

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.016

# 拉应力作用下水工混凝土抗盐冻性能试验研究

詹韵泓<sup>1</sup>, 钱文勋<sup>1</sup>, 石勇刚<sup>2</sup>, 葛津宇<sup>1</sup>, 徐 菲<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院材料结构研究所; 2. 湖北水总水利水电建设股份有限公司)

**摘要:** 为探明拉应力对水工混凝土抗盐冻性能的影响,在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下开展了抗盐冻试验,分析了质量损失、动弹性模量衰减和氯离子扩散规律,并结合孔结构演化揭示了水工混凝土损伤机理。结果表明:拉应力显著加速了混凝土劣化的进程,在 50% 极限抗拉应力作用下,200 次冻融循环后低含气量混凝土试件的质量损失率增长了 21.7%,相对动弹性模量降低了 35.5%,氯离子扩散系数最高提升了 47.0%;拉应力诱导的微裂纹显著增大了孔径并加强了孔隙连通性;虽然提高含气量可减缓盐冻破坏,但高含气量混凝土中有害孔占比较高,叠加拉应力作用可能影响混凝土的耐久性。

**关键词:** 水工混凝土;拉应力;抗冻性能;离子侵蚀;孔结构;耐久性

## Experimental study on salt-freeze resistance of hydraulic concrete under tensile stress

Zhan Yunhong<sup>1</sup>, Qian Wenxun<sup>1</sup>, Shi Yonggang<sup>2</sup>, Ge Jinyu<sup>1</sup>, Xu Fei<sup>1</sup>

(1. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute;  
2. Hubei Shuizong Water Resources & Hydropower Construction Co., Limited)

**Abstract:** To investigate the influence of tensile stress on the salt-freeze resistance of hydraulic concrete, salt-freeze tests were conducted under ultimate tensile stresses of 0%, 30%, and 50%. The mass loss, attenuation of dynamic elastic modulus, and chloride ion diffusion laws were analyzed, and the damage mechanism was revealed in combination with pore structure evolution. The results indicate that tensile stress significantly accelerates the deterioration process of concrete. Under ultimate tensile stress of 50%, after 200 freeze-thaw cycles, the mass loss rate of low-air-content concrete specimens increases by 21.7%; the relative dynamic elastic modulus decreases by 35.5%, and the chloride ion diffusion coefficient increases by up to 47.0%. Microcracks induced by tensile stress significantly enlarge the pore size and enhance the pore connectivity. Although increasing the air content can mitigate salt-freeze damage, the proportion of harmful pores in high-air-content concrete is relatively high, and the superimposed effect of tensile stress may affect the durability of concrete.

**Key words:** hydraulic concrete; tensile stress; frost resistance; ion corrosion; pore structure; durability

我国北方盐碱地区的水工混凝土结构长期服役于盐类侵蚀、频繁冻融与持续荷载等多因素耦合的严苛环境中,尤其闸门结构、溢洪道工作桥、边墩接头等水工建筑物的受约束部位,由于长期处于受拉状态,显著加剧了混凝土结构耐久性失效的风险<sup>[1-4]</sup>。

针对盐蚀、冻融和持续荷载对水工混凝土的耦合劣化机制研究多关注双因素组合作用,并已形成了相对成熟的理论体系:冻融-盐蚀耦合作用下,盐分在结冰-融化循环中参与结晶析出与相变反应,诱发反复的结晶膨胀与溶解破坏,易导致混凝土内部微裂纹的萌生与扩展,特别是在孔隙结构疏松区域,显著加速水泥基体结构的劣化<sup>[5-6]</sup>;冻融-荷载耦合作用下,外加拉应力显著削弱混凝土抵抗冰胀破坏的能力,促使微裂纹形成与贯通,同时冰压作用引发的裂缝扩展效应被进一步强化,加速了结构力学性能与耐久性的同步衰退,外加压应力则在一定程度上可缓解冻融损伤<sup>[7-8]</sup>;盐蚀-荷载耦合作用下,拉应力显著提升了氯离子的渗透性与表层富集程度,使腐蚀介质更易在应力集中区域累积,叠加微裂纹对传输通道的放大效应,进一步加剧界面反应与离子迁移过程,提高了混凝土劣化速率<sup>[9-10]</sup>。

对于冻融-盐蚀-荷载三因素的耦合劣化作用,曹银等<sup>[11]</sup>研究发现,在弯拉荷载-冻融循环-氯盐侵蚀耦合

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52379130);南京水利科学研究院研究生学位论文创新基金项目(Yy425004)

**作者简介:** 詹韵泓(2000—),女,硕士研究生,主要从事水工材料研究。E-mail:18850608618@163.com

**通信作者:** 钱文勋(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水工材料研究。E-mail:wxqian@nhri.cn

作用下,混凝土结构主要表现为表层剥落型破坏,弯拉荷载明显加剧了结构的劣化,甚至诱发结构出现脆性断裂;张云清等<sup>[12]</sup>则通过受弯构件在氯盐环境中冻融循环后的静载试验,系统揭示了盐冻损伤对构件弯曲刚度与极限承载力的显著影响。Yang 等<sup>[13]</sup>进一步指出,在冻融-盐蚀-疲劳荷载的联合作用下,混凝土内部微裂缝的贯通显著促进了氯离子迁移,并伴随水化产物减少及盐类结晶生成,导致动弹性模量衰减、质量损失加剧。然而,现有三因素耦合的研究主要见于三因素耦合作用下混凝土宏观服役性能的衰减响应规律,并且多采用单一冻融介质或简化荷载边界条件,在微观劣化机制方面,鲜有关于微裂纹演化、孔隙结构劣化与宏观力学性能衰退之间的定量耦合关系的研究成果,难以满足复杂环境下水工混凝土耐久性预测的需求。

