

环境友好的泡沫注凝法制备钙长石多孔陶瓷

付梦丽, 李翠伟, 武令豪, 李 昊

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京交通大学材料科学与工程研究中心, 北京 100044)

摘 要: 以碳酸钙、 α -氧化铝和二氧化硅为原料、明胶作为凝胶剂, 采用泡沫注凝法制备了系列钙长石多孔陶瓷, 研究了明胶添加量对制备材料组成、结构与性能的影响。结果表明: 明胶添加量对物相组成没有影响, 均获得了单相材料; 但对材料性能有一定的影响, 当明胶添加量由 6%(质量分数)增加到 12%时, 总气孔率由 89.7%缓慢降低到 88.0%, 体积密度由 0.28 g/cm³ 增大到 0.33 g/cm³, 抗压强度由 1.02 MPa 增加到 2.54 MPa, 热导率由 0.038 W/(m·K)升高至 0.059 W/(m·K)。采用此方法可制备出同时具有低密度、高强度和低热导率的钙长石多孔陶瓷。

关键词: 钙长石; 多孔陶瓷; 明胶; 泡沫注凝法; 热导率

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)03-0723-06

网络出版时间: 2022-01-24



Fabrication of Porous Anorthite Ceramics by Environmental-Friendly Foam Gel-casting Method

FU Mengli, LI Cuiwei, WU Linghao, LI Hao

(Center of Material Science and Engineering, School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Single-phase anorthite porous ceramics were *in-situ* prepared by a foam gel-casting method with CaCO₃, α -Al₂O₃ and SiO₂ as raw materials and environmental-friendly gelatin as a gel. The influence of gelatin amount on the phase composition, microstructure and properties (i.e., porosity, density, compressive strength, and thermal conductivity) of the samples was investigated. The amount of gelatin has no effect on the phase composition of the prepared material, but it affects the properties. The total porosity decreases from 89.7% to 88.0%, the bulk density increases from 0.28 g/cm³ to 0.33 g/cm³, the compressive strength increases from 1.02 MPa to 2.54 MPa, and the thermal conductivity increases from 0.038 W/(m·K) to 0.059 W/(m·K) as the gelatin amount increases from 6% to 12%. It is indicated that porous anorthite ceramics with a low density, a high strength and a low thermal conductivity could be prepared by this promising method.

Keywords: anorthite; porous ceramics; gelatin; foam gel-casting method; thermal conductivity

多孔陶瓷因具有优异的渗透性能、低热导率、高比强度和良好的高温稳定性, 而广泛应用于高温过滤^[1-2]、隔热^[3-5]和催化剂载体^[6]等^[7]方面。在隔热应用中, 钙长石基多孔陶瓷因低的密度和良好的隔热性能而成为重要的选择^[8-9]。多孔陶瓷高气孔率与高强的矛盾限制着其应用。因此, 开发新的制备技术, 制备出性能更加优异的材料是目前研究的

重点之一。

目前报道的钙长石多孔陶瓷制备方法主要包括: 直接发泡法^[10-11]、添加造孔剂法^[12-13]和泡沫注凝法^[14-15]等。前两种方法制备试样的气孔率较低(小于 80%), 不利于获得更低的热导率。采用泡沫注凝法可以制备出气孔率超过 85%的材料, 但制备的材料在气孔率超过 85%时强度很低^[14]。另外, 常规的

收稿日期: 2021-05-09。 修订日期: 2021-09-23。

基金项目: 国家自然科学基金(51472023); 北京市自然科学基金(2182059)资助。

第一作者: 付梦丽(1994—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 李翠伟(1973—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2021-05-09. Revised date: 2021-09-23.

First author: FU Mengli (1994—), female, Master.

E-mail: 18121359@bjtu.edu.cn

Correspondent author: LI Cuiwei (1973—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: cwli@bjtu.edu.cn

泡沫注凝法以丙烯酰胺凝胶体系为主, 此体系所需添加剂种类较多、用量较大, 而且部分添加剂有一定的毒性^[16]。因此, 开发超轻高强钙长石多孔陶瓷环境友好制备技术具有较大的实用价值。

