

基于 PIV 技术的钢包临界卷渣行为水模型研究

吴华杰^{1 2)}✉, 张 漓¹⁾, 徐 阳¹⁾, 岳 峰²⁾, 冯美兰¹⁾, 魏崇一¹⁾, 郭 浩¹⁾

1) 北京科技大学冶金工程研究院, 北京 100083 2) 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: whjyeah@163.com

摘 要 基于粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术, 通过水模型研究临界卷渣条件下卷渣过程和钢包流场特征, 解析临界卷渣从发生到结束的整个过程卷渣处流场速度的变化情况, 并定量分析炉渣运动黏度对临界卷渣速度的影响. 将临界卷渣速度的实验检测值与传统理论计算值进行比较和讨论. 研究结果表明: 临界卷渣过程从开始到结束可细分为八个不同阶段, 卷渣处流场速度变化在这八个阶段中先增大后减小再增大; 炉渣运动黏度对卷渣具有重要影响, 炉渣运动黏度越大, 临界气量和临界卷渣速度越大, 并且临界卷渣速度与炉渣运动黏度的关系更具线性相关性. 实验拟合得到炉渣运动黏度与临界卷渣速度的关系式. 最后根据传统理论计算模型和实测结果提出实验条件下修正的临界卷渣速度表达式.

关键词 炼钢; 流场; 卷渣; 速度; 运动黏度; 粒子图像测速

分类号 TF769.9

Water model study on critical slag entrapment behavior based on PIV technology

WU Hua-jie^{1 2)}✉, ZHANG Li¹⁾, XU Yang¹⁾, YUE Feng²⁾, FEN Mei-lan¹⁾, WEI Chong-yi¹⁾, GUO Hao¹⁾

1) Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083

2) Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

✉ Corresponding author, E-mail: whjyeah@163.com

ABSTRACT The slag entrapment process and the flow field of a specific ladle at critical flow rate are investigated based on particle image velocimetry (PIV) technology, and the change of fluid velocity at the region where slag is entrapped into steel during the whole slag entrapment process is studied by water modelling. The influence of the kinematic viscosity of slag on the critical slag entrapment velocity is analyzed quantitatively. The critical slag entrapment velocity collected from experiments is compared with the calculated one by the traditional theory. It is shown that the critical slag entrapment process can be divided into 8 stages from the occurrence to the end, and the fluid velocity at the point where slag is entrapped into steel increases first, then decreases and increases again during the 8 stages. The kinematic viscosity of slag has great influence on slag entrapment. When the kinematic viscosity of slag increases, the critical flow rate and critical slag entrapment velocity enlarge, and the linear correlation relationship between the critical slag entrapment velocity and the kinematic viscosity of slag becomes more obvious. A relational expression between the critical slag entrapment velocity and the kinematic viscosity of slag is derived from experimental data by liner fitting. At the end of this article, a correctional expression of the critical slag entrapment velocity is put forward based on the experimental data and the theoretically calculated values.

KEY WORDS steelmaking; flow fields; slag entrapment; velocity; kinematic viscosity; particle image velocimetry

钢铁冶金生产过程中钢包内钢液流动和卷渣行为是一种普遍存在且对冶金效果有重要影响的现象. 吹氩搅拌能扩大反应界面, 加速反应物质的传递, 均匀钢

液的成分和温度. 当搅拌强度较弱时, 渣面处于一定程度的凝固状态, 传质较慢; 当搅拌比较强烈的情况下, 钢-渣界面强烈波动, 甚至使渣滴卷入钢水. 因此, 研

究吹氩条件下,钢包流场和钢渣界面临界卷渣行为具有重要的意义.冶金工作者在钢渣界面行为的某些方面进行了大量的研究,并取得一些有重要价值的研究成果^[1-5].但需要指出的是,吹氩条件下,气泡的行为及界面卷渣行为实质上是一个十分复杂的过程,有关钢渣黏度对卷渣行为的定量研究也不多,仍然还有许多问题和现象有待于进一步的深入探讨.