为此,本文以连云港新沂河入海口枢纽工程闸门张拉边界结构的水工混凝土为研究对象,通过构建受控拉应力加载体系,并引入模拟沿海与盐碱地区服役环境的氯盐-硫酸盐复合冻融介质,系统开展 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下的冻融循环试验。通过质量损失率、动弹性模量与氯离子扩散系数的同步测试,并结合硬化气孔分析与汞孔径分析等试验,探索拉应力-盐冻耦合作用下混凝土微裂纹演化、孔隙结构劣化与力学性能衰退之间的耦合路径,并建立了宏观性能与微观结构参数之间的半定量关联关系。此外,本文还进一步考察了不同含气量条件下混凝土在拉应力-盐冻耦合作用中的性能响应差异,揭示含气量对孔隙演化与耐久性退化的调控机制。通过深入阐明拉应力-盐冻耦合作用下的混凝土劣化机制,可为水工混凝土结构的抗盐冻性能评估与耐久服役年限预测提供重要的试验依据。

1 试验方法

1.1 试验材料及配合比

- a. 水泥:选用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥,化学成分中, SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、SO<sub>3</sub> 的质量分数分别为 24.99%、8.93%、4.97%、51.07%、3.28%和 2.22%,烧失量(950℃)为 4.54%。
- b. 粉煤灰:符合 II 级灰标准,含水率为 0.2%,密度为 2.31 g/cm<sup>3</sup>,细度为 10.8%,需水量比为 96%,烧失量为 1.6%,活性指数为 74.1%。
- c. 矿粉:符合 S95 级标准,含水率为 0.07%,密度为 2.91 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为 436 m<sup>2</sup>/kg,流动度比为 100%,7、28 d 活性指数分别为 78%和 105%。
- d. 其他材料:细骨料采用河砂,细度模数为 2.3;粗骨料采用二级配人工碎石,粒径分别为 5~16 mm 的小石和 16~31.5 mm 的中石;拌合水为南京当地自来水;减水剂采用聚羧酸系高性能减水剂,减水率为 27.8%,含气量为 3.7%;引气剂采用松香类引气剂,减水率为 6.8%,含气量为 5.5%。
- e. 配合比:由于同配合比混凝土强度随含气量的增加而降低,为降低抗压强度对试验的影响,对不同含气量的混凝土水灰比进行微调,混凝土配合比见表 1。新拌混凝土的工作性能及标准养护 28 d 后试件的抗压强度和极限拉伸强度试验结果见表 2。

表 1 混凝土样品配合比  
Table 1 Mixture proportions of concrete samples

| 试样<br>编号 | 原材料用量/(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |     |     |      |
|----------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|          | 水                          | 水泥  | 矿粉  | 粉煤灰 | 砂   | 小石  | 中石  | 减水剂  |
| X-1      | 158                        | 236 | 119 | 40  | 693 | 465 | 696 | 5.93 |
| X-2      | 155                        | 239 | 120 | 40  | 671 | 463 | 693 | 5.97 |
| X-3      | 152                        | 240 | 120 | 40  | 632 | 462 | 692 | 6.00 |

表 2 混凝土工作性能及 28 d 抗拉压强度  
Table 2 Workability and 28 d tensile and compressive strengths of concrete

| 试样编号 | 坍落度/mm | 含气量/% | 抗压强度/MPa | 极限拉伸强度/MPa |
|------|--------|-------|----------|------------|
| X-1  | 215    | 3.6   | 47.9     | 4.53       |
| X-2  | 210    | 5.1   | 41.5     | 4.79       |
| X-3  | 210    | 6.2   | 38.2     | 4.31       |

1.2 拉应力加载装置及拉应力试验设计

为分析拉应力与氯盐-硫酸盐耦合作用下的混凝土抗冻性能,设置了如图 1 所示的拉应力加载装置,其具体实现方法为:混凝土冻融试件成型制作时,在试件两端预埋螺纹钢筋,通过自制的应力架张拉钢筋与螺

栓控制拉应力的加载数值。

根据混凝土结构实际服役状态及裂缝发展临界值设定拉力荷载分别为 0%、30%、50% 的极限抗拉应力,其中 0% 的工况作为对照组,代表材料在无外力影响下的抗盐冻性能;30% 极限抗拉应力模拟混凝土结构在长期服役阶段所承受的典型工作应力水平,已有研究<sup>[14]</sup>指出,30% 左右的极限抗拉应力为拉应力-裂缝发展区的上限,混凝土尚处于未开裂阶段;50% 极限抗拉应力接近材料裂缝初始扩展的临界状态,属于应力敏感区,能够表征混凝土耐久性能的劣化临界状态,该应力水平通常用于研究结构在边缘服役状态下的性能演化。

施加 30% 的极限抗拉应力时,X-1、X-2、X-3 试件的轴拉强度分别为 1.36、1.44、1.29 MPa,施加 50% 的极限抗拉应力时分别为 2.27、2.40、2.16 MPa。

为维持拉应力稳定性,试件端部预埋的螺纹钢筋与自制钢架加载装置紧固连接,使用万能试验机加载完成后,拴紧高强螺栓。在 200 次冻融循环试验周期内,试样与加载钢架作为整体被一同放入冻融循环试验机中,试件两端始终与刚性拉杆保持固定连接。每 50 个循环取样检测,检查并加强螺栓的锚固后再进行下一轮冻融循环试验。

冻融介质采用模拟海洋和盐碱地区环境的 3.5% 氯化钠与 5% 硫酸镁的混合溶液。

1.3 质量损失率和相对动弹性模量分析

按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》中快冻法测定混凝土的抗冻性能。每冻融循环 50 次后取出试件,测试其质量和动弹性模量,并计算质量损失率和相对动弹性模量。

