

不同气源条件下熔渣泡沫化的高温模拟

胡超^{1,2}, 王瑞芳^{1,2}, 张波^{1,2*}, 李梦伟^{1,2}, 刘承军^{1,2}, 姜茂发^{1,2}

(1. 多金属共生矿生态冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 熔渣泡沫化的有效控制对冶金工艺的稳定控制具有重要的现实意义。开展了外引和内生两种气源条件下熔渣泡沫化的高温模拟研究, 得到如下结论: 在外引气源条件下, 泡沫渣由尺寸为 7~15 mm 的多面体气泡堆积而成, 泡沫化高度随气体流量增加先升高后降低; 在内生气源条件下, 泡沫渣由尺寸为 0.5~1.0 mm 的球形气泡堆积而成, 泡沫化高度随气体产生量的增加和熔渣碱度的降低而升高。典型炼钢辅料的消泡效果对比如下: 活性石灰>纯碱>石灰石>白云石>菱镁矿。

关键词: 熔渣; 泡沫化; 泡沫结构; 泡沫化高度; 外引气源; 内生气源; 消泡剂

中图分类号: TF703.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)03-0130-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

High-temperature simulation of slag foaming induced by various gas sources

Hu Chao^{1,2}, Wang Ruifang^{1,2}, Zhang Bo^{1,2*}, Li Mengwei^{1,2}, Liu Chengjun^{1,2}, Jiang Maofa^{1,2}

(1. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallurgical Ores (Ministry of Education), Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The effective control of slag foaming has an important practical significance for stability of metallurgical process. In this paper high-temperature simulation of slag foaming induced by interior and exterior gas sources had been conducted. Under present experimental conditions, the following conclusions are obtained. Induced by exterior gas source, the foamed slag consisted of polyhedral bubbles with a size of 7~15 mm. The foaming height firstly increased and afterwards decreased with increasing gas flowrate. When induced by interior gas source, the foamed slag was stacked with spherical bubbles with a size of 0.5~1.0 mm; the foaming height increased with increasing gas amount released by slag-metal reaction and decreasing slag basicity. The defoaming agent were classified depending on their effects: active lime > soda ash > limestone > dolomite > magnesite.

Key words: slag, foaming, foam structure, foaming height, exterior gas source, interior gas source, defoaming agent,

0 引言

熔渣泡沫化在冶金工艺过程中发挥着至关重要

的作用。适度的泡沫化有利于改善化学反应的动力学条件^[1], 提高冶炼效率和能量利用效率^[2], 但泡沫化不足或过度将恶化冶炼效果^[3], 严重时还会引发

收稿日期: 2021-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805100); 国家自然科学基金项目(U1908224)。

作者简介: 胡超(1996—), 男, 硕士研究生, 河北承德人, 主要工作方向: 冶金熔渣泡沫化, E-mail: huchao19960109@163.com; *通讯作者: 张波(1984—), 男, 副教授, 博士, 山东高唐人, 主要工作方向: 高品质钢冶炼, E-mail: zhangbo@smm.neu.edu.cn。

飞溅事故^[4],造成人身伤亡和设备损坏。可见,熔渣泡沫化的精确控制对冶金工艺过程的控制和安全生产具有重要意义。

熔渣的泡沫化程度通常用泡沫化高度来衡量,即:泡沫渣液面高度与初始液面高度之差。Ito 等^[5]向 CaO-SiO₂-FeO 渣中通入氩气,发现泡沫化高度随氩气流量增加而线性增加。Corbari 等^[6]利用焦炭、石墨等碳质材料与熔渣中 (FeO) 的反应引发泡沫化,试验结果表明随渣中 (FeO) 含量升高,泡沫化高度先升高后降低。本质上,泡沫化高度的演变与泡沫结构密切相关^[7-9]。在以上研究中,分别涉及了外引气源^[6]和内生气源^[1, 10]两种气源形式。大量文献^[10-12]表明,冶金熔渣泡沫化一方面取决于气源参数,包括气体流量,气泡尺寸等;另一方面取决于熔渣的物理性质,包括黏度、表面张力和密度等。鉴

于高温下冶金熔渣泡沫化具有难以观察且动态波动的特征,其不同气源条件下的演变过程和结构特征仍不明晰。

为此,笔者利用高温模拟试验表征了内生气源和外引气源条件下的冶金熔渣泡沫化过程,对比分析了泡沫渣的结构特征和高度变化,并考察了几种常见炼钢辅料的消泡效果,以期对冶金熔渣泡沫化的控制提供参考和依据。

