

河道淤泥基新型建筑材料的开发研究

龙 娜¹ 周旭东¹ 刘星龙¹ 陈嘉欣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】：本研究以河道淤泥和拜耳法赤泥为原料，在不添加外加剂的情况下通过高温固相烧结法制备了一种新型建筑用淤泥-赤泥基泡沫陶瓷材料，系统研究了不同组成比例和烧结温度对制备的泡沫陶瓷材料结构与性能的影响。本研究为淤泥和工业固废的协同资源化利用其在建筑节能领域的应用提供了新的思路和技术支持。

【关键词】：河道淤泥；赤泥；泡沫陶瓷；物理性能

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.052

引言

近年来,我国在水环境治理方面投入了大量资金,尤其是对河道淤泥的疏浚和处理,由此产生的淤泥量多达数十亿立方米^[1]。如何有效处理这些淤泥已成为迫在眉睫的问题。由于淤泥中富含硅铝元素,可以作为无机建筑材料的制备原料,目前已有不少研究证实淤泥可作为很好的多孔烧结砖的原料来源^[2,3]。泡沫陶瓷因其独特的闭孔结构和优异的综合性能(低密度、高孔隙率、良好的隔热隔音和化学稳定性)已成为建筑领域中非常受关注的轻质功能材料^[4]。而利用河道淤泥制备泡沫陶瓷的研究较少,因此,本文拟以河道淤泥为主要原料,工业固废为辅助原料,探索两者协同制备高性能泡沫陶瓷的潜在可能性。通过研究不同组成和不同烧结温度的变化对泡沫陶瓷结构与性能的影响来揭示相关的组成-结构-性能的演变规律,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

本研究河道淤泥为主要原料,拜耳法赤泥为辅助材料。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。两种原料的化学组成如表1所示。两种固废的化学组成都很复杂但特征鲜明。其中,河道淤泥的SiO₂和Al₂O₃的含量最高,总和超过80 wt.%。而赤泥中的SiO₂和Al₂O₃的含量偏低,总量低于50 wt.%。从这两种化学组成的含量可看出两种固废存在组成上的互补优势,为成

功制备泡沫陶瓷提供了基本保障。除Si、Al元素外,两种固废中都含有较高含量的Fe₂O₃,能为泡沫陶瓷的制备提供充足的气体^[5]。另外,赤泥中还含有大量的碱金属和碱土金属元素,综合含量达到30 wt.%左右。这些组成为高温玻璃相的形成提供了必要条件。除此以外,两种固废中还检测到多种类的重金属元素。虽然这些重金属元素会污染环境,但是在制备泡沫陶瓷的过程中可以起到降低软化点、促进玻璃相形成的作用,有利于提升泡沫陶瓷的性能。

表1 原料的主要化学组成

原料		河道淤泥	拜耳法赤泥
wt. %	SiO ₂	63.455	20.528
	Al ₂ O ₃	21.375	21.761
	CaO	0.866	17.233
	Fe ₂ O ₃	8.289	10.468
	Na ₂ O	0.164	12.06
	K ₂ O	2.429	1.755
	MgO	1.108	1.043
	Others	2.314	15.152

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)

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℃干燥24h,并过200目筛。根据原料的性质分析,将河道淤泥与拜耳法赤泥的质量比分别设置为90:10、85:15、80:20、75:25、70:30。将河道淤泥与拜耳法赤泥依照设置的比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。利用液压式制样机将混合均匀的粉末倒入25 mm直径的金属模具中并在15-20 MPa的压力下压制成圆形形状的坯体。

最后,将坯体放置于电阻炉中,以5℃/min的升温速率分别加热到1160℃、1170℃、1180℃和1900℃,并保温0.5 h,随后冷却至室温。本研究采用单一变量法研究不同赤泥掺量和不同烧结温度对河道淤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/cm^3)。根据GB/T 3810.3-2006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(%)。根据GB/T 5071-2013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)按GB/T 1964-2023对立立方体样品进行抗压强度测试。

