

复杂侵蚀环境下粉煤灰煤矸石混凝土抗盐冻性能研究

舒 亮^{1,2}, 王晓磊^{1,2}, 刘历波^{1,2}, 李彦苍¹, 周宏峰³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 邯郸市城市地下空间工程技术创新中心, 邯郸 056038;
3. 承德中天建设工程检测试验有限公司, 承德 067000)

摘 要: 针对我国北方盐渍地区建筑结构常年遭受盐类侵蚀和冻融循环多重作用而劣化等问题, 利用粉煤灰和煤矸石替代部分普通混凝土中的水泥和粗骨料, 制备粉煤灰煤矸石混凝土。从混凝土冻融外貌形态、质量损失、动弹性模量变化三方面探究其损伤规律, 在清水、硫酸盐、复合盐三种介质环境中建立了以动弹性模量为损伤变量的煤矸石混凝土冻融损伤模型, 并对其抗盐冻耐久性进行评价。结果表明: 在三种不同介质环境中, 复合盐对混凝土的冻融损伤最大, 其中粉煤灰煤矸石混凝土抗盐冻表现最佳, 250 次盐冻循环后才到达破坏临界值, 质量损失率大于 5%, 相对动弹性模量下降了 48.5%; 粉煤灰煤矸石混凝土具有良好的抗盐冻性能, 粉煤灰的掺入对其抗冻性能的提升效果显著, 在单一盐类冻融侵蚀环境下, 抗冻等级能达到 F250, 在复合盐溶液盐冻情况下为 F200; 拟合的方程和建立的冻融损伤模型能较好反映其真实冻融损伤情况。研究成果为探究粉煤灰煤矸石混凝土在盐侵蚀与冻融双重作用下的性能退化提供了理论依据和试验参考。

关键词: 煤矸石; 冻融循环; 盐冻耦合; 质量损失; 相对动弹性模量; 冻融损伤模型

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0001-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.001

Study on the Salt-Frost Resistance of Fly Ash-Coal Gangue Concrete under Complex Erosive Environments

SHU Liang^{1,2}, WANG Xiaolei^{1,2}, LIU Libo^{1,2}, LI Yancang¹, ZHOU Hongfeng³

(1. College of Civil Engineering Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Urban Underground Space Engineering Technology Innovation Center in Handan City, Handan 056038, China;
3. Chengde Zhongtian Construction Engineering Testing and Experimentation Co., Ltd., Chengde 067000, China)

Abstract: In response to the problem of deterioration of building structures in saline alkali areas in northern China due to salt erosion and multiple freeze-thaw cycles, fly ash and coal gangue were used to replace some of the cement and coarse aggregates in ordinary concrete to prepare fly ash coal gangue concrete. The damage law of the concrete was explored from three aspects: freeze-thaw appearance, quality loss, and dynamic elastic modulus changes. A freeze-thaw damage model of coal gangue concrete with dynamic elastic modulus as the damage variable was established in three media environments: clean water, sulfate, and composite salt. A quadratic equation was used to fit the experimental data, and the fitting results were good. The salt frost

项目来源: 国家自然科学基金资助项目 (U21A20164)。

作者简介: 舒 亮 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 混凝土材料。

通信作者: 周宏峰 (1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程。

收稿日期: 2025-01-14

材料科学

durability of the concrete was evaluated. The results indicate that in three different medium environments, composite salt has the greatest impact on the freeze-thaw damage of concrete. Among them, fly ash-gangue concrete exhibits the best performance in resisting salt and frost. It only reaches the damage threshold after 250 cycles of salt and frost, with a mass loss rate of more than 5% and a relative dynamic elastic modulus decrease of 48.5%; Fly ash and coal gangue concrete have good salt and frost resistance, and the addition of fly ash can improve its frost resistance. In clear water and sulfate freeze-thaw environments, the frost resistance level can reach F250, and in composite salt solution salt and frost conditions, it is F200; The fitted equation and the established freeze-thaw damage model can better reflect its true freeze-thaw damage situation, and the research results can provide reference for its durability design in complex environments.

