

天然矿物低成本制备多孔陶瓷支撑体

王 峰¹, 贺智勇¹, 谢志鹏², 周士杰³

(1. 中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081; 2. 清华大学材料学院, 北京 100084, 3. 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 陶瓷支撑体是多孔陶瓷膜应用的基础。对于传统陶瓷支撑体(如氧化铝), 昂贵的原料价格及较高的烧结成本限制了其进一步应用。因此, 选用合适的天然矿物原料来实现陶瓷支撑体的低成本制备成为当前研究重点。本工作以高岭土、滑石、碳酸钙为原料, 制备出系列多孔陶瓷支撑体。采用热膨胀仪、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、压汞仪、万能试验机对坯体的烧结特性以及多孔陶瓷支撑体的物相组成、显微结构、孔径尺寸分布、抗弯强度和耐酸碱腐蚀性进行了研究。结果表明: 坯体具有优良的低温烧结特性, 通过化学反应烧结机制实现了多孔陶瓷支撑体的制备。烧结温度在 1 000~1 200 °C 间较为适宜, 所得支撑体的显微结构均匀, 孔径呈单峰分布, 开口气孔率、平均孔径尺寸、抗弯强度、0.1 MPa 气体压力差下氮气通量分别为 49.8%~49.4%、1.09~1.83 μm 、40.57~28.85 MPa、119~340 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 同时具有良好的耐碱腐蚀性能。

关键词: 天然矿物; 多孔陶瓷支撑体; 烧结特性; 显微结构; 氮气通量

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)06-1566-06

网络出版时间: 2022-05-30



Low-cost Preparation of Porous Ceramic Supports Using Natural Minerals

WANG Feng¹, HE Zhiyong¹, XIE Zhipeng², ZHOU Shijie³

(1. China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The base application of porous ceramic membrane is ceramic support. For conventional ceramic supports (such as alumina), the expensive raw materials and high sintering cost both restrict their applications. Therefore, the low-cost preparation of ceramic support with natural minerals has attracted more attention. In this paper, a series of porous ceramic supports were fabricated with kaolin clay, talc and calcium carbonate as raw materials. The sintering characteristic of the green body was analyzed by thermal expansion instrument. The phase composition, micro-structure, pore size distribution and bending strength were characterized by X-ray diffractometer, scanning electron microscope, mercury porosimeter and universal testing machine. The acid and alkali corrosion resistances of the supports were also investigated. The results indicate that the obtained green body exhibits a superior low-temperature sintering characteristic. The porous supports were prepared *via* chemical reaction sintering. The suitable sintering temperatures of the supports are in the range of 1 000–1 200 °C. The obtained supports have a homogeneous micro-structure and a unimodal pore size distribution. The porous supports prepared at 1 000–1 200 °C have the open porosities of 49.8%–49.4%, the average pore sizes of 1.09–1.83 μm , the bending strengths of 40.57–28.85 MPa, the nitrogen gas flux of 119–340 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ under a trans-membrane pressure of 0.1 MPa and a superior alkali resistance as well.

Keywords: natural mineral; porous ceramic support; sintering characteristic; microstructure; nitrogen gas flux

多孔陶瓷膜由于具有分离效率高、化学稳定性好、耐高温及环境友好等优点^[1-3], 在食品、医药、化工、冶金, 特别是水处理及废气治理等环保领域

发挥着越来越重要的作用^[4-7]。

对于多孔陶瓷膜, 支撑体是其应用关键^[8]。当前商用支撑体材质一般为氧化铝材质, 生产成本较

收稿日期: 2021-08-04。 修订日期: 2021-10-14。

第一作者: 王 峰(1983—), 男, 博士, 高级工程师。

Received date: 2021-08-04. Revised date: 2021-10-14.

First author: WANG Feng (1983—), Ph.D., Senior Engineer.

