

· 试验研究 ·

## 超音速射流冲击 260 t 转炉熔池界面行为研究

庞洪轩<sup>1,4</sup> 刘广强<sup>2</sup> 徐东<sup>1,3</sup> 郑冰<sup>1,2</sup> 邹志鹏<sup>1</sup>

(1 河北工程大学河北省高品质冷镦钢技术创新中心, 邯郸 056038; 2 辽宁科技大学土木工程学院, 鞍山 114051;

3 河北普阳钢铁集团河北省高韧性风塔钢工程研究中心, 邯郸 056305;

4 河北普阳钢铁集团河北省高塑性耐磨钢板技术创新中心, 邯郸 056305)

**摘要** 建立了260t转炉吹炼过程中的可压缩、非等温三维VOF模型。研究了多孔超音速射流与转炉熔池作用过程特征, 阐明了射流与熔融钢水界面接触的轮廓变化。揭示了钢液喷溅机制, 定量分析了冲击坑形态大小。结果表明, 吹炼过程具有瞬时性, 随着吹炼进行, 气液界面逐渐失稳并发生喷溅, 喷溅会以大块金属带和液滴两种形式共存。在2.2 m枪位53 000 m<sup>3</sup>/h的工况下, 进行吹炼时形成的底部死区面积约为熔池底部面积的12%~15%, 冲击坑直径占熔池直径的55%左右, 冲击坑深度占熔池深度的30%左右。工业生产实践表明, 过程枪位2.2 m, 吹气量53 000 m<sup>3</sup>/h, 吹氧15.2 min, 氧耗47.7 m<sup>3</sup>/t, 脱磷率83.1%, 钢铁料消耗降至1 115 kg/t。

**关键词** 260 t 转炉 数值模拟 喷溅 冲击坑形态

## Study of Interface Behavior of 260 t Converter Molten Pool Impacted by Supersonic Jet

Pang Hongxuan<sup>1,4</sup>, Liu Guangqiang<sup>2</sup>, Xu Dong<sup>1,3</sup>, Zheng Bing<sup>1,2</sup> and Zou Zhipeng<sup>1</sup>

(1 Technology Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038; 2 School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051; 3 Engineering

Research Center for High Toughness Wind Tower Steel of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Corp Ltd,

Handan 056305; 4 Technology Innovation Center for Wear Resistant Steel Plate of High plasticity and

High Toughness of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Corp Ltd, Handan 056305)

**Abstract** A compressible and non-isothermal three-dimensional VOF model for 260 t converter is established. The characteristics of interaction process between the multi-hole supersonic jet and the converter bath are studied and the profile change of interface between the jet and the molten steel is clarified. The mechanism of metal droplet splashing is revealed and the size of the cavity is analyzed quantitatively. The results show that the blowing process has instantaneity, the gas-liquid interface becomes unstable and causes splashing with the process of blowing and splashing can coexist in the form of large metal strip and droplet. When the lance distance is 2.2 m and the flow rate is 53 000 m<sup>3</sup>/h, the dead zone area is about 12%~15% of the bottom area, the cavity diameter accounts for about 55% of the pool diameter, and the cavity depth accounts for about 30% of the pool depth at formed during blowing. Through the analysis of industrial production practice index, it shows that the by process lance distance 2.2 m and flow rate 53 000 m<sup>3</sup>/h, oxygen blowing for 15.2 min, oxygen consumption 47.7 m<sup>3</sup>/t, the dephosphorizing rate is 83.1% and the charging materials consumption decreases to 1 115 kg/t.

