

COMI 转炉工艺的二次燃烧氧枪射流运动特性研究

刘福海^{1,2}, 程钰², 冯超², 董凯², 朱荣^{1,2}

1. 北京科技大学国家材料服役安全科学中心, 北京 100083; 2. 北京科技大学碳中和创新研究院, 北京 100083

The Flow Field of Postcombustion Oxygen Multi-jets for COMI Technology in Steelmaking Process

Liu Fuhai^{1,2}, Cheng Yu², Feng Chao², Dong Kai², Zhu Rong^{1,2}

(1. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Innovation Research Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

1. 前言

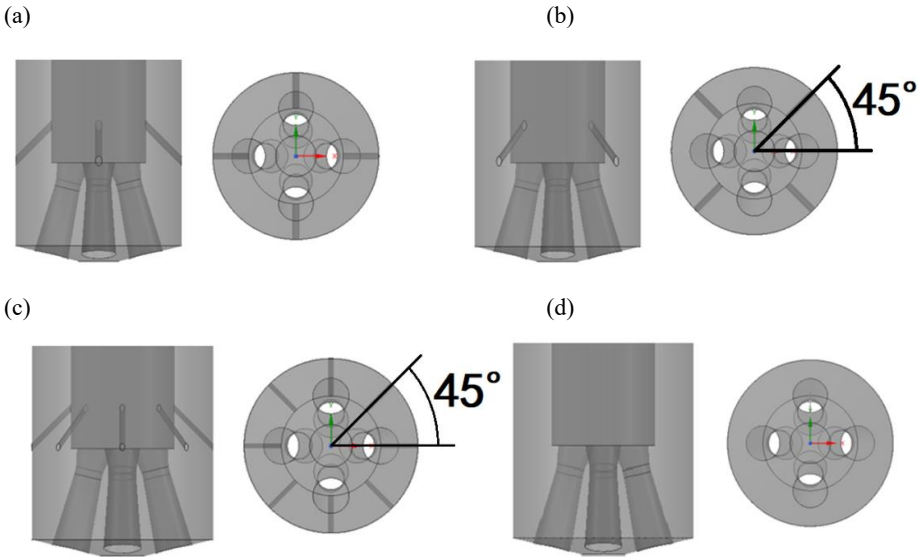
受钢铁行业受碳减排与雾霾治理等政策要求, 国内冶金研究团队提出了转炉 COMI(CO₂ and O₂ Mixing Injection)绿色冶炼新技术, 以满足转炉冶炼过程的节能环保与经济效益需求。大量实验室研究与工业试验成果表明, 该技术在实现了 CO₂ 的废气资源化利用的基础上, 可有效降低粉尘固废颗粒污染、减少 CO₂ 排放、提高熔池脱磷效率。然而, 面对熔池物理热与化学热不足的工况条件时, 应额外添加的补热剂或配合二次燃烧技术以平衡 CO₂ 反应过程中的热消耗需求, 以实现转炉终点的温度命中。^[1-3]。

目前, 国内外针对二次燃烧技术研究, 主要围绕常规“顶吹供氧-底吹供气”的转炉冶炼工艺^[4-7]。对转炉“COMI+二次燃烧”技术所涉及的氧枪结构参数与射流运动特性研究有待进一步完善。因此, 本研究重点分析了特定二氧化碳含量下, 不同环境温度与二次氧枪喷吹设计对高速混合射流的作用特点, 并介绍了射流速度衰减规律与理论冲击凹坑形貌特点。为确定转炉 COMI 工艺下二次燃烧氧枪结构的优选参数, 提供了基础研究数据了分析结论。

本研究分析了转炉 COMI 工艺下二次燃烧氧枪与传统超音速氧枪流场分布特点的差异性, 确定转炉冶金用二次燃烧氧枪结构的优选参数, 本研究设计了三种典型的二次燃烧布置模型, 通过数值模拟方法分析二次燃烧射流的边界速度与氧气浓度长度, 及不同枪位下主氧流股平均速度、氧气浓度与冲击凹坑尺寸, 解析不同二次燃烧布置模式对复合高速氧气流股的作用特点。

