

硼酸钠含量对建筑用河道淤泥-赤泥基泡沫陶瓷结构与性能的影响

龙娜¹ 刘星龙¹ 陈嘉欣¹ 贺灿晓¹ 刘涛涌^{1,2,3} (通讯作者)

1.邵阳学院土木与建筑工程学院 湖南 邵阳 422000

2.竹纤维建造材料湖南省工程研究中心 湖南 邵阳 422000

3.湘西南绿色建造与智能监测湖南省普通高等学校重点实验室 湖南 邵阳 422000

【摘要】：本文利用河道淤泥和拜耳法赤泥为主要原料，硼酸钠为外加剂，通过高温固相反应制备了一种建筑用轻质泡沫陶瓷。研究了不同硼酸钠含量对泡沫陶瓷结构与性能的影响。结果表明，硼酸钠的引入能显著改变孔结构，提高孔隙率，但也导致抗压强度不断降低。当硼酸钠含量为7 wt.%时，制备泡沫陶瓷的综合性能最佳：体积密度为0.72 g/cm³，气孔率为69.1%，抗压强度为9.28 MPa。

【关键词】：河道淤泥；硼酸钠；泡沫陶瓷；物理性能

DOI:10.12417/2811-0528.26.15.077

引言

发泡陶瓷是一种具有多孔结构的无机轻质材料，主要分开孔和闭孔。其中，闭孔型泡沫陶瓷因内部独特的闭孔结构及轻质高强的综合性能，逐渐成为可广泛用于建筑保温领域的被选材料之一^[1]。近年来，关于利用工业固废制备闭孔泡沫陶瓷的研究十分广泛，所选的固废主要集中在粉煤灰、煤矸石、钢渣及各类尾矿等原料^[2-4]。河道淤泥是一种在水力等自然条件下沉积以及历经物理化学作用而形成的粘土，其组成主要为硅铝化合物，是一种良好的制备陶瓷材料的原料^[5,6]。但关于以河道淤泥为原料制备泡沫陶瓷的研究报道不多，而同时将河道淤泥与工业固废组合来协同制备泡沫陶瓷的研究几乎没有。因此，本文主要研究河道淤泥与工业固废赤泥为主要原料，硼酸钠为外加剂来协同制备固废基泡沫陶瓷。重点研究不同含量的硼酸钠对制备泡沫陶瓷的结构与性能的影响，为河道淤泥的资源化利用提供新的有效途径。

1 实验

1.1 原料分析

本研究河道淤泥和拜耳法赤泥为主要材料，硼酸钠为外加剂。其中，河道淤泥采集自湘江浏阳河中段疏浚工程，拜耳法赤泥采集自河南省铝业公司。两种原料的矿物相组成和化学组成分别如图1和表1所示。图1显示河道淤泥中的物相组成主

要为氧化硅和氧化铝；而拜耳法赤泥的物相组成有高岭石、钙霞石、方解石、水钙榴石及少量氧化铁。表1显示河道淤泥的化学组成中有超过80 wt.%的SiO₂和Al₂O₃，而赤泥中的SiO₂和Al₂O₃的含量不足50 wt.%。Fe₂O₃在两种固废中的占比都比较高，其在高温下能形成的Fe³⁺离子可作为网络外体促进高温玻璃相的形成。与淤泥组成不同的是，赤泥中还含有大量的碱金属(Na、K)和碱土金属元素(Ca、Mg)，这些物质的总含量超过了30 wt.%。这些组成为高温玻璃相的形成提供了必要条件。从上述化学组成的分析可知，两种固废存在组成上存在互补性，即满足陶瓷致密化烧结和玻璃相的形成条件，为成功制备泡沫陶瓷提供了基本保障。另外，本实验添加的唯一外加剂为硼酸钠，又称为十水四硼酸钠，化学式为Na₂B₄O₇·10H₂O，是一种良好的助熔剂，其在高温下可参与玻璃相的形成，降低样品的软化点，促进多孔结构的形成。

