

# 水泥窑用 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合耐火材料的研究

袁 林, 陈雪峰, 陈松林, 王杰曾, 刘锡俊, 曾鲁举, 王俊涛  
(中国建筑材料科学研究总院 瑞泰科技股份有限公司, 北京 100024)

**摘要:**根据耐火材料和水泥熟料的反应机理,找到一种既可阻止窑皮中 C<sub>2</sub>S 相变,又不损害镁铝质耐火材料的高温性能的添加物,开发了一种基于 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系的新型复合耐火材料。该材料具有优异的耐火性能、抗热震性能、挂窑皮性能、抗侵蚀性能和较高的机械强度,是一种替代镁铬砖的理想材料,适用于水泥窑烧成带。

**关键词:**尖晶石质耐火材料;水泥窑;MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砖;环境友好材料

**Abstract:** In order to find an additive for modifying the property of magnesia-alumina spinel refractory, MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite refractory was invented based on the reaction mechanism of spinel refractory with cement clinker. This additive could not only stabilize the phase transition of C<sub>2</sub>S in kiln brick coating, but also keep high temperature property of magnesia-alumina spinel refractories. This material has excellent refractoriness property, thermal shock resistance, coating adherence, corrosion resistance and higher mechanical strength. It is an excellent material to replace magnesia-chrome brick for sintering zone in cement kiln.

**Key words:** spinel refractory; cement kiln; MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> brick; environmentally friendly material

**First author's address:** Ruitai Materials Technology Co. Ltd., China Building Materials Academy, Beijing 100024, China

中图分类号:TQ172.622.9 文献标识码:A 文章编号:1002-9877(2011)01-0004-05

## 0 引言

国内外在寻找镁铬砖的替代材料方面做了大量工作<sup>[1-2]</sup>,研制的无铬产品可分为镁铝、镁铝铁、镁铬和镁钙等四大系列<sup>[3-7]</sup>。简单地讲,方镁石镁铝尖晶石材料具有良好的高温性能和抗热震性能,但是抗 CaO 侵蚀和挂窑皮性能差;方镁石铁铝复合尖晶石材料具有优良的抗热震性,良好的挂窑皮性能,但对氧化还原气氛变化敏感;镁铬材料用于高温、耐烧蚀场合,有良好的抗热震性和挂窑皮性能,但价格很高;镁钙材料的耐高温、抗 CaO 侵蚀和挂窑皮性能很好,但抗水化、抗酸性气体的侵蚀能力和抗热震性很差,只能用于窑皮稳定的区域<sup>[8-12]</sup>。

本文在前人基础上,开展了对直接结合镁铬砖和镁铝尖晶石砖挂窑皮性能对比研究。研究表明,镁铝尖晶石砖黏挂窑皮能力不强的原因是黏结在镁铝尖晶石砖表面的窑皮层中的 β-C<sub>2</sub>S 易转化为 γ-C<sub>2</sub>S,转化过程中伴随有 13.6% 的体积增加,导致窑皮层易粉化;而直接结合镁铬砖中的 Cr 具有稳定窑皮层内 β-C<sub>2</sub>S 的能力,可以阻止 β-C<sub>2</sub>S 向 γ-C<sub>2</sub>S 晶型转变,因而窑皮层中没有 β-C<sub>2</sub>S 向 γ-C<sub>2</sub>S 的转变带来的体积效应,窑皮层能够长期稳固地黏挂在耐火砖表

面。所以,直接结合镁铬砖具有良好的挂窑皮性能。

因此,找到一种既可稳定水泥熟料中 β-C<sub>2</sub>S,又不损害耐火材料的高温性能,达到改善镁铝尖晶石挂窑皮性能的添加物,是水泥窑用无铬耐火材料开发的突破口。围绕耐火材料和水泥熟料反应机理和挂窑皮性能的本质,研制了一种新型的 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合耐火材料。

