

石化加热炉的模块化与智能化融合发展路径研究

连卫平 (宁波连通设备集团有限公司, 浙江 宁波 315020)

摘要: 加热炉制造通过模块化设计与智能制造技术深度融合, 重构了传统生产模式。模块化建造将复杂设备分解为标准化功能单元, 显著缩短施工周期并提升装配精度; 智能制造依托物联网、人工智能与数字孪生技术, 实现全流程数据驱动优化。绿色低碳化通过清洁能源与高效热回收技术降低碳排放, 人机协同技术则通过智能交互提升生产自主性。当前面临数据互通、组织协同与标准体系等挑战, 需通过技术创新与生态共建推动产业升级。

关键词: 模块化制造; 智能制造; 绿色低碳; 人机协同; 融合发展

中图分类号: TE963 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 023-0013-03

Research on the Integrated Development Path of Modularization and Intelligence of Petrochemical Heating Furnaces

Lian Weiping (Ningbo Liantong Equipment Group Co., Ltd., Ningbo Zhejiang 315020, China)

Abstract: The manufacturing of heating furnaces has been restructured through the deep integration of modular design and intelligent manufacturing technologies, transforming the traditional production model. Modular construction decomposes complex equipment into standardized functional units, significantly shortening the construction period and improving assembly accuracy. Intelligent manufacturing, relying on Internet of Things, artificial intelligence, and digital twin technologies, achieves full-process data-driven optimization. Green and low-carbonization reduces carbon emissions through clean energy and efficient heat recovery technologies, while human-machine collaboration technology enhances production autonomy through intelligent interaction. Currently, challenges such as data interoperability, organizational collaboration, and standard systems are faced, and technological innovation and ecological co-construction are needed to drive industrial upgrading.

Keywords: Modular manufacturing; Intelligent manufacturing; Green and low-carbon; Human-machine collaboration; Integrated development

在全球制造业智能化转型的背景下, 加热炉作为石化、冶金等领域的核心设备, 其制造模式正经历从传统离散式向模块化、智能化的根本性变革。模块化技术通过标准化设计与可拆分结构, 突破现场施工的时空限制; 智能制造则通过数据感知、算法优化与协同制造, 重构生产流程的效率与质量边界。本文系统分析加热炉制造的技术革新路径, 探讨其面临的挑战与未来发展方向。

1 模块化制造: 加热炉技术革新的基石

1.1 模块化制造的核心理念与技术特征

模块化制造通过标准化设计与可拆分结构重构了传统加热炉的建造模式其核心在于将复杂设备分解为功能独立、接口统一的模块单元例如炉腔模块、对流模块和辐射模块。每个模块在工厂完成精密加工后运输至现场快速组装突破了传统现场施工的时空限制。以中国石化云南石化加热炉项目为例通过模块化建造技术将原本需要半年的现场施工周期压缩至4个月内同时通过预置传感器和管线通道使现场安装误差率降低至0.5%以下。工厂预制环境下钢结构焊接采用激光跟踪仪与自动化焊接机器人协同作业焊缝质量一次

合格率提升至99.2% 炉衬集成采用模块化浇注工艺使耐火材料密实度提高18%。

1.2 效率、质量与成本的三维突破

模块化制造的技术优势体现在效率、质量与成本三个维度。工厂预制环境下自动化焊接设备如CO₂气体保护焊的应用使焊接效率提升40%、配合相控阵超声检测技术无损检测覆盖率可达100%避免了现场环境对焊缝质量的干扰。成本控制方面模块重复利用率达65%、材料损耗率降低15%而标准化接口设计如ISO 13849机械接口标准减少了定制化开发的资源投入。当前模块化技术已在宝钢集团热处理炉项目中实现规模化应用其模块化装配线使关键部件安装精度稳定控制在0.1毫米级较传统工艺提升3倍效率。但运输过程中模块变形控制(最大允许变形量 $\leq 2\text{mm/m}$)和接口兼容性不足仍是制约其推广的主要瓶颈需通过开发轻量化耐候合金如Al-Mg-Si系合金和建立行业级接口标准解决。

