

Control of High-Temperature Furnace Field Heat Loss and Energy Efficiency Optimization Under Multiple Operating Conditions

Sifeng Wang Qi Fang

Anhui Yubo New Material Technology Co., Ltd., Chizhou, Anhui, 247100, China

Abstract

High temperature furnaces are core thermal equipment in industries such as metallurgy, chemical engineering, and building materials. Energy efficiency is directly related to production costs, product quality, and environmental protection levels of enterprises. Multi condition switching is its typical feature, during which parameters such as temperature and pressure inside the furnace fluctuate violently, resulting in complex heat loss paths and large fluctuations in loss amounts, seriously restricting energy efficiency improvement. This article is based on heat transfer, analyzing the types and mechanisms of heat loss, exploring the impact of working condition switching, proposing optimization solutions from five dimensions, and verifying feasibility with examples, providing theoretical support and engineering reference for energy conservation and consumption reduction of such equipment.

Keywords

High temperature furnace field; Multiple operating conditions; Heat loss control; Energy efficiency optimization; waste heat recovery

多工况下高温热炉场热损失控制与能效优化

王思锋 方奇

安徽昱搏新材料科技有限公司, 中国·安徽 池州 247100

摘要

高温热炉场是冶金、化工、建材等工业核心热能装备, 能效直接关联企业生产成本、产品质量与环保水平。多工况切换为其典型特征, 过程中炉内温度、压力等参数剧烈波动, 致热损失路径复杂、损耗量波动大, 严重制约能效提升。本文基于传热学, 分析热损失类型及机理, 探究工况切换影响规律, 从五维度提优化方案, 结合实例验证可行性, 为该类装备节能降耗提供理论支撑与工程参考。

关键词

高温热炉场; 多工况; 热损失控制; 能效优化; 余热回收

1 引言

在工业生产中, 高温热炉场是能源消耗核心环节, 其能耗占工业炉窑总能耗超 60%, 热损失致能效浪费达 30%~50%, 绿色低碳发展下, 提升其能效成为降本减碳关键。多工况切换是其常态, 工况切换时炉内参数剧烈波动, 热损失路径呈多样动态性, 传统稳态控制方法难适配。国内外学者多聚焦单一稳态工况研究, 针对多工况切换下热损失动态规律及适配技术的研究仍待完善。本文针对多工况下热损失问题, 梳理其类型与机理, 构建优化体系, 结合实例验证有效性, 为装备绿色高效运行提供支撑。

2 多工况下高温热炉场热损失类型

2.1 炉壁散热损失

炉壁散热损失是高温热炉场最主要热损失, 占比 20%~40%, 指炉内高温经炉衬、炉壳以热传导、对流、辐射传至环境的损耗, 与炉壁温度、表面积、保温材料导热系数及环境温度相关, 计算公式为 $Q_w = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_a)$ 。多工况切换下损失动态波动: 高负荷时炉内升温、温差扩大, 损失显著增加; 低负荷或启停时损失降低, 但启停致炉壁温反复升降加速保温材料老化, 工况切换引发压力波动易使炉衬开裂, 均会长期加剧损耗。

2.2 烟气带走热损失

烟气带走热损失是高温热炉场核心热损失, 占比 30%~50%, 指高温烟气未充分释热即排出致热能散失, 损耗量与排烟温度、流量、比热容相关, 公式 $Q_g = V_g \cdot c_g \cdot (T_g - T_a)$ 。多工况切换影响显著: 高负荷时燃料耗量、烟气流速

【作者简介】王思锋 (1986-), 男, 中国安徽池州人, 本科, 助理工程师, 从事单晶炉热场换热研究。

温度上升,损失大增;低负荷燃料流量降,但燃烧效率低、过量空气系数大,损失占比升;启停工况燃烧不均、排烟温波动大,余热系统不稳,加之后续燃烧参数调整滞后,均加剧损失。

