

# 盐冻耦合作用下纤维混凝土内部缺陷及孔隙结构

段明翰 覃源 李阳 袁旭东

西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西西安 710048

**摘要:** 为研究高寒冻融气候及盐渍土环境对纤维混凝土的微观结构影响, 以聚丙烯腈纤维混凝土 (PANFRC) 为例, 开展复合盐腐蚀冻融耦合 (盐冻) 耐久性试验。采用超声平测法和对测法研究 PANFRC 的损伤层厚度和内部缺陷发展规律, 并进一步基于 NMR 技术和孔隙分形理论详细分析孔隙结构的演变过程。结果表明: 盐冻耦合作用下, 损伤层厚度逐渐增大, 损伤层抗压强度减小, 导致混凝土整体抗压强度的降低, 且二者之间呈线性关系; PANFRC 试件中部声速值下降速率较快, 缺陷区域面积扩大趋势明显, 成为抵抗荷载破坏最不利的区域, 易诱发断裂现象, 当纤维掺量大于  $1.5 \text{ kg/m}^3$  时, 声速损失较少, 限制内部缺陷发展作用明显, 且在盐冻中后期对混凝土的韧性改善发挥较大作用; 随着盐冻耦合次数增加, PANFRC 微孔比例降低, 大孔和微裂隙比例增加, 小、中孔隙的合计比例有所增大, 整体上孔隙结构发育呈现增维过程, 小孔喉联通转化为超大孔喉及裂隙孔喉也是混凝土内部微观劣化的重要原因。

**关键词:** 盐冻耦合; 纤维混凝土; 内部缺陷; 孔隙结构

**中图分类号:** TV431+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2026)01-0100-15

**DOI:** 10.15951/j.tmgcxb.24060481

## Internal defects and pore structure of fiber reinforced concrete under salt-freezing coupling effect

Duan Minghan Qin Yuan Li Yang Yuan Xudong

State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

**Abstract:** To investigate the effects of alpine freeze-thaw cycles and saline soil environments on the microstructure of fiber-reinforced concrete, a comprehensive durability test was conducted on polyacrylonitrile fiber-reinforced concrete (PANFRC) under combined salt corrosion and freeze-thaw (salt-freezing) conditions. Using both ultrasonic plane testing and opposite-side measurement methods, the thickness of the damaged layer and the development of internal defects in PANFRC were evaluated. Furthermore, the evolution of the pore structure was analyzed using NMR technology and pore fractal theory. Results indicate that under the combined action of salt-freezing cycles, the thickness of the damaged layer increases progressively, and its compressive strength decreases, leading to a corresponding reduction in the overall compressive strength of the concrete. A linear relationship was observed between these two parameters. The ultrasonic velocity in the central region of the PANFRC specimens decreased sharply, and the area of the defect zone expanded significantly, making this region the most vulnerable part under load and prone to

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52279139)

**作者简介:** 段明翰, 博士研究生 **通信作者:** 覃源, 博士, 教授 **收稿日期:** 2024-06-13

fracture. When the PANF content exceeds  $1.5 \text{ kg/m}^3$ , the loss in ultrasonic velocity is minimized, and the fibers effectively inhibit the growth of internal defects, thereby enhancing the toughness of the concrete, particularly during the middle to late stages of salt-freezing cycles. As the number of salt-freezing cycles increases, the proportion of micropores in PANFRC decreases, while the number of macropores and microcracks increases. The total proportion of small and medium-sized pores also rises. Overall, the development of the pore structure follows a trend of increasing complexity, with small pore throats interconnecting and transforming into super-large and fissure-type pore throats.

**Keywords:** salt-freezing coupling; fiber-reinforced concrete; internal defects; pore structure

**E-mail:** qinyuan@xaut.edu.cn

## 引 言

冻融循环是影响高寒地区混凝土材料耐久性降低的主要原因之一<sup>[1]</sup>,而在盐渍土和盐湖卤水环境下,又与腐蚀性盐离子长期发生盐冻作用<sup>[2-3]</sup>,使得混凝土结构快速产生病害。据不完全统计,仅青海、西藏两省区就有大小盐湖 1 700 多个<sup>[4]</sup>,这些盐湖区域的土壤中含有大量氯盐、硫酸盐及镁盐等腐蚀性盐类<sup>[2-3]</sup>。盐冻耦合作用对混凝土结构造成的损伤屡见不鲜,例如,位于青海省的纳子峡面板堆石坝工程,修建及运营期均受到了富含  $\text{SO}_4^{2-}$  冲蚀<sup>[5]</sup>,加之服役期的冻融环境对面板的长期使用极为不利;新疆 635 水利枢纽工程发电厂竖井混凝土在使用 6 个月就受到了盐离子腐蚀破坏,在国内外水工建筑物中较为罕见<sup>[6]</sup>;甘肃省某灌区工程在经过 20 多年的盐侵与冻融循环后,已经大大破坏<sup>[7]</sup>,导致修复加固成本过高。

值得关注的是,长期以来混凝土结构设计中,大多偏重于建筑物的使用性能及安全水平,对结构所处特殊工作环境所诱发的材料耐久性损伤与劣化认知并不够深入<sup>[8]</sup>,正如《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)<sup>[9]</sup>所述:“化学环境作用对混凝土的腐蚀,至今尚缺乏足够的数据积累和研究成果”。目前,已有不少学者就混凝土的盐冻损伤问题展开了研究。Jiang 等<sup>[10]</sup>、Zhao 等<sup>[11]</sup>发现冻融循环和盐腐蚀相互促进,性能劣化有叠加趋势,混凝土损伤程度主要取决于盐溶液类型。与清水溶液不同,盐溶液具有吸湿性<sup>[12]</sup>,使混凝土的饱水程度提高,此时孔隙溶液的结冰压很大<sup>[13]</sup>,当形成的拉应力大小超过混凝土本身的抗拉强度时,则容易形成微裂缝,这些裂缝可为盐的渗透提供了更多的流动通道,加速盐离子的扩散过程,并且在一定程度

下,混凝土内、外部分的裂缝会结合在一起,使得混凝土保护层开裂,当保护层开裂后,结构的损伤速率会明显增加,导致钢筋与混凝土黏结强度降低。在诸多盐腐蚀现象中,最常见的当为氯盐和硫酸盐。其中,氯盐的存在主要以盐结晶形式存在,在冻融循环的加速作用下, $\text{Cl}^-$ 向孔隙中渗透、扩散及电化学迁移的速率加快<sup>[14]</sup>,而形成的裂缝也会加快  $\text{Cl}^-$ 的腐蚀速度,相关研究表明裂缝处的氯离子含量是无裂缝处的 2~3 倍,且裂缝越宽,氯离子含量越高<sup>[13]</sup>;冻融循环作用则首先通过增大扩散系数来提高  $\text{Cl}^-$ 结合力,其次通过减少固相来降低  $\text{Cl}^-$ 结合力,此外也会显著增加结合态和游离态氯化物的浓度和渗透深度<sup>[15]</sup>。硫酸盐存在混凝土体系中时主要发生化学侵蚀, $\text{SO}_4^{2-}$ 会与混凝土内部水化产物发生反应,产生膨胀性产物(钙矾石等),一方面使得混凝土内部结构疏松脆弱,另一方面使得混凝土内部孔隙发生膨胀应力,从而发生劣化,力学性能降低;当硫酸盐与氯盐共同作用时,金祖权等<sup>[16]</sup>发现腐蚀初期,硫酸盐的存在会提高混凝土抗氯离子扩散能力,而腐蚀后期则降低,并且腐蚀产物初期填充在混凝土的孔洞和骨料-浆体界面区,随腐蚀龄期增加,则会膨胀并形成大量裂缝,劣化混凝土性能。由此可知盐冻过程中,混凝土微观孔隙结构变化与宏、细观耐久性能有着密切联系<sup>[17]</sup>。Zheng 等<sup>[18]</sup>发现盐冻作用后混凝土孔隙率、孔隙体积和孔隙数量增加,导致混凝土抗压强度、相对动弹性模量降低。

在这些初步认识下,人们将纤维加入到混凝土中来试图提高混凝土在复杂服役环境下的耐久性。目前,常见的纤维如:聚丙烯纤维(PPF)、聚丙烯腈纤维(PANF)、聚酯纤维(PEF)、纤维素纤维、玄武岩纤维以及钢纤维(SF)等,均在在裂缝控制、抗腐蚀、抗冻融破坏等方面有积极作用,可以增加混凝

土的韧性<sup>[19-20]</sup>，应用较广。其中，PANF 与 PPF 高度相似，直径略小(小于 40 μm)、单位体积数量多、易分散、抗酸碱和耐高温性强、弹性模量高等优点，在水泥路面、机场道面及水利工程中的面板坝中被使用<sup>[21-23]</sup>，在适应较为复杂恶劣的环境中有较大优势<sup>[24]</sup>。文献[24-25]表明，PANF 可通过增加混凝土的含气量，从而提高在(-15~5℃)环境下的抗压、抗拉和抗弯等性能。此外，也有学者证明 PANFRC 抗冻耐久性与 PPFRC 有着相似的规律<sup>[26]</sup>，当以较低的掺量(纤维体积率<0.2%)掺入混凝土拌合物中，能有效减少因失水、温差、自干燥等因素引起的原生裂隙尺度，增强混凝土结构的整体性和连续性，提高抗塑裂能力。

高寒气候环境下，硬化后混凝土的细观结构与常规混凝土不同，而盐冻作用下混凝土发生表层剥落、开裂、分层和骨料暴露等过程，如有外部应力存在，易发生局部断裂现象。从现有研究来看，纤维混凝土的细观孔隙结构损伤规律尚未得到充分的研究。本文以 PANFRC 的盐冻耦合试验为基础，分析了损伤层厚度、整体应力与损伤层应力、内部缺陷、孔隙结构及弯曲强度的演化过程，并进一步建