2. 二次燃烧氧枪结构

本研究氧枪参数如图 1 所示, 研究范围内主氧拉瓦尔喷管结构参数一致, 并在该结构基础上设计三种典型结构模式的二次燃烧氧枪。本研究所采用的主氧拉瓦尔喷管设计马赫数均为 2.0, 其喉口及出口直径分别为 39.5mm 及 51.3mm, 设计流量为 24000Nm³·h⁻¹, 主氧喷管夹角为 13.5°。二次射流总流量为主氧射流总流量的 10%, 即 2400Nm³·h⁻¹, 设计马赫数为 1.0, 竖直轴向夹角为 45°, 且二次射流布置模式均为同圆周等间距布置模式。同时, 主氧射流与二次射流喷管均采用一维等熵流理论进行设计计算, 不同二次射流喷管结构参数如表 1 所示。



(a) 4 孔映射式二次燃烧氧枪；(b) 4 孔交错式二次燃烧氧枪；(c) 8 孔映射式二次燃烧氧枪；(d) 传统超音速氧枪

图 1 不同氧枪结构三维模型示意图

Fig.1 The oxygen lance structure

表 1 二次射流喷管结构参数

Table 1 The designed parameters of the secondary nozzle

项目	单孔设计流量	二次喷管间夹角	内径（φ）
4 孔映射式二次燃烧氧枪	600Nm ³ ·h ⁻¹	45°	12.4mm
4 孔交错式二次燃烧氧枪	600Nm ³ ·h ⁻¹	45°	12.4mm
8 孔映射式二次燃烧氧枪	300Nm ³ ·h ⁻¹	45°	8.8mm

3. 数值模拟模型

表 2 数值模拟模型边界条件

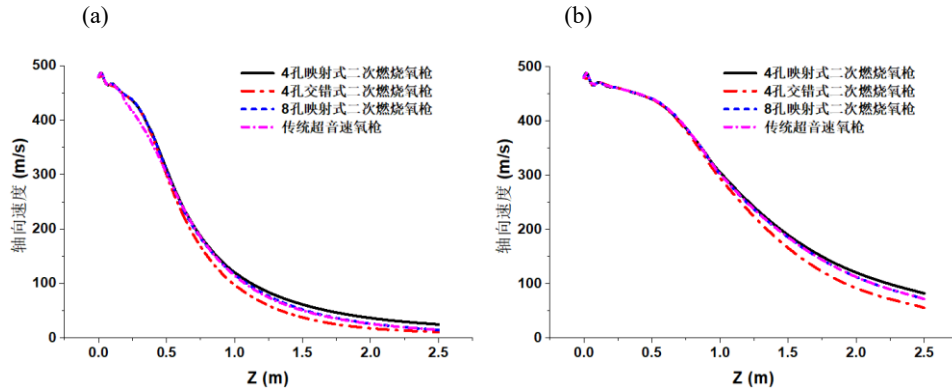
Table 2 Boundary conditions

名称	项目	数值
主氧喷管入口	总质量流量 (kg/s)	2.426
	初始压力 (MPa)	0.814
	气体温度 (K)	300
	气体质量分数 (%)	O ₂ =95/CO ₂ =5
二次射流喷管入口	总质量流量 (kg/s)	0.2426
	初始压力 (MPa)	0.814
	气体温度 (K)	300
	气体质量分数 (%)	O ₂ =95/CO ₂ =5
计算域出口	环境静压 (MPa)	0.101
	气体质量分数 (%)	N ₂ =79/O ₂ =21
	环境温度(K)	300/1700

考虑到二次燃烧氧枪具有射流运动对称性，本文建立了三维等尺寸四分式对称计算仿真模型。模型计算过程中，计算域初始状态充满静止的空气，主氧拉瓦尔喷管与二次射流喷管中无任何气体流动。同时，

各项气体密度均采用理想气体模型计算，数值模拟计算模型采用压力基计算方法，结合稳态计算模式求解雷诺时均方程。数值模拟计算过程中模型边界条件与气相物化参数如表2所示。

