



# 煅烧温度对环保型莫来石多孔陶瓷结构和性能的影响

伍芷菁<sup>1</sup>, 花开慧<sup>1,2\*</sup>, 钟雅丽<sup>1</sup>, 陈晓冰<sup>1</sup>, 高品海<sup>1,2</sup>, 郑愚<sup>1,2</sup>

(1. 东莞理工学院生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523808; 2. 广东省城市生命线工程智慧防灾与应急技术重点实验室, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 莫来石多孔陶瓷因其高强度和耐腐蚀等性能得到广泛地应用。然而, 由于合成莫来石的原料高岭土的不可再生性及持续上涨的价格, 寻找廉价易得的替代原料对于合成莫来石多孔陶瓷迫在眉睫。建筑废弃物的成分与高岭土相似, 可作为高岭土的可行替代品之一。以建筑废弃物和  $Al_2O_3$  为主要原料,  $AlF_3$  为晶须催化剂,  $B_2O_3$  为烧结助剂, 成功制备了环保型莫来石多孔陶瓷。通过阿基米德排水法、XRD 和 SEM 等表征手段, 深入探究了多孔陶瓷的晶相、微观形貌和物理化学特性。同时, 研究了煅烧温度对莫来石多孔陶瓷结构和性能的影响规律及作用机制。结果表明, 适当提升煅烧温度有助于莫来石晶须的生成, 但过高的温度会导致晶须粗化和晶粒增大。当煅烧温度为  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  时, 莫来石晶须的生长形貌最佳, 晶须直径约为  $0.05\text{--}0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、长度为  $0.5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ 、长径比在  $15\text{--}20$  之间。随着煅烧温度增加, 莫来石多孔陶瓷的开口孔隙率不断降低, 抗折强度不断增强。当煅烧温度为  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  时, 样品的开口孔隙率达到  $(61.78\pm 0.72)\%$ , 抗折强度达到  $(3.74\pm 0.46)\text{ MPa}$ 。因此, 以建筑废弃物为主要原料可成功制备具有高气孔率的莫来石多孔陶瓷。本研究为建筑废弃物合成莫来石多孔陶瓷提供了可靠的理论支持, 对降低生产成本及推动建筑废弃物资源化再利用等有重要理论价值和实际意义。

**关键词:** 多孔陶瓷; 建筑废弃物; 莫来石晶须; 原位合成; 煅烧温度; 资源化利用; 形成机制; 微观结构

**中图分类号:** TQ174.75

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9981(2024)03-0495-07

**引文格式:** 伍芷菁, 花开慧, 钟雅丽, 等. 煅烧温度对环保型莫来石多孔陶瓷结构和性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(3):495-501.

WU Zhijing, HUA Kaihui, ZHONG Yali, et al. Effect of Sintering Temperature on Structure and Properties of Environmentally Friendly Mullite Porous Ceramics[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(3):495-501.

## 0 引言

多孔陶瓷是一种内部具有大量彼此相通或闭口气孔的无机材料, 因其具有相对密度低、渗透率高、导热系数低、比表面积大、使用寿命长和可再生性等特性, 被广泛应用于吸声降噪、膜组件过滤、降解污染废水和汽车尾气处理等方面<sup>[1-2]</sup>。其中, 莫来石 ( $3Al_2O_3\cdot 2SiO_2$ ) 是  $Al_2O_3\text{-}SiO_2$  二元系常压下唯一稳定存在的化合物, 其具有强度高、熔点高、热膨胀系数低和化学稳定性好等特点, 被广泛应用于多孔陶瓷材料中<sup>[3-4]</sup>。制备莫来石多孔陶瓷的传统原料为

高岭土, 由于高岭土的不可再生性及不断上涨的价格, 寻找和开发新的可替代原材料变得迫在眉睫。

建筑废弃物是在建筑物建设、维护及后期的拆除过程中遗留的建筑废料, 其主要成分为  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  和  $CaCO_3$ , 与高岭土成分相似<sup>[5]</sup>。因此, 理论上建筑废弃物可作为高岭土的可行替代品。近年来, 随着我国城市化步伐的加快, 建筑废弃物产量日益增长。然而, 建筑废弃物资源化利用不足, 其不仅侵占大量的土地资源及污染土壤和水资源, 甚至还危害了公共安全<sup>[6]</sup>。因此, 以建筑废弃物为原料制备莫来石多

