

## 利用粉煤灰和高炉渣制备发泡陶瓷材料

李海燕<sup>1</sup>, 张蕾华<sup>2</sup>, 李富松<sup>3</sup>

(1. 郑州财经学院土木工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063000; 3. 泰钢集团, 山东 莱芜 271100)

**摘要:** 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。以粉煤灰和高炉渣为主要原料, 外加碳化硅 (SiC) 为高温发泡剂, 硼酸钠 ( $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ) 为助熔剂, 采用高温烧结法制备发泡陶瓷材料。主要研究了原料配比、SiC 添加量及  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$  添加量对发泡陶瓷的气泡结构、体积密度、吸水率、抗压强度及导热系数的影响。实验结果表明: 当粉煤灰含量为 70%, 高炉渣含量为 30%, 并额外添加 0.3% SiC 粉末和 5%  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ , 在烧成温度 1100 °C 下保温 40 min 时, 发泡陶瓷具有较佳的综合性能, 其体积密度为 0.516 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率为 3.82%, 抗压强度为 3.62 MPa, 导热系数为 0.094 W/(m·K)。且该条件下样品的主要物相包括石英相 ( $\text{SiO}_2$ )、钙长石 ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) 和辉石相 ( $\text{Ca}(\text{Mg,Al,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ ), 大量晶体的析出促进了材料强度的提升。本研究为粉煤灰和高炉渣等工业固体废弃物转成高附加值的建筑保温材料提供一种新方法。

**关键词:** 陶瓷及复合材料; 发泡陶瓷; 粉煤灰; 高炉渣; 气泡结构; 综合性能

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.023

中图分类号: TD989; X756 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 05-0161-07

**引用格式:** 李海燕, 张蕾华, 李富松. 利用粉煤灰和高炉渣制备发泡陶瓷材料[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 161-167.

LI Haiyan, ZHANG Leihua, LI Fusong. Preparation of foamed ceramic materials from fly ash and blast furnace slags[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 161-167.

我国建筑行业主要使用 EPS、PU、XPS 等有机板作为外墙保温材料, 但因其强度低、防火性能差、易老化等缺点导致了許多火灾事故的发生, 给人民的生命和财产带来了严重的威胁<sup>[1]</sup>。发泡陶瓷是由工业固废 (如粉煤灰、高炉渣、钢渣、煤矸石、页岩渣等), 外加部分发泡剂、助熔剂等, 采用高温发泡法制成的一种多孔无机保温材料<sup>[2-3]</sup>。与传统有机保温材料相比, 具有强度高、阻燃性好、防老化等优异性能, 现已被广泛应用于建筑保温材料。

粉煤灰是燃煤电厂煤粉燃烧后产生的一种固体颗粒<sup>[4-5]</sup>, 随着我国对煤炭资源需求量的增加, 粉煤灰的排放量也在逐年增大, 预计 2024 年其排放量将高达 9.25 亿 t<sup>[6]</sup>。大量露天堆放的粉煤灰不

仅造成土地资源的浪费, 而且其中含有的重金属离子还会破坏土壤的酸碱平衡, 污染地下水。高炉渣是冶炼生铁时从高炉中排出的一种工业固体废弃物<sup>[7]</sup>。若处理不当, 炉渣中的有害物质会随着雨水慢慢渗入到土壤和地下水中, 从而破坏土壤结构、污染水源, 给人民的生活环境带来巨大的威胁<sup>[8-9]</sup>。如果能将这些固体废弃物进行合理的资源化利用, 转化成高价值的绿色产品, 不但能有效解决环境污染, 还能够创造巨大的经济效益。

本研究以粉煤灰和高炉渣为主要原料, 碳化硅 (SiC) 为发泡剂, 硼酸钠 ( $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ) 为助熔剂, 采用高温烧结法制备发泡陶瓷材料。探究了原料配比、SiC 添加量及  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$  添加量对发泡陶瓷体积密度、吸水率、抗压强度、导热系数以及

收稿日期: 2022-12-18

基金项目: 河南省项目“应用型本科高校大学生可雇佣能力提升路径研究”(JYB2020398)

