第 48 卷第 9 期
2020 年 9 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 9
September，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190720

发泡法制备莫来石多孔陶瓷

吴文浩，张海军，葛胜涛，李赛赛，张少伟

(武汉科技大学，省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室，武汉 430081)

摘 要：以碳化硅及碳酸钙为造孔剂，采用发泡–注凝成型结合添加造孔剂法制备了具有大孔–介孔复合孔结构的莫来石多级孔陶瓷，研究了 SiC 加入量对莫来石多孔陶瓷常温物理性能和高温隔热性能的影响。结果表明：以莫来石粉体为主要原料，以 $CaCO_3$ 和 SiC 为造孔剂，采用发泡结合添加造孔剂法可制备具有较高闭气孔率的莫来石多孔陶瓷；当 SiC 加入量为 4%(质量分数)时，所制备试样的导热系数最低，其孔隙率约为 69.9%。

关键词：莫来石；多级孔陶瓷；发泡–注凝成型法；造孔剂
中图分类号：TQ174　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)09–1353–07
网络出版时间：2020–07–13



Preparation of Mullite Ceramics by Foam–Gelcasting Method

WU Wenhao, *ZHANG Haijun*, *GE Shengtao*, *LI Saisai*, *ZHANG Shaowei*
(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Hierarchical pore structure mullite ceramics with macro– and meso-pores were prepared by a foam–gelcasting method and a pore-forming agent method using SiC and $CaCO_3$ as additives. The effect of SiC amount on the flexural strength, compressive strength and thermal conductivities of porous ceramics was also investigated. The results show that porous mullite ceramics with a lot of close pores can be fabricated *via* the method with mullite powder as a raw material and $CaCO_3$ and SiC (0–8% (mass fraction)) as additives. The as-synthesized porous mullite ceramic prepared with 4% (mass fraction) SiC has 69.9% porosity and a lowest thermal-conductivity.

Keywords: mullite; hierarchical porous ceramics; foam–gelcasting; porerforming agent

莫来石多孔陶瓷(MPC)由于具备熔点高、热膨胀系数小及热导率较低等卓越特性[1–5]，是隔热、催化及气体净化等领域的理想材料[6–8]。但目前 MPC 在实际应用中仍存在孔隙率较低以及隔热性能较差等问题，限制了其推广与使用[9–12]。

多级孔材料具有孔隙率高、化学稳定性好及孔体积大等优点[5, 13–15]。但是，目前多级孔材料制备的困难之处在于其内部多级孔结构难以控制[16–17]。研究表明，在多孔陶瓷烧结过程中，引入合适的添加剂可在材料内部形成大孔–介孔复合的多级孔结构，进而获得孔隙率较高、隔热性能优异的多级孔陶瓷。

目前，$CaCO_3$ 与 SiC 等是 MPC 常用的造孔剂[18–20]。其中，当以 SiC 为添加剂时，一方面 SiC 的氧化过程能够产生高温液相并促进烧结的进行，另一方面其氧化产物中的 CO 和 CO_2 气体会被液相包裹形成封闭气孔，降低多孔陶瓷的导热系数[21–22]。Zhang 等[23]以莫来石纤维为原料，以 SiC、淀粉及 B_4C 为黏结剂，采用挤压成型工艺经 1 673 K 保温 1 h 制备了气孔率可达 87.3%，且耐压强度和导

收稿日期：2019–11–04。　修订日期：2019–12–25。
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51672194，51872210)；湖北省教育厅高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T201602)；湖北自然科学基金创新群体项目(2017CFA004)。
第一作者：吴文浩(1993—)，男，硕士研究生。
通信作者：张海军(1970—)，男，博士，教授。

Received date: 2019–11–04.　**Revised date:** 2019–12–25.
First author: WU Wenhao (1993–), male, Master candidate.
E-mail: wuwenhao5420@163.com
Correspondent authors: ZHANG Haijun (1970–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: zhanghaijun@wust.edu.cn

热系数分别为 2.1 MPa 及 0.093 $W·m^{-1}·K^{-1}$ 的 MPC。Lei[24]等以 SiC、氧化铝和莫来石纤维为原料，水溶性环氧树脂为胶凝剂，采用凝胶注模法合成了孔隙率最高为 71.7%的 MPC。结果表明，当烧结温度为 1 823 K 时，所制备多孔陶瓷的导热系数可低至 0.378 $W·m^{-1}·K^{-1}$。

基于此，本工作以莫来石粉体为主要原料，以 $CaCO_3$ 和 SiC 为造孔剂，采用发泡结合添加造孔剂法制备了含有多级孔结构的 MPC，研究了不同 SiC 加入量对 MPC 的常温物理性能及隔热性能的影响。

1 实验

1.1 样品制备

主要原料为莫来石粉体[工业纯，44 μm，Al_2O_3：67.8%(质量分数)，SiO_2：29.38%]、ISOBAM–104(工业纯)、羧甲基纤维素钠(CMC，分析纯)、十二烷基硫酸三乙醇胺(TLS，分析纯)、$CaCO_3$(100 nm，分析纯，≥98.0%)、SiC(8 μm，分析纯，≥98.0%)和去离子水。