Key words: coal gangue; freeze-thaw cycle; salt freeze coupling; mass loss; relative dynamic elastic modulus; freeze-thaw damage model

0 引言

近年来,我国工程建设飞速发展,作为占用混凝土大部分体积的天然骨料经过多年开采,资源急剧减少^[1]。而煤矸石由于其骨料物化特性,可以用来代替部分天然混凝土骨料,不仅实现其合理利用,同时缓解了天然骨料过量开采的问题。此外,我国北方寒冷地区昼夜温差较大,且道路盐渍土中含有大量盐分。冬季降水和积雪容易结冰,最常见的除冰方式就是在道路表面撒盐,而长达4个月的冬季长期反复的盐冻耦合作用会显著降低混凝土的安全性和耐久性。因此,盐冻环境下的混凝土冻融损伤问题始终是国内外土木工程领域专家和学者关注的重点。

Amir等^[2]用煤矸石替代沥青制备混凝土,发现其各项基本力学性能良好;高健等^[3]探究加气煤矸石混凝土在干湿冻融循环下其耐腐蚀性能,结果表明:干湿循环次数超过15次时抗压强度逐渐减小;李少伟等^[4]利用界面过渡区表征不同掺量煤矸石混凝土的破坏特征,结果表明:当煤矸石掺量低于50%时,界面过渡区致密紧实,超过这一界限力学性能快速下降;杨尚谕等^[5]通过分形维数及三维重构技术,探究自燃煤矸石混凝土不同取代率下的断裂性能,结果表明其破坏特征和普通混凝土并无差别,取代率越大,分形维数越低;刘德慧等^[6]探究煅烧温度对煤矸石混凝土徐变性能的影响时发现,煅烧对徐变影响较大,徐变随时间呈正相关变化;皇民等^[7]对不同取代率下煤矸石混凝土进行了导热试验发现,其导热系数与取代率呈负相关,且全级配的导热性能最差,低于普通混凝土;乔立冬等^[8]通过核磁共振技术测试微观孔隙,并运用灰熵法探究微

观结构之间的关联。结果发现,随着煤矸石取代率增加,其微小孔隙随之增多,图谱面积减少,孔隙率与孔隙占比高度关联;陈琦琦等^[9]采用碱性干粉激发制备煤矸石地聚物混凝土,并运用混沌映射对混凝土最优配比进行了研究。结果表明,通过这一方式计算的经济成本平均节约了11%,在一定范围内,成本随强度等级增加反而降低;姚志鑫等^[10]采用掺合料对煤矸石骨料进行包裹预处理,结果发现骨料裹浆后各方面性能显著提升,微观界面过渡区得到了强化,在干湿循环下仍能保持着良好的耐久性;张亚鹏等^[11]将洗选煤矸石加工处理后制备了透水混凝土,并分析各因素对其抗压强度的影响。结果表明,制备的透水混凝土性能满足相关标准,透水性与力学强度成反比,且孔隙率与冻融损伤呈正相关;关斌等^[12]对煤矸石粉不同掺量时混凝土的冻融损伤规律进行了探究,通过波速损失修正损伤层的厚度,并建立起相应的损伤模型;刘超等^[13]制备了不同煤矸石取代率的喷射混凝土(CGS),而后探究该混凝土抗硫酸盐侵蚀及冻融循环后的劣化规律;钱泽坤^[14]通过对陕北矿区煤矸石混凝土进行冻融试验发现,冻融后煤矸石混凝土的基本力学性能满足使用要求,并将其冻融破坏过程分为四个阶段,得出了较为准确的冻融损伤模型;邱继生等^[15]探究了掺合料对煤矸石混凝土界面过渡区的影响,结果表明掺入粉煤灰不仅能从宏观上增强其抗劈裂强度、减小界面过渡区厚度,还能增加薄弱区的硬度值,使其硬度更加均匀;袁猛^[16]研究了盐蚀与冻融耦合作用下煤矸石混凝土的抗冻性能,研究表明相比于单一冻融作用,盐蚀与冻融耦合作用对混凝土的损伤具有更大的破坏效应。

