

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220921

# 冻融循环下不同纤维掺量混凝土宏观关系试验研究

付 强<sup>1,2</sup>, 陶 琦<sup>1,2</sup>, 关喜彬<sup>1,2</sup>, 范剑雄<sup>3</sup>, 王悦石<sup>4</sup>

(1. 中铁十九局集团第六工程有限公司, 江苏 无锡 214028; 2. 江苏省装配式建筑绿色智慧制造及施工工程技术研究中心, 江苏 常州 213372; 3. 中国铁路上海局集团有限公司, 上海 200071; 4. 淮阴工学院交通工程学院, 江苏 淮安 223003)

**摘要:** 为探究冻融循环下混杂纤维混凝土宏观特性的关联性, 开展以冻融循环周次及纤维体积掺量为变量的快速冻融循环试验。试验结果表明, 不同冻融循环周次下, 抗压强度与含气量、气泡间距系数及气泡平均弦长呈正相关关系、与气孔比表面积呈负相关关系, 而冻融损伤量与气孔参数则呈相反规律, 且均呈近似线性变化; 冻融循环周次越大, 抗压强度越低、冻融损伤量越大、含气量、气泡间距系数及气泡平均弦长也越大, 而气孔比表面积越小; 混杂纤维的掺入, 优化了气孔结构, 提高了抗冻性。

**关键词:** 纤维混凝土; 冻融循环; 气孔结构; 宏观关系; 抗压强度; 冻融损伤

**中图分类号:** TV431<sup>+</sup>.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0159-04

## 1 引言

相比普通混凝土, 纤维混凝土具有较强抗变形能力和抗冻性, 而不同类型纤维具有不同物理力学特性, 常将 2 种类型以上的纤维(混杂纤维)掺入混凝土中, 取长补短, 以期获得最佳材料工程特性。随着混凝土材料在高寒、高海拔地区应用逐渐普遍, 纤维混凝土抗冻性成为研究热点<sup>[1,2]</sup>。通过快速冻融循环试验, 纤维混凝土宏观特性, 如抗压强度、动弹性模量、抗剥落能力、纵波波速, 均随冻融循环次数的增加而呈下降趋势, 而纤维的掺入对力学性质的折减有不同程度缓解<sup>[3,4]</sup>。经冻融循环后, 素混凝土的气孔平均孔径和孔隙体积显著增加, 且多害孔和有害孔含量增加, 而掺入纤维后少害孔和无害孔占比增加, 同时气孔孔径和体积显著减小, 纤维一定程度上缓解了混凝土冻融劣化进程<sup>[5,6]</sup>。然而, 既有文献在研究冻融条件下纤维混凝土抗冻性时, 要么侧重混凝土宏观性质变化、要么偏向细观特征演变, 而鲜有研究将二者在冻融循环下的变化相关性及其内在联系进行深入剖析。因此, 本文开展混杂纤维混凝土快速冻融循环试验, 重点分析抗压强度和冻融损伤

量随气孔结构参数的变化规律, 揭示冻融循环下混杂纤维混凝土宏观演化特点, 以为理论研究提供试验支撑、指导材料的抗冻设计。

## 2 混杂纤维混凝土快速冻融循环试验

### 2.1 试验材料

试验采用 PO 42.5 普通硅酸盐水泥; 细骨料采用细度模数为 2.6 的天然中河砂; 粗骨料采用连续级配碎石, 粒径范围为 20~40 mm; 减水剂采用减水率为 40% 的聚羧酸高性能减水剂, 掺量(质量分数)为 1.0%; 纤维采用玄武岩纤维和聚丙烯纤维混杂, 体积掺量比为 1:1, 长度均为 6 mm, 其他性能指标见表 1, 试验设计了四种纤维体积掺量, 分别为 0、0.1%、0.15%、0.2%, 其中 0 表示素混凝土(参照组)。按照《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[7]</sup>, 设计了混杂纤维混凝土试件的配合比, 见表 2。在此基础上制备 C40、边长为 100 mm 的正方体试块, 用以开展混凝土轴心抗压试验。

