

180 t 转炉氧枪喷头的设计和优化

梁慧坤 冯亮花 张安坤 刘广龙

(辽宁科技大学材料和冶金学院, 鞍山 114051)

摘要 基于氧枪设计的经典理论, 得出 180 t 转炉 5 孔氧枪喷头的入口直径 55 mm, 喉口直径 37.2 mm, 出口直径 50.8 mm, 收缩段长度 44.6 mm, 扩张段长度 97.2 mm, 喉口长度 5 mm; 采用 CFD 流体仿真软件模拟在相同环境温度下喷孔夹角 $13^\circ \sim 17^\circ$ 时氧枪射流流场, 得出 15° 为 180 t 转炉氧枪最优喷孔夹角, 其射流具有较强的穿透能力和较大的有效冲击面积。

关键词 180 t 转炉 氧枪 喷孔夹角 数值模拟 优化

Design and Optimization of 180 t Converter Oxygen Lance Nozzle

Liang Huikun, Feng Lianghua, Zhang Ankun and Liu Guanglong

(School of materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract Based on classical theory for oxygen lance design it is obtained of oxygen lance nozzle with 5 holes for 180 t converter the diameter of inlet 55 mm, the diameter of throat 37.2 mm, the diameter of outlet 50.8 mm, the length of contracting section 44.6 mm, the length of expanding section 97.2 mm and the length of throat 5 mm; with using CFD fluid imitation software to simulate the injecting fluid field of oxygen lance with $13^\circ \sim 17^\circ$ nozzle at same environmental temperature, it is obtained for 180 t converter the optimum nozzle angle is 15° , its injecting fluid has stronger immersion ability and larger effective impact area.

Material Index 180 t Converter, Oxygen Lance, Nozzle Angle, Numerical Simulation, Optimization

喷头结构直接影响转炉氧枪氧气射流特性, 最终影响转炉的吹炼效果^[1-2]。本文采用的 B. N. 巴普基兹[曼]斯基的设计方法^[3], 基于拉法尔管的基本设计计算, 确定马赫数, 选择喷孔数, 计算得到入口直径, 喉口直径, 出口直径, 收缩段长度, 扩张段长度, 喉口长度等结构参数, 依据 B. N. 巴普基兹[曼]斯基方法列出的喷孔数与夹角的关系选择喷孔夹角范围, 并通过 Fluent 软件优化设计最终的夹角。

对于多孔氧枪, 喷孔轴线与喷头轴线的夹角不仅影响气流本身的性质, 而且对熔池的冲击深度及冲击面积也有较大的影响^[4]。夹角过小, 多股气流在到达熔池面之前就会相交, 使射流的穿透能力增大, 但冲击面积却减小; 夹角过大, 射流的穿透能力下降, 冲击面积增大会冲刷炉衬, 因此对于多孔氧枪喷孔轴线与喷头直线的夹角选择直接影响到冶炼效果及转炉的安全运行。本文运用 Fluent 软件对 180 t 转炉设计氧枪在不同喷孔夹角下进行射流流场的模拟, 最终选择射流穿透能力较强, 有效冲击面积大的参数来设计夹角。

1 180 t 转炉氧枪喷头设计

1.1 多孔氧枪喷头的结构设计相关公式

氧枪喷头设计包括供氧量的计算、理论设计氧压的计算、喷头出口马赫数的选取、喷射扩张段和扩张角度的计算、拉法尔单个喷孔收缩尺寸的计算和喷口喉口段长度的计算等。相关计算公式如表 1。

1.2 氧枪喷头的尺寸计算

炉体相关参数见表 2。

1.2.1 180 t 转炉氧枪参数的确定

基于表 1 的计算公式及计算步骤, 最终选定氧枪喷孔数为 5, 出口射流马赫数为 2.12, 氧枪出口压力为 101 000 Pa, 氧枪内管氧气流速为 55 m/s, 设计氧流量为 32 000 m³/h。得到等熵表 3, 计算得 $P_0 = 952\,920$ Pa。

1.2.2 5 孔氧枪喷头尺寸

由表 1 的计算公式和选取的参数计算得到氧枪的相关尺寸。计算结果为表 4。其中扩张角度为 8° , 其结构图如图 1 所示。

通讯作者: 冯亮花, 硕士, 副教授, 辽宁科技大学材料和冶金学院, 鞍山 114051
E-mail: fenglianghua1974@126.com

表 1 氧枪喷头结构参数的计算公式
Table 1 Calculation formula of parameters of oxygen lance nozzle structure