在报道的凝胶体系中, 明胶具有优异的生物可降解性、无毒、无害且环境友好。相比于琼脂糖、果胶和卡拉胶等热溶性多糖类高分子, 明胶在 40 ℃ 左右就会快速溶解, 而当温度降至 25 ℃ 以下即可发生凝胶, 其凝胶过程简单易控^[17]。所以, 以明胶作为凝胶剂的泡沫注凝法, 只需通过降低温度即可使得泡沫浆料固化成型, 无需添加交联剂、引发剂及催化剂等有机物, 不仅减少了有害物质的排放, 而且简化了操作过程。考虑到明胶低温固化的特性, 将其与真空冷冻干燥技术^[18–19]相结合可以获得更高气孔率的坯体, 制备的多孔材料具有更高的气孔率^[20–21]。

以碳酸钙、 α -氧化铝和二氧化硅为主要原料、明胶为凝胶剂, 结合泡沫注凝法和真空冷冻干燥技术制备了系列钙长石多孔陶瓷, 在总气孔率高达 89.7% 时, 体积密度仅为 0.28 g/cm³, 但抗压强度仍保持在 1 MPa 以上, 热导率低至 0.038 W/(m·K)。

1 实验

1.1 原料

合成钙长石的主要原料为 α -Al₂O₃ (中位径 0.3 μ m, 安迈铝业贸易(青岛有限公司))、SiO₂ (中位径 10 μ m, 上海凤陈有限公司) 和 CaCO₃ (中位径 0.8 μ m, 阿拉丁试剂有限公司) 粉体。采用聚丙烯酸铵(分析纯, 上海恒生化工)作为分散剂, 十二烷基硫酸钠(分析纯, 西陇化工有限公司)为发泡剂, 十二醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)为稳泡剂, 明胶(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)为凝胶剂, 去离子水为溶剂。利用氨水调节浆料的 pH 值。

1.2 样品制备

采用明胶体系泡沫注凝法+真空冷冻干燥技术+常压烧结制备钙长石多孔陶瓷, 其工艺流程如图 1 所示。首先将按化学计量比和固含量计算称量的 α -Al₂O₃、SiO₂ 和 CaCO₃ 粉体与一定量的分散剂、去离子水和玛瑙球加入到球磨罐中, 球料比约为 3:1, 球磨约 20 h 之后将浆料与玛瑙球分离置于烧杯当中, 球磨机转速约为 90 r/min; 接下来, 将在适量去离子水中加热溶解制成的明胶溶液加入到上述浆料中搅拌 5 min, 转速为 100 r/min; 而后再将一定浓度的发泡剂溶液加入到浆料中并快

速搅拌 15 min, 转速为 1 500 r/min; 然后, 将均匀发泡的浆料倒入模具中; 注模完成之后, 先在冷阱中预冷 30 min 以便脱模, 将脱模后的坯体在冷阱中继续冷冻约 9 h 后移至干燥腔内, 开始抽真空进行干燥, 真空干燥时间为 24 h; 最后, 将干燥后的坯体置于箱式炉中烧结, 升温速率为 1 ℃/min, 在 100、600 ℃ 分别保温 1 h, 在 1 500 ℃ 保温 5 h。

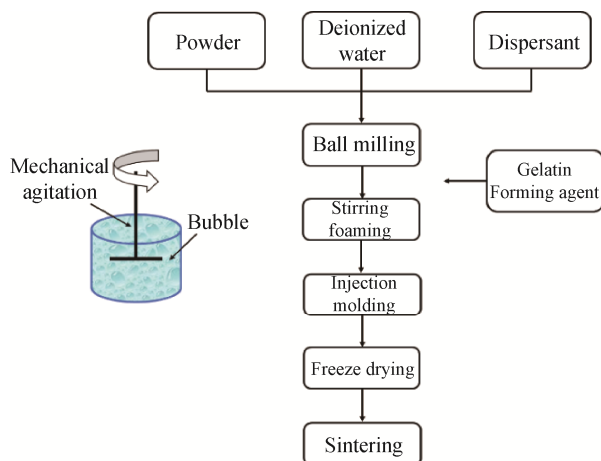


图 1 环境友好泡沫注凝法制备钙长石多孔陶瓷工艺流程图
Fig. 1 Flow chart of environmental-friendly foam gel-casting method used to fabricate porous anorthite ceramics

在此工艺中, 明胶添加量是重要的工艺参数。为研究其对制备材料组成、结构与性能的影响, 浆料初始固含量均固定为 25%(体积分数), 发泡剂质量浓度选择为 1 g/L, 明胶添加量分别选取 6、8、10 和 12%(相对于原料粉体的质量)。之所以选择这个范围, 是因为当明胶添加低于 6% 时, 坯体强度较低, 干燥过程中容易形成开裂。而当明胶添加量超过 12% 时, 浆料黏度太高, 发泡变得困难, 且坯体干燥收缩较大, 容易产生裂纹。