作者简介: 李海燕 (1981-) 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为土木工程。

气泡结构的影响，该研究为粉煤灰和高炉渣等工业废渣的资源化利用提供了一种新思路。

### 1 实验

#### 1.1 实验原料

本实验所选用的原料为粉煤灰（河北唐山）和高炉水淬渣（山东泰钢），两者的化学成分见表 1。由表 1 可知，粉煤灰的主要化学成分是 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，两者含量高达 90.77%；高炉渣的

主要化学成分为 CaO，其含量高达 41.82%，两种固体废弃物相互混合，达到成分互补的目的，为制备发泡陶瓷提供了先决条件。图 1 显示了粉煤灰和高炉渣的 XRD 结果，由图 1 可知，粉煤灰的主晶相由石英相（SiO<sub>2</sub>）、莫来石相（3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>）和普通辉石相（Ca,Mg,Fe,Al)<sub>2</sub>[(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>] 组成；高炉渣中有明显的馒头状衍射峰出现，说明高炉水淬渣中主要以无定形的玻璃相存在，同时析出少量的硅酸二钙（2CaO·SiO<sub>2</sub>）。

表 1 粉煤灰和高炉渣的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of fly ash and blast furnace slags

名称	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	L.O.I
粉煤灰	57.14	23.63	4.88	1.13	4.15	1.42	2.24	0.76	4.65
高炉渣	33.81	14.12	0.69	0.57	41.82	6.27	0.33	0.46	1.93

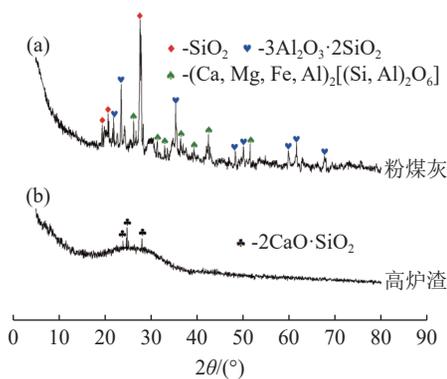


图 1 粉煤灰和高炉渣的 XRD  
Fig.1 XRD of fly ash and blast furnace slags

以粉煤灰和高炉渣为基体原料，实验前使用研磨机将原料磨细至 0.15 mm，同时每 100 份原料中额外添加 0.3 份 SiC 粉末和 5 份硼酸钠分别作为

发泡剂和助熔剂，实验配方及化学组成见表 2、3。根据表 2 实验配方进行配料，采用快速球磨机将混合料均匀混合 1 h，然后将混合料倒入模具中铺平，样品采用半干压成型，成型压力为 5 MPa，最后将样品放入马弗炉中以 10 °C/min 的速率升到 900 °C，再以 3 °C/min 的速率升到 1 100 °C，保温 40 min 进行焙烧发泡成型。

表 2 实验配方/%  
Table 2 Test formula

样品编号	粉煤灰	高炉渣	碳化硅	硼酸钠
A1	50	50	0.3	5
A2	60	40	0.3	5
A3	70	30	0.3	5
A4	80	20	0.3	5
A5	90	10	0.3	5

表 3 样品的化学组成/%  
Table 3 Chemical composition of samples

样品编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	L.O.I
A1	45.48	18.88	2.78	0.85	22.99	3.85	1.28	0.61	3.29
A2	47.81	19.83	3.20	0.90	19.22	3.36	1.47	0.64	3.56
A3	50.14	20.78	3.62	0.96	15.45	2.88	1.67	0.67	3.84
A4	52.47	21.73	4.04	1.02	11.69	2.39	1.86	0.70	4.11
A5	54.81	22.68	4.46	1.07	7.92	1.91	2.05	0.73	4.38

#### 1.2 性能测试与分析

采用 MPDDY2094 型多晶 X 衍射仪（扫描角度为 5~80°）测定较优条件下样品的物相；采用数码相机记录发泡陶瓷样品的气泡结构；样品的体积密度和吸水率按照 GB/T 5486—2008《无机硬

质绝热制品实验方法》进行测量；使用 WAY-300 全自动抗压抗折试验机以 0.5 mm/min 的下降速度来测量发泡陶瓷的抗压强度；在室温环境的条件下，根据保护量热法的原理，使用 HOT DISK TPS25000S 热导仪测量发泡陶瓷试样的导热系