## 1 试验设计与方法

挂窑皮性能取决于水泥熟料和耐火材料的黏结、反应和反应产物 β-C<sub>2</sub>S 的转变<sup>[13-14]</sup>。水泥熟料和镁铝尖晶石耐火材料接触后,熟料中的 C<sub>2</sub>S 会和镁铝尖晶石反应,在紧靠耐火材料的窑皮中会大量形成 β-C<sub>2</sub>S。随后,β-C<sub>2</sub>S 向 γ-C<sub>2</sub>S 转变。如果转变不能得到抑制,产生的膨胀应力将导致黏附在耐火材料表面的窑皮垮落。有两种方法可减少 β-C<sub>2</sub>S 转变的破坏作用,其一,控制尖晶石与水泥熟料的反应,如通过引入 ZrO<sub>2</sub> 来减少尖晶石的掺量;其二,掺加极化能力小于 Ca<sup>2+</sup> 或大于 Si<sup>4+</sup> 的离子,以稳定 β-C<sub>2</sub>S<sup>[15-16]</sup>。

本试验依据这些原理设计了在 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub> 中添加 TiO<sub>2</sub>、Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 加入适当的助烧剂,在 1650℃ 时保温 6h 制成耐火砖,记录

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863 计划)项目(2002AA335070)

烧结线变化。

采用“三明治”法进行挂窑皮试验,见图 1。2 块尺寸为 200mm×100mm×35mm 的试样砖,中间均匀铺设 5mm 的水泥熟料细颗粒,上压 6kg 重物,在 1470℃ 烧成 4h,见图 1(a)。试验完成后,在 WD-4100 型电子万能试验机的载物台上,施加载荷使耐火砖与水泥熟料层彼此分开,记录显示器上所显示的载荷大小,以评价其黏结性能,见图 1(b)。

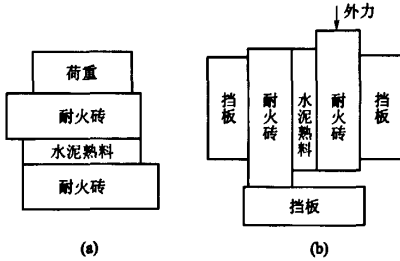


图 1 “三明治”法测量耐火砖黏挂窑皮的能力

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的挂窑皮性能

根据水泥熟料黏结在砖的表面积和施加的剪切应力来判定耐火材料的挂窑皮性能。黏结情况的评分标值为 0~10 分,以直接结合镁铬砖的挂窑皮能力为满分 10 分,其他的材料和其相比得出比值。图 2 是添加 1% TiO<sub>2</sub>、Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的尖晶石砖的挂窑皮分值及其烧结线变化。

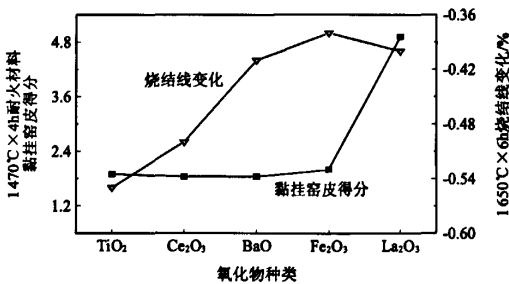


图 2 不同氧化物对 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub> 砖挂窑皮能力和烧结线变化的影响

从图 2 可知,在含铬镁铝尖晶石砖加入 TiO<sub>2</sub>、Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BaO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后,其挂窑皮性都没有显著的提高,各自分数为 1.90、1.84、1.84 和 2.00,但加入 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后挂窑皮性能明显得到提高,达到 4.96 分,且其线收缩率较低,只有 0.40%,其余的分别为 0.55%、0.50%、0.41%和 0.38%。当 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的掺量从 1% 提高到 2.5% 后,挂窑皮性能接近镁铬砖的水平(达到 9.0 分),同时烧成线收缩率减少至 0.19%,见图 3。因此,La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是一种能够提高挂窑皮性能,又不影响材料高温性能的添加物。

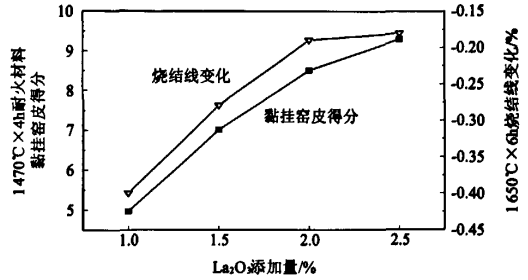


图 3 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量对 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub> 砖挂窑皮能力和烧结线变化的影响