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术作为一种新型的流场测量技术,是一种非接触的测量方法,具有整体性和瞬时性的特点,可定量测量出钢包流场中某一被测截面上所有点的速度分布,有效地显示钢包的流动状况,记录整个钢包卷渣过程的动态图像,为研究钢包流场和卷渣行为提供很好的技术手段.本文以某钢厂钢包为原型,采用粒子图像测速技术进行水模型实验,对钢包卷渣过程进行解析,探索钢渣黏度对临界卷渣速度的影响,并基于实验结果提出实验条件下修正的临界卷渣速度公式.

1 实验参数和方案

以往研究表明,采用水模型方法能够同时满足与原型钢包的几何相似和动力学相似条件,从而保证二者之间钢液流动和钢渣界面行为的相似^[6-11].本研究采用水模拟研究方法,模型按照 110 t 钢包原型以 5:1 采用有机玻璃制成,模型底部直径 $D = 509$ mm,锥度为 0. 本实验采用水模拟钢液,油模拟钢渣,压缩空气模拟原型钢包底吹氩气,当模型与原型的修正弗劳德准数

Fr 数相等时,可以计算出模型底吹气量 Q_m 对应于原型底吹气量 Q_p 的关系式为

$$Q_m = 0.012 Q_p. \quad (1)$$

根据实际工作钢液面高度和渣层厚度,本实验中水的液面深度 $H = 600$ mm,油层厚度 $h = 2$ cm. 当模型与原型的修正弗劳德准数 Fr 数和韦伯准数 We 数相等时,可以计算出实验中模拟介质硅油的密度为 $960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 为研究钢渣黏度对临界卷渣行为的影响,油层选取三种黏度不同、密度和水-油界面张力很相近的硅油,分别为硅油 50CS、硅油 100CS 和硅油 350CS. 各模拟介质的物性参数如表 1 所示.

表 1 模拟介质的物性参数
Table 1 Physical parameters of the analog media

液体	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	运动黏度/ ($10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	与水的界面张力/ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$
钢液	7000	0.9	—	1600
水	1000	1	—	25
硅油 50CS	960	50	52.7	25
硅油 100CS	965	100	53.0	25
硅油 350CS	970	350	53.0	25

粒子图像测速实验时,激光强度定为 30%. 一次实验两个高速相机在 $t = 25$ s 时间内共拍摄 50 组照片,利用粒子图像测速系统软件对所拍摄的照片进行处理,便可计算出所拍摄截面的速度流场. 其装置示意图如图 1 所示.

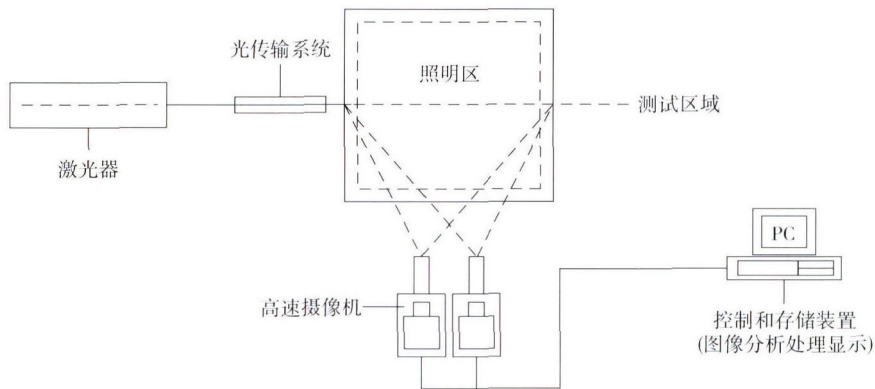


图 1 粒子图像测速装置示意图
Fig. 1 Schematic of particle image velocimetry

实验选择如图 2 所示的截面 A 作为研究对象. 为尽可能减小底吹孔上方的气柱干扰整个流场拍摄,本实验在离激光照射处远端的 $0.7R$ 位置进行单孔底吹气, R 为底部半径大小,重点研究截面 A 左侧的钢包流场.

观察各个方案下水-油界面卷混现象,由低至高调节钢包底吹气量,由于开始发生油滴卷入时,水-油界面一直处于非稳态状态,短时间内不一定发生油滴

卷入. 此外,油滴偶然一次的卷入不能表明后续会有油滴不间断的卷入,因此统计 2 min 内发生油滴卷入的次数. 当在某气量下会发生两次或以上油滴脱离油层现象,且超过该气量,油滴卷入次数会显著增加,定义该气量为临界卷渣气量. 在临界卷渣气量下,粒子图像测速测定的油滴脱离点在油滴卷入前的最大速度为临界卷渣速度.

