**文章编号:**1000-8608(2024)02-0118-09

## 碳酸钙为发泡剂的粉煤灰发泡陶瓷制备

王治聪,解文圣,李爱民\*

(大连理工大学环境学院,辽宁大连 116024)

摘要:发泡陶瓷作为一种新型建筑墙体材料,具有轻质保温的特性.以粉煤灰为主要原料, 分别添加碳酸钙、四硼酸钠作为发泡剂和助熔剂,通过球磨、压片、烧制等工艺实现了一种新 型发泡陶瓷的制备,同时研究了烧结温度、发泡剂掺量、粉煤灰添加量以及粉料粒度对发泡效 果的影响.结果表明,样品平均孔径会随发泡剂掺量增加而增大;随烧结温度升高,样品的表 观密度先下降后上升,孔隙率与之呈相反趋势,平均孔径会逐渐升高;样品的表观密度和孔隙 率随粉料粒度的降低而降低,抗压强度则会提升.研究表明,在发泡剂掺量为1%、烧结温度 为750℃、保温时间为15 min的工艺下可制得表观密度为0.156 g/cm<sup>3</sup>、孔隙率为93%、抗压 强度为2.23 MPa的发泡陶瓷.

关键词:粉煤灰;发泡陶瓷;碳酸钙;高温发泡;烧结温度;孔结构 中图分类号:X705;TQ536.4;TQ174.1 文献标识码:A doi:10.7511/dllgxb202402002

#### 0 引 言

2020年我国煤炭消费 4.04×10° t,同比增长 0.6%,占能源消费总量的 56.8%<sup>[1]</sup>,而 2020年 我国仅火电行业预计就将产生 5.7×10<sup>8</sup> t 粉煤 灰,粉煤灰的过量堆积不仅占用大量宝贵的土地 资源,还会对环境和人体健康造成严重影响,因此 粉煤灰的综合利用是能源环境领域长久以来的重 要课题.以粉煤灰为原料,通过添加不同发泡剂 (氮化硅、碳酸钙、硅酸钠及碳化硅等)制备发泡陶 瓷<sup>[2]</sup>是目前比较常见的利用方式.

张勇林<sup>[3]</sup>以陶瓷坯料、长石粉和球土为主要 原料,分别研究了以 SiC 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为发泡剂制备 发泡陶瓷的性能.付春伟<sup>[4]</sup>以粉煤灰为主要原料, 以炭黑、淀粉、碳酸钙为发泡剂,研究了粉煤灰骨 料堆积组成对陶瓷气孔率的影响. Zhu 等<sup>[5]</sup>以粉 煤灰和废玻璃为原料,添加 30% 硼砂和 0.5%碳 酸钙,控制粉煤灰和废玻璃的比例来探究其对发 泡性能的影响. Luo 等<sup>[6]</sup>通过对粉煤灰进行碱活 化处理,在不添加发泡剂条件下,实现了 1 200 ℃ 下最好的效果. Chen 等<sup>[7]</sup> 以粉煤灰为原料, 硅酸钠 为发泡剂, 在 800 ℃下制备出密度为 0.542 g/cm<sup>3</sup>、 孔隙率为 68.85%、抗压强度为 3.44 MPa 的发泡 样品,同时探究了 800 ℃时样品力学性能随粉煤 灰含量增加的变化情况. Fernandes 等<sup>[8]</sup> 以阴极 射线管为原料, 蛋壳、方解石、白云石为不同的发 泡剂, 探究了低温下制备玻璃陶瓷的可能.

粉煤灰富含硅、铝、钙等元素的特性可以满足 发泡陶瓷对于原料的要求,目前国内外多采用氧 化型发泡剂(碳化硅、氮化硅等)在高温下(1000~ 1200℃)制备样品的发泡工艺,在实现较好的轻 质保温效果的同时,也有较高的烧结温度和高昂 的发泡剂价格带来巨大能源消耗和材料成本的缺 点.因此,本文采用廉价易得的分解型发泡剂(碳 酸钙),通过添加助熔剂(四硼酸钠)以及氧化锌、 长石粉和碳酸钠等来改善坯体的熔融特性,探究 烧结温度、发泡剂掺量、粉煤灰添加量以及粉料粒 度对于发泡陶瓷性能的影响,实现在较低烧结温 度下制备粉煤灰发泡陶瓷,为今后的粉煤灰综合 利用及发泡材料生产提供一定参考.