1.4 氯离子侵蚀试验

参照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》,对样品中水溶性氯离子含量进行测试。每组有一个试件除了一个 100 mm×400 mm 的侧面供外界盐离子侵蚀外,其余 5 个表面均用环氧树脂封住。在经历 200 次冻融循环试验后,取距离混凝土表面 10、20、30、40、50 mm 处的混凝土砂浆粉末样品,滴定 AgNO<sub>3</sub> 溶液测定混凝土砂浆中水溶性氯离子含量。

1.5 硬化混凝土气孔结构分析

将混凝土试件切割为 100 mm×100 mm×15 mm 的薄片,对截面处进行精磨、研磨以及抛光后,用黑墨水涂黑观测面,待干燥后用 5 000 目白色硅微粉填充气泡。处理好的试样参照 ASTM C457 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*,采用 RapidAir-457 硬化混凝土气孔分析仪进行硬化混凝土气孔结构参数测定,测定硬化混凝土中气泡的数量、大小和间距,计算混凝土的含气量、气泡比表面积以及气泡间距系数等参数。

1.6 压汞试验

压汞试验(MIP)被广泛用来测定水泥基材料的孔径参数,例如孔隙率和孔径分布等。在试件冻融循环 200 次后破碎至 5 mm 碎块进行压汞试验,压汞试验中的压力由下式转换为等效孔径:

$$D = - 2\gamma \cos \theta / P$$

(1)

式中: $D$  为等效孔径,μm; $\gamma$  为表面张力,mN/m; $\theta$  为汞与孔隙表面的润湿角,(°); $P$  为毛细管压力,MPa。

采用 Quantachrome 公司生产的 PoroMaster-GT-60 压汞仪测定混凝土中的砂浆孔结构参数,其中低压范围 1.5~350 kPa,高压范围 140~420 MPa,可测量直径在 0.003 5~400 μm 范围内变化的孔容。试验结果参数包括总孔隙率、最可几孔径等。

2 结果与分析

2.1 质量损失率和相对动弹性模量

冻融循环后质量损失率的变化规律见图 2,可见拉应力加剧了混凝土的质量损失,其影响随拉应力的提

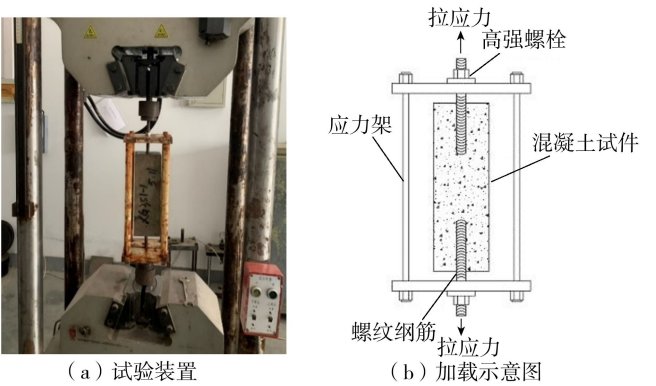


图 1 拉应力加载装置  
Fig. 1 Tensile stress loading device

高而增强。在 200 次冻融循环后,含气量 3.6% 的 X-1 试件在 50% 极限抗拉应力作用下质量损失率高达 2.02%,显著高于未受拉应力作用试件的 1.66%,其质量损失率增长了 21.7%;含气量为 6.2% 的 X-3 试件在 50% 极限抗拉应力作用下的质量损失率为 1.53%,而未受拉应力作用的试件为 1.23%,其质量损失率增长了 24.4%。拉应力可能通过双重机制加速损伤进程:一是在拉应力耦合盐冻作用下,表层砂浆的化学侵蚀与结晶压力增大,导致冻融的剥落速率提升;二是持续的拉应力作用扩展了水进入混凝土内部的通道,放大孔隙水的结冰应力,导致混凝土内部质量损失随着拉应力水平的提高而增长。

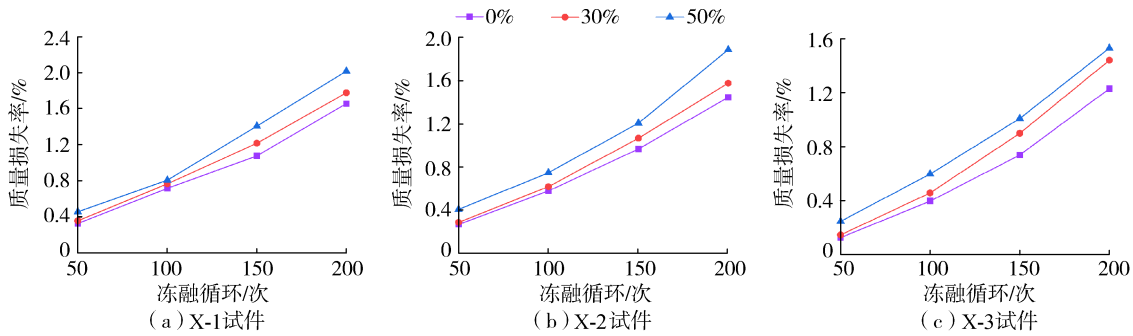


图 2 不同极限抗拉应力作用下的质量损失率  
Fig. 2 Mass loss rate under different ultimate tensile stresses

