

ISSN 1001-9006  
CN 51-1333/TM



2025

第39卷 总第160期

# 東方電氣評論

## DONG FANG DIAN QI PING LUN

- 中国发电设备专业技术期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源
- 《万方数据-数字化期刊群》全文收录
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源
- 《中文科技期刊数据库》(维普网)全文收录
- 《中国期刊全文数据库(CJFD)》全文收录
- 《超星期刊域出版平台》全文收录

ISSN 1001-9006



9 771001 900255

11>

中国东方电气集团有限公司 主办  
四川省动力工程学会

东方电气评论

第三十九卷第六期

二〇二五年十一月

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW



公开 ISSN 1001-9006  
发行 CN 51-1333/TM

第39卷第6期 (总第160期)  
出版日期: 2025年11月25日

国内邮发代号: 62-187  
国内定价: 8.00元

6  
2025

第 39 卷第 6 期 (卷终) 总第 160 期  
(双月刊, 1987 年创刊)

# 东方电气评论



## 目次

### 编辑委员会

主任委员: 胡修奎

副主任委员: 董娜 唐健

委员: 王拯元 艾松 石清华 卢洪 令红兵  
冯涛 刘泰生 刘德民 江国焱 孙奇  
李维成 李婷 李曦滨 杨金炳 邹杰  
宋聚众 陈文学 范小平 周杰 赵永智  
钟连兵 莫尔兵 莫春鸿 铎林 梁权伟  
舒华安 曾明富 谢光有 鄢治国 赖成毅  
雷宇 潘绍成

秘书长: 唐健

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 胡修奎

副主编: 董娜 唐健

本期责任编辑: 李宏

英文编辑: 张媛

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道 18 号

邮编: 611731

电话: 028-87898263

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

投稿网址: <http://dfdqpl.xml-journal.net/>

印刷单位: 成都市新都华兴印务有限公司

国内发行: 四川省报刊发行局

国外发行: 中国出版对外贸易总公司北京 782 信箱

### 基础研究

高 Sn、Sb、Bi 含量钢的电解精炼工艺研究 ..... 雷聪 张程 雷云棣(1)

燃料电池系统在高原高寒地区的运行研究 ..... 唐刚 曹蕾 刘煜等(7)

### 火力发电

热电联产机组运行特性及耦合熔盐储能系统灵活性分析 .....

..... 曾金辉 张雪 潘东晖等(13)

燃气锅炉掺烧炼油厂瓦斯干气的优化改造研究 .....

..... 刘委东 李虎祥 顾宗兴(21)

高速大容量电机的转子屏蔽实现技术 ..... 潘晓杰 冯德洋 陈红(27)

### 水力发电

水泵水轮机自动化元件配置方案概述 ..... 闫浩(31)

灯泡贯流式水轮机转轮室磨蚀修复研究 ... 陈胜 韦天鹏 何小椅等(37)

### 核能发电

核电设备电气贯穿件中国市场竞争现状研究 .....

..... 钟薇 刘南衡 郭运强等(41)

基于转子动力学稳定性的“华龙一号”核能发电机轴承优化探究 .....

..... 官永胜 秦川(47)

“双碳”目标下核电设备产业链的建设路径分析 ..... 刘润智(55)

### 节能环保

污泥湿式氧化处理及资源化研究 ..... 廖勇 万志刚 王智勇等(60)

“双碳”背景下碳捕集技术研究现状及发展 ..... 王小丽 韦耿 刘行磊(68)

面向“双碳”目标的制造企业能源价值链管控与协同服务系统研究 .....

..... 任盼秋 令红兵 黄曦等(76)

### 工程技术

科技情报支撑企业科技创新的实践与探索 .....

..... 令狐文倩 张媛 陈柄元等(84)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM\*1987\*B\*A4\*88\*zh\*p\*¥8.00\*750\*14\*2025-06

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW

6

2025

2025-11-25 Vol. 39 No.6  
(Bimonthly, since 1987)

## CONTENTS



### BASIC RESEARCH

Research on the Electrolytic Refining Process of Indium with High Content of Sn,Sb and Bi ..... *LEI Cong, ZHANG Cheng, LEI Yundi* (1)

Application of Vehicle Fuel Cell System on Power Generation in Plateau and Cold Region ..... *TANG Gang, CAO Lei, LIU Yu, et al* (7)

### THERMAL POWER

Operational Characteristics of Cogeneration Units and Flexibility Analysis of Coupled Molten Salt Energy Storage Systems  
..... *ZEMG Jinhui, ZHANG Xue, PAN Donghui, et al* (13)

Study on Optimization and Transformation of Gas-fired Boilers Co-firing Refinery Dry Gas ..... *LIU Weidong, LI Huxiang, GU Zongxing* (21)

Technology for the Rotor Shielding of High-speed and High-capacity Motors  
..... *PAN Xiaojie, FENG Deyang, CHEN Hong* (27)

### HYDRAULIC POWER

Overview of The Configuration Scheme for Automation Components of Pump Turbine ..... *YAN Hao*(31)

Research on Abrasion Repair of the Runner Chamber in Bulb Tubular Turbine ..... *CHEN Sheng, WEI Tianpeng, HE Xiaoyi, et al* (37)

### NUCLEAR POWER

Research on the Current Competitive Situation of Electrical Penetration Assemblies in the Chinese Nuclear Power Equipment Market  
..... *ZHONG Wei, LIU Nanheng, GUO Yunqiang, et al* (41)

Exploration on Bearing Optimization of HPR1000 Nuclear Energy Generator Based on Rotor Dynamics Stability ..... *GUAN Yongsheng QIN Chuan* (47)

Analysis on the Construction Path of Nuclear Power Equipment Industry Chain under the “Double Carbon” Target ..... *LIU Runzhi* (55)

### ENERGY CONSERVATION & ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research on Wet Air Oxidation Treatment and Resource Utilization of Sludge  
..... *LIAO Yong, WAN Zhigang, WANG Zhiyong, et al* (60)

Research Status and Development of Carbon Capture Technology under the Background of “Carbon Peaking and Carbon Neutrality”  
..... *WANG Xiaoli, WEI Geng, LIU Xinglei* (68)

Energy Value Chain Management and Collaboration Service System Research for Manufacturing Enterprises towards the “Dual Carbon” Goals  
..... *REN Panqiu, LING Hongbing, HUANG Xi, et al* (76)

### ENGINEERING

Practices and Explorations of Science and Technological Information in Supporting Enterprise Technology Innovation  
..... *LINGHU Wenqian, ZHANG Yuan, CHEN Bingyuan, et al* (84)

### EDITORIAL BOARD

**Chairman:** HU Xiukui

**Vice Chairmen:** DONG Na, TANG Jian

**Members:**WANG Zhengyuan, AI Song, SHI Qinghua, LU Hong, LING Hongbing, FENG Tao, LIU Taisheng, LIU Demin, JIANG Guoyan, SUNQi, LI Weicheng, LI Ting, LI Xibin, YANG Jinbing, ZOU Jie, SONG Juzhong, CHEN Wenxue, FAN Xiaoping, ZHOU Jie, ZHAO Yongzhi, ZHONG Lianbing, MO Erbing, MO Chunhong, DUO Lin, LIANG Quanwei, SHU Huaan, ZENG Mingfu, XIE Guangyou, YAN Zhiguo, LAI Chengyi, LEI Yu, PAN Shaosheng

**Chief Secretary:** TANG Jian

**Sponsor:** Dongfang Electric Corporation

**Chief Editor:** HU Xiukui

**Vice Chief Editors:** DONG Na, TANG Jian

**Executive Editor:** LI Hong

**English Editor:** ZHANG Yuan

**Edited and Published by:**

Editorial Department of Dongfang Electric Review  
No. 18 Xi Xin Avenue, Gao Xin Xi District, Chengdu,  
Sichuan, P. R. China

**Postal Code:** 611731

**Tel:** 028-87898263

**E-mail:** dfdqpl@dongfang.com

**Submission Website:** <http://dfdqpl.xml-journal.net/>

**Overseas Distribution by:**

China National Publishing Industry Trading Corporation  
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C. )

# 高 Sn、Sb、Bi 含量铟的电解精炼工艺研究

雷聪 张程 雷云棣

东方电气(乐山)峨半高纯材料有限公司, 四川 夹江 614100

**摘要:**通过对铟在物理方法提纯中剩余的 Sn、Sb、Bi 等元素高的残料作为原料进行电解除杂实验,研究铟电解除杂过程中的影响因素。研究表明,对于杂质元素 Sn、Sb、Bi 等偏高的铟原料,结合电解除杂效果和电解效率等方面的情况,确定铟离子浓度 90 g/L、明胶加入量为 0.6 g/L、电解液循环流量为 200 L/h、电解液 pH 值为 2.0、电解过程中的电流密度为 70 A/m<sup>2</sup> 等工艺参数为最优的电解参数,电解后的铟产物纯度可以达到 99.999 % 以上,质量满足 YS/T 264—2024 标准要求,可以实现物理法提纯铟过程中产生的铟残料回收再利用。

**关键词:**铟;电解精炼;杂质含量;回收再利用

中图分类号:TF804.4

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0001-06

## Research on the Electrolytic Refining Process of Indium with High Content of Sn, Sb and Bi

LEI Cong, ZHANG Cheng, LEI Yundi

(Eastern Electric (Leshan) e half high pure Materials Co., Ltd., 614100, Jiajiang, Sichuan, China)

**Abstract:** Through conducting electrolytic purification experiments using the residual material with high levels of impurities such as Sn, Sb, and Bi left over from the physical purification of indium as raw material, the influencing factors during the electrolytic purification process of indium were studied. The research indicates that for indium raw materials with high levels of impurity elements such as Sn, Sb, and Bi, considering both the effect of electrolytic purification and electrolysis efficiency, the optimal electrolytic parameters are determined as follows: indium ion concentration of 90 g/L, gelatin addition of 0.6 g/L, electrolyte circulation flow rate of 200 L/h, electrolyte pH value of 2.0, and current density during electrolysis of 70 A/m<sup>2</sup>. The purity of the electrolyzed indium product can reach over 99.999 %, and the quality meets the requirements of the YS/T 264—2024 standard, enabling the recycling and reuse of indium residual material generated during the physical purification process of indium.

**Key words:** indium; electrolytic refining; impurity content; recycling and reuse

铟(In)作为一种稀散金属,是一种银白色并略带淡蓝色光泽的金属,具有良好的延展性和可塑性,能与VB族元素形成III-V型化合物<sup>[1-2]</sup>,是半导体、新一代光电显示、新能源、5G通信等新兴领域体现新质生产力的关键材料,是国民经济建设中重要的战略资源。高纯铟主要的提纯方法为物理法与化学法相结合的提纯工艺,物理法主要有真空蒸馏

法、区域熔炼法、直拉法;化学法主要有电解精炼法、熔盐电解精炼法、氯化物法、金属有机法、萃取法等<sup>[3]</sup>。

某高纯铟制备厂以纯度为99.99%的铟为原料,采用物理法制备纯度为99.999%及以上的高纯铟,具体是以真空蒸馏与直拉提纯相结合工艺。但生产中存在以下技术问题:一方面外购

收稿日期:2025-08-07

**作者简介:**雷聪(1984—),男,2007年毕业于四川轻化工大学化学工程与工艺专业,本科,高级工程师。现在东方电气(乐山)峨半高纯材料有限公司从事高纯材料及制备工艺技术研发工作。

99.99% 钢原料中杂质含量不稳定,特别是 Sn、Sb、Bi 这几种元素含量较高,这直接影响了真空蒸馏工序效率及最终产品的质量稳定性;另一方面在真空蒸馏提纯后,由于 Bi 随主体 In 蒸发到低温区而分离,蒸馏锅底残料中的杂质主要是 Sn、Cu、Sb 等,这部分残料中杂质富集严重,难以继续通过物理法回收再利用,往往是将其作为品位较低的粗钢进行低价处理,导致制备纯度为 99.999 9% 及以上高纯钢的成本较高。本文通过开展钢的电解精炼实验,研究电解液成分(钢离子溶度和明胶浓度)、电解工艺参数(如:电解液 pH 值、电解液循环方式、电流密度等)对电解效果的影响,探讨高 Sn、Sb、Bi 钢电解的除杂工艺,获得较优的工艺参数。

## 1 实验

### 1.1 实验目的

通过研究高纯钢电解精炼工艺,对真空蒸馏工艺产生的杂质富集严重的钢残料进行回收利用,实现高纯钢产线闭环与规模化高质量生产。同时对高 Sn、Sb、Bi 的蒸馏钢原料进行电解预处理,使其经过一次蒸馏后纯度达到 99.999 9% 水平,提高产品质量与稳定性,缩短后续提纯工艺周期,提高生产效率,减少能源消耗。

### 1.2 实验原料

本实验采用某厂高纯钢蒸馏过程中产生的纯度约为 99.95% 的钢残料为原料,该原料中的主要杂质元素含量(以下均为质量百分数)见表 1。

表 1 钢原料中各项杂质元素含量

元素	含量/ %	元素	含量/ %	元素	含量/ %
Cu	$7 \times 10^{-4}$	Ni	$5 \times 10^{-4}$	Ca	$5 \times 10^{-5}$
Ag	$5 \times 10^{-4}$	Zn	$5 \times 10^{-4}$	Fe	$5 \times 10^{-4}$
Mg	$5 \times 10^{-5}$	Bi	$13 \times 10^{-4}$	Cd	$5 \times 10^{-4}$
Sb	$27 \times 10^{-4}$	Cr	$2 \times 10^{-4}$	Al	$3 \times 10^{-4}$
Sn	$35 \times 10^{-4}$	As	$2 \times 10^{-4}$	Pb	$5 \times 10^{-4}$

### 1.3 实验原理

电解精炼是以钢原料作为阳极,钛板作为阴极,电解过程中,化学电位比  $\text{In}^{3+}$  高的金属杂质会富集在阳极袋或包裹阳极的滤纸上;电位比  $\text{In}^{3+}$  低的金属杂质留在电解液中,后期通过电解液净化除去,从而实现电解精炼提纯<sup>[4]</sup>。一定条件下,钢在

阳极发生氧化反应生成  $\text{In}^{3+}$  进入溶液,并在电场力作用下由阳极区迁移至阴极区,在阴极析出,钢与 Sb、Bi、Sn 元素的标准电极电位<sup>[5]</sup>(25 °C,在水中)如表 3 所示。其中 Sb、Bi 的标准电极电位与主体钢的差异较大,理论上通过电解精炼可有效降低钢中 Sb、Bi 杂质含量,Sn 元素的标准电极电位与主体钢的较为接近,去除难度较 Sb、Bi 杂质元素大。采用单一变量原则,通过改变电解精炼工艺的参数针对性研究优化去除钢中 Sn、Sb、Bi 等杂质元素。

表 2 Sn、Sb、Bi 等杂质电极反应表

阳极反应	阴极反应	$e^0$ (V)
$\text{In}-3e \rightarrow \text{In}^{3+}$	$\text{In}^{3+} + 3e \rightarrow \text{In}$	-0.33
$\text{Sn}-2e \rightarrow \text{Sn}^{2+}$	$\text{Sn}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Sn}$	-0.13
$\text{Sb}-2e \rightarrow \text{Sb}^{3+}$	$\text{Sb}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Sb}$	0.10
$\text{Bi}-3e \rightarrow \text{Bi}^{3+}$	$\text{Bi}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Bi}$	-0.95
$\text{Pb}-2e \rightarrow \text{Pb}^{2+}$	$\text{Pb}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Pb}$	-0.126

### 1.4 主要材料及设备

原料:99.95% 的钢。

设备:自制电解槽装置(含电解控制系统)、计量泵、电子天平、万用表。

辅材:阴极板(TA2)、导电条(TA2)、铸阳极模具(TA2)、阳极袋(PE)、石英容器、四氟管、耐酸碱手套。

检测设备:辉光放电质谱仪(GDMS)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)。

### 1.5 电解液成分的确定

钢的电解液成分主要以电解液体系、钢离子浓度、氯化钠以及明胶。钢的电解液主要有  $\text{InCl}_2$  和  $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$  体系。氯化盐体系的导电性能好,但存在腐蚀性,会使钢中的杂质溶解较多,如 Pb 元素,因为 Pb 会与氯化物反应形成  $\text{PbCl}_2$ ,从而溶于电解液中,导致钢电解液中的 Pb 杂质含量高。硫酸盐体系可以避免以上问题,因此本研究采用的是  $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$  体系。电解液采用  $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3-\text{H}_2\text{SO}_4$  体系,并加入 NaCl 作为支持电解质,加入明胶作为添加剂<sup>[6]</sup>。以纯度为 99.95% 的钢作为阳极,纯钛作为阴极进行电解精炼。在阳极钢失去电子以钢离子进入电解液中,在阴极钢离子得到电子在阴极板上沉积。

电解液中钢离子浓度是影响电解效率的重要

指标。阴离子浓度过低,会使阴极钢析出量少,降低提纯效率,同时导致电解液中电极电位较正的Sn、Sb、Cu等杂质离子容易在阴极析出,从而是电解产物中杂质含量偏高;钢离子浓度过高,会导致钢离子来不及电解,而直接吸附在阴极上,从而降低阴极的导电性,造成钢电解产物分布不均,影响电解效率<sup>[6]</sup>。

硫酸钢电解液存在导电性较差的缺点,需要加入导电性好的氯化物来提高电解液导电性,氯化物主要以氯化钠为主,作用在于降低电解液的槽电压,同时也起到阻止阳极钝化的作用。

钢的电解提纯过程中还会存在阴极表面“长刺”过长而与其他导电物质相接触,从而造成短路。电解液中需要加入表面活性好的物质(如明胶)来抑制抑制阳极上活性区域的产生及发展,最终得到阴极表面均匀的电解钢产物。

综上,实验选用的钢电解液为配置好的  $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3-\text{H}_2\text{SO}_4$  体系电解液,电解液的初步配方见表3。

表3  $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3-\text{H}_2\text{SO}_4$  体系电解液初步配方表

名称	单槽容积 (L)	$\text{In}^{3+}$ (g/L)	NaCl (g/L)	明胶 (g/L)	pH 值
含量	80	85~100	70~80	0.6~0.8	1.8~2.2
纯度	—	In99.999%	分析纯	分析纯	—

### 1.6 实验操作流程

(1)实验前,先在阳极模具内铸好钢阳极锭,再用滤纸包裹好阳极锭,套上阳极袋,最后在一侧阳极耳上套上绝缘套备用。

(2)在阴极钛板的极耳装上铜螺帽,将备好的钢阳极与钛阴极板放置在电极条上,阳极接触负极极耳与阴极板接触正积极耳处使用绝缘管隔离,控制阴阳极极间距。

(3)打开电解电源,调整电解电流,用万用表测量阴极板与阳极之间的电压,确保槽压在工艺控制范围;再打开计量泵,电解液按照设定流量进行循环。

(4)控制好电解参数连续运行7天后,停止电解,进行出槽操作,对阴极片进行清洗、干燥、称量记录并采样。

(5)对电解后的钢料样品采用辉光放电质谱仪

(GDMS)进行杂质元素含量分析,其中杂质元素指标参照YS/T 264—2024标准中99.999%高纯钢杂质含量要求,并对实验现象和数据记录。

## 2 结果与讨论

在恒定电解液体系、电解投料量、电解液温度、极间距、电解周期的条件下,对不同条件下的电解除杂效果进行实验及讨论,研究钢离子溶度、明胶的加入量、电解液pH值控制、电解液循环、电流密度等对高Sn、Sb、Bi钢中的杂质元素去除效果的影响,确定效果最优的电解参数。

### 2.1 钢离子浓度对电解效果的影响

钢电解液中的电流效率随钢离子的浓度增大而增大,随着钢离子浓度增大,溶液中可迁移的离子数增多,导电率升高,使得电流效率提高;但当钢离子的浓度过高时,电解液的密度和黏度增加,溶液中离子迁移受阻,使得导电率降低,电流效率提升减缓,同时还会使电解液中阳极泥及其他杂质颗粒沉降速度减慢,吸附到阴极表面,影响电解钢的质量。

在电解温度、电流密度以及槽电压恒定条件下, $\text{In}^{3+}$ 的含量对钢中Sn、Pb、Fe、Cu杂质元素去除效果的影响结果如图1。

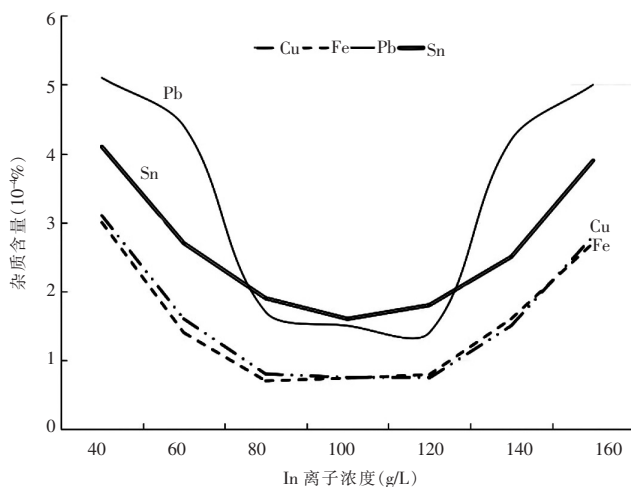


图1 25 °C下不同的  $\text{In}^{3+}$  浓度电解产物中的杂质含量

从图1中可知,钢离子的含量在80~120 g/L之间时,钢中Sn、Pb、Fe、Cu杂质含量处于最低水平。在钢离子浓度80~120 g/L范围内开展实验,不同钢离子浓度下的钢电解产物杂质含量如表4。

表4 不同钢离子浓度下的钢电解产物杂质含量表

钢离子浓度 (g/L)	主要杂质含量(%)						
	Sn	Sb	Cu	Bi	Pb	Ni	Fe
80	$8 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
90	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
100	$2 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$
110	$3 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
120	$3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$

由表4可以看出,当钢离子浓度为90 g/L时,其电解钢产物中的Sn、Bi、Sb、Pb、Fe、Cu含量低,特别是对除钢中的Sn、Bi、Sb几种杂质去除效果较为明显,Sn含量从 $35 \times 10^{-4}\%$ 降低至 $5 \times 10^{-5}\%$ 。综上所述,电解时钢离子的浓度选择90 g/L,此浓度下对钢中Sn、Bi、Sb杂质含量高的钢电解效果最佳。

## 2.2 明胶对电解效果的影响

在钢的电解精炼中,添加剂明胶对钢的质量的影响比较大。明胶的作用在于避免阳极钝化,改善阴极沉积物电结晶结构,并限制钢粒子的生成,得到表面光滑有金属光泽的钢。实验中加入不同明胶量时的钢电解产物杂质含量及现象对比情况如表5。

表5 不同明胶量时的钢电解产物杂质含量及现象

明胶含量(g/L)	主要杂质含量(%)			电解产物铸锭后 残渣量占比(%)	现象
	Sn	Sb	Bi		
0	$8 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	0.7	阴极片“长刺”严重,如图2
0.2	$7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	1	阴极片表面粗糙、疏松
0.4	$7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	1.05	阴极片表面粗糙
0.6	$5 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	1.1	表面光滑、致密、有金属光泽,如图3
0.8	$6 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	1.5	表面光滑、致密、局部发黑

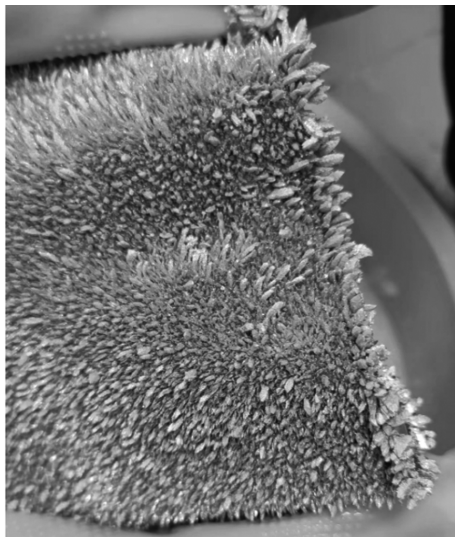


图2 电解钢片(未加明胶)

从表5的检测结果和现象可以得出,钢电解液中明胶的加入量对钢电解产物中的Sn、Bi、Sb杂质的去除效果影响不大,但要影响钢电解的正常运行、电解钢片的外观质量和钢的损耗。综上,钢电解液中明胶的加入量为0.6 g/L时钢电解效果

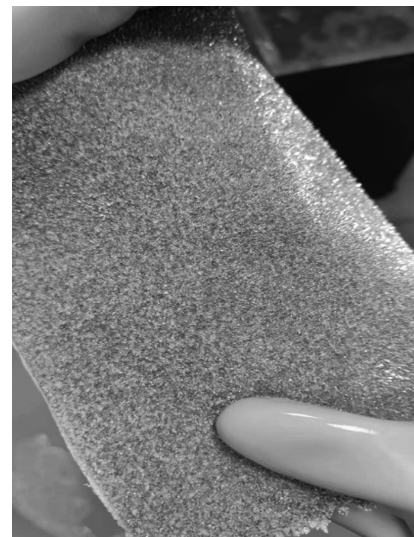


图3 电解钢片(明胶浓度0.6 g/L)

最佳。

## 2.3 电解液pH值对电解效果的影响

电解液的pH值直接影响阴极的质量及电流效率,当pH值较低时,在阴极氢的放电现象较严重,此时得到的产品钢受气泡的影响成为疏松的海绵

钢或出现“鼓包”现象,其吸附能力较强,能吸附电解液中的不溶性物质如阳极泥等;同时又会增大电位比钢高的杂质元素的化学溶解能力,杂质溶入电解液污染阴极;当 pH 值过高,由于硫酸钢水解得到白色的氢氧化钢絮状沉淀<sup>[7]</sup>,如反应方程式①,同

时使得 Sn、Pb 及 Bi 等杂质与钢一起水解沉淀,杂质通过沉淀吸附而污染阴极。电解液 pH 值对电解效果的影响情况如表 6。

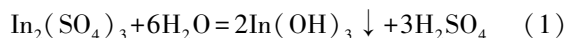


表 6 电解液 pH 值对电解效果的影响

pH 值	主要杂质含量(%)			钢损耗量 占比(%)	现象
	Sn	Sb	Bi		
1.0	$18 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	1.1	阴极处有大量气泡产生,同时出现疏松的海绵钢
1.5	$6 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	0.9	有气泡产生,阴极板结料疏松,易脱落
2.0	$5 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	0.5	电解正常,阴极板结料致密
2.5	$6 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	0.4	电解液变浑浊,有絮状白色物质产生

从表 6 可以看出,在电解过程中电解液的 pH 值为 2.0 时,阴极的 Sn 中杂质含量最低,电解产物外观形态也正常。在钢的电解过程中,不管 pH 值过高或过低都会使产品质量下降。同时在  $\text{H}_2\text{SO}_4$  体系中,pH 值过高电解液会开始变浑浊,同时会有少量气泡产生;而过低会在阴极发生析氢效应,有气泡产生,阴极电解产物也比较疏松易脱落。这种现象的出现,影响钢电解的质量,为了尽量减少钝化作用和析氢效应,实验表明,对于钢中

杂质 Sn 含量高的电解,控制电解液的 pH 值在 2.0 为适宜。

#### 2.4 电解液循环流量对电解效果的影响

钢的电解精炼是采用可溶性阳极,钢离子由阳极表面不断溶解进入电解液,最后到达阴极表面发生电化学还原反应。电解时,阴极附近的钢离子会不断被还原沉积,导致阴极附近钢离子浓度逐渐降低。电解过程中,电解周期内电解液循环流量对电解效果的影响情况如表 7。

表 7 钢电解液循环流量对电解效果影响情况

流量(L/h)	主要杂质含量(%)			电解钢产出和原料 投入比(%)	现象
	Sn	Sb	Bi		
0	$13 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	44	阴极板上的电解产物厚薄不均
100	$8 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	60	阴极结料不致密,电解后期易脱落
200	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	58	无现象
300	$7 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	45	无现象

从表 7 中的不同流量下的对比实验可以看出,电解液不循环时,会出现阴极附近钢离子浓度过低,导致阴极板上的电解产物厚薄不均匀的情况。通过对电解液循环,可以将阳极附近的钢离子及时输送到阴极附近,维持整个电解槽内钢离子浓度的相对稳定,保证产品质量的稳定性,且对于钢中含量较高且电极电位与钢存在差异的 Sn、Sb、Bi 等元素,避免了杂质离子在阴阳极附近富集而导致电解产物中杂质元素偏高的情况;同时,电解液的循环还有利于提高电解钢产出和原料投入比,从而提高电解效率。综上所述,钢电解过程中电解液的循环流量控制在 200 L/h 较为合适。

#### 2.5 电流密度对电解效果的影响

钢电解中提高电流密度,对电极电位较正的金属杂质析出的可能性较大,也可以引起电解液中酸的挥发,导致钢中杂质含量增高<sup>[8]</sup>。当电流密度低于  $35 \text{ A/m}^2$  时,电解效率较低,即阴极收集到的钢产物较少。在相同原料和相同投料量下,电流密度对钢电解效果的影响见表 8。

从表 8 的不同电流密度下对比实验来看,对于高 Sn、Sb 和 Bi 杂质的钢原料,当电流密度在  $65 \sim 70 \text{ A/m}^2$  时,钢电解提纯效果较好,杂质元素含量稳定且小于  $1 \times 10^{-4} \%$ ,且电解产物量较高,单轮电解钢产出和原料投入比达到了 58% 以上。

表8 电流密度对电解效果的影响

电流密度 (A/m <sup>2</sup> )	主要杂质含量(%)			电解产物 量(kg)
	Sn	Sb	Bi	
45	6×10 <sup>-5</sup>	5×10 <sup>-5</sup>	4×10 <sup>-5</sup>	6.02
55	5×10 <sup>-5</sup>	6×10 <sup>-5</sup>	5×10 <sup>-5</sup>	12.3
65	4×10 <sup>-5</sup>	5×10 <sup>-5</sup>	4×10 <sup>-5</sup>	14.72
70	6×10 <sup>-5</sup>	5×10 <sup>-5</sup>	4×10 <sup>-5</sup>	15.16
75	2×10 <sup>-5</sup>	9×10 <sup>-5</sup>	8×10 <sup>-5</sup>	17.18

## 2.6 钢最优电解条件实验验证

根据以上各因素对钢电解后杂质含量的影响分析,最优的电解参数如表9所示。在相同投料量、电解周期和电解温度的条件下,开展了最优条件下的实验验证,实验结果如表10。

表9 最优电解参数表

名称	In <sup>3+</sup> 溶度 (g/L)	明胶量 (g/L)	pH值	循环流量 (L/h)	电流密度 (A/m <sup>2</sup> )
参数值	90	0.6	2.0	200	70

表10 最优参数下电解钢产物中各项杂质元素含量

元素	含量/%	元素	含量/%	元素	含量/%
Cu	2×10 <sup>-5</sup>	Ni	5×10 <sup>-5</sup>	Ca	6×10 <sup>-6</sup>
Ag	3×10 <sup>-6</sup>	Zn	5×10 <sup>-6</sup>	Fe	5×10 <sup>-6</sup>
Mg	2×10 <sup>-6</sup>	Bi	2×10 <sup>-5</sup>	Cd	7×10 <sup>-6</sup>
Sb	5×10 <sup>-5</sup>	Cr	8×10 <sup>-6</sup>	Al	7×10 <sup>-6</sup>
Sn	6×10 <sup>-5</sup>	As	6×10 <sup>-6</sup>	Pb	5×10 <sup>-6</sup>

从表10可知,最优参数下,电解钢产物中的杂质含量经检测后满足YS/T 264—2024标准要求,纯度能达到99.999%以上。本研究可以降低高纯钢在物理方法提纯中剩余的Sb、Bi、Sn等元素高的残料,实验结果可以表明电解精炼工艺可以回收钢残料从而获得高纯度钢产品,实现高杂质含量钢的回收再利用。

## 3 结论

采用高纯钢在物理方法提纯中产生的高Sn、Sb、Bi含量残料作为原料进行电解除杂实验,研究钢电解除杂过程中高效分离Sn、Sb、Bi的影响因子。通过实验,从电解液中钢离子的溶度、明胶含量、pH值、电解液循环流量和电解过程中的电流密度等几方面开展实验研究,已确定最优的电解参数。从实验结果来看,对于杂质元素Sn、Sb、Bi等偏高的钢原料,结合电解除杂效果和电解效率等几方面情况,得出钢离子浓度90 g/L、明胶加入量0.6 g/L、电解液循环流量200 L/h、电解液pH值2.0、电解过程中的电流密度70 A/m<sup>2</sup>等工艺参数为最优的电解参数,电解后的钢纯度可以达到99.999%以上,质量满足YS/T 264—2024标准要求,可以实现物理法提纯钢过程中产生的钢残料回收再利用。

## 参考文献:

- [1] 刘世友. 钢工业资源、应用现状与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 1999(2): 30-32
- [2] 周令治. 稀散金属手册[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993
- [3] 李建敏, 刘晓红, 王贺云, 等. 钢的市场应用及其提取技术[J]. 江西冶金, 2026(1): 41-43
- [4] 周智华, 曾冬铭, 舒万良, 等. 钢电解精炼中添加剂明胶的影响及其机制研究[J]. 稀有金属, 2003(3): 406-409
- [5] 卢兴伟, 彭巨擘, 伍美珍. 电解精炼法制备高纯钢[J]. 矿冶, 2018, 27(6): 54-57
- [6] 于丽敏, 蒋文全, 傅钟臻, 等. 钢电解精炼提纯方法的研究[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 6-19
- [7] 魏昶, 罗天骄. 真空法从粗钢中脱出镉锌铋铊铅的研究[J]. 稀有金属, 2003(6): 852-856
- [8] 袁铁锤, 周科朝, 陈志飞, 等. 熔盐净化-电解法制备高纯钢[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2007(1): 59-62

# 燃料电池系统在高原高寒地区的运行研究

唐刚<sup>1,2</sup> 曹蕾<sup>1,2</sup> 刘煜<sup>1,2</sup> 胡军<sup>1,2</sup>

1. 东方电气(成都)氢能科技有限公司, 成都 611731; 2. 氢电转换四川省重点实验室, 成都 611731

**摘要:**随着燃料电池系统技术不断成熟,零部件供应链日趋完善,系统在商用车领域得到广泛应用,为了适应更多应用场景,对其环境适应性的要求也越来越高。现阶段燃料电池系统大部分应用在海拔2 000 m以下,高原高寒场景的应用案例较少,为了明确燃料电池系统在高原高寒环境中的应用条件,本文从系统零部件、性能、可靠性方面进行分析,并提出相应设计方案,为高原高寒地区燃料电池系统在交通领域、发电领域应用提供重要依据。

**关键词:**燃料电池;零部件;高原高寒;性能影响

中图分类号:TM911.4

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0007-06

## Application of Vehicle Fuel Cell System on Power Generation in Plateau and Cold Region

TANG Gang<sup>1,2</sup>, CAO Lei<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1,2</sup>, HU Jun<sup>1,2</sup>

(1. Dongfang Electric( Chengdu) Hydrogen Technology Company, Ltd. , 611731, Chengdu, China;

2. Hydrogen Electricity Interconversion Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** As the fuel cell system technology continues to mature, the parts supply chain is becoming more and more perfect, the system has been widely used in the field of commercial vehicles, in order to adapt to more application scenarios, the requirements for its environmental adaptability are becoming higher and higher. At present, most of the fuel cell system is applied below the altitude of 2000m, and there are few application cases in the high-cold plateau environment. In order to clarify the application conditions of the fuel cell system in the high-cold plateau environment, this paper analyzes the components, performance and reliability of the system, and propose the corresponding design scheme. It provides an important basis for the application of fuel cell system in the field of transportation and power generation.

**Key words:** fuel cell system; parts and components; plateau high cold; impact on performance

由于地理环境原因,在高原高寒环境下架设供电线路十分困难,部分地区的供电电压不稳定<sup>[1]</sup>,偏远地区的供暖和供氧资源相对匮乏,急需一种综合能源解决方案。随着氢燃料电池系统技术不断成熟,可以解决高原高寒地区电源供电、房屋供暖、供氧的需求。由于高原高寒地区往往太阳能、风能资源丰富,但此类资源具有季节性、时间性等特点。对此,可通过风光资源在丰富的时段开展供电,富余的电能用于电解水制氢产生氢气,氢气通过高压

气瓶或其他储氢材料存储,在特定季节或时间段、电能不足的情况下通过燃料电池发电的方式,解决电网供电不稳定问题,同时燃料电池发电产生的余热可以用于房屋供暖,制氢产生的氧气可以用于当地居民使用,其应用场景可以实现能源闭环。

高原环境中含氧量降低,大气压力也降低,高原气候干燥、昼夜温差大,燃料电池水平衡<sup>[2]</sup>相对对应常温常压下有了较大变化。为满足高原高寒地区燃料电池应用需求,本文将从系统零部件、性能、

收稿日期:2024-12-27

**作者简介:**唐刚(1987—),男,2014年毕业于成都电子科技大学控制理论与控制工程专业,硕士,工程师。现在东方电气(成都)氢能科技有限公司产品开发部主要从事控制与软件开发工作。

可靠性方面进行分析。首先,针对系统零部件进行高原高寒环境离线测试,保证零部件可靠性;其次,保持燃料电池系统操作参数不变,在环境模拟舱中测试燃料电池系统性能,得到高原高寒环境中系统运行工作点;最后,选择系统常用工况点在高原高寒环境模拟舱中开展加速耐久试验,测试系统连续运行可靠性。通过验证系统在高原高寒场景下的可行性,缩短开发时间、节约开发成本,系统可靠性、耐久性得到有效保证。

## 1 高原高寒地区零部件分析

### 1.1 零部件高原高寒可靠性分析

高原环境中,系统电气零部件绝缘性能下降,高压零部件爬电距离<sup>[3]</sup>缩短,系统存在绝缘等风险。为快速验证零部件可靠性,将零部件集成到系统上进行整体测试,如图1所示零部件集成框图。现阶段大部分零部件厂家已完成海拔4000 m测试,确认控制器、CVM电压采集器、节温器、传感器、节气门、比例阀等低压零部件可以在高海拔地区运行;氢泵、水泵、PTC、空压机等高压零部件,厂家反馈电气设计满足高原环境爬电距离要求,但缺乏高原下运行的数据。空压机在高原下空气稀薄,气浮轴承存在冷却气不够,轴承过热的风险;多合一DCDC在高海拔下发电运行,需要按照海拔高度降额运行,如图2所示高原下DCDC母线电压降额电压曲线。同时,在高原下昼夜温差增大,系统紧固件松动、结构密封件蠕变,存在氢气泄漏风险。因此,将零部件集成后放置在低气压、昼夜温差变化的环境舱中,开展系统集成测试,经过14天循环不间断测试,验证系统零部件在高原高寒环境下的可靠性。

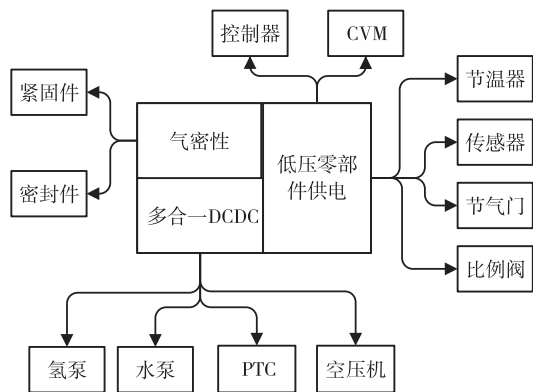


图1 零部件集成框图

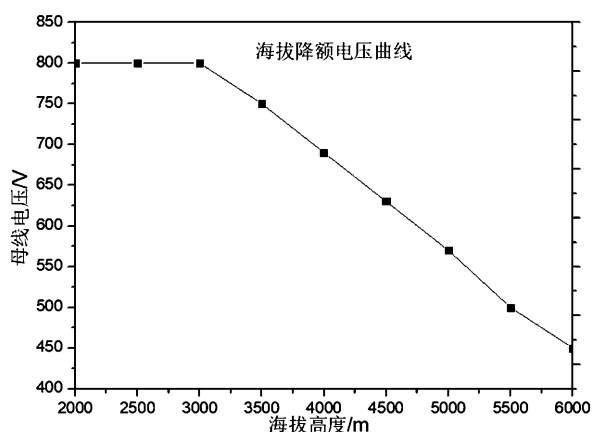


图2 高原DCDC母线电压降额曲线

### 1.2 零部件高原高寒试验

为了应对零部件在高原高寒地区的运行风险,开展海拔4500 m,年平均大气压57 kPa条件下高原<sup>[4]</sup>高寒试验,该海拔覆盖了大部分的应用场景,将零部件集成系统放入环境舱中开展试验,经过14天不间断循环测试,实际运行情况如图3所示。

图3(A)中将环境舱的大气压力设定为57 kPa,实际压力偏差 $\pm 1$  kPa以内,环境舱的气密性正常,满足高原模拟低气压的要求。图3(B)中控制环境舱内温度,温度从白天20℃到夜间-30℃变化,模拟昼夜温差大的实际环境温度变化,环境舱大气温度设定为夜间10点从10℃逐渐下降到凌晨4点的-30℃,然后从-30℃逐渐上升到上午10点的10℃,上午10点从10℃逐渐升高到下午4点的20℃,最后从20℃逐渐降低到夜间10点的10℃,完成一个温度循环的试验,由于运行数据较多,每天抽取3个点进行记录。图3(C)中设定空压机两个固定转速65000 r/min、90000 r/min,验证空压机在高原高寒地区运行可靠性,空压机实际转速稳定,没有故障发生。图3(D)为空压机运行时,直流母线电流随温度变化情况,在环境舱内大气温度、大气压力、空压机转速不变时,空压机电流稳定不变;当温度按照设定值变化时,温度越低,同样的转速下,空压机电流越大;温度越高,同样的转速下,空压机电流越小;这是因为温度低空气密度高,空压机旋转一周压缩的空气量大,空气质量流量增大,流体输送载荷增大,导致空压机电流增大、功耗增加;同理,温度高空气密度低,空压机旋转一周压缩的空气量少,空气质量流量减小,流体输送载荷减小,导致空压机电流减小、功耗减小<sup>[5]</sup>。

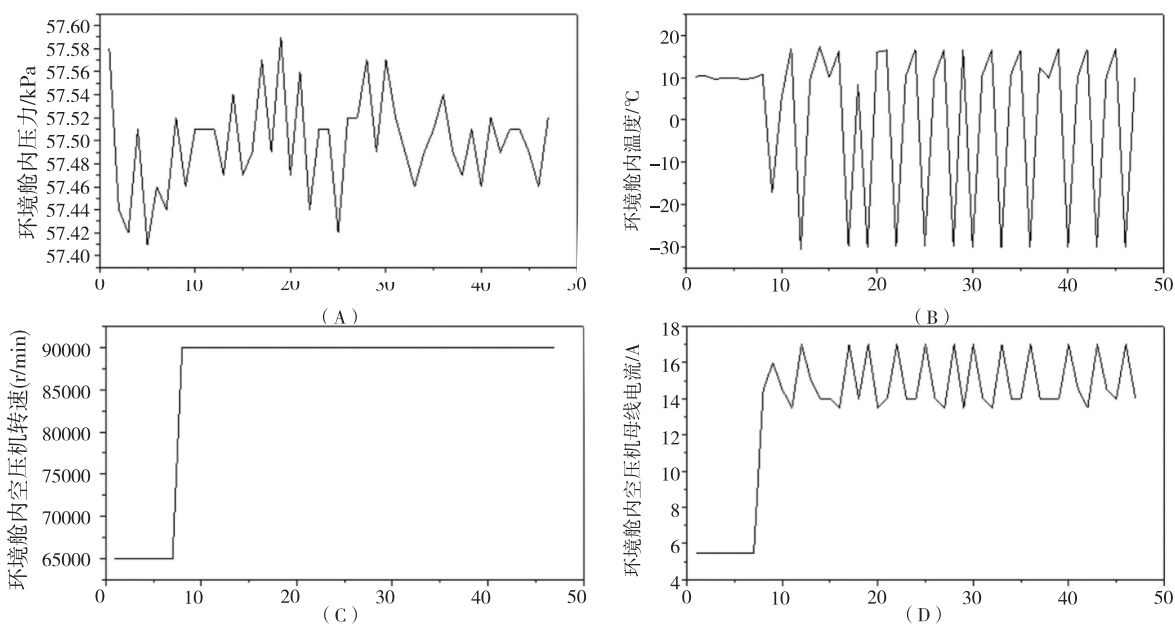


图3 高原高寒环境舱零部件试验

零部件集成系统在环境舱中经过连续14天高原高寒试验,每天一次循环工况,系统的零部件正常工作,电流大小随温度变化周期变化;热管理回路液位没有下降,表明冷却系统管路卡箍没有松动,电堆内部密封件没有失效,系统气密性良好;高压部件正常工作,绝缘值没有降低,表明零部件在高原高寒环境下运行时,高压部件的爬电距离满足高原设计要求;温度、压力等传感器数据正常,其他零部件无故障发生,试验表明燃料电池系统零部件满足高原高寒地区使用条件。

## 2 高原高寒地区系统性能分析

### 2.1 燃料电池系统操作参数影响

燃料电池系统性能受到空气计量比、氢气计量比、空气压力、氢气压力、运行温度等多个参数影响,参数间耦合性强,为保证系统可靠性及寿命,将系统放置到高原高寒环境舱中开展性能测试,得到燃料电池系统在高原高寒环境中的零部件功耗、系统输出性能,确定在高原高寒环境中的系统工作点。

现阶段燃料电池系统在平原环境下通过大量的稳态试验、加速试验、耐久试验标定好了一组稳态参数,在标定好的参数下运行,系统性能、耐久性经过了充分的验证。由于系统操作参数的耦合性强,部分参数改变将导致电堆内水平衡的重新分布,系统的性能及耐久影响将无法快速全面评测。

高原环境下,对燃料电池系统影响最大的操作参数是电堆阴极压力和空气计量比<sup>[6]</sup>,常规的做法是降低电堆阴极操作压力,使用同样的表压作为电堆阴极操作压力,即在常压101 kPa下,电堆阴极压力设定为表压50 kPa,则电堆阴极操作压力绝压为151 kPa,空压机压比为1.495;如果在高原4 500 m下,大气压力为57 kPa,电堆阴极压力设定为表压50 kPa,则电堆阴极操作压力绝压为107 kPa,空压机的压比为1.877,压比变化不大,空压机自身损耗变化不大。为了保持电堆的操作压力绝压不变,在大气压力57 kPa,保持电堆阴极操作绝压151 kPa,空压机的压比为2.65,压比显著增大,空压机的自身功耗将增大,系统效率会降低。另一方面,电堆性能随着阴极操作压力减小而降低,系统性能理论会下降15 mV<sup>[7]</sup>,系统的水平衡发生变化,系统的耐久性无法有效评估,重新根据新的操作参数做稳态试验、耐久试验,将花费大量的测试时间和研发费用,开发周期将大大延长。

### 2.2 燃料电池系统性能分析

#### 2.2.1 燃料电池系统零部件功耗分析

为了将燃料电池系统应用到高原高寒地区,缩短开发周期,节约开发成本,保证系统寿命及可靠性;采用平原常压下的系统操作参数,通过高海拔试验,验证系统在高原环境下的运行区间,根据车用功率、发电功率需求调度最优工作点。高原环境

下,空压机性能影响最大,为了保证电堆阴极操作压力、空气计量比的要求,当空压机达到额定转速时系统输出最大功率。将环境舱海拔设定4 500 m,温度设定12 ℃,观察系统在不同运行电流密度下空压机转速和空压机功率。