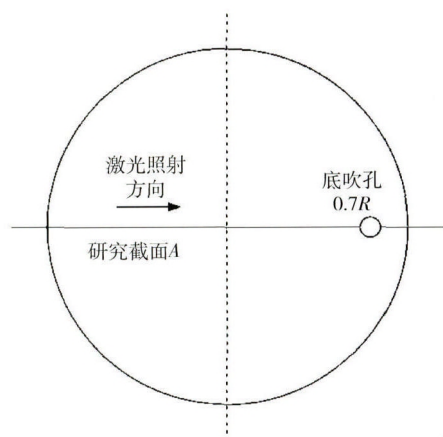


图2 研究截面示意图

Fig.2 Schematic illustration of the selected experimental section

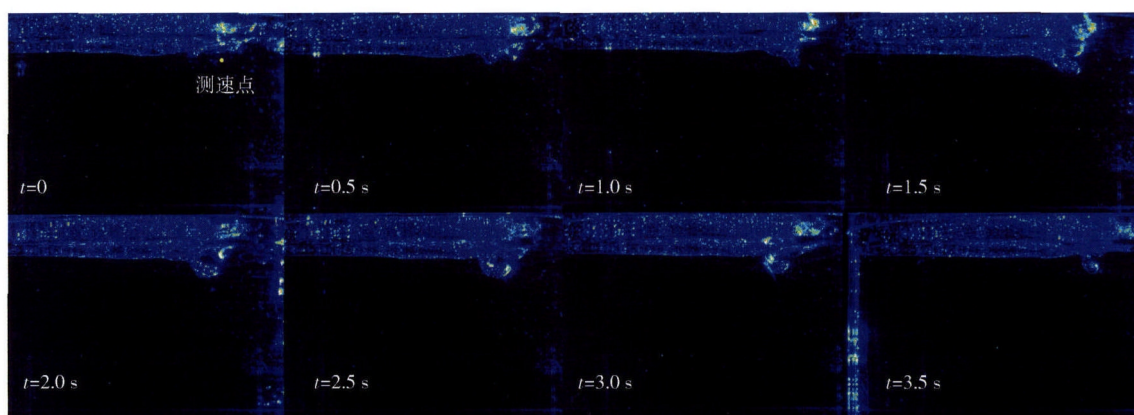


图3 油滴卷入过程

Fig.3 Involving process of an oil drop

层凸起变得非常明显; 2 s 时油层凸起体积继续增大, 且开始往下运动开始形成油滴; 2.5 s 时椭球状油滴将要与油层发生脱离; 3 s 时形成完整的油滴, 与油层断裂; 3.5 s 时油滴进入水流场中并开始上浮, 在水油界面处恢复平稳。整个油滴卷入过程共历时 3.5 s。

粒子图像测速检测截面在对应上述八个过程中钢包流场矢量和迹线图如图 4 所示。

由图 4 可知临界卷渣过程中, 钢包内底吹孔所在的中心面的总体流场特征为: 钢包底吹条件下产生的气泡带动底吹孔上方的水向上流动, 最大的速度达 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上升流在水油界面处流动方向发生改变, 并使水油界面下方和钢包中心处各形成一个漩涡区。从水油界面漩涡区向下的水流受钢包壁面处向右水流的影响而向气柱区域流动, 并且速度逐渐增大, 达 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。进入气柱附近区域时在气柱上升作用的影响下, 改变方向向上运动, 完成钢包内水流整体的一个大回流。

根据每组粒子图像测速检测截面流场速度矢量和

2 实验结果与讨论

2.1 实验结果

2.1.1 临界卷渣过程和流场的粒子图像测速解析

通过高速相机拍摄, 可以获取不同实验条件下, 油滴卷入整个过程的图像、钢包流场和速度变化情况。图 3 所示为硅油 100CS 在临界卷渣气量为 $1120 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的卷渣过程情况, 另两种硅油的卷渣过程与其类似。