冻融循环后相对动弹性模量的变化规律见图 3,在拉应力作用下,混凝土试件的相对动弹性模量在冻融循环 100 次后明显加快。当冻融循环次数到达 200 次时,未受拉应力的 X-1、X-2、X-3 试件相对动弹性模量分别为 84.8%、86.1%、91.5%,而在 50% 极限抗拉应力作用下,其相对动弹性模量降低至 54.7%、59.8%、64.8%,分别降低了 35.5%、30.5%、29.2%,含气量较低的 X-1 和 X-2 试件达到了破坏的标准。产生上述现象的原因,是拉应力使混凝土内部产生微裂纹并使孔隙逐渐贯通,从而削弱了混凝土骨架结构的承载能力。同时,在这种状态下,孔隙压力也更容易引发应力集中现象,加速动弹性模量的衰减。提高含气量可有效分散应力集中和阻断裂缝扩展路径,在一定程度上缓解拉应力对混凝土力学性能造成的破坏,使混凝土在冻融循环和拉应力的多重作用下,保持更为稳定的力学性能。

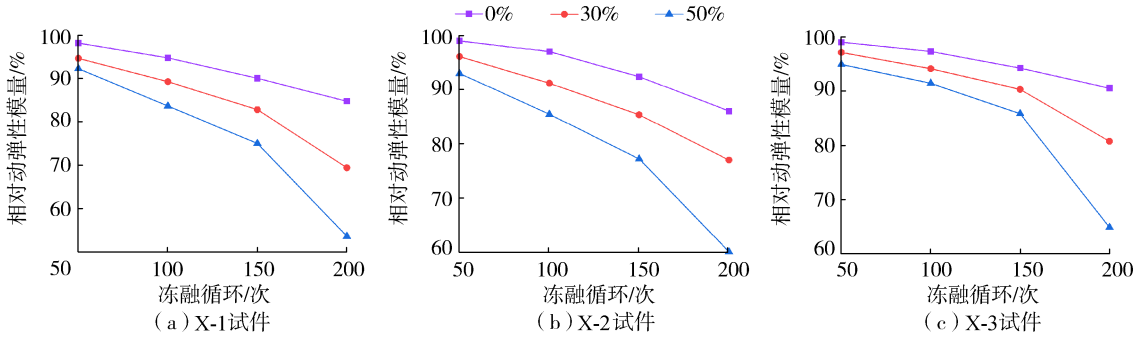


图 3 不同极限抗拉应力作用下的相对动弹性模量  
Fig. 3 Relative dynamic elastic modulus under different ultimate tensile stresses

2.2 氯离子侵蚀试验  
2.2.1 水溶性氯离子含量测试

在经过 200 次冻融循环后,取距离混凝土表面 10、20、30、40、50 mm 处混凝土砂浆粉末样品进行水溶性氯离子含量(质量分数)试验,试验结果如图 4 所示。由图 4 可见,经过 200 次冻融循环后,拉应力显著加剧了混凝土中氯离子的渗透深度与累积。无拉应力作用时,氯离子富集于混凝土表层 0~10 mm 区域,该深度 X-1 试件氯离子含量为 0.289%,而在深度 40~50 mm 时骤降至 0.003%;然而,在施加 50% 的极限抗拉应力后,表层 0~10 mm 区域氯离子含量达到了 0.409%,且渗透深度超过 40 mm 时含量仍然有 0.009%。

拉应力的作用在 20~30 mm 关键层尤为显著,对混凝土的材料性能影响深远。在该深度区域 X-1 试件的氯离子含量从无拉应力作用时的 0.015% 增加至 50% 极限抗拉应力作用下的 0.062%,增长幅度超过 313%。这表明拉应力诱导的微裂纹有效缩短了离子的扩散路径,为氯离子提供了快速渗透通道。

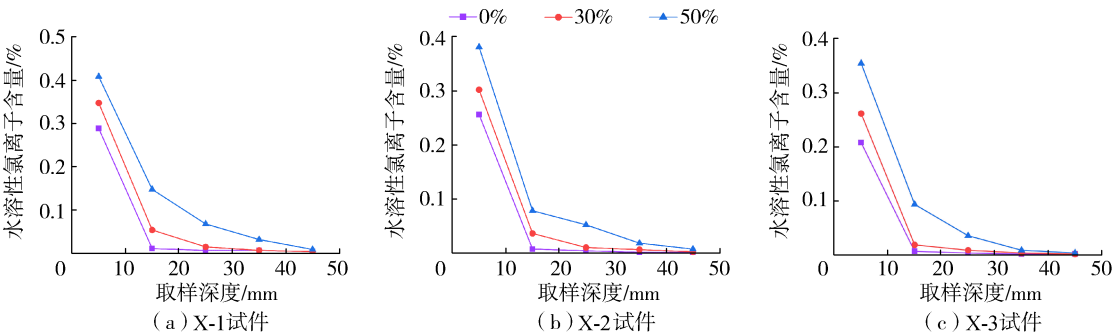


图 4 不同极限抗拉应力作用下的水溶性氯离子含量

Fig. 4 Water-soluble chloride ion content under different ultimate tensile stresses

尽管提高含气量对氯离子扩散有抑制作用,但拉应力对混凝土抗离子侵蚀性能的削弱依然突出。以 X-3 试件为例,在 50%极限抗拉应力作用下,深度为 40~50 mm 处的氯离子含量为 0.005%,相较于 X-1 降低 44.4%。然而,与 X-3 试件无拉应力作用时相比,同深度 40~50 mm 处的氯离子含量仍增长 1.5 倍,说明拉应力对钢筋混凝土耐久性的破坏性影响超过提高含气量所带来的防护效果。

2.2.2 氯离子扩散系数

在进行冻融循环试验时,混凝土试件处于被浸没于试件盒内的状态,此时外界的氯离子在混凝土内部的迁移方式,主要还是以扩散作用的形式呈现,这一扩散过程可以运用 Fick 第二定律来描述<sup>[15]</sup>。罗大明等<sup>[16-17]</sup>研究表明,混凝土试件承受拉应力荷载时,需采用氯离子扩散系数经验公式进行计算:

$$K_1 = K_2 + A_1\sigma + A_2\sigma^2 \tag{2}$$

式中: $K_1$ 、 $K_2$  分别为有、无拉应力作用下的氯离子有效扩散系数; $\sigma$  为名义拉应力; $A_1$ 、 $A_2$  为经验系数,取 -0.012 50 和 0.208 20。

