

黑体测温技术在高炉热风炉测温中的应用对比分析

杜友尧¹, 黄 军¹, 刘 杨¹, 付攀文¹, 陆哲聪², 闵 文²

(1. 江苏沙钢钢铁有限公司, 江苏 张家港 215625; 2. 杭州大吕科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:高炉热风炉为炼铁核心配套设备, 炉内正压气密恶劣工况下, 传统接触式热电偶易出现精度衰减、损耗快、响应滞后、炉体气密性破坏、高温气体泄漏等问题, 难以满足智能化生产与安全运行需求。该文采用仿热电偶安装形式、全密封结构黑体测温技术, 在保持与传统热电偶一致安装方式的基础上, 实现超工况等级密封, 彻底解决正压泄漏难题。以江苏沙钢 2# 正压气密型高炉热风炉为例开展应用测试, 结果显示: 该技术测量偏差 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 响应时间 $\leq 200\text{ ms}$, 密封性能远高于工况要求, 可在正压气密环境下实现长期稳定高精度测温, 性能显著优于传统热电偶, 为正压热风炉安全高效运行提供可靠支撑。

关键词:黑体高温计; 热电偶; 全密封结构; 正压气密热风炉; 温度监测

中图分类号: TU892; TN219

文章编号: 1000-0682(2026)04-0105-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.018

Comparison and analysis of blackbody temperature measurement technology in blast furnace hot blast stove temperature measurement

DU Youyao¹, HUANG Jun¹, LIU Yang¹, FU Panwen¹, LU Zhecong², MIN Wen²

(1. Jiangsu Shagang Steel Co., Ltd., Jiangsu Zhangjiagang 215625, China;

2. Hangzhou Dalu Technology Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310000, China)

Abstract: Hot blast stove is a core supporting equipment for ironmaking. Under the harsh working condition of positive pressure and airtightness in the furnace, traditional contact thermocouples are prone to problems such as accuracy attenuation, rapid loss, response lag, damage to furnace airtightness, and high-temperature gas leakage, which are difficult to meet the requirements of intelligent production and safe operation. This paper adopts a blackbody temperature measurement technology with thermocouple-simulated installation form and fully sealed structure, which maintains the same installation mode as traditional thermocouples and realizes sealing performance exceeding working condition requirements, completely solving the problem of positive pressure leakage. Taking No. 2 positive pressure airtight blast furnace hot blast stove of Jiangsu Shagang as an example, the application test is carried out. The results show that the measurement deviation of this technology is within $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the response time is $\leq 200\text{ ms}$, the sealing performance is much higher than the working condition requirements, and it can realize long-term stable high-precision temperature measurement in positive pressure airtight environment. Its performance is significantly better than traditional thermocouples, providing reliable support for the safe and efficient operation of positive pressure hot blast stoves.

Keywords: blackbody pyrometer; thermocouple-simulated installation; fully sealed structure; positive pressure airtight hot blast stove; temperature monitoring

0 引言

收稿日期: 2026-05-27

第一作者: 杜友尧(1979—), 主要从事高炉生产设备电气维护及管理工作。E-mail: haimeng62723@163.com

热风炉为高炉炼铁系统^[1], 提供稳定的高温热风, 是高炉炼铁体系的核心辅助设备。送风温度的

高低直接决定炼铁生产效率、能源消耗水平与整体生产成本。热风炉拱顶、燃烧室、拱角等核心区域的温度参数,是调控燃烧流程、评估设备运行状态、保障炉体耐火材料结构安全的关键工艺依据。目前国内钢铁企业的热风炉测温系统,仍以传统接触式^[2]热电偶为主要方案,常用 S 型、B 型贵金属热电偶,通过铠装保护套管插入炉体内部采集温度信号。但在正压、高温交变、高粉尘、强气流冲刷的气密工况下,热电偶不仅存在烧蚀快、响应滞后、寿命短、精度衰减等固有缺陷,更会因密封结构薄弱、大孔径开孔难以满足正压气密要求,引发高温气体泄漏、炉壳开裂等重大安全隐患。

