

大掺量固废免蒸压加气混凝土在极寒环境下的各项性能研究综述

张琛, 王学志

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

大掺量固废免蒸压加气混凝土是一种兼具固废资源化利用与节能优势的新型建筑材料, 本文全面综述了大掺量固废免蒸压加气混凝土在极寒环境下的各项性能研究, 包括其力学性能、耐久性能, 并从微观层面分析了低温对材料水化产物种类、形貌及孔结构的影响。详细阐述了不同防冻剂掺量、固废的掺量及总掺比和复合激发剂掺量对加气混凝土性能的影响机制, 分析了大掺量固废免蒸压加气混凝土在极寒环境下的性能降低变化。本文结合国内外相关研究成果, 在固废掺加特性、极寒环境下的核心性能演变规律、制备工艺优化及强化技术等方面, 分析当前研究存在的不足, 并展望未来发展方向, 通过对大掺量固废免蒸压加气混凝土在极寒环境下性能的研究, 为大掺量固废免蒸压加气混凝土在我国东北、西北及青藏高原等极寒地区的推广应用提供理论支撑与实践指导。

关键词

大掺量固废, 免蒸压加气混凝土, 极寒环境, 力学性能, 耐久性能

A Review of Research on Various Properties of High-Volume Solid Waste Non-Autoclaved Aerated Concrete in Extremely Cold Environments

Chen Zhang, Xuezhi Wang

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: May 26, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

High-volume solid waste non-autoclaved aerated concrete (HVW-NAAC) is a novel building material that combines the advantages of solid waste resource utilization and energy conservation. This paper comprehensively reviews the research on various properties of HVW-NAAC in extremely cold environments, including its mechanical properties and durability performance. Additionally, it analyzes the effects of low temperature on the type, morphology, and pore structure of the material's hydration products from a microscopic perspective. The influence mechanisms of different dosages of anti-freezing agents, the dosage and total proportion of solid waste, and the dosage of composite activators on the properties of aerated concrete are elaborated in detail, along with an analysis of the performance degradation law of HVW-NAAC in extremely cold environments. By integrating relevant domestic and foreign research findings, this paper discusses existing research gaps and prospects future development directions in terms of the characteristics of solid waste incorporation, the evolution law of core properties in extremely cold environments, preparation process optimization, and strengthening technologies. Through the research on the properties of HVW-NAAC in extremely cold environments, this paper provides theoretical support and practical guidance for the popularization and application of HVW-NAAC in extremely cold regions of China, such as Northeast China, Northwest China, and the Qinghai-Xizang Plateau.

Keywords

High-Volume Solid Waste, Non-Autoclaved Aerated Concrete, Extremely Cold Environment, Mechanical Properties, Durability Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

我国工业固废每年排放量超过 30 亿吨, 粉煤灰、钢渣、煤矸石等大宗固废的堆存不仅占用土地资源, 还会引发环境污染问题[1]。同时, 建筑行业作为能源消耗大户, 传统蒸压加气混凝土生产需消耗大量热能, 蒸压釜设备投资高, 制约了其绿色发展[2]。大掺量固废免蒸压加气混凝土以工业固废(掺量 $\geq 50\%$)为主要原料, 采用常温常压养护替代蒸压工艺, 实现了“固废减量化”与“生产节能化”的双重目标, 符合建筑材料绿色转型趋势[3]。

我国东北、西北等极寒地区, 冬季气温长期低于 -20°C , 冻融循环频繁, 建筑墙体材料需同时满足高强度、高抗冻性及优异保温性能[4]。传统加气混凝土在极寒环境下易因含水率波动引发冻融破坏, 而大掺量固废的引入改变了材料内部孔结构与水化产物组成, 其性能演变规律更为复杂[5]。因此, 系统研究该材料在极寒环境下的性能特征, 对推动固废资源化利用、拓展加气混凝土应用场景具有重要的理论与工程意义。

1.2. 核心概念界定

固废指在工业生产活动(如煤炭开采、冶金、电力、化工、建材制造等)中产生的固体废物, 是工业生产中原材料消耗、工艺转化或产品加工残留的产物, 具有产量大、成分相对稳定、资源化潜力强等