**收稿日期**: 2022-11-14; 修回日期: 2023-12-02.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2018ZX07601-004).

作者简介:王治聪(1998—),男,硕士生,E-mail:1937687250@qq.com;李爱民\*(1968—),男,博士,教授,E-mail:leeam@dlut.edu.cn.

1

# 实

验

#### 1.1 实验原料

所用粉煤灰取自大连某热电厂. 锂辉石和钠 长石购自石家庄利尚矿产品加工有限公司.碳酸 钙购自天津市科密欧化学试剂有限公司,四硼酸 钠购自天津市大茂化学试剂厂,氧化锌购自国药 集团化学试剂有限公司,碳酸钠购自天津博迪化 工股份有限公司,纯度均为分析纯,对粉煤灰进行 X 射线荧光测试分析,测试结果见表 1. 本实验中 通过添加四硼酸钠及长石粉等来改善样品的烧结 特性,采用碳酸钙为发泡剂,选择在较低温度下进 行发泡材料制备.

表1 粉煤灰样品化学组成 Tab. 1 Chemical composition of coal fly ash samples

组成	w/ %	组成	w/%
$SiO_2$	58.87	K <sub>2</sub> O	2.74
$Al_2O_3$	19.68	Na <sub>2</sub> O	1.54
$Fe_2O_3$	5.97	$SO_3$	0.57
CaO	6.70	TiO <sub>2</sub>	0.96
MgO	1.51	烧失量	1.46

#### 1.2 样品制备

首先按照粉煤灰、ZnO、锂辉石、钠长石、 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>质量比为 80:5:7:4:4 将各原料混 合均匀,记为 PB,再外掺 10%发泡剂和 30%助熔 剂(均为质量分数),记为 PB-10. 取 3.5 g 的坯体 粉末在 8 MPa 条件下于万用试验机中压制成 ♦20 mm×10 mm 的圆柱形样品. 再将样品移至 箱式炉中,以一定的升温速率(600 ℃以下, 10 ℃/min;600 ℃以上,5 ℃/min)升至目标烧结 温度,保温15 min,冷却至室温后再进行各种性 能测试.制备流程如图1所示.



图1 粉煤灰发泡陶瓷的制备流程

Fig. 1 Preparation process of coal fly ash foamed ceramic

#### 1.3 测试方法

样品表观密度采用阿基米德排水法测量,孔 隙率由真密度(比重瓶法测量)及表观密度计算得 到.采用软件 Image-Pro Plus 统计样品的平均孔 径及孔径分布. 孔径离散系数由公式  $C_v =$ 

 $\int_{a}^{n} (d_i - \overline{d})^2 / n / \overline{d}$  计算得出,其中  $d_i$  为各气孔 的孔径, n 为气孔数量, d 为气孔的平均孔径. 吸水 率、抗压强度等性能根据《无机硬质绝热制品试验 方法》(GB/T 5486-2008)测定.

混合料化学组成通过 X 射线荧光光谱仪 (Axios,荷兰帕纳科)测定,样品晶相组成分析采用 X射线衍射仪(D8 Advance,德国布鲁克)进行测 试,测试条件为 Cu 靶 Kα 辐射(λ=0.154 18 nm), 步长 0.05°,扫描角度 15°≤2θ≤90°. 热重分析采 用德国 NETZSCH 公司的 STA 2500 型热分析仪 进行,测温范围为 25~1 000 ℃,升温速率为 10 ℃/min,空气气氛. 样品微观结构采用高分辨 场发射扫描电镜(NOVA NanoSEM 450,美国 FEI) 进行分析. 粉末粒度采用激光粒度仪 (Microtrac S3500,美国麦奇克)进行分析.