图 4 是耐火砖上黏挂水泥熟料的实物照片。从图 4 可以看出,镁铝尖晶石砖黏附水泥熟料的面积比较小,而掺入 ZrO<sub>2</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的尖晶石砖表面均匀地黏挂上一层牢固的水泥熟料层,水泥熟料层几乎布满耐火砖薄片表面,和直接结合镁铬砖的情况相当,黏结性能明显优于普通镁铝尖晶石砖。

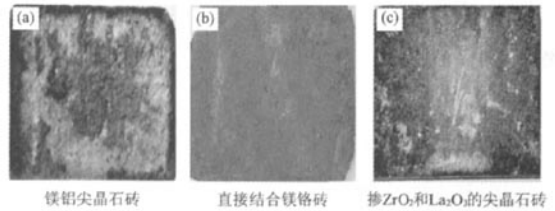


图 4 耐火材料挂水泥熟料的照片

对比分开耐火砖薄片和水泥熟料层所需要施加的剪切力大小也可以得到相同的结论。劈开 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料和水泥熟料的黏结所需的剪切力为 3580N,劈开直接结合镁铬砖和水泥熟料的黏结所需的剪切力为 4160N,而劈开普通尖晶石砖和水泥熟料的黏结所需的剪切力仅为 1910N。因此新型的无铬耐火材料 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和直接结合镁铬砖的黏挂窑皮强度相当,明显地高于普通镁铝尖晶石砖。

### 2.2 材料挂窑皮性能的机理分析

从对镁铝尖晶石砖和直接结合镁铬砖的黏挂窑皮性能的研究可知,耐火砖表面能否长期黏挂一层均匀牢固的窑皮层,取决于耐火砖能否稳定窑皮层中的 β-C<sub>2</sub>S,阻止 β-C<sub>2</sub>S 向 γ-C<sub>2</sub>S 的转化。β-C<sub>2</sub>S 在常温下有向 γ-C<sub>2</sub>S 自发转化的能力,在转化过程中伴随着 13.6% 的体积膨胀,这是镁铝尖晶石砖表面窑皮粉化脱落的原因。图 4(a)可看出水泥熟料在镁铝尖晶石砖表面牢固黏结的面积较小,并且集中在镁铝尖晶石砖薄片的中间部位。通过观察还发现,在两块镁铝尖晶石砖薄片之间没有与耐火砖薄片发生黏结的水泥熟料中有大量的白色粉末状物质。XRD 分析表明,白

色粉末状物质组成中大部分是  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ , 此外还有少量的  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  存在, 说明是水泥熟料和尖晶石耐火材料反应促使的  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  向  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  转变。

从图 4(b) 看出, 水泥熟料层几乎完全布满直接结合镁铬砖表面, 并且水泥熟料层与镁铬砖之间的黏结力很大, 使用较强的外力作用才能把水泥熟料层和镁铬砖分离。水泥熟料层内部没有出现像镁铝尖晶石砖黏挂窑皮试验中出现的那种白色粉末状物质, 水泥熟料层牢固地黏挂在镁铬砖表面。对两镁铬砖薄片间的水泥熟料层进行 X 衍射分析, 见图 5。

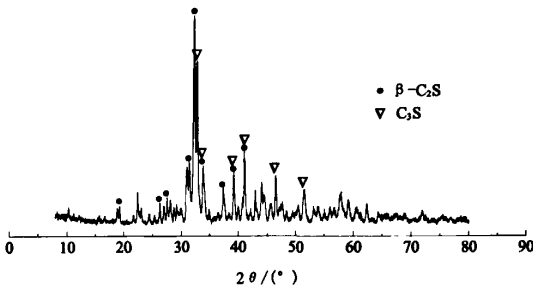


图 5 黏附在镁铬砖表面上的水泥熟料的 XRD 图谱

由图 5 可知, 在镁铬砖表面附着的窑皮层中的主要成分是  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 。尽管在水泥熟料层中  $\text{C}_3\text{S}$  的衍射峰与  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  衍射峰存在着重叠, 但可看出  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  的衍射峰是最强的, 并且没有发现  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  的衍射峰。这是因为水泥熟料中的一部分  $\text{C}_3\text{S}$  分解为  $\text{CaO}$  和  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{CaO}$  和耐火砖内部矿物发生反应, 促使水泥熟料和耐火砖初步黏结, 而  $\text{C}_2\text{S}$  以  $\beta$  相形式保存了下来。

