

210 t 转炉“5+1”孔氧枪喷头 创新设计与应用

Innovative Design and Application of 210 t Converter "5+1" Hole Oxygen Lance Nozzle

供稿|王鹏飞 / WANG Pengfei

内 容 导 读

针对山东钢铁集团日照有限公司炼钢厂 210 t 转炉产能提升, 优化脱磷、脱碳、升温效果, 解决氧枪喷头使用炉数低、钢铁料消耗高、钢水过氧化导致钢水纯净度差的问题, 通过设计新型“5+1”孔氧枪喷头(包括喷孔数、马赫数、喉口直径、出口直径、中心倾角), 提高供氧强度进而缩短纯冶炼周期, 提高产能, 同时为设备检修提供充足时间。强供氧冶炼过程由于氧气射流冲击深度深、面积大且钢液搅拌充分, 爆发性喷溅显著减少、钢铁料消耗降低、炉衬维护提升、氧枪喷头使用炉数提升, 钢水质量大幅提升, 实现年产由 850 万 t 钢提升至 920 万 t 钢, 为新型高级别品种钢的研究、开发及生产提供有力保障。

转炉通过吹氧进行一系列氧化反应, 脱磷、脱碳、升温、去夹杂, 从而得到合格钢水。供氧是转炉冶炼中至关重要的环节, 主要由氧枪通过拉瓦尔喷管将高压氧气射流转变为超音速气体射流, 喷入转炉熔池内进行搅拌、反应。氧枪喷头结构设计的合理性决定着冶炼效率及钢水质量。喷孔分为单孔和多孔, 单孔用于小型转炉, 大型转炉一般采用 3~7 孔。目前多孔氧枪喷头结构多采用传统喷孔, 喷孔采用 5 或 6 孔圆周分布且与中心夹角等倾角。随着大型转炉向高效化、成本节约化、长寿化发展, 传统氧枪喷头结构由于自身固有特点已无法满足高效、洁净炼钢等要求。国内外钢铁企业急需一种新

型氧枪喷头来解决这些问题。

国内外研究者对 2 组倾斜角度不同且结构不同的拉瓦尔喷管交错氧枪喷头进行研究。刘广强等^[1]发现交错氧枪单喷孔射流特性和传统喷头氧气射流相似。成琳^[2]以某钢厂 260 t 转炉模型为研究对象对交错布置的双倾角氧枪进行了数值模拟, 发现交错射流氧枪的冲击面积和搅拌能力都优于传统的氧枪。为了提高转炉冶炼效率、降低冶炼成本, 钢铁企业不断尝试提高转炉供氧强度。蒋晓放等^[3]研究了通过双角度氧枪将 300 t 转炉供氧流量从 60000 m³/h 提高至 69000 m³/h, 缩短了吹氧时间, 提高了脱磷率。杨利彬等^[4]通过热力学和动力学实验发现当顶

作者单位: 山东钢铁集团日照有限公司, 山东 日照 276800

吹供气强度增大至 $3.50\sim 3.72\text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$ 时,能兼顾冶炼前、中、后期成渣和脱磷的需求,提高冶炼效率。

本文以 210 t 转炉 5 孔氧枪喷头为原型,设计一种圆周等倾角 5 孔加中心 1 孔的新型氧枪喷头,丰富了氧枪喷头设计新模式,研究了强供氧冶炼对熔池搅拌、喷溅、脱磷、钢水洁净度、炉衬维护、氧枪长寿命的影响,取得了良好的冶金效果。为大型转炉氧枪设计及强供氧喷吹工艺推广提供了参考。

转炉原技术参数

山东钢铁集团日照公司炼钢厂 4 座 210 t 转炉为顶底复吹转炉,转炉均采用滑板挡渣出钢技术。4 座转炉设计可产钢 850 万 t,主要产品分别供给 2050 mm 热连轧、2030 mm 冷轧、3500 mm 炉卷、4300 mm 宽厚板等生产线。

转炉主要技术参数

国内以大中型转炉为发展趋势,逐渐淘汰落后产能,炼钢厂建设 210 t 顶底复吹转炉,设置 8 孔底吹,有效容积 203 t,炉容比(有效容积/公称容量)为 0.97,单位容量熔池表面积 $0.224\text{ m}^2/\text{t}$,转炉出钢量平均 230 t。转炉其他主要参数详见表 1。

表 1 转炉主要技术参数

熔池直径/mm	熔池深度/mm	熔池高径比*	炉口直径/mm	炉膛直径/mm	炉子有效内高/mm
6100	1750	1.557	3400	0.56	9500

注: *为熔池深度/熔池直径

氧枪喷头原技术参数

氧枪喷头原使用 5 孔拉瓦尔喷头(原氧枪喷头),圆周等倾角分布,5 孔与中心夹角 15.5° 。冶炼过程中供氧强度低,未能完全利用氧氮系统,导致冶炼时间长、熔池搅拌动力能弱。未能有效去除钢液中的杂质,转炉化学反应热力学条件不足,升温速率慢,造成能源浪费。5 孔氧枪喷头主要参数详见表 2。

