

110 t 复吹转炉氧枪喷头设计参数对钢水冶金质量的影响

刘煜 朱荣 刘福海

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 通过建立的几何模型,利用 Fluent 软件对出钢量 110 t 顶底复吹转炉氧枪喷头参数(夹角 $12^\circ \sim 13^\circ$, 孔数 4, 流量 $22\,000 \sim 24\,000 \text{ m}^3/\text{h}$) 对射流影响进行三维数值模拟,在 1.1 ~ 1.4 m 枪位,喷孔夹角 12.5° 的 4 孔氧枪可保持射流半径适中和较高的射流速度。钢厂冶炼 45 钢, Q235 和 HRB400 钢的应用实践表明,采用 12.5° 喷头喷孔夹角, 93 炉次 $22\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 氧气流量时 110 t 钢水的平均冶炼时间为 14.8 min, 终点碳符合冶炼钢种要求, 终点 [P] 0.010% ~ 0.030%, 脱磷率 $\geq 96\%$ 。

关键词 110 t 顶底复吹转炉 氧枪设计参数 数值模拟 终点 [P] 应用实践

Effect of Design Parameters of Oxygen Lance Nozzle for 110 t Combined Blown Converter on Metallurgical Quality of Liquid Steel

Liu Yu, Zhu Rong and Liu Fuhai

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Based on established geometric model the three dimensional numerical simulation on the effect of oxygen lance nozzle parameters (angle between nozzle $12^\circ \sim 13^\circ$, nozzle number 4, flow rate $22\,000 \sim 24\,000 \text{ m}^3/\text{h}$) of top and bottom combined blown converter tapping 110 t liquid steel on jet has been carried out by using software Fluent to get that with nozzle angle 12.5° 4-nozzle oxygen lance at 1.1 ~ 1.4 m lance level the suitable radius and higher jet speed may maintain. The application practice of 93 heats 0.45C steel, Q235 and HRB400 steel steelmaking at steel works shows that with 12.5° nozzle angle and oxygen flow rate $22\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, the average tap to tap time of 110 t liquid is 14.8 min, the end carbon meets the requirement of melting steel grades, the end [P] 0.010% ~ 0.030% and the dephosphorizing rate of liquid $\geq 96\%$.

Material Index 110 t Top and Bottom Combined Blown Converter, Oxygen Lance Design Parameters, Numerical Simulation, End [P], Application Practice

氧枪枪头工作时处于炉内最高温度区,决定着冲向金属熔池的氧流特性,直接影响吹炼效果。本研究对 100 t 复吹转炉顶吹氧枪喷头进行设计,确定适合 100 t 转炉炼钢工艺的炼钢氧枪喷头,配合现场合理的操作工艺,使供氧时间、供氧强度、脱碳率和脱磷率均满足炼钢生产要求。

1 喷头参数设计

1.1 喷头参数选取

对于 50 ~ 100 t 转炉,射流马赫数 $Ma = 1.95 \sim 2.0^{[1]}$ 。马赫数过大,易出现喷溅,增加热损失、渣铁料消耗及铁损,且易损坏转炉内衬和炉底;马赫数较低,射流搅拌作用减弱,氧气的利用率降低,渣中含铁增高,亦会引起喷溅^[2]。综合考虑,设计氧枪喷头的马赫数取 2.0。

在欧洲 100 ~ 149 t 转炉使用 4 孔和 5 孔氧枪喷头,3 孔喷头仅 60 t 转炉使用^[3-6]。国内除小容量转炉采用单孔喷头外,其余转炉皆用多孔喷头。且由于多孔喷头变集中供氧为分散供氧,增大了氧射流