立了孔隙结构与密实程度和弯曲强度的定量关系，研究结果有助于进一步认识混凝土的盐冻损伤机理。

## 1 试验概况

### 1.1 试验样品

本次试验在西藏地区某工程实验室进行。水泥采用高争牌 P·O 42.5 级水泥；细骨料为当地天然河砂(中砂)；粗骨料为粒径约 4.75~31.5 mm 的碎石，其中小石粒径 4.75~9.5 mm，中石粒径 9.5~19.0 mm，大石粒径 19.0~31.5 mm；粉煤灰为当地生产 II 级粉煤灰；减水剂为标准型聚羧酸高性能减水剂；拌合水采用普通自来水；试验中采用束状单丝 PANF，所用材料性能指标见表 1。混凝土设计强度等级为 C40，水胶比为 0.32，混凝土质量配合比水泥：粉煤灰：水：细骨料：粗骨料：减水剂为 487：97.4：185：587：1 191：11.7。纤维掺量选取参考文献[27-30]进行，为 0 kg/m<sup>3</sup>、0.5 kg/m<sup>3</sup>、0.9 kg/m<sup>3</sup>、1.2 kg/m<sup>3</sup>、1.5 kg/m<sup>3</sup>和 1.8 kg/m<sup>3</sup>，分别标记为：0PAN/PC(素混凝土)、0.5PAN/PC、0.9PAN/PC、1.2PAN/PC、1.5PAN/PC 及 1.8PAN/PC。

表 1 试验材料基本性能

Table 1 Basic properties of experimental materials

材料	基本性能
水泥	烧失量：2.28%；三氧化硫：2.27%；氧化镁：1.34%；标准稠度：27.20%；氯离子：0.013 2；比表面积：368 m <sup>2</sup> /kg
粉煤灰	烧失量：3.63%；三氧化硫：1.74%；氧化镁：1.67%；氯离子：0.015
细骨料	表观密度：2 635 kg/m <sup>3</sup> ；细度模数：2.7；含泥量 1.1%
粗骨料	均为碎石，小石：中石：大石比例为 1：5：4
减水剂	pH 值：7；减水率：26.7%；泌水率：20.2%；含气量：2.8%；凝结时间差：初凝+36 min，终凝+15 min；抗压强度比：7 d 158，28 d，147；收缩率比：108%
纤维	密度：1.18 g/cm <sup>3</sup> ；长度：12 mm；直径：12 μm；抗拉强度：537 MPa；弹性模量：7 200；断裂伸长率：22%；熔点：240℃

确定好该混凝土的级配后，在不改变整体配合比的前提下，参照《纤维混凝土应用技术规程》中

对合成纤维的规定<sup>[31]</sup>，加不同掺量的 PANF 制作 PANFRC。试件主要制作流程示意如图 1 所示。

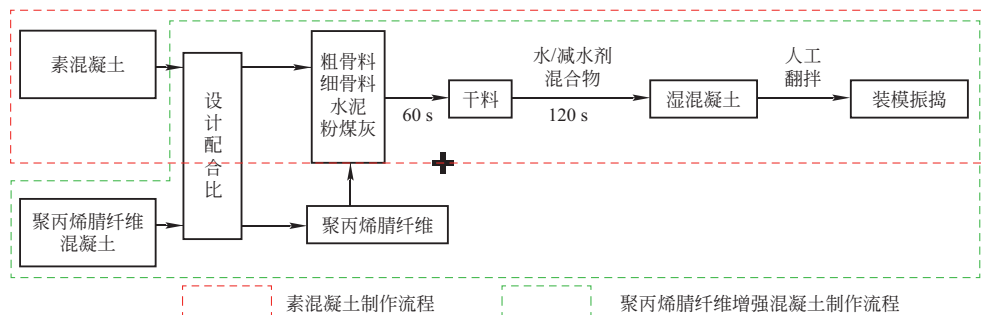


图 1 PANFRC 试件主要制作流程示意图

Fig. 1 Main fabrication flowchart of PANFRC specimen

设计合格的混凝土配合比应该满足其拌合物流动性、保水性好及黏聚性强等特点。高寒地区气候环境复杂，因此对一这工作性能指标要严格把控。本次新拌混凝土工作性能主要以坍落度和含气量为主。试验过程中，发现随着加入不同掺量的 PANF，混凝土的流动性会变差，这是因为纤维对混凝土起到了增稠作用，从而减小了离析概率，进而影响坍落度值，坍落度结果如表 2 所示，可知当不断添加纤维时，会使混凝土的坍落度逐渐变小，且纤维掺量过大会产生团聚趋势，在所研究掺量范围内大概降低约为 4%~20%，并且通过拟合发现，PANF 掺量与坍落度呈线性关系，如式(1)所示。

$$A = 178.81 - 20.82B \quad (1)$$

式中：A 为坍落度；B 为纤维掺量。

当对混凝土添加外加剂，加之搅拌过程的影响，混凝土基体产生气泡，其中气泡体积与混凝土基体总体积之比称之为含气量。当含气量过大，混凝土孔洞增多，导致力学性能变差；当含气量过小，混凝土的和易性又会变差<sup>[32]</sup>，对施工控制不利。本文

通过混凝土含气量测定仪测试含气量，结果如表 2 所示。可知，随着纤维掺量的增加，混凝土含气量呈先增加后下降的趋势，其中含气量最大的试件为 1.5PAN/PC。PANFRC 含气量总体在 4.3%~4.4% 范围内，比素混凝土含气量高 0.15%~0.19%，这是因为纤维在砂浆基体中会随机分布，使微裂隙细化为微小孔洞，因而含气量略有增加，且高寒地区低压特点使这一现象更为明显，但总体上并不会影响强度。对比规范<sup>[33]</sup>中对于高寒环境下的混凝土最大含气量规定要求，发现此次试验 PANFRC 含气量均小于 5.0%，满足此项规定。

此外，测试了室外暴露情况和室内标准养护环境下试件的抗压强度，如表 2 所示。发现受养护环境的制约，室外暴露 28 d 时并未达到设计强度，标准养护 28 d 设计强度满足要求，两种方式 90 d 养护下均满足设计强度。由于试验时间为冬季，温差较大，混凝土水分变化不均匀，因此养护期初期强度发展迟缓，造成上述差异。

表 2 PANFRC 基本性能和强度

Table 2 Basic properties and strength of PANFRC

试件类型	坍落度/mm	含气量/%	室外暴露养护强度/MPa		室内标准养护强度/MPa	
			28 d	90 d	28 d	90 d
0PAN/PC	178	4.20	37.36	42.28	41.23	45.22
0.5PAN/PC	168	4.35	36.96	41.14	42.37	44.84
0.9PAN/PC	162	4.36	37.24	42.85	43.98	45.32
1.2PAN/PC	154	4.38	38.19	43.99	43.32	47.22
1.5PAN/PC	148	4.39	37.34	43.13	43.99	46.17
1.8PAN/PC	140	4.38	37.72	41.99	41.71	45.13

## 1.2 盐冻耦合试验方法

为了研究室外暴露养护状态下混凝土服役期盐冻劣化规律，对达到设计强度的试件进行耐久性试验(本文指养护达到 90 d)。采用快速冻融法开展盐冻耦合试验，冻融介质为 5% MgSO<sub>4</sub> + 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 3.5%NaCl 复合盐溶液，试验时溶液高出试件顶面 20 mm，试验前清水浸泡 4 d，以进一步消除同一配合比混凝土之间的强度差异<sup>[34]</sup>。

将试件装置好以后，设置冻融试验机参数，测温试件的温度阈值设定为(-18℃、5℃)，防冻液的温度阈值设定为(-20℃、25℃)。盐冻循环次数目标设计值为 200 次，最终以实际能承受的盐冻循环次数作为分析处理依据。每间隔 25 次，即一个大循环后，测试计算损伤层厚度、内部缺陷、孔隙结构以

及抗压强度和弯曲强度(图 2)。

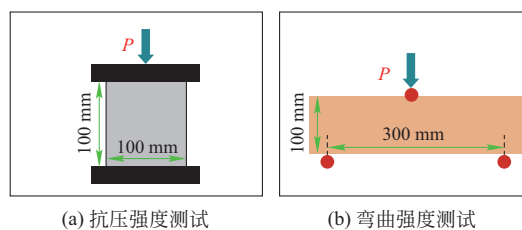


图 2 力学试验方法

Fig. 2 Mechanical test method

## 1.3 损伤层及缺陷检测方法

### 1.3.1 基于超声平测法的混凝土损伤层厚度检测

假定试件界面(盐冻损伤破坏分界线)上层固体为盐冻破坏后的混凝土，下层为未受盐冻破坏的混凝土。混凝土在盐冻耦合作用下，从表面的微裂纹

进而逐步演化为丧失承载力，此时在混凝土表面波的传播速度  $v_1$  要比内部未损伤混凝土的传播速度  $v_2$  小。当折射角  $\alpha = \pi/2$  时，达到一个临界条件，此时由 Snell 定律可得到临界入射角：

$$\alpha_{ic} = \arcsin(v_1/v_2) \quad (2)$$

式中：表面波的传播速度  $v_1$ ；内部未损伤混凝土的传播速度  $v_2$ ； $\alpha_{ic}$  为临界入射角。

当  $T$  (发射)、 $R$  (接收) 换能器距离较近时，超声波以较快的速度首先在损伤层内传播，此时换能器接收端读取的声速数值为损伤层波速  $v_d$ ；当  $T$ 、 $R$  换能器距离较远时，超声波必须透过损伤层向未损伤层传播，此时换能器接收端读取的声速数值为未损伤层波速  $v_u$ ；假设  $T$ 、 $R$  换能器之间的距离为  $l_0$  时，超声波在损伤层中传播到达接收端的时间和两次透过损伤层在未损伤混凝土传播到达接收端的时间相等，此时有式(3)<sup>[35-36]</sup>：

$$\frac{l_0}{v_d} = \frac{2\sqrt{h_f^2 + x^2}}{v_d} + \frac{l_0 - 2x}{v_u} \quad (3)$$