参数	计算公式或依据	说明
氧气供给量	供氧量 = $\frac{\text{每吨钢耗氧量} \times \text{出钢量}}{\text{吹氧时间}}$	每吨钢氧气量 50 ~ 60 m ³ (标准状态) 吹氧时间 16 ~ 20 min。
理论设计氧压	一般理论设计氧压选择范围是 0.068 6 ~ 0.786 MPa	理论设计氧压 (绝对压力) 是喷孔入口处所能达到的氧压。
出口射流马赫数 $M_{\text{出}}$	根据气体动力学的知识可知, 喷头 $M_{\text{出}}$ 在 2.0 左右	$M_{\text{出}} > 2.0$, 操作虽更加稳定, 但需付出更大的压力能 ^[5] , 对于大于 120 t 的转炉, $M_{\text{出}} > 2.0$ 。
孔数及喷孔夹角	根据喷孔夹角与孔数的关系确定。孔数-喷孔夹角 3-9° ~ 11°; 4-10° ~ 13°; 5-13° ~ 15°; > 5-15° ~ 17°	对于多孔喷头, 喷头孔数和喷孔夹角之间的关系对射流影响较大。
喉口氧气流量 $Q_{\text{实}}$	$Q_{\text{实}} = 1.782 C_D \frac{A_{\text{喉}} P_0}{\sqrt{T_0}}$	$Q_{\text{实}}$ - 实际氧量 (标准状态) / (m ³ · min ⁻¹); P_0 - 绝对氧压 / MPa; T_0 - 氧气滞止温度, 选取, $T_0 = 273 + (30 \sim 40)$ K; C_D - 喷孔流量系数, 对多孔喷头, $C_D = 0.90 \sim 0.96$; $A_{\text{喉}}$ - 氧枪喷头喉部面积 / m ² 。
滞止压力 P_0	已知氧枪的出口为近似的标准大气压 P , 根据等熵表确定 P/P_0 的值, 从而计算得到 P_0 的值。	P 为标准大气压, 一般取 $P = 101\ 000$ Pa = 101 kPa。
喉口直径 $d_{\text{喉}}$	确定供氧量 Q 和 P_0 , 由 $d_{\text{喉}} = \left(\frac{4Q \sqrt{T_0}}{1.782 C_D \pi P_0} \right)^{1/2}$	Q - 供氧量 / (m ³ · min ⁻¹); P_0 - 绝对氧压 / MPa; T_0 - 氧气滞止温度, 选取, $T_0 = 273 + (30 \sim 40)$ K; C_D - 喷孔流量系数, 对多孔喷头, $C_D = 0.90 \sim 0.96$ 。
收缩段长度	$L_{\text{收}} = (0.8 \sim 1.5) d_{\text{喉}}$	
扩张角与扩张段 $L_{\text{扩}}$	半锥角 ($\partial_{\text{扩}}/2$) 在 4° ~ 6° 之间取, $L_{\text{扩}} = \frac{d_{\text{出}} - d_{\text{喉}}}{2 \tan(\frac{\partial_{\text{扩}}}{2})}$	半锥角 ($\partial_{\text{扩}}/2$) 在 4° ~ 6° 选取可保证流股与孔壁保持贴合。 $d_{\text{出}}$ - 氧枪喷头出口直径 / mm。

表 2 转炉炉体主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of converter body

项目	参数
公称容量/t	180
有效工作容积/m ³	187.4
炉容比/(m ³ · t ⁻¹)	1.04
炉壳高度/mm	10 240
炉壳外径/mm	7 500
炉子有效高度/mm	8 920
炉膛内径/mm	5 200
炉口直径/mm	4 790
熔池深度/mm	1 660
出钢口直径/mm	159
出钢口角度/°	0

表 3 等熵表
Table 3 Isentropic data

喷管出口马赫数 (Ma)	P/P_0	ρ/ρ_0	T/T_0	喷管出口面积/喷管喉口面积 ($A/A_{\text{喉}}$)
2.12	0.105 99	0.201 26	0.526 63	1.869 0

