

文章编号:1007-9629(2025)01-0058-07

LNG 储罐混凝土超低温冻融损伤演化规律

谢 剑^{1,2}, 司家伟¹, 亢二聪^{1,*}, 孙雅丹^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全
教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要:为明确泄漏工况下液化天然气(LNG)储罐混凝土超低温冻融损伤演化规律,进行了 C50 混凝土的超低温冻融试验,并与快速冻融试验结果进行对比,通过相对动弹性模量来评估 LNG 储罐混凝土的冻融损伤累积.结果表明:快速冻融试验无法真实反映 LNG 储罐混凝土在超低温冻融条件下的损伤演化规律;基于 Weibull 分布理论,建立了实验室模拟冻融循环条件与储罐泄漏工况下混凝土冻融损伤的等效关联,为后续相关研究提供理论基础.

关键词:混凝土; LNG 储罐; 超低温; 冻融损伤; 抗冻性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2025.01.008

Damage Evolution Law of LNG Tank Concrete Subjected to Cryogenic-Temperature Freeze-Thaw Cycles

XIE Jian^{1,2}, SI Jiawei¹, KANG Ercong^{1,*}, SUN Yadan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To clarify the evolution law of cryogenic-temperature freeze-thaw damage of liquefied natural gas(LNG) tank concrete under leakage condition, the cryogenic-temperature freeze-thaw tests on C50 concrete were conducted, and compared with the rapid freeze-thaw test results. Relative dynamic elastic modulus was adopted to evaluate the damage accumulation of LNG tank concrete. The results indicate that the rapid freeze-thaw test cannot truly reflect the damage evolution law of LNG tank concrete under cryogenic-temperature freeze-thaw conditions. Based on the Weibull distribution theory, the damage equivalent correlation between the laboratory-simulated freeze-thaw cycle conditions and the actual LNG tank leakage conditions is established, which can lay a theoretical foundation for the subsequent related research.

Key words: concrete; LNG tank; cryogenic-temperature; freeze-thaw damage; frost resistance

混凝土被广泛应用于液化天然气(LNG)储罐的外罐、穹顶和底板等部位.当发生内部保冷层失效、液体泄漏等事故时,储罐直接遭受低至 -165°C 的超低温冻融循环作用,将导致混凝土性能明显劣化,进而对储罐的安全运营产生不利影响^[1-2].因此,评价超低温冻融循环作用下混凝土的抗冻性具有重要意义.然而,目前国内外学者主要通过快冻法(下限温度约

-18°C)来评估混凝土的抗冻性,研究对象由普通混凝土^[3-4]向纤维混凝土^[5-6]、再生混凝土^[7-8]等不断发展,还有学者从微观尺度研究了冻融过程中混凝土微裂缝的发展和孔隙结构的变化规律^[9-11].基于混凝土内部孔隙水的迁徙和结冰情况,各国学者提出了诸多假说来解释混凝土冻融破坏机理,如静水压力理论^[12]、渗透压理论^[13]、结晶压理论^[14]、微冰晶理论^[15]、黏结剥

收稿日期:2024-01-25; 修订日期:2024-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978459,52278201)

第一作者:谢 剑(1974—),男,河北石家庄人,天津大学教授,博士生导师,博士.E-mail: xiejian@tju.edu.cn

通讯作者:亢二聪(1993—),女,山西临汾人,天津大学博士后,博士.E-mail: kangercong@tju.edu.cn

落理论^[14]和孔隙介质力学理论^[16]等。

超低温冻融循环条件下的相关研究大多仅关注冻融循环后混凝土强度等力学指标的变化规律,而对冻融循环过程中混凝土损伤的演化规律关注不足。时旭东等^[17-18]研究发现不能直接将常规冻融循环研究结果用于设计遭受超低温冻融循环作用的混凝土结构。魏强等^[19-20]发现,混凝土强度和循环下限温度越低,混凝土抗压和劈裂抗拉强度劣化越严重;冻融循环后混凝土阻裂能力下降,但变形性能改善。周大卫等^[21-22]以弹性模量为损伤变量,深入分析了超低温冻融条件下混凝土的损伤演化规律,并利用压汞和核磁共振试验研究了其孔隙变化规律。