#### 结果与讨论 2

#### 2.1 烧结温度对样品性能的影响

为探究初步的烧结温度范围,对粉料 PB-10 进行热重分析,结果如图2所示.曲线有两处主要 的下降趋势:首先从100℃开始至200℃左右,主 要是四硼酸钠失去自身的结晶水导致的质量降 低[9],其后由于失去大部分结晶水而使下降趋势



- 图 2 粉料 PB-10 以升温速率 10 ℃/min 升温 至1000 ℃时的 TG 曲线
- Fig. 2 TG curve of powder PB-10 heated to 1 000 °C at a heating rate of 10 °C/min

变缓;650 ℃时,CaCO<sub>8</sub> 开始分解,并在 700 ℃后 分解速度达到最大值,800 ℃时分解停止.因此, 选定 700~800 ℃作为实验的烧结温度范围.为避 免发泡剂提前大量分解,采用如下烧结制度: 600 ℃以下,升温速率为 10 ℃/min;600 ℃以上, 升温速率为 5 ℃/min,达到烧结温度后保温 15 min,随后样品冷却至室温.

根据确定的烧结温度范围,进行温度梯度 (700、725、750、775、800 ℃)影响实验,并对制得 样品进行各项性能分析.如图 3 所示,随着烧结温 度上升,CaCO<sub>3</sub> 发泡加剧,气泡量增加导致样品 表观密度下降;当温度升至 750 ℃时,高温熔融液 相的黏度降低,无法将过高分解速率下产生的气 泡完全包裹,造成部分气体逸出,样品体积减小, 使得表观密度增大.总体而言,样品表观密度均小 于 0.24 g/cm<sup>3</sup>,最小值仅为 0.118 g/cm<sup>3</sup>,远优于 相应标准要求(小于 1 g/cm<sup>3</sup>).与表观密度变化 相对应的是孔隙率的变化,随着烧结温度升高,样 品的孔隙率逐渐升高,并在 750 ℃时达到最



图 3 不同烧结温度下样品的表观密度和孔隙率 Fig. 3 Apparent density and porosity of samples at different sintering temperatures 高值(94.74%),其后随着烧结温度升高,气泡内 部气压高于液相黏滞阻力及表面张力,导致气泡 破裂,气体逸出,从而使得液相重新进入气泡内 部<sup>[10]</sup>,造成孔隙率明显下降,但样品的孔隙率均 大于 89%,最高值为 94.74%.

样品宏观性能不能完全表征其发泡效果,平 均孔径是微观层面的重要指标.如图4所示,样品 平均孔径随烧结温度升高而升高,从700℃时的 0.380 mm 升至800℃时的0.544 mm,这与样品 的表观密度和孔隙率的变化相吻合,表明发泡剂 的发泡剧烈程度逐渐提升;样品孔径离散系数随 烧结温度的升高而逐渐降低,表明样品气孔更加 均匀.同时对样品进行孔径分布分析可得图5, 750℃时样品内部平均孔径较小且各孔径之间梯 度合理,孔径离散系数较低,有助于降低样品的导 热系数<sup>[11]</sup>.综合考虑表观密度及孔隙率等因素, 选择750℃为实验的理想烧结温度.



- 图 4 不同烧结温度下样品平均孔径及 孔径离散系数
- Fig. 4 Average pore size and pore size dispersion coefficient of samples at different sintering temperatures





#### 2.2 发泡剂掺量对样品性能的影响

分解型发泡剂 CaCO3 主要依靠自身的高温

分解特性<sup>[12]</sup>产生气体进而实现发泡效果.除烧结 温度以外,发泡剂掺量对于整个发泡过程而言至 关重要,因此在已确定的烧结制度下(烧结温度 750 ℃、保温时间 15 min),粉料 PB 外掺 30%四 硼酸钠后,研究对比不同发泡剂掺量(0.5%、1%、 5%、10%、15%、20%)的影响.