E-mail: haw16181618@163.com

高,主要是由于氧化铝原料价格较高同时制备时也需要较高的烧结温度^[9-10]。因此,寻找价格低廉原料、开展新型多孔陶瓷支撑体的低成本制备成为当前研究重点。

在自然界中有储量丰富的天然矿物且价格低廉,采用天然矿物合成多孔陶瓷支撑体吸引了各国研究学者的注意并开展了相关研究。Ghouil 等^[11]以天然黏土和方解石为原料,采用挤出成型工艺制备的坯体于 1 250 ℃ 烧结得到了气孔率为 50%、孔径尺寸为 4 μm 的多孔陶瓷支撑体,同时具有良好的截留性能。Fakhfakh 等^[12]以突尼斯黏土与高岭土为原料,采用挤出成型工艺制备的坯体于 1 000 ℃ 烧结 1 h,得到了气孔率为 38%、平均孔径为 1.04 μm、抗弯强度为 19 MPa 的多孔陶瓷支撑体,对浓度为 0.5 g/L 牛血清蛋白溶液截留率约为 13%、对水的最高渗透速率为 245 L·h⁻¹·m⁻²·bar⁻¹。Monash 等^[13]以矿物(高岭土、叶蜡石、长石、黏土、石英、碳酸钙)为原料,采用半干压成型制备的坯体于 950 ℃ 烧结 6 h,得到了气孔率为 44%、抗弯强度为 28 MPa、平均孔径为 1.01 μm,并具有良好的耐酸碱腐蚀性能的多孔陶瓷支撑体。Zhou 等^[14]以高岭土和白云石为原料,采用挤出成型工艺制备的坯体于 1 250 ℃ 烧结,得到了气孔率为 44%、平均孔径尺寸为 4.7 μm、抗弯强度为 47.6 MPa、水渗透率为 10.76 m³·m⁻²·h⁻¹·bar⁻¹,同时具有良好的耐酸碱腐蚀性能的多孔陶瓷支撑体。通过以上报道可以发现,对于多孔陶瓷支撑体制备用矿物的选取主要有 2 点原则:1) 选取主要化学成份为氧化铝、氧化硅的矿物,以保证制备支撑体的化学稳定性;2) 选取含有碳酸钙、碳酸镁等化学成分的矿物作为成孔剂,用来调节控制支撑体的气孔率。因此,因地制宜选取矿物种类,加强其烧结特性的研究,对于新型多孔陶瓷支撑体的低成本开发与制备具有重要的理论意义与实际应用价值。

本工作以我国储量丰富的高岭土、滑石为主要原料,以碳酸钙为成孔剂,探讨低温制备多孔陶瓷支撑体的可行性。通过研究坯体的烧结特性,分析了不同烧结温度对多孔陶瓷支撑体显微结构、孔径尺寸分布及基本性能的影响,期望能为天然矿物低成本制备多孔陶瓷支撑体提供理论参考。

1 实验

1.1 原料

以商用高岭土,滑石粉,碳酸钙[采用 XRF-1 800 型 X 射线荧光分析仪测试其化学成分,在 1 150 ℃

烧结 1 h 后测试滑石的烧失量(LOI),数据见表 1],5% (质量分数)聚乙烯醇溶液。

表 1 原料化学成分

Table 1 Chemical compositions of the raw materials w/%

Raw materials	SiO ₂	MgO	CaO	CO ₂	Al ₂ O ₃	Others*	LOI
Kaolin	59.56		0.13		37.14	3.17	
Talc	57.67	30.21	3.78		0.03	0.38	7.93
CaCO ₃	0.03		55.92	43.94		0.11	

*Others represented the oxide impurities in raw materials, such as ZnO, K₂O, TiO₂, etc in kaolin, Fe₂O₃, Cr₂O₃, et al in talc, Fe₂O₃, et al in calcium carbonate. In addition, the contents of the bound water in raw materials were not measured; w—Mass fraction.

