DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2022.04.035

基于灰关联理论的玄武岩纤维混凝土孔与抗冻性能相关性研究

边旭辉[1]，申爱琴[2]，连城[1]，吴华[2]，李悦[2]
（1.陕西省高速公路建设集团公司古镇高速公路建设管理处，陕西 汉中 723500；
2.长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室，陕西 西安 710064）

摘要：为探究玄武岩纤维的掺入对混凝土抗冻性能的微观孔结构改善机理，制备6种不同纤维长度、掺量的玄武岩纤维混凝土并对其进行抗冻试验和压汞试验。结果表明：玄武岩纤维能有效改善混凝土由于冻融循环造成的表面及内部损伤，掺入12 mm、0.06%的玄武岩纤维混凝土的质量损失率及抗弯拉强度损失率较基准混凝土分别降低73.9%及26.4%。玄武岩能显著优化混凝土内部孔结构，降低其平均孔径及有害孔比例。同时，基于灰关联理论确定了与抗弯拉强度、相对弹性模量灰色关联度最高的孔结构参数，即多害孔比例。最后采用多元非线性回归分析分别建立玄武岩纤维混凝土抗弯拉强度－孔参数、相对弹性模量－孔参数的数学模型。

关键词：玄武岩纤维；路面混凝土；冻融循环；灰色关联度；多元非线性回归
中图分类号：U414 **文献标志码**：A

中国北方地区水泥路面混凝土均存在不同程度的冻融破坏，不仅给路面行车安全带来隐患，而且增加了路面维修成本[1]。混凝土属于多孔材料，内部孔隙水的结冰膨胀应力是微损伤产生的主要原因。当外部环境温度升高时，微裂纹由于毛细作用吸水饱和，这种反复的冻融作用导致孔隙扩大、裂缝扩展，最终造成混凝土冻融破坏[2]。

玄武岩纤维由玄武岩经高温熔融后拉丝制成[3]，制备过程中无任何有害气体排放，是一种绿色、环保的新型无机纤维。与目前工程中常用的纤维相比，玄武岩纤维具有化学稳定性优异、力学强度高、性价比突出及与混凝土相容良好等显著优势[4]。试验研究表明：玄武岩纤维的掺入能显著提高混凝土在不同腐蚀介质中的抗冻融性能[5－8]。空隙率、平均孔径及孔径分布参数与玄武岩纤维混凝土强度密切相关，Cui[9]建立了抗压、劈裂抗拉强度与分形维数和复合空隙率之间的模型，相关性良好；Kabay[10]建立了玄武岩纤维混凝土抗弯拉强度与磨料磨损量和空隙率的关系模型；赵燕茹[11]通过回归分析建立单面冻融后的抗压强度与玄武岩纤维贡献率、气孔比表面积和孔体积之间的预测模型。目前，关于冻融循环作用对玄武岩纤维混凝土孔参数、孔分布的影响研究较少，且其与冻后强度、模量的相关性研究鲜有报道，对探究及明晰玄武岩纤维对混凝土抗冻性能改善机理不利。因此，该文对不同玄武岩纤维长度、掺量的混凝土试件进行抗冻性试验和压汞试验，通过灰关联理论对影响玄武岩纤维混凝土抗冻性的孔结构参数进行排序，得出主要影响因素并建立其与抗弯拉强度、模量之间的多元非线性数学模型。同时借助扫描电镜对普通混凝土及纤维混凝土内部微观结构进行观测，揭示玄武岩纤维对混凝土在冻融循环过程中孔及裂缝结构的改善作用。

1 试验概况

1.1 原材料与配合比

水泥选用普通硅酸盐水泥，粗集料选用级配连续的天然碎石，级配组成为两档：4.75～9.5 mm、9.5～19 mm，质量比为3∶7，细集料选用Ⅱ类中砂，细度模数为2.62；玄武岩纤维选用短切玄武岩纤维，技术指标如表1所示；为保证纤维混凝土的工作性能，采用KTPCA聚羧酸高性能减水剂，减水率为21%。

试验用混凝土强度等级为C40，水灰比＝0.36，配合比为水泥∶砂∶石子∶减水剂＝1∶1.59∶2.59∶0.011。选用的短切玄武岩纤维长度分别为6、12和

收稿日期：2022－06－14（修改稿）
基金项目：陕西交通科技项目（编号：18－11K）
作者简介：边旭辉，男，高级工程师.E－mail：6589111@qq.com