同熔池的冲击面积,取得了显著的吹炼效果,设计氧枪喷头孔数为 4 孔。喷孔间夹角取 12° 、 12.5° 和 13° 三种方案。

钢厂转炉平均出钢量为 110 t,设计吹炼时间 $\leq 15 \text{ min}$,供氧强度 $\geq 3.2 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 。供氧时间以 14.5 min 进行计算,考虑到不同钢种对冶炼所需氧流量的不同要求,设计氧流量取 $24\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ [供氧强度 $3.6 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$] 和 $22\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ [供氧强度 $3.3 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$] 两种方案,即初始氧枪喷头设计方案为 6 种。

1.2 喷头参数设计计算

以氧流量 $Q = 24\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,喷孔夹角 12° 的喷头参数设计计算为例。

(1) 理论设计氧压

根据等熵流表^[6],当 $Ma = 2$ 时, $P/P_0 = 0.12780$ (P 为炉膛压力, P_0 为截止压力),取炉膛压力 $P = 0.104 \text{ MPa}$,则截止压力 $P_0 = 0.813 \text{ MPa}$ 。每孔氧流量为 $q = 100 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

(2) 喉口直径

喉口面积 $A_{喉}$ 满足公式

$$q = 1.782 \times C_D \times \frac{A_{喉} P_0}{\sqrt{T_0}} \quad (1)$$

式中: C_D - 常数; T_0 - 截止温度; P_0 - 截止压力。取 $C_D = 0.93$, $T_0 = 298 \text{ K}$, $P_0 = 0.104 \text{ MPa}$, 由 $A_{喉}$ 可得喉口直径 $d_{喉} = 0.0404 \text{ m}$, 取 40.4 mm 。

(3) 出口直径

根据 $Ma = 2$ 查等熵流表得, 喷头出口面积 $A_{出}$ 与喉口面积 $A_{喉}$ 的比值 $A_{出}/A_{喉} = 1.6875$, 进而出口直径 $d_{出} = \sqrt{1.6875} \times d_{喉} = 0.0524 \text{ m}$, 取 52.4 mm 。

(4) 扩张段长度

取喉口的直线段长度为 5 mm , 扩张段的半锥角

取 4° , 由 $L_{扩} = \frac{d_{出} - d_{喉}}{2 \text{tg}4^\circ} \quad (2)$

可得扩张段的长度 $L_{扩} = 0.0863 \text{ m}$, 取 86.3 mm 。

(5) 收缩段长度

收缩段的直径以能使整个喷头布置得下 4 个喷孔的原则确定, 取收缩段的进口尺寸的长度为 $d_{收} = 0.06 \text{ m}$, 则收缩段长度为 $L_{收} = 1.2 d_{收} = 0.0484 \text{ m}$ 。

收缩段的半锥角满足 $\theta_{收} = \text{tg}^{-1} \frac{d_{收} - d_{喉}}{2L_{收}} \quad (3)$

求得 $\theta_{收} = 11.5^\circ$ 。6 种氧枪喷头的主要参数见表 1。

2 数值模拟研究

2.1 模型建立

为寻求最佳设计方案, 利用 Fluent 软件对 6 种设计氧枪射流进行了三维数值模拟。几何模型根据表 1 中尺寸按 1:1 比例建立, 并利用 Gambit 软件生成网格。为了提高模拟的精确性, 喷头部分采用 4 面体网格, 圆柱空间采用 6 面体网格。Fluent 数值模拟时采用可压缩流体, 非稳态湍流模型, 用非耦合、隐式求解法计算。与不可压缩流体湍流运动相

比, 湍流方程中考虑了可压缩流体在较高马赫数下由于扩张耗散引起的湍动能损失。整个计算域采用 $k-\epsilon$ 模型计算。

边界条件直接影响计算结果的正确性, 模拟时氧枪拉瓦尔喷管入口设定为压力入口, 入口氧气压力为 0.814 MPa , 入口温度为 300 K ; 射流出口边界设定为压力出口, 压力值设为炉膛压力 0.104 MPa , 出口回流温度为 300 K ; 拉瓦尔喷管壁面的边界类型设定为墙面, 采用无滑移边界条件, 壁面附近流场采用标准壁面函数计算。求解控制中差分格式采用一阶迎风格式。