目前多数试验仅对煤矸石混凝土的力学性能及单一盐冻环境开展研究，在复合盐分侵蚀与冻融循环叠加的复杂环境，其抗盐冻耐久性的研究较少，仍需深入探讨。为此，研究运用室内快速冻融试验装置，系统考察其在清水、硫酸钠溶液及混合氯化钠-硫酸钠溶液三种典型侵蚀介质作用下的抗冻耐久性特征，并以相对动弹性模量表征损伤程度，划分其抗冻等级，进而构建适用于不同冻融条件的损伤预测模型。研究成果可为相关工程实践提供理论依据和技术支持。

1 试验

1.1 试验材料

采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥，掺合料为粉煤灰，等级为 I 级；细骨料细度模数为 2.72；减水剂为 HLX 聚羧酸高效减水剂；清水为邯郸市自来水；碎石为天然碎石，煤矸石取自邯郸市峰峰矿区某矸石厂，其物理指标及化学成分见表 1、2，经破碎后选用 5~20 mm 粒径，连续级配。粉煤灰化学成分见表 3。

表 1 煤矸石粗骨料的物理性能指标
Table 1 Physical performance indicators of coal gangue coarse aggregate

骨料类型	堆积密度 / (kg/m ³)	表观密度 / (kg/m ³)	压碎值 /%	1 h 吸水率 /%
非自燃煤矸石粗骨料	1 150	2 370	11.7	3.22

表 2 煤矸石的化学成分
Table 2 Chemical composition of coal gangue /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	C _n O _m	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	其它
52.34	20.98	13.60	4.47	2.54	1.58	0.93	3.56

表 3 粉煤灰的化学成分
Table 3 Chemical composition of flying ash /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	C _n O _m	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	其它
46.84	32.11	5.20	3.43	3.38	2.75	1.28	5.01

1.2 试验设计

煤矸石原始孔隙较多，掺入粉煤灰能填充内部孔隙，增加混凝土的致密性，从而提高结构的抗冻性能。前期试验结果表明，煤矸石掺量为 40%、粉煤灰掺量 30% 的煤矸石混凝土综合性能最佳。因此，以此配合比为基准组，C30 普通混凝土及单掺煤矸石混凝土为对照组，分别探究其在清水、硫酸钠溶液、硫酸钠-氯化钠复合盐溶液中混凝土抗盐冻性能，配

合比见表 4。

表 4 混凝土配合比
Table 4 Concrete mix ratio / (kg/m³)

组别	水胶比	粉煤灰	水泥量	砂子	煤矸石	石子	用水量	减水剂
C30	0.4		450	796.5		973.5	180	2.25
F0G4	0.4		450	796.5	389.5	584.0	180	2.25
F3G4	0.4	135	315	796.5	389.5	584.0	180	2.25

1.3 试验方法及仪器

试验参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能与耐久性试验方法标准》的要求，采用快速冻融试验法进行。将规格为 100 mm×100 mm×400 mm 的试件置于标准养护条件下养护 24 d 后，再将其浸入 20±2 ℃ 的溶液中浸泡 4 d 以达到充分吸水饱和状态。随后分别在三种不同介质溶液中进行冻融循环试验，每 25 次循环为一周期，在每个周期结束后测量其动弹性模量，并记录质量变化。当任一组试件的质量损失率超过 5%，或相对动弹性模量低于 60%，或冻融循环次数达 300 次时，则停止试验。

冻融试验装置采用 TDR-1 型混凝土快速冻融机，使用 DT-20 型混凝土动弹性模量仪测定混凝土的动弹性模量，电子秤用于测量混凝土试件冻融前后的质量变化。

1.4 试验测试指标

质量损失率计算公式如下：

$$\Delta W_n = \frac{W_0 - W_n}{W_n} \times 100\%$$
 (1)

式中：ΔW_n 为经过 n 次循环后的质量损失率，%；W₀ 为初始质量，g；W_n 为经过 n 次冻融循环后的质量，g。

相对动弹性模量 P_n 计算如下：

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\%$$
 (2)