**Material Index** 260 t Converter, Numerical Simulation, Splash, Cavity Shape

转炉冶炼过程是一个复杂的高温物理化学反应过程, 受限于物理模拟的局限性, 实验过程涉及的实验器械、测量方法等很难满足高温吹炼的条件, 因此对于转炉冶炼过程的探索目前大多采用数值模拟的方式开展<sup>[1]</sup>。近几年, 国内李明明和曹玲玲等在该领域均有了新的突破, 实现了全尺寸的高温条件下的射流-熔渣-钢液多相间的流动与传热传质的耦合计算<sup>[2-3]</sup>。然而对于一些大型转炉的吹炼过程以及所伴随的吹炼特征, 尤其是气液界面的行为仍然需

要进一步深入认识<sup>[4]</sup>, 因此建立大型转炉吹炼过程的数学模型以便对涉及的复杂过程现象、机理等进行深入研究, 从而对指导大型转炉生产实践、进一步开发吹炼过程控制模型具有借鉴意义。

本文以国内钢厂260 t转炉为模型, 从超音速射流与转炉熔池相互作用的界面行为入手, 通过建立可压缩、非等温三维VOF (Volume of Fluid) 多相流模型重点探索超音速射流与熔池作用过程的气液界面变化特征。

## 1 数学模型建立

### 1.1 模型假设

考虑模型准确性以及时间成本,采用雷诺平均 RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) 方法进行模拟研究,并将模型进行简化,忽略炉内化学反应、流动过程为三维、非稳态、非等温过程。

### 1.2 控制方程

采用雷诺平均 Navier-Stokes 方程对流场进行平均,结合实际情况,选取连续介质力学方法对转炉冶炼过程气液界面行为进行研究。多相流模型选取 VOF 模型,在该模型中,引入体积分数  $\alpha_q$  概念, $\alpha_q$  表示某一单元内第  $q$  相的体积分数,其中: $\alpha_q = 0$ ,表示控制体中没有  $q$  相流体; $\alpha_q = 1$ ,表示第  $q$  相流体充满整个控制体; $0 < \alpha_q < 1$ ,表示控制体中包含  $q$  相与其他流体的混合相。在 VOF 模型中,整个模型各相的体积分数之和为 1。VOF 模型中的流体不管属性是否相同,各相共享一套控制方程。其连续性方程与动量方程如下所示:

连续性方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + v_q \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} + \frac{1}{\rho_q} \sum_{p=1}^n (m_{qp} - m_{pq}) \quad (1)$$

式中: $m_{qp}$ -  $q$  相到  $p$  相质量传输; $m_{pq}$ -  $p$  相到  $q$  相质量传输。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

式中: $\vec{v}$ - 速度矢量/( $m \cdot s^{-1}$ ); $p$ - 压力/Pa; $\vec{g}$ - 重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ ); $\rho$ - 密度/( $kg \cdot m^{-3}$ ); $\mu$ - 粘度/( $Pa \cdot s$ ); $\vec{F}$ - 表面张力引起的体积力/( $N \cdot m^{-3}$ )。

由于所有变量及其属性的区域被各相共享,所以方程中出现的属性是整个模型中的每一控制体积中的分相决定的。如下:

$$\rho = \alpha_{\text{气}} \rho_{\text{气}} + \alpha_{\text{钢}} \rho_{\text{钢}} \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_{\text{气}} \mu_{\text{气}} + \alpha_{\text{钢}} \mu_{\text{钢}} \quad (4)$$

采用标准  $k$ - $\varepsilon$  湍流模型对其进行描述,其中湍动能  $k$  与湍流耗散率  $\varepsilon$  的表达式如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\alpha_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中: $G_k$ - 平均速度梯度引起的湍流能产生项; $G_b$ - 浮力引起的湍流能  $k$  的产生项; $Y_M$ - 压缩湍流中脉动扩张的贡献; $\alpha_k$ - 湍流能  $k$  对应的普朗特数; $\alpha_\varepsilon$ - 耗散率  $\varepsilon$  对应的普朗特数; $S_k$ 、 $S_\varepsilon$ - 源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$ - 经验常数<sup>[5]</sup>。

### 1.3 网格划分及边界条件的建立

采用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 自带的 ICFM (Integrated Computer Engineering and Manufacturing) 软件对转炉模型进行建模与网格划分,如图 1 所示。