图4中燃料电池系统保持平原运行操作参数不变,工作在同样电流密度下,高原环境中空压机转速明显提高,在电流密度为1.0 A/cm<sup>2</sup>时空压机转速到达额定值95 000 r/min,燃料电池输出功率受到较大限制,无法满功率输出。平原地区燃料电池系统可以工作在2.0 A/cm<sup>2</sup>及以上电流密度下,系统输出功率可以满足更大负载需求。由图5可知,工作在同样电流密度下,空压机的功耗相应增加,系统效率降低,在电流密度为1.0 A/cm<sup>2</sup>时空压机功耗增加4.2 kW,净输出功率下降值主要来自空压机功耗的增加。

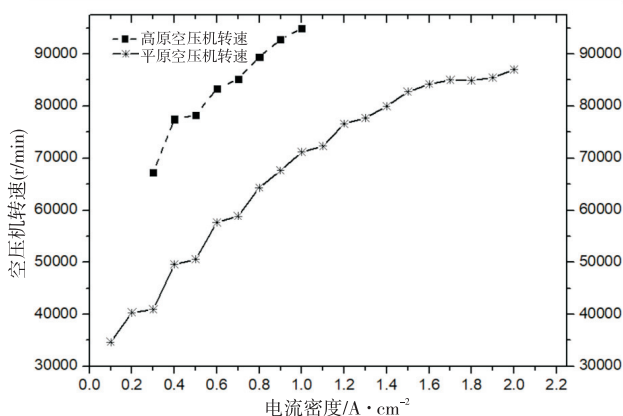


图4 电流密度与空压机转速关系图

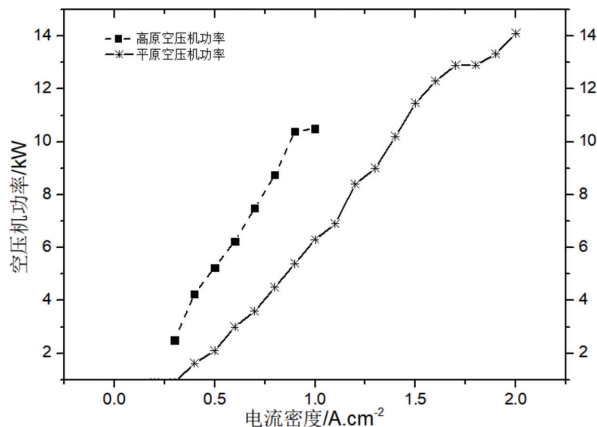


图5 电流密度与空压机功率关系图

### 2.2.2 燃料电池系统性能分析

在海拔4 500 m环境下,燃料电池系统的运行操作参数不变,图6中电堆电流密度逐渐从0.3 A/cm<sup>2</sup>升高到1 A/cm<sup>2</sup>开展性能测试,平原绝压节电压表示常压下的系统操作参数,该电堆平均节电压作为系统输出基准点。高原绝压节电压表示高原低气压情况下,保持电堆阴极压力绝压和计量比参数不变,电堆平均节电压和常压下的电堆平均节电压基本一致,表明操作参数不变的情况下,系统水平衡不变,性能保持不变。高原表压节电压表示在高原情况下运行,电堆阴极压力绝压发生变化,空气计量比不变,具体描述参照2.1节,其他操作参数不变,电堆平均节电压降低约15 mV。按照1 A/cm<sup>2</sup>电密计算,平均节电压降低15 mV,参照100 kW等级电堆,系统输出降低约1~2 kW,具体输出见表1所示。采用高原绝压操作参数,虽然净输出功率

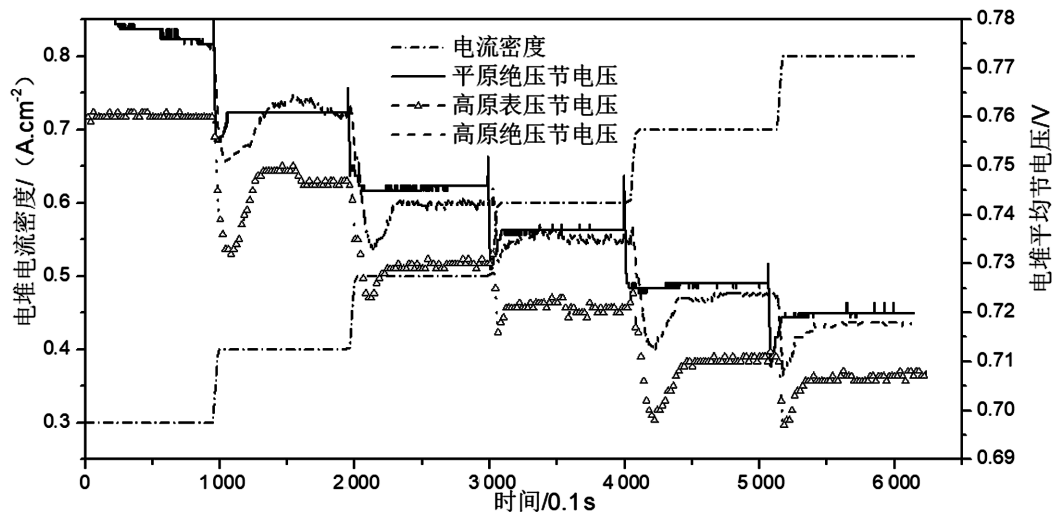


图6 电堆电流密度与电堆平均节电压关系图

相比高原表压操作参数性能下降约 2 kW,但是系统可靠性、耐久性得到保证,从长远运行考虑,选择高原绝压操作参数,即保持燃料电池系统运行操作参数不变更加有利于燃料电池系统长时可靠运行。

表 1 系统输出性能对比

项次	空压机功耗	平均节电压	系统输出 (相对平原)
平原绝压 (1 A/cm <sup>2</sup> 电密)	不变	不变	不变
高原绝压 (1 A/cm <sup>2</sup> 电密)	增加 4.2 kW	不变	降低 4.2 kW
高原表压 (1 A/cm <sup>2</sup> 电密)	不变	降低 15 mV	降低 1~2 kW

### 2.3 燃料电池系统高原高寒耐久分析

#### 2.3.1 燃料电池系统可靠性设计

燃料电池系统经过多年的技术积累,已经形成完备的开发流程,在 IP67 防水防尘方面,系统开展零部件、电气接插件、结构件防水、防尘离线测试;系统振动方面,形成结构设计、仿真、试验三个开发阶段,搭建了完善的产品结构可靠性迭代优化设计开发流程;高寒地区低温启动方面,建立了电堆含水量与环境条件的关联模型,研究了冷机启动时燃料电池系统加载与升温控制策略、停机时吹扫排水策略;电磁抗干扰方面,对零部件厂家进行 EMC 设计要求,让零部件满足抗干扰能力,对系统电气原理进行理论分析,形成电磁兼容正向开发设计。通过对系统主要功能进行详细设计,保证了系统运行可靠性。

#### 2.3.2 燃料电池系统高原可靠性分析

燃料电池系统通过完善的开发流程保证了系统使用可靠性,已经批量在市场上应用,为了让燃料电池系统更好的适应高原高寒地区工作环境,将系统放置在低温高海拔环境舱中进行性能耐久测试,验证系统在高原高寒环境中持续运行可靠性,具体测试工况如下:

图 7 中,系统每个周期运行 30 min,白天开展循环周期发电测试,每个周期内电流密度从 0.2 A/cm<sup>2</sup> 到 0.8 A/cm<sup>2</sup> 交替运行,验证系统零部件在高原环境中的动态响应特性及部件的可靠性,通过多个循环周期的测试,可以验证系统性能的衰减特

性。夜间开展-30℃冷冻试验如图 8 所示,环境舱温度设定值逐渐降低到-30℃,从开始冷冻到结束持续时间 10 h,模拟高原夜间温度降低的过程,燃料电池防冻液的温度也逐渐降低,整个系统的温度也跟着降低。燃料电池系统在白天第一次启动会经历低温启动过程,验证系统低温启动性能及燃料电池低温启动控制策略<sup>[8]</sup>,同时验证零部件在低温下的可靠性,以及多次低温启动运行后系统的气密性。系统在白天开展耐久加速循环测试,夜间开展低温冷冻试验的验证,可以全工况验证燃料电池系统在高原高寒地区的运行特性及零部件运行可靠性。

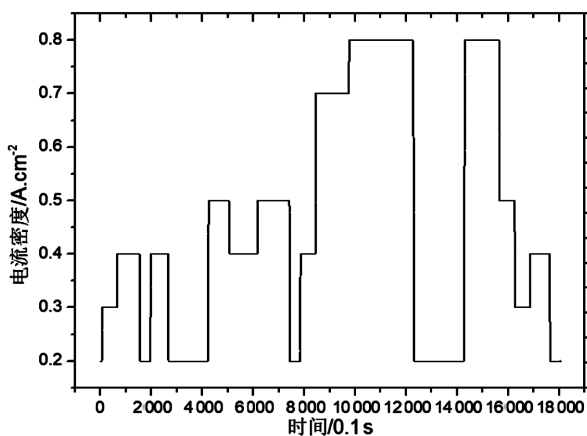


图 7 系统电流周期测试曲线

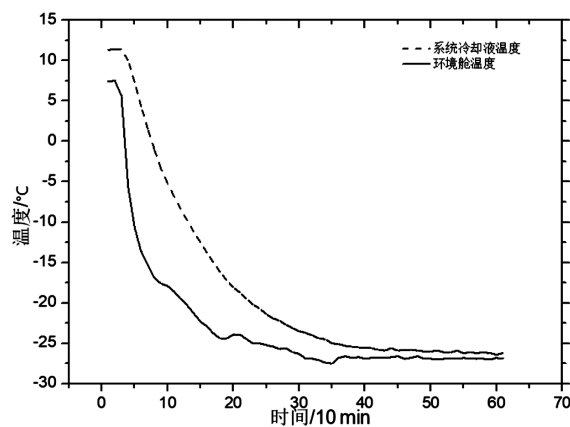


图 8 环境舱温度控制曲线

经过连续 7 天的耐久测试,燃料电池系统在高原高寒环境中正常运行,经过多次低温存储、低温启动、循环测试,环境舱内没有氢浓度报警,燃料电池系统气密性合格;运行中没有发生系统零部件故障、系统通讯故障,燃料电池零部件可靠性合格;白天多次循环测试,系统没有发生故障,性能如同 9 所

示,连续7天运行前后性能对比,燃料电池平均节电压没有发生明显变化,系统耐久性测试合格;试验表明平原下燃料电池系统可以直接应用于高原高寒地区使用。

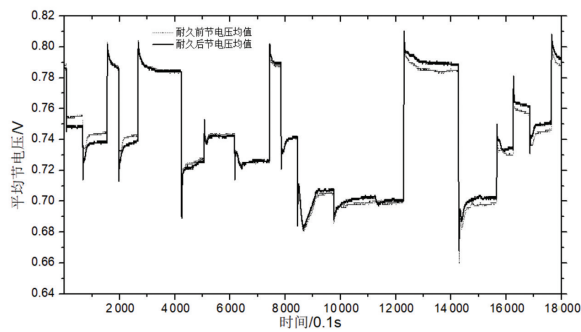


图9 燃料电池系统性能曲线

### 3 结语

本文首先分析了高原高寒环境中燃料电池系统零部件运行风险,并针对零部件潜在风险开展试验,确定燃料电池零部件可以在高原高寒环境中使用。其次,保持燃料电池系统在平原下运行参数不变,高原下空压机的转速和功耗增加,系统输出受限,净输出功率减少,通过试验确定了高原高寒环境下系统运行工作点。最后,在环境舱中开展高原高寒耐久试验,系统经过低温存储、低温启动、循环测试,系统零部件正常运行,电堆输出性能没有衰减,保证了系统的可靠性、耐久性。通过对系统零

部件测试、性能测试、耐久测试,验证了燃料电池系统环境适应性,确定该设计方案可以满足不同场景的应用需求,缩短开发时间,节约开发成本,保证了系统可靠性。

### 参考文献:

- [1] 刘芳. 基于高原环境下移动基站风光氢能源混合供电系统应用相关技术研究与分析[D]. 北京邮电大学, 2013
- [2] 林维康. 车用环境燃料电池含水状态识别与控制方法研究[D]. 同济大学, 2022
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 特殊环境条件高原电工电子产品第1部分: 通用技术要求; GB/T 20626. 1—2017[S]
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T19608. 3: 特殊环境条件分级 第3部分: 高原; GB/T 19608. 3—2004[S]
- [5] 吴东来. 车用燃料电池空压机三高环境工作特性试验研究[J]. 时代汽车, 2023(17): 139-141
- [6] 陈骏. 车用燃料电池系统高海拔运行研究[J]. 上海汽车, 2017(2): 3-5
- [7] 胡旦, 张梦元, 张望. 船用 PEMFC 发电模块高原运行特性研究[J]. 船电技术, 2023, 43(11): 36-38+42
- [8] Chen Jinzhou, He Hongwen, Yue Hongwei. A review of plateau environmental adaptation for proton exchange membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50(Part C): 744-764

# 热电联产机组运行特性及耦合熔盐 储能系统灵活性分析

曾金辉 张雪\* 潘东晖 李果 唐豪杰

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643000

**摘要:**随着近几年新能源发电比例上升,电网对火电厂的调峰灵活性要求越来越高,热电联产机组受限于热电强耦合,导致无法适应深度调峰需求。针对热电联产机组运行灵活性问题,本文采用 Epsilon 软件搭建以某 350 MW 超临界机组耦合熔盐储能系统模型,分析了热电联产机组电热特性,并对比分析了不同热源下热电联产机组耦合熔盐储能系统对机组灵活性的提升效果。结果表明,耦合熔融盐储能系统后,供热机组电负荷调节区间增加,当供热热源分别为第四级抽汽、再热热段抽汽、主蒸汽抽汽时,机组最高电负荷分别提升了 14.26 MW、17.13 MW 和 26.03 MW,机组最低电负荷分别降低了 11.05 MW、12.01 MW 和 4.87 MW。当选取再热热段为热源时,储存在熔融盐储能系统内能量最多,熔融盐储能系统产生的最大蒸汽量也最高,其电热负荷运行域区间扩展最大。

**关键词:**热电联产;运行特性;熔盐储能

中图分类号:TM621;TM73

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0013-08

## Operational Characteristics of Cogeneration Units and Flexibility Analysis of Coupled Molten Salt Energy Storage Systems

ZEMG Jinhui, ZHANG Xue\*, PAN Donghui, LI Guo, TANG Haojie

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 643000, Zigong, Sichuan, China)

**Abstract:** With the increasing proportion of renewable energy generation in recent years, the power grid's demand for peak-shaving flexibility from thermal power plants has grown significantly. Cogeneration units, constrained by the strong coupling of heat and power, struggle to meet the requirements for deep peak shaving. To address the issue of operational flexibility in cogeneration units, this study employs Epsilon software to establish a model of a 350 MW supercritical unit coupled with a molten salt energy storage system. The electrical and thermal characteristics of the cogeneration unit are analyzed, and the flexibility enhancement effects of the coupled molten salt energy storage system under different heat sources are compared. The results indicate that after integrating the molten salt energy storage system, the electric load regulation range of the heating unit is expanded. When the heat sources are extracted from the fourth-stage steam, reheated hot-section steam, and main steam, the maximum electric load of the unit increases by 14.26 MW, 17.13 MW, and 26.03 MW, respectively, while the minimum electric load decreases by 11.05 MW, 12.01 MW, and 4.87 MW, respectively. When the reheated hot section is selected as the heat source, the energy stored in the molten salt energy storage system is maximized, and the system generates the highest amount of steam, resulting in the largest expansion of the electric and thermal load operating range.

**Key words:** cogeneration system; operational characteristics; molten salt energy storage

收稿日期:2025-05-08

**作者简介:**曾金辉(1992—),男,2015年毕业于浙江大学,硕士学位。现就职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司,主要从事压力容器技术、储能技术、综合能源技术研发与应用工作。通信邮箱:zengjh5658@dongfang.com。

张雪(1989—),女,2024年毕业于西南大学,硕士学位。现就职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司,主要从事储能产业、综合能源产业及技术推广工作。通信邮箱:zhangx1008@dongfang.com

## 1 引言

为响应“双碳”战略目标,我国正在加快构建以可再生能源电力为主体的新型电力系统<sup>[1]</sup>。截止2024年底,全国全口径发电装机容量33.5亿千瓦,包括风电、太阳能发电以及生物质发电在内的新能源发电装机达到14.5亿千瓦,首次超过火电装机规模,与此同时2024年我国煤电发电量占总发电量比重为54.8%<sup>[2]</sup>。造成煤电发电量占比依旧较高的原因,一方面是由于太阳能、风能等绿色能源发电的波动性和间歇性的特点,造成消纳困难,另一方面是燃煤发电机组的调节能力有限,特别是对于热电联产机组采用以热定电模式运行,电负荷调节能力受限。因此,开展热电联产机组的灵活性分析和研究,对加快构建新型电力系统具有重要意义。

为了解决热电强耦合问题,一些工业热负荷热电联产机组采用“热电解耦”技术方案,国内外有不少学者对此展开了研究。目前对于供热负荷热电联产机组而言,实现热电解耦的主要方式有采用热网进行蓄热<sup>[3-5]</sup>、低压缸零出力<sup>[6-8]</sup>、配置电锅炉<sup>[9-11]</sup>以及采用配置熔融盐蓄热罐等。

熔盐作为传热和储热介质,具有比热容高、能量密度大、分解温度高以及饱和蒸汽压低等优点<sup>[12]</sup>,可以储存高温热能,产生蒸汽用于工业供热,被广泛用于试验研究和光热发电领域。目前,火电机组耦合熔融盐储热系统尚处于模拟研究和初步设计阶段,少有工程应用<sup>[13]</sup>。在超临界机组方面,庞力平等<sup>[14]</sup>对超超临界660 MW二次再热机组的熔融盐储热流程进行了设计和模拟计算。李峻等<sup>[15,16]</sup>分析了熔融盐储热在火电机组中的应用前景并提出一种适合超临界火电机组的熔融盐双罐储热系统。在亚临界机组方面,张显荣等<sup>[17]</sup>提出了3种基于三元盐的600 MW纯凝机组熔融盐储热系统。Garbrecht等<sup>[18]</sup>分析了1台德国300 MW旧机组的储热灵活性改造可能性并设计了储热系统流程,该系统创新性地利用2种熔融盐对储热调峰过程进行温度匹配,以低温盐匹配低温汽水、高温盐匹配高温蒸汽,有效降低了换热过程中由于较大温度差异导致的能量品质降低。

而针对熔融盐工业供汽储热调峰的研究,范庆

伟等<sup>[19]</sup>针对亚临界600 MW机组建立了一种可以实现工业供汽热电解耦的熔融盐储热系统,并进行了模拟分析。罗海华等<sup>[20]</sup>提出了基于熔融盐蓄热的调峰新方案,该系统在降负荷时抽取再热蒸汽换热后供给热用户,升负荷时利用熔融盐加热除氧水为热用户供给蒸汽,实现了工业热电联产机组的热电解耦。

综上所述,配置熔盐储热系统能够提高热电联产机组运行的灵活性,从而实现热电解耦。本文结合某350 MW超临界热电联产机组案例,采用Epsilon软件模拟分析热电联产机组电热特性,并对对比分析了不同热源下热电联产机组耦合熔盐储热系统对机组灵活性的提升效果。对提高热电联产机组调峰能力的工程应用有一定的参考价值。

## 2 热电联产机组模型搭建

### 2.1 参考机组基本参数

本文采用某项目350 MW超临界一次再热供热机组参数作为参考,对于该机组的变工况特性进行了计算,选取THA工况为基准工况。表1为电厂汽轮机的相关参数,表2为电厂锅炉的相关设计参数,表3为电厂THA工况下的回热系统参数。对外供热蒸汽抽汽口有多个,其位置分别为第四级抽汽、再热热段抽汽和主蒸汽抽汽。同时,在第四级抽汽采用旋转隔板、再热抽汽采用中联门调节抽汽压力,确保机组变工况时,其排汽压力保持不变,主蒸汽温度、压力以及再热蒸汽温度均与基准工况相同。

表1 汽轮机设计数据

汽轮机型号	CC350/275—24.2/566/566
汽轮机型式	超临界、一次中间再热、单轴、三缸双排汽、抽汽凝汽式
额定功率	350 MW
主蒸汽压力/温度	24.200 MPa/566 °C
再热蒸汽压力/温度	3.959 MPa/566 °C
额定主蒸汽流量	1027.1 t/h
最大主蒸汽流量	1110.4 t/h
额定背压	5.2 kPa
额定工况给水温度	283.1 °C
额定再热热段抽汽压力	3.582 MPa
额定四抽抽汽压力	1.500 MPa

表 2 锅炉设计数据

锅炉型号	DG1150/25.4-Ⅱ3
过热蒸汽流量	1 150.00 t/h
过热蒸汽出口压力	25.50 MPa
过热蒸汽出口温度	571 °C
再热蒸汽流量	942.78 t/h
再热器进口蒸汽压力	4.81 MPa
再热器出口蒸汽压力	4.62 MPa
再热器进口蒸汽温度	327 °C
再热器出口蒸汽温度	569 °C
省煤器进口给水温度	285 °C

## 2.2 参考机组模型搭建

本文依托 Ebsilon Professional V14.0 模拟仿真平台建立集成储热的燃煤发电系统构型设计与稳态变工况计算模型。Ebsilon 软件以热力学第一定律为依据,以质量、能量和动量守恒为基础原则,实现热力系统计算过程自动化。Ebsilon 软件可实现热力系统设计、优化以及变工况性能的计算,其建模对象涵盖火电、核电、光热和储热等大部分热能应用领域,适用于对燃煤发电系统集成外部储热进行构型设计与优化。

表 3 THA 工况下回热系统参数

热物性参数	RH8	RH7	RH6	RH5	RH4	RH3	RH2	RH1
温度/°C	372.9	317.0	479.9	420.0	274.3	214.8	152.8	88.5
压力/MPa	6.754	4.399	2.266	1.524	0.487	0.266	0.140	0.066

根据电厂热平衡图中的热力系统以及相关参数,在 Ebsilon 软件搭建了 350 MW 热电联产机组模型,其如图 1 所示。其主要部件包括锅炉、汽轮机高中低压缸、冷凝器、小汽轮机、回热系统、给水泵、凝结水泵。

为验证 Ebsilon 软件模拟热力系统的准确性,对机组在 100 %THA、75 %THA、50 %THA、40 %THA、

30 %THA、20 %THA 各工况进行了模拟,将各工况模拟计算的热耗率和汽耗率与机组设计工况数据进行了对比,结果如表 4、表 5 所示。结果表明,各工况下的计算热耗率误差在 0.20 %以内;汽耗率误差在 0.10 %以内,因此采用 Ebsilon Professional V14.0 所建模型能够准确仿真热力系统的变工况特性,在此基础上,可以进一步展开研究。

表 4 机组设计工况与仿真工况热耗率对比

工况	100 %THA	75 %THA	50 %THA	40 %THA	30 %THA	20 %THA
设计值(kJ/kWh)	7 792	7 893	8 082	8 245	8 547	8 987
仿真值(kJ/kWh)	7 784	7 887	8 068	8 232	8 538	8 979
误差(%)	0.10	0.08	0.17	0.16	0.11	0.09

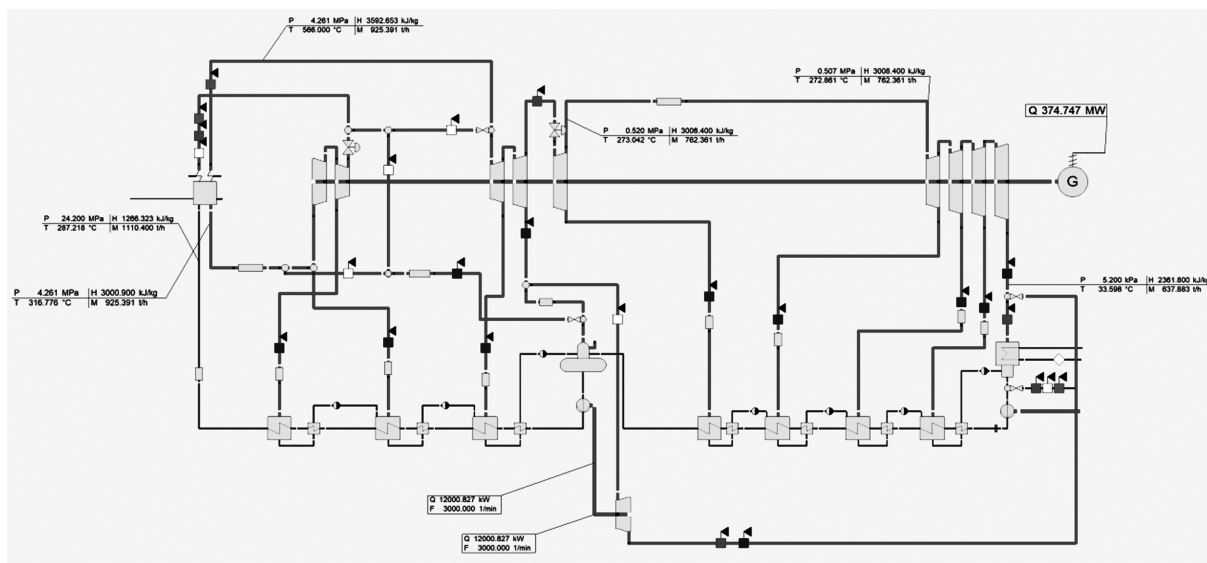


图 1 350MW 机组模型(Ebsilon Professional V14)

表 5 机组设计工况与仿真工况汽耗率对比

工况	100 %THA	75 %THA	50 %THA	40 %THA	30 %THA	20 %THA
设计值(kg/kWh)	2.942	2.854	2.751	2.721	2.824	2.869
仿真值(kg/kWh)	2.940	2.854	2.751	2.722	2.826	2.869
误差(%)	0.07	0.00	0.00	0.04	0.07	0.00

### 2.3 熔盐储能系统构型

熔融盐储能系统设计如图 2 所示,该系统为双罐系统,高温熔融盐和低温熔融盐分别储存在两个罐体之中。在储能过程中,通过抽取机组的蒸汽进入蒸汽熔盐显热换热器加热低温熔融盐,当抽取蒸汽的一部分显热加热熔融盐后,将会再次输送给工业蒸汽用户供热。在放能过程中,高温熔融盐经过高温熔盐泵后加热过冷水,从除氧器抽取的过冷水经过预热器、蒸发器以及过热器三级加热成过热蒸汽后输送给工业蒸汽用户。

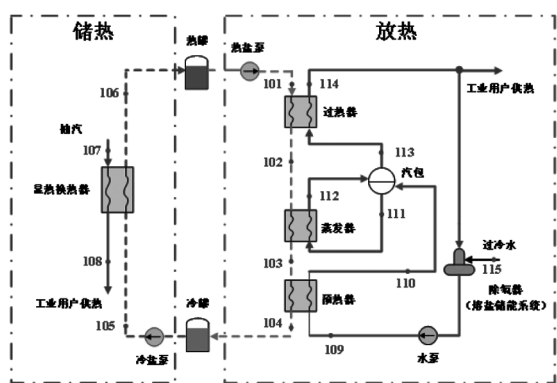


图 2 熔融盐储能系统

### 3 热电联产机组电热特性简析

热电联产是一种高效的能量利用方式,它通过燃料燃烧产生的高品位热能先用于发电,同时将已在汽轮机中做了功后的低品位热能回收对外供热。热电联产遵循了能量品质匹配原则,实现了热能的梯级利用,提高了热能利用率,使供热机组相比纯凝机组的能量利用效率大幅提高,节约了能源。

#### 3.1 热电联产机组的电热特性分析

热电联产机组的运行特性通常通过“电热特性”来描述,即发电功率(P)与供热功率(h)之间的相互耦合关系。这种特性关系能够直观反映机组的运行状态,为评估其灵活调节能力提供了重要依据。

本机组设有三级抽汽口,分别为四抽抽汽、再热热段抽汽、主蒸汽抽汽。当给定汽轮机进汽流量

时,当对外供热量逐渐增大时,由于供热抽汽汽流不经过汽轮机低压缸进行发电,因此随着供热量的逐步增大,机组汽轮机输出的发电功率会逐步降低。由图 3 可知,线 AB 对应机组的主蒸汽流量最大线,在该线上,汽轮机的进汽量均为汽轮机的最大进汽量,在相同的热负荷情况下,该线上存在着机组所能发出的最大发电量。线 BC 对应机组的背压工况线,该线上,机组的低压缸维持最小凝汽流量。线 DC 对应机组锅炉最小蒸发量,在该线上,汽轮机的进汽量均为汽轮机的最小进汽量。线 EF 对应最低供热蒸汽压力,在该线上,汽轮机的供热蒸汽压力为最低供热蒸汽压力。由于这些因素的互相制约,机组电热运行域为图 3 中填充部分。

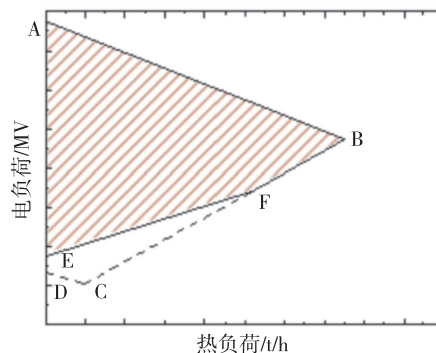


图 3 机组电热特性图

供热机组运行存在一些限制条件,本次计算的电厂的电热特性边界条件如表 6 所示,由此可计算出在不同抽汽情况下,机组的电-热运行特性图。

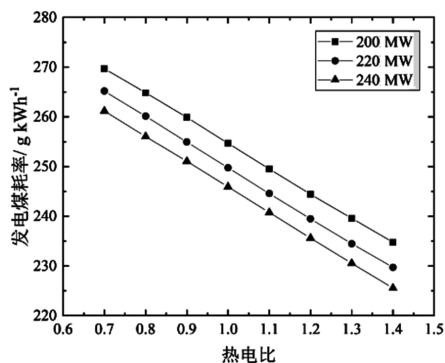
表 6 电热特性边界条件

最大主蒸汽流量	1 110.38 t/h
锅炉最小蒸发量	200.70 t/h
低压缸最小凝汽流量	90.47 t/h
最小供热温度	300.00 °C
最小供热压力	1.2 MPa

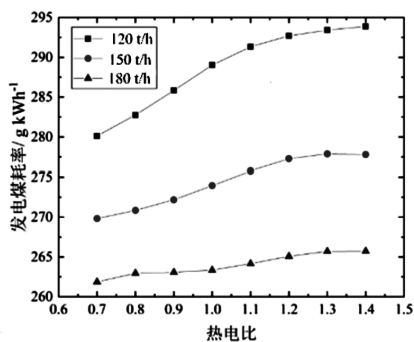
#### 3.2 热电比对机组能耗特性的影响

热电比是热电厂对外供热量和供电量的当量热量的比值。热电比可在一定程度上反映供热机组的热电联产节能效益<sup>[21]</sup>。

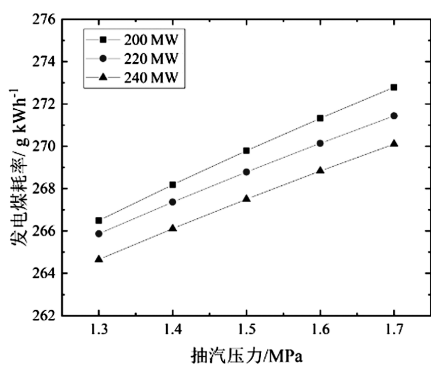
对于供热机组而言,不同的发电量、供热量及供热抽汽压力均会导致机组能耗特性发生改变。改变供热机组的热电比及供热抽汽压力,通过上述模型计算其发电煤耗率,计算结果如图4所示。



(a) 发电功率不同时热电比的影响



(b) 不同供热量时热电比的影响



(c) 供热抽汽压力的影响

图4 热电比及供热抽汽压力对机组能耗的影响

(1)从图4(a)中可以看出,以第四级抽汽为例,发电负荷保持不变时,热电比增加,即机组供热量增加,热化发电量增大,进而导致煤耗率减小;当热电比一定时,发电负荷增加意味着机组供热量也会随之增加,即热化发电率升高,进而导致煤耗率随之减小。

(2)从图4(b)中可以看出,以第四级抽汽为

例,当机组供热量保持不变时,煤耗率随着热电比的增加而增加。当热电比一定时,增加机组供热量意味着发电负荷同步增加,即主蒸汽量增加,热化发电率提高,进而凝汽损失相对减小使得煤耗率减小。

(3)从图4(c)中可以看出,以第四级抽汽为例,当供热抽汽压力保持不变时,随着发电负荷的减小,即热电比的增加,导致煤耗率增加。当发电负荷一定,抽汽量一定时,即热电比变化不大时,供热抽汽压力上升使得系统节流损失增大,进而导致煤耗率增加。

随着电力市场化改革,火电机组在完成深度调峰任务的同时,还要兼顾机组的经济性,通过对于供热机组的电热特性和能耗特性进行建模分析,可以为后续的工程应用提供一定的参考。

## 4 热电联产机组耦合熔盐储能灵活性分析

### 4.1 熔盐储能系统储热功率

当供热机组耦合熔融盐储能系统时,对机组运行灵活性的提升效果由熔融盐储能系统的放热功率所决定,而熔融盐的放热功率受到熔融盐的储热功率和调峰时间所影响,因此。需要对全工况下熔融盐的储热功率进行研究。

熔融盐储能系统储热功率指的是在储热过程中,抽汽加热熔融盐的功率。不同热源在不同工况下加热熔融盐的功率有所不同。在本文中,选取热源分别为第四级抽汽、再热热段抽汽和主蒸汽抽汽。不同热源运行工况下,熔融盐储能系统储热功率如图5所示。

熔融盐储能系统储热功率主要受到机组工业热负荷的影响,因为抽汽越多,储热蒸汽量也越多,因此熔融盐储能系统储热功率相应也增加。以再热热段抽汽为例,在图5(b)中,对于运行点A、B,电负荷均为200 MW,A点热负荷为100 t/h,B点热负荷为300 t/h。运行点A的熔融盐储能系统储热功率为15.72 MW,运行点B的熔融盐储能系统储热功率为47.43 MW。运行点B的熔融盐储能系统储热功率较点A高出31.71 MW。

通过对比不同热源情况下的熔融盐储能系统储热功率,可以得出在相同电热负荷情况下,当热

源为再热热段时,熔融盐储能系统储热功率达到最大。在图5中,对于运行点C、B、D,电负荷均为200 MW,热负荷均为300 t/h。运行点C的熔融盐储能系统储热功率为24.05 MW,运行点D的熔融盐储能系统储热功率为29.41 MW,运行点B的熔融盐储能系统储热功率最大。

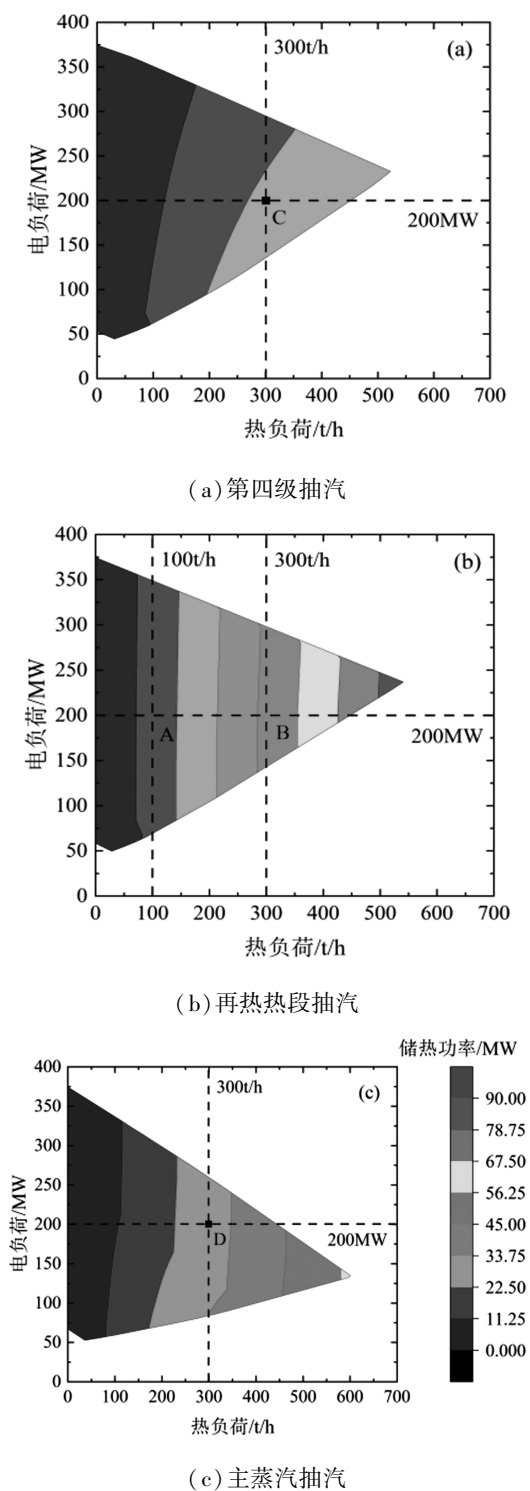


图5 不同工况下储热功率

#### 4.2 热电联产机组灵活性分析

在本文中,所选取的热源为第四级抽汽、再热热段、主蒸汽抽汽,其中第四级抽汽采用旋转隔板、再热热段抽汽采用中联门等抽汽稳压设备。在不同热源情况下,热电联产机组耦合熔融盐储能系统对机组灵活性有一定提升效果。

对于热电联产机组耦合熔融盐储能系统,所储存的热量  $Q_s$  计算式为:

$$Q_s = \int_0^{t_c} P_c dt \quad (1)$$

熔融盐储能系统的最大放热功率  $P_{\max d}$  为:

$$P_{\max d} = \frac{Q_s}{t_d} \quad (2)$$

由此熔融盐储能系统产生的最大蒸汽量  $M_d$  为:

$$M_d = \frac{1\ 000\ P_{\max d}}{h_{\text{supply}} - h_{\text{sub}}} \quad (3)$$

其中,  $P_c$  为熔融盐储能系统储热功率, MW;  $t_c$  为储热时长, s;  $t_d$  为放热时长, s;  $h_{\text{supply}}$  为供热蒸汽焓值, kJ/kg;  $h_{\text{sub}}$  为给水焓值, kJ/kg。

由此可以得出,在不同热源情况下,热电联产机组耦合熔盐储能系统对机组灵活性的提升效果。

在供热流量为 81.13 t/h, 储热时长为 20 h, 放热时长为 4 h, 分别以第四级抽汽、再热热段、主蒸汽为热源的情况下, 模拟得到电厂 350 MW 热电联产机组的扩展情况。

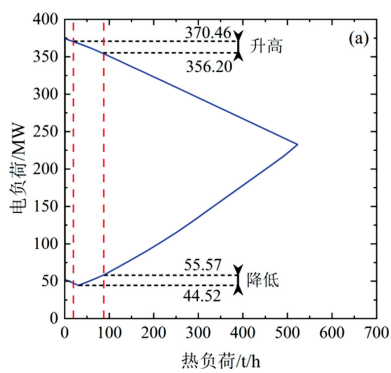
##### (1) 热源为第四级抽汽

当热源为第四级抽汽时, 初始的电负荷调节区间为 55.57 MW 至 356.20 MW。由计算可知最大放热功率  $P_{\max d}$  为 45.78 MW。熔融盐储能系统产生的最大蒸汽量  $M_d$  为 68.10 t/h, 为保证供热流量, 机组热负荷为 13.03 t/h, 可得出相应的电负荷区间。热电联产机组电负荷运行区间得到扩展后, 机组耦合熔融盐储能系统后电负荷调节区间为 44.52 MW 至 370.46 MW, 结果如图 6(a) 所示。最高电负荷上升了 14.26 MW, 最低电负荷降低了 11.05 MW。

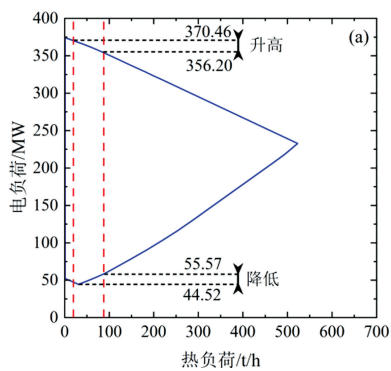
##### (2) 热源为再热热段

当热源为再热热段时, 初始的电负荷调节区间为 62.03 MW 至 355.74 MW。由计算可知最大放热功率  $P_{\max d}$  为 69.52 MW, 熔融盐储能系统产生的最

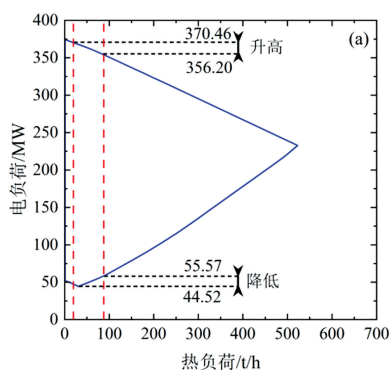
大蒸汽量  $M_d$  为 103.41 t/h, 可满足供热流量, 机组热负荷可降为 0, 可得出相应的电负荷区间。热电联产机组电负荷运行区间得到扩展后, 机组耦合熔融盐储能系统后电负荷调节区间为 50.02 MW 至 372.87 MW, 结果如图 6(b) 所示。最高电负荷上升了 17.13 MW, 最低电负荷降低了 12.01 MW。



(a) 第四级抽汽



(b) 再热热段抽汽



(c) 主蒸汽抽汽

图 6 耦合熔融盐储能系统 350 MW 热电联产机组电负荷扩展

### (3) 热源为主蒸汽

当热源为主蒸汽时, 初始的电负荷调节区间为 57.95 MW 至 345.22 MW。由计算可知最大放热功率  $P_{\max d}$  为 53.73 MW, 熔融盐储能系统产生的最大蒸

蒸汽量  $M_d$  为 79.92 t/h, 为保证供热流量, 机组热负荷为 1.21 t/h, 可得出相应的电负荷区间。热电联产机组电负荷运行区间得到扩展后, 机组耦合熔融盐储能系统后电负荷调节区间为 53.08 MW 至 371.25 MW, 结果如图 6(c) 所示。最高电负荷上升了 26.03 MW, 最低电负荷降低了 4.87 MW。

由以上模拟结果可知, 当选取再热热段为热源时, 储存在熔融盐储能系统内能量最多, 熔融盐储能系统产生的最大蒸汽量也最高, 因此, 其电热负荷运行域区间扩展最大。

## 5 结语

对于工业热负荷燃煤热电联产机组, 需要通过热电解耦的手段, 提升机组运行的灵活性。同时, 煤电工业热电解耦构型具有多样性, 对于耦合储能系统的热电解耦手段, 存在比较不同供热热源系统构型所具有优势的问题。耦合储能系统工业热负荷燃煤机组在完成调峰任务的同时, 还要兼顾机组的经济性。本文基于以上要求, 以电厂 350 MW 工业热负荷热电联产机组为研究对象, 研究了热电联产机组的电热特性和能耗特性, 得到了限制工业热负荷燃煤热电联产机组灵活性提升的主要因素, 分析了不同热源构型下耦合熔融盐储能系统对供热机组的灵活性提升效果, 获得如下的结论:

工业热负荷热电联产机组耦合熔融盐储能系统灵活性的提升与储热功率及储放热时长有关, 当供热机组耦合熔融盐储能系统后, 供热机组电负荷调节区间增加, 当供热热源分别为第四级抽汽、再热热段抽汽、主蒸汽抽汽时, 机组最高电负荷分别提升了 14.26 MW、17.13 MW 和 26.03 MW; 机组最低电负荷分别降低了 11.05 MW、12.01 MW 和 4.87 MW。当选取再热热段为热源时, 储存在熔融盐储能系统内能量最多, 熔融盐储能系统产生的最大蒸汽量也最高, 其电热负荷运行域区间扩展最大。

## 参考文献:

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819
- [2] 中国电力企业联合会. 2024-2025 年度全国电力供需形势分析预测报告 [R/OL]. (2025-01-24). [2025-02-15]. <https://>

- www.cec.org.cn/detail/index.html? 3-341403
- [3] 李平,王海霞,王漪,等. 利用建筑物与热网热动态特性提高热电联产机组调峰能力 [J]. 电力系统自动化,2017,41(15): 26-33
- [4] 杨宇伟,王海龙,杨利军,等. 长输供热管网蓄热试验与热电解耦研究[C]//2024年北京电机工程学会年度论文集. 2024
- [5] 钱军,王刚,张明,等. 大惯性城市热网参与火电机组调峰创新应用研究 [J]. 动力工程学报,2024,44(12):1972-1981
- [6] 王行,赵金峰,豆中州,等. 某350MW热电联产机组低压缸零出力改造热电特性分析 [J]. 汽轮机技术,2022,64(2): 129-132
- [7] 范志强,焦晓峰,魏超,等. 300 MW 供热机组低压缸零出力热力性能、调峰性能和经济性能分析 [J]. 中国测试,2024,50(4):166-172
- [8] 王慧贤,康志忠. 350 MW 机组低压缸微出力技术深度调峰性能研究 [J]. 电力科技与环保,2025,41(1):166-172
- [9] 陈永辉,李志强,蒋志庆,等. 基于电锅炉的火电机组灵活性改造技术研究 [J]. 热能动力工程,2020,35(1):261-266
- [10] 张红昌,薛小军,徐钢,等. 热电联产机组热电解耦改造方案的调峰特性及能耗分析 [J]. 动力工程学报,2023,43(10):1382-1390
- [11] 陆明媚,张启连,王宏伟,等. 提升热源侧调峰能力的热电解耦技术 [J]. 煤气与热力,2024,44(1):39-42
- [12] R Serrano-López, J Fradera, S Cuesta-López. Molten salts database for energy applications [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification,2013,73(73):87-102
- [13] 周科,李银龙,李明皓,等. 燃煤发电-物理储热耦合技术研究进展与系统调峰能力分析 [J]. 洁净煤技术,2022,28(3): 159-172
- [14] 庞力平,张世刚,段立强. 高温熔盐储能提高二次再热机组灵活性研究 [J]. 中国电机工程学报,2021,41(8):2682-2691
- [15] 李峻,祝培旺,王辉,等. 基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析 [J]. 南方能源建设,2021,8(3): 63-70
- [16] 王辉,李峻,祝培旺,等. 应用于火电机组深度调峰的百兆瓦级熔盐储能技术 [J]. 储能科学与技术,2021,10(5):1760-1767
- [17] 张显荣,徐玉杰,杨立军,等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较 [J]. 储能科学与技术,2021,10(5):1565-1578
- [18] O Garbrecht, M Bieber, R Kneer. Increasing fossil power plant flexibility by integrating molten-salt thermal storage [J]. Energy, 2017,118(JAN. 1):876-883
- [19] 范庆伟,居文平,黄嘉骊,等. 基于储热过程的工业供汽机组热电解耦研究 [J]. 汽轮机技术,2019,61(3):221-223+188
- [20] 罗海华,张后雷,刘文涛,等. 基于熔盐蓄热的亚临界火电机组工业供热调峰技术 [J]. 暖通空调,2020,50(10):71-75
- [21] 薛康康. 350 MW 机组供热工况的能耗特性研究 [J]. 节能, 2022,41(11):61-63

# 燃气锅炉掺烧炼油厂瓦斯干气的 优化改造研究

刘委东 李虎祥 顾宗兴

中国石油化工股份有限公司齐鲁分公司, 山东 淄博 255400

**摘要:** 本文以中石化齐鲁石化分公司部分装置为例, 重点介绍燃气锅炉掺烧炼油厂瓦斯干气的节能优化改造技术要点、工艺流程和节能效益等情况。结果表明: 改造后燃气锅炉可在多种掺烧工况下平稳运行, 吨蒸汽耗天然气量从  $83 \text{ Nm}^3/\text{t}$  降至  $63 \text{ Nm}^3/\text{t}$ , 累计节约天然气  $923 \text{ 万 Nm}^3$ , 相应减少  $\text{CO}_2$  排放  $16\,380 \text{ t}$ , 不仅推动企业达成清洁生产要求, 更实现了锅炉装置安全降耗与低碳效应的协同发展, 为石油化工业副产物资源化利用及节能降碳提供了可行路径。

**关键词:** 瓦斯掺烧; 燃烧器改造; 安全降耗; 节能优化; 低碳效应

中图分类号: X74; TK229.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)06-0021-06

## Study on Optimization and Transformation of Gas-fired Boilers Co-firing Refinery Dry Gas

LIU Weidong, LI Huxiang, GU Zongxing

(Sinopec Corp., Qilu Branch, 255400, Zibo, Shandong, China)

**Abstract:** This paper takes selected units of Sinopec Qilu Branch Company as a case study, focusing on the technical specifications, process flow, and energy-saving benefits of retrofitting gas-fired boilers for co-firing refinery dry gas. The results demonstrate that the retrofitted boilers maintain stable operation across various co-firing conditions, with natural gas consumption per ton of steam reduced from  $83 \text{ Nm}^3/\text{t}$  to  $63 \text{ Nm}^3/\text{t}$ . This optimization has cumulatively saved  $9.23 \text{ million Nm}^3$  of natural gas, corresponding to a reduction of  $16,380 \text{ tons}$  of  $\text{CO}_2$  emissions. The project not only facilitates compliance with clean production requirements but also achieves synergistic development between safe energy reduction and low-carbon effects in boiler operations, providing a viable pathway for byproduct utilization and energy-carbon dual reduction in the petrochemical industry.