该文提出仿热电偶安装形式+全密封结构黑体测温^[3]方案:外形与安装方式对标传统热电偶,同时采用多级密封、承压强化设计,密封性能超过热风炉正压工况要求,在不改变现场安装习惯、不改造炉体结构的前提下,实现非接触高精度测温与超等级气密安全双重保障。以沙钢集团 2# 正压气密型高炉热风炉为工程应用对象,系统对比该技术与传统热电偶的应用效果,为正压气密炼铁热风炉提供可直接替换、安全可靠的测温升级方案。

1 高炉热风炉传统测温技术现状与核心痛点

1.1 传统热电偶测温应用现状

国内正压气密高炉热风炉主流测温方案为接触式贵金属热电偶,采用固定螺纹/法兰安装、铠装套管伸入炉内的标准形式,安装位置、开孔尺寸、固定方式已形成成熟工程习惯。但该方案在正压气密工况下,密封依赖单一填料或垫片,长期高温交变后易失效,难以满足高等级气密要求。

1.2 正压工况下传统热电偶核心痛点

(1) 密封结构简单,难以满足正压气密

传统热电偶仅靠填料函或垫片密封,在正压、高温交变环境下易老化、松动,密封等级低,无法长期保证炉体气密,存在高温气体泄漏风险。

(2) 正压冲刷加速损耗,使用寿命短

热电偶保护套管(刚玉/陶瓷材质)长期受炉内高温高烟气持续冲刷,同时承受氧化、硫化侵蚀,套管会快速变薄、变形甚至开裂;频繁更换热电偶又会反复破坏炉体密封结构,进一步加剧泄漏风险,形成“寿命短→换的勤→密封坏→工况更恶劣→寿命更短”的恶性循环。从而导致拱顶热电偶使用寿命由最初的使用 1 年多,缩短至目前的 2 个月不到,频繁更换加剧密封失效。

(3) 响应滞后,正压燃烧控制精度不足

铠装 B 型热电偶平均响应时间在 240 s ~ 300 s 之间(管径越大响应越慢),无法跟踪正压工况下温度瞬态变化,造成空燃比控制超调、燃烧效率下降。

(4) 接触式测量,精度衰减快、数据波动大

长期高温导致热电特性劣化,测量偏差可达 $\pm 5 \sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,数据无规律波动,无法支撑精准调控。

2 黑体测温技术的核心优势

黑体红外测温技术相较传统热电偶测温具备以下优势,是工业高温工况下的理想测温方案。

(1) 安装形式与热电偶一致,直接替换免改造

外形尺寸、安装螺纹/法兰、插入深度 1:1 对标传统热电偶,沿用原有安装孔与固定结构,不停炉、不扩孔、不改变现场布局,快速替换升级。

(2) 全密封强化结构,密封性能远超工况要求

采用多级密封+焊接密封+端面硬密封组合结构密封等级、承压能力、气密寿命显著高于热风炉实际正压工况,从根源杜绝正压高温气体泄漏、炉壳发红等安全隐患。

(3) 非接触光学测温,寿命长、精度稳

传感器不与高温介质直接接触,使用寿命 ≥ 5 年,测量偏差稳定 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,长期无精度衰减。

(4) 毫秒级响应,适配正压瞬态燃烧

热响应时间 $\leq 200\text{ ms}$,实时跟踪温度变化,支撑空燃比精准闭环控制。

3 黑体测温技术在沙钢高炉热风炉的现场应用

3.1 应用对象概况

本次试验选取江苏沙钢集团炼铁厂 2# 高炉配套顶燃式热风炉作为研究对象,该热风炉设计热风温度 $\geq 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$,拱顶最高工作温度 $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$,日常生产执行“两烧一送”的换炉模式,拱顶温度控制在 $1200 \sim 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围。原测温系统采用 B 型热电偶检测拱顶、拱角、烟道等点位温度,生产过程中频繁出现数据波动大、热电偶烧损失效等问题,无法满足智能燃烧调控的要求。

本次改造在 2# 热风炉拱顶、南北拱角位置分别安装工业级黑体测温传感器,与原热电偶测温系统并行运行,两路温度数据同步采集、同画面显示,系统^[6]数据接入热风炉原有 DCS 控制系统,监控总貌画面如图 1 所示,热风炉结构实时画面如图 2 所示,测温点位实时画面如图 3 所示,现场安装黑体测温传感器如图 4 所示。