试验中每 50 次冻融循环时间约为 8 d,因此 200 次冻融循环的测试时间为 32 d,根据前期测得的水溶性氯离子含量,计算得到在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下, X-1 试件的氯离子扩散系数分别为  $2.225\times 10^{-11}$ 、 $2.293\times 10^{-11}$ 、 $3.271\times 10^{-11}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , X-2 试件分别为  $2.091\times 10^{-11}$ 、 $2.521\times 10^{-11}$ 、 $3.208\times 10^{-11}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , X-3 试件分别为  $2.076\times 10^{-11}$ 、 $2.408\times 10^{-11}$ 、 $3.059\times 10^{-11}$   $\text{m}^2/\text{s}$ 。

相同配合比条件下,混凝土的氯离子扩散系数随拉应力水平的提高而增大,低含气量混凝土的扩散系数增幅更为明显。例如, X-1 试件在 50%极限抗拉应力作用下,扩散系数达到  $3.271\times 10^{-11}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ,较无拉应力作用时增大了 47.0%。相比之下,高含气量混凝土因内部存在大量微气孔,初始氯离子扩散系数较低,随拉应力升高的幅度较小。在同等条件下, X-3 试件的扩散系数为  $3.059\times 10^{-11}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ,为 X-1 的 93.5%。这一现象表明,拉应力使混凝土内部产生的裂纹和孔隙为氯离子提供了迁移通道;而高含气量混凝土的气孔结构可在一定程度上缓冲拉应力引发的劣化现象。

2.3 硬化混凝土气孔参数分析

依据 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》,采用 RapidAir-457 硬化混凝土气孔分析仪对经历 200 次冻融循环后的低含气量试件 X-1 和高含气量试件 X-3 进行硬化气孔参数测试,结果见表 3。

表 3 硬化混凝土气孔参数测试结果

| Table 3 Test results of pore parameters of hardened concrete |            |       |           |                                      |           |
|--------------------------------------------------------------|------------|-------|-----------|--------------------------------------|-----------|
| 试件编号                                                         | 极限抗拉应力水平/% | 含气量/% | 气泡平均弦长/mm | 气泡比表面积/( $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ) | 气泡间距系数/mm |
| X-1                                                          | 0          | 5.0   | 126.7     | 26.675                               | 0.188     |
|                                                              | 30         | 5.1   | 128.9     | 26.720                               | 0.179     |
|                                                              | 50         | 5.6   | 143.2     | 29.460                               | 0.172     |
| X-3                                                          | 0          | 7.2   | 182.2     | 27.835                               | 0.142     |
|                                                              | 30         | 7.5   | 189.8     | 31.105                               | 0.126     |
|                                                              | 50         | 7.8   | 198.7     | 31.750                               | 0.122     |

由表 3 可见,拉应力对混凝土气孔参数影响显著,主要体现为含气量增加、气泡平均弦长变长、气泡比表面积增大与气泡间距系数减小。其原因是拉应力作用促使混凝土内部产生更多微裂纹和微孔隙,增加了气

泡总表面积;同时,新产生的微孔隙填充于气泡周围,使气泡间距系数减小<sup>[18]</sup>。

根据静水压理论,混凝土在冰冻过程中由于孔隙液结冰体积膨胀,迫使未结冰的孔溶液克服黏滞阻力向外迁移渗透,从而形成静水压力对混凝土造成应力破坏<sup>[19]</sup>。因此,静水压力随孔隙液流程长度的增加而增大,当静水压力超过混凝土的抗拉强度时即会对混凝土造成破坏。通过引气剂引入气泡后,混凝土中气泡间距系数减小,这些相互独立且封闭的气泡缩短了未结冰孔隙液的迁移渗透流程,因此产生的静水压力变小,从而提高混凝土的抗冻性能。但在拉应力的作用下,气泡间距系数的减小可能伴随着混凝土内部微裂纹的产生扩展和大孔径气泡数量的增加,耦合特殊的盐碱地环境,反而降低了材料的耐久性。

2.4 压汞试验

混凝土孔结构特征是其抗冻耐久性的关键控制因素。随着拉应力水平和含气量的提升,混凝土试件的孔隙率也逐步提升,在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下, X-1 试件孔隙率分别为 8.61%、10.83%、13.20%, X-3 试件分别为 9.65%、11.64%、14.99%。

根据孔径( $d$ )对耐久性的影响机制,Zhang 等<sup>[20]</sup>按照孔径将孔隙划分为无害孔( $<20\text{ nm}$ )、少害孔( $20\sim <50\text{ nm}$ )、有害孔( $50\sim <200\text{ nm}$ )和多害孔( $\geq 200\text{ nm}$ ),其中有害孔与多害孔会显著加剧混凝土试件的冻融损伤。X-1 和 X-3 试件经 200 次冻融循环后在不同拉应力作用下的孔隙分布特征见图 5。随着拉应力水平从 0% 提升至极限抗拉应力的 50%,混凝土试件大于 50 nm 孔径的孔隙占比显著增加。此外,各试件的最可几孔径随拉应力水平的提高而增大,X-1 试件在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下的最可几孔径分别为 9.95、20.12、78.34 nm, X-3 试件分别为 11.23、67.56、182.35 nm,表明拉应力驱动微小孔隙的形成,孔径分布向更大尺寸方向发展,增加有害孔和多害孔的占比。

