DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.005

转炉熔渣中底吹气体搅拌行为研究

赵定国[1,2],张福君[1,2],王书桓[1,2],郝华强[3],支保宁[1,2]

(1. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山,063210;2. 唐山市特种冶金及材料制备重点实验室, 河北 唐山 063210;3.唐山钢铁集团有限责任公司,河北 唐山 063000)

摘　要:采用数值模拟方法,研究了转炉溅渣护炉前向熔渣底吹气体过程喷嘴个数、底吹流量以及底吹位置对熔池中流场的影响规律。结果表明,采用四喷嘴,控制底吹流量 1.14 m·s^{-1},能获得混匀时间短、成分较均匀的良好流场。在熔池尺寸较大时,偏心底吹流场影响较小。

关键词:转炉底吹;数值模拟;喷嘴数量;流量

中图分类号:TF713　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)01-0021-05

Research on Stirring Behavior of Bottom Blowing Gas in Converter Slag

ZHAO Dingguo[1,2], ZHANG Fujun[1,2], WANG Shuhuan[1,2], HAO Huaqiang[3], ZHI Baoning[1,2]

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Tangshan Key Laboratory of Special Metallurgy and Materials Manufactory, Tangshan 063210, China; 3.Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: The numerical simulation method was used to study the influence of the number of nozzles, the flow rate and the position of bottom blowing on the flow field in the molten pool. The results show that by using four nozzles to control the bottom blowing flow rate of 1.14 m·s^{-1}, a good flow field with short mixing time and uniform composition can be obtained. When the size of molten pool is larger, the blow flow field near the bottom has little effect.

Key words: converter bottom blowing; numerical simulation; number of nozzles; flow rate

工业生产中,转炉钢渣回收利用及减少排放的方法有很多,包括弃渣法、热泼法、盘泼碎冷法等[1-5],但这些方法主要为炉外处理法,而转炉熔渣溅渣护炉气化脱磷的方法[6-8],是炉内处理转炉渣的有效方法。

目前,气化脱磷技术已经初步应用于工业化生产,转炉溅渣护炉过程存在气-渣-粉反应,为气化脱磷提供了良好的动力学条件。在溅渣护炉过程中,调整底吹参数并向熔渣中添加适当还原剂,将炉渣中的磷还原脱除,实现热态熔渣循环利用。在某厂进行了工业试验,采用直接向转炉炉口内投加还原剂的方法,试验气化脱磷率达 35%水平,但低于实验室气化脱磷率 81.23%。工业气化脱磷率低的原因主要是由于转炉熔渣粘度较大,从上部投加的碳粉较难与熔渣均匀接触。

本文基于转炉底吹喷粉提高气化脱磷效果的方法[9],采用底吹喷粉工艺,底吹氮气向熔池内喷吹碳粉,改善脱磷剂与熔渣混匀效果,并采用数值模拟法研究了转炉熔渣底吹气体的喷嘴个数、底吹流量以及底吹位置参数对底吹熔渣搅拌效果的影响,为进一步提高转炉熔渣气化脱磷效果的研究奠定基础。

收稿日期:2018-09-05

基金项目:河北省高层次人才资助项目(B2018003021)

作者简介:赵定国(1981-),河北石家庄人,博士,副教授.研究方向:炼钢连铸新技术、高压冶金等方面研究.