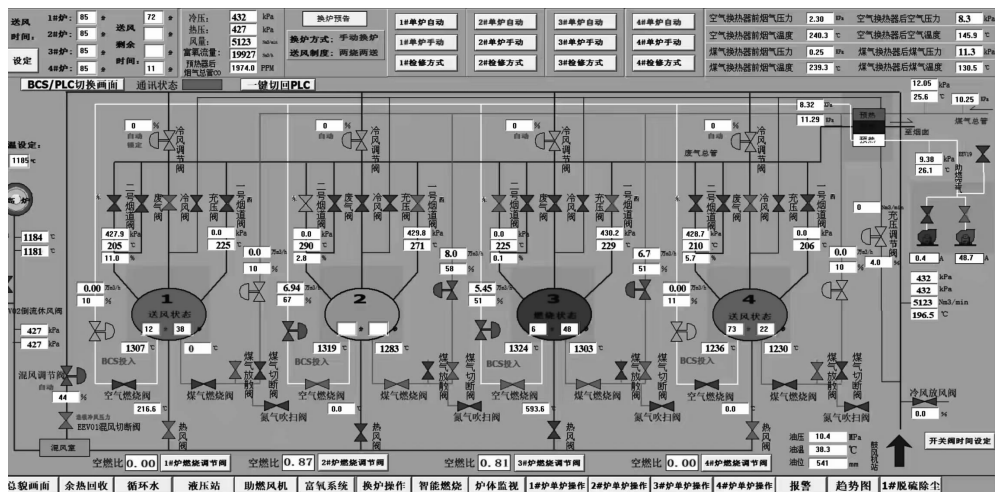


图 1 监控总貌

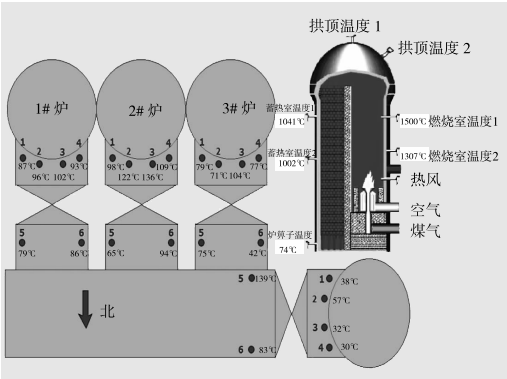


图 2 热风炉结构

	1HS	2HS	3HS	4HS
热风炉工作状态	送风状态		燃烧状态	送风状态
拱顶温度差值报警	NORMAL	NORMAL	NORMAL	ALARM
西烟道温度	224 °C	273 °C	231 °C	205 °C
东烟道温度	204 °C	293 °C	229 °C	210 °C
拱顶温度1	1307 °C	1313 °C	1324 °C	1234 °C
拱顶温度2	0 °C	1283 °C	1302 °C	1228 °C
预燃室温度	0 °C	0 °C	1150 °C	1150 °C
热风支管温度	219 °C	0 °C	575 °C	0 °C
TE-105_1	87 °C	98 °C	79 °C	38 °C
TE-105_2	96 °C	122 °C	71 °C	57 °C
TE-105_3	102 °C	136 °C	104 °C	32 °C
TE-105_4	93 °C	109 °C	77 °C	30 °C
TE-105_5	79 °C	65 °C	75 °C	139 °C
TE-105_6	86 °C	94 °C	42 °C	83 °C
重力除尘温度	87 °C	93 °C	86 °C	106 °C