1.3 样品表征

采用基于 Archimedes 定律的煮沸法测量烧结试样的体积密度及开口气孔率, 总气孔率则是根据试样的体积密度及钙长石理论密度(2.76 g/cm³)计算得出。使用 X 射线衍射仪(XRD, D8ADVANCE A25 型, 德国布鲁克)进行物相组成分析。采用扫描电子显微镜(SEM, EVO18 型, 德国蔡司)观察显微结构。采用万能试验机(WDW-100E)测定试样的抗压强度, 试样尺寸为 ϕ 20 mm×20 mm, 加载速率为 0.5 mm/min; 采用综合物理性质检测系统(PPMS, 6 000, 美国 Quantum Design)的热输运(TTO)组件测

定室温真空热导率, 试样尺寸为 $3\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。每个性能测试均对至少 3 个试样进行, 测试结果为平均值。

2 结果与讨论

2.1 物相组成与显微结构

图 2 为不同明胶添加量所制备的钙长石多孔陶瓷的 XRD 谱。

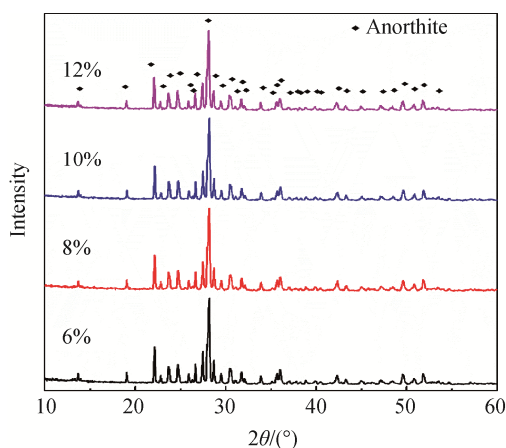


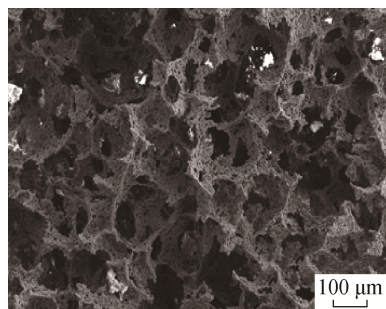
图 2 不同明胶添加量(质量分数)制备的钙长石多孔陶瓷的 XRD 谱

Fig. 2 X-Ray diffraction patterns of porous anorthite ceramics with different gelatin amount(mass fraction)

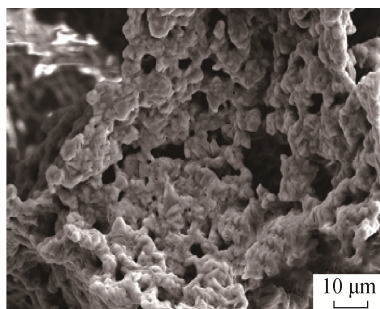
由图 2 可以看出, 不同明胶添加量下制备的试

样的 XRD 谱中所有衍射峰都可以标定为钙长石, 而且不同试样的衍射图没有明显的差别。这说明明胶添加量对制备材料的物相组成没有影响, 在明胶添加量为 6%、8%、10%、12% 的情况下都能够制备出纯的钙长石多孔陶瓷。

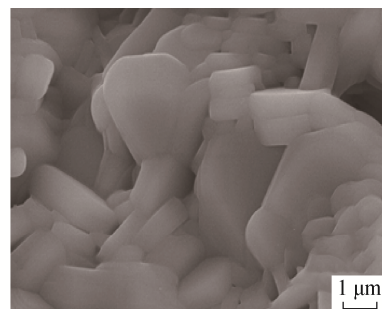
图 3 为不同明胶添加量制备的钙长石多孔陶瓷的 SEM 照片。由图 3 可以看出, 采用此方法制备材料的孔可分为多级, 分别为发泡而来的 $100\text{ }\mu\text{m}$ 左右球形大孔、几十微米的窗口孔和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下由颗粒堆积或明胶排除后生成的小孔。对比不同明胶添加量制备试样的低倍照片发现, 随着明胶添加量的增加, 球形大孔的形貌逐渐变得完整, 孔径明显减小, 而且孔壁厚度逐渐增加, 这可能是由于随着明胶添加量的增加, 浆料的黏度也会增加, 而高黏度的泡沫壁使得泡沫的稳定性提高, 阻碍了气孔的合并长大。随着明胶添加量的增加, 试样球形孔壁或骨架上的小孔数量及大小都在减少, 这可能与随着明胶添加量的增大烧结收缩有所增大有关。在放大倍数后可以看到, 明胶添加量的变化对晶粒形貌和大小影响不明显。所有试样中钙长石晶粒均呈板状, 晶粒厚度约 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、宽度约为 $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 。而且, 晶粒与晶粒之间的结合很紧密, 这有助于提高材料强度。



