

炼钢工序除尘技术研究

曾力¹ 陈鹏²

1 湖南华菱湘潭钢铁有限公司

2 湘潭科技职业学院(湘潭技师学院)

DOI:10.32629/eep.v9i7.3281

[摘要] 炼钢工序产生的高温、高浓度烟尘是钢铁行业环保治理的核心难题,也是制约钢铁企业超低排放达标、绿色低碳转型的关键因素。旋风除尘器作为干法除尘体系中的核心预处理设备,凭借结构简单、无运动部件、耐高温、运行成本低、大风量适配性强等突出优势,广泛应用于炼钢烟气预处理环节,是多级除尘系统中不可或缺的前置核心装置。本文系统开展炼钢工序旋风除尘技术专项研究,详细阐述旋风除尘器的工作原理、核心结构特性与设备分类体系,深度剖析炼钢烟尘的理化特性、生成机制与旋风除尘技术的工况适配性,重点探究除尘器结构参数、运行参数、烟尘特性三大核心因素对除尘性能的影响规律,结合国内钢厂典型工业应用案例验证参数优化、结构改造、工艺适配的实际应用效果,全面梳理当前炼钢旋风除尘技术存在的核心短板,并结合行业环保政策与技术发展趋势预判未来迭代方向。研究表明,通过优化设备结构尺寸与现场运行工况、迭代应用耐磨耐高温新型复合材料、搭建多级复合除尘一体化系统,可大幅提升旋风除尘器粗颗粒捕集效率、降低设备损耗与系统能耗,有效解决炼钢高温高浓度烟尘预处理难题,为钢铁行业超低排放改造、烟气治理提质增效提供坚实的技术支撑。

[关键词] 炼钢; 旋风除尘; 烟气治理; 参数优化; 数值模拟

中图分类号: X701 **文献标识码:** A

Research on Dust Removal Technology in the Steelmaking Process

Li Zeng¹ Peng Chen²

1 Hunan Huali Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd.

2 Xiangtan Science and Technology College (Xiangtan Technical College)

[Abstract] The high-temperature and high-concentration dust generated during the steelmaking process is a core challenge in environmental protection of the steel industry, and it is also a key factor restricting the achievement of ultra-low emissions and the green and low-carbon transformation of steel enterprises. The cyclone dust removal, as the core pre-treatment equipment in the dry dust removal system, with its advantages such as simple structure, no moving parts, high-temperature resistance, low operating cost, strong adaptability to large air volume, and wide application range, is widely used in the pre-treatment of steelmaking flue gas and is an indispensable core device in the multi-stage dust removal system. This paper systematically conducts a special research on the cyclone dust removal technology in the steelmaking process, elaborating on the working principle, core structural characteristics and equipment classification system of the cyclone dust remover, deeply analyzing the physical and chemical properties of steelmaking dust, the generation mechanism and the adaptability of cyclone dust removal technology to the working conditions, and focusing on exploring the influence laws of three core factors, namely the structure parameters, operating parameters and dust characteristics, on the dust removal performance. Combined with typical industrial application cases of domestic steel mills, the actual application effects of parameter optimization, structure modification and process adaptation are analyzed. The current core shortcomings of the steelmaking cyclone dust removal technology are comprehensively summarized, and the future iteration direction is predicted based on industry environmental protection policies and technical development trends. The research shows that by optimizing the equipment structure size and on-site operating conditions, iterative application of wear-resistant and high-temperature-resistant new composite

materials, and establishing a multi-stage composite dust removal integrated system, the efficiency of coarse particle capture of the cyclone dust remover can be significantly improved, equipment loss and system energy consumption can be reduced, and the problem of pre-treatment of high-temperature and high-concentration dust from steelmaking can be effectively solved, providing solid technical support for the ultra-low emission transformation of the steel industry and the improvement and efficiency enhancement of flue gas treatment.

