

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.02.009

# 炼钢转炉顶吹气体射流对熔池的穿透行为

李明明<sup>a,b</sup>, 李 强<sup>a,b</sup>, 张 伟<sup>a,b</sup>, 邹宗树<sup>a,b</sup>

(东北大学 a.材料与冶金学院; b.多金属共生矿生态利用教育部重点实验室, 沈阳 110819)

**摘 要:**在转炉吹炼过程中顶吹气体射流冲击液面形成的冲击坑对于熔池的成渣速率和冶炼效率有较大影响,是冶炼过程中的重要动力学参数。以 1/10 氧气顶吹转炉为对象进行了水模型实验,研究了枪位、顶吹气量对射流穿透行为的影响;基于实验与理论分析,讨论了液相表面张力对穿透深度的影响机理;通过引入用于冲击坑形成的射流冲击动能利用指数,建立了更为精确的穿透深度分析模型。研究表明:穿透深度随枪位的降低、顶吹气量的增大而增大,冲击直径随枪位的提高而增大但受顶吹气量的影响较小;液相表面张力对穿透深度的影响随着表面张力的增大而加强,随着穿透深度的增大影响更为显著;能量利用指数随着枪位的提高而增大,并基于实验得到了其与枪位的定量关系。

**关键词:**氧气转炉炼钢;穿透深度;冲击直径;表面张力;分析模型

**中图分类号:**TF724

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2015)02-0058-06

## Penetration behavior of bath induced by top-blown gas jets for steelmaking converter

LI Mingming<sup>a,b</sup>, LI Qiang<sup>a,b</sup>, ZHANG Wei<sup>a,b</sup>, ZOU Zongshu<sup>a,b</sup>

(a.School of Materials and Metallurgy; b.Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Ores, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, P. R. China)

**Abstract:** The cavity induced by top-blow gas jets impinging on the bath surface is one of most important parameters, which has overwhelming influence on the rate of slag formation and metallurgical performance. Water model experiments are conducted through a 1/10 scaled-down top-blown convertor. Effects of lance height and gas flow rate on penetration behavior are studied, and also the influence mechanism of liquid surface tension on penetration depth is addressed based on the experiments and theory analysis. An energy utilization index (EUI) is defined to reflect how much the impinging kinetic energy of gas jets are transferred into bath for formation of cavity, and an improved model is proposed to predict penetration depth of jets. The results show that penetration depth increases with lowering lance height and increasing gas flow rate, and impact diameter increases with increasing lance height, but is little affected by gas flow rate. Influence of liquid surface tension on penetration depth is enhanced with increasing surface tension and penetration depth. The EUI increases with increasing lance height, and a function relationship of it with lance height is obtained based on the experiments.

**Key words:** basic oxygen converters; penetration depth; cavity diameter; surface tension; analytical models

**收稿日期:**2014-11-10

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51104037);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120402010)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51104037) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (N120402010).