数值模拟的边界条件具体设置为:入口处采用压力入口的边界条件,出口为压力出口,出口压力为大气压,采用无滑移的壁面边界条件,边界条件的具体设置以及各相的具体参数见表 1。压力-速度耦合算法采用 PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 算法,计算时设置为非稳态计算,时间步长为 0.000 1 s,吹炼时长 10 s。当能量残差小于  $10^{-6}$ ,其他变量残差小于  $10^{-3}$  时,认为收敛。

表 1 为模拟边界条件及各相参数值。此外,本研究中选用的转炉模型以及氧枪模型的具体设计尺寸如表 2 所示。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 气液界面瞬态行为

从吹炼枪位  $H = 2.2$  m,吹氧量 53 000  $m^3/h$  时转炉气液界面随时间 (0.5 ~ 7 s) 变化情况可以发现,在超音速气流的作用下,气液界面逐渐发生波动并向炉壁延伸,随着吹炼过程的进行,波动行为越来越剧烈并伴随喷溅行为的发生,液体表面形成喷溅

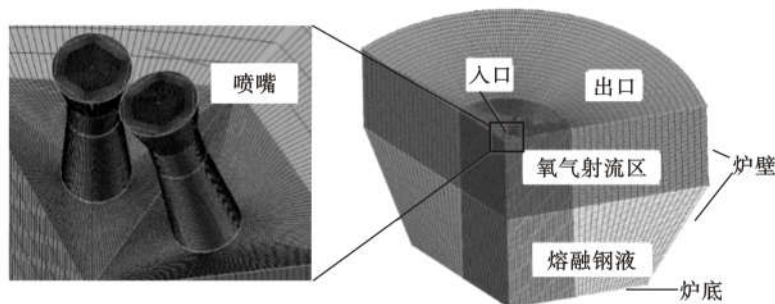


图 1 模型网格划分  
Fig. 1 Model meshing situation

表1 边界条件及各相参数

Table 1 Boundary conditions and each phase parameters

项目	参数	数值
边界条件	炉膛压力( $P$ )/Pa	101 325
	喷头出口氧气温度( $T_0$ )/K	67
	喷头出口速度( $v$ )/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	525
钢液	熔池温度( $T_b$ )/K	1 873
	密度( $\rho$ )/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 000
	粘度( $\mu$ )/( $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ )	0.006 5
	表面张力( $\sigma$ )/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	1.6
	比热容( $c_p$ )/( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	670
	导热系数( $\lambda$ )/( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	40
氧气	密度( $\rho$ )/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.299
	粘度( $\mu$ )/( $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ )	$1.19 \times 10^{-5}$
	比热容( $c_p$ )/( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	919.31
	导热系数( $\lambda$ )/( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	0.024 6
	温度( $t$ )/K	300

表2 转炉及氧枪模型主要设计参数

Table 2 Main design parameters of converter and oxygen lance

模型	参数	数值
转炉	熔池高度( $h$ )/mm	1 670
	熔池直径( $D$ )/mm	6 120
氧枪	出口直径( $d_e$ )/mm	55.6
	喷孔倾角( $\alpha$ )/°	14

主要原因有两个,一个是高速气体射流与液体碰撞时,根据 Kelvin-Helmholtz 不稳定理论,冲击坑表面的反射气流会给熔池表面一个剪切力,驱动表面液体以及内部液体运动,液体表面有一部分获得了向上的速度,速度达到一定值时会脱离熔池造成喷溅;另一个是表面波由中间向两侧移动,在碰到固体壁面时往回反弹,两种方向不同的表面波碰撞也会形成喷溅。