首先以莫来石粉为原料，以相对固含量为 4%的 $CaCO_3$ 和 0~8%的 SiC 为造孔剂，固定固含量为 52% (体积分数)，将上述粉体按照一定配比混合后加入至含有 0.5%的 ISOBAM–104 和 0.1%的 CMC 水溶液中，搅拌后得到浆料；再以 TLS 为发泡剂，向浆料中加入 0.4%的 TLS(相对浆料的质量)，再快速搅拌制得泡沫浆料，而后将浆料逐步注入到 150 mm×30 mm×30 mm 的模具中使其成型，并在室温下放置 12 h 后脱模得到 MPC 生坯。将坯体置于烘箱内先于 323 K 干燥 48 h，再于 383 K 干燥 24 h，最后将制备的生坯放置于马弗炉中以 3.5 K/min 的升温速率加热至 1 673 K 并保温 2 h，随后冷却至室温得到 MPC。

1.2 样品表征

采用 X′pert–Pro 型 X 射线衍射仪测定试样的物相组成。采用 PHILIPS–XL30 型扫描电子显微镜表征试样的显微形貌，并分别统计测量至少 150 个多孔陶瓷的大孔孔径和窗口孔径大小，计算其平均孔径。利用压汞法及氮气吸脱附法测定所制备试样的大孔及介孔孔径分布。在 DKZ–600 型常温抗折测试仪上测试 MPC 的常温抗折强度。在万能压力实验机上测试 MPC 的常温耐压强度。采用 Archimedes 排水法测定 MPC 的体积密度及显气孔率。采用水流量平板法和瞬态平面热源法测试 MPC 在不同温度下的导热系数，测试温度分别为 298、473、673、873、1 073 和 1 273 K。

2 结果与讨论

2.1 SiC 加入量对 MPC 物相成分、显微结构及孔径分布的影响

图 1 为采用不同 SiC 加入量(0~8%，4%$CaCO_3$)且经 1 673 K/2 h 烧结后制得的 MPC 的 XRD 谱。由图 1 可知，所制备试样的主晶相为莫来石，且随着 SiC 加入量的逐步增加，所制备试样中的 $CaAl_2Si_2O_8$ 和 Al_2O_3 的衍射峰强度逐步降低，其中，$CaAl_2Si_2O_8$ 的生成是由于 $CaCO_3$ 与莫来石在高温下发生反应所致。当 SiC 的加入量为 0%时，高温下，$CaCO_3$ 分解后的 CaO 与莫来石反应生成 $CaAl_2Si_2O_8$ 和 Al_2O_3；当 SiC 加入量为 8%时，试样中只含有莫来石，未检测到 $CaAl_2Si_2O_8$ 和 Al_2O_3 等物相。其原因可能是，SiC 加入量过多时，其高温氧化产物 SiO_2 的生成量变大，而 SiO_2 与试样中的 Al_2O_3 及 CaO 在高温条件下反应生成了液相，当 MPC 冷却至室温后转化为玻璃相的形式存在于 MPC 之中，而试样 XRD 谱的背底中没有体现玻璃相的存在，其原因可能如下：1) 体系中生成玻璃相的量可能有限，致使其馒头峰较弱；2) 另外，莫来石的衍射峰很强，掩饰了非晶馒头峰的存在。