电话:15127559076,E-mail:zhaodingguo@nesteducn.com

1　数学模型

1.1　转炉几何模型建立

图 1 为底吹气体示意图,搅拌气体进入熔池时,气泡在喷嘴上形成,在气液两相流推动下到液相分散成小气泡而上浮,同时在高温熔渣中气体受热膨胀,产生强烈搅拌作用。随着吹气量的增加,搅拌强度增大,如果吹气量超过某一临界值,吹入的气体从底部向上部形成所谓的贯穿流。



图 1　转炉底吹示意图

Fig.1 Schematic diagram of the converter bottom blowing

本文采用筒球型的 200 t 转炉熔渣池作为研究对象,转炉尺寸参数如表 1 所示。

1.2　基本假设

转炉内熔渣物性参数(如粘度、密度等)在底吹

表1 参数变量

Tab.1 Parameters of the variable

参数	数值/mm
熔池直径	5 960
熔池球冠半径	5 414
球冠高度	894
喷嘴直径	22
液面高度	700

温度变化范围内变化不大，对底吹搅拌影响不大视为常量；熔池内熔渣磷以 P_2O_5 形式存在，总含量约为3%，与碳反应产生气体总量不大，对熔池搅拌无明显影响，假设模拟计算时不发生反应；假设熔池内处于充分发展的湍流流动；气体为不可压缩气体；忽略炉壁厚度，假设壁面为无滑移无渗透壁面；喷嘴为直径 ϕ22 mm 的等截圆。

2 研究方案

为确定偏心、流量以及喷嘴个数对流场的影响，进行单因素模拟计算，实验因素如表2所示。

表2 单因素实验表

Tab.2 Single factor test table

因素	分组	序号			
		个数	流量(m·s^{-1})	偏心	粘度(Pa·s)
	1	1	0.36	对称	0.1
一组	2	2	0.36	对称	0.1
	3	4	0.36	对称	0.1
	4	4	0.7	对称	0.1
二组	5	4	1.14	对称	0.1
	6	4	1.31	对称	0.1
	7	1	0.36	对称	0.2
三组	8	1	0.36	1/3R	0.2
	9	1	0.36	2/3R	0.2

2.1 模拟计算指标

死区比例，熔池内流场中速度小 0.03 m·s^{-1} 的区域属于弱流区，在此区域熔池搅拌强度弱，对熔体内的传质混匀作用不大，即称为“死区”。

平均湍动能，定义为底吹进入熔池的能量转换为搅拌熔池的能量的平均值为平均湍动能。

熔池流场稳定时间。定义从底吹开始到熔池流场基本不再变化的这段时间为熔池流场稳定时间。

3 计算结果及讨论

3.1 喷嘴数量对熔池流场的影响

图2可知，从1 s到9.5 s熔池平均湍动能增长较快，9.5 s后熔池能平均湍动能增长开始变得平缓。从底吹气体开始，气液两相流带动熔体向界面运动，在初始动量、浮力作用下熔池内形成小环流。在1~3 s过程中环流区域不断变大，3 s时环流基本保持稳定。湍动能的增加主要是主气流带动周围静止熔体开始循环。3~9.5 s环流范围基本保持不变，只是环流流速增加。平均湍动能的增加主要是环流区流速的增加，湍动能变大。9.5 s以后平均湍动能增长基本消失，熔池基本稳定，气体能量转换和耗散达到平衡，再增加喷吹时间，熔池湍动能增长缓慢。

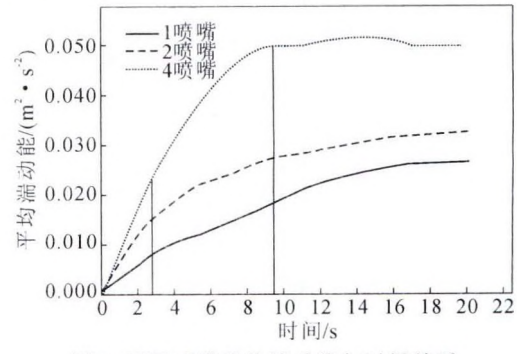


图2 不同喷嘴平均湍动能与时间关系

Fig.2 Relationship between average turbulent kinetic energy and time

从单孔到四孔湍动能转换速率、平均湍动能总量依次升高，双喷嘴平均湍动能是单喷嘴的1.25倍，四喷嘴为2.5倍。图3发现，多喷嘴底吹相邻流域流股发生了碰撞，中间形成了弱峰，四喷嘴峰值更加平缓，湍动能的分布更加平均，碰撞时能量损失小于双喷嘴。由以上分析可以看出，单一喷嘴湍动能总量有极，多喷嘴情况下，横向流发生碰撞增加能量耗

