

磷酸盐结合法低温制备碳化硅泡沫陶瓷及其高温性能

孙文飞^{1,2,3}, 刘卫^{1,2,3}, 黎阳^{2,3}

(1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550025; 2. 贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵阳 550025;
3. 贵州省无机非金属材料重点实验室, 贵阳 550025)

摘要:以聚氨酯海绵为模板、磷酸二氢铝为黏结剂、碳化硅微粉为骨料,在800℃低温下制备出碳化硅泡沫陶瓷。研究了浆料中磷酸二氢铝含量、固相含量和高温处理对碳化硅泡沫陶瓷的线收缩率、体积密度、抗折强度、气孔率及微观形貌的影响,揭示了泡沫陶瓷在高温下结构及性能演变机理。结果表明:低温制备的碳化硅泡沫陶瓷线收缩率小于1%,线收缩率随固相含量的增加而减小,体积密度和抗折强度均随磷酸二氢铝和固相含量的增加而增加。低温制备的碳化硅泡沫陶瓷经高温处理后,其线收缩率、体积密度和抗折强度均随温度的升高先减小后增加,而气孔率则随温度的升高先增加后减小,处理温度为1000℃时,碳化硅泡沫陶瓷抗折强度可达(2.06±0.1)MPa。碳化硅泡沫陶瓷低温下由A型和B型的Al(PO₃)₃将碳化硅微粉粘结起来,随着处理温度的升高,B型的Al(PO₃)₃逐渐向A型转化,随着温度的进一步升高,A型Al(PO₃)₃逐渐分解成AlPO₄相,将碳化硅微粉包裹、粘结起来。

关键词:磷酸二氢铝;碳化硅泡沫陶瓷;聚氨酯海绵;高温性能

中图分类号:TQ174.1+2 文献标志码:A 文章编号:0454-5648(2016)09-0000-07

网络出版时间: 网络出版地址:

Preparation and High-temperature Properties of Silicon Carbide Foam Ceramics by Phosphate Bind Method at low Temperature

SUN Wenfei^{1,2,3}, LIU Wei^{1,2,3}, LI Yang^{2,3}

(1. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Materials and Architecture Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550014, China; 3. The Key Laboratory of Guizhou Inorganic Nonmetal Functional Materials, Guiyang 550014, China)

Abstract: Silicon carbide foam ceramics were prepared at 800 °C with polyurethane sponge as a template, aluminum dihydrogen phosphate as a binder, silicon carbide powder as an aggregate. The effects of aluminum dihydrogen phosphate content, solid content and high-temperature treatment on the linear shrinkage, volume density, flexural strength, porosity and microstructure of the silicon carbide foam ceramics were investigated. The properties and structure evolution of the SiC foam ceramics treated at a high temperature were revealed. The results show that the linear shrinkage of the SiC foam ceramics is less than 1%, which gradually decreases with increasing the solid content. The volume density and flexural strength of the SiC foam ceramics increase with the increase of the aluminum dihydrogen phosphate and solid content. After the high-temperature treatment, the linear shrinkage, volume density and flexural strength of the SiC foam ceramics firstly decrease and then increase with increasing the temperature, and the open porosity firstly increases and then decreases. At the treatment temperature of 1000 °C, the flexural strength is (2.06±0.1) MPa. The SiC foam ceramics are binded by A-Al(PO₃)₃ and B-Al(PO₃)₃ at a low temperature. B-Al(PO₃)₃ gradually transforms to A-Al(PO₃)₃ when the treatment temperature increases, and A-Al(PO₃)₃ gradually breaks down into AlPO₄ when the temperature further increases, resulting in the silicon carbide particles to be coated and bonded together.

Keywords: aluminum dihydrogen phosphate; silicon; carbide foam ceramics; polyurethane sponge; high temperature properties

收稿日期: 2016-04-07。 修订日期: 2016-04-28。

基金项目: 国家自然科学基金(51462004); 贵州省教育厅自然科学研究项目黔教合KY字[2015](363)号资助。

第一作者: 孙文飞(1991—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 刘卫(1966—), 女, 硕士, 教授。

Received date: 2016-04-07. Revised date: 2016-04-28.

First author: SUN Wenfei(1991—), male, Master candidate.

E-mail: 534351013@qq.com

Correspondent author: LIU Wei(1966—), female, Master, Professor.

E-mail: cjlw@gznu.edu.cn

碳化硅(Silicon carbide, SiC)泡沫陶瓷具有密度低、强度高、孔隙率高、渗透性高、比面积大、抗腐蚀、抗氧化、隔热性良好、抗热震次数和耐高温性优异等特点^[1], 已广泛应用于过滤、吸音、化工填料、生物陶瓷和催化剂载体等领域^[2]。SiC 是一种具有强共价键的无机非金属材料, 在低温下很难烧结, 即便添加烧结助剂, 烧结温度均在 1 400 °C 以上^[3-5]。聚碳硅烷黏结法虽能在低温下制备出 SiC 泡沫陶瓷, 但其制品线收缩率大、成本极高^[6-8], 限制了其规模化应用。