表 2 氧枪喷头原技术参数

马赫数	直径/mm		长度/mm			喷孔扩张角/(°)	喷孔与中心夹角/(°)
	喉口	出口	喉口段	扩张段	收缩段		
2.06	43.9	58.7	30	90	30	9.4	15.5

原供氧系统存在问题

冶炼周期长

使用原氧枪喷头时供氧流量为 $42000\sim 46000\text{ m}^3/\text{h}$,供氧强度为 $3.3\sim 3.7\text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$,平均供氧时间在 16 min 以上,冶炼周期在 35 min 以上。转炉供氧时间长,产能提升受到极大制约,同时设备检修时无充足时间进行系统处理,仅零星修复导致安全隐患风险较高。

钢铁料消耗高,成品磷、碳成分超标

氧枪喷头供氧强度小,导致冶炼初期不易成渣,前期脱磷效果弱,终点磷含量较高;熔池冲击面积小、深度浅,熔池搅拌能力弱,钢水冶炼动力学条件不足;转炉脱磷、脱碳速率慢,成品钢中磷、碳成分含量超标,严重时导致成分超出国标,整炉次钢水不达标,造成经济损失巨大;供氧强度弱,升温速率慢导致炉渣化渣困难,为提高化渣效率,采用高氧枪枪位模式冶炼,导致冶炼过程极易产生金属喷溅和爆发性喷溅,钢铁料消耗增加。

钢水洁净度和炉型维护差,氧枪枪龄短

高级别品种钢和单联不脱氧钢终点温度要求较高,而原供氧模式下碳氧反应弱,升温速率慢。为提高出钢温度,延长冶炼时间、增加供氧量会导致钢水过氧化。合金加入量大, $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 夹杂多钢水纯净度差,铸机浇铸易絮流,严重时可能导致铸机停机事故。

冶炼过程始终处于弱吹状态,熔池搅拌能力弱,炉役中后期渣线上涨,导致出钢面、倒渣面维护不均匀,严重时出现炉衬砖外露,溅渣料使用量增加,炉衬费用增加。

由于原氧枪喷头参数及规格存在较大缺陷,冶炼中后期导致炉渣返干,氧气射流直接作用在钢液面,进一步粘钢烧损、侵蚀氧枪及喷头,氧枪及喷头使用炉数大幅降低。

改进喷头参数设计

马赫数和工况氧压

马赫数

氧枪供氧压力的大小由喷头出口马赫数决定。喷头将氧气压力能转化为动能,得到超音速的氧气

流股。氧压过高，在造成爆发性喷溅的同时对炉衬也造成严重侵蚀；氧压过低，氧气的出口射流速度过低，熔池无法得到充分搅拌^[5]。根据现场工况及以往冶炼情况选取周边 5 孔马赫数 (Ma) 为 2.06，中间 1 孔马赫数 (Ma) 为 2.05。

➤ 工况氧压

若工况氧压 (p_0) 高于设计氧压，由于氧气射流的部分压力能未全部转化为动能，使氧气射流离开氧枪喷头后延续膨胀产生的激波，导致氧气射流不稳定，造成炉渣化渣不良，产生不必要的能量损失，氧气射流的高能偏射易导致爆发性喷溅的增加。氧压过低时，氧枪喷头出口氧气射流衰减较快，对熔池的搅拌能力减弱，氧气利用率低，使冶炼时间延长，制约生产。

根据等熵流表确定，由于转炉炉膛的压力 p 与大气压力基本相同^[6]， $p=1.02\times 10^5$ Pa，查等熵流表，当 $Ma=2.06$ 时， $p/p_0=0.1164$ ， $p_0=880000$ Pa；当 $Ma=2.05$ 时， $p/p_0=0.1182$ ， $p_0=860000$ Pa，故工况氧压为 860000~880000 Pa。

氧流量

氧枪流量定义为单位时间内向转炉熔池所供氧的数量，其量纲为 m^3/h 或 m^3/min 。按出钢量 N 为 230 t、氧耗 V 为 45~50 m^3/t 、纯供氧时间 t 为 12~14 min，带入式 (1) 计算，得出氧流量 Q 。前中期氧流量按照 48000 m^3/h 冶炼、后期脱碳按照 52000 m^3/h 冶炼。

$$Q = \frac{60V \cdot N}{t} \quad (1)$$

喉口长度、直径及出口直径

为确保氧气经喷头压缩后气流稳定，便于加

工。现将喉口直段长度 H 调整为中心 30 mm，圆周 25 mm。喉口直径可以通过式 (2) 计算得到。

$$q = 1.783 \times C_D \frac{A_t p_0}{\sqrt{T_0}} \quad (2)$$

式中， q 为单个喷孔氧气流量， m^3/min ； p_0 为工况氧压，Pa； T_0 为氧气滞止温度，K； A_t 为喉口截面积， mm^2 。 C_D 为喷管流量系数，表示实际流量与理论流量的差值。