数。每组数据取3次测量结果的平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原料比对发泡陶瓷性能及气泡结构的影响

通过改变粉煤灰含量来探究原料比对发泡陶瓷气泡结构及性能的影响，表2按照粉煤灰含量分别为50%、60%、70%、80%、90%进行配料，并额外添加0.3% SiC粉末和5% Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub>，

得到的五组混合料依次标记为A1、A2、A3、A4、A5。图2展示了不同粉煤灰含量下发泡陶瓷样品截面的宏观照片，由图2可知，随着粉煤灰含量的增加，发泡陶瓷的气泡尺寸逐渐减小，气泡壁的数量逐渐增多，其平均泡径由3.8 mm减小至0.6 mm，且样品的气泡结构呈现出先变好后变差的趋势，当粉煤灰含量为70%时，样品的气泡结构较优，气泡分布均匀，其平均泡径约为2 mm。

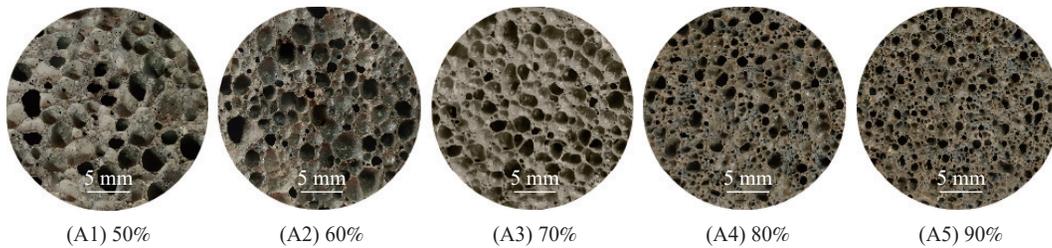


图2 不同粉煤灰含量下发泡陶瓷截面  
Fig.2 Cross-sections of foamed ceramics with different fly ash content

图3为粉煤灰含量对发泡陶瓷体积密度、体积吸水率、抗压强度和导热系数的影响。由图3可见，随着粉煤灰含量的增加，发泡陶瓷样品的

体积密度、抗压强度和导热系数逐渐增大，体积吸水率呈现出先减小后增大的变化趋势。其体积密度由0.402 g/cm<sup>3</sup>增大到0.921 g/cm<sup>3</sup>，吸水率由4.15%减小至3.82%，后再增加到5.48%，抗压强度由1.81 MPa增大到5.97 MPa，导热系数由0.087 W/(m·K)增大到0.152 W/(m·K)。当粉煤灰含量为70%时，发泡陶瓷的体积密度为0.516 g/cm<sup>3</sup>，吸水率为3.82%，抗压强度为3.62 MPa，导热系数为0.094 W/(m·K)，其综合性能表现较优，符合建筑保温材料的性能要求<sup>[10]</sup>。

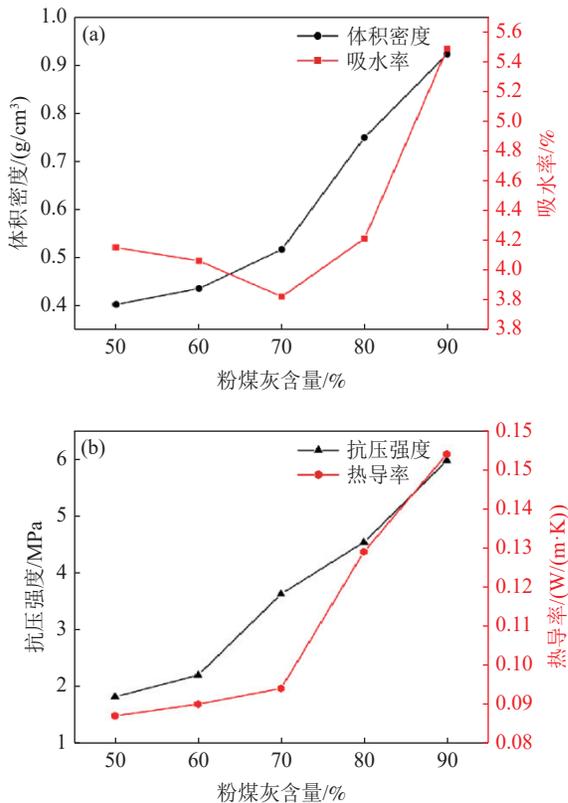


图3 粉煤灰含量对发泡陶瓷体积密度、吸水率(a)抗压强度、导热系数(b)的影响

Fig.3 Effect of fly ash content on the bulk density, water absorption(a), compressive strength and thermal conductivity(b) of foamed ceramics