4. 结果与分析



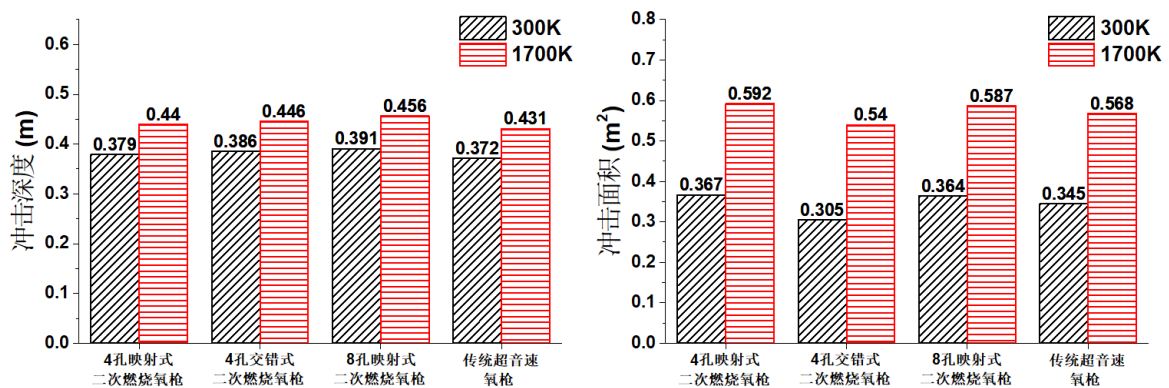
(a)环境温度=300K; (b)环境温度=1700K

图2 不同氧枪结构主氧喷管轴线位置速度分布图

Fig. 2 The main oxygen axial velocity profiles using various postcombustion structures at centerline of the Laval nozzle

如图2所示，多流股氧气射流存在因气流高速流动导致局部静压下降，进而形成静压差诱发射流发生向氧枪中轴线偏转现象。由于二次氧气射流的存在，主氧流股外侧环境流股流速提高，抑制了主氧高速射流与外侧环境流股流间速度差，该作用（速度差抑制作用）可降低主氧射流的速度衰减程度，在保持主氧射流动能方面起到正面的作用；同时，主氧流股外侧环境流股流速的提高降低了当地环境静压，导致主氧流股向外侧膨胀趋势提高，该作用（表面积提升作用）进一步增大了主氧高速射流与低速环境流股的接触面积与掺混强度，该现象加剧了主氧射流的速度衰减程度，在保持主氧射流动能方面起到负面的作用。因此，当二次射流的速度差抑制作用大于表面积提升作用时，二次燃烧氧枪的主氧射流速度大于传统超音速氧枪的主氧射流速度，反之亦然。

如上文所述，在主氧射流、二次射流与环境气氛的共同作用下，射流迹线发生偏转，导致单纯用沿喷管中轴线的速度分布结果难以全面评价主氧射流冲击搅拌效果。因此，本研究进一步研究了典型枪位（1.45m）下，不同氧枪结构与环境温度条件的射流理论冲击深度与冲击面积分布情况。



(a)冲击深度; (b)冲击面积

图3 不同氧枪结构射流冲击深度与冲击面积变化趋势图

Fig. 3 The impaction area and depth using various postcombustion structures at room and high ambient temperature

研究表明,不同氧枪结构熔池理论冲击深度大小排序为:8孔映射式二次燃烧氧枪>4孔交错式二次燃烧氧枪>4孔映射式二次燃烧氧枪>传统超音速氧枪;不同氧枪结构熔池理论冲击面积大小排序为:4孔映射式二次燃烧氧枪>8孔映射式二次燃烧氧枪>传统超音速氧枪>4孔交错式二次燃烧氧枪。因此,4孔交错式二次燃烧氧枪虽然在一定幅度内提升了熔池冲击深度,但其冲击面积则大幅下降,不利于熔池高效化渣。同时,4孔映射式与8孔映射式二次燃烧氧枪的理论冲击深度与冲击面积均大于传统超音速氧枪,表明4孔映射式与8孔映射式二次燃烧氧枪更能综合提升主氧射流冲击搅拌效果。

随着射流汇聚现象的发生氧气射流表面积也随之发生变化,考虑到二次燃烧过程主要发生在氧气射流表面。为进一步分析不同氧枪结构对二次燃烧效应的影响特点,表3与表4展示了不同氧枪结构与环境温度条件下,多组氧浓度等值面的体积分布特点。

表 3 室温环境（300K）下不同氧枪结构的氧浓度等值面体积

Table 3 The iso-surface of oxygen content volume formed by various oxygen lance structures at ambient temperature of 300K