磷酸二氢铝具有耐水性好、固化收缩率小、高温强度大、可在较低温度下实现高强度粘结等优点, 已广泛应用于陶瓷纤维复合材料、耐火材料和无机涂料领域^[9-11], 将其用于制备 SiC 泡沫陶瓷, 可望实现泡沫陶瓷的低温、低成本制备。目前, 国内外鲜见采用磷酸二氢铝黏结法低温制备 SiC 泡沫陶瓷的报道。

利用磷酸二氢铝为粘结剂低温制备 SiC 泡沫陶瓷, 考察了磷酸二氢铝含量、固相含量和高温处理对 SiC 泡沫陶瓷的线收缩率、体积密度、抗折强度、开气孔率及微观形貌的影响, 并探讨了泡沫陶瓷在高温下结构及性能演变机理。

1 实验

1.1 原料

聚氨酯海绵开气孔率>99%, 孔径在 0.2~0.8 mm 之间, 海绵大小为 50 mm×15 mm×15 mm; α -SiC 微粉的平均粒度 $D_{50}=5\ \mu\text{m}$, 纯度为 98.2%(质量分数), 磷酸二氢铝溶液(有效含量为 80%, 质量分数)。

1.2 样品制备

将 SiC 微粉、磷酸二氢铝和水按一定比例混合制成浆料, 并充分搅拌后固料 24 h, 浆料中磷酸二氢铝含量(质量分数)在 25%~40%之间, 固相含量(质量分数)在 45%~60%之间。

将用蒸馏水洗净晾干后的聚氨酯海绵挤压排除空气后置于浆料中, 使其自由伸展并不断搅拌挤压揉搓, 以使浆料均匀涂挂在聚氨酯海绵上, 用自制辊压机去除多余的浆料, 制成泡沫预制体, 在 50 °C 恒温烘箱中干燥 48 h, 使其水份缓慢蒸发, 防止泡沫预制体变形。将泡沫预制体置于箱式炉内, 在空气气氛中, 以 100 °C/h 升温速率升温至 800 °C, 保温 2 h, 随炉自然冷却至室温, 得到 SiC 泡沫陶瓷。

1.3 样品表征

用 STA-449F3 型综合热分析仪测定聚氨酯海绵与磷酸二氢铝的热分解特性, 升温速率为 10

°C/min, 空气气氛, 空气流速为 50 mL/min, 最终温度分别为 1 000 和 1 500 °C。用 EVO18 型扫描电子显微镜分析烧成产物表面的微观形貌, 样品表面喷金处理。根据线收缩率和体积密度公式, 计算烧成泡沫陶瓷的线收缩率和体积密度。根据多孔陶瓷显气孔率试验方法(GB/T1966—1996)测定泡沫陶瓷开气孔率。用 CMT4204 型万能材料试验机测定泡沫陶瓷的三点抗折强度, 测试 5 个样品, 取平均值。用 PANalytical X'pert 型 X 射线衍射仪测试物相组成, 2θ 角 10°~80°, Cu 靶。在 GWL-1600ZKLB 型真空箱式炉中, 以 300 °C/h 的升温速率升温至目标温度(真空度为 0.06 MPa, 温度为 1 000、1 200、1 400 和 1 550 °C)并保温 2 h, 研究泡沫陶瓷的高温性能。

2 结果与讨论

2.1 聚氨酯海绵的热分解特性

图 1 为聚氨酯海绵热重(thermogravimetric, TG)曲线。由图 1 可知, 聚氨酯海绵在 180 °C 开始出现质量损失, 210~400 °C 质量损失达 78%, 可归因于聚氨酯海绵的剧烈分解。400~750 °C 质量损失达 13.5%, 750 °C 后 TG 曲线基本不发生变化, 最终残留率为 6.5%左右。由于在 210~400 °C 之间, 聚氨酯海绵剧烈分解, 产生大量气体, 为防止析出的气体造成泡沫, 陶瓷坯体开裂甚至塌陷^[12], 升温速率应适当降低。为此, 选定 100 °C/h 的升温速率升温至 800 °C 为工艺条件, 制备 SiC 泡沫陶瓷。

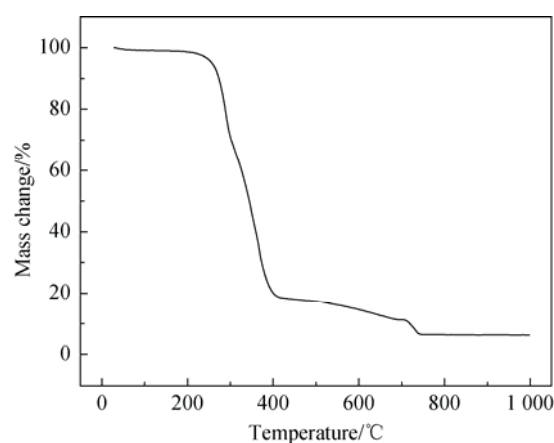


图 1 聚氨酯海绵 TG 曲线

Fig. 1 Thermogravimetry (TG) curves of polyurethane sponges

2.2 低温烧成 SiC 泡沫陶瓷的显微组织与性能

2.2.1 晶型结构分析 图 2 为低温烧成 SiC 泡沫陶瓷的 X 射线衍射(XRD)谱。从图 2 可知, α -SiC 粉经 800 °C 烧成后仍为 α -SiC 粉, 晶型结构未发生任何变化。固相含量为 60%的浆料制备的泡沫预制

