

基于数字图像处理的单面盐冻轻骨料混凝土孔隙和微裂纹定量分析

高志浩, 王 玲, 王振地, 方 俊

(绿色建筑材料国家重点实验室, 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024)

摘 要: 准确识别和量化轻骨料混凝土(LAC)中的孔隙和微裂纹对于分析盐冻劣化机理非常重要。基于形态学原理提出了新 DIP 方法, 克服了传统方法仅依靠形状因子无法精确分割孔与微裂纹、多孔轻骨料干扰混凝土基体孔结构分析的难题, 分析了具有相同浆骨比和相同水灰比的页岩陶粒 LAC 和普通骨料混凝土(NAC)的盐冻孔结构劣化。随冻融循环次数增加, 2 种混凝土均表现出孔径扩张和微裂纹自孔壁萌生, 导致相对动弹性模量(r_n)损失。灰色关联分析表明, 除了微裂纹萌生与扩展, LAC 孔径离散程度较高也能引起 r_n 损失。新 DIP 方法实现了孔与微裂纹的分割和独立分析, 提高二者识别精度至 10.6 μm , 在定量分析混凝土孔结构和微裂纹时具有优势。

关键词: 轻骨料混凝土; 单面盐冻; 数字图像处理; 内部损伤; 孔结构; 微裂纹

中图分类号: TQ175 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)08-1908-12

网络出版时间: 2023-05-05



Quantification of Salt Freeze-Thaw Induced Pores and Microcracks in Lightweight Aggregate Concrete Using Digital Image Processing

GAO Zhihao, WANG Ling, WANG Zhendi, FANG Jun

(State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing, 100024, China)

Abstract: Accurate identification and quantification of pores and microcracks in lightweight aggregate concrete (LAC) are important for analyzing salt frost deterioration mechanisms. Therefore, a new DIP method based on morphology principle was proposed, which overcomes the difficulties of traditional methods that can not accurately segment pores and microcracks because of only relying on shape factors, and the porous lightweight aggregate interferes with the analysis of pore and microcrack in concrete matrix. Using this method, the microstructure deterioration of shale ceramsite LAC and normal aggregate concrete (NAC) with same mortar to aggregate ratio and same water to cement ratio was compared and analyzed. With the increase of freeze-thaw cycles, the pore structure damage of the two concretes is manifested as pore expansion and microcrack initiation from the pore wall, leading to the relative dynamic modulus of elasticity (r_n) loss. Grey correlation analysis indicates that in addition to the initiation and propagation of microcracks, the high dispersion of LAC pore diameter also contributed to the loss of r_n in LAC. Test shows the new DIP method realizes the segmentation and independent analysis of pore and microcrack, and achieves the recognition accuracy to 10.6 μm , which has advantages in quantitative analysis of concrete pore structure and microcracks.

Keywords: lightweight aggregate concrete; single-side salt freezing and thawing; digital image processing; internal damage; pore structure; microcrack

混凝土是 1 种典型的多孔材料, 硬化砂浆基体中复杂的孔结构直接影响着混凝土的强度和耐久性^[1]。吴中伟院士按照孔径对强度的影响, 将硬化

混凝土内的孔划分为 4 类: 直径小于 20 nm 的无害孔, 直径为 20~100 nm 的少害孔, 直径为 100~200 nm 的有害孔, 以及直径大于 200 nm 的多害孔。

收稿日期: 2023-03-09。 修订日期: 2023-04-10。

基金项目: 国家自然科学基金(51972295)。

第一作者: 高志浩(1992—), 男, 博士研究生。

通信作者: 王 玲(1968—), 女, 硕士, 教授级高级工程师。

Received date: 2023-03-09. Revised date: 2023-04-10.

First author: GAO Zhihao (1992—), male, Doctoral candidate.

E-mail: zhihao369@foxmail.com

Correspondent author: WANG Ling (1968—), female, Master, Professor.