图 3 测温点位实时画面

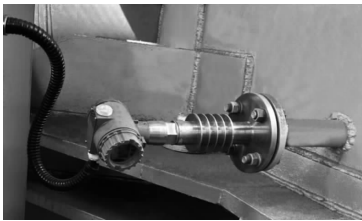


图 4 黑体测温传感器安装

3.2 仿热电偶安装与超等级密封实施

黑体测温系统现场安装与调试方案如下：

(1) 对标热电偶安装

沿用原有安装孔、螺纹 / 法兰结构, 插入深度、外部形态与原热电偶完全一致, 现场安装、接线、布线无任何改造。

(2) 超工况全密封处理

炉壳外侧: 焊接密封底座 + 高温密封垫片 + 螺纹锁紧密封

(3) 传感器本体: 多级迷宫密封 + 高温固化

密封胶承压防护整体气密性能: 经现场试压检测, 远高于热风炉正压运行要求

(4) 纳米隔热 + 正压吹扫

加装纳米隔热层隔绝炉体高温; 配置光学窗口正压吹扫, 防止粉尘与烟气倒灌。

(5) 数据接入与标定

输出 4 ~ 20 mA 标准信号, 采样周期 100 ms, 与原热电偶同画面显示; 结合正压工况完成现场标定。

3.3 现场运行数据采集

系统正式投运后, 对 2# 热风炉拱顶、拱角的温度进行了连续 24 天的同步监测, 监测范围覆盖燃烧、送风、闷炉全工况, 以及换炉操作、负荷调整等全部生产场景, 采集了温度实时趋势、波动范围、响应特性等多维度数据^[7], 为测温效果对比与燃烧优化分析提供了完整的工艺数据支撑。

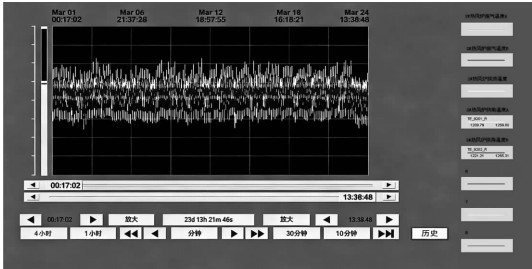


图 5 热风炉拱顶/拱角温度长周期趋势(24 天)

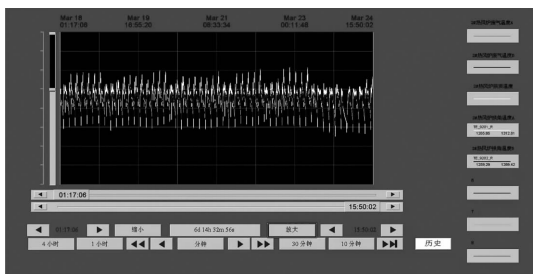


图 6 热风炉拱顶/拱角温度中期趋势(6 天)

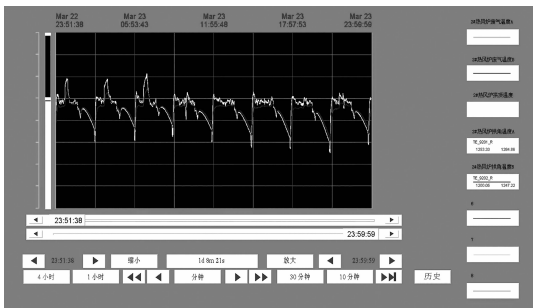


图 7 热风炉换炉过程温度瞬态变化趋势(16 h)

4 正压气密工况下应用效果多维度对比

基于现场连续运行的实测数据,从测量稳定性、动态响应特性、测量精度、运维成本、安全性能 5 个核心维度,对黑体测温技术与传统热电偶测温技术开展系统性对比分析。

4.1 安装与密封性能对比

传统热电偶:安装形式单一,密封结构简单,易失效,无法满足高等级正压气密。

黑体测温:安装形式 1:1 一致,全密封强化处理,密封性能远超工况要求,长期 1.5 倍正压下无泄漏、无松动,安全等级大幅提升。

4.2 测量稳定性对比

由长周期运行趋势可以十分自然、清楚地看到,传统热电偶所测数据有十分明显的高频波动,因此 24 天连续监测中拱顶温度测量值的峰峰值波动达 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,又时常由于热电偶元件劣化而出现数据跳变、无规律波动,故不能可靠地反映炉内温度的实际变化趋势。

由于黑体测温系统^[8]测量数据稳定性极好,故相同工况下所测温度的峰峰值波动严格控制在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,因此能十分可靠、连续地反映炉内温度变化,绝无数数据跳变、失真诸种问题。更难得的是,换炉后的燃烧升温阶段,黑体测温数据平滑、合理地显示了温度线性上升的过程,而热电偶数据中仍有不少毛刺及波动,故黑体测温数据更有利于燃烧空燃比的精细调整。