图 3 中详细展示了油滴卷入各阶段随时间的八个过程: 开始时水油界面非常平稳, 几乎没有波动; 0.5 s 时油层出现微小凸起, 但界面处仍较为平稳; 1 s 时层凸起较 0.5 s 明显变大, 界面出现些微紊乱; 1.5 s 时渣

迹线图, 对上述八个过程中油滴脱离点, 即图 3 中测速点处流场速度进行提取, 结果如图 5 所示。

同样可得硅油 50CS 在临界卷渣气量 $600 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 和硅油 350CS 在临界卷渣气量 $1640 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时在油滴脱离点处的速度变化图, 分别如图 6 所示。

从图 5 和图 6 中可以看出, 在油滴卷入的整个过程中, 油滴脱离位置处的流速呈先增大后减小再增大的特点。临界卷渣开始时, 水油界面比较平稳, 测速点处速度处于正常脉动状态; 随着底吹气体的不断推动, 扰动水油界面, 界面处速度开始增大; 油层吸收能量后, 表面逐步生成明显凸起, 随着凸起部分的油滴体积不断增大, 界面速度开始不断减小; 随着凸起形成较完整的油滴形状, 体积不再增加, 界面的速度又开始增大; 随后, 当界面速度大于一定程度后, 油滴发生脱离。因此由图 5 和图 6 可得, 硅油 50CS、硅油 100CS 和硅油 350CS 油滴脱离位置处的速度分别为 0.0129 、 0.0175 和 $0.0354 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为对应的临界卷渣速度。

