

文章编号: 0253-2409(2012)07-0769-07

煤灰在不同耐火砖表面的润湿性与侵蚀性研究

高峰, 单晓伟

(太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 通过观察煤灰柱在耐火材料表面随温度升高的形态变化和接触角的变化, 来判断煤灰在耐火材料表面的润湿性; 用扫描电镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 等方法对煅烧煤灰过程中煤灰对耐火材料的侵蚀和渗透进行了观察测试, 就渣样的形貌、耐火材料横断面的扫描图像及其元素变化进行了分析。结果表明, 温度是影响煤灰在耐火材料表面润湿性和侵蚀性的重要因素; 不同耐火材料的抗煤灰侵蚀不同, 主要取决于耐火材料的组成和结构, 其中结构致密度尤其重要; 煤灰对耐火材料的侵蚀其实就是煤灰与耐火材料中各矿物元素互相侵蚀与渗透的结果, 在侵蚀过程中还伴随着各种化学反应来抑制或促进侵蚀; 煤灰在耐火材料表面的润湿性与煤灰对耐火材料的侵蚀性基本上表现出一致性。

关键词: 煤灰; 耐火材料; 润湿; 侵蚀; 渗透

中图分类号: TQ53 **文献标识码:** A

Wettability and erodibility of coal ash on the surface of different refractories

GAO Feng, SHAN Xiao-wei

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Through observing the change of morphology and contact angle of coal ash column on the surface of refractories with increasing temperature, surface wettability of refractories was determined. The erosion and permeation behavior of coal ash on refractories during coal ash sintering process were observed and analyzed by using scanning electron microscope (SEM) and energy spectrum analysis. The morphology of slag sample, cross-section image of refractories and the change of element were studied. The results show that temperature is an important factor which influences the wettability and erodibility of coal ash on the surface of refractories. The erosion-resistance to coal ash varies between different refractory, which depends mainly on the composition and structure of refractories. Among these factors, compact structure is especially important. In fact, the corrosion of coal ash on refractories is the result of corrosion and permeation mineral elements between coal ash and refractory materials. During the process of corrosion, chemical reaction inhibits or promotes the corrosion. The wettability of coal ash on the surface of refractories is accordant with erosion behavior of coal ash on refractories.

Key words: coal ash; refractory; wettability; erosion; permeation

目前,耐火材料遍布各个行业,广泛应用于电厂锅炉、煤气化炉等。在这些设备运行过程中,避免不了煤灰和熔渣对炉壁耐火材料进行各种冲刷和侵蚀,以及发生各种各样的化学反应,其中,最常见的就是受热面上的结渣现象。结渣就是软化或熔融的煤灰黏附在受热面上,并生长和积累形成渣体覆盖层^[1,2]。熔融煤灰在耐火材料上的结渣是一个复杂的物理化学变化^[3,4],包括熔融的煤灰在耐火材料表面逐渐的堆积和向耐火材料内部不断的渗透与侵蚀,至于其反应机理至今仍没有定论。Nakano 等^[5]认为,灰渣与耐火材料的界面反应机理包括化学溶解、机械腐蚀、化学剥落和结构剥落。何金桥等^[6~8]研究了熔融煤灰在刚玉上的结渣特性,并提出了利

用灰渣的结晶度来反映煤灰对刚玉的侵蚀程度和黏结作用。Strobel 等^[9]用静态侵蚀法并借用 SEM 和 EDX 等仪器确定了碳化硅耐火砖上的煤灰侵蚀机理和侵蚀速率。

本实验选取四种常用的耐火砖(高纯刚玉砖、高铝砖、镁铝砖和碳化硅砖),研究了熔融煤灰在其表面的润湿性,然后再通过长时间煅烧研究煤灰在耐火砖表面的侵蚀渗透机理,得到了耐火砖与熔融煤灰的不同润湿性与抗侵蚀性。

1 实验部分

1.1 润湿性原理

熔融煤灰对耐火砖的表面润湿可以通过液体对

收稿日期: 2011-11-03; 修回日期: 2012-02-17。

基金项目: 煤转化国家重点实验室开放基金(09-102)。

联系作者: 高峰(1965-), 男, 山西平遥人, 副教授, 工学博士, Tel: 0351-6111121, E-mail: gaofeng@tyut.edu.cn。

本文的英文电子版由 Elsevier 出版社在 ScienceDirect 上出版 (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18725813>)。

固体的润湿行为来描述^[10]。图1为润湿与液滴的形状示意图,将液体置于固体表面,液体会与固体表面形成一个接触角 θ ,从热力学观点来看,液滴在固体表面上的润湿性是由固-气(SV)、固-液(SL)和液-气(LV)三个界面张力所决定的,且满足以下关系 $\cos\theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LV}$ 。当 $\theta > 90^\circ$ 时,润湿张力小,液体收缩,液滴不能润湿固体表面;当 $\theta < 90^\circ$ 时,液滴能铺展在固体表面,即液滴能够润湿固体表面;当 $\theta = 90^\circ$ 时,润湿张力最大,液滴可以完全润湿固体表面。

