

· 试验研究 ·

180 t 转炉超音速射流和聚合射流与炼钢熔池作用的水模型实验研究

吕国成¹ 包丽明¹ 刘坤²

(1 吉林电子信息职业技术学院, 吉林 132021; 2 辽宁科技大学材冶学院, 鞍山 114044)

摘要 以鞍钢180 t顶底复吹转炉为原型,设计超音速氧枪喷头进行了复吹转炉传统射流与聚合射流对熔池相互作用的水力学模型实验。超音速射流水模实验确定最佳的均混时间为12.6 s;在保持最佳顶吹气体流量的条件下,以降低枪位模拟聚合射流对熔池的相互作用。结果表明:当氧枪枪位下降到40 mm时,均混时间为11.8 s,这说明聚合射流完全可以达到传统射流对熔池的搅拌效果,可取消底吹系统,简化转炉设备和提高转炉炉龄。

关键词 180 t顶底复吹转炉 超音速射流 聚合射流 均混时间 气体流量 氧枪枪位 水模实验

Hydraulic Model Experimental Study on Mutual Interaction of Supersonic jet and Coherent Jet to Bath of 180 t BOF

Lü Guocheng¹, Bao Liming¹ and Liu Kun²

(1 Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132021;
2 Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044)

Abstract Anshan Iron and Steel Company 180 t top-bottom combined blowing converter is considered as prototype in this article, the hydraulic model tests of traditional jet and coherent jet to bath were carried on by designing supersonic jet oxygen lance. The best mixed time was 12.6 s which was obtained by traditional jet water model experiment. The interaction between coherent jet and bath was simulated by reducing oxygen lance position, which was carried under the condition of keeping the best top blown gas flow rate is constant. The results shown that: the mixing time was 11.8 s when the lance position was reduced to 40 mm. This showed that the coherent jet flow oxygen lance may achieve the result of top-bottom converter stirring effect. In that case, the bottom blowing system of converter could be canceled, the converter equipment can be simplified, and the converter lining life can be improved.

Material Index 180 t Top and Bottom Combined Blowing Converter, Supersonic Jet, Coherent Jet, Mixed Time, Flow Rate of Gas, Oxygen Lance Position, Hydraulic Model Experiment

氧气经过氧枪喷头流出,形成了氧射流,氧射流经过高温炉气,冲击在铁水熔池表面上,或穿入熔池,引起了熔池铁水运动,起机械搅拌作用^[1-2]。均匀混合时间^[3-4]是吹气设备用来表示其熔池内混合特性的一个重要参数,根据鞍钢180 t顶底复吹转炉的实际生产情况,为了达到冶炼所要求的均混时间需要确定最佳吹炼工艺参数,即最佳的顶吹气体流量和最佳的氧枪枪位,进行了复吹转炉内传统射流与熔池相互作用的模型实验。以降低枪位模拟聚合射流氧枪的冶炼效果,进行了聚合射流与熔池相互作用的模型实验。通过实验结果比较,在保持相同气体流量的条件下,聚合射流可达到顶底复吹的搅拌效果,取消底吹系统,简化转炉设备,提高转炉炉龄,可带来炼钢技术的变革。

1 实验装置与实验条件

1.1 实验装置

本实验按照鞍钢180 t复吹转炉的实际情况,实验装置按几何相似比10:1缩小制成,具体装置如图1所示:

鞍钢180 t转炉的结构及操作参数如表1所示。

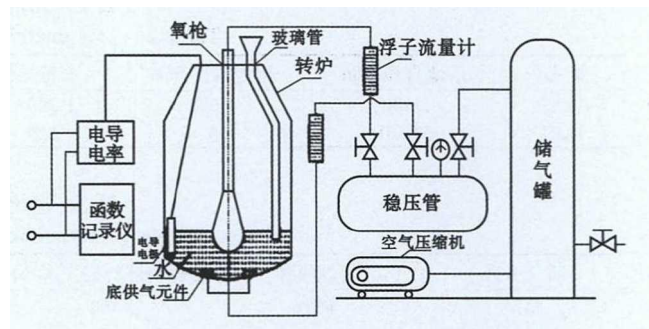


图1 鞍钢180 t复吹转炉模拟实验装置

Fig.1 Simulated experiment device for an 180 t combined blowing converter at Anshan Steel

