

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2016.04.005

## $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对刚玉尖晶石浇注料性能的影响研究

包生重, 杨建红, 李晓星, 李致远, 唐新平  
(中国铝业郑州有色金属研究院有限公司, 河南 郑州 450041)

**摘要:**通过一系列试验,研究了 $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对刚玉尖晶石浇注料综合性能的影响。结果表明: $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>能够促进铝酸钙水泥的膨胀效应反应,抵消水化产物脱水造成的收缩,能够明显提高铝酸钙水泥结合浇注料试样的中温强度(800℃)和降低永久线变化率。当 $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为7wt.%时,中温强度最高,并大于110℃烘干强度;在无铝酸钙水泥和硅微粉添加的条件下,仅采用 $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>做结合剂,其试样的中温强度较低,高温(1400℃)强度不稳定;对于低硅或无硅含量要求的浇注料,或中温下要求尺寸变化小、强度高的浇注料,可采用铝酸钙水泥和 $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>配合使用的方式,但在大量使用时 $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的加入量不宜超过3wt.%。

**关键词:**刚玉浇注料;尖晶石; $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;铝酸钙水泥;中温强度;施工性能

**中图分类号:**TQ174.75 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2278(2016)04-0351-06

## Effect of $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on performance of corundum spinel castables

Bao Shengzhong, Yang Jianhong, Li Xiaoxing, Li Zhiyuan, Tang Xinping

(Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co.Ltd of Chalco, Zhengzhou 450041, Henan, China)

**Abstract:**Through a series of tests, the effects of  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on comprehensive properties of corundum spinel castable were studied. The results showed that  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> could significantly reduce permanent linear change rate of calcium aluminate cement binding castable specimens under 800℃ and improve mid temperature strength. That was because  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> could promote the expansion effect reaction of calcium aluminate cement and offset the dehydration shrinkage of hydration products. When the content of  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was 7wt.%, the mid temperature strength was highest and higher than drying strength at 110℃. Under the condition of neither calcium aluminate cement nor silica fume were added in the corundum spinel castable with only  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as binder, both the mid temperature(800℃) and high temperature(1400℃) strength of specimens were low and instability. For low or no silicon content castable, or castable required small size change rate and high mid temperature strength, calcium aluminate cement and  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> could be used complexly, but the amount of  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition should not be excess 3wt.% in massive use.

**Key words:**corundum castable; spinel;  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; calcium aluminate cement; middle temperature strength; Application performance.

### 0 引言

刚玉质及刚玉尖晶石质浇注料具有较高的耐火度,良好的体积稳定性,以及优良的抗侵蚀性,广泛的应用于冶金、建筑、石油化工等行业<sup>[1-3]</sup>。刚玉质及刚玉尖晶石质浇注料多采用铝酸钙水泥作为结合剂,其用水量小,脱模强度高,施工方便。然而在铝酸钙水泥带来便利的同时,也引入了CaO。在高温下CaO可以与浇注料中或使用环境中的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>等反应,生成低熔点物质,如黄长石、钙长石等,一定程度上影响了高温使用性能<sup>[4]</sup>。

再者由于铝酸钙水泥形成的水化矿物,在中高温区间(800-1200℃)脱水,体积收缩,形成疏松的结构,并且在此温度区间下,不能陶瓷化,造成浇注料制品的强度大幅降低。 $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>结合的刚玉浇注料,由于不含CaO,使用温度能够超过1700℃,但其通常需要与硅微粉结合使用,以降低烧结温度和增加强度<sup>[1,3]</sup>。

冶金与化学工业经常需要硅、钙含量低,强度高的刚玉浇注料制品,并且其实际使用温度可能在800-1200℃之间。对于低或超低铝酸钙水泥含量的纯刚玉质浇注料来说,其纯度也许能够满足要

收稿日期:2016-03-12。 修订日期:2016-05-21。  
基金项目:河南省科技厅创新人才计划项目(14200510025)。  
通信联系人:杨建红(1963-),男,教授。