表 1　玄武岩纤维主要技术指标

纤维类型	直径/μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(kg·m^{-3})
玄武岩纤维	21	4 100～4 800	93～110	2 650

18 mm，掺量分别为混凝土总质量的 0.05%、0.06%和 0.07%。不同长度及掺量的玄武岩纤维混凝土简写如 BF－6 mm－0.06%表示混凝土掺入的玄武岩纤维长度为 6 mm，掺量为 0.06%。

1.2　玄武岩纤维混凝土制备工艺

为使玄武岩纤维在混凝土中分散均匀，制定的拌和步骤如下：首先放入碎石、细砂、水泥及一半质量的纤维干拌 30 s，再放入另一半纤维干拌 30 s，最后倒入水和减水剂拌和 90 s。

1.3　快速冻融试验

根据 GBT 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》进行快速冻融试验，试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，每组设置 3 块平行试件。冻融循环温度为－18～5 ℃，以质量损失率(%)、相对动弹模量(%)、300 次剩余抗弯拉强度(MPa)为混凝土抗冻性评价指标。

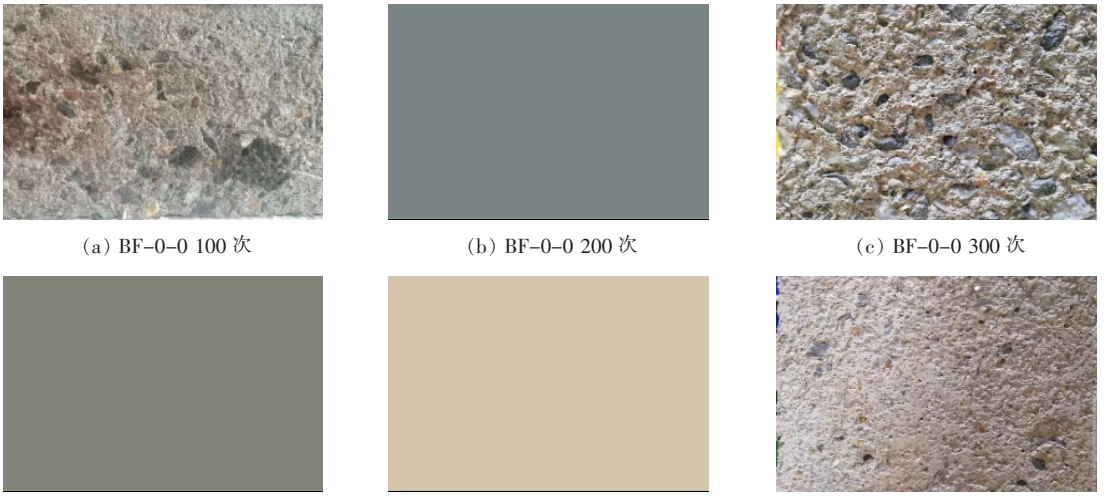
1.4　压汞试验

在混凝土试件的中心位置取 1 cm×1 cm×1 cm 的试样，浸泡于无水乙醇中后置于 60 ℃的烘箱中烘至恒重，而后采用 AutoPore IV 9510 型压汞仪进行压汞试验。

2　结果与讨论

2.1　表面形貌变化

基准混凝土(BF－0－0)和玄武岩纤维混凝土(BFRC)经过不同冻融循环次数后的表面形貌如图 1 所示。可见，经 100 次冻融循环后，基准混凝土表面砂浆开始剥落，200 次冻融循环后表面进一步剥蚀，粗骨料外露明显；而玄武岩纤维混凝土在相同冻融循环次数下的表面剥蚀情况明显弱于基准混凝土，经过 300 次冻融循环后，其表面仅有少量砂浆层剥落，未见明显的粗骨料外露痕迹。冻融循环作用对混凝土造成的损伤从外部逐渐向内发展，而玄武岩纤维的掺入能有效提高混凝土的整体强度，显著降低由于冻融作用造成的表面剥蚀。