E-mail: wangling@cbmamail.com.cn

在混凝土耐久性方面, 多数研究发现^[2-3], 直径在微米级的气泡孔对混凝土的体积稳定性和耐久性, 尤其是抗冻性具有显著影响^[4]。利用轻骨料替代部分或全部粗、细骨料制备而成的轻骨料混凝土(LAC)显著改善了混凝土的某些性能, 例如减轻自重^[5]、减弱自收缩^[6]、提高保温性能^[7]或优化力学性能^[8-9], 在路桥道面等领域获得了广泛应用^[10]。然而, 轻骨料本身也是 1 种多孔材料, 如人造陶粒^[10], 因此轻骨料混凝土中孔结构更为复杂, 对微结构损伤的定量分析造成干扰。

在中国三北地区和高原山区, 普遍存在的正负温交变环境会对混凝土造成冻融破坏, 造成的混凝土内部损伤主要表现为孔结构损伤和裂纹的萌生与扩展^[11-16]。已有研究表明^[12-13], 混凝土在冻融作用下的内部损伤起源于孔隙水相变产生的结晶压力对孔壁的破坏, 导致裂纹的萌生和扩展。中国的 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[17]、美国 ASTM C666^[18]和 RILEM 的 CIF^[19]中, 均利用相对动弹性模量来量化混凝土在冻融作用下的内部损伤, 这些方法已经实现了标准化, 缺点在于无法直接获得用于损伤机理研究的孔或微裂纹的定量信息。

近年来, 数字图像处理 DIP 方法已经开始应用于混凝土微结构损伤研究^[20-21], 如表征孔结构变化^[16, 22]、量化微裂纹^[23-25]或监测混凝土的变形行为^[26-27]。在数字图像中, 包含研究对象(孔或裂纹)的区域被称为 ROI(Region of Interest), DIP 方法的实质就是对 ROI 的统计和分析。早期研究通常先对混凝土进行切片和抛光处理, 再对剖面上的孔或裂纹进行浸渍染色处理, 最后使用高分辨率显微镜直接观察样品, 拍摄数字图像, 选取高质量 ROI 进行分析^[28], 这种方法存在视域和分辨率的矛盾, 通常难以在大范围内获得混凝土样品中的高质量 ROI。随着高质量数字图像采集设备的快速发展, 显著提高了数字图像的分辨率, 进而提高了 ROI 的质量, 很好地解决了上述矛盾。已有研究将高分辨率平板扫描仪应用于获得混凝土切片的高分辨率数字图像, 成功地识别到直径 50 μm 以上的孔^[16]。综上所述, DIP 技术混凝土样品尺寸不受限制, 甚至可以采用截面积 100 mm×100 mm 的混凝土试件直接进行图像采集, 这是计算机断层扫描技术(X-CT)^[29-31]、压汞法(MIP)或低场核磁共振技术(NMR)^[32]等微结构分析技术所不具备的优势。另外, 研究也证明了 DIP 方法在测试孔结构变化方

面, 能够获得与 X-CT 或 MIP 类似的结论, 它们之间的区别仅在于测试的孔径范围不同^[33], 如压汞法测得的孔径范围约为几纳米至几百微米, X-CT 技术测试的孔径范围约为几微米至几百微米, DIP 方法则进一步扩大了孔径识别范围至几微米至 1 000 μm , 研究表明正是这类孔对于混凝土的抗冻性影响较大^[2-4]。另外, 体视学分析方法认为物体的三维结构特征可以基于二维结构特征进行无偏估计^[22, 34], 使得 DIP 方法分析混凝土内部损伤演化的结果能够用于推断混凝土整体内部损伤的演化, 进一步推动了 DIP 方法在表征混凝土孔结构损伤和微裂纹演化方面的应用。

利用 DIP 方法分析混凝土基体的孔和裂纹的核心问题是对 ROI 的准确区分。传统方法一般将 ROI 的长宽比定义为“形状因子”, 并规定阈值作为区分孔和裂纹的判据^[16, 20, 35]。现有研究工作中, 形状因子阈值取值并不统一^[16, 25, 35], 导致研究结果差异较大。另外, 混凝土的数字图像中存在孔与裂纹相连的 ROI^[16, 20], 单纯以形状因子作为判据无法将二者分别统计, 不仅降低了 ROI 的识别精度, 还难以量化微裂纹宽度, 导致对微裂纹宽度的研究较少^[16, 36]。尽管有研究利用形态学图像处理技术对复杂 ROI 进行了分割^[20, 37-38], 但在 ROI 统计和计数中, 这类研究仍旧沿用了形状因子作为判据, 因此现有 DIP 方法存在的核心问题并没有得到解决。