**Key words:** gas blending combustion; burner modification; safety and energy conservation; energy-saving optimization; low-carbon effect

在全球能源结构加速向清洁低碳转型的背景下, 中国“双碳战略”的实施已进入关键攻坚期<sup>[1-4]</sup>。炼油行业的碳排放虽然比钢铁冶金、水泥建材等行业碳排放要少, 但也属于工业领域碳排放的大户, 其中瓦斯干气等可燃气体的无效燃烧是碳排放的主要来源之一<sup>[5-7]</sup>。传统高塔火炬燃烧方式不仅导致热能浪费, 更造成  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等强效温室气体逸

散, 根据有关研究  $\text{CH}_4$  气体的温室效应是二氧化碳的 20 倍<sup>[8-9]</sup>。针对这一行业痛点, 本次研究聚焦于更贴近中国炼化企业实际的锅炉掺烧方案, 通过技术创新改造实现瓦斯干气的“零碳利用”<sup>[10-12]</sup>。

### 1 改造背景

2025 年齐鲁石化炼油厂停车检修期间, 将产生

收稿日期: 2025-09-01

**作者简介:** 刘委东 (1968—), 男, 高级工程师, 1994 年毕业于西安交通大学锅炉专业, 学士。曾主持压烧燃料油技术改造获中华全国总工会优秀合理化建议奖, 现任中石化齐鲁分公司高级专家, 主要从事热电厂锅炉技术与安全环保管理工作。

约 9 000 Nm<sup>3</sup>/h 的过剩副产瓦斯干气(包括三焦化净化干气、干气制乙烯甲烷氢等瓦斯管网气)。从安全环保双重要求出发,该部分瓦斯干气既不可直接排入火炬(避免高温燃烧带来的安全风险及温室气体无序排放),又因炼厂区域内无法实现供需平衡,成为制约检修工作安全有序推进的关键问题,亟需通过合规化利用或安全处置方案破解。依托该企业热电厂现有条件,其本部 2 台 300 t/h 中压燃气锅炉(设计燃料为天然气)及附属设施的防爆等级,完全满足瓦斯干气掺烧的安全标准,为瓦斯干气的资源化利用提供了可行性基础。

在此背景下,本次研究对燃气锅炉进行系列改造,将炼油厂过剩瓦斯干气送入燃气锅炉进行掺烧,构建瓦斯干气处理与燃气锅炉运行新型合作模式。此模式不仅实现瓦斯干气热能高效回收,更通过替代部分天然气消耗降低锅炉装置对化石能源依赖,从源头减少碳排放。企业在实现安全处理瓦斯干气的过程中,达成节能降耗与绿色低碳的双重目标,为炼化企业清洁生产与安全高效运营提供新型实践路径。

## 2 改造内容

### 2.1 燃气锅炉的基本情况介绍

锅炉装置设计燃料为天然气,锅炉型号:UG—300/4.8—Q,该锅炉由无锡华光环保能源集团股份有限公司制造生产,选用 π 型汽包锅炉,采用双送风双引风平衡通风设计,负压燃烧,并设置烟气再循环系统,可有效降低 NO<sub>x</sub> 的生成量。锅炉燃烧器采用分体式超低氮燃烧器,前墙两层布置,每层 3 台,共计 6 台,可以满足排烟 NO<sub>x</sub> 浓度 50 mg/Nm<sup>3</sup> 以下的环保要求。燃烧器所用电气仪表设备均为防爆型,防爆等级 exdIIBT4,并配备火焰检测及控制阀组。

### 2.2 改造思路

本次改造重点对原有燃气锅炉燃烧器进行适应性改造,使其适应多燃料工控下的瓦斯干气掺烧工艺需求,同时新增燃气调压阀组,兼顾考虑工艺与设备安全,通过对燃气调压装置及燃烧器的改造来实现瓦斯干气的完全掺烧,最大限度地回收其热能,实现经济效益和环境保护功能。

### 2.3 天然气及瓦斯干气相关参数介绍

天然气进厂压力 1.3 MPa~2.5 MPa,热值为 37.65 MJ/Nm<sup>3</sup>;瓦斯干气进厂压力为 0.6 MPa~1.0 MPa,具体成分参数及理化性质如表 1-2。

表 1 燃料气各组成成分表

燃气种类	单位	三焦化净化干气	干气制乙烷甲烷氢	天然气
硫含量	mg/m <sup>3</sup>	平均 60	0	0
硫化氢	mg/m <sup>3</sup>	9.15	0	<2.8
氢气	V, %	18.64	27.48	0.1
空气	V, %	5.29	14.36	1.34
甲烷	V, %	51.42	36.58	93.83
乙烷	V, %	16.00	4.45	2.41
乙烯	V, %	2.89	6.11	0
丙烷	V, %	2.0	10.29	1.5
其他	V, %	3.74	0.73	0
总计	V, %	100.00	100.00	100.00

表 2 瓦斯气体理化性质

项目	单位	三焦化净化干气	甲烷氢
正常工况流量	Nm <sup>3</sup> /h	6 000	3 000
压力	MPa	0.9	0.9
密度(标态)	kg/Nm <sup>3</sup>	0.81	0.86
比重(标态)		0.63	0.66
低热值(标态)	kJ/Nm <sup>3</sup>	36 660	32 360

### 2.4 改造后主要工艺流程

本次改造依托原有天然气管道,新增两条工艺管线将炼油厂三焦化、二焦化装置产生的瓦斯干气引至锅炉区域,在进厂区域设置电动球阀及手动闸阀,阀前设置放空阀及氮气置换阀,便于设备检修时置换使用。瓦斯干气引入调压站后,经过滤器、自力式调压阀及流量调节阀后分为两路,分别引至 1#、2#锅炉燃气管,经炉前调压装置减压后送入炉膛进行燃烧,具体工艺流程图如图 1 所示。

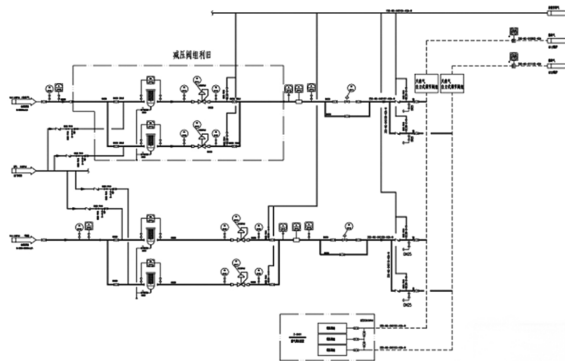


图 1 瓦斯掺烧工艺流程图

## 2.5 技术改造要点

### 2.5.1 管线及调压装置改造

在厂区门口厂际管廊,瓦斯干气设置 DN150 甩头,新增两条 DN200 管线通过扩径与甩头相接,将两路瓦斯干气送至热电厂天然气调压装置区。

新增两组自力式减压阀组和流量调节阀组供两路瓦斯干气使用,两路瓦斯干气分别经过减压阀组,从 0.6 MPa~1 MPa 减压至 0.55 MPa 和 0.53 MPa,接入天然气调压装置后至 1#、2#锅炉天然气管道,利用流量调节阀调整瓦斯干气流量,燃气锅炉优先两路瓦斯干气,不足部分由天然气自动补充。

### 2.5.2 燃烧器改造

改造后的锅炉燃烧器需适应单一天然气燃料燃烧及与不同比例瓦斯干气混合燃烧等不同工况,因此本次燃烧器改造需满足在多种燃料混合下稳定燃烧的要求。同时根据设计规范,燃气锅炉还需满足在 30%~110% 额定负荷运行时,具备连续调节能力并确保烟气排放符合环保标准。

#### 2.5.2.1 燃烧器改造原理

为实现锅炉在不同比例多燃料混烧工况下的稳定运行,本次燃烧器改造需突破气体燃料特性差异带来的影响。由于瓦斯干气中氢气含量达 20%~30%,高含氢量使其燃烧速率较天然气有显著提高,本次改造需通过计算精确燃料枪孔径,优化燃料射流速度  $V_j$ ,确保与空气充分预混<sup>[13-14]</sup>:

$$V_j = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (1)$$

其中, $Q$  为燃料流量, $r$  为燃料枪半径。同时,针对不同掺烧工况下火焰强度的变化,根据火检强度动态调整确定燃料枪喷射角度,优化射流轨迹与炉膛配风的耦合效应,确保火焰充满度及稳定性。此外,中心稳焰枪作为燃烧器核心部件,需根据掺烧燃料热值衰减特性,采用分级供气策略,通过调整燃料耗量、射流长度及喷射角度,形成稳定点火源,保障全负荷工况下火焰的稳定燃烧。

#### 2.5.2.2 燃烧器性能要求

改造后的燃烧器需满足燃气锅炉多维度性能要求如下。

(1) 燃料适应性:在保留天然气单燃料运行能力基础上,实现瓦斯干气不同比例混燃烧,燃料在

切换过程火焰强度平稳无波动。

(2) 火检系统优化:改造后的燃烧器需要消除不同燃料燃烧时产生的干涉现象,通过配合厂家进行火检系统参数优化,确保火焰检测准确率,避免出现连锁保护误动作事故。

(3) 污染物排放控制:在锅炉正常运行期间,严格控制 NO<sub>x</sub> 排放浓度 ≤ 40 mg/Nm<sup>3</sup>,粉尘浓度 ≤ 4 mg/Nm<sup>3</sup>,满足超净排放要求。

(4) 负荷调节特性:因生产需要,燃气锅炉负荷需实现 30%~110% 负荷区间内的连续稳定调节,负荷响应速率 ≥ 3 %BMCR/min。

#### 2.5.2.3 燃烧器改造具体内容

(1) 对中心稳燃部件进行升级,将中心枪直径优化为 φ 5 mm,外环长枪、短枪喷射角度分别调整为 8°、5°,增强中心回流区火焰强度,提升火焰稳定性。

(2) 将主燃料枪直径由 φ 44 mm 增至 φ 55 mm,扩大通流能力,通过多孔阵列结构设计,实现多燃料掺配均匀,保证全掺混工况下的满负荷出力。

(3) 对火检系统进行适应性改造,通过火检厂家适应性参数调整,实现不同燃料火焰的精准识别与动态监测。

(4) 特殊工况下,启动省煤器旁路调节装置,通过省煤器旁路流量调节阀调整省煤器换热量,确保排烟温度稳定维持在 120 °C 以上,有效规避低温腐蚀风险,燃烧器改造后效果图如图 2 所示。

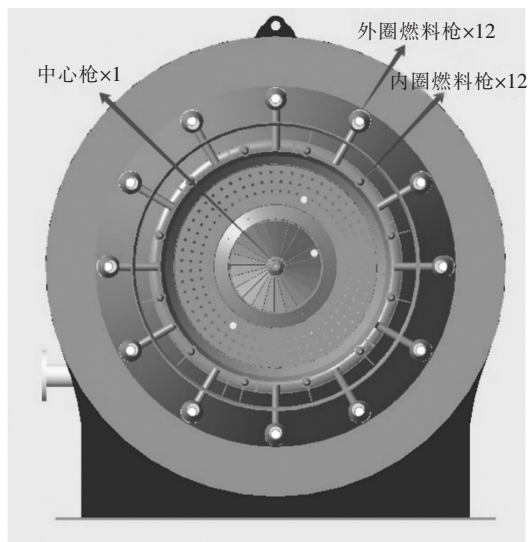


图 2 燃烧器改造效果图

### 3 改造后锅炉运行效果

本次改造经过安全性及经济性论证后有序推进,先后完成管线施工、燃烧器改造、管线吹扫气密性试验、调试运行等关键工序,最终实现瓦斯干气的稳定掺烧。通过前后运行数据对比显示,掺烧工况下锅炉本体及各辅机装置运行参数稳定,燃烧工况稳定,环保达标排放满足烟气排放标准,验证了本次改造的有效性。

#### 3.1 设备腐蚀

锅炉高效设计导致的低排烟温会对锅炉产生腐蚀。特别是瓦斯干气中含有的 S 和 H<sub>2</sub>S 等成分经燃烧后生产 SO<sub>2</sub> 与水蒸气形成 H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 蒸汽,当烟温低于酸露点时将引发尾部受热面的低温腐蚀,所以应控制瓦斯干气掺烧后的排烟温度<sup>[15-16]</sup>。

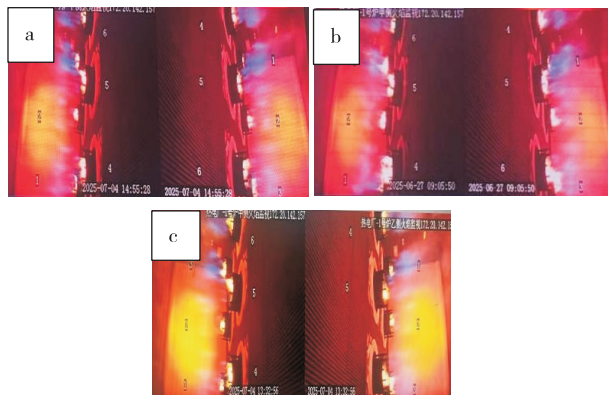
为解决这一问题,我们建立排烟温度调控机制,通过在运行中适当开启省煤器旁路给水调整门(40%~50%),减少省煤器吸热量,提高排烟温度,使锅炉低温省煤器出口烟温保持在 120℃ 以上,保证排烟温度高于酸露点,防止尾部设备的低温腐蚀。

#### 3.2 燃烧优化试验

本次基于瓦斯干气实际掺烧比例,对燃烧器燃料枪结构参数及布风板几何尺寸进行系统性优化设计,成功完成了燃烧器改造。随后,在不同掺烧工况下开展燃烧特性试验研究,重点验证火焰检测系统(Fire Detection System, FDS)的强度响应特性。研究过程中,针对锅炉负荷稳定在 120~130 t/h 的工况区间,详细分析了不同掺烧比例下的火焰形态与燃烧稳定性。分别掺烧两种瓦斯干气共 1 000 Nm<sup>3</sup>、3 000 Nm<sup>3</sup>、6 000 Nm<sup>3</sup> 时(截至目前,瓦斯干气最大时均值为 6 000 Nm<sup>3</sup>),锅炉燃烧情况如图 3 所示。

试验结果表明:各工况下火焰呈现典型双色结构特征,即中心区域为高温金黄色的内核火焰,外层包裹稳定的蓝色主火焰,火焰辐射强度均满足火检检测阈值要求(火检信号强度维持在 4~20 mV),可有效触发安全仪表系统(Safety Instrumented System, SIS)的连锁保护机制,保证锅炉改造后的安全运行。本次改造也为燃气锅炉燃烧系统多燃料

掺烧的优化设计与安全调控提供了工程使用依据。



注:a:1 000 Nm<sup>3</sup>;b:3 000 Nm<sup>3</sup>;c:6 000 Nm<sup>3</sup>

图 3 不同瓦斯干气掺烧量的燃烧情况

#### 3.3 环境保护

在燃气锅炉掺烧瓦斯干气的应用中,其污染物排放与火炬燃烧直排相比具有明显优势,且通过系列技术手段与调控措施可实现环保与安全运行的统一。具体而言,燃气锅炉掺烧瓦斯干气后,NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub> 及烃类污染物排放量显著减少,而烟尘与 CO 排放量变化不明显<sup>[17-18]</sup>。同时,锅炉可依托原有 CEMS 设备在线监测烟气温度、压力、流量及 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、颗粒物等参数,监测数据接入 DCS 系统后同步至信息中心及环保监管部门,形成全过程环保管控体系。

在精准控排方面,通过低氮燃烧器适应性改造结合烟气再循环技术,可多维度实现 NO<sub>x</sub> 达标排放,经不同工况试验验证,排烟中 NO<sub>x</sub> 浓度能降至 30 mg/m<sup>3</sup> 以内,既满足国家标准又达到地方政府协商减排要求,实现大幅削减氮氧化物排放以缓解温室效应。

针对瓦斯干气含硫可能导致的 SO<sub>2</sub> 浓度上升问题,基于 CEMS 实时监测数据与炼厂硫元素数据,通过调控瓦斯管线流量阀控制其流量动态调整三焦化干气掺烧量,同时天然气作为补充燃料弹性应对极端工况,可确保正常运行时烟气 SO<sub>2</sub> 浓度 < 30 mg/Nm<sup>3</sup>,符合环保及企业内控标准,我们选择了瓦斯其中含硫量不同的三种特殊情况,分别作为工况 1、2、3,三种工况下含硫量分别为 60 mg/Nm<sup>3</sup>、170 mg/Nm<sup>3</sup>、500 mg/Nm<sup>3</sup>(极限情况下),不同燃烧工况 SO<sub>2</sub> 排放情况如图 4 所示。

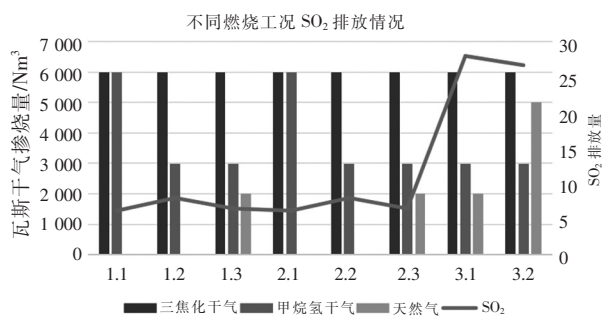


图4 不同燃烧工况 SO<sub>2</sub> 排放情况

由图4可知,当三焦化干气硫含量达500 mg/Nm<sup>3</sup>的极端情况出现时,热电厂接收量需由6 000 Nm<sup>3</sup>/h降至3 000 Nm<sup>3</sup>/h以满足排放需求,系统内瓦斯干气余量由炼厂应急消纳;而炼厂硫元素实时数据同步至热电厂,可实现风险预警与措施前置调整,最终达成环保受控与安全运行的统一。

### 3.4 瓦斯干气带液处理

瓦斯干气在炼油装置经脱硫工艺处理后,会携带饱和状态的水蒸气,正常工况下以气态形式存在,无液态水析出,从源头上规避了因液态水引发的基础安全风险<sup>[19]</sup>。

基于本次改造仅针对炼油装置夏季全停检修期间短期应用的场景,设计中未设置分液罐。但需重点关注:瓦斯干气输送管线因长度较大且未采取伴热及保温措施,在夏季环境下,管线末端仍可能因温降导致水蒸气凝结,形成“瓦斯带液(水)”现象。液态水的积聚可能引发管线积液、压力波动,甚至影响燃烧稳定性,因此当前运行中必须通过严格的定期排液操作,及时清除积液,确保系统安全运行。

## 4 改造收益分析

### 4.1 经济收益

本次改造于2025年3月正式投用,当月掺烧瓦斯干气量为402 t,该种瓦斯干气的热值为36.66 MJ/Nm<sup>3</sup>,锅炉燃烧所使用的天然气热值为37.65 MJ/Nm<sup>3</sup>(密度为0.776 kg/m<sup>3</sup>),经计算可以替代消耗天然气 $402 \times 36.66 / 0.81 / 37.65 \times 0.776 = 374.4$  t<sup>[20]</sup>。随着掺烧工艺的逐渐成熟,瓦斯干气掺烧量的日趋增加,截至到七月底已累计掺烧13 760吨瓦斯干气,节约天然气923万Nm<sup>3</sup>,吨蒸汽耗天然气量从83 Nm<sup>3</sup>/t下降到63 Nm<sup>3</sup>/t,同比下降25%,每月

瓦斯干气掺烧趋势如图5所示。

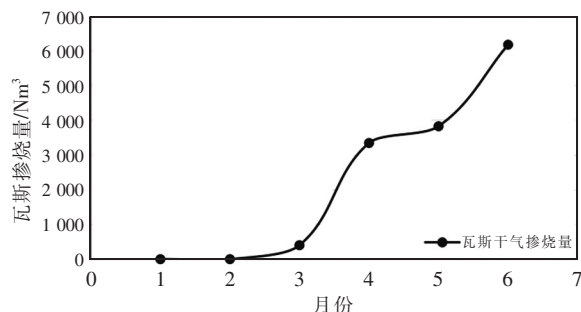


图5 不同月份的瓦斯干气掺烧量

随着炼油厂检修程度的深入,预计在其检修周期内(3月~8月),通过回收利用原本排放至火炬系统的瓦斯干气总量预计可达1 188万Nm<sup>3</sup>,将替代消耗1 104万Nm<sup>3</sup>天然气,直接节省燃料成本达3 091万元,综合考虑改造投资500万元,可实现直接增效2 500余万元,经济效益可观。

### 4.2 低碳效益

本次改造创新性地采用燃气锅炉掺烧瓦斯干气的技术路径,从源头规避瓦斯干气通过火炬直接燃烧产生的大量CO<sub>2</sub>排放,推动企业低碳减排与绿色发展。统计数据显示,截止到6月底,通过掺烧瓦斯干气减少二氧化碳当量排放16 380吨,显著降低企业碳足迹。按照政府相关政策及全国碳市场现行碳配额基准价75元/吨测算,该部分减排量可产生约122万元的碳交易收益,直接将环境效益转化为经济效益<sup>[21]</sup>。这不仅为企业构建可持续的绿色金融资产,更推动炼化行业在低碳转型中拓展“变废为宝”的路径,为企业践行绿色发展理念、实现经济效益与生态效益的协同增长提供了有力支撑。

## 5 结语

本次燃气锅炉掺烧炼油装置瓦斯干气的改造,是炼化行业尾气资源化利用与低碳转型的标志性实践,改造后锅炉装置运行平稳,瓦斯干气量消耗稳定。

从安全与稳定运行看,改造后通过CEMS实时监测与动态调控系统,实现了瓦斯干气掺烧量的精准控制,结合极端工况下天然气补充燃烧机制,有力保障锅炉装置长周期稳定运行。瓦斯干气量消耗持续稳定,彻底解决传统火炬直接燃烧带来的安

全隐患,达成环保受控与生产安全的统一。在节能降耗与经济效益层面,该改造将原本火炬排空的瓦斯干气转化为锅炉燃料,大幅减少了天然气外购量,使天然气吨蒸汽耗天然气量从  $83 \text{ Nm}^3/\text{t}$  下降到  $63 \text{ Nm}^3/\text{t}$ ,创造显著的直接经济效益,实现节能降耗与提质增效的双重突破。从低碳效应看,相比火炬燃烧直排,瓦斯干气掺烧可通过低氮燃烧与烟气再循环等手段,使  $\text{NO}_x$  等污染物排放浓度稳定控制在超低标准,大幅削减温室气体排放,为企业“双碳”目标达成提供了有力支撑。

综上,本次改造为同类型企业提供了可复制的技术范本,其经验表明,炼化尾气的资源化利用不仅是节能减排的有效路径,更是企业实现绿色转型与可持续发展的必然选择,对推动行业低碳升级具有重要示范意义。

#### 参考文献:

- [1] Li Y, Yang X, Du E, et al. A review on carbon emission accounting approaches for the electricity power industry [J]. Applied Energy, 2024, 359: 122681
- [2] 朱法华,王圣. 煤电大气污染物超低排放技术集成与建议[J]. 环境影响评价, 2014(5): 25-29
- [3] 罗胜. 石化行业碳排放强度估算与减排对策研究[D]. 中国石油大学, 2011
- [4] 杨勇平,陈衡,郝俊红,等. “双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6900-6910
- [5] 曹湘洪. 炼油行业碳达峰碳中和的技术路径[J]. 炼油技术与工程, 2022, 52(1): 1-10
- [6] 龚朝兵,陈梓剑,张绍良,等. 炼厂加热炉烟气与工艺废气达标排放分析探讨[J]. 中外能源, 2014, 19(2): 89-92
- [7] 马敬昆,蒋庆哲,宋昭峥,等. 低碳经济视角下炼厂碳产业链的构建[J]. 现代化工, 2011, 31(6): 1-5+7
- [8] 刘国盛. 煤矿瓦斯气的利用[J]. 山西焦煤科技, 2005(S1): 80-81
- [9] 陈静桃. 炼油厂回收低压瓦斯气体的技术总结[J]. 福建化工, 2003(3): 56-58
- [10] 赵艳荣,王江,季海峰. 煤粉锅炉掺烧瓦斯气技改探讨[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37(8): 96-97
- [11] 齐龙江. 燃气锅炉改造的综合节能技术分析和应用[J]. 当代化工研究, 2020(22): 49-50
- [12] 王进兵. 燃气锅炉掺烧多种尾气的实践[J]. 中氮肥, 2015(6): 52-54
- [13] 李劲,赵惠富. 逆向射流火焰稳定机理的研究[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 1997(6): 504-509
- [14] 周中旭,张三光,胡小峰. 煤气化尾气应用于锅炉掺烧节能技术改造[J]. 纯碱工业, 2024(2): 18-21
- [15] 王春波,秦洪飞. 富氧燃煤锅炉再循环方式对烟气酸露点的影响[J]. 动力工程学报, 2013, 33(10): 765-769+788
- [16] 黄良进. 炼化企业燃油锅炉掺烧干气改造分析与研究[D]. 华南理工大学, 2017
- [17] 张丙凯,黄传林. 炼油化工企业节能降耗技术研究[J]. 山西化工, 2023, 43(3): 181-183
- [18] 刘忠生,王海波,王新,等. 炼化 VOCs 废气处理技术工程实践[C]//中国环境科学学会. 第二十二届大气污染防治技术研讨会论文集. 中国石油化工股份有限公司大连石油化工研究院, 2018: 229
- [19] 马俊. 醇胺法干气脱硫工艺在催化裂化装置上的应用[J]. 炼油与化工, 2016, 27(1): 20-21
- [20] 邓婧婧. 碳市场与绿色金融的协同发展研究[J]. 经济与社会发展研究, 2024(12): 253-256
- [21] 李天宇,杨旗,齐亚东,等. 中国碳排放治理的绿色财政政策研究: 基于异质性电力生产系统的 E-DSGE 模型[J]. 财贸经济, 2024, 45(8): 68-85

# 高速大容量电机的转子屏蔽实现技术

潘晓杰<sup>1</sup> 冯德洋<sup>2</sup> 陈红<sup>2</sup>

1. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 东方电气(德阳)电动机技术有限责任公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 高速大容量负载的直接驱动, 催生了高转速大容量电机的发展。而使用工艺气体冷却(通常工艺气体带有一定的腐蚀性), 又是高转速电机发展的一个重要方向。电机转子因其为高速旋转件, 且金属裸露(尤其是铜件), 暴露在腐蚀环境中, 易被工艺气体腐蚀。由于较大离心力作用, 常规转子屏蔽结构很难直接应用在大容量高转速电机上。针对该类问题, 本文提出一种针对高速大容量电机的转子屏蔽实现技术。

**关键词:** 高速大容量电机; 工艺气体; 转子屏蔽

中图分类号: TM355

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)06-0027-04

## Technology for the Rotor Shielding of High-speed and High-capacity Motors

PAN Xiaojie<sup>1</sup>, FENG Deyang<sup>2</sup>, CHEN Hong<sup>2</sup>

(1. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China;

2. Dongfang Electric (Deyang) Motor Technology Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** The direct drive of high-speed and high-capacity loads has led to the development of high-speed and high-capacity motors. The use of process gas cooling (which usually has a certain degree of corrosiveness) is an important direction for the development of high-speed motors. The rotor of the motor is a high-speed rotating component, and the exposed metal (especially the copper parts) is easily corroded by the corrosive environment. Due to the large centrifugal force, the conventional rotor shielding structure cannot be directly applied to high-capacity high-speed motors. In view of these problems, this paper proposes a rotor shielding implementation technology for high-power high-speed motors.

**Key words:** High-speed and high-capacity motors; process gas; rotor shielding

### 1 概述

高速大容量负载的直接驱动, 催生了高转速大容量电机的发展。而使用工艺气体冷却(通常工艺气体带有一定的腐蚀性), 又是高转速电机发展的一个重要方向。

电机转子因其为高速旋转件, 且金属裸露(尤其是铜件), 暴露在腐蚀环境中, 电机屏蔽的重点在转子。常规转子屏蔽的做法为: 转子装配完成后, 热套耐腐蚀的屏蔽套, 待屏蔽套热套就位后, 采用圆周环焊缝将屏蔽套焊接在两端的护环上。通过该种方式可实现对内部装配件的密封, 实现整体

收稿日期: 2025-04-29

**作者简介:** 潘晓杰(1983—), 男, 2007年毕业于合肥工业大学, 本科, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司主要从事产品工艺方向研究工作。

冯德洋(1989—), 男, 2014年毕业于大连理工大学, 硕士, 高级工程师。现在东方电气(德阳)电动机技术有限责任公司主要从事交直流电动机设计工作。

陈红(1989—), 男, 2016年毕业于西南石油大学, 硕士, 工程师。现在东方电气(德阳)电动机技术有限责任公司主要从事交直流电动机设计工作。

屏蔽。

若该种结构直接应用在大容量高转速电机时,由于较大的离心力作用,屏蔽套中间部分应力较大,存在屏蔽套达到屈服极限出现裂纹或整体撕裂的可能。另外,屏蔽套因其高昂的费用(通常采用精密旋压工艺)也增加了电机整体成本。为适用大容量、高转速的电机需求,本文提出了一种不使用屏蔽套的转子屏蔽结构。一方面,该技术是实现大功率高转速电机(可应用到转速 $>5\,000\text{ r/min}$ ,转子直径 $>500\text{ mm}$ )的转子屏蔽的有效途径;另一方面,从降低成本及实现难度的角度出发,该技术也可扩展应用到常规屏蔽电机转子上。

## 2 技术应用细则

当前,高速电机有着越来越广泛的应用,对于一些大容量、高转速电机,叠片转子通常无法适用于高转速工况。此时,转子形式为转子铁心采用实心结构或转子铁心同转轴一体的实心结构。当大容量、高转速电机需在腐蚀性的环境中(腐蚀性气体或液体)运行时,需对转子进行有效的屏蔽防护,尤其对于转子笼条(常采用纯铜、铜合金或铝合金材质)。

### 2.1 结构形式

相比较而言,转子中的转子笼条(常采用纯铜、铜合金或铝合金材质)较容易腐蚀,若采用实心转子结构,转子铁心可采用耐腐蚀钢材。原理上讲,本文所提及的耐腐蚀处理方法为利用轴本体材料、护环材料与槽口块材料的耐腐蚀,使几者之间形成有效密封,将抗腐蚀较差的转子笼条(常采用纯铜、铜合金或铝合金材质)密封到内部,从而实现应对腐蚀性环境的目的。

如图1所示,序1表示护环,序2表示端环,序3表示转子笼条,序4表示转子铁心(分体或与转轴一体),序5表示槽口块。在装配过程中,将转子铁心同转子笼条、端环、护环装配完成后,将序5槽口块打入,为方便后续工序的实施,槽口块与转子铁心之间采用小紧量配合。待槽口块安装就位后,槽口块与转子铁心形成了沿轴向方向的贯穿接缝。随后采用焊接的方法,沿轴向方向焊接接缝处,从而槽口块和转子铁心之间形成了有效密封,保护内部的转子笼条(铜质或铝质材料)。两端位置,护环

为直角U形结构,上半部分与槽口块及转子铁心相接处沿圆周方向开环形焊接坡口,并沿坡口焊接整圆,将护环、槽口块、转子铁心焊接为一个整体,从而实现用环焊缝的两端密封。护环的下半部分与转轴过盈配合,过盈紧量保证在转子高速旋转状态下,护环与转轴不分离。

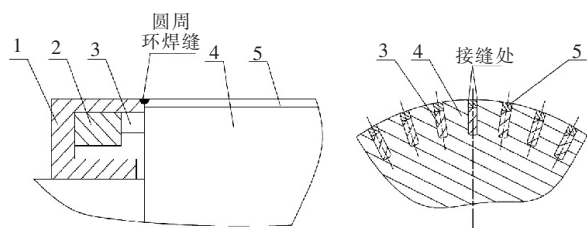


图1 转子屏蔽结构示意图

### 2.2 特殊考虑

考虑热膨胀等因素,在护环与转子铁心搭接的端头处采用特殊的处理方法。端头处护环同槽口块、转子铁心之间的坡口深度小于槽口块的深度。两端的处理上,坡口焊接并不是唯一处理方法,还可以采用其它的焊接型式或采用两端封块后焊接封块。考虑转子笼条(铜或铝)的热胀,护环与转子笼条之间留有膨胀间隙,应对转子笼条与转子铁心之间因膨胀系数的差异造成不同的膨胀长度而使焊缝受力或导致焊缝失效。实现形式上,转子笼条与铁心端面齐平,槽口块长出铁心端面一定的膨胀间隙,该位置处的局部放大如下图2所示。

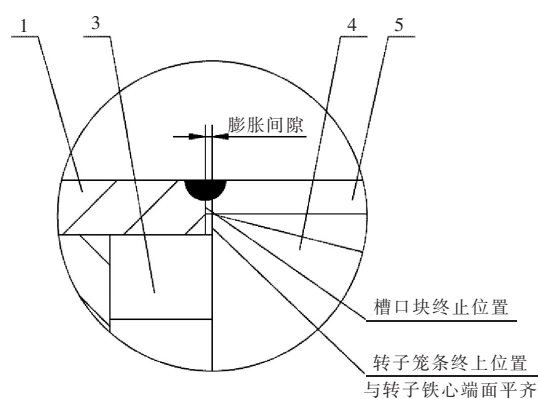


图2 转子护环与转子铁心搭接位置局部视图

很多情况下,工艺气体冷却的高速电机通常采用高压气体。这样,转子外部与护环和转子铁心的空腔之间存在压差。若热套控制的好,护环紧贴槽口块,此时由槽口块承受因压力差产生的力。但由于护环由热态到冷态的过度(特别对于大功率电机

用的大尺寸护环),控制二者之间的严格贴合相对比较困难。此时,外部高压气体压护环从而挤压护环与转子之间环焊缝,使得环焊缝受力。对于该种结构应紧量避免焊缝受力,以免压裂焊缝。为此,本文提出了一种不需严格控制护环与槽口块严格结合,且可避免环焊缝承力的实现方式:热套护环后,护环与槽口块因工艺原因无法紧密贴合,存在微小空隙。此时,在环焊之前配塞块(配塞膨胀系数,护环与转子铁心之间),为保证同样的膨胀系数,配塞块为合金钢(这样护环,槽口块、配塞块有同样的膨胀系数)。配塞块将护环与转子铁心之间塞紧,后将配塞块的一端焊接入环形焊缝内,从而避免了环焊缝受力的可能(配塞块承受因压差产生的力);另一方面配塞块塞入两笼条之间,也不会影响铜条因膨胀系数不同产生的膨胀力的释放。

另,槽口块的形式并不是唯一形式,其它常用的槽口块形式包含斜槽口块(利用斜度打紧),槽口块宽于转子铜条或其它类似型式,举例如图3。在整体密封的实现上采用如上所述相同的处理方式。

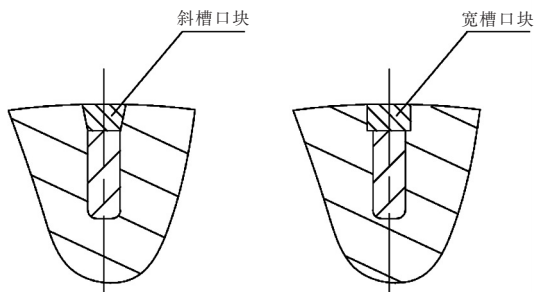


图3 转子槽口块截面示意

### 3 力学分析

#### 3.1 计算方法及评判标准

有限元法作为目前工程应用非常广泛的一种数值计算方法,以其独有的计算优势得到了广泛的发展和应用,并由此产生了一批非常成熟的通用和专业有限元商业软件。随着计算机技术的飞速发展,各种工程软件也得以广泛应用。Ansys 是有限元法非常具有代表性的软件,本文计算方法采用有限单元法,并通过 Ansys Workbench 进行有限元建模仿真分析。

根据 ASME 标准给出了一些用有限元法计算应力的限制,并将应力分类如下: $P_m$ ——一次薄膜应力;

$P_1$ ——一次局部应力; $P_b$ ——一次弯曲应力; $Q$ ——一次薄膜应力+不连续的弯曲应力;设计的参考许用应力为:

$$S_m = \text{MIN}\left(\frac{\sigma_b}{3}, \frac{2}{3}\sigma_s\right) \quad (1)$$

不同应力类型的许用应力:

$$P_m < S_m, P_1 + P_b < 1.5S_m, P_1 + P_b + Q < 3.0S_m \quad (2)$$

#### 3.2 分析案例

基于所提的应用技术,进行必要的受力分析,受力分析举例如下:

举例考虑转子屏蔽结构应用环境包含:高转速、温差大和气体压差大等环境,且同时考虑护环的结构强度和密封性能,应用工况非常复杂。

首先根据电机高转速、气压差等工况,进行转子屏蔽结构的针对设计,创建三维数模,选取圆周局部模型进行有限元网格划分。

其次,考虑高转速工况条件,需充分考虑护环的强度和密封性能,重点分析确定护环与转子间的过盈配合紧量,在满足护环强度的前提下确保转子屏蔽结构的可靠性,分析模型及结果如图4所示。

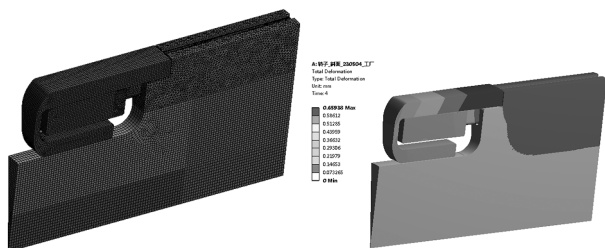


图4 转子端部有限元网格

如图5所示,针对温度差异和气体压差,还应进行相关力学分析。此时需分别重点关注护环与轴、护环与端环及铜条间的接触状态,设计合适的配合过盈量,确保存在温差和气体压差的工况下,端环和转子笼条有合适的热膨胀量,同时不影响护环的强度和密封性能。

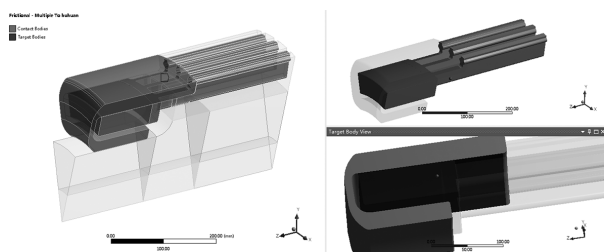


图5 转子端部结构综合位移云图

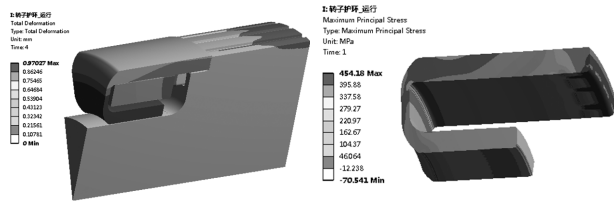


图6 转子端部有限元模型接触面设置

为确保槽口块和转子铁心之间形成有效密封,槽口块与转子铁心沿轴向方向的贯穿接缝,采用焊接的方式,沿轴向方向焊接接缝处。如图7所示,创建槽口块仿真分析模型,针对焊缝进行力学分析。

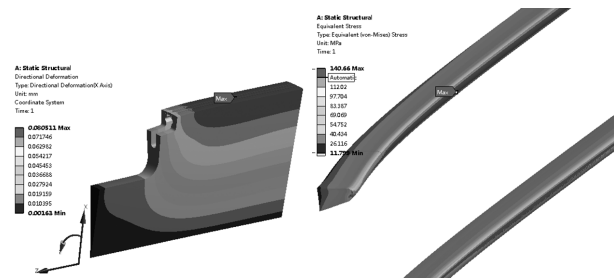


图7 转子端部和护环综合位移云图

综上,通过力学分析,在分析明确护环和槽口块结构尺寸,以及护环分别与转轴、端环和铜条间的接触过盈量后,该技术能在高转速、大温差和高气压差等综合、复杂工况下,满足转子屏蔽性能和结构强度要求。

## 4 结语

高速大容量负载直接驱动,催生了大功率高转速电机的发展。而使用工艺气体冷却(通常工艺气体带有一定的腐蚀性),又使高转速电机发展的一个重要方向。定子因其采用VPI浸漆实现方式,可应对常规腐蚀性环境,整机屏蔽的实现重点就在电机转子上。

本文针对高速大容量电机的转子屏蔽实现方式给出解决途径,为该类型的电机转子屏蔽给出了解决方案。一方面,该种方式是实现大功率高转速电机(可应用到转速 $>5\,000\text{ r/min}$ ,转子直径 $>900\text{ mm}$ )的转子屏蔽的有效途径。另一方面,从降低成本及实现难度的角度出发,所提技术可扩展应用到常规屏蔽电机转子上。

## 参考文献:

- [1] 汤蕴璆. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,2014
- [2] 崔岩,张立文,张驰,等. 核主泵转子屏蔽套真空热胀形原理及技术[J]. 精密成形工程,2021,13(1):105-110
- [3] 郑印钊. 实心转子屏蔽感应电机动态起动特性研究[D]. 华中科技大学,2020
- [4] 蔺旭东,张振,徐腾蛟. 400 MW 蒸发冷却水轮发电机定子带绕组整体吊装技术应用[J]. 水电与抽水蓄能,2023,9(6):47-51

# 水泵水轮机自动化元件配置方案概述

闫浩

东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**抽水蓄能机组的水泵水轮机及其辅助设备需要设置各类检测自动化元件,这些自动化元件采集各部位的状态参数反馈给控制设备和监控系统,是保障机组安全稳定运行的重要组成部分。国家、行业等相关标准对水泵水轮机自动化元件的配置做出了基本规定和要求,在工程中,工程经验也是重要的技术参考和指导。本文综合相关标准和工程实践经验总结归纳自动化元件配置方案,详述各自动化元件的应用场景,分析讨论各配置方案特点并提出可优化点,其中的部分内容可以作为应用的思路和参考。

**关键词:**抽水蓄能;水泵水轮机;自动化元件

中图分类号:TM312.1

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0031-06

## Overview of The Configuration Scheme for Automation Components of Pump Turbine

YAN Hao

(Dongfang Electric Autocontrol Engineering Co., Ltd, 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** The pump-turbine and its auxiliary equipment of the pumped storage unit need to be equipped with various detection automation components. These automation components collect the status parameters of each part and feed them back to the control equipment and monitoring system, which is an important part to ensure the safe and stable operation of the unit. Relevant national and industry standards have made basic regulations and requirements for the configuration of automation components for pump-turbine. In engineering projects, engineering experience is also an important technical reference and guidance. This article summarizes and generalizes the configuration scheme for automation components based on relevant standards and engineering practice experience, details the application scenarios of each automation component, analyzes and discusses the characteristics of each configuration scheme and puts forward optimization points. Some of the content can be used as ideas and references for application.