**作者简介:**李明明(1986-),男,东北大学博士研究生,主要从事冶金反应器多相传输行为等方面的研究。

邹宗树(1958-),男,东北大学教授,博士生导师,主要从事冶金传输原理及反应工程等方面的研究。

**通讯联系人:**李强(1978-),男,东北大学副教授,主要从事冶金多相传输及反应工程等方面的研究, (E-mail) liq@smm.neu.edu.cn。

顶吹(超音速)气体射流被广泛应用于诸如 BOF、EAF、VOD 及铜转炉冶炼等冶金过程。顶吹气体射流冲击到熔池液面引起反应器内熔池的穿透、喷溅、流动等复杂物理现象,特别是射流穿透熔池形成的冲击坑的尺寸是控制熔池内成渣速率、精炼反应以及影响熔池混合的重要的直接动力学参数,有研究<sup>[1-3]</sup>表明在转炉整个冶炼期大约 55% 的碳是在冲击区脱除。因此顶吹气体射流对熔池的穿透行为引起了众多研究者的兴趣。如杨文远等<sup>[4]</sup>、徐栋等<sup>[5]</sup>基于水模型实验研究了操作参数及氧枪配置对熔池穿透深度行为的影响。Asaharal 等<sup>[6]</sup>基于物理和模拟手段,研究了单喷孔及多喷孔超音速射流对熔池的穿透现象。早在 20 世纪 60 年代,Banks 等<sup>[7]</sup>研究了高速气体射流对液体表面的穿透现象,并基于冲击坑驻点的能量平衡首先提出了无因次射流动量与无因次穿透深度的关系式。随后,Qian 等<sup>[8]</sup>、Hwang 等<sup>[9]</sup>、Ek 等<sup>[10]</sup>对此进行了实验研究,得到了气体射流冲击下的熔池穿透及其与操作条件的定量关系。这些研究主要集中在两方面:一是通过实验获得的穿透深度利用 Banks<sup>[7]</sup>提出的无因次关系回归得到了不同的射流中心轴向速度衰减常数  $K$  (5.1~11.5);另一方面通过拟合实验数据调整上述无因次射流动量与无因次穿透深度关系式的形式,进而得出修正的穿透深度分析模型。然而在这些研究中都忽略了两个重要的因素:一是液体表面张力;二是忽略了射流冲击液面形成冲击坑时由于反射流、喷溅以及熔池运动消耗的一部分能量。正是这些被忽略的因素导致了不同研究者所得常数  $K$  值的巨大差异以及不同形式的穿透深度分析模型。

基于上述分析,笔者以顶吹氧气转炉为对象建立缩比例的水模型装置,研究转炉不同顶吹气量、枪位下射流对熔池的穿透行为,并根据实验结果与理论分析,讨论液体表面张力对穿透深度的影响;此外,在考虑射流冲击熔池过程中射流能量分配的情况下,建立描述穿透深度更为精确的分析模型。

## 1 水模型实验

### 1.1 实验原理

根据相似原理,要保证实验模型与原型运动规律相似,必须保证模型和原型的几何相似和动力学相似。本实验中模型和原型的几何相似比为 1:10,采用水模拟钢液,可压缩空气模拟氧气。对于气体射流冲击熔池液面的过程,根据相似理论以及 Meidani 等<sup>[11]</sup>的研究,主要与  $Fr$ 、 $Re$  以及  $We$  有关,然而实际过程比较复杂,很难同时满足模型与原型的所有相似准数相等<sup>[12]</sup>。考虑到气体惯性力与钢液重力起主导作用,选择修正的弗鲁德准数( $Fr'$ )作为实验定性参数<sup>[13]</sup>。实验中必须保证模型和原型的  $Fr'$  相等而  $We$  近似,也即:

$$Fr'_1 = Fr'_2, \quad (1)$$

即:

$$\frac{\rho_{g1} u_1^2}{(\rho_{l1} - \rho_{g1}) g L_1} = \frac{\rho_{g2} u_2^2}{(\rho_{l2} - \rho_{g2}) g L_2}, \quad (2)$$

进而,可得模型与原型顶吹气量之间的关系:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{5}{2}} \times \left[\frac{\rho_{g2}(\rho_{l1} - \rho_{g1})}{\rho_{g1}(\rho_{l2} - \rho_{g2})}\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

以上各式中, $Fr'_1$ 和 $Fr'_2$ 分别为模型及原型修正的弗鲁德准数; $\rho_{g1}$ 、 $\rho_{g2}$ 分别为模型和原型气体密度; $\rho_{l1}$ 、 $\rho_{l2}$ 分别为模型和原型中的液体密度; $u_1$ 、 $u_2$ 分别模型与原型气流速度; $L_1$ 、 $L_2$ 分别为模型和原型特征尺寸; $g$ 为重力加速度; $Q_1$ 、 $Q_2$ 分别为模型与原型的气体流量。实验模型与原型参数见表 1,模型与原型物性参数见表 2。