表 1 复吹转炉的结构和操作参数

Table 1 Structural and operating parameters of combined blowing converter

顶枪枪位/mm	顶枪流量/(m ³ ·h ⁻¹)	顶枪压/MPa	底枪流量/(m ³ ·h ⁻¹)	熔池直径/mm	熔池深度/mm
1 200~2 200	3 200	0.8~1.2	480	5 150	1 680

1.2 实验条件

1.2.1 实验用氧枪喷头的设计

本实验采用的是超音速射流氧枪(喷孔出口马赫数 $Ma = 2$)模拟。实验使用氧枪喷头结构尺寸设计如下:

根据相似理论可知实验的相似准数为修正的 Froude 准数^[5],通过换算可得到原型和模型流量间的关系为:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{P_{gp}}{P_{gm}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{P_{lm}}{P_{lp}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: Q_m, Q_p -模型和原型的气体流量/(m³·h⁻¹);

L_m, L_p -模型与原型的特征尺寸/m;

P_{gm}, P_{gp} -模型与原型的气体密度/(kg·m⁻³);

P_{lm}, P_{lp} -模型与原型的液体密度/(kg·m⁻³)。

实验采用的几何相似比为 10:1,原型的气体流量 $Q_p = 32\ 000\ \text{m}^3/\text{h} = 11.466\ 7\ \text{kg/s}$,将有关参数代入上式得到模型的气体流量 $Q_m = 40.27\ \text{m}^3/\text{s} = 0.144\ 3\ \text{kg/s}$ 。

根据流量的计算公式^[6]来设计氧枪的尺寸:

$$Q_m = 0.040\ 41 \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot F_* \quad (2)$$

由工艺要求出口处 $Ma = 2$,查等熵流表,有 $P/P_0 = 0.127\ 8$,则: $P_0 = 0.101\ 325/0.127\ 8 = 0.796\ \text{MPa}$, $T_0 = 298\ \text{K}$,所以喉口面积:

$$F_* = \frac{Q_m \cdot \sqrt{T_0}}{0.040\ 41 P_0} = \frac{0.144\ 3 \times \sqrt{298}}{0.040\ 41 \times 0.796 \times 10^6} =$$

$$7.80\ \text{mm}^2 \quad (3)$$

从而喉口直径为:

$$d_* = \sqrt{\frac{4F_*}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 7.80}{3.14}} = 3.15\ \text{mm} \quad (4)$$

由 $Ma = 2$,查表有 $F_{\text{出}}/F_* = 1.688$,故 $F_{\text{出}} = 13.166\ 4\ \text{mm}^2$,则出口直径:

$$d_{\text{出}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{出}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 13.166\ 4}{3.14}} = 4.1\ \text{mm} \quad (5)$$

由于该尺寸较小,若做成四孔的氧枪喷头,加工比较困难,故该实验在能保证模型流量的基础上,将喷头制作成单孔形式,也能保证基本的几何相似。

1.2.2 实验用模型几何尺寸设计

根据几何相似,可计算出模型的几何尺寸。以熔池直径为例:对于原型 $d_p = 5\ 150\ \text{mm}$,则有:

$$d_m = \frac{d_p}{L} = \frac{5\ 150}{10} = 515\ \text{mm} \quad (6)$$

用同样的方法可计算出模型的其它几何尺寸,将计算结果列入表 2 中。

1.2.3 模型供气参数确定

顶吹氧枪实际流量为 $32\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$,底吹流量为 $480\ \text{m}^3/\text{h}$,本实验中分别采用 $30\ 000 \sim 35\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 和 $200 \sim 650\ \text{m}^3/\text{h}$ 作为模拟的实际流量范围。由式(1)以及流体的物理参数值得到流体动力相似的结果如表 3 所示。

2 水模实验

根据鞍钢 180 t 复吹转炉的实际生产情况,在

表 2 几何相似的结果

Table 2 Geometrical similarity's results

类别	熔池直径/mm	熔池深度/mm	氧枪枪位/mm	氧枪孔数	氧枪喉口直径/mm	氧枪出口直径/mm
原型	5 150	1 688	1 200~2 200	4	34	44.2
模型	515.0	168.8	120~220	1	3.15	4.10