1.2 样品制备

高岭土、滑石、碳酸钙按质量比 2:1:1 称取后放入球磨罐中,以氧化锆球与水为研磨介质,在行星球磨机上混合 2 h 后进行干燥(混合粉体粒度分布曲线采用 Mastersizer 2 000 型激光粒度分析仪测得,见图 1)。将干燥后所得粉体置于玛瑙研钵内,添加聚乙烯醇溶液后研磨均匀,然后在电动压片机上压制直径为 20 mm、厚度为 2.0~2.3 mm 的圆片状坯体及尺寸为 8 mm×(4.0~4.3) mm×55 mm 的条状坯体,成型压力均为 80 MPa。

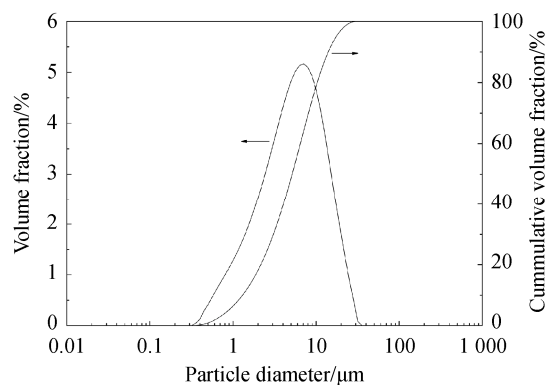


图 1 混合粉体粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution curves of the mixture

坯体干燥后,放入马弗炉中于 850~1 200 ℃ 温度区间内每隔 100 ℃ 选择 1 个烧结温度(其中 850~900 ℃ 间隔 50 ℃)并保温 2 h,升温速率为 2 ℃/min;然后以 5 ℃/min 降至 500 ℃ 后自然冷却至室温。

1.3 样品表征

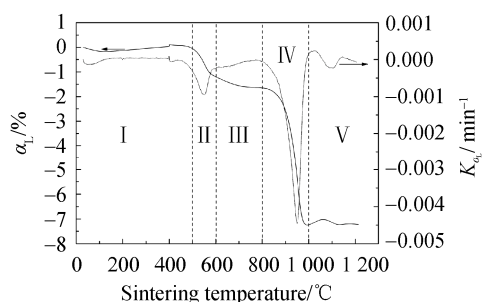
采用 DIL 402PC 型热膨胀仪测定成型坯体从室温~1 200 ℃ 的烧结过程。采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪分析烧结样品物相组成,工作电压为 40 kV,工作电流为 40 mA,铜靶($\lambda=0.154\ 05\text{ nm}$),扫描方式连续扫描,扫描速率为 4(°)/min。采用

LEO-1 530 型场发射电子显微镜观察烧结样品显微结构。通过测量坯体烧结前后直径尺寸的变化计算其烧结线性收缩率;依据 Archimedes 原理,采用煮沸法测定烧结样品气孔率。采用 Autopore IV 9 520 型压汞仪测定烧结样品孔径尺寸分布。依据文献[15]的表征方法,测定烧结样品氮气通量。采用 AG-2 000 型万能实验机测定烧结样品三点弯曲强度,测试样品尺寸 3 mm×4 mm×36 mm,跨距 30 mm,加载速率 0.5 mm/min。依据烧结样品室温下在酸(10%硫酸溶液)、碱(1%氢氧化钠溶液)中的质量分数来表征其耐酸碱腐蚀性能。

2 结果与讨论

2.1 样品烧结特性及物相转变

图 2 为成型坯体样品的烧结特性曲线。由图 2 可以看出,坯体在升温过程(室温~1 200 °C)中分为 5 个阶段:



α_L is linear shrinkage fraction; K_{α} is linear shrinkage rate; $K_{\alpha} = \left(\frac{d_L}{d_0} \right) / L_0$.

图 2 坯体烧结特性曲线

Fig. 2 Sintering characteristic of the green body

1) 室温~500 °C: 主要是样品中自由水、结合水的挥发及黏结剂的分解。样品尺寸略有增加,这主要是由于样品受热膨胀所引起的。

2) 500~600 °C: 随着温度升高,样品发生快速收缩,这主要是由于高岭土晶格水的快速排除所导致的,此时高岭土中的高岭石分解生成偏高岭石^[16]。

3) 600~800 °C: 样品尺寸继续收缩,但变化不大。高岭土会继续发生脱水反应,但速率变缓,直至 800 °C 接近停滞。同时, CaCO_3 在此温度范围内也会发生热分解反应。这 2 个反应均会导致样品发生收缩现象。另外, CaCO_3 热分解时产生的气体在溢出过程中会在样品内形成贯通通道,有助于烧结过程中气孔的形成。

