

# 微孔 CA<sub>6</sub>基隔热材料的长期高温稳定性

van Garsel, Doris; Buhr, Andreas, Dr.; Gnauck, Volker –  
Alcoa Industrial Chemicals Europe, Germany  
Routschka, Gerald – DIFK Deutsches Institut für Feuerfest und Keramik, Germany

## 摘要

SLA-92 是新开发的高纯、多孔的轻质隔热骨料(由六铝酸钙 CA<sub>6</sub>制成,其体积密度为 0.75 g/cm<sup>3</sup>)。基于 SLA-92 制备了高温隔热浇注料,使其在 1400 °C 和 1500 °C 下持续保温 2 周以测试其长期的高温稳定性,并介绍了被测试样的物理性能和热机械性能以及显微形貌。另外,还评价(研究)了磷酸盐结合的 SLA-92 基浇注料的稳定性,同时也研究了其与碱和铝硅质砖接触时的稳定性。

SLA-92 基隔热浇注料有水泥结合和磷酸盐结合,其烧后体积密度为 0.9~1 g/cm<sup>3</sup>,显气孔率为 65%~70%,在 1500 °C 保温 14 天后,磷酸盐结合浇注料呈现出较低的收缩率,仅有 0.3%,而水泥结合浇注料的收缩率却达到 1.9%。在 1500 °C 下保温 7~14 天的浇注料气孔尺寸保持不变,平均值为 1~3 μm,这种微气孔结构使得材料的热导率在较宽的温度范围内保持不变且较低,如 1400 °C 时低至 0.33 W/m·K。SEM 照片显示,在 SLA-92 材料的显微形貌中没有发现明显的变化。磷酸盐结合 SLA-92 中形成了高耐火相的 NC<sub>2</sub>P,而 NC<sub>2</sub>P 在超过 1500 °C 的高温下仍具有较高的性能。

与普通的高温隔热产品相比,SLA-92 基材料表现出了极好的长期稳定性,这归功于材料的高耐火度、高纯度和低热导率(是由微气孔结构导致的)。

## 1. 前言

在过去的几年里,轻质隔热耐火材料的用途已经急剧增加,这与节能措施的不断探索、生产周期更快、延长整体使用寿命紧密相联。用于 1350 °C 以上的隔热轻质材料是莫来石和莫来石基隔热砖、氧化铝空心球基隔热浇注料,或轻质粘土,或陶瓷纤维材料,他们是目前隔热效果最好的<sup>[1, 2]</sup>。

欧盟于 1997 年 10 月立法将陶瓷矿物纤维看作二类致癌物,此法规在 1998 年底被改成国家法律。除了有特殊需要的地方可适当采用纤维产品之外(使用时需制定严格的施工方案并提供保护措施),法律规定需选择安全的材料来代替纤维。

开发 SLA-92 的目的是用高耐火度的高纯微孔原料来生产在高温下(>1400 °C)热导率低的耐火材料。在先前发表的论文中已经粗略地讨论了此原料的性质及用其制备的浇注料和砖的优点。也已对 SLA-92 基耐火材料进行了许多使用试验,证实其具有良好的性能,如用于石化工厂、窑炉或钢铁工业的加热炉上。

本文着重研究了 SLA-92 基材料长期的高温稳定性,也研究了它与其他材料接触时发生的反应,同时还将实验结果与常规高温隔热材料进行了比较。

## 2. 试验

### 2.1 试验浇注料

除了在以前发表的论文中已经描述过的耐火材料配方以外,本研究又新增加了几个水泥结合和磷酸盐结合的高温隔热材料配方。试验用浇注料的配比示于表 1 中。在配方中使用了 Alcoa 的原料,期望能在其他方面起到特殊的作用。从表 2 中能看出试验用浇注料的化学分析。

表 1 试验浇注料的配比 %

浇注料	16 / 1	P9	P14
SLA-92 (通料, 0~1mm, 1~3mm, 3~6mm)	70	93	80
研磨后的氢氧化铝粉 (M20B)	—	—	5
水泥 (CA-25R)	30	5	10
磷酸钠 (Budite 8H) <sup>1)</sup>	—	2	5
添加剂	+1	+1	+0.5
0.5% 纤维素 <sup>2)</sup> (溶液)	+60±10	+60±10	+60±10