2 结果与讨论

2.1 组成影响

图1为不同赤泥掺量的样品1180℃烧结后的孔形貌图。赤泥掺量为10 wt.%的样品内部形成了大量尺寸较小的球形气孔,且气孔的分布相对均匀。随着赤泥掺入量的增加,气孔的尺寸变大。随着赤泥掺入量的继续增加,大尺寸的气孔的数量明显增多,且孔形态多呈现椭球形或不规则多边形;同时,样品中存在一定数量尺寸较小的球形态气孔。当赤泥的掺入量升

高到25 wt.%,气孔的尺寸增加,孔壁变薄,且孔的形状多转变为不规则多边形。

从上述孔结构的变化可以知两个明显的变化趋势:

(1) 气孔尺寸明显变大。

(2) 气孔形态明显转变,即球形向多边形转变。具体原因如下: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。赤泥含量增加使引入的CaO、Na₂O、Fe₂O₃等助熔性物质的含量也增加,导致SiO₂和Al₂O₃内部的桥氧键被破坏,使样品的软化点降低,从而有利于样品内部形成高含量、低粘度的玻璃相。当气体形成后,低粘度玻璃相将气体包裹形成小气泡,并在气泡内的膨胀力作用下不断膨胀,并通过相互接触、挤压与融合等过程,最终形成具有不规则多边形的大尺寸气孔^[6]。

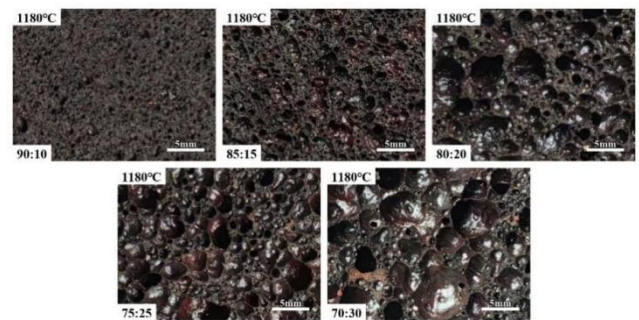


图1 不同赤泥含量的样品孔形貌

图2(a-f)为不同赤泥掺量的样品1180℃烧结后的孔径分布图。与孔结构图的变化趋势一致,随着赤泥掺入量的增加,样品中的气孔尺寸整体呈现增加的趋势。赤泥含量为10 wt.%的样品孔径主要分布在0.25~0.75 mm的范围内,平均尺寸为0.50 mm。随着赤泥掺入量增加到20 wt.%,气孔尺寸变大且孔径分布变宽,平均孔径尺寸增加到1.11 mm,90%以上的孔径集中分布在0~2.0 mm的范围内。而当赤泥的掺入量增加到25 wt.%后,气孔的平均尺寸超过了1.5 mm,且尺寸分布的范围明显增大。图2(g)给出了不同赤泥掺入量的样品烧结后气孔尺寸分布的均匀性系数变化图。均匀性系数越小,孔径尺寸分布的均匀性越好。随着赤泥掺入量的增加,均匀性系数值呈现不断增加的变化趋势,说明赤泥含量的升高使气孔尺寸分布的均匀性不断降低。这主要是因为相同烧结温度下,赤泥含量的增加改变了样品内部玻璃相的含量和粘度,导致气孔尺寸变大并出现两级分化的情况。

