

精炼钢包刚玉基耐火材料冲蚀的有限元分析

黄 奥, 顾华志, 雷 明, 张美杰, 张 丽, 周双玲

(武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地, 武汉 430081)

摘要: 本文根据精炼钢包耐火材料的使用工艺条件, 采用 Johnson-cook 模型, 通过与实验值的对比, 利用有限元模拟方法计算了刚玉基耐火材料在高温服役条件下的冲蚀率, 研究了冲蚀角、冲蚀物速度、冲蚀物粒径和材料气孔率与冲蚀率之间的关系。结合耦合固液传热的精炼钢包钢液流场, 对钢包精炼过程的冲蚀情况进行了分析和探讨。结果表明: 采用 Johnson-cook 模型模拟高温条件下耐火材料以塑性切削为主的冲蚀, 模型正确、参数合理; 冲蚀角在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 小角度范围内, 冲蚀率较大, 随后随着冲蚀角的增大而下降; 冲蚀率与冲蚀物速度、冲蚀物尺寸、气孔率均呈现指数变化关系; 精炼钢包刚玉基耐火材料主要是承受小角度切削冲蚀, 服役过程中形成高熔点致密界面层能有效改善其抗冲蚀损毁。

关键词: 精炼钢包; 耐火材料; 冲蚀; 有限元

中图分类号: TB321

文献标识码: A

文章编号: 1001-1625(2010)01-0153-05

FEM Analysis on Erosion of Corundum-based Refractory in Refining Ladle

HUANG Ao, GU Hua-zhi, LEI Ming, ZHANG Mei-jie, ZHANG li, ZHOU Shuang-lin

(State Key Laboratory Breeding Base of Refractories and Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: According to the application parameter of corundum-based refractory in refining ladle, the Johnson-cook model was chosen, erosion model for refractory in high temperature was established, erosion process of refractory in refining ladle was studied by FEM method. The effects of erosion degree, particle velocity, particle size, porosity on erosion rate of refractory in refining ladle were analyzed. The flow field of bottom blowing ladle with thermal transmission of solid and liquid coupled was considered, the erosion condition of refractory in refining ladle was discussed. The results show that: The Johnson-Cook model, which was applied to simulate ductility cutting erosion of refractory in high temperature, is appropriate and reasonable. The erosion rate with small angle degree from 15° - 30° is much higher, the erosion rate was decreased following the increasing of angle degree above 25° . The relationship between erosion rate and particle velocity, particle size and porosity is exponential. The erosion of refractory in refining ladle is small-angle erosion, particularly in parts of ladle, the slag line near porous plug, the side wall near bottom and porous plug, and etc. performance significantly. The erosion of refractory can be weakened as the interfacial film with higher melting point and density formates.

Key words: refining ladle; corundum-based refractory; erosion; finite element

1 引 言

精炼钢包是承接、运输和钢水二次精炼的重要设备, 其耐火材料不仅因在高温下与钢水、熔渣等长时间

基金项目: 973 前期研究专项(2009CB62600); 湖北省教育厅重点科研项目(D20081109)

作者简介: 黄 奥(1982-), 男, 博士研究生. 主要从事冶炼新技术耐火材料的研究. E-mail: huangao_008@163.com

接触而侵蚀,而且受到精炼条件下钢水、熔渣和夹杂等长时间周期性的冲刷而冲蚀,从而加速钢包耐火材料的损毁。因此,对精炼条件下钢包耐火材料的冲蚀状况进行研究和分析具有非常现实的意义。

随着计算机性能的飞速发展和计算方法提高,数值模拟方法已经被广泛应用到各个工程领域。相比于受到条件约束的复杂的高温冲蚀实验,采用有限元方法进行不同条件下与冲蚀相关因素的计算分析,能够较高效地得到冲蚀过程的大量信息。本文通过数值模拟计算结果讨论和分析,对精炼钢包刚玉基耐火材料的冲蚀情况给出较为直观的解释,为精炼钢包耐火材料的研究与应用提供了一定的理论指导。