Received date:2016-03-12. Revised date:2016-05-21.  
Correspondent author:YANG Jianhong(1963-),male, Professor.  
E-mail:jhyang\_qx@yahoo.com

求,但在800-1200℃的使用区间,其强度会大幅降低,甚至不能满足使用的需要。

本文在刚玉尖晶石浇注料的基础上引入 $\rho$ - $Al_2O_3$ ,通过一系列的试验,研究其对刚玉尖晶石浇注料强度及综合性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 原料

用烧结核状刚玉、富铝尖晶石为骨料,板状刚玉细粉、富铝尖晶石细粉、煅烧 $\alpha$ - $Al_2O_3$ 微粉为基质,纯铝酸钙水泥、 $\rho$ - $Al_2O_3$ (Alphabond300)为结合剂,加入适量的分散性氧化铝作减水剂,配制试验所需的浇注料。

其中烧结核状刚玉的综合 $Al_2O_3$ 含量99.5wt%,镁铝尖晶石的综合 $Al_2O_3 \geq 74$ wt.wt.%,煅烧氧化铝微粉的综合 $Al_2O_3 \geq 99.6$ wt.%,活性 $\rho$ - $Al_2O_3$ 微粉的综合 $Al_2O_3$ 含量为99.8wt.%(去除灼减后),分散性氧化铝的综合 $Al_2O_3$ 含量为80wt.%,纯铝酸钙水泥的综合 $Al_2O_3$ 含量为73wt.%<sup>[5]</sup>。

试验过程采用了三组配方:第一组配方是在原

刚玉尖晶石配方的基础上,逐步增加 $\rho$ - $Al_2O_3$ 的比例;第二组配方是在第一组配方试验的基础上,固定 $\rho$ - $Al_2O_3$ 的比例,改变铝酸钙水泥的比例;第三组配方是仅采用 $\rho$ - $Al_2O_3$ 不采用铝酸钙水泥。分别如表1、2、3所示。

### 1.2 性能测试

按上述表中的配比准确称取各种原料,参照YB/T5202.1-2003标准进行制样,养护24h后脱模,再经110℃×24h烘干,部分试样根据试验需要分别再进行800℃×3h或1400℃×3h烧成。样品尺寸为160mm×40mm×40mm。

根据需要,对上述表1、2、3中试样的测试各有侧重。对表1中试样,主要测量了其用水量,常温抗折强度和中温烧后抗折强度。对表2中的试样主要测量了其用水量,常温抗折强度、中温烧后抗折强度、高温烧后抗折强度,以及相应的中温和高温烧后的线变化率等。对于表3中的试样,主要测量了其中温和高温烧后的强度。

在这些性能测试中,均参照了相应的标准,如YB/T5200-1993、YB/T5201-1993、YB/T5203-

表1 浇注料试验配方(I)/wt.%  
Tab.1 Formula for castable test (I)

Component	Sample Number								
	1-0#	1-1#	1-2#	1-3#	1-4#	1-5#	1-6#	1-7#	1-8#
TC 3-6、1-3, MA 0-1	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
MA0.045,TC0.045, CTC-50, RG-4000	24%	23%	22%	21%	20%	19%	18%	17%	16%
ADW1、ADS1	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
CA-270	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Alphabond300	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%

表2 浇注料试验配方(II)/wt.%  
Tab.2 Formula for castable test (II)

Component	Sample Number								
	2-1.1#	2-1.2#	2-1.3#	2-2.1#	2-2.2#	2-2.3#	2-3.1#	2-3.2#	2-3.3#
TC 3-6、1-3, MA 0-1	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
MA0.045,TC .045,CTC-50	13%	12%	11%	12%	11%	10%	14%	13%	12%
RG-4000	6%	6%	6%	7%	7%	7%	5%	5%	5%
ADW1、ADS1	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Alphabond300	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
CA-270	3%	4%	5%	3%	4%	5%	3%	4%	5%