[Key words] Steelmaking; Cyclone Dust Removal; Flue Gas Treatment; Parameter Optimization; Numerical Simulation

1 引言

1.1 研究背景。我国钢铁年产量占全球总产量50%以上,炼钢行业年耗煤约6亿吨,二氧化碳年排放18亿吨,占全国碳排放总量15%。在“双碳”战略与超低排放政策约束下,除尘设备升级改造成为行业刚需。转炉、电炉、精炼炉冶炼时产生大量300–500℃高温、数十至百g/m³高浓度烟尘,粉尘主要为FeO、Fe₂O₃、SiO₂等金属氧化物,粒径跨度0.1–100μm。未经处理的烟尘直排会造成大气污染、损害人体健康;同时粉尘磨损、堵塞后续精除尘设备,增加运维成本。旋风除尘作为成熟干法工艺,依靠离心力完成气固分离,无运动构件,耐受最高450℃高温、处理风量规模大、运维成本低廉,可高效捕集5 μm以上粗粉尘,是炼钢多级除尘系统不可或缺的前置设备。

1.2 国内外研究现状。国外旋风除尘工业化应用始于20世纪初,当前研究重心集中在CFD流场模拟、耐磨耐高温材料、多级复合除尘系统集成。意大利达涅利研发的高炉煤气旋风除尘器压力损失仅20–40mbar,粗粉尘分离效率超85%。

国内相关研究起步于20世纪50年代,现已形成标准型、多管型、旁路型、扩散型完整产品系列,大量应用于炼钢、烧结、高炉工段。国内学者结合CFD数值模拟与工业试验,优化筒体直径、锥体高度、入口尺寸等结构参数;陶瓷、碳化硅耐磨内衬的普及有效延长设备服役周期。

现有技术仍存在明显短板:对5 μm以下细粉尘除尘效率不足60%;高温环境下分离性能衰减;高浓度粉尘易堵塞排灰口;系统匹配度差,难以满足现行超低排放硬性指标。

1.3 研究内容与技术路线。本文立足炼钢工序实际冶炼工况与烟气治理痛点,结合理论分析、数值模拟与工业验证,开展系统性旋风除尘技术研究,核心研究内容分为五个模块:第一,全面解析炼钢烟尘的生成渠道、理化特性、粒径分布与污染特征,明确烟尘治理核心难点;第二,深度剖析旋风除尘器的气固分离机理、核心结构组成与不同设备类型的工况适配特性;第三,系统探究设备结构参数、现场运行参数、烟尘理化参数三大维度对炼钢工况除尘性能的影响规律,明确最优参数匹配区间;第四,梳理旋风除尘在转炉、电炉、精炼炉等炼钢核心工序的应用场景与成套工艺配置,结合典型工业案例验证技术优化效果;第五,全面梳理当前旋风除尘技术的现存缺陷与应用短板,结合行业政策与技术迭代方向预判未来发展趋势。

技术路线:本文采用“理论分析+CFD数值模拟+工业案例验证”综合研究方法,通过文献调研明确烟尘性质与分离机理,借

助数值模拟完成参数优化,依托国内钢厂实际项目验证优化效果。

2 炼钢烟尘理化特性与除尘技术适配性

2.1 烟尘来源与理化特征。炼钢粉尘四大产生渠道:转炉吹炼(占总烟尘70%以上,铁水剧烈氧化生成高温金属氧化物烟气);电炉冶炼(废钢熔化、合金化产生电弧细粉尘);精炼炉脱硫、脱气生成少量微细颗粒;物料转运产生无组织扬尘。

炼钢烟尘核心特征为高温、高浓度、强磨蚀、粒径分布宽、碱性强,关键参数见表1。

表1 炼钢烟尘理化特性参数

参数	数值范围	备注
烟气温度	300–500℃	转炉吹炼峰值温度可达 800℃
烟尘浓度	20–150g/m ³	转炉一次烟气浓度最高
颗粒粒径	0.1–100 μm	5 μm 以下细颗粒占比 30%–50%
主要成分	FeO (40%–60%)、Fe ₂ O ₃ (20%–30%)、SiO ₂ (5%–10%)、CaO (3%–8%)	金属氧化物占比超 90%
真密度	4.5–5.2g/cm ³	磨蚀性强,易磨损设备
安息角	35°–45°	流动性差,易堵塞排灰口

2.2 除尘技术适配性分析。目前炼钢烟气主流除尘技术包括旋风除尘、布袋除尘、静电除尘、湿法除尘,各技术优缺点及适配性对比如表2所示。

表2 炼钢烟气主流除尘技术对比

技术	优点	缺点	适配性
旋风除尘	结构简单、耐高温、运行成本低、处理风量大、无二次污染	细颗粒(<5 μm)效率低、压力损失较大	粗除尘、预除尘,适配高温高浓度粗颗粒烟尘
布袋除尘	除尘效率高(>99.9%)、可捕集细颗粒	不耐高温(<200℃)、滤袋易磨损堵塞、运行成本高	精除尘,需配套降温预处理设备
静电除尘	除尘效率高、压力损失小、耐高温(<400℃)	设备投资大、结构复杂、维护难度高、细颗粒效率衰减	精除尘,适配稳定工况烟气
湿法除尘	除尘效率高、降温效果好、设备投资低	产生废水污泥、二次污染、能耗高、腐蚀设备	早期应用,逐步被干法除尘替代