$\beta\text{-C}_2\text{S}$  的稳定性取决于其中杂质离子的极化能力, 极化能力比  $\text{Ca}^{2+}$  小或比  $\text{Si}^{4+}$  大的离子对  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  都有稳定作用, 而离子极化能力的大小和杂质离子的半径大小有关, 根据 H.E.Schwiete 等提出的稳定  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  离子半径的依据, 用半径较大的离子取代  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  中的  $\text{Ca}^{2+}$  或用半径较小的离子取代  $\text{Si}^{4+}$  对  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  都有稳定作用。按照哥希密特离子半径数据,  $\text{La}^{3+}$  的离子半径为  $1.22\text{\AA}$ , 大于  $\text{Ca}^{2+}$  的离子半径  $1.06\text{\AA}$ , 根据上述理论可以推测出  $\text{La}^{3+}$  具有稳定  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  的能力。图 4(c) 可看出含有  $\text{La}_2\text{O}_3$  的尖晶石砖黏结水泥熟料的能力比普通尖晶石砖黏结水泥熟料的能力显著增强。图 6 为夹在两种不同的无铬砖中的水泥熟料层 XRD 图谱, 其中一种含有 2% 的  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 另外一种不含  $\text{La}_2\text{O}_3$ 。

从图 6 可看出, 在加入了  $\text{La}_2\text{O}_3$  的耐火砖薄片层中的水泥熟料中的  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  矿物明显增加了许多, 与不加  $\text{La}_2\text{O}_3$  的耐火砖薄片中的水泥熟料相比, 其中的  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  矿物的衍射峰值有所降低。水泥熟料在自然冷却时,  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  会部分转化为  $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ , 而含  $\text{La}_2\text{O}_3$  的耐火砖

薄片间的水泥熟料中却可以保持较大含量的  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ , 说明  $\text{La}_2\text{O}_3$  的确具有稳定  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  的能力。

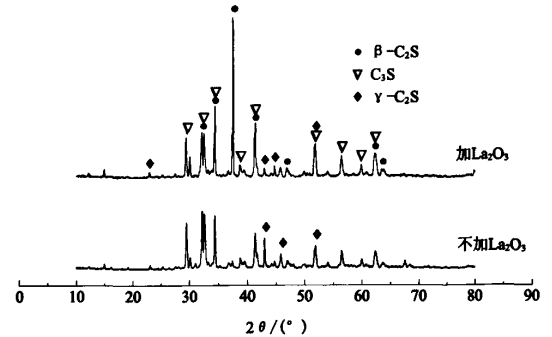


图 6 黏附在试验砖表面上的水泥熟料的 XRD 图谱

显微结构分析表明(见图 7),  $\text{MgO-MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  内部矿物组成主要是方镁石和镁铝尖晶石, 基质中白色点状物质为添加物  $\text{ZrO}_2$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$ 。对其能谱分析知(见图 8),  $\text{La}_2\text{O}_3$  在砖内主要和  $\text{ZrO}_2$  反应形成锆酸镧固溶体  $\text{La}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{ZrO}_2(\text{SS})$ , 其中含有少量的  $\text{CaO}$ 。锆酸镧为一种高熔点化合物, 对耐火材料的高温性能影响不大。因此, 引入的  $\text{La}_2\text{O}_3$  显著改善了挂窑皮性能且不影响耐火材料的高温性能。

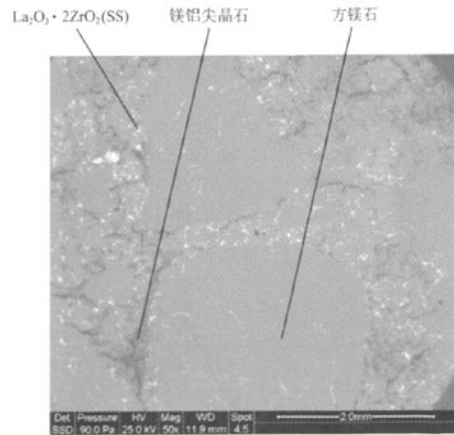


图 7  $\text{MgO-MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$  复合耐火材料的 SEM 照片