注: $P/P_0, \rho/\rho_0, T/T_0$ - 氧气定熵的总参数和静参数之比。

表 4 氧枪结构尺寸 / mm
Table 4 Size of oxygen lance structure / mm

入口直径	喉口直径	出口直径	收缩段长度	扩张段长度	喉口长度
55	37.2	50.8	44.6	97.2	5

2 喷孔夹角对射流影响的分析

喷孔夹角的选择对转炉炼钢至关重要。它不仅影响气流本身的性质, 而且对熔池的深度及冲击的面积都造成了很大的影响。应用数值模拟软件, 建

立 5 孔氧枪三维图, 研究喷孔夹角分别为 13°、15°、17° 时的氧射流流动情况, 以确定最佳的喷孔夹角。

2.1 喷孔角度射流流股速度衰减的影响

以下是针对 180 t 转炉 5 孔氧枪在工况条件环境温度选取 1 873 K, 对喷孔夹角为 13°、15°、17° 时进行数值模拟的结果。

由图 2 可知, 13° 氧枪喷孔夹角过小, 射流超音速从喷孔流出并汇合, 汇合之后仍然以超音速继续沿射流中心线流动, 之后射流速度便呈现递减的趋势; 15° 氧枪射流从出口射出后各股射流独立流动, 到达一定距离后汇聚成一股继续流动, 汇合时的速度较前者有所降低, 以 300 m/s 左右的速度继续流动, 但之后速度也沿射流中心线衰减; 17° 氧枪射流从出口射出后各股射流之间的流动相对分散, 基本看不出汇聚为一条流股, 而且射流的宽度越来越大, 射流流场杂乱无章。

2.2 喷孔角度对射流流股偏移的影响

结合图 2 和图 3(a) 可知, 13° 氧枪的偏移量较大, 射流自喷孔射出后流股由于抽引作用强烈, 迅速

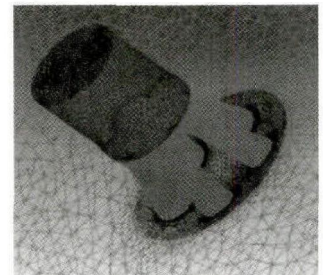


图 1 氧枪喷头三维模型局部图
Fig. 1 Partial topography of three-dimensional model of oxygen lance nozzle

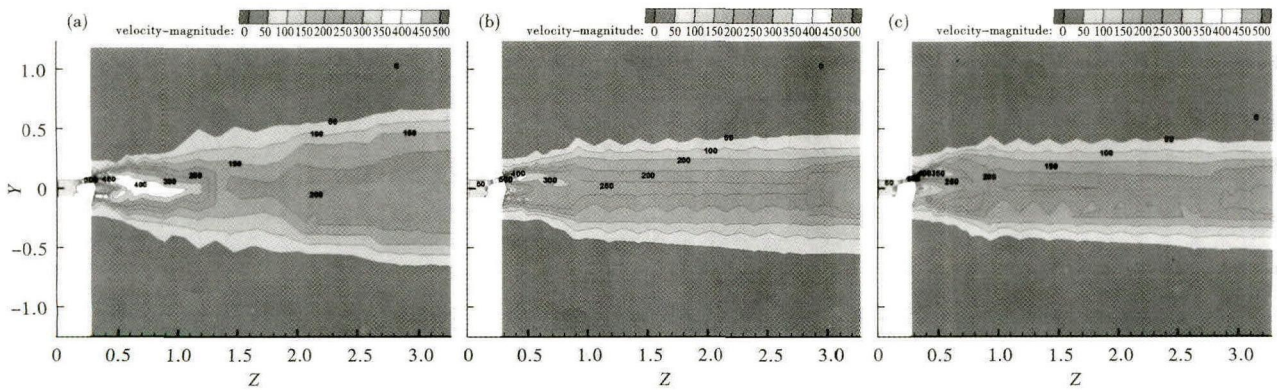


图2 13°(a), 15°(b)和17°(c)氧枪射流等速线
Fig. 2 Constant velocity line of oxygen lance injecting fluid with nozzle 13° (a), 15° (b) and 17° (c)