(a) BF-0-0 100 次　(b) BF-0-0 200 次　(c) BF-0-0 300 次

(d) BFRC 100 次　(e) BFRC 200 次　(f) BFRC 300 次

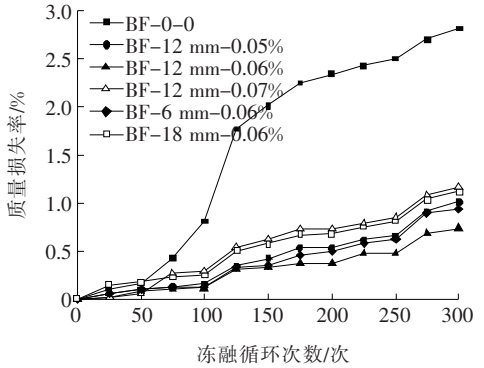
图 1　不同冻融循环次数下的基准及纤维混凝土的表面剥蚀

2.2　质量损失率及相对动弹模量

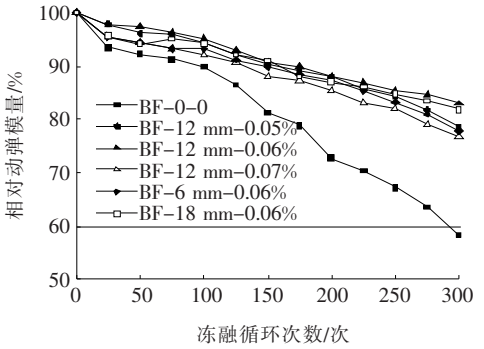
图 2 为基准混凝土及玄武岩纤维混凝土随冻融循环次数增加造成的质量损失率与相对动弹模量变化规律。

由图 2(a)可知：6 组混凝土试件的质量损失率均随着冻融循环次数增加而增大，其中基准组质量损失率明显大于纤维组。这是因为随着冻融循环次数的增加，混凝土内部损伤加剧，从而出现表面剥落、骨料外露现象，质量损失也不断加大；而玄武岩纤维的加入可以阻止混凝土内部裂缝的产生并延缓其扩展，减轻混凝土内部损伤，提高混凝土的抗冻性。经 300 次冻融循环后，未掺玄武岩纤维的普通混凝土质量损失率最大，达到 2.809%；纤维组 BF－12 mm－0.06%质量损失率最小(0.733%)，比普通混凝土减少了 73.9%，

可明显提高混凝土抗冻性。



(a) 质量损失率随冻融循环次数变化



(b) 相对动弹模量随冻融循环次数变化

图 2 混凝土抗冻性能指标随冻融循环次数变化

由图 2(b)可知:混凝土试件相对动弹模量随冻融循环次数增加而降低,且掺玄武岩纤维的混凝土试件相对动弹模量均比基准组高。基准组混凝土内部损伤最大,其抗冻性约为 292 次,而纤维组抗冻性均大于 300 次。这是因为在混凝土受冻融破坏过程中,横跨微裂纹的纤维可以抑制因孔隙水冰冻而产生的膨胀压力和渗透压力而导致的微裂纹的发生和扩展,起到明显的阻裂作用,提高混凝土抗冻性。冻融循环 300 次时,对比掺相同长度的玄武岩纤维,不同掺量的试件相对动弹模量损失由小到大依次为:0.06%组<0.05%组<0.07%组;相同掺量不同长度的纤维试件相对动弹性损失从小到大依次为:12 mm 组<18 mm 组<6 mm 组。究其原因在于:相同长度下,当玄武岩纤维掺量较低时,纤维对混凝土增强作用不明显;而玄武岩纤维掺量过高时,混凝土中纤维难以均匀分布,其桥接、阻裂作用也不明显。相同掺量下,纤维长度过短,难以起到承托骨料和桥接作用;过长的玄武岩纤维在混凝土内部容易出现无效搭接和缠绕,减弱纤维与水泥之间的黏附力。

2.3 抗弯拉强度

冻融前后混凝土的弯拉强度测试结果如图 3 所示。

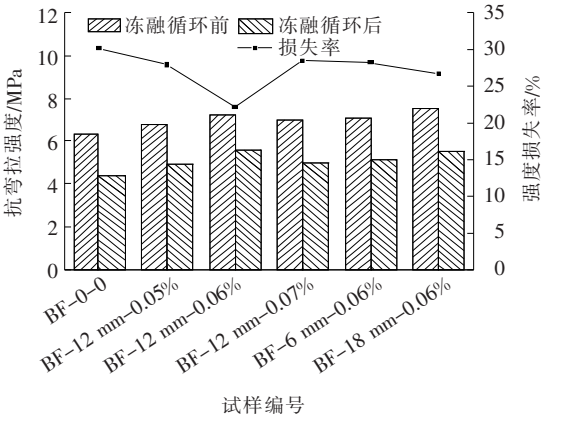


图 3 冻融循环前后试件弯拉强度及损失率变化图

由图 3 可知:

(1) 玄武岩纤维的掺入能有效提高混凝土的抗弯拉强度,主要原因在于玄武岩纤维的高强高模特性使其能桥接裂缝、提高整体混凝土的韧性。随玄武岩纤维掺量增加,混凝土抗弯拉强度先升高后稍有降低,经过 300 次冻融循环,随掺量增加纤维混凝土抗弯拉强度比普通混凝土分别提高 11.4%、27.3%、13.6%。纤维掺量大于 0.06%时,强度有所下降,这是因为纤维极易吸附水分,减少水化可用水,使混凝土不能水化完全;另一方面,掺过量纤维的混凝土搅拌过程中纤维不易分散均匀并黏结成团,在混凝土中造成气孔,因此强度有所下降[12];随纤维长度增加,纤维混凝土抗弯拉强度也呈现先增加后降低的趋势,但受长度影响不大。

(2) 经过 300 次冻融循环,基准混凝土与纤维混凝土的抗弯拉强度均呈现不同程度的损失,基准混凝土损失率最高,为 30.2%。纤维混凝土损失率均低于基准混凝土。相同玄武岩纤维长度下,随着纤维掺量增加,纤维混凝土强度损失率先降后升,掺量为 0.06%的纤维混凝土冻融弯拉强度损失率最低,为 22.22%;相同纤维掺量下,纤维混凝土损失率随纤维长度增加呈先降后升趋势。这是因为长度过短,纤维难以形成三维网状结构,其桥接裂缝、传递应力作用减弱,长度大于 12 mm 时,强度损失率增大,是因为纤维长度增大导致纤维与水泥之间黏附性减弱[6]。

2.4 孔结构

图 4 为基准混凝土和纤维混凝土试件冻融循环 300 次后的孔隙参数压汞试验结果。由图 4 可知:与基准混凝土相比,玄武岩纤维的加入可以增大混凝土的总孔隙量、总孔隙面积和空隙率,减小平均孔径。由图 4(a)可知:随着纤维掺量的增加,纤维混凝土总孔隙量依次减小;长度对其影响不大;由图 4(b)可知:纤

维混凝土试件的总孔隙面积随纤维掺量和长度的增加均呈现先增大后减小的趋势，其中试件 BF－12 mm－0.06%最大，比基准组增加了 10.7 倍，由图 4(c)可知：平均孔径呈现与总孔隙面积相反的趋势，BF－12 mm－0.06%的纤维混凝土平均孔径最小，比基准组降低了 89.2%；由图 4(d)可知：虽然纤维组试件空隙率比基准组略有增加，但其总孔隙面积增大使混凝土孔结构复杂化，且平均孔径明显减小，混凝土孔结构得到细化。这对降低混凝土内部渗透压力和静水压力有利，因而整体上纤维混凝土抗冻性发生明显改善。