计算中心孔喉口直径时，取 $C_D=0.95$ ， $T_0=300$ K， $Q=48000$ m^3/h ， $q=133$ m^3/min ， $p_0=860000$ Pa，带入 (2) 式，得出中心孔喉口直径 $D_t=44.9$ mm。

计算周边 5 孔喉口直径时，取 $C_D=0.95$ ， $T_0=300$ K， $Q=52000$ m^3/h ， $q=144$ m^3/min ， $p_0=880000$ Pa，带入 (2) 式，得出周边 5 孔喉口直径 $D_t=46.2$ mm。

根据等熵流表，当 $Ma=2.06$ 时， $A_e/A_t=1.775$ (A_e 为出口截面积， mm^2)；当 $Ma=2.05$ 时， $A_e/A_t=1.760$ ，计算得出周边 5 孔出口直径 $D_e=61.6$ mm，中心一孔出口直径 $D_e=59.6$ mm。

喷孔分布及孔倾角

由于 5 孔喷头流股较多，将形成较大的负压区，易烧损喷头端面。同时由于流股较多，到达熔池表面后，射流重叠率加大造成能量的叠加，产生较大的金属喷溅和爆发性喷溅。为确保有较深的冲击深度和较大的冲击面积，设计周边均匀分布 5 孔+中心 1 孔氧枪喷头。喷头形式采用 5+1 孔拉瓦尔喷头，孔倾角 α 设置为 15° ，中心 1 孔马赫数 2.05、圆周 5 孔马赫数 2.06，新型“5+1”孔氧枪喷头参数详见表 3。采用该氧枪后射流均匀，熔池搅拌动力学、热力学得到有效提高，化学反应充分，转炉喷溅得到改善，氧枪喷头黏钢情况未再发生。

表 3 设计新型“5+1”孔氧枪喷头技术参数

喷孔位置	喷孔数量	马赫数	直径/mm		长度/mm		喷孔扩张角/(°)	喷孔与中心夹角/(°)
			喉口	出口	喉口段	扩张段		
圆周	5	2.06	46.2	61.6	25	106	6	15
中心	1	2.05	44.9	59.6	30	80	6	0

工艺改进实验结果

供氧时间

由于供氧流量由 42000~46000 m^3/h 提高至

48000~52000 m^3/h ，供氧强度相应由 3.3~3.7 $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 提高至 3.8~4.1 $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ ，熔池搅拌能力增强，钢液搅拌均匀，供氧时间由优化前平

均 16.7 min 缩短为优化后的 13.6 min，纯吹氧时间平均缩短 186 s，冶炼枪位降低 100 mm。使用新型

“5+1”氧枪喷头，转炉冶炼过程优化前后参数对比详见表 4。

表 4 转炉冶炼过程参数优化表

优化	供氧强度/[m ³ /(t·min)]	供氧时间/min	供氧流量/(m ³ /h)	枪位/mm
前	3.3~3.7	16.7	42000~46000	1900~2700
后	3.8~4.1	13.6	48000~52000	1800~2600

钢水磷、终点氧含量

使用新设计的氧枪喷头，熔池冲击深度加深、搅拌面积增大，为脱磷、升温提供了有效的动力学条件，熔渣成渣早，中后期返干得到有效缓解，冶炼过程石灰熔化良好，钢水磷含量有效降低，图 1 为氧枪喷头优化前后的钢水磷质量分数对比。由图 1 看出，氧枪喷头优化前钢水磷含量波动大，磷质量分数最高值达到 0.039%，平均值 0.019%；采用新设计的氧枪喷头后，磷含量较为稳定，波动范围显著降低，最高值 0.020%，平均值 0.013%，优化后磷质量分数平均值降低 0.006%。冶炼过程升温平稳，动态吹氧量减少，钢水终点氧含量降低，钢水纯净度提高，合金加入量减少，合金费用降低。碳氧反应平稳，金属及爆发性喷溅减少，钢铁料消耗降低，每吨钢铁料消耗由 1103 减少到 1075 kg。

