

转炉泡沫渣气泡分布特点及形成过程

李翔,包燕平[✉],王敏,林路

北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: baoyp@ustb.edu.cn

摘 要 在转炉留渣-双渣工艺脱磷阶段结束倒渣时,分别使用样勺获取倒渣开始时上部泡沫渣、倒渣结束时下部泡沫渣以及倒渣结束后炉内剩余底部泡沫渣,使用宏观及微观的方法分别分析泡沫渣各部位气泡分布特点。结果表明:气泡平均当量直径,上部>下部>底部;孔隙率,上部>下部>底部。转炉泡沫渣的形成过程为:随着大量 CO/CO₂ 气泡进入渣中,气泡之间不断碰撞、合并,上部气泡被下部气泡抬挤且由于气泡本身的浮力作用,气泡不断上升,气泡在上升时由于重力作用,气泡之间渣相在重力作用下析液,气泡的拓扑结构不断发生变化,同时气泡之间不断碰撞、合并,最后形成上部气泡直径大且孔隙率高,下部气泡直径小且孔隙率低的泡沫渣。

关键词 转炉; 泡沫渣; 气泡; 分布; 形成机理

分类号 TF769

Distribution characteristic and formation process of bubbles in foaming slag in a converter

LI Xiang, BAO Yan-ping[✉], WANG Min, LIN Lu

State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: baoyp@ustb.edu.cn

ABSTRACT Foaming slags at the top at the beginning of deslagging, in the lower portion at the end of deslagging, and at the bottom after deslagging were taken with a sample scoop at the end of dephosphorization in the converter slag-remaining and double-slag process. The distribution characteristic of bubbles was analyzed by the macro & micro analysis technique. The results indicate that the order of average equivalent diameter of bubbles is the slag at the top > slag in the lower > slag at the bottom, and the order of gas porosity is the slag at the top > slag in the lower > slag at the bottom. The formation process of foaming slags was observed and analyzed. Bubbles collide and coalesce with CO/CO₂ moving into the slag. Bubbles in the upper are elevated by bubbles in the lower and the bubbles rises up with buoyancy. The drainage of liquid slag occurs with gravity and the topological structure of bubbles changes. With bubble collision and coalescence, the foaming slag with larger bubbles and higher porosity in the upper and that with smaller bubbles and lower porosity in the lower are formed.

KEY WORDS converters; foaming slag; bubbles; distribution; formation mechanisms

炉渣泡沫化是冶金过程中普遍存在的现象,有关学者对于炉渣泡沫化指数及泡沫寿命影响因素做过大量研究^[1-8]。对于转炉双渣或留渣-双渣工艺,炉渣泡沫化是将前期脱磷渣从炉内倒出的主要手段^[9-10]。前人对于转炉泡沫渣的研究主要是减少吹炼终点炉渣泡沫化程

度以降低铁损或减少喷溅^[11-12],而在转炉倒渣时,泡沫渣孔隙率对于转炉倒渣量有重要影响。相同体积泡沫渣,孔隙率越低则倒渣量越大。本文通过宏观及微观的方法,研究了某厂 50 t 转炉留渣-双渣工艺倒渣时不同部位泡沫渣气泡分布特点,探讨转炉泡沫渣的形成过

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5157040346); 钢铁冶金新技术国家重点实验室自主基金资助项目(41614014)

程, 为转炉获得更大的倒渣量提供理论依据。

1 研究方法

研究转炉泡沫渣气孔分布特点, 在转炉留渣—双

渣工艺脱磷阶段结束, 转炉倒渣时使用取样勺取渣, 所取渣样分别为转炉倒渣开始时上部泡沫渣, 倒渣即将结束时下部泡沫渣, 以及倒渣结束后炉内剩余底部泡沫渣, 取样位置示意图如图 1 所示。

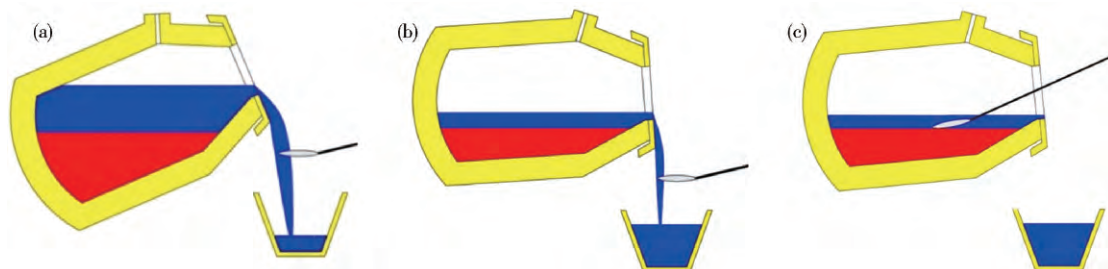


图 1 泡沫渣取样位置示意图: (a) 上部泡沫渣; (b) 下部泡沫渣; (c) 底部泡沫渣

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points: (a) slag at the top; (b) slag in the lower; (c) slag at bottom