表3 浇注料试验配方(Ⅲ) /wt.%  
Tab.3 Formula for castable test (Ⅲ)

Sample Number Component	3-1#	3-2#	3-3#	3-4#	3-5#	3-6#
TC 3-6、1-3, MA 0-1	70%	70%	70%	70%	70%	70%
MA 0.045, TC 0.045, CTC-50	14%	15%	16%	17%	18%	19%
ADW1、ADS1	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Alphabond300	7%	7%	7%	7%	7%	7%
RG-4000	8%	7%	6%	5%	4%	3%

备注:表中TC 3-6、1-3指烧结板状刚玉3-6 mm颗粒和1-3 mm颗粒;MA0-1指富铝尖晶石0-1 mm颗粒;MA0.045指富铝尖晶石0.045 mm细粉;TC0.045指烧结板状刚玉0.045 mm细粉;CTC-50为煅烧氧化铝微粉;ADW1、ADS1为分散性氧化铝;Alphabond300为活性 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 微粉;RG4000为煅烧氧化铝超微粉;百分比均为质量百分比。

1993、GB 3001-2000等。当然,除了这些标准测试项目外,还对浇注料施工性能、脱模后制品表面状况等进行了观察和直观的评价。

试样检测试验中所用的仪器设备有JJ-5型水泥胶砂搅拌机, GZ-85型水泥胶砂振动台, 160 mm×40 mm×40 mm 标准三联模, NLD-2水泥胶砂流动度测定仪, 试样养护箱, 鼓风干燥箱, 高温井式炉, 1400 °C箱式炉, 常温抗折试验仪, 高温抗折试验仪, 游标卡尺, 气孔率、体密测定仪等。

### 1.3 应用检测

根据试验检测的结果,选择综合性能好的配方进行实际应用测试。每次配料量在100 kg以上,采用JS-250强制搅拌机搅拌,浇筑成长方体结构的制品,在有空调的房间内养护,温度10-25 °C,湿度大于等于30wt.%。主要检测浇注料的实际施工性能,以及脱模后的形貌、烘干性能等。

应用试验中所用的设备有电子秤、JS-250强制搅拌机、大型振动台、自制模具、大型鼓风干燥箱等。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量的影响

根据表1中的配方进行制样并检测。结果显示,随着 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的增多,浇注料的用水量呈现递增性变化,如图1所示。

通过抗折强度测试,发现随着 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的增多,其常温抗折强度呈先增加后降低的趋势,但中温烧后强度整体呈上升趋势,如图2所示。

在 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量3wt.%-4wt.%时,常温抗折强

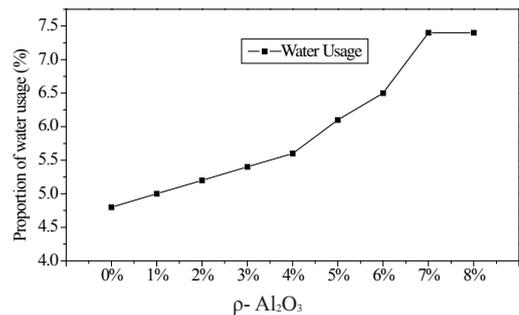


图1 用水量随 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的变化

Fig.1 Changes of water usage with different  $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  content

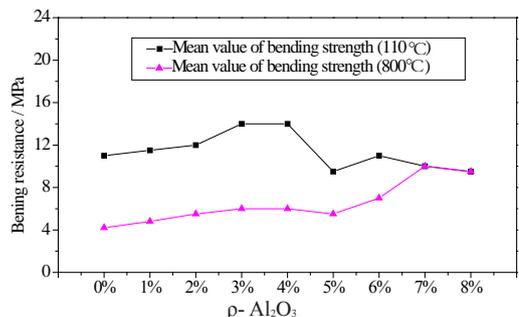


图2 常温及中温强度随 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的变化

Fig.2 Changes of normal temperature and mid temperature strength with  $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  content