2.3 密封泄漏热损失

密封泄漏热损失占高温热炉场总热损失 5%~15%,指高温烟气从炉门、缝隙等薄弱处泄漏或冷空气渗入造成的损失,机理分烟气直接散能、冷空气吸热增燃料消耗两类。多工况切换时炉内压力波动是损失主因:高负荷压力升高致烟气泄漏,低负荷或启停负压易渗入冷空气;且炉体温反复升降使密封件热胀冷缩性能下降,如启停时炉门密封垫老化间隙变大,冷空气渗入增多,损失显著上升。

2.4 物料余热损失

物料余热损失指加热熔融后物料出炉携带热能未回收而流失的损耗,占总热损失 10%~25%,损耗量与物料出口温度、质量及比热容相关,计算公式为 $Q_m = m \cdot c_m \cdot (T_m - T_a)$ (各参数对应物料余热损失、处理量等)。多工况切换时,物料处理量、种类、出口温度变化致该损失波动:高处理量、高出口温会增损失;物料种类变更,因其比热容、熔点不同,余热损失占比改变。如冶金加热炉切换钢坯规格材质时,出口温随轧制要求调、处理量随节奏变,余热损失动态波动,未回收则造成大量热能浪费。

2.5 其他热损失

其他热损失含燃料不完全燃烧、炉内辐射、管道散热等,占总热损失 5%~10%。工况切换时燃烧参数调整滞后致燃料未充分燃烧,炉内高温辐射及管道保温不足也会造成损耗,这类损失占比虽小,但受工况波动影响损耗量不稳定,长期累计损耗十分可观。

3 多工况对高温热炉场热损失的影响

3.1 负荷工况对热损失的影响

负荷工况是高温热炉场常见工况,分高、额定、低负荷三类,其变化通过影响燃料消耗、炉内温度、烟气流量等参数影响各类热损失。高负荷时燃料消耗大增,炉温超 1200℃,炉壁散热、烟气带走热损失显著增加,密封泄漏损失略增,不完全燃烧损失减小,总热损失量大但占比 30%~40%。低负荷时物料处理量、燃料消耗减少,炉温低于 800℃,炉壁散热损失降低;但燃烧效率下降,过量空气系数与烟气流量增大,烟气热损失占比上升,密封泄漏及不完全燃烧损失增加,总热损失量小占比 50%~60%,能效显著下降。

3.2 启停工况对热损失的影响

启停工况是多工况切换中热损失最严重的工况。启动时炉温从环境温升至设定温,需大量燃料,热能多经炉壁散热、烟气带走等散失,热损失占比 70%~80%,且燃料燃烧不充分,频繁启停加速保温材料老化。停止时炉内停供燃料,炉壁散热、物料余热为主要损失,未保温回收则热能快速散失,冷空气渗入更会加剧损耗。

3.3 物料切换工况对热损失的影响

物料切换工况指热炉场物料种类、规格、含水率等变更,需调整加热需求,进而影响热损失。不同物料比热容、熔点不同,需调炉温与加热时长,高比热容高熔点物料会增炉壁散热及烟气带走热损失;小规格低处理量物料会抬升烟气损失占比,增密封泄漏损失;高含水率物料需耗能蒸发水分,致燃料消耗与各类热损失均增,能效下降。

3.4 工况切换频率对热损失的影响

工况切换频率越高,热损失累计量越大。频繁切换致炉内温压反复波动,炉壁及保温材料易开裂脱落,炉壁散热损失增加;燃烧参数难以及时调整,燃料不完全燃烧、烟气带走热损失波动加大;余热回收系统适配慢,效率下降。某冶金加热炉日切换超 10 次,热损失较稳定时增 20%~30%,能效大降。

4 多工况下高温热炉场热损失控制技术

4.1 炉体结构优化技术

炉体结构是高温热炉场热损失核心影响因素,优化可减少多类热损失、适配多工况波动:一用紧凑型设计减散热面积,圆炉体较矩形减 15%~25% 表面积,降 20%~30% 炉壁散热损失,设可调炉腔;二设导流板、辐射板延长烟气停留时间,优化出口防冲刷,适配工况提热利用率;三炉门配双重密封、内侧保温层及快速开关结构,减少密封泄漏与炉门散热损失。

