

# 转炉炼钢过程的精细化控制及协同优化

刘守国

新疆湘和新材料科技有限公司 新疆 哈密 839000

**[摘要]**在转炉炼钢过程中,多种杂质元素的氧化脱除、利用杂质元素氧化放热自升温以及大量气体产物在转炉吹炼不同时段对熔池产生不均衡搅拌等多元、异构、非均相复杂因素交织在一起,各因素之间既有相互促进的外在表象,也有随时序动态变化的内在制约,且与外界始终伴随有物质、能量和信息交换,是较为复杂的开放系统,具有显著的耗散结构特征,导致其在时间-空间边界内所展示的变化规律呈动态、非线性和波动起伏,其内在转变诱因和转变强度与外在调控参数的关联性复杂多变,因此探究转炉炼钢过程的精细化控制及协同优化极具现实意义。

**[关键词]**转炉炼钢;点技术;精细控制

**[DOI]** 10.12252/j.issn.2096-6261.2021.10.2249

## 1 相关“点技术”及与流程高效顺行的协同匹配

### 1.1 溅渣护炉技术

转炉溅渣护炉技术为中国钢铁企业突破转炉炉龄普遍偏低的“瓶颈”制约做出了非常重要的技术贡献。但很多企业在近几年生产实践中也在审慎思考如下问题:溅渣护炉技术虽然可以带来转炉长寿炉龄,但溅渣所需耐材累积消耗量的增加、固定溅渣时间的占用、转炉冶炼周期延长对连铸稳节奏可能带来的影响、因溅渣使转炉底吹效果的弱化、长期溅渣后转炉内炉型的异常变化、溅渣对转炉钢水洁净度和质量稳定性的影响、以及转炉炉壳变形和其寿命降低等问题,在不同企业的生产实践中都有所显现。因此,国内钢铁企业对这项技术所持观点正在逐步趋于成熟和理性,尝试按转炉“经济炉龄”组织正常生产,不再片面追求溅渣护炉后转炉能否获得超长炉龄这个单一指标,正在结合企业自身运行特点,调整和优化综合效益最佳的技术途径。从溅渣护炉这项技术应用效果的演变引发思考,在不同的发展阶段,市场对一项技术的实际需求和其技术内涵也应该随之发生变化,并应有所拓展和提升,继续沿用传统每炉占用固定时间溅渣的护炉理念值得推敲并适度优化。可以看出,溅渣护炉技术虽有其非常积极的应用效果,但与转炉炼钢在先进钢铁流程中所应发挥的功能定位作用会产生以下冲突<sup>[1]</sup>。

### 1.2 转炉熔池均衡搅拌技术

众所周知,在转炉吹炼过程中,脱碳反应产生CO气泡对熔池的搅拌作用非常不均衡。在熔池温度较低的吹炼前期,因脱碳速率低、产生的CO气泡数量少,冶炼过程内生CO气泡对熔池的搅拌作用非常不充分,而此时恰恰又是转炉脱磷的最佳时机,迫切需要借助熔池搅拌作用强化炉渣与钢水之间的掺混,促进钢水中杂质元素磷向炉渣富集和偏聚由此可见,必须借助布局合理、灵敏可调的底吹惰性气体搅拌系统,改善转炉吹炼过程自身搅拌极不均衡的现象,以展现不同时序下内-外互补、均衡精准的熔池搅拌效果<sup>[2]</sup>。