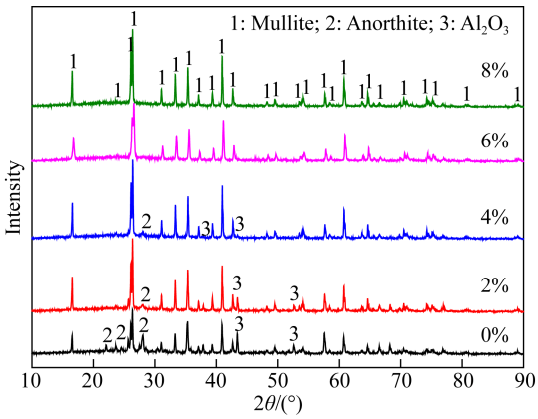


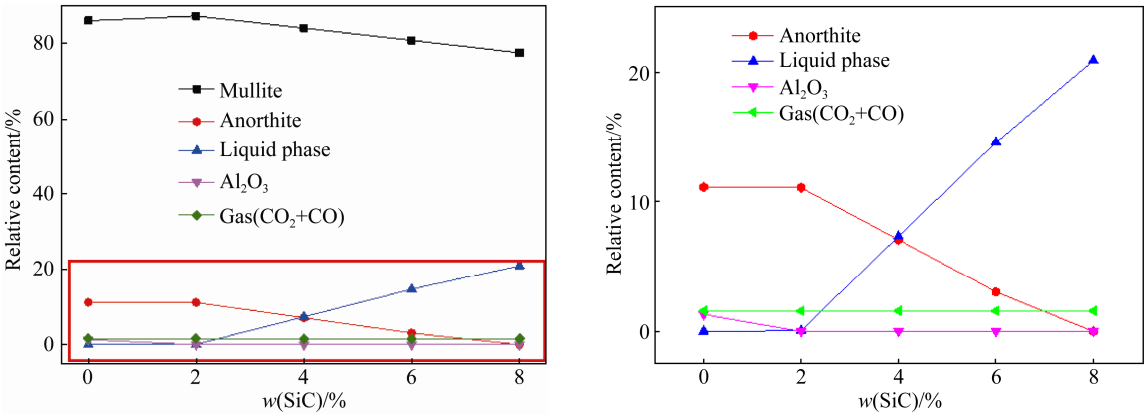
图 1 不同 SiC 加入量时所合成 MPC 的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of as-synthesized mullite porous ceramics sample with different contents of SiC and heated at 1 673 K for 2 h

采用 Factsage 软件计算了 $Al_6Si_2O_{13}$–SiC–$CaCO_3$ 反应体系在 1 673 K 时，各物相组成随 SiC 加入量的变化关系[19, 25]，结果如图 2 所示。由图 2 可知：随着 SiC 加入量的增加，反应体系中的 $CaAl_2Si_2O_8$ 的含量逐步下降，而莫来石的含量呈先增加后降低，同时液相量逐步增加。当 SiC 加入量为 8%时，反

应体系中的液相量达到最大；同时，莫来石、Al_2O_3 和 $CaAl_2Si_2O_8$ 的含量均降至最小，这与图 1 的结果相一致。SiC 加入量的增加，其氧化产物的量也会增加，进而促进了反应体系中液相量的生成。

图 3 为加入不同量 SiC 且经 1 673 K/2 h 烧结后所制备 MPC 的 SEM 照片。从图 3 可知，大气孔(图 3 中 *A* 处)和窗口小气孔(图 3 中 *B* 处)均匀的分布在制备的 MPC 试样中。随着 SiC 用量的上升，所制备 MPC 试样的平均孔径逐步降低。概括图 3 的结果统计了样品中大气孔和小气孔的平均孔径，