表 1 纤维的性能指标  
Tab. 1 Performance index of fiber

种类	直径 / $\mu\text{m}$	长度 / $\text{mm}$	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/MPa
玄武岩纤维	15	6	2 650	100	3 800
聚丙烯纤维	20	6	950	30	450

收稿日期: 2022-05-05, 修回日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51904110); 江苏省科技厅产学研课题(DH20210000)

作者简介: 付强(1985-), 男, 高级工程师, 研究方向为铁路桥梁、路基工程、混凝土材料, E-mail: fuqiang1417@163.com

通讯作者: 陶琦(1976-), 男, 高级工程师, 研究方向为岩土工程、工程材料, E-mail: taoqi123hy@163.com

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Concrete mix proportion

水泥 /(kg·m <sup>-3</sup> )	砂 /(kg·m <sup>-3</sup> )	碎石 /(kg·m <sup>-3</sup> )	水 /(kg·m <sup>-3</sup> )	纤维 掺量/%
265.6	587.3	1 110.6	205	0~0.2

### 2.2 冻融循环试验

本次冻融试验采用成都理工大学 TC-B-100 高低湿热试验箱。根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》<sup>[8]</sup> 中关于快速冻融法的规定,对混凝土试块进行冻融循环试验,冻结和融化温度分别为-15、15℃,冻、融过程各持续 4 h,则一个冻融循环为 8 h。试验共设定 0、20、40、60、80、100 六组冻融循环周次(用  $n$  表示),其中  $n=0$  表示未经冻融的试件,作为参照组。冻融试验步骤如下:①根据表 2 的设计配合比制备混凝土拌合物,在模具中进行浇筑、振捣;②经标准养护后,将混凝土试块放入清水中浸泡 3 d;③取出后放入高低温湿热试验箱进行快速冻融试验,达到设计的冻融循环次数后取出,采用非金属声波检测仪测试试件超声波速;④最后根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[9]</sup>,采用 DYE-200 型压力机进行单轴抗压试验,加载速率设定为 3 mm/min。

### 2.3 气孔结构测试

混杂纤维混凝土孔结构试验采用 DXR 型气孔结构测试仪。测试前,需对试样进行特殊处理,操作步骤为将经冻融循环后的立方体试件(100 mm×100 mm×100 mm)进行切片处理,切片厚度为 20 mm,且每组试块留取三个完整的切片样本;然后采用抛光机对试件切面进行先粗打磨后精打磨;将试件切片清洗干净后,自然晾干,用黑色中性笔在试件切片表面标记,然后将其置于温度 100℃烘箱中烘烤 1 d;取出,冷却至室温后在切面上均匀涂抹硫酸钡(BaSO<sub>4</sub>)粉末,填充试件切面上的所有气孔,再用钢尺轻轻刮除多余粉末,最后将其置于试验台进行气孔结构测试。测试得到 4 个气孔参数指标分别为含气量( $x_1$ )、气泡间距系数( $x_2$ )、气泡平均弦长( $x_3$ )、气孔比表面积( $x_4$ ),其定义参见文献<sup>[6]</sup>。

## 3 宏观特性的冻融损伤分析

### 3.1 力学强度损伤分析

图 1(a)为混杂纤维混凝土试件抗压强度  $f_c$  随冻融循环周次  $n$  的变化曲线图。由图 1(a)可知,整体来看,随  $n$  增加, $f_c$  呈近似线性下降趋