表 3 动力相似的结果

Table 3 Dynamic similarity's results

吹气方式	熔池液体	液体密度/(kg·m ⁻³)	喷吹气体	气体密度/(kg·m ⁻³)	气体流量/(m ³ ·h ⁻¹)
原型	钢液	7 000	氧气(顶吹)	1.43	顶吹:30 000~35 000
			氮气(底吹)	1.25	底吹:200~650
模型	水	1 000	空气	1.29	顶吹:38~42 底吹:0.55~0.75

相似理论的指导下,分别进行了复吹转炉超音速射流和聚合射流与炼钢熔池相互作用的水力学模型实验。

2.1 复吹转炉超音速射流水模实验

2.1.1 实验方案

本实验是在保持最佳的底吹工艺参数^[7]下,通过改变顶吹的气体流量及枪位高度来进行的,主要考察复吹工艺参数对均混时间的影响。具体的实验方案如下:

底吹:气体流量 $0.70 \text{ m}^3/\text{h}$,底枪的位置 $0.3 D$ (即喷嘴所在同心圆直径与转炉炉体熔池直径之比为 0.3)。

顶吹:根据表3的动力相似结果,气体流量采用 $38 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $39 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $41 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $42 \text{ m}^3/\text{h}$;根据表2的几何相似结果,枪位值采用 130 mm 、 150 mm 、 170 mm 、 190 mm 、 210 mm 。

2.1.2 实验结果及分析

复吹转炉传统射流水模实验进行了不同氧枪枪位和不同顶吹气体流量对熔池均混时间影响的测量,将实验中测得的数据绘成图表,如图2所示,从图2中可以直观地得出均匀混合时间同氧枪枪位和顶吹气体流量的关系。

从图2(a)氧枪枪位对熔池均混时间的影响可以看出,随枪位的改变熔池的均混时间都能呈现出波动的趋势,近似于“V”字形。不同的顶吹流量情况下,均混时间随着枪位的升高先减少后增加。除流量为 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 的情况外,其余顶枪流量下的均混时间在枪位为 150 mm 处达到最低值。随着枪位的继续升高,均混时间呈现出明显增加趋势,枪

位到达 170 mm 后,均混时间随枪位的升高变化不明显。流量为 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时均混时间的最低点出现在枪位 130 mm 处,数值为 16.4 s ,但和 150 mm 枪位处的均混时间相差不大。可以看出熔池的最佳冶炼氧枪枪位为 150 mm 。

从图2(b)顶吹气体流量对均混时间的影响可以看出,枪位为 210 mm 和 130 mm 条件下熔池的均混时间相对较长,其他枪位条件下均混时间随流量出现了上下波动的“W”字形,即随着流量的增加,均混时间出现了最低值,而后又有增加;除枪位为 130 mm 外,其余枪位下的均混时间在流量为 $39 \text{ m}^3/\text{h}$ 时达到最佳值。当流量 $\geq 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,对于不同的枪位,均混时间上下波动不大,说明当流量很大时,枪位对均混时间的影响已不显著;可以得出复吹转炉条件下的最佳顶吹气体流量是 $39 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

从以上分析可以看出,复吹转炉传统喷吹工艺的顶吹气体流量和氧枪枪位对均混时间都有一定的影响。同一流量下,不同枪位影响均混时间的最大差为 12 s ,平均差为 6.4 s ;同一枪位下,不同顶吹气体流量影响均混时间的最大差为 11.6 s ,平均差为 5.3 s 。复吹转炉的最佳吹炼工艺参数是:枪位为 150 mm ,顶吹气体流量是 $39 \text{ m}^3/\text{h}$,相当于实际枪位 1500 mm ,流量 $30800 \text{ m}^3/\text{h}$,此时的均混时间为 12.6 s 。实际冶炼过程中,若要增强熔池的搅拌效果,主要应对气体流量与枪位高度进行控制。