特点。

大掺量固废指工业固废在免蒸压加气混凝土的“硅质 + 钙质原料总质量”中掺量 $\geq 50\%$, 既包括单一工业固废的高比例掺加(如 67%粉煤灰), 也包括多种工业固废的复合掺加(如 40%煤矸石 + 25%粉煤灰), 核心要求是实现固废的“减量化、资源化”, 同时保证材料性能满足极寒环境应用需求[6]。

免蒸压加气混凝土是指以水泥、石灰等为胶凝材料, 铝粉等为发气剂, 通过常温静停、蒸汽养护 ($\leq 100^\circ\text{C}$)等工艺成型, 无需高温高压蒸压处理的多孔混凝土, 其干密度通常为 $400\sim 800\text{ kg/m}^3$, 抗压强度 $\geq 2.0\text{ MPa}$ [7]。

参考《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26-2018), 极寒环境指最冷月平均气温 $\leq -10^\circ\text{C}$ 、极端最低气温 $\leq -20^\circ\text{C}$ 的环境, 该环境下材料需承受 ≥ 100 次冻融循环而无明显破坏[8]。

2. 大掺量固废的种类及掺加特性

大掺量固废的种类与掺加比例直接影响免蒸压加气混凝土的浆体流动性、发气稳定性及最终性能。目前研究中应用较广的固废主要包括硅质固废、钙质固废及复合固废三大类, 其掺加特性与作用机理存在显著差异。

2.1. 硅质固废

硅质固废以粉煤灰、硅锰渣、煤矸石等为代表, 主要提供活性 SiO_2 , 与水泥、石灰水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 生成 C-S-H 凝胶, 提升材料强度[9]。

粉煤灰是应用最成熟的硅质固废, 其球形颗粒可改善浆体流动性, 玻璃体含量越高, 火山灰活性越强。孙鑫蕊等[10]以 67%粉煤灰为硅质原料, 搭配 10%水泥、20%石灰制备免蒸压加气混凝土, 经 85°C 蒸汽养护 6 d 后自然养护 5 d, 干密度达 716 kg/m^3 , 抗压强度 6.75 MPa, 满足 A 5.0 级标准, 且在 -20°C 冻融循环 25 次后强度损失率仅 12.3%, 优于低掺量粉煤灰组。但高掺量粉煤灰会降低浆体早期强度, 需通过化学激发(如 NaOH、三乙醇胺)提升活性[11]。

硅锰渣富含 SiO_2 与 Al_2O_3 , 但活性较低, 需与硅灰复合掺加以改善性能。王昱博等[12]用硅锰渣 - 硅灰(质量比 2:1)复合取代粉煤灰, 当取代率为 25%时, 混凝土抗压强度达最大值 3.8 MPa, 干密度 620 kg/m^3 ; 取代率增至 75%时, 因活性成分不足, 抗压强度下降至 2.5 MPa, 且极寒环境下冻融循环 50 次后强度损失率超 40% [12]。

2.2. 钙质固废

钙质固废主要包括钢渣、电石渣、脱硫石膏等, 其 CaO 含量较高, 可作为钙质补充原料, 促进水化反应进行, 部分固废还能调节浆体凝结时间[13]。

钢渣具有潜在水硬性, 但其体积稳定性差, 需经粉磨活化后使用。张宾等[14]以 30%钢渣、25%水泥、15%石灰为原料, 采用 CO_2 矿化养护制备免蒸压加气混凝土, 干密度 700 kg/m^3 左右, 抗压强度达 5.5 MPa; 在 -25°C 冻融循环 50 次后, 质量损失率仅 2.1%, 抗压强度损失率 15.6%, 优于普通硅酸盐水泥基加气混凝土[14]。这是因为钢渣水化生成的水化硅酸钙与碳酸钙交织形成致密结构, 降低了孔隙率。

电石渣可替代部分石灰提供 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 姚星亮等[15]用 20%电石渣、30%粉煤灰、25%水泥制备固废基免蒸压加气混凝土, 电石渣的引入使浆体凝结时间缩短至 4 h, 28 d 抗压强度 4.2 MPa; 但电石渣掺量超 30%时, 浆体易出现速凝现象, 导致发气不均, 孔结构恶化[15]。