## 2.2 熔池内流场及波动行为

图2为枪位  $H=2.2\text{ m}$ ,吹氧量  $53\,000\text{ m}^3/\text{h}$  时,不同时刻的速度云图,根据文献[6]认为速度小于  $0.05\text{ m/s}$  的区域为死区,由图2可知,在喷吹过程中,多孔氧枪射流冲击熔池后会在各孔中间与炉底接触的中心形成一块“死区”,随着喷吹的进行,最终在熔池底部形成一块固定的“死区”位置,“死区”的大小会随吹炼时间出现波动,“死区”面积约为熔池底部面积的  $12\% \sim 15\%$ ,因此,吹炼过程中配合底吹进一步缩小“死区”的面积对于提高吹炼效果具有积极影响。此外在熔池的底部与侧壁面的交界

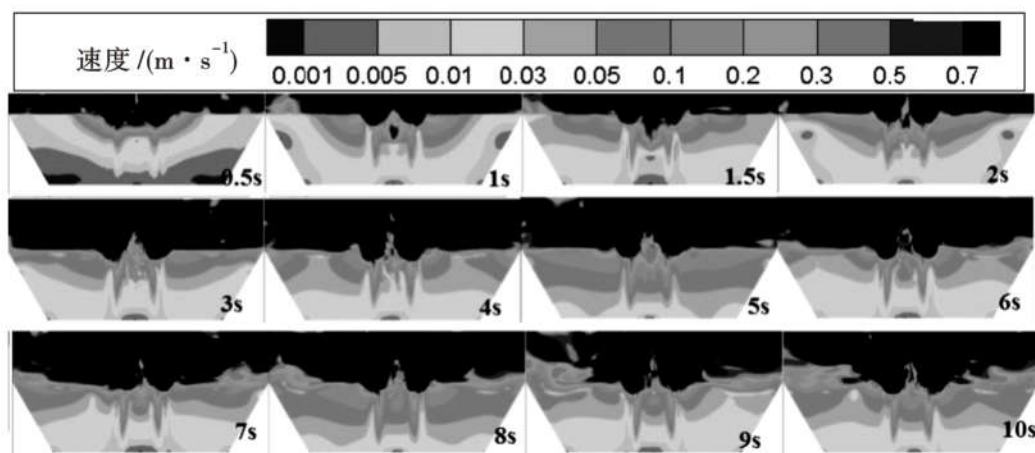


图2 不同吹炼时刻的速度云图

Fig. 2 Velocity contour map at different blowing moments

处,由于转炉本身的结构特点,也存在一定范围的“死区”。

图3为枪位  $H=2.2\text{ m}$ ,吹氧量  $53\,000\text{ m}^3/\text{h}$  时,典型吹炼时刻的炉内各相流场变化情况,图3中下部箭头表示液相,上部箭头表示气相,由图3可知,射流在冲击到液面时,在熔池表面形成凹坑,射流随之反射回去,并携带部分液相形成喷溅。射流冲击表面处液体向熔池底部移动,受到底部壁面阻隔后向两侧移动,在炉内形成循环。

图4显示了气液界面随时间波动情况,由图4

可知,射流冲击液面时,会在液体表面形成表面波,表面波从凹坑附近开始产生并不断向两侧转移,在到达熔池壁时再往回反弹,在液体表面不断进行传播,并具有一定周期性,随着时间增加,气液界面震荡剧烈,会在熔池表面形成喷溅。李明明等<sup>[7]</sup>通过研究认为,表面波的形成是产生喷溅的主要原因,气液界面的喷溅机理主要有两种:(1)单个液滴从冲击坑边缘直接飞出,(2)在冲击坑边缘形成的凸起部分被反射气流撕裂成不同尺寸的喷溅。本研究与李明明等人的研究结论基本一致。