1) Budite 8H——Budenheim, 德国; 2) Blanosse 7M——Aqualon, 德国。

表 2 浇注料的化学分析

浇注料		16 / 1	P9	P14	P14
煅烧温度	°C	1500	1500	1500	1500
保温时间	h	5	5	5	336
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	88.4	88.7	86.2	86.7
CaO	%	10.4	8.1	8.3	8.20
Na <sub>2</sub> O	%	0.54	1.40	2.02	1.64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.01	1.26	2.77	2.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.05	0.04	0.04	0.05
SiO <sub>2</sub>	%	0.11	0.11	0.14	0.10
MgO	%	0.51	0.51	0.54	0.65

## 2. 2 制样和检测

依照欧洲标准 ENV 1402 “不定形耐火制品” 第 1 和第 6 部分的规定进行制样、样块处理和测试。

干物料先混合 1min 左右，加约 60% 的纤维素溶液（浓度 0.5%，Blanose 7M, Aqualon/Henkel）后再混 4 min。将浇注料振动浇注于模型中，根据试样尺寸以 0.2~0.5 mm 的振幅振动 30~60s。需要制备的试块如下：

——230mm×64mm×54mm 试块，用于检测常规性能（ENV 1402-6）；

——230mm×114mm×64mm 试块，用于检测热导率（热线法，ENV 995-15），并进行长达 14 天的长时间煅烧试验。

振动浇注后的试块在室温下带模养护 24h，脱模后于相对湿度≥90% 的空气中于常温下再养护 24h，在 110 °C 下烘干 24h，然后于 1500°C 煅烧 5h。为了进行长时间的热处理试验，试样再于 1400°C 或 1500°C 分别保温 24h、7 天和 14 天。

为了进行抗碱试验，制备了 80mm×80mm×65mm 的坩埚，内装 15 g 渣，盖上盖子后，在炉中于 1250°C 或 1350°C 下煅烧 5h。将冷却后的试样剖开观察其开裂情况，并用 XRD 分析物相变化。

## 2. 3 试验浇注料的常规性能

表 3 给出了浇注料的物理性能。SLA-92 的粒度分布，尤其是细粉部分的，有着很大的差异，这导致了混合加水量的不同而引起浇注料结合性的不同，从而也导致了浇注料体积密度和强度等性能的不同。

表 3 物理性能

		温度	16 / 1	P9	P14
体积密度	g/cm <sup>3</sup>	110°C	1.10	0.97	0.95
		250°C		0.97	1.07
		450°C		0.98	1.06
		1000°C	1.02	0.99	0.93
		1500°C	1.03	0.97	0.92
		1500°C/336h	1.15	1.00	1.02
常温抗折强度 (CMOR)	N/mm <sup>2</sup>	110°C	0.8	0.5	0.7
		250°C	1.5	0.4	0.6
		450°C	0.6	0.6	0.5
		1000°C	0.5	0.7	0.6
		1500°C	0.7/1.9	0.3/0.8	0.5/0.7
		1500°C/336h	1.00	0.3	0.7
常温耐压强度 (CCS)	N/mm <sup>2</sup>	110°C	5.0	1.1	6.7
		250°C	4.3	1.6	4.7
		450°C	4.7	1.9	4.3
		1000°C	4.1	1.9	1.0
		1500°C	7.6	3.4	1.9
		1500°C/336h	6.0	5.3	4.6
		110°C	0	0	0

线变化率	%	250℃	0	0	-0.09
		450℃	0	0	+0.04
		1000℃	0	0	0
		1400℃	-0.06	+0.27	+0.09
		1400℃/336 h	-0.21	+0.76	+0.16
		1500℃	-0.68	+0.26	+0.17
		1500℃/336h	-1.9	-0.27	-0.25