2.3. 复合固废

多种固废复合掺加可实现“优势互补”, 通过调节硅钙比优化水化产物组成。续入银等[16]以 40%煤

矸石、25%粉煤灰、20%水泥为复合原料, 制备的免蒸压加气混凝土抗压强度达 5 MPa, 干密度 520 kg/m³; 在-20℃冻融循环 30 次后, 强度损失率仅 10.8%, 优于单一煤矸石掺加组[16]。这是因为煤矸石的刚性颗粒与粉煤灰的活性成分协同作用, 既提升了骨架强度, 又优化了孔结构。

表 1 汇总了不同大掺量固废免蒸压加气混凝土的基础性能及极寒环境适应性, 可以发现硅钙复合固废体系的综合性能最优, 单一固废则需通过活性激发或掺加改性剂提升极寒环境下的适应性。

Table 1. Comparison of basic performance of non-autoclaved aerated concrete with different high-volume solid wastes
表 1. 不同大掺量固废免蒸压加气混凝土的基础性能对比

	固废掺量(%)	干密度(kg/m ³)	28 d 抗压强度(MPa)	-20℃冻融 50 次强度损失率(%)
粉煤灰	固废类型	716	6.75	28.5
硅锰渣 - 硅灰	50	650	3.2	42.1
钢渣	30	700	5.5	15.6
煤矸石 - 粉煤灰	65	520	5.0	10.8
电石渣 - 粉煤灰	50	680	4.2	22.3

3. 极寒环境下大掺量固废免蒸压加气混凝土的核心性能研究

极寒环境的核心挑战是低温冻融循环引发的“水-冰相变”, 导致材料内部产生体积膨胀应力, 进而引发裂缝扩展与性能劣化。大掺量固废的引入改变了材料的孔结构、水化产物及界面结合状态, 其力学性能、抗冻性能及热工性能的演变规律与普通加气混凝土存在显著差异。

3.1. 力学性能演变规律

极寒环境下, 大掺量固废免蒸压加气混凝土的力学性能(抗压强度、弹性模量等)主要受含水率、冻融循环次数及固废掺加类型影响, 呈现“先稳后降”的阶段特征。

含水率是影响力学性能的关键因素。邓春宁[17]研究表明, 当蒸压加气混凝土含水率从 0%增至 20%时, 抗压强度下降 40%以上; 而大掺量粉煤灰免蒸压加气混凝土在含水率 10%时抗压强度达最大值, 含水率超 15%后, 因孔隙水结冰膨胀, 强度开始显著下降, 含水率 30%时强度损失率达 35% [17]。这是因为固废颗粒的吸附作用使水分在材料内部分布更均匀, 低含水率时可增强界面粘结, 高含水率则加剧冻融破坏。

冻融循环次数直接决定力学性能劣化程度。何坤等[18]对大掺量钢渣免蒸压加气混凝土进行-20℃冻融循环试验, 发现前 25 次循环中, 抗压强度略有上升(增幅 5.2%), 这是因为低温促进了钢渣的二次水化, 生成更多 C-S-H 凝胶; 25 次循环后, 强度开始持续下降, 50 次循环后强度损失率 18.3%, 弹性模量损失率 25.6% [18]。而单一粉煤灰掺加组在 25 次循环后强度即开始下降, 50 次循环后强度损失率达 32.1%, 表明钢渣的致密作用可延缓冻融劣化。

固废类型对力学性能的影响体现在水化产物与孔结构上。丁学成[19]对比了磷酸镁基与硅酸盐基大掺量固废免蒸压加气混凝土, 前者水化生成的 K-鸟粪石晶体结构更稳定, 在-25℃冻融 50 次后抗压强度损失率仅 12.7%, 而后者因 C-S-H 凝胶在低温下易脆化, 强度损失率达 28.9% [19]。

3.2. 抗冻耐久性机制与影响因素

抗冻耐久性是掺量固废免蒸压加气混凝土在极寒环境下的核心性能指标, 其优劣取决于孔结构、水化产物稳定性及界面粘结强度三大因素, 其中孔结构的优化是提升抗冻性的关键。

3.2.1. 孔结构的调控作用

加气混凝土的孔结构包括气孔率、孔径分布及孔形态, 其中闭孔率高、孔径均匀(100~500 μm)的孔结构可有效缓解冻融膨胀应力。曾智等[20]通过 MATLAB 图像处理技术分析钢渣 - 矿渣加气混凝土的孔结构, 发现当搅拌时间 35 s 时, 气孔平均孔径 95 μm , 闭孔率 68%, -20°C 冻融 50 次后质量损失率仅 1.8%; 搅拌时间过长(60 s)会导致气孔合并, 平均孔径增至 200 μm , 闭孔率降至 45%, 质量损失率升至 8.2% [20]。