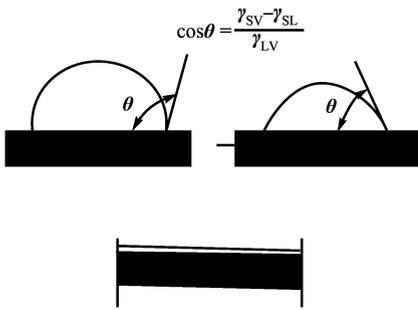


图1 润湿与液滴的形状示意图

Figure 1 Wettability and shape of droplet

1.2 实验材料

表1 煤灰成分分析

Table 1 Component analysis of coal ash

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
w/%	60.82	22.89	3.86	3.82	2.55	1.13	1.40	1.10	1.82	0.42

表2 耐火砖成分及技术参数

Table 2 Composition and technical parameter of bricks

	Content w/%						Apparent porosity η /%	Bulk density ρ /(g·cm ⁻³)
	Mg ₂ O	SiC	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO		
Magnesia-alumina brick	80	-	8	4.0	1.5	2.0	18	3.0
High alumina brick	-	-	75	15	-	-	23	3.0
Silicon carbide brick	-	75	15	-	-	-	18	3.0
Corundum brick	-	-	98	-	0.7	-	18	3.2

1.3.2 煤灰在不同耐火砖上的侵蚀实验

把耐火砖切成25 mm×25 mm×10 mm的试样,取一定量的煤灰(约0.2 g)均匀地平铺在耐火砖上由O形圈组成的圆形区域内。然后将各个煤灰/耐火砖试样放入高温电阻炉中温度分别升至1 200、1 300、1 350 ℃,保温20 h。保温结束后冷却至室温,观察煤灰在耐火砖表面侵蚀情况。

2 结果与讨论

2.1 煤灰柱在耐火砖表面上的形态变化

实验所采用煤灰为内蒙古胜利煤灰。煤灰成分分析见表1。

实验所用的耐火砖共四种,分别是高纯刚玉砖、高铝砖、镁铝砖和碳化硅砖。耐火砖成分及技术参数见表2。

实验主要用到的仪器有SRJX-4-B型马弗炉、HKHR-4C型智能灰熔点测定仪、SX₂-6-13箱式电阻炉、101-2型干燥箱、扫描电子显微镜为JSM-6700F型场发射扫描电镜等。

1.3 实验过程

1.3.1 煤灰柱在耐火砖表面上的润湿实验

按GB/T212-2008《煤的工业分析方法》将胜利煤在马弗炉中烧制成煤灰,用特制的模具将煤灰压制成直径8 mm,高10 mm的煤灰柱,压缩比为56%。把灰柱放在四种不同的耐火砖上,推入管式加热炉中,升温加热。升温速率为10 ℃/min(900 ℃之前)和5 ℃/min(900 ℃之后)。在升温过程中,用相机拍摄记录下灰柱的形态变化和对应的温度,直至灰柱完全熔融铺展在耐火砖上。为了保证实验的准确性,煤灰柱在每种耐火砖表面的润湿实验各做三组平行实验,记录下来的温度分别取平均值。

在升温过程中,煤灰柱在耐火砖上呈现不同的形态变化,可以通过这种形态变化来判断灰柱在耐火砖上的润湿情况^[11]。以煤灰柱在刚玉砖上随温度升高的形态变化和接触角的变化为例来描述煤灰柱在耐火砖表面的润湿情况。图2为煤灰柱在高纯刚玉砖上随温度的形态变化。由图2可知,在1 200 ℃时,煤灰柱与初始形状相同,没有发生变化;1 235 ℃时,灰柱发生局部收缩,底部开始凹陷进去;1 258 ℃灰柱开始变成不规则形状;1 273 ℃时灰柱

变成球形(或半球形),灰柱开始熔化,灰柱与耐火砖的接触角约为 135° ;继续升高温度,灰柱与耐火砖之间的接触角开始变小,当温度达到 $1\ 295^\circ\text{C}$ 时,灰柱与刚玉砖接触角约为 90° ,这时灰柱开始在耐火砖上发生表面润湿; $1\ 322^\circ\text{C}$ 时,灰柱进一步发生润湿,中间部分开始凹陷,灰柱与刚玉砖的接触角约为 45° ; $1\ 378^\circ\text{C}$ 时,灰柱完全铺展在耐火砖上,此时灰柱与刚玉砖的接触角约为 0° 。