从上述研究发现,尚无相关研究建立快冻法和超低温冻融循环条件之间混凝土冻融损伤的等效关系。鉴于此,本文以LNG储罐C50(设计抗冻等级为F300)混凝土为研究对象,通过快冻法和超低温冻融试验,揭示了不同冻融循环条件下混凝土的损伤累积规律,并通过损伤累积度建立了不同冻融循环条件之间混凝土损伤的等效关系,为LNG储罐设计建造及安全性评估提供理论依据。

1 试验

1.1 试验设计

对C50(F300)混凝土开展冻融循环试验,共设计快速冻融、超低温气冻气融和超低温气冻水融3种冻融循环条件,分别用CTDR、CCQ和CCDR表示,冻融循环次数用 N 表示。参考GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,均采用100 mm×100 mm×400 mm混凝土棱柱体试件。每组6个平行试件,其中超低温气冻气融循环条件下混凝土劣化程度较低,设计3个平行试件,总计15个试件,具体试验设计见表1。试件由LNG储罐建设单位制备,水胶比(质量比,文中涉及的含量、比值等均为质量分数或质量比)为0.33,标准养护28 d后送至实验室,配合比见表2。胶凝材料采用P·O 42.5级水泥,掺硅灰、F类Ⅱ级粉煤灰(活性指标≥70%)和S95级矿粉(比表面积425 m²/kg,7 d活性指数72%,28 d活性指数96%)。砂为中砂,碎石粒径5~25 mm;外加剂为聚羧酸系高性能缓凝型减水剂(有效减水率30%)。自然状态下混凝土实测含水率为4.70%,立方体抗压强度平均值为61.0 MPa。

表1 试验设计
Table 1 Test design

Condition	Freeze-thaw cycle condition	Freezing temperature/℃	N /times
CTDR	Water freeze and water thaw	−20	450
CCQ	Air freeze and air thaw	−165	20
CCDR	Air freeze and water thaw	−165	20

表2 混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of concrete

Water	Cementitious material				Sand	Gravel	Water reducer
	Cement	Silica fume	Fly ash	Mineral powder			
152	286	24	48	105	707	1 030	9.4

1.2 冻融循环条件及试验设备

快速冻融试验参考GB/T 50082—2024标准中快冻法相关规定进行。超低温冻融试验上限温度为20℃,下限温度为−165℃,降温速率为1℃/min,并采取自然回温。不同冻融循环条件下试件降温-回温曲线见图1。试验开始前需将试件放在约20℃的水中浸泡4 d,试件经历一次降温和回温为一次冻融循环,回温结束后观察试件表观形态变化,并测量其质量和动弹性模量。在快速冻融循环条件下,相对动弹性模量降至60%以下时判定试件失效,终止试验。由于超低温冻融对混凝土细观结构的损伤逐渐递减^[1],且实际服役工况下

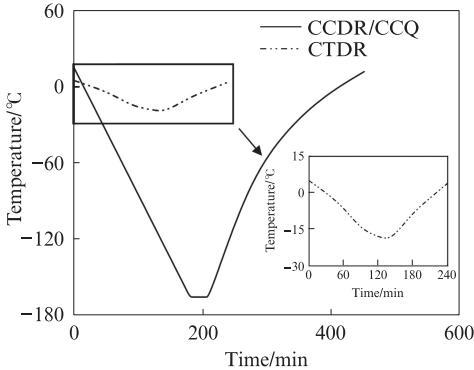


图1 不同冻融循环条件下混凝土试件降温-回温曲线
Fig. 1 Cooling-rewarming curves of concrete specimens under different freeze-thaw cycle conditions

LNG 储罐发生泄漏事故次数有限,综合考虑试验难度及时间成本,超低温冻融循环次数均设置为20次。

快速冻融试验通过 TDR-III 型快速冻融试验箱进行,超低温冻融试验均通过标准箱式深冷箱进行,该设备温控范围 -196°C ~常温(20°C),控温精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,可实现 $0.1\sim 10.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 范围内降温速率的精准控制。动弹性模量通过 DT-20 型动弹性模量测定仪测量,质量通过精度为 1 g 的 LB-07 型天平测量。