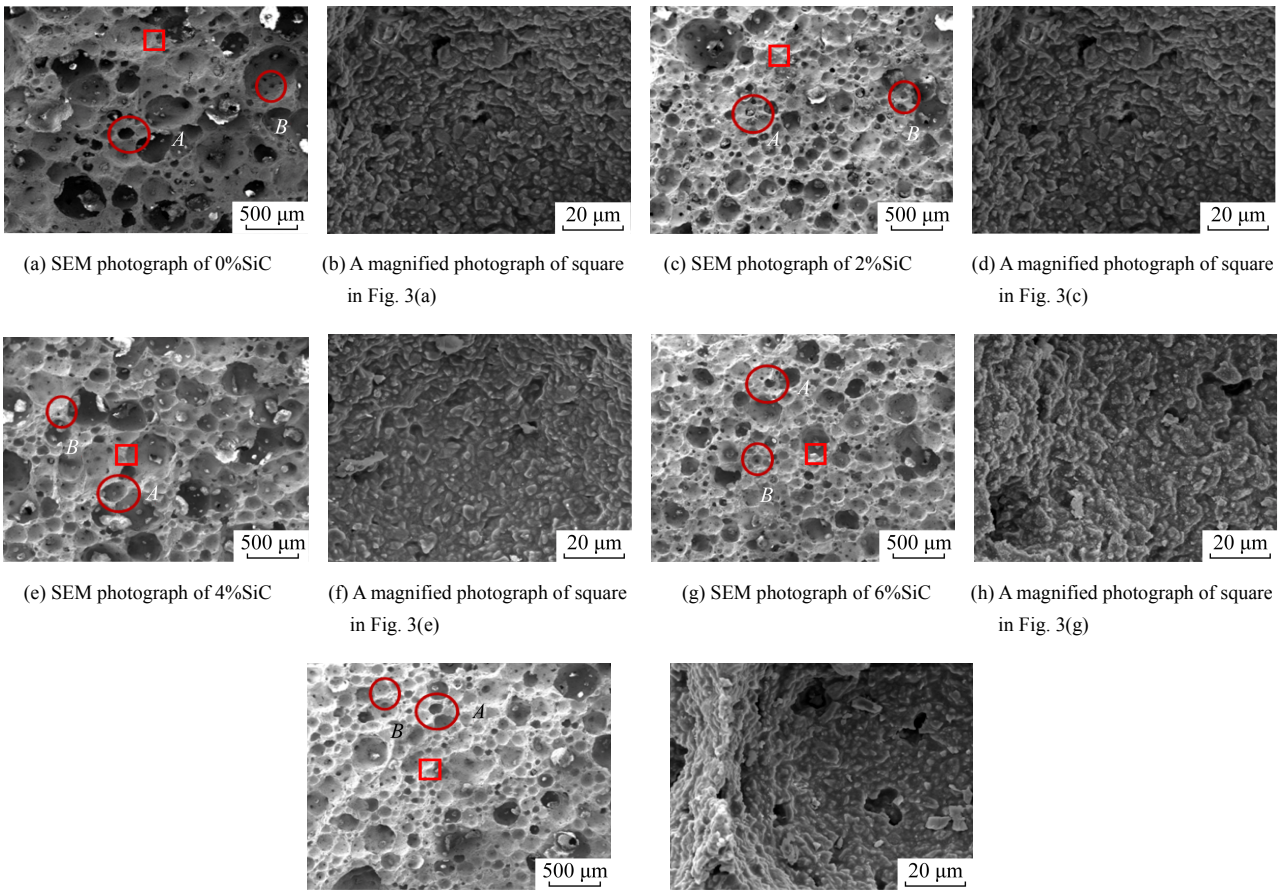


(a) Different contents of SiC　　(b) A magnified part in Fig.2(a)

w—Mass fraction.

图 2　SiC 加入量对莫来石–SiC–$CaCO_3$ 反应体系中各物相组成的影响

Fig. 2　Effect of SiC dosage on phase contents of the mullite–$CaCO_3$–SiC system



(a) SEM photograph of 0%SiC　(b) A magnified photograph of square in Fig. 3(a)　(c) SEM photograph of 2%SiC　(d) A magnified photograph of square in Fig. 3(c)

(e) SEM photograph of 4%SiC　(f) A magnified photograph of square in Fig. 3(e)　(g) SEM photograph of 6%SiC　(h) A magnified photograph of square in Fig. 3(g)

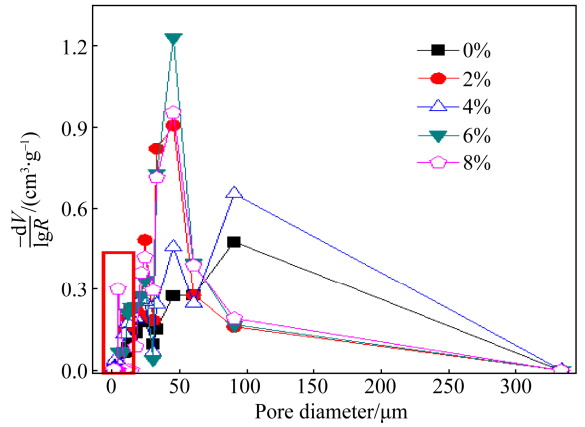
(i) SEM photograph of 8%SiC　(j) A magnified photograph of square in Fig. 3(i)

图 3　1 673 K 保温 2 h 不同 SiC 加入量时所制备 MPC 的 SEM 照片

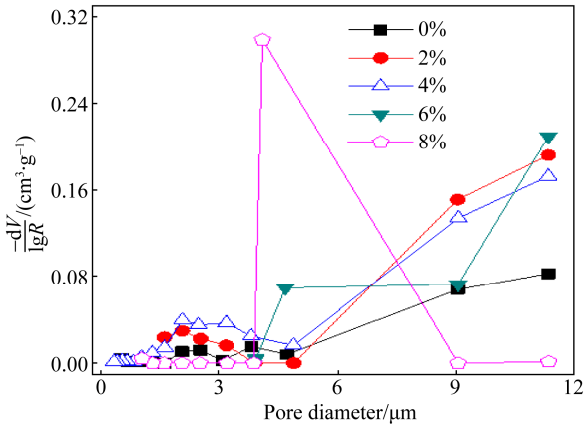
Fig. 3　SEM images of as-synthesized MPC with different contents of SiC and heated at 1 673 K for 2 h

结果表明随着 SiC 加入量的增加试样大孔(0%SiC：186.02 μm；2%SiC：164.03 μm；4%SiC：171.2 μm；6%SiC：162.7 μm；8%SiC：176.54 μm)未发生明显变化，而小孔(0%SiC：37.26 μm；2%SiC：29.98 μm；4%SiC：26.72 μm；6%SiC：26.31 μm；8%SiC：22.97 μm)的平均孔径呈逐步下降的趋势。其原因可能是：高温烧结过程中，SiC 的氧化产物 SiO_2 促进了陶瓷坯体中液相生成(图 2)，促进了坯体的烧结，使得试样的孔径减小，孔径分布变窄。