1.3 应用现状与现存技术瓶颈

尽管模块化技术已取得显著成效其实际应用仍面临多重挑战。运输环节中模块尺寸受公路限高

($\leq 4.5\text{m}$)与海运舱容限制长距离运输导致结构变形率高达3%~5%。接口标准化不足如法兰规格不统一增加了现场组装的调试难度中石油云南千万吨炼油项目因接口差异导致工期延误12天。未来需通过优化模块分割策略如基于拓扑优化的分箱设计、开发耐高温密封胶(耐受温度 $\geq 800^\circ\text{C}$)以及建立模块化设计数据库推动模块化技术向更高集成度演进。

2 智能制造：技术融合的核心驱动力

2.1 数据感知与实时控制

物联网与工业互联网技术深度渗透至加热炉制造领域构建起全维度数据感知网络。通过部署精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的高精度热电偶、分辨率为 320×240 像素的红外热像仪及量程为 $0\sim 5000\text{Nm}^3/\text{h}$ 的气体流量传感器实时采集最高 1800°C 的炉膛温度梯度、 $\pm 0.02\text{MPa}$ 的燃料压力波动及 O_2 、 CO 、 NO_x 等烟气成分数据采集频率达到毫秒级。鞍钢集团1780产线通过部署智能燃烧控制系统集成2000个数据采集节点结合LSTM算法对时间序列长度 ≥ 10 年的历史燃烧数据进行特征提取实现炉温波动范围从 $\pm 15^\circ\text{C}$ 精准控制在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内、单座加热炉日均能耗降低12%(约280t标准煤)、年碳排放减少1.2万吨。工业互联网平台如西门子MindSphere构建多源异构数据融合中枢整合设备运行参数如振动、电流。环境监测数据如温湿度、粉尘及工艺指令流。基于数字孪生体建立网格精度 $\leq 5\text{mm}$ 的热工过程动态仿真模型实现调节周期 ≤ 5 秒的空燃比自适应调节、燃料利用率提升至92%以上。

2.2 智能优化与预测性维护

人工智能算法深度融入燃烧控制系统通过长短期记忆网络(LSTM)对历史运行数据进行特征提取与模式识别。以重庆新兴通用传动有限公司为例其部署的数字孪生系统集成2000个传感器实时采集炉内热成像(空间分辨率 0.1°C)与振动数据(采样率 10kHz)。结合DDPG强化学习算法优化燃烧策略在 1580°C 高温工况下实现燃烧效率98.2%、吨钢能耗降至 420kgce 。该系统通过多物理场耦合仿真(温度场、压力场、应力场)预测炉衬侵蚀速率(误差 $\leq 3\%$)关键部件如炉辊更换周期预测精度提升至98%、年节约维护成本超1200万元。DDPG算法通过Actor-Critic架构实现连续动作空间优化其中Critic网络采用双延迟深度确定性策略梯度(TD3)结构抑制过估计偏差、Actor网络输出层激活函数设计为 \tanh 函数以匹配燃烧阀开度(0~100%)的物理约束。

2.3 协同制造与全生命周期管理

协同制造与全生命周期管理推动加热炉产业向模块化与智能化深度融合演进。智能模块集成高精度压

力传感器量程 $0\sim 10\text{MPa}$ 、电动执行器重复定位精度 $\pm 0.05^\circ$ 与5G通信模组时延 $\leq 10\text{ms}$ 构建“感知-决策-执行”闭环系统。例如宁波舟山港能源装备基地研发的智能对流模块配备自适应风门基于炉膛压力波动($\pm 50\text{Pa}$)实时调节气流分布使燃烧效率提升至91.5%。自动化产线采用六轴机器人焊接系统重复定位精度 $\pm 0.02\text{mm}$ 与激光导航AGV物流设备定位精度 $\pm 5\text{mm}$ 协同作业模块关键部件装配精度稳定控制在0.1毫米级。芜湖智能工厂部署的全生命周期管理系统通过工业互联网平台整合设计(CAD/CAE)、生产(MES)、运维(IIoT)数据流实现三维模型驱动的模块化协同设计使新产品开发周期从18个月压缩至9个月、运维响应时效提升60%平均故障修复时间 ≤ 4 小时、备件库存周转率提高45%。