由 16 小时换炉瞬态趋势可以十分清楚、可靠地看到,热风炉“燃烧-送风-闷炉”工况切换时黑体测温能很好地反映温度的周期性变化规律,而热电偶数据有明显滞后及波动,故其若干时刻的测量值与真实温度偏差较大。

4.3 动态响应特性对比

由于动态响应性能是测温系统能很好地支撑智能燃烧控制的根本指标,因此本次试验用换炉、空燃比阶跃调整的方法对两套系统的响应时间做了系统、严谨的实测分析:传统 B 型热电偶的温度响应时间是 45 s ,空燃比调整后需约 1 分钟方能可靠地反映炉内温度变化,因而严重滞后于燃烧工况的调整节奏,故燃烧控制时发生超调、振荡,不能获得理想的空燃比控制效果。

由于黑体测温系统^[9]温度响应时间不超过 200 ms ,故空燃比调整以后能立即、可靠地检测炉内温度变化,因此很自然地成为燃烧控制系统提供实时温度反馈,有利于实现空燃比的精确闭环控制,也因而提高燃烧效率,降低煤气消耗。

4.4 测量精度对比

以热风炉稳定燃烧工况下拱顶温度为基准,对两套系统的测量精度做了系统、严谨的现场标定及工艺校核,结果表明:在 $1200\sim 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的常规工作温度范围内,传统热电偶的实际测量偏差普遍达 $\pm 10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,部分劣化热电偶的偏差甚至超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。且随运行时间延长,其热电特性持续劣化,长期测量精度无法保证。

由于黑体测温系统^[10]在所测温度区间内测量偏差稳定地控制在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,故其测量精度大大优于传统热电偶,更难得的是全温度量程内测量精度无明显衰减,长期运行稳定性极好。因此从实测数据中可以十分清楚、可靠地分辨热风炉不同工作状态下的温度差异,自然良好地反映燃烧、送风、闷炉各状态的温度变化规律,对工艺判断有直接而重要的帮助。

从现场应用结果可以十分清楚、可靠地看到,黑体测温系统的测量偏差控制在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,响应时间不大于 200 ms ,因而性能大大优于传统热电偶,因此很自然地成为热风炉智能燃烧控制理想的实时数据来源。更难得的是黑体测温系统全生命周期运维成本低,安装时不损伤炉体结构,安全性极好,故在高炉热风炉领域有极好的应用前景。

4.5 运维成本与使用寿命对比

传统热电偶方案中,2#热风炉拱顶、拱角位置的

热电偶平均使用寿命仅 4 个月,年更换频次达 3~4 次。每次更换均需配合停炉降温,单次备件、人工及停炉减产损失合计超 2 万元,单套系统年运维成本超过 6 万元,单个炉子年运维成本预计 50 万元。

黑体测温系统为非接触式测量,传感器无高温损耗件,设计使用寿命 ≥ 5 年,日常运维仅需定期检查吹扫压缩空气的压力与洁净度,无备件更换需求,全生命周期成本远低于传统热电偶方案,经济效益显著。

4.6 安全性能对比

传统热电偶套管需深入炉体内部,在长期高温交变工况下,安装孔处的耐火材料易开裂、脱落,引发炉壳发红、高温气体泄漏等严重的安全隐患;同时套管断裂后的脱落部件会损伤炉内蓄热体与燃烧器,威胁设备安全运行。

黑体测温系统仅需开设小型光学观测孔,没有部件深入炉体内部,最大程度保障了炉体结构的完整性,从根本上消除了炉体泄漏、部件脱落的安全隐

患;同时传感器安装在炉体外部,日常巡检、维护无需接触高温区域,大幅降低了运维作业的安全风险。

5 结论与展望

5.1 结论

该文以江苏沙钢集团 2#高炉热风炉为工程应用对象,开展黑体测温技术与传统热电偶测温技术的现场对比试验,得出以下结论:

(1)该文提出的仿热电偶安装形式+全密封结构黑体测温方案,外形、安装、接口与传统热电偶完全一致,可直接替换、免现场改造。

(2)系统采用超工况等级密封处理,气密与承压能力远高于热风炉正压运行要求,从根本上解决正压泄漏、密封失效等安全难题。

(3)正压工况实测:测量偏差 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,响应时间 $\leq 200\text{ ms}$,寿命 ≥ 5 年,整体性能显著优于传统热电偶,是正压气密热风炉理想的测温升级技术。