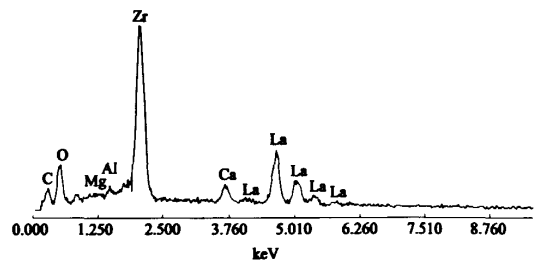


图 8  $\text{La}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{ZrO}_2$  固溶体的能谱分析

图 9 为 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合耐火材料和水泥熟料黏结的微观结构,颜色较深的部分为耐火砖,较浅的部分为水泥熟料层。

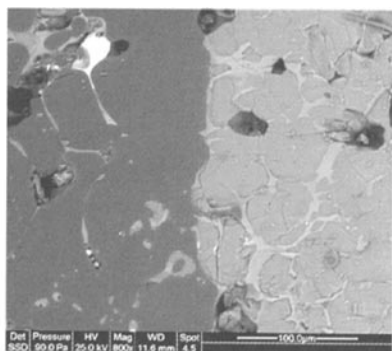


图 9 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

复合耐火材料经水泥熟料侵蚀后的 SEM 照片

从图 9 可看出,水泥熟料层与耐火砖紧密地黏结在一起,并且有些水泥熟料通过耐火砖内的气孔或低熔相侵蚀进入耐火砖内部。耐火砖黏挂窑皮的过程分为两个阶段:1)水泥熟料黏结在耐火砖表面形成窑皮层;2)耐火砖内部组分稳定窑皮层中的 β-C<sub>2</sub>S,使窑皮层能稳固地黏挂在耐火砖表面。对于第 1)阶段,水泥熟料中的组分必须与耐火砖内部组分发生反应,这样水泥熟料才能黏挂在耐火砖表面。新型无铬砖与水泥

熟料在高温下接触时,水泥熟料中的 C<sub>2</sub>S 分解成 C<sub>3</sub>S 和 CaO,CaO 从熟料中侵入到耐火砖体中,与耐火砖内部的有关矿物发生复杂的反应。从图 9 可知,水泥熟料和 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料间的过渡层不是很厚,说明 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有稳定 β-C<sub>2</sub>S 的作用。

### 3 材料的应用

图 10 为某水泥厂回转窑的烧成带和过渡带采用 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 耐火材料砌筑的示意。砌筑时使用大小为 200mm×180mm×90/80mm 的主砖和尺寸为 200mm×180mm×70/60mm 和 200mm×180mm×60/50mm 的两种配砖,其性能见表 1。

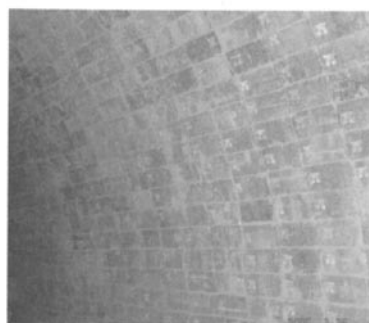


图 10 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合耐火材料在回转窑内的砌筑示意

表 1 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合耐火材料的性能

显气孔率 /%	体积密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	常温耐压强度 /MPa	1400℃抗折强度 /MPa	0.6MPa 时荷软温度 /℃	抗热震性能 (950℃风冷) /次	挂窑皮分值	化学成分 /%						
							MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
13.8	3.15	73	5.3	1650	>100	8.6	83.8	5.5	4.8	3.0	1.3	1.0	0.6

该回转窑于 2005 年 3 月 10 日点火升温后运行了 280d,因其他原因停窑检修,停窑后观察发现 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砖窑皮黏挂均匀牢固,厚度约为 260mm,试验砖残砖厚度约有 140mm,第二次点火后继续使用直至运行至 2006 年 4 月检修时,在役使用寿命已超过了 400d,远远超过了在相同部位使用直接结合镁铬砖的正常寿命(约 180d)。