3 融合趋势：加热炉制造的未来图景

3.1 绿色低碳化：清洁生产与能源革命

绿色低碳化通过空气分级比为1:2.5的分级供风技术与再循环率达30%的烟气再循环系统将氮氧化物排放浓度稳定控制在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。余热回收系统采用导热系数 $\geq 50\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 的超导陶瓷换热管与储热密度 $\geq 200\text{kJ}/\text{kg}$ 的相变储热技术使热效率突破85%大关较传统设备节能率达25%以上。中国石化云南石化建设的全球首套百万吨级氢基炼化装置通过 H_2 浓度 $\geq 99.99\%$ 的纯氢燃烧技术实现吨产品碳排放强度下降70%、年减排二氧化碳超60万t。哈尔滨工业大学研发的SiC体积分数 $\geq 40\%$ 的碳化硅增强陶瓷基复合材料应用于炉衬使寿命突破12年、年腐蚀速率 $\leq 0.05\text{mm}$ 、配合厚度 $50\mu\text{m}$ 的纳米氧化锆涂层将炉壁热阻降低22%显著提升热传导效率。

3.2 柔性生产：模块化重组与智能协同

柔性生产通过模块化设计与智能协同实现制造模式革新。在化工领域高精度压力传感器与智能换型系统结合使传热模块与反应模块实现4小时内快速重组支持多品种小批量生产切换。华东化工园区通过模块化流水线将产品切换效率提升3倍。宝钢集团与沈阳新松机器人共建工业互联网平台基于ISO 13849机械接口标准开发标准化模块(接口公差 $\pm 0.05\text{mm}$)使跨品牌设备互操作性提升40%、产品迭代周期缩短50%。移动复合机器人(负载能力 100kg)集成RFID芯片(识别距离 $\leq 1\text{m}$)与视觉识别系统(分辨率200万像素)在广东汽车零部件基地实现7天快速产线重构产能提升100%。

3.3 人机协同：智能交互与自主决策

人机协同技术通过AR/VR与自主决策系统重构生产流程。鞍钢集团轧钢产线部署的AR远程运维

系统（视场角 $\geq 80^\circ$ ）工程师佩戴智能眼镜通过5G网络实时获取高炉红外热成像数据结合数字孪生体进行故障预诊断（准确率 $\geq 92\%$ ）使非计划停机时间缩短40%。沙钢集团引入的深度确定性策略梯度（DDPG）强化学习算法基于20万个历史燃烧数据点（状态空间维度 ≥ 50 ）动态优化空燃比与温度梯度在1580℃高温工况下实现燃烧效率98.2%、吨钢能耗降至420kgce。系统集成多物理场耦合仿真模块（网格自适应划分）通过自适应PID调节将炉温波动控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内配合视觉识别技术实现钢坯表面缺陷自动分拣使产品合格率提升至99.7%、年减少人工质检成本1800万元。

3.4 未来生态：工业元宇宙与全球协同

加热炉制造正迈向工业元宇宙新阶段模块化设备作为“原子单元”通过数字线程实现全要素互联。全球供应链重构推动模块化制造生态升级。跨国企业通过云端协同平台如达索3DEXPERIENCE共享模块库（模块SKU超10万）与产能资源池（覆盖30国）实现跨区域动态协作。例如浦项制铁依托模块化加热炉技术将全球工厂的能源利用率提升20%（单位产品能耗 $\leq 45\text{GJ/t}$ ）碳排放减少18%标志着行业进入高效低碳的全球协同新时代。浦项制铁模块化加热炉项目通过数字孪生体实现全球工厂能源动态调配其韩国光阳基地与印度尼西亚喀拉喀托基地的热能利用率差值从15%收敛至3%。基于区块链的智能合约自动执行模块交易成本较传统跨国采购降低40%、交付周期从12周压缩至4周形成“设计即生产、生产即服务”的新业态。