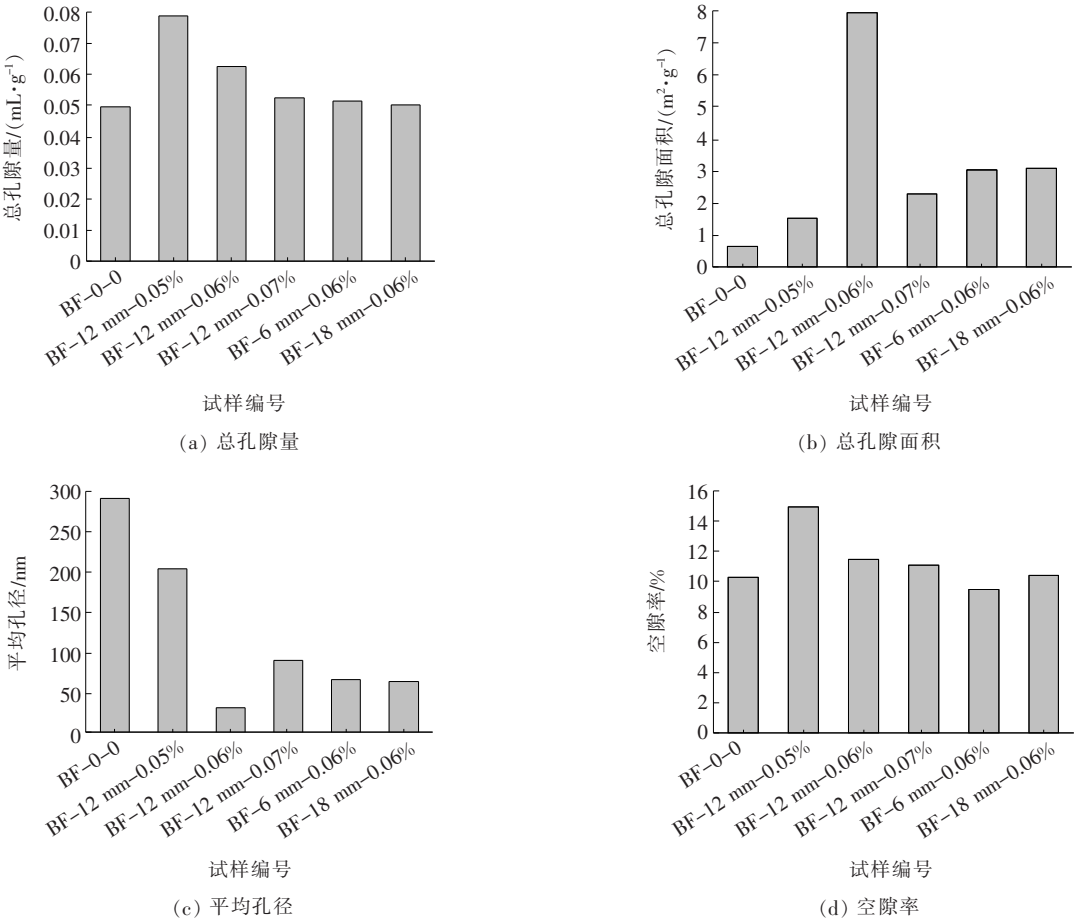


图 4　冻融循环后基准及玄武岩纤维混凝土孔参数测试结果

吴中伟院士按不同孔径对混凝土性能的影响，将混凝土内部孔隙分为无害孔(＜20 nm)、少害孔(20～50 nm)、有害孔(50～200 nm)及多害孔(＞200 nm)，并提出增加少害孔，减少有害孔，可以显著改善混凝土的性能[ ]。基准组和纤维组混凝土经冻融循环后的孔径分布情况如图 5 所示。由图 5 可知：玄武岩纤维的加入使混凝土无害孔和少害孔的比例增加，有害孔和多害孔的比例减小。相比于基准组，随纤维掺量增加，玄武岩纤维混凝土无害孔比例分别增加 1.1 倍、8.4 倍和 3.5 倍，多害孔比例分别减少 4.4%、24.3%和 11.5%；随纤维长度增加，纤维混凝土试件无害孔比例比基准组分别增加 3.9 倍、8.4 倍和 4.3 倍，多害孔比例分别减少 11.6%、24.3%和 18.8%。说明玄武岩纤维能增加

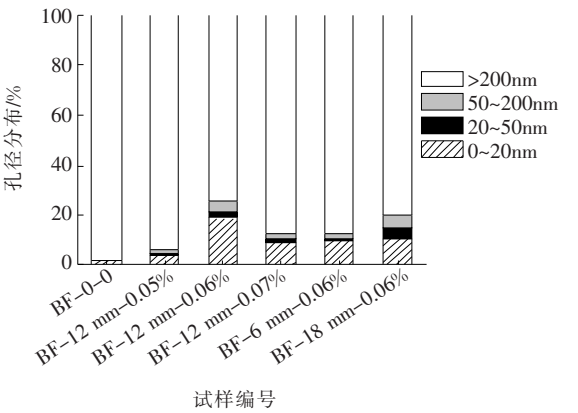


图 5　基准及玄武岩纤维混凝土冻融循环后的孔径分布

无害孔比例，减少多害孔含量，改善混凝土孔隙结构，提高混凝土抗冻耐久性，这与前述混凝土试件宏观试

验结果一致。

2.5 灰色关联度分析

灰色关联度是一种多属性决策方法，其通过计算母序列与子序列的关联度并排序，从而确定影响母序列的主要因素[13]。分别以冻融 300 次后 5 种玄武岩纤维混凝土试件的弯拉强度、弹性模量和质量为母序列 $X_0(k)$，孔隙特征参数和孔径分布参数为子序列 $X_i(k)$，子序列与母序列的关联度计算步骤如下：

(1) 对各序列进行无量纲化处理

令弯拉强度为母序列，采用均值化公式对母序列和子序列进行无量纲化处理，公式为 $X'_i(k)=X_i(k)/\overline{X}_i$，$(k=1,2,\cdots,5;i=0,1,2,\cdots,8)$，处理结果见表 2。