除上述问题外, 由于轻骨料混凝土中轻骨料也是多孔材料, 因此轻骨料混凝土的剖面上不仅存在水泥砂浆基体中的孔和微裂纹, 还存在大量轻骨料的孔隙结构, 形成数字图像时也会被采集并形成 ROI, 仅依靠形状因子无法区分两种不同的孔, 更无法量化微裂纹, 这不利于轻骨料混凝土的孔结构损伤定量分析, 需要对此提出适用的 DIP 方法。

本工作提出基于形态学原理的 DIP 方法, 测试了相同浆骨比及相同水灰比的普通骨料混凝土(NAC)和页岩陶粒 LAC 在单面盐冻作用下的孔和微裂纹, 成功地将 DIP 方法的应用范围扩展到轻骨料混凝土的孔和微裂纹的检测, 研究结果表明提出的 DIP 方法高精度识别孔和微裂纹的能力有助于定量分析混凝土孔结构损伤。

1 实验

1.1 原材料及配合比

从考虑 DIP 分析的角度出发, 设计了相同浆骨

比(水泥浆与骨料的体积比约为 0.50)和相同水灰比(0.60)的普通粗骨料混凝土 NAC 和页岩陶粒轻粗骨料混凝土 LAC。2 种混凝土的胶凝材料均为 P. I 42.5 水泥;细骨料均为天然河砂,细度模数 2.68;且均未掺加任何化学外加剂。

NAC 的粗骨料为碎石,由 5~10 mm 和 10~20 mm 颗粒以质量比 4:6 均匀混合为连续级配粗骨料;LAC 的粗骨料为页岩陶粒,其表面粗糙且存在部分开口孔,表观密度和松散堆积密度都明显小于碎石。按照等体积替代 NAC 中碎石的原则,确定了 LAC 的页岩陶粒用量。页岩陶粒和碎石的物

理性能见表 1,其中页岩陶粒和碎石的筒压强度是样品被压入圆筒 20 mm 深度时所承受的压力值,GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法 第 2 部分:轻集料试验方法》测得。2 种混凝土的配合比、坍落度、新拌混凝土含气量、28 d 抗压强度和干表观密度见表 2,其中坍落度和新拌混凝土含气量按照 GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测得,28 d 抗压强度和干表观密度按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》测得,结果显示 2 种混凝土 28 d 抗压强度差异很小,利于分析轻骨料对混凝土盐冻内部损伤的影响。

表 1 页岩陶粒和碎石的物理性能
Table 1 Physical properties of coarse aggregate

Coarse aggregate	Apparent density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Bulk density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Water absorption for 24 h/%	Void ratio/%	Crushing index/%	Cylinder compressive strength/MPa
Graded stone	2 720	1 670	0.1	39	5.6	11.9
Shale ceramsite	1 428	678	5.5	35	19.4	8.1

表 2 混凝土的配合比及性能
Table 2 Concrete mix ratio and performance

Sample No.	Mix ratio/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				Water to cement ratio	Slump/mm	Air content/%	28 d compressive strength/MPa	Dry apparent density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
	Cement	Water	Gravel	Sand					
NAC	360	216	1 045	810	0.60	120	1.4	28.3	2 453
LAC	360	216	549	810	0.60	150	3.5	27.9	1 799

1.2 试件制备

准备内径 100 mm、高 100 mm 的塑料圆柱混凝土模具,在模具内部底面放置直径 100 mm,高 30 mm 的聚四氟乙烯垫块,用于制备直径 100 mm、高 70 mm 的混凝土试件。每种混凝土各成型 5 组试件,每 3 个试件为 1 组。其中 1 组试件用于测试相对动弹性模量和第 32 次冻融循环后的 DIP 分析,其余 4 组试件分别用于冻融试验前和第 8、16、24 次冻融循环后的 DIP 分析。

2 种混凝土分别搅拌均匀后,一次性浇筑到塑料模具中,并在振动台上振动 10 s。试件在温度为(20±5)℃、相对湿度大于 50%的成型室条件下养护 1 d 后拆除塑料模具,参考 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中盐冻法^[17]进行后续的养护,即拆模后先在温度(20±2)℃的水中养护 7 d,随后将试件移入温度为(20±2)℃、相对湿度为(65±5)%的干空室中继续养护,当混凝土试件龄期达到 25 d 时,使用丁基橡胶铝箔密封圆柱体混凝土试样侧面,使试样的抹面和接触聚四氟乙烯的底面保持暴露,其中试件底面作为单面盐冻试验的测试面。所有试件继