度最高,而在 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量7wt.%时,中温烧后抗折强度最高,且等于常温抗折强度。没有添加 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的0#样中温烧后强度最低。

此外,在加水搅拌和制样的过程发现,当 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量超过4wt.%以后,浇注料粘度大幅增加,流动性有所降低,用水量也增加较多。当 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量达7wt.%至8wt.%时,试样在800 °C烧后,表面呈现细微裂纹,1400 °C烧后,表面有明显微裂纹。

2.2 铝酸钙水泥及超微粉的影响

固定 $\rho$ - $Al_2O_3$ 的含量,通过改变铝酸钙水泥以及超微粉氧化铝的比例,观察试样的性能变化。配方如表2所示。按照表2配方制样,其用水量变化不大。如图3所示。

在抗折试验前,对部分试样进行了中温(800℃)和高温(1400℃)烧后的永久线变化测量,其结果如图4所示。此外,试样在不同温度点处理后的冷态抗折强度如图5所示。

从测试结果来看:

(1)在固定 $\rho$ - $Al_2O_3$ 含量7wt.%时,铝酸钙水泥及 $\alpha$ -A超微粉的比例变化对用水量的影响不大,

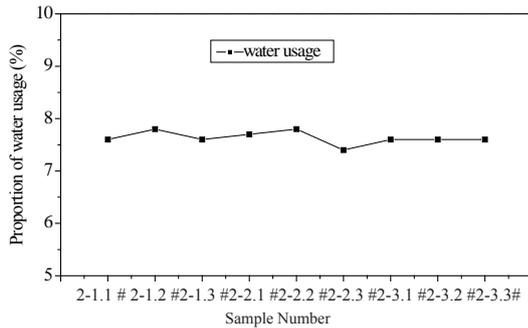


图3 各试样的用水量

Fig.3 Water usage for each sample

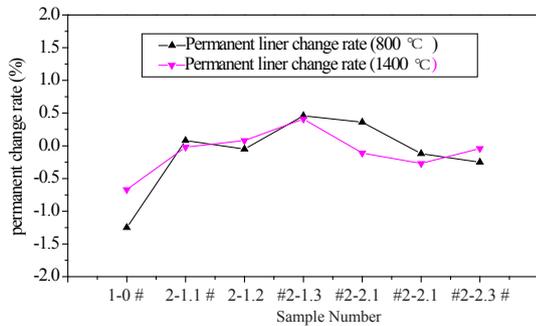


图4 中温及高温烧后的线变化率

Fig.4 Permanent change rate of mid temperature and high temperature sintering

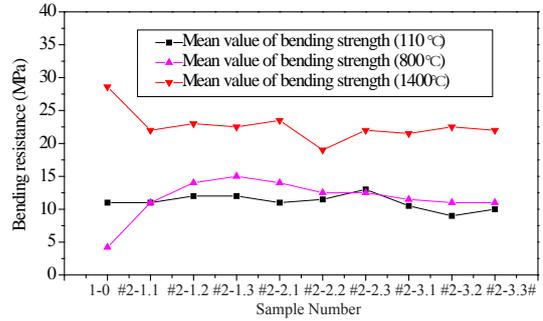


图5 不同温度处理后试样的冷态抗折强度

Fig.5 Cold bending strength of samples treated with different temperature

用水量基本稳定在7.6wt.%-7.8wt.%。

(2)含有 $\rho$ - $Al_2O_3$ 试样(A-F)的永久线变化率均比较小,相比之下没有添加 $\rho$ - $Al_2O_3$ 的1-0#样永久线变化率较大。

(3)在固定 $\rho$ - $Al_2O_3$ 含量7wt.%时,铝酸钙水泥含量由3wt.%增加到5wt.%,其110℃烘干强度、中温烧后强度、高温烧后强度的变化不大。

(4)在固定 $\rho$ - $Al_2O_3$ 含量7wt.%时, $\alpha$ -A超微粉含量由5wt.%增加到7wt.%,其110℃烘干强度、中温烧后强度、高温烧后强度的变化不大。