进一步采用压汞法对所制备 MPC 的孔径分布进行表征(图 4)。结果表明，所制备 MPC 试样的大孔孔径主要集中分布在 50~100 μm 之间，小孔孔径则主要集中在 0~12 μm 之间。随着 SiC 加入量由 0%增至 8%，试样中小孔(0~3 μm)的孔容呈先逐步增大后降低的趋势(0%SiC：0.003 7 $cm^3·g^{-1}$；2%SiC：0.092 $cm^3·g^{-1}$；4%SiC：0.15 $cm^3·g^{-1}$；6%SiC：0.007 $cm^3·g^{-1}$；8%SiC：0.008 $cm^3·g^{-1}$)；当 SiC 加入量为 4%时，小气孔的孔容最大。以下几方面的综合因素使得 MPC 的孔容先增大后减小：1) 在高温下，SiC 氧化产生的 CO 气体及 $CaCO_3$ 高温分解产生的 CO_2 气体在坯体烧结过程中具有造孔的作用；2) 在高温烧结过程中，SiC 的氧化产物 SiO_2 与 $CaCO_3$ 高温分解产物 CaO 促进了体系中液相的生成，加快了 MPC 的烧结进程，不仅使 MPC 气孔率变小，而且增加了小孔的孔容；3) 当 SiC 用量大于 6%时，体系中生成大量的液相，MPC 变得较为致密(图 3d~图 3e)，致使小孔孔容进一步降低。



(a) Different contents of SiC



(b) A magnified part in Fig. 4(a)

图 4 SiC 加入量不同时，MPC 的孔径分布曲线

Fig. 4 Pores size distributions of MPC with different contents of SiC

此外，采用氮气吸脱附法表征了所制备试样的介孔孔径(图 5)。结果表明，所制备样品在 5~6 nm 的范围内有 1 个明显的峰，对应于试样中的介孔结构。随着 SiC 加入量的升高(0~8%)，所制备多孔陶瓷的其比表面积分别为 0.499、0.454、0.444、0.448 和 0.343 m^2/g。此外，随着 SiC 加入量的上升，MPC 试样的介孔孔容以 0.002 5 $cm^3·g^{-1}$ 下降为 0.001 6 $cm^3·g^{-1}$，其原因可能是体系中液相量的过多生成促进了试样的烧结。

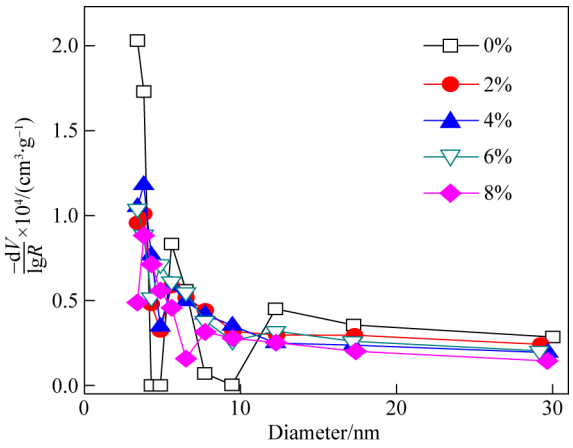


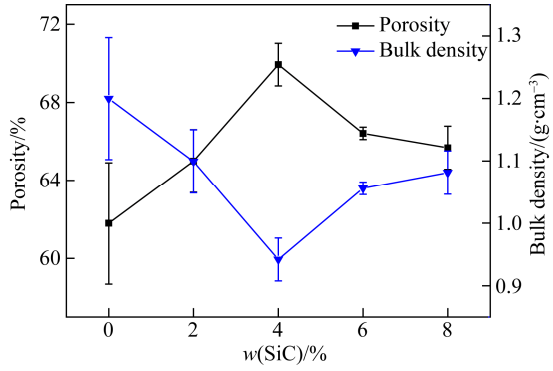
图 5 不同 SiC 加入量时所制备 MPC 的孔径分布曲线

Fig. 5 Mesopore size distributions of as–synthesized MPC with different contents of SiC

2.2 SiC 加入量对 MPC 气孔率、体积密度及力学性能的影响

图 6 为 SiC 加入量对所制备 MPC 试样的体积密度及气孔率的影响。由图 6 可知，随着 SiC 加入量的增加，所制备 MPC 试样的体积密度先减小后增大，其气孔率先增高后降低。当 SiC 用量为 4%时，所制备 MPC 试样的体积密度最小，约为 0.94 $g·cm^{-3}$；此时，气孔率最大，约为 69.9%。MPC 的气孔率先增加后下降的原因可能如下：SiC 加入量较低时(<4%)，高温烧结时，试样中 4%的 $CaCO_3$ 分解产生的 CO_2 气体和 SiC 氧化后产生的 CO 气体起到造孔的作用，使得 MPC 的体积密度下降，从

而提高了 MPC 的气孔率。但是随着 SiC 的加入量进一步增加至 6%~8%时，体系中 SiC 的高温氧化产物 SiO_2 的含量也进一步升高，导致液相含量的增加，从而促进了坯体的烧结，导致 MPC 的气孔率又呈现降低的趋势。



w—Mass fraction.