**收稿日期:** 2024-04-03

**基金项目:** 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目(地区培育项目)(2023A1515140095); 东莞市社会发展科技项目(重点项目)(20211800905302); 粤澳科技创新联合资助(2022A0505020030); 广东省基础与应用基础研究基金(19201910260000040); 广东省联合培养研究生示范基地人才培养项目(粤教研函[2021]2号; 粤教研函[2023]3号); 松山湖科特派员项目(20234418-01KCJ-G); 东莞理工学院质量工程项目(202302031); 广东省城市生命线工程智慧防灾与应急技术重点实验室(2022B1212010016); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515110081)。

**作者简介:** 伍芷菁, 硕士研究生, 研究方向为绿色功能材料和有机废水处理。E-mail: wuzhijing-2001@foxmail.com。

**通信作者:** 花开慧, 博士, 副教授, 研究方向为多孔陶瓷、固废资源化、废水处理和绿色建材等方面的基础研究及应用。

E-mail: huakh@dgut.edu.cn。

孔陶瓷,既可减少陶瓷行业对高岭土消耗及降低生产成本,又可以提高建筑废弃物资源化再利用效率。

目前,莫来石主要通过高温固相反应合成<sup>[7]</sup>,但该方法合成的莫来石存在煅烧温度较高及能耗较大等问题。为解决上述问题,可通过加入低熔点烧结助剂(如 $\text{WO}_3$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和 $\text{B}_2\text{O}_3$ 等)来降低莫来石的煅烧温度,以降低富含 $\text{SiO}_2$ 液相的形成温度,从而增强莫来石晶粒的各向异性生长<sup>[8]</sup>。Ju<sup>[9]</sup>以 $\text{B}_2\text{O}_3$ 为烧结助剂,在煅烧温度 $1450\text{ }^\circ\text{C}$ 下制备莫来石多孔陶瓷。研究表明, $\text{B}_2\text{O}_3$ 的加入不仅能降低莫来石的煅烧温度,而且还可以有效地促进莫来石沿C轴方向生长,改善莫来石的形貌。Luo<sup>[10]</sup>以高岭土和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 为原料,以 $\text{AlF}_3$ 为催化剂,在煅烧温度 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 下合成莫来石多孔陶瓷。一般情况下,莫来石多孔陶瓷的煅烧温度高于 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ ,为进一步降低莫来石煅烧温度,可通过添加复合烧结助剂实现莫来石低温生成。

本文选用 $\text{AlF}_3$ 作为晶须生长剂, $\text{B}_2\text{O}_3$ 作为烧结助剂,以促进莫来石晶须低温生成。此外,考虑到建筑废弃物中含有许多熔点较低的碱土金属氧化物等可作为烧结助剂,这样更有望达到最佳低温生成效果。在该项研究中,根据建筑废弃物的物相特征和成分,通过添加少量 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 补充建筑废弃物中铝含量以提高陶瓷稳定性,制备出环保型莫来石多孔陶瓷。通过对莫来石多孔陶瓷的物相组成、显微结构及物理化学特性进行分析,研究其结构和性能随煅烧温度的变化规律,为后续的研究应用提供理论和技术支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

实验原料为建筑废弃物,取自深圳某公司。首先将建筑废弃物进行破碎、筛分、球磨等处理,使之成为细粉末。氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、氟化铝( $\text{AlF}_3$ )和氧化硼( $\text{B}_2\text{O}_3$ )购于上海麦克林生化科技有限公司,均为AR级。

### 1.2 陶瓷制备

陶瓷以预处理后的建筑废弃物粉末和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为主要原料, $\text{AlF}_3$ 为晶须生长剂, $\text{B}_2\text{O}_3$ 为烧结助剂。将质量分数49%的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、质量分数36%的建筑废弃物粉末、质量分数12%的 $\text{AlF}_3$ 和质量分数3%的 $\text{B}_2\text{O}_3$ 放进研磨介质为氧化铝球的行星式球磨机中,在 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下球磨30 min。其中,原料粉体、水、球磨介质的质量比为1:1:10。将所得浆料置于 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥12 h,研磨后过孔径为 $0.425\text{ mm}$ 筛网,获得预混物料。将预混物料与水混合均匀,用孔径为 $0.425\text{ mm}$ 筛筛分,待干燥后将所得坯料置于模具中,在压力 $4\text{ MPa}$ 下压制生成坯。将生

坯置于电炉中,以 $5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至不同煅烧温度( $1100$ 、 $1150$ 、 $1200$ 、 $1250$ 和 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ )并保温2 h,再以 $5.5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率降温至 $700\text{ }^\circ\text{C}$ ,自然冷却至室温,即得多孔陶瓷样品。环保型多孔陶瓷的制备流程如图1所示。