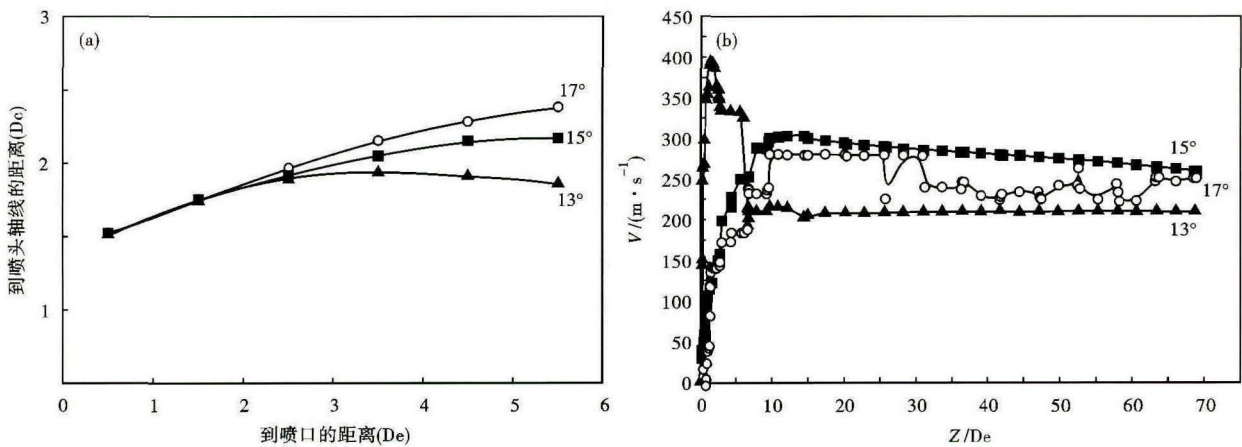


图3 3种氧枪射流(a)偏移量图和(b)中心线速度衰减
Fig. 3 Offset chart (a) and centerline velocity attenuation (b) of three kinds of oxygen lance injecting

向射流中心线偏移。17°氧枪的偏移量最小,仍保持很好的射流刚性,速度偏移量因素变小。

2.3 喷孔角度对射流中心线速度衰减的影响

由图3(b)可知,由于13°氧枪的射流偏移量较大,所以临近出口处的速度变化明显,多股射流由于抽引相互掺杂,合速度较快,在出口处能获得更高的速度,但是衰减快。15°氧枪射流速度增加平稳,衰减比较平缓。17°氧枪的射流合速度比15°氧枪低,其汇合较慢,而且速度沿中心线并非平稳的衰减,而是产生紊乱。

2.4 喷孔角度对射流冲击面积的影响

图4为不同喷孔夹角在不同枪位下的射流横截面等速线,定义射流冲击半径就是射流截面上速度最大的点到射流流股边缘的距离,因此根据等速线图绘出冲击半径图5。由图4可知,50 m/s的等速线基本连在一起,表明多孔氧枪各流股间低速区射流干扰较大,沿氧枪射流方向,速度不断衰减,各流股射流间的干扰增加。同一位置处,喷孔夹角小,高

速区射流干扰明显。13°喷孔角度过小,射流汇合较早,50 m/s冲击面积过小,然而17°喷孔角度过大,射流的冲击面积过大,这样又会冲刷炉衬,影响转炉寿命。

3 氧枪喷孔夹角确定

通过数值模拟分析可知,不同夹角的氧枪的外界环境温度相同,达到相同的出口速度,夹角过小,射流向喷头中心线偏移增大,多股气流会在到达熔池面之前会相交在一起,造成射流的穿透力增大,冲击面积减小,最终达不到设计要求的最佳值。夹角过大,导致射流的穿透能力下降,冲击的面积加大,会冲刷炉衬,减少炉子寿命。

相比于13°、17°喷头,15°喷头两者的优点兼而有之,在不影响有效冲击面积的情况下,也能保持良好的射流速度,保证射流的穿透能力。实际转炉吹炼当中既需要有一定的冲击面积又需要到达钢液面时具有稳定的速度。