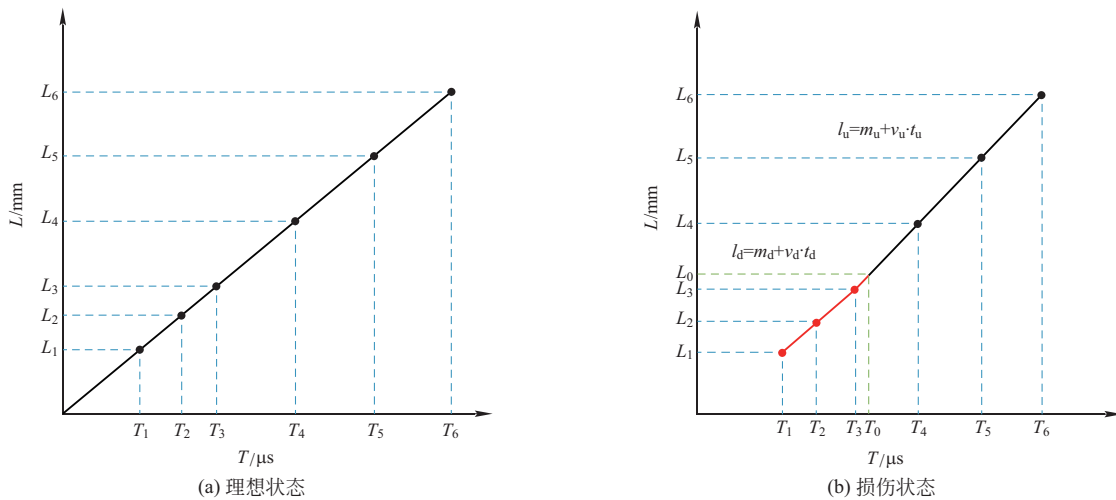


图3 测距与声时关系曲线

Fig. 3 Relationship between distance measurement and sound time

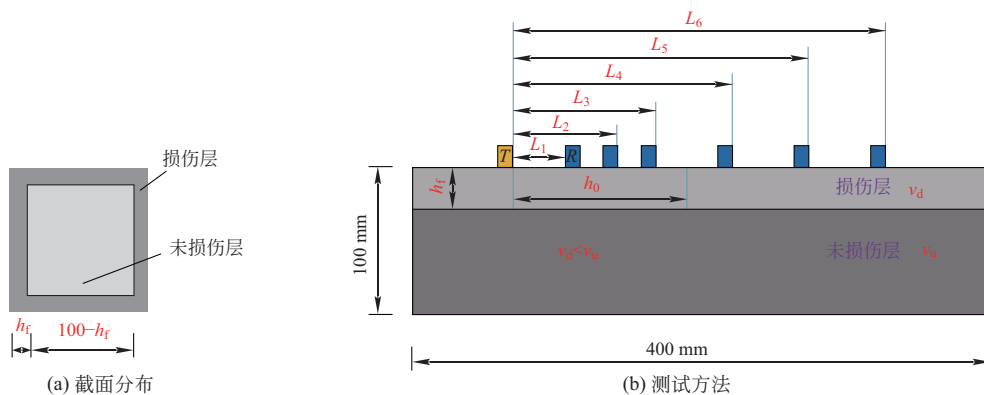


图4 损伤厚度测试示意图<sup>[36]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of damage thickness test<sup>[36]</sup>

进而可得到混凝土的损伤层厚度  $h_f$ ：

$$h_f = \frac{l_0}{2} \sqrt{\frac{v_u - v_d}{v_u + v_d}} \quad (4)$$

图3为混凝土在无损伤与受损状态下的测距-声时关系曲线。依据图3，基于线性回归法得到损伤层、未损伤层的时-距关系曲线式(5)和式(6)。

$$l_d = m_d + v_d t_d \quad (5)$$

$$l_u = m_u + v_u t_u \quad (6)$$

由式(5)、式(6)式得到声速突变处测距方程为：

$$l_0 = \frac{m_d v_u - m_u v_d}{v_u - v_d} \quad (7)$$

每25次盐冻循环试验结束后，在棱柱体试件表面较为平整的一侧布置测点，进行损伤层厚度测试。测距依次为50 mm、75 mm、100 mm、150 mm、200 mm、250 mm，如图4所示。为保证混凝土与换能器接触良好，采用凡士林作为耦合剂。

### 1.3.2 基于超声对测法的混凝土内部缺陷检测

盐冻作用下混凝土宏观性能的衰减与其变形和裂隙的发展密切相关，采用超声对测法可以了解试件在劣化过程中内部缺陷。每 25 次盐冻循环试验结束后，采用混凝土相互平行的两个侧面对混凝土内部缺陷进行检测，共计 20 个测点，测点与测点之间距离均匀，以进一步消除超声路径改变对分析结果的影响，测线布置如图 5 所示。

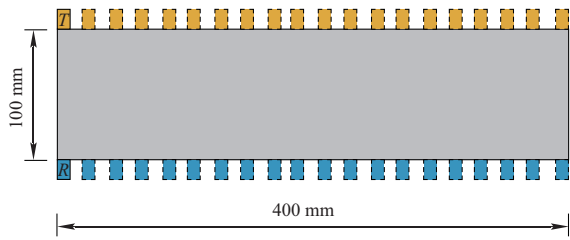
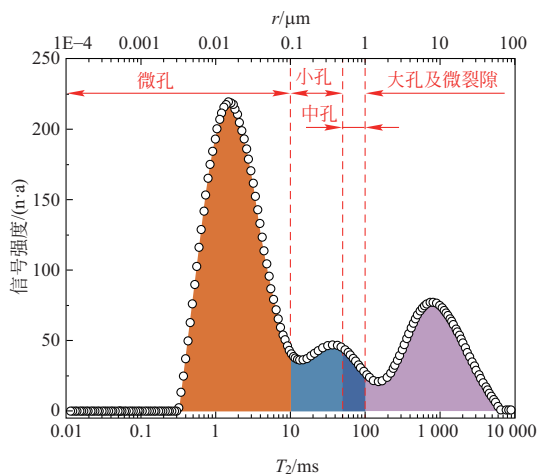


图 5 混凝土内部缺陷测试示意图<sup>[37]</sup>

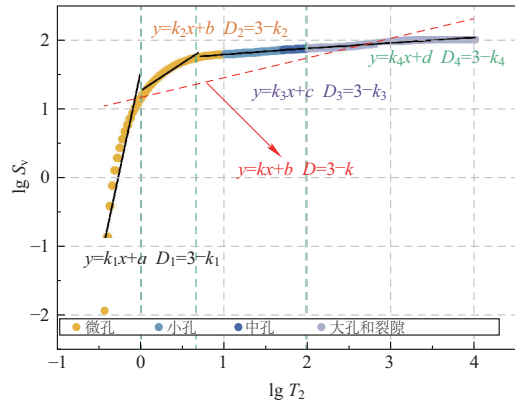
Fig. 5 Schematic diagram of internal defect test of concrete<sup>[37]</sup>

### 1.4 孔隙结构检测及分析方法

采用 MesoMR23-060H-1 型核磁共振 (NMR) 分析系统，测定 PANFRC 在盐冻过程中的孔隙结构参数。测试样本尺寸为 50 mm×50 mm 的圆柱体样本，由金刚石钻芯机钻取。试验前需要将测试样本置于 -0.1 MPa 的真空饱水装置中 24 h，使样本达到吸水饱和状态。本文参考相关文献对孔隙类型的划分<sup>[38-39]</sup>，通过  $T_2$  图谱测试结果对微孔、小孔、中孔、大孔和微裂隙分别计算孔径分布占比，并且参考孔隙体积分形理论<sup>[40]</sup>，求得分形维数  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  以及总孔隙的分形维数  $D$ 。孔隙半径划分及分形维数计算方法如图 6 所示。



(a) 孔隙划分标准



(b) 孔体积分形维数计算方法

图 6 孔隙划分及分形维数计算方法

Fig. 6 Calculation methods of pore division and fractal dimension

## 2 结果及分析

### 2.1 损伤层厚度演化规律

图 7 为 PANFRC 损伤层厚度与盐冻循环次数关系。可知随着盐冻循环次数的增加，各组试件损伤层厚度线性增大。劣化过程中， $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  及  $\text{Cl}^-$  等离子不断进入混凝土的孔隙与裂隙中，混凝土的膨胀密实区逐渐从外部向内部移动，表面蓬松区域逐渐增大增厚，进而损伤层厚度逐渐呈增大之势，素混凝土虽然受盐冻次数短，但损伤劣化程度最深。盐冻循环 50 次时，各组试件的损伤层厚度大小依次为：0PAN/PC > 0.5PAN/PC > 0.9PAN/PC > 1.5PAN/PC > 1.8PAN/PC > 1.2PAN/PC；盐冻循环 100 次时，各试件的损伤层厚度大小依次为 0PAN/PC > 0.9PAN/PC > 0.5PAN/PC > 1.8PAN/PC > 1.5PAN/PC；盐冻循环 150 次时，各试件的损伤层厚度大小依次为 0.5PAN/PC > 0.9PAN/PC > 1.2PAN/PC > 1.5PAN/PC > 1.8PAN/PC；盐冻循环 200 次时，各试件的损伤层厚度大小依次为 1.5PAN/PC > 1.8PAN/PC。通过对比分析发现，高纤维掺量 ( $>1.5 \text{ kg/m}^3$ ) 对盐冻损伤层厚度增加有较好的抑制作用。

同样采取超声平测法对正常养护的素混凝土试件进行了损伤层厚度测试，发现历经 150 次、200 次循环后损伤层厚度为 10.02 mm、12.66 mm。对比分析可知，前者大致与 1.5PAN/PC、1.8PAN/PC 盐冻 150 次一致，后者大致与 1.2PAN/PC、1.5PAN/PC 盐冻 150 次及 175 次接近。可见自然养护相对于标准养护不仅使试件存在初始缺陷，而且也加剧盐冻过程

中的损伤，PANF 则对混凝土的盐冻劣化有减缓作用。

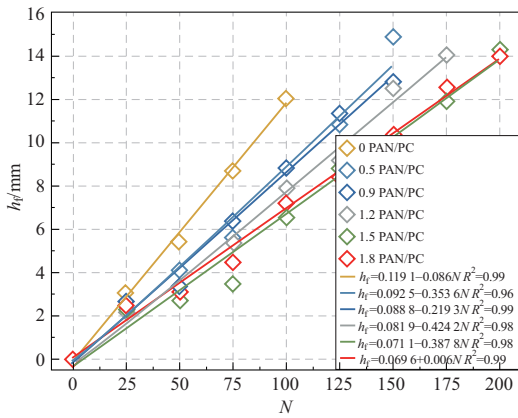


图 7 损伤层厚度关系

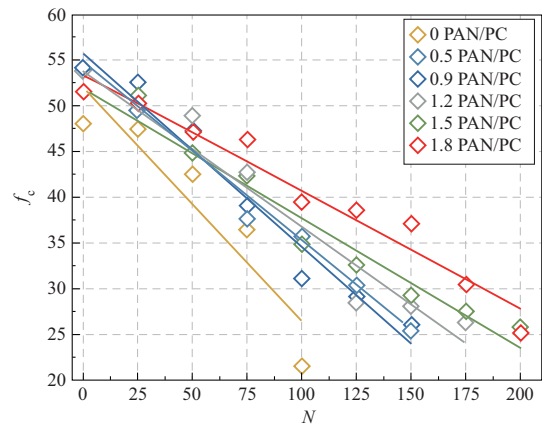
Fig. 7 Relationship of damage layer thickness