2 试验结果及分析

混凝土冻融损伤的主要来源一般有3种:冻结过程中产生的冻胀力(如静水压力、渗透压力和微冰晶压力等)、因组分热膨胀系数不同产生的温度应力

和多次冻融循环导致的疲劳作用。本节将从表观形态、质量损失率和相对动弹性模量3方面,详细分析不同冻融循环条件下 LNG 储罐混凝土的冻融损伤累积规律。

2.1 表观形态

图2给出了不同冻融循环条件下混凝土表观形态的变化情况。由图2可见:(1)450次快速冻融循环后,试件表面砂浆剥蚀严重,部分细骨料外露,孔洞直径最大为 $2\sim 3\text{ mm}$,深度达 $5\sim 6\text{ mm}$ 。(2)超低温冻融循环条件下,20次气冻气融循环后试件表观形态仍基本保持完整,而20次气冻水融循环后试件出现轻微的砂浆剥蚀、边角剥落等现象,表明含水率对表观形态劣化有重要影响。(3)快速冻融循环条件下混凝土表观形态劣化更为严重,这主要是因为较多的冻融循环次数引起更多冻胀疲劳作用。

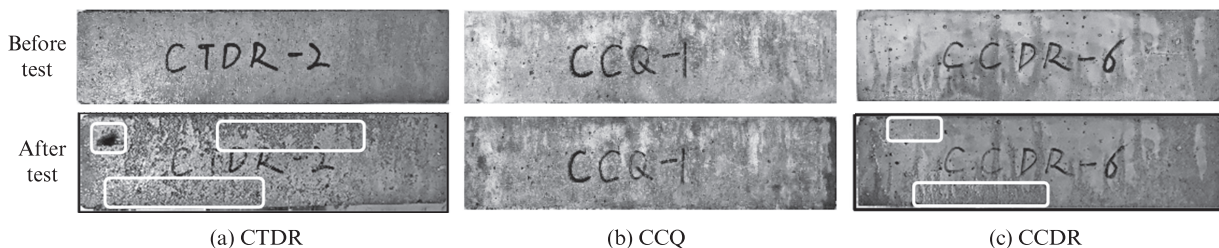


图2 不同冻融循环条件下混凝土表观形态变化

Fig. 2 Change of concrete surface after different freeze-thaw cycle conditions

2.2 质量损失率

图3给出了不同冻融循环条件下混凝土质量损失率的变化情况。由图3可见:(1)快速冻融循环条件下,试件质量损失率呈稳定上升趋势,450次循环后质量损失率均值为 0.71% 。(2)超低温气冻气融循环条件下,首次冻融循环导致的质量损失率最大,平均损失 0.19% ,表明混凝土性能劣化最严重;20次循环后质量损失率均值仅为 0.04% ,这主要是因为当温度从 -165°C 回至常温时,试件吸收部分冷凝水导致

质量增加。(3)超低温气冻水融循环条件下,混凝土试件质量呈现先升后降的趋势,20次循环后质量损失率均值为 -0.20% 。(4)3种冻融循环条件下混凝土质量变化均较小,这主要是因为混凝土水灰比较低且掺有粉煤灰、矿粉和硅灰(见表2),使其具有优良的抗冻性^[23]。

2.3 相对动弹性模量

图4给出了不同冻融循环条件下混凝土相对动弹性模量的变化情况。

由图4(a)可见,快速冻融循环条件(CTDR)下混凝土劣化可大致分为两个阶段:(1)缓慢下降阶段。经历275次循环后,相对动弹性模量缓慢降低至 95.58% 。由于下限温度仅 -20°C ,循环次数较少时因组分热膨胀系数不同产生的温度应力并不明显,此阶段混凝土损伤主要由冻胀力造成。同时随着循环次数的不断增加,微裂缝不断出现及扩展,为水接触胶凝材料提供通道,引起混凝土继续水化。在冻胀力和继续水化耦合作用下,试件表面虽劣化明显,但相对动弹性模量并未快速下降。(2)迅速降低阶段。275次循环后,随着循环次数不断增加,冻胀疲劳作用持续进行,残余温度应力发展至一定程度后,内部裂缝

