

# 高原环境下复合胶凝材料砂浆 抗冻性能与劣化机制研究

张宏伟<sup>1</sup>, 王朝晖<sup>1</sup>, 张小龙<sup>2</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 刘宁<sup>3</sup>, 王杰<sup>4</sup>, 杨军宏<sup>2</sup>

(1. 宁夏公路管理中心, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏公路桥梁建设有限公司, 宁夏 银川 750016;  
3. 宁夏交通运输综合执法监督局质量与安全执法分局, 宁夏 银川 750002; 4. 长安大学, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为探究高原低温低压环境对复合胶凝材料砂浆抗冻性能的影响, 以粉煤灰-矿渣粉复合胶凝材料砂浆为对象, 在0°C、8°C、15°C三种典型低温与65 kPa恒定低气压条件下进行养护, 并以标准养护(20°C、101 kPa)为对照, 开展冻融循环试验, 评估材料的质量损失、力学性能及相对动态弹性模量演化规律。结果表明: 低温低压显著抑制早期水化反应, 造成初期结构疏松, 养护温度越低, 材料冻融劣化程度越显著。0°C与8°C组试件在冻融初期因残余水化略有增强, 但随循环次数增加, 强度与模量迅速衰退; 15°C组表现出相对平缓的性能退化趋势。微观分析显示, 冻融循环引起C-S-H凝胶破坏、孔隙连通性增强与裂缝扩展, 孔径分布向大孔迁移, 导致结构稳定性下降。核磁测试进一步证实孔隙结构劣化是性能退化的关键机制。

**关键词:** 复合胶凝材料砂浆; 低温低压养护; 抗冻性能; 微观结构演化; 孔隙结构

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0040-09

## Freeze Resistance and Degradation Mechanisms of Composite Cementitious Mortars in Plateau Environments

ZHANG Hongwei<sup>1</sup>, WANG Zhaohui<sup>1</sup>, ZHANG Xiaolong<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, LIU Ning<sup>3</sup>,  
WANG Jie<sup>4</sup>, YANG Junhong<sup>2</sup>

(1. Ningxia Highway Management Center, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

2. Ningxia Highway & Bridge Construction Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750016, China;

3. Ningxia Transportation Comprehensive Law Enforcement Supervision Bureau Mass  
and Safety Law Enforcement Branch, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

4. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

**Abstract:** To investigate the effects of low-temperature and low-pressure environments typical of high-altitude regions on the frost resistance of composite cementitious materials, this work employed a fly ash-slag powder composite system cured at three representative low temperatures (0°C, 8°C, and 15°C) under a constant low air pressure of 65 kPa. Standard curing conditions (20°C, 101 kPa) were used as a control. A series of freeze-thaw cycle tests were conducted to evaluate the evolution of mass loss, mechanical properties, and relative dynamic elastic modulus. The results indicate that low-temperature and low-pressure conditions significantly inhibit early hydration, resulting in a porous and weak initial structure, and the extent of freeze-thaw degradation increases with decreasing curing temperature. Specimens cured at 0°C and 8°C exhibited slight performance enhancement in the early stage due to residual hydration, but both strength and modulus declined rapidly with continued cycling. In contrast, the 15°C group showed a more gradual deterioration trend. Microstructural analysis revealed that freeze-thaw cycling caused C-S-H gel damage, increased

pore connectivity, and crack propagation, with pore size distribution shifting toward larger capillary pores, thereby compromising structural stability. Nuclear magnetic resonance (NMR) testing further confirmed that pore structure degradation is a key mechanism leading to performance loss.

**Keywords: composite cementitious material mortar; low-temperature and low-pressure curing; frost resistance; microstructural evolution; pore structure**

随着基础设施建设的持续推进和城市化进程的加速,水泥作为最主要的胶凝材料,其消耗量持续上升,进而带来了显著的资源 and 环境压力<sup>[1-2]</sup>。为响应绿色低碳发展的战略目标,工业固废资源化利用成为研究热点。矿渣粉与粉煤灰作为典型的固废掺合料,凭借其潜在活性与环境友好性,在部分取代水泥的研究中展现出良好应用前景<sup>[3-4]</sup>。大量研究表明,合理掺配矿渣与粉煤灰不仅有助于激发火山灰反应,还能优化浆体微结构,改善材料的力学性能与耐久性<sup>[5-6]</sup>。

然而,在高原寒冷地区或冬季施工环境中,混凝土材料往往面临低温和低压等复杂外部环境,这些因素将显著延缓水化进程、影响水化产物生成,进而削弱材料的早期强度与长期耐久性,尤其对其抗冻性能造成不利影响<sup>[7-9]</sup>。抗冻性能作为评估材料在寒冷环境中服役寿命的关键指标,其劣化过程往往伴随着孔隙结冰膨胀、内应力积聚及微裂纹扩展等损伤机制<sup>[10]</sup>。特别是在低温低压协同作用下,传统水泥基材料难以形成致密结构,更易发生冻融破坏<sup>[11]</sup>。

目前已有研究分别从低温或低压单因素出发,探讨其对胶凝材料水化行为、力学性能与微观结构的影响。如,徐长伟等<sup>[12]</sup>低温条件下矿粉-水泥复合胶凝材料砂浆的水化特性进行了研究,指出低温显著延缓水化加速期的出现,并导致非蒸发水含量与水化热速率明显降低。王培铭等<sup>[13-15]</sup>采用多尺度研究方法,深入探究了 0~20℃ 养护温度对硅酸盐水泥水化特性的影响规律。在低温环境下,水泥水化反应速率明显减缓,水化进程延缓,但有利于后期强度持续增长,使材料获得更优的长期力学性能。Liu 等<sup>[16]</sup>则指出,低温显著抑制了硅灰等活性矿物的反应活性,使材料力学性能明显下降。另一方面,李林等<sup>[17]</sup>在 0.2~0.8 个大气压范围内研究了环境压力对复合材料性能的影响,发现随着气压降低,材料各项力学指标普遍下降。刘旭<sup>[18]</sup>针对高原地区特有的低气压-冻融耦合作用环境,开展了引气砂浆的性能演化机制研究,发现低压条件加剧了含气量增加引发的力学性能衰减,但对抗冻耐久性的影响呈现差异化特征。Chen 等<sup>[19]</sup>、Zuo 等<sup>[20]</sup>的试验