图 6　SiC 加入量不同时所制备 MPC 的气孔率和体积密度

Fig. 6　Effect of SiC contents on the bulk density and porosity of MPC heated at 1 673 K for 2 h

进一步计算所制备 MPC 试样中闭气孔的含量(图 7)。结果表明，随着 SiC 加入量由 0%增至 8%，MPC 试样的闭气孔率由 1.2%增至 2.7%，呈逐步增加的趋势。其原因可能为：1) 在高温烧结过程中，$CaCO_3$ 分解成 CaO 和 CO_2，SiC 氧化生成 SiO_2 以及 CO 气体，CaO 与 SiO_2 以及 Al_2O_3 反应生成低熔点液相并将高温下生成的气体包裹在其中从而形成封闭气孔；2) SiC 粉体的加入量越多，体系中的液相量也越多(图 2)，导致试样的闭气孔率也逐步升高。

当 SiC 的加入量不同时，所制备 MPC 试样的常温耐压及抗折强度如图 8 所示。结果表明，随着

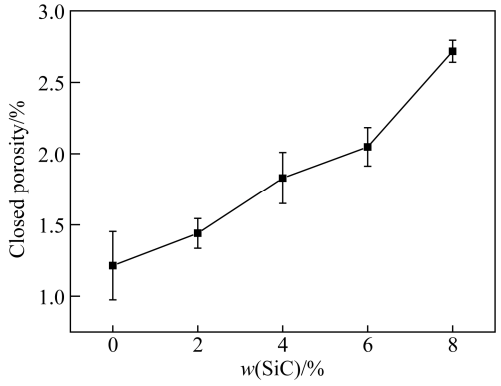


图 7　SiC 加入量对 1 673 K 烧结 2 h 所合成 MPC 的闭气孔率的影响

Fig. 7　Effect of SiC contents on the closed porosity of MPC fired at 1 673 K for 2 h

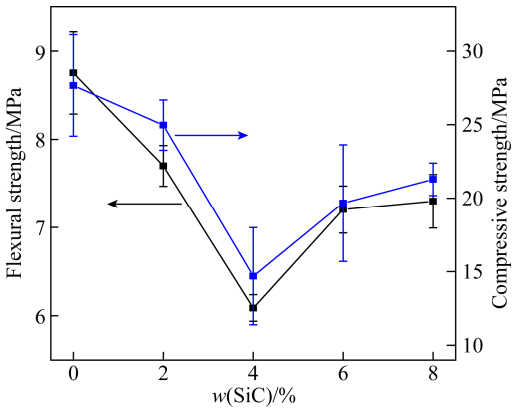


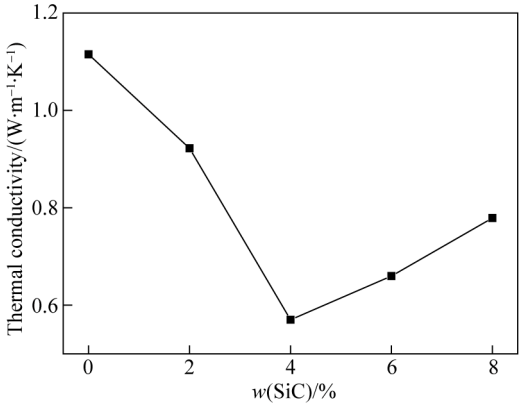
图 8　不同 SiC 加入量时所制备 MPC 的力学性能

Fig. 8　Mechanical strength of MPC prepared with various contents of SiC

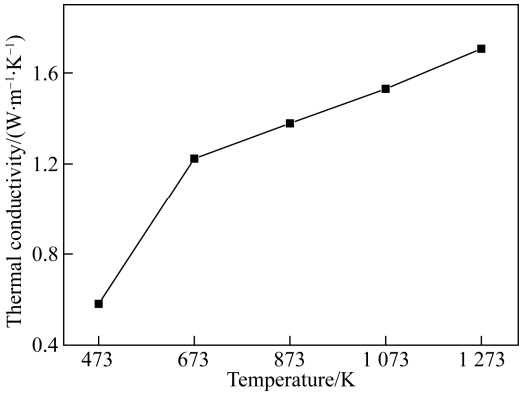
SiC 加入量的增加，MPC 的抗折和耐压强度均呈先降低后增加的趋势。当 SiC 的用量为 4%时，试样的常温抗折和耐压强度分别为 6.2 MPa 和 14.7 MPa，其原因同气孔率变化(图 6)。

