

纤维增强粉煤灰混凝土耐久性研究

Research on Durability of Fiber-Reinforced Fly Ash Concrete

杨志刚¹, 董世博², 仲小玲², 张 晨², 邬丛斌²

- 新疆路桥桥梁工程建设有限责任公司, 乌鲁木齐 830021;
- 新疆农业大学 交通与物流工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对西北地区冬季环境中混凝土结构物的耐久性问题, 探究粉煤灰与纤维对混凝土服役期寿命的增长趋势, 选用两种不同配合比, 开展冻融循环试验, 对耐久性进行研究。建立 Weibull (威布尔) 概率分布函数, 对其退化规律建立模型; 选用最小二乘法进行 Weibull (威布尔) 参数估计值的计算。结果表明: 两组配比下混凝土经过循环质量损失普通混凝土 (简称 A 组) 为 4.3%、SY-A 粉煤灰混凝土 (简称 B 组) 为 3.63%; 相对动弹性模量损伤 A 组为 35.4%、B 组为 27.4%; 强度损失 A 组为 30.6%、B 组为 21.9%; 根据寿命预测 A 组循环 345 次、B 组循环 450 次达到极限。依据 Weibull 函数构建的图像模型能有效的描述寿命损失的过程, 可反应出结构物失效点, Weibull 函数能有效预测混凝土的服役寿命。

关键词: 抗冻性能; 模型预测; 强度损失; 动弹模量; 快冻法

中图分类号: U444 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 03-0023-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.005

YANG Zhigang¹, DONG Shibo², ZHONG Xiaoling², ZHANG Chen², WU Congbin²

(1. Xinjiang Luqiao Bridge Engineering Construction Co., Ltd., Urumqi 830021, China;

2. School of Transportation & Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to solve the durability problem of concrete structures in the winter environment of Northwest China, the growth trend of fly ash and fiber on the service life of concrete was explored, and two different mix ratios were selected to carry out freeze-thaw cycle tests to study the durability. The Weibull probability distribution function was established, and the degradation law was modeled. The least squares method was used to calculate the estimated value of Weibull parameters. The results show that the mass loss of concrete after circulation is 4.3% for ordinary concrete (referred to as group A) and 3.63% for SY-A fly ash concrete (referred to as group B) under the ratio of the two groups. The relative dynamic elastic modulus damage was 35.4% in group A and 27.4% in group B. The strength loss was 30.6% in group A and 21.9% in group B. According to the lifespan, it is predicted that the limit will be reached at 345 cycles in group A and 450 cycles in group B. The image model constructed based on the Weibull function can effectively describe the process of life loss, reflect the failure point of the structure, and the Weibull function can effectively predict the service life of concrete.

Key words: frost resistance; model prediction; strength loss; dynamic modulus; Quick-freeze method