4) 800~1 000 °C: 样品发生了急剧收缩(特别是在 900 °C 以后)。高岭土内部结构的变化、脱水后产物(偏高岭石)的相变^[16]以及样品中各组分之间的烧结反应是导致样品收缩的主要原因。

5) 1 000~1 200 °C: 1 000 °C 以后,样品快速的烧结收缩结束,收缩率趋于稳定。在 1 000~1 200 °C 之间,可以观测到样品有轻微的膨胀效应,说明在此区间有新物质生成,同时伴有一定的体积膨胀。

图 3 为不同烧结温度制备多孔陶瓷支撑体的 XRD 谱。由图 3 可以看出,在 850 °C 时有滑石及 CaO 相存在,说明在此温度之前主要是以原料的分解反应为主;当烧结温度升至 900 °C 时,有新物相钙铝黄长石的生成,随着烧结温度的升高,钙铝黄长石生成量逐渐增加;当烧结温度提高至 1 100 °C,钙铝黄长石开始向钙长石转变,并在 1 100~1 200 °C 之间占据主导地位;在 1 200 °C 时,样品主晶相为钙长石,同时还有镁铝尖晶石(MgAl_2O_4)、透辉石($\text{Ca}(\text{MgAl})(\text{SiAl})_2\text{O}_6$)、顽火辉石(MgSiO_3)相的存在。钙长石生成过程中涉及的主要化学反应如下^[17]:

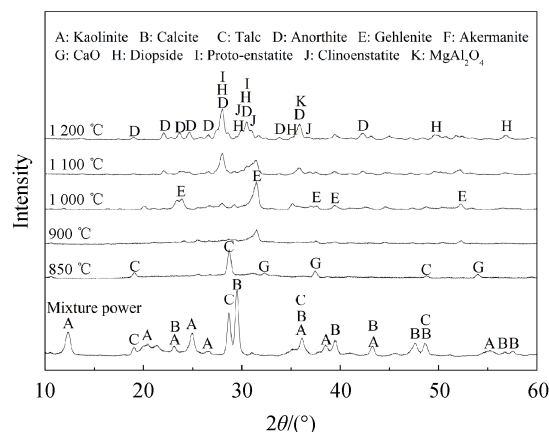
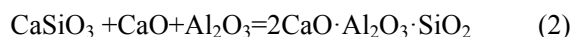


图 3 不同烧结温度制备支撑体的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of the supports prepared at different sintering temperatures

2.2 显微结构

图 4 为不同烧结温度下制备多孔陶瓷支撑体的显微结构。由图 4 可以看出,在 850 °C 时,可见片状颗粒的存在,对照图 3 可知,片状颗粒应该是还未分解完全的滑石。随着烧结温度的升高,片状颗粒逐渐消失,开始发生烧结,颗粒间相互连接逐渐形成一个整体。当烧结温度升至 1 000 °C 时,片状颗粒基本消失,形成孔的尺寸明显增大,在孔径通

道壁上有晶粒析出。随着烧结温度的进一步升高, 孔径形成趋于完整, 多孔通道趋于圆滑。当烧结温度升至 1 200 °C 时, 可见明显大晶粒的存在, 原有的细小颗粒及微小气孔已消失, 贯通的多孔通道更加光滑完整。结合坯体烧结特性曲线可知, 对于高岭土-滑石-碳酸钙体系的孔径形成过程, 颗粒间堆

积孔隙及碳酸钙分解产生二氧化碳溢出时所产生的多孔通道是一次成孔过程, 此时孔径尺寸相对较小 (850 °C); 随着烧结温度的升高, 坯体中各组元之间发生的化学反应烧结机制使得孔径尺寸增大, 同时形成光滑的贯通通道是二次成孔过程 (900~1 200 °C)。