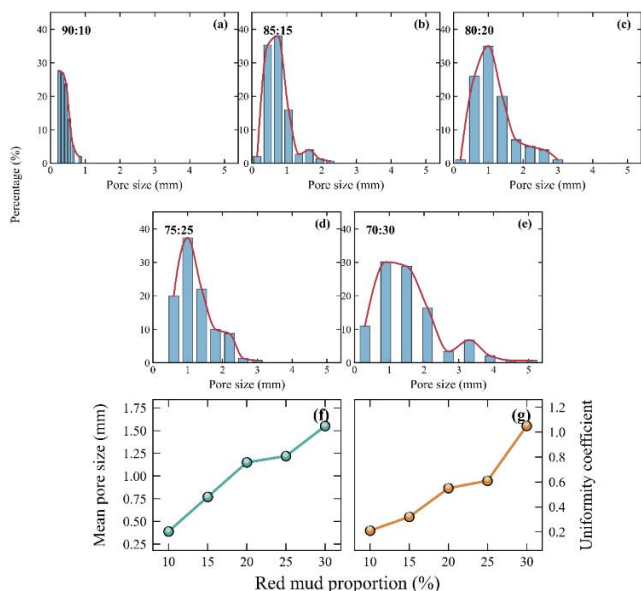


图2 孔径分布与均匀系数

图3为不同赤泥掺入量的样品1180℃烧结后的物理性能。随着赤泥含量增加,样品的体积密度呈现不断下降的变化趋势,而气孔率呈现相反的变化。赤泥含量增加到30 wt.%,样品的体积密度从1.31降低至0.46 g/cm³,气孔率从44.9%提升至83.2%。赤泥的引入及其含量的增加可明显改善样品的发泡能力。图3(c)为样品的抗压强度变化趋势。随着赤泥掺入量的增加,抗压强度从33.9 MPa持续降低至1.8 MPa。在相同烧结温度下,样品的抗压强度变化与气孔率的变化呈相反趋势,与体积密度的变化则呈现正相关性。在泡沫陶瓷中,固相是主要的载荷承受部分,气孔率增加导致固相含量减少,承受压力载荷的物质减少,导致力学强度下降;而气孔尺寸和分布的变化往往会引起孔壁形状和分布发生改变,从而引起受力不均匀,导致强度降低^[7]。

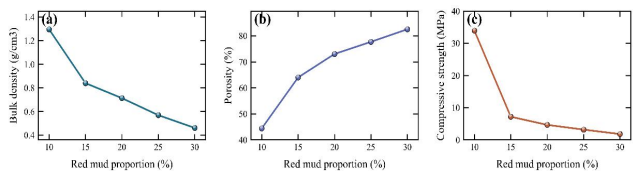


图3 不同组成样品的物理性能: 体积密度(a), 气孔率(b)和抗压强度(c)

2.2 烧结温度影响

根据综合性能选取河道淤泥/赤泥比为80/20的样品来研究烧结温度对制备泡沫陶瓷结构与性能的影响。图4为河道淤泥/赤泥比为80/20的样品在不同烧结温度下的孔结构图。从气孔尺寸变化看, 烧结温度

越低, 样品内部形成的小尺寸气孔越多, 且分布相对越均匀。孔径的分布范围主要集中在0~3 mm内, 但气孔尺寸会呈现增加的趋势, 进而影响孔径分布的比例。随着烧结温度的升高, 形成的气孔的尺寸变大。样品孔径分布范围明显变宽(0~5 mm)。孔径分布的范围和百分比变化导致样品的平均孔径呈现不断增大的趋势, 如图4(e)所示。从气孔的形态变化看, 低温下的气孔主要以球形态为主, 而当温度升高后, 气孔尺寸的增加加速了相邻气孔之间的“挤压-融合”变化, 孔壁变薄, 孔形态向偏椭圆形态转变。温度对气孔尺寸与形态的影响这主要与不同烧结温度对泡沫陶瓷内部玻璃相状态(含量和粘度水平)的影响有关。低温会使样品中的玻璃相含量低粘度高, 气泡的移动与融合过程缓慢, 气孔尺寸偏小, 气孔形态多以球形态为主; 而高温会导致形成的玻璃相含量增多, 包裹的气泡总量增加, 同时低粘度的玻璃相也会使包裹气泡的表面张力小于气泡内部的扩张压力, 从而使相邻气孔更容易发生膨胀并通过“挤压-融合”过程成为大尺寸的椭圆形气孔。这种温度的变化也导致气孔的均匀性变得不可控制, 进而降低整个孔径分布的均匀性变差, 如图4(f)所示的均匀性系数呈现不断增加的变化^[6]。