2 有限元计算模型

2.1 几何模型及单元划分

在几何模型中,冲蚀物被模拟为球形粒子,其直径为 d ;靶材受冲击的区域为 $3d \times 3d \times 2d$ 。靶材的有限元模型采用带有一个积分点和沙漏控制的三维8节点实体显式动力学单元进行离散,单元为 SOLID164^[1]单元,为达到精确结果而避免大量计算并便于计算冲蚀率,将冲击区域细化成标准的立方体网格,按比例生成孔隙,见图1。计算中限制了耐火材料底面的自由度,以及冲蚀物颗粒的旋转自由度。

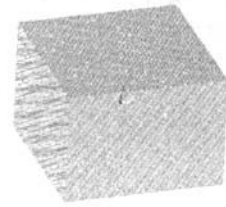


图1 钢包耐火材料的有限元模型

Fig. 1 Finite element mesh of ladle refractory with porosity

2.2 材料模型及参数

材料的冲蚀存在两种典型的冲蚀模型^[2]:塑性冲蚀和脆性冲蚀。如陶瓷材料在常温或低温下是典型的脆性材料,但在达到一定高温条件时转变为韧性材料^[3]一样,耐火材料在高温条件下的冲蚀表现出明显的塑性特点,切削是冲蚀的主要形式^[4]。因此,本文精炼钢包刚玉基耐火材料本构模型选用 Johnson-Cook 模型,该模型不仅是描述材料在大变形、高应变率下和高温下的本构模型^[5,6],而且在较低的应变率条件下,甚至在准静力范围内仍然有效^[7],主要参数见表1^[8]。

表1 Johnson-Cook 材料模型参数

Tab. 1 Material parameters of projectile and ceramic plate

Item	Value	Item	Value
Density/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	3.07	Strain hardening index	0.26
Shear modulus/GPa	154	Reference strain rate	10^6
Yield strain constant/GPa	4.0	Wave velocity/ $\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	1.0
Strain hardening constant/GPa	0.074	Gruneisen coefficient	0.2

3 计算条件及方案

冲蚀物与耐火材料之间采用面面接触算法的侵蚀接触,冲蚀物被描述为刚体,使用剪切失效模型模拟冲蚀过程中的材料的脱落破坏,采用多冲蚀物冲蚀法^[9],计算结束时间为 $1.3 \times t_{\text{last}}$, t_{last} 为最后一组冲蚀物接触耐火材料的时间。其中,材料破坏通过控制单元失效实现,由损伤参数和等效失效塑性应变控制,当这些阈值被超过时,单元失效,材料破坏,单元和节点立即从模型中被移除,计算完成后,通过统计失效单元的数量可以给出量化的冲蚀率 E_r (mg/g),定义为:

$$E_r = \frac{\Delta W}{W_b} \quad (1)$$

式中, ΔW 为刚玉基耐火材料试样冲蚀前后的质量损失,mg; W_b 为冲蚀物的累计质量,g。

本文分别对刚玉基耐火材料在高温冲蚀作用下的冲蚀角、冲蚀物速度和尺寸、耐火材料气孔率等影响参数进行了研究,并结合精炼钢包流场探讨了钢包刚玉基耐火材料在精炼过程中的冲蚀情况。计算方案及条

件如表 2 所示。

表 2 实验方案及条件

Tab.2 The conditions and program of the experimental

Scheme	Impact speed/m · s ⁻¹	Impact angle/degree	Porosity/%	Erosion material particle diameter/mm
1	14.68	5 ~ 90	19	0.15
2	5 ~ 15	30	19	0.15
3	14.68	30	19	0.05 ~ 1.00
4	14.68	30	19 ~ 24	0.15

4 计算结果与分析

4.1 模型及参数验证

本文根据文献[4]的冲蚀参数(冲蚀速度 14.68 m · s⁻¹, 冲蚀角 45°)模拟计算了刚玉基耐火材料在高温条件下(≥1200 °C)的冲蚀率,并与实验值进行了对比,如图 2 所示。由图可知,冲蚀率的计算值与实验值是基本符合的。其中,计算值略高于实验值可能是实验过程中,高温条件下微小冲蚀物粉末易于在耐火材料表面沉积烧结,使耐火材料增重,而且在耐火材料表面粘结成保护层,使材料的抗冲蚀性增加,导致实验值偏低。因此,本文的模型及参数是合理的。