试验浇注料的总气孔率在 65%~70% 范围内，没有明显的闭口气孔。所有试样煅烧至 1400℃ 后，其体积均稳定；烧至 1500℃ 时，水泥结合浇注料 16 / 1 表现为收缩（约 0.7%），而磷酸盐结合浇注料 P9 和 P14 表现为微膨胀（约 0.2%）；烧至 1600℃ 时，所有浇注料试块已经弯曲，但收缩相对较小（1.5%~2.5%）；烧至 1700℃ 时，试样出现了意料中的较大收缩，达 10%，但没有出现试样软化或熔融的迹象。

## 2.4 热膨胀行为

不定形耐火材料的尺寸线变化，尤其是第一次煅热后的，与耐火衬体的收缩密切相关。从仅经过干燥的材料上切取 10mm×10mm×50mm 的小试块来检测热膨胀性。实验中一直加热到 1450℃，并在膨胀仪中冷却。试验结果见图 1。

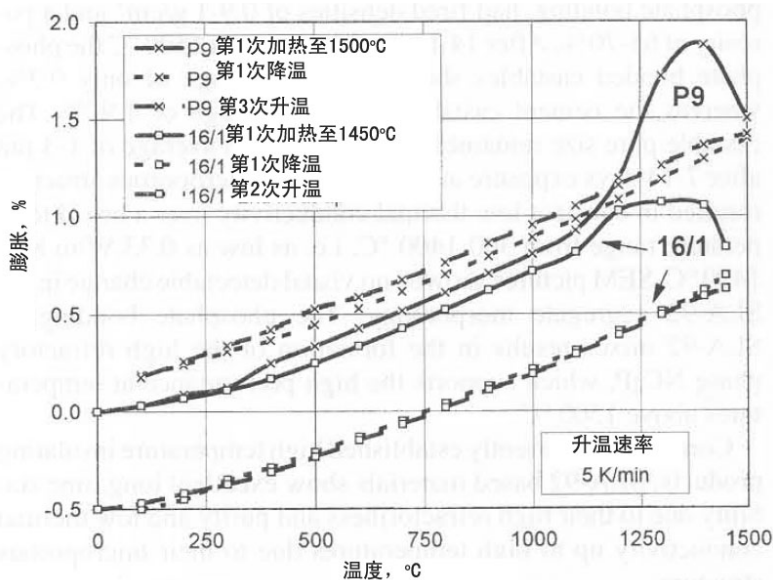


图 1 试样 16/1 和 P9 一直加热到 1500℃ 的热膨胀曲线

水泥和磷酸盐结合两种试验浇注料均在第一次加热至 1100~1350℃ 范围内呈现快速膨胀，然后收缩。磷酸盐结合 P9 材料的此效应更明显，第一次或第二次加热后，出现可逆的热膨胀，1000℃ 时大约达到 0.8%。

1200℃ 烧后水泥结合材料 16 / 1 的 XRD 分析显示材料中有添加的  $CA_6$  相和新生物相  $CA_2$  (与未烧的相比)。一直烧到 1450℃ 的磷酸盐结合材料中矿物组成没有变化，但没有发现磷酸盐相。生产快速膨胀的原因还没有完全搞清楚。

## 2.5 长期热处理

将标型砖试块 (240mm×114mm×64mm) 置于电炉中，煅烧至 1400℃ 和 1500℃ 时一直保温 14 天 (336h)，用来评价长时间高温使用对这种新材料性能的影响。