体经 800 °C 烧成后, 其物相结构主要由 α -SiC、*A* 型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 和 *B* 型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 构成。随着磷酸二氢铝含量增加, *A* 型和 *B* 型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 的衍射峰均增强。结合聚氨酯 TG 曲线可知, 聚氨酯海绵被烧掉, 磷酸二氢铝分解成 *A* 型和 *B* 型的 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 。

2.2.2 显微组织观察 图 3 为不同固相含量的泡沫预制体经 800 °C 烧成后所得 SiC 泡沫陶瓷的通孔结构扫描电子显微镜(SEM)照片。由图 3 可以看出, SiC 泡沫陶瓷复制了聚氨酯海绵模板, 得到了具有类似海绵的结构, 在骨架交汇处, 有聚氨酯海绵分解留下的三角形微孔, 泡沫陶瓷的通孔孔径介于 0.3~0.8 mm 之间, 说明利用磷酸二氢铝为黏结剂、SiC 微粉为原料低温制备 SiC 泡沫陶瓷具有可行性。从图 3 还可以看出, 随固相含量的增加, SiC 泡沫陶瓷的孔筋骨架变得粗壮致密, 通孔孔径变小。孔筋上 SiC 颗粒边界趋于清晰、无液相产生, 且随固相含量增

加, SiC 颗粒间堆积得越紧密, 颗粒边界逐渐模糊, 说明磷酸二氢铝热解产物将 SiC 颗粒黏结在一起。

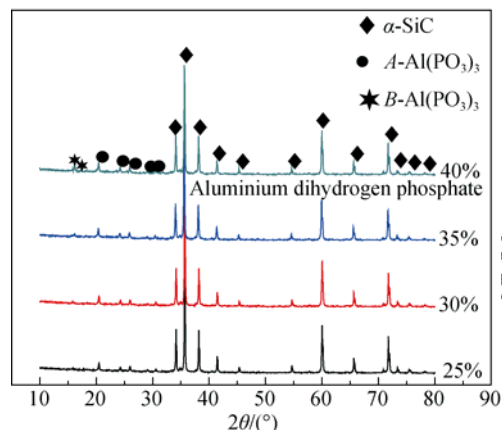


图 2 不同磷酸二氢铝含量低温烧成 SiC 泡沫陶瓷的 XRD 谱
Fig. 2 XRD patterns of low-temperature sintering SiC foam ceramics in different aluminum dihydrogen phosphate content