大掺量固废可通过颗粒级配优化孔结构。李嘉诚[21]用 18%再生细骨料粉末替代粉煤灰, 使加气混凝土的孔隙率从 65%降至 58%, 平均孔径从 180 μm 缩小至 120 μm , -20°C 冻融 30 次后强度损失率从 25%降至 15% [21]。这是因为再生细骨料粉末填充了微小孔隙, 减少了连通孔数量, 阻碍了水分迁移与结冰膨胀。

3.2.2. 水化产物的稳定性

水化产物的低温稳定性直接影响抗冻耐久性。XRD 分析表明, 普通硅酸盐基加气混凝土的主要水化产物为 C-S-H 凝胶与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在低温下易发生晶型转变, 导致结构疏松[22]; 而大掺量钢渣加气混凝土的水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量降低 30%, 生成更多水化硅酸钙与钙矾石, 且钢渣中的 Fe_2O_3 可促进水化产物形成交织结构, 提升低温稳定性[14]。

磷酸镁基、硫铝酸盐基胶凝体系的水化产物更适应极寒环境。彭非非[23]制备的硫铝酸盐水泥基免蒸压加气混凝土, 水化产物以钙矾石与铝胶为主, 钙矾石在 -25°C 下仍能保持稳定晶型, 冻融 50 次后强度损失率仅 10.5%; 而普通硅酸盐水泥基强度损失率达 35.2% [23]。

3.2.3. 界面改性与强化技术

纤维掺加与界面改性是提升抗冻性的有效手段。董泓江[24]在铝灰 - 粉煤灰加气混凝土中掺加 0.4% 玄武岩纤维, -20°C 冻融 50 次后抗压强度损失率从 30%降至 18%, 抗折强度损失率从 45%降至 22%; 纤维的桥接作用可阻止裂缝扩展, 减少冻融破坏[24]。彭非非[23]用铝/锌粉无机涂层处理钢筋, 使涂层钢筋 - 加气混凝土界面的握裹力在 Cl^- 侵蚀与冻融循环后仍保持 1.12 MPa, 高于裸钢筋组的 0.65 MPa [23], 表明界面改性可提升整体抗冻耐久性。

3.2.4. 抗冻性能提升效果对比

为量化不同强化技术的极寒抗冻提升效果, 整合文献[14] [19] [23] [24]中 -20°C 冻融 50 次试验数据, 绘制不同强化措施下材料强度损失率变化图(图 1), 由图可知, 未改性普通固废体系强度损失率普遍超过 30%; 单一胶凝体系改性、界面改性可将损失率降至 20%以内; 而纤维掺加 + 复合胶凝体系协同改性效果最优, 可将冻融 50 次强度损失率控制在 10%以内, 是极寒环境下材料性能强化的最优技术路径。同时结合前文微观 SEM 图谱可发现, 该强化路径的核心机理是从微观层面优化孔结构、稳定水化产物、抑制裂缝扩展, 实现宏观抗冻性能的大幅提升。

3.3. 热工性能变化特征

极寒地区建筑对墙体材料的保温性能要求极高(导热系数 $\leq 0.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 大掺量固废免蒸压加气混凝土的热工性能主要受干密度、含水率及冻融循环影响。

干密度与导热系数呈正相关关系。孙鑫蕊等[10]制备的干密度 $716 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的粉煤灰基加气混凝土, 导热系数 $0.16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 当干密度降至 $520 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时, 导热系数降至 $0.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 但强度也随之降低至 3.5 MPa [10]。因此, 极寒地区需平衡保温性能与强度, 通常选择干密度 $600\sim 700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的产品。

含水率是影响热工性能的关键变量。金宏庆等[25]研究表明, 大掺量固废免蒸压加气混凝土的导热系数随含水率增加呈指数增长, 含水率从 0%增至 30%时, 导热系数从 $0.13 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增至 $0.52 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 增

幅达 300% [25]。这是因为水分的导热系数(0.6 W/(m·K))远高于空气(0.026 W/(m·K)), 且结冰后导热系数进一步增大(2.2 W/(m·K))。