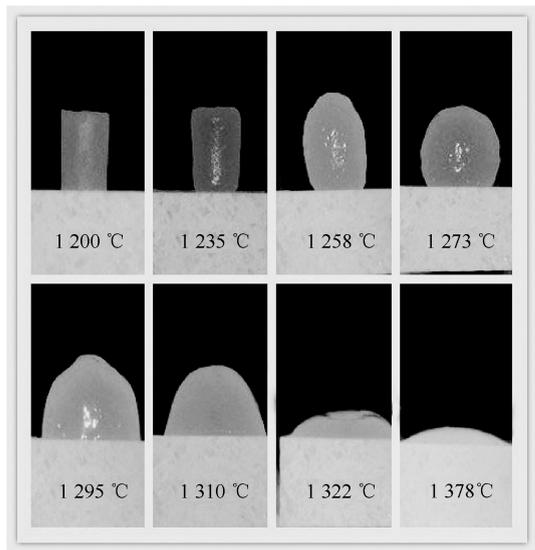


图2 煤灰柱在高纯刚玉砖上随温度的形态变化

Figure 2 Morphological change of coal ash column on the corundum brick as temperature rises

2.2 煤灰在不同耐火砖上润湿性的研究

煤灰柱在耐火砖上随温度变化经历了变形、熔融和润湿这几个阶段。将灰柱在四种不同耐火砖上的几个典型形态变化和相应的接触角做对比,分别取煤灰在各个耐火砖上几个典型的形态变化和接触角(135° 、 90° 、 45° 、 0°)所对应的温度(取三组平行实验中的平均温度),并做接触角-温度的曲线图,结果见图3。

由图3可以看出,随着温度的升高,几种耐火砖与煤灰柱的接触角越小,即随着温度的升高,煤灰在耐火砖上的润湿性也越来越好,当接触角变为 0° 时,熔融煤灰完全润湿在耐火砖表面上。熔融煤灰在不同耐火砖上的所表现出来的润湿性也不同,由图3中的四条曲线可以看出,灰柱在刚玉砖上接触角随温度变化增长最快,而在高铝砖上接触角的增长最慢,碳化硅砖与煤灰柱的接触角对应的温度要整体高于镁铝砖;从润湿终点来看,即灰柱完全润湿于耐火材料表面时,刚玉砖所需温度最高,镁铝砖和碳化硅砖次之,高铝砖最低。因此,煤灰在四种耐火

砖表面润湿性由强到弱依次为:高铝砖>碳化硅砖>镁铝砖>高纯刚玉砖。

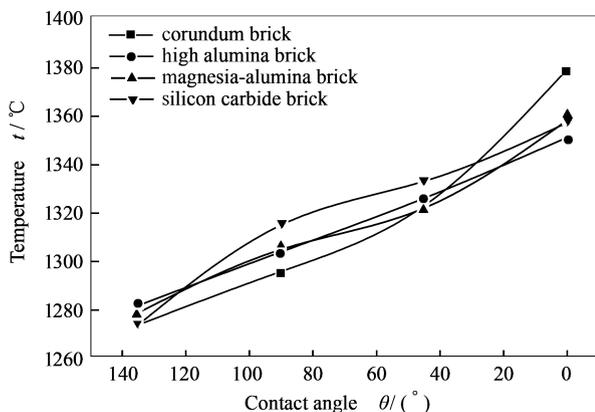


图3 煤灰在各耐火砖上接触角的变化

Figure 3 Contact angle change of coal ash on all the bricks

2.3 不同温度下煤灰对不同耐火砖侵蚀表面的形貌分析

煤灰在各耐火砖不同温度下的侵蚀见图4~图6。

$1\ 200^\circ\text{C}$ 时,刚玉砖上灰渣分布松散,呈弱黏聚态^[12];高铝砖上的灰渣分布均匀而致密,呈强黏结态;镁铝砖上的灰渣聚集在一起,但并未与耐火砖发生任何的结合;碳化硅砖上的灰渣也聚集在一起,与耐火砖发生轻微结合,呈弱黏聚态,见图4。

$1\ 300^\circ\text{C}$ 时,刚玉砖上的煤灰有开始熔融的趋势,与刚玉砖结合紧密,呈强黏结态;高铝砖上的灰渣比较分散地黏结在其表面上,与高铝砖呈强黏结态;镁铝砖上煤灰发生了流动,且有大量气泡产生,灰渣紧密黏结在镁铝砖表面;碳化硅砖表面已经被煤灰侵蚀,表面开始发生破坏,耐火砖表面的灰渣已经脱落,见图5。

$1\ 350^\circ\text{C}$ 时,刚玉砖上的煤灰已经成熔融状态且煤灰边缘呈黄色,灰渣与砖面结合紧密;高铝砖上的煤灰呈熔融态且聚集在一起,并发生轻微流动;镁铝砖上的煤灰已呈完全熔融状态,且完全流动,铺展在镁铝砖表面,渣层非常光滑;碳化硅砖的表面受煤灰侵蚀破坏较为严重,见图6。