**试样的显微结构** 图 2 示了水泥结合试样 16/1 于 1500℃ 保温 168h (7 天) 后的 SEM 照片。试样的晶体结构与前期所研究的 SLA-92 原料<sup>[5]</sup> 的类似。

### 磷酸盐结合材料化学分析的变化

又对 1500℃ 保温 336h (14 天) 的 P14 材料进行了化学分析，与 1500℃ 保温 5h 的相比发现，仅有少量的  $Na_2O$

蒸发,  $P_2O_5$  含量实际上没有变化 (见表 2)。

### 尺寸永久线变化

**试验温度 1400 °C:** 水泥结合试样 16 / 1 在加热 14 天后仅收缩 0.2%，磷酸盐结合浇注料随加热时间的延长而呈现轻微的膨胀(P9 的 0.76%，P14 的 0.16%)。

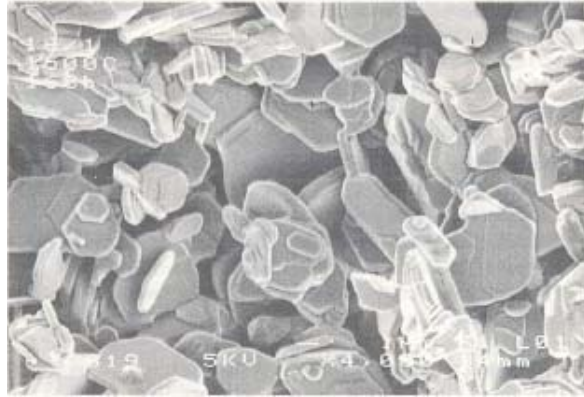


图 2 1500°C保温 168h (7 天) 的试样 16/1 的 SEM 照片 (断口)

**试验温度 1500 °C:** 试样 16 / 1 在开始保温的 29h 内迅速收缩, 大约保温 1 周后, 收缩趋势几乎停止并达到体积稳定。磷酸盐结合材料 P9 在开始保温的 5h 内表现为膨胀, 而 P14 为轻微的收缩。保温一周后, P9 和 P14 的尺寸均稳定, 此时的总收缩率约为 0.25%。

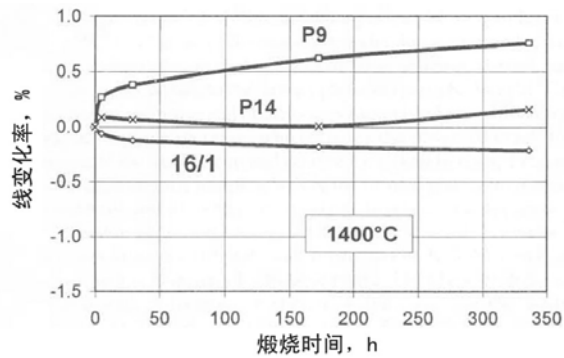


图 3a 试样的尺寸永久线变化 (1400°C)

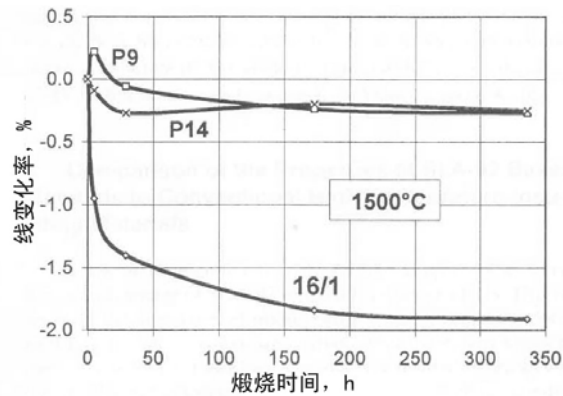


图 3b 试样的尺寸永久线变化 (1500°C)

### 微孔孔径分布 (图4)

本试验发现, 在 1500 °C 下长时间加热的条件下不会改变试样的孔径分布。一个有意义但还不能解释清楚的现象是, 磷酸盐结合浇注料中只有直径 <math>10\ \mu\text{m}</math> 的气孔, 而且所有气孔的尺寸都比 SLA-92 原料颗粒的气孔尺寸小。

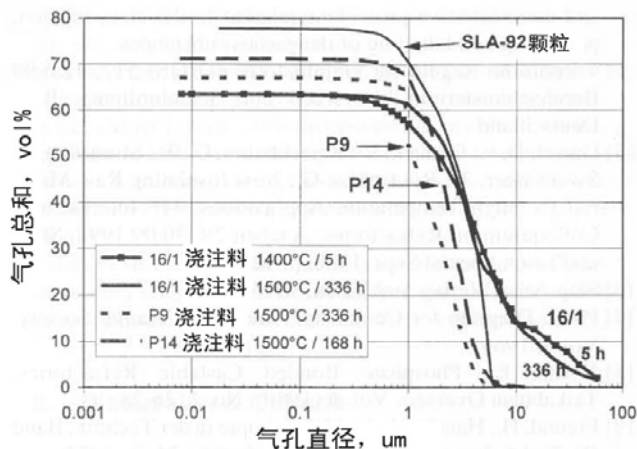


图 4 微孔尺寸分布 (压汞法)