不同强化措施下冻融循环对强度损失率的影响

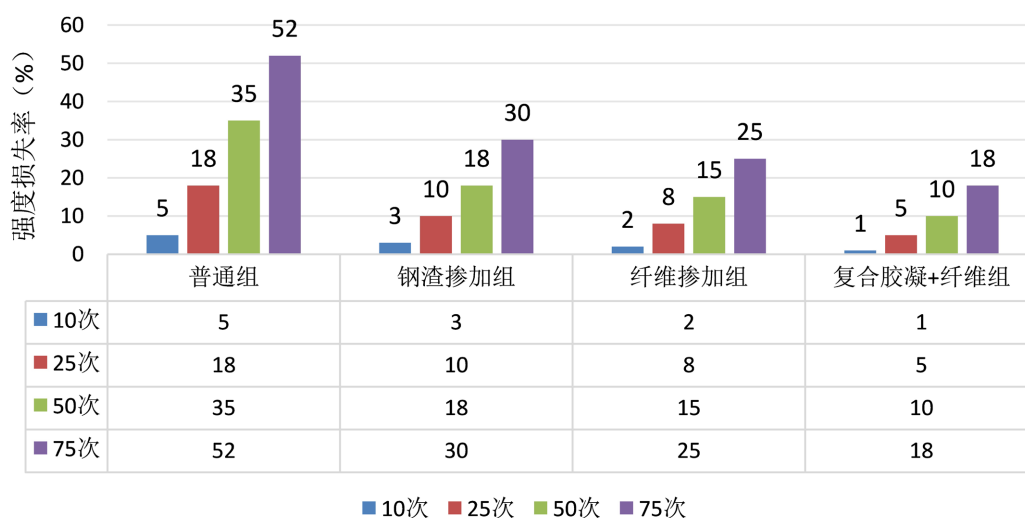


Figure 1. Changes in strength loss rate of high-volume solid waste autoclaved aerated concrete under different strengthening measures

图 1. 不同强化措施下大掺量固废免蒸压加气混凝土的强度损失率变化

冻融循环会导致热工性能劣化。杨建宇等[26]对蒸压加气混凝土墙板进行 -20°C 冻融试验, 50次循环后, 因内部裂缝增多, 导热系数从 $0.14\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增至 $0.18\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 保温性能下降 28.6% [26]。大掺量钢渣加气混凝土因结构致密, 冻融50次后导热系数仅增至 $0.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 保温性能更稳定[14]。

4. 大掺量固废免蒸压加气混凝土的制备工艺优化

为提升极寒环境适应性, 需从配合比设计、养护制度及外加剂优化三方面对制备工艺进行调控, 实现“固废高掺加、性能高稳定”的目标。

4.1. 配合比优化

配合比优化的核心是调节硅钙比(SiO_2/CaO)与水胶比, 优化水化产物与孔结构。英志刚等[27]通过 $L_{16}(4^5)$ 正交试验, 发现铝粉掺量是影响抗压强度与密度的首要因素, 粉煤灰掺量在 $40\%\sim 55\%$ 时强度无明显降低; 最优配合比为粉煤灰 55% 、水泥 15% 、石灰 25% 、铝粉 0.12% 、水胶比 0.55 , 28 d 抗压强度 1.2 MPa , 干密度 $672\text{ kg}/\text{m}^3$ [27]。

硅钙比控制在 $2.0\sim 3.0$ 时, 水化产物以C-S-H凝胶为主, 结构最稳定。姜玉凤等[28]制备碱激发钢渣加气混凝土时, 硅钙比 2.5 时, 28 d 抗压强度达 4.0 MPa , -20°C 冻融50次后强度损失率 16% ; 硅钙比降至 1.5 时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量过高, 强度损失率升至 32% [28]。

4.2. 养护制度优化

免蒸压养护制度需兼顾水化进程与节能需求, 常用“蒸汽养护 + 自然养护”复合制度。孙鑫蕊等[10]采用 85°C 蒸汽养护 6 d 后自然养护 5 d , 使粉煤灰基加气混凝土的水化程度达 85% , 抗压强度比标准养护组提升 25% ; 蒸汽养护温度低于 60°C 时, 水化不完全, 强度仅为标准组的 60% [10]。