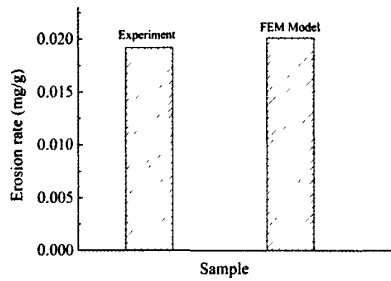


图 2 有限元模拟与实验的冲蚀率对比

Fig.2 Erosion rate with experiment and FEM modelling

4.2 冲蚀角及冲蚀物速度对冲蚀率的影响

图 3、图 4 分别为冲蚀率随冲蚀角、冲蚀物速度的变化图。由图 3 可以看出,冲蚀角在 5° ~ 25° 范围内冲蚀率随之急剧增大,25° 左右时达到最大值;随后,随着冲蚀角的增大,冲蚀率减小,在 25° ~ 75° 范围内,冲蚀率下降非常明显,之后则相对平缓。从能量平衡角度,耐火材料的冲蚀是由垂直方向的冲击造成的冲蚀和水平方向的切削共同造成的。由于高温下刚玉基耐火材料趋韧性化,而且和钢液、渣等反应易生成低熔点物,耐火材料基质因塑性变形能力能够吸收冲击物的能量,增强了抗法向冲蚀能力,但同时削弱了抗切削冲蚀能力,导致相对小角度冲蚀严重。由图 4 可以看出,冲蚀率随着冲蚀物速度的增大而增大,由拟合曲线可得,冲蚀率与冲蚀物速度成指数正比关系,指数为 2.06。

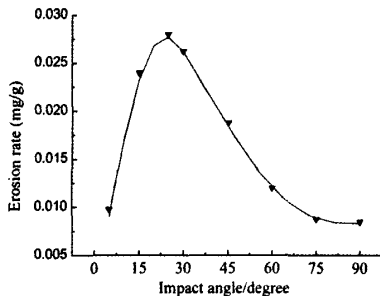


图 3 冲蚀率随冲蚀角的变化图

Fig.3 Variation of erosion rate with impact angle

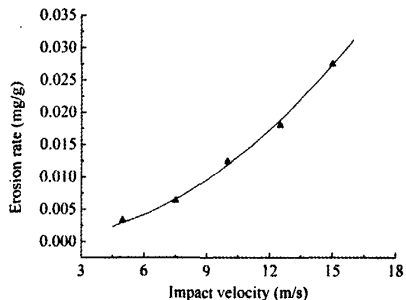


图 4 蚀率随冲蚀物速度的变化图

Fig.4 Variation of erosion rate with impact velocity

结合图 3、4,根据简化复合式冲蚀^[10]拟合得出下式:

$$E_r = \begin{cases} 3.3 \times 10^{-5} V_s^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 1.4 \times 10^{-4} V_s^{2.06} \cos^{2.5} \alpha \sin 3\alpha, & \alpha \leq 30^\circ \\ 3.3 \times 10^{-5} V_s^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 1.4 \times 10^{-4} V_s^{2.06} \cos^{2.5} \alpha, & \alpha > 30^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 为冲蚀角; V_s 为冲蚀物速度, m/s。

4.3 冲蚀物粒径及耐火材料气孔率对冲蚀率的影响

图5、图6分别为刚玉基耐火材料冲蚀率随冲蚀物粒径、耐火材料气孔率的变化规律。由图5可知, 冲蚀率随冲蚀物粒径的增大而增大, 这是因为冲蚀物粒径大, 其冲击动能也大, 冲击应力也增大, 即增强了冲蚀物的切削能力, 使得耐火材料外表层脱落速率加快, 冲蚀率增加。冲蚀率与冲蚀物粒径 d 成指数变化关系, 经拟合其关系式得:

$$E_r = 0.048 \times d^{0.32} \tag{3}$$

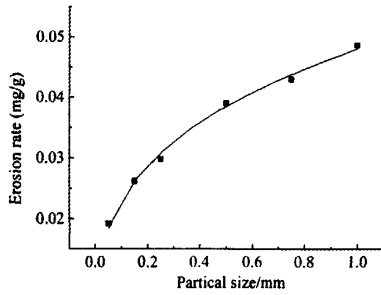


图5 冲蚀率随冲蚀物粒径的变化图

Fig. 5 Variation of erosion rate with partial size

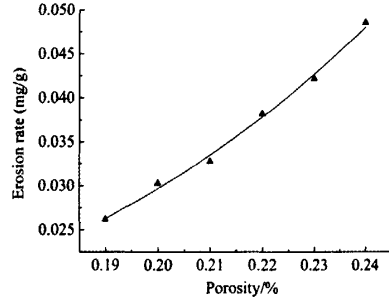


图6 冲蚀率随气孔率的变化图

Fig. 6 Variation of erosion rate with porosity

由图6可知, 材料的冲蚀率与气孔率 q 同样呈指数正比变化趋势。这一方面是由于气孔引起应力集中, 气孔等缺陷的存在使得裂纹容易在这些部位沿断口扩展, 一旦受到外加应力, 就会使裂纹扩展加剧而断裂; 另一方面是表面孔洞的存在, 增大了冲蚀面积, 也导致材料切削失效脱落率增大。经分析拟合得出如下关系式:

$$E_r = 0.00875 + 5.48 \times q^{3.46} \tag{4}$$

4.4 刚玉基耐火材料服役过程冲蚀分析



图7 底吹气量为 54 m³/h 时的钢包流场图

Fig. 7 The flow field of steel liquid in ladle with bottom blowing at 54 m³/h

根据以上研究, 影响刚玉基耐火材料的冲蚀率的主要因素为冲蚀角、冲蚀物粒径、冲蚀速度以及耐火材料的气孔率, 其中冲蚀角的影响为单峰型, 其它均成指数关系, 合并式(1)、(2)、(3)、(4)总结得出如下关系式(5)。

$$E_r = \begin{cases} 2.31 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 9.81 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \cos^{2.5} \alpha \sin 3\alpha, \alpha \leq 30^\circ \\ 2.31 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 9.81 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \cos^{2.5} \alpha, \alpha > 30^\circ \end{cases} \tag{5}$$

根据某厂实际精炼钢包的操作工艺参数, 采用欧拉两流体模型以及多孔介质模型, 耦合固液传热, 采用

数模方法计算了底吹钢包内的钢液流动特性。如图7所示,为精炼钢包底吹54 m³/h气量时的钢包透气砖中心截面流场图。

由图7中钢液的速度矢量分布可以看出,精炼钢包工作层刚玉基耐火材料主要是承受小角度的冲蚀,钢包近透气砖的下渣线及近底部工作层、远透气砖工作区及包底工作层的耐火材料冲蚀相对严重。结合式(5)及以上研究可知,此时钢包工作层刚玉基耐火材料主要承受切削冲蚀,高气孔率和低熔相的生成会造成更严重的冲蚀损毁,所以在服役过程中耐火材料与钢液间高熔点致密化界面层的形成有助于提高其抗冲蚀损毁性能。

5 结 论

(1)精炼钢包刚玉基耐火材料的冲蚀率与冲蚀角的变化关系较为复杂,总体来说,在小角度冲蚀下(一般为30°以内)冲蚀磨损量急剧增大,然后随着冲角的增大,冲蚀率降低。除此之外,冲蚀率与冲蚀物粒径、冲蚀速度以及材料的气孔率均成指数关系,经拟合得关系式:

$$E_r = \begin{cases} 2.31 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 9.81 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} \\ + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \cos^{2.5} \alpha \sin 3\alpha, \alpha \leq 30^\circ \\ 2.31 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 9.81 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} \\ + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_s^{2.06} \cos^{2.5} \alpha, \alpha > 30^\circ \end{cases}$$