续在干空室养护至龄期达到 28 d,将混凝土试件测试面朝下,置于质量分数为 3%的 NaCl 溶液中,液面高度为(10±1) mm,在温度为(20±2)℃的条件下预饱和 7 d。

1.3 单面盐冻试验和样品制备

单面盐冻试验的温度制度和试验方法参考了 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中盐冻法,冻融循环次数为 32 次。混凝土试件在冻融循环前和每 8 次冻融循环后,先按照标准方法测试相对动弹性模量,随后制备混凝土样品用于 DIP 分析,具体制样流程如下:

1) 利用钻孔取芯机从混凝土试件中取样,获得直径 70 mm、高 70 mm 的混凝土芯样。

2) 利用金刚石锯片切割机在距离试件测试面 15 mm 处进行切割,横切面垂直于混凝土芯样的轴线,得到直径 70 mm,高 15 mm 的圆薄片。

3) 依次用 50, 150, 500, 1 000, 3 000 目和 5 000 目的碳化硅磨盘抛光圆薄片的横切面,之后将所有抛光后的样品置于超声清洗槽中清洗 30 min,去除横切面上残留的粉尘。

4) 将圆薄片放入烘箱中以 40℃干燥 1 d,确

保横切面上无水分残留。将透明胶带粘贴在样品侧面, 透明胶带的上边缘比横切面至少高 10 mm。

5) 利用 A、B 组分混合后黏度 650 cps 的环氧树脂胶与粒径 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的荧光粉按 10:1 质量比均匀混合制备浸渍染料并均匀倾倒在抛光后的横切面上, 染料的深度不小于 5 mm。

6) 将所有样品置于真空釜中, 使用真空泵抽真空至 1 kPa 并保持恒定至少 24 h, 使染料完全固化。

7) 使用平刀片除去覆盖在横切面上的染料, 再次利用 5 000 目碳化硅磨盘对横切面进行抛光, 获得用于 DIP 分析的混凝土样品。

2 数字图像的获取、处理和参数计算

2.1 数字图像的获取

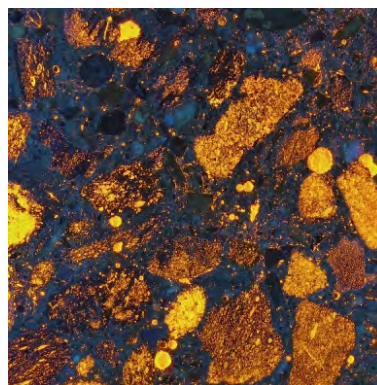
利用高分辨率 CCD (Charge Coupled Device) 相机在紫外光条件下拍摄样品浸渍面。CCD 相机像元尺寸为 $1.45\text{ }\mu\text{m}\times 1.45\text{ }\mu\text{m}$, 可获得高分辨率的数字图像; 利用紫外荧光灯发射波长为 365 nm 的紫外光激发染料的荧光效应; 必要时利用 LED 灯补光。

选择横切面中心处 $45\text{ mm}\times 45\text{ mm}$ 的正方形区域以规避边缘亮度不均匀的影响, 拍摄获得混凝土横切面的数字图像, 如图 1 所示。所获得的数字图像尺寸为 $45\text{ mm}\times 45\text{ mm}$, 这时图中每个像素尺寸约为 $10.6\text{ }\mu\text{m}\times 10.6\text{ }\mu\text{m}$ 。混凝土横切面上的孔和微裂纹被浸渍染料填充, 在紫外荧光灯的照射下会被激发出明亮的荧光, 从而显示为橙红色亮斑。值得注意的是, 在 LAC 的数字图像中(图 1a), 由于页岩陶粒中的孔也被填充荧光树脂, 在数字图像中以密集的荧光亮斑呈现。