### 强度

虽然也涉及到因细颗粒的差异而导致的混合加水量不同, 但比较煅烧 5 h 和 14 天后试块的常温耐压强度和抗折强度, 没有发现明显的差别。

### 热导率 (图5)

所有试样的热导率均随温度增加 (一直到 1400°C) 而缓慢降低 (见图 5)。与莫来石质高铝隔热砖 (73%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 和陶瓷纤维块 (80%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 相比, SLA-92 基浇注料在 >1200°C 时的热导率均较低, 其中磷酸盐结合浇注料 P14 的最低, 在 1200~1400°C 范围内的热导率为 0.33 W/m · K。

由于试样 16 / 1 在 1500 °C 收缩 1.9%, 保温 1 周后的热导率从 0.4 W/m · K (保温 5h 烧后) 增加到 0.5 W/m · K [5]。从图 3b 的收缩曲线可以看出, 保温时间进一步延长, 试样不会进一步收缩, 因而预计热导率不会在此水平上继续增加。

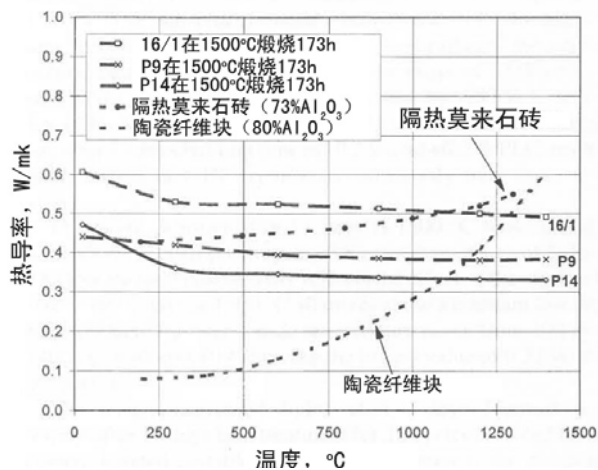


图 5 热导率

### 抗热震性

空气淬冷试验 (DIN ENV993-11) 通常用来评价一直循环 10 次的抗热震性。即使在 1500°C 下长时间加热, 水泥结合材料 16 / 1 甚至收缩达到 1.9%, 仍然没发现有裂纹。磷酸盐结合浇注料在热震 7~10 次后被损坏。肉眼观察发现, 此类材料中骨料颗粒较小, 在烘干和烧后试样中发现有层裂现象, 这是制备试样时出现的。因此,

需要进一步改进配方以预防这种缺陷。可以预计，无层裂的磷酸盐结合试样将会达到与水泥结合材料相同的热震次数。

### 荷重软化温度

图 6 举例说明了磷酸盐结合浇注料 P9 与水泥结合浇注料 16 / 1 有同样好的荷重软化温度。在 1500℃ 下长时间煅烧时，材料的显微结构稳定，因而延迟了其软化开始点。试样 P14 和 16 / 1 的  $T_{0.5}$  为 1500℃，试验是在 0.05 N/m<sup>2</sup> 的荷重下做的。

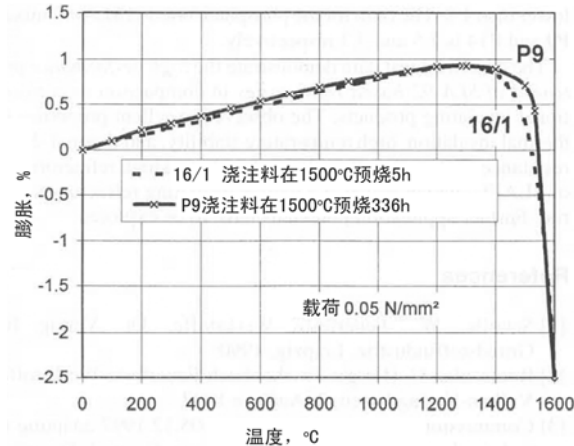


图 6 荷重软化温度(0.05 N/m<sup>2</sup>)