(5)在固定 $\rho$ - $Al_2O_3$ 含量7wt.%时,浇注料试样的中温烧后强度总是大于等于其110℃烘干强度。

选取实验后效果较好的2-1.3#试样,首先在不同温度下进行处理,然后在800℃下进行抗热震实验,5次后测量其抗折强度,结果如表4所示。数据显示,试样的热振稳定性较好,当经过中高温处理过的试验,其剩余强度的比例降低。

此外,在加水搅拌和制样的过程发现,所有试样粘度均较大,流动性略差。在800℃或1400℃烧后,其表面均有微裂纹出现。

2.3 仅 $\rho$ - $Al_2O_3$ 作为结合剂

固定 $\rho$ - $Al_2O_3$ 含量7wt.%时,去掉铝酸钙水泥,

表4 配方2-1.3#试样抗热震性能试验前后的强度

Tab.4 Strength of 2-1.3# sample before and after thermal shock resistance test

Sample Number	Pre or Post thermal shock	Bending resistance at room temperature(after drying at 110 °C), mean value(MPa)	Bending resistance at room temperature(after sintering at 800 °C), mean value(MPa)	Bending resistance at room temperature(after sintering at 1400 °C), mean value(MPa)
2-1.3#	Before thermal shock	12	15	23
	Thermal shock 5 times	11.5	10.5	19.5
		Residual strength ratio 95.8%	Residual strength ratio 70%	Residual strength ratio 84.8%

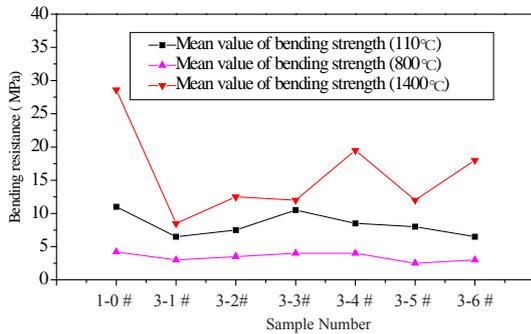


图6 不同温度处理后的冷态抗折强度

Fig.6 Cold bending strength of samples after treated with different temperature

调整 $\alpha$ -A超微粉氧化铝的比例, 观察试样的性能变化。

按照表3配方制样, 并对不同配方不同温度点试样做冷态抗折实验, 实验数据如图6所示。

从测试结果来看:

(1)固定 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为7wt.%, 无铝酸钙水泥的情况下,  $\alpha$ -A超微粉含量从8wt.%-3wt.%变化, 中温烧后抗折强度都维持在3MPa左右, 且变化不大。

(2)固定 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为7wt.%, 无铝酸钙水泥的情况下,  $\alpha$ -A超微粉含量从8wt.%-3wt.%变化, 1400℃烧后抗折强度不稳定, 波动较大。

(3)此外, 在加水搅拌和制样的过程, 所有试样粘度均较大, 流动性差, 脱模强度低。脱模后多数有局部掉块的现象出现, 个别试样甚至脱模时就断裂。

## 2.4 应用试验

根据前面的检测试验发现2-1.3#配方的中温强度最高, 于是按照此配方配制100 kg, 在JS-250搅拌机中搅拌, 加水量7.6wt.%, 准备浇筑呈1 m左右长的长方体结构制品。然而在搅拌过程中发现, 浇注料放热, 在没有搅拌均匀前就已经凝固。

降低浇注料中 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量, 并添加0.2wt.%的柠檬酸钠以延长其凝固时间。采用1-3#配方配制100kg料( $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为3wt.%), 在JS-250搅拌机中搅拌, 加水量7.6wt.%, 浇筑成1 m左右长的长方体结构制品。本次试验完成了浇筑, 浇注料的有效可施工时间约为26 min。自然养护2天后脱模, 并在鼓风机干燥箱中烘干, 目标温度300℃。然而当温度在250-300℃区间时, 却发生了爆裂。

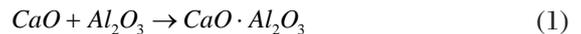
进一步降低 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量, 采用1-2#配方配制100kg料( $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为2wt.%), 按照相同的程序进行浇筑、烘干。浇注料的有效可施工时间约为32

min。烘干过程在250℃左右保温了一段时间, 再缓慢升高至300℃。烘后完好!