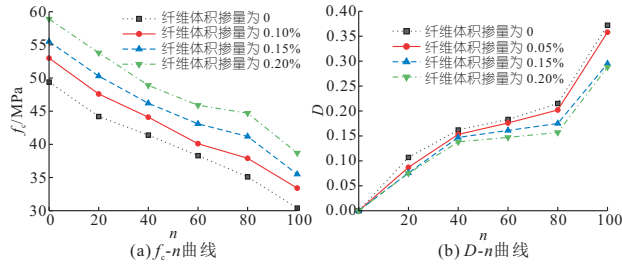


图 1 抗压强度  $f_c$ 、冻融损伤量  $D$  与冻融循环次数  $n$  的变化曲线图

Fig. 1 Curve of compressive strength, freeze-thaw damage and freeze-thaw cycles

势,且不同纤维体积掺量,曲线下斜率基本相当;当  $n$  一定时,随纤维体积掺量的增大, $f_c$  呈增大趋势。当  $n=0$  时,对比素混凝土(纤维体积掺量为 0),纤维体积掺量为 0.10%、0.15%、0.20% 的试件,其抗压强度分别提高 7%、12%、18%;当  $n=100$  时,与素混凝土相比,纤维体积掺量为 0.10%、0.15%、0.20% 的试件,其抗压强度分别提高 9%、16%、27%。这是因为纤维具有高弹性模量和高韧性的特点,且与混凝土基体黏结性较好,起到骨架支撑作用。一方面,混凝土拌合物在拌和、硬化过程中,纤维掺入能有效抑制原生裂纹和气孔萌生,使混凝土更加密实;当在冻融循环下受到冻胀力作用时,纤维又能很好起到加筋约束的作用,即“桥连效应”,抑制裂缝和气孔的拉裂、扩展,使混凝土处于三向受压状态,有效提高抗压强度。

### 3.2 冻融损伤量

根据损伤力学,冻融损伤量  $D$  常用以定量刻画混凝土材料在冻融作用下的损伤劣化程度,而  $D$  一般采用相对动弹性模量  $E_r(n)$  这一无量纲参数来表征, $E_r(n)$  与超声波速存在相关关系,数学公式为:

$$E_r(n) = E_n / E_0 = V_n^2 / V_0^2 \quad (1)$$

$$D = 1 - E_r(n) \quad (2)$$

式中, $E_n$ 、 $V_n$  分别为混凝土经  $n$  次冻融循环后的动弹性模量、超声波速; $E_0$ 、 $V_0$  分别为未经冻融作用的混凝土初始动弹性模量、初始超声波速。

图 1(b)为冻融条件下混杂纤维混凝土(纤维体积掺量 0、0.1%、0.15%、0.2%)冻融损伤量  $D$  随冻融循环周次  $n$  的变化曲线图。由图 1(b)可知,整体来看, $D$  随  $n$  增加而增大,变化特点可分为三个阶段:当  $n < 40$ , $D$  随  $n$  增长较快;40 <  $n$  < 80, $D$  随  $n$  增长变得缓慢;当  $n > 80$ , $D$  随  $n$  增长速率最大。另一方面,当  $n$  一定时,纤维体积掺量越大, $D$  越小,素混凝土  $D$  最大,而纤维体积掺量 0.2% 的试件  $D$  最小。具体分析来看,当  $n=0$  时,对于不同纤维体积掺量混凝土试件, $D=0$ ;当

$n = 100$  时,纤维体积掺量分别为 0、0.1%、0.15%、0.2%的试件,对应  $D$  分别为 0.37、0.35、0.29、0.28;对比素混凝土,纤维体积掺量分别为 0.1%、0.15%、0.2%的试件,对应  $D$  分别降低了 3%、20%、23%。另外,纤维体积掺量为 0.2%的试件, $D$  最小,其抗冻性最优。原因是掺入的混杂纤维在基体中交错分布,有效抑制了混凝土在拌合、硬化过程中产生的微孔洞及连通裂隙,基体更加密实,水分难以渗入混凝土内部,从而大幅降低冻融循环下因水产生的冻胀力,有效提高其抗冻性。

### 4 宏—细观特性冻融损伤分析

#### 4.1 细观形貌

混凝土细观特征一般由气孔结构特征反映,而气孔结构则常采用四个气孔参数表征。由气孔结构测试结果,得到混杂纤维混凝土气孔结构示意图,见图 2。由图 2 可见,混凝土内部分布着形状各异、大小不一的气孔和错乱交织的纤维,大孔径气孔被纤维分割为小孔径气孔,且随纤维体积掺量的增大,小孔径气孔占比增加,大孔径气孔占比减小,从而优化了混凝土孔结构分布;冻融作用下,在试件内部由水产生的冻胀力、盐结晶压力等应力主要由弹性模量更高的纤维承担、传递,因此能有效抑制新生气孔的萌生,缓解气孔尖端处的拉裂、扩展,从而提高混凝土的密实度和强度。