必须提到的是，不含玻璃相的 SLA-92 不像铝硅质（纤维）材料那样出现软化。材料塌陷是因为这类高气孔率材料的收缩。

## 3 根据相图评价并验证 SLA-92 基材料的稳定性

### 3.1 对磷酸盐结合 SLA-92 基材料的耐火度评价

已经利用三元相图 C-A-P [1]、N-C-P、N-C-A[6,7]评价了磷酸盐结合剂（磷酸钠）对 SLA-92 基材料高温行为的影响，三元相图 N-A-P 和四元相图 N-C-A-P 是不适用的。

C-A-P 系统显示没有三元相，A-P 二元相图显示结合相 AP 的熔点为 1450℃，二元相磷酸钙的熔点随磷酸盐含量的增加而降低，从 C<sub>4</sub>P 和 C<sub>3</sub>P 的 >1700℃ 降至 C<sub>2</sub>P 的 1350℃ 和 CP、C<sub>2</sub>P<sub>3</sub>、CP<sub>2</sub> 的 <1000℃。在含有几个三元相的 C-A-P 体系中也与此类似的现象，相成分的熔点由 >1500℃ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 <50%) 急剧降至 <1000℃ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 >50%)。

前面提到的 SLA-92 基材料 P9 和 P14，其组成比例 N: C: P 落在开始熔融温度为 1630℃ 的 C-NC<sub>2</sub>P-N<sub>3</sub>CP 相三角形中，这就解释了磷酸盐结合 SLA-92 基材料高温稳定的原因。考虑到试样 P9 中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量为 89%，P14 中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量为 86%，用 CA<sub>6</sub> 取代 CaO。电镜分析证实，有 NC<sub>2</sub>P（含 C<sub>3</sub>P 的固溶体）和 CA<sub>6</sub> 共存。NC<sub>2</sub>P 的熔点高达 1830℃，根据 Yorita [8] 的报道，它是磷酸盐结合碱性浇注料的结合相。

1400℃ 烧后的 P9 和 P14 复合材料的 XRD 分析显示有 CA<sub>6</sub>、α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 β-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Na<sub>2</sub>O · 11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 相，NC<sub>2</sub>P 和 AP 因其衍射峰重叠而不能被分辨开。N-C-A 相图 [6] 显示，CA<sub>6</sub> 和 β-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之间有条虚线，表明这两相之间有可相容性。然而，这部分系统中固溶体的形成和相稳定性还需要进一步的详细研究。

### 3.2 与铝硅系隔热砖反应的评价

已经利用 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 三元相图 [6] 从理论上评价了 SLA-92 基材料与铝硅系隔热砖的反应，也将 SLA-92 基材料 16 / 1 与隔热砖按 1: 1 比例的组成点画进相图中相应的分三角形里，并计算了熔融开始温度。

对于 ASTM 的 26、28 和 30 级隔热砖（40%、60%、73% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）与 16 / 1 材料（89% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，21% CaO）的混合物，稳定相是刚玉—钙长石—莫来石，熔融开始温度是 1512℃。在与这种隔热砖反应期间，试样 16 / 1 的主晶相 CA<sub>6</sub> 将转化成钙长石和莫来石，而不会形成熔点低于 1512℃ 的物相。16 / 1 浇注料与 ASTM 30 级 (JM30) 砖接触处试样的 1400℃ 蠕变试验研究证实了相图的结论，表明在不同的隔热材料之间仅有 0.5~1 mm 的反应薄层。

另一方面，根据相图，材料 16 / 1 与低等级隔热砖 ASTM 23（35% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）的混合物有一稳定相成分莫来石

—钙长石—方石英，其熔化开始温度为 1345 °C。考虑到此类隔热材料中含有大量的杂质（如碱，）可以预见，在高于 1300 °C 接触时的反应危害性更大，但这已超出了 23 级砖的 1260 °C 的分类温度。

