

转炉冶炼过程中高温熔融金属喷溅防控技术分析

龚建明¹ 袁意²

1. 云南佑鑫注册安全工程师事务所有限公司 云南 昆明 650000

2. 中皓安环科技有限公司云南分公司 云南 昆明 650000

【摘要】 转炉冶炼作为钢铁生产核心环节，高温熔融金属喷溅是制约生产安全与效率的关键隐患，易引发设备损毁、人员伤亡及生产中断等严重后果。随着钢铁工业向高效、安全、绿色方向升级，喷溅防控已成为冶炼工艺优化的核心课题。本文聚焦转炉冶炼全流程，分析喷溅产生的关键诱因，并针对防控技术的优化路径进行探讨，以期为提升转炉冶炼安全稳定性提供技术参考。

【关键词】 转炉冶炼；过程；高温熔融金属喷溅防控技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.03.078

引言

焊接类作业场所、金属冶炼厂、浇铸厂等企业在转炉冶炼过程中存在一定的安全隐患。根据我国历年对安全事故数据的统计分析，其中发生的灼烫事故最多，具体表现为高温金属液体倾翻和坠落、高温金属液体产生的辐射热、熔融金属泄漏与喷溅等对作业人员的人体烧伤等。因此，深入探究转炉冶炼过程中的高温熔融金属喷溅防控技术意义重大。

1 转炉冶炼全流程概述

转炉冶炼全流程贯穿原料精准预处理、高效兑铁加料、动态吹炼反应、优质出钢精炼及环保炉渣处置等关键环节，各环节的工艺匹配度与操作精准度直接决定冶炼效能、钢品质量及生产安全底线。原料环节需严格管控铁水硫磷含量、废钢理化状态及造渣剂活性，杜绝杂质引发反应失衡；吹炼阶段需动态适配供氧强度、枪位调控节奏及造渣体系，抑制高温熔体喷溅与炉渣发泡异常；出钢精炼需优化脱氧合金化时序，减少钢水二次污染；炉渣处理需兼顾固废回收与环保排放要求。全流程需构建智能监测与实时调控体系，融合传感检测技术与工艺优化模型，实现各环节协同联动，从源头规避生产风险，推动转炉冶炼向高效低耗、安全可控方向升级，适配现代钢铁工业高质量发展诉求。

2 高温熔融金属喷溅防控技术分析

转炉冶炼中，高温熔融金属喷溅易引发安全事故，防控需依托针对性技术手段。喷溅根源在于炉内碳氧反应失控，因此技术应用需围绕反应调控、状态监测等关键环节展开，形成多维度防控体系。

一是智能供氧调控技术。采用副枪-氧枪联动系统，副枪实时采集熔池碳含量、温度数据，经PLC控制系统运算后，自动调节氧枪枪位与供氧强度，避免局部供氧过量。

二是高效造渣稳池技术。推行“分段造渣”模式，前期加入低熔点复合熔剂加速化渣，中期补加镁质球调整渣相，控制炉渣碱度在3.0-3.5之间，减少高粘度炉渣包裹气体。配合底吹氩搅拌，可使熔池成分均匀性提升40%。

三是喷溅前兆监测技术。炉口安装红外测温与声波监测装置，当熔池震动频率超15Hz或炉口温度骤升50℃时，系统立即报警。同时配套标准化操作，定期校验氧枪喷头、开展应急演练，降低人为失误风险。

这些技术相互协同，可从源头调控、过程监测到操作保障形成闭环，为转炉生产提供可靠安全支撑。

3 转炉冶炼过程中高温熔融金属喷溅产生的关键诱因

3.1 原料成分与状态失衡

铁水硫、磷含量过高时，吹炼前期易与造渣剂反应生成低熔点黏性渣，温度升高后渣层内气体急剧逸出却受黏渣阻碍，局部高压冲破熔池表面。废钢规格混杂或含水量超标危害更大，大块废钢扰动熔池流场，湿废钢遇高温瞬间汽化，蒸汽快速膨胀引发爆发式喷溅。造渣剂粒度不均导致化渣失衡，“返干”后补加造渣剂易与钢水剧烈反应形成喷溅。

3.2 吹炼工艺参数失准

供氧强度与枪位高度匹配不当直接决定反应剧烈程度，供氧过强且枪位过低时，氧气射流冲击熔池底部，击碎钢水并推动其上涌；枪位骤变会打乱氧化反应节奏，碳氧反应生成的CO气体排放受阻，在上部积聚成高压气团。造渣节奏失控同样危险，前期造渣不足易致后期渣量骤增，过量加萤石等助熔剂使炉渣过度泡沫化，泡沫渣裹挟钢水随CO上浮溢出，引发大规模喷溅。