取上部渣样时提前将样勺置于炉口下方, 倒渣初期目测样勺已满后将转炉摇回零位, 将上部渣样端走后, 再继续摇炉倒渣, 然后依次取下部及底部泡沫渣, 所取渣样应保持平稳, 避免磕碰, 待所取渣样自然冷却后作如下分析。宏观形貌观察: 对所取的渣样进行拍照观察, 从宏观上评价转炉泡沫渣的气泡分布特点; 微观形貌观察: 对所取泡沫渣镶样、磨平和喷碳之后在扫描电镜下观察其微观形貌, 从微观上分析转炉泡沫渣

的气泡分布特点。

2 结果与讨论

2.1 转炉泡沫渣宏观形貌

转炉不同部位所取渣样冷却后, 泡沫渣宏观形貌如图 2 所示。其中上部泡沫渣由于极易碎裂, 未经任何处理, 而下部及底部泡沫渣为使用磨样机磨平处理后照片(图中标尺最小刻度为 1 mm)。

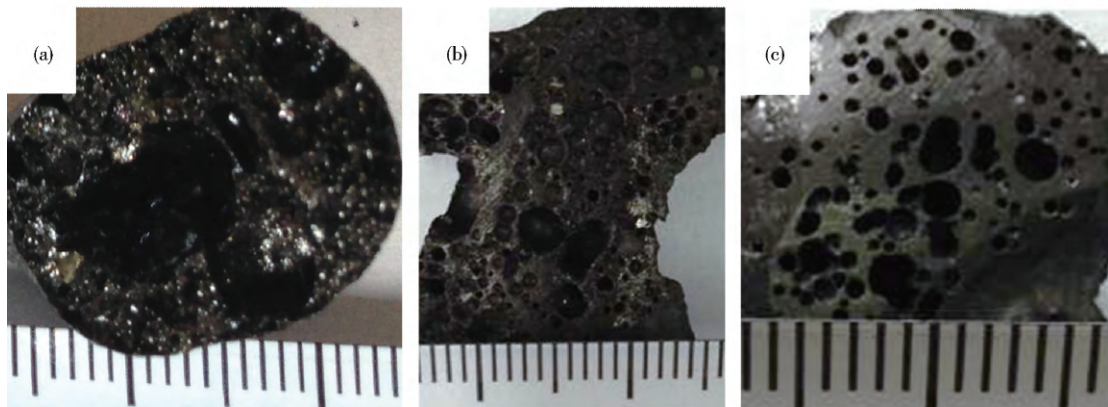


图 2 不同部位泡沫渣宏观形貌: (a) 上部泡沫渣; (b) 下部泡沫渣; (c) 底部泡沫渣

Fig. 2 Macro morphology of foaming slags at different positions: (a) slag at the top; (b) slag in the lower; (c) slag at the bottom

上部泡沫渣冷却后极为疏松, 使用较小的外力即可使其碎裂。由上图 2(a) 可见, 上部气泡直径极大, 大气泡直径超过 5 mm, 同时存在大量直径 > 2 mm 的气泡, 由于气泡直径较大, 气泡形状极不规则。泡沫渣冷却过程中, 气泡体积收缩, 所观察气泡直径应小于吹炼过程中炉内泡沫渣气泡直径。

由图 2(b) 可见, 下部泡沫渣冷却后内部同样存在大量的气泡, 其中大气泡直径 > 3 mm, 同时存在大量直径 < 2 mm 的气泡, 下部泡沫渣气泡直径明显小于上部泡沫渣。同时, 下部泡沫渣相对上部泡沫渣更致密, 由于下部泡沫渣气泡直径较小, 气泡多接近球形。

由图 2(c) 可见, 底部泡沫渣中也存在大量的气

泡, 其中大气泡直径 > 2 mm, 同时存在大量直径 < 1 mm 的气泡, 大气泡直径稍小于下部泡沫渣。

总体而言, 根据宏观形貌观察结果, 不同部位泡沫渣气泡直径为上部 > 下部 > 底部, 且上部泡沫渣明显更疏松, 孔隙率明显大于下部和底部。

2.2 转炉泡沫渣微观形貌

图 3 为冷却后转炉底部泡沫渣背散射照片, 图 4 为图 3(a) 对应面扫描照片。由图 4 可见, 转炉底部泡沫渣中存在大量的 Ca、Si、Mg、Fe、O、P 和 S 元素, 图 3(a) 中黑色部分为气泡, 灰色部分为渣相, 白色部分为铁珠, 其中铁珠主要是由于气泡穿越钢渣界面形成的液膜将钢液带入渣中形成。由图 3 可见, 底部泡