### 3. 3 与碱反应的评价

将莫来石隔热砖 JM30 与  $K_2CO_3$  在 1250°C 时反应。根据 K—A—S 相图，莫来石分解，有白榴石（ $KAS_4$ ，熔点 1680°C）和钾霞石（ $KAS_2$ ，熔点 >1750°C）生成<sup>[6]</sup>，这种矿物组成的变化引起比体积的大量增加，从而能导致坍塌试样开裂，这种现象称为碱爆裂<sup>[9]</sup>。由于有高温点相生成，没有发现熔融现象，但反应层有明显的粉化现象。

SLA-92 基材料与  $K_2CO_3$  在 1350°C 时反应，导致  $CA_6$  分解并形成 K- $\beta$ - $Al_2O_3$  ( $KA_{11}$ ) 和 KA（是一种极易水化的物相），这种物相变化导致坍塌试样的比体积明显增加而开裂。用 1: 1 的  $NaCl+K_2SO_4$  混合粉在 1250°C 和 1350°C 反应时，碱的破坏程度要小些，1250°C 时有  $\beta$ - $Al_2O_3$  生成，1350°C 时  $CA_6$  分解，并且有  $\beta$ - $Al_2O_3$  和  $CA_2$  形成，但坍塌试样中仅形成了较小的裂纹。由于缺少相图，不可能对反应和相转化进行更详细的论述。研究证明，对于 N—A—S 系统和 K—A—S 系统， $CA_6$  和  $KA_{11}$  之间的平衡温度(conode)在 1100°C，但  $KA_{11}$  和  $CA_2$  之间没有平衡温度(conode)<sup>[6]</sup>。

## 4. SLA-92 基材料与传统高温隔热材料的性能比较

从 300°C 一直到 1400°C 的热导率低是 SLA-92 基耐火材料产品的独特优势，这是因为材料中的微气孔较多，使在升温时导热机制（辐射）占主导地位，其热导率很低。而与其耐火度相当的纤维制品或隔热砖的热导率随温度升高而提高<sup>[1, 2, 10]</sup>。

所研究的 SLA-92 基材料表现出较高的体积稳定性，在 1400°C 或 1500°C 保温 14 天后的收缩率低于 2%，且保温 14 天后所有试样的尺寸均稳定。与之相比的铝硅质隔热砖、ASTM 的 28~30 级或 EN 1094 的 150—160 级浇注料或捣打料，由于有莫来石生成而表现出持续的膨胀<sup>[11]</sup>；而低等级的材料（ASTM 26）由于生成了低熔相，在 1400°C 下的超长保温时间内（200h）均趋于收缩<sup>[10]</sup>。铝硅质隔热陶瓷纤维毯或组块用在这些温度下，使用期间的结构有明显变化。

铝硅质纤维（ $Al_2O_3$  含量在 40%~60%）是非晶态（玻璃质）产品，在高温下长期使用后将逐渐变成晶态，形成莫来石晶相（900°C 时）二氧化硅晶体（1200°C 时），随后就变成了有害的材料，因为再结晶使材料的体积收缩，密度增大，纤维烧结，晶体继续长大，质脆，结构被破坏，因而失去了纤维材料所固有的隔热特性<sup>[12-14]</sup>。

纤维是个在升温过程中导热性提高的典型例子，因为玻璃具有辐射透过性（在非晶态纤维情况下）和非常高的气孔率。

## 5. 总结与展望

对 SLA-92 基浇注料的评价表明，在 1400°C 和 1500°C 的试验温度下保温 14 天后仍具有较高的热稳定性：所有试样均达到了在 1500°C 保温 7 天后的线变化率（PLC）低于 2% 的稳定标准。在 1500°C 下保温 7 天后，磷酸盐结合的 P9 和 P14 呈现出较高的体积稳定性，仅收缩 0.25%；水泥结合浇注料 16/1 较稳定，收缩率为 1.8%，这个值仍然低于 ASTM C 155 或 EN 1094 所要求的 2% 的极限。在 1400°C 下保温 14 天后，浇注料 16/1 和 P14 表现出很低的收缩，其 PLC 分别为 -0.2% 和 +0.2%，而浇注料 P9 持续膨胀至 +0.8%。