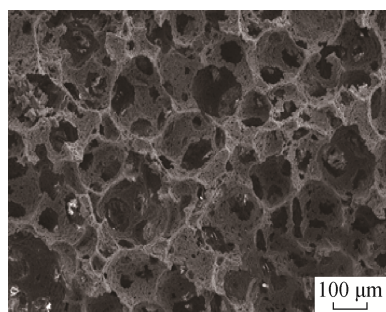
(a) 6%(low magnification)



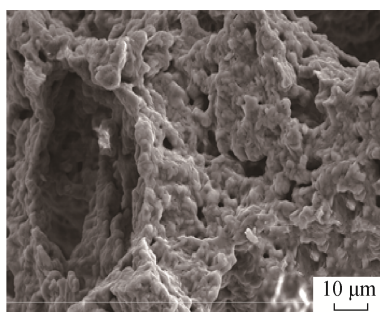
(b) 6%(medium magnification)



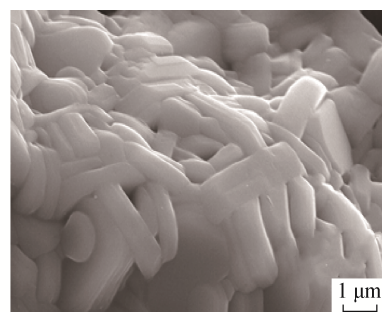
(c) 6%(high magnification)



(d) 8%(low magnification)



(e) 8%(medium magnification)



(f) 8%(high magnification)