基金项目: 中央引导地方科技发展资金 (ZYD2025QY18); 校级研究生科研创新计划项目 (XJAUGRI2025049)。

作者简介: 杨志刚 (1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路桥梁检测。

通信作者: 仲小玲 (1985—), 女, 硕士, 副教授/高级工程师, 研究方向: 道路工程。

收稿日期: 2024-12-31

材料科学

0 引言

西北属于寒旱区域,建(构)筑物在恶劣环境中,耐久性能损伤远大于内地。为此,开展混凝土耐久性提升相关研究尤为重要。

工程材料在服役期间的耐久性能是保障工程质量的关键因素,有学者对掺和料改善混凝土的性能开展研究。丁大伟等^[1]在混凝土中加入粉煤灰和钢纤维后,发现粉煤灰虽对混凝土抗冲磨性能影响有限,但能显著改善其内部结构的均匀性和密实度;郑永娟^[2]在混凝土中分别掺入聚丙烯颗粒和粉煤灰,发现聚丙烯颗粒降低力学性能,粉煤灰增强耐久性,但适量复掺两者可优化混凝土后期性能;韩长君等^[3]得出10%掺量的粉煤灰替代水泥,后期能促进二次水化,填充孔隙,优化混凝土结构,从而提升力学性能;郭自利等^[4]研究发现掺9.5%粉煤灰并涂抹防护材料的混凝土抗渗性能最优;莫黎等^[5]探究不同养护下粉煤灰混凝土的冻融循环试验,粉煤灰混凝土的耐久性优于普通混凝土,其损伤累积的速度相对较慢;刘佳敏等^[6]对掺粉煤灰混凝土进行了抗冻试验,采用粉煤灰替换水泥发现随着粉煤灰的掺入,混凝土后期力学性能、抗冻性能呈现先增大后减小的趋势,抗冻性能也具有相同趋势;侯海龙等^[7]探究不同粉煤灰掺量下对海砂混凝土抗冻性能影响,粉煤灰掺量越大,损伤程度越低。掺入的纤维在混凝土内部均匀分散,可以改善大孔隙数量,增大抗外界侵入的阻力,提升抗渗及抗冻性能^[8-9]。纤维还能有效降低强度损失^[10]。当前对于混凝土力学性能和耐久性的研究,更多的选用复合因素而非单一因素对其产生的影响^[11-12]。掺和料能有效降低混凝土内的水分积聚,减少冻融过程中产生的体积膨胀,纤维的加入能够改善混凝土的韧性和延展性,防止冻融作用下混凝土的裂缝扩大^[13-14]。混凝土中掺入掺和料能显著改善混凝土的耐久性,但对混凝土力学性能也有影响,适当的掺和料可以有效改善混凝土的各项性能^[15]。混凝土耐久性问题始终是现在的热点问题,需加强对耐久性的研究。

基于此,以粉煤灰、SY-A纤维为影响因素,开展快速冻融循环、电通量试验,探究粉煤灰、SY-A纤维对混凝土质量损失率、抗压强度、相对

动弹性模量的变化规律,通过建立Weibull分布的损伤模型,预测混凝土在冻融循环作用下的服役极限寿命,为提升高原地区混凝土结构物的抗冻设计水平和延长使用寿命提供了坚实的理论基础和技术支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验原材

选用的是P·O 52.5水泥,其性能参数详见表1和表2。粉煤灰属于F类Ⅱ级,主要指标见表3。粗骨料、细骨料详情见表4、表5。该细集料的粒径分布合理,能够有效填充混凝土中的孔隙,提高混凝土的整体性能。通过合理搭配粗细骨料,确保混凝土工作性能达到预期的设计要求。减水剂选用JB-I标准型聚羧酸高效减水剂,淡黄色透明溶液,主要技术标准见表6。此外,使用的SY-A型聚丙烯纤维主要技术指标见表7,形状为束状网。

表1 水泥的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
168	209	4.9	7.4	25.6	56.3

表2 水泥化学主要成分

Table 2 Main chemical components of cement /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	碱含量	Cl ⁻
20.4	6.5	50	3	2.3	0.29	0.03

表3 粉煤灰主要指标

Table 3 Main indicators of fly ash /%

烧失量	SO ₃	需水量比	碱含量	细度
4.26	0.39	103	4.26	24.9

表4 粗骨料主要指标

Table 4 Main indexes of coarse aggregate

表观密度 /(g/cm ³)	堆积密度 /(g/cm ³)	含泥量 /%	针片状含量 /%	压碎值 /%
3.14	1.85	0.3	4.5	6

表5 细骨料主要指标

Table 5 Main indexes of fine aggregates

表观密度 /(g/cm ³)	堆积密度 /(g/cm ³)	含泥量 /%	细度模数
2.68	1.65	0.4	2.79

表6 减水剂的主要技术指标

Table 6 Main technical indexes of superplasticizer

减水率 /%	含气量 /%	Cl ⁻	抗压强度比/%		
			3 d	7 d	28 d
27	3.2	0.01	162	157	149

表 7 纤维主要指标
Table 7 Main indicators of fiber

直径 / μm	长度 / mm	弹性模量 / MPa	密度 / (g/cm^3)	颜色
34	15	3 850	0.91	白色

1.2 配合比设计

进行 C50 普通混凝土 (A) 和 SY-A 纤维粉煤灰混凝土的配合比设计 (B), 主要配合比见表 8。

表 8 混凝土配合比
Table 8 Concrete mix ratio

序号	水泥	水	粉煤灰	粗骨料	SY-A	砂率 / $\%$	聚羧酸 减水剂/ $\%$
A	478.1	153		1 045.2		43	1.2
B	406.4	153	71.7	1 045.2	91	43	1.2