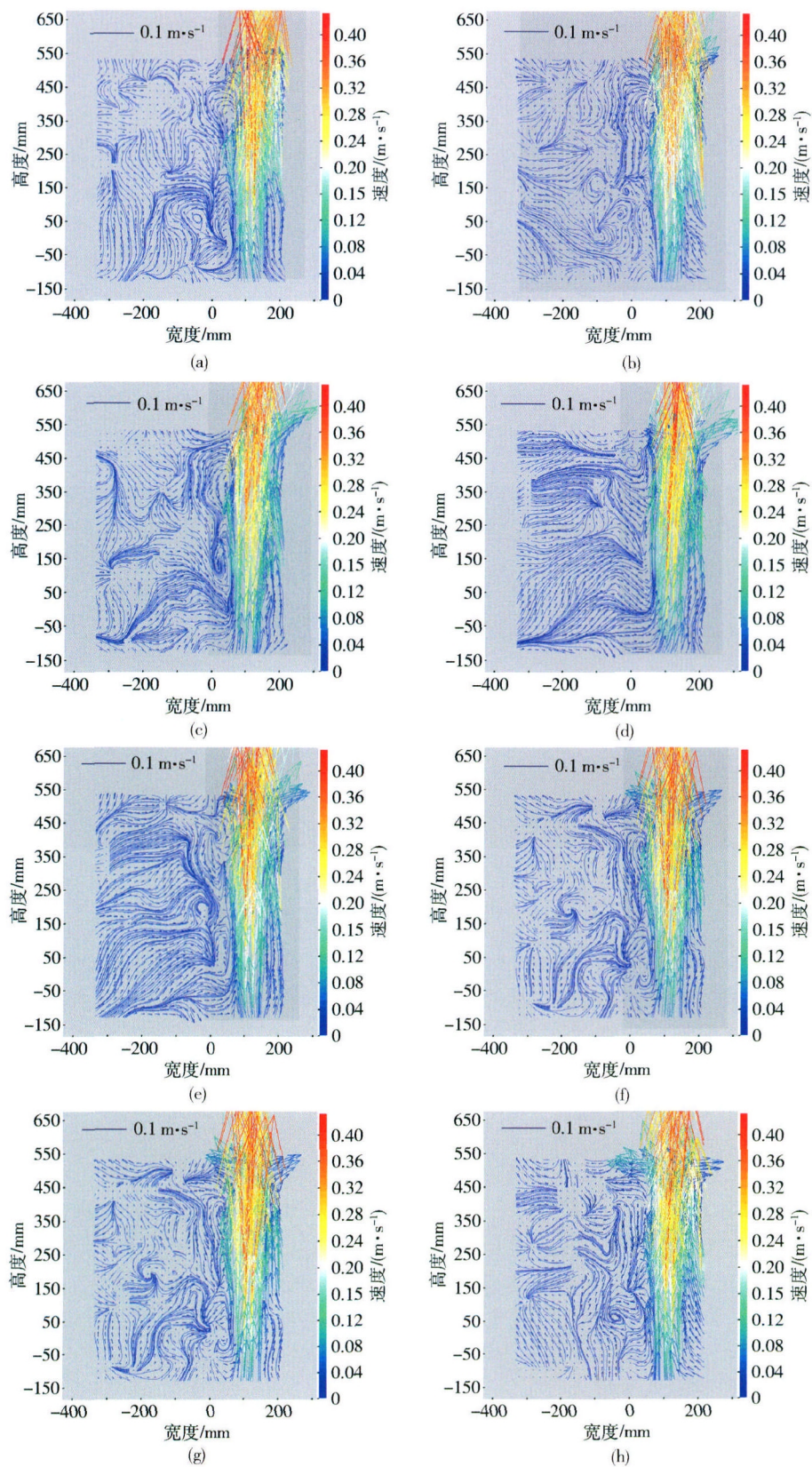


图4 油滴卷入过程流场矢量和迹线图. (a) $t=0$ s; (b) $t=0.5$ s; (c) $t=1$ s; (d) $t=1.5$ s; (e) $t=2$ s; (f) $t=2.5$ s; (g) $t=3$ s; (h) $t=3.5$ s

Fig.4 Flow vectors and streamlines in the oil drop involving process: (a) $t=0$ s; (b) $t=0.5$ s; (c) $t=1$ s; (d) $t=1.5$ s; (e) $t=2$ s; (f) $t=2.5$ s; (g) $t=3$ s; (h) $t=3.5$ s

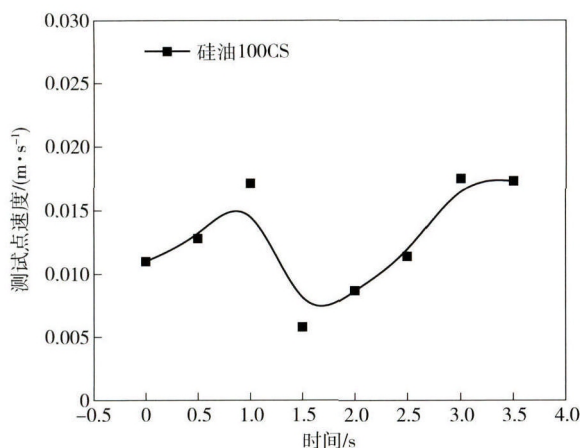


图5 测试点处速度变化

Fig. 5 Velocity change at the test point

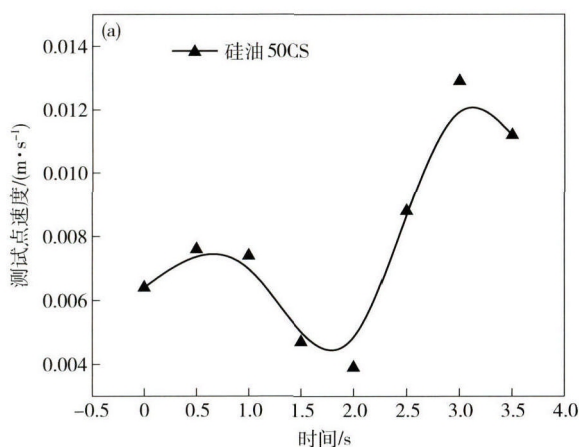


图6 硅油 50CS (a) 和硅油 350CS (b) 测试点处速度变化

Fig. 6 Velocity change at the test point for silicone oil 50CS (a) and silicone oil 350CS (b)