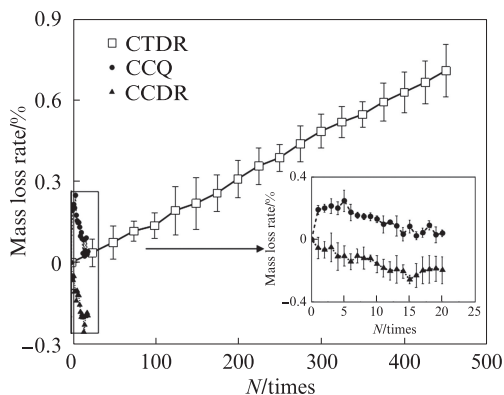


图3 经历冻融循环后混凝土质量损失率变化

Fig. 3 Change of mass loss rate of concrete after freeze-thaw cycles

迅速扩展,混凝土损伤快速增大,相对动弹性模量降低速度明显加快,直至450次循环后降至60.00%以下,混凝土失效^[24]。

由图4(b)可见:(1)超低温气冻气融循环条件(CCQ)下,首次循环后混凝土相对动弹性模量下降1.61%;之后,随着循环次数的增加,相对动弹性模量变化趋于稳定;20次循环后降至98.50%。由于混凝土含水率始终较低,冻胀力处于较弱状态,温度应力成为引起混凝土损伤的主要因素。首次冻融过程中温度应力导致的损伤最大,之后温度应力逐渐减弱,循环次数的增加造成的损伤累积不大,变化趋势与

课题组断裂能相关研究^[20]一致。(2)超低温气冻水融循环条件(CCCR)下,首次循环后混凝土相对动弹性模量下降5.14%,较超低温气冻气融循环条件下高3.53%,这主要是因为混凝土始终处于饱水状态,饱水状态下冻胀力较大,损伤由温度应力和冻胀力共同造成。之后,随着循环次数的增加,相对动弹性模量下降幅度减缓,此阶段与超低温气冻气融循环条件类似,温度应力逐渐减弱,冻胀力成为造成混凝土损伤累积的主要因素。20次循环后降至76.89%,若循环次数继续增加,冻胀力逐渐减弱,混凝土损伤应按前期趋势继续累积。

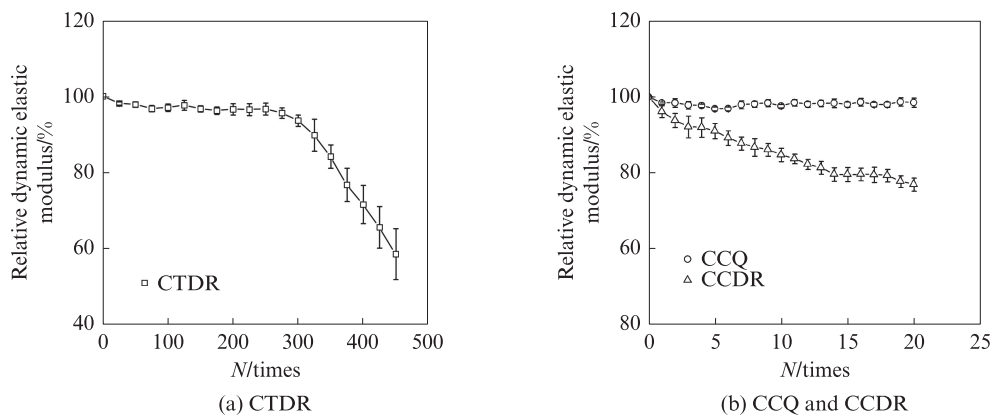


图4 经历冻融循环后混凝土相对动弹性模量的变化

Fig. 4 Change of relative dynamic elastic modulus of concrete after freeze-thaw cycles

明确冻融循环后混凝土强度等力学性能指标的损失率对准确评估结构受力性能至关重要。混凝土试件的固有振动频率可反映其强度,动弹性模量测定仪通过测量试件的谐振频率来推算其强度。然而,目前由动弹性模量评定混凝土的冻融损伤仍属于定性的范畴,只能反映混凝土实际的服役状态,无法直接反映冻融后混凝土力学性能变化情况^[25]。已有研究^[26]发现,混凝土抗压强度损失率随下限温度降低而增大,经历12次下限温度为 -80°C 的气冻气融循环后强度损失率达27.38%。而本研究中20次超低温气冻气融循环后混凝土相对动弹性模量仅下降2.00%,进一步证实仅根据相对动弹性模量指标无法直接获得冻融损伤混凝土的力学性能指标变化情况,二者之间的对应关系仍有待研究。

3 冻融损伤等效关系的建立

3.1 基于Weibull分布的冻融损伤模型

Weibull分布理论是可靠性分析和寿命检验的基础理论,常用作材料的寿命和损伤模型^[27]。根据Weibull分布函数的定义^[28],尺度因子 η 影响函数的均值和广度, η 越大,函数在纵轴上覆盖范围越小,冻