1.3 试验方法

室内快速冻融试验参考 T0565—2005 《水泥混凝土抗冻性试验方法》。试块为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 标准件, 成型后需养护 24 d, 浸泡 4 d, 开始冻融试验, 分别用普通 C50 混凝土、纤维粉煤灰 C50 混凝土进行对比, 冻融环境中选取 2 组 3 个试块。

参考 GB/T 50082—2024 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[16] 规范, 采用试验电通量法进行电通量试验, 试件为圆柱形直径 100 mm, 高 50 mm, 养护至 28 d 进行试验, 试验前需真空饱水处理至试件完全饱和, 保证试件与试验槽的密闭性, 分别在试验槽两侧注入 NaCl 溶液和 NaOH 溶液, 再施加 60V 电压, 每 5 min 记录一侧电流数据, 持续记录 6 h, 最终得到整个试验通过的电流数据。

2 结果与分析

2.1 冻融循环质量损失分析

混凝土在冻融循环的作用下, 破坏过程表现为由表及里的逐步发展。水在冻融交替变化的过程中, 渗透至混凝土的孔隙中, 产生渗透压力与冻胀力, 导致混凝土逐步受损。随着冻胀的反复发生, 混凝土表层的孔隙逐渐扩大, 胶结材料逐渐脱落, 从而引发混凝土表面出现裂缝和剥落现象, 最终导致试件的质量劣化。

由图 1 可知, 起始普通混凝土质量损失率与 SY-A 混凝土质量损失率较为接近, 在循环达到 75

次时质量损失率基本一致, 当循环次数大于 75 次后, 普通混凝土质量损失相对于 SY-A 混凝土损失增长较大, 在冻融达到 300 次, 最大损失差达到 0.7%。因 SY-A 混凝土内部有纤维形成三维结构, 具有较强的抗拉强度, 能有效抵抗混凝土微裂纹的产生, 而普通混凝土内部抵抗裂纹能力较弱, 混凝土外表面浆体会出现剥离基体的现象, 导致混凝土整体质量减小。SY-A 混凝土内部有部分水泥被粉煤灰替代, 粉煤灰早期未参与水化反应, 分布在混凝土大量孔隙间, 二次水化反应有效降低混凝土孔隙率。减少了 SY-A 混凝土表层大面积出现水的冻融现象。

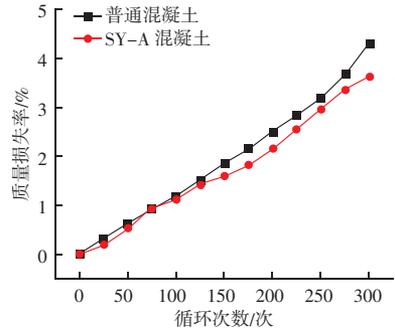
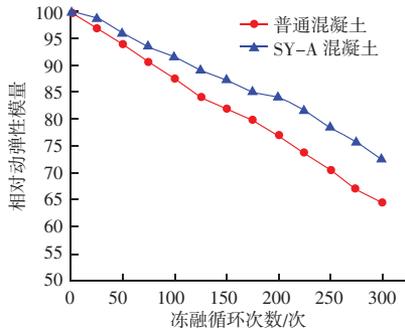


图 1 冻融循环质量损失率
Fig. 1 Rate of mass loss in freeze-thaw cycles

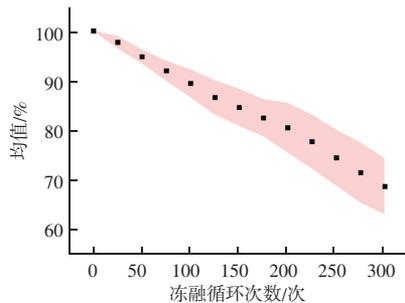
2.2 冻融循环相对动弹性模量分析

在冰冻作用下, 进行基频测量, 早期混凝土受冻融循环影响相对动弹性模量变化如图 2 所示, 分别对两组试块的相对动弹性模量做对比分析, 普通混凝土损伤速率大于 SY-A 混凝土。在进行混凝土试件的冻融循环试验时, 经过 50 次冻融循环后, 相对动弹性模量的变化幅度较小, 且曲线的变化趋势保持一致。然而, 冻融循环次数达到 175 次时, 变化趋势开始出现差异, 此时普通混凝土的相对动弹性模量出现明显的下降趋势, SY-A 混凝土下降趋势变缓。当冻融循环达到 200 次后, 如图 3 所示, 相对动弹性模量差值由小变大, 后期因普通混凝土内部约束基体应力比 SY-A 混凝土低, 使普通混凝土内部出现损伤相对较大。SY-A 混凝土内部纤维的“三维”结构, 能有效降低混凝土内部结构损伤, 粉煤灰能有效降低孔隙率, 削弱溶液浸入、增强内部约束力, 降低混凝土内部因损伤产生的微裂纹。

