

固废基无机保温材料的研究和应用进展

Research and Application Progress of Solid Waste-based Inorganic Thermal Insulation Materials

崔彦发^{1,2}, 付士峰^{1,2}, 池宗鹏³

(1. 河北省建筑科学研究院有限公司, 石家庄 050227; 2. 河北省固废建材化利用科学与技术重点实验室, 石家庄 050227; 3. 河北恒钏建筑材料有限公司, 承德 068350)

摘要: 大宗固体废弃物, 包括钢渣、矿渣、尾矿、淤泥、建筑垃圾、玻璃渣等材料, 是以氧化硅、氧化铝、氧化钙等为主的无机材料, 与无机保温材料组分相似、结构相近, 是替代传统天然原料的主要来源。根据无机保温材料的结构特点, 结合大宗固体废弃物的物化特征, 综述了大宗固体废弃物在固废基保温功能填料、固废基掺合材料和全固废基保温材料等建筑节能领域的研究进展, 讨论了大宗固废高附加值利用过程物化特性研究、组分调制、多固废协调作用的技术可行性, 提出了固废基无机保温材料的发展趋势。

关键词: 保温材料; 固废综合利用; 尾矿; 固废基胶凝材料

中图分类号: TU551 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0138-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.026

CUI Yanfa^{1,2}, FU Shifeng^{1,2}, CHI Zongpeng³

(1. Hebei Academy of Building Research Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China; 2. Hebei Province Science and Technology Key Laboratory of Solid Waste for Building Materials, Shijiazhuang 050227, China; 3. Hebei Hengchuan Building materials Co., Ltd., Chengde 068350, China)

Abstract: Bulk solid wastes, including steel slag, slag, tailings, sludge, construction waste, glass slag, and other materials, is a mixture of inorganic materials mainly composed of silicon oxide, aluminum oxide, calcium oxide, and so on. These wastes have similar compositions to inorganic thermal insulation materials and are the main source of replacing traditional natural raw materials. Based on the structural characteristics of inorganic thermal insulation materials and the physical and chemical characteristics of bulk solid wastes, this paper summarizes the research progress of bulk solid wastes in the field of building energy conservation such as solid waste-based thermal insulation fillers, solid waste-based admixtures, and total solid waste-based thermal insulation materials, and discusses the technical feasibility of reearch on physicochemical characteristics, component adjustment, and coordinated action of multiple solid wastes. Finally, the development trend of solid waste-based inorganic thermal insulation materials is proposed.

Key words: hermal insulation materials; comprehensive utilization of solid waste; tailings; solid waste-based cementing mate

基金项目: 石家庄市科技创新团队项目 (248790156A)。

作者简介: 崔彦发 (1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 大宗固废综合利用技术研究和新型材料开发等工作。

通信作者: 付士峰 (1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 固废建材化利用研究。

收稿日期: 2023-08-04

0 引言

我国建筑行业的节能发展起步较晚，与国外许多国家有着一定差距，发展空间比较大，尤其是在建筑节能保温材料和节能技术领域有着很高研究价值^[1-2]。使用保温材料，可有效提高建筑外墙的热工性能，降低建筑能源消耗，提高建筑质量和使用寿命^[3]。我国建筑用保温材料，特别是外墙外保温材料以挤塑聚苯板、模塑聚苯板、发泡聚氨酯等有机材料为主，挤塑聚苯板和模塑聚苯板在中国建筑节能保温材料中占有率达 80%，而在欧洲和美国小于 10%^[3]。这些有机保温材料防火性能不强，尤其是我国大量高层建筑保温系统未经过有效的防火处理，且日常管理措施不到位，火灾事故时有发生。

2011 年，住建部提出“新建、改建、扩建工程的外保温材料一律不得使用易燃材料，严格限制使用可燃材料”。各地住建部门和消防部门也提出“鼓励采用 A 级不燃建筑保温材料，特别是在既有建筑提升改造中宜采用 A 级不燃建筑保温材料进行设计和施工”。与有机保温材料相比，无机保温材料具有 A 级防火、强度高、耐候与耐久性好的特点，引起了国内外的广泛关注。

大宗固体废弃物，包括钢渣、矿渣、尾矿、淤泥、建筑垃圾、玻璃渣等材料，是以氧化硅、氧化铝、氧化钙等为主的无机材料，与无机保温材料组分相似、结构相近，是替代传统天然原料的主要来源。当今，我国尾矿堆存超过 600 亿 t，主要金属尾矿每年超过 12 亿 t^[4]；我国粗钢产量持续位居世界第一，钢渣按粗钢 15% 计算，仅 2020 年产生超过 1.5 亿 t^[5]；目前我国城市化率逐步提高，城市更新和改造过程也使得建筑垃圾迅猛增长^[6]，每年新增建筑垃圾 30 亿 t 以上^[7]……这些固体废弃物的大量堆存已经严重威胁自然环境和人身健康，违背国家“循环经济”和“低碳经济”的发展理念。