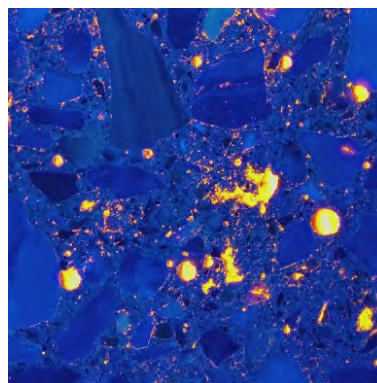
2.2 数字图像的处理

利用 Fiji(ImageJ, with "Batteries Included") 软件平台^[39]处理数字图像, 具体步骤包括数字图像的二值化、轻骨料相去除、孔和微裂纹的 ROI 提取和微裂纹 ROI 的骨架化。

2.2.1 数字图像二值化 将获得的数字图像以 HSB (Hues, Saturation, Brightness) 色彩空间保存, 屏蔽色调和饱和度通道, 仅保留亮度通道, 获得具有明显双峰的亮度分布直方图, 利用 InterModes^[40] 阈值法, 确定双峰亮度值的平均值即为二值化的自动阈值。密实部分像素值记为 0(黑色); ROI 的像素值记为 1(白色), 完成图像的二值化, 记为图像 000, 如图 2 所示。



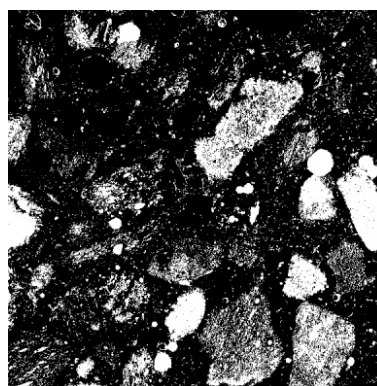
(a) LAC



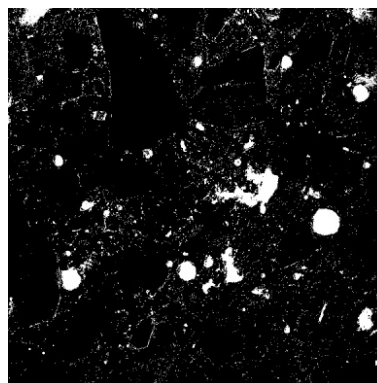
(b) NAC

图 1 混凝土剖面的数字图像

Fig. 1 Digital image for concrete longitudinal-section



(a) LAC



(b) NAC

图 2 混凝土的二值化数字图像

Fig. 2 Binary digital image of concrete

2.2.2 轻骨料相的去除(针对 LAC) 利用形态学图像处理的闭操作, 设置替代次数为 5 次, 将二值化图像中多处聚集的 ROI 连接形成多个大面积 ROI^[20], 并统计各 ROI 直径。考虑到使用的粗骨料粒径均大于 5 mm, 因此将直径大于 5 mm 的 ROI 提取形成图像 000-AGG。利用图像 000 与图像 000-AGG 做逻辑减法运算, 获得新的二值化数字图像, 该图像中仅存在 LAC 砂浆基体中的孔与微裂纹, 记为图像 000-LAC。

闭操作的迭代次数将直接影响处理结果。当迭

代次数为 p 次时, ROI 将先沿边界向外扩展 p 层像素, 再沿边界向内收缩 p 层像素。当相邻 2 个 ROI 间的最小距离小于 $2p$ 个像素时, 这 2 个 ROI 连接形成一个 ROI。依据图 3b, 使用的页岩陶粒被浸渍后, 聚集 ROI 的间距从几个像素至十几个像素不等, 因此为了连接这些 ROI, 定义迭代次数 p 取 5。此时砂浆基体中可能存在少量近距离 ROI 同时被连接, 但砂浆基体中不存在大规模聚集的 ROI (如图 1a 所示), 连接后的 ROI 直径无法达到 5 mm, 不会被提取至图像 000-AGG 中。