**Key words:** pumped storage; pump-turbine; automation components

抽水蓄能机组的水泵水轮机及其辅助设备需要设置各类检测自动化元件,采集各部位的状态参数反馈给控制设备和监控系统,控制设备和监控系统根据这些检测信号以及机组的各种工况进行综合判断,控制和保护机组整体的安全稳定运行。这些自动化元件用于包括压力、温度、流量、液位、位移和其他非电量的测量和采集,所获得的模拟量和

开关量在多维度上实时反馈水泵水轮机及其辅助设备各部位的状态,为控制设备和监控系统提供基本的数据支持。水泵水轮机及其辅助设备需根据其测量和控制要求配置不同的检测方案,检测参数类型和数量也要根据不同部位的状态判断和冗余要求进行相应调整。根据相关国家、行业标准和多个抽水蓄能机组的实际项目执行经验,以水泵水轮

收稿日期:2025-08-21

**作者简介:**闫浩(1988—),男,2011年毕业于北京航空航天大学自动化(自动控制与信息技术)专业,本科,工程师。现任职于东方电气自动控制工程有限公司设计工程师,主要从事水轮发电机组自动化系统设计工作。

机及其辅助设备不同子系统的自动化元件配置方案为研究对象,展开说明各自动化元件配置方案的具体内容和特点,归纳总结现有方案的基础上阐明可以优化的方向。

## 1 水泵水轮机自动化元件

### 1.1 水力测量自动化元件

水力测量自动化元件用于测量蜗壳、座环、顶盖、转轮室、底环和尾水管即机组流道中的压力和差压,通常从测量取源点用引压管至水泵水轮机现地仪表盘。自动化元件主要包括:用于现地显示的压力表和输出 DC 4 mA ~ 20 mA 模拟量的压力、差压变送器。

配置方案的具体内容为:

- 1) 蜗壳进口压力表:1 只;
- 2) 蜗壳进口压力变送器:1 只;
- 3) 蜗壳进口压力脉动变送器:2 只;
- 4) 蜗壳末端压力表:1 只;
- 5) 固定导叶与活动导叶间压力脉动变送器:1 只;
- 6) 转轮与活动导叶间压力表:2 只;
- 7) 转轮与活动导叶间压力变送器:2 只;
- 8) 转轮与活动导叶间压力脉动变送器:2 只;
- 9) 转轮与顶盖间压力表:1 只;
- 10) 转轮与顶盖间压力变送器:1 只;
- 11) 转轮与顶盖间压力脉动变送器:1 只;
- 12) 转轮与底环间压力表:1 只;
- 13) 转轮与底环间压力变送器:1 只;
- 14) 转轮与底环间压力脉动变送器:1 只;
- 15) 上止漏环前压力表:1 只;
- 16) 上止漏环前压力变送器:1 只;
- 17) 上止漏环后压力表:1 只;
- 18) 上止漏环后压力变送器:1 只;
- 19) 下止漏环前压力表:1 只;
- 20) 下止漏环前压力变送器:1 只;
- 21) 尾水管进口压力表:1 只;
- 22) 尾水管进口压力变送器:1 只;
- 23) 尾水管进口压力脉动变送器:2 只;
- 24) 尾水肘管进口压力表:1 只;
- 25) 尾水肘管中部压力表:1 只;

- 26) 尾水肘管出口压力表:1 只;
- 27) 尾水肘管压力变送器:1 只;
- 28) 尾水肘管压力脉动变送器:1 只;
- 29) 尾水管出口压力表:1 只;
- 30) 尾水管出口压力变送器:1 只;
- 31) 尾水管扩散段压力表:1 只;
- 32) 尾水管扩散段压力变送器:1 只;
- 33) 蜗壳测流量差压变送器:1 只;
- 34) 尾水管测流量差压变送器:1 只;
- 35) 水头(扬程)差压变送器:1 只;
- 36) 流量水头仪:2 台。

通过配置内容可以看出,对同一压力测点同时设置了压力表和压力变送器,这样既能够在现地仪表盘显示该测点压力,又具备模拟量信号采集能力,可以供监控系统对机组段流道内压力的实时分布情况进行监测。在相关标准要求的测点外增加的尾水肘管进口、中部、出口测点,能更详细的反应尾水管内压力的分布情况。丰富的测点数据既能监测水泵水轮机的运行状态,又能为评估水泵水轮机性能、设计和安装技术水平提供数据支持。

测量水轮机工况机组流量、水泵工况机组流量和水头(扬程)的差压变送器,其输出的模拟量信号通常传送至用于测量机组流量和水头的流量水头仪,它通过接收以上变送器信号和有功功率变送器信号经过计算后,输出瞬时流量、工作水头、机组效率、耗水率对应的 DC 4 mA ~ 20 mA 模拟量信号至监控系统。流量水头仪共两台,其中一台用于水轮机工况测量、另一台用于水泵工况测量,两台仪器安装在属于水泵水轮机辅助设备控制装置的仪表柜内。

### 1.2 顶盖水位测量和排水系统自动化元件

顶盖水位测量自动化元件用于测量顶盖积水位,输出水位监测信号至控制顶盖排水泵启停的控制装置和监控系统。自动化元件主要包括:输出开关量的液位开关和输出 DC 4 mA ~ 20 mA 模拟量的液位变送器。

配置方案的具体内容为:

- 1) 顶盖水位液位变送器:1 只;
- 2) 顶盖水位液位开关:4 只。

本方案中液位开关 4 只,所设液位从低到高依

次为：“低液位”、“高液位”、“过高液位”和“事故报警液位”。通常顶盖排水泵为双泵组合，一主一备，根据控制顶盖排水泵启停的控制装置所需液位信号分为：“低液位”对应停泵信号，“高液位”对应启主泵信号，“过高液位”对应启备泵信号，“事故报警液位”对应机械事故报警信号。<sup>[1]</sup>液位开关可以选择浮子开关或连杆浮球液位开关，实际应用中，浮子开关方案应用较多且发生机械卡阻的故障概率较低。

液位变送器输出模拟量至顶盖排水泵启停控制装置和监控系统，实时监测顶盖积水位，同时也能够作为判据，参与排水泵的启停控制。液位变送器可以选择压力式液位变送器且应用较多，也可以选择连杆浮球液位变送器。

顶盖水位测量自动化元件是顶盖排水系统的重要组成部分，除了液位开关和液位变送器外，排水系统中还可以在各顶盖排水泵的排水管路上加装流量开关，将开关量信号作为排水泵工作状态的反馈信号输送至顶盖排水泵启停控制装置，参与顶盖排水系统控制流程。

### 1.3 尾水管水位测量自动化元件

尾水管水位测量自动化元件用于测量调相水位，输出水位监测信号至控制调相水位的控制装置和监控系统。控制装置和监控系统根据该监测信号和机组在不同工况下对调相水位的要求，控制充气压水和回水排气相关阀门。自动化元件主要包括：输出开关量的液位开关和输出 DC 4 mA~20 mA 模拟量的液位变送器。

配置方案的具体内容为：

- 1) 尾水管水位液位变送器:1 只;
- 2) 尾水管水位液位开关:4 只。

本方案中液位开关 4 只，所设液位从低到高依次为：“过低液位”、“低液位”、“补气液位”和“高液位”。液位信号的对应含义为：“过低液位”对应尾水管水位过低报警液位，“低液位”对应停止补气液位，“补气液位”对应开启补气液位，“高液位”对应停止充气液位。液位开关量信号传送至控制调相压水系统工作的控制装置和监控系统，结合机组运行工况转换的要求，控制充气压水阀门、补气压水阀门、尾水管回水排气阀门、蜗壳回水排气

阀门、顶盖回水排气阀门和止漏环供水阀门的启闭，进而控制尾水管水位即调相水位，使调相水位始终按要求保持在规定的范围之内。液位开关可以选择音叉开关、超声波液位开关、与磁翻柱液位计配套使用的磁性开关，其中音叉开关和磁性开关应用较多，音叉开关和超声波液位开关应用效果较好。

液位变送器输出模拟量至调相压水控制装置和监控系统，实时监测调相水位，同时也能够作为判据，参与调相压水系统的控制。液位变送器可以选择导波雷达液位计和与磁翻柱液位计配套使用的液位变送器，选用导波雷达液位计避免了磁翻柱液位计在长期运行中水位剧烈变化时，可能产生的磁浮子机械卡阻问题的发生，相较之下导波雷达液位计的应用效果更好。

### 1.4 导叶及接力器位置测量自动化元件

导叶及接力器位置测量自动化元件用于测量导叶接力器行程位置，进而反映导叶开度，在导叶接力器全行程内特定位置设置开关量输出点，反馈导叶位置状态；也用于监测导叶接力器锁锭的工作状态和反馈导叶卡阻报警信号的用途。自动化元件主要包括：输出开关量的位置开关和输出 DC 4 mA~20 mA 模拟量的位移变送器(图 1)。

配置方案的具体内容为：

- 1) 导叶接力器位移变送器:2 只;
- 2) 导叶位置开关:6 只;
- 3) 导叶接力器锁锭位置开关:4 只;
- 4) 剪断销信号器及报警装置:1 套;
- 5) 导叶卡阻位置开关及报警装置:1 套。

位移变送器输出模拟量信号至监控系统，用于实时监测导叶接力器行程。该位移变送器可以选择磁致伸缩线性位移传感器或拉线式位移传感器。位置开关选用叉型摇杆、非自动返回式、左右双向触发的限位开关，位置开关的分配方式为：导叶全关 3 只、水泵最小开度 1 只、空载以下 1 只、导叶全开 1 只；位置开关还可以增加 2 只，分别用于空载以上 1 只、导叶 45%开度 1 只。这些位置开关量信号根据需要传送至监控系统、调速器系统和机械制动控制系统作为各自控制流程的状态判据。

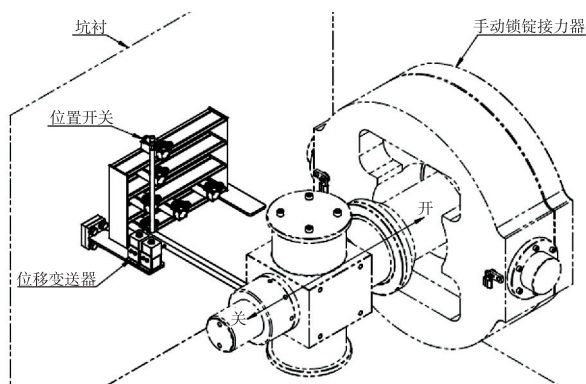


图1 导叶接力器位置测量自动化元件安装示意图

导叶接力器锁锭位置开关分别设置在液压锁锭、手动锁锭投入和退出位置,向监控系统反馈锁锭状态。

剪断销信号器和导叶卡阻位置开关根据导水机构的机械结构选择应用,每个活动导叶配置一个剪断销信号器或位置开关,两种元件通常仅配置一类,不同时使用。正常情况下,剪断销信号器输出常闭信号,导叶卡阻位置开关输出常开信号。对应信号元件同时配置剪断销报警装置或导叶卡阻报警装置,该装置安装在仪表柜内,能够收集全部信号元件的开关量,输出剪断销剪断或导叶卡阻的综合报警信号并能够现地显示发生该故障的导叶编号。

### 1.5 主轴密封测量自动化元件

主轴密封测量自动化元件用于测量主轴密封磨损量。自动化元件为输出 DC 4 mA ~ 20 mA 模拟量的位移变送器。

配置方案的具体内容为:

- 1) 主轴密封磨损位移变送器:1 只。

配置 1 只位移变送器,能够实时、持续的监测主轴密封磨损量的变化,也是监测的最低要求。根据机组运行工况等各种运行状态参数与长期记录的磨损量数据的变化,综合研判机组的运行参数对主轴密封磨损情况的影响,能够为检修和维护提供数据支持,优化运维流程。

该位移变送器可以选择电感式传感器或者导轨式磁致伸缩线性位移传感器,电感式传感器应用较多且安装条件相对简单。

### 1.6 水导油槽测量自动化元件

水导油槽测量自动化元件用于测量水导油槽

内油位、油槽底部油液含水量、水导轴瓦温度 and 油液温度。自动化元件主要包括:输出开关量的液位开关、输出 DC 4 mA ~ 20 mA 模拟量的液位变送器、具有数显功能和输出 DC 4 mA ~ 20 mA 模拟量的油混水信号器以及测温 RTD。

配置方案的具体内容为:

- 1) 水导油槽磁翻柱液位计:1 只;
- 2) 水导油槽液位开关:4 只;
- 3) 水导油槽液位变送器:1 只;
- 4) 水导轴瓦瓦温 RTD:1 套;
- 5) 水导油槽油温 RTD:2 只;
- 6) 水导油槽油混水信号器:1 只。

工程项目中通常设置一只顶装式磁翻柱液位计,安装于水导油槽盖板处,该液位计配套有液位开关和液位变送器,这样不仅具有现地显示能力,同时可以输出开关量和模拟量用于监测和控制。测量油槽内油位的液位开关根据整定值在正常运行液位以上设置两只,分别为液位高和液位过高;在正常运行液位以下设置两只,分别为液位低和液位过低。四只液位开关分两个报警层级监测油槽内油位,在油位超出正常油位范围时,发出油位异常的报警信号。

液位变送器输出模拟量信号,实时监测油位状态。通常液位开关和液位变送器都与磁翻柱液位计配套使用,液位开关采用磁性干簧原理,液位变送器采用磁性干簧电阻链或磁致伸缩原理。液位开关通过可调结构安装在磁翻柱液位计的外壳上,液位变送器安装在磁翻柱液位计外壳的固定位置上。

在本方案中也可以另采用 1 只液位变送器替代 4 只液位开关,通过两只液位变送器输出的模拟量信号与整定值做比较判断油槽内油位状态。由于与磁翻柱液位计配套的液位变送器通常采用磁性原理,因此另一只液位变送器可以选用压力式液位变送器或杆式导波雷达液位计,不同测量原理的传感器增加了测量的抗干扰裕度,实现了测量的多样冗余。

测量水导轴瓦瓦温和水导油槽油温的 RTD 选用 Pt100 铂热电阻 ( $\alpha = 3.851 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )。每片水导轴瓦配置两只瓦温测量 RTD,油槽内两只油温测

量 RTD 分别安装在供油口和排油口附近。

油混水信号器既能够显示油中水的含量比(容器中水的体积与油的体积之比),又能够输出模拟量信号,其显示值和 4 mA~20 mA 模拟量输出值与油中混水量在 0~10 % 范围内成正比。

## 2 水泵水轮机辅助设备自动化元件

### 2.1 水导轴承润滑油冷却系统自动化元件

水导轴承润滑油冷却系统自动化元件用于测量冷却器循环冷却水的压力、流量和温度;如果冷却器外置,还要测量冷却装置油路上油泵出口压力和油的压力、流量和温度。自动化元件主要包括:输出开关量的压力开关和流量开关、输出 DC 4 mA~20 mA 模拟量的压力变送器和流量计、现地显示的压力表和温度计(图 2)。

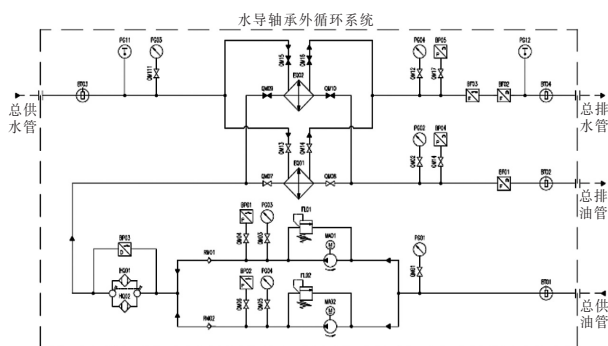


图 2 水导外循环自动化元件系统图

配置方案的具体内容为:

- 1) 水导外循环油压力表:1 套;
- 2) 水导外循环油泵出口压力表:1 套;
- 3) 水导外循环油泵出口压力开关:1 套;
- 4) 水导外循环油压力变送器:1 只;
- 5) 水导外循环油流量计:1 只;
- 6) 水导外循环冷却水压力表:1 套;
- 7) 水导外循环冷却水压力变送器:1 只;
- 8) 水导外循环冷却水流量开关:1 只;
- 9) 水导外循环冷却水流量计:1 只;
- 10) 水导外循环冷却水温度计:2 只;
- 11) 水导外循环油温 RTD:2 只;
- 12) 水导外循环水温 RTD:2 只。

该方案面向水导轴承润滑油外冷方式,即冷却器在水导油槽外部,通过油循环管路和冷却水循环管路,在外部冷却器实现油-水的热量交换。由于抽

水蓄能机组转速高、出力大,对水导轴瓦冷却要求较高,受水导油槽尺寸限制,满足冷却要求的冷却器无法放置在水导油槽内部,因此水导轴承润滑油都采用外冷方式。

水导外循环装置在油、水两循环管路上配置丰富的检测元件,水导外循环油泵采用 100 % 冗余设计,每个油泵出口配置 1 只压力表和 1 只压力开关,压力开关输出开关量信号至控制水导外循环装置的现地控制柜,作为油泵启停状态的反馈信号参与控制流程。水导外循环装置排油总管流量计、压力变送器、压力表监测循环油流状态,流量计输出模拟量信号的同时能够输出开关量信号用于流量低报警,该流量计一般选用孔板流量计或涡轮流量计。压力变送器和流量计输出的信号一起,综合判断水导外循环装置总管油流状态。供、排油总管分别安装 1 只测温 RTD,监测油温。

在水循环管路上,冷却水供水总管和排水总管各配置 1 只压力表和 1 只温度计,现地显示供排水压力和温度。供水总管安装 1 只压力变送器,输出模拟量信号至监控系统,监测水导外循环装置冷却水供水压力。排水总管安装 1 只流量计和 1 只流量开关,流量计输出模拟量信号至监控系统实时监测冷却水流量,流量开关输出开关量信号用于流量低报警至监控系统。压力、流量传感器和安装在供、排水总管的测温 RTD 一起监测水导外循环装置冷却水的综合状态。

### 2.2 主轴密封水系统自动化元件

主轴密封水自动化元件用于测量主轴密封水供水管路中水的压力、流量和温度。自动化元件主要包括:输出开关量的压力开关和流量开关、输出 DC 4 mA~20 mA 模拟量的流量计、现地显示的压力表和温度计。

配置方案的具体内容为:

- 1) 主轴密封水压力表:1 套;
- 2) 主轴密封水压力开关:1 套;
- 3) 主轴密封水压力变送器:1 只;
- 4) 主轴密封水流量开关:1 只;
- 5) 主轴密封水流量计:1 只;
- 6) 主轴密封水温度计:1 只。

该方案对主轴密封水的状态监测较为全面,压

力表和温度计能够现地显示供水压力和温度,流量开关和流量计反馈主轴密封水的通流状态,压力变送器和流量计输出模拟量信号至监控系统实时监测压力和流量变化。根据主轴密封水水源和供水品质的要求,有些情况下需要使用水过滤器和增压泵,此时在冗余配置的各增压泵进口加装压力表,出口加装压力表和压力开关。增压泵出口压力开关和主轴密封供水装置排水总管的流量开关输出的开关量信号,共同发送至监控系统或控制主轴密封供水装置的控制设备,作为监测和控制的反馈信号,实现主轴密封水主、备用水源切换,主、备用增压泵切换等控制能力。

### 2.3 上下止漏环冷却水系统自动化元件

上下止漏环冷却水自动化元件用于测量上下止漏环冷却水供水管路中水的压力和流量。自动化元件主要包括:输出开关量的流量开关、输出 DC 4 mA ~ 20 mA 模拟量的流量计和压力变送器、现地显示的压力表。

配置方案的具体内容为:

- 1) 止漏环冷却水供水管压力表:1 只;
- 2) 上止漏环冷却水压力表:1 只;
- 3) 下止漏环冷却水压力表:1 只;
- 4) 上止漏环冷却水压力变送器:1 只;
- 5) 下止漏环冷却水压力变送器:1 只;
- 6) 上止漏环冷却水流量开关:1 只;
- 7) 下止漏环冷却水流量开关:1 只;
- 8) 上止漏环冷却水流量计:1 只;
- 9) 下止漏环冷却水流量计:1 只。

本方案全面监测上下止漏环冷却水供水管路中水的压力和流量。供水总管压力表可以显示水源压力,在经过水过滤器后将分为两个支路,分别为上止漏环和下止漏环提供冷却水。各支路流量开关和流量计反馈冷却水的通流状态,压力变送器和流量计输出模拟量信号至监控系统实时监测压力和流量变化。

在以上各子系统的配置方案中,测水流量的流量计选用电磁流量计,流量开关通常选用热导式流量开关,测量探头部分的防结垢涂层,可以延长检修和维护周期。当监测一种非电量需要自动化元件的输出信号既包括模拟量又包括开关量的时候,一般同时设置测量变送器和开关。现有的测量仪器具有能够同时输出模拟量和开关量的产品,因此为满足信号的输出要求,可以选择此类测量仪器代替变送器和开关两类仪器的组合。这样有利于减少测量系统故障率,节约测量成本,但由于同一传感器的测量原理是单一的,因此会失去测量的多样冗余。

在工程中,要同时考虑经济性、可靠性等多种复杂的限制条件,可以从系统的故障和冗余、测量和控制等多方面决定自动化元件的具体配置方案,不局限于单一或部分的优越,而是追求系统整体性能的提升。

## 3 结语

通过以上对各子系统自动化元件配置的描述和分析,可以得知,在实际工程应用中自动化元件的配置较为丰富和多样,在满足状态可读的基础上,更能满足控制和监测对于反馈信号和采集系统状态数据的要求。各子系统整理的配置方案既是应用的需求,也是经验的总结和优化成果。所有自动化元件共同组成了保障水泵水轮机安全和稳定运行的庞大监测网络,向监控和保护系统提供海量的数据支撑,是机组状态数字化描述的基元。在未来的工程实践中,更多智能化传感器的选择和应用,是机组以至电站智能化不可或缺的根基。

### 参考文献:

- [1] 闫浩,马莹. 水轮发电机组顶盖排水控制系统设计[J]. 东方电气评论,2024,38(6):37-39

# 灯泡贯流式水轮机转轮室磨蚀修复研究

陈胜 韦天鹏 何小椅 葛明凯

国家电投集团贵州金元股份有限公司, 贵阳 550000

**摘要:**为解决多泥沙水电站灯泡贯流式水轮机转轮室的磨蚀问题,本文以某灯泡贯流式水电站3次C级检查性小修为例,对贯流机组转轮室的磨蚀修复分别采用堆焊法修复和 Belzona1311 高分子材料修复,并对修复后的转轮室在一定运行周期内的破坏情况进行分析,探寻低水头水电站贯流式机组转轮室的破坏修复方法,为同类型水电站的安全稳定运行提供参考依据。

**关键词:**贯流式水轮机;转轮室;磨蚀

中图分类号:TH311

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0037-04

## Research on Abrasion Repair of the Runner Chamber in Bulb Tubular Turbine

CHEN Sheng, WEI Tianpeng, HE Xiaoyi, GE Mingkai

(National Electric Power Investment Group, Guizhou Jinyuan Co., Ltd, 550000, Guiyang, China)

**Abstract:** In order to solve the erosion problem of the runner chamber in bulb tubular turbines of hydropower stations with high sediment content, this paper takes the third C-level inspection and minor repair of a certain bulb tubular hydropower station as an example. Two methods, namely surfacing welding and Belzona 1311 polymer material repair, were adopted to repair the erosion of the runner chamber of the tubular unit. The damage conditions of the repaired runner chamber within a certain operation cycle were analyzed to explore the repair methods for the runner chamber of low-head tubular units in hydropower stations, providing a reference basis for the safe and stable operation of similar hydropower stations.

**Key words:** tubular turbine; runner chamber; abrasion

为解决全球气候变化日益加剧,实现从化石燃料向清洁能源转变的过程,具有水力性能好、机组结构紧凑等优点的灯泡贯流式水轮机机组广泛用于大流量、低水头水力资源开发的水电站。而转轮室是该类机组的主要过流部件,是转轮进行能量转换的重要场所,在多泥沙河流长期运行中,由于过流造成的卡门涡带、窄缝射流、压力脉动等不利因素,时常出现渗漏、焊缝开裂以及严重磨蚀破坏等现象,使材料的强度下降,影响机组的安全稳定运行。

在国外,Changya Yan<sup>[1]</sup>研究提出了一种能同时处理涡轮叶片磨损、裂纹、材料缺失、变形等多种损伤因素的涡轮叶片模型重建策略。Irene Alfred<sup>[2]</sup>在

文章中提出了两种修复镍基组件的新方法。混合钎焊工艺包括修复涂层、镍基填料、NiCoCrAlY 和铝层,然后进行热喷涂、热处理、联合钎焊和铝化工艺,大大地缩短了修复过程。在国内,由于许多水电站机组的泥沙磨损与空蚀破坏相当严重,因而在这方面进行了大量的研究工作。刘小兵<sup>[3]</sup>通过固液两相流机理的研究,对  $k-\epsilon$  双方程湍流模型和含浓度参数的 Lagrangian 颗粒运动方程进行了丰富和完善,为水轮机的磨蚀研究提供了理论基础;梁武科等<sup>[4]</sup>在研究碳钢、不锈钢等不同材料在不同含沙量、不同流速中的抗磨特性的基础上,通过电镜扫描的方法对水轮机的磨蚀部位进行了研究,从微观上探讨了水轮机磨蚀破坏的机理。朱玉峰等<sup>[5]</sup>把

收稿日期:2025-03-19

作者简介:陈胜(1971—),男,毕业于南昌工程学院电力系统及其自协化专业,工程师,主要从事水电厂运行维护管理工作。

表面粘涂技术、热喷涂技术等表面修复技术应用在水轮机的过流部件表面防护中,并对水轮机过流部件表面修复的新工艺、新技术等进行了展望。解建军等<sup>[6]</sup>对我国近年来关于水轮机泥沙磨损与空蚀的研究成果及防护措施、修复技术进行了分析总结,从三个方面提出防护措施,以及对过流部件中易产生磨蚀的部位采用高抗磨蚀材料进行替换的措施等,对黄河流域的高水头多泥沙水电站水轮机的经济效益、安全稳定运行等起到了指导作用。徐洪泉等<sup>[7]</sup>通过对贯流式水轮机原、模型尾水管压力脉动和真机振动的频率特性进行研究,指出1倍、2倍或3倍叶片通过频率压力脉动产生于叶片内、外侧端面间隙空化。吴玉萍等<sup>[8]</sup>对抗空蚀材料进行了研究,并对目前抗空蚀新材料的应用进行了相应的总结,指出抗空蚀新材料包括金属及非金属涂层材料等。孟安波等<sup>[9]</sup>通过磨蚀特性的分析,并结合水轮机磨蚀破坏原理,给出了水轮机过流部件表面防护的方法和措施。葛新峰等<sup>[10]</sup>采用CFD技术,使用 $k-\varepsilon$ 双湍流模型,拉格朗日颗粒跟踪模型和Tabakoff and Grant磨损模型对低水头灯泡贯流式水轮机进行了固液两相流数值模拟计算,得到的结论是:叶片正面进水侧头部、叶片出水边、叶片轮缘和转轮室都是容易受到磨损的部位;在水流中,泥沙颗粒浓度、沙粒直径与导叶、叶片及转轮室的磨损面积和磨损程度成正相关,叶片和转轮室的磨损程度比导叶更为严重。苟维杰等<sup>[11]</sup>分析了水轮机叶片空蚀修复的技术要求,并在试验中以马氏体不锈钢水轮机叶片作为基体材料,采用熔滴高速摄影技术,研究了不同焊接工艺、不同焊接参数对立焊焊缝成形的影响。

而灯泡贯流式水轮机在汛期时常在低水头运行,转轮室长期在空蚀系数较大的区域运行,当转轮室过流面材质抗空蚀性能差时,其空蚀情况越严重。因此本文对磨蚀破坏的灯泡贯流式水轮机转轮室的修复技术进行研究,探寻低水头水电站贯流式机组转轮室的破坏修复方法,为同类型水电站的安全稳定运行提供参考依据。

### 1 堆焊法在转轮室磨蚀修复中的应用

本文以某水电站( $D_1=6\text{ m}$ )的三台灯泡贯流式

机组分别于2015年至2017年3次C级检查性小修为例,分析目前贯流机组的转轮室在磨蚀破坏后采用堆焊法进行修复及修复后运行一个周期后转轮室的磨蚀破坏现状。堆焊法修复中,首先对转轮室的磨蚀部位进行打磨和清洗,再对磨蚀部位进行相应的气刨、打磨和焊接,并对焊接完成后的堆焊部位进行粗磨、精磨,最后进行探伤检查,完成堆焊修复。

#### 1.1 2015年度检修修复

2015年3台机组在进行C级检修时,每台机组的累计运行时间分别如表1所示。停机检修时发现3台机组的转轮室在不同的部位分别出现不同程度的磨蚀。

表1 每台机组累计运行时间

机组编号	1#	2#	3#
运行时间(h)	13 981	13 286.4	11 721.4

其中,1#机组转轮室的磨蚀呈零星分布,在圆周方向上受到磨蚀的总长约2.52 m,宽度大约11 cm,磨蚀严重处的最大深度达到3.1 mm,如图1(a)所示;2#机组因受电站负荷调节影响,磨蚀破坏最严重,主要发生在转轮室的上半圆与叶片进、出水边

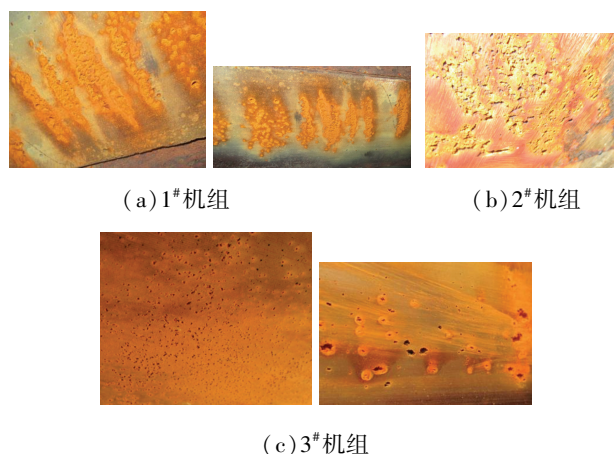


图1 2015年机组C修时转轮室磨蚀破坏

对应的部位,严重处的最大磨蚀深度为4.2 mm,在局部区域出现部分坑槽,同时在转轮叶片出水边对应的转轮室区域呈现大片蜂窝麻面,其宽度达到223 mm,总的破坏长度约5 050 mm,蜂窝麻面的平均深度约2.1 mm,如图1(b)所示;3#机组在+Y方向磨蚀严重,磨蚀深度约2~3 mm,局部出现坑槽现象,如图1(c)所示。在对转轮室的磨蚀修复中,对磨蚀破坏区域均采用堆焊法进行修复。

### 1.2 2016 年度检修修复

2016 年又对 3 台机组进行了 C 级检修,再次发现各转轮室在 2015 年未修复的部位均出现不同程度磨蚀破坏。其中,1# 机组的破坏主要发生在转轮室的上半圆部分,磨蚀破坏总面积大约为 1.52 m<sup>2</sup>、其最大破坏深度约为 3.1 mm,破坏结果如图 2(a) 所示;2# 机组的破坏主要位于转轮室的正上方,总的破坏面积约为 4.2 m<sup>2</sup>,最严重处的深度达到 2.2 mm,如图 2(b) 所示;3# 机组的磨蚀破坏主要以蜂窝麻面为主,其总面积约 0.582 m<sup>2</sup>,最严重处的深度达到 3.1 mm,基本分布在转轮室的上半圆部分,破坏结果如图 2(c) 所示。2016 年在进行转轮室磨蚀修复时,为了进行对比,还是采用了 2015 年相同的修复处理技术和方法。

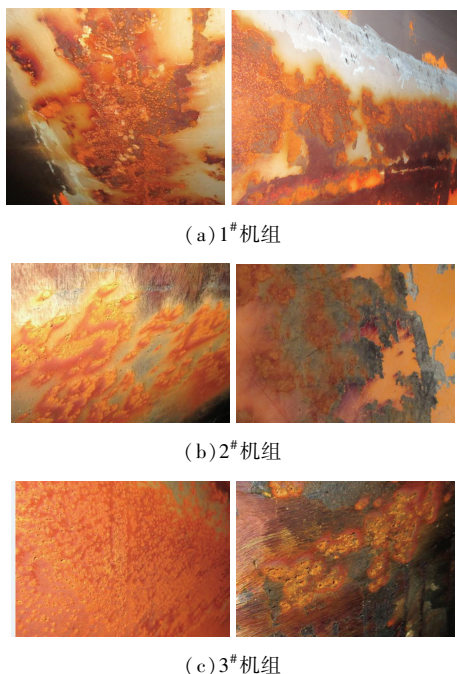


图 2 2016 年机组 C 修时转轮室磨蚀破坏

### 1.3 2017 年度检修修复

2017 年进行 C 级检修时,3# 机组的转轮室在 X 方向和 +Y 方向还是存在一定的磨蚀破坏,其圆周上的磨蚀破坏总长约 1.0 m,最大宽度约 10 cm,其中最严重磨蚀处的深度为 2.5 mm,具体破坏情况如图 3 所示。与上年的检修结果对比可知,转轮室修复区域的磨蚀有所减缓。因此该转轮室在 2017 年进行修复时采用了 Belzona 涂料对焊接修复后的转轮室在水轮机转轮运行范围所对应的区域进行了喷涂处理(图 4),达到改善磨蚀破坏的目的。

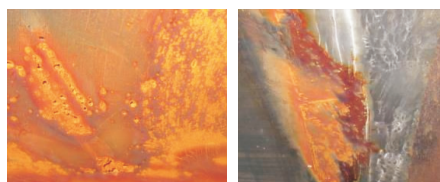


图 3 2017 年 3# 机组 C 修时转轮室磨蚀破坏

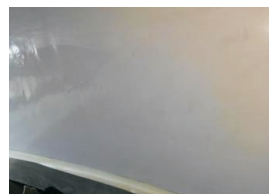


图 4 3# 机组转轮室 Belzona 涂料修复结果

图 5 表示 3# 机组在 2019 年进行 C 级修时转轮室的磨蚀破坏。由图 5 可知:采用 Belzona 材料修补转轮室下半圆部分后,转轮室的下半圆部分基本没有磨蚀破坏;而转轮室下半圆部分未采用该材料进行修补的区域,依然存在比较严重的破坏,其破坏结果如图 5(a) 所示。采用 Belzona 高分子材料对转轮室磨蚀部位进行修补涂层后其上半圆部分任然受到磨蚀破坏,如图 5(b) 所示,这与 Belzona 高分子材料涂层破坏后形成新的空化源有关。

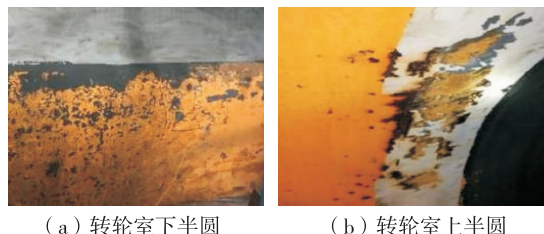


图 5 Belzona 高分子材料涂层后 3# 转轮室磨蚀情况

## 2 Belzona1311 材料在转轮室磨蚀修复中的应用

水轮机运行过程中转轮室受水流冲蚀、水中沙砾和杂质等的破坏,使转轮室壁表面出现点蚀、腐蚀坑等腐蚀现象。如果在过流部件表面涂刷一层高分子材料,不仅可以提高过流部件抗磨损腐蚀和空蚀的能力,还可以延长机组设备的使用寿命,提升电站的经济效益。

水电站机组的过流部件长期在温度低于 50 ℃ 的液体中工作,具有无收缩、膨胀或变形的双组分修复材料 Belzona1311 可作为涂层修复和保护遭受侵蚀腐蚀而损坏的金属部件,提高设备的耐磨损、耐腐蚀和耐冲蚀等性能。采用该材料进行水轮机转轮室修复中,先用与转轮室材料匹配的焊丝对磨

蚀破坏区域进行补焊,再采用相应的工艺对补焊区域进行打磨,并平整到设计尺寸要求,如图6所示;在对焊缝和缺陷进行加强刮抹处理后,用刮板将修复材料均匀涂抹在磨蚀破坏区域;为保证液体在流经转轮室壁面时与最初的设计一致,最后用刮板刮出设备表面设计尺寸所需的轮廓和弧度,并要求其表面平整、无毛刺等。



图6 磨蚀区域补焊和打磨

转轮室在采用 Belzona1311 材料进行连续涂刷时,应及时进行漏涂检查和补涂。环境温度和湿度对涂层的性能影响较大,在常温条件下,首次涂层处理后,一般在4h后应及时加涂第二层;当再次涂刷时间间隔超过24h时,必须对前次涂层的表面做相应的扫砂处理,待表面光洁后才能再次进行涂刷;涂层的养护期应大于72h,在此期间不得对涂层部件进行机械加工等作业操作,以保证涂层牢固地粘附金属材料表面。其涂刷过程如图7所示。



图7 补焊区域喷砂和涂装处理

### 3 转轮室改造

已建电站由于受当时技术水平的限制,部分灯泡贯流式机组的转轮室在采用上述方式进行磨蚀区域的修复处理后,在机组运行一段时间后,转轮室依然存在严重的磨蚀破坏,甚至出现环筋裂纹,密封漏水等问题,不仅大大影响机组的运行效率,还严重影响机组的安全性。

针对这些电站转轮室磨蚀问题的解决,可以采用钢板模压成型焊接技术对转轮室进行整体更换改造,或者采用不锈钢板镶嵌技术对转轮室磨蚀区

域进行修复处理,为保证修复后的流道尺寸与初始设计一致,该转轮室需要返回工厂进行加工处理。修复过程中具体采用何种方案进行灯泡贯流式水轮机转轮室的改造,需要针对具体电站的水力设计参数重新进行优化设计,并结合转轮室刚强度计算和动力特性对比计算结果,在完成经济性能分析后再确定改造方案。

### 4 结论

对含沙量较高的灯泡贯流式水电站,水轮机转轮室磨蚀后可以采用堆焊法和 Belzona 高分子材料进行修复处理。Belzona 高分子材料喷涂在堆焊法处理的转轮室表面,虽然可以减缓贯流式机组转轮室的磨蚀破坏程度,但还达不到彻底解决其过流表面的磨蚀破坏。对早期修建的灯泡贯流式水电站,可通过转轮室更换改造等达到不磨蚀的目的。

### 参考文献:

- [1] Yan Changya, Wan Weiqiang, Huang Kuntaog, et al. A reconstruction strategy based on CSC registration for turbine blades repairing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020,61:101835
- [2] Alfred Irene, Nicolaus Martin, Hermsdorf Jörg, et al. Advanced high pressure turbine blade repair technologies [J]. Procedia CIRP, 2018, 74:214-217
- [3] 刘小兵. 水轮机机械中的湍流固-液两相流动及磨损研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1996(6):606-609
- [4] 梁武科, 罗兴琦, 廖伟丽. 含沙水流中金属材料磨蚀机理分析[J]. 陕西水力发电, 1996(3):42-46
- [5] 朱玉峰, 董金华. 表面工程技术在泵过流部件防护中的应用[J]. 表面技术, 2004(4):72-74+80
- [6] 解建军, 龙建明. 我国水轮机磨蚀研究及防护、治理技术的进展[J]. 中国农村水利水电, 2007(6):137-139
- [7] 徐洪泉, 何成连, 孟龙, 等. 间隙空化对贯流式水轮机压力脉动特性的影响[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3):96-102
- [8] 吴玉萍, 王泽华, 谢国治, 等. 水力机械抗汽蚀材料研究新进展[J]. 机械工程材料, 2005(9):8-10
- [9] 孟安波, 殷豪, 陈德新. 多泥沙河水轮机的磨蚀与防护技术的研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(4):115-116
- [10] 葛新峰, 孙洁, 蔡建国, 等. 超低水头两叶片灯泡贯流式水轮机固液两相流研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4):1481-1493
- [11] 荀维杰, 胡伟, 王丽红. 马氏体不锈钢水轮机叶片补焊修复工艺[J]. 电焊机, 2016, 46(7):79-82

# 核电设备电气贯穿件中国市场竞争现状研究

钟薇<sup>1</sup> 刘南衡<sup>1</sup> 郭运强<sup>2</sup> 杨明<sup>3</sup> 俞高伟<sup>1\*</sup>

1. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240; 2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000;  
3. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室, 四川 德阳 618000

**摘要:**党的二十大提出,积极安全有序发展核电。《“十四五”现代能源体系规划》也提出,在确保安全的前提下,积极有序推动沿海核电项目建设,合理布局新增沿海核电项目。在此背景下,中国核电行业迎来了发展的黄金期。一些涉核企业、单位进一步扩大规模,也有一些组织相继进入核电行业。为了核电行业的良性竞争,也为让拟进入核电行业的企业对该行业有更多认知。本文以IE级核电设备电气贯穿件为例,采用文献及调查问卷等工具,较为详尽地分析了核电设备市场竞争格局,对核级设备的竞争现状进行研究。旨在树立核电设备产业的良性竞争环境、促进技术创新和进步,让社会公众对核电行业有更多的认知。

**关键词:**核电设备;电气贯穿件;竞争现状

中图分类号:F426;TM623

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0041-06

## Research on the Current Competitive Situation of Electrical Penetration Assemblies in the Chinese Nuclear Power Equipment Market

ZHONG Wei<sup>1</sup>, LIU Nanheng<sup>1</sup>, GUO Yunqiang<sup>2</sup>, YANG Ming<sup>3</sup>, YU Gaowei<sup>1\*</sup>

(1. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., 200240, Shanghai, China;

2. Dongfang Turbine Co. Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China;

3. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** The 20th National Congress of the Communist Party of China proposed the active, safe, and orderly development of nuclear power. The "14th Five-Year Plan for Modern Energy System" also advocates for the active and orderly promotion of coastal nuclear power project construction while ensuring safety, and for the rational layout of new coastal nuclear power projects. Against this backdrop, China's nuclear power industry has entered a golden era of development. Some nuclear-related enterprises and units have further expanded their scale, while some organizations have also entered the nuclear power industry. In order to promote healthy competition in the nuclear power industry and to enable enterprises intending to enter the industry to gain a deeper understanding of it, this article takes the IE-grade nuclear power equipment electrical penetration assembly as an example to study the current competitive situation of nuclear-grade equipment. This article employs literature and survey questionnaires to provide a detailed analysis of the competitive landscape of the nuclear power equipment market. The study is to establish a healthy competitive environment for the nuclear power equipment industry, promote technological innovation and progress, and enhance public awareness of the nuclear power industry.

**Key words:** nuclear power equipment; electrical penetration assembly; current competition situation

收稿日期:2025-09-24

**作者简介:**钟薇(1988—),女,2024年毕业于同济大学工商管理专业,硕士研究生,经济师。现就职于上海发电设备成套设计研究院有限责任公司,主要从事核电设备市场营销工作。

俞高伟(1979—),男,2002年毕业于浙江大学,工学学士,正高级工程师。通信邮箱:yugaowei@speri.com.cn。

电气贯穿件(见图1)是核安全电气一级设备<sup>[1]</sup>,安装在核电厂安全壳上,用于电缆穿越安全壳的核电专用电气设备<sup>[2]</sup>。作为安全壳压力边界最后屏障的特殊功能与技术要求。电气贯穿件设备的市场竞争研究对核电厂的建设、运营及安全有着重要的价值。本文通过文献研究和调查问卷对国内电气贯穿件设备进行了较为全面的分析,为国内的核电设备电气贯穿件的良好市场竞争格局提供参考。

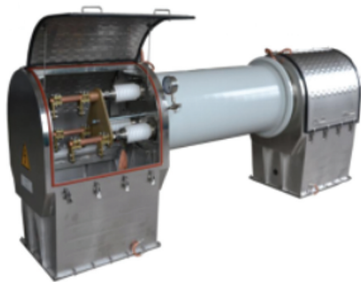


图1 电气贯穿件

## 1 概述

中国核电自1984年加盟国际原子能机构IAEA产业近年来发展迅速,已成为全球核电市场的重要参与者。截至2024年8月,我国在运、在建和核准建设的核电机组共102台,装机容量达到1.13亿千瓦,核电总体规模首次跃居世界第一<sup>[3]</sup>。中国自主研发的三代核电技术“华龙一号”已进入批量化建设,全球首个陆上商用小型核反应堆“玲瓏一号”进展顺利,高温汽冷堆核电站商业示范工程已正式投入商运,为世界先进核能发展提供更多中国方案。2024年,中国核电机组发电量4508.5亿千瓦时,较2023年增长3.7%(见图表1)<sup>[4-5]</sup>。

表1 2024年主要能源产品产量及其增长速度

产品名称	单位	产量	比上年增长(%)
原煤	亿吨	47.8	1.2
原油	万吨	21 289.1	1.8
天然气	亿立方米	2 464.5	6.0
发电量	亿千瓦时	100 868.8	6.7
其中	亿千瓦时	63 742.6	1.7
火电	亿千瓦时	14 256.8	10.9
水电	亿千瓦时	4 508.5	3.7
核电	亿千瓦时	9 970.4	12.5
太阳能发电	亿千瓦时	8 390.4	43.6

## 2 国内外供应商及行业分析

### 2.1 国内供应商现状

在国际市场中,主要的供应商有美国IST、法国AUXITROL、德国肖特公司。在国内,电气贯穿件设备自2003年国产化以来,国内先后有三家公司取得了电气贯穿件设备的设计、制造许可证,分别是(A公司、B公司和C公司)。

A公司成立于1959年,系全国发电设备制造行业的开发应用I类研究所。作为中国电站装备行业应用技术的重要科研机构,始终致力于电力能源领域的关键和共性技术研究。2003年,A公司开始研发电气贯穿件设备,是国内最早开始核电设备电气贯穿件的国产化研发单位,也是国内首家获得国家核安全局民用核安全设备电气贯穿件设计、制造许可证的单位,具备为二代加核电站、“国和一号”(CAP系列)核电站、“华龙一号”核电站供货能力。最早供货的秦山一期改造项目的电气贯穿件至今已安全运行18年。

B公司成立于1965年,是中国集核动力技术研究、设计、试验、运行、退役全周期和小批量生产为一体的大型综合性科研基地。B公司是中国唯一成体系的综合性核动力研发机构,科研实力雄厚,实验设施先进,在中国国防军工、先进能源开发工业体系和高新技术中,发挥着不可替代的重要作用。B公司是民用核安全设备电气贯穿件制造及民用核安全设备电气贯穿件设计的持证单位;拥有较强的核专业研究、设计、试验、生产制造(有2个电气贯穿件制造厂房)和运行能力。其研究、设计和试验能力的结合,使得B公司具有非常强的竞争力。

C公司成立于1995年,是一家民营企业。也是民用核安全设备制造及民用核安全设备设计的持证单位。在行业竞争中,价格曾是其最大的优势。但由于公司资金链问题,2023年完成重组,其信誉度受到较大的影响。但是,新全资股东、上市公司无锡鑫宏业线缆科技股份有限公司高度重视、全力支持公司做大做强核电业务,在完成8000万元重整投资后追加投资5000万元,用于公司基础设施建设、设备技改、技术研发和流动资金投入。公司

整体面貌焕然一新、生机勃勃,核电业务增长势头强劲。

## 2.2 行业竞争及供需情况

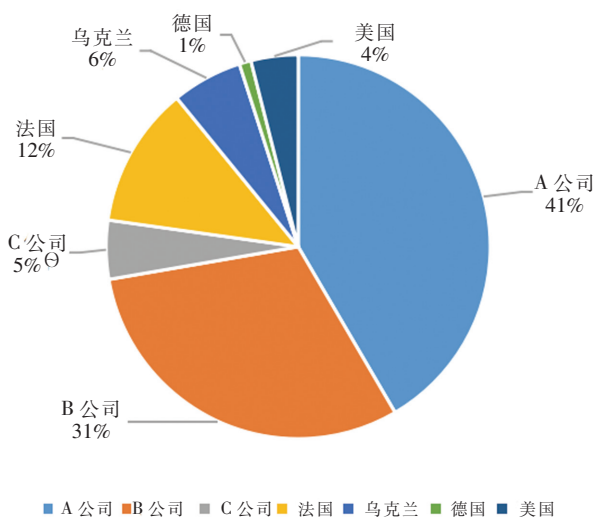
1E级核电设备电气贯穿自2003年国产化以来,在中国已有22年的历史。在近二十年的竞争中,三家供应商的技术、产品线宽度、研发能力、提供给购买者的服务、销售渠道、质量等处于同一区间,导致三家厂商不断采取各种措施来提升自己市场份额。竞争厂商的利润越来越低,这可能也是导致C公司走到了破产重组的境况之一。基于此,竞争厂商已经达成了一定的竞争默契,不再通过恶性的价格竞争来获取市场份额,转而为主业提供更为个性化服务的竞争中。但对于生存情况较弱的C公司,在重组归来时,仍然想通过削减自己的利润来获得市场,但其行为未被市场和购买者接受。核电行业成功的关键是技术、质量、资信能力、对业主需求的响应能力。从2020年1月至2025年5月电气贯穿件公开招标(涉及招标集团有中核集团、中广核、国家电投集团和华能集团)的13个项目中,其高价中标为2个项目(一个是新项目,一个是成熟项目)、次高价中标项目有9个(均为成熟项目)、低价中标项目有1个(成熟项目)、次低价中标项目有1个(成熟项目)。由此可见,价格不再成为核电设备(电气贯穿件属于1E级设备,其安全要求和质量要求甚高,有严格的准入条件,需要国家核安全局颁发的设计及制造许可证)主要的竞争力,为了产品的良性供应,购买者也需要保障供应商的健康发展,实现共赢。

从1985年至2025年8月,中国需要用到电气贯穿件设备的核电机组共101个(已招标),主要由A公司、B公司、C公司、法国、乌克兰、德国、美国提供。目前,中国核电厂关于电气贯穿件设备,供应商已中标的机组数量分别为:A公司42个、B公司31个、C公司5个、法国12个、乌克兰6个、美国4个、德国1个。市场份额分别是,A公司41%、B公司31%、C公司5%、法国12%、乌克兰6%、美国4%、德国1%,见图2。

## 2.3 市场需求

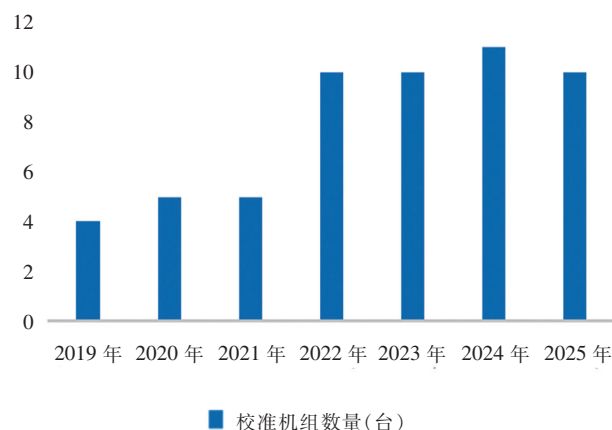
近年来,核电审批进程在逐步加速。2019年至2025年8月,新核准核电机组数量分别为4台、5