通过几组不同温度下煤灰对耐火砖侵蚀的形貌图可以看出,温度对煤灰在耐火材料上的侵蚀影响很大。随着温度的逐渐升高,煤灰从固态缓慢开始熔融,熔融的煤灰在耐火材料表面的黏结能力和侵蚀能力以及耐火材料在熔融煤灰中的溶解能力都比其固态时明显加强。因此,温度越高,耐火材料受煤灰的侵蚀程度越严重。

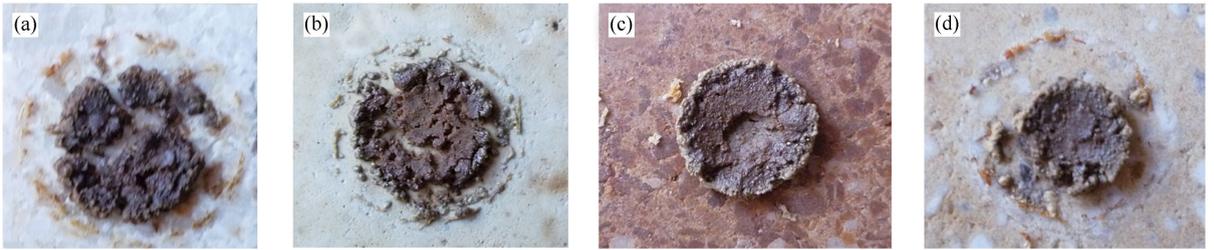


图4 1 200 °C下煤灰在各个耐火砖上煅烧 20 h 后的形貌

Figure 4 Morphology of coal slag sample sintered for 20 h on the bricks at 1 200 °C

(a) : corundum brick; (b) : high alumina brick; (c) : magnesia-alumina brick; (d) : silicon carbide brick

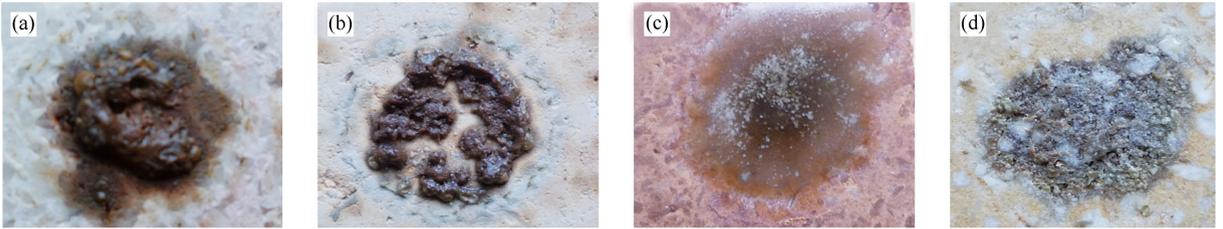


图5 1 300 °C下煤灰在各个耐火砖上煅烧 20 h 后的形貌

Figure 5 Morphology of coal slag sample sintered for 20 h on the bricks at 1 300 °C

(a) : corundum brick; (b) : high alumina brick; (c) : magnesia-alumina brick; (d) : silicon carbide brick

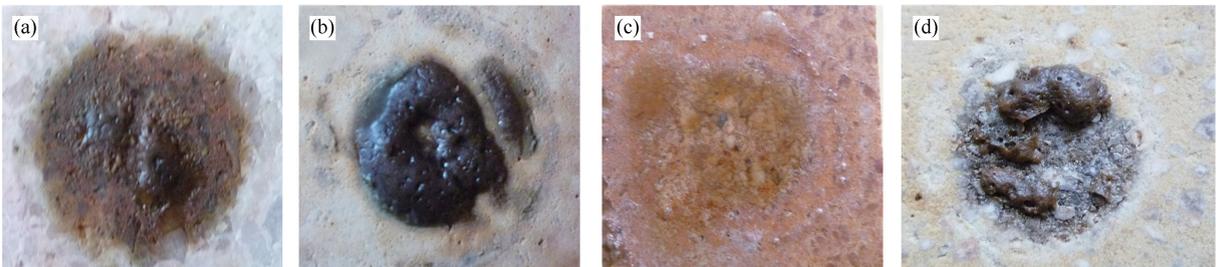


图6 1 350 °C下煤灰在各个耐火砖上煅烧 20 h 后的形貌

Figure 6 Morphology of coal slag sample sintered for 20 h on the bricks at 1 350 °C

(a) : corundum brick; (b) : high alumina brick; (c) : magnesia-alumina brick; (d) : silicon carbide brick