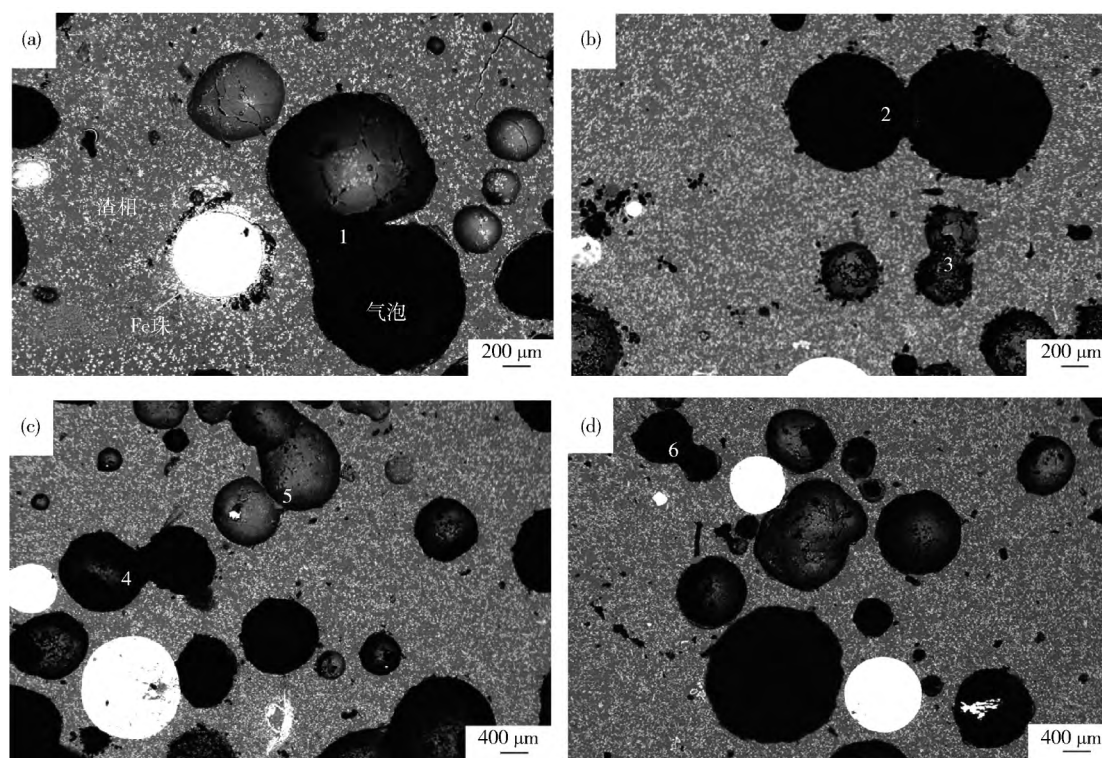


图3 底部泡沫渣渣样背散射照片

Fig.3 EBSD photos of foaming slag at the bottom

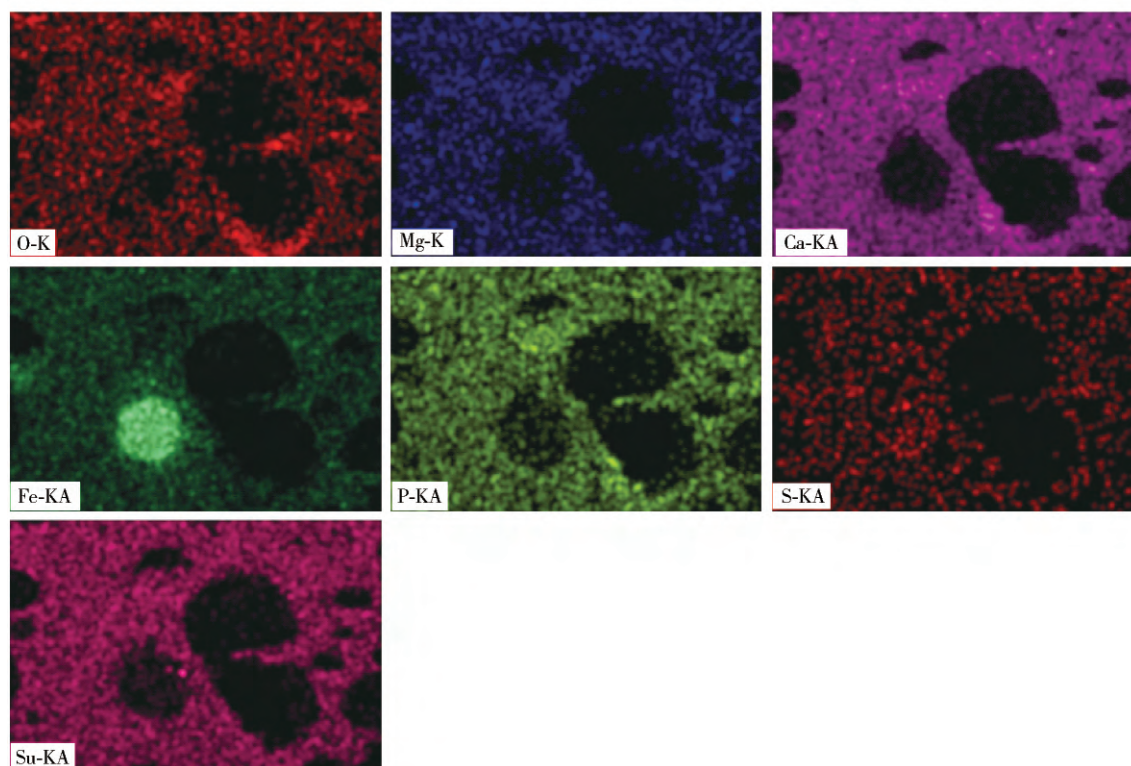


图4 图3(a)对应面扫描照片

Fig.4 Corresponding surface scanning photos of Fig.3(a)

沫渣存在大量的气泡,其中多数气泡接近球形,少数为不规则形状,气泡直径差别较大,其中较大的气泡直径 $>2\text{ mm}$,大量气泡直径 $<1\text{ mm}$ 。

由图3可见,冷却后转炉底部泡沫渣存在大量密集的气泡,多数气泡单独存在,但也有大量气泡相互之间碰撞,并有进一步合并的趋势,表明钢液中形成的

CO/CO₂在穿越渣层时相互之间不断碰撞、合并。由图3可见,气泡1为两个直径将近1 mm 气泡正在碰撞,气泡5为三个直径将近1 mm 气泡正在碰撞,其他如图中2、3、4和6均为两个气泡之间的碰撞,可见气泡之间的碰撞可以发生在两个、三个或多个气泡之间,气泡碰撞后气泡合并,单个气泡直径将增大。图3可见转炉底部泡沫渣气泡直径分布极不均匀,观察位置

不同气泡直径也相差较大。当然,所观察泡沫渣是冷却到室温时的形貌,实际转炉内气泡受热膨胀后气泡直径大于所观察气泡。

图5为冷却后下部泡沫渣背散射照片。下部泡沫渣同样存在大量的气泡,其中多数气泡接近球形,少数为不规则形状。气泡直径差别较大,其中较大的气泡直径>3 mm,大量气泡直径<2 mm。