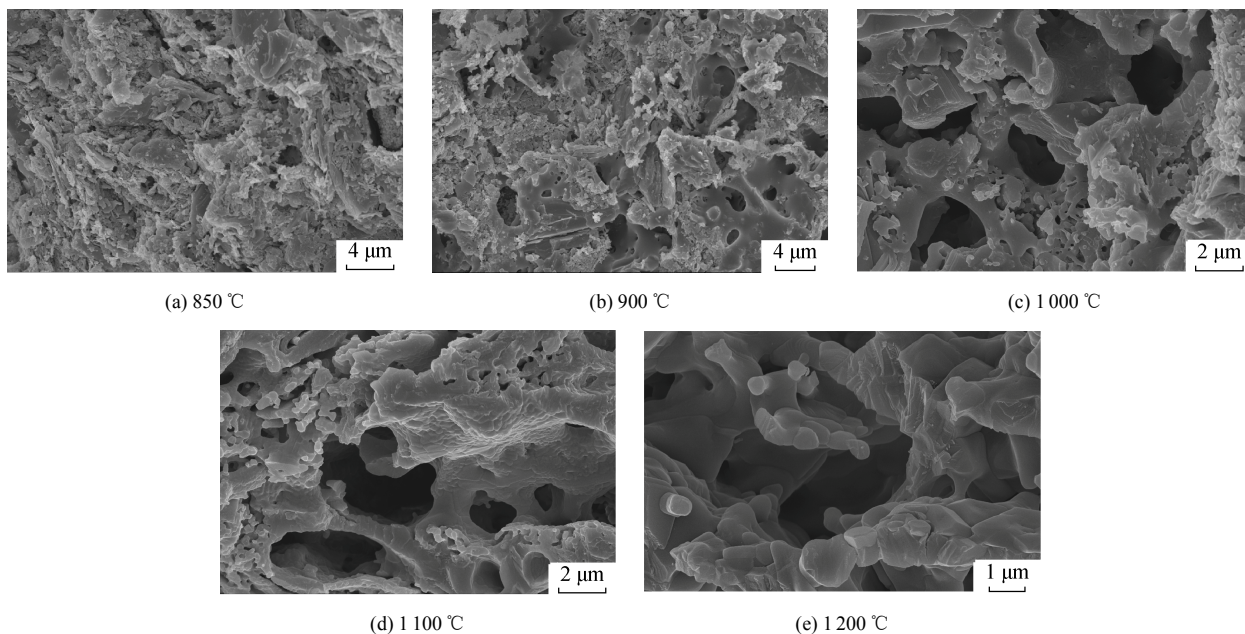


图 4 不同烧结温度制备支撑体的 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrographs of the supports prepared at different sintering temperatures

2.3 线性收缩率与显气孔率

图 5 为多孔陶瓷支撑体的收缩率与开口气孔率随烧结温度变化曲线。由图 5 可以看出, 样品的收缩率随烧结温度增加而增大, 在 850~900 °C 之间时, 烧结收缩率快速增加, 1 000 °C 以后变化则趋于平缓, 与烧结特性曲线分析略有出入, 主要是烧结制度不同所引起的样品收缩提前/延迟所致。

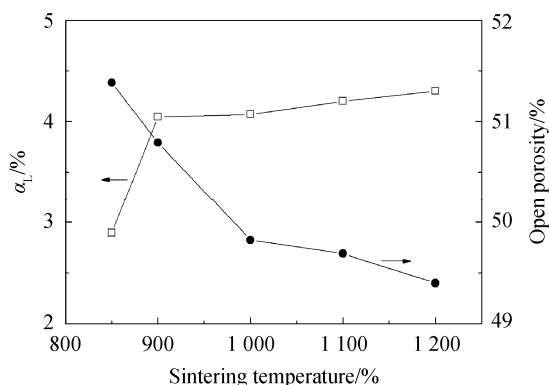


图 5 不同烧结温度制备支撑体的线性收缩率与开口气孔率
Fig. 5 Linear shrinkage fraction and open porosity of the supports prepared at different sintering temperatures

900 °C 以前样品收缩以烧结收缩占据主导地位。900 °C 以后, 随着烧结温度的升高, 样品中依次有钙铝黄长石及钙长石的生成。对照烧结特性曲线 (图 2) 可知, 这些物质在生成过程中伴随有一定的体积膨胀, 这与烧结收缩具有相互抵消作用, 因此, 样品烧结收缩趋于平缓。样品开口气孔率随烧结温度的升高略有降低, 这主要是由于烧结致密化作用所引起的。在 850、900、1 000、1 100、1 200 °C 制备得到多孔陶瓷支撑体的开口气孔率分别为 51.4%、50.8%、49.8%、49.7%、49.4%。