目前，大宗固废综合利用主要包括回收有价元素、充填采空区、改良土壤及生产建材等^[8]，综合固体废弃物消纳量和产品经济性，大宗固体废弃物的高值化、功能化建材利用已经成为国家和企业研究的热点。

基于此，根据无机保温材料的结构特点，结合

大宗固体废弃物的物化特征，综述大宗固体废弃物在建筑节能领域的研究进展，探究大宗固废高附加值利用的途径和技术可行性，提出固废基无机保温材料的发展趋势为相关研究提供参考。

1 无机保温材料分类和性能

热量的传递有热传导、热辐射和热对流三种方式，其中对于建筑保温而言，热传导是主要的传递方式。建筑保温性能的好坏由材料导热系数 λ 决定，导热系数越小，保温性能越好，常见的保温材料的导热系数 λ 小于 0.14 W/(m·K)^[9]。

市场上最常见的无机保温材料主要有矿物棉、泡沫玻璃、发泡陶瓷、泡沫混凝土、膨胀珍珠岩和膨胀蛭石保温板材料。无机保温材料结构上以纤维状结构、多孔结构或复合结构为主，如岩棉、玻璃棉是丝状结构互相穿插缠绕形成高度复杂的热传导路径，降低传导效率；泡沫混凝土、发泡陶瓷等多孔结构具有丰富的无机封闭空气孔和复杂的骨架热传导路径，降低了传导效率。按工艺划分有熔融喷丝、发泡、煅烧膨胀和化学制备等工艺；按照可加工形态可分为保温板材、保温纤维和保温砂浆，纤维材料包括岩棉、玻璃棉纤维等，保温板材包括泡沫混凝土板，发泡陶瓷板和泡沫玻璃板等成型板材，还有一些利用轻质填料形成的具有一定保温作用的砂浆。

表 1 无机保温材料分类

Table 1 Classification of inorganic thermal insulation materials			
序号	分类方法	类别方法	常见建筑保温材料
1	微观结构	纤维类	岩棉、玻璃棉、硅酸铝棉及其制品
		多孔类	发泡陶瓷、泡沫玻璃、泡沫混凝土等块材或板材 膨胀珍珠岩、二氧化硅气凝胶等轻质保温填充物及制品
2	工艺	熔融喷丝	岩棉、玻璃棉、硅酸铝棉及其制品
		发泡	发泡陶瓷、泡沫玻璃、泡沫混凝土等
		煅烧膨胀	膨胀珍珠岩、膨胀蛭石等轻质填料
		化学制备	二氧化硅气凝胶
3	加工形态	保温板材	发泡陶瓷、泡沫玻璃、泡沫混凝土、珍珠岩板等
		保温纤维	岩棉、玻璃棉、硅酸铝棉及其气凝胶毡等复合材料
		保温砂浆	添加膨胀珍珠岩、膨胀蛭石等材料的保温砂浆

矿物棉是熔融的岩石经过喷丝冷却后形成的纤维制品，最初是模拟火山喷发后形成的天然岩棉材料，导热系数为 0.040~0.050 W/(m·K)，具有保温隔热作用，防火性能好、价格低廉等优点；泡沫

研究与应用

玻璃是内部具有均匀气泡的非晶态玻璃保温材料^[10]，一般导热系数为 $0.058 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右，具有良好的绝热透湿性。以黏土、石英和氧化铝粉、氧化镁粉等原材料经过高温焙烧发泡而成的高气孔率的闭孔陶瓷材料，受材料性质、孔状态影响，其导热系数在 $0.04 \sim 0.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间，具有轻质、保温、隔音，耐酸碱腐蚀、耐老化的特征，因此在建筑、工业、海工、环保工程等领域得到广泛应用^[11]。泡沫混凝土（又称为发泡水泥）是在水泥砂浆中引入适量微小气泡，搅拌均匀后浇注硬化而成的混凝土材料^[12]，其中含有大量封闭气泡，使之具有轻质、保温和隔音特征，常被用于隔墙、隔音设施等领域^[13]。大量的研究证明混凝土泡沫的含量和尺寸大