1 试验方法

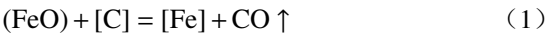
参考国内某钢厂转炉前期渣成分设计了 CaO-SiO₂-FeO_x-MgO 渣系作为试验渣,其化学成分如表 1 所示。试验渣均采用分析纯化学试剂配制而成,使用前在 120 ℃ 下烘干 4 h 除去水分和杂质。

表 1 试验渣化学成分设计
Table 1 Chemical compositions of experimental slag

序号	碱度R	w/%			
		CaO	SiO ₂	TFe	MgO
试验渣 A	0.5	24.00	48.00	20.00	8.00
试验渣 B	0.75	30.86	41.14	20.00	8.00
试验渣 C	1.0	31.72	31.72	20.00	8.00
试验渣 D	1.25	40.00	32.00	20.00	8.00

试验采用了内生气源和外引气源两种发泡形式。在外引气源泡沫化试验中,向熔渣中通入纯度 99.9% 氩气作为气源;在内生气源泡沫化试验中,向熔渣中加入含碳生铁,使其与熔渣中 (FeO) 发生

式 (1) 所示的化学反应释放 CO 气体,进而引起熔渣泡沫化。



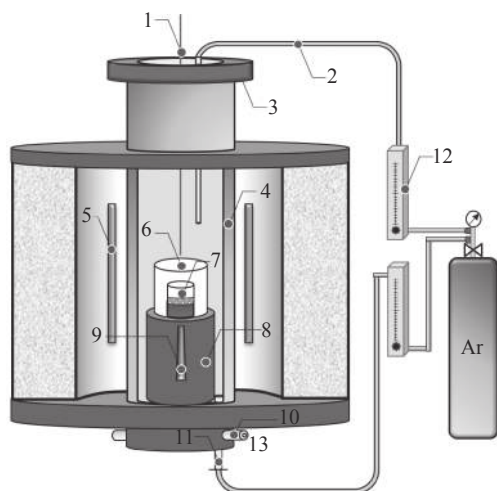
试验用含碳生铁的化学成分如表 2 所示。

表 2 生铁的化学成分
Table 2 Chemical compositions of pig iron

Fe	C	Si	Mn	P	S
94.80	4.60	0.36	0.12	0.08	0.04

试验设备如图 1 所示。将按照比例配好的 120 g 渣料放入 MoSi₂ 高温管式炉内的氧化镁坩埚(内径 45 mm)中,在氩气保护下随炉加热到 1 500 ℃ 并保温 30 min,利用钼丝挂渣法测量熔渣的初始液面高度,然后分别开展内生气源和外引气源条件下的泡沫化试验,试验过程中通过插入钼丝测量泡沫渣液面高度,直至泡沫渣完全衰退。

冶金工艺过程中经常使用冶炼辅料作为消泡剂来避免泡沫化过度引发飞溅事故^[13]。笔者借助熔渣泡沫化高温模拟试验考察了五种典型的炼钢辅料(包括活性石灰、石灰石、白云石、菱镁石和纯碱)的消泡效果。当泡沫化高度达到最大值时,将 1 g 炼钢辅料投入坩埚内泡沫渣中,随后采用钼丝挂渣法测量泡沫化高度的变化。



1—钼丝; 2—吹气管; 3—可移动挡板; 4—气体转子流量计; 5—刚玉管;
6—炉管; 7—发热体; 8—石墨坩埚; 9—氧化镁坩埚; 10—样品台;
11—热电偶; 12—进气口; 13—冷却水进口

图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2 结果与讨论

2.1 外引气源条件下的熔渣泡沫化现象

从高温管式炉上方观察到外引气源条件下形成了多面体结构的泡沫渣,如图2所示,测量可知这些多面体气泡尺寸在7~15 mm范围内。

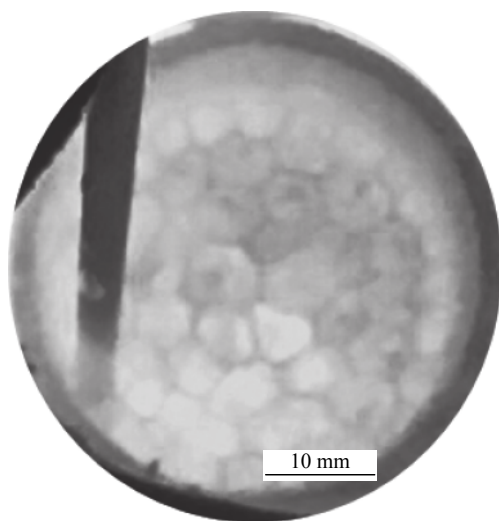


图2 泡沫渣形貌俯视(氩气流量 50 mL/min)