式中：P_n 为经过 n 次冻融循环后的相对动弹性模量，%；f_n 为经过 n 次冻融循环后的横向基频，Hz；f₀ 为初始横向基频，Hz。

2 结果与讨论

2.1 质量损失率

由图 1 可知，达到冻融破坏标准后，三种混凝土材料的表观都出现了不同程度的剥落情况。其中，煤矸石混凝土剥落最为严重，其次是 C30 混凝土，粉煤灰煤矸石混凝土的表观最完整。

材料科学

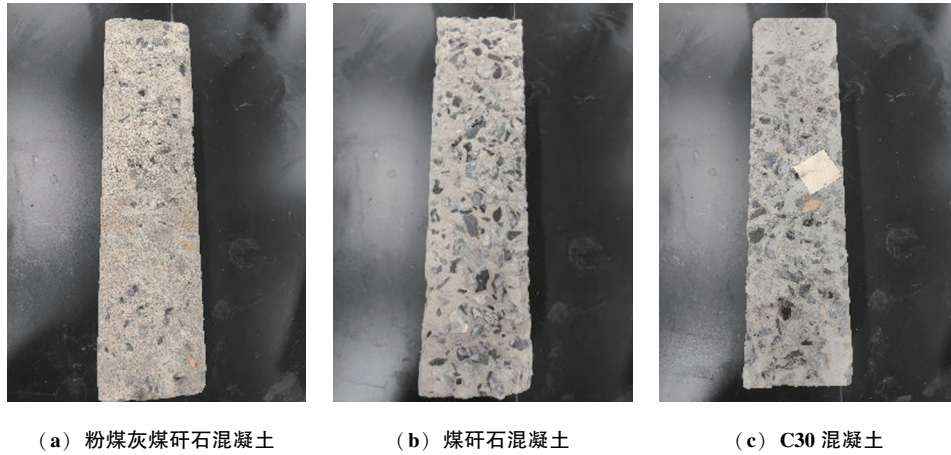


图 1 冻融破坏时三种材料外貌图

Fig. 1 Appearance of three materials during freeze-thaw failure

由图 2 可知,在冻融循环初期前 100 次,三种混凝土质量损失率均存在不同程度的下降。其中,煤矸石混凝土的下降幅度最为明显,随着冻融循环的持续进行,质量损失率由降转升,且上升趋势明显加快。在三种冻融介质中,复合盐对质量损失率的影响最大,各混凝土试件在其中均最先达到冻融破坏标准。C30 普通混凝土在经过 200 次冻融循环后,在三种不同介质溶液中,质量损失率均超过 5%;煤矸石混凝土在复合盐中冻融循环的质量损失率最大,

经过 175 次冻融循环后,质量损失率为 5.43%;在硫酸盐、清水介质下质量损失率分别在冻融循环 200 次和 225 次后超过了 5%,分别为 5.03%、5.1%;粉煤灰煤矸石混凝土具有更好的抗盐冻性能。在经过 250 次冻融循环后,在复合盐介质中的质量损失率为 5.3%,远大于同时期另外两种介质的质量损失率。这表明,随着冻融循环的持续进行,复合盐侵蚀对混凝土具有更大的协同破坏效应。