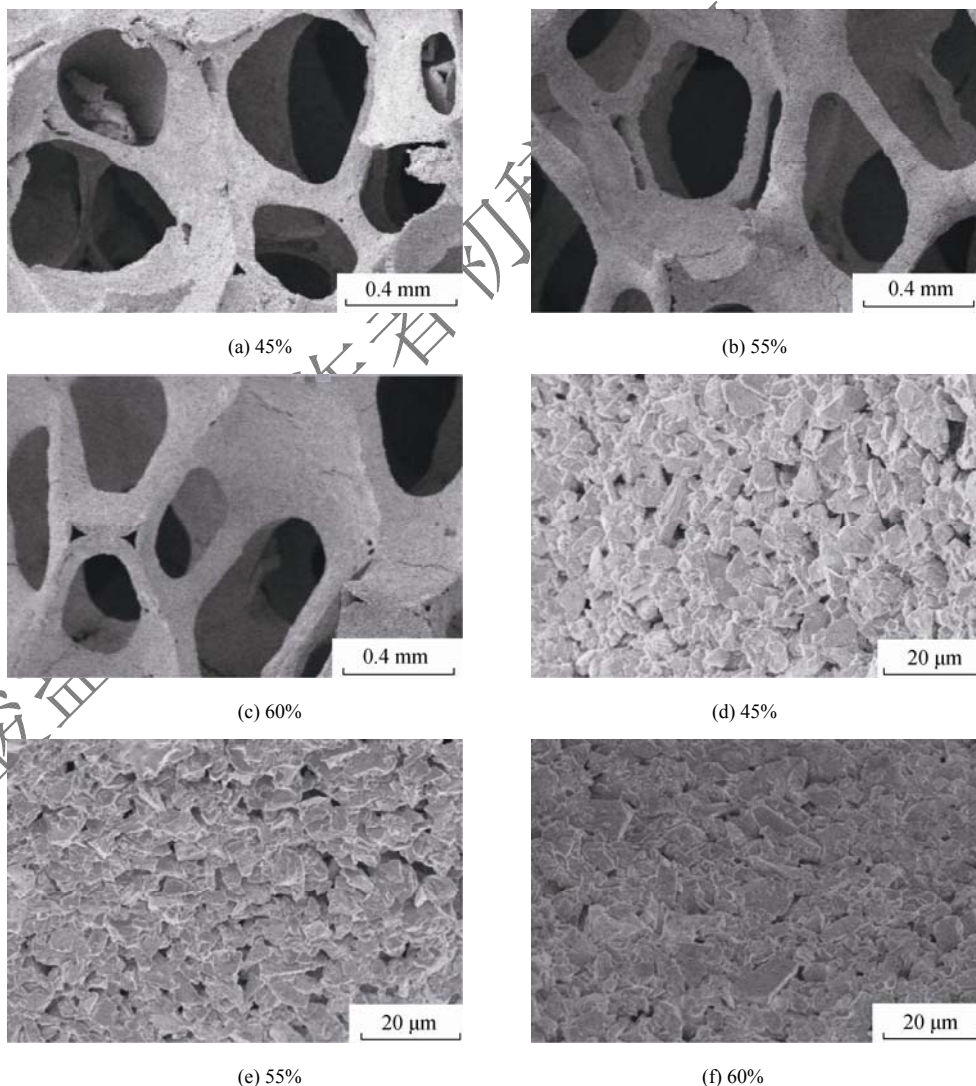


图 3 固相含量对 SiC 泡沫陶瓷通孔结构和微观形貌的影响

Fig. 3 Effect of solid content on pore structures and microstructure of SiC foam ceramics

2.2.3 线收缩率与体积密度分析 图4为SiC泡沫陶瓷的线收缩率与浆料固相含量关系曲线。由图4可见,泡沫陶瓷的线收缩率均小于1%,线收缩率随固相含量增加而减小,在固相含量为55%和60%或磷酸二氢铝含量为35%和40%时,线收缩率较小,均小于0.5%,结合图2和图3可知,随固相含量增加,颗粒之间堆积得越紧密,低温下主要是水分的析出,使得泡沫陶瓷的线收缩率较小。

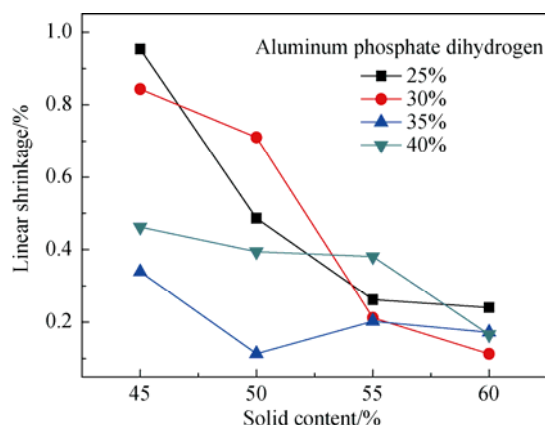


图4 线收缩率与浆料固相含量关系曲线

Fig. 4 Relationship between linear shrinkage and solid content

图5为不同磷酸二氢铝含量下SiC泡沫陶瓷体积密度与固相含量关系曲线。由图5可见,不同固相含量浆料制备的SiC泡沫陶瓷体积密度均低于0.5 g/cm³,相同磷酸二氢铝含量条件下,体积密度随固相含量的增加而增加;相同固相含量的浆料烧成的SiC泡沫陶瓷,体积密度随磷酸二氢铝含量增加而增加。

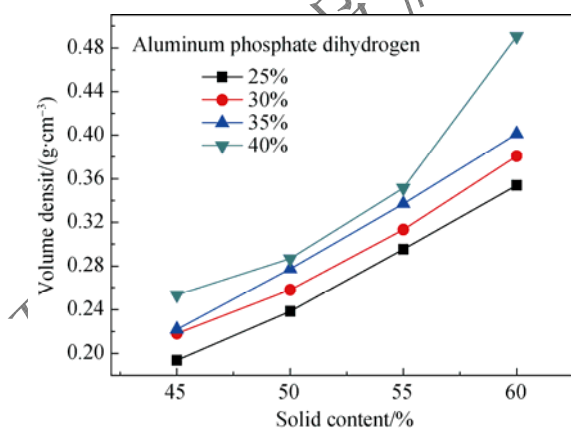


图5 体积密度与浆料固相含量的关系曲线

Fig. 5 Relationship between volume density and solid content

2.2.4 力学性能分析 图6为不同磷酸二氢铝含量下SiC泡沫陶瓷的力学性能与固相含量关系曲线。由图6可见,泡沫陶瓷的抗折强度随固相含量

的增加而增加,固相含量为45%的浆料制备的SiC泡沫陶瓷力学性能较差,抗折强度均低于0.4 MPa;固相含量为60%的浆料制备的SiC泡沫陶瓷抗折强度均在0.7 MPa以上,其中,磷酸二氢铝含量为40%的浆料制备的SiC泡沫陶瓷抗折强度达(1.24±0.01) MPa。从图6还可以看出,采用相同的固相含量,SiC泡沫陶瓷的抗折强度随磷酸二氢铝含量的增加而增加。