台、10台、10台、11台、10台,如图3所示。为支持核能发电行业的良性发展,中国出台了一系列政策,并明确了发展目标及开发计划。《“十四五”现代能源体系规划》提出,核电企业积极推进装机工作,计划到2025年运行的电力装机容量达到7000万千瓦<sup>[6]</sup>。根据近两年核准的机组数量加未来能源需求的增长,保守估计在未来五年,每年核准的核电机组估计10台,以华龙一号6台、国和系列2台、其他新技术堆型(高温气冷堆、小堆)2台,每年所需要的电气贯穿件数量为1018台左右。根据历史同类型堆型所需要的设备数量及金额预估,其市场规模超过人民币2亿元/年。



注:根据公开数据整理。

图2 中国核电厂已招标的机组配套电气贯穿件设备的市场份额占比情况



注:根据公开数据整理。

图3 近7年国家核准核电机组数量统计

## 2.4 市场供给

目前,根据电气贯穿件国内三家供应商的历史承接合同及供货能力推算。A公司的产能是320台/年,B公司的产能是620台/年,C公司的产能是160台/年,累计供给为1100台,与市场需求接近,供需较为平衡。

## 3 竞争力调查研究

### 3.1 调查目的

本文为了让三家供应商的竞争力情况更为客观,采用调查问卷的形式,将竞争对手一并纳入调研,从电气贯穿件成功的十项竞争力(成功因素/强势)指标中<sup>[7]</sup>,与行业竞争对手的能力相比较,找出三家供应商的相对弱势因素。

### 3.2 调查对象

调查对象来源于电气贯穿件设备生产者、购买者和使用者,岗位分别是业务层领导、市场营销经理、生产经理、项目经理、设计经理、研发经理、技术经理、质保经理、监造经理,其从业年限均在11年以上。被调查者对三家公司的各项竞争因素情况比较了解,故选择其作为调查对象能得到较为真实客观的结果。

### 3.3 内容设计

问卷调查通过借鉴国内外文献研究材料,结合美国的阿瑟·汤姆森(Arthur A. Thompon)和斯迪克兰德(A. J. Strickland)的竞争强势评估的加权竞争强势评估量表,确定核电设备竞争成功的关键因素。问卷包含两个部,第一部分是调查对象的基本情况收集,包含性别、从业年限和职务。第二部分为核电设备竞争关键成功因素/强势指标,包含质量/产品性能、声誉形象、技术技能、制造能力、进度计划、供货保障能力、特约经销商/分销能力、新产品革新能力、财务资源、客户服务能力,共10项,均为单选。问卷采用Likert5级评分法,“1”表示“很弱”;“2”表示“较弱”;“3”表示“一般”;“4”表示“强”;“5”表示“很强”。并对其进行了权重分配(在核电设备中,每项指标/因素对竞争力影响的重要程度不一样,加上权重后得出的结果更为符合真实竞争情况),这些权重的确定,是为了

体现不同因素对竞争优势大小的影响。通过业内五位专家(采购经理、项目经理、研发经理、核能业务负责人)进行分别打分,得出每项关键因素的平均权重,引入到调查问题最后的每项关键因素结果计算中。

### 3.4 调查问卷的实施

调查问卷设计完成后,由作者在通过问卷星线上收集数据。问卷先进行了十位业内专家(电气贯穿件业务相关经理)的试做,并将结果进行信度分析,满足要求后再向所有对象发放问卷。问卷发放形式为问卷星小程序,调查问卷收集的数据用问卷星线上结果分析和SPSS软件进行分析。接受调查的对象都是经理层级及以上,他们分别来自国家电投集团、中核集团、中广核集团、上海电气集团、哈尔滨电气集团等),从业年限在11~30年之间。问卷发放66份,收回问卷61份,问卷收回率92.42%,得出数据均为有效数据,保证了竞争力评估有效性。

### 3.5 调查结果

调研对象基本信息。本次调研针对的经理级以上层级,本次受访者男性49人,占比80.3%,女性12人,占比19.7%。受访者的工作年限较长,超过16年(含)以上的从业者样本人数最多,占全体受访者的50.8%,而从业年限在11~15年(含)和6~10年(含)的样本人数较少,分别为34.4%和14.8%。从职务分布情况来看,被调查者以采购经理、项目/业务经理为主,占全体受访者的百分数据分别为36.1%和21.3%。其次是质量/监造经理、销售/营销经理,占全体受访者的占全体受访者的百分数据分别为13.1%和9.8%,详见图表2所示。

信度分析。一般情况下,信度系统在0-1,如果量表的信度系统在0.9以上,表示量表的信度很好。如果量表的信度系统在0.8-0.9,表示量表的信度可以接受<sup>[8]</sup>。图表3是通过SPSS进行的可靠性统计,其克隆巴赫Alpha值为0.807,基于标准化项的克隆巴赫Alpha值为0.854,项数是19,说明问卷的可信度较好,量表的内容可接受。

表 2 被调查者性别分布(N=61)

		频率(N)	百分比(%)
性别	男	49	80.3
	女	12	19.7
从业年限	6~10年(含)	9	14.8
	11~15年(含)	21	34.4
	16年(含)以上	31	50.8
职务	采购经理	22	36.1
	研发经理	2	3.3
	质量/监造经理	8	13.1
	项目/业务经理	13	21.3
	生产制造经理	2	3.3
	销售/营销经理	6	9.8
	技术经理	5	8.2
	设计经理	3	4.9

表 3 可靠性统计(N=19)

克隆巴赫 Alpha	基于标准化项的克隆巴赫 Alpha
0.807	0.854

效度分析。效度分析在用 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 进行分析的时候使用的方法是因子分析,SPSS 中的效度分析属于探索性因子分析,通常针对百成熟量表或对成熟量表有所改动的量表。SPSS 效度分析指的是在社会科学和医学研究中,使用 SPSS 软件对问卷或量表等测量工具的有效性进行评估的过程。该方法有助于评估问卷题项的设计是否合理,以及测量结果是否能够真实反映所要研究的内容。如果巴特利特球形度检验显著值 P 值<0.05, KMO>0.6, 适合因子分析<sup>[8]</sup>。图表 4 为 KMO 和巴特利特检验结果。KMO

取值为 0.856,说明问卷整体效度还好。巴特利特球形度检验显著值 P 值小于 0.001,显著拒绝了原假设,同样表明问卷整体效度可以接受。

表 4 KMO 和巴特利特检验

KMO 取样适切性量数	0.856
巴特利特球形度检验	近似卡方 360.637
	自由度 45
	显著性 <.001

竞争力对比表。图表 5 中,展示了三家竞争者的竞争力评估结果,由于每一个关键的成功因素和竞争优势指标对成功因素的影响并不是相同的,所以进行了加权赋值。该表的权重来源是通过行业内的专家,工作时间跨度为 12-30 年之间,从他们对核电设备的关键成功因素/强势指标进行权重分配,再取专家们对各因素权重分配的平均值作为本量表的权重配比。最终,加权三家公司在所有指标上的得分,得出公司的竞争力得分。总体得分来看,A 公司具有相对优势。A 公司在质量/产品性能、技术技能、制造能力、供货保障能力、新产品革新能力、客户服务能力等方面表现良好,加权得分普遍较高。竞争力评分总和为 42.87,表明 A 公司在这些关键成功因素上的整体竞争力较强。B 公司在声誉形象、财务资源等方面得分较高。强势评分总和为 41.13,整体竞争力略低于 A 公司。C 公司在质量/产品性能、技术技能、制造能力、供货保障能力、特约经销商/分销能力等方面得分较低。强势评分总和为 33.54,表明 C 公司在关键成功因素上的整体竞争力相对较弱。

表 5 竞争力对比表(N=19)

关键成功因素/强势指标	权重	A 公司		B 公司		C 公司	
		平均得分	加权得分	平均得分	加权得分	平均得分	加权得分
质量/产品性能	24.60	4.34	1.07	4.26	1.05	3.21	0.79
声誉形象	8.00	4.46	0.36	4.15	0.33	3.13	0.25
技术技能	13.90	4.39	0.61	4.41	0.61	3.16	0.44
制造能力	13.50	4.30	0.58	4.23	0.57	3.38	0.46
进度计划	9.50	4.34	0.41	3.95	0.38	3.61	0.34
供货保障能力	8.50	4.46	0.38	4.15	0.35	3.57	0.30
特约经销商/分销能力	1.40	3.64	0.05	3.49	0.05	3.38	0.05
新产品革新能力	8.60	4.30	0.37	4.08	0.35	3.28	0.28
财务资源	5.00	4.23	0.21	4.39	0.22	3.18	0.16
客户服务能力	7.00	4.41	0.31	4.02	0.28	3.64	0.25
强势评分总和	100	42.87	4.35	41.13	4.19	33.54	3.33

#### 4 结语

本文基于加权竞争强势评估方法,结合问卷调查数据,对国内三家主要电气贯穿件供应商(A公司、B公司、C公司)的市场竞争力进行了系统分析。评估结果表明,在十大关键竞争因素中,质量/产品性能(权重 24.60%)、技术技能(13.90%)和制造能力(13.50%)共同构成了电气贯穿件市场竞争的核心维度,三者合计权重超过 50%,充分体现了核电设备行业对技术可靠性与产品质量的极高要求。

从调查问卷中三家公司的具体得分来看:A公司在多项高权重指标中表现突出,尤其在质量/产品性能、技术技能、制造能力、供货保障能力等方面均领先于竞争对手,综合竞争力最强,与其市场占有率第一的地位相符;B公司在声誉形象与财务资源方面具有相对优势,但在进度计划与客户服务能力方面略逊于A公司,整体竞争力位居第二;C公司受此前经营困境影响,在多项关键指标上得分较低,尤其在质量/产品性能、技术技能等核心领域的差距显著,反映出其在技术积累与市场信任重建方面仍面临挑战。

从权重结构来看:“质量-技术-制造”构成了电气贯穿件供应商的核心能力三角,而供货保障、新产品革新能力与客户服务能力等中高权重因素,则体现了核电项目对设备全生命周期服务与持续创新的需求。相比之下,特约经销商/分销能力权重最低(1.40%),反映出核电产品电气贯穿件仍以直销与项目合作为主,渠道建设并非竞争关键。

综上所述,电气贯穿件市场的竞争已从初期的

价格主导,转向以技术可靠性、产品质量、供货保障与客户服务为核心的综合能力竞争。未来,随着核电装机容量的持续增长与技术路线的多元化,供应商需进一步强化在新产品研发、智能制造、全周期服务等方面的能力建设,以应对市场竞争与核电安全标准的不断提升和核电行业的行稳致远。

此外,本研究也为拟进入核电设备行业的企业提供了重要参考:必须在技术积累、质量体系与资金实力等方面做好长期投入准备,避免盲目进入导致资源浪费与市场风险。

#### 参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 核电厂安全重要电气设备鉴定:GB/T 12727—2023[S]
- [2] 陆燕荪,刘吉臻,周鹤良. 电力强国崛起中国电力技术创新与发展(下册)[M]. 中国电力出版社,2021:502-503
- [3] 中国核能行业协会,中国战略规划研究总院有限公司,中智科学技术评价研究中心. 中国核能发展报告 2025[EB/OL]. [2025-04-29]. <https://www.china-nea.cn/site/content/49144.html>
- [4] 国家统计局. [DB/OL]. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228\\_1958817.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html)
- [5] 中国核能行业协会[DB/OL]. <https://www.china-nea.cn/site/content/44020.html>
- [6] 中国政府网. 国家发展改革委 国家能源局 关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content\\_5680759.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm)
- [7] 汤姆森,斯迪克兰迪著. 战略管理(第十版)概念与案例[M]. 段盛华,王智慧主译. 北京:北京大学出版社,2004:110-112
- [8] 张甜,杨维忠. SPSS 统计学原理与实证研究[M]. 北京:清华大学出版社,2024:1-2,385-396

# 基于转子动力学稳定性的“华龙一号” 核能发电机轴承优化探究

官永胜 秦川

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 本文围绕“华龙一号”核能发电机轴承损耗优化展开研究,旨在保证转子稳定性前提下实现低损耗运行,接近国际先进水平。通过 DyRoBeS 软件仿真计算,验证了 No. 2 轴承优化方案在降低损耗方面效果显著,单机年节能近百万千瓦时,实现了与国际引进技术相当的节能水平,极大提升了发电机效率,为核电能源的高效利用提供了有力支持。

**关键词:** 华龙一号;核能发电机;轴承静特性;轴承动特性;转子动力学稳定性

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)06-0047-08

## Exploration on Bearing Optimization of HPR1000 Nuclear Energy Generator Based on Rotor Dynamics Stability

GUAN Yongsheng, QIN Chuan

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** This study focuses on optimizing the bearing loss of the HPR1000 nuclear energy generator, aiming to reduce loss while maintaining rotor stability, approaching international technology levels. Utilizing the DyRoBeS simulation software, we analyzed the static characteristics of the bearing and rotor dynamics stability, confirming that the optimized No. 2 bearing scheme significantly reduces loss, achieving nearly one million kWh of annual energy-savings per unit. This achieves an energy-saving level comparable to internationally introduced technologies. This significantly enhances generator efficiency, supporting the efficient utilization of nuclear energy.

**Key words:** HPR1000; nuclear energy generator; static characteristics of bearing; dynamic characteristics of bearing; rotor dynamics stability

“华龙一号”作为我国核电事业的代表,轴承性能直接关系到核电站的经济性和安全稳定性。通过轴承优化设计,不仅能减少“华龙一号”核能发电机的轴承损耗,提升运行效率,还能为核电技术的未来发展积累宝贵的经验和参考。

为实现轴承优化目标,本研究选用了 DyRoBeS 计算软件作为主要分析工具。该软件由美国机械工程师学会设计与开发,主要是用于转子动力学特性分析与轴承参数设计分析。

本研究精选了两种椭圆度下的四个轴承方案进行对比分析。这些方案技术可行性高,既符合当前技术水平,又能够直接解决在实际运行中的轴承关键问题,有大量运行业绩作为技术支撑。

### 1 “华龙一号”核能发电机轴承系统概述

#### 1.1 轴承结构及其功能

如图 1 所示,“华龙一号”核能发电机采用了低速重载椭圆瓦滑动轴承,轴瓦内孔呈椭圆形,其轴瓦由两个圆弧面组成,两个圆弧面的包角小于

收稿日期: 2025-02-06

作者简介: 官永胜(1971—),男,正高级工程师,主要从事汽轮发电机设计与研发工作。

秦川(1994—),女,工程师,主要从事汽轮发电机设计与研发工作。

180°,轴瓦上、下各形成一个油膜的双油楔轴承,与圆柱轴承相比,流量大、温升低,这一设计旨在满足核能发电机在高速、重载工况下的稳定运行需求。

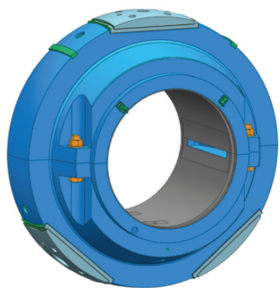


图1 轴承结构

轴承作为旋转机械中的关键部件,承载着转子的重量和负荷,其性能直接关系到发电机的运行稳定性。转子支承系统,尤其是轴承的油膜特性,对轴系临界转速、不平衡激励下的响应和动力学稳定性等具有重要影响。

### 1.2 存在的问题及其影响

如表1所示,尽管“华龙一号”核能发电机轴承系统在运行过程中表现良好,但对于相同负荷下的轴承损耗,与国外的先进技术相比仍存在一定差距。

表1 轴承实测参数

项目	自主核电	引进机组
汽端油量(m <sup>3</sup> /h)	31.2	72.7
汽端进油温度(°C)	32.3	37.6
汽端出油温度(°C)	59.7	46.2
汽端轴承损耗(kW)	398.9	291.8
励端油量(m <sup>3</sup> /h)	33	65.4
励端进油温度(°C)	32.3	37.6
励端出油温度(°C)	57.3	46.9
励端轴承损耗(kW)	376.8	283.8
轴承总损耗(kW)	775.7	575.6

轴承损耗高不仅意味着能量转化效率低,也有可能引发转子稳定性问题。高损耗轴承易热变形,导致间隙变化,进而影响转子的对中精度和振动等,因此,轴承优化涉及轴承结构型式、轴承性能与转子动力学稳定性问题。

## 2 轴承结构优化设计与分析

### 2.1 优化设计目标与原则

针对“华龙一号”核能发电机轴承损耗存在进

一步优化空间的问题,本研究的核心目标是在全面保障轴承静特性满足设计要求、动特性参数指标正常以及转子动力学稳定性的基础上,探索并实施有效措施,以显著降低轴承的损耗。为实现这一综合性的目标,本研究进一步确立了具体的优化原则。

### 2.2 轴承结构与特性分析

#### 2.2.1 轴承结构

针对轴承结构优化,本研究选取两种椭圆度下的四个轴承进行详尽对比分析,为了直观呈现优化方案及具体措施,如表2所示,表中详细列出了每种方案的具体实施细节。

表2 优化方案及措施

方案代号	椭圆度	优化措施
No. 1	0.25	原轴承
No. 2	0.25	上瓦开槽加宽,水平油楔加大
No. 3	0.50	与No. 1比,仅改变椭圆度
No. 4	0.5	上瓦开槽加宽,水平油楔加大

#### 2.2.2 静特性对比分析

轴承静特性研究内容主要包含轴承功耗、润滑油流量、油膜压力、油膜温度和油膜厚度等参数的研究,这些静特性参数直接决定了轴承的性能和使用寿命。

结构的改变可能直接影响润滑油的流动和分布,在进行轴承结构改变时,需要充分考虑其对润滑静态性能的影响,通过合理的结构设计来优化轴承的润滑效果,确保其稳定运行和延长使用寿命。

#### 2.2.3 偏心率

滑动轴承的偏心率是指轴颈中心相对轴承瓦块中心的偏移程度,这一参数对轴承的润滑性能、承载能力和磨损情况有重要影响。合理控制偏心率,有助于确保轴承运转的平稳性和延长使用寿命。由图2可知,No. 1轴承(即原轴承)偏心率最小,No. 3轴承偏心率最大。

#### 2.2.4 油膜温度

如果油膜温度过高,将会导致润滑油性能下降,甚至可能油膜破裂,使轴承表面直接接触,增加摩擦和磨损。此外,高温还可能引起轴承材料热膨胀,进一步加剧磨损,甚至可能引发轴承故障,轴承

最高油膜温度是轴承设计和使用过程中的一个关键参数。

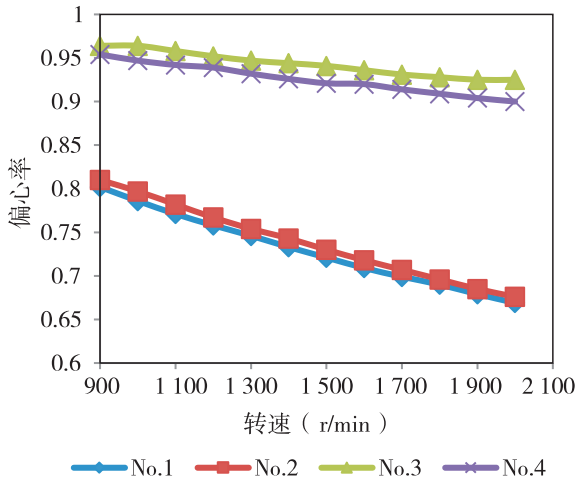


图2 偏心率随转速关系曲线

为了确保轴承正常运行和延长寿命,需要严格控制轴承油膜温度,避免其超过最高允许温度。由图3可知,在相同的进油温度条件下,轴承油膜最高温度均随着转速的增加而升高,0.25 椭圆度轴承 (No. 1~No. 2) 升幅较大,这是由于椭圆度较小,油膜分布较为均匀且在某些区域可能较薄,这些区域可能更容易受到摩擦热的影响,导致温度迅速上升。

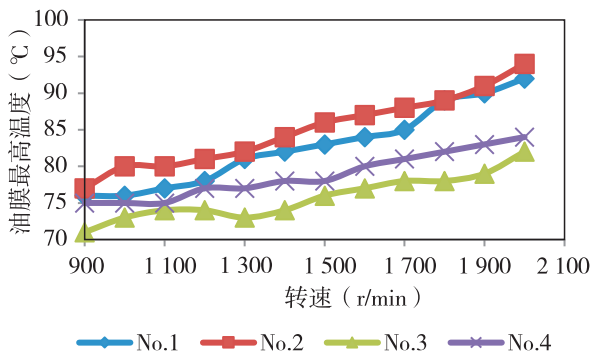


图3 油膜最高温度随转速关系曲线

### 2.2.5 油膜压力

轴承油膜压力是指轴承运转时,润滑油在轴承间隙内形成的油膜所承受的压力。适当的油膜压力能减少摩擦和磨损,提供有效的润滑;而压力不足或过高都可能导致轴承失效。因此,合理控制轴承油膜压力是确保轴承正常运行的关键。

由图4~5可知,0.25 椭圆度优化前轴承 No. 1 最大油膜压力最低,这是由于预负荷小、承载面积未被减小的缘故。

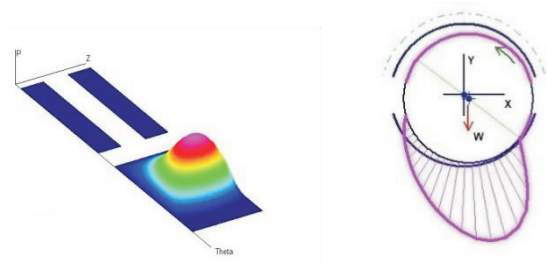


图4 轴承压力分布

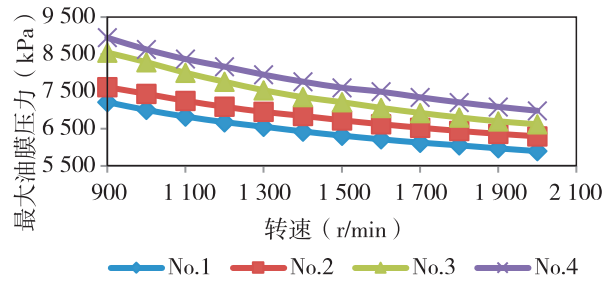


图5 最大油膜压力随转速关系曲线

### 2.2.6 油膜厚度

最小油膜厚度随转速变化如图6所示,在相同的进油温度条件下,油膜厚度均随着转速的增加而增大,0.5 椭圆度优化后轴承 No. 4 最小油膜厚度最小,这是由于预负荷大、承载面积被减小的缘故。

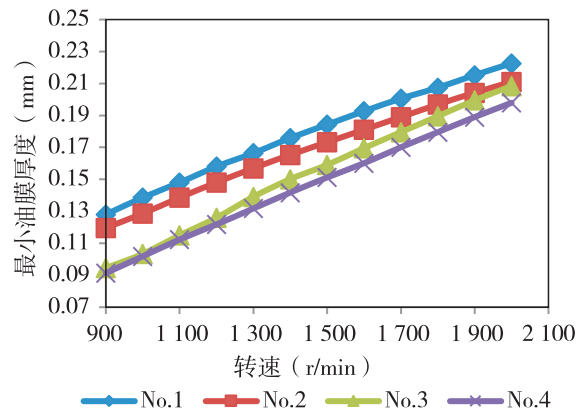


图6 最小油膜厚度随转速关系曲线

### 2.2.7 润滑油流量

润滑油流量过大会导致浪费和成本增加,同时也可能造成环境污染;而润滑油流量过小则可能无法满足轴承的润滑和冷却需求,导致轴承失效。由图7可知,流量随转速的升高而加大,0.25 椭圆度优化后轴承 No. 2 润滑油流量最小,这是由于预负荷小、承载面积被减小的缘故。

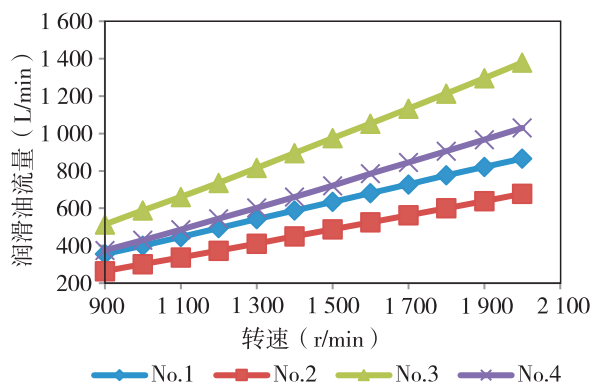


图7 轴承润滑油流量随转速关系曲线

### 2.2.8 轴承损耗

由图8可知,随着转速的提高,轴承内部的摩擦、磨损以及热量增加,导致损耗上升。在低转速范围内,轴承损耗随转速增加缓慢上升,而在高转速范围内,损耗上升速率会加快。

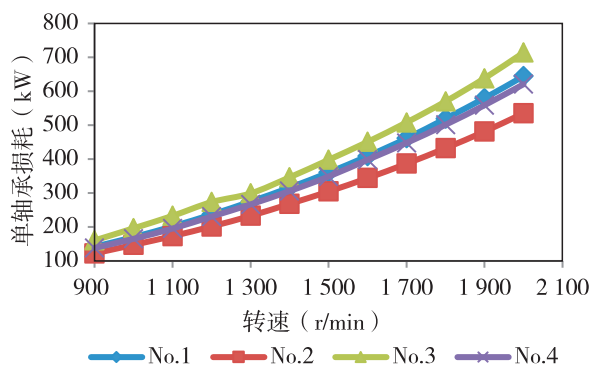


图8 轴承损耗随转速关系曲线

如图9所示,额定转速1500 r/min下, No.1原轴承计算损耗 $2 \times 360.5$  kW,与表1实测值775.7 kW接近;0.25椭圆度优化后 No.2轴承损耗( $2 \times 304.66$  kW)最小,较优化前 No.1轴承损耗减小 $2 \times 56$  kW,减少率15.5%。

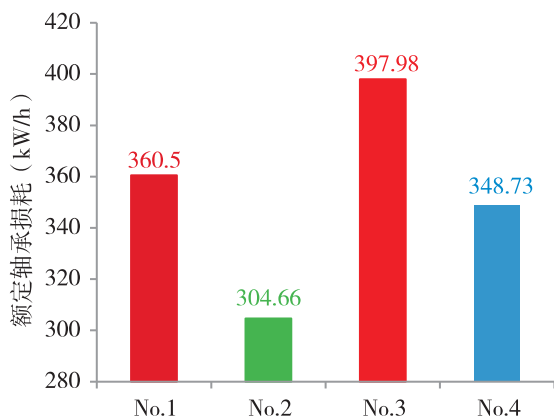


图9 各轴承方案额定损耗

### 2.2.9 润滑油出油温度

轴承润滑油出油温度过高会导致润滑油粘度降低,油膜承载能力减弱,从而增加轴承的磨损和损坏风险。此外,过高的温度还可能引发润滑油的氧化、变质等问题,进一步影响轴承的正常运行。在实际应用中,对于在运行轴承,为防止轴承油量不足、油质劣化、油路堵塞等,需要密切关注轴承润滑油出油温度的变化情况。一旦发现温度异常升高,应立即采取措施进行检查和调整,确保轴承得到充分的润滑和冷却,从而保障设备的稳定运行和延长使用寿命。

润滑油出油温度随转速增加而升高,由图10可知,0.25椭圆度优化后轴承 No.2 出油温度最高,这是由于预负荷小、摩擦面积减小、润滑油流量最低的缘故。

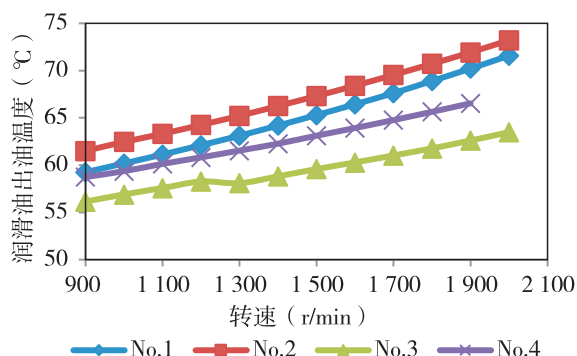


图10 润滑油出油温度随转速关系曲线

### 2.3 动特性对比分析

合理的结构变化能够优化润滑油流路径,形成稳定的润滑油膜,增强油膜承载能力,使轴承在承受外部冲击或载荷变化时仍能维持稳定的润滑状态;而不良的结构改变可能使油膜厚度不足或刚度下降,导致轴承失稳或轴系较大振动。No.1~No.4轴承刚度和阻尼详见图11~图18。

高主刚度轴承能够更有效地抵抗外部载荷和振动,从而减小轴系的振动幅度和位移,提高轴系的稳定性。阻尼能够消耗轴承在振动过程中的能量,从而抑制振动的幅度,减小冲击对轴系的影响,从而提高转子轴系的稳定性。

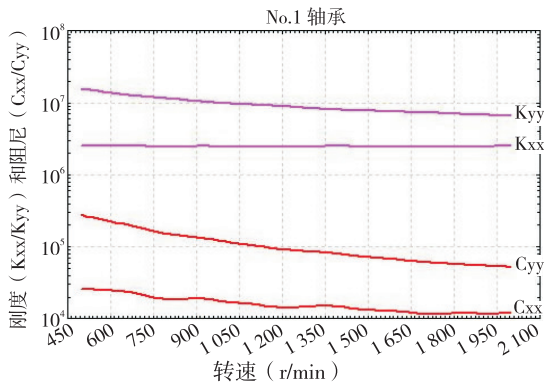


图 11 No. 1 主刚度和阻尼随转速关系曲线

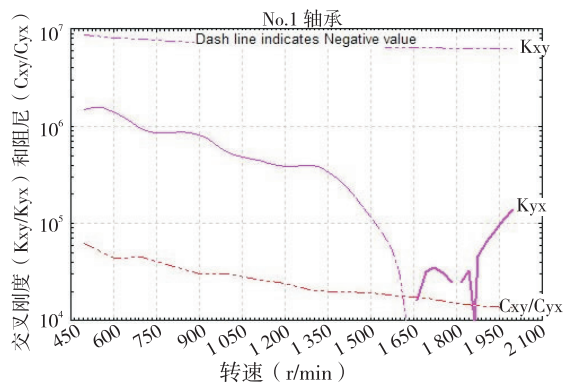


图 12 No. 1 交叉刚度和阻尼随转速关系曲线

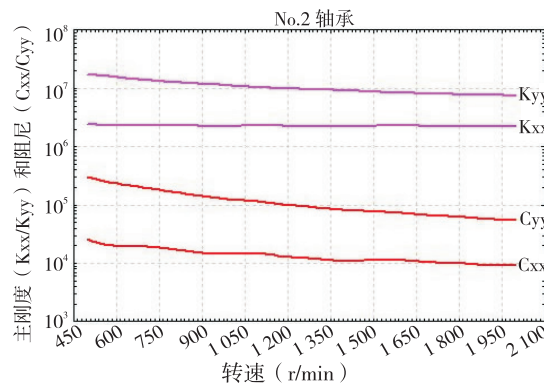


图 13 No. 2 主刚度和阻尼随转速关系曲线

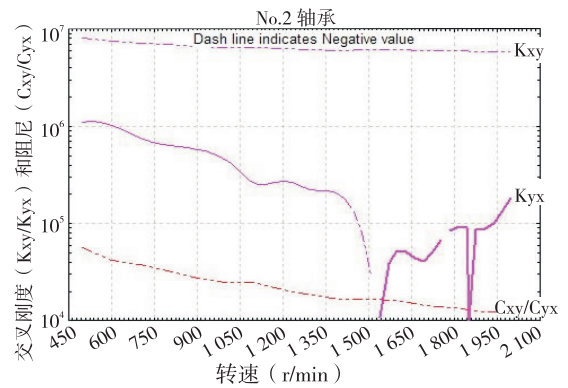


图 14 No. 2 交叉刚度和阻尼随转速关系曲线

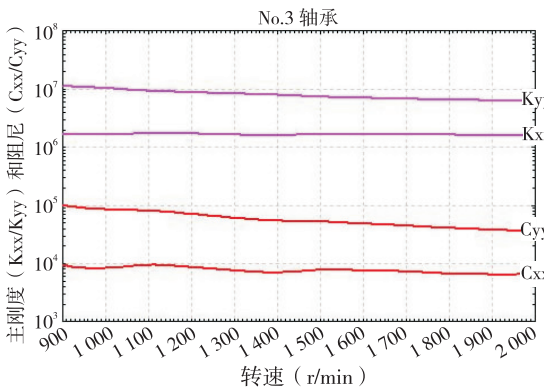


图 15 No. 3 主刚度和阻尼随转速关系曲线

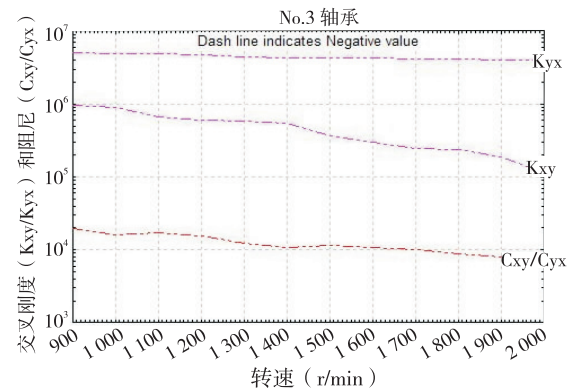


图 16 No. 3 交叉刚度和阻尼随转速关系曲线

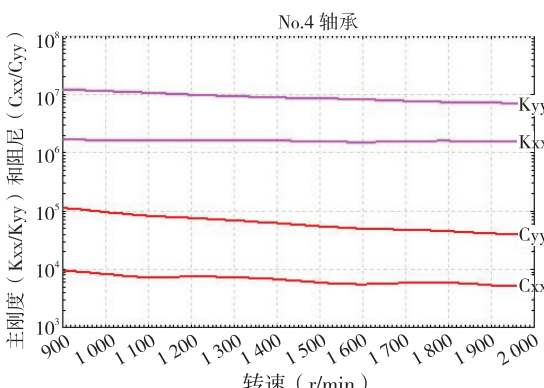


图 17 No. 4 主刚度和阻尼随转速关系曲线

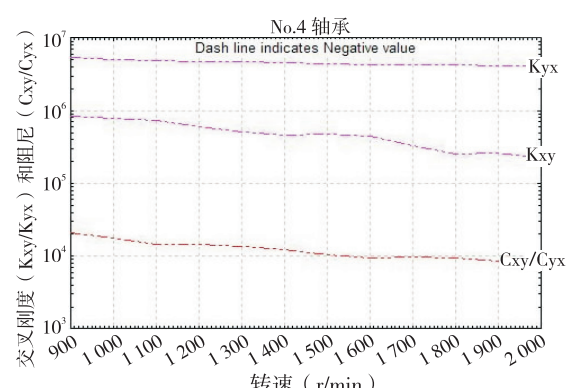


图 18 No. 4 交叉刚度和阻尼随转速关系曲线

刚度和阻尼系数是影响轴系稳定性的重要因素。在设计轴系时,需要根据具体的应用场景和需求选择合适的轴承类型和参数,从而保证轴系的稳定性和安全可靠。

#### 2.4 小结

本研究对四种优化轴承方案进行了静特性分析,结果显示所有轴承均符合设计要求。特别是2号优化方案在轴承损耗方面表现出色,显著优于其它方案。然而,轴承动特性变化影响轴系稳定性,因此,尽管静特性满足条件,为确保轴系的安全稳定运行,仍需进一步对验证各优化方案中的动特性对轴系转子动力学稳定性影响的分析计算。

### 3 转子动力学稳定性分析

#### 3.1 轴系振动分析意义

转子作为汽轮发电机的核心部件,其动力学稳定性直接关系到整个发电机组的运行效率和安全性。所谓稳定性就是指如果对某个机械系统进行干扰,而此系统最终又恢复为初始平衡状态,则称此系统是稳定的。如果系统无限偏离原先的平衡状态,则这个机械系统是不稳定的。

通过对转子动力学稳定性的深入分析,可以精确掌握转子的振动特性、临界转速等重要参数,从而有效预防共振和失稳现象的发生。这不仅有助于延长汽轮发电机的使用寿命,还能确保发电机组在各种工况下都能稳定运行,为电力供应提供可靠保障。因此,转子动力学稳定性分析是汽轮发电机设计和维护过程中不可或缺的重要环节。

#### 3.2 转子轴系模型构建

转子动力学模型的构建是旋转机械设计的基础,它涉及转子的几何结构、支撑方式、材料属性和运动特性。在构建过程中,需精确设定转子的质量、刚度、阻尼等关键参数,以反映转子的实际动态行为。准确的模型构建和参数设定对于预测转子的振动特性以及优化性能至关重要。

对转子轴系建模,应考虑每一轴段的长度、质量直径、刚度直径等参数,对于转子上联轴器、风扇、护环、线圈、绝缘块、轴向引线等部件,应考虑为附加重量,转子轴系建模如图19所示。

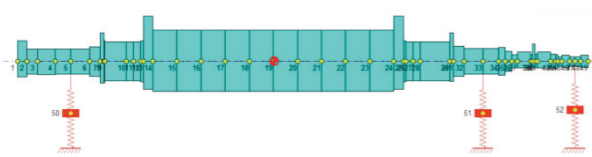


图19 发电机转子轴系模型

#### 3.3 轴系临界转速计算

转子的振动固有频率称为刚性临界转速,计入支承系统后转子的振动固有频率称为弹性临界转速,将各转子连成轴系后有轴系的固有频率和振动频率,转子的固有频率主要是对改进转子弯曲刚度提供设计依据,转子的振动频率主要是对机组运行提供参考。分别考虑轴承水平支撑刚度和垂直支撑刚度下的无阻尼临界转速计算,计算结果见表3所示。

表3 无阻尼临界转速计算结果 (单位:r/min)

	发电机一阶		发电机二阶	
	水平	垂直	水平	垂直
No. 1	883	1 053	2 320	2 955
No. 2	867	1 067	2 262	3 007
No. 3	813	1 047	2 075	2 930
No. 4	796	1 062	2 020	2 988

国产机组判别准则是:临界转速避开工作转速 $\pm 15\%$ 。由表3可知,发电机转子各阶临界转速相对工作转速均避开 $\pm 15\%$ 以上,转子设计是合理的。

尽管无阻尼临界转速提供了一个理论上的参考点,但在实际应用中,所有旋转机械都会受到某种程度的阻尼影响,因此需进一步考虑支撑刚度和支撑阻尼对转子系统的影响。

3D进动模态用于描述转子在三维空间中的振动特性,转子不仅会在其旋转轴线上振动(即轴向振动),还会在垂直于旋转轴线的平面上进行振动(即横向振动),以No.1轴承为例的计算3D进动模态如图20~21所示。

当系统存在阻尼时,阻尼会消耗振动能量,使得系统的振动响应发生变化。在某些情况下,阻尼可能会降低系统的临界转速,因为阻尼能够抑制系统的振动,使得系统更容易达到稳定状态。如表4所示,发电机转子轴系Campbell图中各阶阻尼临界转速与表3无阻尼临界转速相差不大。

Mode No. = 3 STABLE MIXED (7% F, 92% B) Whirl  
Shaft Rotational Speed = 1149 rpm  
Whirl Speed (Damped Natural Freq.) = 1148 rpm (19 Hz), Log. Dec. = 0.4338

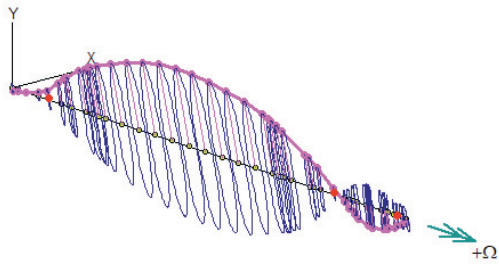


图 20 No. 1 轴承发电机垂直一阶 3D 进动模态

Mode No. = 4 STABLE FORWARD Precession  
Shaft Rotational Speed = 2016 rpm  
Whirl Speed (Damped Natural Freq.) = 2016 rpm (34 Hz), Log. Dec. = 1.4039

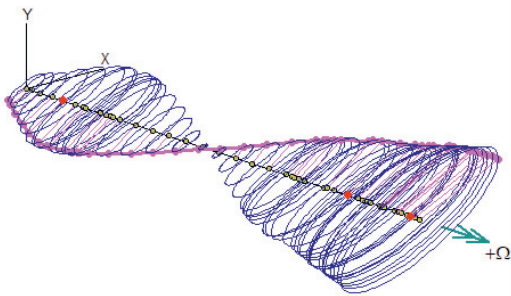


图 21 No. 1 轴承发电机水平二阶 3D 进动模态

表 4 阻尼临界转速计算结果 (单位:r/min)

	发电机一阶		发电机二阶	
	水平	垂直	水平	垂直
No. 1	807	1 148	2 016	3 203
No. 2	801	1 155	1 951	3 237
No. 3	-	1 128	1 781	3 042
No. 4	-	1 131	1 742	3 052

注:No. 3 和 No. 4 轴承在低速下计算数值不收敛,未获得有效结果。

在转子动力学中,对数衰减率是一个重要的稳定性指标。如果对数衰减率较小,表示系统阻尼不足,需要采取措施增加阻尼以提高系统的稳定性。各阻尼临界转速下的计算对数衰减率  $\delta$  如表 5 所示。

### 3.4 Q 因子计算

目前所用准则是基于临界转速必须避开工作转速  $\pm 15\%$  以上,但实际上,个别电机即使在临界转速附近运行,其稳定性也良好;而也有相反的例子,个别电机满足临界转速避开率设计准则,但平衡起来很困难,说明临界转速避开率准则存在瑕疵,现

在,新的 Q 因子(轴系共振峰值响应灵敏度)准则被用来代替临界转速避开率。Q 因子对轴系振动的影响见表 6。

表 5 各阶阻尼临界转速下的对数衰减率  $\delta$

	发电机一阶		发电机二阶	
	水平	垂直	水平	垂直
No. 1	0.596 7	0.433 8	1.403 9	0.869 7
No. 2	0.512 6	0.406 1	1.199 0	0.824 3
No. 3	-	0.427 9	1.213 7	0.994 5
No. 4	-	0.383 4	0.923 5	0.951 3

注:No. 3 和 No. 4 轴承在低速下计算数值不收敛,未获得有效结果。

表 6 Q 因子对轴系振动的影响

Q 因子大小	对轴系影响
$Q < 2.5$	检测不到峰值响应,连续运行没有问题
$2.5 < Q < 5.0$	可检测到峰值响应,响应不大,转子经良好平衡后可在此转速下长期、连续运行
$5 < Q < 10$	易检测到峰值响应,高速平衡后可在此转速下长期、连续运行
$10 < Q < 15$	中等峰值响应,可能要现场平衡
$15 < Q < 25$	大的峰值响应,需要现场平衡
$Q > 25$	需要新的平衡技术,或改进设计

Q 因子描述了系统在共振频率下的能量储存与耗散之间的比例关系,在转子动力学中,Q 因子( $Q = 1/2\xi = \pi/\delta$ ,式中  $\xi$  为阻尼比, $\delta$  为对数衰减率)直接影响转子的振动特性和稳定性,通过分析和计算 Q 因子的值,可以更好的了解转子的性能和稳定性,为转子系统的设计和优化提供重要的参考和依据。

较高的 Q 因子意味着系统能够更有效地储存能量,从而在共振时产生更强烈的振动;而较低的 Q 因子则意味着系统能量耗散较快,振动较为平衡。根据表 7 对数衰减率  $\delta$  计算 Q 因子如表 7 所示。

表 7 各阶阻尼临界转速下的 Q 因子

	发电机一阶		发电机二阶	
	水平	垂直	水平	垂直
No. 1	5.26	7.24	2.24	3.61
No. 2	6.13	7.74	2.62	3.81
No. 3	-	7.34	2.59	3.16
No. 4	-	8.19	3.40	3.30

注:No. 3 和 No. 4 轴承在低速下计算数值不收敛,未获得有效结果。

如图 22 所示, No. 1~No. 4 轴承下的发电机转子轴系共振转速峰值响应灵敏度 Q 因子符合安全评价标准。

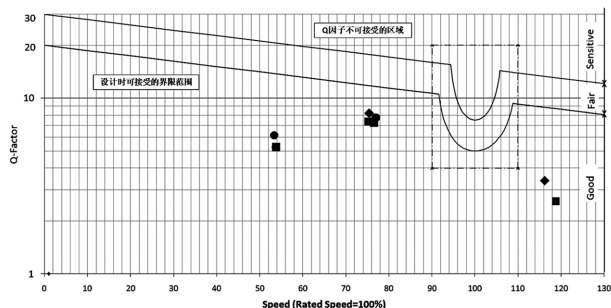


图 22 发电机转子轴系 Q 因子

### 3.5 转子波特图临界转速

转子波特图是一种描述转子在旋转过程中振幅和相位随转速变化的图形,当波特图上振幅曲线出现波峰,同时相位发生急剧增加(增加幅度大于  $70^\circ$ )时,这时所对应的转速即是该测点处转子临界转速。各阶临界转速如表 8 所示。

表 8 转子波特图临界转速计算结果 (单位: r/min)

	发电机一阶		发电机二阶	
	水平	垂直	水平	垂直
No. 1	831	1 111	2 338	3 060
No. 2	814	1 122	2 210	3 129
No. 3	-	1 100	2 035	2 940
No. 4	-	1 110	1 875	2 990

注: No. 1 轴承下发电机转子现场实测临界转速: 841 r/min 和 1 033 r/min, No. 3 和 No. 4 轴承在低速下计算数值不收敛, 未获得有效结果。

表 4 和表 8 临界转速不一样的原因是 Campbell 图和波特图是两种计算方法计算出的临界转速, Campbell 图是通过求根方式计算出的值, 而波特图是通过响应计算出的临界转速值, 二者计算模型不一样造成。在实际应用中, 通常需用多种方法相互验证和补充, 以确保临界转速的准确性和可靠性。

### 3.6 小结

本研究对轴系转子动力学稳定性进行了分析计算, 无论临界转速避开率还是 Q 因子判别准则,

四种优化轴承下的发电机转子轴系动力学稳定性均满足安全评价标准, 均可以保证发电机安全、可靠运行。

## 4 结论

本研究通过轴承静特性与转子动力学稳定性仿真计算, 证实 No. 1~No. 4 轴承均满足设计准则, 其中 No. 2 轴承优化方案在降低损耗方面成效显著, 单机损耗降低 112 kW, 减少 15.5%, 单机年节能近百万千瓦时, 实现了与国际引进技术相当的节能水平, 大幅提升了发电机效率。对于“华龙一号”等大型自主三代核电项目, 该方案将带来显著的能源成本节省, 增强企业经济效益, 并推动核电行业绿色转型, 符合节能减排政策, 对构建清洁、低碳能源体系具有积极意义。

## 参考文献:

- [1] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 等. 高等转子动力学: 理论、技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [2] 朱均, 虞烈. 流体润滑理论[M]. 西安交通大学润滑理论与轴承研究所, 1991
- [3] 张直明, 张言羊, 谢友柏, 等. 滑动轴承的流体动力润滑理论[M]. 高等教育出版社, 1986
- [4] 成大先. 机械设计手册(轴承)[M]. 化学工业出版社, 2004
- [5] 李典来, 姚全, 周琴, 等. 某型汽轮机滑动轴承特性分析[J]. 船舶工程, 2019, 41(4): 61-65+134
- [6] 陆颂元. 汽轮发电机组振动[M]. 中国电力出版社, 2000
- [7] 申秀兰, 张秋鸿, 吕智强. 半转速百万等级核电汽轮发电机组轴系振动特性研究[C]//中国动力工程学会透平专业委员会. 中国动力工程学会透平专业委员会 2011 年学术研讨会论文集. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司, 2011: 129-132
- [8] 王洪鹏, 韩丽丽, 吕智强. 哈汽一东芝型超超临界 1 000 MW 汽轮机[J]. 热力透平, 2008(1): 6-11
- [9] 王延博, 张学延, 寇胜利. 汽轮发电机组轴系-支撑系统油膜失稳问题探讨[J]. 汽轮机技术, 1999(3): 19-22
- [10] 黄文虎, 夏松波, 焦映厚, 等. 旋转机械非线性动力学设计基础理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006

# “双碳”目标下核电设备产业链的建设路径分析

刘润智

中广核工程有限公司, 广东 深圳 518000

**摘要:**在“双碳”目标下,核电建设迎来新一轮建设高峰,三代核电技术的应用为我国核电设备产业链的发展和升级带来前所未有的机遇。本文深入探讨核电设备产业链现状及存在的问题,围绕加快培育优质资源、深化核心技术攻关、提升安全质量水平、深化协同融通等方面,提出核电设备产业链的建设路径,为提升核电设备产业链韧性和安全水平提供理论依据与实践指导。

**关键词:**核电设备;产业链;安全;韧性

中图分类号:F426;F273

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0055-05

## Analysis on the Construction Path of Nuclear Power Equipment Industry Chain under the “Double Carbon” Target

LIU Runzhi

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., 518000, Shenzhen, Guangdong, China)

**Abstract:** Under the goal of "dual carbon", nuclear power construction has ushered in a new round of construction peak. Simultaneously, the application of third-generation nuclear power technology has brought unprecedented opportunities for the development and upgrading of China's nuclear power equipment industry chain. This paper probes into the current situation and existing problems within the nuclear power equipment industry chain, focusing on core areas including accelerating the cultivation of high-quality resources, deepening key technology tackling, improving the level of safety and quality, and deepening coordination and integration. Based on this analysis, the construction path of the nuclear power equipment industry chain is put forward to provide theoretical basis and practical guidance for enhancing its tenacity and safety level.