小与泡沫混凝土的热学性能、力学性能表现出强相关性，随着泡沫含量的增加，混凝土密度降低，导热降低，强度降低；相同密度下，随着平均孔径的增大，导热系数升高，抗压强度降低^[14]。珍珠岩和蛭石等多层硅酸盐矿物在瞬间高温下，内部水分气化膨胀，冷却后呈现内部多孔、表面玻璃化的形态，其密度降低，为 $60 \sim 160 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，导热系数为 $0.063 \sim 0.071 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，保温性能提高，是常见的保温轻质骨料，添加到发泡水泥砂浆中能增加强度，降低导热系数^[15]；膨胀珍珠岩和蛭石粉粒还可利用一定量无机胶凝材料（水泥、石膏等）黏接压制成轻质的保温板制品。以上几种无机保温材料相应技术规范要求见表2。

表2 常见无机保温板相关规范
Table 2 specifications for Inorganic Insulation Board Properties

类型	参考标准	导热系数/ [W/(m·K)]	密度/ (kg/m ³)	24 h 吸水量/ (kg/m ²)	吸水率 /%	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	垂直抗拉强度 /MPa
矿物棉	JG/T 483-2015 (TR15)	≤0.040	无要求	≤0.2	≤0.5	无要求	无要求	≥15
泡沫玻璃	JC/T 647-2014 (I型)	≤0.045	无要求	≤0.3	无要求	≥0.5	≥0.4	≥0.12
发泡陶瓷	JG/T511-2017 (Iw)	≤0.065	≤180	无要求	≤3	≥0.4	≥0.4	≥0.15
泡沫混凝土	JC/T 2125-2021 (B04)	≤0.09	≤430	无要求	≤28	无要求	无要求	无要求
膨胀珍珠岩保温板	JG/T 532-2018 (I类)	≤0.065	≤230	无要求	≤0.8	≥0.4, 且 <0.5	≥0.20	≥0.1, <0.15
膨胀蛭石保温板	JC/T 2341-2015 (J类)	≤0.08	≤300	无要求	≤4	≥0.7	≥0.10	无要求

2 固废基无机保温材料的研究进展

近年来，随着原材料成本逐年上涨和社会环保意识提高，大宗固体废弃物引起了社会的关注。在无机保温领域，固体废弃物对保温制品原材料的替换是降低成本最直接的方式，也是节能减排最有效的解决方案，按照保温制品中固体废弃物含量和功能，可划分为固废基保温功能填料、固废基掺合材料和全固废无机保温材料三种类型。

2.1 固废基保温功能填料

在大宗固体废弃物中，有些粒状或粉状的材料具有轻质、多孔的结构特点，因此具有较低的导热系数，可做为保温功能填料，配合岩棉、发泡或未发泡的水泥砂浆使用可形成纤维毡制品、砂浆制品、水泥板制品和涂料等。

粉煤灰是火力发电过程产生的“粒群”态副产物，其中在低钙粉煤灰中玻化微珠含量高达50%^[16]。玻化微珠表面玻璃化，内部多孔腔，具有优异的绝热性能，是最早被发现和大规模高值化利

用大宗固体废弃物^[17]。刘成楼^[18]以弹性丙烯酸乳液为成膜物，以玻化微珠等为填料制备了导热系数仅有 $0.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的保温涂料。张泽平^[19]系统研究了玻化微珠在保温混凝土中的应用，研制出C10~C35强度等级、导热系数为 $0.206 \sim 0.850 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的玻化微珠保温混凝土。

另外，将泡沫玻璃边角料做为填料也是一种常见的应用方式。冯伟等^[20]将泡沫玻璃废弃物做为保温填料掺入到混凝土中，制备泡沫玻璃保温混凝土，发现其具有良好的保温效果；薛力犁等^[21]将免煅烧脱硫石膏和粉煤灰等作为胶凝材料，搭配泡沫玻璃填料采用振动成型、包裹成型及分层浇筑成型三种制备方式制备自保温材料，结果表明分层浇筑成型的保温试件外观最佳，传热系数为 $0.10 \sim 0.14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，强度大于 0.5 MPa 。