4 挑战与对策：迈向深度融合的实践路径

4.1 技术融合瓶颈与数据互通突破

多源异构数据融合面临协议不兼容如Modbus-TCP与OPC UA协议转换延迟 $\geq 50\text{ms}$ 、接口标准缺失等核心挑战。宝钢集团系统集成时需对接20余种设备接口如西门子S7、施耐德Modicon数据清洗与格式转换耗时占比达40%且耐高温光纤传感器工作温度 $\geq 1000^\circ\text{C}$ 单价超过传统仪表的5倍（达¥5000/支）显著增加制造成本。对策包括开发通用数据接口协议如基于JSON-LD的元数据描述框架与边缘计算网关算力 $\geq 20\text{TOPS}$ 推动国产化传感器研发如武汉理工大学的ZnO基高温传感器打破国际垄断。

4.2 组织协同障碍与敏捷转型路径

传统企业组织架构难以适应智能制造的敏捷开发需求。项目因部门协同滞后（跨部门会议频次 ≤ 1 次/月）导致工期延误3个月暴露出跨部门数据共享机制缺失、决策链条冗长等弊端。破局需重构组织模

式建立以项目为核心的扁平化团队通过数字化工具如Teamcenter实现设计、制造、运维全流程透明化管理数据实时共享延迟 ≤ 1 秒。同时引入“热能工程师+数据科学家”联合培养机制。培养周期 ≥ 2 年提升团队技术融合创新能力。

4.3 标准体系滞后与生态共建策略

现行标准体系对模块化智能设备的认证、安全等要求尚未完善制约技术规模化应用。例如加热炉模块的接口协议如IEC 61850-7-420兼容性、数据安全规范如GDPR合规性存在区域差异导致跨品牌设备互操作性不足。对策包括加快制定《智能加热炉模块化技术规》参考ISO 19650建筑信息模型标准，设立示范项目给予税收优惠如对通过智能认证的企业减免10%增值税。未来需构建开放协同的产业生态通过云端共享模块库、产能资源池推动全球供应链形成动态协作网络。2025年《中国制造2025》重点领域技术路线图明确要求到2026年需建立覆盖加热炉模块化设计、智能制造、安全评估的全生命周期标准体系。工信部已启动首批5个国家级智能加热炉示范基地建设对通过《智能制造能力成熟度模型》GB/T 39116-2020四级认证的企业给予设备投资额15%的专项补贴。

5 总结

加热炉制造的技术革新以模块化与智能化为核心，通过标准化接口、数据驱动优化及全球供应链协同，实现效率、质量与成本的全面提升。然而，技术融合中的数据互通瓶颈、组织协同障碍及标准体系滞后仍需突破。未来，工业元宇宙与全球资源动态调配将推动加热炉制造向更高效、低碳、智能的生态化方向发展，为工业制造范式转型提供关键支撑。

参考文献：

- [1] 黄菊. 智能制造：引领未来工业的发展方向[J]. 东方电气评论, 2025, 39(2): 54-62.
- [2] 邵南银. 智能燃烧系统在蓄热式加热炉上的应用[J]. 新型工业化, 2021, 11(12): 151-154.
- [3] 信春华, 吴娅楠, 王丽璇. 智能制造知识图谱应用的综述研究[J]. 中国工程机械学报, 2025, 23(2): 194-198.
- [4] 佚名. 《国家智能制造标准体系建设指南(2024版)》发布[J]. 信息技术与标准化, 2025(5): 5-5.
- [5] 李永生, 李义, 熊涛. 基于智能制造的轧钢加热炉远程集控实践[J]. 今日制造与升级, 2025(1): 106-108.

作者简介：

连卫平(1972-), 男, 汉族, 新疆精河人, 硕士, 高级经济师, 研究方向: 大型加热炉模块化制造技术研究、传统制造企业国际化路径创新。