材料科学



(a) 相对动弹性模量损失



(b) 相对动弹性模量均值

图2 相对动弹性模量变化

Fig. 2 Relative dynamic modulus variation

2.3 抗压强度损失

经过 300 次的冻融循环, 抗压强度如图 3 所示, 由于水在融化状态下, 浸入混凝土, 在冻结状态时水发生体积膨胀, 导致混凝土的表面水泥浆脱落, 随着循环次数的增加, 混凝土的无侧限抗压强度逐渐降低, 但 SY-A 纤维混凝土掺有粉煤灰, 后期水化产物可与粉煤灰活性物质发生反应, 产生有利于强度增长的物质, 在混凝土内部产生拉应力, 具有抵抗表面剥落的能力, 所以 SY-A 纤维混凝土力学性能比普通混凝土好。

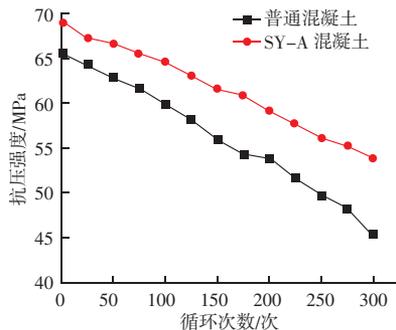


图3 混凝土强度

Fig. 3 Concrete strength

2.4 混凝土电通量试验结果分析

由表 9 可知, SY-A 混凝土电通量小于普通混凝土, 表明抗氯离子渗透性 SY-A 混凝土 > 普通混凝土, 由于 SY-A 在混凝土内部三维乱向分布, 能限制裂纹初期的发展, 在一定程度上增加混凝土的韧性, 粉煤灰在混凝土内部起着填充孔隙结构, 使混凝土基体结构致密, 氯离子侵入较难, 故 SY-A 混凝土电通量相对较低, SY-A 混凝土抵抗氯离子渗透性的能力较强。

表9 氯离子渗透试验

Table 9 Chloride ion permeation test

试验编号	持续 时间/h	28 d		58 d			
		通过电 通量/C	95 min 的 平均电 通量/C	通过电 通量/C	95 min 的 平均电 通量/C		
普通 混凝土	6	904	816	581	525		
	6	930	840	840	606	547	
	6	958	864	630	568	547	
SY-A 混凝土	6	818	738	282	255		
	6	830	749	749	324	292	292
	6	843	761	365	330		

3 混凝土寿命预测

3.1 分布函数检验

对两组混凝土试件在清水冻融循环 300 次过程中测得相对动弹性模量数据进行分析, 作为基础样本信息。相对动弹性模量变化需进行转变, 计算其损伤度, 并对损伤度数据进行 Weibull 分布函数的假设检验。在此过程中, 当混凝土损伤度 $D_i \geq 1$ 时, 表示混凝土即将达到丧失强度的状态; 而当 $D_i \leq 0$ 时, 表示混凝土强度得到了增强。相对性动弹性模量的变化为损伤变量的计算公式如下:

$$D_i = (1 - E_r) / 0.4 \quad (1)$$

式中: D_i 为损伤度, 取值 $[0, 1]$; E_r 为相对动弹性模量。

由图 4 中可知, 两组混凝土试件的冻融损伤度 D_i 数据均位于 95% 的置信区间内, 这一结果表明, 冻融损伤度 D_i 可以有效反映混凝土的服役寿命。通过对损伤数据进行分析, 其符合 Weibull 分布函数的特征。

3.2 基于 Weibull 寿命试验可靠度分析

由图 5 和图 6 可知, 在清水冻融条件下, 普通混凝土的损伤速度比掺入 SY-A 粉煤灰的混凝土更快。总体而言, 在寿命预测中, 普通混凝土在经过 345 次