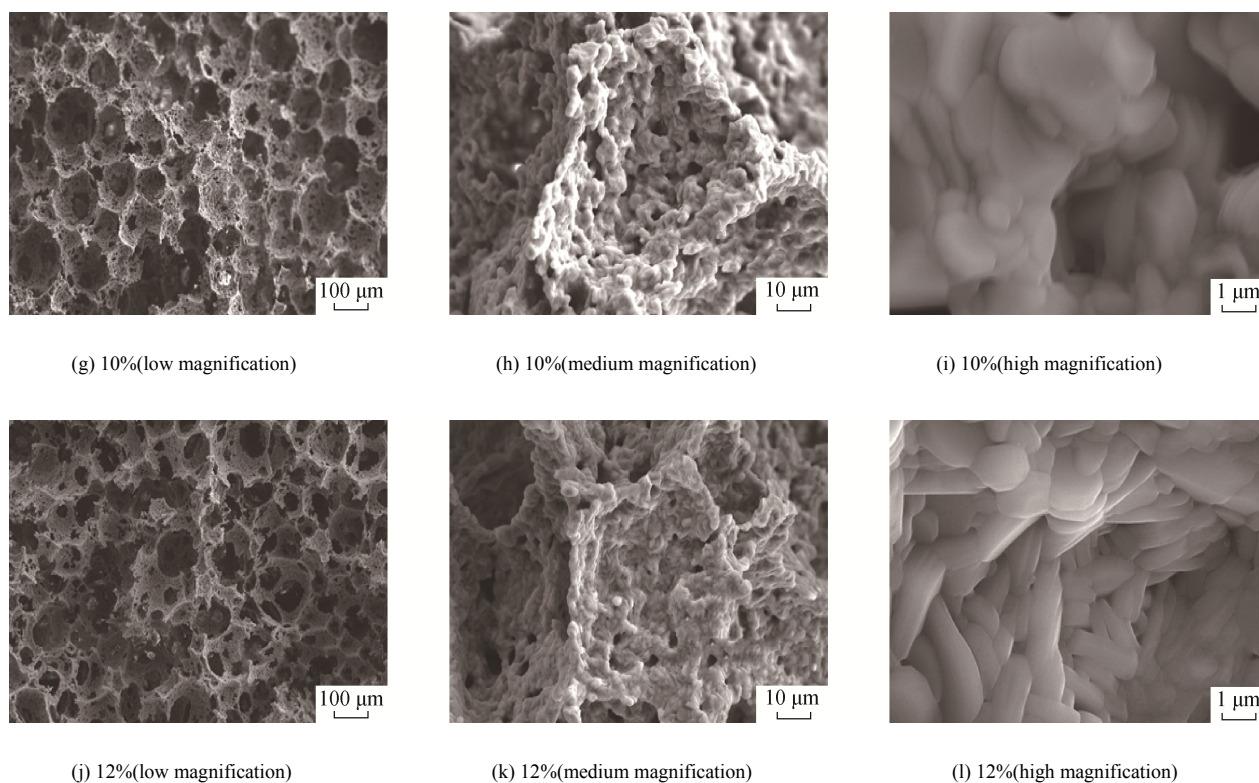


图3 不同明胶添加量制备钙长石多孔陶瓷的 SEM 照片

Fig. 3 SEM graphs of porous anorthite ceramics with different gelatin amount

2.2 线收缩率、总气孔率和体积密度

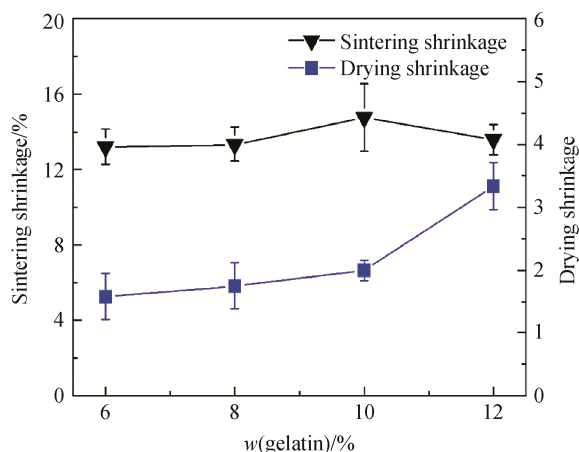
图4为在不同明胶添加量条件下样品的干燥收缩率和烧结收缩率。由图4可以看出,试样的干燥收缩率随着明胶添加量的增加而逐渐增大,这是由于明胶溶液在冷冻过程中会形成三维网络结构,同时水会结晶成冰而存在于此三维网络中。当真空干燥的时候,冰升华排出后会留下大量的孔隙,明胶凝胶因此发生收缩。因此,随着明胶添加量的增大,试样干燥收缩率逐渐增大。所有试样的干燥收缩都在3.5%以下,远小于丙烯酸胺体系制备的试样,这与真空冷冻干燥机理有关。低的干燥收缩有利于坯体保持高的气孔率。

与对干燥收缩的影响不同,明胶添加量对烧结线收缩的影响规律不明显,总体呈现上升趋势,但烧结线收缩率变化较小,仅仅波动于13.2%到14.7%之间。当明胶添加量分别是6%和12%时,烧结线收缩率分别为13.2%和13.6%,仅仅变化了0.4%。分析原因,烧结收缩增大可能是由明胶添加量增多引起的。冷冻干燥后明胶形成的三维网络存在于多孔坯体中。在进行烧结时,此明胶三维网络在较高温度下被排除而形成大量微小孔洞,这些孔洞的出

现使得材料的烧结驱动力增大,从而烧结收缩有所增大。综合干燥收缩率和烧结收缩率得到总收缩率,当明胶添加量由6%逐步升高到12%时,总收缩率由14.8%升高到16.9%,其较大的增长主要来源于干燥收缩。

明胶添加量对收缩率影响的直接表现为材料总气孔率和体积密度的变化。测试了不同明胶添加量制备试样的总气孔率和体积密度,结果如图5所示。随着明胶添加量的增大,制备试样的总气孔率总体呈现降低的趋势,而体积密度呈升高的趋势,这与总收缩逐渐增大相一致。明胶添加量从6%增大到12%,制备材料的总气孔率从89.7%降低至88.0%,变化较小;而体积密度由 0.28 g/cm^3 增大到 0.33 g/cm^3 。

与同等固含量和发泡剂浓度条件下,采用丙烯酸胺体系的泡沫注凝法制备的钙长石多孔陶瓷(总气孔率85.7%,体积密度为 0.39 g/cm^3)^[15]相比,材料的总气孔率更高、体积密度更低。而且添加剂种类少、低毒无害,工艺步骤少且操作简单。采用此方法制备的材料具有较高的气孔率。高的气孔率有助于材料获得低的热导率,从而具有良好的隔热性能。



w—Mass fraction.