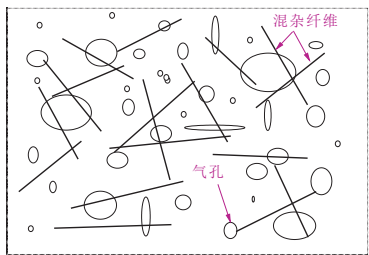


图 2 纤维混凝土气孔结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of porous structure of fiber reinforced concrete

#### 4.2 冻融下宏细观关联分析

为剖析冻融条件下,混杂纤维混凝土宏细观特征的关联性,绘制了不同冻融循环周次下抗压强度  $f_c$ 、冻融损伤量  $D$ (宏观特征)与 4 个气孔参数  $x_1 \sim x_4$ (细观特征)的变化曲线,见图 3。由图 3 可知,随着冻融循环周次  $n$  增加(从 0 到 100),细观特征参数  $x_1 \sim x_3$  也不断增加, $x_4$  则减小,而宏观上  $f_c$  降低,冻融损伤量  $D$  增大。当纤维体积掺量一定时,不同冻融循环周次下, $f_c$  和  $D$  均与 4 个气孔结构参数保持较好的线性变化关系,表

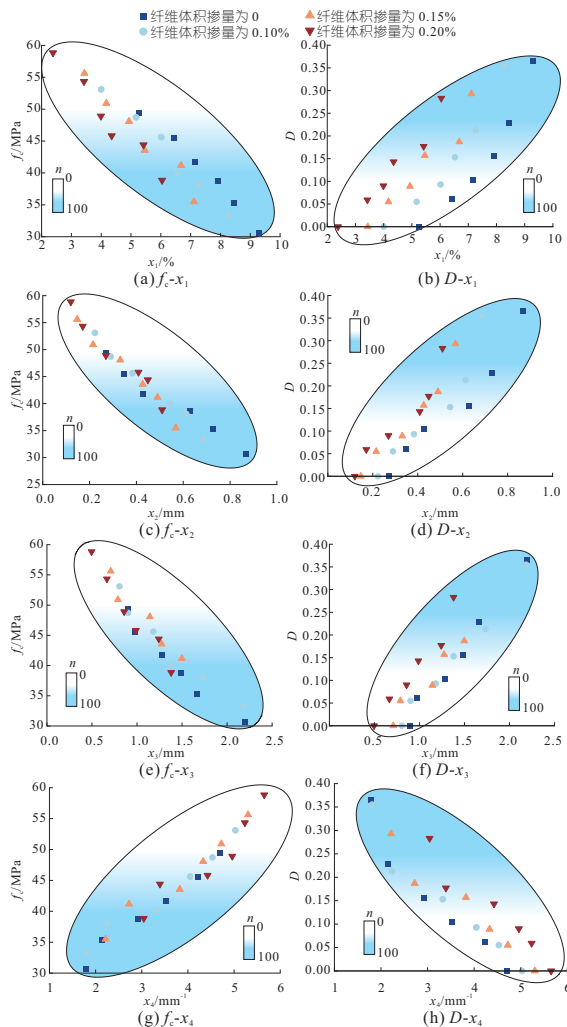


图 3 不同冻融循环周次  $n$  下混凝土宏观特性与  $x_1 \sim x_4$  关系图

Fig. 3 Relationship between macroscopic characteristics of concrete and  $x_1 \sim x_4$  under different freeze-thaw cycles

明冻融作用下纤维混凝土宏观力学性质的退化与细观孔结构特征演变存在紧密联系。

对冻融作用引起混凝土宏细观特性变化相关性的内在原因解释为冻融循环下,通过连通毛细通道渗入混凝土试件内部水分,会在气孔孔壁产生较大冻胀力、渗透应力及盐结晶压力等作用,气孔尖端部位等应力集中处发生大变形、拉裂,并进一步扩展、贯通,随  $n$  的增加,试件小孔径气孔发展演变为大孔径气孔,多个相邻小孔径气孔逐渐融合为大孔径气孔,气孔孔壁形貌特点也由粗糙、曲折发展为光滑、单一,故而导致气孔参数  $x_1 \sim x_3$  增加,而  $x_4$  减小。与未经冻融混凝土相比,试件冻融后, $x_1 \sim x_3$  增大及  $x_4$  减小,使得试件内部更加疏松多孔,试件截面上有效受力面积减小,因而  $f_c$  和承载力随之降低; $x_1 \sim x_3$  增大同时也增加了连通裂缝的数量,水分更易渗入试件内部,渗入的水分量也越多,在正、负温度交替下气孔孔壁承受的冻胀力和结晶压力成倍增加, $D$  也就显著