融损伤越小,混凝土可靠度越高;形状因子 β 影响函数的偏斜性和尖峰度,当 $\beta > 1$ 时,函数呈现右偏斜性并具有更陡峭的尖峰度,当 $\beta < 1$ 时,函数呈现左偏斜性并具有更平坦的尖峰度。定义混凝土材料冻融循环损伤累积变量 D 随冻融循环次数 N 增加的概率函数为:

$$D(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (1)$$

对式(1)进行Weibull变换,取两次对数,得:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - D(N)} = \beta \ln N - \beta \ln \eta \quad (2)$$

快速冻融循环条件下,混凝土的损伤演化过程可分为初始阶段和扩展阶段,采用余红发等^[24]提出的两阶段冻融损伤模型,将快速冻融循环条件下的 D 和 N 代入式(2)进行回归分析(见图5),确定快速冻融循环条件下混凝土的冻融损伤模型。

初始阶段:

$$D(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{1\,190\,000} \right)^{0.38} \right] \quad (3)$$

扩展阶段(D 从0.96开始下降):

$$D(N) = 0.96 - \exp\left[-\left(\frac{N}{500}\right)^{5.16}\right] \quad (4)$$

同样,将超低温气冻水融循环条件下的 D 和 N 代入式(2)进行回归分析(见图5),确定超低温气冻水融循环条件下混凝土的冻融损伤模型为:

$$D(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{310}\right)^{0.50}\right] \quad (5)$$

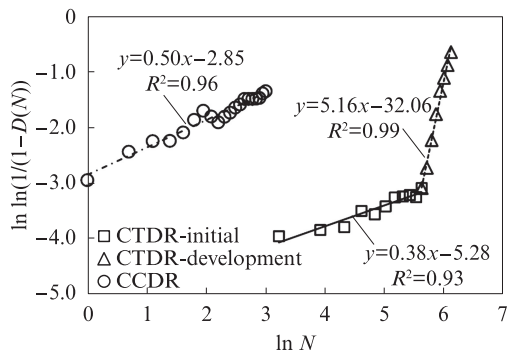


图5 不同冻融循环条件下混凝土损伤度拟合

Fig. 5 Damage degree fitting of concrete under different freeze-thaw cycle conditions

3.2 冻融损伤等效关系

参考文献[29],将CCDR循环条件下 N_{CCDR} 次循环产生的损伤累积变量标记为 D_{CCDR} ,将CTDR循环条件下 N_{CTDR} 次循环产生的损伤累积量标记为 D_{CTDR} ,当两种冻融循环条件下的损伤累积量相等时,可将 N_{CCDR} 等效为 N_{CTDR} ,并将等效后的CCDR循环条件下的冻融循环次数标记为 $N_{CCDR,e}$.

基于Weibull分布冻融损伤模型,建立快速冻融和超低温冻融循环条件下混凝土冻融损伤的等效关系,如图6所示.快速冻融循环条件下,初始阶段损伤模型 η 较大,损伤累积程度较小,混凝土的抗冻性能更为可靠, β 小于1,函数曲线具有左偏斜性和平坦的尖峰度.扩展阶段损伤模型 η 较小,损伤累积程度较大, β 大于1,函数曲线具有右偏斜性,混凝土在多次冻胀的疲劳作用下损伤累积速度迅速加快.超低温气冻水融循环条件下,损伤模型 η 较小,损伤累积程度大, β 小于1,函数曲线具有左偏斜性和平坦的尖峰度,混凝土损伤累积速度较快.

从图6可以看出,较少次数的超低温冻融循环引起的混凝土损伤极为严重,2次超低温冻融循环与300次快速冻融循环的损伤累积变量相当.因此仅通过快速冻融试验无法直接获得泄漏工况下LNG储罐混凝土真实的损伤演化规律.此外,随着超低温冻融循环次数的增加,损伤累积速度放缓,10次超低温冻融循环与360次快速冻融循环的损伤累积变量相

当.若按冻融损伤模型趋势继续累积,从动弹性模量的角度,81次超低温冻融循环后混凝土将失效.