数据揭示,新拌水泥基材料内部气孔体积的演变与环境气压之间存在显著的线性关系。这一现象不仅源于气孔内外压力梯度的变化,更受到界面张力变化所导致的液膜附加压强的调控。微观观测证实,在高表面能作用下,浆体中的气孔呈现出明显的非球形几何特征<sup>[21-22]</sup>。

尽管上述研究从不同角度揭示了低温或低压对胶凝材料性能的影响机制,但对低温与低压协同作用下复合胶凝材料砂浆抗冻性能的系统研究仍较缺乏,尤其在宏观性能演化与微观结构损伤之间的耦合关系尚不清晰。因此,深入探究极端环境对绿色固废胶凝体系冻融劣化机制的作用规律,具有重要的理论意义与工程价值。基于此,本文以矿渣-粉煤灰复合胶凝材料砂浆为研究对象,模拟青藏高原代表性地区(如理塘)典型的低温(0℃、8℃、15℃)与低压(65 kPa)服役环境,开展冻融循环试验,系统分析不同养护温度与低压条件下复合胶凝材料砂浆的质量损失、力学性能及相对动弹性模量变化规律,并结合扫描电子显微镜(SEM)与低场核磁共振(NMR)等技术,探讨其微观结构与孔隙演化特征,揭示低温低压协同条件下材料冻融劣化的主要机制。需要特别指出的是,本研究主要聚焦于高原环境中的养护阶段对材料性能的影响规律。因此,试验设计上,仅在养护期模拟低温低压条件,而前期的拌合则在标准大气压环境下进行的。这一设计旨在剥离“高原养护环境”这一单一变量,深入揭示其对材料微观结构形成及其后续抗冻耐久性的影响机制,为高原地区混凝土施工中的养护环节提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

本试验所用水泥为宁夏瀛海天琛建材有限公司生产的 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,其比表面积为 366 m<sup>2</sup>/kg。该水泥的主要物理、力学性能及化学成分如表 1 和表 2 所示。掺合料选用 II 级粉煤灰和 S95 级粒化高炉矿渣粉,前者比表面积为 436 m<sup>2</sup>/kg,密度为 2 720 kg/m<sup>3</sup>,后者比表面积为 470 m<sup>2</sup>/kg,密度为 2 810 kg/m<sup>3</sup>,其化学成分如表 2 所示。细集料

采用由厦门艾斯欧标准砂有限公司提供的 ISO 标准砂,符合《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》<sup>[23]</sup>(GB/T 17671—2021)的相关要求。拌合用水为普通自来水。

表 1 硅酸盐水泥的主要物理和力学性能

初凝 /min	终凝 /min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		3 d	28 d	3 d	28 d
165	229	5.2	28.7	8.4	54.8

表 2 水泥、粉煤灰和矿渣粉主要化学成分指标

材料	单位:%							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
水泥	65.67	18.33	4.56	4.27	3.46	1.34	0.94	0.45
粉煤灰	7.54	52.24	6.99	23.16	1.35	1.64	3.08	1.02
矿渣粉	44.25	20.96	14.35	9.00	1.43	6.40	0.21	0.46

## 1.2 配合比设计

相关研究表明<sup>[24-27]</sup>,粒化高炉矿渣粉在碱性环境中具有较高的潜在活性,尤其在中后期能够持续生成 C-S-H 凝胶,从而有效提升砂浆试件的致密性与抗冻性能。因此,适当提高矿渣粉掺量有助于增强复合材料的后期力学性能及其在冻融环境下的稳定性。硅酸盐水泥作为主要的早期强度来源,适量保留能够提供必要的水化热与结构骨架支撑,改善材料在早龄期的性能表现。相较而言,粉煤灰在低温条件下的火山灰活性较弱,但具有良好的填充效应和微结构优化能力,适度掺入可提高浆体的和易性并进一步改善其致密性。

综合考虑各组分在低温低压养护条件下的性能表现与协同作用,并结合课题组之前对复合胶凝材料砂浆性能的研究基础<sup>[28-29]</sup>,本试验采用的胶凝材料质量配比为:普通硅酸盐水泥 40%、粒化高炉矿渣粉 50%、Ⅱ级粉煤灰 10%。具体配合比设计如表 3 所示。

表 3 试验配合比设计

试件编号	水/g	质量分数/wt%		
		水泥	粉煤灰	矿渣
5K1F	225	40	10	50

## 1.3 试验方法

为真实模拟西部高寒高原地区混凝土的服役环境,本研究选取青藏高原腹地地理塘地区(海拔约 4 000 m)作为代表区域。根据理塘国家气象站 2021—2024 年最新的连续观测数据,该地区的常年平均大气压为 65 kPa,年均相对湿度为 75%。因此,本研究将试验养护的压力设定为 65 kPa,养护湿度设定为 75%<sup>[28-29]</sup>。此外,参照理塘地区近十年初春(2—3 月)、初秋(9—10 月)与夏季(6—8 月)平均气温统计值,设定三种典型养护温度,分别约为 0℃、8℃ 和 15℃,用以模拟不同季节下材料服役环