2.4 耐火砖横断面上的 SEM 及元素变化分析

温度对煤灰侵蚀耐火砖的作用是明显的,在一定范围内,温度越高,煤灰对耐火砖的侵蚀越严重。同一温度下煤灰对不同的耐火砖侵蚀程度也有差异。以 1 350 °C 为例,对耐火砖横断面做电镜扫描(SEM)和元素能谱分析(EDS),以了解煤灰在不同耐火砖上的侵蚀深度以及煤灰与耐火砖之间的物理化学变化。

图7为 1 350 °C 下各耐火砖横断面的 SEM 图。经 1 350 °C 煅烧 20 h 后得到的煤灰侵蚀各耐火砖的横断面 SEM 图。观察断面的微观结构,由图 7(a)可知,在刚玉砖靠近煤灰的一端(左侧)被灰渣侵蚀的凹凸不平,由图中的标尺可以算出煤灰在刚玉砖上的最大侵蚀深度约为 96 μm ;由图 7(b)可知,高铝砖中存在着很多气孔,灰渣对高铝砖的最大侵蚀深度约为 220 μm ;由图 7(c)可知,在镁铝砖的横断面上可以清晰的看出灰渣层、耐火砖侵蚀层和原砖

层,而且灰渣层和侵蚀层都很均匀,煤灰在镁铝石砖上的最大侵蚀深度约为 143 μm ;由图 7(d)可知,碳化硅砖的断面虽然受到煤灰的侵蚀破坏严重,但最大侵蚀深度也只有约为 158 μm 。从煤灰侵蚀耐火砖的最大深度可以大概判断四种耐火砖抗煤灰侵蚀性由强到弱依次为:刚玉砖>镁铝砖>碳化硅砖>高铝砖。

根据扩散原理^[13]可知,在熔融煤灰与耐火材料结合处,元素会从含量高的一侧向含量低的一侧扩散和渗透。熔融煤灰对耐火材料的侵蚀其实就是煤灰与耐火材料中各个矿物元素相互侵蚀和渗透的过程。由此可以通过耐火材料横断面上的元素变化区间来判断煤灰在耐火材料上的侵蚀深度。利用能谱分析(EDS)绘制元素变化曲线,结果见图 8。由图 8 可知,横坐标表示距灰渣层的距离 L (μm),从左向右依次贯穿灰渣层、灰渣侵蚀层和耐火材料层;纵坐标表示元素的质量分数。高纯刚玉砖横断面的

元素变化区间为 $100\ \mu\text{m}$ 左右,大量的 Al 元素从耐火材料向煤灰渗透侵蚀,而少量的 Si 元素则从煤灰向耐火材料中渗透侵蚀,如图 8(a) 所示;高铝砖横断面的元素变化区间为 $250\ \mu\text{m}$ 左右,Al 和 Si 在煤灰与耐火材料之间发生渗透侵蚀,如图 8(b) 所示;镁铝耐火砖横断面上元素变化比较复杂,可能在元

素渗透侵蚀过程中发生了化学反应^[14],其元素变化区间为 $200\ \mu\text{m}$ 左右,如图 8(c) 所示;碳化硅砖的元素变化也以 Al 和 Si 为主,与其他耐火砖不同的是,整体元素变化区间为 $200\ \mu\text{m}$ 左右,但 Si 元素的变化区间只有不足 $100\ \mu\text{m}$,如图 8(d) 所示。

