

刚玉质耐火材料高温耐冲蚀磨损性能的研究

胡水 于仁红 蒋明学

西安建筑科技大学材料科学与工程学院 西安 710055

摘要 以不同组成的刚玉质耐火材料作为试验样品,用 ABR-1450A 型高温耐磨试验仪分别研究了水泥加入量(w)为 2%、4%、6%、硅微粉加入量(w)为 2%、3%、4%、冲蚀角为 30°、45°、60°、磨料粒度为 1~3 mm、2~5 mm 以及冲蚀温度为 600 °C、800 °C、1000 °C、1200 °C 时对刚玉质耐火材料高温耐冲蚀磨损性能的影响。结果表明:随材料中纯铝酸钙水泥加入量的提高,材料的高温耐磨性降低;随硅微粉加入量的提高,材料的高温耐磨性提高;提高冲蚀温度、增大磨料颗粒尺寸和增大冲蚀角都可以增加对耐火材料的磨损。

关键词 冲蚀磨损 刚玉质耐火材料 冲蚀角 磨料粒度 冲蚀温度

冲蚀磨损是现代工业生产中常见的一种磨损形式^[1]。高温下,固体粒子的冲蚀磨损是造成工业窑炉衬里材料损坏的一个重要因素,也给工业生产带来许多不利影响。高炉上部和风口,水泥窑窑口、下料管、冷却器和喷煤管,石灰窑内衬,电厂循环流化床锅炉的旋风分离器等部位的工作条件极其苛刻,要求能承受高温、高速含尘气流的长期冲刷。因此,随着刚玉质耐火材料在这些领域的广泛应用,对其冲蚀磨损性能的研究显得越来越重要。

近几十年来,国内外众多学者对金属材料的磨损做了大量研究工作,对陶瓷材料磨损的报道大多是常温下的磨损研究,而中、高温下耐火材料磨损研究的报道很少。本工作将采用自行设计的高温耐磨试验仪(专利号 ZL03204459.3),以不同组分的刚玉质耐火材料作为试样,对材料在中、高温条件下的抗冲蚀磨损行为加以研究。

1 试验

1.1 试样制备

将经过浓度为 10 mol·L⁻¹ 的盐酸酸洗、烘干后的刚玉颗粒和细粉及添加剂按表 1 的组成配料后在

表 1 试样配比(w)

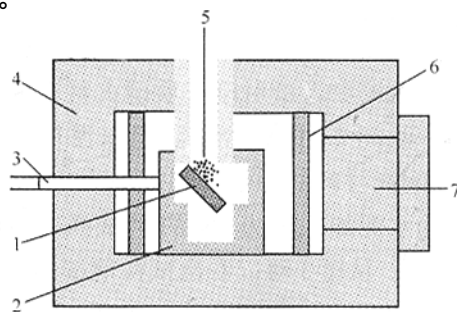
Table 1 Formulas of specimens

原料	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	%
1~3 mm	30	30	30	30	30	30	-	
棕刚玉	<1 mm	38	38	38	38	38	35	
	<0.088 mm	27	25	23	26	25	24	58
纯铝酸钙水泥	<0.088 mm	2	4	6	4	4	4	
硅微粉		3	3	3	2	3	4	3

球磨机中混合,用 NYL-500 型 500 kN 压力试验机以 300 MPa 的压力压制成型为 60 mm × 60 mm × 5 mm 的试样,并于 1500 °C 3 h 烧成。

1.2 冲蚀磨损试验设备

冲蚀磨损试验在 ABR-1450A 型高温耐磨试验仪上进行。该设备可以在控制良好的试验条件下进行材料的高温耐冲蚀磨损性试验。试验装置原理图见图 1。



1 - 试样 2 - 试样架 3 - 热电偶 4 - 炉体;

5 - 被机械加速的磨料颗粒 6 - 发热体 7 - 炉门

图 1 材料高温耐冲蚀磨损试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high temperature erosion testing apparatus