### 4 结论

1)为了提高新型无铬 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub> 砖的黏挂窑皮能力,加入了既不会降低尖晶石砖的高温使用性能,又能抑制 β-C<sub>2</sub>S 转变的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,制得了一种新型耐火材料 MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砖。

2)MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砖的挂窑皮性能与直接结合镁铬砖相当,明显优于普通镁铝尖晶石砖;在干法水泥回转窑的实际使用中,MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-

ZrO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砖的寿命超过了在相同部位使用的直接结合镁铬砖。

### 参考文献:

[1] Bray D J. Toxicity of chromium compounds formed in refractories[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1985, 64 (7): 1012-1016.  
 [2] Lee Y. Formation of hexavalent chromium by reaction between slag and magnesia-chromite refractory [C]// Steel Making Conference Proceedings, 1998:553-560.  
 [3] Komatsu H. Current and future status of chrome-free bricks for rotary cement degassers[J]. Taikabutsu Overseas, 1999,19(4):3-9.  
 [4] Lee W E. Evolution of in situ refractory in the 20th century[J]. Journal of America Ceramic Society, 1998, 81(6):1385-1410.  
 [5] Kajita Y. Refractories and Environment-Prospect of Refractories in 21st Century (Special Issue)[J]. Journal of Refractories, Japan, 2000, 20 (4):266-270.  
 [6] Yoshikazu P. New uniformly porous CaZrO<sub>3</sub>/MgO composites with three-dimensional network structure from natural dolomite [J]. Journal of

# 不同条件下旋风预热器压降的试验

杨沛浩, 陈延信, 徐德龙, 酒少武

(西安建筑科技大学 粉体工程研究所, 陕西 西安 710055)

**摘要:**在不同温度、风速和固气比条件下对旋风预热器的压降进行了测试。结果表明压降随着温度的升高,先增大后减小,大约在 200~400℃之间出现最大值;压降随风速的提高而增大;压降随着固气比的增大先减小后增大,大部分在 Z=1.5~2.0 之间出现最小值。

**关键词:**旋风预热器;压降;温度;风速;固气比

**Abstract:** The pressure drop of the cyclone preheater was measured in different temperature, gas velocity and solid-gas ratio. The results showed that the pressure drop increased with the gas temperature increasing till to a maximum value approximately at the gas temperature of 200~400℃, then the pressure drop decreased with the gas temperature further increasing. The pressure drop increased with the gas velocity increasing. The pressure drop decreased gradually with the solid-gas ratio increasing, and mostly reached a minimum value between Z=1.5 and Z=2.0. Across this point, the pressure drop increased with the solid-gas ratio further increasing.

**Key words:** cyclone preheater; pressure drop; temperature; gas velocity; solid-gas ratio

**First author's address:** Institute of Powder Engineering, Xi'an University of Architecture Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

中图分类号:TQ172.622.24 文献标识码:A 文章编号:1002-9877(2011)01-0008-05

有关旋风预热器(或者旋风筒)压降研究的文献很多<sup>[1-9]</sup>,但研究方向一般是高温低固气比或常温高固气比条件下旋风筒的压降,在不同温度、不同固气比及不同入口风速条件下的压降研究还未见有实质性的报道,本文在这方面做了初步探索。

## 1 试验

### 1.1 试验流程及其装置

试验流程及其装置见图 1。燃煤热风炉出口管道、燃气热风炉、换热管、旋风预热器、集料箱和旋风预热器出口高温管段全部采用不锈钢(1Cr18Ni9Ti)

制作,外敷 100mm 厚矿棉保温层。燃煤热风炉用普通钢材(Q235)制作,内砌保温材料和耐火砖,燃气热风炉内浇注耐火材料。

热气流从燃煤热风炉经燃气热风炉、换热管进入旋风预热器,出旋风预热器的气体再经过孔板流量计、袋除尘器和风量调节闸阀,最后经离心风机排出。物料由喂料机喂入换热管,随气流进入旋风预热器分离后,大量物料进入集料箱,少量物料出旋风预热器后进入袋除尘器被收集。

---

American Ceramic Society, 2000,83(8):2091-2093.