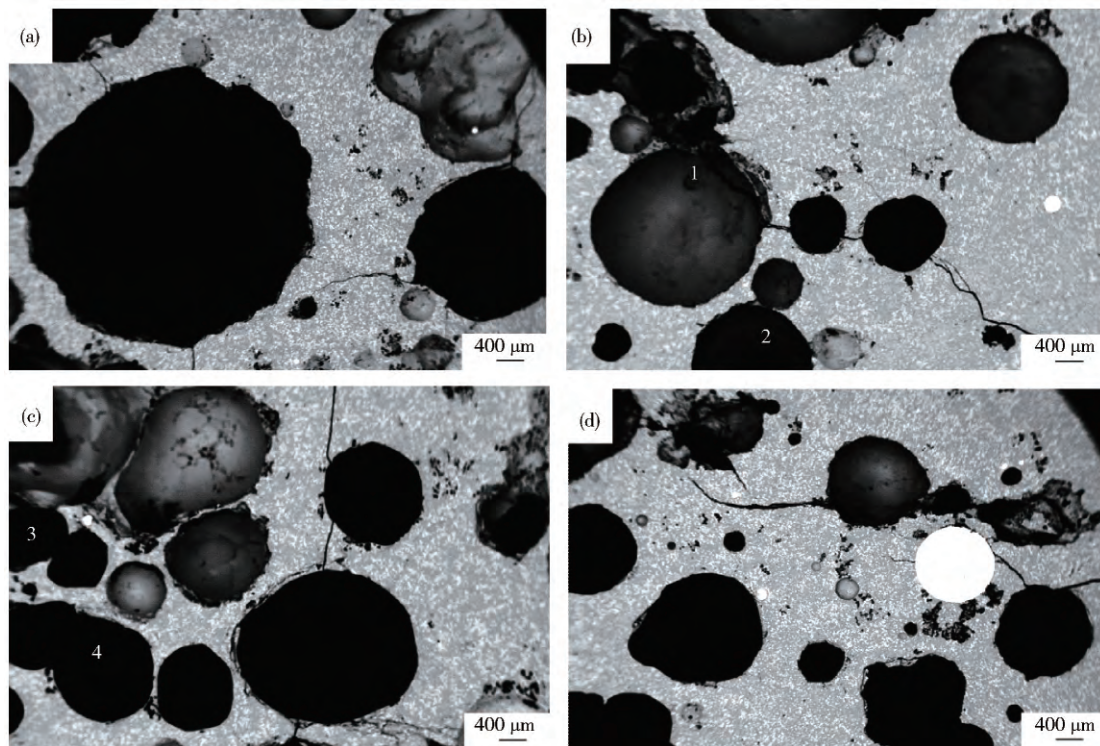


图5 下部泡沫渣渣样背散射照片

Fig.5 EBSD photos of foaming slag in the lower

由图5可见,对于冷却后转炉下部泡沫渣,多数气泡单独存在,但也有大量气泡相互之间碰撞,并有进一步合并的趋势,表明下部泡沫渣气泡之间仍然在不断碰撞、合并。气泡2为两个直径不同的气泡正在碰撞,其中较大气泡直径超过1 mm,较小气泡直径在1 mm以内;气泡4同样为两个气泡之间的碰撞;气泡1是三个气泡之间的碰撞,其中大气泡直径>2 mm;气泡3则是多个气泡之间的碰撞。因此下部泡沫渣气泡之间的碰撞同样可以发生在两个、三个或多个气泡之间,气泡碰撞后单个气泡直径将增大。由此可见,转炉下部泡沫渣气泡直径分布同样极不均匀,与底部泡沫渣相似,下部泡沫渣主要基体相为渣相,同时含有一定量的铁珠。从该图还可以看出,下部泡沫渣出现大量裂纹,主要是由于下部渣样气泡更大,制样过程中更易导致试样碎裂。

对于上部泡沫渣渣样,由于气泡直径过大,渣样极易碎裂,难以制样,且上部泡沫渣大气泡直径超出显微电镜量程,故无法观察上部泡沫渣渣样的微观形貌。

2.3 转炉泡沫渣气泡分布特点

使用Image-ProPlus6.0软件对底部和下部各60张渣样背散射照片进行处理,处理后照片示例如图6所示。

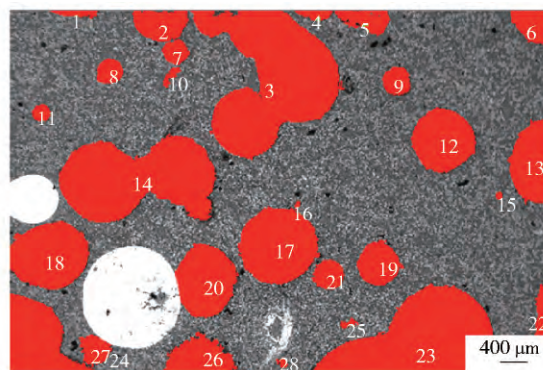


图6 Image-ProPlus6.0软件处理照片示例

Fig.6 Photo example processed by Image-ProPlus 6.0 software

使用Image-ProPlus 6.0分别统计底部泡沫渣及下部泡沫渣气泡数量及当量直径,计算单位面积气泡个

数(mm^{-2}),如表1所示.可见,底部泡沫渣 1mm^2 面积内气泡个数为2.9,而下部泡沫渣气泡个数为2.2,下部泡沫渣单位面积气泡个数明显少于底部泡沫渣.同时,底部泡沫渣气泡平均当量直径为 $381.6\mu\text{m}$,而下部泡沫渣平均当量直径为 $498.9\mu\text{m}$,下部泡沫渣平均当量直径大于底部泡沫渣.