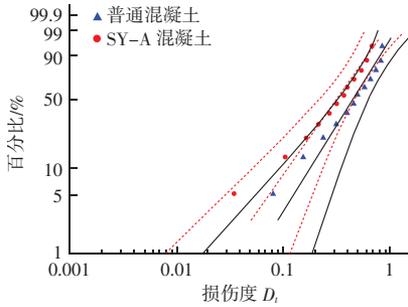
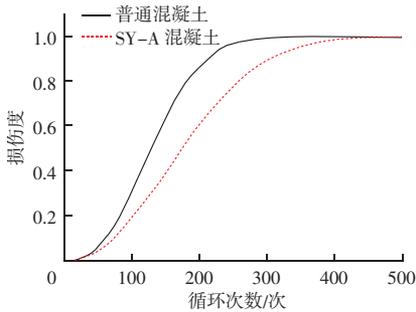
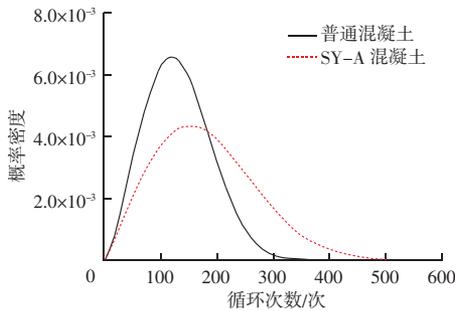


图4 冻融损伤度概率图-Weibull

Fig. 4 Probability of freeze - thaw damage - Weibull

冻融循环后达到了损伤极限，而SY-A粉煤灰混凝土则能承受多达450次的冻融循环才达到损伤极限并发生破坏。这一对比强烈表明，SY-A混凝土的服役寿命显著长于普通混凝土。

图5 寿命预测 $F(t)$ Fig. 5 Life prediction $F(t)$ 图6 密度函数 $f(t)$ Fig. 6 Density function $f(t)$

其中概率密度函数中的密度曲线是混凝土冻融普坏过程速度的宏观表现，可知普通混凝土密度函数峰值高、跨度小，劣化速率越快。

结果充分展示了掺入粉煤灰和纤维对混凝土性能的显著改善作用。通过优化混凝土配方，加入SY-A纤维和粉煤灰，可以有效提高混凝土的抗冻融能力，提升耐久性，从而延长其使用寿命。因此，对于需要承受冻融循环等环境条件的工程项目，采

用SY-A纤维和粉煤灰混凝土等混凝土材料是一个较好的选择。

4 结论

通过对掺粉煤灰、纤维粉煤灰混凝土的冻融循环试验，并对数据进行分析和预测，得到以下结论：

(1) 掺粉煤灰和纤维的混凝土抵抗质量损失效果较好，由于纤维的三维乱向分布，纤维在混凝土内部出现应力，粉煤灰在后期与混凝土水化产物氢氧化钙发生反应，形成硅酸钙水化合物和铝酸钙水合物，填充混凝土内部孔隙，提高混凝土内部密实度，不利于水浸入，减少的质量损失。

(2) 相对动弹性模量是评估混凝土内部结构损伤的重要指标，掺粉煤灰及纤维的混凝土内部具有约束应力及填充孔隙的能力，保证混凝土动弹性模量损失速率降低。

(3) 基于Weibull分布函数，可有效预测混凝土试件失效过程，根据寿命预测函数能直观的反应混凝土寿命值。

参 考 文 献

- [1] 丁大伟, 郭子涵, 张伟, 等. 粉煤灰和钢纤维对超高性能混凝土抗冲磨性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3585 - 3594.
- [2] 郑永娟. 粉煤灰和塑料废料对混凝土力学和耐久性能的影响 [J]. 塑料科技, 2024, 52 (7): 105 - 108.
- [3] 韩长君, 周海龙, 陈岩, 等. 粉煤灰对高强混凝土力学性能及孔隙结构影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42 (4): 410 - 417.
- [4] 郭自利, 康迎杰, 祝小靓, 等. 粉煤灰和表面防护剂对混凝土抗氯离子渗透性能的影响 [J]. 混凝土, 2024 (7): 1 - 3, 10.
- [5] 莫黎, 魏留明, 周强, 等. 不同养护制度下粉煤灰混凝土压缩冻融损伤演化 [J]. 水电能源科学, 2024, 42 (7): 101 - 104.
- [6] 刘佳敏, 马玉薇, 李刚. 粉煤灰对渠道用混凝土抗冻及抗冲磨性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (4): 1436 - 1444.
- [7] 侯海龙, 屈锋, 石卫华, 等. 冻融循环作用对海砂粉煤灰混凝土的损伤研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (5): 28 - 34.
- [8] 周兴宇, 杨鼎宜, 朱从香, 等. 基于孔结构分析的多尺度聚丙烯纤维混凝土耐久性 [J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40 (1): 110 - 115.