Fig. 2 Top view of foamed slag (Ar flow rate of 50 mL/min)

图3为不同氩气流量条件下的泡沫化高度。随着氩气流量的增加,泡沫化高度呈先增加后降低的趋势。这是因为在较低的氩气流量范围内,氩气流量增加带来的主要影响是熔渣中停留的气体体积增加,从而使得泡沫化高度增大;而在较高的氩气流量范围内,氩气流量升高引起气泡尺寸显著增大,导致

气泡的上浮和破裂速度加快,从而使得泡沫化高度降低。

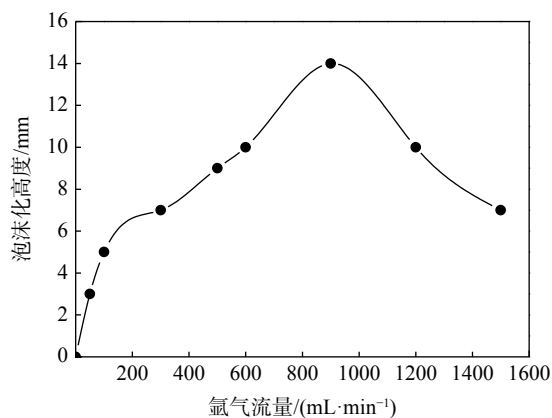


图3 泡沫化高度随氩气流量的变化情况

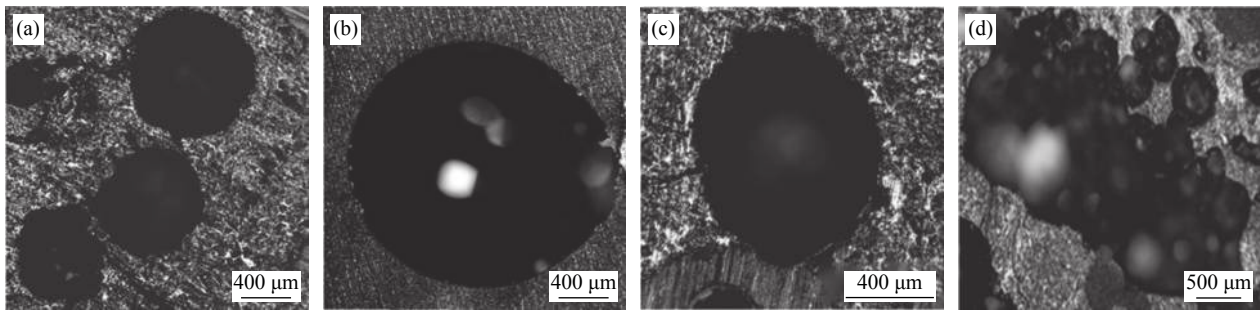
Fig. 3 Foaming height variation with Ar flow rate

2.2 内生气源条件下的熔渣泡沫化现象

试验中观察到内生气源条件下,泡沫渣为球形泡沫结构,其由细密的球形气泡堆积而成。由于气泡尺寸太小,受试验条件限制未能拍摄到高温下的球形泡沫渣结构。为此,对盛有泡沫渣的坩埚进行淬冷处理、环氧树脂封装,并在光学显微镜下观察其泡沫结构。图4为光学显微镜下观察到的球形泡沫渣中的气泡形貌,可以发现存在球形、椭球形和不规则形三种气泡形貌。球形泡沫结构主要由直径为0.5~1.0 mm的球形气泡构成,如图4(a)所示;还可观察到少量大尺寸球形气泡,如图4(b)所示。此外,还存在1.0~2.0 mm的椭球形气泡,如图4(c)所示;以及少量大于2.0 mm的不规则气泡,如图4(d)所示,大尺寸的不规则气泡是由多个气泡合并形成的。

图5为不同生铁加入量条件下泡沫化高度随时间的变化情况。随着生铁加入量的增加,气体产生量增加,泡沫化高度最大值增大。对比图3和图5可知,内生气源条件下的泡沫化高度远高于外引气源,原因在于内生气源条件下的球形泡沫渣结构稳定性高于外引气源条件下形成的多面体泡沫渣结构,易导致泡沫的累积。

图6为不同熔渣碱度条件下泡沫化高度随时间的演变过程。随着熔渣碱度升高,发泡速度(即泡沫化高度随时间的增长速度)加快,但最大泡沫化高度降低(见图7)。分析认为,这主要是由于熔渣黏度随碱度升高而降低造成的。随着熔渣黏度降低,气泡的形成速率加快使泡沫渣液面增长加快,但低黏度条件下形成的气泡上浮和破裂速率较快,导致最大泡沫化高度降低。