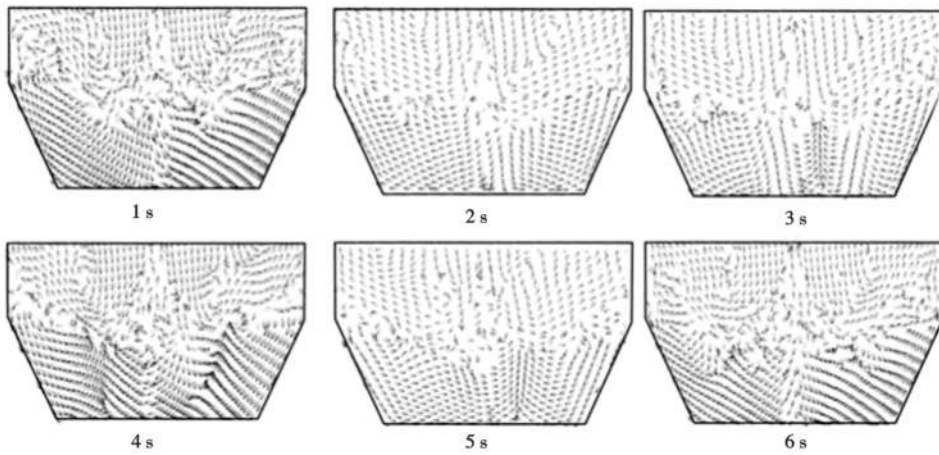


图 3 不同时刻熔池流场变化情况  
Fig. 3 Variation of flow field in molten pool at different time

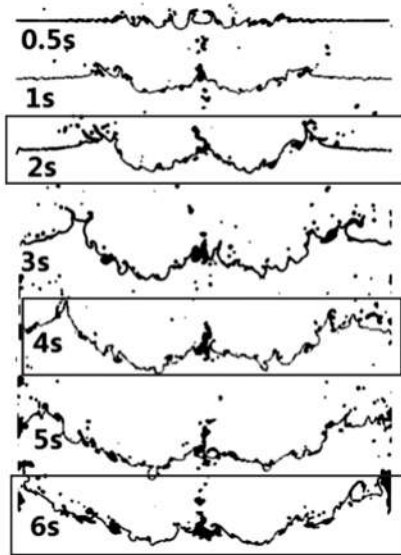


图 4 不同时刻的气液界面波动情况  
Fig. 4 Fluctuation of gas-liquid interface at different time

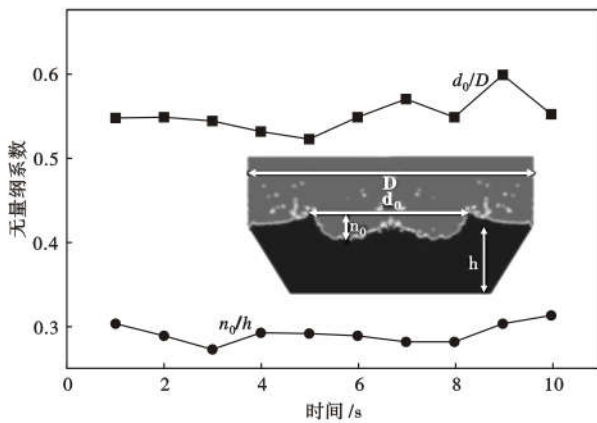


图 5 冲击坑尺寸随吹炼时间的变化  
Fig. 5 Variation of cavity size with blowing time

### 2.3 冲击坑形态变化

良好的冲击坑形态是吹炼过程中获取优良吹炼条件的前提<sup>[8]</sup>。(1)冲击坑深度较深、冲击面积较大可以有效的改善冲击区的精炼条件；(2)过大的冲击深度容易产生顶底复吹的相互干扰从而导致喷吹效率下降,而过大的冲击面积则容易造成气流冲刷炉墙,缩短转炉的寿命。因此,获得良好的冲击坑形态也是判定氧枪好坏的依据。

图 5 显示了冲击坑直径和冲击深度随吹炼时间的变化。可以发现 260 t 转炉在 2.2 m 枪高,53 000 m<sup>3</sup>/h 的氧量进行吹炼时,其形成的冲击坑直径占比熔池直径的 55% 左右,冲击坑深度占比熔池深度的 30% 左右,冲击坑形态比较合理。由于吹炼过程中的冲击坑是来回摆动和上下震荡的,从而导致了冲击坑的宽度和深度随吹炼时间发生相应变化。