2.2 固废基掺合材料

大多数固体废弃物本身并不具备保温特征，但在无机保温材料的生产中这些固废基掺合材料可以起到一定的胶凝、填充作用，从而改善保温制品的

热学、力学等性能。魏伟明等^[22]通过钼尾矿球磨激发活性，掺入泡沫混凝土中，抗压强度增大达到 1.25 MPa；易龙生等^[23]发现铁尾矿掺量对泡沫混凝土性能影响较大，泡沫混凝土抗压强度和干密度均随铁尾矿掺量增大而逐渐减小，掺入 55% 铁尾矿的 28 d 抗压强度高达 1.65 MPa；马一平等^[24]通过正交设计试验方法，分析了粉煤灰、矿粉、调理剂等不同材料对超轻发泡水泥保温材料强度的影响程度，利用其制备了 120 kg/m³ 的超低密度泡沫混凝土；张晓涵等^[25]用化学发泡法制得钼尾矿泡沫混凝土，当钼尾矿替代 30% 水泥时，混凝土导热系数为 0.178 W/(m·K) 和力学性能为 5.54 MPa，综合最佳；姜晨等^[26]研究发现随着铁尾矿砂的增加，玻化微珠保温混凝土的抗压强度先增大后减小，同时对导热系数影响较低。

2.3 全固废基保温材料

全固废基保温材料是以固体废弃物为主体，添加一定的添加剂制备而成的保温制品。其可实现固体废弃物对传统矿物、水泥、黏土等原材料的完全替代，具有重要的社会价值和经济价值。

岩棉是我国最常用的无机保温材料，主要原材料包括玄武岩、辉绿岩等矿物，分布广、蕴藏量大，原材料丰富^[27]。随着研究的深入，研究学者以冶金矿渣^[28]、硅锰废渣^[29]、镍铁渣^[30]、高炉渣^[31]等热熔矿渣为原料，经过熔融喷丝形成相近的纤维制品——矿棉，由于其生产工艺、性能等相似性，产品外观难以分辨，因此以酸度系数大于 1.6 的定义为岩棉，小于 1.6 的为矿渣棉^[32]。

在发泡陶瓷领域，王国梅等^[33]利用瓷砂原料和废碎玻璃试制了具有防水、保温功能的高温发泡陶瓷，其具有烧成温度低、烧成时间短、烧成温度范围宽、易于生产控制的特点；马龙等^[34]利用赤泥生产发泡陶瓷保温材料，在 1 120 °C 烧结下制备样品抗折强度 0.41 MPa，密度 479 kg/m³；包启富等^[35]以粉煤灰为主要原料，添加一定废玻璃非晶相，1 130 °C 烧结 15 min，所获得的泡沫陶瓷孔径在 1.5 mm 以内，气孔分布均匀，体积密度为 0.39 g/cm³，抗弯强度为 60 MPa；周明凯等^[36]以固体废弃物煤矸石为主要原料，采用粉料坯体发泡法制备闭孔发泡陶瓷，导热系数仅有 0.06~0.09 W/(m·k)；申盛伟^[37]采

用粉煤灰、锂渣等材料，利用地聚物原理，通过碱激发和多固废协同作用制备出无机聚合多孔材料，体积密度可控制在 500 ± 20 kg/m³ 以内，抗压强度达到 2.5~3.0 MPa，导热系数为 0.165 ± 0.005 W/(m·K)，满足蒸压加气混凝土的相关要求。除此之外建筑垃圾、城市淤泥^[38]、粉煤灰^[35]和稀土尾矿^[39]等均有制备发泡陶瓷的研究和报道。

在泡沫玻璃领域，李安林等^[40]利用废旧建筑玻璃为原料，高温发泡制备密度为 210 kg/m³，气孔率达 87.26% 的泡沫玻璃；洪军明^[41]利用萤石尾矿做原材料进行发泡试验，探究温度、发泡剂等对泡沫玻璃的影响，探究出萤石泡沫玻璃的可行性。这些研究逐步降低了泡沫玻璃的成本，扩展了应用适用性。

总之，各行各业的专家已经逐步尝试全固废材料的应用，基于全固废材料的替代，传统无机保温制品的生产越来越低碳化。

3 固废基无机保温材料的技术原理

3.1 固废材料特性分析

深化固废材料的特性研究是高附加值的固废基保温材料研究和制备的基础。粉煤灰空心微珠内部多孔空腔使其具有良好的绝热特性，同时学者发现微珠外部的圆球形玻璃镜面对光产生反射作用，因此在反射隔热涂料和涂层领域^[42-43]，空心微珠又是一种优异的光反射填料。发泡陶瓷等轻质泡沫制品的生产依赖于发泡剂高温分解造孔过程，而陶瓷抛光渣废料中含有的 SiC 在高温下发生氧化反应，生成 SiO₂ 增强结构骨架，同时产生 CO₂ 气体导致大量的闭孔，使材料容重降低、导热系数降低，因此可用于发泡陶瓷^[44]和泡沫保温砖^[45]的生产。煤矸石是煤炭生产过程的排废，但其本身具有一定的热值，在烧结制多孔砖过程可以参与燃烧，同时做为原料和燃料，节约了能源消耗^[46]。大宗固废一般是某生产过程的副产物，多数是多种成分的混合物，因此我们在研究过程中应关注其中的不同成分和材料，充分利用其特性制备保温材料。