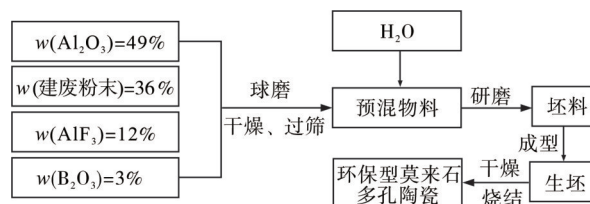


图1 环保型莫来石多孔陶瓷制备流程图

Figure 1 Flowchart of preparation of environmentally friendly mullite porous ceramics

### 1.3 分析表征

利用X射线衍射仪(Ultima IV型,日本理学Rigaku公司)对样品进行晶相分析,其中靶材为Cu靶,管电压 $40\text{ kV}$ ,管电流 $40\text{ mA}$ ,步速 $2\text{ }^\circ\cdot\text{min}^{-1}$ ,扫描范围 $10^\circ\text{--}65^\circ$ 。利用扫描电子显微镜(JSM-6701F型,日本电子株式会社),观察样品的微观形貌。采用阿基米德排水法,测定样品开口孔隙率、吸水率和体积密度。采用万能材料试验机(INSTRON-5567型,Instron Engineering Corporation, USA)检测样品的抗折强度,其中试样为经抛光处理的条状样品,尺寸为 $4\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ ,抗折仪跨距为 $30\text{ mm}$ ,加载速率为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 建筑废弃物的理化性质分析

图2为建筑废弃物的晶相分析图。从图2可以看出,建筑废弃物的物相组成较为复杂,其主要物相为碳酸钙相、石英相和微斜长石相。其中,碳酸钙相的主要来源为生石灰发生反应后的生成物,石英相

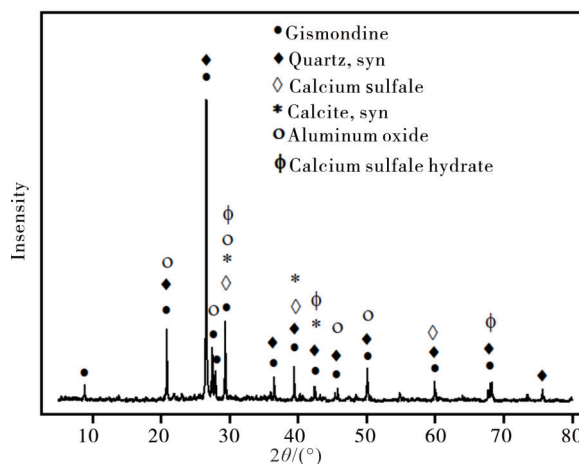


图2 建筑废弃物的XRD图谱

Figure 2 XRD patterns of construction waste powder

的主要来源为建筑废弃物中的沙子,而微斜长石相的主要来源为建筑废弃物的矿物。

表1为建筑废弃物的主要化学组成。由表1可知,建筑废弃物主要成分为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaCO}_3$ ,其中 $\text{CaCO}_3$ 质量分数高达3.98%。由于 $\text{CaCO}_3$ 在

600—800℃高温下发生热分解,分解产物主要为 $\text{CaO}$ 和 $\text{CO}_2$ ,因此 $\text{CaCO}_3$ 会从两个方面促进莫来石多孔陶瓷生成。一方面,煅烧产生的 $\text{CaO}$ 可降低莫来石多孔陶瓷的煅烧温度;另一方面, $\text{CO}_2$ 会使陶瓷内部形成大量微孔<sup>[11]</sup>,为晶须提供生长和长大的空间。

表1 建筑废弃物的主要化学组成

Table 1 Main chemical composition of the construction waste powder

化学成分	灼烧量(IL)	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaCO}_3$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
含量w/%	10.80	65.66	12.06	3.01	0.41	3.98	0.60	2.40	0.84