CO₂ 矿化养护可提升抗冻性。张宾等[14]对钢渣加气混凝土进行 CO₂ 养护, 使表面生成致密碳酸钙层, 孔隙率降低 10%, -25℃冻融循环 50 次后强度损失率从 20%降至 15.6% [14]。但 CO₂ 养护成本较高, 需结合工程需求合理选用。

4.3. 外加剂优化

外加剂可分为活性激发剂、稳泡剂与增强剂, 分别用于提升固废活性、优化孔结构与强化力学性能。王善冬[29]掺加 0.03%三乙醇胺与 0.5%硫酸钠复合激发剂, 使粉煤灰基加气混凝土的 28 d 抗压强度从 3.5 MPa 提升至 4.8 MPa, 这是因为三乙醇胺加速了水泥水化, 硫酸钠促进了钙矾石生成[29]。

稳泡剂可改善孔结构, 硬脂酸钙是常用稳泡剂。李颖等[30]掺加 1.5%硬脂酸钙, 使煤气化渣加气混凝土的气孔分布更均匀, 平均孔径从 180 μm 缩小至 100 μm, 闭孔率从 55%提升至 70%, 抗冻性能显著提升[30]。

5. 现存问题与未来研究方向

5.1. 现存问题

目前大掺量固废免蒸压加气混凝土的基础配方、常规性能研究已取得阶段性成果, 但针对极寒环境长期服役的专项研究仍存在诸多短板, 制约了材料寒区规模化推广, 具体问题如下:

长期服役性能数据缺失。现有冻融试验多集中于 50~100 次短期冻融循环, 仅可反映材料短期抗冻性能, 而极寒地区建筑设计使用寿命超 50 年, 需承受数千次冻融循环及长期低温老化作用, 材料长期微观结构演变、性能衰减规律、疲劳损伤机制尚不明确[31]。

低活性固废激发效率偏低、成本偏高。煤矸石、钼尾矿等低活性固废资源化利用率高, 但现有激发方式依赖高温活化或高掺量化学激发剂, 不仅提升生产成本, 部分化学试剂还可能引入有害物质, 存在环境风险, 难以实现低成本、绿色化高效利用[32]。

寒区专用标准体系空白。目前国内无针对大掺量固废免蒸压加气混凝土的极寒环境专项评价标准, 材料抗冻等级、低温强度、保温性能等关键指标的检测方法、评价体系不统一, 工程应用缺乏规范依据[33]。

性能与经济性难以平衡。为提升极寒适配性, 现有改性技术多依赖纤维、纳米改性剂、特种激发剂等高价材料, 大幅提升生产成本, 难以实现规模化工程推广, 高强度抗冻与低成本的矛盾尚未解决[24]。

5.2. 未来研究方向

针对现有研究短板, 结合寒区建材前沿研究趋势, 突破传统研究局限, 提出精准化、前沿化、可落地、工程适配性强的创新性研究方向, 未来应从以下方面开展研究:

开发基于多源固废协同效应的低温早强型胶凝体系: 突破单一固废性能缺陷, 探究粉煤灰、钢渣、煤矸石、电石渣等多源固废的活性互补、颗粒级配协同机制, 精准调控硅钙比与水化反应速率, 研发适配极寒低温环境的早强、高稳、低碳复合胶凝体系, 解决大掺量固废体系早期强度低、低温水化缓慢、易冻损的核心难题, 实现固废超量掺加与低温性能优异的双重目标[34]。

揭示冻融循环下孔隙水中离子迁移与重结晶对结构损伤的耦合作用机制: 突破传统宏观性能研究局限, 从微观离子尺度切入, 探究极寒冻融循环过程中, 固废水化体系内可溶性离子的迁移、富集、重结晶规律, 分析离子重结晶膨胀、水分冻胀、温度应力三者的耦合损伤机制, 阐明微观离子演化与宏观结构开裂、性能劣化的关联机理, 完善极寒环境材料损伤理论体系[35]。

构建基于热-力-湿多场耦合的寒区服役寿命预测模型: 摒弃单一冻融评价模式, 结合极寒地区低

温、温差、干湿、冻融多场耦合服役环境, 依托微观损伤参数、宏观性能数据、现场暴露试验数据, 建立热-力-湿多场耦合下大掺量固废免蒸压加气混凝土的长期服役寿命预测模型, 精准预判材料 50 年及以上长期性能演变规律, 为寒区工程耐久性设计提供理论支撑[33]。