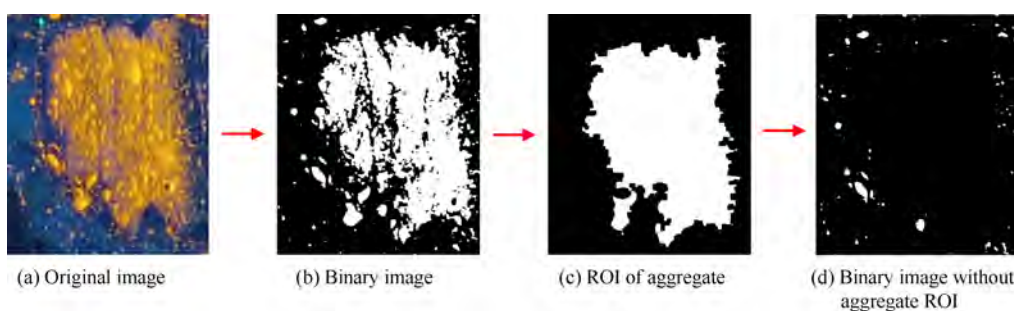


图 3 轻骨料 ROI 去除

Fig. 3 ROI removal of lightweight aggregate

2.2.3 孔和微裂纹的 ROI 提取 已有研究表明^[16, 20, 36], 混凝土未发生内损伤时, 内部的孔在二维平面上多表现为圆形或近似圆形。混凝土基体内部的孔和微裂纹可能独立存在, 被识别为独立的 ROI; 而经典结晶压理论认为, 冰晶在孔内生长挤压孔壁, 致使微裂纹自孔壁萌生并向基体内扩展^[12–13], 被识别为孔与微裂纹相连的 ROI 组合体。形状因子对独立的 ROI 的识别效果较好, 但对 ROI 组合体的识别表现不佳, 因此设计提取、分割和再提取、骨架化的分阶段图像处理方法, 以实现孔与微裂纹 ROI 的单独分析。

1) 圆孔提取

先利用 ROI 的圆形度实现第 1 次提取, 见式(1)。数字图像中对圆形的识别至少需要 1 个长宽比为 1:1 像素形成的 ROI, 此时 ROI 为正方形像素, 此时取得圆形度 R 下限约为 0.785; 当 ROI 为标准圆形时, 圆形度 R 为上限 1, 见式(2)。所有处于圆形度上下限范围内的 ROI 被首先提取至一张新的数字图像中, 记为图像 000-P1; 对于 LAC, 该图像为 000-LAC-P1。

$$R = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (1)$$

$$0.785 \leq R \leq 1.000 \quad (2)$$

式中: R 为 ROI 的圆形度; A 为 ROI 的面积, μm^2 ;

L 为 ROI 的周长, μm 。

2) 孔与微裂纹的分割和再提取

利用原始的二值化图像 000(LAC 为图像 000-LAC)与图像 000-P1(LAC 为图像 000-LAC-P1)做逻辑减法运算, 获得图像 001, 其中的 ROI 不仅包含独立的微裂纹, 同时还包含孔与微裂纹的组合体, 如图 4a 所示。对图像 001 中的 ROI 执行形态学图像处理的开操作, 通过控制迭代次数为 3 次, 实现断开 ROI 之间的细小连接^[20]并去除独立的 ROI^[41], 以达到去除独立的微裂纹以及与孔相连的微裂纹的目的。此时数字图像中仅存在孔, 如图 4b 所示, 记为图像 000-P2(LAC 为图像 000-LAC-P2)。

将数字图像 000-P1 和 000-P2 做逻辑加法运算, 获得新的数字图像记为图像 000-Pore(LAC 为图像 000-LAC-Pore), 其中所有的 ROI 均为孔。同时, 利用原始的二值化图像 000(LAC 为图像 000-LAC)与图像 000-Pore(LAC 为图像 000-LAC-Pore)做逻辑减法运算, 获得图像 000-Crack, 其中的 ROI 均为微裂纹。基于上述操作, 达到了将二值化数字图像中孔与微裂纹分割的目的。

与前文中的闭操作类似, 在对 ROI 执行开操作的迭代次数同样影响图像处理结果。当迭代次数为

p 次时, ROI 将先沿边界向内收缩 p 层像素, 再沿边界向外扩展 p 层像素。若 ROI 宽度小于 $2p$ 个像素, 或 ROI 边界上存在宽度小于 $2p$ 个像素的凸起, 则在收缩边界的过程中被移除; ROI 边界被额外移除的部分会在边界扩展的过程中得以弥补。基于上述操作, 去除了宽度小于 $2p$ 个像素的微裂纹, 对微裂纹的长度并无限制, 由此突破了仅依靠形状因子判断孔与微裂纹的局限性。