[7] Ozeki F. New magnesia-spinel bricks for cement rotary degasser utilizing waste in large quality[J]. Taikabutsu, 2000, 52(1):28-30.

[8] Komatsu H. The development of magnesia-spinel brick with high resistance against alkali salts in cement rotary degasser [J]. Taikabutsu, 2000, 52(2):78-87.

[9] Toshio K. Development of magnesia-zircon castable for steel ladle slag line[J]. Taikabutsu, 1993, 45(9):521-592.

[10] Medvedev P G. Development of dual-phase magnesia-zirconia ceramics for light water reactor inert matrix fuel[D]. Dissertation, Texas A & M University, 2004.

[11] Rodriguez J L. Reaction sintering of zircon-dolomite mixtures[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001(21):343-354.

[12] Rodriguez J L. Relationships between phase constitution and mechanical behavior in MgO-CaZrO<sub>3</sub>-calcium silicate materials [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004(24): 669-679.

[13] Polensning W. Magnesia-alumina Brick as a Lining Material in the Cement Industry and its Behaviour with regard to Cement Clinker[J]. ZKG, 1984(1):18-28.

[14] Nishio H. Reaction between Spinel and CaO [J]. Taikabutsu Overseas, 1992, 12(3): 30-35.

[15] 李建锡,冯培植,董大懋.  $\beta$ -C<sub>2</sub>S 固溶体稳定的热力学研究[J]. 硅酸盐学报, 1995, 23(6):644-651.

[16] 冯修吉,龙世宗.微量离子对  $\beta$ -C<sub>2</sub>S 稳定性的影响及其机理研究[J]. 硅酸盐学报, 1985(4):424-431.

(编辑 王新频)

作者: 袁林, 陈雪峰, 陈松林, 王杰曾, 刘锡俊, 曾鲁举, 王俊涛  
作者单位: 中国建筑材料科学研究总院瑞泰科技股份有限公司, 北京, 100024  
刊名: 水泥 **ISTIC PKU**  
英文刊名: CEMENT  
年, 卷(期): 2011(1)

## 参考文献(16条)

1. Bray D J Toxicity of chromium compounds formed in refractories 1985(07)
2. Lee Y Formation of hexavalent chromium by reaction between slag and magnesia-chromite refractory 1998
3. Komatsu H Current and futuro status of chrome-free bricks for rotary cement degassers 1999(04)
4. Lee W E Evolution of in situ refractory in the 20th century[外文期刊] 1998(06)
5. Kajita Y Refractories and Environment-Prospect of Refractories in 21st Century(Special Issue) 2000(04)
6. Yoshikazu P New uniformly porous CaZrO<sub>3</sub>/MgO composites with three-dimensional network structure from natural dolomite 2000(08)
7. Ozeki F New magnesia-spinel bricks for cement rotary degasser utilizing waste in large quality 2000(01)
8. Komatsu H The development of magnesia-spinel brick with high resistance against alkali salts in cement rotary degasser 2000(02)
9. Toshio k Development of magnesia-zircon eastable for steel ladle slag line 1993(09)
10. Medvedev P G Development of dual-phase magnesia-zirconia ceramics for light water reactor inert matrix fuel 2004
11. Rodriguez J L Reaction sintering of zircon-dolomite mixtures 2001(21)
12. Rodriguez J L Relationships between phase constitution and mechanical behavior in MgO-CaZrO<sub>3</sub>-calcium silicate materials 2004(24)
13. Polensning W Magnesia-alumina Brick as a Lining Material in the Cement Industry and its Behaviour with regard to Cement Clinker 1984(01)
14. Nishio H Reaction between Spinel and CaO 1992(03)
15. 李建锡;冯培植;童大懋 B-C<sub>2</sub>S固溶体稳定的热力学研究 1995(06)
16. 冯修吉;龙世宗 微量离子对β-C<sub>2</sub>S稳定性的影响及其机理研究 1985(04)

## 本文读者也读过(2条)

1. 张世国(编译).王晓阳(校) 水泥窑材料对碱性耐火材料的化学腐蚀[期刊论文]-耐火与石灰2011, 36(4)
2. 刘锡俊 水泥窑用方镁石-尖晶石砖应用进展[期刊论文]-耐火材料2000, 34(2)