## 2.2 损伤层应力分析

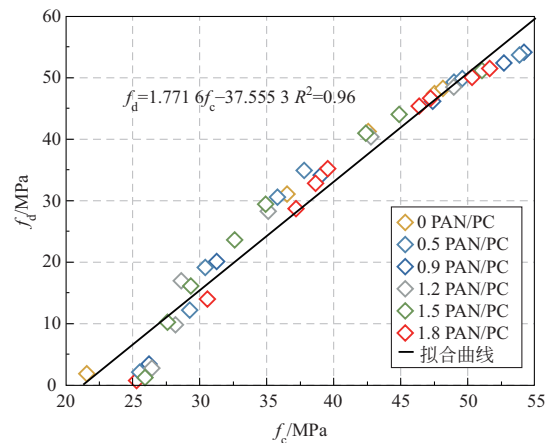
不同盐冻循环次数下 PANFRC 抗压强度如图 8 (a)所示，抗压强度随盐冻循环次数增加呈线性下降关系。对比分析发现，在 50 次盐冻循环前，混凝土的抗压强度损失较小，比较缓慢，盐冻循环 25 次时，抗压强度损失率在 5% 以内；盐冻循环 50 次时，抗压强度损失率小于 15%；100 次盐冻循环后，混凝土试件抗压强度损失较大，且损失速率逐渐增大，盐冻循环 100 次时，各组试件的抗压强度损失率分别为 52.83%、33.66%、42.46%、32.04%、32.16% 及 23.40%，素混凝土损失率大于 50% 以上，试件破坏，不再试验；此时 1.8PAN/PC 仅损失 23.40%。在盐冻循环初期，主要是以冻融损伤为主，且集中在试件表层(砂浆基体)，对试件强度影响较小；随着盐冻循环的持续进行，腐蚀损伤作用也增大，在冻融与腐蚀耦合作用下，试件由表及里发生损伤，强度呈现迅速下降的趋势，整个过程抗压强度随盐冻循环次数线性下降。

盐冻作用过程中，混凝土损伤层厚度的增大，导致损伤层的承载能力减弱，使得试件的整体压荷载基本由未损伤层承担，直接导致了混凝土整体抗压强度的下降。试验结束时，素混凝土和 PANFRC 损伤层仅能够承受的荷载均小于 4 MPa。因而，经历盐冻循环的混凝土整体抗压强度  $f_c$  与损伤层抗压强度  $f_d$  之间也应存在相关性。对  $f_c$  和  $f_d$  进行回归分析，结果如图 8(b) 所示。发现试验结果与 PANF 掺量之间的关系不大，因此建立一个总的表达式来描述  $f_c$  和  $f_d$  之间的关系，发现  $f_c$  和  $f_d$  之间呈线性相关性，拟合程度较高。运用此经验公式，可以计算出高寒盐冻环

境下混凝土的损伤层平均强度，对试验或工程中分析混凝土的盐冻损伤劣化规律及预估混凝土承载力提供参考。



(a) 抗压强度与冻融循环次数关系



(b) 整体抗压强度与损伤层抗压强度关系

图 8 抗压强度关系

Fig. 8 Relationship of compressive strength

## 2.3 内部缺陷分析

基于超声波对测法获得的声速值，可以绘制试件内部的缺陷云图，以 1.5PAN/PC 组为例，如图 9 所示。研究发现在经历盐冻作用后，试件各测点的声速值下降，表明试件内部不同位置处的孔隙尺寸均有所增大，混凝土受到一定的损伤；而随着缺陷区域面积的扩大，使混凝土内部出现相对疏松状区域，素混凝土与 PANFRC 疏松状区域基本一致，均在试件中部，这是因为试件中部受到多个方向的腐蚀渗透，导致声速相对下降较快。因此，在盐冻过程中，混凝土试件中部的密实度最差，可能成为抵抗荷载破坏最不利的区域，易诱发断裂现象。

对不同位置处的声速求平均值来反映盐冻耦合作用下试件内部的密实程度，结果如图 10 所示。发现，素混凝土与 PANFRC 的整体密实程度与盐冻循环次数可由抛物线表示。当 PANF 掺量小于  $0.9 \text{ kg/m}^3$

时,混凝土破坏时的声速均值小于 3 km/s,当纤维掺量大于 1.2 kg/m<sup>3</sup>时,混凝土破坏时的声速均值大于 3 km/s; 0.5PAN/PC 在盐冻 150 次后的平均声速与素混凝土盐冻循环 100 次时的平均声速一样; 0.9PAN/PC 在盐冻 100 次后的平均声速与素混凝土盐冻循环 75 次时的平均声速一样; 1.2PAN/PC 在盐冻 175 循环次后的平均声速大致与 0.9PAN/PC 试件 130 次的一样,与素混凝土 80 次的一样; 1.5PAN/PC 在盐冻 200 次后的平均声速大致与 0.9PAN/PC 试件 100 次的一样; 1.8PAN/PC 在盐冻 200 次后的平

均声速与 1.2PAN/PC 试件 150 次的一样。总体来说,当纤维掺量大于 1.5 kg/m<sup>3</sup>时,混凝土整体密实程度下降较小,对声速损失抑制比较有效。例如,1.5PAN/PC 在 25 次、50 次、100 次、150 次及 200 次时相对于初始平均声速下降 2.57%、3.32%、3.82%、11.92% 及 22.78%,而素混凝土在 25 次、50 次、100 次时相对于初始平均声速下降 5.52%、16.32% 及 50.56%。以上分析表明 PANF 限制了内部缺陷的发展,从而抑制整体密实程度下降,这与抗压强度的变化规律有良好的一致性。

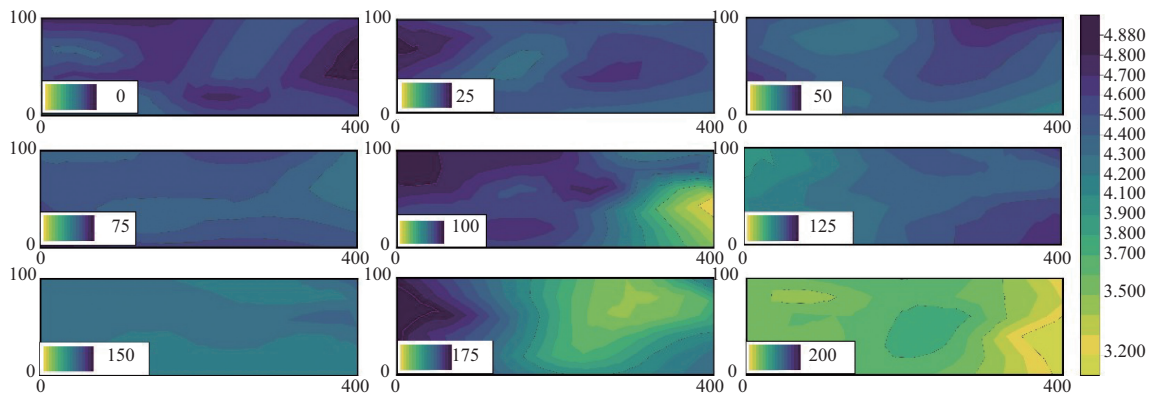


图 9 PANFRC 内部缺陷云图  
Fig. 9 Internal defect contour of PANFRC

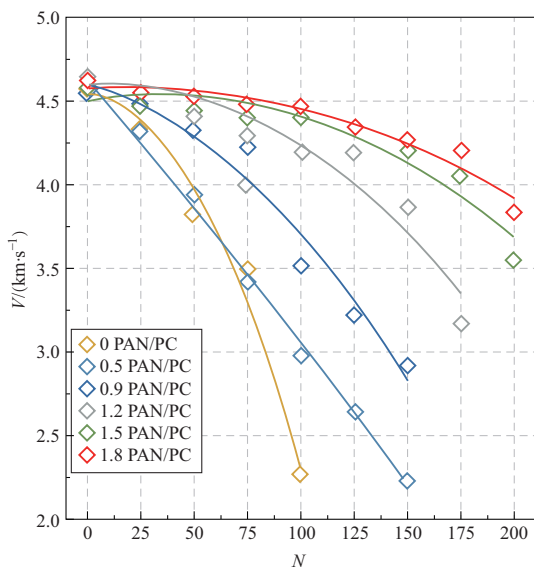


图 10 整体密实程度与盐冻循环次数关系  
Fig. 10 Relationship between the overall compactness and the number of salt-freezing cycles

## 2.4 孔隙结构分析

核磁共振测试得到的  $T_2$  图谱如图 11 所示。PANFRC 盐冻作用后的  $T_2$  谱主要存在 3 个信号峰,横

坐标  $T_2$  越小,则孔隙尺寸和体积越小,孔隙水自由度小,所受束缚力越大<sup>[41-42]</sup>;  $T_2$  越大,则孔隙体积越大,孔隙水自由度大,所受束缚力越小。主峰范围为 0.1~10 ms,可具体对应为半径在 0~0.1  $\mu\text{m}$  内的小、中孔;次峰范围为 10~100 ms,可对应半径 0.1~1  $\mu\text{m}$  内的小、中孔;最小峰范围为 100~10 000 ms,可对应半径范围在  $>1 \mu\text{m}$  的大孔和微裂隙。从图 11 中可以看出,当纤维掺量为 0~1.2 kg/m<sup>3</sup>时,随着盐冻循环的进行,各峰面积逐渐增加,三峰位置出现向右偏移,主峰较其他两峰明显,说明盐冻过程中微小孔隙终归向中、大孔隙转化;当纤维掺量为 1.5~1.8 kg/m<sup>3</sup>时,各峰面积逐渐增加,但主峰有向左微偏趋势,其余两峰仍然向右偏移,这说明当纤维数量达到一定程度后,新生微小孔隙增加速率可能大于原生微小孔隙向中、大孔隙转化率。此外, PANFRC 各峰面积增幅均小于素混凝土,以素混凝土破坏对应的上一次测试结果为准(第 75 次结果),即 100 次盐冻循环后,素混凝土主峰增幅值为 71.94%, 0.5PAN/PC、0.9PAN/PC、1.2PAN/PC、1.5PAN/PC 和 1.8PAN/PC 分别为 6.99%、4.23%、15.11%、6.18% 及 2.06%。