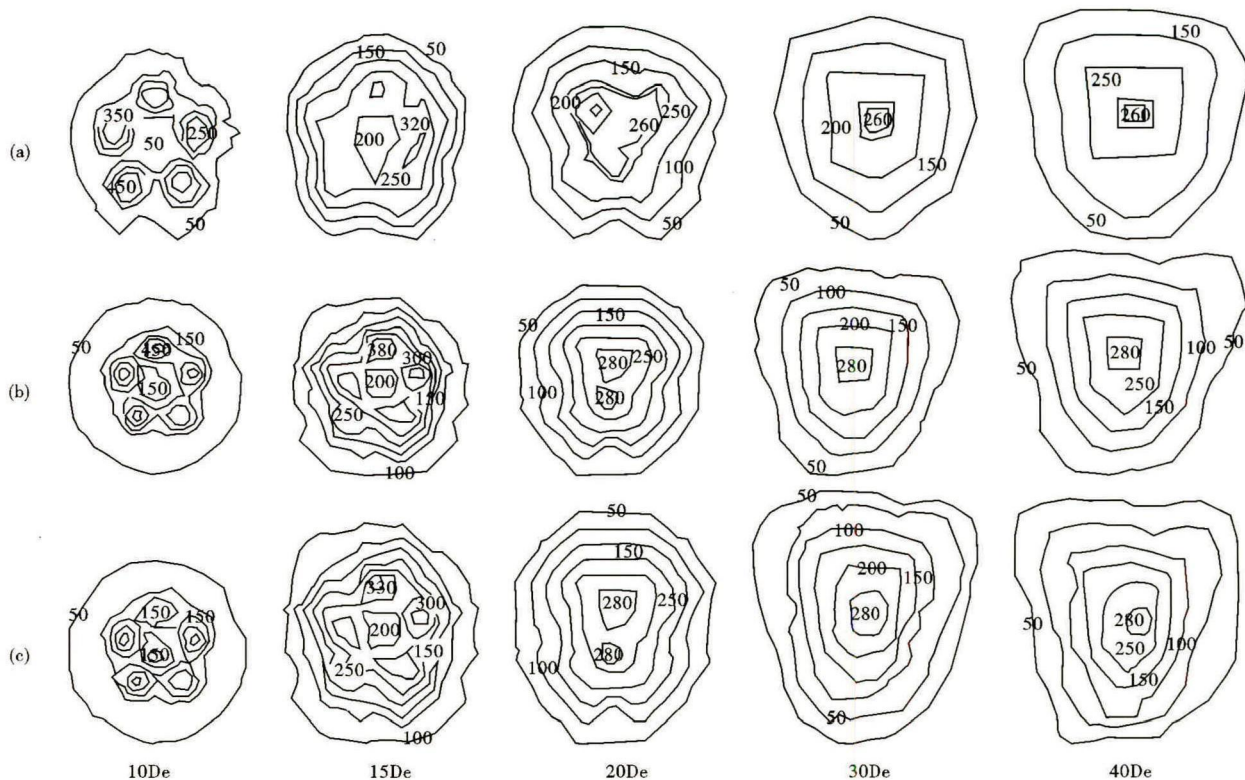


图 4 13°(a), 15°(b) 和 17°(c) 氧枪射流不同位置等速线图

Fig. 4 Constant velocity line diagram at different location for oxygen lance injecting fluid with 13° (a), 15° (b) and 17° (c)

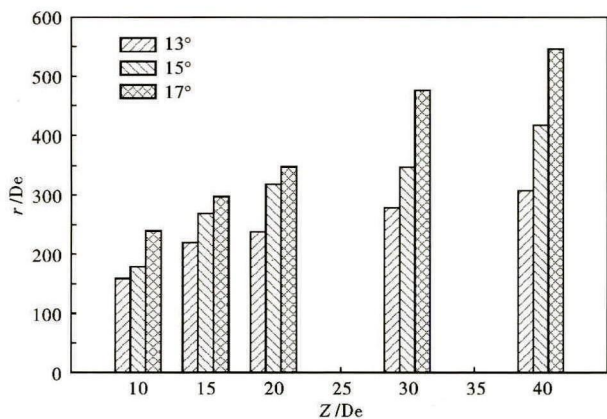


图 5 3 种氧枪的冲击半径

Fig. 5 Impact radius of three kinds of oxygen lance

综上所述, 相同环境温度下, 15° 为 180 t 转炉 5 孔氧枪的最优化喷孔夹角, 射流的穿透能力较强, 有效冲击面积大, 能够满足设计要求和实际生产需要。

4 结论

(1) 采用 B. N. 巴普基兹[曼]斯基的设计方法, 基于拉法尔管的基本计算确定 180 t 转炉氧枪的相关参数。确定马赫数为 2.12, 喷孔数为 5, 氧枪的出口为近似的标准大气压 $P = 101\ 000\ \text{Pa}$, 氧枪内管氧

气流速取 55 m/s, 设计氧流量为 32 000 m³/h。

(2) 180 t 转炉氧枪喷头入口直径 55 mm, 喉口直径 37.2 mm, 出口直径 50.8 mm, 收缩段长度 44.6 mm, 扩张段长度 97.2 mm, 喉口长度 5 mm。

(3) 15° 为 180 t 转炉氧枪的最优化喷孔夹角。喷孔夹角为 15° 时, 射流的穿透能力较强, 有效冲击面积大, 能够满足实际生产需要。

国家自然科学基金项目资助(51204093)

参考文献

- [1] 袁长福, 潘贻芳. 炼钢氧枪技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [2] 刘志昌. 氧枪[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [3] 贾凌云, 高留治. 转炉氧枪喷头改进设计的探索[J]. 上海金属, 1989, 11(5): 43-46.
- [4] 孙正茂, 宋战, 张评, 等. 转炉氧枪喷头的优化设计与应用[J]. 鞍钢技术, 2000(9): 4-9.
- [5] 吴耀光. 95 t 转炉氧枪喷头设计与应用[J]. 炼钢, 2005, 21(4): 56-59.

梁慧坤(1991-), 女, 硕士研究生(辽宁科技大学), 辽宁科技大学(本科)毕业, 氧枪射流模拟。

收稿日期: 2014-12-06