表 1 模型与原型参数

Table 1 Parameters of water model and prototype

参数	原型	模型
熔池直径/m	5.80	0.58
熔池深度/m	1.540	0.154
喷孔喉口直径/mm	30	3
喷孔出口直径/mm	43.4	4.30
喷孔数/个	6	6
喷孔夹角/(°)	14	14
熔池液体	钢液	水
液体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 000	1 000
液体表面张力/(N·m <sup>-1</sup> )	1.70	0.073
顶吹气体	氧气	空气
气体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.43	1.29

## 1.2 实验装置与方法

实验以 150 t 转炉为对象建立了 1/10 缩小比例水模型。模型采用有机玻璃制造,为了消除圆柱形容器的光学变形,将模型置于盛水的方形有机玻璃容器中。利用高分辨率相机(Canon 5D Mark III)记录冲击坑的形态。实验装置如图 1 所示。实验流量为 30.2~42.7 Nm<sup>3</sup>/h,相应的原型流量为 24 000~34 000 Nm<sup>3</sup>/h;实验枪位为 0.09~0.21 m,相应的原型枪位为 0.9~2.1 m。穿透深度通过粘贴在炉壁上的标尺读出。冲击坑直径通过如下处理获得:

$$d_c = \frac{D_1}{D'_1} \cdot d'_c, \quad (4)$$

式中: $d_c, d'_c$ 分别为实际冲击坑直径与图像中获得的冲击坑直径; $D_1, D'_1$ 分别为模型实际熔池直径与图像获得的模型熔池直径。实验数据处理方法如图 2 所示。

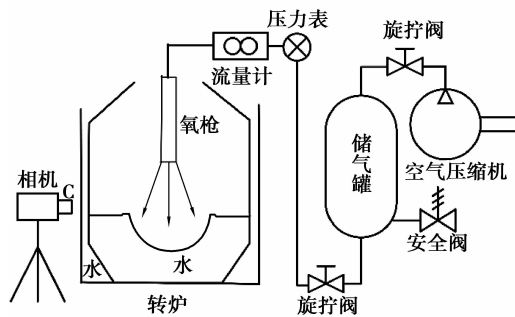


图 1 实验装置原理图

Fig.1 Schematic illustration of experiment setup

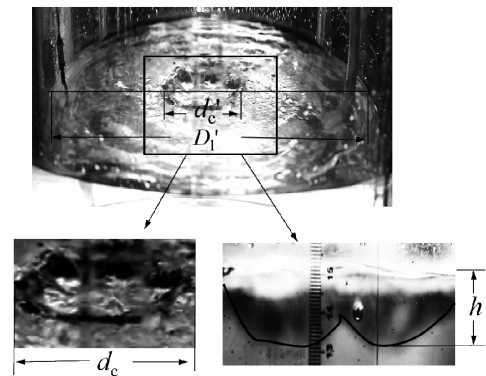


图 2 实验冲击坑深度与冲击直径的处理方法

Fig.2 Processing method of cavity depth and diameter obtained in experiments

## 2 结果与讨论

### 2.1 冲击坑尺寸

冲击坑尺寸是转炉冶炼过程的重要动力学参数,控制了冶炼过程熔池的成渣速率、精炼反应以及熔池混合。冲击坑尺寸主要受操作枪位、顶吹流量以及氧枪参数(喷孔数量、喷孔夹角)的影响。当低枪位操作时,被称为“硬吹”,有利于熔池的搅拌和脱碳;而高枪位下,也即“软吹”,利于熔池的化渣、脱磷。图 3 为枪位、顶吹流量对穿透深度的影响。结果表明穿透深度随着枪位的降低、顶吹气量的增大而增大。图 4 为枪位、顶吹流量对冲击直径的影响。由图可以看出:随着枪位的提高冲击直径明显增大,而顶吹流量对冲击直径的影响并不大,此结论与 Cheslak 等<sup>[14]</sup>的研究结果相一致。