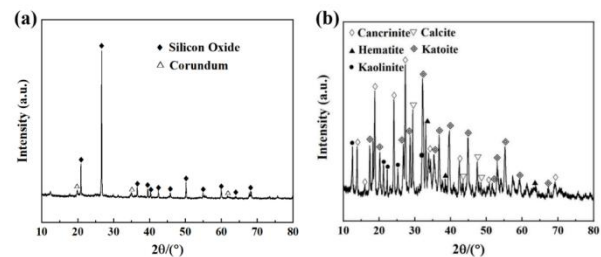


图1 河道淤泥(a)和拜耳法赤泥(b)的XRD图谱

【作者简介】龙娜，女，2004年生，邵阳学院土木与建筑工程学院在读本科生。

通讯作者：刘涛涌，男，1986年生，博士，副教授，长期从事功能陶瓷材料及固废资源建材化利用方面的研究工作。

资助项目：湖南省大学生创新创业训练计划项目(NO.S202310547008)。

表1 原料的主要化学组成

原料	wt. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Others
河道淤泥	63.4	21.55	0.86	8.2	0.16	2.42	1.1	2.31
拜耳法赤泥	20.5	21.76	17.2	10.46	12.0	1.75	1.0	15.1

1.2 样品制备

首先，将两种固废原料放置在行星球磨机中以 400 r/min 的速度湿磨 2 h，球磨介质为去离子水。球磨后放置在干燥箱 120°C 干燥 24h，并过 200 目筛。根据前期的预实验，将河道淤泥与拜耳法赤泥的质量比设置为 90:10，硼酸钠的掺杂量分别为 1、3、5、7 和 9 wt.%。所有硼酸钠的掺入形式均为外加。将河道淤泥、拜耳法赤泥和硼酸钠三种原料依照设置的比例精确称重后置于氧化铝研钵中进行混合，待充分混合均匀后滴入 3-5 wt.% 的去离子水并均匀化。利用液压制样机将混合均匀的粉末倒入金属模具中并在 15-20 MPa 的压力下压制直径为 25 mm 的圆柱状坯体。最后，将坯体放置于电阻炉中，以 5°C/min 的升温速率升温至 1140°C 保温 0.5 h，随后冷却至室温。本研究采用单一变量法研究不同硼酸钠掺量对河道淤泥-赤泥基泡沫陶瓷材料孔结构与性能的影响。

1.3 性能表征

采用 ZSX Primus II 型的 X 射线荧光光谱仪测定两种原料的化学成分。采用 D/max-2550PC 型的 X 射线衍射仪分析了两种原料和制备的多孔陶瓷的物相。采用 D7200 型光学相机捕获孔隙形态图像，使用 Image Pro Plus 软件分析孔径分布，每张孔结构图像选择 80-150 个孔隙。物理性能测试主要包括以下三个指标：（1）体积密度 (g/cm³)。将制备试样切成规则块状，使用游标卡尺分别测量长、宽和高，多次测量后分别取平均值，并计算体积 V。使用万分位分析天平称量样品的干重 m，根据体积密度公式 $\rho = m/V$ 计算所有样品的体积密度；（2）孔隙率 (%)。通过排水法测定样品的真密度 (ρ_t)，然后依照公式 $P = (1 - \rho/\rho_t) \times 100\%$ 计算制备样品的气孔率；（3）抗压强度 (MPa)。在加载速率为 0.5 mm/min 的情况下，用电子万能试验机 (CSS44100) 对加工后的样品进行抗压强度测试。