旋风除尘完美匹配炼钢高温、高浓度、粗颗粒占比高的烟气工况,前置分离粗粉尘可大幅减轻后续设备负荷。

3 旋风除尘器工作原理与结构特性

3.1 工作原理。旋风除尘器依靠离心沉降实现气固分离,全过程分为四阶段:(1)切向进气加速:含尘烟气以15–25m/s切向进入筒体,形成向下螺旋运动的外旋流;(2)离心分离:粉尘承受300–800倍重力加速度的离心力,被甩向筒壁;(3)重力沉降:粉尘沿锥体滑落至灰斗排出;(4)净化排气:气流在锥体底部反向上形成内旋流,洁净气体由顶部排气管排出。

3.2 设备结构组成。标准旋风除尘器由进气管、排气管、圆筒体、圆锥体、灰斗、卸灰阀六部分构成,各部件设计要点:(1)进气管:矩形切向结构,入口风速控制18–23m/s;(2)排气管:管径取筒体直径0.4–0.6倍,插入深度为筒体高度0.8–1.0倍;(3)圆筒体:直径1.0–2.5m;(4)圆锥体:锥体高度取筒径2–3倍;(5)

灰斗: 双层保温防结露; (6) 卸灰阀: 星型卸料器隔绝空气。

3.3 设备分类及适用工况。按结构分为四类: (1) 标准型: 适配中小风量常规高温粗粉尘预处理; (2) 多管型: 多组小直径旋风单元并联, 适配大风量烟气; (3) 旁路型: 增设旁路分离室, 细颗粒效率提升10%-15%; (4) 扩散型: 倒锥结构抑制二次扬尘, 适配超高浓度易堵灰工况。炼钢现场以标准型、多管型应用最广泛。

4 炼钢工况下旋风除尘性能影响因素

4.1 结构参数影响。筒体直径 D 越小离心力越强、效率越高, 但处理风量下降, 炼钢常用直径1.0-2.5m; 入口尺寸扩大可提升风量但离心力减弱, 入口风速需维持18-23m/s; 锥体高度越高分离越充分, 取筒径2-3倍; 排气管管径缩小提升效率但阻力上升, 取筒径0.4-0.6倍; 排气管最优插入深度为筒体高度0.8-1.0倍。

4.2 运行参数影响。烟气温度升高气体粘度上升、密度下降, 300℃以上效率相比常温下降5%-10%, 需配套耐高温材料; 烟尘浓度20-100g/m³区间内浓度越高颗粒碰撞凝聚越多、效率提高, 超过150g/m³易堵塞排灰口; 处理风量稳定运行区间为设计值80%-110%。

4.3 烟尘特性影响。 $>10\mu\text{m}$ 粉尘分离效率90%-95%, $5-10\mu\text{m}$ 颗粒70%-90%, $<5\mu\text{m}$ 微细粉尘效率不足60%, 必须配套精除尘设备。炼钢烟尘4.5-5.2g/cm³的高密度特性利于分离, 烟气含水率极低, 基本无粘壁问题。

5 旋风除尘在炼钢工序的实际应用

5.1 核心应用场景。(1) 转炉一次烟气预处理: 去除80%以上粗颗粒, 保护后端静电除尘设备; (2) 电炉、精炼炉烟气粗除尘: 降低布袋除尘器滤袋损耗; (3) 二次烟气与无组织粉尘治理: 采用“旋风+布袋”组合工艺; (4) 转炉煤气回收预处理: 避免管道与回收设备堵塞。

5.2 主流成套工艺配置。转炉一次烟气干法除尘流程: 800℃转炉烟气→汽化冷却烟道降温至350-400℃→旋风除尘器粗除尘($>10\mu\text{m}$ 效率85%-90%)→静电除尘器精除尘(总效率 $>99\%$)→煤气柜回收或排放。

电炉、精炼炉烟气除尘流程: 300-400℃烟气→冷却器降温至200℃以内→多管旋风粗除尘(效率80%-85%)→布袋除尘器精除尘(总效率 $>99.9\%$)→引风机→烟囱排放。