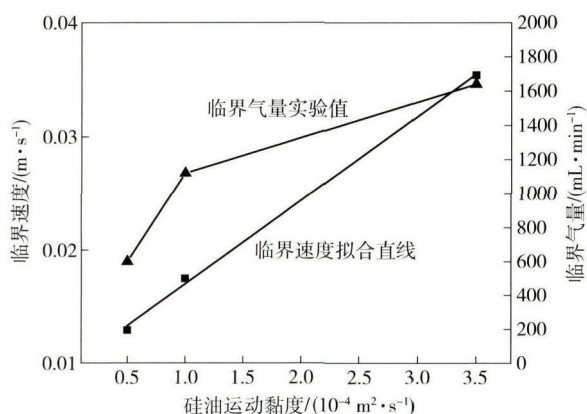
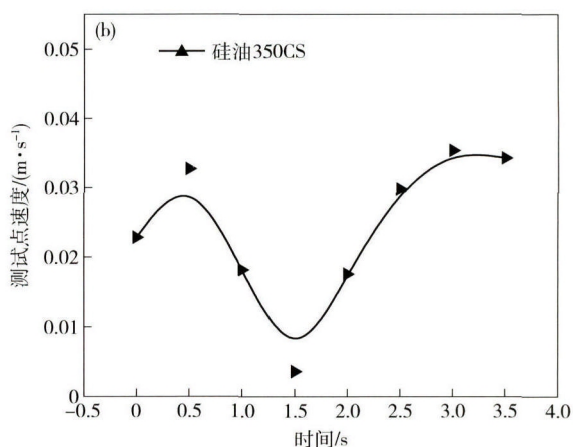


图7 不同黏度硅油临界速度和临界气量

Fig. 7 Critical velocity and gas flow of slag entrapment in different kinematic viscosity of silicone oils

2.2 讨论

2.2.1 实验测试结果与临界卷渣理论公式的比较

关于临界卷渣速度公式,开尔文-亥姆霍兹、浅井滋生、奥特斯等进行过理论推导.开尔文-亥姆霍兹描

2.1.2 油的黏度对临界卷渣速度的影响

对实验条件下不同种类油的临界卷渣气量与临界卷渣度进行比较,并对临界卷渣速度值进行线性拟合,结果如图7所示.

经拟合后关系式如式(2)所示,其中临界速度 V_{cr} 单位为 $m \cdot s^{-1}$,运动黏度 η 的单位为 $m^2 \cdot s^{-1}$, r^2 为拟合关系式的相关系数.

$$V_{cr} = 73.9\eta + 0.0096, r^2 = 0.997. \quad (2)$$

从图7中可以看出,随着黏度的增加,临界卷渣气量和临界卷渣速度不断增大,且运动黏度与临界卷渣速度之间近似为直线关系.所以,黏度对卷渣是有抑制作用的,当钢渣的黏度值较大时,钢渣界面处受剪切流动产生的渣层运动受到的抑制作用也更大,渣滴的形成也更加困难.

述了由于界面附近流动造成的一种界面非稳态情况,并给出非稳态速度方程^[12]:

$$V_{cr} = \left[2 \left(1 + \frac{\rho_{sl}}{\rho_{st}} \right) \right]^{1/2} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_{sl}^2} \right)^{1/4}. \quad (3)$$

浅井滋生认为,当钢液流提供给液滴的动能大于生成液滴所需要的界面能和渣滴的浮力功之和时才能发生卷渣现象^[7].由此推导出如下公式:

$$V_{cr} = \left[\frac{48 g \sigma \Delta \rho}{\rho_{sl}^2} \right]^{1/4}. \quad (4)$$

奥特斯指出,当钢液流的惯性力大于钢渣界面的界面张力与渣的浮力之和时,渣层的下边界形成渣滴,开始卷入钢液^[13].由此可以得到临界卷渣速度公式为

$$V_{cr} = \left[\frac{128 g \sigma \Delta \rho \cos \alpha}{3 \rho_{sl}^2} \right]^{1/4}. \quad (5)$$

式(3)~(5)中: V_{cr} 为临界卷渣速度, $m \cdot s^{-1}$; $\Delta \rho$ 为炉渣和钢液的密度差, $kg \cdot m^{-3}$; σ 为炉渣和钢液界面张力, $N \cdot m^{-1}$; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; ρ_{sl} 为炉渣密度, $kg \cdot m^{-3}$; α 为渣滴浮力与界面张力的夹角.