1.3 试验方法

使用的磨料分别是粒度为 1~3 mm 和 2~5 mm 未整形的棕刚玉颗粒,在试验中尽量选用粒子大小及化学组成等均匀的磨料,并在使用前充分干燥。盛放样品的试样架为氮化硅结合 SiC 匣钵,内置不同角度的楔块,可进行不同冲蚀角下的冲蚀试验。

磨损量的测量可采用线形磨损测量法、面积磨损

* 胡水 男,1979 年生,硕士研究生。

收稿日期 2005-03-28

编辑 周丽红

测量法、体积磨损测量法与质量磨损测量法^[2]。在本试验磨粒冲蚀过程中,由于磨损宽度、磨损面积和磨损厚度不容易测定,会给测量带来较大的误差,因此,选用了质量法来衡量试样磨损量的大小,即用冲蚀磨损率来表示材料的耐磨性。冲蚀磨损率按下式进行计算:

$$\Delta E = \frac{\Delta W}{\nu t}$$

式中: ΔE 为冲蚀磨损率, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; ΔW 为试样磨损前后的质量损失, mg ; ν 为磨料的流量, $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$; t 为冲蚀时间, min 。

试验时,冲蚀粒子用量为 30 kg,冲蚀温度为 600 ~ 1200 °C,每次冲蚀时间为 15 min,热电偶距离试样背面不超过 20 mm。具体过程是将棕刚玉颗粒按给料流速和时间称取相应的质量后放入料仓中,当试样架内热电偶温度达到试验温度后,使其恒温 30 min,开动颗粒加速装置,并打开料仓下的加料阀门,使磨料颗粒以一定的流速和流量冲向试样。在试验前用感量为 10 μg 天平称量试样的干燥质量,试验后扫除试样表面的粉尘,并称量试验后的试样质量。

2 结果和讨论

2.1 水泥加入量对刚玉质耐火材料冲蚀磨损率的影响

图 2 为水泥加入量对刚玉质耐火材料冲蚀磨损率的影响。从图 2 可以看出,随着水泥加入量的增加,刚玉质耐火材料的冲蚀磨损率增大,耐磨性能降低。图 3 为水泥加入量为 6% 的 3[#] 试样冲蚀磨损后的 SEM 照片。从图 3 可以看出试样前端的基质已经十分疏松,并在基质和刚玉颗粒之间出现了裂纹,这进一步说明水泥加入量为 6% 时的冲蚀磨损较严重。这可能是由于 1500 °C 烧后,试样中纯铝酸钙水泥所

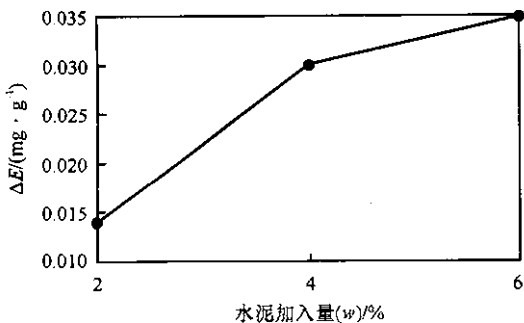


图 2 水泥加入量与冲蚀磨损率之间的关系(800 °C,磨料粒度 1~3 mm)
Fig. 2 The relationship between the cement content and the rate of erosion

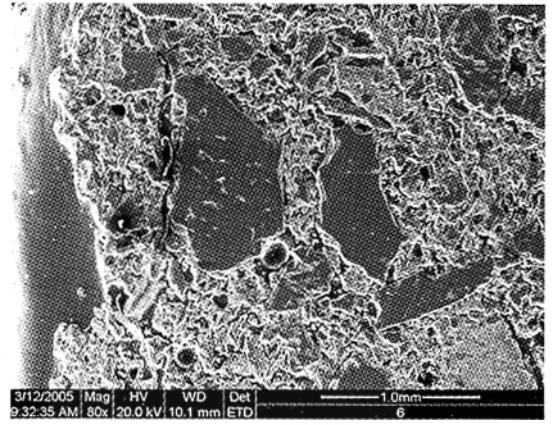


图 3 3[#] 试样冲蚀磨损后的前端 SEM 照片(800 °C,磨料粒度 1~3 mm)