### 3 工业生产实践

以本研究的工况点为依据,对钢厂用 260 t 转炉进行工业生产实践,其中开吹枪位控制在 2.6 m 左右,过程枪位下调至 2.2 m,吹气量 53 000 m<sup>3</sup>/h,实际操作根据现场冶炼情况略有变化。统计有效 300 炉次的生产实践数据,其中预处理铁水成分及温度和加渣料成分分别如表 3 和表 4 所示。

表 5 示出了在本模拟工况下对应工业生产实践

表 3 预处理铁水成分及温度

Table 3 Composition and temperature of pretreatment hot metal

C	铁水成分/%				温度/ °C
	Si	Mn	S	P	
4.576	0.382	0.192	0.014	0.074 7	1 334

表4 渣料成分/%  
Table 4 Slag ingredient/%

轻烧白云石	活性白灰	菱镁石	冷却废钢	大块白灰	球团
3.79	6.69	0.94	-	1.0	0.037

表5 关键冶炼指标  
Table 5 Key smelting indicators

吹氧时间/ min	脱磷率/ %	氧耗/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	供氧强度/ ( $\text{m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$ )	钢铁料消耗/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )
15.2	83.1	47.7	3.13	1 115

的吹炼效果,平均吹氧时间控制在15.2 min,平均脱磷率在83.1%,吹氧时间与冲击坑深度密切相关,而脱磷率则与冲击面积密切相关,两项指标均间接反映了在实际吹炼中射流与熔池形成的良好的冲击坑形态。

此外平均氧耗的统计结果为 $47.7 \text{ m}^3/\text{t}$ ,供氧强度为 $3.13 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ ,钢铁料消耗较之前降低至 $1 115 \text{ kg/t}$ ,各项关键冶炼指标均较好,这也验证了本数值模拟的有效性。

#### 4 结论

(1) 熔池表面液体受到反射气流的剪切力作用以及表面波在传递过程中受壁面影响反弹碰撞作用均会引起喷溅。喷溅以两种形式共存,可以是单个液滴从冲击坑边缘直接飞出,也可以是大块金属带在冲击坑边缘直接撕裂喷出。

(2) 死区面积会随吹炼时间出现波动,大小约为熔池底部面积的12%~15%。冲击坑直径占比熔池直径的55%左右,冲击深度占比熔池深度的

30%左右。

(3) 以数值模拟结果为基础,进行工业生产实践,结果表明各项关键技术指标较好,这也验证了本数值模拟的有效性。

国家自然科学基金联合基金项目(NSFC)(U20A20272),河北省钢铁联合基金(E2020402016),辽宁科技大学材料成型与组织性能控制重点实验室(USTLKFYSY201708)资助

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 曹玲玲.转炉熔池气-渣-金多相流行为的模拟研究[D].北京:北京科技大学,2018.
- [4] 张国新,刘广强,刘坤,等.新型双结构氧枪与转炉熔池交互行为的水模实验[J].特殊钢,2020,41(2):6-9.
- [5] 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.
- [6] 刘广强,朱国强,张国新,等.260 t转炉用新型双结构氧枪的工业实验[J].特殊钢,2020,41(3):39-42.
- [7] 李强,李明明,李琳,等.炼钢转炉顶吹氧气射流特性的CFD数值分析[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(6):828-831.
- [8] 刘广强,张国新,朱国强,等.260 t转炉用新型双结构氧枪水模实验与工业应用[J].钢铁研究学报,2020,32(11):19-25.

庞洪轩(1987-),男,硕士(2013年东北大学),工程师,2011年东北大学(本科)毕业,炼钢、轧钢工艺技术研究。  
E-mail:panghongxuan1988@163.com

收稿日期:2021-04-29

尊敬的投稿作者:《特殊钢》现无网站投稿平台,如发现有伪造特殊钢投稿网站欺骗作者,请及时电话告知

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 电话:0714-6297386 6297313 投稿邮箱:E-mail:tsghs@sina.com