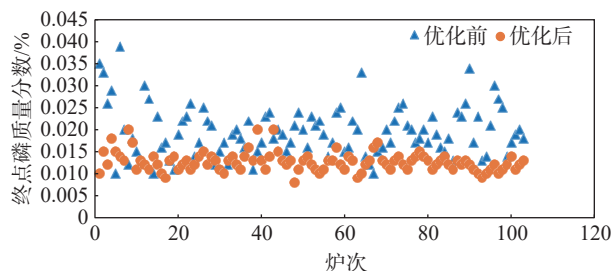


图 1 氧枪喷头优化前后终点磷含量对比

炉衬维护和喷头寿命

新设计的氧枪喷头，供氧强度大，氧气射流出口动能大，熔池钢液冲刷炉衬均匀，渣线上涨情况得到有效改善，炉型得以稳定维护，出钢面、倒渣面未再出现大面积炉衬裸露情况。由于强供氧冶炼，冶炼中后期炉渣返干情况得到有效改善，优化后喷孔扩孔及粘钢显著减轻，氧枪喷头使用炉数由 350 炉提高至 600 炉。图 2 为氧枪喷头优化前后侵蚀情况对比图，可以看出，采用“5+1”孔氧枪喷头后，

喷头侵蚀情况明显好转。



图 2 氧枪喷头优化前后侵蚀情况: (a) 优化前; (b) 优化后

转炉炉衬日常维护需利用转炉终点炉渣中含量达到饱和或过饱和的碱性氧化物，通过转炉高压氮气使转炉炉渣黏附在转炉炉衬上进行溅渣护炉。由于转炉炉衬为碱性耐火材料，高碱度转炉终点渣才能有效维护炉衬，相反，弱碱度终渣或全铁含量较高终渣不仅不能有效维护炉衬还会对炉衬腐蚀。体现转炉终点渣碱度的重要指标为氧化钙、氧化镁和全铁 (TFe) 的质量分数，对超低碳钢和中碳钢终渣分别取样进行化验，成分如表 5~6 所示。

表 5 中碳钢炉渣成分 (质量分数) %

氧枪喷头	CaO	MgO	TFe
优化前	32~36	5~8	15~18
优化后	40~45	10~13	13~16

表 6 超低碳钢炉渣成分 (质量分数) %

氧枪喷头	CaO	MgO	TFe
优化前	35~38	7~10	20~25
优化后	43~47	12~15	13~18

根据检测结果可知，中、超低碳钢终渣氧化钙平均质量分数均比优化前提高 8.5%，氧化镁平均质量分数均比优化前提高 5%，全铁含量平均值较优化前分别降低 2% 和 7%。优化后炉衬碱度提高的同时随着氮气流量溅渣护炉，炉衬维护效果显著提升。渣中全铁含量均减少，钢铁料消耗减少，成本得到有效控制。

结束语

(1) 通过设计新型“5+1”孔氧枪喷头, 提高供氧强度使氧气射流冲击深度深、冲击面积大, 钢液搅拌充分, 纯冶炼时间缩短 186 s, 终点磷质量分数平均值降低 0.006%, 为开发特殊钢种及冶炼高级别品种钢提供有力保障。

(2) 熔池钢液冲刷炉衬均匀, 冶炼中后期炉渣返干情况得到有效改善, 氧枪铜头扩孔及粘钢情况明显下降, 氧枪喷头使用炉数由 350 炉提高至 600 炉。

(3) 氧枪喷头优化后, 中、超低碳钢终渣氧化钙平均质量分数均比优化前提高 8.5%, 氧化镁平均质量分数均比优化前提高 5%, 全铁含量平均值较优化前分别降低 2% 和 7%。炉衬碱度提高的同时随着氮气流量溅渣护炉, 炉衬维护效果显著提升, 随着渣中全铁含量降低以及金属喷溅、爆发性喷溅的减少, 钢铁料消耗减少, 企业效益大幅提升。

参考文献

- [1] 刘广强, 张国新, 朱国强, 等. 260 t 转炉用新型双结构氧枪水模实验与工业应用. 钢铁研究学报, 2020, 32(11): 951
- [2] 成琳. 多孔氧枪射流行为及与熔池相互作用的研究 [学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019
- [3] 蒋晓放, 杨文远, 吴亚明, 等. 大型转炉双角度氧枪喷头高供氧强度炼钢. 钢铁, 2021, 56(9): 62
- [4] 杨利彬, 曾加庆, 邓勇, 等. 大型转炉高效率、长寿命顶底复合吹炼技术. 钢铁, 2020, 55(4): 45
- [5] 魏恒露, 黄晓龙, 叶磊, 等. 一种 $\Phi 245$ 大流量氧枪喷头: 中国专利, 215713117. 2022-02-01
- [6] 李新林, 刘海强, 张振申, 等. 120 t 转炉氧枪喷头设计与应用. 河南冶金, 2006(4): 36

作者简介: 王鹏飞 (1993—), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 冶金工程师, 2017 年毕业于内蒙古科技大学冶金工程专业, 主要研究方向: 钢铁冶金。通信地址: 山东省日照市东港区临钢路 1 号; E-mail: 2261842140@qq.com。