(2) 计算灰色关联系数

母序列与子序列的关联系数计算公式为 $\gamma_i(k)=\dfrac{\min\limits_i\min\limits_k\Delta_i(k)+0.5\cdot\max\limits_i\max\limits_k\Delta_i(k)}{\Delta_i(k)+0.5\cdot\max\limits_i\max\limits_k\Delta_i(k)}$，其中 $\Delta_i(k)=|X'_0(k)-X'_i(k)|$，$(k=1,2,\cdots,5;i=1,2,\cdots,8)$。计算结果如表 3 所示。

(3) 计算灰色关联度

灰色关联度计算公式为 $\gamma_i=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{k=1}^{n}\gamma_i(k)$，$(k=1,2,\cdots,5;i=1,2,\cdots,8)$，关联度计算结果如表 4 所示。同理可得孔参数与弹性模量、质量的灰色关联度，如表 4 所示。

表 2 各序列无量纲化处理结果

序列	弯拉强度 $X'_0(k)$	总孔隙量 $X'_1(k)$	总孔隙面积 $X'_2(k)$	平均孔径 $X'_3(k)$	空隙率 $X'_4(k)$	无害孔 $X'_5(k)$	少害孔 $X'_6(k)$	有害孔 $X'_7(k)$	多害孔 $X'_8(k)$
1	0.938 7	1.336 5	0.431 8	2.219 3	1.300 4	0.400 5	0.382 1	0.319 2	1.113 6
2	1.072 8	1.058 3	2.216 8	0.342 9	1.003 8	1.793 8	1.199 6	1.397 4	0.881 7
3	0.957 9	0.888 7	0.638 8	0.998 3	0.966 6	0.853 9	0.915 4	0.726 0	1.030 2
4	0.977 0	0.868 4	0.846 0	0.737 2	0.823 5	0.927 3	0.506 1	0.759 2	1.028 8
5	1.053 6	0.848 0	0.866 6	0.702 3	0.905 7	1.024 5	1.996 9	1.798 3	0.945 7

表 3 孔参数与弯拉强度的灰色关联系数

序列	总孔隙量 $\gamma_1(k)$	总孔隙面积 $\gamma_2(k)$	平均孔径 $\gamma_3(k)$	空隙率 $\gamma_4(k)$	无害孔 $\gamma_5(k)$	少害孔 $\gamma_6(k)$	有害孔 $\gamma_7(k)$	多害孔 $\gamma_8(k)$
1	1.336 5	0.431 8	2.219 3	1.300 4	0.400 5	0.382 1	0.319 2	1.113 6
2	1.058 3	2.216 8	0.342 9	1.003 8	1.793 8	1.199 6	1.397 4	0.881 7
3	0.888 7	0.638 8	0.998 3	0.966 6	0.853 9	0.915 4	0.726 0	1.030 2
4	0.868 4	0.846 0	0.737 2	0.823 5	0.927 3	0.506 1	0.759 2	1.028 8
5	0.848 0	0.866 6	0.702 3	0.905 7	1.024 5	1.996 9	1.798 3	0.945 7

表 4 玄武岩纤维混凝土灰色关联度计算结果

项目	关联度							
	总孔隙量	总孔隙面积	平均孔径	空隙率	无害孔	少害孔	有害孔	多害孔
弯拉强度	0.833	0.646	0.631	0.841	0.762	0.667	0.631	0.858
弹性模量	0.830	0.632	0.628	0.851	0.750	0.641	0.607	0.871
质量	0.762	0.627	0.659	0.786	0.712	0.604	0.606	0.862

由表 4 玄武岩纤维混凝土孔参数与弯拉强度的灰色关联度结果可知：孔参数对弯拉强度的影响最显著的因素为：多害孔(0.858)＞空隙率(0.841)＞总孔隙量(0.833)，其他孔结构参数与纤维混凝土抗弯拉强度的灰色关联度均在 0.762 以下；对玄武岩纤维混凝土弹性模量影响显著的因素为：多害孔(0.871)＞空隙率

(0.851)＞总孔隙量(0.830)，其他因素与混凝土相对弹性模量的灰色关联度均在 0.75 以下；玄武岩纤维混凝土冻融循环 300 次之后的多害孔比例与质量关联度最大，其他因素与质量没有太大关联性。因此，多害孔比例对纤维混凝土抗冻性影响最大，其次是空隙率和总孔隙量。