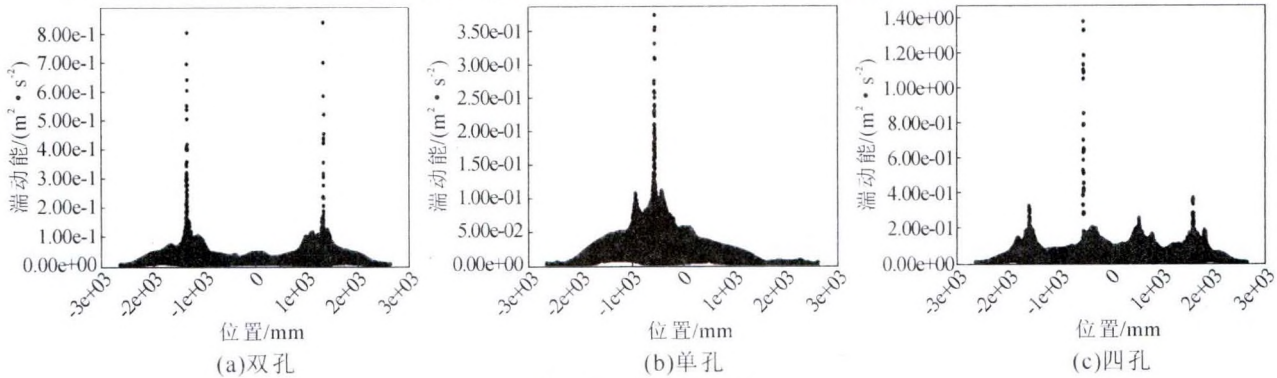
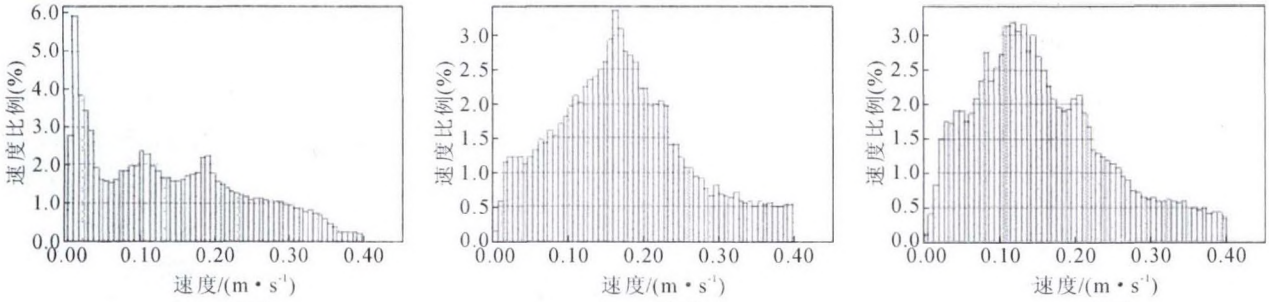


图3 20 s湍动能分布

Fig.3 20 s turbulent kinetic energy distribution

散，但不同喷嘴数横向流碰撞能量损失比例不同。四喷嘴损耗比双喷嘴低，湍动能的分布更加均匀，间隔小；压力形成环流更早稳定，横向流碰撞发生的更早，减少了能量传递过程；平均湍动能更早达到极限，减少熔池流场稳定时间，更早的达到混匀效果。