(a)、(b) 球形气泡; (c) 椭球形气泡; (d) 不规则气泡

图4 内生气源条件下泡沫渣中的气泡形貌

Fig. 4 Bubble morphology in foamed slag induced by external gas source

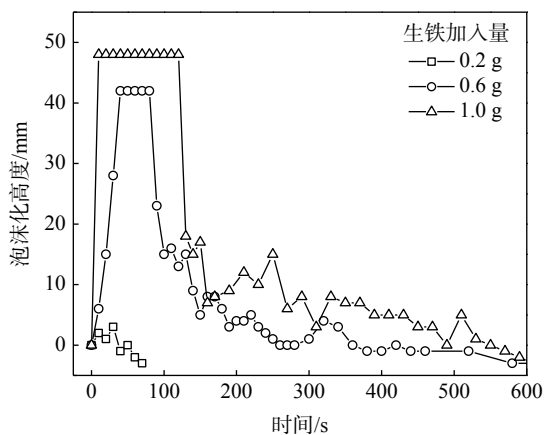


图5 不同生铁加入量条件下泡沫化高度随时间的变化情况

Fig. 5 Variation of the foaming height against time with various amounts of pig iron

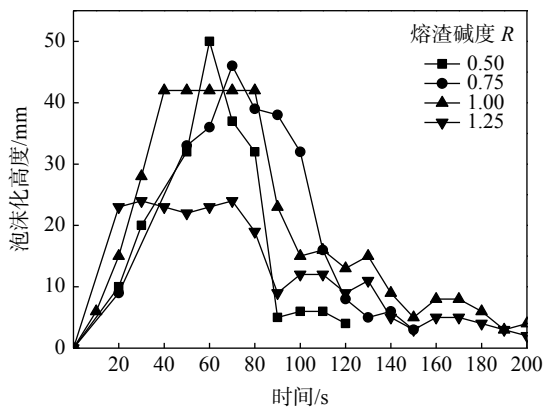


图6 不同熔渣碱度条件下泡沫化高度随时间的变化情况

Fig. 6 Variation of the foaming height against time under various slag basicity

2.3 常用炼钢辅料的消泡作用对比

图8为五种常见炼钢辅料的消泡效果,由图8可知,活性石灰、石灰石、白云石、菱镁石和纯碱均具有一定的消泡效果,加入这几种消泡剂后泡沫渣高度迅速下降,这得益于这几种消泡剂对泡沫渣结构的物理破坏作用。其中,碳酸盐类消泡剂(包括石

灰石、白云石和菱镁矿)效果均不理想,加入后引起泡沫化高度反复波动,这是由于碳酸盐分解释放气体引起了一定程度的泡沫化。相比而言,纯碱和活性石灰的消泡效果较好,考虑到纯碱对炉衬有侵蚀作用,最终认为这几种消泡剂的综合消泡效果:活性石灰>纯碱>石灰石>白云石>菱镁石。

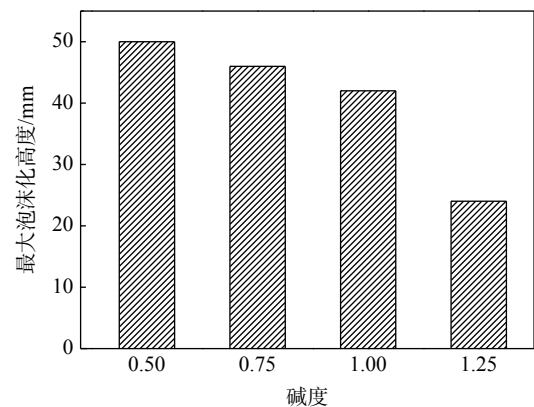


图7 最大泡沫化高度随碱度的变化情况

Fig. 7 Variation of maximum foaming height with slag basicity

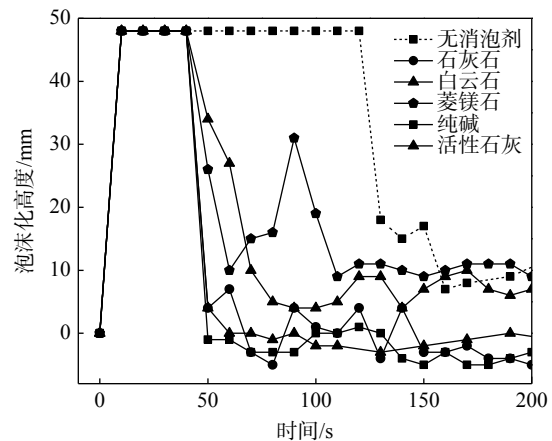


图8 典型炼钢辅料的消泡效果对比

Fig. 8 Comparison of defoaming effects of typical steel-making auxiliary materials