增加,试件抗冻性能降低。

## 5 结 论

a. 从宏观特性上,随冻融循环次数  $n$  的增加,混杂纤维混凝土抗压强度  $f_c$  呈近似线性降低,冻融损伤量  $D$  逐渐增大; $n$  相同时,随纤维体积掺量增加, $f_c$  增大,而  $D$  降低,因此抗冻性增强。

b. 从细观特性上,随冻融循环次数  $n$  增加,试件气孔参数  $x_1 \sim x_3$  增加,而  $x_4$  降低,试件密实度降低,则  $f_c$  降低, $D$  增加。当  $n$  一定时,随纤维体积掺量的增加, $x_1 \sim x_3$  减小,而  $x_4$  增加。

c. 冻融作用促进混凝土内部小孔径气孔逐渐演变为大孔径气孔,这是其宏观性质发生退化的本质原因,而混杂纤维的掺入一定程度抑制了这一进程,优化了气孔结构,提高了抗冻性。

### 参考文献:

[1] RUSTAMOV S, KIM S W, KWON M, et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced lightweight concrete subjected to repeated freezing and thawing [J]. Construction and building materials, 2021, 273: 121710.

[2] 薛国斌,卢晓春,熊勃勃,等.冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下碾压混凝土性能研究[J].水电能源科学,2021,39(2):123-126.

[3] 乔宏霞,李江川,朱飞飞,等.纤维混凝土抗冻性能研究[J].功能材料,2019,50(1):1114-1119.

[4] FEO L, ASCIONE F, PENNA R, et al. An experimental investigation on freezing and thawing durability of high performance fiber reinforced concrete (HPFRC) [J]. Composite structures, 2020, 234: 111673.

[5] 何晓雁,张天晓,王辰昊,等.纤维水泥基材料抗冻性与孔结构关系的变化规律[J].硅酸盐通报,2022,41(5):1529-1538.

[6] 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.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土配合比设计规程:JGJ55-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T50082-2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T50081-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

## Test Study on Macro-meso Relationship of Concrete with Different Fiber Content Under Freeze-thaw Cycle

FU Qiang<sup>1,2</sup>, TAO Qi<sup>1,2</sup>, GUAN Xi-bin<sup>1,2</sup>, FAN Jian-xiong<sup>3</sup>, WANG Yue-shi<sup>4</sup>

- (1. China Railway 19th Bureau Group Sixth Engineering Co., Ltd., Wuxi 214028, China; 2. Jiangsu Prefabricated Building Green Intelligent Manufacturing and Construction Engineering Technology Research Center, Changzhou 213372, China; 3. China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China; 4. College of Transportation Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

**Abstract:** In order to explore the relationship between macro and micro characteristics of hybrid fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles, rapid freeze-thaw cycle tests were carried out with freeze-thaw cycles and fiber volume content as variables. The test results show that under different freeze-thaw cycles, the compressive strength has a positive correlation with air content, bubble spacing coefficient and average chord length of bubbles, and a negative correlation with specific surface area of pores, while the freeze-thaw damage and pore parameters have an opposite law, and they all change approximately linearly; The larger the freeze-thaw cycles, the lower the compressive strength, the greater the freeze-thaw damage, the greater the air content, the bubble spacing coefficient and the average chord length of bubbles, and the smaller the specific surface area of pores; The incorporation of hybrid fibers optimizes the pore structure and improves the frost resistance.

**Key words:** hybrid fiber concrete; freeze thaw cycle; pore structure; macro-meso relationship; compressive strength; freeze thaw damage