3.2 多组分调制方法

表 3 是部分工业固体废弃物的主要化学组成情况^[47]，大宗工业固体废弃物以硅-铝-钙等氧化物为主，与地球表面丰富的矿物资源组成类似，与传

研究与应用

统无机保温材料成分相近。陶瓷和玻璃等无机材料中 SiO_2 是三维网络形成的主要组分, Al_2O_3 是网络中间氧化物, 可以增加材料的强度, 碱性金属氧化物 (K_2O 、 Na_2O 等) 具有助熔、降低烧结温度的作用。多组分调制, 正是利用已有的传统玻璃和陶瓷物料原理, 根据不同固废的成分特点, 互相配合, 制备出具有高附加值的无机非金属保温材料的方法。Riley^[48] 提出轻质陶粒生产原料配比 SiO_2 : Al_2O_3 : 助溶剂为 40%~79%: 10%~25%: 13%~26%; 姜中宏等^[49] 提出了钠硅硼、钠钙硅等多种体系相图模型, 在玻璃形成区范围可有效避免大范围晶体析出, 提高玻璃生产率; 范佳乐^[50] 利用钨尾矿, 添加废玻璃、粉煤灰调制组分制备泡沫微晶玻璃, 试样体积密度为 0.768 g/cm³, 孔隙率为 68.43%, 抗压强度为 6.67 MPa; 岳东亭^[51] 采用两段煅烧法, 调制固废组分, 制备出脱水污泥-黏土尾矿-赤泥-钢渣等两组份、三组分和四组分体系固废基多孔陶粒; 叶晓春^[52] 分析了煤基固废成分, 搭配煤矸石和伴生页岩、抛光渣等材料设计 70%~75% SiO_2 -16%~21% Al_2O_3 -9%~14% MgO 三元发泡陶瓷, 其密度低于 0.53 g/cm³, 孔隙率高于 80%, 导热系数小于 0.14 W/(m·k)。

3.3 多固废协同作用

对于多固废协同作用, 主要体现在胶凝材料的制备上。与传统水泥相比, 固废基胶凝材料水化速度可控, 耐久性高, 在泡沫混凝土的生产和养护过程中将具有一定优势。李颖等^[53] 通过深入分析钢渣、矿渣和石膏水化过程, 提出富钙铝硫中钙矾石的生成加速了三种固废协同水化过程, 体系中钙离子、铝离子、硫酸根和氢氧根离子共同作用形成大量 C-S-H 凝胶; 王亚光^[54] 分析了赤泥-粉煤灰-脱硫石膏三元体系发现在碱性和硫酸盐协同作用下赤泥和粉煤灰中活性硅铝物质可快速参与反应, 使赤泥等固废胶凝材料水化程度向聚合度更高的反应方向进行。这些研究为固废体系制备胶凝材料提供了理论依据。在多固废基胶凝材料研究的基础上, 刘晓圣等^[55] 利用钢渣-矿渣-石膏三元体系制备了 600 kg/m³ 的泡沫混凝土; 杨世钊^[56] 以脱硫石膏、赤泥、铝灰和电石渣为原材料, 制备了硫铝系保温混凝土, 导热系数 0.156 W/(m·K)。

表 3 部分工业固体废弃物的主要化学组成质量分数^[54]

Table 3 The main chemical composition and mass fraction of some industrial solid waste /%

类型	化学组分							烧失物
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	
煤基固废	40~60	10~30	2~5	20~30	0.5~2	0.5~1	0.5~2	10~30
工业废渣	15~75	5~10	1~15	20~40	1~10	0.1~2	0.1~1	0~5
工业尾矿	40~75	2~15	2~20	1~15	0~20	0.1~2	0.2~1	3~15
污泥	10~60	10~30	3~30	2~4	0.2~1	0.1~3	0.1~15	2~50