按照第 2.4 节划分方式,统计得到的 PANFRC 孔隙在所含半径区间内的比例,如图 12 所示。对于

微孔, 孔径比例随着盐冻循环次数的增加而降低, 盐冻循环试验结束时, 素混凝土的减少比例为 22.88%, 而 PANFRC 的减少比例最大为 19.77%, 为 1.8PAN/PC; 对于  $>1 \mu\text{m}$  大孔及微裂隙孔径比例随着盐冻循环次数的增加而增大, 100 次盐冻循环后, 素混凝土增加幅度最高, 为 15%, 1.8PAN/PC 增加幅度最小, 为 5%。但对于盐冻循环次数相同的 1.5PAN/PC 和 1.8PAN/PC, 200 次盐冻循环后, 1.5PAN/PC 的微裂隙占比 1.8PAN/PC 少 2%, 可见当 PANF 掺量大于  $1.5 \text{ kg/m}^3$  时可进一步抑制微裂隙的生长来提升抗盐冻能力, 但 1.5PAN/PC 和 1.8PAN/PC 似乎之间的差距并不大。对于小孔隙和中孔隙来说, 素混凝土与微裂隙规律一致, 而

PANFRC 没有出现单调变化规律, 但合计比例在盐冻循环结束时有所增大。综合来看, 总体上 50 次盐冻循环后, 微孔隙向大孔隙和微裂隙演变的速度有加快趋势, 主要体现在微孔隙比例和微裂隙比例上。以素混凝土组为例, 50 次盐冻循环时, 微孔相对于初始时的降幅为 12%, 微裂隙的增幅为 10%, 而对于 25 次盐冻循环, 对应的降幅和增幅仅为 6% 和 2%。再以抗盐冻性能较优的 1.5PAN/PC 为例, 75 次盐冻循环时, 微孔隙相对于初始时的降幅为 4%, 微裂隙的增幅为 8%, 而相对于 50 次盐冻循环, 对应的降幅和增幅仅为 -5% 和 1%。由于大孔隙和微裂隙相比微小孔隙, 在盐冻过程中产生的静水压力较大, 因此成为盐冻破坏的主要微观因素。

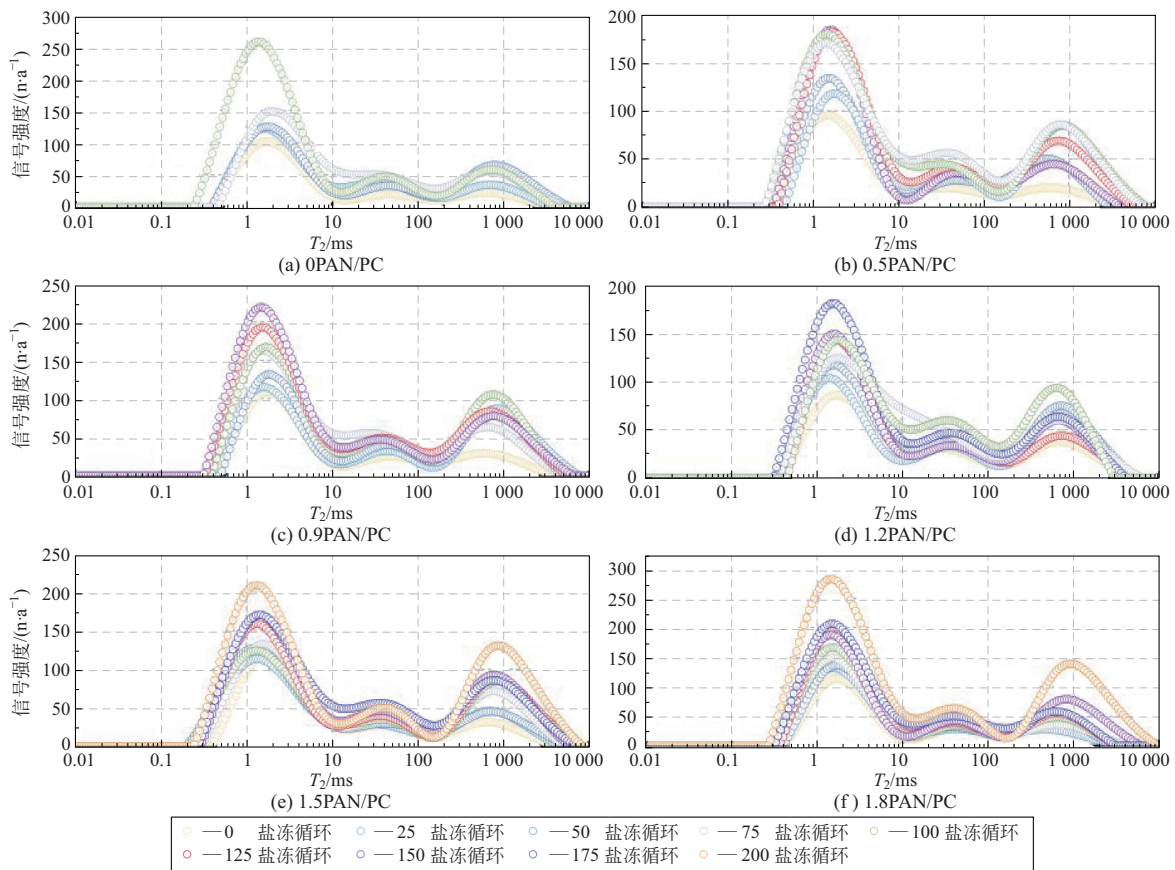
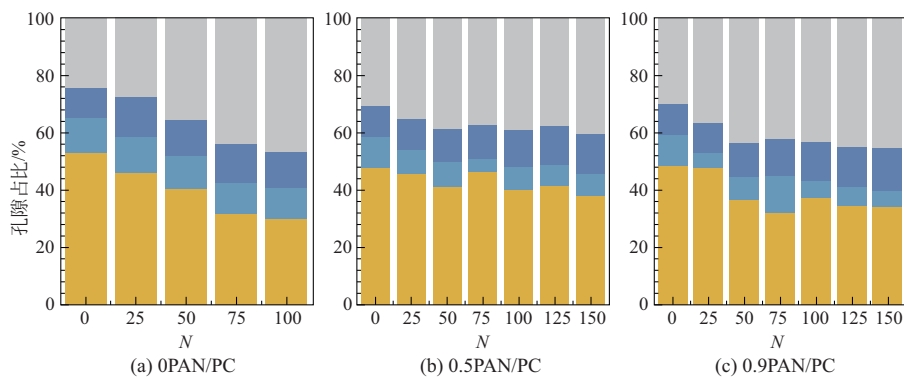


图 11 PANFRC 的  $T_2$  谱图 (0PAN/PC~1.8PAN/PC)

Fig. 11  $T_2$  spectrum of PANFRC



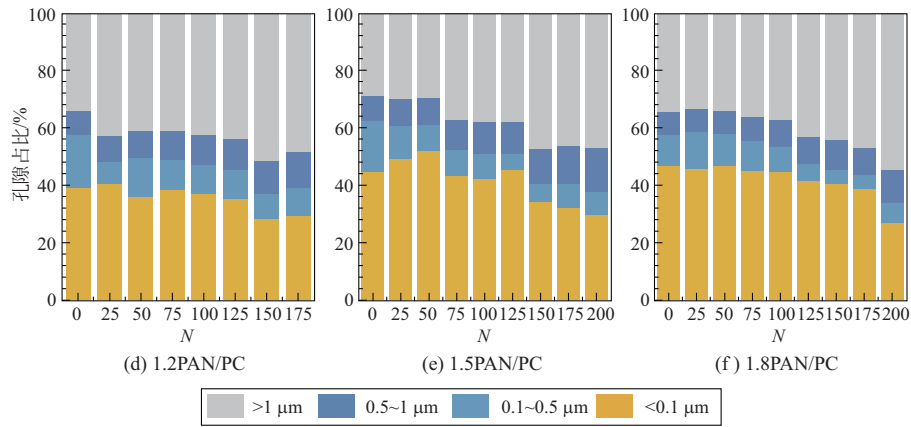


图 12 PANFRC 孔隙比例  
Fig. 12 Pore ratio of PANFRC

图 13 为不同尺寸孔隙的体积分形维数与盐冻循环次数的关系。可知，混凝土中无论有否 PANF，在盐冻耦合作用下， $D_1$  随冻融循环次数增加而增加， $D_2$ 、 $D_3$  及  $D_4$  均随冻融循环次数增加而减小，总的孔隙体积分形维数  $D$  也是减小的。对于微孔分形维数  $D_1$ ，素混凝土在 1.42 ~ 1.63 之间，这和薛慧君等人<sup>[43]</sup>的结果接近，该结果为 1.41 ~ 1.65，但其仅考虑了冻融影响，没有考虑盐的腐蚀作用，同时  $D_1 < 2$ ，

说明微孔的孔隙结构较为简单，不均匀性较小，并不具备分形结构。Qin 等<sup>[44]</sup>曾也指出对于封闭孔隙，分形特征并不明显，而半径小于  $0.1 \mu\text{m}$  的孔隙属于封闭孔隙，与本文结果具有相似性。当半径  $> 0.1 \mu\text{m}$  之间时， $D_2$ 、 $D_3$  和  $D_4$  在 2 ~ 3 之间，说明中孔、大孔及微裂隙均具有多重分形结构。因而，可知盐冻耦合作用下，孔隙不仅是微孔转化大孔、裂隙，数量增加的过程，孔隙结构的发育也是呈现增维过程。