境的温度变化。与此同时,为控制试验环境湿度,避免低压条件下水分快速挥发对水化反应产生干扰,试样在脱模后立即置于密闭容器中,并在容器底部设置饱和氯化钠(NaCl)溶液以维持封闭环境的相对湿度。相关研究表明<sup>[30-31]</sup>,NaCl 饱和溶液在 0~20℃ 可稳定维持相对湿度约为 75%。

试样制备的具体操作步骤为:首先在养护箱底部放置饱和 NaCl 溶液,随后将成型的试样放置于密闭容器内,并将容器内的气压抽至 65 kPa,然后将该密闭容器置于低温试验箱中储存,当试样养护至 28 d 后,取出试样进行后续的冻融循环试验。

## 1.4 冻融循环试验

本研究采用快冻法对养护龄期为 28 d 的试件开展抗冻性能测试。试验参照《水泥胶砂抗冻性试验方法》<sup>[32]</sup>(GB/T 41060—2021)中快冻法进行,冻融介质为去离子水。

冻融循环范围设定为:冻结温度为  $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ,融化温度为  $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。每个冻融循环周期为 4 h,其中冻结与融化各占 2 h。试件在循环过程中保持全部浸没状态,且整个试验过程中不添加任何化学冻融促进剂。

当试件出现以下任一情况时,即中止其冻融试验:①达到预定冻融循环次数;②试件的相对动弹性模量下降至 60%;③试件质量损失率达到 5%。

每完成 10 次冻融循环后,将试件移出冻融设备,依照试验规程分别进行质量测定、相对动弹性模量测定与抗压强度测试。测试结束后,将未发生破坏的试件重新置于冻融模具中,继续进行后续的冻融循环试验。

## 1.5 力学性能测试

本研究采用标准方法测试水泥胶砂试件的抗折强度与抗压强度,以评估其在冻融循环作用下的力学性能演化规律。所有力学性能测试均依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》<sup>[23]</sup>(GB/T 1767—

12021)进行。

试件尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm, 每组试件共 3 条, 分别进行抗折试验与抗压试验, 结果取算术平均值作为该组力学性能指标。抗折强度测试采用三点加载法, 加载跨距为 100 mm, 加载速率为  $50 \pm 10$  N/s; 抗压强度测试在抗折破坏后的试件两端残块 (40 mm × 40 mm) 上进行加载速率控制在  $2\ 400 \pm 200$  N/s。

### 1.6 SEM 微观形貌

本研究采用 JSM-IT500 型扫描电子显微镜对 65 kPa 压力下养护温度为 0℃、8℃ 和 15℃ 条件下养护 28 d, 分别对冻融循环前后的代表性试件进行微观形貌分析。测试加速电压设定为 12 kV, 放大倍数控制在 1000 倍至 5000 倍范围内, 根据观察对象 (如水化产物、孔隙结构、裂缝等) 适当调整。进行测试前, 需对试验进行导电预处理, 使用铝箔对样品底部及周向进行包覆, 采用导电胶将试件固定于载物台基座, 随后在真空环境中喷金。

### 1.7 孔结构演变规律

本研究采用苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的低场核磁共振仪 MesoMR12-060V 进行低温低压养护后复合胶凝材料砂浆冻融循环的孔结构测试, 为保证孔隙充分饱和, 所有试样在 NMR 测试前均经过真空饱水处理, 饱水处理后采用低场核磁设备测试试件的  $T_2$  谱, 测试采用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列, 参数设定如表 4 所示。

表 4 CPMG 脉冲序列参数

名称	CPMG 序列	名称	CPMG 序列
主频/MHz	21	等待时间/ms	4000
频偏/Hz	$23 \times 10^4$	数字增益	3
90 度脉冲长度/ $\mu$ s	20	叠加次数/次	30
180 度脉冲长度/ $\mu$ s	39.04	相位编码	30
接收机带宽/kHz	200	回波时间/ms	0.25
射频延迟/ms	20	回波数/个	18000

## 2 试验结果与分析

### 2.1 质量损失率变化规律

图 1 为不同养护条件下, 复合胶凝材料砂浆在经历每 10 次冻融循环后的质量变化和损失率。从图 1 可以看出, 各组试件在冻融循环前的初始质量基本一致, 说明试样制备与养护过程具有良好的均一性。然而, 随冻融循环次数增加, 各组试件呈现出显著差异的质量变化特征, 表明不同温湿度条件对抗冻稳定性存在显著影响。

在恒定养护压力 (65 kPa) 条件下, 养护温度越高, 材料的质量损失率越低。其中, 15℃ 养护组在整个冻融过程中表现出最小的质量变化, 说明其初始结构更致密, 抗冻稳定性更强。相比之下, 0℃ 和 8℃ 条件下的试件, 由于早期水化反应受限, 内部结构疏松, 致使其在冻融循环中更易发生表层剥蚀与质量衰减。