2.3　SiC 加入量对 MPC 导热系数的影响

采用瞬态平面热源法来表征所制备的 MPC 试样的导热系数(图 9a)。结果表明，随着 SiC 加入量由 0%增至 8%，试样在 473 K 时的导热系数呈先降低后增加的趋势。当 SiC 加入量为 4%时，试样在 473 K 的测试温度下的导热系数达到最低，为 0.57 $W·m^{-1}·K^{-1}$。随测试温度的升高试样(SiC 加入量为 4%时)的导热系数由 473 K 时的 0.57 $W·m^{-1}·K^{-1}$ 升高至 1 273 K 时的 1.71 $W·m^{-1}·K^{-1}$(图 9b)。造成这种现象的原因可能为：1) 当测试温度一定时，随着 SiC 加入量由 0%增至 4%时，试样的气孔率及闭气孔率逐步增加(图 6~图 7)，其体积密度相应下降(图 6)，导致试样的热导率降低；而当 SiC 含量从 4%增至 8%时，试样的气孔率降低、体积密度增加(图 6)，使得试样的热导率又增加。2) 当 SiC 添加量为 4%时，MPC 试样的气孔率最大，其孔径分布均匀且平均孔径小，同时其中还含有大量的微小气孔以及一定数量的介孔结构，另外，试样的闭气孔率也较高，这些因素的协同作用使得所制备 MPC 的隔热性能最佳。3) 当测试 SiC 加入量为 4%的 MPC 试样在不同温度下的导热系数时，由于此时试样的气孔率是固定的，热传导对导热系数的贡献基本相同；但测试温度的升高会使气孔内部的热辐射和热对流加剧，最终导致试样的导热系数随测试温度的升高而增加(图 9b)。



(a) Different contents of SiC at 473 K



(b) Different temperatures

图 9 不同 SiC 加入量时所合成 MPC 的导热系数和 SiC 加入量为 4%时不同测试温度下 MPC 的导热系数

Fig. 9 Thermal conductivity of MPC synthesized with different contents of SiC at 473 K and thermal conductivity of MPC measured at different temperatures

3 结论

以莫来石粉体为原料，以 $CaCO_3$ 和 SiC 为造孔剂，采用发泡–添加造孔剂法合成了具有多级孔结构的 MPC。引入适量的 SiC 粉体有利于制备闭气孔率较高的 MPC，其原因是，在高温下，$CaCO_3$ 分解成 CaO 和 CO_2，SiC 的氧化成 SiO_2 和 CO 气体，CaO 与 SiO_2 的生成能够促进高温液相的生成，同 MPC 中的 CO 和 CO_2 气体会被液相包裹从而形成封闭气孔。当固含量为 52%、CMC 加入量 0.1%、IB 加入量为 0.5%、TLS 加入量为 0.4%及 $CaCO_3$ 加入量为 4%时，试样加入 0~8%的 SiC 可制得具有 1.2%~2.7%闭气孔率的 MPC。当 SiC 加入量为 4%时，所制备 MPC 试样的气孔率约为 69.9%，其抗折和耐压强度分别为 6.2 和 14.7 MPa，同时其导热系数达到最低，约为 0.57 $W·m^{-1}·K^{-1}$。

参考文献:

[1] 韩磊, 邓先功, 王军凯, 等. SiC 复相多孔陶瓷的研究进展[J]. 耐火材料, 2017, 51(3): 227–234.
HAN Lei, DENG Xiangong, WANG Junkai, et al. Naihuo Cailiao (in Chinese), 2017, 51(3): 227–234.

[2] 李发亮, 段红娟, 陈子瑛, 等. 原位合成莫来石晶须–氧化铝复合体系[J]. 耐火材料, 2017, 51(1): 13–16.
LI FaLiang, DUAN Hongjuan, CHEN Ziying, et al. Naihuo Cailiao (in Chinese), 2017, 51(1): 13–16.

[3] 王龙庆, 冯涛, 王刚, 等. 发泡法–溶胶凝胶成型工艺制备莫来石晶须[J]. 耐火材料, 2018, 52(5): 326–333.
WANG Longqing, FENG Tao, WANG Gang, et al. Naihuo Cailiao (in Chinese), 2018, 52(5): 326–333.

[4] DENG X G, WANG J K, ZHANG H J, et al. Effects of firing temperature on the microstructures and properties of porous mullite ceramics prepared by foam–gelcasting[J]. Adv Appl Ceram, 2016, 115(4): 204–209.

[5] DENG X, WANG J, LIU J, et al. Low cost foam–gelcasting preparation and characterization of porous magnesium aluminate spinel ($MgAl_2O_4$) ceramics[J]. Ceram Int, 2016, 42(16): 18215–18222.

[6] LIU R, FANG Z, SU W, et al. Impregnation of porous mullite with Na_2SO_4 phase change material for thermal energy storage[J]. Sol Energ Mat Sol C, 2015, 134(1): 268–274.

[7] CHEN M, Li Z, DONG Y, et al. Waste–to–resource strategy to fabricate highly porous whisker-structured mullite ceramic membrane for simulated oil-in-water emulsion wastewater treatment[J]. Acs Sustain Chem Eng, 2016, 4(4): 2098–2106.

[8] LI C, CHAO B, YAO H, 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.

[9] 苗正, 李楠, 鄢文. 原料配比对钙长石–莫来石复相多孔陶瓷显微结构与性能的影响[J]. 耐火材料, 2015(4): 259–263.
MIAO Zheng, LI Nan, YAN Wen. Naihuo Cailiao (in Chinese), 2015, 49(4): 259–263.

[10] DENG X, WU Y, WEI T, et al. Preparation of elongated mullite self–reinforced porous ceramics[J]. Ceram Int, 2018, 44(7): 7500–7508.