图3为建筑废弃物预处理粉体的粒度分布图。从图3可见,建筑废弃物粉体的粒径介于0.2—120.0 $\mu\text{m}$ 之间。

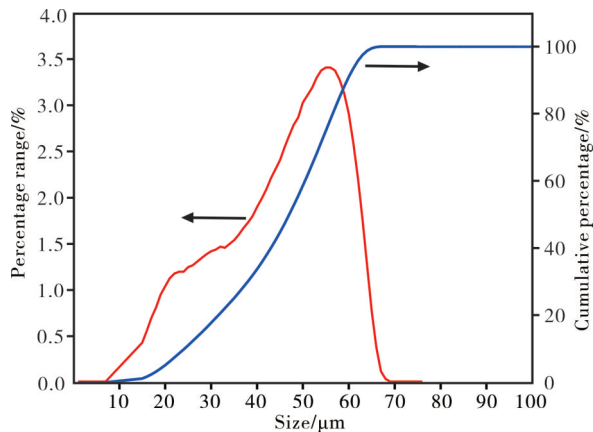


图3 建筑废弃物的粒度分布图

Figure 3 Particle size distribution map of construction waste powder

## 2.2 多孔陶瓷的物相组成

图4为不同煅烧温度下(1100—1300℃)多孔陶瓷的XRD图谱。从图4可见,适当提升煅烧温度,有助于莫来石晶须的生成。当煅烧温度为1100和1150℃时,检测到大量钙长石相;随着煅烧温度升高至1200和1250℃时,该衍射峰强度开始减弱。当煅烧温度为1100℃时,出现了莫来石相的特征衍射峰;当煅烧温度为1200和1250℃时,该衍射峰强度逐渐变得尖锐,峰强增强,表明钙长石相在莫来石生长过程中起到参与作用。此外,随煅烧温度升高,莫来石晶体不断发育和生长,晶体结构逐渐趋于规整。当煅烧温度为1200℃时,出现了硼酸铝相的特征衍射峰,这与文献[12]和[13]的研究结果相一致,表明作为烧结助剂的 $\text{B}_2\text{O}_3$ 与部分的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 发生反应并生成了硼酸铝晶须;当煅烧温度提升至1250和1300℃时,硼酸铝相的衍射峰强度较低,这是由于过高的煅烧温度导致 $\text{B}_2\text{O}_3$ 大量的挥发<sup>[14]</sup>。当煅烧温度为1200℃时,出现了刚玉相的特征衍射峰,

其衍射峰强度随着温度的提升而增强。值得注意的是,当煅烧温度为1300℃时,莫来石相的衍射峰强度有所下降,而钙长石相衍射峰增强,说明煅烧温度为1300℃时莫来石的形成受到抑制。这可能是由于建筑废弃物中的杂质成分,特别是碱金属氧化物,促进了莫来石熔融分解<sup>[15]</sup>。

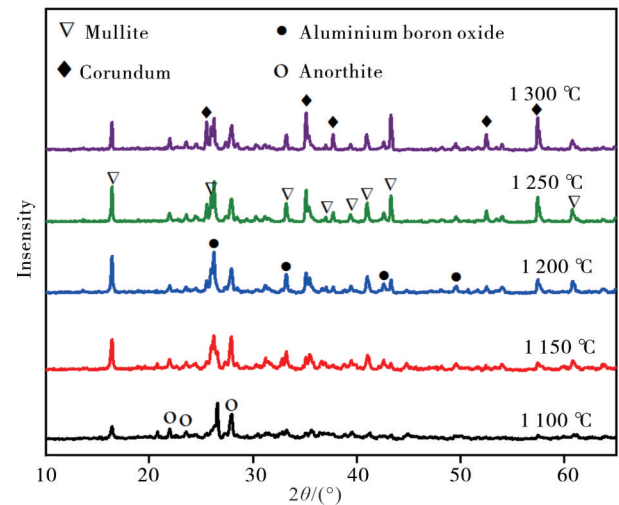


图4 不同煅烧温度下多孔陶瓷的XRD图谱

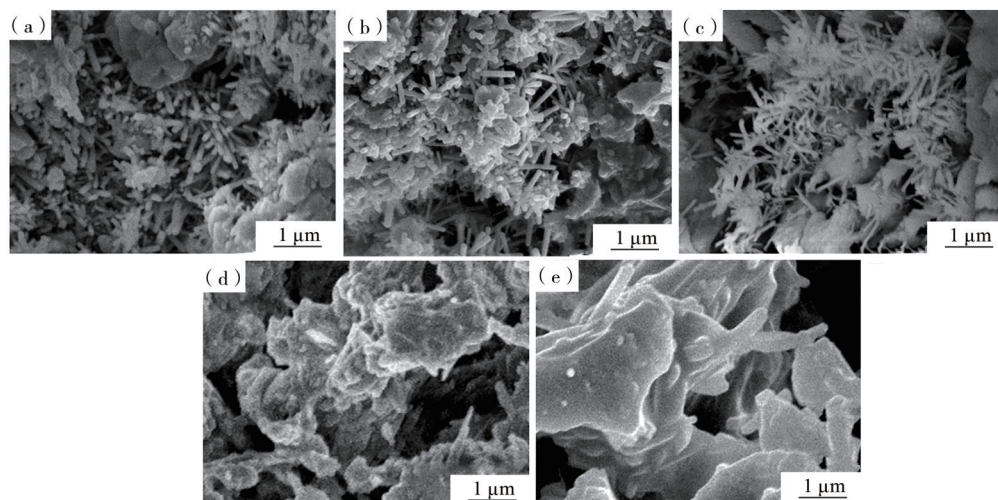
Figure 4 XRD patterns of porous ceramics at different temperatures