Fig. 3 SEM image of eroded side of specimen 3[#]

形成的主要物相 CA、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、少量的 CA_6 、 C_2A 以及水泥所带入的 CaO 与配料中的 SiO_2 和 Al_2O_3 反应生成的低熔点矿物钙长石 (CAS_2) 或钙铝黄长石 (C_2AS) 等随着水泥加入量的增加而增加,从而导致基质的中、高温强度和抗冲蚀性下降。此外,中温时,铝酸钙水化物在脱水和分解过程中使水合键遭到破坏,导致刚玉质耐火材料强度显著降低,也会导致材料的耐冲蚀磨损性下降。

2.2 硅微粉加入量对刚玉质耐火材料冲蚀磨损率的影响

图 4 为硅微粉加入量对刚玉质耐火材料冲蚀磨损率的影响。从图 4 可以看出,随着硅微粉加入量的增加,刚玉质耐火材料的冲蚀磨损率减小,耐磨性能提高,且加入量 > 3% 时冲蚀磨损率降幅较小。图 5 为硅微粉加入量为 2% 的 4[#] 试样冲蚀后的 SEM 照片。从图 5 可以看出:随着冲蚀时间的延长,裂纹不断扩展,导致裂纹所包围的整块材料脱落时材料的切面呈锯齿状。

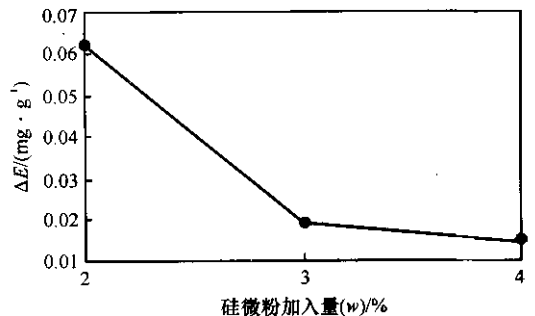


图 4 硅微粉加入量与冲蚀磨损率之间的关系(800 °C,磨料粒度 1~3 mm)

Fig. 4 The relationship between the micro-silicon content and the rate of erosion

众所周知,在以硅微粉为结合系统时,浇注料强度的获得是由于 SiO_2 水化后在表面形成了类似硅胶

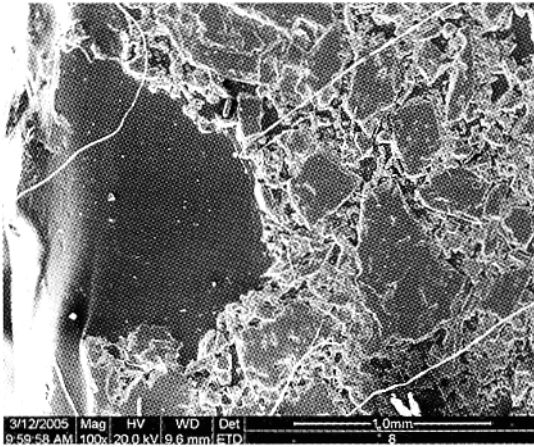


图5 4# 试样冲蚀后的侧面 SEM 照片(800 °C ,磨料粒度 1 ~ 3 mm)

Fig.5 SEM images of eroded side of specimen 4#

结构的 Si—OH 键,脱水聚合成 Si—O—Si 网状链。在试样中加入少量的 SiO₂ 微粉于 1500 °C 烧后会形成液相,促进了试样的烧结,使材料的显气孔率也随之降低,结构更加致密,试样强度提高,所以会降低冲蚀磨损率,而且基质中的物相主要为莫来石和刚玉,也增加了材料的耐磨损性能。综合考虑,确定硅微粉加入量为 3%。