从实验结果可以看出，不同原料比对发泡陶瓷样品性能及气泡结构有很大影响。具体原因如下：当粉煤灰含量为50%时，混合料中SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等化合物含量较低，CaO、MgO等碱金属化合物含量较高，当烧成温度达到混合料共熔点时，熔体中[SiO<sub>4</sub>]和[AlO<sub>4</sub>]等网络四面体结构含量较少，且Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>等断网离子还会夺走四面体中的氧原子，使其桥氧键断裂，所以该条件下熔体粘度较低<sup>[11]</sup>。此时由CO<sub>2</sub>气体形成的气泡会不断地克服熔体粘度阻力而长大或相互融合形成大气泡或连通气泡，气泡结构较差，因此该条件下发泡陶瓷的体积密度小、导热系数低、吸水率较高，同时数量较少且薄的气泡壁使得样品在受到外界载荷作用时每单位面积的实际承载面积较小<sup>[12]</sup>，所以试样A1具有较小的抗压强度。随着粉煤灰含量的增加，混合料中SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量逐

渐增大, CaO、MgO 的含量逐渐减小, 所以高温液相熔体的粘度逐渐增加。当粉煤灰含量为 70% 时, CO<sub>2</sub> 气泡所产生的压力与液相熔体的粘度相匹配, 因此试样 A3 的气泡结构较好, 气泡较均匀且缺陷较少, 所以其具有较低的体积密度、吸水率和导热系数的同时, 还具有较高的抗压强度。随着粉煤灰含量增加到 90% 时, 试样 A5 中 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量过多, 此时液相熔体粘度较大, 导致气泡发育不充分, 因此该条件下样品的气泡尺寸过小且气泡壁较厚, 虽其具有较高的抗压强度, 但较大的导热系数和吸水率不能满足保温材料的要求。

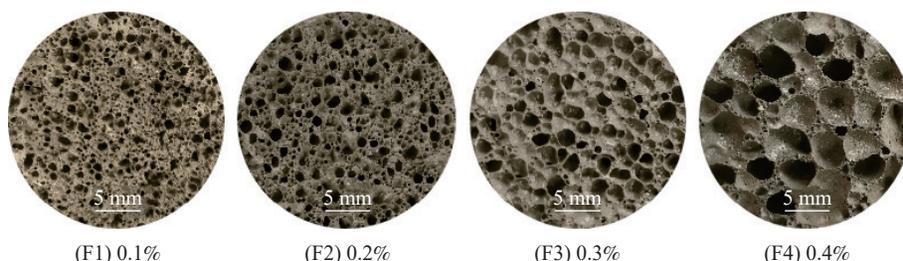


图 4 不同 SiC 添加量下发泡陶瓷截面

Fig.4 Cross-sections of foamed ceramics with different SiC addition

图 5 为 SiC 添加量对发泡陶瓷体积密度、体积吸水率、抗压强度和导热系数的影响。由图可见, 随着 SiC 添加量的增加, 发泡陶瓷样品的体积密度、抗压强度和导热系数逐渐减小, 体积吸水率逐渐增大。其体积密度由 0.913 g/cm<sup>3</sup> 减小到 0.401 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率由 3.32% 增加到 3.93%, 抗压强度由 5.74 MPa 减小到 1.82 MPa, 导热系数由 0.141 W/(m·K) 减小到 0.082 W/(m·K)。