## 2.3 多孔陶瓷的显微结构

图5为不同煅烧温度下多孔陶瓷的断面形貌。从图5可见,随着煅烧温度的增加,样品断面形貌明显不同。当煅烧温度为1100℃时,样品断面形貌出现晶须状产物,在陶瓷内部间隙间呈现拥簇生长,此时晶体较为粗大,有长成须状的趋势。当煅烧温度增至1150℃时,样品的断面形貌有大量的晶须产物,晶须形貌极好,长径比增大。当煅烧温度增至1200℃时,样品断面形貌由晶须和少量片状晶体组成,莫来石的析晶速率加快,晶须的长度及长径比增大,晶须直径约为0.05—0.1 $\mu\text{m}$ 、长度为0.5—1 $\mu\text{m}$ 、长径比在15—20之间。当煅烧温度为1250℃时,出现大量无定型结块,晶须相产物锐

减,原本由晶须支撑起来的孔隙变为较大间隙。结合煅烧温度为1 250 °C时陶瓷的XRD图可以推断,莫来石晶体产物经煅烧变得致密,晶须与界面之间的作用力增大,致使晶须被玻璃相包裹,并与玻璃相结合成块状,导致晶须难以长出。当煅烧温度提高到1 300 °C时,晶须粗化且大量结块,该现象可通过

莫来石晶须生长机理中气相反应物的过饱和度对晶须生长的影响来解释。在较高的煅烧温度下,系统中气相反应物的过饱和度超过晶须定向生长所需的量时,多余的气体将会促使晶核沿其余方向生长,使晶核各方向生长速率较为接近,最终造成晶须粗化及长径比变小。



(a)—1 100 °C;(b)—1 150 °C;(c)—1 200 °C;(d)—1 250 °C;(e)—1 300 °C。

图5 不同煅烧温度下多孔陶瓷的断面SEM图

Figure 5 SEM images of fracture surfaces of porous ceramics at different temperatures

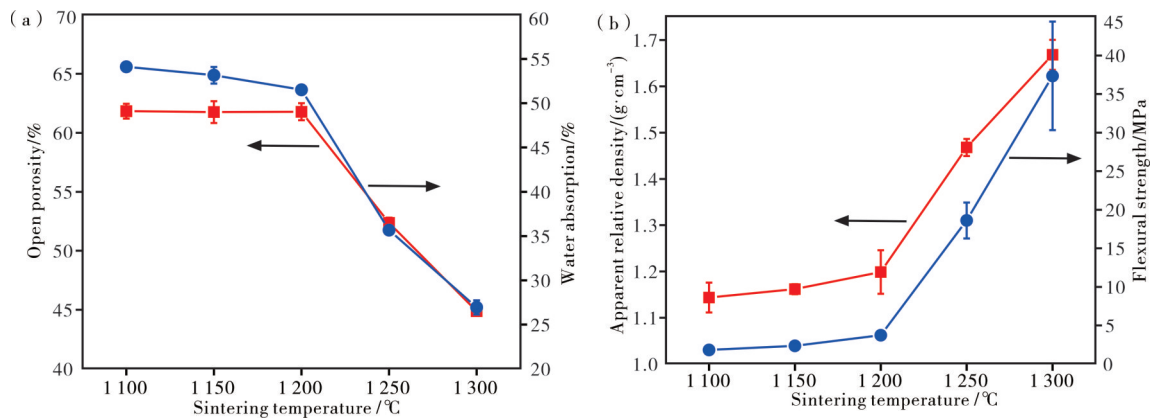
综上所述可知,适当提升煅烧温度可促进莫来石的晶须生长及孔径变小,从而有利于提高多孔陶瓷的孔隙率。但是,煅烧温度过高不利于莫来石生长,造成晶须粗化及结块增加,导致样品断面致密化,不利于形成多孔洞的内部结构。