与图 4 对比，单喷嘴流场流速在 0.03 m·s^{-1} 以下区域占 15%，双喷嘴占 4 %，四喷嘴占 3.5%。且单喷嘴速度分布峰值在 0.05 以下，而双喷嘴在 0.1~0.25，四喷嘴达到 0.075~ 0.225。结合上面分析，单喷嘴底带入熔池能量少，环流影响范围有限，死区比例大。双喷嘴增加了能量，形成四个环流区域有效减少了死区比例，喷嘴间隔较大，横向流之间碰撞较小，环流影响区域得以充分发展；高速流速为气液两相附近的纵向流，与周围流速差距较大。四喷嘴底吹间距小，环流未充分发展就相互碰撞，远离主气流区域的低速区不能形成，横向流碰撞增加了主气流区能量损失，使主气流区域流速降低，速度分布峰值较双喷嘴底吹偏左移动。横向流速率较低的区域还没有达到峰值就和相邻向流发生碰撞，环流区速度大，死区比例小。因此四喷嘴底吹效果最佳。



(a)双孔　(b)单孔　(c)四孔

图 4 速度分布比例

Fig.4 Speed distribution ratio

3.2 喷吹流量对熔池流场的影响

结合以上分析和图 5 可以看出，平均湍动能转换速率不仅与喷嘴个数成正相关关系，而且喷嘴流量越大湍动能的转换速率越大，熔池能湍动能总量越大。喷嘴流量从 1.14 m·s^{-1} 增大到 1.31 m·s^{-1} 时，湍动能总量增加不大。从模拟计算过程的气体体积分布而言，由于熔池内没有形成贯穿流，因此损失大量能量。由图 6 可见，流量增加气体初始动量增加，相近环流以较大速度碰撞，形成峰值，增加了碰撞能量损失，降低了湍动能转化率。因此，在保证熔池内达到混匀效果的前提下，应尽量减小喷嘴流量。

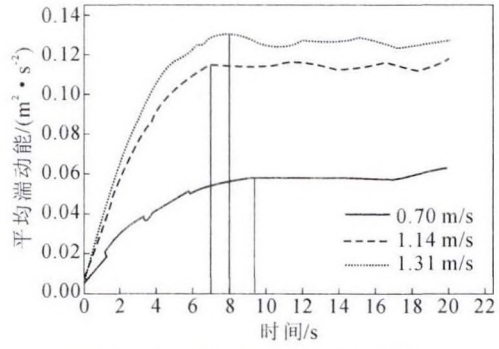
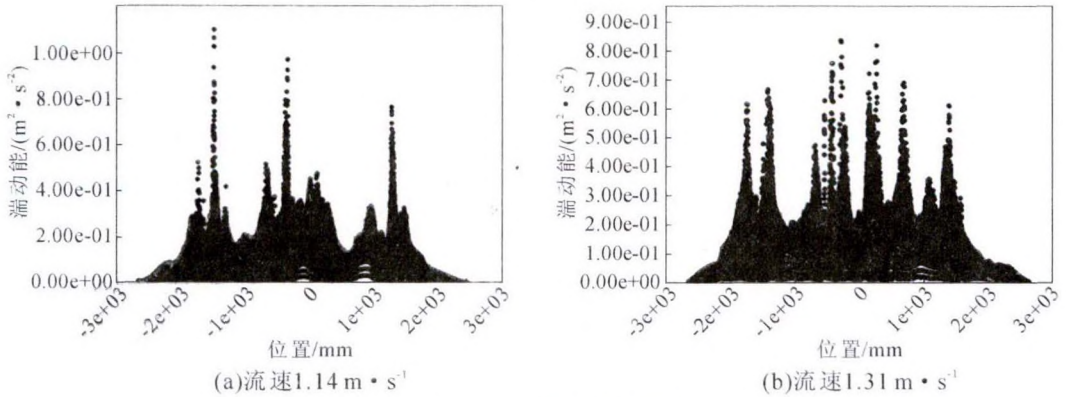