5.3 工业应用案例。

案例1: 210t转炉干法除尘系统。

湖南某钢厂4座210t转炉采用“蒸发冷却+旋风除尘+静电除尘”干法工艺, 原存在吹炼泄爆频发、除尘效果差问题。优化方案: 筒体直径2.2m, 锥体高度5.5m, 入口风速20m/s, 主体采用Q235R耐热钢, 内壁衬陶瓷耐磨层。改造效果: 转炉泄爆率由7.60%降至0.08%, 旋风粗颗粒分离效率稳定88%-92%, 静电除尘器入口粉尘浓度降至10-15g/m³, 煤气回收量由54.6m³/t提升至123.6m³/t, 最终排放浓度低于10mg/m³。

案例2: 100t电炉烟气除尘系统

湖南某钢厂100t电炉配套多管旋风+布袋组合除尘, 单台多

管旋风含12组0.8m直径旋风单元, 总处理风量180000m³/h, 入口350℃、粉尘浓度35g/m³。运行效果: 多管旋风对 $>10\mu\text{m}$ 粉尘分离效率93%, 布袋入口粉尘浓度降至5-8g/m³, 系统总效率 $>99.8\%$, 设备稳定运行周期延长至12个月, 年运维成本降低20%。

6 现存技术与未来发展趋势

6.1 当前技术短板。(1) 微细粉尘处理能力不足: $<5\mu\text{m}$ 颗粒分离效率不足60%, 须搭配精除尘设备; (2) 高温性能衰减: 300℃以上效率下降5%-10%; (3) 设备磨损严重: 金属氧化物粉尘磨蚀性强, 筒壁磨损导致效率下降; (4) 堵灰风险突出: 高浓度工况易堵塞排灰机构造成停机; (5) 系统匹配性差: 与后端设备风量、阻力参数不匹配, 整体能耗偏高。

6.2 技术发展趋势。(1) CFD流场仿真优化: 依托数值模拟优化结构尺寸, 提升细颗粒捕集能力、降低阻力; (2) 新型耐磨耐高温材料普及: 碳化硅陶瓷、高耐磨合金将耐受温度提升至550℃以上; (3) 多级复合除尘一体化集成: 开发“旋风+静电+布袋”成套系统, 出口粉尘 $<5\text{mg}/\text{m}^3$; (4) 智能在线调控系统: 融合物联网与AI算法自动调节运行参数, 综合能耗降低15%-20%; (5) 小型模块化标准化设备: 适配不同产能产线, 缩短工期、降低投资。

7 结论

(1) 炼钢烟气具备高温、高浓度、强磨蚀、粒径跨度大特征, 旋风除尘耐高温、低运行成本、大风量的特性高度适配炼钢粗除尘需求, 是多级干法除尘系统核心前置设备。(2) 旋风除尘器依靠离心沉降完成气固分离, 除尘效率与压力损失由结构、运行、粉尘理化特性共同制约, 参数优化可平衡净化效果与系统能耗。(3) 工业实践表明, 经优化后的旋风除尘器粗颗粒分离效率可达85%-95%, 有效保护后端除尘装置, 降低系统运维成本与能耗。(4) 现有技术存在细颗粒效率低、高温性能衰减、磨损堵灰等短板。未来通过流场仿真优化、新型材料应用、多级复合除尘集成、智能控制等技术迭代, 将突破现有性能瓶颈, 旋风除尘将在钢铁绿色低碳转型中持续发挥不可替代的核心作用。

【参考文献】

- [1] 王小明, 李建辉, 张建军. 炼钢转炉干法除尘技术应用与优化[J]. 钢铁, 2022, 57(8): 112-118.
- [2] 陈均. 干法除尘工艺在200t半钢炼钢转炉上的应用[J]. 钢铁研究, 2015, 43(5): 59-63.
- [3] 刘军, 赵刚, 王丽. 高温工况下旋风分离器性能数值模拟研究[J]. 环境工程, 2023, 41(3): 89-94.
- [4] 黄磊. 转炉吹炼过程炉口异常冒火原因及对策[J]. 金属世界, 2023(12): 45-48.
- [5] 张磊, 陈明, 刘辉. 多管旋风除尘器在电炉烟气除尘中的应用[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(2): 78-81.

作者简介:

曾力(1976—), 男, 汉族, 湖南省益阳市人, 本科, 工程师, 从事环境保护方面的研究。