2.3 冲蚀温度对刚玉质耐火材料冲蚀磨损率的影响

图 6 给出了刚玉质耐火材料冲蚀磨损率与冲蚀温度之间的关系。从图 6 中可以看出,随着冲蚀温度的升高,几种刚玉质耐火材料的冲蚀磨损率均逐渐增大,在 1000 °C 左右达到最大;继续升高温度,刚玉质耐火材料的冲蚀磨损率反而降低。材料的冲蚀磨损存在两种典型的冲蚀模型:塑性冲蚀和脆性冲蚀^[3]。低温下刚玉质耐火材料的韧性相对很低,体现了脆性冲蚀的特点。但达到某高温时就会出现少量的玻璃相,这种玻璃相在高温下具有较高的粘性,它能够松弛应力集中,提高断裂韧性,从而使刚玉质耐火材料表现出一定的塑性,明显改善其脆性。

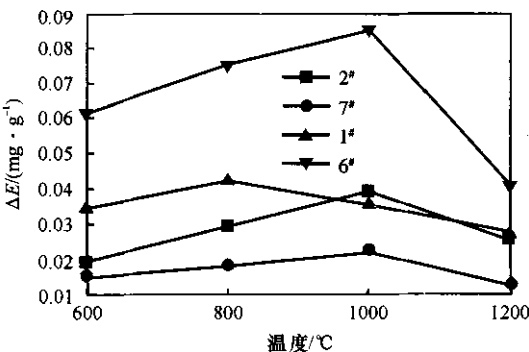


图 6 冲蚀磨损率与冲蚀温度之间的关系

Fig.6 The relationship between the rate of erosion and the temperature of erosion

2.4 冲蚀角和磨料粒度对刚玉质耐火材料冲蚀磨损

率的影响

图 7 给出了冲蚀角和磨料粒度对刚玉质耐火材料冲蚀磨损率的影响。从图 7 中可以看出,在 30 ~ 60° 范围内,随着冲蚀角的增大,不同粒度的磨料对刚玉质耐火材料的冲蚀磨损率均随之增大,且冲蚀角在 45 ~ 60° 之间时,其冲蚀磨损率迅速增大,这表明冲蚀磨损机制发生了转变。从能量角度看,当粒子冲击到靶面时,材料的冲蚀是由垂直方向的冲击和水平方向的切削造成的。当入射角度小,入射速度在垂直方向的分量就小,入射粒子在垂直方向的动能分量导致的脆性材料的裂纹扩展和交叉也少。由于刚玉质耐火材料一般具有高硬度,所以由粒子水平方向上切削造成的冲蚀是比较低的。随着入射角度的增大,法向冲击不断增大,使材料表面或亚表面形成裂纹,裂纹在后序磨粒的持续作用下扩展,最终导致基质的流失。此外,从图 7 还可以看出,在同一冲蚀角下,冲蚀磨损率随磨粒尺寸的增大而增大。这是由于磨粒尺寸大,其冲击动能也大,冲击靶面的应力也增大,即增加了外表面的变形量,使得外表面颗粒脱落速率加快,冲蚀磨损率增加。