1500°C 保温 14 天后的微气孔保持稳定，显气孔率为 65%~70%，气孔平均尺寸在 1~3  $\mu m$ 。低热导率体现了微气孔的作用：1500°C 保温 7 天后，所有试样的热导率在 300~1400°C 的宽温度范围内均保持不变且较低，其中 P14 的最低，1400°C 时其值为 0.33 W/m·K。

保温 14 天后的强度稍有下降。对保温 14 天后的试样进行抗热震试验，10 次循环后水泥结合浇注料 16/1 没有裂纹出现，而磷酸盐结合浇注料 P9 和 P14 出现裂纹甚至断裂，这可能归因于基质结合相的强度较低。

根据热化学相平衡推断，SLA-92 材料与  $Al_2O_3$  含量 >40% 的铝硅系隔热砖在 1400°C 以下发生反应，与  $Al_2O_3$  含量 <45% 的砖在 1250°C 以下发生反应。SLA-92 材料中添加的磷酸盐结合剂在 (N+C): P 比不低于 1.2 的条件下将形成高温点的结合相 ( $NC_2P-C_3P$  固溶体)，而磷酸盐结合 SLA-92 材料 P9 和 P14 的 (N+C): P 比分别为 7.5 和 3.7。

已给出的试验数据证明，与传统的隔热产品相比，SLA-92 基浇注料具有较大的性能优势。研究发现，其隔热、高温稳定和抗热震等良好性能归因于 SLA-92（由一种独特的耐火原料制成）的高耐火度和微气孔。以后一定能探究到它未来的应用潜力。

- [1] Schulle, W.: Feuerfeste Werkstoffe. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1990
- [2] Routschka, G. (Hrsg): Taschenbuch Feuerfeste Werkstoffe. Vulkan-Verlag Essen, 2. Auflage 1997
- [3] Commission Directive 97/69/EC of 05.12.1997 adapting to technical progress for the 23rd time Council Directive 67/548/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances.
- [4] Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 512, 12.6.98 Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung, B R Deutschland
- [5] Garsel, D. v.; Gnauck, V.; Kriechbaum, G. W.; Stinneßen, I.; Swansinger, T.; Routschka, G.: New Insulating Raw Material for High Temperature Applications, 41<sup>st</sup> International Colloquium on Refractories, Aachen 29.-30.09.1998, Stahl und Eisen Special Sept. 1998, p. 122-128.
- [6] Slag Atlas, Verlag Stahleisen, 1995
- [7] Phase Diagram for Ceramists, American Ceramic Society, Vol. I, 1964
- [8] Yorita, E.: Phosphate Bonded Castable Refractories, Taikabutsu Overseas Vol. 9 (1989), No. 1, 26-28
- [9] Freund, H.: Handbuch der Mikroskopie in der Technik, Band IV, Teil 5, Umschau Verlag, Frankfurt am Main, 1974
- [10] Refractory Engineering. Materials - Design - Construction. Vulkan-Verlag Essen, 1996
- [11] Schulte, M; Klima, R.; Sucker, D.: Entwicklung und Erprobung von Anforderungskriterien an leichte Zustellungen aus Feuerleichtsteinen und keramischen Faserdämmstoffen. Betriebsforschungsinstitut BFI, Verein deutscher Eisenhüttenleute VDEh, Schlußbericht, Förderkennzeichen 7902, Düsseldorf, 3/1993
- [12] Horie, E.: Ceramic fibre insulation theory and practice. The Energy Conservation centre, Tokyo, Japan. Translated and printed by The Eibun Press Ltd., Osaka, Japan, 1986
- [13] Elstner, I: Faserwerkstoffe. VDEh-seminar "Refractory technology on steel ladles", 1-3.06.1997, Ahrweiler, Germany
- [14] Thorpe, S.: Dealing with the reclassification of refractory ceramic fibres. WCR January/February 1999, p. 15-18.