**Key words:** nuclear power equipment; industrial chain; safety; toughness

### 1 引言

为应对全球气候持续变化带来的严峻挑战,碳减排已成为全球共识。2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出了2030年实现“碳达峰”、2060年实现“碳中和”的“双碳”目标,为我国全面推动绿色低碳转型、实现可持续发展提供了根本遵循。中国作为全球能源消费第一大国、全球制造业第一大国,电力碳排放在我国总排放中占

比近50%,由此可见,电力系统减排是实现“双碳”目标的关键举措之一。与其它能源相比,核能具有能量密度高、电力过程环境友好、清洁低碳等特点,一座百万千瓦核电厂相较于同等燃煤电厂每年可减少二氧化碳排放600多万吨,是减排效应最大的能源之一,已成为世界清洁能源的主力军。因此,积极推进核电建设对我国在实现“双碳”目标路径中减少碳排放将发挥关键作用<sup>[1]</sup>。

截至2024年9月30日,我国在运核电机组56

收稿日期:2025-07-03

**作者简介:**刘润智(1982—),男,2005年毕业于四川大学广播电视新闻专业,大学本科,工程师。现任中广核工程有限公司设备采购与成套中心副主任,主要从事设备采购管理、产业链建设、商务管理等研究领域研究方向相关工作。

台,在建核电机组 26 台,运行机组数及容量均列世界第三位,在建机组数及容量均保持世界第一,中国核电规模逐步扩大。为实现“双碳”目标,加快推进构建清洁低碳能源体系,根据规划,预计到 2035 年国内在运核电装机规模将达到 1.7 亿千瓦,按此目标还需新增建成投运 78 台机组,核电发展进入重要历史机遇期<sup>[2]</sup>。

面对核电发展新形势,当前国内核电设备产业链还存在韧性和安全水平不足等风险。习近平总书记强调,产业链供应链在关键时刻不能掉链子,这是大国经济必须具备的重要特征,要着力提升产业链供应链韧性和安全水平<sup>[3]</sup>。因此,加快打造具有较强韧性与较高安全水平的核电设备产业链,对支撑我国核电行业高质量发展,促进“双碳”目标实现具有重要战略意义。

## 2 我国核电设备产业链概述

核电产业链主要涉及研发、设计、制造、调试和运维等环节,包括核岛、常规岛、辅助系统等设备类别,是核电产业链的核心枢纽,具有装备属性强、技术门类多、科技含量高、制造要求高、可靠性要求高、产业链条长等特点,是典型的资金密集型、技术密集型产业,一定程度上代表了一个国家的先进制造业水平和技术创新水平。

自 1983 年秦山核电站核准以来,在国家统一规划下,我国核电经过“适度发展”到“积极发展”再到“安全高效发展”阶段,进入到当前的“积极安全有序发展”阶段。从区域分布来看,目前已形成以黑龙江和辽宁为代表的东北地区、以江苏和上海为代表的华东地区、以四川和重庆为代表的西南地区三大核电装备制造基地。从设备专业来看,形成了以东方电气、上海电气和哈尔滨电气为产业龙头的核电主设备制造基地,以一重、二重(德阳)和上海上重为产业龙头的大型铸锻件制造基地,以沈鼓、重泵、江苏神通和大连大高阀门为代表的核级泵阀制造基地。从企业结构来看,形成了以大型装备制造集团为龙头、中小型行业骨干企业为主体的核电设备供应体系。

总体上,通过持续对引进技术的消化吸收、自主创新和升级,实现了核岛和常规岛关键设备

设计、制造核心技术自主可控,我国核电设备产业链韧性和安全水平得到了显著增强。

## 3 我国核电设备产业链存在的问题

党中央多次强调,要把增强产业链韧性和竞争力放在更加重要的位置,着力构建自主可控、安全高效的产业链供应链<sup>[4]</sup>。面对纷繁复杂的国际环境以及核电高质量批量化发展新形势,深入分析当前国内核电设备产业链现状,主要存在优质资源紧张、科技创新不足、质量风险严峻、产业协同不够等问题,使得“双碳”目标下国内核电设备产业链建设面临诸多挑战。

### 3.1 优质资源有限导致产业链供需不够均衡

伴随着我国核电装备制造业发展,通过持续的积累和沉淀,形成了一批质量可靠、技术成熟、经验丰富、勇于创新、善于管理的环境友好型设备制造企业,成为我国核电设备产业链优质资源。但由于核电设备产业链的特殊属性,当前产业链资源较为集中,随着核电发展节奏加快,设备产业链优质资源不断稀释。各核电建设主体为提前锁定资源,均积极筹划关键设备采购,多项目需求集中导致设备产业链负荷呈现急剧攀升趋势,特别是以反应堆压力容器(RPV)和蒸汽发生器(SG)为代表的核岛主设备、汽轮发电机组(TG)、应急柴油发电机(EDG)和中高端泵阀等设备。中高端泵阀虽已实现国产化,但重要泵阀属核安全监管范围,受持证要求及鉴定影响,国内具备供应能力的厂家有限,且由于门槛相对较高,新供应商进入的难度较大;此外,核级泵阀铸件资源有限,中高端泵阀设备整体呈现主包及关键分包资源日趋紧张的态势。

### 3.2 关键核心技术攻关不足导致产业链不够稳定

在我国核电事业发展过程中,各核电国有企业积极与产业链企业一道持续加大关键核心技术攻关力度,并加快推进研发成果落地应用,促进我国核电关键设备、关键材料国产化、自主化取得了重大进展。但部分工艺难度高、技术含量高的关键设备或核心零部件及材料的设计制造仍未掌握,依赖进口。如先导式稳压器安全阀、DCS 关键芯片、高端焊材等<sup>[5]</sup>。贸易保护主义“抬头”,国外供应商断供风险持续存在,产业链安全面临威胁。

同时,部分设备国内市场竞争不充分。一方面,部分“卡脖子”设备实现自主化后转变为国内垄断,该部分设备存在技术难度大、投入资金高、研发周期长等特点,其中部分设备国内企业虽然具备一定的研发能力,但由于核电设备质保体系严格、企业技术人员短缺、市场份额有限等导致自主研发意愿不强,短期内实现突破的难度较大。另一方面,部分设备虽然已经打破长期独家供应的局面,但尚未完全形成“适度竞争、健康发展”的产业链格局,产业链韧性面临风险。

### 3.3 质量风险形势严峻导致产业链不够健全

核安全是国家安全的重要组成部分,是核电事业发展的生命线,设备质量是核电站全周期安全稳定运行的核心。伴随着我国核电事业的发展,核安全文化逐步形成,质量管理体系逐步完善,核电设备主包单位总体上形成了较好的核安全文化和质量管理基础,但核电设备制造纵深跨度大、涉及环节多,产业链企业规模和管理水平参差不齐,下游配套企业的质量意识和管理能力还较为薄弱,尤其随着核电行业越来越被看好,市场正迎来大量产业链“新兵”,设备质量风险面临新的考验。

面对新形势,为了进一步加强核安全管理,五部委联合提出了坚持最严标准规划审批、坚持最高质量工程建设、坚持最严要求运行管理、坚持最严措施强化监管的四个基本原则,核电行业面临更加严格的监管形势,对核电设备产业链质量水平也提出了更高要求<sup>[6]</sup>。

### 3.4 协同深度广度有限导致产业链不够通畅

我国虽然已发展形成了较完备的核电设备产业链体系,但在多年来的发展中,产业链上下游企业间尚未能建立形成有效的协同发展生态圈,合作机制和沟通渠道比较单一,企业之间在技术研发、市场开拓等方面缺乏有效的协同,产业链协同发展不够。

其次,随着数字技术的加速发展,蓬勃发展的核能行业正迎来工业 4.0 时代和数智化转型重要历史发展机遇。但当前核电设备产业链上下游间数智化方面的协同,存在创新不够、动能不足,在顶层规划、数据治理、平台建设、实施路径、资源保障、安全保障、协同推进等方面还存在卡点和堵点,在深度和广度上还存在明显短板等问题。具体表现在,

一是协同停留在较为表面的信息交互与常规流程对接,设计数据交换、接口交换、技术要求确认等设备信息的交互还依赖于传统模式,距离数智化存在差距;二是数据价值尚未充分利用,对数据的加工、分析、建模应用较少,对海量数据中蕴含的规律和趋势挖掘不够,制约了数智化赋能产业链协同效能的发挥。

## 4 “双碳”目标下核电设备产业链建设路径

### 4.1 加快培育优质资源,提升产业链发展力

核电设备产业链条长、覆盖面广,资源参差不齐。链条上的各企业应持续建立健全产业链管理体系,推动产业链积聚协作加快发展步伐,持续丰富市场资源,有效应对核电批量化发展新形势,确保设备产业链具有强劲的资源支撑力。

(1) 强化产业联盟平台运作。各核电国有企业已建立了产业联盟平台,要深化核电设备产业链各相关平台建设,吸纳更多优秀企业加入,逐步壮大平台规模与实力。自 2009 年以来,中广核陆续搭建了中广核核电设备国产化联合研发中心和广东核能产业联盟两个平台,截止目前,平台会员均超 150 家,近 3 年来已连续组织产业链建设大型活动 5 次,专题交流 10 余次,广泛凝聚起“共建、共享、共赢”的共识。

(2) 强化优质资源培育力度。要紧抓核电批量化建设机遇,以构建“适度竞争、健康发展”的产业链格局为目标,加大市场培育力度,特别是技术要求高、制造难度大、成熟资源有限的核级高端阀门、仪表等设备,培育更多“专精特新”企业,持续扩大产业链优质资源池。

(3) 建立精益化产业链管理体系。要探索建立一套科学的信用评价机制,实现对产业链企业信用状况动态监控和管理,筛选履约能力强、合作意愿高的优质企业,并提前预判履约风险,及时采取防范措施,从而持续优化产业链结构,提升产业链诚信水平。参考《国有企业供应商信用评价实施指南》,并结合核电设备供应商的信用特点,中广核正在探索搭建设备采购供应商信用评价管理体系,涵盖基础信用、经营管理、财务信用、履约信用、公共信用、社会评价等方面,后续将结合实践持续优化

和应用,推动行业的诚信建设,提升行业信用管理水平,促进行业可持续健康发展。

#### 4.2 深化核心技术攻关,增强产业链创新力

(1) 深化核心技术攻关。要坚持高水平科技自立自强,加大科技创新投入,持续开展关键设备、零部件及原材料等核心技术攻关,进一步做好零部件深度自主化工作。中广核在推进核电项目建设过程中,积极履行科技创新主体责任,与产业链单位累计签订关键核心技术联合研发协议 200 余份,开展设备鉴定与评定超过 10 000 次,累计突破关键核心技术超过 400 项,实现 1 000 余台套核电高端设备核心技术自主可控,新建核电技术装备国产化率达 95 % 以上。

(2) 积极打造创新联合体。关键核心技术都是复杂的综合性技术,打造创新联合体是加快促进创新能力提升、实现关键核心技术持续突破的有效组织形式;要充分发挥产业链资源优势、规模优势和技术优势,在制造关键环节、核心技术、先进装备上开展联合攻关,加快打造核电装备制造新质生产力,不断增强高质量发展“硬实力”。中广核积极支持产业链单位加大研发投入,建立以落地运用为目标、全流程协同的科研项目管理机制,实现风险共担、成果共享;制定项目落地应用总体实施方案,分阶段推动关键核心技术攻关及落地应用,实现成熟一项、落地一项,持续激发产业链单位参与关键核心技术攻关的积极性。

(3) 开展先进工艺和技术研发。要充分发挥项目批量化建设牵引作用,在解决“有无”的问题后解决“好坏”的问题,积极发展高端核电装备制造,力争在核级泵阀、仪器仪表等技术要求高的设备领域发展出更多具有国际竞争优势的标杆企业,建设形成“自主可控、安全可靠、竞争力强”的现代化核电设备产业体系。

#### 4.3 提升质量管理水平,强化产业链支撑力

核安全是国家安全的重要组成部分,是核电事业发展的生命线,核电设备质量是核电工程建设质量和安全稳定运行的重要核心。产业链必须牢固树立“今天的设备质量就是明天的核安全”理念,加强全面质量管理,铸牢发展支撑力。

(1) 深化核安全文化建设。产业链企业要持续

深化核安全文化及领导力建设,不断提升对确保核安全绝无失的认识,要持续开展和优化产业链质量经理认证系列培训及实践考核,在产业链建立一支对核安全文化高度认同并认真践行的高素质、高技能质量管理人才队伍。近年来,中广核持续推动产业链单位建立“两级 QA、三级 QC”质量管理体系,开展专项质保培训和联合质保监查;会同核能行业协会,连续多年组织产业链质量经理认证、能力提升系列培训及认证,已累计为产业链培养质量经理约 1 400 名,有效促进产业链质量管理人才队伍能力水平不断提升。

(2) 提升设备实体质量。产业链企业要聚焦设备实体质量,持之以恒提升质量管理水平。重点围绕责任落实、痛点治理、风险防范、能力提升等方面采取有效措施,持续提升质量管理体系有效性。中广核已连续七年协同产业链开展设备质量提升行动,协同成立质量风防小组 50 余个,扎实推进质量预演、质量责任田等特色品牌活动,常态化开展见证、巡检、抽查、培训等活动,推动产业链装备质量水平持续提升,近年来,设备质量事件数量持续呈现下降趋势。

#### 4.4 坚持协同融通共赢,提高产业链凝聚力

产业链上下游有效融通,是现代化产业体系建设必不可少的重要内容。

(1) 积极发挥党建引领作用。创新联合党建模式,推动党建与业务深融共促,为高质量推进核电设备产业链建设注入红色引擎;要持续开展廉洁共建,增强行业自律,营造风清气正的市场环境,使党组织在推动廉洁文化建设方面发挥重要作用。中广核积极创新联合党建模式,打造了核电设备产业链党建星火联盟,组织 20 余家产业链企业开展“第一议题”学习、沉浸式教育等活动,进一步提升发展凝聚力。聚焦急难险重任务,协同产业链企业成立党员攻坚总队、党员攻坚先锋队,充分发挥党组织的战斗堡垒和党员干部的先锋模范作用。开展廉洁文化建设及共建活动,推进在核电装备产业链上下游形成风清气正的合作氛围。

(2) 增强数智化转型赋能。要紧抓时代机遇,与核电行业的特点和数智化技术发展趋势紧密结合,统筹、科学地构建数智化转型目标,加快推进产

业链数字化转型和智能化升级,探索设备制造协同平台、共享智能制造应用新场景,全面促进产业链上下游深度融合,构建形成互惠共赢的数智化生态,为产业链发展赋能。中广核持续探索通过数字化技术强化产业链协同,规划建设数字供应链 WE-LINK 系统,依托质量管理、文件管理、进度管理、现场服务管理、基础数据管理等五大功能模块,循序打通产业链设计、制造、交付全周期各环节业务流程,推动关键业务、数据协同贯通,促进实现产业链上下游供需的精准对接与匹配。

(3)深化产业链关系提升。各核电央企要与产业链上下游企业持续探索深度协同新路径,以设备品类为基础,根据不同产业链企业特点,区分不同关系类型,适应性建立不同的关系维护策略。推动开展产业链协作关系提升行动,促进产业链上下游深入交流与协作,建立起联系更加紧密、业务更加协同、目标更加统一的核电设备产业链。中广核探索实施核电设备产业链协作关系提升行动,分层分级推动市场协作关系提升工作。目前已开展 80 余家重点供应商关系提升活动,有效助推各方互信度和关系水平持续提升。

## 5 结语

“双碳”目标下核电设备产业链建设的关键在于以提升产业链的韧性和安全水平为着力点,建立健全产业链建设体系,打造安全、可靠的核电装备产业集群,提升华龙一号高质量批量化建设设备承

载力,为我国碳减排作出积极贡献。本文坚持以习近平总书记对产业链供应链的系列重要指示为根本遵循和行动指南,以服务国家战略、推动核电行业高质量发展为主线,立足于“双碳”目标下核电行业发展的历史性机遇,剖析了当前核电设备产业链发展中存在的突出问题,围绕加快培育优质资源、深化核心技术攻关、提升安全质量水平、深化协同融通等方面提出了“双碳”目标下推进产业链建设的综合路径。

## 参考文献:

- [1] 中国核能行业协会. 我国核电运行年度综合分析核心报告(2023 年度) [EB/OL]. [2024-04-29]. <https://www.china-nea.cn/site/content/44804.html>
- [2] 中国核电发展中心 国网能源研究院有限公司编著. 我国核电发展规划研究[M]. 北京:中国原子能出版社,2019
- [3] 求是网. 国家中长期经济社会发展战略若干重大问题[EB/OL]. [2020-10-31]. [https://www.qstheory.cn/dukan/qs/2020-10/31/c\\_1126680390.htm](https://www.qstheory.cn/dukan/qs/2020-10/31/c_1126680390.htm)
- [4] 中国政府网. 习近平:新发展阶段贯彻新发展理念必然要求构建新发展格局[EB/OL]. [2022-08-31]. [https://www.gov.cn/xinwen/2022-08/31/content\\_5707604.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2022-08/31/content_5707604.htm)
- [5] 中国核能行业协会编. 中国核能行业智库丛书(第五卷)[G/OL]. 北京:中国原子能出版社,2021:29-37. <https://dt.china-nea.cn/html/heneng/upload/heneng/file/20240603/1717382432568095.pdf>
- [6] 国家发展改革委,生态环境部,国资委,能源局,国防科工局. 核电行业安全质量提升行动计划(2022—2025 年)[M]. [2022-05-19]

# 污泥湿式氧化处理及资源化研究

廖勇<sup>1</sup> 万志刚<sup>1</sup> 王智勇<sup>1</sup> 庞晓怡<sup>1</sup> 谭尧荟<sup>1</sup> 孙昊<sup>2</sup>

1. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 江南大学, 江苏 无锡 214000

**摘要:**本研究通过实验室小试探讨了污泥湿式氧化处理过程和污泥处理前后的特性,并验证了湿式氧化处理后污泥制备包装材料的可行性。结果表明,污泥湿式氧化的氧化度随着保温时间、反应温度、初始压力的提高而提高,本试验实现的最佳氧化度为 62.95 %。污泥湿式氧化会释放氧化热,导致反应体系温度高于设定的保温温度。另外,保温阶段为污泥降解的主要反应阶段。污泥湿式氧化导致有机物降解后迁移到液相中,提高了液相中 COD、BOD 和氨氮浓度,降低了污泥的有机质含量和 pH 值。同时,湿式氧化后污泥的粒径更小,比表面积更大,含水率和 Zeta 电位更低。湿式氧化处理后污泥具有更好的固液分离效果。在湿式氧化后污泥添加量为 35 % (干基) 条件下,本试验制备的污泥基包装材料符合包装行业要求,实现了 81.50 % 的污泥留着率。

**关键词:**污泥;湿式氧化;包装材料

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0060-08

## Research on Wet Air Oxidation Treatment and Resource Utilization of Sludge

LIAO Yong<sup>1</sup>, WAN Zhigang<sup>1</sup>, WANG Zhiyong<sup>1</sup>, PANG Xiaoyi<sup>1</sup>, TAN Yaohui<sup>1</sup>, SUN Hao<sup>2</sup>

(1. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China; 2. Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

**Abstract:** In this study, the characteristics of sludge before and after wet oxidation treatment were discussed through laboratory experiments, and the feasibility of making packaging materials from sludge after wet air oxidation (WAO) treatment was verified. The results showed that the oxidation degree of WAO of sludge increased with the increase of holding time, reaction temperature and initial pressure, and the optimal oxidation degree achieved in this experiment was 62.95 %. WAO of sludge would release oxidation heat, resulting in the reaction system temperature higher than the set insulation temperature. In addition, the heat preservation stage was the main reaction stage of sludge degradation. The AWO of sludge led to the migration of organic matter to the liquid phase after degradation, which increased the concentration of COD, BOD and ammonia nitrogen in the liquid phase, and reduced the content of organic matter and pH value of the sludge. At the same time, the particle size of the wet oxidized sludge was smaller, the specific surface area was larger, the water content and Zeta potential were lower. After WAO treatment, the sludge had better solid-liquid separation effect. Under the condition that the sludge addition amount after wet oxidation was 35 % (dry base), the sludge-based packaging materials prepared in this experiment met the requirements of packaging industry, and achieved 81.50 % sludge retention rate.

收稿日期:2025-03-31

基金项目:东方电机有限公司科研项目:污泥湿式氧化试验装置开发;项目编号:708-F-2327。

作者简介:廖勇(1996—),2022年毕业于重庆大学环境工程专业,硕士,工程师。现在东方电机有限公司从事系统设计及运用工作。

万志刚(1985—),2010年毕业于东南大学机械设计及其自动化专业,高级工程师。现在东方电机有限公司从事环境与能源新技术研发。

王智勇(1990—),2014年毕业于华中科技大学电气工程及其自动化专业,高级工程师。现在东方电机有限公司从事环境与能源新技术研发与管理。

Key words: sludge; wet air oxidation; packaging material

污泥作为废水处理的副产物,是指处理生活污水或工业废水的过程中所截留或分离的以有机物为主要成分的固体部分,由活性污泥微生物、微生物自身氧化残余物以及附着于其上的尚未降解或难以降解的有机物和无机物组成,有机质含量通常在40~70%<sup>[1,2]</sup>。污泥的成分非常复杂,含有很多毒性物质,如重金属离子、病原微生物、寄生虫卵等;但也含有可利用物质,如有机物、植物营养元素、氮、磷、钾等。污泥的絮体主要由大量微生物通过胞外聚合物(EPS)、二价阳离子(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等)和其他无机细颗粒架桥而组成<sup>[3]</sup>。大量EPS为难生物降解的大分子胶体物质,而微生物同化的有机物又位于细胞内,难以处理和利用。对污泥细胞进行破解是污泥处理的关键,将细胞内有机物和水分流出,释放毛细水,并将难降解的大分子有机物转化为小分子有机物或无机物。

湿式氧化是污泥溶解或矿化的一种方案,在封闭的高温高压条件下,氧气与有机物反应,产生无机盐和更简单的可生物降解和不可生物降解化合物;在某些情况下,可能使有机物完全氧化成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。湿式氧化是通过自由基对有机物攻击,产生低分子量的有机酸,典型的稳定中间体有乙酸、甲醇和乙醇等。湿式氧化可以全部或部分破坏细胞结构,释放出胞内水,降低污泥含水率,并实现污泥无害化处理。

随着我国经济发展,污水处理量剧增,相应污泥产量也随之剧增,2019年我国污泥产量约为6000万吨,预计2025年污泥年产量超过亿吨。面对巨大的污泥产量,开发污泥无害化处理具有重要意义,也是后续污泥资源化利用的前提。基于此,东方电机开展了污泥湿式氧化(WAO)技术研究,通过实验室规模的小试,探讨了污泥湿式氧化处理过程,分析了湿式氧化处理后前的污泥特性,并验证了湿式氧化后污泥制包装材料的可行性。

## 1 材料与实验方法

### 1.1 实验装置

污泥湿式氧化试验装置主要包括反应釜、氧气

罐、冷却水箱等,如图1所示。反应釜采用哈式合金,容积为1L,内有搅拌器和冷却管,通过加热套对反应釜加热,出料口设在反应釜底部。压缩氧气(95%氧浓度)通过曝气头进入反应釜中。反应釜内的压力、温度通过传感器将信息汇集到数据采集界面。

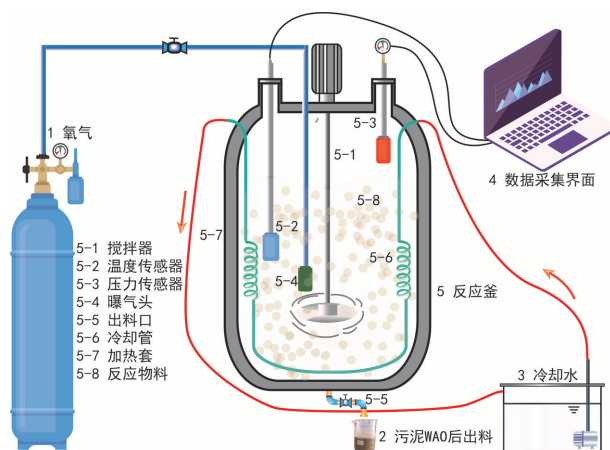


图1 污泥湿式氧化原理试验装置示意图

### 1.2 实验方法与数据测试

实验前,取无锡市太湖新城污水处理厂污泥脱水车间出料口的污泥,碾磨成粉,并与水按比例配制为含水率为90%的泥浆(以模拟将来工业化污泥湿式氧化工艺进料端和污水厂污泥脱水车间之间的连接环节)。通过玻璃棒将600 mL泥浆引流入反应釜中,并关闭反应釜;将反应釜中的搅拌转速设为600 r/min,反应温度分别设为150℃、200℃和250℃,保温时间分别设为30 min、60 min和90 min,通入压缩氧气(含氧95%)使反应釜内压力分别达到3.0 MPa、4.0 MPa和5.0 MPa。进料和参数设置完成后,反应釜开始升温至保温温度,然后进行保温,保温结束后打开冷却水循环泵,待反应釜内温度降到30℃时,打开反应釜底部出料口阀门,进行出料。

试验过程中,通过数据采集界面收集污泥湿式氧化过程中的温度、压力和氧含量。对反应前后的泥水混合物采用循环水式多用真空泵进行简单的固液分离,真空度设为-0.098 MPa,抽滤时间设为2 h,如图2所示。经上述简单分离后的固相作为含水率测定的原料。本试验将对湿式氧化前后的污

泥进行上清液和污泥体系进行特征分析,并对污泥基包装材料进行表征和污泥留着率分析。

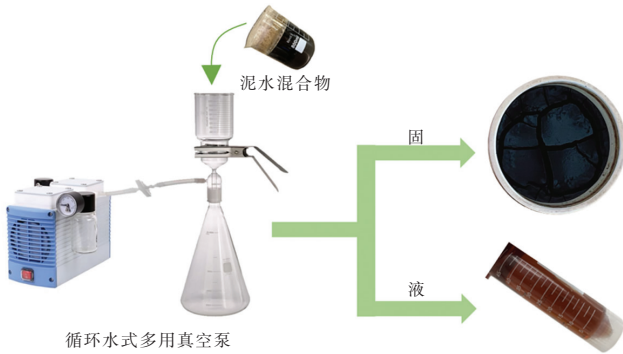


图2 泥水混合物固液分离示意图

## 2 结果与讨论

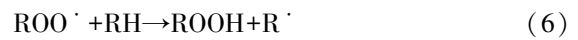
### 2.1 污泥湿式氧化过程分析

污泥湿式氧化是通过反应产生的自由基攻击有机物,将大分子有机物转化为小分子有机物。湿式氧化机理较复杂,目前研究结果普遍认为是自由基反应,可分为链的引发、传递和终止三阶段<sup>[4]</sup>。

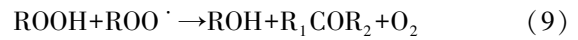
①链的引发:反应物分子生产自由基的过程。



②链的传递:自由基与分子相互作用,交替进行使自由基数量迅速增加的过程。



③链的终止:自由基间相互碰撞生成稳定分子的过程。



本试验过程中,保温时间对有机物的氧化有极其显著的影响( $p \leq 0.001$ ),延长反应的保温时间利于污泥中的有机物氧化,即有机物在湿式氧化过程中被降解的更彻底。如图 3a 所示,在反应温度为 200 °C,初始压力为 3 MPa 条件下,当保温时间为 30 min 时,湿式氧化处理后污泥有机质含量为 41.40%;当保温时间增加至 60 min 和 90 min 时,处理后污泥中有机质含量为 23.36% 和 19.16%。

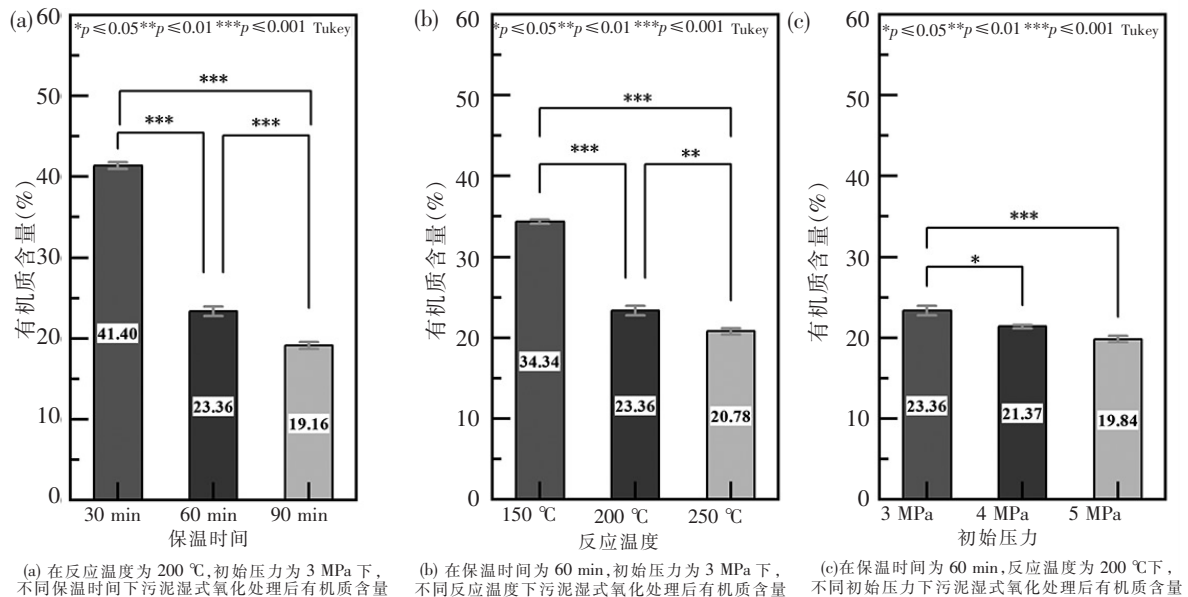


图3 不同反应条件下污泥湿式氧化后的有机质含量

本试验发现提高反应温度可进一步降低湿式氧化后污泥的有机质含量(图 3b)。在保温时间为 60 min,初始压力为 3 MPa 条件下,当反应温度为 150 °C、200 °C、250 °C 时,湿式氧化后污泥有机质含

量分别为 34.34%、23.36% 和 20.78%。

试验过程中,通过改变向反应釜中注入氧气的量来改变反应釜中的初始压力。试验发现当初始压力从 3 MPa 提高到 4 MPa 时,湿式氧化后污泥有机质含

量从 23.36 % 降到 21.37 %, 降低幅度较小 ( $p \leq 0.05$ ); 当初始压力从 4 MPa 提高到 5 MPa 时, 反应后污泥的有机质含量数据不具备差异性 (图 3c)。

湿式氧化处理效果可用氧化度来表示。

$$\text{氧化度} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中,  $C_0$  为湿式氧化前污泥有机质含量, %;  $C_1$  为湿式氧化后污泥有机质含量, %。

本试验所用的原泥有机质含量为 51.72 %, 在反应温度为 200 °C, 初始压力为 3 MPa, 保温时间 90 min 条件下, 污泥氧化度为 62.95 %, 是本试验实现的最佳氧化度。氧化度随着保温时间、反应温度、初始压力的提高而提高, 但提高幅度随着上述三因素的提高而减小。

为研究污泥湿式氧化过程, 本试验连续监测了反应釜内温度和压力变化。图 4 展现了在反应温度为 200 °C, 初始压力为 3 MPa, 保温时间为 60 min 的条件下, 反应釜内温度和压力的变化曲线。当反应进行到 140 min 时釜内温度达到 200 °C, 保温至 200 min 左右, 然后采用冷却水对反应釜进行降温。反应开始时, 釜内压力随温度升高逐渐升高, 当温度升到 200 °C 时, 釜内压力达到最大 (4.70 MPa), 此时反应釜内氧含量为 66.65 %。釜内温度达到保温温度 (200 °C) 后, 釜内压力整体呈下降趋势。处于保温阶段时, 反应釜加热套停止加热仅起保温作用, 釜内温度仍持续上升至 214 °C, 保温结束时釜内温度为 206.10 °C (氧含量 14.64 %), 这是污泥湿式氧化过程有机物被氧化释放出氧化热所导致, 该现象与 I. Baskyr 等人试验现象一致。<sup>[5-6]</sup>

当釜内反应进行到 233 min 时, 釜内温度 (196.30 °C) 低于保温温度, 此时釜内氧含量为 6.01 %, 表明在釜内温度大于 200 °C 的 93 min 内有 60.64 % 的氧气被消耗; 而在反应的前 140 min 为加热过程, 期间有有机物氧化消耗了约 33.26 % 的氧气。上述说明污泥湿式氧化的保温阶段是污泥中有机物氧化降解的主要阶段。

## 2.2 湿式氧化处理前后污泥特征分析

Y. Khan 等人的研究表明湿式氧化将污泥挥发性总固体 (VTS) 转化为短分子挥发性有机酸 (VFA)、醛类 (HCHO) 和溶解性有机物 (SCOD), 并

产生  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$ <sup>[7]</sup>。本试验也验证了湿式氧化过程污泥中有机物向液相中迁移的现象。本试验通过对湿式氧化前后污泥上清液进行分析 (反应条件: 反应温度 200 °C, 初始压力 3 MPa, 保温时间 60 min), 发现湿式氧化后污泥上清液中 COD 浓度为 18 098.67 mg/L, 氨氮浓度为 768.04 mg/L, 都远高于原泥上清液中的 COD 和氨氮浓度, 如表 1 所示。这表明湿式氧化过程污泥中有机物和氨氮迁移到了液相中。

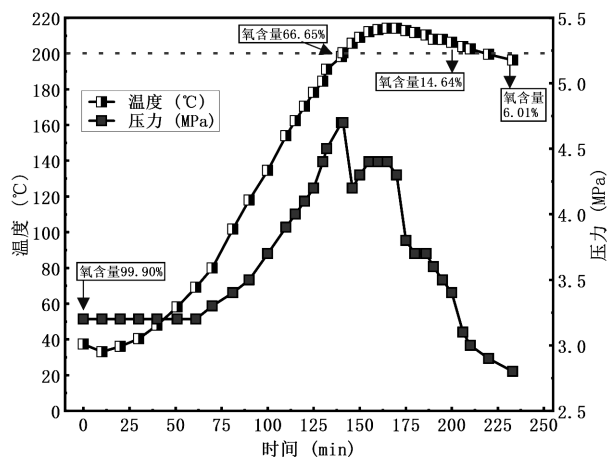


图 4 污泥湿式氧化过程温度和压力变化趋势

表 1 污泥湿式氧化处理前后上清液特征

指标 (mg/L)	COD	BOD	氨氮
原泥	849.45	570.58	82.20
WAO 处理后	18 098.67	10 862.50	768.04

通过对上清液进行有机物分子量分布分析发现, 污泥湿式氧化处理后的上清液中分子量  $10^5 \sim 10^6$  Da 的有机物高于原泥的上清液, 这说明污泥中存在较大有机物的溶出 (图 5(a) 和图 5(b))。另外, 处理后的污泥上清液中小于 1000Da 的峰值也高于原泥上清液, 这说明湿式氧化过程中产生了更多的小分子有机物。通过三维荧光光谱 (EEMs) 技术对上清液有机物进行三维荧光表征, 如图 5(c) 和图 5(d) 所示。结果表明, 污泥湿式氧化后上清液在 EX/EM 为 265 ~ 285/325 ~ 375 出现荧光峰 A, 代表类蛋白成分物质<sup>[8]</sup>; 在 EX/EM 为 310 ~ 320/400 ~ 420 观察到荧光峰 B, 代表代表腐殖酸物质<sup>[8]</sup>。该现象也同样说明污泥在湿式氧化中存在有机物的溶出。

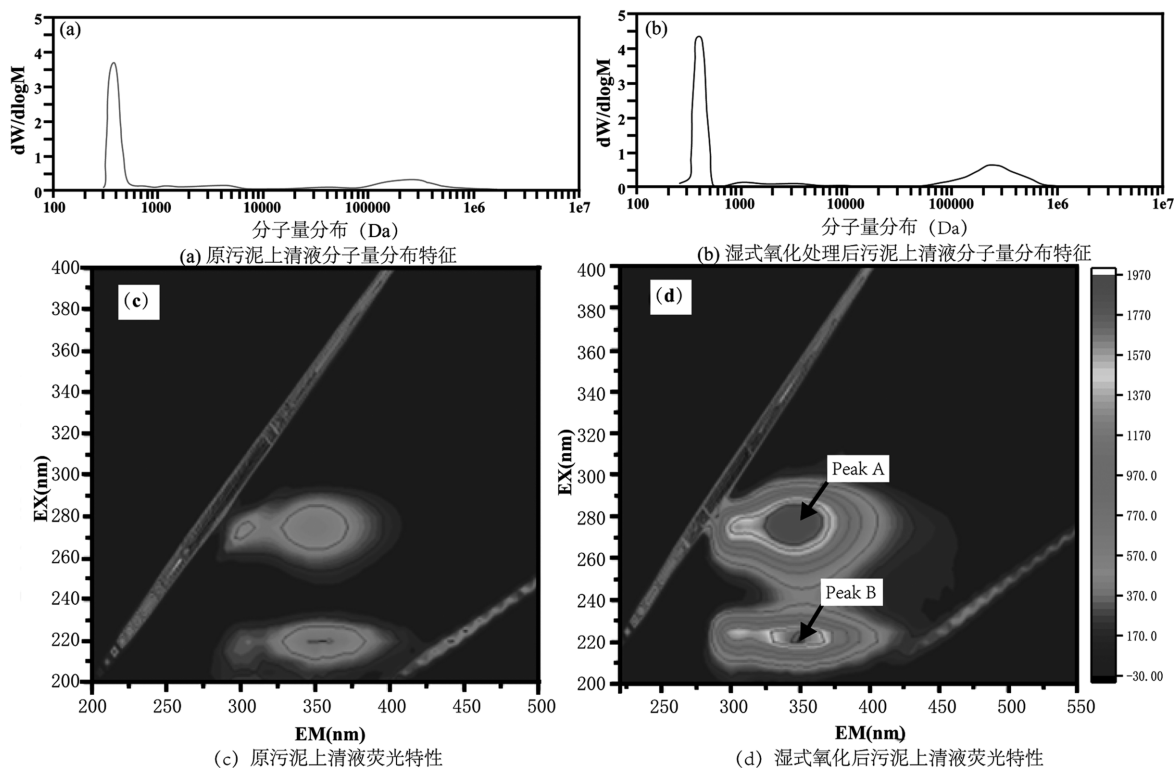


图5 湿式氧化前后污泥上清液表征

另一方面,通过对反应前后的污泥进行有机质分析发现,在反应温度为 200 ℃,初始压力为 3 MPa,保温时间为 60 min 的反应条件下,反应后污泥的有机质含量平均值为 23.36 %,远低于原泥的 51.72 %,如图 6a 所示。同时,对污泥处理前后的浆液进行 pH 测试,发现处理后污泥浆液 pH 平均值为 4.82,低于原泥浆液的 6.67,如图 6b 所示。该现象进一步说明湿式氧化过程中污泥有机物溶出向液相转移,并产生了分子量更小的有机酸。

被破坏,EPS 被分解成小分子有机物或无机物,利于污泥脱水和进行固液分离。本试验原泥含水率平均值为 84.87 %,湿式氧化处理后污泥含水率平均值为 55.93 %(反应条件:反应温度 200 ℃,初始压力 3 MPa,保温时间 60 min),如图 7 所示。可见,湿式氧化可将污泥含水率降到 60 % 以下。需要注意的是,本试验采用图 2 的过程进行的简易固液分离,若采用污水厂正常脱水设备将实现更低的含水率。

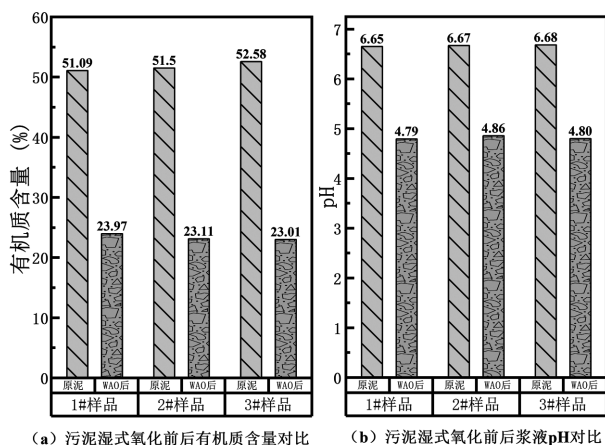


图6 污泥湿式氧化前后有机质含量和浆液 pH  
湿式氧化可造成污泥细胞破裂,污泥絮体结构

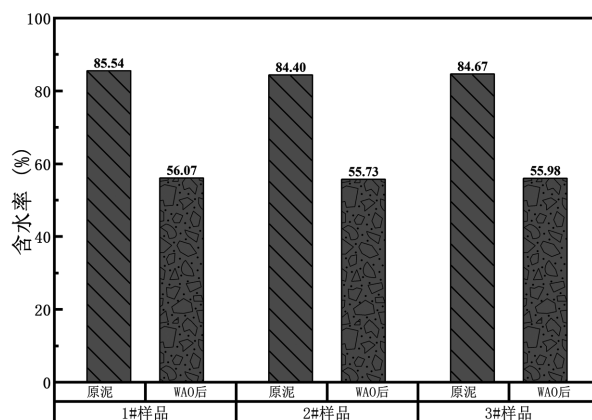


图7 湿式氧化前后污泥的含水率

通过对湿式氧化处理前后的污泥进行电子扫描电镜(SEM)和粒径分析发现,污泥经过湿式氧化

处理后颗粒明显细化,大颗粒减少,如图 8(a)~8(d)所示。由图 8(e)和表 2 可知,原泥中 90 % 粒径小于 142.97  $\mu\text{m}$ ,中位粒径为 30.917  $\mu\text{m}$ ;湿式氧化后污泥中 90 % 粒径小于 21.257  $\mu\text{m}$ ,中位粒径为 5.158  $\mu\text{m}$ 。污泥湿式氧化后颗粒粒径变小,这是由于污泥絮体机构被破坏,污泥颗粒不再相互粘连或搭桥形成大颗粒。污泥湿式氧化处理后,污泥体系的比表面积为 0.743  $\text{m}^2/\text{g}$ ,高于原泥的 0.157  $\text{m}^2/\text{g}$ (表 2)。

表 2 污泥湿式氧化前后粒径和比表面积对比

	粒径 ( $\mu\text{m}$ )			比表面积 ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
	D10	D50	D90	
原泥	6.414	30.917	142.97	0.157
处理后污泥	1.332	5.158	21.257	0.743

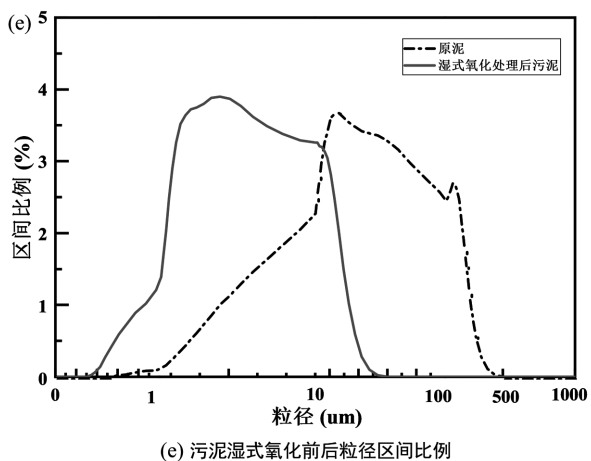
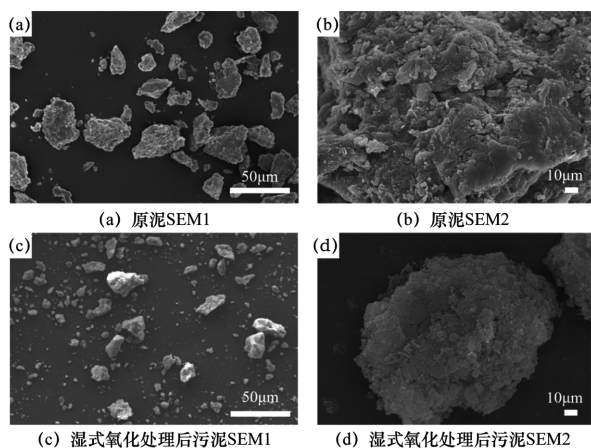


图 8 污泥湿式氧化前后 SEM 图和粒径区间比例

进一步对原泥和湿式氧化处理后污泥进行 Zeta 电位分析,发现原泥的 Zeta 电位为 -20.10 mV,处理后污泥 Zeta 电位平均值为 -27.67 mV,如图 9 所示。

湿式氧化后污泥体系比表面积的增大,会促进对负电荷的吸附,另外污泥湿式氧化过程中蛋白质等生物聚合物的溶出也会降低 Zeta 电位。Zeta 电位越低越有利于污泥脱水,所以湿式氧化利于污泥的固液分离。

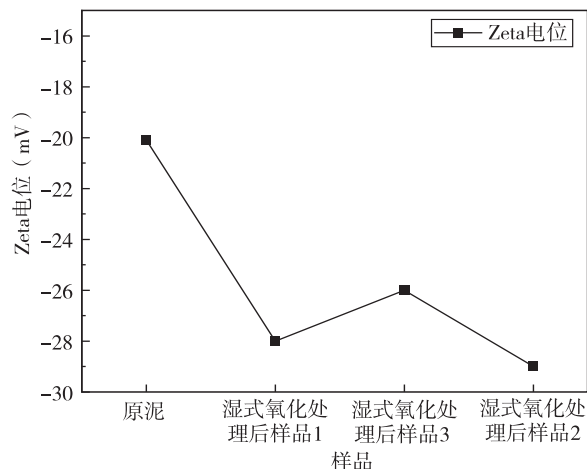


图 9 污泥湿式氧化前后 Zeta 电位变化

本试验通过污泥自然沉降的直观方式观察了污泥湿式氧化处理前后的固液分离效果,如图 10 所示。结果发现,湿式氧化后污泥在静置 24 h 后具有良好的沉淀分离效果(图 10(f))。污泥的低含水率和良好的固液分离效果利于污泥后续的机械脱水处理。