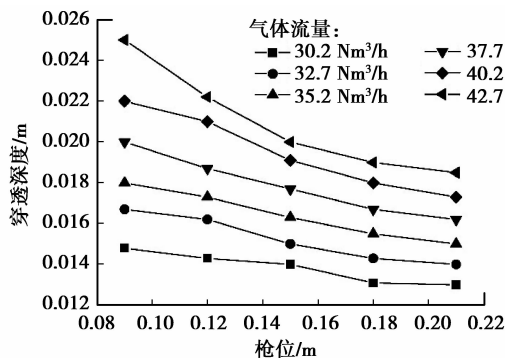


图 3 穿透深度随枪位及顶吹气量的变化

Fig.3 Cavity depth as the function of lance height and gas flow rate

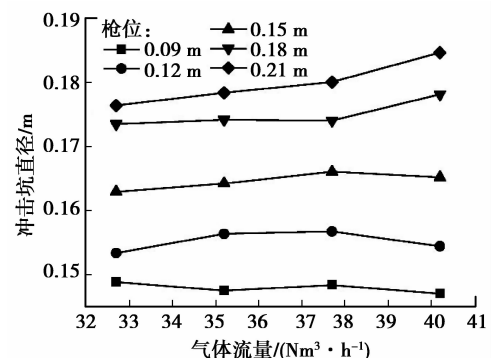


图 4 冲击直径随枪位及顶吹气量的变化

Fig.4 Cavity diameter as the function of lance height and gas flow rate

### 2.2 液相表面张力对穿透深度的影响

在之前的研究<sup>[6-13]</sup>中,为了简化分析模型,液相表面张力对穿透深度的影响往往被忽略,对于表面张力对穿透深度的影响程度以及影响机理未见深入的研究,因此有必要进行深入的分析。在射流冲击驻点主要受

如下力的作用:射流惯性力  $f_s$ ,切应力  $\tau$ ,表面张力  $f_\sigma$  以及浮力  $f_g$ ,受力示意图如图 5 所示。

Qian 等<sup>[8]</sup>和 Cheslak 等<sup>[14]</sup>的研究表明液体粘性对穿透深度的影响很小,可以忽略。因此在冲击坑驻点根据能量平衡可得:

$$\frac{1}{2}\rho_g v_c^2 = \rho_l g h + \frac{2\sigma}{R_0}, \quad (5)$$

式中: $v_c$  为射流冲击速度; $\rho_g, \rho_l$  分别为气体和液体密度; $h$  为穿透深度; $\sigma$  为液相表面张力; $R_0$  为冲击坑曲率半径。根据 Banks 等<sup>[7]</sup>的研究以及射流轴向速度衰减规律则有:

$$\frac{1}{2}\rho_g v_c^2 = \rho_l g h + \frac{8K^2\sigma h}{H^2}, \quad (6)$$

$$\frac{v_c}{v_j} = K \frac{d_e}{x}. \quad (7)$$

以上各式中  $H$  为枪位; $K$  为射流中心轴向速度衰减常数; $v_j$  为喷孔出口射流速度; $d_e$  为喷孔出口直径; $x$  为距离喷孔出口的轴向距离。联合式(6)(7),并将  $x$  用枪位  $H$  代替,则可得到考虑了液相表面张力的穿透深度分析模型:

$$\frac{M}{\rho_l g h H^2} = \frac{\pi}{2K^2} \left( 1 + \frac{8K^2\sigma}{\rho_l g H^2} \right), \quad (8)$$

式中: $M$  为单股射流的动量流率,  $M = (\pi/4)\rho_g d_e^2 v_j^2$ 。为了考察表面张力的影响大小,定义变量  $F$ :

$$F = \frac{\left( \frac{\pi}{2K^2} \cdot \frac{8K^2\sigma}{\rho_l g H^2} \right)}{\left( \frac{M}{\rho_l g h H^2} \right)} = \frac{4\pi\sigma h}{M} = \frac{4\pi\sigma H_1}{M} \frac{h}{H_1}, \quad (9)$$