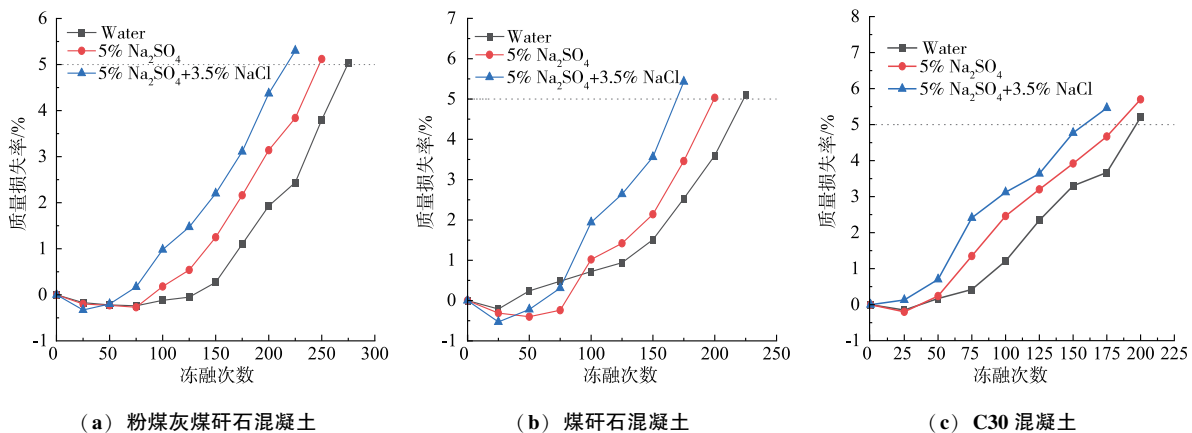


图 2 三种介质环境下混凝土的质量损失率

Fig. 2 Mass loss rate of concrete under three different medium environments

冻融初期质量损失率下降,这主要是由于试件内部孔隙吸水饱和,且试件表面没有出现剥落现象,质量略微增加。与 C30 普通混凝土相比,煤矸石混凝土的质量在早期增加幅度较大,这是因为煤矸石本身原始孔隙较多,相比于天然碎石吸水性更强,

能够吸收更多的可冻水。随着试验的不断进行,试件剥落程度加剧,但此时由于盐冻侵蚀损伤而剥落的质量仍低于新生孔隙吸水的质量,因此试件的质量损失率缓慢上升。进入冻融后期,试件表面出现大量剥落,其本身剥落的质量远大于新生裂缝吸水

的质量,试件的质量损失率急剧上升。相较于清水,盐溶液对试件的冻融影响分为两个阶段:在冻融前期,由于硫酸盐的存在导致混凝土试件中孔隙冰点的降低,使得混凝土内部在更低的温度下才会结冰,延缓了冻结的发生;而在冻结后 Na_2SO_4 溶液抗压塑性很大,有效吸收冻胀产生应力的同时也减少微裂纹的扩展;随着试验进入中后期阶段,盐类侵蚀作用随龄期延长而持续发展。在此过程中,混凝土内部不断生成钙矾石和石膏等膨胀性产物,一方面增加了试件内部膨胀应力,另一方面导致体积膨胀,进一步加剧混凝土开裂和剥落。因此,在冻融后期,试件的质量损失率上升显著加快。粉煤灰的掺入对煤矸石混凝土试件的抗盐冻性能提升明显。这主要归因于粉煤灰持续水化反应,随着反应的不断进行,混凝土内部孔隙逐渐被生成的细小颗粒所填充,混凝土内部微观结构被显著改善,具体表现为孔隙率的减少和孔径分布的细化,从而提升了混凝土的抗冻能力^[17]。相比于单一盐冻,复合盐侵蚀对混凝土试件具有显著的协同破坏效应在多种侵蚀介质的共

同作用下,材料呈现出加速劣化的盐冻破坏特征。

2.2 相对动弹性模量

由图3可知,在冻融初期相对动弹性模量存在小幅度上升和持平;在三种不同介质条件下,复合盐的冻融侵蚀对混凝土的破坏最大,其次是硫酸盐、清水;三种材料中,单掺煤矸石的混凝土冻融损伤最大,其次是C30普通混凝土,粉煤灰煤矸石混凝土损伤最小。经过200次冻融循环后,C30混凝土在清水、硫酸盐和复合盐介质中的相对动弹性模量分别降至58.7%、55.4%和51.6%;煤矸石混凝土在复合盐溶液中经过175次冻融后相对动弹性模量即降至57.7%;在清水和硫酸盐溶液中则经过200次冻融后才降至60%以下,此时相对动弹性模量损失率分别下降了42.2%、46.4%、50.8%。粉煤灰煤矸石混凝土表现出最优的抗盐冻性能,经历250次冻融后,在清水、硫酸盐、复合盐三种不同介质溶液中相对动弹性模量才都降至60%以下,分别为59.8%、54.6%、51.5%。