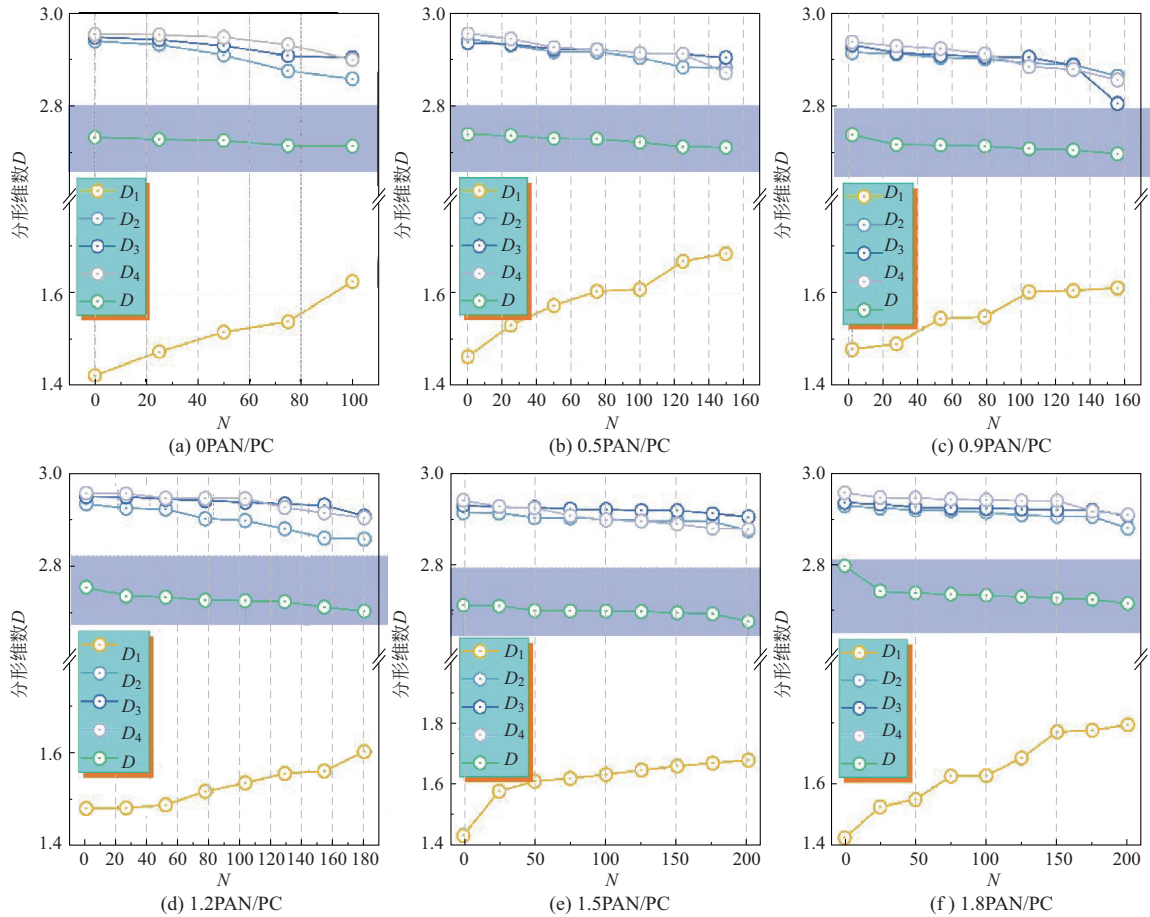


图 13 PANFRC 孔隙体积分形维数  
Fig. 13 Fractal dimension of pore volume of PANFRC

在多孔材料内部，除了用孔隙自身表征孔隙结构外，连系孔隙与孔隙之间的通道，也是研究孔隙结构的重点，大多学者倾向于称为孔喉<sup>[45]</sup>。在 NMR 测试当中一般只统计半径在 0~25 μm 之间的孔喉。在盐冻耦合作用下，混凝土内部孔隙结构作为一个储存空间，主要起赋存流体作用，进而影响混凝土其他性能，而孔喉则作为流体的重要通道，不仅影响材料内部自身的连续性，也影响渗流连续性。图 14 给出了 PANFRC 在盐冻循环过程中的孔喉分布柱状统计图，为了便于分析，如图 14 中尺寸划分方法，分别定义为小孔喉、中孔喉、大孔喉、超大孔喉及裂隙孔喉。可知小孔喉体积总是占据绝大多数，当 PANF 掺量小于 0.5 kg/m<sup>3</sup> 时，随着盐冻循环次数的增加，体积占比减小；对于 0.9PAN/PC、1.2PAN/PC、1.5PAN/PC、1.8PAN/PC，孔喉体积占比先增大后减小，这说明当 PANF 掺量小于 0.5 kg/m<sup>3</sup> 时，盐冻循环对原有的小孔喉发展不利，因而加速了混凝土的细观损伤，导致宏观指标速率下降快，经受盐冻循环次数少；而 PANF 掺量大于 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时，

小孔喉在变大的同时，也会衍生新的小孔喉，而这些新的孔喉是原有的以及新生的孔隙在联通作用下形成的。对于半径在 0.1~0.16 μm 范围内的中孔喉：随着盐冻循环次数的增加，素混凝土、0.5PAN/PC 及 1.2PAN/PC 孔喉体积占比先增大后减小，大致呈一个正态分布，0.9PAN/PC、1.5PAN/PC 及 1.8PAN/PC 孔喉体积总体减小，说明对于这一区间范围的微小孔喉来说，随着纤维掺量的增加，盐冻循环对其有负相关作用，而 0.9PAN/PC 应作为一个临界值。对于半径在 0.16~10 μm 范围内的大孔喉：盐冻循环对其孔喉占比的影响不大，说明这一范围内孔喉总是保持动态平衡，从而延续内部损伤的变化。对于半径在 10~16 μm 范围内的超大孔喉：随着盐冻循环次数的增加，占比均增加，对混凝土内部细观损伤影响较大。对于半径在 16~25 μm 范围内的裂隙孔喉：随着盐冻循环次数的增加，占比均增加，对混凝土内部细观损伤影响起主要作用。分析表明：盐冻耦合作用下，小孔喉联通转化为超大孔喉及裂隙孔喉也是混凝土内部细观损伤变化的一个重要原因。

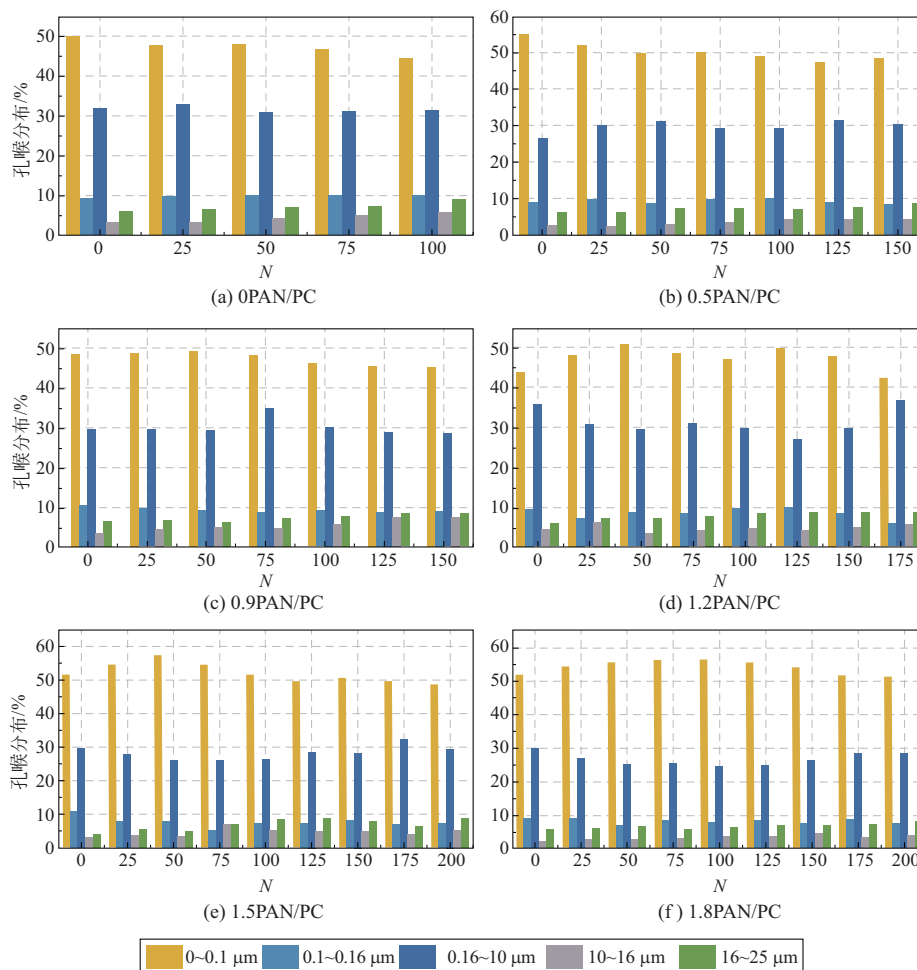


图 14 PANFRC 孔喉分布

Fig. 14 Pore throat distribution of PANFRC

## 2.5 弯曲强度劣化分析

冻融循环前,与素混凝土相比,PANFRC弯曲强度随纤维掺量增加而增加,最大可增加1.1 MPa(1.8PAN/PC)。盐冻耦合作用下,各组试件的弯曲强度均随盐冻循环次数的增加线性下降,使得弯曲强度损失率随盐冻循环次数的增加而增大,如图15所示。盐冻耦合作用使试件表面的裂纹数量、裂纹宽度增加,因此裂纹有效面积增加。当混凝土试件受到载荷时,混凝土本身的有效受力面积减小,导致应力集中,从而降低了弯曲强度;此外,盐冻耦合劣化对PANFRC的负向作用明显小于素混凝土。100次盐冻循环试验后,弯曲性能表现为:1.8PAN/PC > 1.2PAN/PC > 1.5PAN/PC > 0.9PAN/PC > 0.5PAN/PC > 素混凝土;150次盐冻循环试验后,混弯曲性能表现为:1.8PAN/PC > 1.5PAN/PC > 1.2PAN/PC > 0.9PAN/PC > 0.5PAN/PC;可见1.8PAN/PC和1.5PAN/PC两组在盐冻中后期性能较好,故可知当纤维掺量大于1.5 kg/m<sup>3</sup>时,对混凝土盐冻过程中的韧性改善有积极作用。而PANF的这种增强效应主要是因为其自身抗拉强度、应力应变比和断裂伸长率等力学特性较高,在混凝土中具有增强、阻裂和增韧等作用,可限制盐冻过程中裂缝的发育,进而收缩Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的扩散通道,减少腐蚀产物产生,减缓膨胀破坏进程。而在弯曲荷载下,混凝土跨其中,微裂隙占比与密实程度和抗压强度关系为:

$$f(x, y) = -458.14 + 511.22x + 399.61y - 366.28xy - 95.65y^2 + 54.18xy^2 + 7.22y^3 \quad R^2 = 0.8919 \quad (8)$$