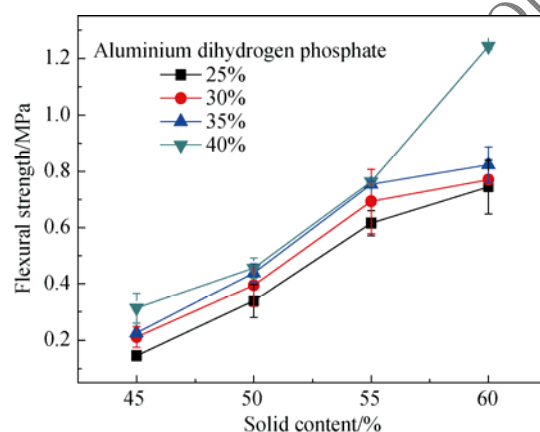


图6 抗折强度与浆料固相含量关系曲线

Fig. 6 Relationship between flexural strength and solid content

综合以上分析可知,利用聚氨酯作为模板、磷酸二氢铝为黏结剂、SiC微粉为骨料,可低温制备出力学性能较好的SiC泡沫陶瓷。其低温制备机理是磷酸二氢铝分解成A型Al(PO₃)₃和B型Al(PO₃)₃将SiC粉末黏结起来。

为进一步研究低温制备SiC泡沫陶瓷的高温性能,选用磷酸二氢铝含量为45%、固相含量为55%的浆料低温制备SiC泡沫陶瓷,对其高温性能进行研究。

2.3 高温处理后SiC泡沫陶瓷的显微组织与性能分析

2.3.1 热处理后产物的显微组织 图7为不同温度处理后SiC泡沫陶瓷的通孔结构。由图7可以看出,1400℃之前,泡沫陶瓷无明显缺陷,孔筋致密,随着处理温度的增加(图7c),孔筋上出现了大量细小气孔,孔筋骨架变得疏松,且通孔孔径变小。

不同温度处理后,SiC泡沫陶瓷微观形貌如图7d~图7f所示。处理温度在1000℃时(图7d),有液相产生,孔筋致密,SiC颗粒被完全被包裹起来,未见明显的颗粒边界;随着处理温度的升高(图7e和图7f),SiC颗粒边界又逐渐变得清晰且仍相互黏结在一起,但有大量的微气孔产生,且气孔随温度的升高而变大,1550℃时孔筋已变得疏松多孔。

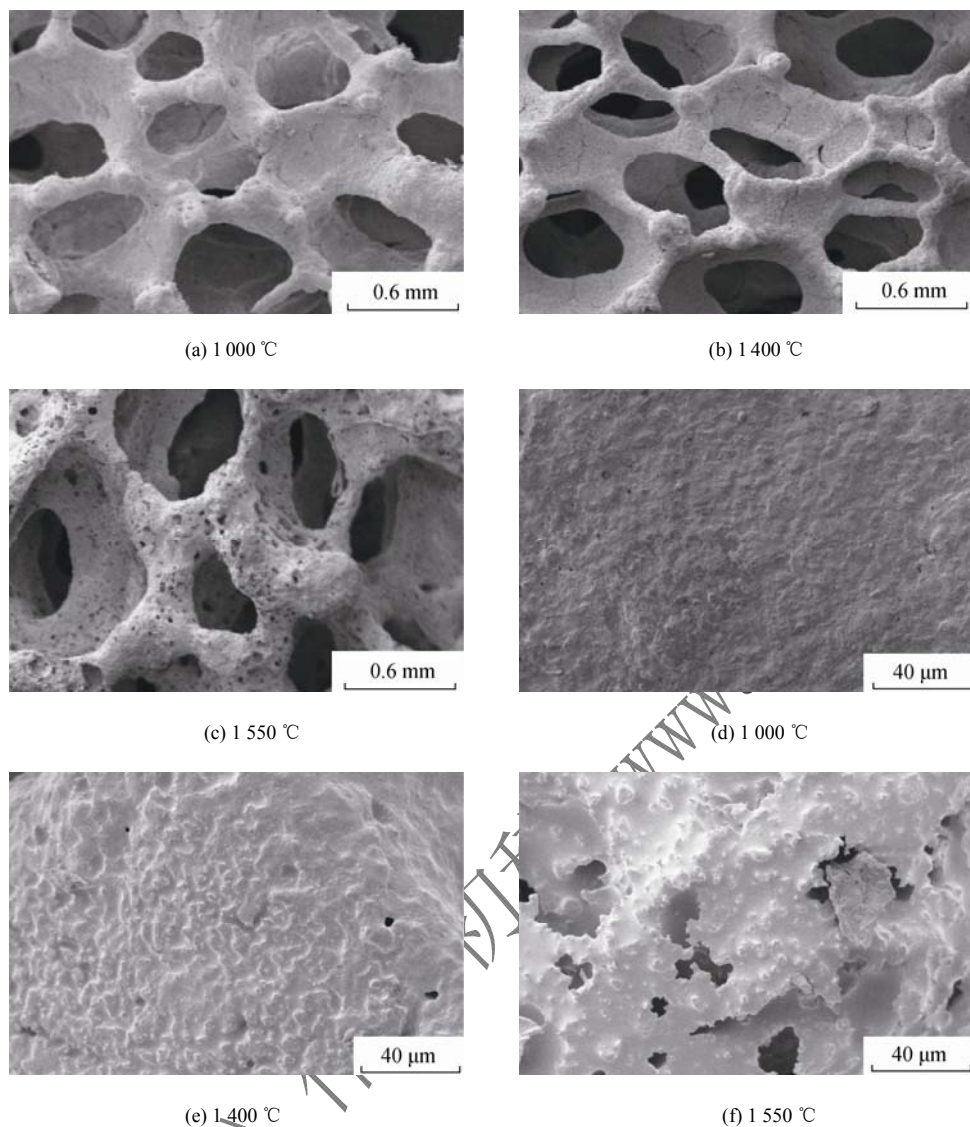


图 7 处理温度对 SiC 泡沫陶瓷通孔结构和微观形貌的影响
Fig. 7 Effect of treatment temperature on pore structures and microstructure of SiC foam ceramics