模型假设和说明: (1) 氧枪喷头内部所有连接处都很光滑, 忽略管内摩擦; (2) 拉瓦尔管内靠近壁面的流体是粘性的, 拉瓦尔管外的整个流场中的气体均为理想气体; (3) 射流计算空间的边界压力等于环境压力; (4) 采用总能量模型, 氧枪壁面是绝热面。

2.2 模拟结果

图 1 是 6 种氧枪喷头设计方案的速度云图。由图 1 可知, 4 孔氧枪在氧压为 0.814 MPa 条件下, 各喷管出口处速度达到 450 m/s , 射流核心区长度在 0.5 m 以上, 此后由于氧气射流与环境气流持续混合与卷吸, 氧气射流速度开始衰减。各个喷管之间的氧气射流并无汇合交织, 因此基本不存在射流干扰现象, 有利于转炉内反应的进行。据经验, 认为射流速度大于 100 m/s 时, 射流产生的冲击力能较好地进行化渣和有效搅拌钢-渣界面, 脱碳反应可顺利进行。当射流速度大于 100 m/s 时, 6 种氧枪喷头设计方案的氧气射流长度见表 2。表 3 是 6 种方案的射流半径, 射流半径为最大射流宽度, 即射流速度为 50 m/s 时, 气流最外侧距中心轴距离。

从表 2 和表 3 中可以看出, 在两种不同氧流量下, 不同夹角的 4 孔氧枪, 随喷头夹角的增大, 等速度射流长度减小, 射流半径增加。在理论枪位 ($1.1 \sim 1.4 \text{ m}$) 范围内, 12.5° 的 4 孔氧枪可保持较高的射流速度。当氧流量为 $24000 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 对于喷孔夹角为 12.5° 的氧枪, 200 m/s 射流速度的射流长度达 1.369 m , 且射流半径适中, 为 0.43 m ; 当氧流量为 $22000 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 对于喷孔夹角为 12.5° 的氧枪, 200 m/s 射流速度的射流长度达 1.328 m , 且射流半径适中, 为 0.43 m 。即 12.5° 的 4 孔氧枪既可以在保持有效地冲击深度的同时, 也可以将冲击面积控制在较小的区域内, 有利于熔池中脱磷、脱碳等反应的进行, 且减轻了对转炉炉壁的侵蚀。夹角为 13° 的氧枪喷头, 射流长度最小, 且冲击面积最大, 对转

表 1 设计氧枪喷头的主要参数

Table 1 Main parameters of designed oxygen lance nozzle

夹角/ °	孔数	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	喉口直 径/mm	出口直 径/mm	收缩段长 度/mm	喉口长 度/mm	扩张段长 度/mm
12	4	24 000	40.4	52.4	48.4	5	82.6
12.5	4	24 000	40.4	52.4	48.4	5	82.6
13	4	24 000	40.4	52.4	48.4	5	82.6
12	4	22 000	38.7	50.2	48.4	5	86.3
12.5	4	22 000	38.7	50.2	48.4	5	86.3
13	4	22 000	38.7	50.2	48.4	5	86.3

炉壁侵蚀严重,考虑到钢厂的炉型为瘦高型,适宜采用 12.5° 的 4 孔氧枪进行转炉炼钢生产。

利用 Fluent 软件对 12.5° 氧枪对转炉熔池的冲击深度和冲击面积进行了三相流模拟。由表 4 可知,采用氧气流量为 22 000 m³/h 的转炉氧枪时,在 1.2 m 和 1.5 m 枪位下,熔池冲击面积分别为 2.02 m² 和 2.37 m²;相应地,采用氧气流量为 24 000 m³/h 的转炉氧枪时,熔池冲击面积分别提高 15.1% 和 24.0%;采用氧气流量为 22 000 m³/h 的转炉氧枪时,在 1.2 m 和 1.5 m 枪位下,熔池冲击深度分别为 0.301 m 和 0.249 m;相应地,采用氧气流量为 24 000 m³/h 的转炉氧枪时,熔池冲击面积分别提高 22.6% 和 14.1%。