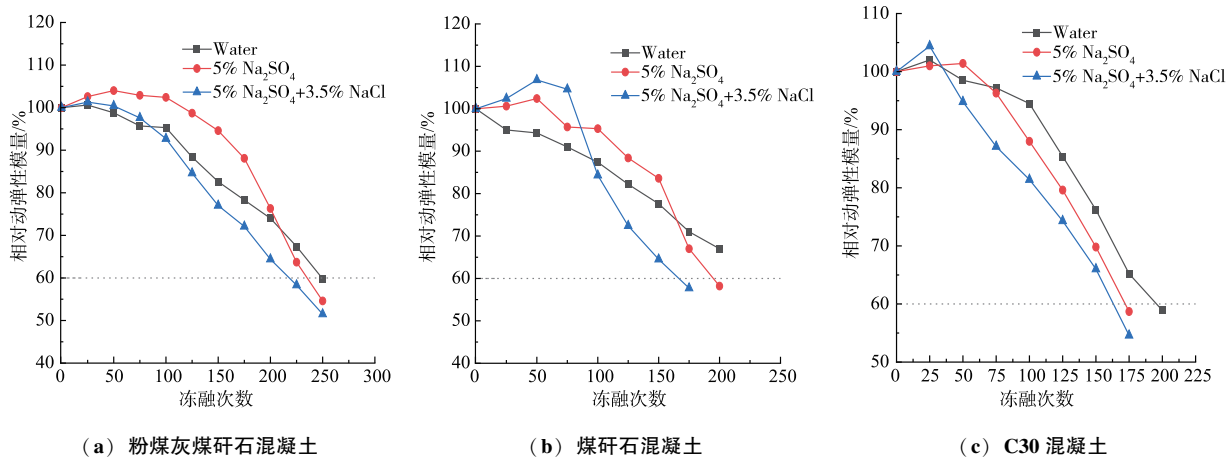


图3 三种介质环境下混凝土的相对动弹性模量

Fig. 3 Relative dynamic elastic modulus of concrete under three different medium environments

在冻融初期,试件的相对动弹性模量出现轻微上升或保持稳定,主要是因为混凝土内部孔隙被外部水分和盐溶液渗入。一方面水分随着冻融的持续进行从液态转化为固态,进而填充混凝土的孔隙;另外侵蚀介质硫酸盐、氯盐等不断和水泥水化产物发生化学反应生成结晶产物。这些新生相在混凝土孔隙中沉积并逐渐填充孔隙结构,从而改善了材料

的微观致密性,动弹性模量也随之增大,进而延缓了冻融损伤的发生。相比于普通混凝土和煤矸石混凝土,粉煤灰煤矸石混凝土动弹性模量变化幅度较小,这是由于煤矸石和普通混凝土自身的原始孔隙较多,外界介质填充其内部的量也越多,动弹性模量变化相对明显。随着冻融侵蚀的持续进行,三种材料的相对动弹性模量显著下降,主要是因为随着

材料科学

冻融的进行,硫酸盐生成的钙矾石等膨胀性物质造成试件内部损伤加重,混凝土内部的受冻膨胀越来越严重,当应力超过混凝土承受极限时裂缝扩展且界面强度降低,加速了混凝土内部结构破坏^[18];冻融后期,动弹性模量继续降低。盐冻循环条件下,盐溶液结晶产生的晶体应力、冻结过程引发的体积膨胀力以及胶凝材料水化反应导致的自生膨胀力相互叠加并持续累积,最终使试样达到破坏临界点。

2.3 抗冻耐久性评价

材料的抗冻性评价参考 GB/T50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》,用动弹性模量变化来表征抗冻耐久性,抗冻耐久性指数 DF 计算如下:

$$DF = \frac{0.6 \times N}{300} \times 100\% \quad (3)$$

式中: DF 为抗冻耐久性指数,%; N 为试件破坏时的冻融循环次数。

根据上述公式计算结果表明, C30 普通混凝土、煤矸石混凝土以及粉煤灰煤矸石混凝土,在不同介质环境中的抗冻耐久性指数有着较大差异,其对应的抗冻等级明显不同。具体数据详见表 5、6。

表 5 不同冻融环境下材料的抗冻耐久性指数
Table 5 Frost resistance durability index of materials under different freeze-thaw environments / %

材料	Water	5% Na ₂ SO ₄	5% Na ₂ SO ₄ + 3.5% NaCl
C30 混凝土	40	35	35
煤矸石混凝土	45	40	35
粉煤灰煤矸石混凝土	50	50	45