3 结论

1) 外引气源条件下, 泡沫渣为多面体泡沫结构, 由尺寸为 7~15 mm 的多面体气泡堆积而成; 内生气源条件下, 泡沫渣为球形泡沫结构, 由尺寸为 0.5~1.0 mm 的球形气泡堆积而成。

2) 外引气源的泡沫化高度随气体流量先升高后降低, 内生气源的泡沫化高度随气体产生量升高和熔渣碱度降低而升高。

3) 活性石灰、石灰石、白云石、菱镁石和纯碱均有一定的消泡效果, 其消泡效果: 活性石灰>纯碱>石灰石>白云石>菱镁石。

参考文献

- [1] Qiu Guibao, Shan Cheng, Zhang Xu, *et al.* Physical modelling of slag foaming phenomenon resulted from inside origin gas formation reaction[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2017, 44(4): 246–254.
- [2] Zhang Y, Fruehan R J. Effect of carbonaceous particles on slag foaming[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1995, 26(4): 813–819.
- [3] Zhang Dakui, Yu Shujuan, Geng Jishuang, *et al.* Formation and control of foaming slag in torpedo ladle[J]. *Iron and Steel*, 2012, 47 (11): 89–92.
(张大奎, 于淑娟, 耿继双, 等. 鱼雷罐中泡沫渣的成因与控制[J]. 钢铁, 2012, 47 (11): 89–92.)
- [4] Guo Chuanqi, Liu Qian. Optimization process oxygen lance position control to reduce the splash of the blowing BOF steelmaking[J]. *China Metallurgy*, 2015, 25(3): 45–47.
(郭传奇, 刘谦. 优化过程枪位控制减少复吹转炉炼钢飞溅[J]. 中国冶金, 2015, 25(3): 45–47.)
- [5] Ito K, Fruehan R J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1989, 20B: 509–514.
- [6] Corbari R, Matsuura H, Halder S, *et al.* Foaming and the rate of the carbon-iron oxide reaction in slag[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2009, 40B: 940–948.
- [7] Wang Ruifang, Zhang Bo, Liu Chengjun, *et al.* Physical modelling of dynamic evolution of metallurgical slag foaming[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 113: 110014.
- [8] Li Xiang, Bao Yanping, Wang Min, *et al.* Distribution characteristic and formation process of bubbles in foaming slag in a converter[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(6): 773–779.
(李翔, 包燕平, 王敏, 等. 转炉泡沫渣气泡分布特点及形成过程[J]. 工程科学学报, 2016, 38(6): 773–779.)
- [9] Niu Qiang, Chu Shaojun, Wu Keng, *et al.* Morphotype conversion of foams in metallurgical melts[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2000, 22(2): 109–112.
(牛强, 储少军, 吴铿, 等. 冶金熔体泡沫演化中的转型[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(2): 109–112.)
- [10] Guo Zhancheng, Yang Xuemin, Ai Jing, *et al.* Investigation on the reduction of Fe₂O₃ by CO in foam slag[J]. *Iron and Steel*, 1996, 31(9): 10–14.
(郭占成, 杨学民, 艾菁, 等. 泡沫渣中CO还原Fe₂O₃的实验研究[J]. 钢铁, 1996, 31(9): 10–14.)
- [11] Porracin P, Onesti D, Grosso A, *et al.* Slag foaming and dynamic optimization of AC EAF[J]. *Iron and Steel*, 2007, 42(6): 88–90.
(Porracin P, Onesti D, Grosso A, 等. 泡沫渣的生成和交流电弧炉动态最优化控制[J]. 钢铁, 2007, 42(6): 88–90.)
- [12] Wang Jie, Zeng Jiaqing, Yang Libin. Research status of slag foaming behaviors during steelmaking process[J]. *China Metallurgy*, 2016, 26(9): 1–5.
(王杰, 曾加庆, 杨利彬. 炼钢过程中熔渣泡沫化的研究现状[J]. 中国冶金, 2016, 26(9): 1–5.)
- [13] Cheng Li. Cause of the problems and solving measures in molten iron pretreatment[J]. *Continuous Casting*, 2016, 41(2): 20–23.
(程立. 太钢铁水预处理常见问题原因及解决措施[J]. 连铸, 2016, 41(2): 20–23.)