式中  $F$  代表射流克服表面张力做功与射流总冲击动能的比。 $F$  越大,代表表面张力影响越大,反之越小; $H_1$  为熔池深度; $h/H_1$  为穿透深度与熔池深度的比,Koria 等<sup>[15]</sup>报道其值为 0.11~0.16,Zhou 等<sup>[16]</sup>实验得到其值小于 0.3。在目前的实验中, $H_1=0.154$  m,单股射流的最大动量流率为  $0.3284$  ( $\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2$ ,相应原型的熔池深度和单股射流的最大动量流率为  $1.54$  m 和  $661.4$  ( $\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2$ 。将此数据代入式(9),可得到模型与原型条件下表面张力对穿透深度的影响,如图 6 所示。结果表明:液体表面张力对穿透深度的影响随着表面张力的增大而增强,且随着穿透深度的增大影响更为显著。尤其是对于水模型研究,当  $h/H_1$  从 0.1 增大到 0.5 时, $F$  从 0.05 增大到 0.25,也就是说忽略液体表面张力可引起穿透深度 5%~25%的估计误差;而对于转炉原型, $F$  为 0.005~0.025,相应的估计误差为 0.5%~2.5%。此误差相较于水模型误差要小,这是因为射流冲击力对于冲击坑的形成有着更决定性的作用,原型中射流冲击力更大,且远大于液相的表面张力。基于上述分析,在一定的条件下(尤其对于模型研究)或者就一般化的应用研究而言,液体表面张力对穿透深度的影响是不可忽略的。

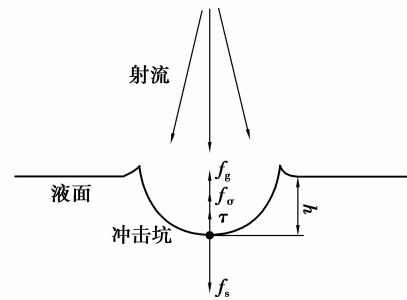


图 5 冲击坑驻点受力分析示意图

Fig.5 Schematic illustration of force acting at the stagnation point of cavity

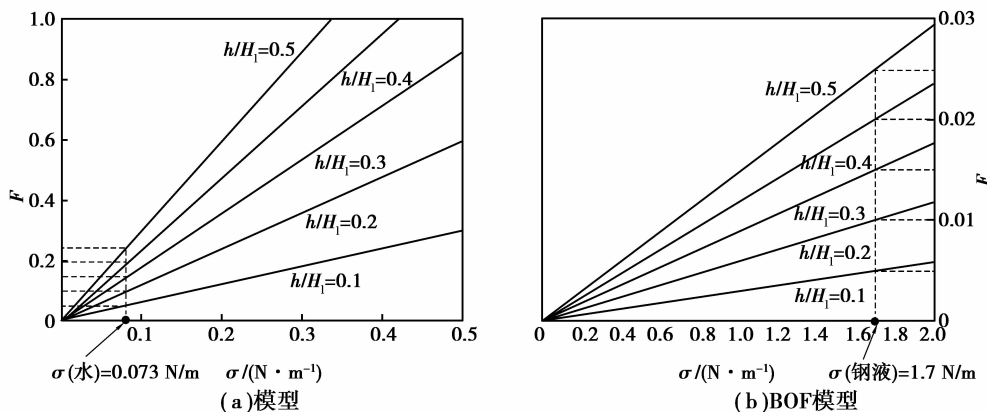


图 6 表面张力对穿透深度的影响

Fig.6 The effect of surface tension on cavity depth

### 2.3 穿透深度分析模型的改进

如前言中所述,气体射流的冲击动能除了用于冲击坑的形成外,气体反射流、喷溅、熔池搅拌也需要消耗一部分能量。而前人在得出穿透深度预测模型时,往往假定射流冲击动能全部作用于冲击坑形成,因此这些假定以及对液体表面张力的忽略可能共同导致了不同研究者获得的射流轴向速度衰减常数  $K$  的巨大差异。在此,定义能量作用系数  $\eta$ ,该系数代表用于冲击坑形成消耗的射流冲击动能占其总冲击动能的比,则式(5)变为:

$$\frac{1}{2} \eta \rho_g v_c^2 = \rho_l g h + \frac{2\sigma}{R_0} \quad (10)$$

考虑到实际冶炼中多使用多喷孔氧枪,则有:

$$M = \frac{M_n \cos \theta}{n} \quad (11)$$

式中: $M$  为单股射流的动量流率; $M_n$  为总的动量流率; $n$  代表喷孔数量; $\theta$  代表喷孔夹角。联合式(6)、(7)及式(10)、(11),可得:

$$\frac{M_n \cos \theta}{\rho_l g n H^3} = \frac{\pi}{2K^2 \eta} \frac{h}{H} \left[ \left(1 + \frac{h}{H}\right)^2 + \frac{8K^2 \sigma}{\rho_l g H^2} \right] \quad (12)$$

在笔者之前对于多喷孔射流流动行为的研究中,得到了射流轴向速度衰减系数  $K$  为 5.6<sup>[17]</sup>。根据实验结果,以式(12)左右两侧的无因次动量和无因次穿透深度作图,则可得不同枪位下的无因次动量和穿透深度的拟合关系,如图 7 所示。结果表明两者有很好的线性关系。不同枪位下的线性拟合参数如表 2 所示。结果表明随着枪位的提高,消耗于冲击坑形成的射流冲击动能占总射流冲击动能的比例逐渐增大,换言之用于熔池搅拌与喷溅的冲击动能利用率则减小。这一结果可能是高枪位下熔池具有弱的搅拌强度及喷溅量的原因之一。

图 8 显示了枪位与能量利用指数之间的拟合关系。基于目前的实验结果,可得到能量利用指数与枪位之间的函数关系,也即

$$\eta = 20.43968H^2 - 2.90804H + 0.58902 \quad (14)$$

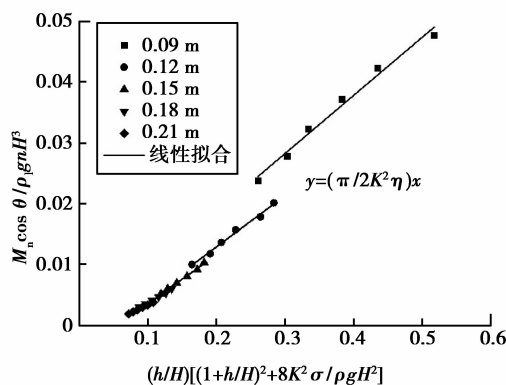


图 7 不同枪位下无因次射流动量与无因次穿透深度的关系  
Fig.7 The relationship of dimensionless jets momentum and dimensionless cavity depth at different lance heights

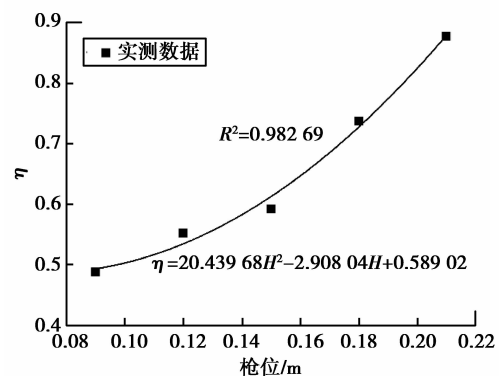


图 8 能量利用指数与枪位的拟合关系  
Fig.8 The fitting relationship of energy utilization index and lance height