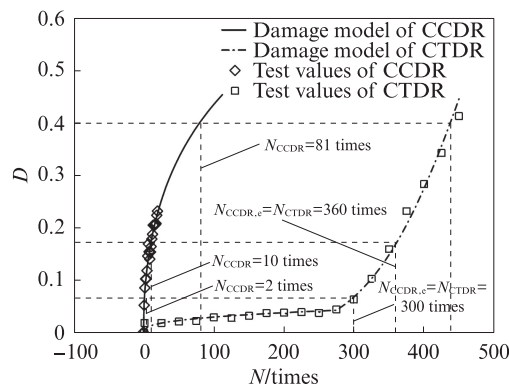


图6 快速冻融与超低温冻融循环条件下混凝土损伤的等效关系

Fig. 6 Damage equivalent relationship between rapid and cryogenic temperature freeze-thaw cycles

4 结论

(1)冻融循环条件对混凝土损伤累积规律的影响显著,快速冻融试验无法真实反映泄漏工况下LNG储罐混凝土的冻融损伤规律.LNG储罐混凝土在快速冻融循环作用下损伤累积呈两阶段趋势,并在450次循环后失效;20次超低温气冻水融循环后,混凝土相对动弹性模量均值降至76.89%;20次超低温气冻水融循环对混凝土造成的损伤累积不大.

(2)基于Weibull分布理论,建立了快速冻融和超低温冻融循环条件之间混凝土损伤的等效关系,实现了实验室模拟冻融循环条件与LNG储罐实际泄漏工况下混凝土损伤的等效关联.LNG储罐混凝土经历2次超低温冻融循环与300次快速冻融循环的损伤累积变量相当,并可能达到混凝土的抗冻耐久性极限.

(3)超低温冻融循环条件下含水率对混凝土冻融损伤累积有重要影响,因此LNG储罐运维管理过程中注入冷液前,务必做好吹扫工作及预冷处理,以降低混凝土含水率,最大程度降低超低温冻融造成的混凝土损伤累积变量.此外,仅根据相对动弹性模量指标无法准确评估冻融后混凝土抗压强度等力学性能指标的变化情况,二者之间的对应关系仍有待研究.

参考文献:

- [1] 吕超. 混凝土给定超低温作用区间冻融性能试验研究[D]. 北京:清华大学,2016:1.