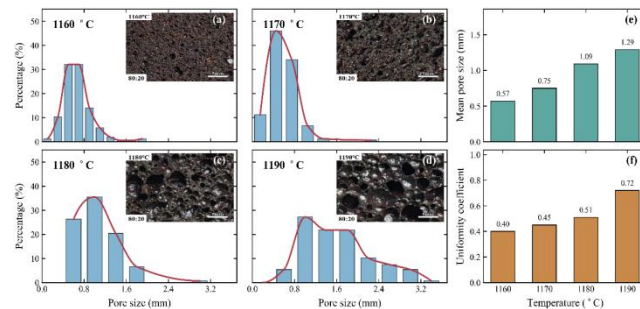


图4 不同烧结温度样品的孔形貌图与孔径分布

图5为不同烧结温度下样品的物理性能。随着烧结温度升高, 体积密度从0.97 g/cm³一直降低至0.49 g/cm³, 而气孔率则随着烧结温度的升高从56.09%上升至81.88%。两种相反的变化趋势主要是烧结温度的升高有利于样品内部玻璃相的形成, 高含量的低粘度玻璃相将释放的气体包裹并形成多个气泡, 并在膨胀力的作用下通过不断融合形成孔隙, 孔隙率增加导致体积密度降低。而抗压强度则随着烧结温度的增加整体呈现不断降低的变化趋势, 从16.63 MPa降低至1.03 MPa。温度对抗压强度的影响除了体积密度降低外, 还与气孔的分布和尺寸有关。高温促进大尺寸的气孔形成, 孔壁变得更薄, 导致样品承受外界压力的支撑更脆弱, 从而使强度值不断降低。

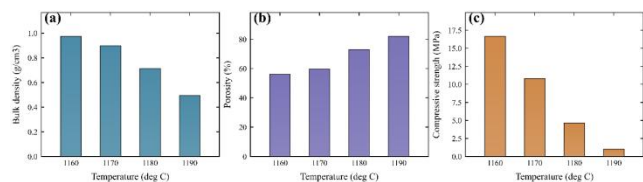


图5 不同烧结温度样品的物理性能：体积密度（a），气孔率（b）和抗压强度（c）

3 结论

（1）赤泥的掺入会降低样品的软化温度，导致样

品内部形成更多的气孔，且随赤泥含量的增加气孔尺寸不断增大。体积密度和抗压强度随赤泥掺入量的增加不断降低，气孔率呈现相反的趋势。赤泥掺入量为20 wt.%的样品综合性能最佳：体积密度为0.71 g/cm³，气孔率为73.01%，抗压强度为4.65 MPa。

（2）烧结温度的升高导致样品内部形成更多低粘度的玻璃相，促进了相邻气孔间的融合，使气孔的尺寸变大，分布变宽且均匀性降低。而且，过高的温度容易导致大尺寸气孔的形成，孔壁变薄，不利于抗压强度提升。

参考文献：

- [1] 时晓宁.河道淤泥资源化利用研究进展[J].水资源开发与管理,2023,9(04):26-31.
- [2] 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.
- [3] 仇启涵,陈忠,李波,等.水热固化淤泥质渣土砖砌体抗压性能试验研究[J].新型建筑材料,2024,51(08):69-73.
- [4] 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.
- [5] 张波,武金朝,张乾,等.煤气化渣制备泡沫陶瓷及性能研究[J].硅酸盐通报,2025,44(12):4526-4535.
- [6] 嵇鹰,王瑞琦,朱刚,等.煤矸石制备发泡陶瓷的性能研究[J].耐火材料,2024,58(06):461-467.
- [7] T Y Liu,J Liu,Q Z Yang,et al.Sustainable use of coal gangue and other wastes in lightweight material:Physical-mechanical, environmental security and synergistic mechanisms[J].Ceramics International,2025,51:2244-2258.