4 固废基无机保温材料趋势和展望

我国“十四五”规划提出要完成建筑节能 80% 的总目标, 并赶上中等发达国家建筑节能水平。根据全国建筑节能外墙外保温市场情况分析, 我国现建筑节能的市场规模, 目前已达到 1.5 万亿元, 而且这个数字以 1 000 亿元/年的速度增长。这种现实为我国新型墙体建筑材料、新型保温隔热材料的生产行业提供了广阔和难得的机遇。无机保温材料保温、防火、耐久和耐候等特点具有良好的市场潜力; 同时随着《“十三五”装配式建筑行动方案》的实施和装配式技术的推广, 无机保温材料还具有保温结构一体化的特征, 是装配式建筑理想的保温材料。建筑行业是涉及国泰民安的基础行业, 材料的应用需要综合成本、性能多方面考虑, 固废基无机保温材料将有效降低生产成本, 是无机保温材料发展的重要方向, 是大宗固体废弃物高值化利用的重要手段, 也是实现建筑低碳化的途径之一。

但目前固废基无机保温材料仍处于发展的前期阶段, 涉及矿山、冶金、固体废弃物综合利用以及建筑材料和建筑节能等多行业多领域, 这种行业壁垒和原料差异导致传统企业、传统从业者的认识不足, 科技人才欠缺, 技术研究水平受限。另外固体废弃物来源广泛, 组分复杂, 不同行业、不同区域, 甚至不同时期的固体废弃物可能具有明显的差异, 这种差异性给将对材料的物化性能、生产加工和应用带来阻碍。因此固废普查, 大数据的建立是大宗固体废弃物综合利用的基础; 同时固废基保温制品原材料不稳定性有待解决, 不论是统一的生产标准还是普遍性的固体废弃物均化方法都将有效提高固废综合利用率; 最后, 与传统有机保温材料相比, 固废基无机保温材料的绝热性能仍有待进一步提高。通过组分调制、工艺调整, 探究材料组分、工艺与