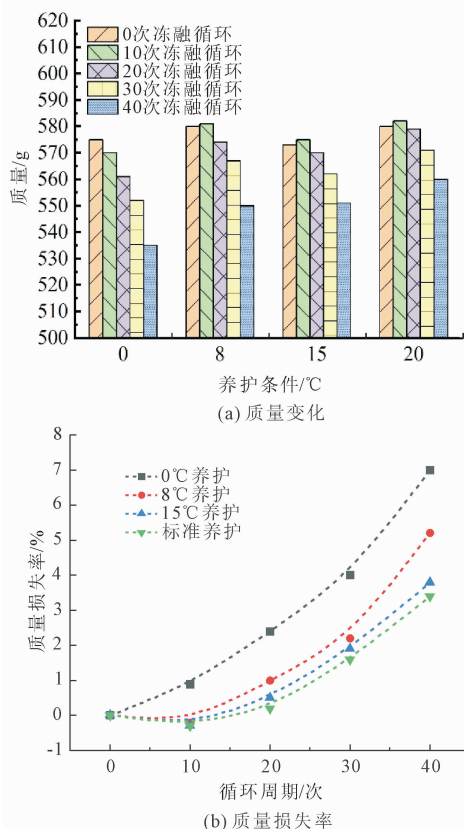


图 1 不同养护条件下粉煤灰-矿渣粉复合胶凝材料砂浆质量变化和质量损失率

当冻融循环次数超过 10 次后, 所有试件均进入质量持续损失阶段, 表明此时冻融破坏机制占主导地位。至第 40 次循环结束, 0℃ 养护组试件的质量损失率已达 7%, 显著高于其他各组, 其中 8℃ 养护组次之, 而 15℃ 养护组与标准养护组 (20℃, 101 kPa 条件下) 的质量损失率始终控制在 3% 以内, 显示出良好的抗冻耐久性。需要指出的是, 试件质量的下降不仅反映了结构剥蚀程度, 也间接揭示了冻融循环过程中材料内部孔隙连通性与微裂纹发展的趋势。上述结果表明, 低温低压环境显著削弱了复合胶凝材料砂浆的初期结构致密性, 加剧了冻融循环中的质量衰减过程。特别是在 0℃ 养护条件下, 试件更早进入结构剥落主导阶段, 表明其对低温冻融环境高度敏感, 具有显著的温度脆弱性。

## 2.2 相对动弹性模量变化规律

不同低温低压养护条件下,粉煤灰-矿渣复合胶凝材料砂浆在冻融循环中的相对动弹性模量(RDME)变化规律如图2所示。整体来看,材料的相对动弹性模量(RDME)演化具有显著的温度依赖性与阶段性,养护温度越低,材料的抗冻弹性保持能力越差。高原低温低压环境显著抑制了材料的水化进程,导致材料在冻融循环中的性能衰退更为迅速。尤其是在0℃和8℃养护条件下,材料初期表现出一定的“刚度回弹”现象,但随冻融循环的继续,裂纹的扩展与微观结构的破坏加剧,导致RDME迅速下降。与此相比,15℃养护组和标准养护组的RDME变化较为平缓,说明高原环境的低温低压条件显著影响了材料的弹性模量变化规律。

在前10次冻融循环内,0℃和8℃养护组试件的RDME略有上升,分别达到初始值的103.1%和101.8%,表现出短暂的“刚度回弹”现象。然而,随着冻融循环次数的增加,微裂纹积累、胶凝结构破坏和孔隙连通性增强成为主导机制,使得RDME迅速下降。

综合分析表明,低温低压条件下复合胶凝材料砂浆的RDME变化呈“先升后降”的双阶段特征,初期增强受限于残余水化与冻结压实效应,后期快速衰减反映了累积损伤对弹性模量的主导控制。该趋势与2.1节中的质量损失结果高度一致,进一步验证了低温环境下材料早期致密性不足对冻融耐久性的削弱效应。

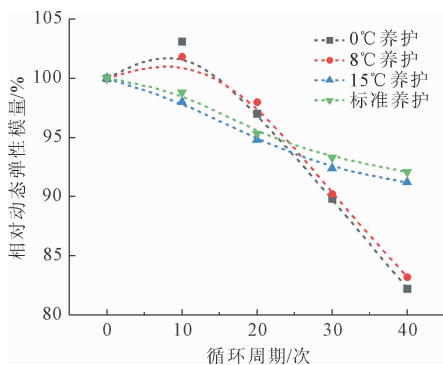


图2 相对动弹性模量

## 2.3 抗压强度

图3展示了粉煤灰-矿渣复合胶凝材料砂浆在不同低温低压养护条件下经历冻融循环后的抗压强度变化及其损失率演化趋势。结果表明,养护温度对材料的抗压性能具有显著影响,温度越低,冻融循环下材料的力学退化程度越大。

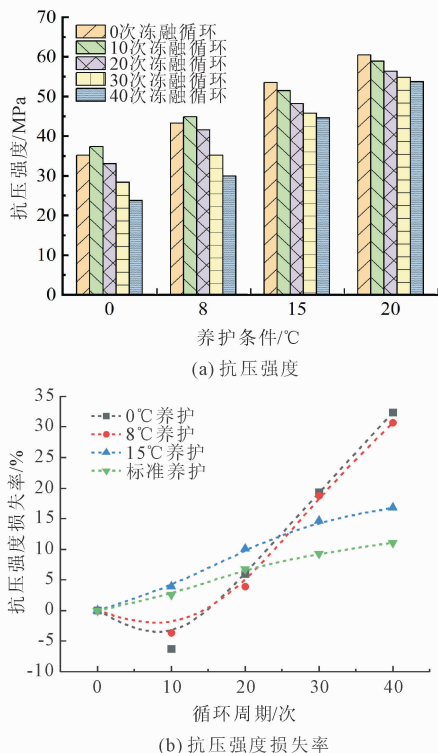


图3 不同养护条件下粉煤灰-矿渣复合胶凝材料砂浆抗压强度变化和强度损失率

值得注意的是,随着循环次数的增加,低温组试件表面出现明显的颗粒松散与边缘剥落现象,这些宏观劣化形态与其抗压强度下降趋势一致,进一步验证了冻融破坏机制由“残余水化+压实”向“裂缝扩展+结构削弱”的转变过程。低温低压环境显著延缓了复合胶凝材料砂浆的早期水化,造成其结构初期疏松,进而使材料在冻融循环中更易发生强度劣化。抗压强度试验结果进一步印证了前两节质量损失与弹性模量变化的规律性趋势,三者“初期短暂提升-后期快速衰退”的演化机制上表现出高度一致性。