水模型不同类型硅油对应的临界卷渣速度与对应

条件下上述理论的推导值进行比较,得到的结果如图8所示。

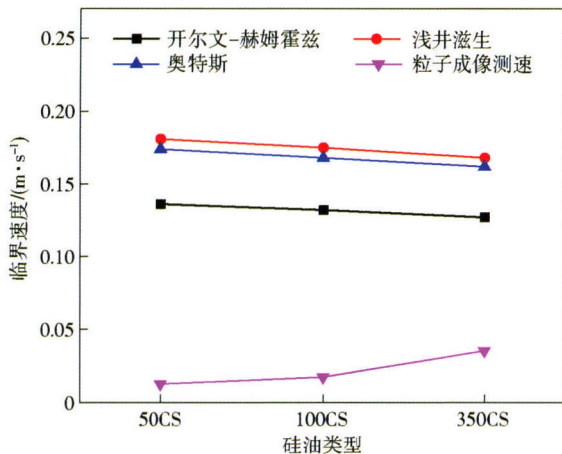


图8 临界卷渣速度水模型实验值和理论值的比较

Fig. 8 Comparison of critical slag entrapment velocity between experimental data by water modelling and theoretical results

从图8中可以看出:粒子图像测速实测出的钢包模型临界卷渣速度要远小于前三者的理论推导值;并且随黏度的增大,临界卷渣速度的实验值呈增大趋势,而前三者的理论推导值呈略微递减趋势。

经分析,发现理论推导建立的临界卷渣速度模型忽略了两个重要的因素:(1)以上理论模型分析都是假设渣滴在瞬间获取钢液流速的能量,直接跳跃进入钢液中。由粒子图像测速观察可知,渣滴完全卷入钢液的整个过程中,渣滴不是瞬间就卷入钢液,而是在钢渣界面有渣层凸起之后,气泡持续驱动的钢液流依旧能持续为之提供能量,这个能量大于一定程度后才会使油滴脱落,完成整个卷渣过程,反之油滴会回到油层中,这个阶段所需要的能量要小于卷渣完成的整个过程所需克服的界面能、内能变化和浮力功的总和。(2)黏度对卷渣是有影响的,而以上的理论推导中忽略了黏度的抑制作用。因此,粒子图像测速实验测量的临界卷渣速度要远小于理论计算公式得到的临界值。

2.2.2 临界卷渣速度公式的修正

分析式(3)、式(4)和式(5)可以综合得到

$$V_{cr} = M \times N. \quad (6)$$

其中, $N = \left(\frac{\Delta \rho g \sigma}{\rho_{sl}^2} \right)^{\frac{1}{4}}$, 则

$$M = \frac{V_{cr}}{N}. \quad (7)$$

M 理论上应与钢渣厚度、钢渣与钢液密度比、钢渣运动黏度相关。由表1可得本实验条件下 N 的数值为0.066,将式(2)和 N 的数值代入式(7)可得

$$M = 1119.7\eta + 0.15. \quad (8)$$

将式(8)代入式(6),由此可得实验条件下修正的临界卷渣速度的公式为

$$V_{cr} = (1119.7\eta + 0.15) \left(\frac{\Delta \rho g \sigma}{\rho_{sl}^2} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (9)$$

值得一提的是,温度对 η 、 σ 和 ρ_{sl} 有较大影响,实际生产中计算 η 、 σ 和 ρ_{sl} 的取值时应注意温度条件。

3 结论

以5:1的钢包原型为研究对象,基于相似原理和粒子图像测速技术,进行钢包卷渣的水模型实验研究,解析渣滴进入钢包流场的全过程,并研究油的黏度对临界卷渣速度的影响,得到如下结论。

(1) 对应实际0.7R底部半径的底吹气位置,在临界卷渣气量时,钢包内流场分布为:底吹气体带动底吹孔上方的钢液向上流动,上升流使钢渣界面形成一个漩涡区,促进了渣滴的形成。从水油界面漩涡区向下的水流受钢包壁面处向右水流的影响而向气柱区域流动,并且速度逐渐增大,进入气柱附近区域时在气柱上升作用的影响下,改变方向向上运动,完成钢包内水流整体的一个大回流。

(2) 临界卷渣过程钢渣界面变化可详细分为非常平稳—出现微小凸起—凸起开始长大—凸起明显变大—凸起开始形成渣滴—椭圆状渣滴将要与渣层脱离—出现完整的渣滴—渣滴进入钢液八个阶段。在这个过程中,渣滴脱离位置处的速度变化为先增大后减小再增大。