(2)精炼钢包刚玉基耐火材料主要承受小角度冲蚀,钢包近透气砖的下渣线及近底部工作层、远透气砖工作区及包底工作层的材料冲蚀相对严重,服役过程中形成高熔点致密界面层能有效改善其抗冲蚀损毁。

参 考 文 献

- [1] Kohnke P A. Inc. theory reference[M]. Canonsburg; Swanson Analysis Systems, Inc., 2004.
- [2] 孙继龙, 许森虎. Sialon 陶瓷的冲蚀磨损及磨粒磨损行为[J]. 无机材料学报, 2000, 15(5): 889-896.
- [3] 师昌绪. 材料大辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994.
- [4] 胡 水. 耐火材料高温耐冲蚀磨损性能试验方法的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2005.
- [5] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Netherlands; The Hague, 1983: 541-547.
- [6] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, Strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [7] 陈 克. MCA 方法与弹丸侵入混凝土过程研究[D]. 南京: 南京理工大学博士学位论文, 2005.
- [8] Den Reijer P C. Impact on ceramic faced armor [D]. Netherlands; Delft University of Technology, 1991.
- [9] 王宇飞. 耐磨耐蚀层状复合管的制备及其冲蚀模拟分析[D]. 上海: 复旦大学博士学位论文, 2008.
- [10] 林建忠. 流-固两相拟序涡流及稳定性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 125-172.

精炼钢包刚玉基耐火材料冲蚀的有限元分析

作者: [黄奥](#), [顾华志](#), [雷明](#), [张美杰](#), [张丽](#), [周双玲](#), [HUANG Ao](#), [GU Hua-zhi](#), [LEI Ming](#), [ZHANG Mei-jie](#), [ZHANG Li](#), [ZHOU Shuang-lin](#)

作者单位: [武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地](#), 武汉, 430081

刊名: [硅酸盐通报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)

英文刊名: [BULLETIN OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY](#)

年, 卷(期): 2010, 29(1)

被引用次数: 1次

参考文献(10条)

1. [Kohnke P A Inc theory reference](#) 2004
2. [孙继龙;许森虎 Sialon陶瓷的冲蚀磨损及磨粒磨损行为](#) [期刊论文]-[无机材料学报](#) 2000(05)
3. [师昌绪 材料大辞典](#) 1994
4. [胡水 耐火材料高温耐冲蚀磨损性能试验方法的研究](#) 2005
5. [Johnson G R;Cook W H A constitutive model and data for metals subjected to large strains,high strain rates and high temperatures](#) 1983
6. [Johnson G R;Cook W H Fracture characteristics of three metals subjected to various strains,Strain rates,temperatures and pressures](#) [外文期刊] 1985(01)
7. [陈克 MCA 方法与弹丸侵入混凝土过程研究](#) 2005
8. [Den Reijer P C Impact on ceramic faced armor](#) 1991
9. [王宇飞 耐磨耐蚀层状复合管的制备及其冲蚀模拟分析](#) 2008
10. [林建忠 流-固两相拟序涡流及稳定性](#) 2003

本文读者也读过(4条)

1. [孔松涛.王莹.张美杰.刘娟.赵丽君 耐火材料在钢包中的裂纹稳定性研究](#) [会议论文]-2009
2. [蒋国璋.孔建益.李公法.陈世杰.白晨. Jiang Guozhang. Kong Jianyi. Li Gongfa. Chen Shijie. Bai Chen 钢包内衬结构的优化研究](#) [期刊论文]-[冶金能源](#)2006, 25(4)
3. [熊玲琪.尹振江. XIONG Ling-qi. YIN Zhen-jiang 钢包耐火材料对钢中夹杂物的影响](#) [期刊论文]-[矿冶](#) 2009, 18(4)
4. [刘义成 宝钢120 t VOD钢包耐火材料的选择和使用](#) [期刊论文]-[耐火材料](#)2010, 44(4)

引证文献(1条)

1. [张美杰.黄奥.顾华志.林小龙.毕思标.吕洁.尹路 连铸中间包用耐火材料冲蚀的数值模拟](#) [期刊论文]-[特殊钢](#) 2010(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gsytb201001030.aspx