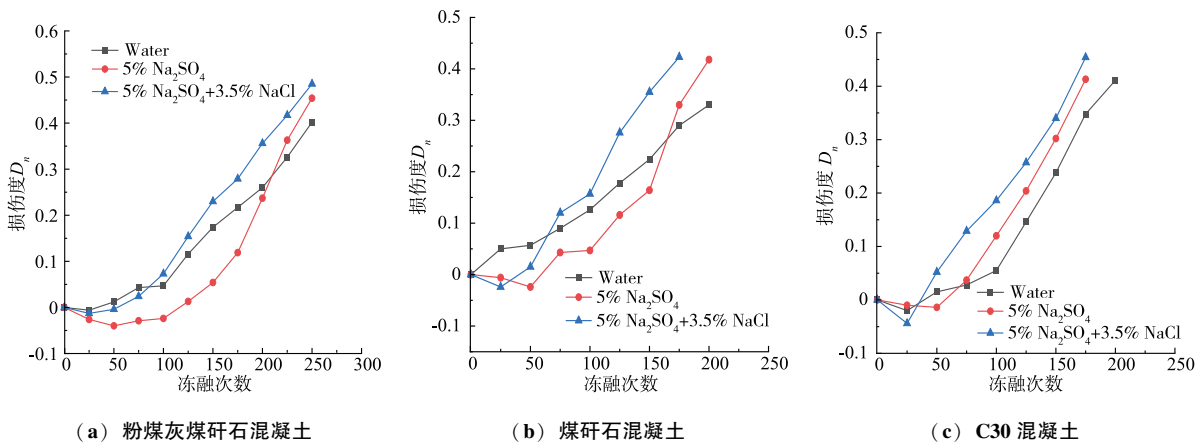


图 4 不同冻融介质下材料的损伤度 D_n

Fig. 4 Damage degree of materials under different freeze-thaw media D_n

表 6 不同冻融环境下材料的抗冻等级

Table 6 Frost resistance levels of materials under different freeze-thaw environments

材料	Water	5% Na ₂ SO ₄	5% Na ₂ SO ₄ + 3.5% NaCl
C30 混凝土	F200	F175	F175
煤矸石混凝土	F225	F200	F175
粉煤灰煤矸石混凝土	F250	F250	F200

3 冻融损伤模型的建立

3.1 不同侵蚀介质下的损伤度

由损伤力学的理论可知,应力 σ 和应变 ε 存在着以下关系,见式 (4)。经过推导可进一步简化为式 (5)。在冻融循环条件下,弹性模量通常可通过动弹性模量实现近似替代^[19],具体见式 (6):

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - D_n) \quad (4)$$

式中: D_n 为试件经 n 次冻融后损伤度; E_0 为初始弹性模量, MPa。

$$D_n = 1 - \frac{\sigma}{\varepsilon E_0} = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (5)$$

式中: E_n 为试件经 n 次冻融后弹性模量, MPa。

$$D_n = 1 - \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \quad (6)$$

式中: E_{d0} 为初始动弹性模量, MPa; E_{dn} 为经 n 次冻融循环后试件的动弹性模量, MPa。

由图 4 可知,三种材料损伤度 D_n 呈现较为相似的变化趋势。随着冻融循环的持续进行,三种材料的损伤度前期轻微减少或持平,100 次冻融循环后急剧上升。冻融损伤度的大小为:煤矸石混凝土 > C30 普通混凝土 > 粉煤灰煤矸石混凝土。