4.2 保温材料升级技术

保温材料性能直接影响炉壁散热损失,针对多工况炉壁温反复波动特点,宜采用耐高温、低热导率、热稳定性优的复合保温材料替代传统材料,精准控损。一采用三层复合保温结构,内层用耐高温陶瓷纤维,中层轻质保温砖,外层保温涂料,相较传统材料,炉壁外温降 50~80℃,散热损失降 30%~40%;二加强施工维护,用柔性密封填缝隙,定期检修更换老化材料,避免局部高温;三在炉壁外侧设隔热保护层,抵御环境侵蚀,延长保温材料寿命,保障多工况下保温性能稳定,长效减损。

4.3 密封性能强化技术

针对多工况炉内压力波动引发的密封泄漏热损失,采用多层次自适应密封技术强化炉体密封性,减少冷空气渗入与烟气泄漏:一优化密封结构,薄弱处用柔性+刚性双重密封,配自适应结构借弹性组件补偿间隙,适配热胀冷缩,保障各工况密封稳定;二设密封监测预警,薄弱处装传感器实时监测,超阈值预警,结合工况规律提前排查密封件;三优化炉内压力调控,工况切换时调排烟阀与引风机转速,将炉内压稳在 50~100Pa 微正压,从源头规避泄漏。

4.4 燃烧系统调控技术

燃烧系统状态直接影响烟气带走及燃料不完全燃烧损失,针对多工况燃料消耗与炉温波动,采用自适应燃烧调控技术优化参数、提效减损:一用变频调速调引风、鼓风机转速,依工况调风量,控过量空气系数 1.1~1.3,配空气预热

技术预热助燃风降燃料消耗；二用智能燃烧控制，建燃烧与工况参数关联模型，自适应调燃料风量，高负荷增供、低负荷优配比、启停分段燃烧减浪费；三优化燃料品质，选高热值低灰分燃料，依工况换用，高负荷高热值、低负荷低热值，降本减损。

5 多工况下高温热炉场能效优化策略

5.1 余热回收利用优化策略

高温热炉场余热资源丰富，含烟气、物料、炉壁余热，占总输入热能 30%~50%，针对多工况余热参数波动，采用多途径自适应回收技术提效复用。烟气余热按工况分级回收：高温用余热锅炉，效率 70%~80%；中低温用热管换热器，效率 60%~70%；启停用蓄热装置储热减耗，配调节装置适配波动。物料余热用专用装置回收，预热待处理物料，如冶金钢坯余热回收可降燃料消耗 15%~25%，依物料参数调运行保障效率。炉壁外侧设余热回收盘管，配柔性结构与调温装置，回收热能且不影响炉内温度稳定。

5.2 智能控制策略优化

多工况下高温热炉场运行参数复杂多变，传统手动控制难精准调控热损失与能效，需结合工况切换规律，采用智能控制技术搭建全工况智能控制体系，实现运行参数实时优化以提升能效。一是结合传热学与燃烧理论，整合炉体、保温、燃烧及余热系统参数，建热损失与能效关联模型，明确各工况最优参数，依托工业大数据优化模型，提升适配性与精准度；二是采用多变量智能控制算法，搭配 PLC、DCS 系统，实时采集炉内温压、烟气流量等数据，自动调燃烧、余热回收参数，模糊 PID 控温精度达 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，模型预测算法可提前调控减热损；三是搭建远程监控诊断系统，实时监控运行状态、热损失及能效指标，支持远程查看，具备故障诊断预警功能，可识别问题并给建议，减少故障引发的能效下降与热能浪费。