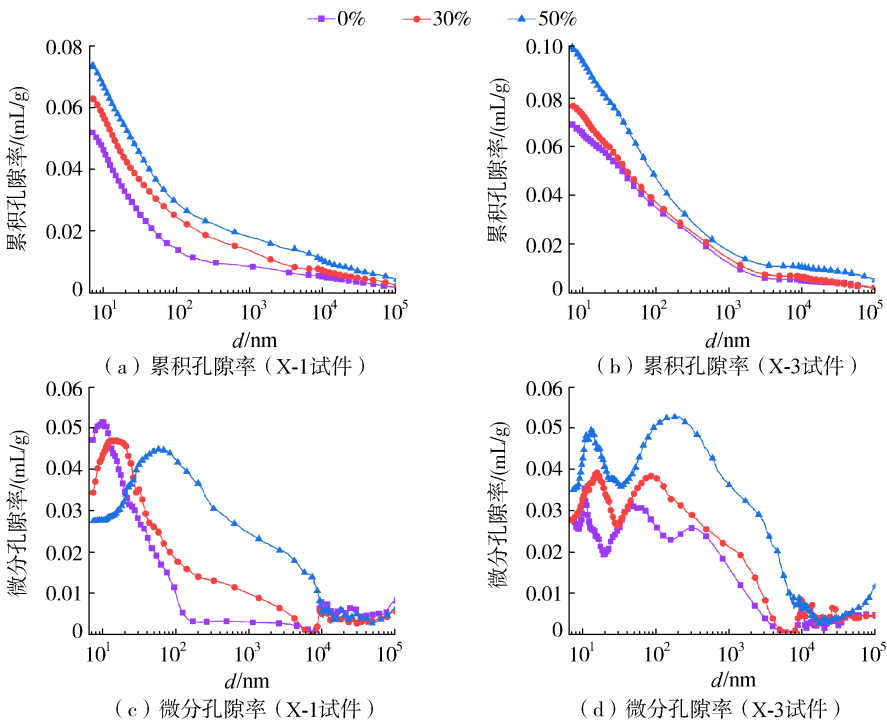


图 5 不同极限抗拉应力作用下的孔结构测试结果

Fig. 5 Pore structure test results under different ultimate tensile stresses

由表 4 可见,高含气量混凝土中有害孔和多害孔占比相对偏高,但其抗冻性能并未出现显著下降。含气量高的混凝土含有大量孔径在  $1\text{ }\mu\text{m}$  以上的微小气孔,在压汞试验中被计入多害孔的范畴。这些气孔的存在一定程度上优化了孔径分布,有利于混凝土抗冻性能的提升,为冻融循环时产生的孔隙压力提供了缓冲空间,吸收部分冻胀压力,从而降低混凝土的微观破坏风险。然而,拉应力的施加显著改变了这一趋势,其通过加剧孔隙的连通性与融合进程,增大了混凝土的总孔隙率和最可几孔径,孔结构的劣化降低了混凝土的抗离子渗透能力和抗冻性能。

表 4 不同极限抗拉应力作用下的孔径占比

Table 4 Proportion of pore sizes under different ultimate tensile stresses

| 试件编号 | 极限抗拉应力<br>水平/% | 不同孔径的占比/% |           |            |         |
|------|----------------|-----------|-----------|------------|---------|
|      |                | <20 nm    | 20~<50 nm | 50~<200 nm | ≥200 nm |
| X-1  | 0              | 43.3      | 24.7      | 15.1       | 16.9    |
|      | 30             | 41.7      | 24.4      | 15.0       | 18.9    |
|      | 50             | 34.9      | 27.2      | 18.0       | 19.9    |
| X-2  | 0              | 32.9      | 18.6      | 20.0       | 28.5    |
|      | 30             | 31.0      | 17.8      | 19.1       | 32.1    |
|      | 50             | 26.1      | 13.2      | 23.5       | 37.2    |

2.5 混凝土宏观关联分析

混凝土的宏观力学性能退化与其微观孔结构变化存在密切的耦合关系。质量损失率随孔隙率升高而增大,孔隙率越高,外界水分越易于进入混凝土内部,在冻融作用下产生更高的冻胀压力,加剧表层材料的剥落破坏。当超过 50 nm 的孔径占比增大时,质量损失趋势更为显著,表明较大孔隙对混凝土抗冻性能影响更为关键。

动弹性模量的损失也与孔结构参数密切相关。气泡间距系数减小使孔隙更密集,最可几孔径和平均孔径的增大则显著削弱孔隙骨架结构的承载能力,导致动弹性模量加速劣化;同时,多害孔占比升高进一步加剧了动弹性模量的劣化。拉应力的引入显著加剧了这一趋势:一方面促进了微裂纹的产生与贯通,另一方面扩大孔径增强孔隙的连通性,从而进一步降低了混凝土的结构完整性与力学性能。

为明确混凝土宏观性能与微观孔结构指标间的关系,本文对相对动弹性模量损失率和质量损失率等宏观指标与气泡间距系数、最可几孔径、总孔隙率等微观参数进行了对比分析,结果表明,这些参数之间存在明显的对应关系。以 X-1 试件为例,在 50%极限抗拉应力作用下,相对动弹性模量较无拉应力作用时降低了 46.3%,对应最可几孔径从 9.95 nm 增大至 78.34 nm,总孔隙率提高了 53.2%,气泡间距系数降低了 8.5%;而 X-3 试件在相同拉应力水平下,相对动弹性模量降低了 32.2%,最可几孔径从 11.23 nm 增大至 182.35 nm,总孔隙率提高了 55.4%,气泡间距系数降低了 14%。上述结果进一步证实,最可几孔径与相对动弹性模量的损失率呈显著正相关关系,而气泡间距系数则与质量损失率呈负相关关系。进一步分析发现,相对动弹性模量的损失率与最可几孔径的关系呈现出近似对数增长特征,即当孔径超过 50 nm 后,对力学性能的影响呈显著放大趋势;气泡间距系数每降低 0.01 mm,相对动弹性模量平均下降 5%~8%,表明较小的气泡间距对裂缝扩展具有一定的缓冲效应。此外,总孔隙率每增大 1%,质量损失率平均提高 0.1%~0.2%,说明孔隙连通性的增强会提高混凝土渗透性,从而加速其劣化。