表1 不同部位转炉泡沫渣气泡分布统计数据

Table 1 Statistic data of the bubble distribution of foaming slags in different parts during converter steelmaking process

泡沫渣部位	单位面积气泡个数/ mm^{-2}	气泡平均当量直径/ μm	孔隙率/%
底部	2.9	381.6	33.2
下部	2.2	498.9	43

使用气泡面积占视场面积比例表示泡沫渣的孔隙率.统计底部及下部泡沫渣孔隙率如表1所示.可见底部泡沫渣孔隙率为33.2%,而下部泡沫渣孔隙率为43.4%,底部泡沫渣孔隙率低于下部泡沫渣.

图7为底部及下部泡沫渣气泡当量直径个数分布比例.可见,底部泡沫渣气泡当量直径主要集中在 $0\sim 600\mu\text{m}$ 之间,合计所占比例为80.4%,随着气泡直径的增加气泡个数所占比例降低.下部泡沫渣中气泡当量直径同样主要集中在 $0\sim 600\mu\text{m}$ 之间,但合计所占比例为76.2%.下部泡沫渣中除 $0\sim 200\mu\text{m}$ 气泡所占比例少于底部,其余当量直径气泡所占比例都有所增加,其中当量直径 $1.5\sim 2\text{mm}$ 气泡数量下部比底部增加0.5%(增幅为26.3%),当量直径 $>2\text{mm}$ 气泡数量下部比底部同样增加0.5%(增幅为62.5%),表明下部泡沫渣中大气泡更多.

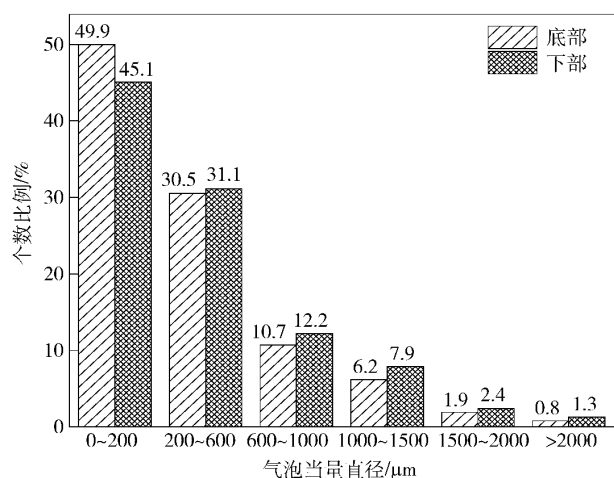


图7 不同当量直径气泡个数分布比例

Fig.7 Number distribution of bubbles with different equivalent diameters

图8为不同当量直径气泡面积分布比例.可见,无论是底部还是下部泡沫渣中,所占面积最大的气泡

当量直径主要集中在 $1\sim 1.5\text{mm}$ 及 $>2\text{mm}$ 区间, $0\sim 200\mu\text{m}$ 气泡个数最多但所占面积最小.下部泡沫渣在气泡当量直径 $600\sim 1000\mu\text{m}$ 、 $1.5\sim 2\text{mm}$ 及 $>2\text{mm}$ 区间所占面积高于底部泡沫渣,其中气泡当量直径 $>2\text{mm}$ 所占面积下部相对底部明显增加,增幅达20.4%.

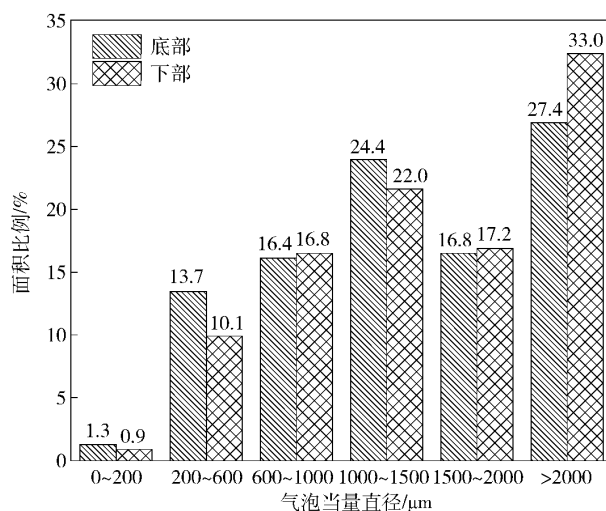


图8 不同当量直径气泡面积分布比例

Fig.8 Area distribution of bubbles with different equivalent diameters

通过微观形貌分析可知,气泡平均当量直径为下部 $>$ 底部,且孔隙率为下部 $>$ 底部.由于上部泡沫渣气泡直径过大且炉渣极易碎裂,无法镶样后观察微观形貌.但通过宏观形貌结果可知上部泡沫渣孔隙率明显大于下部及底部泡沫渣,且气泡平均当量直径明显大于下部和底部.因此,转炉泡沫渣的气泡平均当量直径分布特点是上部 $>$ 下部 $>$ 底部,泡沫渣从上至下气泡直径逐渐减小.孔隙率分布特点为上部 $>$ 下部 $>$ 底部,泡沫渣孔隙率分布至上而下逐渐降低.