微观结构和应用性能的内在联系, 开发综合性能更加优异的保温材料势在必行。

参 考 文 献

- [1] 汪贞伊. 建筑保温材料的节能技术 [J]. 石材, 2022, 382 (12): 109-111.
- [2] 张飞, 潘艳, 周杨, 等. 外墙保温材料的研究进展及存在问题 [J]. 建筑节能, 2019, 47 (11): 83-85.
- [3] 张吉春. 节能保温材料在建筑外墙中的应用研究 [J]. 工程机械与维修, 2022, 306 (5): 189-191.
- [4] 申艳军, 白志鹏, 郝建帅, 等. 尾矿制备混凝土研究进展与利用现状分析 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (3): 845-857, 876.
- [5] 王剑锋, 常磊, 王艳, 等. 钢渣胶凝活性与体积稳定性优化研究现状 [J/OL]. 材料导报, 2023 (11): 1-17 [2023-03-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20220516.1314.014.html>.
- [6] 付士峰, 刘东基, 崔彦发, 等. 建筑垃圾综合利用体系及现状 [J]. 建筑技术, 2021, 52 (7): 793-796.
- [7] 吴楠. 国内外建筑垃圾资源化利用政策分析 [J]. 科技资讯, 2021, 19 (28): 100-101, 105.
- [8] 顾晓薇, 张延年, 张伟峰, 等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望 [J]. 金属矿山, 2022, 547 (1): 2-13.
- [9] 吴雪樵. 浅析无机保温材料的分类特性及应用前景 [J]. 居业, 2014, 70 (12): 52-59.
- [10] 郭翰卿. 高层民用建筑外墙保温材料的种类与特点 [J]. 四川水泥, 2022, 306 (2): 135-136, 139.
- [11] 叶芬, 车龙, 刘勇闯, 等. 发泡陶瓷的研究现状与展望 [J]. 广州化工, 2017, 45 (15): 9-10, 41.
- [12] 潘志华, 程麟, 李东旭, 等. 新型高性能泡沫混凝土制备技术研究 [J]. 新型建筑材料, 2002 (5): 1-5.
- [13] 扈士凯, 李应权, 徐洛屹等. 国外泡沫混凝土工程应用进展 [J]. 混凝土世界, 2010, 10 (4): 48-50.
- [14] 兰明章, 代丹丹, 陈智丰, 等. 超轻发泡水泥保温板孔结构与性能关系研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (2): 518-524.
- [15] 马玲, 雷贤庆, 李渠江. 膨胀蛭石与玻化微珠复合无机保温砂浆应用研究 [J]. 中国西部科技, 2012, 11 (2): 55-56, 46.
- [16] 边炳鑫, 宋志伟, 艾淑艳. 粉煤灰空心微珠的特性及综合利用研究 [J]. 煤炭加工与综合利用, 1997 (3): 41-43.
- [17] 李颖, 黄艳芳. 玻化微珠保温材料在建筑行业中的应用分析 [J]. 广东建材, 2022, 38 (10): 21-24.
- [18] 刘成楼. 柔性无机材料外墙保温隔热涂料的研制 [J]. 中国涂料, 2007, 135 (9): 41-43, 56, 42.
- [19] 张泽平. 玻化微珠保温混凝土及其结构的基本性能试验与理论分析研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [20] 冯伟, 蔡瑛, 倪作夫, 等. 泡沫玻璃轻骨料混凝土配比正交试验分析 [J]. 建筑节能, 2013, 41 (6): 44-46, 52.
- [21] 薛力梨, 潘钢华, 刘红飞, 等. 脱硫石膏基泡沫玻璃保温材料成型方式研究 [J]. 建筑技术, 2016, 47 (10): 922-924.
- [22] 魏伟明, 邱建锋, 汪磊, 等. 尾矿基发泡水泥隔热材料性能增强工艺研究 [J]. 矿产保护与利用, 2021, 41 (4): 119-123.
- [23] 易龙生, 吴倩, 米宏成, 等. 利用铁尾矿制备发泡水泥 [J]. 非金属矿, 2021, 44 (1): 1-4.
- [24] 马一平, 李奎, 明守旺, 等. 超低密度等级发泡水泥的制备研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2016, 159 (5): 3-6, 11.
- [25] 张晓涵, 邓军平, 黄浩琪, 等. 高掺量钼尾矿自保温砌块的制备及性能研究 [J]. 混凝土, 2022, 393 (7): 138-142.
- [26] 姜晨, 李珠, 赵林, 等. 铁尾矿砂掺量对玻化微珠保温混凝土物理性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2019, 362 (12): 169-172.
- [27] 胡小媛. 岩棉在我国外墙外保温市场的应用 [J]. 建设科技, 2012, 231 (23): 62-63, 66.
- [28] 李胜春, 朱春江, 宁伟. 最新固废利用热态熔渣生产优质矿棉的研究和应用 [C] //2019 第 22 届全国玻璃窑炉技术研讨交流会论文集汇编, 日照, 2019: 12.
- [29] 孔令军, 赵祥麟, 刘广龙. 红土镍矿冶炼镍铁废渣综合利用研究综述 [J]. 铜业工程, 2014, 128 (4): 42-44.
- [30] LI Y, DAI W B. Modifying hot slag and converting it into value-added materials: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175 (FEB. 20): 176-189.
- [31] ZHAO D, ZHANG Z, TANG X, et al. Preparation of slag wool by integrated waste-heat recovery and resource recycling of molten blast furnace slags: From Fundamental to Industrial Application [J]. Energies, 2014, 7 (5): 3121-3135.
- [32] 孙诗兵, 田英良, 韩继先, 等. 我国岩矿棉制造发展状况与生产减碳途径 [J]. 北京工业大学学报, 2022, 48 (3): 306-311.
- [33] 王国梅, 徐晓虹, 吴建锋. 高温发泡陶瓷的烧成工艺与性能 [J]. 新型建筑材料, 1997 (11): 19-21.
- [34] 马龙, 李国忠, 姜葱葱. 用赤泥生产发泡陶瓷保温材料的试验室初探 [J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2013, 181 (1): 45-47.
- [35] 包启富, 董伟霞, 周健儿, 等. 利用粉煤灰和玻璃废料制备泡沫陶瓷的烧成工艺 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44 (增刊 1): 358-360.
- [36] 周明凯, 彭丽芬, 王怀德, 等. 氧化铁和发泡剂对煤矸石闭孔发泡陶瓷的性能影响 [J]. 中国陶瓷, 2015, 51 (2): 77-80.
- [37] 申盛伟. 多固废体系无机聚合多孔材料的制备机理与性能研究 [D]. 武汉: 湖北大学, 2022.
- [38] 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.
- [39] 朱建平, 乐红志, 白荣, 等. 利用黄金尾矿制备发泡陶瓷的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (9): 2989-2997.
- [40] 李安林, 张辉, 曾小州, 等. 废旧建筑玻璃制备泡沫玻璃的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (12): 4021-4026.
- [41] 洪军明. 泡沫微晶玻璃发泡影响因素分析 [J]. 新型工业化,