图 5 不同流量平均湍动能与时间关系

Fig.5 Relationship between average turbulent kinetic energy and flow rate

结合图 2 和图 5 分析，从单喷嘴到四喷嘴底吹湍动能增长速率变化很大，单喷嘴湍动能增长平缓，四喷嘴在 9.5 s 前湍动能增长迅速，很快达到平衡。随着喷嘴流量增加达到平衡时间分别为 7 s 和 8 s，流量由 1.31 m·s^{-1} 减少至 1.14 m·s^{-1}，这是由于平衡



(a)流速1.14 m·s^{-1}　(b)流速1.31 m·s^{-1}

图 6 1.31 m·s^{-1} 湍动能分布图

Fig.6 Schematic of 1.31 m·s^{-1} turbulent kinetic energy distribution

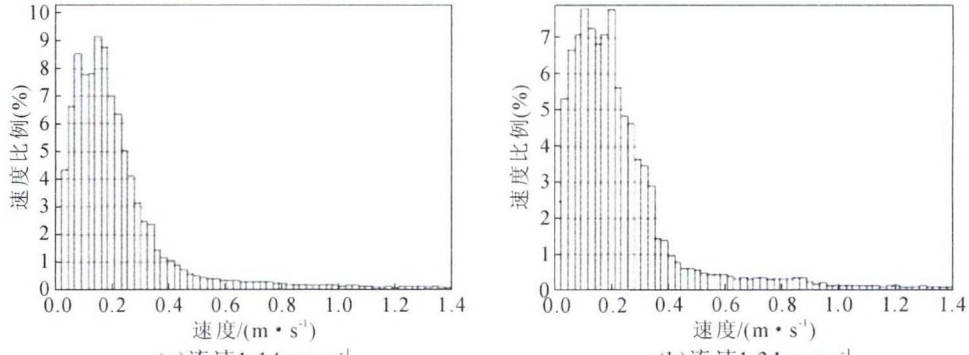
时的湍动能总量增加。虽然增加流量湍动能增长速率也有大幅度增加，但是没有明显的转折，达到熔池湍动能平衡的时间没有明显减少。由此可见，当流量在一定范围内时，喷嘴数量增加是影响熔池流场稳定时间的主要因素。

由图 7 可以看出，随喷嘴流量增加熔池总体速度有所增加，喷嘴速度为 0.7 m·s^{-1} 时，熔池内流速主要集中在 0.025~0.25 之间，喷嘴流速为 1.14 m·s^{-1} 时，熔池内流速主要集中在 0.02~0.3。死区比例基本为 3%左右。这是由于气体进入熔池内熔带动周围熔体由下向上运动，形成环流，死区区域主要集中在靠近壁面的圆形环流与壁面形成的夹角处或两环流与炉底壁面夹角。增加底吹流量，流速增加，环流以外区域影响不大。从上面分析可以看出，双喷嘴形成四个环流区域时，环流区域基本覆盖整个熔池，熔池内死区比例在 4%左右。喷嘴个数是影响死区比例的重要因素，流量增加只能增加熔池内主环流区域流速，改善主环流区混合效果。

3.3 偏心对熔池流场的影响

偏心底吹流场达到稳定的时间与中心底吹基本一致。图 8 可以看出，偏心位置不同流场稳定时的影响范围基本相同，只是随着底吹喷嘴位置偏移。底吹喷嘴位于 1/3 处时，左侧离壁面较近会产生碰撞，横向流发生偏转形成较小环流。碰撞发生时，湍动能激增形成一个弱峰，湍动能总量基本保持不变，峰值随喷嘴位置不同产生整体移动。