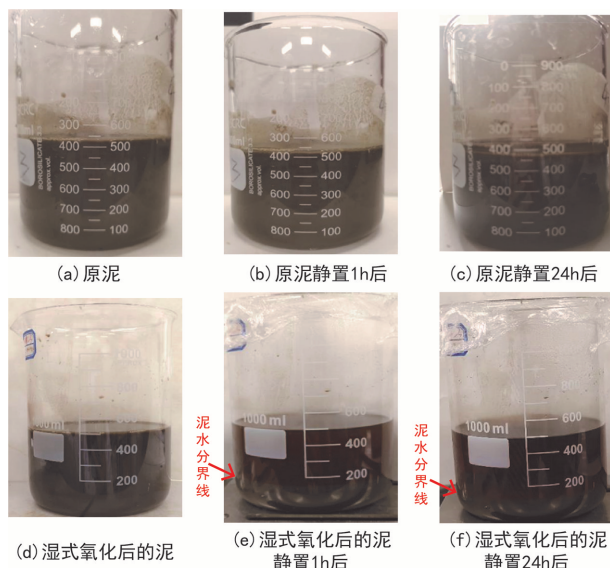


图 10 污泥湿式氧化前后的固液分离效果

### 2.3 污泥湿式氧化后的资源化

污泥资源化利用是污泥湿式氧化处理的最终目标,实现污泥的经济价值,打通污泥处理最后一

程。当前,污泥资源化利用主要为土地利用、建材利用、能源化工利用和其他利用等四方面<sup>[9-11]</sup>,如图 11 所示。

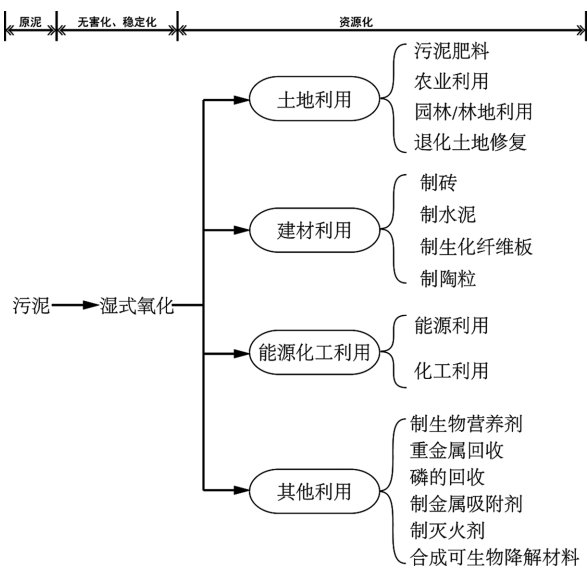


图 11 污泥湿式氧化后资源化方式

图 11 中合成可生物降解材料是当前研究热点,如江南大学将污泥无害化处理后作为包装材料的原料之一,采用无害化处理后污泥可改善纤维间的结合效果,发现污泥基包装材料更加紧致,力学性能更佳<sup>[12,13]</sup>。从污泥元素组成来看,湿式氧化后污泥成分与造纸填料高岭土类似<sup>[14]</sup>,而且其铅、镉、汞和六价铬的总和小于 100 mg/kg 符合《包装与环境》(GB/T 16716—2018)的要求,如表 3 所示。另外,湿式氧化后污泥中 90 % 粒径小于 21.257  $\mu\text{m}$ ,满足造纸填料 0.5~47  $\mu\text{m}$  的粒径要求<sup>[15]</sup>。所以,湿式氧化后污泥具备作为包装填料的可能性。

表 3 污泥湿式氧化前后的元素组成

元素(mg/kg)	Si	Ca	Fe	Al
原泥	161 810	60 140	152 540	54 460
处理后污泥	171 810	76 320	146 529	68 090
元素(mg/kg)	Pb	Cd	Hg	Cr <sup>6+</sup>
原泥	0.015	0.003	10.54	0.027
处理后污泥	0.029	0.003	6.16	0.077

东方电机为寻求一种湿式氧化后污泥的高价值利用方案,与江南大学在实验室规模下验证了污泥湿式氧化后作为制包装材料原料的可行性,如图 12 所示。在污泥添加量为 35 % (干基) 条件下,能制备出可生物降解的包装材料(图 12(a)),污泥基

包装材料完全符合包装行业要求,详见表 4。

表 4 本试验污泥基包装材料指标检测

指标(mg/kg)	纸浆模塑制品技术通则 (GB/T 42943—2023)	本试验污泥 基包装材料
水分(%)	≤14.0	6.25
Pb	≤90	0.007
Cd	≤60	0.001
Hg	≤60	0.70
Cr <sup>6+</sup>	≤75	-
Pb+Cd+Hg+Cr <sup>6+</sup>	≤100	0.708
多溴联苯	≤1 000	-
多溴二苯醚	≤1 000	-
有机氯	≤150	-
邻苯二甲酸酯	≤1 000	11

注:-表示未检出

通过扫描电镜发现,污泥基包装材料中成功结合了污泥颗粒,实现了 81.50 % 的留着率,达到了污泥替代部分纤维的目的(图 12(b)、图 12(b)(c))。将湿式氧化后污泥作为包装材料的原料之一,可有效减少纯纤维的使用量,降低碳排放,保护植被碳汇。另外,包装材料具有使用广泛、用量大、增量快的特点,污泥基包装材料具有较好的市场前景。

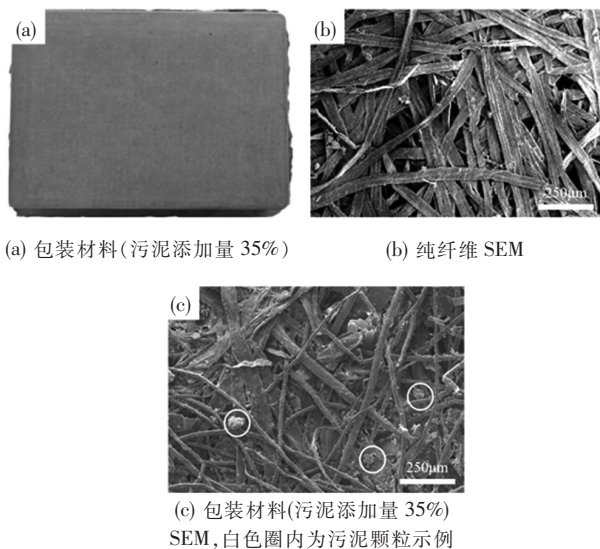


图 12 污泥基包装材料及扫描电镜图

污泥湿式氧化处理后作为填加物用于包装材料的制作,极大的提高了污泥的经济价值,可打通的污泥处理和资源化利用路径。

### 3 结语

(1)污泥湿式氧化的氧化度随着保温时间、反

应温度、初始压力的提高而提高,但提高幅度随着上述三因素的提高而减小。本试验在反应温度 200 ℃,初始压力 3 MPa,保温时间 90 min 条件下,实现本试验最佳氧化度为 62.95 %。

(2)污泥湿式氧化的保温阶段是有机物氧化降解的主要阶段;湿式氧化过程中有机物氧化释放的氧化热会使污泥体系温度高于保温设置的温度。

(3)污泥湿式氧化处理后有机物被降解形成小分子有机物进入液相中,导致液相中 COD、BOD、氨氮浓度远高于原泥上清液;另外,污泥湿式氧化处理后的颗粒粒径和 pH 值低于原泥。

(4)湿式氧化会降低污泥的含水率和 Zeta 电位,使得湿式氧化后污泥固液分离效果良好。

(5)湿式氧化后污泥可作为制备包装材料的填充物,在污泥添加量为 35 % (干基)条件下,制备的污泥基包装材料符合包装行业要求,并实现了 81.50 %的留着率。

#### 参考文献:

[1] 何泽源. 低有机质剩余污泥 VFA 碳源高效转化技术[D]. 重庆大学,2020

[2] Dewil R, Appels L, Baeyens J, et al. Peroxidation enhances the biogas production in the anaerobic digestion of biosolids [J]. *Journal of Hazardous Materials*,2007,146(3):577-581

[3] 袁悦,谭学军,郑舍予. 基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价[J]. *环境科学*,2019,40(7):3216-3222

[4] 叶舒帆. 催化湿式氧化处理城市污水处理厂污泥的实验研究[D]. 东北大学,2008

[5] Baskyr I, Weiner B, Riedel G, et al. Kopinke, Wet oxidation of char-water-slurries from hydrothermal carbonization of paper and brewer's spent grains [J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 128:425-431

[6] Silva Thomsen Lars Bjørn, Anastasakis Konstantinos, Biller Patrick. Wet oxidation of aqueous phase from hydrothermal liquefaction of sewage sludge[J]. *Water Research*,2022,209:117863

[7] Khan Y, Anderson G K, Elliott D J. Wet oxidation of activated sludge[J]. *Water Research*,1999,33(7):1681-1687

[8] 廖勇. 潮汐人工湿地污水处理强化技术及灰水处理工程应用研究[D]. 重庆大学,2022

[9] 陈果,李雅婕,凌建菊,等. 城市剩余污泥处理处置及资源化利用研究进展[J]*广东化工*,2024,51(10):116-120

[10] 矫洪铭,周盈盈,毛佳乐,等. 剩余污泥深度脱水及资源化利用研究进展[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 1-12. [2025-11-05]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20240814.1251.002>

[11] 潘云川,吕学斌,陶姣,等. 污泥预处理与资源回收利用技术研究进展[J]. *应用化工*,2024,53(4):900-905

[12] 李昊津,郑君,卫灵君,等. 淀粉包覆改性市政污泥用于制备新型纸板材料及其性能[J]. *材料科学与工程学报*,2024,42(3):468-477

[13] 张美珠,卫灵君,李昊津,等. 包覆-球磨改性市政污泥制备新型纸包装材料[J]. *包装工程*,2022,43(11):38-45

[14] 王婷婷,曹延芬,孙昊,等. 无害化污泥填料应用于造纸的可行性分析[J]. *材料科学与工程学报*,2021,39(6):989-993+1034

[15] 程金兰. 填料物理化学特性对留着性能的影响[D]. 南京林业大学,2009

# 双碳背景下碳捕集技术研究现状及发展

王小丽<sup>1,2</sup> 韦耿<sup>1,2</sup> 刘行磊<sup>1,2\*</sup>

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001; 2. 能源清洁低碳热转化利用技术与装备四川省重点实验室, 成都 611731

**摘要:**作为全球最大能源生产国,全球最大能源消耗国,中国减碳任务艰巨,达成“双碳”目标任重道远。碳捕集技术的基础研究、工业试验以及商业应用等领域的研究成为国内外学者及行业专家的关注重点。为更加清晰了解碳捕集技术的当前研究进展,对燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链燃烧4种碳捕集技术的研究现状进行了概括,总结出不同碳捕集技术的优缺点和应用场景,并提出了CCUS技术的未来研究方向。化学链燃烧技术实现了从实验室研究到工程应用的重大突破,是未来最具发展潜力的碳捕集技术之一。后续碳捕集技术应持续关注能耗降低、成本下降、规模上升的研究方向,加快推进CCUS技术构建体系和大规模集成示范,促进形成高效率、低能耗、低成本、适合中国国情的CCUS技术商业模式,进而实现“碳达峰”和“碳中和”的任务目标。

**关键词:**双碳; 碳捕集; CCUS; 化学链燃烧; 研究进展

中图分类号:TK6

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0068-08

## Research Status and Development of Carbon Capture Technology under the Background of “Carbon Peaking and Carbon Neutrality”

WANG Xiaoli<sup>1,2</sup>, WEI Geng<sup>1,2</sup>, LIU Xinglei<sup>1,2\*</sup>

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd, 643001, Zigong, Sichuan, China; 2. Energy Cleaning and Low-Carbon

Thermal Conversion Utilization Technology and Equipment Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** As the world's largest energy producer and largest energy consumer, China faces a formidable task in reducing carbon emissions, with a long journey ahead to achieve the “carbon peaking and carbon neutrality” goals. Scholars and industry experts both domestically and internationally are focusing on research in fundamental studies, industrial trial, and commercial applications of carbon capture technologies. To gain a clearer understanding of current research progress in carbon capture technologies, this paper summarizes the research status of four carbon capture technologies: pre-combustion capture, post-combustion capture, oxy-fuel combustion and chemical looping combustion (CLC). The advantages and disadvantages of different carbon capture technologies and their application scenarios are summarized, meanwhile the future research direction of CCUS technology is proposed. CLC technology has made a great breakthrough from laboratory research to engineering application, and is one of the most promising carbon capture technologies in the future. Continuous efforts should focus on reducing energy consumption, lowering costs, and scaling up operations. It is imperative to accelerate the establishment of CCUS technological frameworks and large-scale integrated demonstration projects, while fostering the development of efficient, low-energy, cost-effective CCUS business models tailored to China's national conditions. These initiatives will ultimately contribute to achieving the strategic goals of “carbon peak” and “carbon neutrality”.

**Key words:** carbon peaking and carbon neutrality; carbon capture; CCUS; chemical looping combustion; research progress

收稿日期:2025-06-11

**作者简介:**王小丽(1998—),女,2023年毕业于电子科技大学化学工程与技术专业,硕士,助理工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司,主要从事清洁低碳燃烧和碳捕集技术等方面研究工作。

刘行磊(1984—),男,2012年毕业于华北电力大学热能工程专业,硕士,高级工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司,主要从事锅炉试验研究和流态化基础研究等方面工作。通信邮箱:liuxl2378@dongfang.com。

作为全球最大能源生产国,全球最大能源消耗国<sup>[1]</sup>,我国减碳任务艰巨,达成“双碳”目标任重道远。经相关环境及大气污染发布的统计数据,2022年5月大气层中的CO<sub>2</sub>浓度已经高达421 μmol/mol(421 ppm),所造成的环境污染、地质、天气等自然灾害已经严重危及到全球生态环境问题。为解决CO<sub>2</sub>控制排放,当前被广泛利用的主要

手段包含:第一,提升能源使用效率,减少能源消耗从而降低碳排放;第二,着重发展可再生清洁能源使用,调整能源消耗结构,减轻化石燃料的燃烧应用;第三,推广研究CO<sub>2</sub>捕集、利用与封存技术<sup>[2]</sup>,将CO<sub>2</sub>从油气、电力、化工、石化、供热等工业过程产生的混合气中脱离出来并加以利用,如图1。

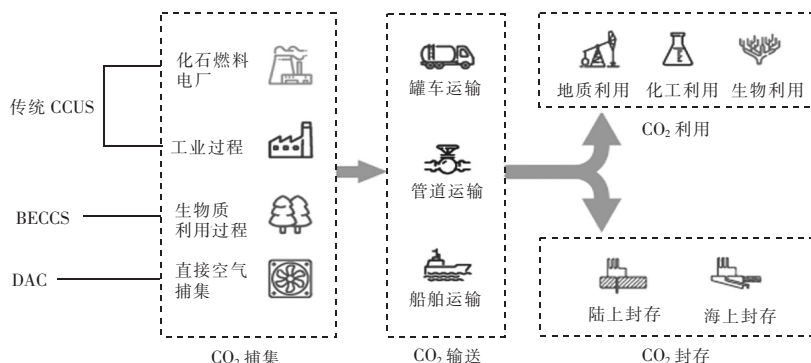


图1 碳中和目标下的CCUS技术定义<sup>[3]</sup>

2023年国家出台相关政策指明碳排放行业要降本增效、规模化CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage)技术研发、实现商业化应用推广。国内外相关学者和行业专家对CO<sub>2</sub>捕集技术均有大量的研究与应用,但有关CCUS技术的基础研究、工业试验以及商业应用等的研究方向与研究阶段还存在一定差异。为更加清晰了解碳捕集技术的当前研究进展,本文将概括4种主要碳捕集技术方法,分析对比了各碳捕集技术方法的研究现状、优缺点和工业应用场景,并提出了CCUS技术的未来发展和研究方向,以期CCUS技术降本增效和规模化应用开发提供一定的参考依据,从而推动我国“双碳”目标的实现。

## 1 碳捕集技术方法

CCUS技术中的CO<sub>2</sub>捕集是指将CO<sub>2</sub>从工业生产、能源消耗以及大气中直接分离出来的过程<sup>[4]</sup>,燃烧前和燃烧后捕集、富氧燃烧以及化学链燃烧是CCUS技术中实现CO<sub>2</sub>捕集的4种主要途径。

### 1.1 燃烧前捕集

燃烧前捕集技术通过脱碳方法将传统燃料(煤或天然气)与空气或氧气在高压条件下发生反应生成以CO与H<sub>2</sub>为主要成分的合成气,经冷却后,CO与H<sub>2</sub>O发生水煤气变换反应(Water-Gas Shift Reaction, WGS)生成高浓度CO<sub>2</sub>与H<sub>2</sub><sup>[5]</sup>,在后续过

程中将CO<sub>2</sub>与H<sub>2</sub>分离后实现CO<sub>2</sub>捕集,反应生成的H<sub>2</sub>也可作为燃料进一步利用。

燃烧前捕集技术由于在高压条件下CO<sub>2</sub>浓度较高,因此分离CO<sub>2</sub>能耗较低,生成的H<sub>2</sub>也可作为燃料燃烧从而降低碳捕集成本。但该技术目前主要应用在基于整体煤气化联合循环(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)<sup>[6]</sup>的CO<sub>2</sub>燃烧前捕集技术,使用场景存在局限性,其设备投资成本也远高于常规发电厂。后续研发过程应关注如何提升碳捕集效率以及降低设备改造成本。物理吸收法、化学吸收法、固体吸附法和低温蒸馏法是基于IGCC的燃烧前捕集过程中分离CO<sub>2</sub>的主要方法。

#### 1.1.1 物理吸收法

物理吸收法主要原理是混合气中CO<sub>2</sub>分子与吸附溶剂之间产生物理作用,而其他气体不与之发生反应。物理吸收法的工艺流程主要设备有吸收塔和解吸塔,混合气中的CO<sub>2</sub>在吸收塔内被物理吸收剂捕获,在解吸塔中解吸后得到高浓度CO<sub>2</sub>产品,如图2所示。物理吸收法主要采用的吸收剂有碳酸丙烯酯、聚乙二醇二甲醚和甲醇等<sup>[7]</sup>,均对CO<sub>2</sub>展现出较好的吸收能力,且吸收剂再生过程中不用对其加热,能够有效降低碳捕集能耗,后续应开发选择性高、吸收效果好的物理吸收剂。

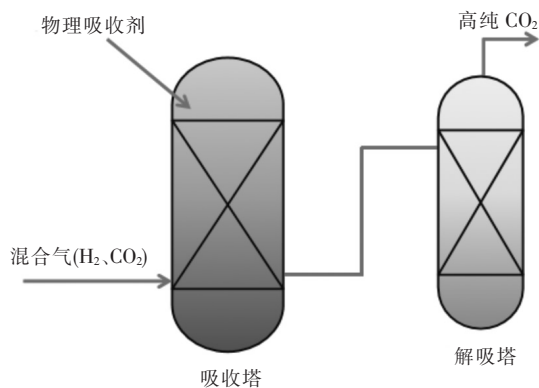


图2 物理吸收法工艺图

### 1.1.2 化学吸收法

化学吸收法主要利用碱性溶液与 CO<sub>2</sub> 发生化

学反应捕集 CO<sub>2</sub>, 解吸后释放 CO<sub>2</sub> 实现碳捕集和吸收剂的再生, 能够应用在以火电为主, 合成氨、炼油、天然气等为辅的相关行业中。目前国内外对于物理吸收法和化学吸收法具有较为广泛的研究, 如表 1 所示。现有的化学吸收剂主要包括低温甲醇、碳酸丙烯酯、聚乙二醇二甲醚等<sup>[9]</sup>。这些吸收剂具有高效捕集 CO<sub>2</sub> 的能力, 是实现碳捕集的关键因素之一。化学吸收法具有分离 CO<sub>2</sub> 能力强、吸收速率快、捕集容量大等优势, 但吸收剂的工业成本仍然高于国际碳捕集方法成本水平, 未来有关化学吸收剂的研究得到突破将会有效降低化学吸收法的成本, 使其应用更加广泛。

表 1 燃烧前捕集 CO<sub>2</sub> 应用情况<sup>[8]</sup>

序号	项目名称	捕集方法	所在国家和地区	实施时间(年)	捕集规模(t/a)
1	德克萨斯州清洁能源项目	物理吸收法	美国	2015	240 万
2	Kemper County 碳捕集项目	物理吸收法	美国	2016	300 万
3	神华集团内蒙古煤制油	物理吸收法	内蒙古	2009	115 万
4	整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)电站	化学吸收法	天津	2012	10 万
5	汇能煤制天然气捕集 CO <sub>2</sub>	物理吸收法	内蒙古	2014	880 万
6	克拉玛依驰放气 CO <sub>2</sub> 捕集	化学吸收法	新疆	2015	10 万
7	神华集团宁夏煤制油 CO <sub>2</sub> 捕集	物理吸收法	宁夏	2016	100 万

### 1.1.3 固体吸附法

固体吸附法主要利用 CO<sub>2</sub> 分子与固体吸附剂间的作用从合成气中脱离 CO<sub>2</sub>, 其中起到决定性作用的是范德华力和化学键。常见的固体吸附剂主要有分子筛、活性氧化铝、活性炭, 此外还有金属多

孔类材料等<sup>[10]</sup>, 这类吸附剂对 CO<sub>2</sub> 的选择性高、吸收速率快。固体吸附法主要应用在合成氨项目中, 目前全世界范围内已完成多个固体吸附法合成氨碳捕集项目的建设与应用(表 2), 但由于高压条件的约束还对其商业化推广有一定的局限性。

表 2 燃烧前捕集 CO<sub>2</sub> 固体吸附法应用情况<sup>[11]</sup>

序号	项目名称	所在国家和地区	实施时间(年)	捕集规模(t/a)
1	英国帝国化学工业集团公司 450 t/d 合成氨	英国	20 世纪 80 年代末	20 万
2	CO <sub>2</sub> CRC Otway 站	澳大利亚	2017	40 万
3	宁波四明化工有限公司 45 000 Nm <sup>3</sup> /h 装置	浙江	2010	20 万
4	新乡河南心连心化肥有限公司 180 000 Nm <sup>3</sup> /h 变换器脱硫 CO <sub>2</sub> 装置	河南	2015	71 万

### 1.1.4 低温分馏法

低温分馏法利用原料气各组分间的相对挥发度差异, 对合成气进行低温处理冷凝后采用蒸馏法进行分离<sup>[12]</sup>。此方法能够有效应用在 CO<sub>2</sub> 浓度高(>60%)、各气体组分相对挥发度差异大的混合气中捕集 CO<sub>2</sub>, 具有经济性好、成本低等优势。由于混合气中气体组分复杂、装置设备多等因素, 要实现

对混合气中 CO<sub>2</sub> 的高效捕集还需进一步研究和改进, 例如优化装置设备结构、提升制冷剂性能等。

### 1.2 燃烧后捕集

燃烧后捕集技术是在化工燃料燃烧后的尾部烟气中对 CO<sub>2</sub> 进行脱离和回收的技术, 该技术主要包含物理吸附、化学吸附、化学溶液吸收和膜分离法。

### 1.2.1 化学溶液吸收法

化学溶液吸收法的主要反应原理是利用 CO<sub>2</sub> 与碱性溶液发生化学反应生成不稳定的盐类,后续通过高温或减压的方法使盐类吸收 CO<sub>2</sub> 的反应逆向进行,实现解吸 CO<sub>2</sub>,达到碳捕集和吸收剂再生的目的,如图 3。常见的化学吸收剂包含有机胺溶液、离子液体、氨水溶液等吸收剂,新型相变吸收剂也由于低能耗特性被广泛研究。

化学溶液吸收法在燃煤电厂等大型碳捕集工业项目中的研究和应用较为广泛,并且已经进入商业应用阶段,如表 3。然而,吸收 CO<sub>2</sub> 后的溶液在加热再生过程中消耗大量显热,导致再生能耗过高,使得电厂效率降低 10%~30%。吸收剂在循环使用的过程中容易存在氧化、热降解等消耗因

素,增加了碳捕集运行成本。因此,该技术的未来发展核心在于开发出低能耗、低成本、高效率的吸收剂。

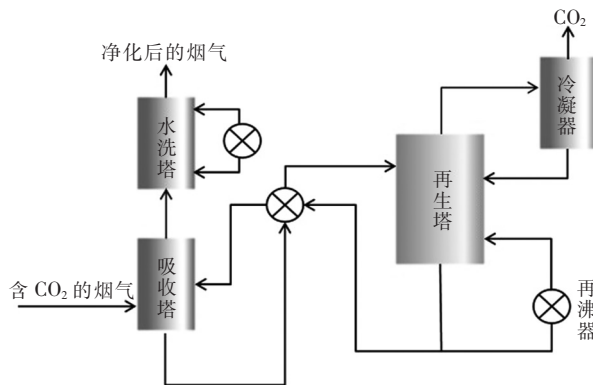


图 3 化学溶液吸收法 CO<sub>2</sub> 捕集的工艺流程

表 3 燃烧后化学溶液吸收法捕集 CO<sub>2</sub> 应用情况

序号	项目名称	所在国家地区	实施时间(年)	捕集规模(t/a)	吸附剂
1	SaskPower “Boundary Dam 电站” CCS 项目	加拿大	2014	100 万	复合胺
2	休斯顿 Petra Nova 发电厂 CCS 项目	美国	2017~2020	140 万	复合胺
3	国能锦界 15 万吨/年 CCS 示范项目	陕西	2021	15 万	有机胺
4	国家能源集团江苏泰州电厂 CCUS 示范工程	江苏	2023	50 万	醇胺吸收法
5	浙能兰溪发电 CO <sub>2</sub> 捕集与矿化利用集成示范项目	浙江	2024	15 万	复合胺

### 1.2.2 化学吸附法

化学吸附法利用烟气中不同组分气体分子与吸附剂之间的吸附作用差异实现吸附剂捕集 CO<sub>2</sub>。CO<sub>2</sub> 分子可与化学吸附剂表面的活性位点反应形成稳定的化学键,达到饱和后再通过加热或减压的方法释放出 CO<sub>2</sub>,释放出 CO<sub>2</sub> 后化学吸附剂还可重复循环利用。常见的化学吸附剂主要有碳酸盐基吸附剂、有机胺吸附剂和离子液体吸附剂等。

化学吸附法适用于火电、水泥和钢铁等行业,如表 4 所示。与化学溶液吸收法相比,化学吸附法吸附过程中无需溶剂,具有能耗低、再生能力强、工艺简单等优势,但其存在耐热性差、化学稳定性低的缺陷。因此,化学吸附法未来的研究方向应聚焦于对吸附剂的性能和生产成本、工艺难度的降低和核心技术的研发上。

表 4 化学吸附法捕集 CO<sub>2</sub> 应用情况<sup>[8]</sup>

序号	项目名称	所在国家地区	实施时间(年)	吸附剂	捕集规模(%)	捕集率	实施机构
1	双循环流化床	西班牙	2009	CaO	1.7 MW	>90	西班牙国家煤炭研究所
2	美国气流床+回转窑	美国	2010	CaO	120 kW	>90	俄亥俄州立大学
3	韩国输运床+鼓泡床	韩国	2012	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10 MW	>80	韩国能源研究所
4	德国双循环流化床	德国	2012	CaO	1 MW	90~92	达姆施塔特工业大学
5	移动床	日本	2017	固体胺	1.26 kt/a	93	川崎重工
6	清华大学双鼓泡流化床	北京	2009	CaO	20 kW	90~95	清华大学
7	东南大学双鼓泡流化床	南京	2012	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10 Nm <sup>3</sup> /h	>90	东南大学

### 1.2.3 物理吸附法

物理吸附法是 CO<sub>2</sub> 与物理吸附剂表面的活性

点形成范德华力,当升温或加压时吸附剂吸收 CO<sub>2</sub>,再通过降温或减压解吸 CO<sub>2</sub>,从而分离 CO<sub>2</sub> 气体分

子。常被使用的吸附剂主要包括多孔分子筛、活性炭、硅胶、多孔配位骨架材料等<sup>[13]</sup>,均具有比表面积大能够实现吸附量大的特征。

根据吸附和解吸方式的不同,物理吸附法可划分为真空变压吸附法(Vacuum Swing Adsorption, VSA)、变压吸附法(Pressure Swing Adsorption, PSA)、变温吸附法(Thermal Swing Adsorption, TSA),还可采用将变压与变温相结合的吸附方法(Pressure Thermal Swing Adsorption, PTSA)<sup>[14]</sup>。物理吸附法工艺简便、再生能耗小,但其操作条件严格,对环境要求较高,且CO<sub>2</sub>回收率较低。因此,需加速研发高性能、高效率、低成本的物理吸附剂,降低碳捕集成本。

表5 不同类型分离膜优缺点对比

膜种类	优点	缺点	吸附剂
聚合物膜	优异的成膜能力和可加工型,易于大面积制造	气体渗透通量较低、溶解性较差	天然橡胶、聚丙烯酸酯、聚碳酸酯、聚酰亚胺和聚砜等
无机膜	可在高温高压条件下使用,机械强度高、热稳定性好、化学性质稳定、使用寿命长	加工性能差、生产成本低、难以扩大规模	SiO <sub>2</sub> 膜、沸石膜、MOFs膜等
混合基质膜	较高的热稳定性,能耗较低,良好的分离性能	聚合物基质与填料之间的界面相容性差,填料成本较高,难以规模化生产	含有MOF-801/离子液体的PIM基混合基质膜、沸石咪唑盐骨架(ZIF-8)和羧基化碳纳米管(CNT)复合基质膜

### 1.3 富氧燃烧技术

富氧燃烧技术是在现有锅炉系统燃烧基础上,通过空分装置获取氧体积含量高于21%的富氧空气或纯氧,用高浓度O<sub>2</sub>替换空气在炉膛内进行燃烧,同时高浓度O<sub>2</sub>与部分烟气进行再混合后作为燃料燃烧的氧化剂,达到高效强化燃烧的效果。这种方法能够产生纯度较高的CO<sub>2</sub>烟气(高达80%),大大降低污染物NO<sub>x</sub>的排放同时利于CO<sub>2</sub>的捕集。采用富氧燃烧技术后产生的烟气主要成分为高纯度CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O,以及N<sub>2</sub>、Ar、O<sub>2</sub>等少量杂质气体,利用气体组分间的物性差异可将烟气中CO<sub>2</sub>进行压缩与分离,CO<sub>2</sub>浓度可提纯至95%以

### 1.2.4 膜分离法

膜分离法是基于气体分子的相对渗透率差异分离CO<sub>2</sub>,烟气中各气体组分对于分离膜的溶解度和扩散率具有明显差距。根据膜材料分类,分离膜有聚合物膜、无机膜和混合基质膜等类型<sup>[15]</sup>,其优缺点差异见表5。膜分离法在燃煤电厂、钢铁和水泥行业等大型排放源中广泛应用,具有环境友好、操作简便、设备投资成本低、占地面积小等优势。

然而,当前膜分离法过程中分离膜对混合气中的CO<sub>2</sub>还存在选择性较低的问题,在后续研发中应重点研究选择性和渗透性更高的分离膜,降低其生产成本,提高工艺效率。

上,从而实现高效率的CO<sub>2</sub>捕集。

富氧燃烧技术可以分为常压富氧燃烧和加压富氧燃烧,目前主要在火电、钢铁、垃圾焚烧、水泥等行业领域开展试验和应用研究,见表6。富氧燃烧技术能够直接在现有锅炉系统燃烧基础上进行改造,具有改造难度小、改造成本低、易于规模化的优势。然而,由于制氧过程中生产和分离的成本高昂,导致其在应用过程中有较大的成本限制。因此,如何实现低成本、低能耗是富氧燃烧技术后续的研发重点,其制氧过程中空气分离方法对于降低能耗和成本至关重要。

表6 国内外具有代表性的富氧燃烧CO<sub>2</sub>捕集项目<sup>[16]</sup>

项目名称	所在国家和地区	时间(年)	项目规模(MW)	压缩分离供应方
Schwarze Pumpe 燃煤富氧燃烧示范项目	德国	2014	30	Linda/Air Product
Callide 富氧燃烧项目	澳大利亚	2011	30	Air Liquid
CIUDEN 循环流化床富氧燃烧项目	西班牙	2012	30	Air Liquid
Doosan 富氧燃烧示范项目	英国	2009	40	Air Product
华科3 MW 富氧燃烧全流程工业试验	中国	2012	3	四川空分
35 MWth 富氧燃烧全流程工业试验	中国	2015	35	-

### 1.4 化学链燃烧技术

化学链燃烧(chemical looping combustion, CLC)技术是一种低成本、无火焰燃烧的新型技术,可应用于碳捕集领域,相较于前面三种传统碳捕集技术,其碳捕集成本不到传统碳捕集技术的三分之一,是当前最具发展潜力的低能耗、高效率 CO<sub>2</sub> 捕集技术之一<sup>[17]</sup>,其主要工作原理如图 4 所示。

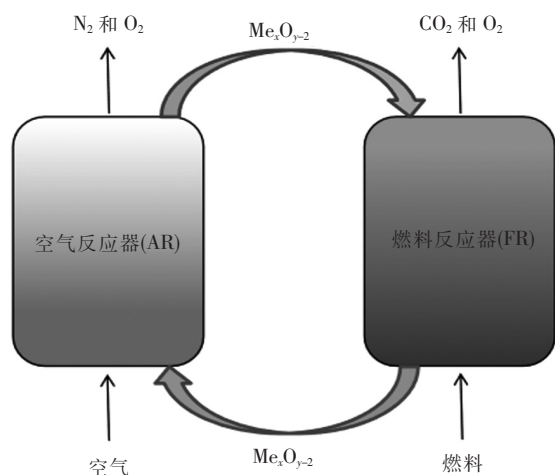


图 4 化学链燃烧原理图

CLC 技术可分为三种类型<sup>[18]</sup>,如图 5。合成气化学链燃烧技术 (Chemical Looping Gasification, CLG) 是通过在燃料反应器中将煤气化后产生合成气,其主要成分为 CO 和 H<sub>2</sub>,与在空气反应器中的高价态载氧体发生反应,避免燃料与载氧体直接混合,但其过程中需增加气化炉和空分装置,使得系统复杂度和成本相应上升。原位气化化学链燃烧技术 (In-situ Gasification Chemical Looping Combustion, iG-CLC) 是直接将燃料颗粒送至燃料反应器,燃料颗粒在 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 作用下将转化为合成气和其他可燃挥发分,在燃料反应器中合成气与高价载氧体生成烟气,其主要成分为以 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,载氧体在空气反应器中与 O<sub>2</sub> 发生氧化反应变回高价态,重新回到燃料反应器中,从而实现整个循环脱离出 CO<sub>2</sub>。氧解耦化学链燃烧<sup>[19]</sup> (Chemical Looping with Oxygen Uncoupling, CLOU) 技术的主要工作原理是采用可以释放 O<sub>2</sub> 的载氧体,主要包括金属氧化物 (如 CuO、NiO)、非金属氧化物 (如 CaSO<sub>4</sub>)、复合型载氧体 (如 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),通过载氧体在燃料反应器中释放 O<sub>2</sub> 发生燃烧反应,反之在空气反应器中发生氧化反应吸收 O<sub>2</sub>,再返回燃料反

应器中继续释放 O<sub>2</sub>,完成燃烧循环。气相氧的利用可以增强固体燃料的燃烧,提高碳转化率和 CO<sub>2</sub> 捕集率。

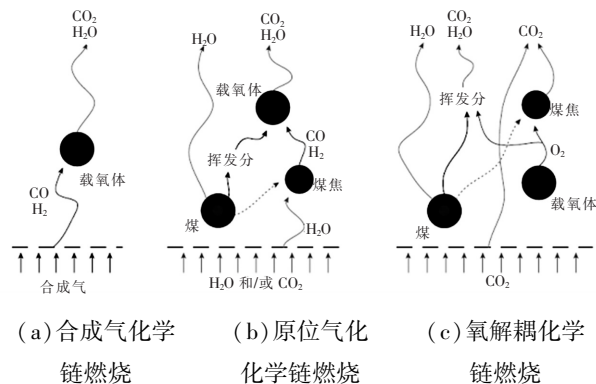


图 5 化学链燃烧三种途径<sup>[20]</sup>

化学链燃烧由于采用载氧体进行循环提供活性氧,改进了传统的燃烧方式,能够避免烟气中产生浓度较高的 N<sub>2</sub>,降低 CO<sub>2</sub> 捕集成本和能耗的同时获得高浓度 CO<sub>2</sub>。同时,由于烟气中 N<sub>2</sub> 含量较少,燃烧过程中不易产生如 SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> 等腐蚀性气体,能够提高设备的可靠性和使用寿命。化学链技术涵盖生物质、石油焦、煤、天然气等燃料的低碳燃烧,在电力、供热、石化和化工等高排放行业中应用潜力较大<sup>[21]</sup>。

目前国内外对于化学链燃烧技术已经有了广泛的研究,见表 7。国际上首次实现了 5MWth 化学链燃烧碳捕集装备系统的自热连续运行,从燃烧源头捕集 90% 浓度以上的 CO<sub>2</sub>,碳捕集成本大幅度降低,突破了化学链燃烧自热示范瓶颈,完成了化学链燃烧技术兆瓦级中试研究,为未来碳捕集技术的发展方向提供了重要依据。载氧体、热力系统和反应器系统作为化学链燃烧技术的关键技术研究方向。通过不断优化载氧体的性能和降低其应用成本,设计研究先进高效的燃烧反应系统,与此同时结合市场需求,推动实现商业化应用。

## 2 碳捕集技术发展方向

### 2.1 聚焦当前碳捕集技术的关键技术研发

目前已经开发出来的 CO<sub>2</sub> 捕集技术具备各自的优缺点。燃烧前捕集技术中物理吸收法和化学吸收法吸收容量大,能耗较低,但吸收剂的吸收效果有待提升,需进一步降低捕集成本;固体吸附法

吸附剂吸附 CO<sub>2</sub> 选择性高、吸收速率快,但使用条件具有局限性;低温分馏法成本较低但分离 CO<sub>2</sub> 效果较差。燃烧后捕集技术适用性广泛,然而化学吸收法、物理吸附法、膜分离法等捕集 CO<sub>2</sub> 能耗较高,吸附剂的开发也是难点技术之一。富氧燃烧捕集技术具有改造成本低、易于规模化的优势,但高昂

的制氧成本限制了其广泛应用。化学链燃烧碳捕集技术具备低能耗、低成本、高效率、大规模捕集的优势,其关键研发在于载氧体和燃烧系统的开发。目前化学链燃烧技术取得了从实验室研究到工程应用的重大突破,为后续碳捕集技术发展的研究方向提供了重要依据。

表 7 国内外具有代表性的化学链燃烧 CO<sub>2</sub> 捕集建设项目

名称	所在国家	时间(年)	项目规模(MWth)	实施机构
化学链燃烧热态反应器	瑞典	2004	0.01	查尔姆斯科技大学
10 kWth 气体燃料化学链燃烧系统	韩国	2004	1.01	韩国能源科学研究院
化学链燃烧装置	德国	2013	1	达姆斯塔特工业大学
化学链燃烧装置	美国	2012	3	阿尔斯通公司
4 MWth 化学链燃烧系统 <sup>[22]</sup>	中国	2024	4	清华大学、东方锅炉、浙江大学、SINTEF Energi AS、Total Energies、IFP Energies nouvelles、SINTEF AS、Silesian University、Bellona

## 2.2 研发低成本、高效率、低能耗和大规模捕集的新型技术

当前 CO<sub>2</sub> 捕集技术主要采用单一技术为主,尽管大量学者和行业专家对各项技术进行了研发优化,但仍存在成本高、能耗大、效率低等缺陷。采取单一的碳捕集方法尚且不能够满足低成本、高效率、低能耗、易操作和大规模捕集的最终需求,为有效完善技术局限性,根据实际应用场景结合多种方式制定合理方案,将碳捕集技术进行复合作用,实现多技术融合,提高碳捕集效果。

## 2.3 加快中试试验和示范工程建设

自“双碳”目标提出以来,我国碳捕集技术发展已取得了较大的提升,但对比国际先进技术还存在一定差距。目前国际上化学溶液吸收法已经达到了商业应用化水平,物理吸收法、低温分馏法、富氧燃烧法等也有较多的工业示范项目,膜分离法、化学吸附法和化学链燃烧还处于中试试验阶段。在后续研发中应加强研究,攻关重点技术难题,加快推进 CCUS 技术构建体系和大规模集成示范,促进形成高效率、低能耗、低成本、适合中国国情的 CCUS 技术商业模式。

捕集技术捕集 CO<sub>2</sub> 能耗较低,适用于新建 IGCC 电厂,但碳捕集效率有待提升,碳捕集成本需进一步降低。燃烧后捕集技术应用广泛,然而存在捕集 CO<sub>2</sub> 能耗高、吸附剂效率低等缺点,应当聚焦于吸附剂的开发和降低捕集能耗;富氧燃烧碳捕集技术的高昂制氧成本限制了其广泛应用;化学链燃烧碳捕集技术捕集效率高、捕集成本低,具有广泛的应用前景,亟需进一步研究,推动其工程化示范和商业应用。

在现有的碳捕集方法中,各碳捕集方法尚且不能够同时满足低成本、高效率、低能耗、易操作和大规模捕集的最终需求。碳捕集技术在未来发展中,应持续关注能耗降低、成本下降、规模上升的研究方向。我国 CCUS 技术产业建设已列入国家政策规划,碳捕集方法作为其中重要环节受到全球各科研人员 and 行业专家的广泛关注,针对我国的具体国情,加快推进 CCUS 技术构建体系和大规模集成示范,促进形成高效率、低能耗、低成本、适合中国国情的 CCUS 技术商业模式,进而实现“碳达峰”和“碳中和”的任务目标。

## 3 结论

通过分析对比了 4 种不同的 CO<sub>2</sub> 捕集技术的优缺点,总结出碳捕集技术未来发展方向。燃烧前

## 参考文献:

- [1] 刘明亮,卫浩,盖玉龙,等. 中国、美国、欧盟及世界一次能源消费现状与展望[J]. 煤化工,2022,50(2):1-5
- [2] Dubey A, Arora A. Advancements in carbon capture technologies: A

- review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 373: 133932
- [3] 陈健, 程军, 刁玉杰, 等. 中国二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023); 中国 CCUS 路径研究[J]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2023
- [4] 邢力仁, 武正弯, 张若玉. CCUS 产业发展现状与前景分析[J]. *国际石油经济*, 2021, 29(8): 99-105
- [5] Chao C, Deng Y, Dewil R, et al. Post-combustion carbon capture [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110490
- [6] Theo W L, Lim J S, Hashim H, et al. Review of pre-combustion capture and ionic liquid in carbon capture and storage[J]. *Applied energy*, 2016, 183: 1633-1663
- [7] Xu X, Song C, Miller B G, et al. Adsorption Separation of Carbon Dioxide from Flue Gas of Natural Gas-fired Red Boiler by a Novel Nanoporous "Molecular Basket" Adsorbent [J]. *Flue Processing Technology*, 2005, 86(14-15): 1457-1472
- [8] 唐强, 李金惠, 邹建伟, 等. 二氧化碳捕集技术研究现状与发展综述[J]. *世界科技研究与发展*, 2023, 45(5): 567-580
- [9] 王茹洁, 谢成, 杨晓彤, 等. 面向碳捕集的液-固相变吸收剂的研究进展[J]. *化工新材料*, 2024, 52(4): 19-23
- [10] Lee S C, Chae H J, Lee S J, et al. Development of regenerable MgO-based sorbent promoted with  $K_2CO_3$  for  $CO_2$  capture at low temperatures [J]. *Environmental science & technology*, 2008, 42(8): 2736-2741
- [11] Subraveti S G, Pai K N, Rajagopalan A K, et al. Cycle Design and Optimization of Pressure Swing Adsorption Cycles for Pre-combustion  $CO_2$  Capture [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113624
- [12] 林名桢, 代晓东, 闫广宏, 等.  $CO_2$  低温分馏装置参数优选[J]. *化工科技*, 2021, 29(6): 44-49
- [13] 李亮荣, 艾盛, 杨小喆, 等. 碳捕集固体胺吸附剂载体性能优化策略及分析[J]. *精细化工*, 2024, 41(7): 1414-1423
- [14] Hekmatmehr H, Esmaili A, Pourmahdi M, et al. Carbon capture technologies: A review on technology readiness level [J]. *Fuel*, 2024, 363: 130898
- [15] Norahim N, Yaisanga P, Faungnawakij K, et al. Recent membrane developments for  $CO_2$  separation and capture [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2018, 41(2): 211-223
- [16] Zheng C, Liu Z, Xiang J, et al. Fundamental and Technical Challenges for a Compatible Design Scheme of Oxyfuel Combustion [J]. *Engineering*, 2015, 1(1): 139-149
- [17] Lyngfelt A. Chemical looping combustion; status and development challenges [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(8): 9077-9093
- [18] 刘壮, 周劲松, 周启昕, 等. 煤化学链燃烧脱汞研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(8): 59-68
- [19] Abanades J C, Arias B, Lyngfelt A, et al. Emerging  $CO_2$  capture systems [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 126-166
- [20] 李振山, 陈虎, 李维成, 等. 化学链燃烧中试系统的研究进展与展望[J]. *发电技术*, 2022, 43(4): 544-561
- [21] Czakiert T, Krzywanski J, Zylka A, et al. Chemical looping combustion; a brief overview [J]. *Energies*, 2022, 15(4): 1563
- [22] Haugen N E L, Li Z, Gouraud V, et al. Building the world's largest Chemical Looping Combustion (CLC) unit [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, 129: 103975

# 面向“双碳”目标的制造企业能源价值链 管控与协同服务系统研究

任盼秋 令红兵 黄曦 封瑞 王旭\*

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618099

**摘要:**针对国家“双碳”目标下制造业能源价值链的数字化、精益化管控需求,以东方电气集团东方电机有限公司典型分厂为对象,在分析制造业过程价值创造、传递、增值的能源价值链的基础上,研发了能源价值链管控与协同服务系统,实现制造业能源价值链管控与服务数字化、精益化与智能化,用以指导企业的节能减碳技术改造。实际应用结果表明,该系统能有效识别用能系统节能降碳关键环节,通过相关设备或子系统的技术改造,实现单位产值综合能耗降低了10%,单位产值减碳12%目标,切实提升了企业的能效,并有效减低了碳排放。

**关键词:**能源价值链;制造企业;“双碳”目标;管控与协同服务

中图分类号:F406

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0076-08

## Energy Value Chain Management and Collaboration Service System Research for Manufacturing Enterprises towards the “Dual Carbon” Goals

REN Panqiu, LING Hongbing, HUANG Xi, FENG Rui, WANG Xu\*

Dongfang Electric Machinery Co., Ltd, Dongfang Electric Corporation, Deyang, 618099

**Abstract:** In response to the demand for digital and lean management of the manufacturing energy value chain under the national “dual carbon” goal, taking the typical branch of Dongfang Electric Machinery Co., Ltd. of Dongfang Electric Group as the object, based on the analysis of the energy value chain of value creation, transmission, and value-added in the manufacturing process, an energy value chain management and collaborative service system has been developed to achieve digital, lean, and intelligent management and service of the manufacturing energy value chain, which can guide the energy-saving and carbon reduction technology transformation of enterprises. The application results show that the system can effectively identify the key links of energy conservation and carbon reduction in the energy supply system. Through the technological transformation of related equipment or subsystems, the comprehensive energy consumption per unit output value has been reduced by 10%, and the carbon emissions per unit output value have been reduced by 12%, effectively improving the energy efficiency of enterprises and reducing carbon emissions.