## 2.5 结果讨论

铝酸钙水泥结合的刚玉浇注料, 依靠其水化反应, 形成 $\text{CA} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{CA}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{C}_{12}\text{A}_7 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 等水化产物, 从而产生一定的强度。其试样在中温烧后(800℃)强度低, 是由于水化产物脱水反应, 造成体积收缩, 形成疏松状结构。当温度在900℃以上时, 结合水将完全脱除, 原有晶格破坏, 并开始出现新的矿相, 即二次 $\text{CA}$ 、 $\text{CA}_2$ 化(膨胀效应反应), 但并没有产生烧结。直到1200℃以上, 浇注料才会出现烧结, 即陶瓷化, 并且继续伴有新的矿物生成, 直至反应完毕<sup>[3]</sup>。所以浇注料试样在高温烧后(1400℃)强度较高。

铝酸钙水泥浇注料中的膨胀效应化学反应主要是 $\text{CA}$ 或 $\text{CA}_2$ 的二次生成。例如 $\text{CaO}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应生成 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (简称为 $\text{CA}$ )或 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (简称为 $\text{CA}_2$ )。其化学反应如下:



经过式(1)计算的体积膨胀为19.6wt.%, 而式(2)计算的体积膨胀为12.86wt.%. 所以无论是哪种反应, 均有体积膨胀的作用<sup>[3]</sup>。该膨胀反应正常情况下在900℃左右才开始发生, 且小于水化产物的脱水收缩, 所以浇注料试样整体表现为收缩。

测量1-0#试样不同温度点处理后的线变化率, 如图7所示, 可以看出: 800℃收缩率最大, 之后逐步减小, 至1300℃达最小, 然后又逐步升高。表明在800℃之后有体积膨胀反应, 逐步在抵消脱水反应的收缩, 所以收缩率才不断减小。在1300℃之后因为出现烧结, 收缩率又开始变大。

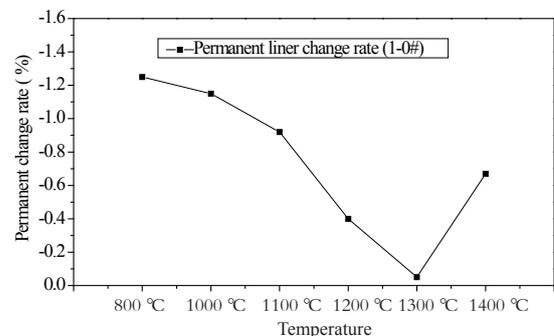


图7 1-0#试样在不同温度处理后永久线变化率

Fig.7 Permanent liner change rate of 1-0# sample after treated with different temperature

这个过程恰好说明了铝酸钙水泥结合浇注料中脱水收缩反应、膨胀反应、烧结收缩反应间的相互影响。

$\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 遇水后能发生水化反应并形成三羟铝石 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和勃姆石溶胶 $\text{AlOOH}$ ，具有胶结和硬化作用，凝结硬化机理是水化结合。其反应方程式为：



水化后的 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 高温下逐步脱水分解，并产生晶型转化<sup>[1]</sup>，最终生成 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 水化后再脱水体积是收缩的，但在从2.2节中的永久线变化率测试结果可以看出：800℃处理后，含有 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的试样(2-1.1#至2-2.3#)其线变化率非常小，并且有的并没有收缩。而不含 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的试样(1-0#)其线变化率较大，并且收缩较明显(-1.25wt.%)。