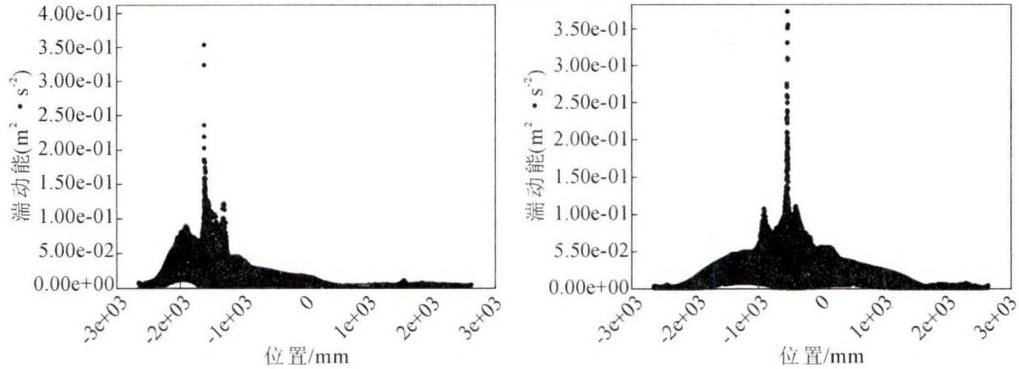
由图 9 可见，1/3 偏心底吹流场流速在 0.03 m·s^{-1} 以下区域约占 44%，2/3 时约占 22%，中心时约占



(a)流速1.14 m·s^{-1}　(b)流速1.31 m·s^{-1}

图 7 1.31 m·s^{-1} 速度分布比例

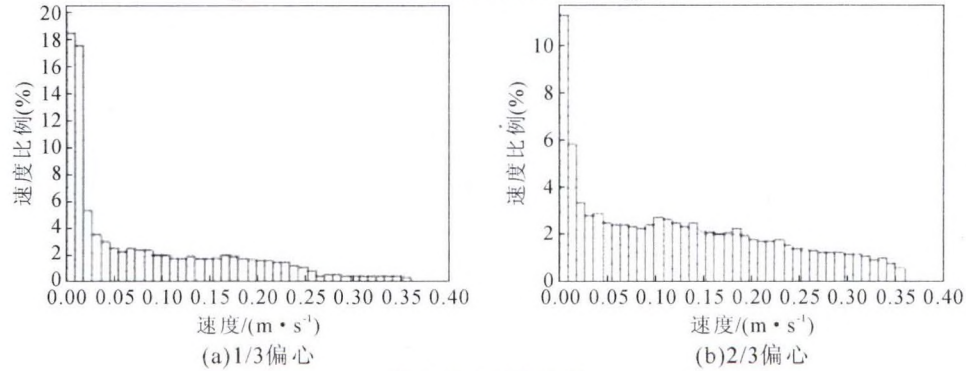
Fig.7 1.31 m·s^{-1} speed distribution scale



(a)1/3偏心　(b)2/3偏心

图 8 20 s 湍动能分布图

Fig.8 Schematic 20 s turbulent kinetic energy distribution



(a)1/3偏心　(b)2/3偏心

图 9 速度分布比例

Fig.9 Speed distribution scale

15%。相比中心底吹死区比例大幅度增加。偏心位置在 2/3 时只增加了 7%，由于炉底熔池为球缺，喷嘴位置距界面距离较近，虽然横向流影响范围没有发生明显改变，但是熔池深度发生了改变，喷嘴形成的射流张角在界面处半径变小，主流区纵向流影响的范围变小。偏心位置在 1/3 时死区比例大幅度增加，一方面是由于底吹喷嘴距界面较近，另一方面，左侧环流距壁面较近，横向流在没有充分发展前发生了碰撞，减小了环流横向距离，死区比例较大幅度增加。