## 2.4 抗折强度

图4为不同低温低压养护条件下,粉煤灰-矿渣复合胶凝材料砂浆在冻融循环中的抗折强度变化规律。从图4可以看出,复合胶凝材料砂浆在冻融循环中的演化趋势与抗压强度基本一致,均呈现“初期提升-后期下降”的双阶段特征,但其劣化速率更为剧烈。

在冻融前10次循环中,0℃和8℃养护组的试件抗折强度分别从6.8 MPa和7.9 MPa小幅提升至7.1 MPa和8.0 MPa,表现出轻微增强。相比之下,15℃养护组表现出较为缓慢的强度衰退,进一步验

证了高原环境下温度对材料力学性能的影响具有明显的温度依赖性。

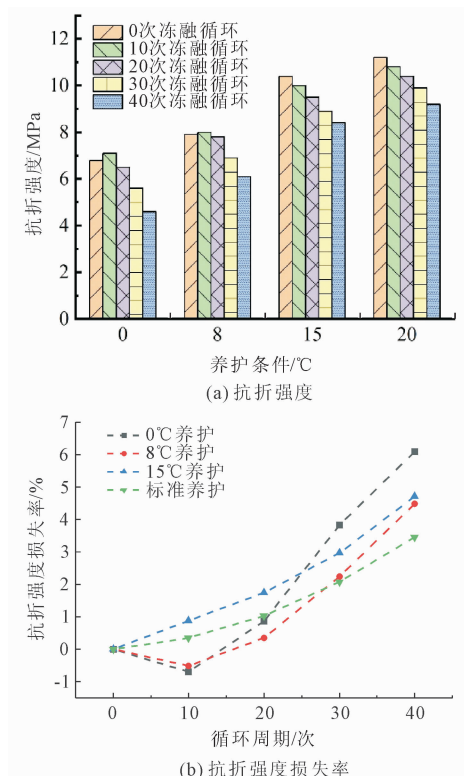


图 4 不同养护条件下粉煤灰-矿渣粉复合胶凝材料砂浆抗折强度变化和强度损失率

横向对比发现,养护温度越低,材料的抗折强度初始值越低,后期劣化速率也越快,表现出强烈的温度依赖性与脆弱性特征。特别是 0°C 养护组,在冻融 20 次后即出现显著裂纹贯通和表面剥蚀,表明其微观结构稳定性不足,界面黏结性能退化严重,进而导致整体抗弯性能迅速衰减。此外,相较于抗压性能,抗折强度在反映结构整体连续性和界面破坏方面更为敏感,能更早揭示冻融微裂纹发展的临界点。因此,抗折强度作为衡量寒冷服役条件下复合胶凝材料砂浆力学退化程度的重要指标,其演化趋势在本研究中与质量损失率、RDME 变化及抗压强度结果相互印证。

### 2.5 微观形貌分析

图 5 展示了复合胶凝材料砂浆在冻融循环前后的微观形貌演变。通过对比不同养护条件下的试样,可以清晰地观察到冻融损伤的微观特征。

图 5(a)和图 5(c)分别为 0°C 养护组和标准养护组在冻融前的微观结构。从图中可以看出,0°C 条件下养护的试件,其微观结构疏松,可观察到明显的板状  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体及微裂纹,这反映了低温低压养护对水化反应的抑制,导致水化产物数量不足、结构完整性差。相比之下,标准养护试件(图 5(c))结构则致密得多,水化产物充分交织,形成了连续的整体,未见明显缺陷。