研发低成本绿色复合活化与改性技术: 以工业副产物替代化学试剂, 开发低成本、无环境污染的复合激发剂, 结合机械粉磨、微波辅助等物理活化技术, 协同提升低活性固废水化效率; 同时研发新型低成本纤维、纳米粉体改性技术, 在保障高强、高抗冻、低导热综合性能的前提下, 有效控制生产成本, 破解性能与经济性的矛盾[36]。

建立极寒地区专用材料评价与施工标准体系: 结合多场耦合服役性能、长期老化试验数据, 制定适配极寒环境的大掺量固废免蒸压加气混凝土性能指标、检测方法、施工工艺及验收规范, 明确寒区专用抗冻等级、导热系数、低温强度等核心控制指标, 填补行业标准空白。

开展全生命周期环境与经济协同评价: 从原料开采、固废加工、材料制备、寒区服役、废弃回收全生命周期维度, 量化分析材料的能耗、碳排放、环境效益与经济效益, 建立绿色建材评价体系, 为材料低碳认证、规模化推广及工程应用提供数据支撑[37]。

6. 结论

大掺量固废免蒸压加气混凝土的极寒环境服役性能由固废类型、微观孔结构、水化产物稳定性及制备工艺参数共同调控。硅钙复合固废体系可实现活性与结构的优势互补, 其中煤矸石-粉煤灰、钢渣复合体系的低温抗冻耐久性、力学稳定性最优, 适配极寒环境长期服役需求; 微观层面, 均匀细小的闭孔结构(闭孔率 $\geq 65\%$ 、平均孔径 $\leq 150 \mu\text{m}$)、高稳定水化产物(钙矾石、K-鸟粪石、致密 C-S-H 凝胶)是材料抵御极寒冻融损伤的核心基础, 纤维掺加、复合胶凝改性、界面优化是提升极寒适配性的关键技术手段。

当前该领域研究仍存在长期服役性能数据不足、低活性固废激发技术低效高成本、寒区专用标准体系缺失、性能与经济性失衡等突出问题。未来研究需聚焦多源固废协同低温胶凝体系开发、多场耦合损伤机理探究、长期服役寿命模型构建等前沿方向, 突破现有技术瓶颈, 完善理论与标准体系, 推动大掺量固废免蒸压加气混凝土在极寒地区的规模化、规范化应用, 最终实现大宗工业固废高效资源化利用与寒区建筑节能低碳发展的双重战略目标。

参考文献

- [1] 中国环境保护产业协会. 中国大宗工业固体废物综合利用发展报告(2023) [R]. 北京: 中国环境保护产业协会, 2023.
- [2] 肖长根, 石海信, 王荣健, 等. 免蒸压加气混凝土砌块研究现状与发展趋势[J]. 广东化工, 2022, 49(12): 134-136.
- [3] 王美娜, 姬军, 马宁, 等. 免蒸压加气混凝土的研究进展[J]. 混凝土, 2021(1): 139-142.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50176-2016 寒冷地区民用建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [5] 陈芸芸. 含水率对蒸压加气混凝土砌块性能的影响[J]. 砖瓦, 2018(8): 66-67+89.
- [6] 姚星亮. 固废基高铁硫铝系胶凝材料及免蒸压轻质混凝土制备试验研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2022.
- [7] 国家市场监督管理总局. GB/T 11968-2020 蒸压加气混凝土砌块[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [8] 新疆维吾尔自治区住房和城乡建设厅. JGJ 26-2018 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [9] 李敏, 彭晓彤, 林晨, 等. 粉煤灰制备免蒸压加气混凝土配合比试验研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2025, 39(6): 891-898.