2.4 孔径尺寸分布

图 6 为多孔陶瓷支撑体的孔径尺寸分布随烧结温度变化图。由图 6 可以看出, 随着烧结温度的升高, 样品的平均孔径尺寸呈现增大趋势。孔径尺寸分布变化与烧结过程中化学反应、烧结机制及孔径形成机制密切相关。在 850 °C 制备得到的支撑体孔径尺寸较小且分布范围较宽。孔通道主要是由高岭土的分解物质、滑石及氧化钙等颗粒发生颈部烧结而形成的, 由于这些物质颗粒较为细小, 因此, 孔径尺寸较小。当烧结温度为 900 °C 时, 钙铝黄长石

开始生成,同时颗粒间小气孔发生扩散聚集效应成大气孔,导致样品的孔径分布呈双峰分布,孔径平均尺寸开始向大尺寸(右)偏移。在 1 000~1 100 °C 范围内,样品孔径平均尺寸呈现典型的单峰分布,孔径分布范围较窄,孔径尺寸变化也不大。研究表明^[3, 18],在多孔陶瓷支撑体制备过程中,当新物质生成伴随着体积膨胀时,这种膨胀机制能与烧结收缩相抵消,同时在一定程度上也会影响孔径尺寸的变化。对应烧结特性曲线及物相分析可知,在 1 000~1 100 °C 之间,钙长石在生成时伴随着一定的体积膨胀,体积膨胀效应在一定程度上能够抵消烧结带来的收缩效应,同时也会抵消部分气孔扩散聚集效应带来的孔径尺寸增加,因此孔径尺寸基本没有变化。随着烧结温度的升高(1 200 °C),钙长石生成反应基本结束,气孔扩散聚集效应占据主导地位,因此样品孔径分布开始宽化,同时平均孔径尺寸增加。在 850~1 200 °C 范围内制备得到的支撑体的平均孔径尺寸分别为 0.13、0.54、1.09、1.10、1.83 μm 。

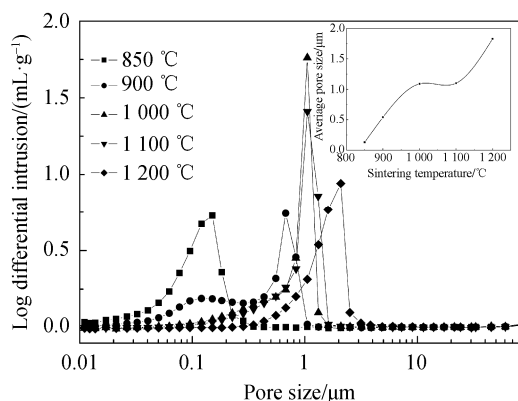


图 6 不同烧结温度制备支撑体的孔径尺寸分布

Fig. 6 Pore size distributions of the supports prepared at different sintering temperatures

2.5 气体渗透性能、抗弯强度及化学稳定性

图 7 为不同烧结温度下制备多孔陶瓷支撑体的氮气通量与气体压力差之间的关系曲线。由图 7 可以看出,在相同的膜压下,支撑体的氮气通量随烧结温度的升高呈增大趋势。支撑体的气体渗透性能与其孔径尺寸,开口气孔率以及贯通孔道状况密切相关。气体渗透率与孔径尺寸及开口气孔率的平方成正比,其中,孔径尺寸影响更为明显^[19]。随着烧结温度的升高,虽然开口气孔率略有降低,但制备得到支撑体的平均孔径尺寸逐渐增大,同时支撑体内部贯通孔道壁形成并趋于光滑,这使得支撑体氮气通量呈现逐渐增大的趋势。在 0.1 MPa

压力差下,900、1 000、1 100、1 200 °C 烧结得到支撑体的氮气通量分别为 34、119、177、340 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。850 °C 制备得到支撑体的氮气通量因太小,而难以测量。