式中: $f(x, y)$ 为抗压强度,MPa; $x$ 为密实程度,km/s; $y$ 为微裂隙占比,%。

裂隙孔喉占比与密实程度和抗压强度关系为:

$$f(x, y) = -441.37 + 2.05 \times 10^3 x + 395.20y - 1.30 \times 10^2 xy - 106.37y^2 + 192.4xy^2 + 9.44y^3 \quad R^2 = 0.8781 \quad (9)$$

式中: $f(x, y)$ 为抗压强度,MPa; $x$ 为密实程度,km/s; $y$ 为裂隙孔喉占比,%。

微裂隙分形维数与密实程度和抗压强度关系为:

$$f(x, y) = 9.32 \times 10^3 - 3.38 \times 10^3 x - 5.13 \times 10^3 y + 1.93 \times 10^3 xy + 618.97y^2 - 262.63xy^2 + 14.26y^3 \quad R^2 = 0.8131 \quad (10)$$

式中: $f(x, y)$ 为抗压强度,MPa; $x$ 为密实程度,km/s; $y$ 为微裂隙分形维数。

总孔隙分形维数与密实程度和抗压强度关系为:

$$f(x, y) = 1.94 \times 10^4 - 7.30 \times 10^3 x - 1.02 \times 10^3 y + 3.90 \times 10^3 xy + 1.25 \times 10^3 y^2 - 505.63xy^2 + 12.06y^3 \quad R^2 = 0.8944 \quad (11)$$

式中: $f(x, y)$ 为抗压强度,MPa; $x$ 为密实程度,km/s; $y$ 为总孔隙分形维数。

中裂缝扩展会先绕过纤维分布较多且均匀的部位,使裂缝的路径延长,并且在整个受力过程中PANF吸收了一部分能量,进而达到提升韧性作用。

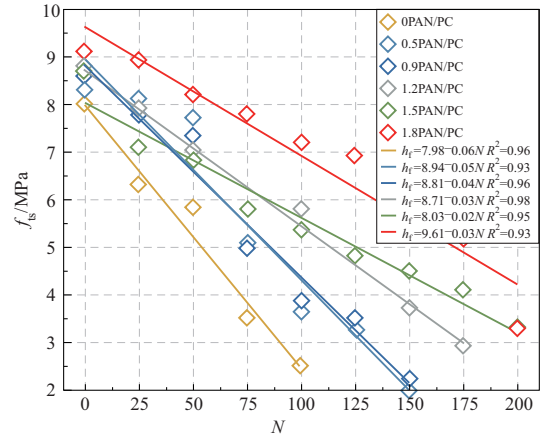
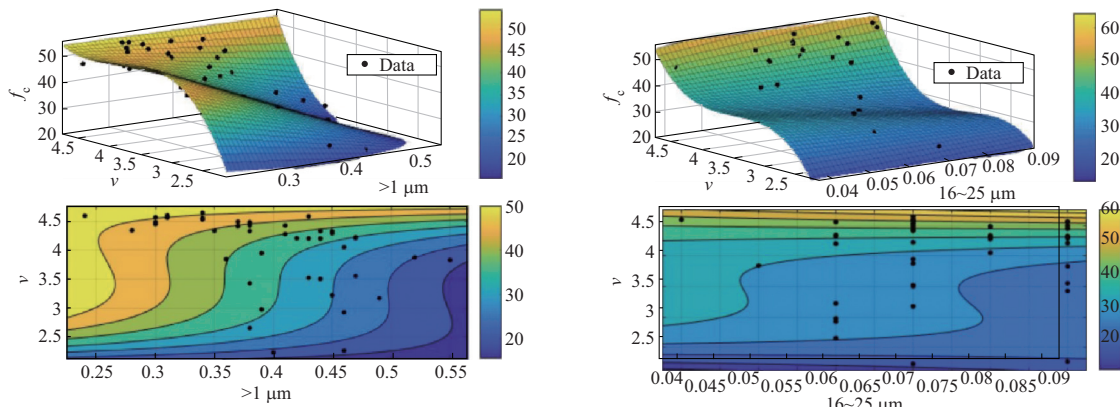


图15 PANFRC弯曲强度

Fig. 15 Bending strength of PANFRC

## 2.6 孔隙结构与密实程度、整体抗压强度关系

由前述分析可知,盐冻过程中孔隙结构的演变与混凝土的密实程度和力学性能息息相关,其中微裂隙占比、裂隙孔喉占比以及裂隙结构形态为主要因素。因此,本文采用Matlab中多项式曲线拟合功能,得到孔隙结构与密实程度、抗压强度的三维曲面模型,如图16所示。



(a) 微裂隙占比与密实程度和整体抗压强度关系

(b) 裂隙孔喉占比与密实程度和抗压强度关系

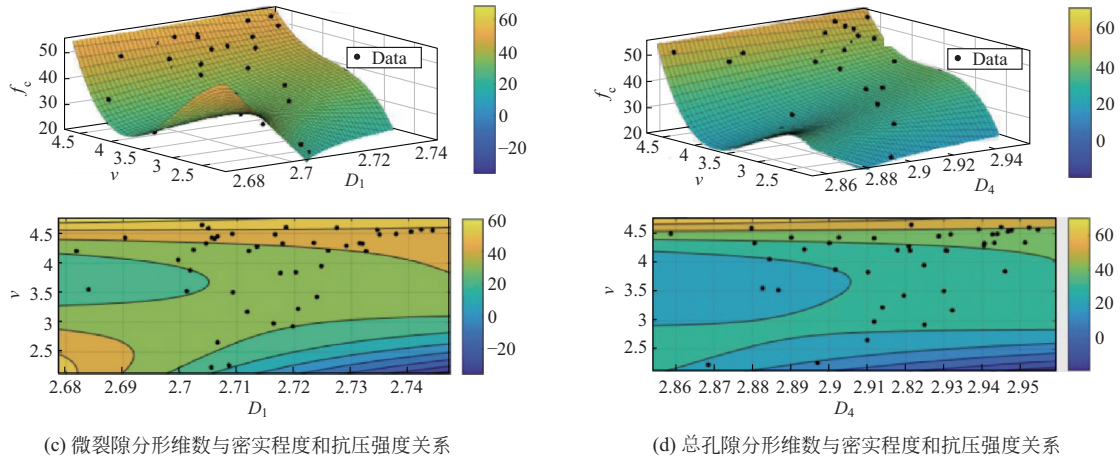


图 16 孔隙结构与密实程度、抗压强度关系

Fig. 16 Relationship between pore structure and compactness/compressive strength

### 3 结 论

本文以盐冻耦合作用下 PANFRC 的内部缺陷及孔隙结构为主要研究对象，结论如下：

(1) 盐冻耦合过程中，混凝土的损伤层厚度逐渐增大，损伤层抗压强度减小，直接导致了混凝土整体抗压强度的变化，分析表明损伤层抗压强度与整体抗压强度呈线性关系。

(2) 历经不同盐冻循环次数后，各组试件整体各测点的声速值下降，内部缺陷区域面积逐渐增加，其中试件中部变化更为明显，是抵抗荷载破坏最薄弱的地方，易诱发断裂现象；PANF 可限制内部缺陷的发展，抑制混凝土密实程度下降，当纤维掺量大于  $1.5 \text{ kg/m}^3$  时，声速损失较少，且中后期对混凝土的韧性改善作用明显。

(3) 盐冻耦合作用下，微孔比例降低，大孔和微裂隙比例增加，小孔和中孔的合计比例有所增大；混凝土内部发生细观损伤主要是由于微小孔隙向大孔和裂隙的转化、大孔及微裂隙数量增加、孔隙结构的增维发育以及小孔喉联通转化为超大孔喉及裂隙孔喉等几个原因导致。

(4) 通过 Matlab 拟合得到了孔隙结构参数与密实程度、抗压强度的三维经验曲面模型，可进一步帮助理解盐冻耦合劣化对混凝土的造成的细观损伤。

#### 参 考 文 献

[1] ZHENG X Y, WANG Y R, ZHANG S Q, et al. Research progress of the thermophysical and mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2022, 330: 127254.  
 [2] 乔宏霞, 朱彬荣, 陈丁山. 西宁盐渍土地区混凝土劣化

机理试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(4): 805-815. (QIAO Hongxia, ZHU Binrong, CHEN Dingshan. Experimental study of the deterioration mechanism of concrete in Xining saline soil area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(4): 805-815. (in Chinese))

[3] 王家滨, 牛荻涛, 何晖, 等. 盐湖侵蚀环境喷射混凝土耐久性能劣化规律及机理研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(6): 67-80. (WANG Jiabin, NIU Ditao, HE Hui, et al. Durability deterioration and corrosion mechanism of shotcrete in salt lake environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 67-80. (in Chinese))

[4] 林勇杰, 郑绵平. 青藏高原盐湖反风化作用与关键元素循环[J]. 地球学报, 2024, 45(5): 777-790. (LIN Yongjie, ZHENG Mianping. Reverse weathering in salt lakes on the Qinghai-Tibet Plateau and its implications for key element cycling[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024, 45(5): 777-790. (in Chinese))

[5] 马颖彪. 硫酸盐侵蚀条件下纤维素纤维混凝土力学性能试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (MA Yingbiao. Experimental study on mechanical properties of cellulose fiber concrete under sulfate attack [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese))

[6] 贺传卿, 李永贵, 王怀义, 等. 硫酸盐对水泥混凝土的侵蚀及其防治措施[J]. 混凝土, 2003(3): 56-57, 51. (HE Chuanqing, LI Yonggui, WANG Huaiyi, et al. Corrosion by sulphate and solution [J]. Concrete, 2003(3): 56-57, 51. (in Chinese))

[7] 田子荀. 盐冻复合作用下渡槽排架耐久性劣化规律研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018. (TIAN Zixun. Study on the durability deterioration law of aqueduct under salty solution frost [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese))

[8] 李洪飞. 玄武岩纤维细石混凝土抗盐冻性能试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021. (LI Hongfei. Experimental study on salt frost resistance of basalt fiber fine aggregate concrete [D]. Zhengzhou: North China