2.4 转炉泡沫渣形成过程

转炉碳氧反应形成大量 CO/CO_2 气泡,这些密集的气泡进入炉渣中将发生碰撞(由底部泡沫渣微观形貌分析结果可知),无论是两个气泡之间的碰撞,还是多个气泡之间的碰撞,任意两个气泡在相互碰撞时,由Laplace定律可知,不同气泡内部压力不同,如图9所示.假设其中一个气泡碰撞液膜处内部压力为 P ,则相应另一个气泡碰撞液膜处内部压力为 $P - \frac{2\gamma}{r}$,此时,相邻胞元的压力差满足

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1)$$

式中: ΔP 为碰撞气泡压力差, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; γ 为气泡表面张力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$; r 为碰撞气泡曲率半径, μm .

气泡碰撞时,若液膜强度不足以维持压力差,相邻

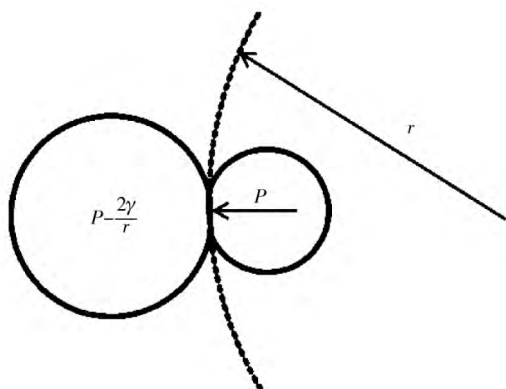


图9 气泡碰撞时内部压力差

Fig. 9 Internal pressure difference during bubble collision

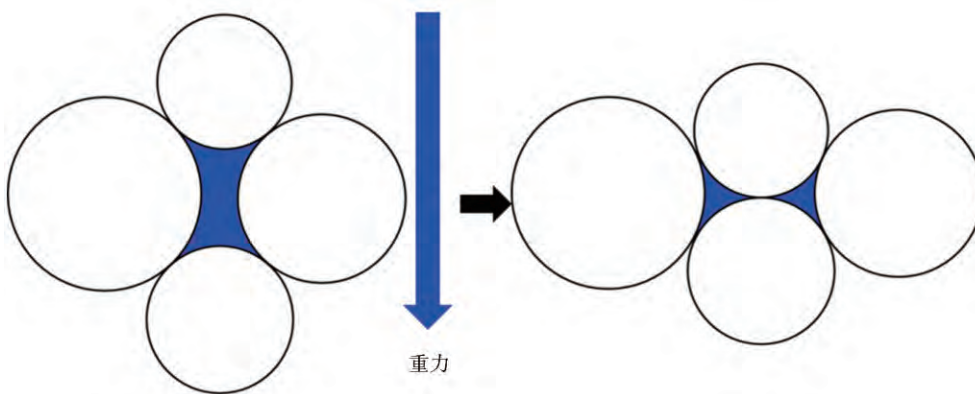


图10 气泡析液几何拓扑结构变化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of geometric topology change during bubble drainage process

减小,底部泡沫渣孔隙率最低,但由于炉渣和钢液之间的黏附力,底部泡沫渣难以从炉内分离。

因此,转炉泡沫渣的形成过程为:随着Si、Mn氧化结束,碳氧反应到来,大量CO/CO₂气泡进入渣中,气泡之间不断碰撞、合并,由于气泡不断进入,上部气泡被下部气泡抬挤且由于气泡本身的浮力作用,气泡不断上升,气泡在上升同时由于重力作用,气泡之间的渣相在重力作用下析液,气泡的拓扑结构不断发生变化,气泡之间不断碰撞、合并,最后形成上部气泡直径大、孔隙率高,下部气泡直径小、孔隙率低的泡沫渣。可见,析液是影响泡沫形成过程的一个重要因素,析液导致气泡之间的渣相减少,降低析液速度或减少析液时间有利于得到孔隙率更低的泡沫渣。显然,相同体积泡沫渣,孔隙率越低则倒渣量越大。

3 结论

(1) 转炉泡沫渣的气泡平均当量直径分布特点是上部>下部>底部,泡沫渣从上至下气泡直径逐渐减小。孔隙率分布特点为上部>下部>底部,泡沫渣孔隙率分布至上而下逐渐降低。