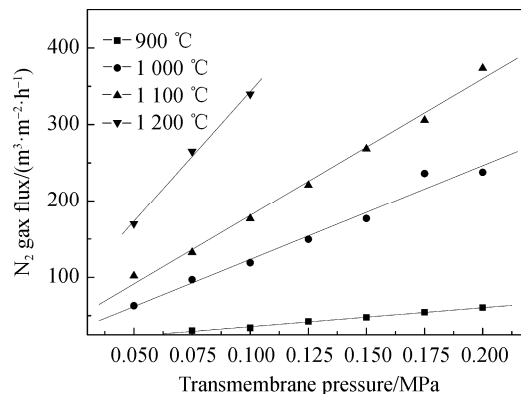


图 7 不同烧结温度制备支撑体的氮气通量与不同气体压力差之间相互关系曲线

Fig. 7 Relationship between nitrogen gas fluxes and different applied trans-membrane pressures of the supports prepared at different sintering temperatures

表 2 为不同烧结温度制备多孔陶瓷支撑体的抗弯强度及耐化学腐蚀性能数据。由表 2 可以看出,随着烧结温度的升高,支撑体的抗弯强度先增加后减小,1 000 °C 时制备得到的支撑体的抗弯强度最高(40.57 MPa),这主要是由于烧结过程化学反应生成新物质时导致显微结构变化所引起的。在 900~1 000 °C,颗粒间开始发生烧结并伴有钙铝黄长石的生成,因此抗弯强度随着烧结温度的升高而增加;1 000 °C 以后,通过显微结构(图 4c~图 4e)可以看出,样品中析出的晶粒尺寸逐渐长大,同时伴随着钙铝黄长石向钙长石发生物相转变,晶粒长大及各相强度的差异是导致抗弯强度降低原因所在。另外,由于支撑体中钙长石、钙铝黄长石及玻璃相中均含有碱土金属元素,因此制备得到的多孔陶瓷支撑体耐酸腐蚀较差。

表 2 不同烧结温度制备支撑体的抗弯强度及耐化学腐蚀性
Table 2 Bending strength and chemical resistance of supports prepared at different sintering temperatures

Sintering temperature/°C	Bending strength/MPa	w(Mass loss)/%	
		H ₂ SO ₄ solution/6 d	NaOH solution/1 d
900	33.07±2.65	7.38	1.60
1 000	40.57±2.32	7.25	0.86
1 100	32.78±3.07	12.24	0.55
1 200	28.85±3.69	11.15	0.42

3 结论

1) 以高岭土、滑石、碳酸钙为原料, 成功制备得到了系列多孔陶瓷支撑体, 其中, 烧结温度在 1 000~1 200 °C 时较为适宜。在 1 000 °C 时制备支撑体的主要物相为钙铝黄长石, 随着温度的升高, 钙铝黄长石逐渐向钙长石转变, 同时也有其它物相的生成。在 1 200 °C 时支撑体的主要物相为钙长石, 同时有镁铝尖晶石、透辉石、顽火辉石相的存在。

2) 在 1 000~1 200 °C 烧结温度制备得到支撑体的孔径分布呈单峰分布, 开口气孔率、平均孔径尺寸、抗弯强度、0.1 MPa 气体压力差下氮气通量分别为 49.8%~49.4%、1.09~1.83 μm 、40.57~28.85 MPa、119~340 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 同时具有较好的耐碱腐蚀性能, 可用于中性及偏碱性污水及废气的过滤处理。

3) 以天然矿物为原料进行多孔陶瓷支撑体的研究探讨, 对实现不同种类多孔陶瓷支撑体的低成本化制备具有一定的理论参考, 对进一步拓展多孔陶瓷支撑体应用领域具有重要意义。

参考文献:

- [1] 苟敏涛, 黄建国. 低成本多孔碳化硅陶瓷支撑体的制备及耐酸碱性优化[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(12): 1737-1745.
GOU Mintao, HUANG Jianguo. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(12): 1737-1745.
- [2] GUO H S, Li W F, YE F B. Low-cost porous mullite ceramic membrane supports fabricated from kyanite by casting and reaction sintering[J]. Ceram Int, 2016, 42(4): 8419-8426.
- [3] WANG F, YE J K, HE G, et al. Preparation and characterization of porous MgAl_2O_4 spinel ceramic supports from bauxite and magnesite[J]. Ceram Int, 2015, 41(6): 7374-7380.
- [4] HUBADILLAH S K, HARUN Z, OTHMAN M H D, et al. Effect of kaolin particle size and loading on the characteristics of kaolin ceramic support prepared via phase inversion technique[J]. J Asian Ceram Soc, 2016, 4(2): 164-177.
- [5] 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 Junjie, LI Wenhao. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(9): 1810-1827.
- [6] 李孝建, 韩磊, 黄仲, 等. 发泡-注凝成型/表面改性制备超亲水-疏

油硅藻土多孔陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(12): 2572-2580.