- [10] 孙鑫蕊, 王学志, 辛明, 等. 多因素作用下免蒸压加气混凝土性能研究及模型预测[J]. 建筑科学, 2023, 39(9): 80-87.
- [11] 罗杰波, 彭晓彤, 刘兆磊, 等. 硅灰和水泥对免蒸压加气混凝土的性能影响与微观分析[J]. 中国粉体技术, 2025, 31(2): 152-160.
- [12] 王昱博, 赵琳, 辛明, 等. 免蒸压硅锰渣加气混凝土力学性能研究[J]. 吉林水利, 2022(12): 56-58+63.
- [13] 刘星, 李小华, 曾智, 等. 新型轻质钢渣加气混凝土的实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2782-2788.
- [14] 张宾, 汪超, 李越颖, 等. 利用钢渣制备免蒸压加气混凝土的研究[J]. 水泥, 2022(11): 45-49.
- [15] 姚星亮, 李辉, 吴锋, 等. 固废基高铁硫铝系胶凝材料的水化特性[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 1956-1965.
- [16] 续入银, 杜美利, 王水利, 等. 煤矸石免蒸压加气混凝土研究[C]//第十八届中国科协年会——分 10 煤炭清洁高效利用学术论坛论文集. 西安: 西安科技大学, 2021: 234-237.
- [17] 邓春宁. 含水率对蒸压加气混凝土力学性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [18] 何坤, 袁璞, 马芹永, 等. 含水率与干湿循环对蒸压轻质混凝土抗压强度的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8644-8649.
- [19] 丁学成. 混掺纤维对磷酸镁基免蒸压加气混凝土力学性能影响及增强机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [20] 曾智, 李小华, 罗伟, 等. 免蒸压钢渣-矿渣加气混凝土孔结构特性及其导热系数模型研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2023, 33(1): 71-78.
- [21] 李嘉诚. 再生细骨料粉末制备免蒸压加气混凝土试验研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [22] Yang, J.Y., Zou, J.M., Yang, W.J., et al. (2022) Experimental Study on the Interrelationship between the Moisture Content and Drying Shrinkage of Autoclaved Aerated Concrete Wallboard. *Materials*, **15**, Article 5582. <https://doi.org/10.3390/ma15165582>
- [23] 彭非非. 钢筋涂层对硫铝酸盐水泥基免蒸压加气混凝土耐久性的影响[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [24] 董泓江. 铝灰-粉煤灰免蒸压加气混凝土物理力学性能及抗冻性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2022.
- [25] Jin, H.Q., Yao, X.L., Fan, L.W., et al. (2022) Experimental Determination and Fractal Modeling of the Effective Thermal Conductivity of Autoclaved Aerated Concrete: Effects of Moisture Content. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **188**, Article 122654.
- [26] 杨建宇, 邹家明, 杨卫军, 等. 蒸压加气混凝土墙板含水率与干燥收缩的相关性研究[J]. 材料导报, 2023, 37(8): 123-128.
- [27] 英志刚, 雷一鸣, 乔林, 等. 正交分析免蒸压粉煤灰加气混凝土性能[J]. 中国粉体技术, 2022, 28(4): 78-84.
- [28] 姜玉凤, 陈跃, 李明, 等. 碱激发钢渣微粉免蒸压加气混凝土的制备研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2574-2580.
- [29] 王善冬. 免蒸压加气混凝土制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
- [30] 李颖, 李辉, 吴锋, 等. 高掺量煤气化渣制备免蒸压加气混凝土[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(7): 154-161.
- [31] Warjri, T., Lyngkhai, R.B. and Marthong, C. (2022) Impact of Moisture Content on the Compressive and Shear Behavior of Autoclaved Aerated Concrete Masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **34**, Article 04022115.
- [32] 李春, 王恩峰, 崔乐, 等. 钼尾矿免蒸压加气混凝土的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(5): 80-84.
- [33] 中国建筑科学研究院. 绿色建材评价标准 加气混凝土砌块(征求意见稿) [S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2023.
- [34] Slávik, R., Struhárová, A. and Čekon, M. (2021) Reliability Study of Equilibrium Moisture Content Methods for Sorption/desorption Isotherms Determination of Autoclaved Aerated Concrete. *Applied Sciences*, **11**, Article 824. <https://doi.org/10.3390/app11020824>
- [35] Sukmana, N.C., Khifdillah, M.I., Nurkholil, A.S., et al. (2022) Optimization of Non-Autoclaved Aerated Concrete Using Phosphogypsum of Industrial Waste Based on the Taguchi Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1234**, Article 012045.
- [36] Ebead, U.A. (2022) Development of High-Strength Lightweight Non-Autoclaved Aerated Concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Structures and Buildings*, **175**, 165-178.
- [37] Wang, C.Q., Lin, X.Y., Wang, D., et al. (2022) Utilization of Oil-Based Drilling Cuttings Pyrolysis Residues of Shale Gas for the Preparation of Non-Autoclaved Aerated Concrete. *Construction and Building Materials*, **315**, Article 125789.