4　水模拟对比

李勇[10]通过水模拟实验发现，随着底部喷嘴数量的增加，混匀时间先减少后增大，其中三支底吹喷嘴布置方式的混匀时间最短，混匀特性最好，四支喷嘴布置方式转炉的混匀时间最长，混合效率最低；随着底吹供气强度的增加，转炉混匀时间减小。随着喷嘴距炉底轴心距离的增加，混匀时间先减小后增大；在距离 0.4 D 圆周上，混匀时间最小。随着流量增加，这种差别逐渐减小。以相同几何比例模型进行数值模拟得出结论，在四喷嘴条件下混匀效果最好；在一定范围底吹流量增加，混匀时间减少；底吹偏心布置对混匀效果没有明显影响。水模拟实验和数值模拟计算结果有偏差，这是由于水模拟实验实际模型小于数值模拟模型，三喷嘴形成的流域不能完全覆盖熔池流场，且数值模拟为二维模拟，没有考虑其他截面的影响。因此，最佳喷嘴数量大于水模拟结果，总的趋势还是一致的，与实际情况吻合。数值模拟计算采用的是高粘度钢渣，底吹流量选取较大，最后结论得出，偏心底吹对熔池流场没有明显影响与水模拟实验结果相吻合。

5　结论

(1)底吹喷嘴数量是影响熔池死区比例和有效喷吹时间的关键性因素。在一定的喷嘴流量范围内，单一喷嘴形成的环流区域以及形成环流的有效时间随流量增加变化不大。

(2)流量的增加只是增加了环流区域的流体速度，加强了环流区域能量、动量和质量的传输；增加碰撞时的能量损失和湍流强度，对死区比例的减少效果不大。底吹喷嘴数量增加，扩大了环流区域在熔池内覆盖区域，即提高了熔池内总湍动能。流量增加是增强了环流区域的流速导致总湍动能的增加，但增加流量在浅熔池中易形成贯穿流造成过多能量损失，利用率低。在保证熔池搅拌效果前提下，应尽量较少喷嘴流量。

(3)偏心底吹在浅、宽熔池中对流场影响不大。向高粘度熔体中喷吹气体时，为了获得稳定均匀的流场，应该选取合适的喷嘴数量，适量增加喷吹时间。

参考文献：

[1] 沈建国，郭春媛，于景坤，等. 钢铁冶金渣的资源化利用[J]. 材料与冶金学报，2003，2(3)：163-166.

[2] 邬斌. 转炉钢渣资源化利用研究[D]. 长沙：中南大学，2009.

[3] 李光辉，乌仔斌，张元波. 转炉渣工艺矿物学及其综合利用技术[J]. 中南大学学报. 2010，41(6)：2065-2071.

[4] 樊君，赵俊学，陈艳梅，等. 现代转炉炼钢各工序炉渣的再利用研究综述[J]. 中国冶金，2010，20(12)：43-7.

[5] 岑永权. 转炉渣还原处理提高利用价值的实验研究 [J]. 上海金属，1994(3)：47-51.

[6] 王书桓，吴艳青，刘新生，等. 硅还原转炉熔渣气化脱磷实验研究[J]. 钢铁，2008(2)：31-34.

[7] 王书桓，吴艳青，徐志荣，等. 硅还原转炉熔渣气化脱磷热力学分析[J]. 炼钢，2008(1)：31-34.

[8] 吴艳青. 硅还原转炉渣气化脱磷热力学和动力学基础研究[D]. 唐山：河北理工大学，2007.

[9] 赵定国. 转炉底吹喷粉提高气化脱磷效果的方法[P]，CN107419061.A. 2017-12-01.

[10] 李勇. 顶底复吹转炉内气液两相流行为的模拟研究[D]. 沈阳：东北大学，2013.

书讯

《铸造缺陷及其对策》

由日本铸造工学会编写，由大连理工大学张俊善教授和尹大伟先生翻译成中文，机械工业出版社出版。通俗易懂地解说各种铸造缺陷，能够帮助现场的铸造技术人员及时判断他所遇到的缺陷属于何种类型的缺陷，找出缺陷产生的原因及解决方案，是铸造相关人员的好帮手。全书分 8 部分，247 页，234 千字。16 开，精装，定价 58 元，特快专递邮购价：80 元。

邮购地址：铸造技术杂志社

（710048 西安理工大学 608 信箱）

联 系 人：李巧凤 029-83222071