因此,24 000 m³/h 流量氧枪与 22 000 m³/h 流量氧枪相比,其射流对转炉熔池的冲击面积和冲击深度均有明显升高,对熔池具有更明显的混匀、搅拌效果,有利于促进熔池中各项物化反应的进行。但考虑到钢厂铁水磷含量高,为防止前期熔池升温速度快,脱磷时间短,终点磷含量过高,适宜采用 22 000 m³/h (低流量) 转炉氧枪。最终选定设计氧枪喷头

表 2 6 种设计方案的氧气射流长度/m

速度/ (m · s ⁻¹)	24 000 m ³ /h 流量			22 000 m ³ /h 流量		
	12°	12.5°	13°	12°	12.5°	13°
400	0.682	0.673	0.665	0.668	0.657	0.650
300	0.951	0.950	0.941	0.925	0.922	0.914
200	1.375	1.369	1.365	1.333	1.328	1.322
100	2.150	2.118	2.089	2.088	2.054	2.025

表 3 6 种设计方案的氧气射流半径/m

流量/ (m ³ · h ⁻¹)	氧枪喷头夹角		
	12°	12.5°	13°
24 000	0.41	0.43	0.43
22 000	0.42	0.43	0.44

表 4 4 种顶吹三相流模拟方案的冲击面积和冲击深度

方案 编号	喷孔 夹角/°	氧流量/ (m ³ · h ⁻¹)	枪位/ m	冲击面积/ m ²	冲击深度/ m
1	12.5	22 000	1.2	2.02	0.301
2	12.5	22 000	1.5	2.37	0.249
3	12.5	24 000	1.2	2.38	0.389
4	12.5	24 000	1.5	3.12	0.290

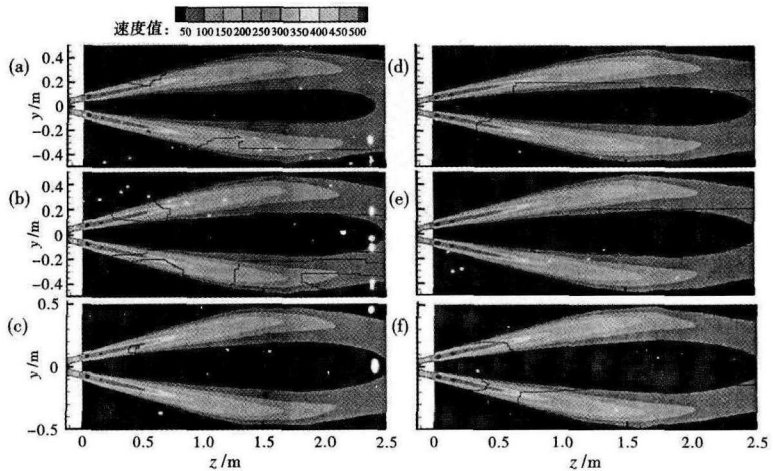


图 1 4 孔氧枪在设计压力 0.814 MPa 的射流速度分布图: 氧气流量 (a) (b) (c) 24 000 m³/h, (d) (e) (f) 22 000 m³/h; 喷孔夹角 (a) (d) 12°, (b) (e) 12.5°, (c) (f) 13°

Fig. 1 Distribution diagram of jet velocity of 4-nozzle oxygen lance with designed pressure 0.814 MPa; oxygen flow rate (a) (b) and (c)-24 000 m³/h, (d), (e) and (f)-22 000 m³/h; nozzle angle (a) and (d) 12°, (b) and (e) 12.5°, (c) and (f) 13°

