

煤矸石基硅酸盐材料研究及建筑节能应用前景分析

叶 涵 薛圣泽* 王凌德 钱 枫

西安欧亚学院, 陕西 西安 710065

摘要: 煤矸石出现大量堆存的状况带来了环境方面的压力, 建筑节能的领域之中对于绿色建材存在着迫切的需求。相关研究聚焦于煤矸石制备硅酸盐材料, 把碱激发地质聚合物当作重点内容, 系统地开展对于原材料进行活化处理、对配合比进行优化以及进行材料制备等工作。分析材料的微观结构、物理力学以及热工性能等方面, 揭示基于多孔构造的隔热机理, 模拟并且量化其在建筑围护结构当中的节能效果。研究显示, 煤矸石基硅酸盐材料具备优异的保温隔热性能、显著的利废减排效益, 在自保温墙体等场景存在着较大的应用潜力, 其发展需要攻克原料均质化以及长期耐久性等关键的技术挑战。

关键词: 煤矸石; 硅酸盐材料; 地质聚合物; 建筑节能; 热工性能; 应用前景

DOI: 10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202603020

0 引言

煤矸石作为煤炭开采以及洗选所产生的主要的固体废弃物, 长时间地堆存起来会占用大量的土地, 并且还会引发诸如自燃、扬尘以及水土污染等环境方面的问题。建筑行业作为能源消耗以及碳排放的重点领域, 对于高性能且低能耗的绿色的建材有着迫切的需求。把煤矸石进行资源化利用, 来制备硅酸盐基的建筑材料, 能够同步地实现大宗固废的消纳以及建筑的节能降耗, 是推动建材行业进行绿色转型以及建筑业实现可持续发展的有效的技术途径。

1 煤矸石基硅酸盐材料的制备与性能研究

1.1 原材料预处理与活化机理

煤矸石的矿物组成以高岭石、伊利石、石英为主, 是制备硅酸盐材料的基础。未经处理的煤矸石化学活性较低, 必须经过热活化过程破坏其晶体结构。在 650°C 至 850°C 的煅烧温度范围内, 高岭石等层状硅酸盐矿物发生脱羟基反应, 失去结构水, 转变为具有高反应活性的无定形偏高岭土相。煅烧时间通常维持在 1.5 至 2.5 小时, 以保证充分的相转变并避免过度烧结导致二次结晶^[1]。该相变过程是材料获得活性的关键, 无定形态的偏高岭土结构疏

松, 含有大量断裂的硅氧键和铝氧键, 使其易于在碱性环境下解离, 为后续的地质聚合反应提供必需的活性二氧化硅和活性氧化铝。

1.2 配合比优化与制备工艺

材料的最终性能由配合比与工艺参数精确控制, 激发剂体系通常采用水玻璃与氢氧化钠复合的碱激发剂, 其模数是核心参数。模数为 1.2 至 1.6 的水玻璃可提供适宜的硅酸根离子聚合度与 OH^{-} 浓度, 促进铝硅酸盐网络快速生成。液固比影响工作性与最终强度, 范围多控制在 0.30 至 0.45。煤矸石作为主要硅铝质原料, 其质量占比可达 70% 至 85%, 其余为矿渣、粉煤灰等辅助胶凝材料, 用以调节钙含量与改善早期强度。

1.3 结构性能表征与分析

煤矸石基硅酸盐材料的宏观性能由微观结构决定, X 射线衍射图谱在 20° 至 35° (2θ) 区间呈现明显的“馒头状”弥散峰, 证实其主要反应产物为非晶态的硅铝酸盐凝胶, 结晶相主要为未参与反应的石英^[2]。扫描电子显微镜观察显示, 其微观形貌为由纳米级凝胶颗粒聚集形成的连续三维网络结构, 结构致密且存在大量亚微米级孔隙。这种多尺度孔隙结构是材料轻质与隔热的基础, 具体数据对比如表 1 所示。