2.3.2 演变机理分析 图 8 为不同温度处理后 SiC 泡沫陶瓷的 XRD 谱, 其物相结构主要由 α -SiC 和 A 型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 和 AlPO_4 构成。随着温度的升高, A 型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 衍射峰减弱, AlPO_4 相衍射峰逐渐增强, 同时有 SiO_2 衍射峰出现, 说明 A 型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 逐渐分解转化为 AlPO_4 , 部分 SiC 被氧化。从图 8 还可以看出, 除以上物相外, 没有其他新物相生成, 说明 SiO_2 与磷酸盐没有发生反应。结合图 7 可知, 1000 °C 所产生的包裹液相实质为偏磷酸盐玻璃相, 这与文献[13–14]一致。结合图 2 可知, 当处理温度为 1000 °C 时, B 型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 相衍射峰消失, 为判定磷酸二氢铝烧成产物的物相演变过程, 将磷酸二氢铝进行 TG–DSC 测试。

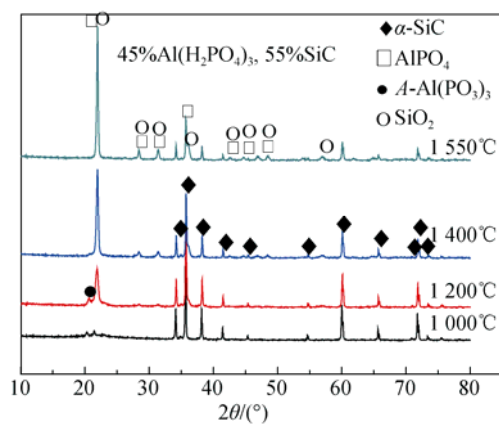


图 8 不同温度处理后 SiC 泡沫陶瓷的 XRD 谱
Fig. 8 XRD patterns of SiC foam ceramics after at different treatment temperatures

图9为磷酸二氢铝的TG-DSC曲线。从图9的DSC曲线可以看出,有4个吸热峰值点:244, 561, 908, 1 230 °C。由TG曲线可知,磷酸二氢铝的分解可分为3个阶段:第1阶段室温~561 °C,磷酸二氢铝发生了剧烈质量损失,由图2和图9的DSC曲线可知,该阶段主要发生磷酸二氢铝分解,生成A型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 、B型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 和水;第2阶段,561~908 °C之间,TG曲线无变化,根据图8和文献[15~17]分析可知,吸热归因于B型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 向A型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 转化,其转化本质为六元环状 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 向四元环状 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 转变;第3阶段,908~1 500 °C发生剧烈质量损失,根据图8和文献[18]研究可知,该质量损失归因于A型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 分解生成 AlPO_4 和 P_2O_5 气体。 P_2O_5 气体的逸出造成了孔筋上出现微孔缺陷(图7f)。

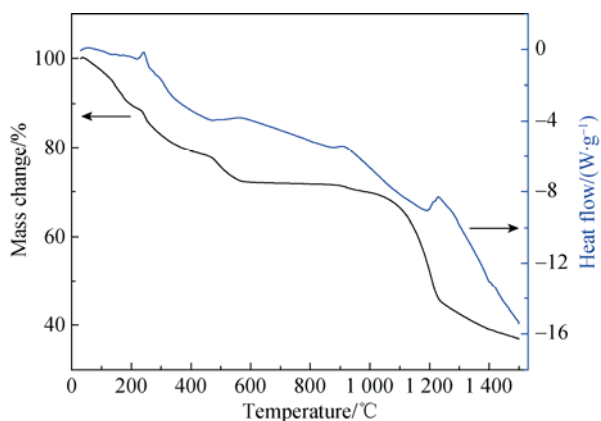


图9 磷酸二氢铝的DSC/TG曲线

Fig. 9 DSC/TG curves of aluminium dihydrogen phosphate

2.3.3 线收缩率和体积密度分析 图10为不同温度处理后的SiC泡沫陶瓷的线收缩率与温度关系曲线。由图10可见,随处理温度增加,线收缩率先减小后略微增加,在1 000 °C处理后,泡沫陶瓷收缩最大,达3.78%。在1 200 °C之后,陶瓷线收缩率变化较小,保持在0.5%左右。结合图7和图8可知,1 000 °C时主要是由于偏磷酸盐玻璃相的生成,导致坯体收缩严重。随温度的升高,收缩减小,是因为大量的A型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 分解成 AlPO_4 并释放出 P_2O_5 气体,气体的逸出造成烧结体膨胀,从而抵御了1 000 °C的收缩。