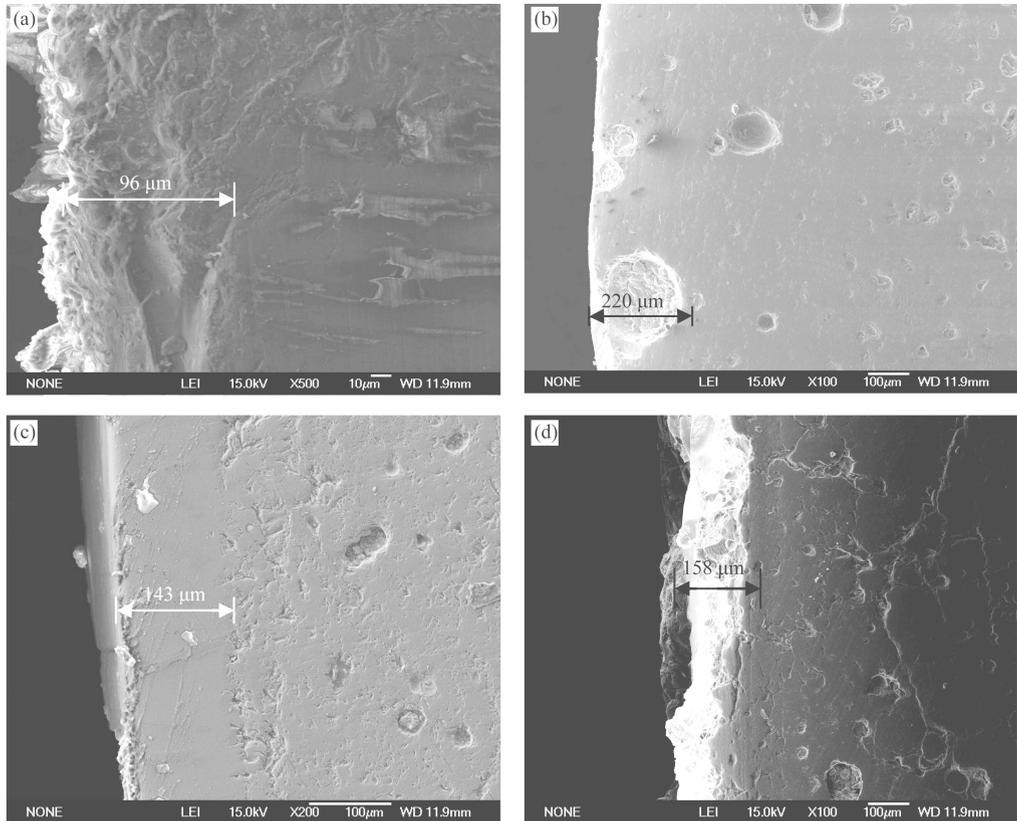


图 7 1350 °C 下各耐火砖横断面的 SEM 图

Figure 7 Cross-section scanned image of bricks at 1350 °C

(a): corundum brick; (b): high alumina brick; (c): magnesia-alumina brick; (d): silicon carbide brick

由上可得,煤灰矿物元素在渗透过程中起主要作用的就是元素 Al、Si 的行为变化,还有少量的 Mg、Fe、Ca 等元素的行为变化。由图 8 还可看出,利用能谱分析(EDS)测得的耐火材料横断面上元素变化区间大小与在扫描电镜(SEM)下观察得到的煤灰对耐火材料的最大侵蚀深度很相近,这进一步验证了煤灰对耐火材料侵蚀的深度。

2.5 煤灰对不同耐火材料侵蚀原因与机理的研究

不同的耐火材料对煤灰表现出不同的抗侵蚀和渗透性,取决于耐火材料本身的组成、结构及性质^[15]。高纯刚玉砖由于其致密的结构以及较小的气孔率,对煤灰的侵蚀和渗透表现出非常强的抵抗性,从刚玉砖表面煤灰边缘呈黄色和耐火材料内部没有发现 Fe 离子可以看出,煤灰中 Fe 离子很难渗

透进入刚玉砖中,因而大部分 Fe 离子扩散到煤灰边缘使其边缘呈黄色。高铝砖虽然跟高纯刚玉砖的主要成分同样都是 Al_2O_3 ,但高铝砖的体积密度小,疏松多孔且气孔率大,从图 7(b) 中可以看出,高铝砖在高温下形成好多的气孔。由于熔融煤灰具有一定的流动性,在高铝砖中一部分煤灰会先从较大的开气孔沿“通道”进入耐火材料内部,剩下的煤灰流动性就会增大,煤灰的黏度就会降低,向耐火材料内部扩散能力就增强,因而更容易渗透进入耐火材料。另外,高铝砖在高温下还会与熔融煤灰中的 CaO 和 SiO_2 反应生成 $\text{C}_2\text{AS-CAS}_2$ 系低熔点硅酸盐^[16]。所以,煤灰对高铝砖的侵蚀渗透程度大,而留在高铝砖面上的灰渣少且分散。

镁铝砖在高硅熔渣中溶解能力较强^[17],在镁铝

砖溶解与渗透过程中还与熔融煤灰发生化学反应,形成一定数量的镁铝尖晶石铝酸钙盐等高熔点相^[14],阻止了煤灰对耐火材料的侵蚀。另外,从图8(c)中可以看出,大量Mg元素从耐火材料向煤灰中渗透,Mg的氧化物改善了煤灰的熔融性^[18],降低了煤灰的熔融温度,使得煤灰更易在镁铝砖表面熔融,故熔融煤灰在镁铝砖表面发生了流动。碳化硅

砖表层中的SiC很有可能发生了钝化反应^[19],生成致密的SiO₂氧化膜,虽然减缓了灰渣侵蚀耐火砖的速率,但是反应界面有大量气泡产生。随着温度的升高,反应的加剧,当逸出的气泡足够多时,SiO₂氧化膜就会受到破坏,碳化硅砖受煤灰侵蚀破坏依然严重。