综上,混凝土的抗盐冻性能与微观孔隙结构密切相关,通过最可几孔径与气泡间距系数的变化能够有效预测拉应力-盐冻耦合作用下混凝土的宏观力学性能衰退趋势。

3 结 论

a. 拉应力对混凝土的抗冻性能有显著的负面影响。随着拉应力水平的提升,混凝土在冻融循环中的质量损失率和动弹性模量损失呈现加速上升趋势。经 200 次冻融循环后,在 50%极限抗拉应力作用下,含气量为 3.6%的 X-1 试件较无拉应力作用时质量损失率增长了 21.7%,相对动弹性模量降低了 35.5%;含气量为 6.2%的 X-3 试件对应指标也分别增长了 24.4%和降低了 29.2%。此外,拉应力作用还通过诱导内部微裂纹形成与扩展,加速了氯离子的渗透和冻胀破坏,导致混凝土抗冻性能下降;拉应力作用会加快氯离子迁移,200 次冻融循环后氯离子扩散系数最高提升 47.0%。

b. 拉应力可使混凝土的微观孔隙结构发生明显劣化。在 50%极限抗拉应力作用下,X-1 和 X-3 两组试件的气孔间距系数较无拉应力作用时显著降低;含气量、气泡平均弦长、气泡比表面积等指标皆呈上升趋势,其中大孔径孔隙占比显著提升,导致混凝土的总孔隙率和最可几孔径相应增大,拉应力加速了孔结构的劣化。

c. 拉应力作用下含气量提升对混凝土抗冻性能的优化与潜在风险并存。尽管含气量优化了孔径分布,提升了抗冻性能,但高含气量混凝土的有害孔和多害孔占比相对偏高,在 50%极限抗拉应力作用下,这两类孔隙占比甚至突破 60%。在长期拉应力与冻融耦合作用下,混凝土内部孔隙的连通性与融合现象显著加剧,其耐久性因此遭受严重威胁,说明在混凝土抗冻配合比设计中,应综合考虑含气量调控与拉应力水平控

制,以实现抗冻性能与耐久性的优化。

## 参考文献:

- [1] 苏安双,王宇,石北啸,等.冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):61-66. (Su Anshuang, Wang Yu, Shi Beixiao, et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 61-66. (in Chinese))
- [2] 胡成,翁兴中,朱懋江,等.纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):84-92. (Hu Cheng, Weng Xingzhong, Zhu Maojiang, et al. Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 84-92. (in Chinese))
- [3] 吴佳雯,王少伟,刘毅,等.冻融溶蚀耦合作用下混凝土劣化机理及预测模型[J].水利水电科技进展,2025,45(6):53-60. (Wu Jiawen, Wang Shaowei, Liu Yi, et al. Mechanism and prediction model of concrete deterioration under coupled freeze-thaw and leaching action[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(6): 53-60. (in Chinese))
- [4] 蒋林华,闫菁怡,杨国辉,等.复杂条件下水工混凝土研究进展[J].水利水电科技进展,2025,45(5):81-88. (Jiang Linhua, Yan Jingyi, Yang Guohui, et al. Research progress on hydraulic concrete under complex conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 81-88. (in Chinese))
- [5] Ma Farong, Zhang Yunsheng, Qiao Hongxia, et al. Analysis of damage models and mechanisms of mechanical sand concrete under composite salt freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2024, 429: 136311.
- [6] Xiao Qianhui, Cao Zhiyuan, Guan Xiao, et al. Damage to recycled concrete with different aggregate substitution rates from the coupled action of freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221: 74-83.
- [7] 王学军.不同应力水平作用下混凝土碳化及抗冻性能研究[J].新型建筑材料,2017,44(11):44-47. (Wang Xuejun. Study on carbonization and frost resistance of concrete under different stress levels[J]. New Building Materials, 2017, 44(11): 44-47. (in Chinese))
- [8] 陈雨唐,缪凡璠,唐晨,等.冻融循环与持续荷载共同作用下FRP片材-混凝土界面黏结性能的退化行为[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):468-476. (Chen Yutang, Miao Fanfan, Tang Chen, et al. Bond performance degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interface under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 468-476. (in Chinese))
- [9] 徐港,龚朝,刘俊,等.混凝土抗水冻融和抗盐冻融循环作用的相关性[J].建筑材料学报,2020,23(3):552-556. (Xu Gang, Gong Chao, Liu Jun, et al. Correlation between water freeze-thaw resistance and salt freeze-thaw resistance of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 552-556. (in Chinese))
- [10] 胡大琳,徐怀存,张航,等.初始弯曲应力对冻融-碳化后钢筋混凝土梁承载力影响分析[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(5):38-47. (Hu Dalin, Xu Huaicun, Zhang Hang, et al. Analysis on influence of initial bending stress on bearing capacity of reinforced concrete beam after freeze-thaw carbonization[J]. Journal of Changan University (Natural Science Edition) 2020, 40(5): 38-47. (in Chinese))
- [11] 曹银,王玲,王振地,等.弯拉荷载-冻融循环-氯盐侵蚀作用下混凝土的劣化[J].建筑材料学报,2016,19(5):821-825. (Cao Yin, Wang Ling, Wang Zhendi, et al. Deterioration of concrete caused by freeze-thaw cycles combined with chloride attack under flexural load[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5): 821-825. (in Chinese))
- [12] 张云清,余红发,孙伟,等.盐冻作用下混凝土受弯构件承载力的计算[J].材料科学与工程学报,2014,32(1):29-34. (Zhang Yunqing, Yu Hongfa, Sun Wei, et al. Calculation of the capacity of concrete flexural members under salt freezing[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, 32(1): 29-34. (in Chinese))
- [13] Yang Siqi, Zhang Jiawen, Zhang Weijie, et al. Study on the evolution mechanism of concrete properties under the coupled effects of freeze-thaw cycle, chloride salt and fatigue loading[J]. Frontiers in Physics, 2025, 13: 1623258.
- [14] Sun W, Zhang Y M, Yan H D, et al. Damage and its restraint of concrete with different strength grades under double damage factors[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(5/6): 439-442.
- [15] Zhang Junzhi, Zhao Jing, Zhang Yurong, et al. Instantaneous chloride diffusion coefficient and its time dependency of concrete exposed to a marine tidal environment[J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 225-234.
- [16] 罗大明,牛荻涛,苏丽.荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展[J].工程力学,2019,36(1):1-14. (Luo Daming, Niu Ditao, Su Li. Research progress on durability of stressed concrete under environment actions[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 1-14. (in Chinese))
- [17] 于丽波,蒋林华,储洪强,等.混凝土中结合氯离子研究综述[J].科学技术与工程,2020,20(9):3387-3393. (Yu Libo,