研究与应用

- 2022, 12 (10): 252–255.
- [42] 刘亚辉, 冯建林, 许传华. 空心玻璃微珠在反射隔热涂料中的应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2014, 17 (2): 22–23, 33.
- [43] 王福强, 戴国军, 潘建中, 等. 一种无机反射隔热轻质陶彩石涂料及其制备方法 [P]. 浙江省: CN114525046A, 2022–05–24.
- [44] 缪松兰, 马光华, 李清涛, 等. 建筑陶瓷抛光废渣制备轻质陶瓷材料的研究 [J]. 陶瓷学报, 2005 (2): 71–79.
- [45] 税安泽, 夏海斌, 曾令可, 等. 利用抛光砖废料制备多孔保温建筑材料 [J]. 硅酸盐通报, 2008, 166 (1): 191–195.
- [46] 张三明, 陈湛, 余其康, 等. 利用废弃煤矸石生产保温砖及其在自保温墙体中的应用 [J]. 新型建筑材料, 2009, 36 (9): 22–26.
- [47] 汪学彬, 杨重卿, 张祥伟, 等. 工业固体废弃物制备陶粒及其应用研究进展 [J]. 中国粉体技术, 2021, 27 (2): 1–8.
- [48] RILEY C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays [J]. Journal of the American ceramic society, 2006, 34 (4): 121–128.
- [49] 姜中宏, 胡丽丽. 玻璃的相图结构模型 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1996 (5): 395–404.
- [50] 范佳乐. 利用钨尾矿制备泡沫微晶玻璃的研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [51] 岳东亭. 利用污泥/赤泥/钢渣等固体废物制备新型多孔陶粒的膨胀机理研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [52] 叶晓春. 煤矿固体废弃物泡沫隔热陶瓷组成与性能一体化设计和制备 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [53] 李颖, 吴保华, 倪文, 等. 矿渣-钢渣-石膏体系早期水化反应中的协同作用 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2020, 41 (4): 581–586.
- [54] 王亚光. 赤泥-粉煤灰-脱硫石膏新型胶凝材料微结构演变与复合协同效应 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [55] 刘晓东, 王美娜, 王振方, 等. 全固废泡沫混凝土性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (10): 4.
- [56] 杨世钊. 固废基硫铝系绿色节能保温材料的制备及优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.

(上接第 123 页)

- [14] GUO P G, CARPINTERI A, SPAGNOLI A, et al. Effects of mechanical properties of concrete constituents including active mineral admixtures on fatigue behaviours of high performance concrete [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33 (1): 66–75.
- [15] 刘峰. 粉煤灰掺量对高性能混凝土性能的影响 [J]. 科技与企业, 2012 (12): 316–317.
- [16] YOICHI M, VANISSORN V, ITARU H, et al. Tensile mechanical properties of fly ash concrete at early age for thermal stress analysis [J]. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2020, 1 (1): 1–14.
- [17] 宋旭明, 戴公连, 龚雪芬. 粉煤灰高性能混凝土疲劳性能试验研究 [C]. 中国公路学会 2007 年学术年会论文集 (下). 2007: 226–230.
- [18] 曹兴龙. 绿色高性能混凝土配合比设计与性能预测 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [19] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152 [S]. 北京: 中国标准化出版社, 2012.

(上接第 128 页)

- [7] 王延仓, 李笑芳, 张文胜, 等. 基于高光谱技术公路路基土壤压实度定量反演的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43 (7): 2294–2300.
- [8] 王如会. 基于改进灰色 Markov 模型的建筑工程造价预测研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 122–127.
- [9] 赵得杰, 毕经东, 李浩. 基于 ARIMA 模型的基坑变形预测研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 40–45.
- [10] 李风增. 基于人工神经网络模型预测混凝土抗压强度 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (3): 126–133.
- [11] KURNAZ T F, KAYA Y. The performance comparison of the soft computing methods on the prediction of soil compaction parameters [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 13 (4): 1–13.
- [12] JAYAN J, SANKAR N. Prediction of compaction parameters of soils using artificial neural network [J]. Asian Journal of Engineering and Technology, 2015, 3 (4): 1–13.
- [13] WANG H, YIN Z. High performance prediction of soil compaction parameters using multi expression programming [J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105758.
- [14] MOINFAR A, SHAHGHOLI G, GILANDEH Y A, et al. Investigating the effect of the tractor driving system type on soil compaction using different methods of ANN [J]. Anfis and Step Wise Regression, 2022, 222: 105444.
- [15] WANG X, DONG X, ZHANG Z, et al. Compaction quality evaluation of subgrade based on soil characteristics assessment using machine learning [J]. Transportation Geotechnics, 2022, 32: 100703.
- [16] LIU G, PIE L, LI S. Compactness prediction of airport soil field based on artificial neural network [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2021, 38 (1): 54–60.