SiC 是制备发泡陶瓷的核心添加剂, 能够与 O<sub>2</sub> 发生氧化还原反应生成 CO<sub>2</sub> 气体, 进而在样品内部形成气泡<sup>[13]</sup>。当 SiC 添加量为 0.1% 时, 样品 F1 中 CO<sub>2</sub> 气体生成量较少, 大部分气体会溶解在高温熔体中, 此时剩余的少量气体无法克服熔体的粘度阻力, 因此该样品气泡尺寸较小, 气泡壁较厚, 进而导致其体积密度、抗压强度及导热系数较大。随着 SiC 添加量的增加, CO<sub>2</sub> 气体生成量逐渐增加, 其产生的膨胀压力增大, 当 SiC 添加量为 0.3% 时, 气体的膨胀压力与熔体粘度阻力相似, 因此样品 F3 的气泡尺寸适中且分布均匀, 虽其吸水率略高于 F1 和 F2, 但导热系数远低于两者。当 SiC 添加量为 0.4% 时, 气体膨胀压力过大, 部分气泡相互融合或吞并形成连通气泡

## 2.2 SiC 添加量对发泡陶瓷性能及气泡结构的影响

通过改变 SiC 添加量来探究发泡剂对发泡陶瓷气泡结构及性能的影响, 按照粉煤灰含量为 70%, 高炉渣含量为 30%, Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量为 5%, SiC 添加量分别为 0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 进行配料, 样品依次标记为 F1、F2、F3 和 F4。图 4 展示了不同 SiC 添加量下发泡陶瓷样品截面的宏观照片。由图 4 可知, 随着 SiC 添加量的增加, 发泡陶瓷的气泡尺寸逐渐增大, 气泡壁变薄, 当 SiC 添加量为 0.4% 时, 样品 F4 的泡径过大, 同时气泡壁上还分布着大量的小气泡, 其气泡结构较差。

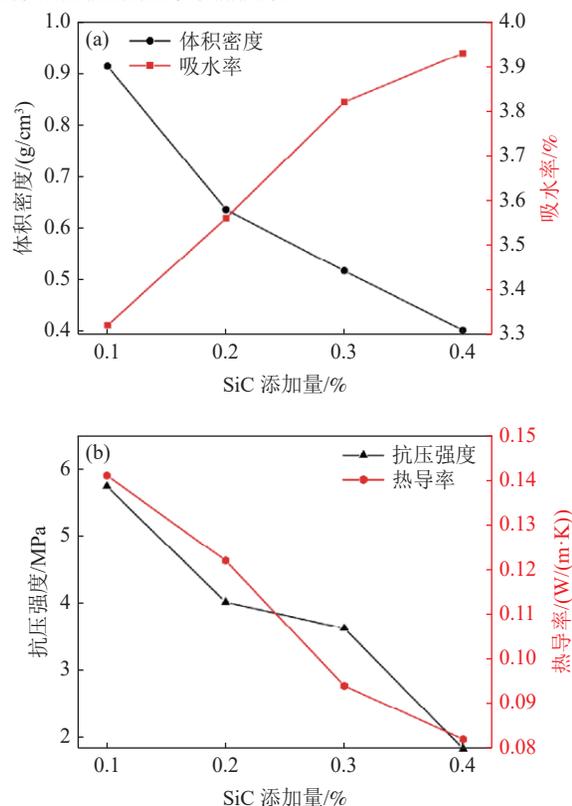


图 5 SiC 添加量对发泡陶瓷体积密度、吸水率 (a) 抗压强度、导热系数 (b) 的影响

Fig.5 Effect of SiC addition on the bulk density, water absorption(a), compressive strength and thermal conductivity(b) of foamed ceramics

和缺陷气泡，进而导致样品 F4 吸水率较高，抗压强度较低。综合比较分析，当 SiC 添加量为 0.3% 时，样品气泡结构和性能较优。

### 2.3 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量对发泡陶瓷性能及气泡结构的影响

通过改变 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量来探究助熔剂对发泡陶瓷气泡结构及性能的影响，按照粉煤灰含量为 70%，高炉渣含量为 30%，SiC 添加量为 5%，Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量分别为 1%、3%、5% 和 7% 进行

配料，样品依次标记为 Z1、Z2、Z3 和 Z4。图 6 展示了不同 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量下发泡陶瓷样品的宏观照片，由图可知，当 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量为 1% 时，样品 Z1 的气泡数量较少且尺寸较小，样品中气泡壁较厚。随着 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量的增加，发泡陶瓷的气泡尺寸逐渐增大，气泡壁数量变少。当 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量的增加为 7% 时，样品 Z4 的气泡尺寸分布不均匀，大气泡和小气泡相互交叉分布，同时样品中还存在部分连通气泡。