2.2 聚合射流水模实验

2.2.1 实验的理论依据

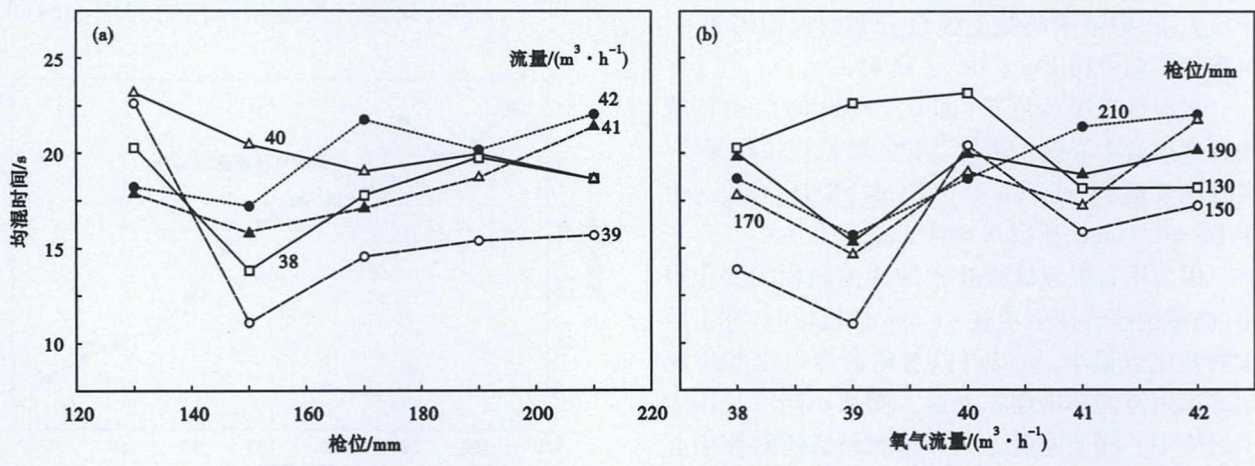


图2 顶吹氧枪枪位(a)和顶吹气体流量(b)对熔池均混时间的影响

Fig. 2 Influence of top blowing oxygen lance level (a) and top gas flow rate (b) on bath uniform mixing time

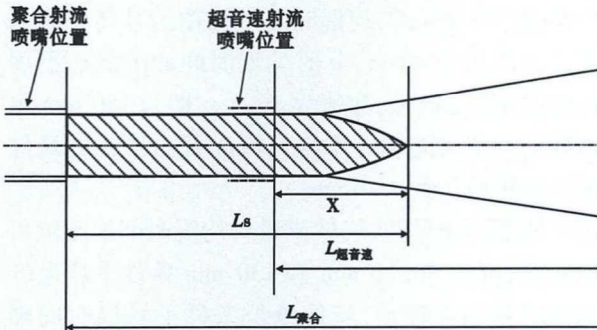


图 3 以模型的超音速射流模拟原型的聚合射流示意图
Fig. 3 Diagrammatic sketch of prototype's coherent jet simulated by model's supersonic jet

以往采用枪位修正的方法^[8],以亚音速氧枪模拟超音速射流氧枪,本实验以超音速射流氧枪模拟聚合射流氧枪,避免了氧枪枪位的修正,其结构如图 3 所示:由图 3 可以看出有如下的关系式成立:

$$L_{\text{聚}} = L_{\text{超}} + L_s - X \quad (7)$$

式中: $L_{\text{聚}}$ - 聚合射流氧枪枪位/m;

$L_{\text{超}}$ - 传统超音速射流氧枪枪位/m;

L_s - 聚合射流氧枪超音速区长度/m;

X - 传统射流氧枪超音速区长度/m。

由此可以明显看出,聚合射流与传统的超音速射流相比,多了一个射流核心区^[9],可以保证射流在较长的距离内保持着出口的速度,即聚合射流在理论上可以达到顶底复吹的搅拌效果,加强熔池的搅拌,取消底吹系统。

因为顶底复吹转炉的水力学模型实验的最佳枪位是 150 mm,而氧枪的出口直径 $De = 4.1 \text{ mm}$,则 $X / De = 36.58$,当主孔压力为 0.796 MPa,伴随流压力为 0.20 MPa,则由副孔伴随流在不同的滞止压力下,射流中心线上速度分布的模拟结果^[10]可查该实验取得 $U_m / U_e = 0.85$ 。