材料科学

参 考 文 献

- [1] 华经产业研究院. 2022-2027年中国建筑垃圾处理行业市场调研及投资战略规划建议报告 [M]. 华经产业研究院, 2021.
- [2] KUMAR S, KUMAR R, BANDOPADHYAY A, et al. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30 (8): 679-685.
- [3] BINICI H, TEMIZ H, MEHMET M, et al. The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 21 (5): 1122-1128.
- [4] MA Z, LI W, WU H, et al. Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199: 652-663.
- [5] SCHACKOW A, STRINGARI D, SENFF L, et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 62: 82-89.
- [6] KUZIELOVA E, PACH L, PALOU M. Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 998-1004.
- [7] 张肖明, 黄沛增, 崔庆怡. 建筑垃圾再生微粉泡沫混凝土性能研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2020 (5): 96-98.
- [8] 张松, 李如燕, 董祥, 等. 再生微粉有效代替水泥制备泡沫混凝土 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37 (9): 2948-2953.
- [9] 刘香, 运喜刚, 张君瑞, 等. 再生微粉制备泡沫混凝土的试验研究 [J]. *新型建筑材料*, 2016, 43 (3): 77-80.
- [10] 葛星, 李瑶. 活性砖粉制备泡沫混凝土物理性能研究 [J]. *低温建筑技术*, 2021, 43 (6): 1-6.
- [11] 罗向东. 再生微粉对混凝土体积稳定性的影响 [J]. *市政技术*, 2020, 38 (1): 259-261, 264.
- [12] 赵世颖, 李滢, 康晓明, 等. 再生微粉混凝土抗冻性能试验研究 [J]. *工业建筑*, 2020, 50 (11): 112-118, 96.
- [13] 李应权, 徐洛屹, 扈士凯, 等. 聚合物水泥泡沫保温材料的研究 [J]. *新型建筑材料*, 2010, 37 (2): 29-33.
- [14] 林兴胜. 纤维增强泡沫混凝土的研制与性能 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

(上接第 27 页)

- [9] 徐存东, 李智睿, 连海东, 等. 冻融循环下玄武岩纤维混凝土的耐久性寿命预测 [J]. *混凝土*, 2022 (1): 1-6.
- [10] 王振山, 李亚坤, 韦俊, 等. 玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能试验研究 [J]. *实验力学*, 2020, 35 (6): 1060-1070.
- [11] 陶友海. 纤维素纤维混凝土抗冻耐久性劣化规律 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22 (2): 715-720.
- [12] 徐存东, 李博飞, 李准, 等. 早期受盐-冻耦合作用下掺玄武岩纤维混凝土耐久性劣化规律 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (3): 816-824.
- [13] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性研究 [J]. *功能材料*, 2024, 55 (4): 4121-4126.
- [14] 徐超. 纤维混杂效应对混凝土复合材料的力学及耐久性的影响 [J]. *功能材料*, 2021, 52 (1): 1202-1207.
- [15] 普少昌, 周喻, 张宏博, 等. 含铁尾矿粉和粉煤灰混凝土强度和耐久性研究 [J]. *非金属矿*, 2021, 44 (6): 84-87, 93.
- [16] GB/T 50082—2024, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S].

(上接第 42 页)

- [9] 邹小童, 武建好, 李星辰, 等. 减缩剂对水泥砂浆及超高性能混凝土收缩性能的影响 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2024 (6): 18-21, 26.
- [10] 张信, 陈航宇, 王航, 等. 减缩剂在混凝土中的作用效果研究 [J]. *工业建筑*, 2023, 53 (增刊2): 722-725, 693.
- [11] 左俊卿, 房霆宸, 朱敏涛, 等. 裂缝控制材料对混凝土收缩及微观性能影响 [J]. *混凝土*, 2024 (1): 95-100, 106.
- [12] 光鉴森, 邹小童. 减缩剂对水泥砂浆塑性收缩开裂的影响及机理分析 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50 (9): 57-61.
- [13] GB/T 50081—2019. 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.