- LÜ Chao. Experimental study on behavior of concrete subjected to freezing-thawing action under given cryogenic temperature range [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016:1. (in Chinese)
- [2] 蒋正武. 超低温下水泥基材料力学行为与性能演变机理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2023.
- JIANG Zhengwu. Mechanical behaviors and performance evolution mechanism of concrete at cryogenic temperature [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2023. (in Chinese)
- [3] 洪锦祥, 缪昌文, 刘加平, 等. 冻融损伤混凝土力学性能衰减规律[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 173-178.
- HONG Jinxiang, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 173-178. (in Chinese)
- [4] LI Y, JIN K K, LIN H, et al. Analysis and prediction of freeze-thaw resistance of concrete based on machine learning [J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108946.
- [5] 李趁趁, 马娇, 张普, 等. 混杂纤维/束高强混凝土的抗冻性[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10): 1072-1081.
- LI Chenchen, MA Jiao, ZHANG Pu, et al. Freezing resistance of hybrid fiber/bundle high strength concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10): 1072-1081. (in Chinese)
- [6] ZHANG J G, GUAN Y H, FAN C Q, et al. Experimental and theoretical investigations on the damage evolution of the basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2024, 422: 135703.
- [7] 成旭, 朱平华, 王新杰, 等. 矿物掺合料对再生混凝土抗冻性与可再生性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(3): 956-964.
- CHENG Xu, ZHU Pinghua, WANG Xinjie, et al. Effects of mineral admixtures on frost resistance and renewability of recycled aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(3): 956-964. (in Chinese)
- [8] 郭凯, 佟舟, 张树峰, 等. 冻融与氯盐侵蚀耦合作用下GO-RAC的耐久性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(11): 1183-1191.
- GUO Kai, TONG Zhou, ZHANG Shufeng, et al. Durability of GO-RAC under the coupling action of freeze-thaw cycling and chloride salt erosion [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11): 1183-1191. (in Chinese)
- [9] BASSUONI M T, NEHDI M L. The case for air-entrainment in high-performance concrete [J]. International Journal of Production Research, 2005, 158(5): 311-319.
- [10] XIE R F, LU L J, QIAO P Z, et al. Nanoindentation-based micromechanical characterization of ultra-high-performance concrete exposed to freezing-thawing [J]. Magazine of Concrete Research, 2022, 74(4): 162-176.
- [11] WANG R J, HU Z Y, LI Y, et al. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze-thaw environment [J]. Construction and Building Materials, 2022, 321: 126371.
- [12] POWERS T C, WILLIS T F. The air requirement of frost resistant concrete [C]. Highway Research Board Proceedings, 1950, 29: 184-211.
- [13] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing [C]. Philadelphia: ASTM, 1953, 32: 285-197.
- [14] VALENZA J J, SCHERER G W. A review of salt scaling: II. Mechanisms [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(7): 1022-1034.
- [15] SETZER M. Micro ice lens formation, artificial saturation and damage during freeze thaw attack [J]. Materials for Buildings and Structures, 2000, 6: 175-182.
- [16] COUSSY O, MONTEIRO P J M. Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(1): 40-48.
- [17] 时旭东, 李亚强, 李俊林, 等. 不同超低温温度区间冻融循环作用混凝土受压强度试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 153-164.
- SHI Xudong, LI Yaqiang, LI Junlin, et al. Experimental study on the compressive strength of concrete undergoing freeze-thaw cycle actions with different ultralow temperature ranges [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 153-164. (in Chinese)
- [18] 时旭东, 汪文强, 田佳伦. 不同强度等级混凝土遭受超低温冻融循环作用的受压强度试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 211-220, 240.
- SHI Xudong, WANG Wenqiang, TIAN Jialun. Experimental study on the compressive strength of concrete of different strength grades experiencing ultralow temperature freeze-thaw cycle action [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(2): 211-220, 240. (in Chinese)
- [19] 魏强, 谢剑, 吴洪海. 超低温冻融循环对混凝土材料性能的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(增刊1): 125-131.
- WEI Qiang, XIE Jian, WU Honghai. Experimental analysis on properties of concrete after freezing-thawing cycles under extra-low temperatures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(Suppl 1): 125-131. (in Chinese)
- [20] 谢剑, 闫明亮, 刘洋. 极地低温下冻融作用对混凝土断裂性能的影响[J]. 工程力学, 2023, 40(2): 202-212.
- XIE Jian, YAN Mingliang, LIU Yang. Effect of freezing and thawing on fracture performance of concrete at polar low temperature [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(2): 202-212. (in Chinese)
- [21] 周大卫, 刘娟红, 段品佳. 混凝土超低温冻融循环损伤演化规律和机理[J]. 建筑材料学报, 2022, 5(25): 490-497.
- ZHOU Dawei, LIU Juanhong, DUAN Pinjia. Damage evolution law and mechanism of concrete under cryogenic freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2022, 5(25): 490-497. (in Chinese)
- [22] LIU J H, ZHOU D W, CHENG L N, et al. A review on evolution laws and mechanism of concrete performance under cryogenic circumstance from multi-scale perspectives [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105666.
- [23] 潘钢华, 秦鸿根, 孙伟. 粉煤灰混凝土冻融破坏机理研究[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(1): 37-40.
- PAN Ganghua, QIN Honggen, SUN Wei. Study of frost resistance mechanism of fly ash concrete [J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(1): 37-40. (in Chinese)
- [24] 余红发, 孙伟, 张云升, 等. 在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命

- 命预测方法 I ——损伤演化方程与损伤失效模型[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(增刊 1): 128-135.
- YU Hongfa, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. Service life of prediction method of concrete subjected to freezing-thawing cycles and/or chemical attack I —Damage development and degradation mode [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(Suppl 1): 128-135. (in Chinese)
- [25] 杜鹏. 多因素耦合作用下混凝土的冻融损伤模型与寿命预测[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2014.
- DU Peng. Freeze-thaw damage model and service life prediction of concrete under multi-factor coupling [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2014. (in Chinese)
- [26] 唐静. 低温环境下混凝土材料抗冻性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- TANG Jing. Experimental study on the frost resistance of concrete materials at low temperatures [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [27] DODSON B. The Weibull analysis handbook [M]. Wisconsin: ASQ Quality Press, 2006: 1.
- [28] 刘子昂. 小样本情形下威布尔分布可靠性参数估计方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- LIU Ziang. Reliability parameter estimation method of Weibull distribution in small samples [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [29] 严佳川, 邹超英. 冻融循环作用下混凝土材料寿命评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6): 11-15.
- YAN Jiachuan, ZOU Chaoying. Evaluation method for the service life of concrete under the freeze-thaw action [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(6): 11-15. (in Chinese)