#### 2.4 多孔陶瓷的力学性能分析

图6为不同煅烧温度下多孔陶瓷的力学性能。从图6(a)可见,随着煅烧温度的提高,陶瓷的开口孔隙率呈不断减少的趋势,吸水率的变化趋势与开口孔隙率相同。当煅烧温度从1 100 °C提升到1 200 °C时,开口孔隙率从 $(61.82 \pm 0.62)\%$ 减少至 $(61.78 \pm 0.72)\%$ ,变化幅度均不明显;当煅烧温度从1 200 °C提高到1 300 °C时,开口孔隙率变化较为强烈,开口孔隙率从 $(61.78 \pm 0.72)\%$ 减少至 $(44.9 \pm 0.15)\%$ ;当煅烧温度增至1 300 °C以上时,陶瓷的开口孔隙率最小为 $(26.94 \pm 0.80)\%$ 。当煅烧温度在1 100 °C时,陶瓷的吸水率最大为 $(54.11 \pm 0.52)\%$ ;当煅烧温度从1 100 °C到1 200 °C时,多孔陶瓷的吸水率呈减少趋势,但变化幅度较小;当煅烧温度从1 200 °C升到1 300 °C时,吸水率减少的幅度较大。这是由于材料中所含的CaO和TiO<sub>2</sub>等杂质在高温下

会转变为液相,部分开口气孔在液相作用下转变为闭气孔<sup>[16]</sup>。随着煅烧温度从1 200 °C升到1 300 °C时烧结致密化发生,使得烧成后的陶瓷开口孔隙率大幅降低。

图6(b)为煅烧温度对多孔陶瓷相对密度和抗折强度的影响。从图6(b)可见,随着煅烧温度的升高,多孔陶瓷的相对密度逐渐增加。当煅烧温度从1 100 °C增至1 200 °C时,样品的相对密度从 $(1.14 \pm 0.03)\%$ 增加至 $(1.20 \pm 0.05)\%$ ;当煅烧温度进一步从1 200 °C提升至1 300 °C时,样品的相对密度从 $(1.20 \pm 0.05)\%$ 急剧增加至 $(1.67 \pm 0.03)\%$ 。相对密度的变化趋势与开口孔隙率相反,这是由于莫来石晶须随煅烧温度升高而逐渐烧结致密,导致相对表观密度增加,这与SEM截面微观形貌的结果相符。此外,随着相对密度提高,多孔陶瓷的抗折强度也相应提升。当煅烧温度从1 100 °C提升至1 200 °C时,多孔陶瓷的抗折强度从1.84 MPa增加至3.74 MPa;当煅烧温度进一步从1 200 °C提升至1 300 °C时,多孔陶瓷的抗折强度显著增至37.35 MPa。这是由于高温煅烧产生的莫来石晶须相互搭建成的咬合结构及晶须增强效应,在二者共同作用下提升了陶瓷的抗折强度<sup>[12]</sup>。



(a)—开口孔隙率与吸水率;(b)—相对密度和抗折强度。

(a)—open porosity and water absorption; (b)—relative density and bending strength.

图6 不同煅烧温度下多孔陶瓷的力学性能

Figure 6 Properties of porous ceramics at different temperatures

## 2.5 莫来石晶须的形成机制

莫来石晶须的生长机理一般分为气-固(VS)反应机制和气-液-固(VLS)反应机制。VS反应机制是在高温下使反应混合物熔融,再通过降温使熔融混合反应物通过气-固界面层成核并析出晶体,且逐渐生长变成晶须<sup>[17]</sup>。VLS反应机制最初由Wagner和Ellis提出,通过在低温条件下加入催化剂并形成熔融的液滴,这些液滴在气相反应物和基体之间形成VLS界面层,促使晶核在基体表面析出晶体而形成晶须<sup>[18]</sup>。其中,VLS反应机制生长的晶须与VS反应机制生长的晶须存在明显标志,即VLS纳米棒顶端有球形液滴状物质。通过观察制备的陶瓷样品中莫来石晶须形貌发现,所制备的陶瓷样品晶须表面光滑,顶端无液滴状物质存在且晶面清晰可辨,因此可推断出所制备出的莫来石晶须属于VS反应机

制。然而,制备陶瓷的主要原料中有低熔点氧化物存在,部分低熔点相为液相,反应体系同时存在固相、气相和液相,因此其生长机理较为复杂,生成晶须的形貌也存在各种差异,因而体系中可能同时存在VLS反应机制和VS反应机制<sup>[19]</sup>。

图7为陶瓷样品中莫来石晶须形成的机理示意图。随着煅烧温度的升高,原料中的 $\text{AlF}_3$ 首先发生反应生成 $\text{AlOF}$ 和 $\text{SiF}_4$ 等气相,从而引发莫来石晶核形成的反应,然后在传质过程中使得莫来石晶体沿C轴方向生长,形成莫来石晶须<sup>[20]</sup>。陶瓷样品中莫来石晶须形成的化学反应式<sup>[21]</sup>如下。