## 3 结 论

1) 穿透深度随着枪位的降低、顶吹气量的增大而增大;冲击直径随着枪位的提高而增大,然而流量对冲击直径的影响很小。

2) 液相表面张力对穿透深度的影响不可忽略,且随着液相表面张力的增大而加强,且随着穿透深度的增大影响更为显著。

3) 提出了用于冲击坑形成的射流冲击动能利用指数,该指数随着枪位的提高而增大,并且得到了其与枪位之间的定量关系。联合液相表面张力以及该能量利用指数,提出了描述穿透深度更为精确的分析模型。

#### 参考文献:

- [1] Price D. Process engineering of pyrometallurgy [M]. London: 1974: 8-15.
- [2] Dogan N, Brooks G A, Rhamdhani M A. Comprehensive model of oxygen steel making part 1: model development and validation [J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2011, 51(7): 1086-1092.
- [3] Dogan N, Brooks G A, Rhamdhani M A. Comprehensive model of oxygen steel making part 3: decarburization in impact zone [J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2011, 51(7): 1102-1109.
- [4] 杨文远,丁永良,王明林,等.大型转炉多孔喷头与熔池作用的水模研究[J].钢铁,2004,39(3): 16-19.  
YANG Wenyuan, DING Yongliang, WANG Minglin, et al. Water modeling of interaction between jets from multi-nozzle lance and bath in large converter [J]. Iron and Steel, 2004, 39(3): 16-19.
- [5] 徐栋,苍大强,秦丽雪,等.低枪位下氧枪射流对熔池作用的冷态实验研究[J].冶金能源,2011,30(2):13-17.  
XU Dong, CANG Daqiang, QIN Lixue, et al. Hydrodynamics model experiment study on impact of top blow jet on bath under low lance level[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2011, 30(2): 13-17.
- [6] Asahara N, Naito K, Kitagawa I, et al. Fundamental study on interaction between top blown jet and liquid bath [J]. Steel Research International, 2011, 82(5): 587-594.
- [7] Banks R B, Chandrasekhara D V. Experimental investigation of the penetration of a high velocity gas jet through a liquid surface [J]. Journal of Fluid Mech, 1963, 15(1): 13-34.
- [8] Qian F, Mutharasan R, Farouk B. Studies of interface deformations in single- and multi-layered liquid baths due to an impinging gas jet [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27(6): 911-920.
- [9] Hwang H Y, Irons G A. A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(2): 302-315.
- [10] Ek M, Du S C. Study of penetration depth and droplet behavior in the case of a gas jet impinging on the surface of molten metal using liquid Ga-In-Sn [J]. Steel Research International, 2012, 83(7): 678-685.
- [11] Meidani A R N, Isac M, Richardson A, et al. Modelling shrouded supersonic jets in metallurgical reactor vessels [J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2004, 44(10): 1639-1645.
- [12] Lee M S, O'Rourke S L, Molloy N A. Oscillatory flow in the steel making vessel [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2003, 32(5): 281-288.
- [13] Martin M, Rendueles M, Diaz M. Steel-slag mass transfer in steel converter, bottom and top/bottom combined blowing through cold model experiments [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2005, 83(9): 1076-1084.
- [14] Cheslak F R, Nicholls J A, Sichel M. Cavities formed on liquid surfaces by impinging gaseous jets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 36(1): 55-63.
- [15] Koria S C, Lange K W. Penetrability of impinging gas jets in molten steel bath [J]. Steel Research International, 1987, 58(9): 421-426.
- [16] Zhou X B, Ersson M, Zhong L C, et al. Mathematical and physical simulation of a top blown converter [J]. Steel Research International, 2014, 85(2): 273-281.
- [17] Li M M, Li Q, Li L, et al. Effect of operation parameters on supersonic jet behavior of BOF six-nozzle oxygen lance [J]. Iron making and Steel making, 2014, 41(9): 699-709.