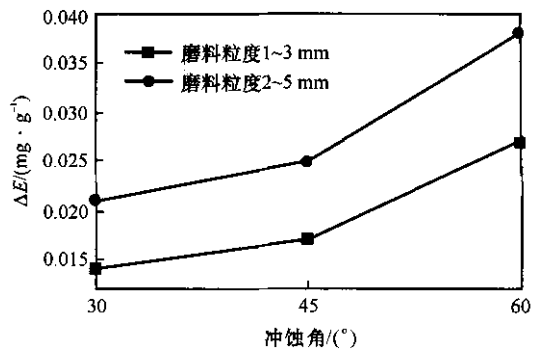
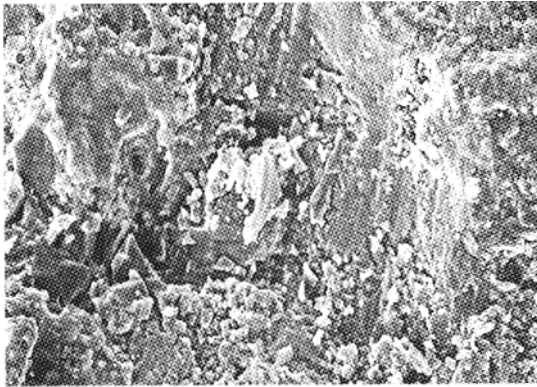
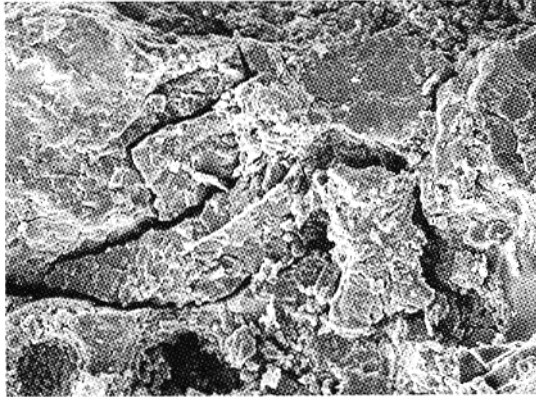


图 7 冲蚀磨损率随冲蚀角和磨料粒度的变化(1# 试样 600 °C)
Fig.7 Variation of the rate of erosion with the impact angle and abrasive particle size(specimen 1# 600 °C)

图 8 为不同冲蚀角下冲蚀后刚玉质耐火材料的 SEM 照片。从图 8 (a) 切削留下的沟槽的显微照片可以看出:刚玉质耐火材料在低冲蚀角时,由于磨粒的硬度比基质的硬度高,角状的磨粒易对基质切削留槽。随着冲击角度的增加,由于样块基质吸收了冲击粒子大部分的能量,塑性迅速耗尽。磨粒的大部分动能转化为材料的弹性功、塑性功和裂纹扩展功,随着变形量的增大,将导致微裂纹的成核、扩展,最终引起颗粒脱落。冲击能量的增大,会诱发亚表层、甚至更深层的微裂纹张大、扩展(见图 8 (b))。



(a) 冲蚀角 30° 的正面照片



(b) 冲蚀角 60° 的正面照片

图 8 冲蚀后刚玉质耐火材料的 SEM 照片(1# 试样, 600 °C)
Fig. 8 SEM images of eroded surface of corundum refractory
(specimen 1#, 600 °C)

3 结论

(1) 刚玉质材料的抗冲蚀性能与水泥加入量密切相关, 水泥加入量越多, 材料的耐磨性能越差, 最终确定为 2%。

(2) 加入少量硅微粉有利于提高刚玉质耐火材料的抗冲蚀能力, 以 3% 为宜。

(3) 随着冲蚀温度的升高, 刚玉质耐火材料的冲蚀磨损率逐渐增大, 在 1000 °C 左右达到最大, 继续升高温度, 冲蚀磨损率反而降低。

(4) 刚玉质耐火材料的冲蚀磨损一般表现为较强的脆性冲蚀特征, 其冲蚀磨损率随冲蚀角的增大而增大, 在同一冲蚀角下, 大粒度磨粒对刚玉质耐火材料冲蚀磨损的影响要比小粒度磨粒大。

致谢 本试验是在雅安市海特高温材料厂 ABR - 1450 A 型高温耐磨试验仪上进行的, 在试验中得到了该厂的大力支持, 谨致谢意。

参考文献

- [1] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损. 北京: 机械工业出版社, 1987: 2-5
- [2] 黄培云. 粉末冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 113-115
- [3] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. Wear, 1960, (3): 87-103