氧浓度 (mass%)	4 孔映射式二次 燃烧氧枪	4 孔交错式二次 燃烧氧枪	8 孔映射式二次 燃烧氧枪	传统超音速氧枪
40	0.020 m ³	0.022 m ³	0.029 m ³	0.018 m ³
35	0.097 m ³	0.106 m ³	0.114 m ³	0.090 m ³
30	0.204 m ³	0.199 m ³	0.201 m ³	0.187 m ³

表 4 高温环境（1700K）下不同氧枪结构的氧浓度等值面体积

Table 4 The iso-surface of oxygen content volume formed by various oxygen lance structures at ambient temperature of 1700K

氧浓度 (mass%)	4 孔映射式二次 燃烧氧枪	4 孔交错式二次 燃烧氧枪	8 孔映射式二次 燃烧氧枪	传统超音速氧枪
40	0.224 m ³	0.223 m ³	0.235 m ³	0.206 m ³
35	0.307 m ³	0.297 m ³	0.305 m ³	0.273 m ³
30	0.421 m ³	0.408 m ³	0.401 m ³	0.348 m ³

研究表明不同工况下二次燃烧氧枪的氧浓度等值面体积均大于传统超音速氧枪,证明本研究所设计二次燃烧氧枪均可提升转炉二次燃烧效果,增大转炉炉膛温度,实现提高转炉废钢比的目的。同时,室温环境下二次燃烧氧枪的氧浓度等值面平均体积是传统超音速氧枪的1.12倍;高温环境下二次燃烧氧枪的氧浓度等值面平均体积是传统超音速氧枪的1.14倍。因此,环境温度的提高可小幅强化二次燃烧氧枪的工作效率。

在氧浓度为 40mass%时,室温与高温环境下,8 孔映射式二次燃烧氧枪形成的氧浓度等值面体积最大。但在氧浓度下降到 30mass%后,室温与高温环境下,8 孔映射式二次燃烧氧枪形成的氧浓度等值面体积最小,而 4 孔映射式二次燃烧氧枪形成的氧浓度等值面体积最大。因此,当二次燃烧主要发生高氧浓度条件下,8 孔映射式二次燃烧氧枪的工作效率最大;当二次燃烧主要发生在低氧浓度条件下,4 孔映射式二次燃烧氧枪的工作效率最大。

5. 结论

(1)虽然4孔交错式二次燃烧氧枪可有效提升熔池冲击深度,但是其冲击面积甚至低于传统超音速氧枪,导致该结构严重降低了熔池化渣效率;

(2)4孔与8孔映射式二次燃烧氧枪形成的冲击深度与冲击面积均大于传统超音速氧枪,表明4孔与8孔映射式二次燃烧氧枪可综合提升主氧射流冲击搅拌效果;

(3)室温环境与高温环境下二次燃烧氧枪的氧浓度等值面平均体积分别是传统超音速氧枪的1.12和1.14倍,表明高温环境可小幅提高二次燃烧氧枪的工作效率;

(4)当二次燃烧主要发生在高氧浓度条件时，8 孔映射式二次燃烧氧枪的炉膛温度提升效率最优。当二次燃烧主要发生在低氧浓度条件时，4 孔映射式二次燃烧氧枪的炉膛温度提升效率最优。

参考文献

- [1] 董建锋, 魏光升, 朱荣, 等. CO₂ 顶吹比例对转炉终点控制的影响[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1476-1482.
- [2] 朱荣, 王雪亮, 刘润藻. 二氧化碳在钢铁冶金流程应用研究现状与展望[J]. 中国冶金, 2017, 27(4): 1-4+10.
- [3] Liu C, Zheng S, and Zhu M. Effect of lance design on jet characteristics in 250t converter[J]. Steel Res. Int, 2021, 92, 2100677.
- [4] 郑淑国, 朱苗勇. 转炉二次燃烧氧枪技术研究进展[J]. 鞍钢技术, 2021, 432(6): 1-4.
- [5] Oda N, Koseki S, Uchida Y, et al. Behavior of jet from nozzle set on side wall of lance[J]. ISIJ International, 2021, 61(6): 1794-1800.
- [6] Garajaua F S, Guerraa M S L, Maia B T, et al. Effects of post combustion temperature on the wear of the supersonic nozzles in BOF lance tip[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96(2): 175-185.
- [7] Nakajima H, Anezaki S, Tozaki Y, et al. Improvement of the heat balance in the blowing process[J]. Transactions ISIJ, 1985, 26(1): 40-47.