在设计工况条件下(即 $n = 1.00$ 时),由传统超音速射流中心线上速度变化的数值模拟结果^[10]可查该实验当 $U_m / U_e = 0.85$ 时, $X / De = 10$ 。由于 $De = 4.1 \text{ mm}$,所以 $X = 41 \text{ mm}$ 。

因为聚合射流氧枪技术的冲击面积的变化很小,而传统超音速射流在 41 mm 低枪位时,冲击面积的变化也很小,所以可以忽略聚合射流和传统超音速射流的冲击面积差距。则从不同滞止压力下射流中心线上速度分布和传统超音速射流中心线上速度变化的数值模拟结果^[10]推导可知,当传统超音速射流的枪位到达 41 mm 时,与聚合射流氧枪的枪位在 150 mm 时的搅拌效果相当,这就证

明传统超音速射流可以通过改变枪位来模拟聚合射流。

2.2.2 实验方案

聚合射流与熔池相互作用的水力学模型实验是在保持传统复吹最佳工艺参数的同时,将底枪堵死,以最佳枪位 150 mm 为基础,将顶枪的枪位每次降 10 mm 用来模拟聚合射流,进行冷态的水模实验。具体实验方案如下:

顶吹气体流量: $39 \text{ m}^3/\text{h}$

氧枪枪位: 150 mm, 140 mm, 130 mm, 120 mm...枪位直至降到聚合射流条件下的熔池均混时间小于顶底复吹条件下传统射流对熔池的均混时间为止。

2.2.3 实验结果及分析

实验中在每一个枪位条件下,进行 5 次水模实验,记录五次实验数据,然后求平均值,以考虑聚合射流情况下,熔池的均混时间与氧枪枪位的关系,其结果如图 4 所示。

从图 4 聚合射流的均混时间随枪位变化的规律中可以看出:(1)当枪位大于 120 mm 时,均混时间先减少而后又开始增长,这是由于顶底复吹转炉中的氧枪最佳枪位高于纯顶吹的最佳枪位^[11](由底吹的作用导致的)。(2)枪位在 100 ~ 120 mm 内,均混时间与枪位的关系趋于直线,这是由于射流的冲击深度和冲击面积共同决定了熔池的均混时间,当流量保持不变,枪位不断下降时,冲击面积对均混时间的影响越来越小,则影响均混时间的主要因素只有冲击深度;(3)当顶枪枪位小于 90 mm 之后,可显著改善搅拌效果,熔池的均混时间呈现显著地下降趋势;(4)当顶枪枪位下降到为 50 mm 时,射流与熔池相互作用的均混时间

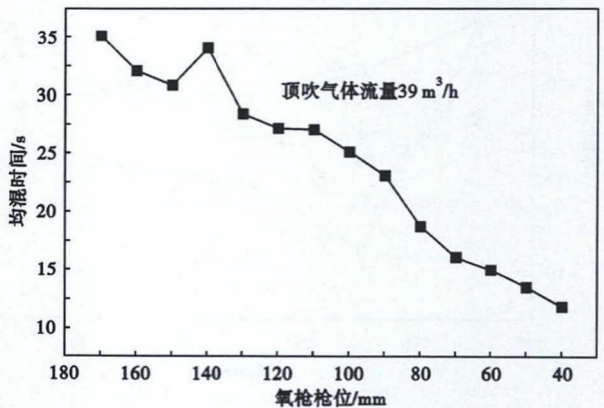


图 4 聚合射流的均混时间随枪位变化的规律
Fig. 4 Rule of coherent jet's mixed time along with lance position's change

为13.4 s,已经接近传统射流的最佳熔池均混时间12.6 s;继续降低氧枪枪位至40 mm时,射流到达液面的马赫数很大,对熔池的搅拌能力也很大,均混时间为11.8 s,小于复吹的最佳均混时间。这是由于随着枪位的下降,实验逐步接近于聚合射流的搅拌情况,均混时间则一度呈现下降的趋势。由此可以得出聚合射流氧枪可以在与顶底复吹技术搅拌效果相当的情况下,取消底吹系统,实现转炉炼钢技术的又一次变革。