(3) 随着黏度的增加,临界卷渣速度不断增大,且运动黏度与临界卷渣速之间近似为直线关系。对实验条件下黏度和临界卷渣速度的关系进行线性拟合为 $V_{cr} = 73.9\eta + 0.0096$ 。

(4) 粒子图像测速实验测得的临界卷渣速度要比奥蒂斯、浅井滋生等推导的理论公式值小,因为传统临界卷渣速度的理论推导模型忽略了卷渣过程中能量提供的持续性和黏度对卷渣的抑制作用。综合理论公式特征和实验结果,得到实验条件下的临界卷渣速度修正公式为

$$V_{cr} = (1119.7\eta + 0.15) \left(\frac{\Delta \rho g \sigma}{\rho_{sl}^2} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

参 考 文 献

- [1] Li Y H, Zhao L H, Bao Y P, et al. Flow characteristic of molten steel in slab casting tundishes. *J Univ Sci Technol Beijing* 2014, 36(1): 21
(李怡宏, 赵立华, 包燕平, 等. 板坯中间包内钢液流动特性. 北京科技大学学报 2014, 36(1): 21)
- [2] Feng J H, Li B B, Wei G Z, et al. Effect of different bottom blowing argon methods on LF refining. *J Univ Sci Technol Beijing* 2009, 31(Suppl 1): 7
(冯聚合, 李博斌, 魏国增, 等. 钢包底吹氩方式对LF精炼的影响. 北京科技大学学报 2009, 31(增刊1): 7)

- [3] Zhao L H ,Ma W J ,Wang M. Physical modeling of argon bottom blowing refining in a 100 t ladle. *J Univ Sci Technol Beijing* 2014 , 36(Suppl 1) : 140
(赵立华 ,马文俊 ,王敏. 100 t 钢包底吹氩精炼过程的物理模拟. 北京科技大学学报 2014 36(增刊 1) : 140)
- [4] Han J J ,Li S Q ,Wu L. Stirring characteristics of argon blowing from the ladle bottom. *J Univ Sci Technol Beijing* 2011 31(9) : 1085
(韩建军 ,李士琦 ,吴龙. 钢包底吹氩搅拌特性. 北京科技大学学报 2011 31(9) : 1085)
- [5] Zheng W ,Tu H ,Li G Q ,et al. Physical simulation of refining process optimization for bottom argon blowing in a 250 t ladle. *J Univ Sci Technol Beijing* 2014 36(Suppl 1) : 53
(郑万 ,屠浩 ,李光强 ,等. 250 t 钢包底吹氩精炼工艺优化的物理模拟. 北京科技大学学报 2014 36(增刊 1) : 53)
- [6] Jakobsson A ,Sichen D ,Seetharaman S ,et al. Interfacial phenomena in some slag/metal reactions. *Metall Mater Trans B* 2000 31(5) : 973
- [7] Iguchi M ,Yoshida J ,Shimizu T ,et al. Model study on the entrapment of mold powder into molten steel. *ISIJ Int* 2000 40(7) : 685
- [8] Ignehi M ,Teranehi Y. Karman vortex probe for the detection of molten metal Surface flow in low velocity range. *ISIJ Int* 2002 42(9) : 939
- [9] Han Z J ,Holappa L. Mechanisms of iron entrainment into slag due to rising gas bubbles. *ISIJ Int* 2003 43(3) : 292
- [10] Yamashita S ,Iguchi M. Mechanism of mold powder entrapment caused by large argon bubble in continuous casting mold. *ISIJ Int* 2001 41(12) : 1529
- [11] Ai X G ,Bao Y P ,Wu H J ,et al. A study on water modeling of ladle with bottom argon blowing in critical slag entrapment condition. *Spec Steel* 2009 30(2) : 7
(艾新港 ,包燕平 ,吴华杰 ,等. 钢包底吹氩卷渣临界条件的水模型研究. 特殊钢 2009 30(2) : 7)
- [12] Feldbauer S L. *Slag Entrainment in the Mold of a Continuous Caster* [Dissertation]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University , 1995.
- [13] Mietz J ,Schneider S ,Oeters F. Emulsification and mass transfer in ladle metallurgy. *Steel Res* 1991 62(1) : 10