

## 新型双结构氧枪与转炉熔池交互行为的水模实验

张国新 刘广强 刘坤 李绘祥  
(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114044)

**摘要** 以钢厂 260 t 顶吹炼钢转炉为研究对象, 建立了 1:7 的物理模型, 分析了新型双结构氧枪喷头与熔池作用的交互作用, 讨论了不同工况下的冲击坑深度和宽度以及射流对转炉熔池的搅拌强度, 并将结果与传统结构氧枪喷头进行比较。结果表明, 新型喷头与熔池作用形成的冲击坑深度与传统氧枪喷头的差别不大, 设计流量下, 枪高为  $H=35$  de 时, 新型喷头形成的冲击坑深度最大为 147 mm; 不同枪位下, 新型氧枪射流冲击坑直径比传统氧枪射流冲击坑直径平均增加 22%; 新型喷头的射流对熔池的搅拌效果好于传统喷头, 设计流量下的最佳操作枪位为 35~40 de。

**关键词** 双结构氧枪 转炉熔池 冲击坑 混匀时间 水模实验

## Water Model Experiment on Interaction Between Innovated Double-Structure Oxygen Lance and Converter Molten Pool

Zhang Guoxin, Liu Guangqiang, Liu Kun and Li Huixiang  
(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114044)

**Abstract** Based on 260-ton top blowing converter of a steel works, the 1:7 physical model is established, and the interaction between the innovated double-structure oxygen lance and the molten pool is analyzed. The depth, width and stirring intensity of cavity under different impacting conditions are discussed and the results are compared with those of traditional oxygen lance. It is found that the cavity depth formed by the interaction between the new nozzle and the molten pool is almost equal to that of the traditional nozzle. At design flow and the lance height  $H=35$  de, the maximum cavity depth formed by the innovated nozzle is 147 mm; as compared with traditional lance at different lance height the average impact cavity diameter by innovated lance increases by 22%. The corresponding optimal operating lance position is 35~40 de under the design flow.

**Material Index** Double-Parameter Oxygen Lance, Converter Bath, Impact Cavity, Mixing Time, Water Model Experiment

在顶吹氧气炼钢转炉中, 高压氧气通过多孔拉瓦尔喷头转化成超音速射流, 吹入转炉熔池中, 超音速射流行为对氧气的供给、造渣等起着关键的作用<sup>[1]</sup>。因此, 了解超音速射流的动力学特性以及射流与钢液之间的物理反应是十分重要的。

随着炼钢技术的进步, 氧枪在冶金过程中的应用已经从单喷头结构发展到多喷头结构, 每个喷头具有相同的结构和尺寸。国内外对这些传统的氧枪进行了大量的研究, 积累了其在各种条件下的动力学行为, 推动了转炉炼钢技术的进步和发展<sup>[2-4]</sup>。然而, 随着钢铁行业对成本、效率要求的不断提高, 对氧枪的性能要求也越来越高。传统氧枪固有的结构特点以及其在控制射流行为操作因素的局限性, 已经无法为炼钢过程的进一步优化提供满意的解决方案。因此, 提高氧枪性能的新方案也不断被提出。

行之有效的解决办法是改进或设计一种新型结构氧枪。因此双结构氧枪的设计开发日益受到人们的重视。

双结构氧枪又称交错氧枪, 其特点是两组喷头具有不同的倾角和流量。大喷头分布在射流内部, 小喷头分布在射流外部。大喷头的倾角比小喷头的倾角小  $3^\circ \sim 5^\circ$ 。此外, 两组喷头中心距氧枪轴线的距离不同。杨文远等人<sup>[4]</sup>基于水模型的研究表明, 双结构在提高冶炼性能和氧枪喷头使用寿命方面具有很大的优越性和潜在的应用价值。然而, 对于具有双结构喷头的氧枪的射流特性以及其与钢液之间的物理反应的了解仍未清楚。