结果如图 6、7 所示.随着发泡剂掺量的上升,发 泡位点增加,分解反应加剧,表观密度逐渐降低,在 发泡剂掺量为 10%时达到最小值(0.118 g/cm<sup>3</sup>). 但相同的烧结制度下形成的液相量所能包裹的气 体量有限,因此更大的发泡剂掺量并不能完全发 挥作用.同时由于气泡间的液膜变薄,相互竞争生 长的气泡破裂的趋势也更明显,使得液相重新进 人气泡,在造成气孔更不均匀的同时也使样品体 积收缩,密度增加.孔隙率的变化趋势与表观密度 的变化趋势相反.平均孔径随发泡剂掺量的上升而







图 7 不同发泡剂掺量下样品的平均孔径



上升,发泡剂掺量为20%时最大可达0.566 mm.

为更好描述发泡陶瓷的微观孔隙结构,对各样品的微观结构和孔径分布进行分析,如图 8、9 所示.随着发泡剂掺量的增加,气孔尺寸逐渐增 大,气孔之间彼此连接融合的情况增加,造成孔径 分布更不均匀,同时气孔壁上出现的微小气孔逐 渐增多,这与样品宏观性质的具体变化相吻合.发 泡剂掺量为 0.5%和 1%时,样品孔径在 0~ 0.25 mm的占比均超过 75%,高于其他样品;与 0.5%发泡剂掺量样品相比,1%发泡剂掺量样品 在保证十分接近的平均孔径(0.5%:0.320 mm, 1%:0.342 mm)的同时,有着更好的孔隙均匀度 (最大孔径为 6.842 mm),并且在 0~2 mm 有着 更好的孔径梯度,这有利于样品的隔热性能以及 力学性能<sup>[13]</sup>.





发泡陶瓷的物相组成是判断烧结过程是否发 生的依据<sup>[14]</sup>.通过 XRD 分析(图 10)可得,各样品 的主要晶相均为石英相(SiO<sub>2</sub>,PDF # 46-1045), 0.5%发泡剂掺量样品中存在霞石相(NaAlSiO<sub>4</sub>, PDF # 35-0424)及方解石相(CaCO<sub>3</sub>,PDF # 721214),10% 发泡剂掺量样品中存在钙长石相 (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>,PDF  $\ddagger$  41-1486),15% 发泡剂掺量 样品中存在硅酸钙相(CaSiO<sub>8</sub>,PDF  $\ddagger$  33-0306). 原料中锂辉石的存在会促使石英相在熔体中熔解 的同时抑制其向方石英的转化<sup>[15]</sup>,石英相含量也



图 9 不同发泡剂掺量下样品的孔径分布









会随发泡剂掺量增加而逐渐降低,导致高温熔融 液相的系统黏度降低<sup>[16]</sup>,有利于气孔成长以及表 观密度的降低.原料中的 CaCO<sub>3</sub> 在高温下生成大 量高熔点的钙长石相.烧结后四硼酸钠变为非晶 态,因此图中并无四硼酸钠的峰.

结合实验及相关文献<sup>[17]</sup>可得,发泡剂掺量为 1%时制备的样品较能符合要求.

#### 2.3 粉煤灰添加量对样品性能的影响

为探究粉煤灰添加量对样品性能的影响,在 粉体 PB 基础上分别外掺 0%、10%、20%粉煤灰, 再外掺 5% CaCO<sub>3</sub> 和 30% 四硼酸钠,记为 P0、 P10、P20,具体化学组成见表 2.

	表 2	粉体化学组成
Tab. 2	Chemio	cal composition of powders

编号	w(SiO <sub>2</sub> )/ %	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/ %	w(Fe₂O₃)/ %	w(CaO)/ %	w(MgO)/ %	w(K <sub>2</sub> O)/ %	w(Na <sub>2</sub> O)/ %	$w(\mathrm{SO}_3)/$	w(ZnO)/ %	烧失量/ %
<b>P</b> 0	57.27	17.68	4.47	5.48	1.17	2.29	4.25	0.26	4.61	2.52
P10	58.17	18.10	4.66	5.66	1.22	2.91	4.06	0.29	4.24	0.69
P20	58.32	18.26	4.78	5.76	1.24	2.90	3.85	0.32	3.89	0.68