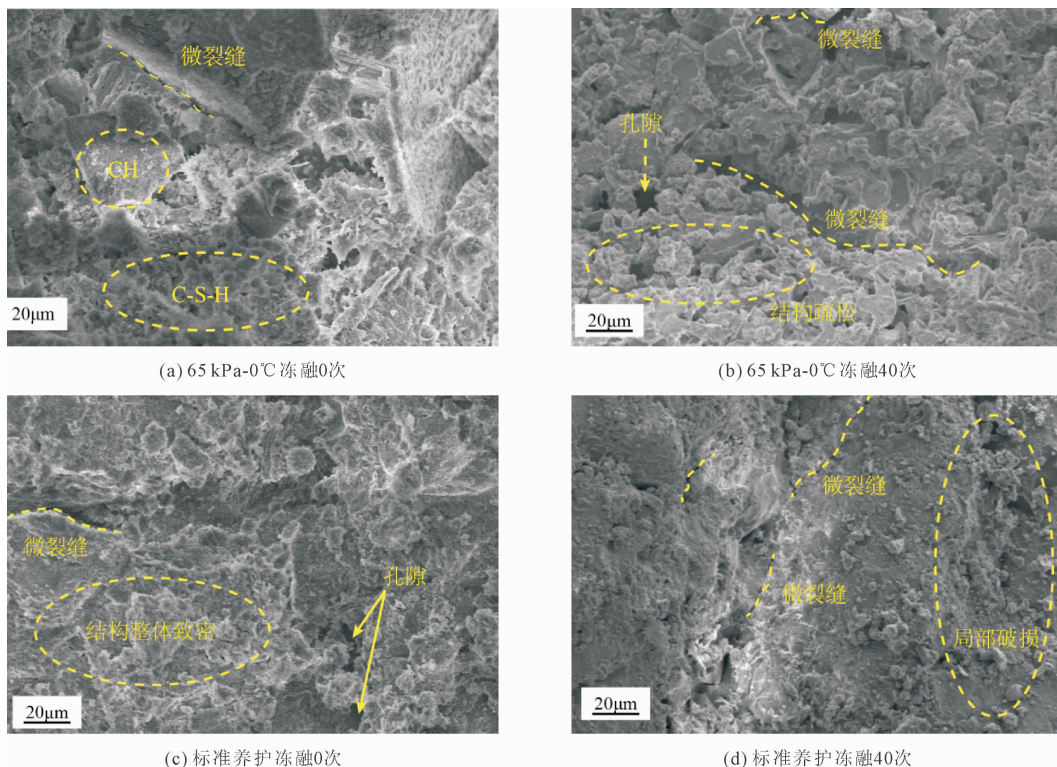


图 5 不同养护条件下粉煤灰/矿渣粉(1:5)复合胶凝材料砂浆冻融循环微观形貌

复合胶凝材料砂浆在不同养护条件下历经 40 次冻融循环后的微观形貌如图 5(b) 与图 5(d) 所示, 经过 40 次冻融循环, 两种试件的差异急剧放大。低温低压养护的试件(图 5(b)) 发生了严重的结构劣化: 原有的微裂纹扩展为宽大的贯通裂缝, 整体结构变得酥松、多孔。值得注意的是, 早期观察到的板状 CH 晶体数量显著减少或消失, 这可能是因为冻融循环产生的物理应力破坏了 CH 晶体的结构, 同时持续的微弱水化可能消耗了部分 CH。而在标准养护组(图 5(d)) 中, 虽也因冻融产生了一些细微裂纹, 但整体结构仍保持相对完整, 未出现大面积的崩塌和脱粘。

## 2.6 孔结构演变规律

图 6 为低温低压养护条件下, 复合胶凝材料砂浆在冻融循环前后的  $T_2$  谱曲线。图 6(a) 为各养护条件下复合胶凝材料砂浆试件在冻融循环前的  $T_2$  谱分布。结果显示, 材料内部主要存在三类孔隙结构, 即微孔、中孔和毛细管孔。其中, 0℃ 与 8℃ 养护组在毛细管孔区域的谱峰强度明显高于 15℃ 养护和标准养护组, 表明在低温养护条件下, 水化反应受抑, 孔隙细化作用不足, 材料中大孔比例较高, 结构致密性较差。

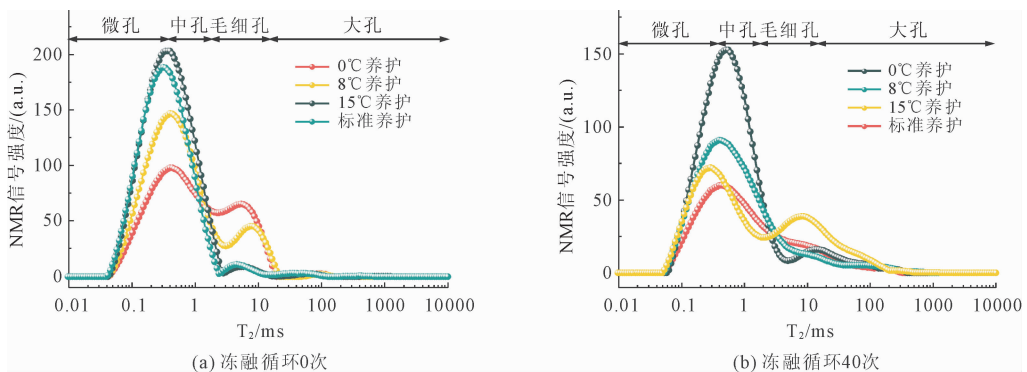


图 6 不同养护条件下粉煤灰/矿渣粉(1:5) 固废胶砂  $T_2$  谱分布规律

为进一步研究复合胶凝材料冻融前后内部  $T_2$  谱峰面积的变化规律, 图 7 展示了不同养护条件下冻融循环前后对孔结构的影响。从图 7 可以看出, 冻融循环前后孔隙面积占比的变化规律保持一致。结果表明, 养护温度的升高和养护环境的优化有助于促进水化反应, 提高复合胶凝材料的孔隙致密度, 从而增强其耐久性。

## 3 结论

本研究聚焦于高原环境对复合胶凝材料砂浆在养护阶段及冻融循环过程中的影响, 针对高原地区

图 6(b) 显示了经过 40 次冻融循环后的  $T_2$  谱演化趋势。各组谱峰整体呈现“右移 + 增强”特征, 表明冻融作用导致孔隙尺寸扩大、孔隙率增加。其中, 0℃ 和 8℃ 养护组的大孔谱峰强度显著增强, 小孔区域峰面积明显减少, 反映出冻胀压力作用下微孔结构遭受破坏, 部分微孔转化为毛细管孔和大孔, 孔隙结构发生严重劣化。这一现象与前述 SEM 观察中的“凝胶破坏-界面剥离-孔隙贯通”机制高度一致。

进一步分析不同温度下的谱峰演化可见, 低温养护组的谱线右移幅度较小, 但大孔段峰值上升最为显著, 说明孔径在分布范围上扩展有限, 但单位体积中大孔比例急剧增加。相比之下, 15℃ 养护与标准养护组的谱线变化较为平缓, 小孔峰仍占主导, 说明其结构抗劣化能力较强, 孔隙演化趋于稳定。

此外, 冻融循环前后谱峰变化趋势表明: 低温低压环境在早期造成孔隙分布粗大化, 冻融过程中微裂纹优先扩展于界面与大孔区域, 进而诱发孔径进一步扩大与连通性提升。这种微观结构演化趋势直接削弱了材料的密实性与抗冻稳定性, 是导致宏观力学性能衰退与 RDME 快速下降的关键机制。