2.6　多元非线性抗冻模型

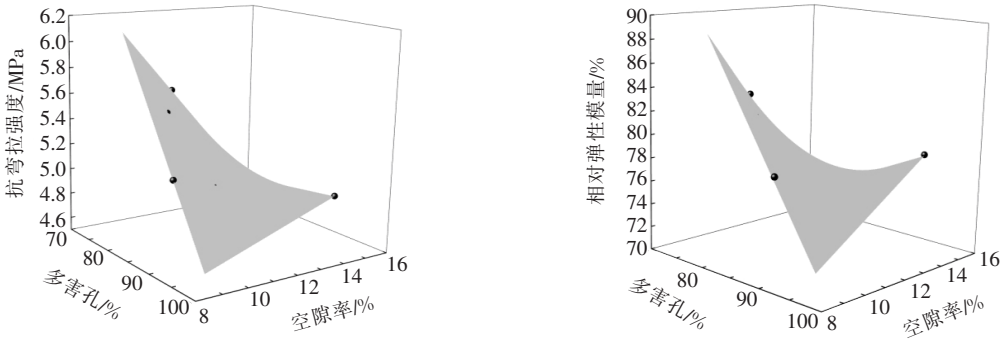
根据上述灰色关联度分析，冻融循环后影响纤维混凝土抗弯拉强度的主要因素是多害孔比例和空隙率。因此，选取多害孔比例表征孔径分布参数，选取空隙率表征孔隙参数，并考虑多害孔比例和空隙率的交互作用，假设弯拉强度与孔结构的关系模型为式(1)，回归结果见表 5 和图 6(a)。同理可得相对弹性模量与孔参数的回归结果见表 5 与图 6(b)。

$$R=\beta_0+\beta_1 D+\beta_2 P+\beta_3 DP \tag{1}$$

式中：R 为玄武岩纤维混凝土的抗弯拉强度(MPa)；D 为多害孔比例(%)；P 为空隙率(%)；β_0、β_1、β_2、β_3 为回归系数。

表 5　多元回归结果

模型	β_0	β_1	β_2	β_3	方差 R^2	F 值	显著性概率 P
抗弯拉模型	25.436 29	−0.229 5	−1.416 44	0.015 81	0.995 86	85 070	0.002 52
弹性模量模型	333.199 32	−2.922 24	−18.858 65	0.214 83	0.916 61	13 111	0.006 42



(a) 抗弯拉强度与孔参数模型　　(b) 相对弹性模量与孔参数模型

图 6　抗弯拉强度、相对弹性模量与孔参数模型

由表 5 可知：抗弯拉强度与孔参数回归的方差 $R^2=0.995\ 86$，对其进行统计学中的 F 检验可得：$F=85\ 070>F_{0.05}(3,1)=215.7$，显著性概率 $P=0.002\ 52<0.05$，则认为在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下，玄武岩纤维混凝土抗弯拉强度与多害孔比例和空隙率之间有显著关系。因此，玄武岩纤维混凝土抗弯拉强度－孔参数模型为式(2)：

$$R=25.436\ 29-0.229\ 5D-1.416\ 44P+0.015\ 81DP \tag{2}$$

同理，对相对动弹模量－孔参数回归进行 F 检验可得：$F=13\ 111>F_{0.05}(3,1)=215.7$，显著性概率 $P=0.006\ 42<0.05$，则认为在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下，玄武岩纤维混凝土相对弹性模量与多害孔比例和空隙率之间有显著关系。因此，玄武岩纤维混凝土相对弹性模量－孔参数模型为式(3)：

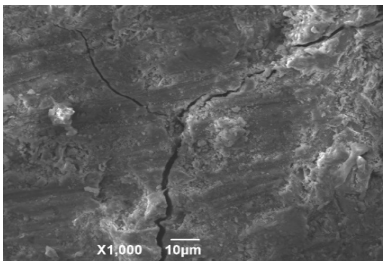
$$R=333.199\ 32-2.922\ 24D-18.858\ 65P+0.214\ 83DP \tag{3}$$