本实验是通过水模型实验和数值模拟, 探讨双结构氧枪的射流与钢液之间的物理相互作用, 以及交错射流对熔池的穿透深度、冲击面积、搅拌强度以

及熔池内钢液随时间的演化规律;并将结果与传统喷头的进行比较。

## 1 装置与材料

以钢厂 260 t 转炉为原型,按比例缩小 7 倍,建立顶吹转炉-氧枪系统。图 1 显示了实验装置的示意图。该装置主要由空气压缩机和储气罐、有机玻璃转炉、铜制氧枪喷头、升降平台和高速摄像机组成。

实验中使用氧枪的位置主要由实际熔炼过程中操作枪的位置以及模型与原型的几何相似性决定。实验使用吹氧理论流量通过相似准则数 Froude 数计算,其表达式为<sup>[5-6]</sup>:

$$Fr' = \frac{v_g^2 \rho_g}{gH\rho_l} \quad (1)$$

式中: $v_g$ - 气体的特征速度/( $m \cdot s^{-1}$ ); $H$ - 特征长度/ $m$ ;  $g$ - 重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ ); $\rho_g$  和  $\rho_l$ - 气体密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )和液体密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )。具体参数见表 1。模型氧枪喷头分别采用传统结构和新型双结构两种类型,具体几何尺寸如表 2 所示。

在气液界面水平固定一根刻度线以记录冲击坑的大小。采用佳能 1D (EOS 1D X Mark II) 进行拍摄。在建立稳定的喷吹条件(喷射开始后约 20 s)后,以每秒 16 帧的速度拍摄照片。用 Image J 1.51 软件对不同条件下拍摄的图像进行处理。为了清晰

表 1 转炉原型和模型的几何尺寸

Table 1 Converter geometric dimensions of prototype and model

项目	原型	模型
容量 /t	260	-
熔池直径, $D$ /m	6.12	0.87
熔池深度, $h$ /m	1.80	0.26
枪高, $H$ /m	1.8 ~ 2.8	0.26 ~ 0.40
气体流量, $Q$ /( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	39 000 ~ 58 000	60 ~ 90

注:模型:原型 = 1:7

表 2 模型氧枪喷头的结构参数

Table 2 Structure parameters of model oxygen lance nozzle

项目	喷头喉口直径 $d_t$ /mm	喷头出口直径 $d_e$ /mm	拉瓦尔夹角 $\alpha$ /°
传统氧枪模型	5.96	7.94	14
新型氧枪模型	大孔	6.8	9.06
	小孔	4.99	6.64

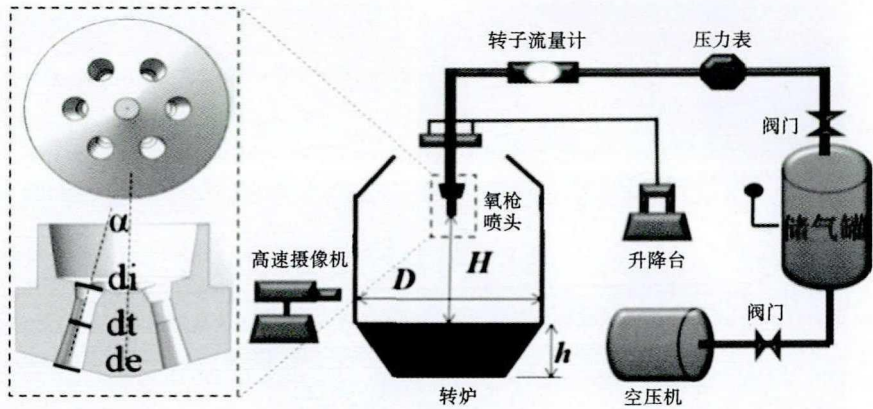


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

地显示冲击坑的轮廓,通过将最小亮度/对比度和最大亮度/对比度分别调整为 100 和 250 来锐化气液界面。应注意的是,在冲击坑内部形成的表面波会对图像中的冲击坑的宽度和深度的测量造成干扰。为了减小测量误差,计算了 6 幅图像的平均值。