(下转第 115 页)

(上接第 83 页)

化测试方法展开,提出一种基于软件仿真的测试方案,能够自动完成监控分站相关功能参数的配置,并对其控制逻辑执行情况与响应时间进行系统化评估。该方法以较低成本显著提升了测试效率,尤其在出厂批量测试等场景下,工作效率提高 1 倍以上,且能够直接输出精确的控制响应时间数据。需要说明的是,当前系统在部分显示状态与特殊工况下的功能验证仍需人工辅助完成。未来工作中,将进一步优化测试逻辑与实施方案,推动测试流程的全自动化,减少人工干预,为煤矿安全监控设备的可靠运行提供更高效的技术支撑。

参考文献:

- [1] 邓飞. 煤矿安全监控系统研究现状与展望[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 14-19.
- [2] 孙东玲. 煤矿瓦斯灾害防治实用新技术及应用实例[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2020.
- [3] 陈向飞. 煤矿安全监控系统逻辑控制自动检测装置设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(06): 154-158.
- [4] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 煤矿监控系统主要性能测试方法: MT/T772—1998 [S]. 北京:国家煤炭工业局, 1999-04-01.
- [5] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 矿用分站: MT/T 1005—2006 [S]. 北京:中国煤炭工业出版社, 2006-11-01.
- [6] 张雪梅, 梁光清. 基于抗干扰技术的催化式甲烷传感器

设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(04): 47-51.

- [7] 谭凯, 邵严. RS485 动态调控主动传输技术在安全监控系统的应用[J]. 煤矿机械, 2025, 46(8): 181-185.
- [8] 邵严. 不定期受控 RS485 总线通信方式在煤矿安全监控系统中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(7): 117-120.
- [9] 中华人民共和国应急管理部, 国家矿山安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京:应急管理出版社, 2025.
- [10] 《修改条款专家解读》编写组. 煤矿安全规程解读[M]. 北京:应急管理出版社, 2025.
- [11] 中华人民共和国应急管理部. 煤矿安全监控系统通用技术要求: AQ6201—2019 [S]. 北京:中华人民共和国应急管理部, 2020-02-01.
- [12] 国家矿山安全监察局. 煤矿安全规程执行说明[M]. 北京:应急管理出版社, 2025.
- [13] 中华人民共和国应急管理部. 煤矿安全监控系统及检测仪器使用管理规范: AQ1029—2019 [S]. 北京:中华人民共和国应急管理部, 2020-02-01.
- [14] 何青松. 高瓦斯煤矿双巷掘进工作面甲烷风电闭锁分析[J]. 煤矿安全, 2015, 46(01): 71-72+75.
- [15] 郝宏伟. 煤矿双巷掘进甲烷风电闭锁本地断电方案设计[J]. 煤矿现代化, 2020(01): 85-86+90.
- [16] 黄伟. 煤矿安全监控实用技术[M]. 北京:应急管理出版社, 2021.
- [17] 国家安全生产监督管理总局. 矿用断电控制器: MT/T 1079—2008 [S]. 北京:国家安全生产监督管理总局, 2009-01-01.

参考文献:

- 参考文献:**

 - [1] 贺继盛,段维伊,肖 晶,等. V2G 模式下电动汽车充电负荷频率响应控制研究[J]. 电子设计工程,2026,34(2):150-153+158.
 - [2] 孙阳,孟懿帆,赵顺毅,等. 基于扰动主动利用的孤岛微电网双模模型预测负荷频率控制[J]. 动力工程学报,2025,45(12):2180-2188+2218.
 - [3] 汪沛,袁方,余意,等. 基于 MPC 的风电接入下电力系统负荷频率控制[J]. 武汉大学学报(工学版),2025,58(12):1927-1936.
 - [4] 张艳,符家骐. 基于 IDE 算法的互联电力系统负荷频率控制[J]. 武汉大学学报(工学版),2025,58(08):1266-1274.
 - [5] 满林坤,吴珂鸣,迟成,等. 计及储能随机接入退出行为的互联电网自适应负荷频率控制策略[J]. 中国电力,2025,58(09):164-174.
 - [6] 李英,王金平,刁怀佳,等. 基于正余弦优化算法的两区域多电源互联电力系统负荷频率控制[J]. 热能动力工程,2025,40(05):141-149.
 - [7] 刘冠宇,刘惠慧. 非周期 DoS 攻击下多区域互联电力系统的负荷频率控制[J]. 电力科学与技术学报,2025,40(06):23-31.
 - [8] 王喜军,王伟,李寅松,等. 考虑源-荷-储可调度资源的新能源配电网负荷频率控制策略[J]. 可再生能源,2025,43(11):1537-1546.
 - [9] 翟正亮,严怀成,陈世明,等. 时变时滞电力系统负荷频率控制的稳定性分析[J]. 控制理论与应用,2026,43(03):501-508.
 - [10] 邹玉意,陈勇,刘越智,等. 基于 Q 学习的源荷扰动下交直流微电网负荷频率控制方法[J]. 西南大学学报(自然科学版),2025,47(05):188-198.
 - [11] 赵晶晶,王涵,杨斐翔,等. 基于数据驱动的时滞非线性电力系统负荷频率控制[J]. 电力自动化设备,2025,45(10):210-216.
 - [12] 吴向权,骆应东. 基于 RL-MPC 算法的含风电互联电网负荷频率控制研究[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(S1):921-927.
 - [13] 张磊光,陈海涛,吴赋章,等. 基于可学习模型预测控制的含风电多微网频率控制方法[J]. 智慧电力,2024,52(10):49-55+87.
 - [14] 张岩,卜旭辉,陈宗遥. 控制器动态线性化互联电力系统数据驱动负荷频率控制[J]. 控制理论与应用,2025,42(09):1818-1826.
 - [15] 刘宝伟,邹宽胜,张兆军,等. 基于混沌自适应正余弦算法的负荷频率自抗扰控制[J]. 现代电子技术,2024,47(24):97-104.

(上接第 109 页)

5.2 展望

以黑体测温获取的正压温度大数据为基础,优化热风炉正压自适应智能燃烧控制模型,实现空燃比自动优化、换炉时机精准判断,进一步提高风温、降低煤气消耗。同时将该技术推广应用至高炉本体、正压焦炉、热风管道等正压气密高温设备,推动炼铁工序全流程正压工况智能化测温与安全绿色升级。

参考文献:

- [1] 董万鹏. 高炉风口回旋区热态模拟装置图像监测及测温研究[D]. 重庆:重庆大学,2023.
 - [2] 孙晓曦,高敏,余鹏举,等. 工业用接触式测温技术综述[J]. 电子世界,2021(23):23-24.
 - [3] 陈伟孟,苏明义. 黑体测温仪与黑体辐射定律[J]. 物理教师,2021,42(04):72-73+82.
 - [4] 韩昌林,郭金朋,陆洲. 非接触式智能测温研究[J]. 电
 - 2025,25(07):2504-2512.
 - [9] 郑建忠,刘用权,陈克武. 黑体空腔式钢水连续测温系统的校验[J]. 中国仪器仪表,2025(03):32-36.
 - [10] 魏晓伟. 热风炉红外测温监测系统的应用[J]. 设备管理与维修,2021(15):144-146.

脑知识与技术,2024,20(13):124-126+131.

- [5] 王成亮,李嘉伟,王晓晖,等. 辐射加热环境下的非接触测温误差评价技术[J]. 强度与环境,2026,53(01): 25-31.
- [6] 李哲龙,焦炉燃烧室自动测温系统 V1.0. 湖南省,湖南瑞菱科技有限公司,2022-05-06.
- [7] 付攀文,林光辉,孟皓,等. 基于黑体的测温技术在热回收焦炉中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置,2025(06):102-105.
- [8] 周杰,孟梓樵,蔡宇武,等. 红外测温技术在不同防火门耐火性能中的动态测温研究[J]. 安全与环境学报,2025,25(07):2504-2512.
- [9] 郑建忠,刘用权,陈克武. 黑体空腔式钢水连续测温系统的校验[J]. 中国仪器仪表,2025(03):32-36.
- [10] 魏晓伟. 热风炉红外测温监测系统的应用[J]. 设备管理与维修,2021(15):144-146.