## 2 转炉炉底维护和低氧化性出钢技术

### 2.1 转炉炉底维护技术

转炉底吹元件正常工作时,其对炉底耐材的影响效果与

转炉出钢条件和底吹元件分布及供气参数直接相关。一般情况下,当转炉出钢 $w([C]) \leq 0.08\%$ 时,由于钢水氧化性相对较强,如果出钢温度再控制的偏高,会加速对炉底耐材的冲刷损毁,炉底耐材工作层厚度会随着炉龄延长呈逐渐减薄趋势,国内某300t转炉炉底砖残厚随炉龄延长的变化趋势如图3所示。由于底吹搅拌气流对其风口周边耐材的反锤冲刷作用,很容易造成该部位耐材比炉底其他非风口区域的耐材冲刷损毁严重,逐渐在风口处显现凹陷的深坑,容易引发漏钢事故,也给炉底长寿命维护增加了难度。对于转炉采用终点钢水相对较高碳含量的出钢条件(出钢 $w([C]) \geq 0.15\%$ ),结合溅渣护炉操作,统计规律显示炉底厚度因溅渣作用一般呈逐渐“上涨”趋势。炉底“上涨”使底吹元件对应风口区底吹气流通道发生异常改变,底吹搅拌气流阻力增加,如不及时采取有效调控措施,底吹搅拌效果将随炉龄延长逐步弱化直至消失。转炉炉底寿命维护既要尽可能延缓整个炉役期内炉底工作层耐材减薄的速率,也要能有效控制炉底厚度“上涨”趋势,确保全炉役能维持良好的底吹搅拌效果。保持转炉底吹元件较长期处于正常通气状况和炉底寿命维护是涉及全炉役的操作技巧,生产实践证明,可以从以下几方面开展工作,来保障转炉底吹元件处于正常工作状态<sup>[3]</sup>。

### 2.2 转炉低氧化性出钢技术

转炉低氧化性出钢旨在降低转炉出钢时钢水的过氧化性,提高初炼钢水洁净度。目的是降低炼钢过程脱氧剂消耗量,减少钢水内生夹杂总量,减轻钢水后续精炼时内生夹杂上浮去除的负荷,提高钢水精炼速率,减少连铸水口堵塞的概率。因此,对于全流程生产节奏稳定顺行、提高钢材质量、产品竞争力和树立产品品牌具有重要意义。依据所生产钢种的区别,可以遵循以下技术路径来提高转炉初炼钢水的洁净度。(1)对于生产量大面广的扁平材之炼钢过程,由于转炉出钢时钢水碳含量相对较低,对应的钢水全氧含量相对较高,须严格控制进精炼站钢水碳-氧含量的匹配状态,充分利用后续真空装置的脱气功能,实现钢水同时脱氧和深度脱碳的综合效果。须通过对初炼转炉高效冶炼的精准控制,尽可能获得相对较低的钢水碳氧积和与钢水始终接触的大包

顶渣的低氧化性。日本倡导的全量铁水预处理技术将铁水脱硫、脱硅和脱磷的任务前移至铁水预处理阶段完成,使转炉炼钢任务相对单一,基本只保留了脱碳-升温功能,由于转炉炼钢过程摆脱了吹炼后期高温钢水“回磷”的顾忌,为转炉低氧化性出钢创造了条件。脱磷和脱碳同时在转炉单一反应器中完成时,存在热力学条件的不协调,为保证转炉合适的出钢温度(满足连铸要求),转炉冶炼前期已经进入炉渣中的磷负荷,随着熔池温度的升高,又重新进入钢水中。为阻止回磷,转炉出钢时必须匹配较高的钢水氧化性、炉渣高碱度和大渣量。从这一点看,将脱磷任务前移至铁水预处理阶段完成是合理的,充分显示了炼钢工序功能解析、优化的理论指导意义和实际应用效果<sup>[4]</sup>。(2)对于生产中、高碳品种钢的炼钢过程,也应积极尝试采用将脱磷任务前移至铁水预处理工序完成的技术思想,且应尽可能将半钢磷含量脱至合适深度,日本提出将铁水预处理脱磷深度尽可能控制在小于0.015%的范围。此时,转炉炼钢过程具备了采用高拉碳操作冶炼中、高碳品种钢的基本条件。国内转炉流程在生产中、高碳钢种时,由于受钢水磷含量不能稳定进线的条件限制,高拉碳操作水平普遍偏低。日本川崎制铁生产轴承钢时,转炉出钢 $w([C])$ 可以控制在0.9%,不论在钢水氧化性控制、脱氧剂和增碳剂消耗以及铁合金消耗等方面都显示出巨大优势。此外,用高炉-转炉流程生产中、高碳钢种时,如果铁水预处理阶段可以将磷含量预先脱除至合适深度,由于转炉炼钢阶段可以将渣量控制的很少(脱磷造渣的任务已大大减轻),更应该在转炉高拉碳操作时尝试锰矿(或铬矿)熔融还原技术,利用锰矿(或铬矿)化渣,利用熔池中待去除的碳元素作为还原剂,将炉渣中的氧化锰(或氧化铬)还原至金属锰(或铬)进入钢水,以大幅度减少炼钢过程对高能耗锰铁(或铬铁)合金的依赖。日本转炉流程生产金属锰质量分数小于1.2%的钢种时,几乎全部采用锰矿熔融还原技术。国内目前在转炉锰矿(或铬矿)熔融还原技术应用方面几乎是空白,亟待挖潜提升。