Study on erosion and abrasion resistance of corundum refractories at high temperatures/Hu Shui, Yu Renhong, Jiang Mingxue//Naihuo Cailiao. -2005, 39(6): 415

The corundum refractories with different compositions were used as test specimens. The influences of some parameters including cement contents (2 wt%, 4 wt% and 6 wt%) and the micro-silica contents (2 wt%, 3 wt% and 4 wt%) of the refractories, the impacting angles (30°, 45° and 60°), the particle sizes of the abrasive (1~3 mm, 2~5 mm) and the erosion temperatures (600 °C, 800 °C, 1000 °C and 1200 °C) on the erosion and abrasion resistance of corundum refractories at high temperature were investigated with high temperature erosion test apparatus of Model ABR - 1450A. The results indicated that the erosion and abrasion resistance of corundum refractories became poor with the increase of its calcium aluminates cement contents and was improved with the increase of its micro-silica contents. The elevated temperatures and enlarged impacting angles as well as the coarse abrasive sizes bring forth increased erosion loss for the specimens.

Key words: Erosion loss, Corundum refractories, Impact angle, Abrasive particle size, Erosion temperature
Author's address: College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture Science and Technology, Xi'an 710055, China

刚玉质耐火材料高温耐冲蚀磨损性能的研究

作者: [胡水](#), [于仁红](#), [蒋明学](#), [Hu Shui](#), [Yu Renhong](#), [Jiang Mingxue](#)
作者单位: [西安建筑科技大学材料科学与工程学院](#), 西安, 710055
刊名: [耐火材料](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [REFRATORIES](#)
年, 卷(期): 2005, 39(6)
被引用次数: 5次

参考文献(3条)

1. [李诗卓](#); [董祥林](#) [材料的冲蚀磨损与微动磨损](#) 1987
2. [黄培云](#) [粉末冶金原理](#) 1980
3. [Finnie I](#) [Erosion of surfaces by solid particles](#) 1960(03)

本文读者也读过(5条)

1. [胡水](#) [耐火材料高温耐冲蚀磨损性能试验方法研究](#)[学位论文]2005
2. [娄海琴](#); [宋伟](#); [刘晖](#); [马培沪](#); [李永刚](#); [邵昕](#) [耐火材料高温下抗冲蚀磨损检测技术及应用](#)[会议论文]-2009
3. [王晓利](#); [彭西高](#); [石干](#); [孙加林](#) [定形耐火材料的高温耐磨性研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2009, 43(5)
4. [王晓利](#) [耐火制品的高温耐磨性](#)[期刊论文]-[耐火与石灰](#)2009, 34(2)
5. [黄仲明](#); [高建荣](#); [李永刚](#); [娄海琴](#); [蔚晓敏](#) [一种新型高温耐磨试验方法的探讨](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2010, 44(6)

引证文献(5条)

1. [彭西高](#); [王晓利](#); [石干](#); [吴学真](#); [孙加林](#); [李福燊](#) [高铝浇注料高温耐磨性影响因素的研究](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2009(5)
2. [彭西高](#); [王晓利](#); [吴学真](#); [孙加林](#) [氧化铝基耐火材料的高温耐磨性](#)[期刊论文]-[北京科技大学学报](#) 2010(8)
3. [廉晓庆](#); [冯秀梅](#); [蒋明学](#); [高元双](#) [耐火材料强度与冲蚀磨损率的数值关系](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2011(4)
4. [袁军](#); [陈冬林](#); [陶化龙](#); [刘唐庆](#); [裴晓冲](#); [孙国超](#); [陈琪华](#) [MgO对卫燃带材料上煤灰结渣的影响](#)[期刊论文]-[长沙理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2009(3)
5. [陈冬林](#); [陈彦菲](#); [鄢晓忠](#); [叶昌](#); [裴晓冲](#) [环境气氛对煤灰在Al2O3-Cr2O3-ZrO2材料上结渣的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2008(5)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhc1200506005.aspx