3.3 设备异常与操作失范

氧枪喷头磨损变形使氧气射流分散，无法形成稳定反应区，导致熔池反应能量不均，局部过度反应引发喷溅。转炉倾动系统故障或角度控制不当，在兑铁、出钢时易晃动熔池，破坏钢渣界面稳定。操作上，人员对熔池温度、渣层厚度判断偏差会造成调控滞后，如未及时察觉渣层过厚仍强化供氧，或喷溅初期未采取降枪减氧措施，都会让轻微喷溅升级为恶性事故。

4 防控技术的优化路径

4.1 强化原料全流程精准管控，筑牢喷溅防控基础防线

原料特性的稳定性直接决定喷溅防控的起点质量，需建立从入厂检测到炉前预处理的全链条管控体系，消除源头风险。铁水入厂后应通过快速检测技术明确硫、磷等有害元素含量，针对超标铁水制定差异化预处理方案，通过脱硫剂配比调整与搅拌参数优化，将有害元素控制在安全阈值内，避免吹炼阶段生成大量黏性渣。废钢管理需推行分类堆放与规格标准化，通过筛分设备剔除大块杂质，同时采用烘干工艺降低含水量，防止高温下蒸汽急剧膨胀引发喷溅。造渣剂则需严格控制粒度分布与活性指标，采用分级破碎与均化处理技术，确保化渣速度与吹炼节奏匹配，减少因化渣不均导致的“返干”与补加造渣剂引发的反应波动。此外，原料入炉前应建立数字化台账，将成分数据实时同步至炉前控制系统，为后续工艺参数调整提供精准依据，从源头提升熔池反应的稳定性。

4.2 开展吹炼工艺动态适配优化，把控喷溅防控核心环节

吹炼阶段作为喷溅高发环节，需以反应规律为核心，构建参数动态调控体系，实现工艺与熔池状态的精准匹配。供氧系统优化应采用变枪位、变供氧强度的分段控制策略，根据碳含量变化曲线调整供氧模式，在吹炼前期采用低枪位小供氧强度，促进造渣剂快速熔化；中期逐步提升枪位与供氧强度，强化碳氧反应效率；后期降低供氧强度并微调枪位，避免反应过

度剧烈。造渣工艺优化需遵循“早化渣、化好渣、不返干”原则，通过在线检测技术实时监测渣层厚度与成分，根据检测结果精准补加造渣剂与助熔剂，控制炉渣碱度在合理范围，减少泡沫渣生成。同时，需建立熔池温度实时监测机制，通过温度反馈数据调整冷却剂加入量，避免因温度过高导致渣层黏度下降引发喷溅。针对吹炼过程中的异常情况，应制定分级响应预案，当检测到熔池压力异常升高时，自动触发降氧、提枪等应急调控措施，快速缓解反应强度，防止轻微异常发展为恶性喷溅。

4.3 实施智能监测与系统协同升级，提升喷溅防控保障能力

依托智能技术构建全方位监测与协同调控体系，是提升喷溅防控精准度与及时性的关键路径。设备层面需对氧枪、转炉倾动系统等关键设备进行智能化改造，在氧枪上加装位移传感器与射流监测装置，实时反馈枪位精度与射流形态，发现喷头磨损或射流分散时及时预警并自动调整参数；转炉倾动系统应配备角度传感器与振动监测模块，确保倾动过程平稳，避免熔池剧烈晃动。监测系统需融合多源传感技术，通过炉气分析、声呐探测、红外测温等手段，实时采集熔池温度、压力、渣层状态等数据，构建熔池反应数字孪生模型，实现喷溅风险的提前预判。控制系统则需建立工艺参数与熔池状态的关联数据库，通过算法模型实现参数的自动优化与精准调控，当模型预判到喷溅风险时，立即联动供氧、造渣等系统进行协同调整，形成“监测-预判-调控”的闭环机制。同时，需加强岗位人员与智能系统的协同，通过智能预警与操作指导提升人员应急处置能力，确保在系统自动调控的基础上，实现人工干预的精准高效，全方位提升喷溅防控的可靠性。

总而言之，智能调控、高效造渣与前兆监测技术的协同应用，构建起转炉喷溅防控的立体防线。这既破解了碳氧反应失控的核心难题，又通过工艺优化降低了安全风险。未来，还需持续深化技术融合，让安全保障与生产效能同步提升，为钢铁冶炼筑牢坚实根基。

参考文献：

- [1] 陶明光.冶金高温熔融金属作业风险机理与安全防控技术研究[J].冶金与材料,2025,45(11):151-153.
- [2] 张杰,陈龙平,王富春.铜冶炼中高温熔融金属作业的安全管理与事故预防研究[J].中国金属通报,2025,(04):13-15.
- [3] 张芮钊.高温熔融金属处理过程中的安全防护技术[J].冶金与材料,2024,44(09):109-111.