表 5 最终设计的氧枪喷头主要参数

Table 5 Main parameters of finally designed oxygen lance nozzle

孔数	夹 角/°	流量/ (m ³ · h ⁻¹)	喉口直 径/mm	出口直 径/mm	收缩段长 度/mm	喉口长 度/mm	扩张段长 度/mm
4	12.5	22 000	38.7	50.2	48.4	5	86.3

参数见表 5。

3 应用实践

为检验设计氧枪喷头的可行性,在钢厂进行了 93 炉次工业试验,并对转炉冶炼时间和钢样脱磷情况进行了统计分析。复吹转炉平均出钢量为 110 t, 供氧强度为 3.3 m³/(min · t), 脱碳枪位 1.3 m。底吹元件采用对称布置,底吹供气强度根据钢种和冶炼阶段的需要控制在 0.04 ~ 0.08 m³/(min · t)。大部分炉次的冶炼时间为 10 ~ 20 min, 平均冶炼时间为 14.8 min, 各个炉次的冶炼时间在平均冶炼时间上下波动, 实际冶炼时间满足生产节奏。设计供氧时间为 14.5 min, 实际平均冶炼时间与理论值接近。由图 2 可知, 随着终点温度的增加, 终点碳含

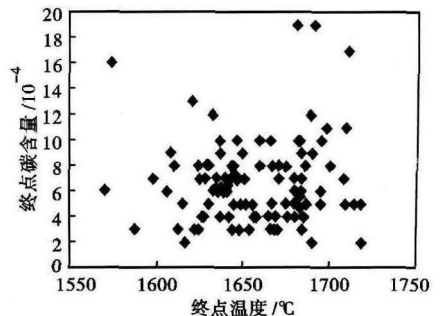
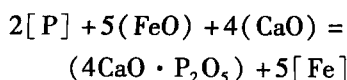


图 2 终点温度对终点碳含量的影响
Fig. 2 Effect of end temperature on end carbon content in liquid

量根据钢种的需要，在 $200 \times 10^{-6} \sim 1900 \times 10^{-6}$ 范围内波动，冶炼钢种主要有 45 钢、Q235 和 HRB400。

由图 3 可知，钢液终点磷含量基本保持在 300×10^{-6} 以下，脱磷率保持在 96% 以上，设计氧枪可达到很好的脱磷效果，满足钢厂生产需求。此外，随着终点温度降低，脱磷率升高，终点磷含量降低，即适当低温有利于钢液脱磷。这主要是由于脱磷反应为放热反应，根据分子理论，脱磷反应式为：



钢液温度升高抑制上述反应向正向进行，且导致磷的活度降低，造成脱磷困难。因此在保证化渣效果的基础上，适当降低终点钢水温度，可以提高脱磷率，降低终点磷含量。

由图 4 可知，随着渣量的增大，终点磷含量减少，脱磷率增大。因此冶炼过程中可以依靠增加渣量降低磷含量，如可采取多次换渣操作。但渣量过大会导致顶吹搅拌压力大，搅拌效果降低；同时也会使金属和热量的损失增大。因此，冶炼过程应该对终点渣量控制在合适的范围之内，且适当加强底吹流量，促进熔池搅拌效果，提高脱磷效率。

4 结论

(1) 两种不同氧流量的 4 孔氧枪，随喷头夹角增大，等速度射流长度减小且射流半径增加。在理论枪位 (1.1 ~ 1.4 m) 范围内，喷孔夹角为 12.5° 的 4 孔氧枪可保持较高的射流速度，且射流半径适中，加之钢厂的炉型为瘦高型，选取喷孔夹角为 12.5° 。

(2) $24000 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量氧枪与 $22000 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量氧枪相比，其射流对转炉熔池的冲击面积和冲击深度均有明显升高，对熔池具有更明显的混匀、搅拌效果，有利于促进熔池中各项物化反应的进行。但因钢厂铁水磷含量高，为防止前期熔池升温速度快，脱磷时间短，终点磷含量过高，故采用 $22000 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量氧枪。