用电导探针测量电导率的变化。探头放置在距离转炉底部 50 mm 处,靠近炉壁固定。探头输出输入电导仪,0 ~ 1 V 直流输出输入计算机接口。喷吹稳定后,通过靠近壁面的注射器注射 200 ml 饱和 KCl 溶液,注射器位于探针对面并靠近炉壁处。以 0.5 s 的间隔记录溶液的电导率。本实验中混匀时间定义为瞬时示踪剂浓度稳定在接近炉内溶液最终示踪剂浓度的  $\pm 5\%$  偏差所需的时间。

## 2 结果与讨论

超音速射流冲击熔池时,会在熔池表面形成冲击坑。为了获得最佳的吹炼条件,需要合理的冲击坑形态。一般来说,较深的冲击坑深度和较大冲击直径可以改善冲击区的精炼条件。冲击坑的形状和尺寸取决于氧枪喷头出口处的马赫数、喷头出口间距、喷头倾角和喷头流量等。这些参数对腔体形状的影响在文献[2,7]中都有报道。然而,大多数的研究都是基于传统的氧枪。很少有学者关注双结构氧枪形成的冲击坑形态。

图 2 比较了传统氧枪和双结构氧枪在不同流量下形成的冲击坑图像。从图 2 看出,在不同流量下,固定喷枪高度  $H = 30 de$  (对于新型喷头,  $de$  取大孔直径)时,传统氧枪可以形成一个深而完整的空腔,但双结构氧枪形成的空腔是分散的,且深浅交替排列分布。双结构氧枪形成的冲击坑的相互作用小于传统氧枪形成的冲击坑的相互作用。从射流聚并的

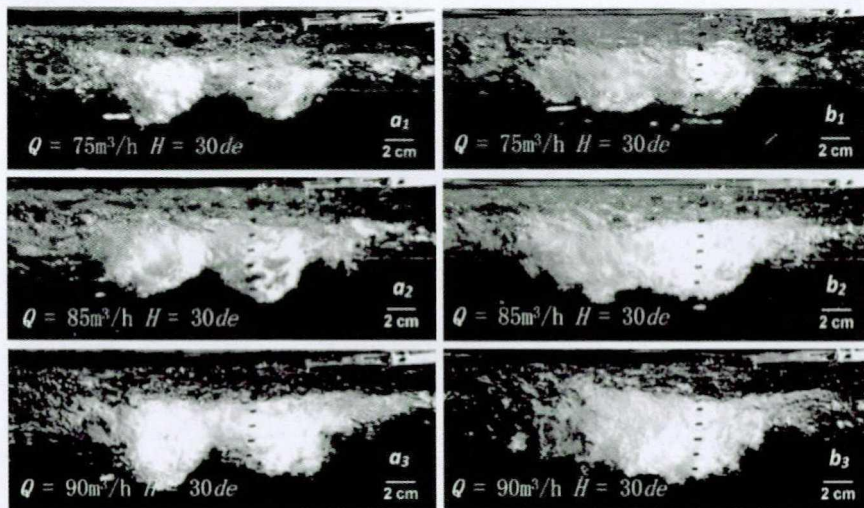


图 2 双结构氧枪(左)和传统氧枪(右)形成的冲击坑形貌

Fig. 2 Morphology of cavity formed by innovated lance (left) and traditional lance (right)

角度可以解释上述现象。对于多喷头氧枪,每个喷头的中心逐渐偏离喷头轴。随着射流的推进,它们在由喷管轴和喷管轴组成的平面上形成一条曲线,向喷管轴会聚,最终趋于统一。这种行为被称为射流聚并<sup>[8]</sup>。双结构氧枪具有喷头间距大、倾角大的特点,因此延迟了射流的聚并和射流边界的混合。

图 3 为传统氧枪喷头和双结构氧枪喷头射流与熔池之间作用产生的冲击坑深度随枪位、顶吹气体流量的变化关系,其中双结构氧枪的冲击坑深度按照大孔的深度进行测量。可以看出,冲击坑的深度随枪位的降低和流量的增大而增大。降低枪位,射流的流动距离变短,射流冲击熔池表面的速度变快,射流冲击熔池产生的冲击坑深度变大。随着气体流量的增加,流股在喷头出口处获得较大的动量。射