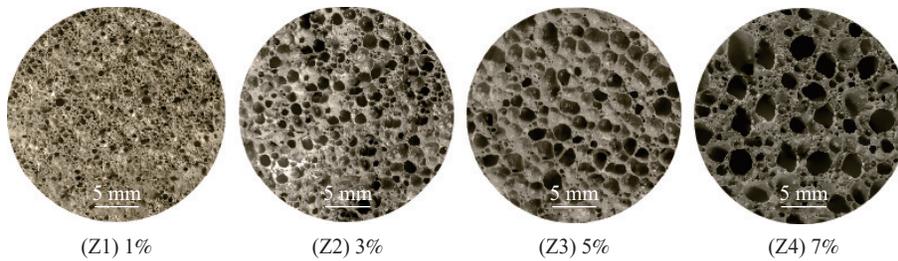


图 6 不同 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量下发泡陶瓷截面

Fig.6 Cross-sections of foamed ceramics with different Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> addition

图 7 为 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量对发泡陶瓷体积密

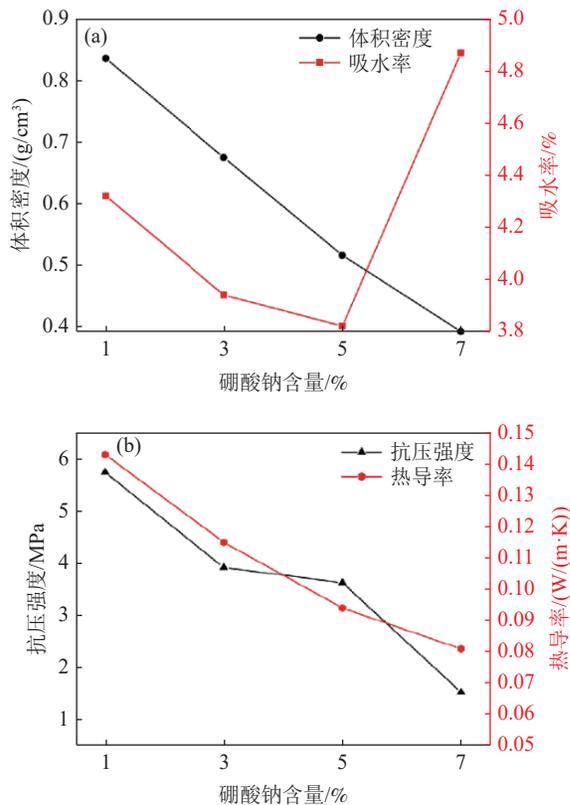


图 7 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量对发泡陶瓷体积密度、吸水率 (a) 抗压强度、导热系数 (b) 的影响

Fig.7 Effect of Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> addition on the bulk density, water absorption(a), compressive strength and thermal conductivity(b) of foamed ceramics

度、体积吸水率、抗压强度和导热系数的影响。由图可见，随着 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量的增加，发泡陶瓷样品的体积密度、抗压强度和导热系数逐渐减小，体积吸水率呈现出先减小后增大的变化趋势。其体积密度由 0.836 g/cm<sup>3</sup> 减小到 0.392 g/cm<sup>3</sup>，吸水率由 4.32% 减小到 3.82%，后再增加到 4.87%，抗压强度由 5.75 MPa 减小到 1.52 MPa，导热系数由 0.143 W/(m·K) 减小到 0.081 W/(m·K)。

Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 在制备发泡陶瓷过程中发挥着助熔剂的作用，能够在高温下分解出 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>O，进而降低混合料的熔融温度及液相熔体的粘度<sup>[14]</sup>。当 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量为 1% 时，样品 Z1 熔融温度较高，在发泡温度下无法生成充足的熔体来包裹住 CO<sub>2</sub> 气体，大部分气体通过固体颗粒之间的缝隙逸出，因此样品 Z1 发泡效果较差，气泡数量较少且尺寸较小，气泡结构较差，进而导致其吸水率和导热系数较高。随着 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量的增加，混合料的熔融温度逐渐降低，样品中形成的熔体量越来越多。当 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量为 5% 时，Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的助熔效果较充分，样品 Z3 中形成了充足的熔体，且同时熔体粘度阻力与 CO<sub>2</sub> 气泡所产生的压力相接近，因此样品 Z3 具有良好的气泡结构和性能。当 Na<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 添加量增加到 7% 时，样品 Z4 中生成了大量的液相熔体且熔体粘度较小，其流动