Jiang Linhua, Chu Hongqiang, et al. Review of researches on binding chloride ions in concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3387-3393. (in Chinese))

[18] 黄守刚,陈进杰,王建西,等. 多孔玄武岩骨料轨枕用混凝土的制备及其硬化后的微结构[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24045-24054. (Huang Shougang, Chen Jinjie, Wang Jianxi, et al. Preparation of porous basalt aggregate concrete for railway sleepers and its microstructure[J]. Materials Reports, 2020, 34(24): 24045-24054. (in Chinese))

[19] 汪林萍,杨全兵. NaCl-MgCl<sub>2</sub> 复合除冰盐对混凝土盐冻破坏的影响及其作用机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 129-136. (Wang Linping, Yang Quanbing. Effect and mechanism of NaCl-MgCl<sub>2</sub> compounded deicing salt on the salt-frost scaling of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 129-136. (in Chinese))

[20] Zhang Ai, Yang Wencui, Ge Yong, et al. Effect of nanomaterials on the mechanical properties and microstructure of cement mortar under low air pressure curing[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118787.

(收稿日期: 2025-06-19 编辑: 熊水斌)

(上接第 91 页)

[8] 信昆仑,詹书俊,陶涛,等. 基于灵敏度分析的供水管网模型多目标校核[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 736-739. (Xin Kunlun, Zhan Shujun, Tao Tao, et al. Multi objective calibration of hydraulic model in water distribution network based on sensitivity analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5): 736-739. (in Chinese))

[9] Abdelbaki C, Bendaib M M, Benziada S, et al. Management of a water distribution network by coupling GIS and hydraulic modeling: a case study of Chetouane in Algeria[J]. Applied Water Science, 2017, 7(3): 1561-1567.

[10] 付强,余健恩,闫强,等. 基于 Flowmaster 的不同阀门开度对供水管网优化[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 266-270. (Fu Qiang, Yu Jianen, Yan Qiang, et al. Flowmaster-based optimization study of water supply pipe network with different valve openings[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(3): 266-270. (in Chinese))

[11] 俞亭超,张土乔,吕谋. 基于 SVM 的管网状态估计模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(9): 1205-1208. (Yu Tingchao, Zhang Tujiao, Lyu Mou. State estimation model of water distribution network based on SVM[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(9): 1205-1208. (in Chinese))

[12] 刘宪亮,许新勇,陈晓楠,等. 基于智慧水力学的长距离调水工程调度参数预测方法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 18-25. (Liu Xianliang, Xu Xinyong, Chen Xiaonan, et al. Research on scheduling parameter prediction method of long-distance water transfer project based on intelligent hydraulics[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(3): 18-25. (in Chinese))

[13] Lu Mengyao, Xu Guitao, Liu Xiaolian. Research on detection and restoration methods of basic operation data for inter-basin water diversion projects[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 11726.

[14] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Artificial neural network-based water distribution scheme in real-time in long-distance water supply systems[J]. AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2024, 73(8): 1611-1620.

[15] 赵振兴,何建京. 水力学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2010.

[16] 李炜. 水力计算手册[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2006.

[17] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2): 211-218.

[18] 郭永鑫,郭新蕾,杨鹏志,等. 管道水力摩阻系数的敏感性分析[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 1021-1028. (Guo Yongxin, Guo Xinlei, Yang Pengzhi, et al. Sensitivity analysis of the hydraulic conveyance coefficients of pipes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 1021-1028. (in Chinese))

[19] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Calibration of roughness coefficient for long-distance water supply systems with multi-branch pipelines[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(9): 097162.

[20] 史峰,王辉,郁磊,等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.

[21] 田正宏,苏伟豪,郑祥,等. 基于 GA-BP 神经网络的碾压混凝土压实度实时评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 81-86. (Tian Zhenghong, Su Weihao, Zheng Xiang, et al. Real-time evaluation method of compaction degree for roller-compacted concrete based on GA-BP neural network[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 81-86. (in Chinese))

[22] 刘媛媛,刘业森,郑敬伟,等. BP 神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 284-295. (Liu Yuanyuan, Liu Yesen, Zheng Jingwei, et al. Intelligent rapid prediction method of urban flooding based on BP neural network and numerical simulation model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 284-295. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-09-02 编辑: 刘晓艳)