LI Xiaojian, HAN Lei, HUANG Zhong, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(12): 2572-2580.

- [7] GUESMI Y, LAFI R, AGOUGUI H, et al. Synthesis and characterization of alpha alumina-natural apatite based porous ceramic support for filtration application[J]. Mater Chem Phys, 2020, 239: 122067.
- [8] BIESHEUVEL P M, VERWEIJ H. Design of ceramic membrane supports: permeability tensile strength and stress[J]. J Membr Sci, 1999, 156(1): 141-152.
- [9] WANG Y H, CHENG J G, LIU X Q, et al. Preparation and sintering of Macroporous ceramic membrane support from titania sol-coated alumina powder[J]. J Am Ceram Soc, 2008, 91(3): 825-830.
- [10] 王峰, 贺智勇, 张启富, 等. 低温制备高纯氧化铝陶瓷支撑体[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(6): 817-822.
WANG Feng, HE Zhiyong, ZHANG Qifu, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(6): 817-822.
- [11] GHOUIL B, A HARABI A, BOUZERARA F, et al. Elaboration and characterization of ceramic membrane supports for raw materials used in microfiltration[J]. Desalin Water Treat, 2016, 57(12): 5241-5245.
- [12] FAKHFAKH S, BAKLOUTI S, BAKLOUTI S, et al. Elaboration and characterisation of low cost ceramic support membrane[J]. Adv Appl Ceram, 2010, 109(1): 31-38.
- [13] MONASH P, PUGAZHENTHI G. Development of ceramic supports derived from low-cost raw materials for membrane applications and its optimization based on sintering temperature[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2011, 8(1): 227-238.
- [14] ZHOU J E, ZHANG X Z, WANG Y Q, et al. Elaboration and characterization of tubular macroporous ceramic support for membranes from kaolin and dolomite[J]. J Porous Mater, 2010, 17(1): 1-9.
- [15] NANDI B K, UPPALURI R, PURKAIT M K. Preparation and characterization of low cost ceramic membranes for micro-filtration application[J]. Appl Clay Sci, 2008, 42(1-2): 102-110.
- [16] 西北轻工业学院等编. 陶瓷工艺学[M]. 北京: 轻工业出版社, 1994: 36-39.
- [17] 秦娟, 崔崇, 崔晓昱, 等. 钙长石晶体的形成机制研究[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(5): 1153-1157.
QIN Juan, CUI Chong, CUI Xiaoyu, et al. J Synth Cryst (in Chinese), 2016, 45(5): 1153-1157.
- [18] DONG Y C, ZHOU J E, LIN B, et al. Reaction-sintered porous mineral-based mullite ceramic membrane supports made from recycled materials[J]. J Hazard Mater, 2009, 172(1): 180-186.
- [19] 姚爱华, 于宝海, 杨柯, 等. 莫来石-刚玉多孔陶瓷支撑体的制备与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(增刊1): 255-258.
YAO Aihua, YU Baohai, YANG Ke, et al. Rare Metal Mat Eng(in Chinese), 2005, 34(Sup.1): 255-258.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



王峰, 中国钢研科技集团有限公司高级工程师, 博士。先后参与和负责国家自然科学基金、北京市自然科学基金、科技部中俄国际合作、中科院中俄国际合作、国家 02 科技重大专项、中科院理化所开放课题等项目, 在国内外学术刊物发表论文 20 余篇, 其中 SCI/EI 收录论文 18 篇, 申请专利 10 余项。主要从事高性能陶瓷材料的研究工作, 研究方向包括多孔陶瓷、高红外辐射陶瓷、高导热陶瓷、透明氧化铝陶瓷、铝基碳化硅及碳/碳化硅复合材料等。