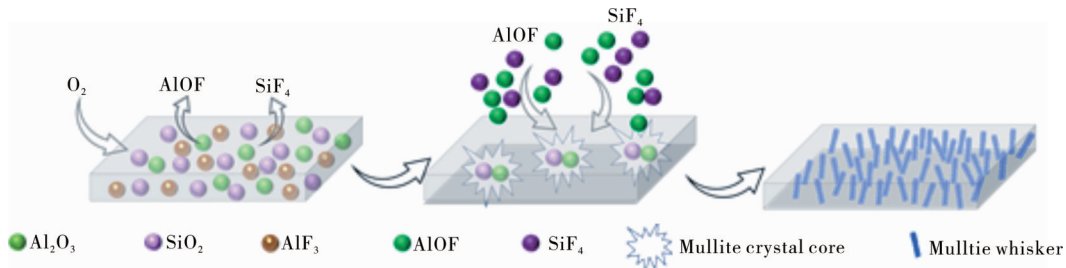
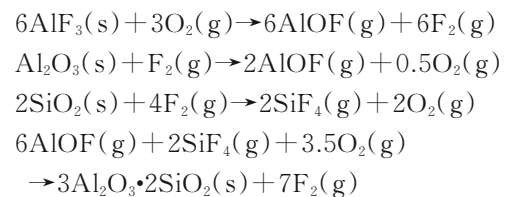


图7 莫来石晶须形成的机理示意图

Figure 7 Schematic diagram of the mechanism of mullite whisker formation

## 3 结论

本文以建筑废弃物和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为主要原料, $\text{AlF}_3$ 为晶须催化剂, $\text{B}_2\text{O}_3$ 为烧结助剂,研究了煅烧温度对环保型莫来石多孔陶瓷结构和性能的影响。

(1)在 $\text{AlF}_3$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 和建筑废弃物中低熔点氧化物的作用下,能够在相对较低的煅烧温度(1100—1200 °C)下有效促进莫来石晶须生成,而过高或过低的温度会导致晶须粗化或因液相过多堵塞气相传

输通道,不利于晶须的形成。

(2)随着煅烧温度的升高,环保型莫来石多孔陶瓷的开口孔隙率和吸水率减少,相对密度和抗折强度增加。莫来石晶须的烧结致密化增加了陶瓷的相对密度,同时晶须相互搭建成的咬合结构提高了陶瓷的抗折强度。

(3)在1200℃煅烧温度下,莫来石晶须的生长形貌最佳,晶须的直径约为0.05—0.1 μm、长度为0.5—1 μm和长径比在15—20之间,而多孔陶瓷的各项性能表现优异,其开口孔隙率为(61.78±0.72)%,吸水率为(51.53±0.32)%,以及抗折强度为(3.74±0.46)MPa。

(4)多孔陶瓷反应物体系相对复杂,同时存在固相、气相和液相,因此其生长机理也较为复杂,体系中可能同时存在VLS反应机制和VS反应机制,生成晶须的形貌也存在各种差异。