3.2 冻融损伤模型

利用一元二次函数拟合煤矸石混凝土在不同冻融介质中的损伤度^[20]，计算如下：

$$D_n = an^2 + bn + c \tag{7}$$

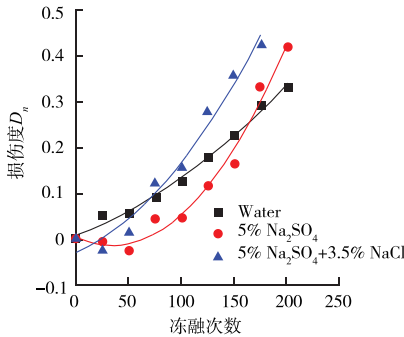
式中： a 、 b 、 c 都为待定系数。

基于拟合公式（7）和损伤度数据，利用 Origin 进行煤矸石混凝土在清水、硫酸钠溶液以及硫酸钠-氯化钠复合溶液三种冻融环境下回归分析，并获取了各混凝土试件损伤度 D_n 的一元二次函数模型参数。分析结果如图 5 所示，相应的模型参数详见表 7。

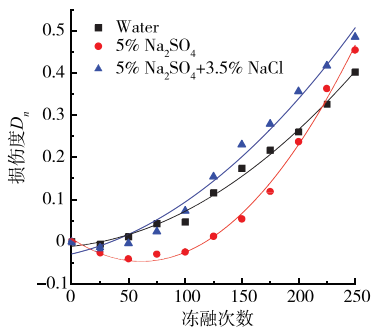
表 7 材料的一元二次模型参数

Table 7 Univariate quadratic model parameters of materials

混凝土类别	冻融介质	a	b	c	R^2
煤矸石混凝土	Water	3.976E-6	8.462E-4	0.009	0.991
	5%Na ₂ SO ₄	1.595E-5	-0.001	0.019	0.977
	5%Na ₂ SO ₄ +3.5%NaCl	9.848E-6	9.795E-4	-0.028	0.970
粉煤灰煤矸石混凝土	Water	5.537E-6	2.729E-4	-0.011	0.991
	5%Na ₂ SO ₄	1.435E-5	-0.002	0.008	0.993
	5%Na ₂ SO ₄ +3.5%NaCl	6.083E-6	6.218E-4	-0.029	0.983



(a) 煤矸石混凝土



(b) 粉煤灰煤矸石混凝土

图 5 三种冻融环境下材料的损伤度回归曲线

Fig. 5 Regression curve of material damage degree under three freeze-thaw environments

根据表 7 和图 5 的数据分析表明，煤矸石混凝土及粉煤灰煤矸石混凝土在不同冻融环境下的损伤度模型预测值与试验实测值具有良好的一致性，其变化规律呈显著相关性，相关系数 R^2 值介于 0.969~0.993 区间建立的损伤度模型，可准确表征材料在多组冻融介质作用下，随着循环次数增加其损伤程度的动态演变规律。

4 结论

以粉煤灰煤矸石混凝土为基准组，C30 混凝土及单掺煤矸石混凝土为对照组，分别在清水、硫酸钠溶液、硫酸钠+氯化钠复合盐溶液中进行盐侵蚀和冻融循环试验。得出以下结论：

(1) 在不同溶液中，粉煤灰煤矸石混凝土的抗盐冻性存在显著差异。在清水中冻融 275 次后，质量损失率为 5.03%；在硫酸盐溶液中冻融 250 次后质量损失率为 5.12%；在复合溶液中冻融 225 次后质量损失达到了 5.3%。250 次冻融循环后，粉煤灰煤矸石混凝土在清水、硫酸盐、复合盐溶液中的相对动弹性模量分别下降了 40.2%、45.4%、48.5%。

(2) 三种不同溶液中，复合盐冻融侵蚀对材料的破坏最大，其次是硫酸盐溶液、清水的影响最小。其中，粉煤灰煤矸石混凝土的抗盐冻性能最佳，在复合盐冻融侵蚀抗冻等级达到 F200，表明掺入粉煤灰能有效增加煤矸石混凝土的抗盐冻性能。

(3) 基于损伤力学理论构建的一元二次函数模型能够较为准确地描述复杂环境下粉煤灰煤矸石混凝土相对动弹性模量的冻融变化过程。该模型与试验数据有效吻合，为探究粉煤灰煤矸石混凝土在盐侵蚀与冻融双重作用下的性能退化提供了理论依据和试验参考。

参 考 文 献

[1] 蒋建华, 睦源, 翁伟新. 初始应力损伤对再生混凝土硫酸盐腐蚀的影响 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2021, 38 (2): 8-13, 37. (下转第 24 页)