分析认为： $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 促进了铝酸钙水泥二次 $\text{CA}$ 、 $\text{CA}_2$ 化的膨胀效应反应，抵消了水化产物脱水造成的收缩，才使得含有 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的试样(2-1.1#至2-2.3#)永久线变化率非常小，并且也恰恰是这个原因， $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 添加后试样的中温烧后强度提高。

现行常用的 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 结合浇注料，通常需要 $\text{SiO}_2$ 超微粉作助结合剂。在1200℃左右， $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 就能够与 $\text{SiO}_2$ 超微粉反应，生成大量的针网状莫来石结构，所以强度很高<sup>[1,5]</sup>。然而在没有硅微粉的情况下， $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 结合的浇注料又很难烧结，烧结温度需达1600℃以上。所以在硅微粉，也没有和铝酸钙水泥添加的情况下，中温烧后(800℃)强度很低，高温烧后(1400℃)强度低且不稳定。

对于无硅或低硅含量的浇注料，或中温使用条件下要求尺寸变化小、强度高的浇注料，可采用 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与铝酸钙水泥复合的方式。

然而，从前面的应用试验中可以看到： $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 水化过程放热明显，高 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的浇注料在大批量使用过程中，由于产热而温度升高，加速浇注料的凝固，造成难以施工。此外，在300℃左右，水化产物(三羟铝石 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和勃姆石溶胶 $\text{AlOOH}$ )分解，易造成制品开裂或爆裂。

### 3 结论

(1) $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的添加能够增加铝酸钙结合浇注料试样的中温(800℃)烧后强度，并且当 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为7wt.%时，中温烧后强度 $\geq$ 110℃烘干强度。

(2)当固定 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为7wt.%，且无铝酸钙水泥和硅微粉添加时，浇注料的中温烧后强度较低，且高温烧后(1400℃)强度不稳定。

(3)当固定 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为7wt.%时，铝酸钙水泥达3wt.%， $\alpha$ -A超微粉达5wt.%既可以获得较好的中温、高温烧后强度，并且继续增加铝酸钙水泥或 $\alpha$ -A超微粉，对浇注料的强度和综合性能影响不大。

(4)中温条件下(800℃)，铝酸钙水泥水化物脱水反应的收缩，大于其二次 $\text{CA}$ 、 $\text{CA}_2$ 化反应的膨胀，表现出铝酸钙水泥结合的浇注料，在中温下有明显的收缩和较低的强度。

(5) $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 促进了铝酸钙膨胀效应反应的发生，抵消了水化产物脱水造成的收缩，使得含有 $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的铝酸钙结合浇注料试样，在中温下(800℃)具有小的永久线变化率和相对较高的强度。

(6) $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与铝酸钙水泥相结合，适用于无硅或低硅含量的浇注料，或中温尺寸变化较小、强度高的浇注料，但大量使用时， $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量不能太高，小于3wt.%为宜。

#### 参考文献：

- [1]徐平坤. 刚玉耐火材料[M]. 第二版, 北京: 冶金工业出版社, 2007: 246-285.
- [2]李红霞. 耐火材料手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 524-537.
- [3]韩行禄. 不定型耐火材料[M]. 第二版, 北京: 冶金工业出版社, 2008: 1-3, 85-86, 380-384.
- [4]李有奇, 李亚伟, 汪明亮, 等.  $\text{CaO}$ 含量对刚玉质浇注料性能与显微结构的影响[J]. 耐火材料, 2005, 39(4):270-273.  
Li Y J, Li Y W, Wang M L, et al. Journal of Refractories, 2005, 39(4): 270-273(in Chinese).
- [5]安迈铝业青岛有限公司网站. <http://www.almatis.cn>.
- [6]李洪波, 赵继增, 陈奇.  $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 加入量对莫来石-刚玉浇注料性能的影响[J]. 耐火材料, 2008, 42(1):40-43.  
Li H B, Zhao J Z, Chen Q. Journal of Refractories, 2008, 42(1): 40-43(in Chinese).