[11] DENG X, RAN S, HAN L, et al. Foam–gelcasting preparation of high–strength self-reinforced porous mullite ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2017, 37(13): 4059–4066.

[12] GE S, LIN L, ZHANG H, et al. Synthesis of hierarchically porous mullite ceramics with improved thermal insulation *via* foam–gelcasting combined with pore former addition[J]. Adv Appl Ceram, 2018, 117(8): 493–499.

[13] HAN L, LI F, HUANG L, et al. Preparation of Si_3N_4 porous ceramics *via* foam–gelcasting and microwave-nitridation method[J]. Ceram Int, 2018, 44(15): 17675–17680.

[14] HAN L, WANG J, LI F, et al. Low-temperature preparation of Si_3N_4 whiskers bonded/reinforced SiC porous ceramics *via* foam–gelcasting combined with catalytic nitridation[J]. J Eur Ceram Soc, 2018, 38(4): 1210–1218.

[15] DENG X, WANG J, LIU J, et al. Preparation and characterization of porous mullite ceramics via foam–gelcasting[J]. Ceram Int, 2015, 41(7): 9009–9017.

[16] 葛胜涛, 邓先功, 毕玉保, 等. 多级孔材料研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(13): 2195–2213.
GE Shengtao, DENG Xiangong, BI Yubao, et al. Cailiao Daobao (in

Chinese), 2018, 32(13): 2195–2213.
[17] DAVIS M E. Ordered Porous materials for emerging applications[J]. Nature, 2010, 33(40): 245–245.
[18] 李进, 邓哲哲, 涂晓诗, 等. 多孔陶瓷的制备方法及其应用[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(2): 138–143.
LI Jin, DENG Zhezhe, TU Xiaoshi, et al. J Ceram (in Chinese), 2017, 38(2): 138–143.
[19] 陈敏, 王楠, 于景坤, 等. 碳化硅添加剂对含碳钙锆复合耐火材料性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005(3): 256–259.
CHEN Min, WANG Nan, Yu Jingkun, et al. J Northeastern Univ:Nat Sci(in Chinese), 2005(3): 256–259.
[20] 徐晓虹, 张银凤, 吴建锋, 等. 烧结助剂对堇青石–莫来石复相陶瓷的致密化和烧结特性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(12): 1748–1759.
XU Xiaohong, ZHANG Yinfeng, WU Jianfeng, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(12): 1748–1759.
[21] 杨赞中, 王涵, 王永在, 等. 抛光砖废渣复合发泡法制备闭孔泡沫陶瓷[J]. 材料导报, 2017(20): 122–126.
YANG Zanzhong, WANG Han, WANG Yongzai, et al. Cailiao Daobao (in Chinese), 2017(20): 122–126.
[22] 邓先功, 韦婷婷, 冉松林, 等. 发泡–注凝成型法制备自结合莫来石多孔陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(12): 1803–1809.
Deng Xiangong, Wei Tingting, Ran Songlin, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(12): 1803–1809.
[23] ZHANG R, YE C, HOU X, et al. Microstructure and properties of lightweight fibrous porous mullite ceramics prepared by vacuum squeeze moulding technique[J]. Ceram Int, 2017, 2016, 42(13): 14843–14848.
[24] LEI Y, MA B, QIANG Z, et al. Preparation and properties of mullite-bonded porous fibrous mullite ceramics by an epoxy resin gel–casting process[J]. Ceram Int, 2017, 43(7): 5478–5483.
[25] 折媛, 巨建涛, 郭艳萍, 等. 基于 KTH 模型的 $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO$ 渣系成分优化研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(12): 3166–3170.
SHE Yuan, JU Jiantao, GU Yanping, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2014, 33(12): 3166–3170.

※　※　※　※　※　※　※　※　※　※　※



吴文浩，武汉科技大学材料科学与工程硕士研究生，研究方向为多孔陶瓷的制备及表面修饰改性。所在课题组研究项目包括：非氧化物复合耐火材料及高温性能、多孔陶瓷表面改性及功能化、纳米高效催化剂制备及性能、材料基因组计算及材料设计等。



张海军，武汉科技大学耐火材料与冶金国家重点实验室教授，博士生导师。中国冶金过程物理化学学会以及中国工程陶瓷学会的理事，Interceram、China’s Refractories 及耐火材料杂志编委。先后获得湖北省“楚天学者”特聘教授、湖北省有突出贡献中青年专家、中国金属学会青年冶金先进工作者、河南省杰出青年科学基金及武汉市黄鹤英才计划等荣誉称号。团队入选湖北省自然科学基金创新群体和湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队。先后主持和参与国家“九五”科技攻关、国家 973 预研专项、863 重点项目、国家自然科学基金等耐火材料重大应用基础研究项目及其他科研课题 30 余项。在国内外学术刊物上发表研究论文 380 余篇，SCI 收录 200 余篇。主要研究方向为高技术陶瓷与耐火材料、纳米材料。