2 结果与讨论

图 2 (a) 为不同含量硼酸钠掺杂的样品 1140°C 烧结后的直径变化趋势图。如图所示，随着硼酸钠含量的增加，烧结后样品的直径呈现增-降-增-降的“N”字型不规则变化趋势。其中，最大直径为 26.68 mm，最小值为 25.15 mm。样品直径的变化反映了内部气孔的膨胀程度，说明硼酸钠的引入会影响样品的发泡能力。当硼酸钠的掺杂量为 5 wt.% 时，样品烧结后的直径变化最大，说明其发泡能力最好。图 2 (b) - (f) 展示了不同含量硼酸钠掺杂样品 1140°C 烧结后的孔结构变化。可以从两方面分析硼酸钠掺入量对泡沫陶瓷孔结构的影响。一方面，气孔尺寸的变化。硼酸钠含量少时，样品中存在的气孔尺寸较小，且气孔的分布相对均匀。而随着硼酸钠掺入量的增加，气孔的尺寸明显变大。当硼酸钠的掺入量达到 9 wt.% 后，大尺寸的气孔明显增加。另一方面，气孔形态的变化。硼酸钠含量少时，形成的气孔形态多以球形态为主；而高含量的硼酸钠样品中的气孔形态主要呈现不规则的多边形态。导致上述孔结构变化的主要原因与硼酸钠在样品内部的作用有关。在高温下，河道淤泥中高含量的硅铝氧化物能与赤泥中的 Na、K、Ca 等金属氧化物在高温下发生反应形成玻璃相。从硼酸钠的化学式可知，引入硼酸钠相当于引入 Na⁺ 离子，而 Na⁺ 离子对破坏 [SiO₄] 四面体和 [AlO₄] 四面体中的 Si-O-Si、Al-O-Al 桥氧键有非常显著的效果。在这些离子的共同作用下，样品中的各类化学组成发生固相反应并形成低共熔玻璃相的温度降低，导致样品的软化点降低。而在相同温度下，硼酸钠的含量越高，样品软化点下降的也越明显。样品内部玻璃相的含量与粘度也会随软化点的降低而呈现增多和降低的变化。因此，当气体形成后，低粘度玻璃相将气体包裹形成小气泡的时间提前，并在气泡膨胀力作用下不断变大，导致相互接触、挤压与融合等过程发生的温度也降低，最终在高含量硼酸钠掺杂的样品内部形成具有不规则多边形的大尺寸气孔。

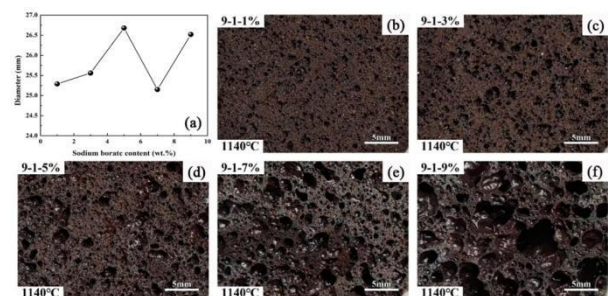


图2 不同含量硼酸钠掺杂样品的直径变化和孔结构

不同含量硼酸钠掺杂的样品 1140°C 烧结后的孔径分布如图 3 (a-e) 所示。随着硼酸钠含量的增加，样品中的气孔尺寸整体呈现增加的趋势。含 1 wt.% 硼酸钠样品的孔径分布主要

集中在 0.25~1.00 mm 的范围内, 孔径占比最大 (41%) 的为 0.5 mm 左右的气孔。随着硼酸钠的掺入量增加到 3 wt.%, 气孔尺寸变大且孔径分布变宽, 超过 85% 的气孔集中分布在 0.20~1.00 mm 的范围内。当硼酸钠的掺入量增加至 5 wt.% 时, 可看到样品的孔尺寸明显增加, 但是孔径分布的范围并没有明显扩展, 80% 左右的气孔依然分布于 0.30~1.20 mm 之间。这说明引入 3~5 wt.% 的硼酸钠对样品的孔径分布影响较小。随着硼酸钠掺入量增加到 7 wt.% 之后, 气孔尺寸明显增大, 孔径的分布范围扩大到 0~2 mm 以上。当硼酸钠的引入量达到 9 wt.% 时, 气孔尺寸的分布范围直接扩大到 0~5 mm, 气孔尺寸也明显增大。图 3 (f) 展示了含硼酸钠样品平均孔径和孔径分布均匀性系数的变化。平均孔径随硼酸钠含量的增加呈现不断增加的趋势, 从 0.53 增加到 1.24 mm, 而均匀性系数也保持一致的变化趋势, 即从 0.20 上升至 0.97。均匀性系数主要反映样品内部孔径尺寸分布的一致性, 其数值越小, 表明孔径分布越均匀。可见, 硼酸钠含量的提高导致气孔尺寸分布的均匀性逐渐变差。从气孔尺寸和分布均匀性的变化可以看出, 在相同烧结温度下, 硼酸钠含量的变化改变了样品内部玻璃相的含量和粘度, 导致气孔尺寸出现上述变化。