性较大,部分大气泡会被流动的熔体所填充,因此样品 Z4 气泡尺寸不均匀,大小气泡交叉分布,气泡结构性较差,所以该条件下的发泡陶瓷吸水率较大,抗压强度较小。综合比较分析,当  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$  添加量为 5% 时,样品的气泡结构和性能较优。

由单因素实验结果可知,当粉煤灰含量为 70%,高炉渣含量为 30%,并额外添加 0.3% SiC 粉末和 5%  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$  时,发泡陶瓷具有较佳的综合性能,其体积密度为  $0.516 \text{ g/cm}^3$ ,吸水率为 3.82%,抗压强度为 3.62 MPa,导热系数为  $0.094 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。图 8 是较佳条件下粉煤灰-高炉渣发泡陶瓷的 XRD,由图 8 可知,样品的主要物相包括石英相 ( $\text{SiO}_2$ )、钙长石相 ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) 和辉石相 ( $\text{Ca(Mg,Al,Fe)Si}_2\text{O}_6$ ),当样品受到外界压力冲击时,大量晶体的析出会阻止裂纹在样品内部进行传播,进而增强材料的强度。

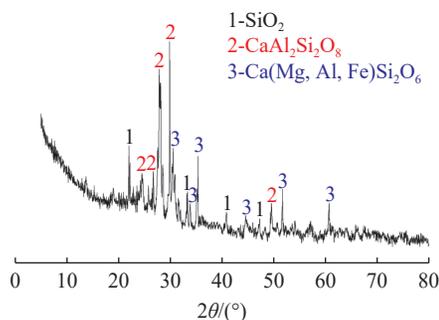


图 8 较佳条件下样品的 XRD  
Fig.8 XRD of samples at optimal condition

### 3 结 论

(1) 利用粉煤灰和高炉渣为主要原料制备发泡陶瓷,由单因素实验结果可知,当粉煤灰含量为 70%,高炉渣含量为 30%,并额外添加 0.3% SiC 粉末和 5%  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$  时,发泡陶瓷具有较佳的综合性能,其体积密度为  $0.516 \text{ g/cm}^3$ ,吸水率为 3.82%,抗压强度为 3.62 MPa,导热系数为  $0.094 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

(2) 较佳条件下发泡陶瓷样品的主要物相包括石英相 ( $\text{SiO}_2$ )、钙长石相 ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) 和辉石相 ( $\text{Ca(Mg,Al,Fe)Si}_2\text{O}_6$ ),大量晶体的析出促进了材料强度的提升。

(3) 该发泡陶瓷材料的成功制备为粉煤灰和高炉渣等大宗工业废渣的资源化利用提供了一种

新思路,符合国家提倡的“资源的高效利用和循环利用”的政策理念。

### 参考文献:

- [1] 余江,熊平,刘建泉,等.以污泥、建筑垃圾为基料制备高强轻质发泡环保陶瓷板[J].四川大学学报(工程科学版),2014,46(5):161-167.
- [2] YU J, XIONG P, LIU J Q, et al. Preparation of high-strength and light-weight environmental foaming ceramic plate using sludge and construction waste[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(5):161-167.
- [3] 李林,姜涛,陈超,等.攀西钒钛磁铁矿尾矿制备储水泡沫陶瓷的研究[J].矿产综合利用,2020(6):7-13+6.
- [4] LI L, JIANG T, CHEN C, et al. Study on preparation of water-retaining foam ceramics from vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):7-13+6.
- [5] 赵威,韩硕,陈明堃.钼尾矿基发泡陶瓷墙材的制备及其性能研究[J].商洛学院学报,2021,35(6):1-5+12.
- [6] ZHAO W, HAN S, CHEN M K. Preparation of molybdenum tailings-based foamed ceramic wall material and its performance research[J]. Journal of Shangluo College, 2021, 35(6):1-5+12.
- [7] 聂铁苗,夏淼,刘攀攀,等.粉煤灰基矿物聚合材料研究进展[J].矿产综合利用,2022(4):123-128.
- [8] NIE Y M, XIA M, LIU P P, et al. Research progress on fly ash based geopolymer[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(4):123-128.
- [9] 康栋,杨志杰,张德.粉煤灰中提取非晶态硅及硅产物的高值化利用[J].矿产综合利用,2022(4):162-168.
- [10] KANG D, YANG Z J, ZHANG D. Extraction of amorphous silicon from fly ash and high value utilization of silicon products[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(4):162-168.
- [11] 刘梦茹,杨亚东,杨素洁,等.粉煤灰资源综合利用现状研究[J].化工矿物与加工,2021,50(4):45-48.
- [12] LIU M R, YANG Y D, YANG S J, et al. Study on statues of comprehensive utilization of fly ash[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(4):45-48.
- [13] 许莹,李单单,杨姗姗,等.含钛高炉渣综合利用研究进展[J].矿产综合利用,2021(1):23-31.
- [14] XU Y, LI D D, YANG S S, et al. Research progress of comprehensive utilization of Ti-bearing blast furnace slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):23-31.