(2) 转炉泡沫渣的形成过程为:碳氧反应形成的

气泡则会合并。因此,碰撞气泡内部压力差是导致气泡合并的动力,合并后单个气泡体积增加,合并后的气泡再与其他气泡继续碰撞,单个气泡体积不断增加。随着气泡体积的增加,渣中大气泡增多,同时气泡之间的渣相在重力作用下析液,析液将导致气泡间的几何结构重排,气泡间的几何拓扑关系发生变化^[13],如图10所示。

由图10可见,气泡之间渣相的析液使得气泡之间的渣相减少,伴随着气泡直径的变大,泡沫渣的孔隙率增加。由于炉渣底部不断有气体进入,炉渣体积逐渐膨胀,达到一定高度后即可倒渣。倒渣时,首先倒出的是孔隙率较高的上层泡沫渣,之后泡沫渣孔隙率逐渐

大量CO/CO₂气泡进入渣中,气泡之间不断碰撞、合并,上部气泡被下部气泡抬挤且由于气泡本身的浮力作用,气泡不断上升,气泡在上升同时由于重力作用,气泡之间的渣相在重力作用下析液,气泡的拓扑结构不断发生变化,最后形成上部气泡直径大、孔隙率高,下部气泡直径小、孔隙率低的泡沫渣。

参考文献

- [1] Ito K, Fruehan R J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results. *Metall Mater Trans B*, 1989, 20(4): 509
- [2] Ito K, Fruehan R J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part II. Dimensional analysis and foaming in iron and steelmaking processes. *Metall Mater Trans B*, 1989, 20(4): 515
- [3] Ito K, Fruehan R J. Slag foaming in electric furnace steelmaking. *I & SM*, 1989, 16(8): 55
- [4] Lahiri A K, Seetharaman S. Foaming behavior of slags. *Metall Mater Trans B*, 2002, 33(3): 499
- [5] Cheng G G, Niu S T, Zhang J, et al. Slag foaming in the process of reduction and refining. *J Iron Steel Res*, 1996, 8(5): 12
(成国光, 牛四通, 张鉴, 等. 还原精炼条件下炉渣的泡沫化. *钢铁研究学报*, 1996, 8(5): 12)
- [6] Yue K X, Dong Y, Wang S J, et al. Experimental study on foa-

- ming behavior of refining slag. *J Iron Steel Res*, 2000, 12(3): 14
(乐可襄,董元,王世俊,等. 精炼炉熔渣泡沫化的实验研究. 钢铁研究学报, 2000, 12(3): 14)
- [7] Zhang D L, Wang X M, Kuang S B, et al. Study on foaming property of LF refining slag. *J Iron Steel Res*, 2003, 15(6): 12
(张东力,王晓鸣,匡世波,等. LF 精炼渣发泡性能的实验研究. 钢铁研究学报, 2003, 15(6): 12)
- [8] Niu Q, Chu S J, Wu K, et al. Morphotype conversion of foams in metallurgical melts. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2000, 22(2): 109
(牛强,储少军,吴铿,等. 冶金熔体泡沫演化中的转型. 北京科技大学学报, 2000, 22(2): 109)
- [9] Zhu Y X, Zhong L C, Xiao Z M. Application and development of deep dephosphorization technology in top and bottom combination blown converters. *Steelmaking*, 2013, 29(4): 1
(朱英雄,钟良才,萧忠敏. 复吹转炉深脱磷技术在国内的应用与进展. 炼钢, 2013, 29(4): 1)
- [10] Wang X H, Zhu G S, Li H B, et al. Investigation on “slag-re-maining + double-slag” BOF steelmaking technology. *China Metall*, 2013, 23(4): 40
(王新华,朱国森,李海波,等. 氧气转炉“留渣+双渣”炼钢工艺技术研究. 中国冶金, 2013, 23(4): 40)
- [11] Cui Y, Nan X D, Feng J, et al. Technology of foaming slag level control during latter period of blowing for BOF process. *Steelmaking*, 2010, 26(2): 70
(崔阳,南晓东,冯军,等. 转炉吹炼末期泡沫渣高度控制技术. 炼钢, 2010, 26(2): 70)
- [12] Lu K, Li J Z. Effect of oxygen used in steel making on splash in converter. *Steelmaking*, 2009, 25(6): 20
(卢凯,李具中. 炼钢用氧对转炉喷溅的影响. 炼钢, 2009, 25(6): 20)
- [13] Gergely V, Clyne T W. Drainage in standing liquid metal foams: modeling and experimental observations. *Acta Mater*, 2004, 52(10), 453