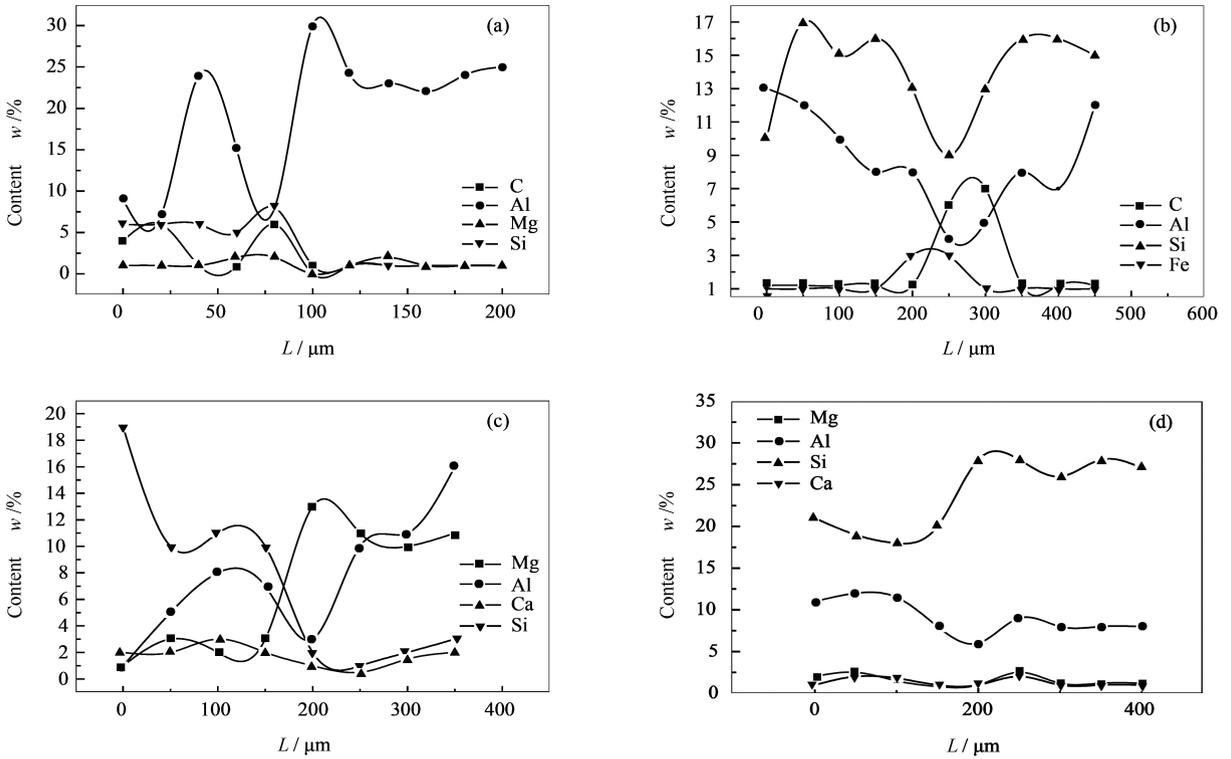


图8 1350 °C下耐火砖横断面元素变化曲线

Figure 8 Cross-section element change curve of bricks at 1350 °C

(a): corundum brick; (b): high alumina brick; (c): magnesia-alumina brick; (d): silicon carbide brick

3 结论

煤灰柱在不同的耐火砖上表现出了不同的润湿性,润湿性由强到弱依次为:高铝砖>镁铝砖>碳化硅砖>刚玉砖。

温度是影响煤灰侵蚀耐火材料的重要因素,温度越高,侵蚀程度越强。

不同耐火材料抗煤灰侵蚀性不同,这主要取决于耐火材料的组成与结构,其中,结构的致密度尤其

重要。煤灰对耐火材料的侵蚀其实就是煤灰与耐火材料中各矿物元素互相侵蚀与渗透的结果,在侵蚀过程中还伴随着各种化学反应来抑制或促进侵蚀。煤灰对四种耐火砖的侵蚀作用由强到弱依次为:对高铝砖的侵蚀最强,碳化硅和镁铝砖次之,刚玉砖受到的侵蚀作用最弱。

煤灰在耐火材料表面的润湿性与煤灰对耐火材料的侵蚀性基本上表现出一致性。

参考文献

[1] DEGEREJI M U, INGHAM D B, POURKASHANIAN M, WILLIAMS A. Prediction of ash slagging propensity in a pulverized coal combustion furnace[J]. Fuel, In Press, Corrected Proof, Available online 11 January 2011.
 [2] VUTHALURU H B. Remediation of ash problems in pulverised coal-fired boilers[J]. Fuel, 1999, 78(15): 1789-1803.
 [3] MISCHA T, BENGT J S, MARIA Z. Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of bio-fuels: Part 2 Deposit chemistry [J]. Fuel, 2006, 85(14): 1992-2001.
 [4] BENGT J S, RAINER B, MIKKO H. Characterization of the sintering tendency of ten biomass ashes in FBC conditions by a laboratory test and by phase equilibrium calculations [J]. Fuel Process Technol, 1998, 56(1): 55-67.