- [8] 王海风, 张春霞, 齐渊洪, 等. 高炉渣处理技术的现状和新的发展趋势[J]. *钢铁*, 2007(6):83-87.  
WANG H F, ZHANG C X, QI Y H, et al. Present situation and development trend of blast furnace slag treatment[J]. *Iron and Steel*, 2007(6):83-87.
- [9] 刘洋, 张春霞. 钢铁渣的综合利用现状及发展趋势[J]. *矿产综合利用*, 2019(2):26-30.  
LIU Y, ZHANG C X. Comprehensive utilization situation and development trend of iron and steel slag in China and abroad[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(2):26-30.
- [10] 曾珍, 张雄. 建筑保温材料的发展[J]. *上海建材*, 2005(4):28-30.  
ZENG Z, ZHANG X. Development of building insulation materials[J]. *Shanghai Building Materials*, 2005(4):28-30.
- [11] LIU T Y, LI X Y, GUAN L M, et al. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine

- tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(1):1733-1739.
- [12] 马子钧. 利用硅酸盐工业废(尾)矿制备发泡陶瓷的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
MA Z J. Preparation of foamed ceramics from silicate industrial waste (tailing) ore[D]. Beijing: Beijing University of Industry, 2019.
- [13] XI C P, ZHENG F, XU J H, et al. Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190:896-909.
- [14] CHEN X J, LU A X, QU G. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent[J]. *Ceramics International*, 2013, 39(2):1923-1929.

## Preparation of Foamed Ceramic Materials from Fly Ash and Blast Furnace Slags

LI Haiyan<sup>1</sup>, ZHANG Leihua<sup>2</sup>, LI Fusong<sup>3</sup>

(1.Zhengzhou Institute of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2.North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China; 3.Taigang Group, Laiwu 271100, Shandong, China)

**Abstract:** This is an article in the field of ceramics and composites. The high-temperature sintering method was used to prepare foamed ceramics by using fly ash and blast furnace slag as the main raw materials, adding silicon carbide (SiC) as a high temperature foaming agent and sodium borate ( $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ) as a flux. The effects of raw material ratio, SiC addition and  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$  addition on the bubble structure, bulk density, water absorption, compressive strength and thermal conductivity of foamed ceramics were mainly studied. The experimental results showed that when the fly ash was 70%, the blast furnace slag was 30%, 0.3% SiC powder and 5%  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$  were added additionally, and the sintering temperature was 1100°C for 40 min, the foamed ceramic had the best comprehensive properties, and its bulk density was 0.516 g/cm<sup>3</sup>, with water absorption rate of 3.82%, compressive strength of 3.62 MPa, thermal conductivity of 0.094 W/(m·K). The main phases of the sample under this condition included quartz phase ( $\text{SiO}_2$ ), anorthite ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) and pyroxene phase ( $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ ), the massive precipitation of crystals enhanced the strength of the material. This research provided a new method for converting industrial solid wastes such as fly ash and blast furnace slag into high value-added building insulation materials.

**Keywords:** Ceramics and composites; Foamed ceramics; Fly ash; Blast furnace slag; Bubble structure; Comprehensive properties