表1 不同激发剂模数对煤矸石基硅酸盐材料性能的影响

激发剂模数 (Ms)	28 天抗压强度 (MPa)	28 天抗折强度 (MPa)	导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	干密度 (kg/m^3)
1.0	36.2	5.8	0.48	1820
1.3	52.7	7.1	0.41	1720
1.6	45.3	6.5	0.38	1680

2 煤矸石基材料的建筑节能作用机理

2.1 多孔结构特征与传热模型

煤矸石基硅酸盐材料的节能本质源于其独特的多尺度孔隙结构，材料内部孔隙包括凝胶孔、毛细孔与引入的气孔，总孔隙率通常在20%至40%之间。压汞法测试显示其孔径呈双峰分布，主峰位于0.1至10 μm的微米级范围，次要峰位于10至100 nm的纳米级范围。热量在固体中通过晶格振动传导，在气体中依靠分子碰撞传递。固体相的导热系数约为1.5 W/(m·K)，而静态空气的导热系数仅为0.026 W/(m·K)。

2.2 热工性能的调控途径

材料的密度与导热系数可通过配合比设计及工艺调整进行定向调控，引入松香热聚物类引气剂，掺量为胶凝材料质量的0.1%至0.3%，可在搅拌过程中引入大量均匀、稳定、封闭的球形微孔，孔径主要集中在50至300 μm，能使材料密度降低150至300 kg/m³，导热系数相应降低0.05至0.10 W/(m·K)^[4]。使用膨胀珍珠岩或玻化微珠作为轻质骨料部分替代细骨料，掺量20%至40%，可构建更宏观的绝热骨架，材料干密度可降至1400 kg/m³以下，导热系数可降至0.25 W/(m·K)以下^[5]。

2.3 围护结构节能效果模拟

为量化节能效果，建立了一个位于寒冷地区城市的基准建筑模型。模型为南北朝向的中间层标准房间，尺寸为4.0 m × 4.0 m × 2.8 m，窗墙比为0.3。对比方案一为传统240 mm厚实心粘土砖墙外贴50 mm厚EPS板，方案二为200 mm厚煤矸石基硅酸盐自保温砌块墙体。在DesignBuilder软件中设置相同的室内热扰参数与采暖空调设定温度^[6]。

表2 煤矸石基自保温砌块与蒸压加气混凝土砌块(AAC)综合对比

性能指标	煤矸石基自保温砌块(目标值)	蒸压加气混凝土砌块(AAC, B06级)
干密度(kg/m ³)	600-800	≈ 600
导热系数(W/(m·K))	0.16-0.20	0.16-0.20
抗压强度(MPa)	≥ 3.5	≥ 3.5
生产成本估算(元/吨)	≈ 230	≈ 280
固废利用率(质量比)	≥ 70%	粉煤灰/砂, 占比约60-70%
生产碳排放(kg CO ₂ /吨)	≈ 150	≈ 420

4 结语

研究表明，煤矸石所构成的硅酸盐材料，尤其是经过碱激发而形成的地质聚合物，借助对制备工艺加以优化，能够得到性能优良、孔隙结构可控制的轻质且高强的材料。未来的研

3 应用前景、挑战与技术经济性分析

3.1 主要应用场景与技术优势

煤矸石基硅酸盐材料的核心应用方向是建筑围护结构的节能构造，在自保温砌块领域，其干密度介于600至800 kg/m³，抗压强度大于3.5 MPa，导热系数低于0.20 W/(m·K)，可直接砌筑成240 mm或300 mm厚墙体，满足寒冷地区建筑节能65%的设计标准，省去外贴保温层工序。在装配式建筑中，可预制成厚度为150 mm的夹芯保温外墙板，面层为30 mm厚的装饰混凝土，芯层为90 mm厚的煤矸石基保温材料，实现结构与保温装饰一体化，板材传热系数K值低于0.45 W/(m²·K)^[7]。