将坯体置于箱式炉中,保证升温速率和保温 时间不变,探究不同烧结温度下,不同粉煤灰添加 量对样品性能的影响.如图 11 所示,样品的表观 密度随着粉煤灰添加量的增加而迅速增大,但在 更高的温度(大于 750 ℃)时,更多的粉煤灰添加 量对样品表观密度的影响减弱;孔隙率随着粉煤 灰添加量的提升而迅速降低,均在 775 ℃时达到 最低;P10、P20 的吸水率 W 与 P0 相比都有很大





Fig. 11 Various properties of samples at different sintering temperatures

程度的下降,且随烧结温度的升高而略微降低(维持在4%以下).主要的原因是:P0样品的化学组成中SiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的比例更接近于三者相图中的共晶点<sup>[18]</sup>,导致其软化温度较低,相同温度下能够生成更多的黏度更低的熔融液相,这有助于CaCO<sub>3</sub>分解产生的CO<sub>2</sub>气体更好地被液相包裹,达到更低的表观密度以及更高的孔隙率,但同时因为孔棱和孔壁中存在较多细微气孔导致样品的吸水率偏高.当向其中添加更多粉煤灰时,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>增加,导致相应的助熔成分比例降低,样品的熔化温度升高,相同温度下产生的液相

量减少,造成大量的气体外逸,阻碍气孔生长,进 而造成表观密度的增大以及孔隙率的降低;而烧结 温度的升高会抵消部分因为粉煤灰添加量增加带 来的对于发泡性能的负面影响,因此在更高的烧 结温度下 P10 和 P20 样品的各项性质相差不大.

图 12 显示了 750 ℃下烧结制得的各样品的 XRD 图谱,可以看出主要晶相为石英相(SiO<sub>2</sub>, PDF # 46-1045),其含量随粉煤灰添加量的增加 略有减少,石英相在冷却阶段存在冷却应力,会损 害样品的力学性能<sup>[19]</sup>;P10、P20 样品中出现的钙 长石相(CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>,PDF # 41-1486)与样品中添 加的 CaO 有关.



图 12 不同粉煤灰添加量下样品的 XRD 图谱 Fig. 12 XRD patterns of samples with different coal fly ash additions

#### 2.4 粉料粒度对样品性能的影响

在烧结过程最重要的发泡阶段,发泡剂在熔 融液相中达到分解温度,产生的气体被液相包裹 进而产生尺寸均匀合理的气泡.研究表明[20],在 有液相参与的烧结过程中,液相能润湿和溶解固 相,由于小颗粒的表面能较大,其溶解于液相的能 力越强,越有利于发泡.因此,本节中通过控制研 磨时间来探究粉料粒度对样品性能的影响.向原 始粉料 PB 中外掺 1% CaCO<sub>3</sub> 和 30% 四硼酸钠 后,在球磨机中分别研磨1、2、3、4 h. 图 13 和表 3 分别展示了不同研磨时间粉料粒度分布曲线及平 均粒度,粉料粒度分布曲线均为单峰,随研磨时间 的增加,峰值对应粒度逐渐降低(研磨1h样品为 96.01 µm,研磨 2 h 样品为 80.70 µm,研磨 3 h 样 品为 67.86 µm, 研磨 4 h 样品为 57.07 µm), 粉料 平均粒度 D<sub>50</sub>逐渐降低,由1h 时的 77.86 μm 降 至4h时的41.73 μm;同时粉料粒度范围也随研

磨时间的增加而缩小,分布曲线向小粒度方向移动,粒度更均匀.



图 13 粉料粒度分布曲线

Fig. 13 Powder particle size distribution curves

表 3 粉料平均粒度 Tab. 3 Average particle size of powder

研磨时间/h	$D_{50}/\mu{ m m}$	研磨时间/h	$D_{50}/\mu{ m m}$
1	77.86	3	47.65
2	74.79	4	41.73