图 4 不同明胶添加量条件下制备试样的干燥收缩率和烧结收缩率

Fig. 4 Drying shrinkage and sintering shrinkage of porous anorthite ceramics obtained from different gelatin amount

2.3 抗压强度和热导率

图 6 为不同明胶添加量条件下制备的钙长石多孔陶瓷的抗压强度和热导率。

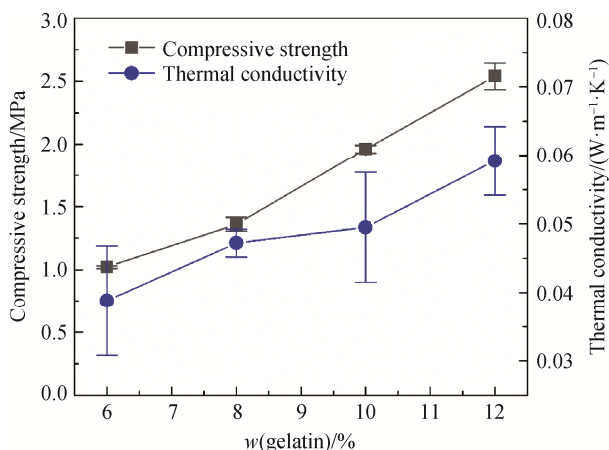


图 6 不同明胶添加量制备钙长石多孔陶瓷的抗压强度及热导率
Fig. 6 Compressive strength and thermal conductivity of porous anorthite ceramics obtained from different gelatin amount

由图 6 可以看出, 随着明胶添加量的增加, 试样的抗压强度大幅度提高, 由 1.02 MPa 增加到 2.54 MPa, 增长了近 1.5 倍。分析原因发现: 1) 随着明胶加入量的增大, 气孔率呈降低的趋势(如图 5); 2) 随着明胶添加量的增加, 球形气孔尺寸明显减小(如图 3); 3) 明胶添加量增多使得烧结收缩略有增大, 从而导致试样骨架的致密化程度增加(如图 3)。气孔率降低、孔径尺寸减小和骨架致密程度增加是材料强度提高的主要原因。

从图 6 还可以看出, 随着明胶添加量的增加, 试样热导率有所上升, 由 0.038 W/(m·K) 增加到

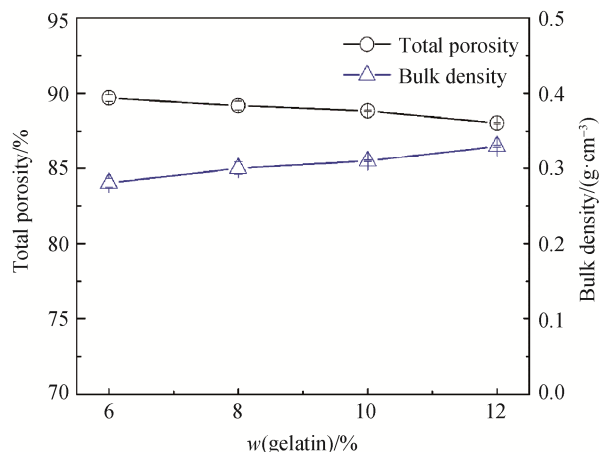


图 5 不同明胶添加量制备试样的总气孔率和体积密度

Fig. 5 Total porosity and bulk density of porous anorthite ceramics obtained from different gelatin amount

0.059 W/(m·K)。多孔陶瓷热导率的影响因素主要包括试样的组成、骨架致密程度和气孔率等。所有试样均由单相钙长石组成, 因此气孔率和骨架致密程度就成为热导率的决定因素。与固体相比, 气体具有更低的热导率, 因此气孔率升高有助于材料获得低的热导率。随着明胶添加量的增加, 气孔率降低的同时骨架致密程度提高, 二者共同作用导致了试样热导率增大。