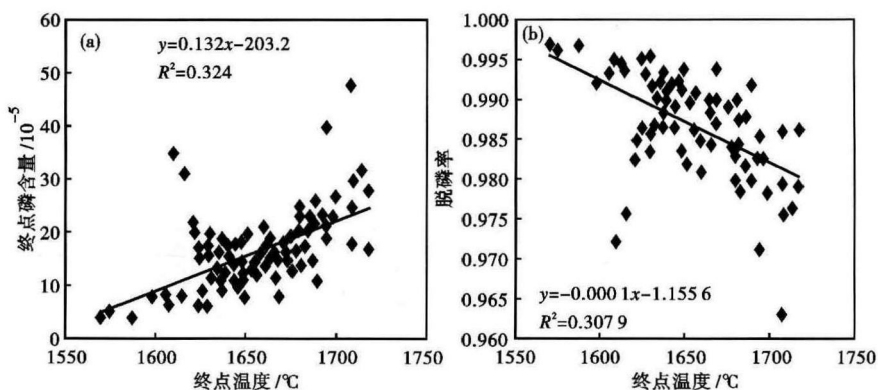


图 3 终点温度对(a)终点 P 含量和(b)脱 P 率的影响

Fig. 3 Effect of end temperature on end phosphorus content in liquid (a) and dephosphorizing rate (b)

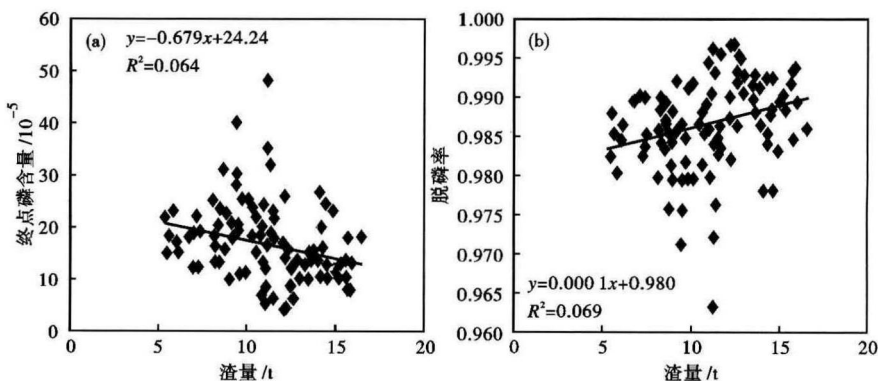


图 4 渣量对(a)终点 P 含量和(b)脱 P 率的影响

Fig. 4 Effect of slag amount on end phosphorus content in liquid (a) and dephosphorizing rate (b)

(3) 工业试验表明，110 t 转炉平均冶炼时间为 14.8 min，终点碳含量达到生产标准，脱磷率达 96% 以上，设计氧枪喷头的冶炼效果满足生产需求。

参考文献

- [1] 王磊, 朱荣, 刘福海, 等. 100 t 转炉氧枪喷头的设计与优化[J]. 冶金能源, 2012, 31(1): 12-14.
- [2] 潘贻芳, 李树庆, 王宝明, 等. 天钢转炉氧枪喷头与供氧系统改造[J]. 炼钢, 2006, 22(4): 44-47.
- [3] 赵国光, 郭振和. 顶底复吹转炉氧枪喷头的确定[J]. 梅山科技, 2000(1): 15-17.
- [4] 卢帝维, 朱荣. 转炉氧枪喷头参数的数值模拟研究[J]. 冶金能源, 2008, 27(6): 10-11.
- [5] 尹振江, 朱荣, 卢帝维, 等. 转炉氧枪的数值模拟[J]. 冶金能源, 2008, 27(5): 13-15.
- [6] 袁章福, 潘贻芳. 炼钢氧枪技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.

刘煜(1989-), 女, 硕士研究生(北京科技大学), 2012年 北京科技大学(本科)毕业, 钢铁冶金。

E-mail: liuyuxiaoxian@126.com

收稿日期: 2014-07-05