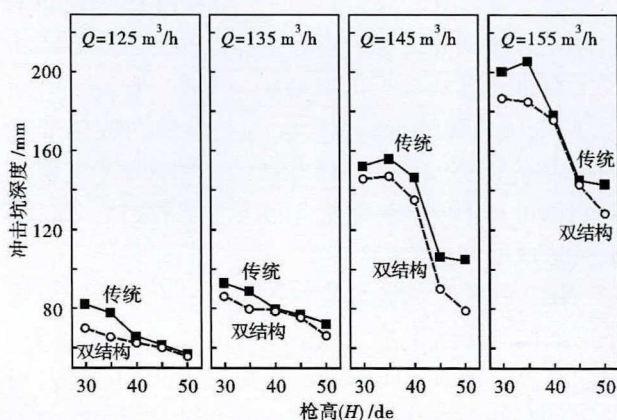


图 3 不同枪高、不同流量下传统与双结构氧枪冲击坑深度对比

Fig. 3 Comparison between cavity depths with traditional and innovated lance at different lance heights and flow rates

流的动能下降缓慢,射流冲击熔池的速度较高。当射流到达熔池表面时,冲击能量高,冲击坑深度大。对比传统的氧枪喷头和双结构氧枪喷头,二者所形成的冲击坑的深度差别不大,设计流量下(模型流量 145 m<sup>3</sup>/h,原型流量 51 000 m<sup>3</sup>/h)双结构氧枪喷头的最大熔池深度为 147 mm,对应的枪高为 H = 35 de。

图 4 为传统氧枪喷头和双结构氧枪喷头射流与熔池之间作用产生的冲击坑直径随枪位、顶吹气体流量的变化关系。

可以发现,射流流量一定时,冲击坑直径随枪位升高而增大,原因在于射流径向膨胀随轴向距离增大而增大,从而导致冲击面积增大。固定枪高时,冲击坑直径随流量的增大而增大,表现为动量的增大、射流速度的缓慢衰减和冲击面积的增大。对比传统氧枪和双结构氧枪,在相同枪位和流量下,双结构氧枪喷头的冲击面积优势明显。分析原因在于双结构氧枪的两组喷头由于流量和倾角的不同而交错排列。射流流股融合前,变角度氧枪的倾角相差较大,射流分布范围较大。射流流股的独立性较好。随着流股融合距离的增加,流股的衰减速度变慢,从而形成的冲击坑面积增大。在设计流量下,与传统氧枪喷头相比,双结构氧枪喷头的双流量、双角度的特性使得其在不同枪高下的冲击坑直径平均增加了 22%。

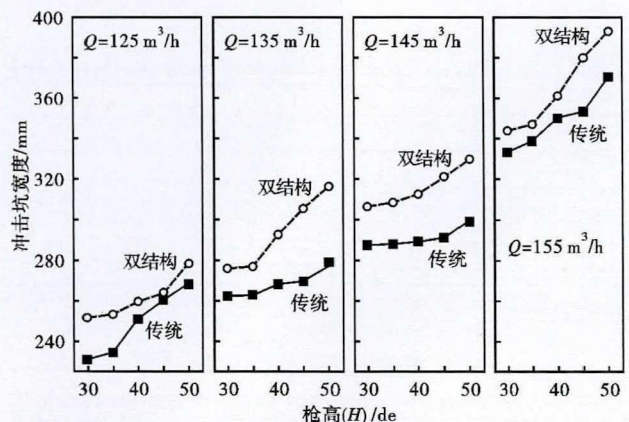


图 4 不同枪高、不同流量下双结构与传统氧枪冲击坑宽度对比

Fig. 4 Comparison between cavity diameters with innovated and traditional lance at different lance heights and flow rates