典型的低温低压服役环境, 系统开展了矿渣-粉煤灰复合胶凝材料在不同养护温度(0℃、8℃、15℃) 与恒定低气压(65 kPa) 下的冻融循环试验, 结合质量损失、力学性能、动弹性模量以及微观结构演化, 深入分析了其抗冻性能及损伤机制。主要结论如下:

(1) 低温低压养护显著抑制早期水化反应, 养护温度越低, 水化程度越低, 初始结构越疏松。0℃ 与 8℃ 养护组试件在冻融过程中发生显著质量损失、弹性模量衰退及强度劣化, 表现出明显的温度脆弱性。相较之下, 15℃ 养护组结构致密性更高, 冻融过程中的性能衰减更为缓和。

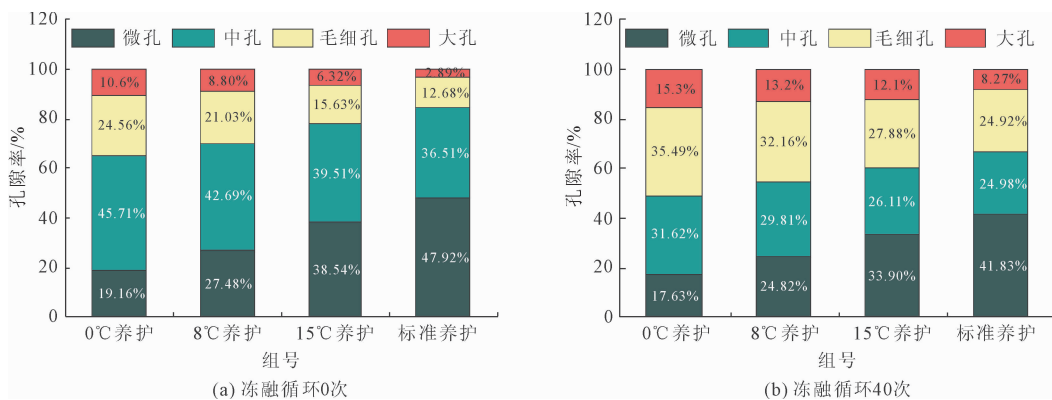


图7 冻融循环对粉煤灰/矿渣粉(1:5)复合胶凝材料孔体积占比影响

(2)冻融循环对材料性能的影响具有阶段性特征。在低温养护条件下,前10次循环内由于残余水化与孔隙压实作用,材料抗压与抗折性能略有提升;但随着循环进行,微裂纹扩展与界面破坏加剧,性能迅速下降,表现出“初期增强-后期退化”的双阶段演化趋势。

(3)低温低压条件显著抑制水化反应,导致复合胶凝材料砂浆形成孔径大、结构疏松的微观体系,冻融过程中C-S-H凝胶断裂、孔隙连通性增强、裂缝扩展,微观结构稳定性降低,抗冻性能明显劣化。

(4)NMR测试结果表明,冻融循环导致材料孔径从以微孔主导逐渐向毛细管孔和大孔迁移,孔隙率增加、孔径分布右移明显,且养护温度越低,该趋势越突出,反映出冻融劣化对孔隙结构稳定性的持续削弱。

(5)复合胶凝材料的总孔隙率随养护温度升高而降低,且冻融循环促使孔隙普遍粗化。其中,0℃养护条件下的复合胶凝材料表现出与其他条件不同的孔隙分布特征,其微中孔占比低于毛细孔和大孔。

#### 参考文献:

[1] Schneider M. The cement industry on the way to a low-carbon future [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124:105792.

[2] 魏浩杰,于皓,彭犇,等.我国大宗工业固废综合利用发展状况分析[J].*中国资源综合利用*,2019,37(11):56-58.

[3] 李林坤,刘琦,黄天勇,等.基于水泥基材料的CO<sub>2</sub>矿化封存利用技术综述[J].*材料导报*,2022,36(19):82-90.

[4] Yuan Kangze, Li Qingxiang, Ni Wankui, et al. Graphene stabilized loess: Mechanical properties, microstructural evolution and life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 389:136081.

[5] 刘建军,姜芳禄,张海辉.矿渣微粉高性能混凝土及其工程应用[J].*中国港湾建设*,2006,34(6):33-36.

[6] 石明霞,谢友均,刘宝举.粉煤灰-水泥复合胶凝材料的水化性能研究[J].*建筑材料学报*,2002,5(2):114-119.

[7] Liliya F Kazanskaya, Olga M Smirnova, Ángel Palomo, et al. Supersulfated Cement Applied to Produce Lightweight Concrete[J]. *Materials*, 2021, 14(2):403.

[8] Bastidas D M, Fernández-Jiménez A, Palomo A, et al. A study on the passive state stability of steel embedded in activated fly ash mortars [J]. *Corrosion science*. 2008, 50(4):1058-1065.

[9] 潘钢华,秦鸿根,孙伟,等.粉煤灰混凝土冻融破坏机理研究[J].*建筑材料学报*,2002(1):37-41.

[10] Fagerlund G. Critical moisture contents at freezing of porous materials [C]//*Proceedings of 2nd International CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings*, Rotterdam, 1975.

[11] Liu Zhuangzhuang, Lou Baowen, Sha Aimin, et al. Microstructure characterization of Portland cement pastes influenced by lower curing pressures [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227:135-142.

[12] 徐长伟,杨梦卉,秦任远.掺合料对引气混凝土抗冻性的影响研究[J].*混凝土*,2013(12):97-99.

[13] 王培铭,徐玲琳,张国防.0℃~20℃硅酸盐水泥的水化性能[J].*材料导报*,2012,26(4):114-117.