本工作与文献报道的钙长石基多孔陶瓷的抗压强度和体积密度如图 7 所示。

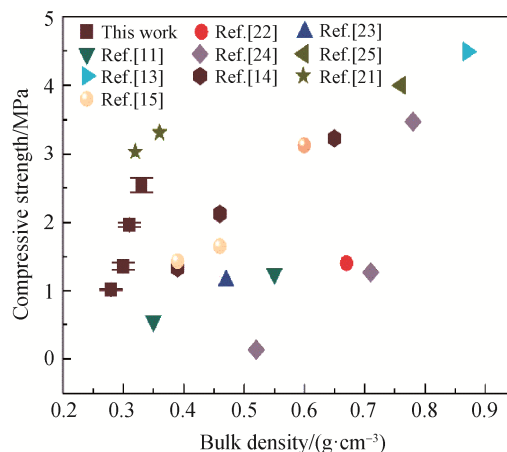


图 7 材料体积密度、抗压强度的数据与文献报道结果对比
Fig. 7 Data of compressive strength with bulk density in this study and some reference

从图 7 可以看出, 与大部分报道结果相比, 本工作所制备试样的体积密度更低、气孔率更高, 而且本文制备的材料具有更高的比强度。与文献[14]、[15]和[24]报道的纯钙长石多孔陶瓷的数据对比发现, 材料在体积密度微小增大的情况下, 抗压强度即获得了较大幅度的提升。虽然文献 21 报道的钙

长石/莫来石晶须多孔陶瓷在相近体积密度下具有更高的抗压强度,但其中对应试样的热导率介于 0.105~0.115 W/(m·K)之间,是本职工作试样热导率的 2 倍以上。这是因为与钙长石相比莫来石的热导率更高。与文献[14]和[15]报道的材料相比,本职工作制备的材料不仅具有更高的比强度,其热导率也处于较低的水平。

本职工作制备的材料具有更好的综合性能,因此可以制备出兼具低密度、高强度和低热导率的钙长石多孔陶瓷,并且通过控制明胶添加量可以在一定范围内调控材料的显微结构,进而影响材料的抗压强度与热导率。

3 结论

1) 明胶添加量对物相组成没有影响,对干燥收缩、气孔尺寸影响明显;随着明胶添加量的增加,干燥收缩增大,气孔尺寸减小,骨架结合紧密程度提高。

2) 明胶添加量对制备多孔陶瓷的性能有一定影响,通过调控明胶添加量可以实现对钙长石多孔陶瓷性能的调控;当明胶添加量为 6%时,材料总气孔率高达 89.7%,体积密度仅为 0.28 g/cm³,抗压强度保持在 1.02 MPa,热导率低至 0.038 W/(m·K)。

3) 该工艺环境友好、操作简单,可以制备出兼具低密度、高强度和低热导率的钙长石多孔陶瓷。

参考文献:

- [1] LIU Jingjing, REN Bo, WANG Yali, et al. Hierarchical porous ceramics with 3D reticular architecture and efficient flow-through filtration towards high-temperature particulate matter capture[J]. Chem Eng J, 2019, 362: 504–512.
- [2] 周小楠, 张建飞, 黄鑫, 等. 多孔重结晶碳化硅陶瓷的烧结颈结构调控与力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(9): 1208–1213. ZHOU Xiaonan, ZAHANG Jianfei, HUANG Xin, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(9): 1208–1213.
- [3] KANG Eun seo, KIM Young-wook, NAM Woo hyun, et al. Multiple thermal resistance induced extremely low thermal conductivity in porous SiC–SiO₂ ceramics with hierarchical porosity[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41(2): 1171–1180.
- [4] 吴文浩, 张海军, 葛胜涛, 等. 发泡法制备莫来石多孔陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(9): 1359–1365. WU Wenhao, ZHANG Haijun, GE Shengtao, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(9): 1359–1365.
- [5] 王涵, 李翠伟, 武令豪, 等. 颗粒稳定泡沫法制备莫来石基多孔陶瓷的结构与性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(6): 824–832. WANG Han, LI Cuiwei, WU Linghao, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(6): 824–832.
- [6] HUO Cunbao, TIAN Xiaoyong, CHEN Cunzhuang, et al. Hierarchically porous alumina catalyst carrier with biomimetic vein structure prepared by direct ink writing[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41(7): 4231–4241.
- [7] 张笑妍, 杨君洁, 李雯昊. 基于浆料的陶瓷增材制造技术制备多孔陶瓷研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(9): 1810–1827. ZHANG Xiaoyan, YANG Junhao, LI Wenhao. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(9): 1810–1827.
- [8] 刘强, 潘志华, 李庆彬, 等. 钙长石系轻质隔热砖的制备及钙长石形成过程[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(6): 1269–1274. LIU Qiang, PAN Zhihua, LI Qingbin, et al. B Chin Ceram Soc(in Chinese), 2010, 29(6): 1269–1274.
- [9] LI Cuiwei, BIAN Chao, HAN Yao, et al. Mullite whisker reinforced porous anorthite ceramics with low thermal conductivity and high strength[J]. J Eur Ceram Soc, 2016, 36(3): 761–765.
- [10] LI Ye, CHENG Xudong, GONG Lunlun, et al. Fabrication and characterization of anorthite foam ceramics having low thermal conductivity[J]. J Eur Ceram Soc, 2015, 35: 267–275.
- [11] 耿浩洋, 潘志华. 化学发泡法制备钙长石系轻质隔热砖坯体[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(5): 814–818. GENG Haoyang, PAN Zhihua. B Chin Ceram Soc(in Chinese), 2013, 32(5): 814–818.
- [12] 游世海, 郑化安, 付东升, 等. 粉煤灰合成钙长石多孔陶瓷的结构与性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(12): 1718–1723. YOU Shihai, ZHENG Huanan, FU Dongsheng, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(12): 1718–1723.
- [13] SUTCU M, AKKURT S, BAYRAM A, et al. Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition[J]. Ceram Int, 2012, 38: 1033–1041.
- [14] HAN Yao, LI Cuiwei, BIAN Chao, et al. Wang Chang-an, Porous anorthite ceramics with ultra-low thermal conductivity[J]. J Eur Ceram Soc, 2013, 33(10): 2573–2578.
- [15] LI Cuiwei, HAN Yao, WU Linghao, et al. An Li-nan, Fabrication and properties of porous anorthite ceramics with modelling pore structure [J]. Mater Lett, 2017, 190: 95–98.
- [16] LLieoTeJTb, B. O. (Russia, translated by Xu Weizheng, He Kunrong), Handbook of Polymer Toxicity[M]. Chemical Industry Press, Beijing, 1991, 91–93.
- [17] 谢志鹏, 薄铁柱. 结构陶瓷的新型凝胶注模成型技术研究与进展[J]. 陶瓷学报, 2011, 32(2): 312–319. XIE Zhipeng, BO Tiezhu. J Ceram, (in Chinese), 2011, 32(2): 312–319.
- [18] MATSUNAGA Chika, FUKUSHIMA Manabu, HYUGA Hideki, et al. Fabrication of porous silica ceramics by gelation-freezing of diatomite slurry[J]. J Eur Ceram Soc, 2017, 37(16): 5259–5264.
- [19] YUAN Lei, JIN Endong, LI Chaoyue, et al. Preparation of calcium hexaluminate porous ceramics by novel pectin based gelcasting freeze-drying method[J]. Ceram Int, 2021, 47(7): 9017–9023.
- [20] WU Zhen, SUN Luchao, PAN Jingjing, et al. Highly porous Y₂SiO₅ ceramic with extremely low thermal conductivity prepared by foam-gelcasting-freeze drying method[J]. J Am Ceram Soc, 2018, 101: 1042–1047.
- [21] WU Linghao, LI Cuiwei, CHEN Yufeng, et al. Seed assisted *in-situ* synthesis of porous anorthite/mullite whisker ceramics by foam-freeze casting[J]. Ceram Int, 2021, 47(8): 11193–11201.
- [22] 胡建辉. 新型钙长石/莫来石复相轻质耐高温材料的制备及性能研究[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 北京, 2010. HU Jianhui. The preparation and properties of anorthite-mullite composite light factory[D]. Master's thesis of China University of Geosciences, Beijing, 2010.
- [23] 倪文, 刘凤梅, 李翠伟. 利用天然原料合成钙长石轻质耐火砖的研究[J]. 地质找矿论丛, 1998, 13(2): 1–9. NI Wen, LIU Fengmei, LI Cuiwei. Contrib Geol Miner Resour Res (in Chinese), 1998, 13(2): 1–9.
- [24] 顾幸勇, 马光华. 钙长石质轻质隔热材料研制[J]. 陶瓷学报, 1998, 19(3): 144–148. GU Xingyong, MA Guanghua. J Ceram (in Chinese), 1998, 19(3): 144–148.
- [25] PRIMACHENKO V V, MARTYNENKO V V, DERGAPUTSKAYA L A, et al. Anorthite light-weight material with microporous structure [C]. Proceedings of UNITECR'01, Cancun, Mexico, 2001, 1: 193–195.