- University of Water Resources and Electric Power, 2021. (in Chinese))
- [9] 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Standard for design of concrete structure durability; GB/T 50476—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese))
- [10] JIANG L, NIU D T, YUAN L D, et al. Durability of concrete under sulfate attack exposed to freeze - thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 112: 112-117.
- [11] ZHAO X L, WEI J, LIU Z K. Durability of concrete under multi-damage action[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2004, 19(2): 73-75.
- [12] 曹瑞实, 田金亮. 不同除冰盐冻融环境下对混凝土耐久性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(12): 2632-2636. (CAO Ruishi, TIAN Jinliang. Different deicing salt influence on the durability of concrete in freeze-thaw environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(12): 2632-2636.(in Chinese))
- [13] 张君, 居贤春, 公成旭. 混凝土中的裂缝对氯盐侵蚀作用的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(6): 720-724. (ZHANG Jun, JU Xianchun, GONG Chengxu. Effect of cracks in concrete on chloride penetration[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(6): 720-724.(in Chinese))
- [14] 杨启斌, 陈峰. 玄武岩纤维高性能混凝土抗渗性能试验[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(2): 95-98. (YANG Qibin, CHEN Feng. Experiments on high performance basalt fiber concrete impermeability [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(2): 95-98.(in Chinese))
- [15] JIANG W Q, SHEN X H, HONG S X, et al. Binding capacity and diffusivity of concrete subjected to freeze-thaw and chloride attack; a numerical study [J]. Ocean Engineering, 2019, 186: 106093.
- [16] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 630-635. (JIN Zuquan, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. Damage of concrete in sulfate and chloride solution[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(5): 630-635.(in Chinese))
- [17] 甘磊, 冯先伟, 沈振中, 等. 盐冻交替作用下混凝土强度与细观孔结构关系[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2023, 54(12): 4860-4869. (GAN Lei, FENG Xianwei, SHEN Zhenzhong, et al. Relationship between strength and fine-scale pore structure of concrete under effect of salt-freezing alternation [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2023, 54(12): 4860-4869.(in Chinese))
- [18] ZHENG X C, LIU F, LUO T, et al. Study on durability and pore characteristics of concrete under salt freezing environment[J]. Materials, 2021, 14(23): 7228.
- [19] 覃源, 关科, 马颖彪, 等. 硫酸盐干湿循环下纤维混凝土的耐久性及其寿命[J]. 水力发电学报, 2021, 40(9): 141-150. (QIN Yuan, GUAN Ke, MA Yingbiao, et al. Durability and service life of fiber concrete with sulfate admixtures under wet-dry cycling [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(9): 141-150. (in Chinese))
- [20] 甘磊, 吴健, 沈振中, 等. 硫酸盐和干湿循环作用下玄武岩纤维混凝土劣化规律[J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 37-46. (GAN Lei, WU Jian, SHEN Zhenzhong, et al. Deterioration law of basalt fiber reinforced concrete under sulfate attack and dry-wet cycle [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 37-46. (in Chinese))
- [21] XIA D T, YU S T, YU J L, et al. Damage characteristics of hybrid fiber reinforced concrete under the freeze-thaw cycles and compound-salt attack [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01814.
- [22] WANG Y Z, YANG W C, GE Y, et al. Analysis of freeze-thaw damage and pore structure deterioration of mortar by low-field NMR [J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 126097.
- [23] LU J G, LIU J N, YANG H H, et al. Experimental investigation on the mechanical properties and pore structure deterioration of fiber-reinforced concrete in different freeze-thaw media[J]. Construction and Building Materials, 2022, 350: 128887.
- [24] 姚武. 聚丙烯腈纤维混凝土的低温性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 627-631. (YAO Wu. Properties of polyacrylonitrile fiber reinforced concrete at low temperatures[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(5): 627-631.(in Chinese))
- [25] 姚武, 冯炜. 聚丙烯腈纤维混凝土抗冻融耐久性的研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(11): 43-45, 80. (YAO Wu, FENG Wei. Study on durability of freezing-thawing resistance of polyacrylonitrile fiber reinforced concrete[J]. Industrial Construction, 2003, 33(11): 43-45, 80. (in Chinese))
- [26] 陶喆. 氯盐浓度和纤维掺用方式对面板混凝土耐久性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (TAO Zhe. Study on the influence of chlorine salt concentration and fiber admixture on the durability of face concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.(in Chinese))
- [27] 李林香, 谭盐宾, 李康, 等. 玄武岩纤维、聚丙烯腈纤维和聚乙烯醇纤维对混凝土性能影响的对比研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(11): 130-134. (LI Linxiang, TAN Yanbin, LI Kang, et al. Comparative study on effect of basalt fiber, polyacrylonitrile fiber, and polyvinyl alcohol fiber on concrete performance [J]. Railway Engineering, 2019, 59(11): 130-134.(in Chinese))
- [28] 蔡汉超. 聚丙烯纤维和腈纤维对混凝土性能的影响研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014. (CAI Hanchao. Study on the influence of polypropylene fiber and nitrile fiber on the properties of concrete [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014. (in Chinese))
- [29] 邓宗才, 何唯平, 张国庆. 聚丙烯腈纤维对混凝土早期抗裂性能的影响[J]. 公路, 2003, 48(7): 163-165. (DENG Zongcai, HE Weiping, ZHANG Guoqing. Effects of polyacrylonitrile fiber on early cracking properties of concrete [J]. Highway, 2003, 48(7): 163-165. (in Chinese))

- Chinese))
- [30] 王志旺. 聚丙烯腈纤维混凝土性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019. (WANG Zhiwang. Study on properties of polyacrylonitrile fiber concrete[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019. (in Chinese))
- [31] 纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T 221—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Technical specification for application of fiber reinforced concrete: JGJ/T 221—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [32] 胡敏, 李涛涛, 刘中华, 等. 振动加速度对钢纤维高性能混凝土含气量和力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(9): 60-62, 67. (HU Min, LI Taotao, LIU Zhonghua, et al. Effect of vibration acceleration on air content and mechanical properties of steel fiber reinforced high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(9): 60-62, 67. (in Chinese))
- [33] 水工混凝土试验规程: SL 352—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Test code for hydraulic concrete: SL 352—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese))
- [34] 刘怡媛. 高海拔寒冷地区混凝土抗冻耐久性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021. (LIU Yiyuan. Frost resistance durability of concrete in high altitude cold area [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021. (in Chinese))
- [35] 徐存东, 高懿伟, 程昱, 等. 超声波平测法在混凝土盐冻损伤检测中的应用研究[J]. 混凝土, 2019(11): 29-33, 38. (XU Cundong, GAO Yiwei, CHENG Yu, et al. Application of the pulsed ultrasound plane monitor method for inspection of concrete salt frost damage[J]. Concrete, 2019(11): 29-33, 38. (in Chinese))
- [36] 超声法检测混凝土缺陷技术规程: CECS 21—2024[S]. 北京: 中国计划出版社, 2024. (Technical specification for inspection of concrete defects by ultrasonic method: CECS 21—2024[S]. Beijing: China Planning Press, 2024. (in Chinese))
- [37] 徐存东, 王铭岩, 王燕, 等. 超声波平测法在混凝土早期受冻损伤检测中的应用研究[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2019, 40(4): 1-9. (XU Cundong, WANG Mingyan, WANG Yan, et al. Study on the application of ultrasonic flat measurement method in the detection of early frozen damage of concrete[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2019, 40(4): 1-9. (in Chinese))
- [38] WEI Y M, CHEN X Z, CHAI J R, et al. Correlation between mechanical properties and pore structure deterioration of recycled concrete under sulfate freeze-thaw cycles: an experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 134794.
- [39] 薛慧君, 郑建庭, 邹春霞, 等. 冻融作用下风积沙浮石混凝土孔结构分形特征[J]. 工业建筑, 2022, 52(1): 187-193, 142. (XUE Huijun, ZHENG Jianting, ZOU Chunxia, et al. Fractal characteristics of pore structure of aeolian sand pumice concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Industrial Construction, 2022, 52(1): 187-193, 142. (in Chinese))
- [40] ZHANG C Y, LIU T Y, JIANG C, et al. The freeze-thaw strength evolution of fiber-reinforced cement mortar based on NMR and fractal theory: considering porosity and pore distribution[J]. Materials, 2022, 15(20): 7316.
- [41] 黄观送, 苏丽, 薛翠真, 等. 基于核磁共振技术的玄武岩-聚丙烯混杂纤维增强混凝土孔隙特征分析[J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 1034-1048. (HUANG Guansong, SU Li, XUE Cuizhen, et al. Analysis on pore characteristics of hybrid basalt-polypropylene fiber-reinforced concrete based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 1034-1048. (in Chinese))
- [42] 邓祥辉, 梁凯轩, 王睿, 等. 高海拔寒冷地区混凝土抗冻耐久性试验研究[J]. 工程力学, 2023, 40(9): 37-47. (DENG Xianghui, LIANG Kaixuan, WANG Rui, et al. Experimental study on the frost resistance durability of concrete in high altitude and cold regions[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(9): 37-47. (in Chinese))
- [43] 薛慧君, 郑建庭, 邹春霞, 等. 冻融作用下风积沙浮石混凝土孔结构分形特征[J]. 工业建筑, 2022, 52(1): 187-193, 142. (XUE Huijun, ZHENG Jianting, ZOU Chunxia, et al. Fractal characteristics of pore structure of aeolian sand pumice concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Industrial Construction, 2022, 52(1): 187-193, 142. (in Chinese))
- [44] QIN L, ZHAI C, LIU S, et al. Fractal dimensions of low rank coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw based on nuclear magnetic resonance applied for coalbed methane recovery[J]. Powder Technology, 2018, 325: 11-20.
- [45] 张中亚. 硫酸盐环境喷射混凝土细观侵蚀机理及剪切特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. (ZHANG Zhongya. Mesoscopic erosion mechanism and shear properties of shotcrete materials under sulfate-containing environments [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese))

段明翰(1996— ),男,博士研究生。主要从事寒旱区水工纤维混凝土宏/细观损伤机理研究。

覃源(1983— ),男,博士,教授。主要从事水工混凝土结构安全及耐久性研究。

李阳(1991— ),男,博士,副教授。主要从事水工混凝土耐久性 & 损伤修复研究。

袁旭东(2001— ),男,硕士研究生。主要从事纤维混凝土抗冻耐久性研究。