### 3 转炉煤气高效回收技术

国内转炉煤气回收技术与日本转炉钢厂仍存在较大差距。长期以来,国内转炉钢厂统计煤气回收指标时,比较关注吨钢煤气回收量,忽视对回收煤气热值的同时关注,由此造成该指标虚高,无法客观评判实际回收水平的高低。日本采用全量铁水预处理的比例非常高,在实施全量铁水预处理工艺时,也不可避免地会伴随铁水中碳含量的损失,即使这样,日本主流钢厂转炉炼钢时煤气回收的门槛值仍保持在 $100\text{m}^3/\text{t}$ 钢和煤气热值 $2000\sim 4.18\text{kJ}/\text{m}^3$ 的水平。国内转炉钢厂还没有实现全量铁水预处理的实际案例,如果同时提供转炉回收煤气量和煤气热值2个指标,很容易发现存在的技术短板。新日铁绝大多数转炉降氧枪开吹后很短时间就进入煤

气回收状态,当时最短开始回收煤气的 시간은30s,这可能与新日铁采用全量铁水预处理比例很高有关,半钢中硅、锰、磷含量较低,温度比正常铁温度高,顶枪一降枪开吹,很快就进入碳氧化的高速反应期,此时的煤气回收系统(日本钢厂多采用湿法除尘)必须及时匹配相应的执行动作,确保转炉炉口的微正压,将转炉炼钢过程最初阶段产生的煤气量加以回收,几乎可以做到对该技术潜力的充分挖掘。可以设想,其至少将涉及以下技术点:对转炉炼钢过程碳氧反应速率及与之匹配的煤气发生规律的精准掌控、回收煤气烟道中烟气成分累计变化规律、风机抽力与烟道阻力变化的动态匹配、煤气初始回收期安全保障措施等。需要的技术支撑手段至少应包括:完备的在线检测/监测手段(转炉熔池温度、煤气成分、管道压力等)、风机变频器多档位灵敏可调、转炉煤气发生规律-风机变频器调节档位-转炉炉口微正压动态匹配的精准控制等。必须具备对煤气回收过程模型化的自动控制功能,仅凭人为经验的控制操作将难以适应。此应对措施同样可以用于转炉炼钢后期碳氧反应弱化后的煤气回收,确保转炉在整个炼钢吹炼期内始终处于动态有序的煤气回收状态。国内大多数转炉钢厂对于转炉炼钢前期和后期产生煤气的回收时机不太关注,或缺乏应对手段,推广干法除尘后又增加了对煤气泄爆的安全顾虑,风机抽力状态与炉内碳氧反应速率不能做到时机和总抽力的动态匹配,往往处于抽力过剩状态,使得炉内碳氧反应相对较弱的前期和后期都匹配了过剩的风机抽力,造成回收煤气管道氧气含量超出安全回收设定值,使这两个阶段产生的煤气被迫放散,这可能是造成国内转炉煤气回收量少或热值偏低的直接原因。此项技术的攻关团队必须由炼钢工艺、设备、自动化与安全等部门的专业人员共同组成,开展协同攻关。

### 结束语

转炉炼钢过程涉及诸多“点技术”,为稳定获得高效化生产和钢水洁净度较高的冶炼效果,应在不断凸显转炉炼钢在全流程中功能定位的前提下,将各个“点技术”应用效果在炼钢时序上做有序规划,追求转炉冶炼效果及与相关工序生产节奏的协同匹配,确保全流程高质量稳定顺行。

### 参考文献

- [1]刘小亮,曾加庆,马登,等.转炉底吹供气方式对熔池搅拌的影响[J].钢铁研究学报,2017,29(12):990.
- [2]刘小亮,曾加庆,王杰,等.底吹方式对渣-钢界面影响规律的水模型[J].钢铁,2016,51(8):29.
- [3]曾加庆,杨利彬,王杰等.底吹搅拌对复吹转炉脱磷工艺的作用分析[J].钢铁,2017,52(6):40.
- [4]王新华,李金柱,刘凤刚.转型发展形势下的转炉炼钢科技进步[J].炼钢,2017,33(1):1.