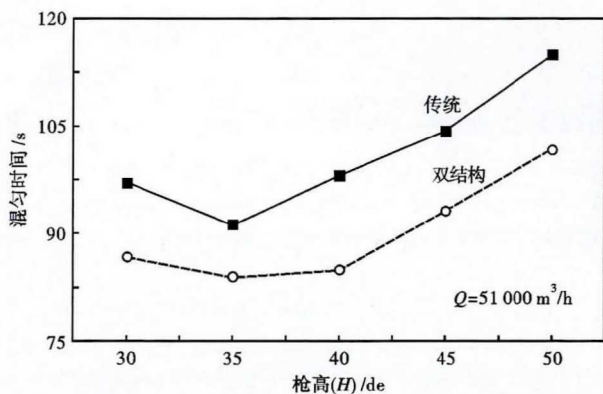


图 5 不同枪高下传统和双结构氧枪射流对熔池的混匀时间对比

Fig. 5 Comparison between mixing time of pool with traditional and innovated lance jet at different lance heights

混匀时间表示射流对熔池的搅拌能力。混匀时间越短,搅拌强度越大,熔池中的化学反应越迅速,吹炼时间得以缩短。图 5 显示了当气体流量为 145 m<sup>3</sup>/h 时,传统的氧枪喷头和双结构氧枪喷头的混匀时间随枪位的变化,可以看出,在固定喷吹流量下,传统氧枪和双结构氧枪的混匀时间均随枪位升高先减小后增加。这是因为枪位升高,射流动能衰减增大、射流冲击熔池的冲击能量变小,弱化了熔池的搅拌力,从而延长了射流对熔池的混匀时间,而低枪位下由于底吹的存在,造成了顶底复吹下的气流之间的相互干扰。

对比传统结构氧枪喷头,双结构氧枪喷头能够明显缩短对熔池的混合时间,在枪高 35 ~ 40 de,双结构氧枪喷头取得对熔池的最佳的搅拌效果。

### 3 结论

(1) 双结构氧枪喷头与传统氧枪喷头作用于熔

池形成的冲击坑深度差别不大,设计流量下双结构氧枪喷头形成的最大冲击坑深度为 147 mm,对应枪高为  $H = 35 de$ 。

(2) 冲击坑宽度随枪位和流量的增大而增大。在相同流量不同枪高,对比传统氧枪喷头,双结构氧枪喷头射流与熔池的冲击坑直径平均增加 22%。

(3) 相同工况下,双结构氧枪对熔池的混匀时间比传统氧枪的明显缩短。设计流量,双结构氧枪喷头对熔池的最佳搅拌效果发生在枪位为 35 ~ 40 de。

国家重点研发项目(批准号 2017YFC0805100)和辽宁省科技厅重点项目(批准号 2018307003)的资助。

### 参考文献

- [1] 刘昌兵,杨文远,陈大慈,等. 氧枪喷头在使用中射流变化及其对冶炼的影响[J]. 钢铁,1996,31(3):21-26.
- [2] 刘志昌. 氧枪的研究和设计[J]. 钢铁,1988,23(8):46-50.
- [3] 王 勇,杨宁川,王承宽. 我国转炉炼钢的现状和发展[J]. 特殊钢,2005,26(4):1-5.
- [4] 杨文远,冯 超,王明林,等. 大型转炉高供氧强度吹炼的水模实验[J]. 钢铁研究学报,2017,29(10):807-815.
- [5] 包丽明,刘 坤,吕国成. 180 t 转炉聚合射流流场的水力学模型的实验研究[J]. 特殊钢,2014,35(3):11-14.
- [6] 朱苗勇,萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,1998:123.
- [7] 杨文远. 转炉供氧参数对喷溅的影响[A]. 中国金属学会. 2012 年全国炼钢-连铸生产技术会论文集(上)[C]. 北京:中国金属学会,2012:7.
- [8] 邓丽琴,李明明,李 强,等. 炼钢转炉喷溅行为的数值模拟[J]. 材料与冶金学报,2016,15(1):25-32.

张国新(1996-),男,硕士生,2018 年山西大学(本科)毕业,冶金能源高效利用研究。E-mail:zhang4577717@sina.com

收稿日期:2019-10-25

## “讲文明树新风”公益广告

绿化环境

从我做起