2.7　微观裂缝结构

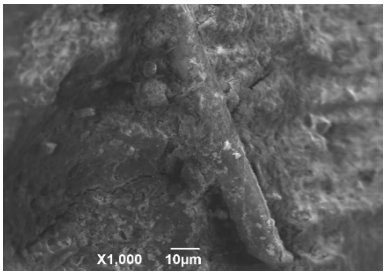
采用扫描电镜观察冻融循环后基准混凝土和纤维混凝土微观形貌图片，以揭示玄武岩纤维增强机理，结果如图 7 所示。由图 7(a)可知：经冻融破坏后，基准混凝土内部出现较大裂缝，内部结构破坏严重。而在相同倍率下，玄武岩纤维混凝土内部裂缝较小，玄武岩纤维和混凝土紧密结合，如图 7(b)所示。这主要是因为玄武岩纤维是天然矿物纤维，与水泥基材料相容性好，玄武岩纤维在混凝土内部乱向均匀分布形成空间网络结构，起到承托骨料的作用，纤维和混凝土协同受力，使混凝土整体强度增加。冻融过程中，跨越混凝土内部裂缝的纤维起到传递分散应力作用，从而提高混凝土抗冻性。

3　结论

(1) 相同冻融循环次数下，玄武岩纤维的掺入能



(a) 基准混凝土



(b) 玄武岩纤维混凝土

图 7 冻融循环后普通及纤维混凝土内部微观结构

有效改善混凝土表面剥蚀及强度损失。随纤维长度和掺量的增加,纤维混凝土相对弹性模量和抗弯拉强度均呈现先升后降的趋势,冻融循环后的质量损失率和弯拉强度损失率则先降后升。

(2) 玄武岩纤维的掺入增大了混凝土中的总孔隙量、总孔隙面积和空隙率,但其平均孔径及多害孔含量被有效降低,说明玄武岩纤维的掺入可优化并改善混凝土孔隙结构。同时玄武岩纤维在混凝土中能有效抑制冻融循环作用产生的内部微裂缝的萌生和发展,整体上提高了混凝土抗冻性。

(3) 与混凝土冻融循环后质量、强度、模量损失灰关联度最高的孔结构参数为多害孔比例、空隙率及总孔隙量,并通过多元非线性回归建立了冻融循环后纤维混凝土抗弯拉强度、相对弹性模量与多害孔比例、总空隙率的数学模型,模型显著性较高。

参考文献:

[1] 郭寅川,翟超伟,李鹏,等.道路混凝土微观结构与抗冻性影响机理研究 [J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(6):48－55.

[2] 谢永亮,战仕利,王瑞,等.玄武岩纤维对机场道面混凝土抗冻性能影响研究 [J].混凝土与水泥制品,2012(12):48－50.

[3] 张向冈,秦文博,田琦,等.玄武岩纤维混凝土材料性能研究进展[J].混凝土,2018(2):94－7.

[4] 王海良,钟耀海,杨新磊.玄武岩纤维混凝土研究进展与建议 [J].工业建筑,2013,43(S1):639－643.

[5] JIN S J,LI Z L,ZHANG J,et al. Experimental Study on the Performance of the Basalt Fiber Concrete Resistance to Freezing and Thawing [J]. Applied Mechanics and Materials,2014,584－586:1 304－1 308.

[6] YILDIZEL S A, KAPLAN G, OZTURK A U, et al. Freeze-Thaw Resistance of Light-Coloured Basalt Fibre Reinforced Concrete Used for Concrete Paving [J]. The Journal of Engineering Research,2014,3(2):252－259.

[7] ZHAO Y R, WANG L, LEI Z, et al. Study on Bending Damage and Failure of Basalt Fiber Reinforced Concrete under Freeze-Thaw Cycles [J]. Construction and Building Materials,2018,163:460－470.

[8] FAN X C, WU D, CHEN H. Experimental Research on the Freeze-Thaw Resistance of Basalt Fiber Reinforced Concrete [J]. Advanced Materials Research,2014,919－921:1 912－1 915.

[9] CUI S,LIU P,CUI E,et al. Experimental Study on Mechanical Property and Pore Structure of Concrete for Shotcrete Use in a Hot-Dry Environment of High Geothermal Tunnels [J]. Construction and Building Materials,2018,173:124－135.

[10] KABAY N. Abrasion Resistance and Fracture Energy of Concretes with Basalt Fiber [J]. Construction and Building Materials,2014,50:95－101.

[11] 赵燕茹,刘芳芳,王磊,等.单面盐冻条件下基于孔结构的玄武岩纤维混凝土抗压强度模型研究 [J].材料导报,2020,34(12):12 064－12 069.

[12] LI J J,ZHAO Z M. Study on Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete[C]. Proceedings of the 2016 5th International Conference on Environment, Materials, Chemistry and Power Electronics,2016.

[13] 李震南,申爱琴,郭寅川,等.玄武岩纤维沥青胶浆及混合料的低温性能关联性 [J].建筑材料学报,2021,24(1):146－152.