#### 参考文献:

- [1] PECK D, ZAPPI M, GANG D, et al. Review of porous ceramics for hot gas cleanup of biomass syngas using catalytic ceramic filters to produce green hydrogen/fuels/chemicals [J]. *Energies*, 2023, 16(5): 2334.
- [2] 材料研究与应用编辑部.先进陶瓷材料专题序言[J].材料研究与应用, 2024, 18(1): 7-8.
- [3] ROY R, DAS D, ROUT P K. A review of advanced mullite ceramics [J]. *Engineered Science*, 2021, 18: 20-30.
- [4] LIMA L, SILVA K, MENEZES R, et al. Microstructural characteristics, properties, synthesis and applications of mullite: A review [J]. *Cerâmica*, 2022, 68: 126-142.
- [5] 王子鑫, 花开慧, 欧阳焱, 等. 造孔剂对环保型多孔吸声陶瓷结构和性能的影响 [J]. *陶瓷学报*, 2021, 42(4): 681-687.
- [6] TIAN C, WANG Q W, WU J M, et al. Microstructure and properties of porous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics fabricated by digital light processing combined with spark plasma sintering [J]. *Ceram Int*, 2023, 49(24): 40814-40820.
- [7] LIAN J, ZHU B, LI X, et al. Growth mechanism of in situ diamond-shaped mullite platelets and their effect on the properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C refractories [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(15): 12427-12434.
- [8] GU X, CHEN P, WANG T, et al. Analysis of influencing factors in the preparation of mullite whiskers from recovering silicon-rich waste under low-temperature conditions [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(7): 1143.
- [9] JU M, CAI M, NIE J, et al. Advanced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-SiO<sub>2</sub>-C refractories with B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(20): 29525-29531.
- [10] LUO M H, ZHOU J E, WANG Y Q, et al. Preparation and characterization of porous acicular mullite ceramics [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 412: 65-68.
- [11] SIMÃO L, CALDATO R, INNOCENTINI M, et al. Permeability of porous ceramic based on calcium carbonate as pore generating agent [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(3): 4782-4788.
- [12] 花开慧.绿色莫来石晶须骨架多孔陶瓷的制备与性能[D].广州:华南理工大学, 2017.
- [13] 丰铭.硼酸铝晶须增强莫来石基陶瓷的制备及性能研究[D].太原:太原科技大学, 2023.
- [14] 张曼, 尹磊, 丁瑜, 等. 煅烧温度对熔盐法制备硼酸铝晶须的影响[J]. *中国陶瓷*, 2020, 56(7): 33-37.
- [15] 杨树行, 张俊计, 郑文杰, 等. 高岭土为原料熔盐法制备莫来石晶须[J]. *材料科学*, 2021, 11(11): 8.
- [16] 陈富文, 桑绍柏, 万卓夫, 等. 粉煤灰和烧成温度对矾土基轻量莫来石材料结构及性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(4): 1488-1495.
- [17] 张玲, 黄靖茵, 肖卓豪, 等. 莫来石晶须生长机理及研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2020, 41(6): 880-893.
- [18] WANG D C, LEI Y, JIAO W, et al. A review of helical carbon materials structure, synthesis and applications [J]. *Rare Metals*, 2021, 40: 3-19.
- [19] 张锦化.莫来石晶须的制备、生长机理及其在陶瓷增韧中的应用[D].北京:中国地质大学, 2012.
- [20] CHEN P, GU X, LIU S, et al. Industrial waste silica-alumina gel recycling: Low-temperature synthesis of mullite whiskers for mass production [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(6): 9442-9451.
- [21] CHEN N, WANG H, HUO J, et al. Preparation and properties of in-situ mullite whiskers reinforced aluminum chromium phosphate wave-transparent ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(15): 4793-4799.

## Effect of Sintering Temperature on Structure and Properties of Environmentally Friendly Mullite Porous Ceramics

WU Zhijing<sup>1</sup>, HUA Kaihui<sup>1,2\*</sup>, ZHONG Yali<sup>1</sup>, CHEN Xiaobing<sup>1</sup>, GAO Pinhai<sup>1,2</sup>, ZHENG Yu<sup>1,2</sup>

(1. School of Ecological Environment and Architectural Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Disaster Prevention and Emergency Technologies for Urban Lifeline Engineering, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** Mullite porous ceramics are widely used owing to their high strength and corrosion resistance. However, the escalating price and non-renewable nature of kaolin, the primary raw material for mullite synthesis, underscore the urgency of identifying cost-effective and readily available alternatives. The composition of construction waste is similar to kaolin, so it can be used as a viable alternative to kaolin. This study explores the utilization of construction waste and  $Al_2O_3$  as the main raw materials, with  $AlF_3$  serving as a whisker catalyst, and  $B_2O_3$  as a sintering agent, in the fabrication of eco-friendly mullite porous ceramics. The crystalline phase composition, micro-morphology and physicochemical properties of porous ceramics were investigated by means of Archimedean drainage method, XRD and SEM. The effect of sintering temperature on its structure and properties and its mechanism were studied. Findings reveal that an optimal increase in sintering temperature facilitates mullite whisker formation, with whisker length exhibiting an initial growth followed by a decline as temperature escalates. When the sintering temperature was 1 200 °C, the mullite whisker attains its optimum growth morphology, featuring a diameter of approximately 0.05—0.1  $\mu\text{m}$ , length ranging between 0.5—1  $\mu\text{m}$ , and a length-to-diameter ratio falling within 15—20. Excessive sintering temperatures result in coarsening of mullite whiskers and enlargement of grain size. With the increase of sintering temperature, the open porosity of mullite porous ceramics decreased and the bending strength increased. Specifically, at 1 200 °C, the sample achieved an open porosity of  $61.78 \pm 0.72\%$  and a bending strength of  $3.74 \pm 0.46$  MPa. Then, the mullite porous ceramics with high porosity can be successfully prepared by using construction waste as the main raw material. This study provided reliable theoretical underpinnings for the synthesizing mullite porous ceramics from construction waste, with profound implications for reducing the production costs and advancing construction waste recycling initiatives.

**Keywords:** porous ceramics; construction waste; mullite whisker; in situ synthesis; sintering temperature; resource utilization; formation mechanism; microstructure

(学术编辑: 孙文)