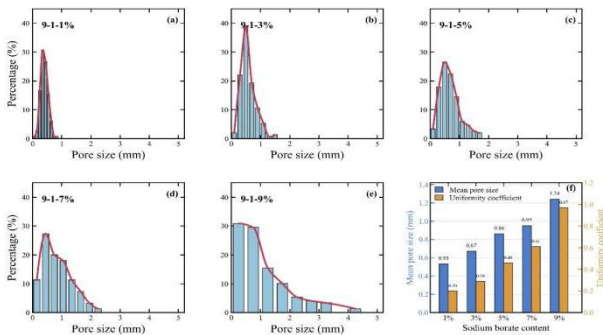


图 3 不同含量硼酸钠掺杂样品的孔径分布和均匀性系数

图 4 为不同含量硼酸钠掺杂样品 1140°C 烧结后的物理性

能。随着硼酸钠含量的增加, 样品的体积密度呈现不断降低的变化趋势, 即从 1.38 g/cm³ 一直降低至 0.66 g/cm³。而样品气孔率则呈现相反的趋势, 即从 44.6% 一直增加到 70.9%。由此可见, 硼酸钠的加入及其含量的增加可明显改善样品的发泡能力。而抗压强度变化趋势如图 4 (c) 所示, 即抗压强度随硼酸钠含量的增加呈现持续降低的趋势, 即从 40.5 MPa 降低至 6.2 MPa。上述物理性能的变化主要与硼酸钠引入后对样品内部相变的影响有关, 主要与玻璃相的形成温度、含量及粘度有关。从前面孔结构变化的分析可知, 硼酸钠能破坏硅铝化合物内部的化学键, 降低物质间发生化学反应的势垒, 促进玻璃相形成。相同温度下, 样品内部形成气孔结构的时间提前。因此, 气孔发生膨胀-融合的温度降低。当样品加热到目标烧结温度后, 高含量硼酸钠掺杂的样品的气孔尺寸更大, 气孔率更高, 相对应的体积密度更低。而抗压强度与体积密度呈现正相关性, 因此也表现不断降低的趋势。值得注意的是, 硼酸钠的含量在 5-7 wt.% 时, 样品的物理性能变化幅度明显, 说明这个含量区间的硼酸钠掺入量对泡沫陶瓷的性能影响明显。

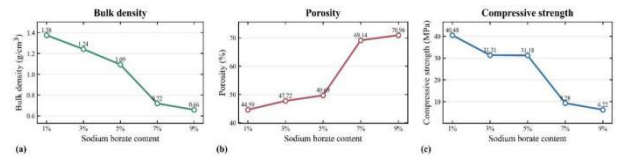


图 4 不同含量硼酸钠掺杂样品的物理性能: 体积密度 (a), 气孔率 (b) 和抗压强度 (c)

3 结论

硼酸钠的掺入会明显降低样品的软化温度, 低粘度的玻璃相在相对降低的温度下形成, 从而导致样品的气孔尺寸呈现出不规则的增大, 孔结构的均匀性变差。体积密度和抗压强度随硼酸钠掺入量的增加不断降低, 气孔率呈现相反的趋势。当硼酸钠的掺入量为 7 wt.% 的样品表现出最佳的综合性能: 体积密度为 0.72 g/cm³, 气孔率为 69.1%, 抗压强度为 9.28 MPa。

参考文献:

- [1] 汪洋洋, 杜娟, 孟凡会, 等. 煤矸石高温发泡法制备不同主晶相泡沫陶瓷及其性能研究[J]. 无机盐工业, 2026, 58(03): 96-105.
- [2] 孙紫豪. 基于多源固废协同制备功能泡沫陶瓷及其性能研究[D]. 安徽理工大学, 2025.
- [3] 常星岚. 粉煤灰-锂渣基发泡陶瓷的制备及性能研究[J]. 耐火材料, 2024, 58(01): 1-7.
- [4] 李京, 吴晓琳. 煤基固废制备多孔陶瓷材料研究进展[J]. 中国陶瓷, 2025, 61(11): 1-11+22.
- [5] 倪亚玲. 河湖淤泥制备烧结砖的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(1): 94-97, 107.
- [6] 张世瑜, 周阳, 李志强, 等. 粉煤灰与水库淤泥制备烧结砖及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2026, 45(04): 1256-1265.