3 聚合射流技术的应用效果分析

自2008年以来,鞍山钢铁股份有限公司180 t转炉一直采用顶底复合技术,其具体操作参数为顶枪气体流量为32 000 m³/h,顶枪压力为0.8~1.2 MPa,底枪流量为480 m³/h。目前,在转炉冶炼过程中,在180 t转炉上应用聚合射流技术进行了试生产,顶吹流量仍然为32 000 m³/h,结果表明,其熔池搅拌时间与顶底复吹技术基本相等,甚至略有降低,这为聚合射流技术在转炉炼钢过程中的广泛应用提供了有力保证。

4 结论

本实验利用超音速射流氧枪模拟鞍钢180 t转炉冶炼过程,在聚合射流和复吹转炉超音速射流情况下,进行了射流与熔池相互作用时均混时间的水力学研究,得出以下结论:

(1) 在复吹转炉超音速射流水力学模型实验中,熔池均混时间受顶吹气体流量和枪位的双重影响。最佳的工艺参数是氧枪枪位为150 mm,顶吹气体流量为39 m³/h,均混时间为12.6 s,相当于实际吹炼过程中氧枪枪位为1 500 mm,顶吹气体流量为30 800 m³/h。

(2) 在超音速射流最佳吹炼工艺参数条件下,保持模型顶吹气体流量39 m³/h不变,从最佳氧枪枪位150 mm开始,逐渐降低氧枪枪位来模拟聚合射流与熔池之间相互作用的水模实验,当顶枪枪位降至120 mm时,随枪位再降低,均匀混合时间明显缩短,表明聚合射流可改善转炉搅拌效果。

(3) 当聚合射流氧枪枪位降到40 mm(即到达液面的马赫数与聚合射流氧枪枪位在150 mm时射流到达液面的马赫数相当的枪位)时,均匀混合时间为11.8 s,小于顶底复吹的最佳均混时间12.6 s,表明聚合射流氧枪搅拌效果完全可以达到传统顶底复吹的搅拌效果。

(4) 聚合射流氧枪技术从熔池搅拌角度分析,可取消转炉底吹系统,简化炉底设备,并能够解决底吹转炉寿命与溅渣护炉技术转炉寿命不同步,影响转炉冶炼效率的难题,延长转炉寿命,实现转炉炼钢技术的又一次变革。

参考文献

- [1] 吴凤林,蔡扶时. 顶吹转炉氧枪设计[M]. 北京:冶金工业出版社,1982.
- [2] 蔡志鹏,谢裕生,夏安武. 氧气炼钢过程中射流对熔池的作用[J]. 钢铁,1980,15(1):14-19.
- [3] 刘漠川,金光南,郝宝升,等. 侧底复吹转炉的水力学研究[C]. 首届全国青年冶金学术交流会论文集,北京:冶金工业出版社,1990:192-195.
- [4] 刘爱华,李强,冯明霞,等. LBE转炉优化吹炼工艺参数的水模实验研究[J]. 材料与冶金学报,2003,2(1):21-24.
- [5] 包丽明. 聚合射流氧枪与熔池相互作用的水模型研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2009:24-26.
- [6] Chatterjee A, Bradshaw A V. Break-Up of a Liquid Surface by an Impinging Gaseous Jets[J]. Journal of Iron and Steel Institute, 1972; 210(2):179-182.
- [7] 包丽明,刘坤,吕国成,等. 180t转炉底吹气体与熔池相互作用的水模型实验[J]. 特殊钢,2008,29(2):18-20.
- [8] 冯春荣,杨伟健. 氧气顶吹炼钢中射流穿透深度的研究和理论分析[C]. 氧枪文集,1986,23-24.
- [9] 蔡志鹏,马恩祥,钱占民,等. 氧气炼钢过程中射流与熔池作用的某些传递现象[J]. 化工冶金,1983,4(1):37-47.
- [10] 刘坤. 超音速聚合射流氧枪射流行为特征的数学物理模拟研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.
- [11] 包丽明,刘坤,吕国成,等. 转炉氧枪顶吹工艺的水力学研究[J]. 特殊钢,2007,28(5):13-15.

吕国成(1982-),男,硕士(2009年辽宁科技大学),副教授,2006年鞍山科技大学(本科)毕业,冶金传输方向研究。

收稿日期:2018-05-20