[14] 刘贤萍,王培铭.硅酸盐熟料-煤矸石混合水泥界面结构研究[J].*硅酸盐学报*,2008,36(1):104-111.

[15] 王培铭,刘贤萍,胡曙光,等.硅酸盐熟料-煤矸石/粉煤灰混合水泥水化模型研究[J].*硅酸盐学报*,2007, 35(S1):180-186.

[16] Liu Jun, Li Yao, Ouyang Peng, et al. Hydration of the silica fume-Portland cement binary system at lower temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93:919-925.

[17] 李林,叶铜,刘状壮.低气压养护对水泥砂浆微

- 观孔隙及抗渗性能影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(8):823-830.
- [18] 刘旭. 低气压环境对混凝土引气效果及孔结构影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [19] Chen Xin, Liu Xu, Tian Bo, et al. Effect of low atmospheric pressure on air entrainment in cement. Based materials: An on-site experimental study at different elevations[J]. Materials, 2020, 13(18):3975.
- [20] Zuo Shenghao, Yuan Qiang, Huang Tingjie, et al. Rheology and air entrainment of fresh Portland cement mortars in simulated low air pressure environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 135:104848.
- [21] Gao Wenzhong, Qi Jiaye, Yang Xuan, et al. Experimental investigation on bubble departure diameter in pool boiling under sub-atmospheric pressure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134:933-947.
- [22] Yagov V V, Gorodov A K, Labuntsov D A. Experimental study of heat transfer in the boiling of liquid sat low pressures under conditions of free motion. Pdf[J]. Plenum Publishing Corporation, 1970, 18(4):624630.
- [23] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [24] 李祝文, 桂霖彬, 张飞, 等. 粉煤灰及矿粉对 C40 高性能混凝土性能影响的研究[J]. 建材世界, 2025, 46(2):24-28.
- [25] 陈平, 夏海洋, 胡成, 等. 多元固废基复合胶凝材料的硬化特征与抗蚀性能研究[J]. 混凝土, 2025(3):24-28.
- [26] 屠艳平, 白登显, 程书凯, 等. 矿粉和生石灰高温改性对磷石膏水泥基材料性能影响[J]. 无机盐工业, 2024, 56(6):94-101.
- [27] 赵杰. 掺矿粉与粉煤灰高强度水工混凝土性能研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(2):36-39.
- [28] 田威, 万嘉豪, 程续, 等. 钢渣矿渣基胶凝材料协同固碳性能与微观结构[J/OL]. 建筑材料学报, 1-9 [2025-04-21]. <https://link.cn.net/urlid/31.1764.tu.20241129.1344.006>.
- [29] Cheng Xu, Tian Wei, Yuan Qiang, et al. Effect of carbon dioxide mineralization curing on mechanical properties and microstructure of Portland cement-steel slag-granulated blast furnace slag ternary paste[J]. Construction and Building Materials, 2024, 431:136553.
- [30] 吴泽媚, 毛浩宇, 郑新颜, 等. 高原复杂环境下水泥基材料微结构及性能研究进展[J/OL]. 湖南大学学报(自然科学版), 1-19 [2025-04-21]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1061.n.20250417.175.002>.
- [31] 符睿, 段旭, 刘建宇, 等. 大理、理塘和林芝气象要素的日变化特征对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(3):12-17.
- [32] 水泥胶砂抗冻性试验方法:GB/T 41060—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

(上接第 7 页)

- [6] 夏映映, 姜李潮. 海相盐渍土电阻率预测模型研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(9):12-16, 84.
- [7] 张秉来, 刘宇平, 周林虎, 等. 盐渍土地区某输电线路地质灾害分布特征及危险性现状评估[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(5):37-38, 43.
- [8] Cheng Shukai, Wang Qing, Wang Jiaqi, et al. Effects of freeze-thaw cycle on mechanical properties of saline soil and Duncan-Chang model[J]. Geomechanics and Engineering, 2024, 38(3):249-260.
- [9] 赵辉伟, 邴慧. 基于超声波速的冻融盐渍土强度预测模型构建[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2):612-624.
- [10] 邓彩虹, 郝广延, 吴勇刚, 等. 粗颗粒盐渍土工程特性与路基改良方法研究进展[J]. 公路, 2025, 70(6):25-31.
- [11] 张莎莎, 叶素纤, 张林, 等. 粗粒盐渍土路基水热盐力耦合方程修正及试验验证[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3):31-40.
- [12] 王景辉, 张卫兵, 唐莲, 等. 水盐运移对硫酸盐渍土盐-冻胀规律的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6):108-115.
- [13] 周凤玺, 周志雄, 赵文沧, 等. 寒旱区硫酸盐渍土特征温度及盐冻胀特性[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4):58-67.
- [14] 周志雄, 周凤玺, 张明礼, 等. 降雨作用下硫酸盐渍土水-热-盐迁移及变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(8):2056-2068.
- [15] 张少英, 邵帅, 邵生俊, 等. 冻融循环下盐渍水泥改良风积沙三维力学特性[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(6):1648-1663.
- [16] 唐先习, 吕闻起, 李明泽, 等. 温度对含硫酸钠盐黄土土水特性影响规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(1):131-139.
- [17] 栾恩铭, 唐先习, 吕闻起. 冻融环境下石灰对盐渍土强度与稳定性影响机理[J]. 公路, 2025, 70(9):236-247.
- [18] 张莎莎, 钱宇, 王利鑫, 等. 砾质硫酸盐渍土道基水盐迁移及变形特征[J]. 湖南大学学报, 2025, 52(9):48-58.
- [19] 张喆, 李盛, 李宏波, 等. 盐渍土盐冻胀机理及多场耦合模型研究进展[J]. 西北工程技术学报(中英文), 2025, 24(3):262-273.