在确定研磨时间带来的粉料粒度变化后,保 持其他因素(烧结温度 750 ℃、升温速率 5 ℃/min、保温时间 15 min)不变,探究研磨时间 对样品性能的影响.如图 14 所示,随着研磨时间 增加,样品的表观密度(最高为 0.69 g/cm3,最低 为 0.63 g/cm<sup>3</sup>)、孔隙率(最高为 71.1%,最低为 68.5%) 和吸水率(最高为11.38%,最低为 6.87%)均逐渐降低:抗压强度逐渐升高(最低为 2.39 MPa,最高为 2.81 MPa);各样品平均孔径呈 先下降后上升的趋势;样品孔径在0~0.25 mm的 比例逐渐降低,其他区间的孔径占比增加.主要的 原因是:在粉料添加量一定的情况下,通过延长研 磨时间来降低粉料粒度导致颗粒分散程度增加, 活性提高,产生的液相量大,黏度低,有利于小气 孔的生长;而研磨时间过短,使得相同发泡剂掺量 下发泡剂颗粒增大,不利于其溶解于液相中,致使 液相化学组成与设计组成有较大差异,难以制备 出孔径均匀的样品,大而彼此连接的气孔在降低 孔隙率、提高吸水率的同时还会对样品的物理强度 产生影响,这与多孔固体抗压强度经典模型[21]相 吻合(孔隙率为 71.1%时抗压强度为 2.39 MPa, 孔隙率为 68.5% 时抗压强度为 2.81 MPa).





Fig. 14 Various properties of samples at different grinding time

### 3 结 论

(1)烧结温度对发泡陶瓷的性能有重要影响,

样品的表观密度随烧结温度升高先降低后升高, 在 750 ℃时取得最小值 0.118 g/cm<sup>3</sup>. (2) CaCO<sub>3</sub> 含量是影响发泡过程的重要因素,适宜的发泡剂掺量为1%.

(3)粉煤灰原料中 CaO 含量偏高,过高的粉 煤灰添加量会导致样品中钙长石的出现,同时过 高的 SiO<sub>2</sub> 含量会导致液相黏度升高,阻碍气体在 液相中的移动和扩散,不利于发泡过程,导致样品 的孔隙结构劣化.

(4)粉料粒度越低,表面能越大,越容易在高 温下熔融;发泡剂颗粒越小,会产生更多的发泡核 心,利于整个发泡过程,进而导致表观密度和孔隙 率下降,抗压强度上升,孔径分布更加均匀.

#### 参考文献:

- [1] 林伯强.中国能源发展报告 2020 [M].北京:北京 大学出版社,2020.
  LIN Boqiang. China Energy Outlook 2020 [M]. Beijing: Peking University Press, 2020. (in Chinese)
- [2] 刘 荣,高文元.新型建筑保温隔热材料的研究及应用进展[J].中国陶瓷工业,2013,20(5):25-28.

LIU Rong, GAO Wenyuan. Progress in research and application of new thermal insulation building materials [J]. China Ceramic Industry, 2013, 20(5): 25-28. (in Chinese)

 【3】张勇林.高温发泡陶瓷制备基础研究 [D]. 广州:
 华南理工大学,2014.
 ZHANG Yonglin. Fundamental research on preparation of high-temperature foamed ceramics [D].

Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)

- [4] 付春伟. 粉煤灰多孔陶瓷的制备及性能研究 [D]. 济南:山东建筑大学,2011.
  FU Chunwei. Preparation and study on characteristics of fly ash porous ceramics [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011. (in Chinese)
- [5] ZHU Mengguang, JI Ru, LI Zhongmin, et al. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 398-405.
- [6] LUO Yang, ZHENG Shili, MA Shuhua, et al. Preparation of sintered foamed ceramics derived entirely from coal fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 529-538.