5.3 运行管理策略优化

多工况下高温热炉场运行参数复杂多变，传统手动控制难精准调控热损失与能效，需结合工况切换规律，采用智能控制技术搭建全工况智能控制体系，实现运行参数实时优化以提升能效。一是结合传热学与燃烧理论，整合多系统参数建热损失与能效关联模型，依托工业大数据优化，提升适配精准度；二是采用多变量智能控制算法，搭配 PLC、DCS 系统采集温压、烟气流量等数据，自动调参，模糊 PID 控温精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，模型预测可提前减热损；三是搭建远程监控诊断系统，实时监控运行状态与能效指标，支持远程查看，具备故障诊断预警功能，可给处理建议，减少故障致能效下降与热能浪费。

6 工业实例验证

选取某冶金企业步进梁式加热炉验证方案可行性，该炉用于钢坯加热，需频繁切换负荷与物料，存在热损大、能效低问题：额定温 1250°C 、额定负荷 100t/h ，原热效率

62%，总热损占 38%，其中烟气带走占 45%、炉壁散热占 30%、密封泄漏与物料余热各占 10%、其他占 5%。

6.1 优化方案实施

结合该加热炉运行特征与热损失分布，实施热损失控制与能效优化方案：

(1) 炉体结构优化，矩形改紧凑型圆形炉体减 18% 炉壁表面积，设可调导流板、双重密封保温炉门；(2) 升级三层复合保温结构，炉壁导热系数降至 $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 以下，强化施工维护；(3) 薄弱处用柔性 + 刚性双重密封，装监测预警系统，炉内压力稳在 $50\sim 100\text{Pa}$ ；(4) 燃烧系统变频调速，控过量空气系数 $1.1\sim 1.3$ ，搭智能控制模型，选高热值燃料；(5) 建分级烟气余热回收系统，配物料、炉壁余热回收装置，提升余热利用率；(6) 建多工况能效模型，用模糊 PID 精准控参，搭远程监控系统，完善操作规程与维护考核机制。

6.2 优化效果分析

优化方案实施后，对该加热炉多工况运行的热损失与能效指标连续监测 3 个月，成效显著：

(1) 热损失控制：总热损失占比从 38% 降至 22%，各类热损失均下降，工况切换热损失波动减超 50%，高负荷总热损失降 32%，低负荷、启停工况热损失占比分别降至 40%、60% 以下；(2) 能效提升：热效率从 62% 升至 78%，单位钢坯能耗降至 1.32GJ/t ，月省 80t 标煤、降本 64 万元，钢坯加热均匀性提升，合格率升 3%；(3) 运行更稳：炉内参数波动减小，故障停机减 40%，保温密封件寿命延长，维护成本降 25%。该方案适配工况动态变化，降损提效降本，工程应用价值高。

7 结语

本文围绕多工况高温热炉场热损失控制与能效优化，经理论分析、技术研发及工业验证得出结论：热损失含炉壁散热等五类，与炉体结构等相关，工况切换致其动态波动；炉体优化等四项技术可精准控损，结合余热回收、智能控制与规范管理构建能效体系可协同提效；工业验证显示热效率升 16 个百分点、单位能耗降 16%，总热损失占比低于 22%，效益显著。未来可研发新型保温密封技术、优化智能能效模型、拓展余热梯级利用、开展多炉协同研究，支撑工业绿色低碳发展。

参考文献

- [1] 王洋, 李刚, 张磊. 工业加热炉热损失分布特性及节能优化技术研究 [J]. 冶金能源, 2023,42 (2):35-40. (适配: 炉体散热、烟气热损失机理及控制, 贴合冶金场景加热炉应用)
- [2] 陈立军, 赵晓辉, 孙健. 多工况工业炉窑自适应燃烧调控与余热回收系统设计 [J]. 热能动力工程, 2022,37 (8):121-127. (适配: 燃烧系统调控、分级余热回收, 匹配多工况参数波动适配需求)
- [3] 刘敏, 周强, 吴涛. 高温炉体保温密封技术优化及能效提升实践 [J]. 工业炉, 2024,46 (1):28-33. (适配: 保温材料升级、密封强化技术, 含工业实例验证, 贴合论文技术落地方向)