图11为不同温度处理后SiC泡沫陶瓷的气孔率与体积密度关系曲线。由图11可见,泡沫陶瓷体积密度均小于 0.4 g/cm^3 ,体积密度随温度的增加先降低后增加,而开气孔率则随温度的增加先增加后降低,在1 400 °C处理后达84.4%。在1 000 °C时主要是由于偏磷酸盐玻璃相的生成导致坯体体积减小,

使得体积密度最大;随着温度的升高,A型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 分解产生的 P_2O_5 气体,造成体积膨胀和质量减小,导致体积密度减小和气孔率增加;随温度进一步升高,SiC氧化造成坯体质量增加和孔洞愈合,体积密度增加、气孔率减小。

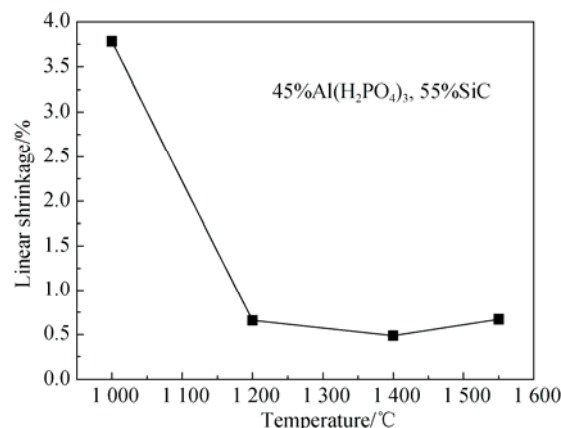


图10 线收缩率与温度关系曲线

Fig. 10 Relationship between linear shrinkage and temperature

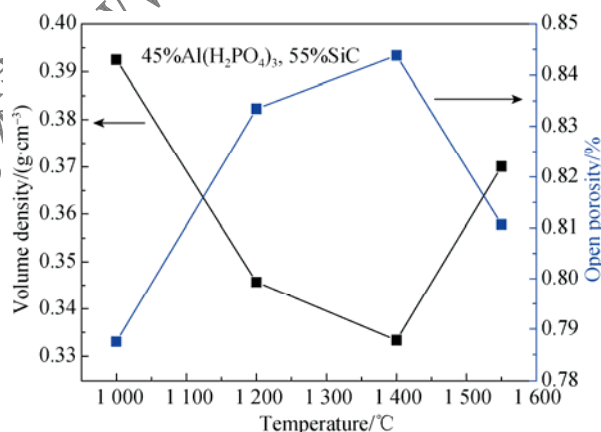


图11 开气孔率和体积密度与温度关系曲线

Fig. 11 Open porosity and volume density at different temperatures

2.3.4 热处理后产物抗折强度分析 图12为不同温度处理后的SiC泡沫陶瓷的抗折强度曲线。由图12可见,抗折强度随处理温度的增加先降低后升高,在1 000 °C时,抗折强度达到最大,达 $(2.06 \pm 0.1) \text{ MPa}$ 。在1 000 °C时,形成了大量的四元环状 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 和偏磷酸盐玻璃相,将SiC颗粒包裹起来,微观结构致密,使得泡沫陶瓷力学性能优异;在1 200 °C,时强度降到最低,是因为A型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 分解成 AlPO_4 并放出 P_2O_5 ,使得结构多孔,从而降低了抗折强度;在1 200 °C之后,抗折强度逐渐增加,主要是由于A型 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 分解产生了大量 AlPO_4 和氧化形成的 SiO_2 使孔洞逐渐愈合,抗折强度提高。

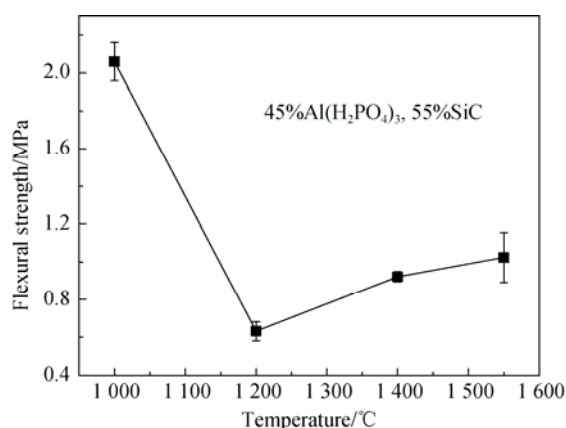


图 12 抗折强度与处理温度关系曲线

Fig. 12 Relationship between flexural strength and treatment temperatures

3 结论

1) 低温制备的 SiC 泡沫陶瓷线收缩率小于 1%，体积密度小于 0.5 g/cm^3 ，线收缩率随固相含量的增加而减小，体积密度和抗折强度均随磷酸二氢铝和固相含量的增加而逐渐增加。

2) SiC 泡沫陶瓷经高温处理后，线收缩率、体积密度和抗折强度均随处理温度的增加先降低后增加，开气孔则随处理温度的增加先增加后减小。处理温度在 1000°C 时，SiC 泡沫陶瓷气孔率为 78.8%，抗折强度达 2.06 MPa。