3.2 产业化关键技术挑战

材料的规模化推广面临多项具体技术瓶颈，原材料煤矸石的矿物组成与化学成分受煤层、开采工艺影响波动显著，其中石英、高岭石、黄铁矿含量差异导致煅烧后活性差异大，直接影响产品性能稳定性，需建立原料预均化与在线快速检测反馈系统。在连续化生产层面，碱激发剂的精确计量与高速搅拌混合是难点，物料在5至8分钟内会开始凝结，对布料、成型设备的效率与可靠性提出高要求，现有水泥制品生产线需针对其快硬特性进行改造。

3.3 技术经济与环境效益分析

以生产1 m³、干密度为700 kg/m³的自保温砌块为例进行经济性核算，原材料成本中，煅烧煤矸石(占比70%)成本约80元，碱性激发剂成本约60元，其他辅料与水成本约20元。生产能耗成本(破碎、粉磨、搅拌、养护)约为40元。设备折旧、人工与摊销成本约为30元。综合测算，吨产品生产成本约为230元^[8]，具体性能与经济性对比如表2所示。

究需要着重攻克原料均质化、长期耐久性评价以及标准建立等产业化方面的关键瓶颈问题，推动绿色建材实现工程化应用，对于促进建筑业实现低碳转型以及循环经济发展具备重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 马晓雪,焦润成,李凯,等.强降雨条件下泥石流物源冲淤概率遥感研究——以北京西山采煤区煤矸石冲淤为例[J/OL].自然资源遥感,1-11[2026-04-10].
- [2] 胡晓莹,彭尔兴,李前,等.MICP固化煤矸石在冻融循环条件下的力学性能与浸出特性研究[J/OL].冰川冻土,1-12[2026-04-10].
- [3] 陈澎军,夏曷远,刘强,等.太湖淤泥-改良剂复合利用对滨海砂质盐碱土的协同改良效应[J/OL].地质学刊,1-11[2026-04-10].
- [4] 李田湉,刘浪,屈慧升,等.典型矿山固废充填材料有害气体释放机制与控制技术研究进展[J/OL].煤炭科学技术,1-15[2026-04-10].h
- [5] 柴春镜,宋慧平,冯政君,等.煤矸石基多孔材料对矿区复垦用煤矸石粉持水性能的影响[J].矿产保护与利用,2026,46(01):127-136.
- [6] 郁林利,夏军武,浦海,等.采空区FRP约束煤矸石充填体轴压性能及损伤演化研究[J].采矿与安全工程学报,2026,43(02):467-478.
- [7] 王莹,姜可,赵迪斐,等.煤矸石固废的前世新生(二)——煤矸石环境治理问题的由来与特点[J].智能矿山,2026,7(03):38-44.
- [8] 霍立山.无机结合料稳定煤矸石在某乡道四级公路基层中的应用探讨[J].工程建设与设计,2026,(05):95-97.

作者简介:叶涵(2003.1-),男,汉,江西鹰潭,本科,研究方向为煤矸石基硅酸盐材料特性研究。

通讯作者:薛圣泽(1995.6-),男,汉,陕西西安,博士,讲师/工程师,研究方向为煤基固废综合开发利用及绿色建筑研究。

项目信息:陕西省教育厅一般专项科学研究计划项目,基于微波活化作用下的煤矸石胶结性能增强路径研究(24JK0576)。

2024年大学生创新训练计划项目创新训练项目,煤矸石基硅酸盐材料特征研究及其在建筑节能中的应用(S202412712017)。

2025年度西安欧亚学院校级科研基金项目企业需求类项目,端钩钢-玄武岩纤维增强再生骨料混凝土多尺度力学特性研究(2025QYXQ10)。

2024年度西安欧亚学院校级科研基金项目,玄武岩纤维增强复合型材力学性能研究及光伏支架产品研发(2024XJZK03)。