**Key words:** energy value chain; manufacturing enterprises; the “dual carbon” goals; control and collaborative services

“碳达峰·碳中和”已成为我国实现绿色可持续发展的重大战略,大幅提高综合能源利用效率是实

现碳达峰碳中和目标的重要途径。能源消耗占比超过50%的制造业是我国经济的支柱产业,正通过

收稿日期:2025-10-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目;项目编号:2022YFB3304500。

作者简介:任盼秋(1994—),男,高级工程师。研究方向为智能制造。

令红兵(1964—),男,高级工程师。研究方向为智能制造。

黄曦(1984—),男,高级工程师。研究方向为智能制造。

王旭(1963—),女,教授、博士研究生导师。研究方向为制造企业绿色智能化。通信邮箱:wx921@163.com。

集群化发展推动我国经济由高速增长转向高质量发展<sup>[1]</sup>;但我国制造业粗放的能源管理与服务模式并没有根本改变,传统制造企业集群能源服务协同管控效率低、协同互动困难、综合能效差的问题依然普遍存在。当前,在能源与环境的双重压力下,充分发挥数字技术赋能作用,根本解决制造企业集群能源协同管控与服务难题已刻不容缓。

为了实现《巴黎协定》2℃的控温目标,全球130多个国家和地区提出碳中和目标,绿色低碳发展已经成为国际共识。制造业作为各国经济发展的重要引擎,也是能源消耗和碳排放的主要部门,尤其中国作为世界工厂及全球最大碳排放国,制造业面临着更为迫切的降碳增效需求<sup>[2]</sup>。随着数字技术快速发展,通过数字赋能,提高制造业能源价值链数字化、精益化管控与服务能力,从企业单体节能转向企业集群系统优化,实现制造业能源综合效率提升与降碳管控,是当前行业痛点,也是全球研究热点。为此,各国围绕制造业能源价值链,从制造企业及企业集群综合能效管理、综合能源管控、碳排放评估与降碳优化决策等方面开展了一系列研究。

在制造企业集群综合用能服务方面,目前主要对工业园、产业链集群能耗特性建模、用能态势预测、能效管理服务等进行了研究。早在上世纪八十年代,美国就将推进绿色制造和低碳经济写入法律文本<sup>[3]</sup>。国内,重庆大学<sup>[4]</sup>、浙江大学<sup>[5]</sup>、东北电力大学<sup>[6]</sup>等围绕设备-工艺-车间-企业开展了能耗机理及能耗建模方法的研究,建立了工业能耗建模与评估中心,初步形成了系统性的能耗特性与建模理论基础。随着数字技术的应用,在数字化技术赋能下,如何构建面向供用协同互动的制造企业集群用能体系建模与综合用能协同服务理论与技术,加强制造企业集群全链条、全维度、全过程用能精细化管理,已发展为当前研究热点<sup>[7]</sup>。

在能源系统调度与管控,当前仍以DCS控制架构与集中调度为主流,但基于互联网思想的能源互联网架构成为重要发展方向。2006年,美国IBM公司提出了“智能电网”解决方案<sup>[8]</sup>;2008年,德国实施了“E-Energy”计划,提出通过信息网络的拓展实现能源系统高效互联的系统架构<sup>[9]</sup>。在我国,2014年国家电网公司提出了全球能源互联网架构,通过广域分布的能源点互动来提高供能的可靠性和经济性<sup>[10]</sup>。在系统管控策略方面,当前依然以基于经

典控制理论的PID控制及计划性管理为主,而基于源荷预测和多目标优化的知识驱动型控制策略和在线管理已逐渐崭露头角。近年来,Google、微软、通用电器、西门子、ABB等都纷纷推出各自的智慧能源管理系统<sup>[11]</sup>。清华大学<sup>[12]</sup>、华北电力大学<sup>[13]</sup>等也分别提出了基于多能流分析及大数据技术的智慧能源管理系统。

能源价值链碳排放评估目前主要开展基于生命周期评价、投入产出统计分析的评价方法研究,随着新一代信息技术成熟应用,碳排放在线评估与数字化管理也成为新趋势。国际标准化组织等先后制定了ISO 14064等碳排放评价通用标准<sup>[14]</sup>,构建了工艺过程碳排放评价清单数据库。我国则针对钢铁等24个行业制定了碳排放评价标准,并由工业互联网联盟等牵头起草了《工业互联网碳达峰碳中和园区指南》<sup>[15]</sup>,悉尼大学提出数据驱动的能源需求响应调度与碳排放强度优化决策方法<sup>[7]</sup>,以期推动碳排放评估数字化转型等。我国则积极推动近零碳排放园区,开展管理机制创新,建立智能优化决策系统,实现园区内碳排放总量持续降低<sup>[16]</sup>。

综上所述,当前制造企业集群能源管控正向着源荷互动、数据驱动以及能效与碳排放双控的方向发展。在双碳目标背景下,碳排放约束得到进一步强化,综合能源的应用与发展受到高度重视,但充分考虑碳排放和能源约束的制造企业集群综合用能特性仍不清、供用两侧协调互动机制尚不明,还缺乏互动调度管控、能源协同服务以及能源价值链核心设备碳排放评估与决策方法,制造企业全能源价值链能耗、碳排放、经济效益的综合优化决策机制尚未形成。本文面向国家“双碳”目标下制造业能源价值链的数字化、精益化管控的需求,针对当前存在的问题,通过理论与技术创新,支撑面向“双碳”的能源价值链管控与协同服务。

## 1 能源价值链管控与协同服务系统架构及功能

### 1.1 系统基本架构

能源价值链管控与协同服务系统架构如图1所示。采用统一的技术路线和开发框架进行系统开发,数据库支持可高用,系统采用微服务方式进行部署实现高可靠性,并通过健壮的安全防护机制实现应用安全,提供系统自动化运维机制保障系统安全稳定运行。

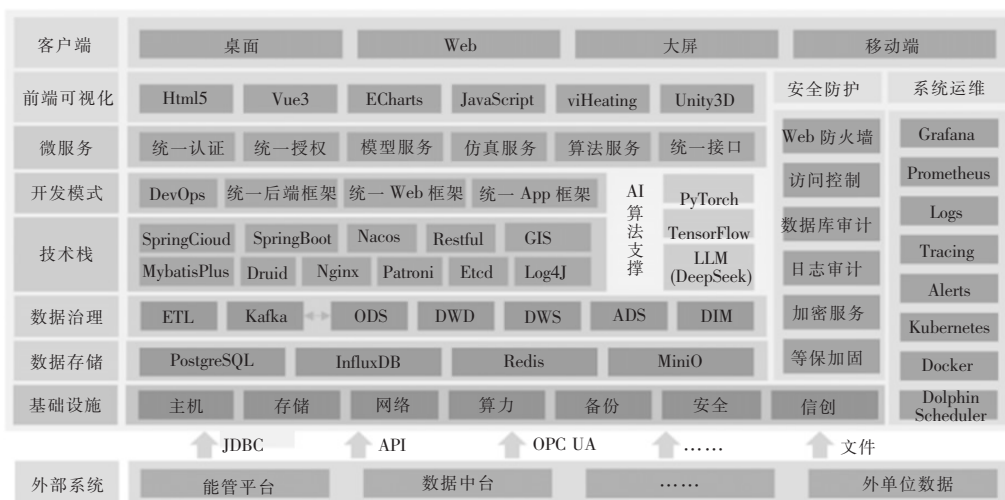


图1 能源价值链管控与协同服务系统架构

由图1可见,能源价值链管控与协同服务系统的基本组成如下:

**外部系统:**对接东方电机已建的能管平台、数据中台等,并集成各功能模块,以及外单位数据(即集群上下游企业能源数据),通过JDBC、API、OPCUA、数据文件方式进行数据接入。

**基础设施:**包括主机、存储、网络、算力、备份、安全等设备,并支持信创要求。

**数据管理:**通过ETL、Kafka消息队列等方式将数据进行汇聚,并按ODS、DWD、DWS、ADS四层框架进行数据仓库建设,DIM层做为公共维度为DWD、DWS、ADS提供支撑。采用关系数据库PostgreSQL、时序数据库InfluxDB、缓冲数据库Redis、分布式文件存储MinIO等支撑各类数据存储需求。

**技术栈:**统一采用支持微服务框架的SpringCloud、SpringBoot、MybatisPlus、Druid、Restful等技术进行开发,支持GIS地图集成展示,采用Nginx、Patroni、Etc等技术实现数据库高可用,采用Log4J进行应用日志记录。

**开发模式:**采用DevOps研发效能平台实现CICD构建流程,统一前、后端以及App端的开发框架。

**微服务:**实现统一认证、统一授权、模型服务、仿真服务、算法服务、统一接口等微服务,为前端应用提供支撑。

**前端可视化:**采用Htm5、Vue3、Echarts、JavaScript进行前端开发,采用viHeating进行模型展

示,采用Unity3D技术进行3D数字孪生模式可视化展示。

**系统运维:**采用Grafana、Prometheus实现运维监测数据的可视化展示,通过Logs、Traceing和Alerts机制实现对Kubernetes、Docker、DolphinScheduler以及服务器的CPU、内存、磁盘、网络等监控异常信息的主动告警。

**安全防护:**通过Web防火墙、访问控制、数据库审计、日志审计、加密服务以及等保加固等措施保障应用和数据的安全性。

**客户端:**支持桌面、Web、大屏以及移动端上的使用。

## 1.2 系统基本功能

能源价值链管控与协同服务系统的基本功能包括:

**设备状态监测:**包括供能侧设备状态监测和用能侧设备状态监测,通过数据通讯模块、数据处理与分析模块以及用户交互界面等,实现对设备运行数据状态的实时监测、故障预警。

**考虑能碳约束的APS计划排程:**在主生产计划基础上,加上能源供给的约束,形成“能源+能力”双约束的主生产计划,并可以设置“能源供给无限(计算能力需求)”、“能源供给有限(均衡供给、峰谷供给约束)”等多业务场景,按照实际的生产计划和项目需求进行模拟、分析和计划。

**用能管理:**实时掌握重点产品在工艺、车间、重点设备等维度的用能分布情况,实现对用能历史数据分析和未来用能数据的预测。计算年度/月度碳

配额的使用进度、实时电碳因子数据,提醒管理者关注碳排放的情况。

**功能管理:**全面掌握各类能源的供给情况,可调空间、相应速率等信息,根据用能计划所需,围绕综合能效最优的目标,给出与之相匹配的供能计划。展示供能侧的能耗、碳排数据走势,实时碳排放因子数据等。

**有序用能:**针对集群(由多个独立企业主体构成的能源生态系统)能源短缺的情况,支持电网侧设置区域级动态负荷限制,基于实时电网运行状态及碳排放约束,通过以下机制协调多企业主体协同优化。

**碳监控管理和优化:**碳源数据,整合所有排放源的数据,包括固定燃烧、移动燃烧、逸散排放、外购电力、外购水、上下游运输和废弃物处理,并确保每条数据都有时间戳以便进行时间序列分析;快速识别对总体排放影响最大的排放源,从而优先制定针对性的减排策略;揭示这些排放源随时间变化的趋势,获得外购电力消耗量与排放量之间的关系,评估能效提升措施的影响;进行多变量回归分析来探索生产量、能源效率等操作变量与总碳排放之间的关系,提供策略调整的方法。

**数智驾驶舱:**将系统能源状态、供能状态、碳曲线、重点设备监测、能源价值链、优化成果、分厂状态和碳足迹等多个模块,以大屏的形式为东方电机提供本项目的全局概览信息,帮助管理者监控企业的能源使用情况,展示本项目关于能源和生产的优化收益。

## 2 用能系统功率模型

### 2.1 用能系统功率模型

作为典型的离散制造企业,东方电机有限公司主要从事机械制造类的生产,整体包括焊接分厂、重金工分厂、金冲分厂、线圈分厂、发电机分厂等多个场景,综合各个分厂的加工任务、设备类型等信息,基于各分厂前期积累的设备历史能耗、功率等数据进行排序筛选,采用一定的比例将高功率和历史能耗的设备划分为关重用能设备,最终得到关重用能设备一般有如下几类:烘炉设备、机床设备等,而机床设备可分为:车床、铣床、钻床、镗床、磨床、加工中心等。

用能系统的能耗模型采用数据驱动模型为主,机理模型为辅的整体方针,将机理模型作为数据驱动模型的一个模块,而对于机理模型中比较难获取的参数,采用数据驱动的方式进行量化。

#### (1) 机理模型

烘炉以电作为主要能源,各运行阶段的功率模型较为简单,一般可分为预热、恒温、冷却三个阶段,通用的功率模型如下所示:

预热阶段:

$$P_{pre} = k_1(T_{set} - T_{cur}) + k_2 \quad (1)$$

其中, $P_{pre}$ 表示预热阶段的输入功率, $T_{set}$ 表示设定的预定温度, $T_{cur}$ 表示当前炉膛内的温度, $k_1$ 表示升温速率系数, $k_2$ 表示环境等其他影响因素的修正因子。

恒温阶段:

$$P_{keep} = k_3(T_{set} - T_{cur}) + k_4(T_{set} - T_{cur})^2 + k_5 \quad (2)$$

其中,由于恒温阶段是一个温度动态平衡的阶段,故采用非线性方程描述其过程的功率, $P_{keep}$ 表示恒温阶段的输入功率, $T_{set}$ 表示设定的预定温度, $T_{cur}$ 表示当前炉膛内的温度, $k_3$ 和 $k_4$ 表示烘炉自身的稳定系数, $k_5$ 表示环境等其他影响因素的修正因子。

冷却阶段:

$$P_{cool} = k_6(T_{cur} - T_{cool}) + k_7 \quad (3)$$

其中, $P_{cool}$ 表示冷却阶段的输入功率, $T_{cur}$ 表示当前炉膛内的温度, $T_{cool}$ 表示安全冷却温度, $k_6$ 表示降温速率系数, $k_7$ 表示环境等其他影响因素的修正因子。

#### (2) 数据和机理混合模型

基于数据和机理混合模型的关重设备用能态势实时预测流程如图2所示。

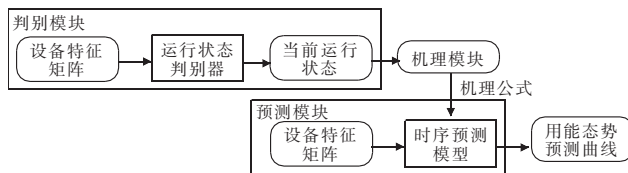


图2 关重设备用能态势实时预测方法流程图

如图2所示,关重设备用能态势实时预测分为三个阶段:

1) 第一阶段,获取关重用能设备的机理模型。具体来说,通过设备的一些运行参数以及工艺参数

计算得到当前特定阶段的运行功率,各种类型设备的功率模型如上一小节所述,其中,需要通过增设各种类型传感器的方法实时获取一些运行参数,例如机床的主轴转速、进给速度等,同时通过数字化的方式记录关重用能设备的工艺参数、加工工件类型等,这些机理信息可以反映出设备当前所处场景,称为多场景特征,例如加工工艺类型可以反映设备所处哪一分厂,加工工艺参数可以反映处于零件加工的哪一个阶段。

2) 第二阶段,训练深度学习模型预测设备未来一段时间的运行阶段。

第一步,将高频采集的历史用能态势、工艺参数、运行参数运行状态等按时间顺序排列为一个参数矩阵,其中,对数字类型的特征信息进行归一化预处理,对运行状态等非数字类型的特征信息分别进行数字编码预处理。将预处理后的特征数据进行 Z-Score 标准化处理,并使用滑动窗口提取数据的时序特征,分别得到特征矩阵,表达式为:

$$X^{t:(t+T)} \quad (4)$$

其中,  $X \in \mathbb{R}^{1 \times F}$ ,  $F$  表示设备的输入特征数,  $X$  表示设备的特征矩阵,包括每一时间步的历史用能态势信息、历史多场景特征等数据,  $t:(t+T)$  表示从时间步  $t$  到时间步  $(t+T)$ ,滑动窗口宽度为  $T$ 。

第二步,将设备的特征数据(特征矩阵)作为输入,将滑动窗口之后一段时间步的设备运行状态作为目标值,训练判别器模型。本文采用 Transformer 模型作为判别器模型,Transformer 模型是一种基于自注意力机制的神经网络模型,因其适用于并行化计算以及本身模型的复杂程度使其在精度和性能上都优于以往模型。

将特征矩阵输入 Transformer 模型,在模型最后增加 softmax 模块,使其能够输出当前时间步处于各个运行阶段的概率,并将一些逻辑规则(例如机床的负载阶段一般在空载阶段之后)转化为数学规则对预测概率进行约束,将所得概率最大的预测运行阶段作为输出的预测值,使用交叉熵作为损失函数,与目标值进行损失函数计算,利用梯度反向传播更新模型参数,实现模型训练。

3) 第三阶段,根据预测得到的设备运行阶段选择相应的功率模型,将其作为一个机理输入模块,结合设备历史用能态势、加工任务等信息,训练实

时用能态势预测模型。

第一步,根据未来短期的生产计划安排设备加工工艺参数,结合预测得到的功率模型,通过机理计算得到未来一段时间步的可能功率(时间步数量与第二阶段预测的运行状态的时间步一致),标准化后将其拼接在第二阶段所得的特征矩阵  $X^{t:(t+T)}$  后面作为用能态势预测模型的输入。

第二步,使用长短期记忆网络(LSTM)模型和全连接层进行训练,输出未来一段时间的用能态势,表达式如下:

$$f_t = \sigma(W_{fx}x_t + W_{fh}h_{t-1} + b_f) \quad (5)$$

$$i_t = \sigma(W_{ix}x_t + W_{ih}h_{t-1} + b_i) \quad (6)$$

$$o_t = \sigma(W_{ox}x_t + W_{oh}h_{t-1} + b_o) \quad (7)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_{cx}x_t + W_{ch}h_{t-1} + b_c) \quad (8)$$

$$\tilde{C}_t = C_{t-1} \odot f_t + \tilde{C}_t \odot i_t \quad (9)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (10)$$

其中,  $x_t$  表示当前时间步的特征矩阵,  $f_t$ 、 $i_t$ 、 $o_t$  分别表示当前时间步  $t$  的遗忘门、更新门、输出门,  $\tilde{C}_t$  表示当前时间步  $t$  的隐藏层,  $C_t$  表示当前时间步  $t$  的记忆单元,  $h_t$  表示当前时间步  $t$  的输出,下标为  $t-1$  的参数表示该参数来自上一时间步  $t-1$ ,  $W$  和  $b$  表示可学习的参数矩阵,会在训练中依据梯度反向传播不断优化更新,不同下标的可学习参数矩阵互相独立,  $\tanh$  和  $\sigma$  表示对应的激活函数,表示哈达玛积运算。

在训练过程中将长短期记忆网络(LSTM)模型在当前时间步  $t$  的输出输入全连接层,改变数据维度后使用反标准化获得设备用能态势预测值,与实际值进行损失函数计算,依据梯度反向传播优化模型参数。训练完成后,得到关重用能设备的用能态势实时预测模型。

## 2.2 供能系统功率模型

以东方电机有限公司三联供系统为基础,基于模块化建模原则建立各设备的功率模型,并根据工质、能源或信息流向完成系统模型的构建。以热力学定律、传热方程、热平衡方程为基础,以下以燃气内燃发电机组数学模型为例介绍供能系统关重设备的功率模型<sup>[17]</sup>。

### (1) 压气机模型

压气机工作过程视为理想气体绝热压缩过程,

其出口气体温度及压力为:

$$T_1 = T_{\text{air}} \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_c} (\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1) \right\} \quad (11)$$

$$P_1 = P_{\text{air}} \pi_c \quad (12)$$

式中,  $T_1$  表示压气机出口温度,  $T_{\text{air}}$  表示环境温度,  $\eta_c$  表示压气机效率,  $\pi_c$  表示压气机增压比,  $k$  表示空气绝热指数,  $P_1$  表示压气机出口压力,  $P_{\text{air}}$  表示环境压力。

压气机压缩气体所消耗的扭矩为:

$$T_{\text{tc}} = \frac{1}{\eta_c} \frac{k}{k-1} \frac{30}{3.14 n_c} D_c R T_{\text{air}} (\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1) \quad (13)$$

式中,  $T_{\text{tc}}$  表示压气机消耗扭矩,  $n_c$  表示压气机转速,  $D_c$  表示压气机空气质量流量,  $R$  表示气体常数。

从以上几个关系式可以看出, 若想求出压气机出口气体压力和温度, 应先求出压气机的效率和压比。压气机效率  $\eta_c$ 、转速  $n_c$ 、流量  $D_c$  以及压比  $\pi_c$  之间有如下两个基本关系:

$$D_c = f(n_c, \pi_c) \quad (14)$$

$$\eta_c = g(n_c, \pi_c) \quad (15)$$

根据给定的压气机特性曲线可以得到压气机流量、转速、压比和效率之间的数量关系。因此, 计算时只需要已知一组压气机转速和流量, 就可以求出相应的效率和压比。

## (2) 涡轮模型

涡轮的主要作用是吸入排气管废气, 并依靠废气驱动做功。涡轮出口温度和输出扭矩为:

$$T_2 = T_4 \left\{ 1 - \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_t} \right)^{\frac{k_e-1}{k_e}} \right] \right\} \quad (16)$$

$$T_{\text{tt}} = \eta_t \frac{k_e}{k_e-1} \frac{30}{3.14 n_t} D_t R T_4 \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_t} \right)^{\frac{k_e-1}{k_e}} \right] \quad (17)$$

式中,  $T_2$  表示涡轮出口温度,  $T_4$  表示涡轮前排烟温度,  $\eta_t$  表示涡轮效率,  $\pi_t$  表示涡轮膨胀比,  $D_t$  表示涡轮内气体质量流量,  $k_e$  表示废气绝热系数,  $n_t$  表示涡轮转速,  $T_{\text{tt}}$  表示涡轮输出扭矩。

与压气机类似, 通过涡轮特性曲线也可以得到涡轮流量、转速、压比和效率之间的关系, 据此可以求出涡轮出口温度和输出扭矩。

$$D_t = f(n_t, \pi_t) \quad (18)$$

$$\eta_t = g(n_t, \pi_t) \quad (19)$$

## (3) 涡轮增压器模型

根据轴的刚体动力学原理, 涡轮增压器的动力学模型可表示为:

$$J_{\text{tc}} \frac{\pi}{30} \frac{dn_c}{dt} = \eta_{\text{mt}} T_{\text{tt}} - T_{\text{tc}} \quad (20)$$

式中,  $J_{\text{tc}}$  表示增压器涡轮转子转动惯量,  $\eta_{\text{mt}}$  表示增压器机械效率。

## (4) 中冷器模型

中冷器的输出参数为出口气体温度和压力, 同时经过换热后气体会有一定的压力损失和温降。

$$T_3 = T_1 (1 - \eta_{\text{cool}}) + \eta_{\text{cool}} T_{\text{wi}} \quad (21)$$

$$\Delta p_{\text{cool}} = \Delta p_{e0} (D_c / D_{\text{cool}})^2 \quad (22)$$

$$p_3 = p_1 - \Delta p_{e0} \quad (23)$$

式中,  $T_3$  表示中冷器出口温度,  $\eta_{\text{cool}}$  表示中冷器冷却效率,  $T_{\text{wi}}$  表示中冷器冷却水进口温度,  $\Delta p_{\text{cool}}$  表示气体经过中冷器时的压损,  $\Delta p_{e0}$  表示中冷器在设计工况下的压力损失,  $D_{\text{cool}}$  表示中冷器设计流量,  $p_3$  表示中冷器出口压力。

## (5) 气缸模型

燃气内燃机气缸内的工作循环包括进气、压缩、燃烧、膨胀和排气过程。充气效率为:

$$\eta_v = \eta_{v0} - B \left[ \left( \frac{n_s}{n_{s0}} \right)^2 - 1 \right] \quad (24)$$

式中,  $\eta_v$  表示气缸充气效率,  $\eta_{v0}$  表示确定最佳定时的气缸充气效率,  $n_s$  表示发动机转速,  $n_{s0}$  表示确定最佳定时的发动机转速,  $B$  表示冲程数。

进入气缸的空气量为:

$$D_a = \frac{p_3 V_{\text{cy1}}}{120 R T_3} \eta_v n_s \quad (25)$$

式中,  $D_a$  表示进入发动机气缸的空气量,  $V_{\text{cy1}}$  表示发动机总排量。

内燃机缸内工作过程:

$$D_f H_u + D_a C_{\text{pa}} T_3 = Q_w + P_e + (D_f + D_a) C_{\text{pg}} T_4 \quad (26)$$

式中,  $D_f$  为示燃料消耗量,  $H_u$  为天然气低位发热量,  $Q_w$  为单位时间冷却水带走的热量,  $C_{\text{pa}}$  为进气工质的定压比热,  $C_{\text{pg}}$  为排气工质的定压比热,  $P_e$  为发动机的有效功率。



和产值数据对比可见,单位产值电耗降低 17.24%,单位产值气耗降低 48.45%,单位产值综合能耗(天然气低位热值按 36 MJ/N·m<sup>3</sup>计)降低 29.16%,单位产值降碳 22.32%(电力和天然气的碳排放因子分别按 0.5810 kgCO<sub>2</sub>/kW·h 和 2.162 kgCO<sub>2</sub>/N·m<sup>3</sup>计)。

表 2 各分厂节能降碳情况

分厂名称	单位产值节电 kW·h/万元	单位产值省气 N·m <sup>3</sup> /万元	单位产值减碳 tCO <sub>2</sub> /万元
焊接分厂	15.72	2.30	0.014
发电机分厂	12.48	0.12	0.008
冲剪分厂	14.61	1.39	0.011
重金工分厂	12.55	0.00	0.008
线圈分厂	16.69	0.04	0.010

#### 4 结论

在能源价值链分析优化的基础上,对绿色智慧互联工厂建设进行了整体规划,通过整合企业业务流程,提升信息化、自动化程度,增强持续创新能力与竞争力,完成全价值链的数字化转型。通过应用测试,达到了单位产值综合能耗降低率 10% 以上的目标。目前,东方电机有限公司正在积极拓展和深化能源价值链管控与协同服务系统的应用,以进一步挖掘系统的节能降碳潜力,助力企业的降本增效和节能降碳。

致谢 本文得到了国家重点研发技术项目(项目编号:2022YFB3304500)的支持,对此表示感谢!

#### 参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2024

[2] IEA. CO<sub>2</sub> Emissions in 2024: Global Trends Report [R]. Paris: IEA, 2025

[3] 刘志峰, 黄海鸿, 李磊, 等. 绿色制造: 碳达峰、碳中和目标下制造业的必然选择 [J]. 金属加工(冷加工), 2022(1): 15-19

[4] 王强钢, 吴雪翠, 杨龙杰, 等. 考虑设备变工况特性和灵活性供需匹配的园区综合能源系统优化配置模型 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 20-28+37

[5] 董萌苇, 朱劭婷, 徐成司, 等. 多主体参与的区域综合能源系统集中-分布式需求响应机制 [J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2336-2345

[6] 王义军, 齐岩, 蔡亦浓, 等. 计及设备变负载率特性的综合能源系统“源-荷-储”协同优化调度策略 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 123-130

[7] WANG Yunqi, QIU Jing, TAO Yuechuan. Optimal Power Scheduling Using Data-Driven Carbon Emission Flow Modelling for Carbon Intensity Control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2894-2905

[8] WANG Mingdong, SU Wenxia, Kong Bin. Fuzzy Comprehensive Assessment of Smart Grid Maturity [J]. Advanced Materials Research, 2014, 960-961: 803-807

[9] 王喜文, 王叶子. 德国信息化能源 (E-Energy) 促进计划 [J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(4): 75-76+80

[10] 杨挺, 刘豪, 王静, 等. 基于深度强化学习的园区综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3604-3613

[11] 何清华. 用户侧智慧能源管理系统的研究与应用 [D]. 湖南大学, 2021

[12] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 面向能源互联网的多能流综合能量管理系统: 设计与应用 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 122-128+171

[13] 翟华, 闻若彤, 卢锦玲. 基于物联网技术的海上油田综合能源管理系统架构 [J]. 电力科学与工程, 2021, 37(4): 37-48

[14] Deane Felicity, Huggins Anna, Karim Md Saiful. Measuring, monitoring, reporting and verification of shipping emissions: Evaluating transparency and answerability [J]. Review of European, Comparative & International Environmental Law (RECIEL), 2019, 28(3): 258-267

[15] 工业互联网产业联盟. 工业互联网碳达峰碳中和园区指南 (2021) [EB/OL]. [2021-12-30]. <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/zthg/202201/P020220105397507391821.pdf>

[16] 刘慧敏. 近零碳排放园区试点建设实施方案研究 [J]. 绿色科技, 2022, 24(23): 276-280

[17] 熊深源. 耦合光伏的园区型燃气分布式能源系统动态特性及设计方法研究 [D]. 重庆大学, 2024

# 科技情报支撑企业科技创新的实践与探索

令狐文倩<sup>1</sup> 张媛<sup>1\*</sup> 陈柄元<sup>2</sup> 田宇<sup>3</sup>

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 东方电气集团数字科技有限公司, 成都 610218;  
3. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**科技情报在支撑企业科技创新中的重要性日益凸显。本文系统分析了科技情报在企业创新活动中的核心作用,指出其在创新方向选择、战略决策支持及风险预警方面的价值。同时,结合实践调研,梳理了企业在科技情报获取、分析与应用过程中面临的主要挑战,包括高质量情报提取难、研判深度不足以及科研与管理决策支撑不充分等问题,构建了智能科技情报系统,从系统架构、数据、功能与运营等维度介绍了系统的设计与实现路径及在创新活动中提升决策科学性与资源配置效率的作用。尽管系统仍处于智能化深化阶段,但其在企业科技创新中的实践价值已初步显现,为未来构建高水平科技情报服务体系提供了可参考的路径。

**关键词:**科技情报;数字技术;数字化平台;科技创新

中图分类号:G350

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)06-0084-05

## Practices and Explorations of Science and Technological Information in Supporting Enterprise Technology Innovation

LINGHU Wenqian<sup>1</sup>, ZHANG Yuan<sup>1\*</sup>, CHEN Bingyuan<sup>2</sup>, TIAN Yu<sup>3</sup>

(1. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Dongfang Electric Digital Technology Co., Ltd., 610218, Chengdu, China;

3. Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** The importance of scientific and technological (S&T) information in supporting enterprise research and innovation has become increasingly prominent. This study systematically examines the core roles of S&T information in corporate innovation activities, highlighting its value in guiding innovation direction, supporting strategic decision-making, and enabling risk early warning. Based on practical investigations, the paper further identifies key challenges enterprises face in the acquisition, analysis, and application of S&T information, including difficulties in extracting high-quality information, insufficient analytical depth, and inadequate support for research and management decision-making. To address these issues, an intelligent S&T information system is constructed. The paper describes its design and implementation across multiple dimensions-including system architecture, data foundation, functional modules, and operational mechanisms-and illustrates how the system enhances the scientific basis of decision-making and improves resource allocation efficiency in innovation activities. Although the system is still in the stage of advancing its intelligent capabilities, its practical value in supporting enterprise research and innovation has already begun to emerge, offering a valuable reference for building high-level S&T information systems in the future.

**Key words:** scientific and technical information; digital technology; digital platform; technology innovation

收稿日期:2025-10-30

**作者简介:**令狐文倩(1997—),女,2022年毕业于美国马里兰大学市场分析专业,硕士,研究员。现任职于东方电气集团科学技术研究院有限公司,主要从事科技情报等方面研究工作。

张媛(1985—),女,2011年毕业于西安交通大学化学工程与技术专业,硕士,高级工程师。现任职于东方电气集团科学技术研究院有限公司,主要从事能源行业绿色低碳技术及产业研究工作。通信邮箱:zhangyuan03@dongfang.com。

科技是第一生产力,创新是第一动力,科技创新是发展新质生产力的核心要素。为强化科技创新主体地位,企业普遍高度重视科技创新活动及成果产出,多维度提升创新活动的质效。然而,仍有诸多问题需要解决,包括创新方向研判与布局的有效性、投入与产出的匹配性以及科研管理决策支撑不足等问题。在此背景下,科技情报作为连接信息与创新的重要桥梁,通过系统化的信息收集、挖掘、分析和共享,可以为科技创新提供科学依据和战略支持。基于人工智能技术应用,构建智能化科技情报平台对多源数据充分整合及利用,不仅能够提升创新布局的前瞻性和有效性,还能优化创新资源配置,促进技术成果转化,增强科研体系的整体创新能力。因此,探索科技情报在企业科技创新中的实践路径与作用机制,对于提升企业竞争力和发展水平,进而推动我国培育新质生产力具有重要和现实意义。

## 1 科技情报对企业科技创新的作用

科技情报是以科技视角为主的各类情报信息。根据1985年刘茂才、张伟民主编的《科学学辞典》,科技情报是关于自然科学、数学、技术科学和应用科学(工程技术)等范围内的情报。广义的科技情报则是指涵盖科学研究、科技合作、科技交流、技术转移与成果转化、产业孵化的全创新链的情报信息。科技情报工作是指把科技知识和科技成果,通过组织加工后,准确、及时地提供给使用者的传递工作<sup>[1]</sup>。在数字化转型背景下,建立系统化、数字化的科技情报工作模式,对企业科技创新具有双重核心价值。一方面推动传统科研模式创新,将从前的“经验判断、靠外脑”逐步优化升级为“数据支撑、建内脑”;另一方面可借助数字技术整合内外部多源智力资源,衔接科研全流程,完善科研服务链条,进而为企业科技创新能力的提升提供有效保障。

具体而言,在知识与数字经济深度融合的时代,数据已成为企业创新发展的核心驱动力。科技情报作为数据价值转化的重要载体,帮助企业:①提供持续创新方向,通过分析行业趋势、技术进步等信息为企业打开洞察行业前沿技术动态、把握技术迭代方向的关键窗口,助力企业明确持续创新的路径;②支持战略决策,通过对市场需求、竞争格局等信息的深度挖掘,帮助企业精准预测市场走势,规避创新风险,从而做出科学、及时的战略决

策;③预警潜在风险。通过科技情报监控和动态数据分析,预测潜在的市场风险,及时发出预警,协助企业规避风险。

## 2 科技情报支撑企业科技创新面临的挑战

尽管科技情报在企业科技创新中发挥着重要作用,为创新方向选择、战略决策和风险预警提供了有力支撑,但在实际应用过程中,企业在科技情报的获取、分析和利用方面仍面临诸多挑战。

### (1) 海量数据环境中高质量情报难以获取

在数字化浪潮推动下,网络数据呈指数级增长,信息来源高度分散、格式多样、更新不均衡,导致科研人员在获取高质量科技情报时面临困难。一方面,开放网络资源中存在大量重复、失真或过度包装的信息,人工甄别难度增加,易导致研究方向判断受干扰。另一方面,当前多数企业尚未建立成熟的情报质量审核与评价机制,数据采集环节缺乏对来源可信度、专业价值、时效性的系统把关,使得不同层次的情报混杂进入科研活动中,降低情报的可用性与支撑效率。此外,前沿科技成果发布速度加快,如不具备高效的信息汇总与分析能力,企业难以及时捕捉潜在突破点,影响创新窗口期的把握。如何从互联网提供的海量信息中,发现有价值的真实信息,并应用在科研工作中,也对科技情报工作提出了新的要求<sup>[2]</sup>。

### (2) 创新方向判定中情报研判深度不够

在企业科技创新过程中,科技情报不足或不精确,直接影响企业对创新方向、技术路线和合作模式的判断。在合作创新方面,企业普遍缺乏基于情报分析的合作伙伴评估机制,尤其在产学研中,不同机构在科研能力、技术积累、产业定位等方面的匹配度难以通过经验、零散信息等传统方式准确判断,从而导致协同成本升高、合作效率受限等问题。在自主创新方面,关键创新要素(如技术知识、研发资源、研发人员能力结构)呈现快速更迭趋势,企业如果缺乏对外部技术生态的系统监测与对内部能力的情报化评估,将难以识别真正具有战略价值的创新主题。此外,自主创新普遍伴随高风险、高投入特征,使企业对未知领域的预期评估尤为依赖科学情报,若相关信息不充分,则可能导致路径选择模糊、项目储备不足或技术布局延误。

### (3) 科研与管理决策中情报成果支撑力度不足

当前企业科技情报工作仍以信息收集、汇总、呈报为主,缺乏面向科技创新的深度研判与情报推演机制,难以通过数据驱动的方式参与项目立项、技术储备、预算配置等关键决策环节。在科研立项方面,部分企业仍依赖课题申报者的经验判断或主观阐述<sup>[3]</sup>,缺乏以全球技术竞争态势、专利趋势、产业政策动向等系统情报的客观依据。在战略管理层面,情报成果未能形成结构化的决策模型或量化的指标体系,使管理层难以将科技情报转化为具体行动,如研发投资方向选择、技术并购与合作研发评估、技术风险预判等。使得情报与决策之间的断层加剧,削弱了企业对创新机会的捕捉能力与对创新风险的应对能力。

### 3 科技情报系统支撑企业科技创新实践

为有效应对上述情报获取难、研判浅、支撑弱

等问题,提高科技情报在科技创新中的实际应用,东方电气集团建设了智能科技情报系统,通过完善的系统架构与多维度功能设计,力图弥补传统情报工作的不足,为科技创新活动提供更加高效、精准的支撑。

#### 3.1 系统架构

科技情报系统的构建从科技大数据的全生命周期视角出发,对数据采集、存储、分析、应用等环节进行科学化、合理化统筹管理。该系统围绕数据基础、功能建设、运营服务三大核心维度进行体系化构建与精细化管控,并联动技术研发、市场分析、管理决策等多领域角色协同参与,打造服务于企业科技创新突破与战略决策优化的数字化、流程化、协同化支撑平台。具体架构分为四层,如图1所示。



图1 智能科技情报系统总体架构

(1) 业务应用层是科技情报系统的最终体现,直接服务于企业科研、管理等各项业务需求,涵盖前沿技术监测、企业竞争分析、AI技术问答等核心功能,提供从信息获取到智能研判的一站式应用服务。

(2) 基础支撑层通过与企业现有信息系统的深度集成,实现数据流、业务流与管理流的协同,支持

信息的高效管理和应用。依托信息检索、日志管理、标签体系等工具,确保情报数据在系统中可追溯、可管理、可调用。

(3) 数据底座层是科技情报系统的核心,负责全链路的数据采集、处理、治理与分析,通过OCR识别、文件解析、接口对接、ETL工具、网页抓取、实体识别等多种手段整合内外部数据,实现内容的抽

取、清洗、融合与统一建模,形成高质量的本地化科技数据资源池。结合持续更新机制,保证数据的准确性、完整性和时效性,为企业科技创新提供可依赖、可量化的数据基础。

(4)基础设施层为系统稳定运行提供底层算力、存储与网络环境支撑,依托集中服务器、大模型算力中心与安全可靠的企业网络,保障科技情报系统的高效运行与可持续扩展升级。

### 3.2 数据资源池构建

多源数据是科技情报工作的基石。多源数据融合是把通过不同渠道、利用多种采集方式获取的具有不同数据结构的信息汇聚到一起,形成具有统一格式、面向多种应用的数据集合的过程<sup>[4]</sup>,也就是构建数据资源池的过程。数据资源池的质量直接决定科技情报系统分析能力的深度和输出结果的有效性。

构建支撑科技智能情报系统高效运行的数据资源池,需从源头上确保数据的广泛性、可靠性、准确性与及时性。其中,广泛性体现在对企业关键技术领域与前沿方向的全面覆盖,通过收集政策法规、科研论文、专利文献、行业报告、机构信息等多类结构化与非结构化数据,形成对全球行业科技生态的多维观察;可靠性通过优选权威来源、确保数据质量、引入专业数据库等方式保障,避免信息来源不稳定、内容失真或数据缺失等问题;准确性则依赖于OCR识别、实体匹配、文本解析、数据交叉验证等数据治理手段,实现内容语义准确抽取、重复项清理与信息对齐,提高数据的可用度与分析可信度。收集路径包括通过采集全球公开数据与专业数据库外购两种途径,汇集支撑企业研发与战略判断所需的外部知识,并通过收录企业沉淀的专题研究、可行性分析报告、会议材料等,其具有高度专业性、贴合企业实际需求、知识积累沉淀深等特点,是情报分析中不可替代的重要信息来源。

### 3.3 核心功能建设

为合理匹配企业管理、技术、市场等多类用户的差异化情报需求,以智能科技情报系统为载体,采用“通用基础功能+核心特色功能”多维度功能体系,全面支撑企业科技情报服务落地。其中,搜索功能、标签工具、订阅推送、个性主页、资源管理、模型管理及用户操作日志记录与权限控制等构成通用基础功能层,为用户提供便捷的数据检索、个性

化配置与安全管控服务。核心特色功能包括:①多源知识库以规范化整合的数据资源为依托,借助通用层的搜索引擎、统一标签等工具搭建多类型知识库,结合人工智能大模型技术应用,采用语义检索技术构建可信可溯源的智能问答体系,提供便捷的知识共享与检索服务;②通过自然语言处理提取技术点,结合指标统计计算与时序分析,构建评价指标体系并关联相关情报开展态势跟踪,精准识别前沿及热点科技动态;③以企业工商信息、动态新闻为核心,形成友商多维度画像,辅助企业评估市场布局。通过通用能力实现数据统一管理,通过算法与智能模块提升情报筛选质量,解决企业高质量情报提取、创新方向研判、科研与管理决策支撑等问题,为科技创新提供了更高效、更可靠的情报支撑。

### 3.4 系统运营服务

科技情报研究是“需求分析—数据挖掘—综合研判—服务反馈”的循环<sup>[5]</sup>。设计合理闭环的运营体系有利于保障系统的持续运行。本系统构建了逻辑闭环、机制完善的运营体系,通过精准识别用户需求、强化数据挖掘与研判能力,并以服务反馈反哺系统优化,有效衔接情报工作各环节,及时响应系统运行中的问题与需求迭代,为智能科技情报系统的长期稳定运行与价值持续释放提供关键保障。具体有:①系统建立用户角色分类与定位机制,以企业员工为核心服务对象,根据部门属性与工作职能划分为不同类别角色;不同角色情报需求各异,为功能配置和权限分配提供了明确依据,确保情报服务的针对性和有效性;②构建基于角色的权限管控体系,保障数据安全与资源精准分发;系统针对不同角色在情报检索、查看、下载、上传、订阅等环节设定差异化权限,并由专职管理员动态调整与审核,既强化安全防护,又提升管控灵活性,确保多层次用户协同下的系统安全可控。

## 4 科技情报系统在企业科技创新的应用

科技情报系统不仅是信息收集与管理的工具,更是科技创新全过程的重要支撑。东方电气集团科技情报系统面向全员开放使用,对创新链条上的相关人员,特别是研发人员从创新活动的全流程——研发前、中、后三个时期给与有力支撑。

### 4.1 研发前:前瞻性支撑与研发方向选择

依托系统的数据资源池与前沿识别能力,研发

人员能够从海量、多源的科技信息中快速提取关键情报,克服传统依赖经验和零散信息判断的局限,如:①通过大模型智能问答快速获取高可信度的技术解释、研究进展,快速获取陌生技术领域知识;②借助热点技术动态追踪功能持续监测关键技术的热度变化、论文与专利增长趋势,从时间序列中识别技术成熟度与未来增长点;③利用前沿技术识别模块,结合指标体系评估,精准发现全球技术前沿与潜在空白赛道,从而判定哪些方向值得开展储备研究或重点投入。通过这一系列系统化的情报分析,研发团队能够在立项前全面掌握全球科研格局和竞争态势,科学确定研发方向、技术路线和合作策略,显著降低方向性偏差风险,为高价值创新奠定坚实基础。

#### 4.2 研发中:动态支撑与技术难题解决

在研发实施阶段,科技情报系统为项目开展提供持续、实时的动态支撑,帮助团队及时应对技术挑战、把握竞争环境变化,并提升研发过程的科学性与效率。首先,借助系统的订阅推送与行业动态监测能力,研发人员能够每日获取最新的政策、技术、专利、产品更新和竞争对手创新动向,及时掌握外部变化对研发方案的影响,避免技术路线滞后或重复研发。其次,系统整合的知识库与语义化检索功能,可帮助研发人员在解决具体技术难题时快速定位相关研究成果、解决方案或最佳实践;结合智能技术问答能力,研发人员能够获得更具针对性和解释性的参考路径,提高问题解决效率。

在竞争策略层面,系统内的企业竞争分析模块可同步分析行业企业的技术布局、产品策略及专利组合,使企业在研发过程中能够开展同步的专利规避设计、技术差异化分析与潜在合作伙伴识别,提升研发成果的竞争力与可产业化程度。基于科技情报的动态支撑,避免研发过程局限于内部活动,而是与外部技术生态进行实时互动的过程,大幅提升研发效率、创新质量与战略能力。

#### 4.3 研发后:评估支撑与成果优化

在研发完成后,科技情报系统在成果评价、应用转化和知识沉淀方面发挥持续作用,有助于提升企业创新活动的闭环管理水平。一方面,通过系统的查新检索、专利比对与知识库匹配功能,研发和管理人员能够对成果的原创性、技术先进性和产业价值进行系统评估,识别研发内容是否存在低水平

重复、是否与已有专利构成冲突,并据此完善技术方案或开展成果优化,从而提高成果的可转化性与知识产权质量。另一方面,科技情报还能支撑成果应用策略制定。例如,通过系统的行业分析与竞争态势监测,企业可判断成果在市場中的潜在定位、产业应用场景及市场窗口期,为成果推广、技术转移或后续产品化提供依据。同时,通过对项目全过程情报数据的整理与沉淀,系统能够形成可回溯的科技知识链条,为企业构建经验库和方法库,支持未来研发工作的复用与改进。有利于企业实现从前期方向选择、中期动态支撑到后期成果优化的全流程赋能,推动建立以数据驱动、情报引领、闭环管理为特征的创新体系,使科研成果的质量、效率和价值实现全面提升。

## 5 总结

本文围绕科技情报在企业科技创新中的价值、面临的挑战、系统建设实践及应用进行了系统论述,表明智能科技情报系统能够通过整合内外部多源数据、构建智能分析模型和完善运营机制,有效提升信息流通效率与跨部门协同水平,为研发前、中、后的全流程提供前瞻研判、动态支撑和成果评价等关键情报服务。系统的多源知识库、前沿技术识别、市场竞争分析、智能问答等核心功能显著增强了企业技术洞察能力和创新决策科学性。然而,目前系统仍处于智能化深化阶段,在智能体、行业垂直大模型应用等方面需进一步开展研究。未来有必要持续推进技术迭代与功能扩展,强化系统的智能化与自主化水平,提升企业科技创新能力,助力新质生产力的培育与企业核心竞争力的构建。

#### 参考文献:

- [1] 周晓英,陈燕方,张璐.中国科技情报事业发展历程与发展规律研究[J].科技情报研究,2019,1(1):13-28
- [2] 赖茂生.科技情报工作和情报学发展的回顾与思考[J].情报理论与实践,2024,47(6):1-10
- [3] 汪业梅.科技情报在科研管理中的重要性分析及建设方案路径探析[J].安徽科技,2023(6):44-47
- [4] 李广建,化柏林.大数据分析 with 情报分析关系辨析[J].中国图书馆学报,2014,40(5):14-22
- [5] 耿国桐,雷帅,孙颖,等.关于科技情报研究智能化的认识与实践[J].情报理论与实践,2022,45(5):1-6