- [5] NAKANO J, SRIDHAR S, BENNETT J, KWONG K-S, MOSS T. Interactions of refractory materials with molten gasifier slags[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2011, **36**(7): 4595-4604.
- [6] 何金桥, 时章明, 陈冬林, 鄢晓忠. 粉煤燃烧过程的熔融煤灰在刚玉上的结渣特性[J]. *过程工程学报*, 2008, **8**(4): 756-760. (HE Jin-qiao, SHI Zhang-ming, CHEN Dong-lin, YAN Xiao-zhong. Slagging characteristics of molten ash on corundum during pulverized coal combustion[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2008, **8**(4): 756-760.)
- [7] 何金桥, 时章明, 陈冬林, 梅焱, 鄢晓忠. 粉煤锅炉刚玉质炉衬结渣特性实验研究[J]. *湖南科技大学学报*, 2008, **23**(3): 113-117. (HE Jin-qiao, SHI Zhang-ming, CHEN Dong-lin, MEI Zhi, YAN Xiao-zhong. Experiment study of slagging characteristics on corundum furnace lining about pulverized coal boiler[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology*, 2008, **23**(3): 113-117.)
- [8] 何金桥, 时章明, 陈冬林, 梅焱, 鄢晓忠. 基于耐火材料的粉煤燃烧过程结渣特性[J]. *煤炭学报*, 2009, **34**(5): 692-696. (HE Jin-qiao, SHI Zhang-ming, CHEN Dong-lin, MEI Chi, YAN Xiao-zhong. Slagging characteristics on refractory materials during pulverized-coal combustng[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, **34**(5): 692-696.)
- [9] STROBEL T M, HURLEY J P. Coal-ash corrosion of monolithic silicon carbide-based refractories[J]. *Fuel Process Technol*, 1994, **44**(1/3): 201-211.
- [10] 陆佩文. 无机材料科学基础[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005, **7**: 115-119. (LU Pei-wen. *Inorganic materials science foundation*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005, **7**: 115-119.)
- [11] ROCHA V G, BLANCO C, SANTAMARÍA R, DIESTRE E I, MENÉNDEZ R, GRANDA M. Pitch/coke wetting behaviour[J]. *Fuel*, 2005, **84**(12/13): 1550-1556.
- [12] 李彦林. 煤粉锅炉结渣的研究现状及进展[J]. *电力安全技术*, 2002, **2**(2): 8-13. (LI Yan-lin. Research status and progress coal ash boiler slagging[J]. *Electric Safety Technology*, 2002, **2**(2): 8-13.)
- [13] 张志杰. 材料物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 228-243. (ZHANG Zhi-jie. *Materials physics and chemistry*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 228-243.)
- [14] 鄢文, 李楠. 熔渣对铝-镁系耐火材料侵蚀的研究进展[J]. *材料导报*, 2008, **5**(22): 423-427. (YAN Wen, LI Nan. Research progresses in corrosion of refractories in Al_2O_3 -MgO system by molten slags[J]. *Materials Review*, 2008, **5**(22): 423-417.)
- [15] 徐建峰. 耐火材料的组成对其抗侵蚀性能的影响[J]. *耐火与石灰*, 2008, **33**(2): 28-31. (XU Jan-feng. Effects of composition of refractories on corrosion resistance[J]. *Refractories & Lime*, 2008, **33**(2): 28-31.)
- [16] 姚金甫, 田守信. 钢包粘渣与包衬耐火材料[J]. *耐火材料*, 2003, **37**(2): 108-110. (YAO Jin-fu, TIAN Shou-xin. Ladle slag building-up and lining refractories for ladle[J]. *Refractories*, 2003, **37**(2): 108-110.)
- [17] 顾华志, 汪姣, 汪厚值, 刘光明, 李继铮. 不同熔渣下铝镁质材料渣蚀机理研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2008, **31**(3): 251-254. (GU Hua-zhi, WANG Jiao, WANG Hou-zhi, LIU Guang-ming, LI Ji-zheng. Influence of different fused slag on corrosion mechanism of alumina-magnesia based refractories[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2008, **31**(3): 251-254.)
- [18] 李继炳, 沈本贤, 赵基钢. 镁基助熔剂对刘桥二矿混煤灰熔融特性的影响[J]. *煤炭转化*, 2009, **32**(2): 37-40. (LI Ji-bing, SHEN Ben-xian, ZHAO Ji-gang. Effect of magnesium-based flux on the melting characteristics of coal ash from coal blends using the Liu Qiao NO.2 coal mine[J]. *Coal Conversion*, 2009, **32**(2): 37-40.)
- [19] WELLS J, RILEY G, WILLIAMSON J. Interactions between coal-ash and burner quarls. Part 2 Resistance of different refractory materials to slag attack in a combustion test facility[J]. *Fuel*, 2003, **82**(15/17): 1867-1873.