- [7] CHEN Bo, LUO Zhiwei, LU Anxian. Preparation of sintered foam glass with high fly ash content [J].
   Materials Letters, 2011, 65(23/24): 3555-3558.
- [8] FERNANDES H R, FERREIRA D D, ANDREOLA F, et al. Environmental friendly management of CRT glass by foaming with waste egg shells, calcite or dolomite [J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 13371-13379.
- [9] LI Xiangming, YANG Qing, SUN Dongyue, et al. Foaming mechanism and performance of closed-pore foamed ceramics prepared using calcium carbonate as a foaming agent [J]. Ceramics International, 2021, 47(20): 29162-29173.
- [10] 彭丽芬. 煤矸石发泡陶瓷的制备及性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
  PENG Lifen. Preparation and study on performance of coal gangue foam ceramics [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] SKIBINSKI J, CWIEKA K, IBRAHIM S H, et al. Influence of pore size variation on thermal conductivity of open-porous foams [J]. Materials, 2019, 12(12): 2017.
- [12] KÖNIG J, PETERSEN R R, YUE Yuanzheng. Influence of the glass-calcium carbonate mixture's characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34 (6): 1591-1598.
- [13] KONIJN B J, SANDERINK O B J, KRUYT N P.
   Experimental study of the viscosity of suspensions:
   Effect of solid fraction, particle size and suspending liquid [J]. Powder Technology, 2014, 266: 61-69.
- [14] 谭洪波,吕周岭,马保国,等.黄姜废渣发泡陶瓷的制备及其性能研究[J]. 硅酸盐通报,2021,40(2):597-604.

TAN Hongbo, LYU Zhouling, MA Baoguo, *et al*.
Preparation and properties of foamed ceramics from turmeric residue [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(2): 597-604. (in Chinese)

- [15] 胡晓洪,张庆今. 锂辉石的工业应用 [J]. 中国陶瓷, 1995, **31**(3): 34-36.
  HU Xiaohong, ZHANG Qingjin. The application of spodumene to industry [J]. China Ceramics, 1995, **31**(3): 34-36. (in Chinese)
- [16] TANG Baoshan, LIN Jian, QIAN Shuai, et al.

Preparation of glass-ceramic foams from the municipal solid waste slag produced by plasma gasification process [J]. Materials Letters, 2014, 128: 68-70.

- [17] XI Xiuan, XU Linfeng, SHUI Anze, et al. Effect of silicon carbide particle size and CaO content on foaming properties during firing and microstructure of porcelain ceramics [J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 12931-12938.
- [18] 葛雪祥. 炉渣发泡陶瓷的组成设计及孔结构与力学 性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
  GE Xuexiang. Study on composition design, pore structure and mechanical properties of foamed ceramic from coal bottom ash [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [19] 韩 超,曹顺华,刘慧远. 原料 B<sub>4</sub>C 粉末粒度对多

孔 TiB<sub>2</sub>-TiC 复相陶瓷孔结构的影响 [J]. 粉末冶金 材料科学与工程,2011,16(5):678-681.

HAN Chao, CAO Shunhua, LIU Huiyuan. Effect of particle size of  $B_1C$  on pore structure of porous TiB<sub>2</sub>-TiC multiphase ceramics [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(5): 678-681. (in Chinese)

- [20] 张联盟. 材料科学基础 [M]. 武汉: 武汉理工大学 出版社, 2008.
  ZHANG Lianmeng. Fundamentals of Materials Science [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [21] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 178-182.

### Preparation of coal fly ash foamed ceramic using calcium carbonate as foaming agent

WANG Zhicong, XIE Wensheng, LI Aimin\*

(School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** As a new type of building wall material, foamed ceramic has the characteristics of light weight and heat preservation. Using coal fly ash as the raw material, adding calcium carbonate and sodium tetraborate as foaming agent and flux agent respectively, a new kind of foamed ceramic is prepared by ball milling, pressing, firing and other processes. At the same time, the effects of sintering temperature, foaming agent content, coal fly ash addition and powder particle size on foaming effect are studied. The results show that the average pore size of the sample increases with the increase of foaming agent content. With the increase of sintering temperature, the apparent density of the sample decreases first and then increases, while the porosity shows an opposite trend, and the average pore size increases gradually. The apparent density and porosity of the sample decreases. The study shows that the foamed ceramic with an apparent density of 0.156 g/cm<sup>3</sup>, a porosity of 93% and a compressive strength of 2.23 MPa is prepared under the conditions of foaming agent content of 1%, sintering temperature of 750  $\mathbb{C}$  and holding time of 15 min.

Key words: coal fly ash; foamed ceramic; calcium carbonate; high temperature foaming; sintering temperature; pore structure