3) 低温下 SiC 泡沫陶瓷由 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 黏结起来，随着处理温度的升高， $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 逐渐分解成 AlPO_4 相，将 SiC 微粉包裹、黏结起来。

4) 采用聚氨酯海绵模板浸渍磷酸二氢铝与 SiC 微粉制备的浆料，制备出通孔结构良好的 SiC 泡沫陶瓷。与传统制备工艺相比，该法具有烧成温度低、成本低的优点。

参考文献:

- [1] DING Shudang, ZENG Yuping, et al. Thermal shock resistance of in situ reaction bonded porous silicon carbide ceramics[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 425(1-2): 326-329.
- [2] 刘霞, 李洪, 高鑫, 等. 泡沫碳化硅陶瓷材料的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(11): 2520-2525.
LIU Xia, LI Hong, GAO Xin, et al. Prog Chem Eng(in Chinese), 2012, 31(11): 2520-2525.
- [3] 杨莹, 陈斐, 沈强, 等. 高强度碳化硅泡沫陶瓷的制备及其抗压强度研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S1): 7-10.
YANG Ying, CHEN Fei, SHEN Qiang, et al. Rare Met Mater Eng(in Chinese), 2011, 40(S1): 7-10.
- [4] CHEN Fei, YANG Ying, SHEN Qiang, et al. Macro/micro structure dependence of mechanical strength of low temperature sintered silicon

carbide ceramic foams[J]. Ceram Int, 2012, 38(6): 5223-5229.

- [5] 朱新文, 江东亮, 谭寿洪. 碳化硅网眼多孔陶瓷的制备[J]. 无机材料学报, 2000, 15(6): 1055-1060.
ZHU Xingwen, JIANG Dongliang, TAN Shouhong. J Inorg Mater (in Chinese), 2000, 15(6): 1055-1060.
- [6] 刘坚, 许云书, 熊亮萍, 等. 先驱体聚合物粘结法制备 SiC 纳米多孔陶瓷[J]. 无机化学学报, 2009, 25(5): 823-827.
LIU Jian, XU Yunshu, XIONG Liangping, et al. J Inorg Chem(in Chinese), 2009, 25(5): 823-827.
- [7] 姚秀敏, 黄政仁, 谭寿洪. 聚碳硅烷低温烧结碳化硅网眼多孔陶瓷的研制[J]. 无机材料学报, 2010, 15(2): 168-172.
YAO Xiumin, HUANG Zhengren, TAN Shouhong. J Inorg Mater (in Chinese), 2010, 15(2): 168-172.
- [8] 刘卫, 黎阳, 陈璐. 聚碳硅烷低温制备碳化硅泡沫陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(11): 1763-1767.
LIU Wei, LI Yang, CHEN Lu. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(11): 1763-1767.
- [9] 王新坤, 汪定江, 祝长春, 等. 偏磷酸铝黏结剂在真空液相浸渗制备 Cf/Al 复合材料中的应用研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(5): 693-696.
WANG Xinkun, WANG Dingjiang, ZHU Changchun, et al. J Mater Sci Eng(in Chinese), 2004, 22(5): 693-696.
- [10] HIPEDING L R N E, SCIAN A N, AGLIETTI E F. Magnesia-phosphate bond for cold-setting cordierite-based refractories[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(5): 675-682.
- [11] VIPPOLA M, AHMANIEMI S, KERANEN J, et al. Aluminum phosphate sealed alumina coating: characterization of microstructure[J]. Mater Sci Eng A, 2002, 323(1-2): 1-8.
- [12] 姚秀敏, 谭寿洪, 黄政仁. 聚氨酯海绵的预处理对网眼多孔陶瓷性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(10): 1215-1219.
YAO Xiumin, TAN Shouhong, HUANG Zhengren. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(10): 1215-1219.
- [13] MORRIS J H, PERKINS P G, ROSE A E A, et al. The chemistry and binding properties of aluminium phosphates[J]. Chem Soc Rev, 1997, 6(2): 173-194.
- [14] 陈嘉甫, 谭光薰. 磷酸盐的生产与应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989: 149-156.
CHEN Jiafu, TAN Guangxun. Production and application of phosphate(in Chinese). Chendu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1989: 149-156.
- [15] 王新鹏, 田蔚. 磷酸铝相变及其热性能和介电性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S1): 716-719.
WANG Xinpong, TIAN Shi. Rare Metal Mater Eng(in Chinese), 2005, 34(z2): 716-719.
- [16] 张莹莹. 具有低介电损耗性能的磷酸盐耐高温材料[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
ZHANG Yingying. Heat-resistance phosphate material with low dielectric loss (in Chinese, dissertation), Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [17] HAN H J, KIM D P. Studies on curing chemistry of aluminum-chromium-phosphates as low temperature curable binders[J]. J Sol-Gel Sci Technol, 2003, 26(1-3): 223-228.
- [18] KOSENKO N F, FILATOVA N V, FUKINA T A. Thermal transformations of an aluminoboro-phosphate binder[J]. Inorg Mater, 2004, 40(10): 1122-1126.