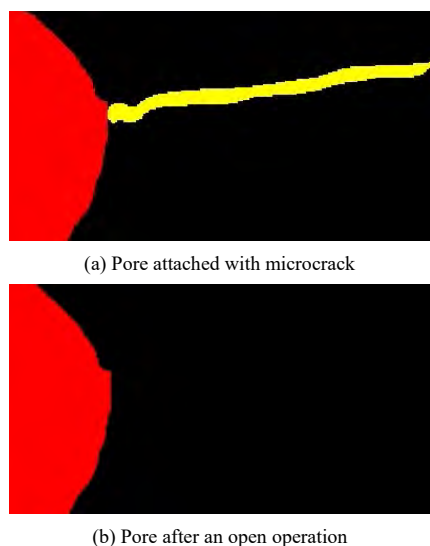


图 4 组合体 ROI 中微裂纹去除

Fig. 4 Removal of microcrack in ROI of composite

在冻融作用下混凝土基体内部萌生的微裂纹通常十分细小且形状不规则, 依靠形状因子很难量化微裂纹的宽度, 反而凸现了传统方法中利用形状因子作为微裂纹判据的局限性。本工作定义开操作迭代次数为 3 次, 此时数字图像中 ROI 均为圆形或近似圆形, 即满足式(2)中条件, 图像中的微裂纹已经被全部移除, 剩余 ROI 全部为孔。此时图像 000-Pore(LAC 为图像 000-LAC-Pore)中最小孔径为单个像素形成的 ROI, 孔径识别精度为最小像素尺寸 $10.6 \mu\text{m}$; 同时图像 000-Crack 中最窄微裂纹为单个像素形成的 ROI, 微裂纹宽度识别精度为最小像素尺寸 $10.6 \mu\text{m}$ 。因此, 相比于传统技术新 DIP 方法提高了微裂纹的识别精度。

3) 微裂纹的骨架化

对提取到的微裂纹 ROI 的量化分析前提是骨架化(Skeletonization)^[36, 41], 即在二值图片中对 ROI 边缘不断地去除像素点, 直至形成一个单像素宽的形状, 同时不影响图像中 ROI 的数量, 如图 5 所示, 获得的图像记为图像 000-Crack-Skeleton(LAC 为图像 000-LAC-Crack-Skeleton)。

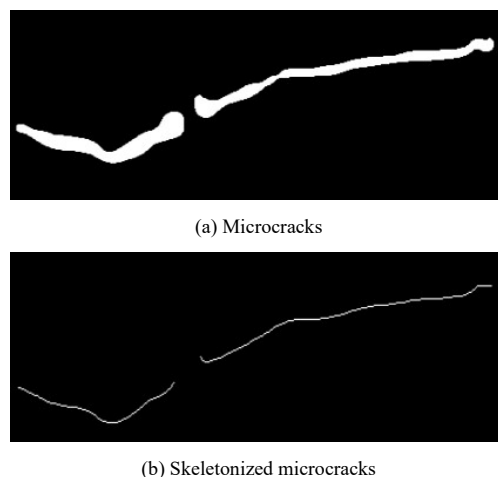


图 5 微裂纹的骨架化

Fig. 5 Skeletonization of microcracks

2.3 孔与微裂纹的定量参数

分别对二值化图像 000-Pore 和 000-LAC-Pore 中所有 ROI 统计并计数, 获得孔的总数量 i 和每个孔的孔径 d_k , 以孔径为横坐标, 以当前孔径的孔数量占比为纵坐标, 建立两种混凝土的孔径分布曲线, 用于分析孔参数随冻融循环的演化。

分别对二值化图像 000-Crack-Skeleton 和 000-LAC-Crack-Skeleton 中所有 ROI 统计并计数, 每个 ROI 均代表 1 个微裂纹, 获得微裂纹的总数量 j 和每个微裂纹的长度 L_m 。分别统计二值化图像 000-Crack 和 000-LAC-Crack 中所有 ROI 面积, 获得微裂纹总面积 S_C 。基于 j 、 L_m 和 S_C , 数字图像分析获得了 2 个冻融作用下混凝土定量微裂纹参数, 如式(3)和式(4)所示:

$$L_{\text{mean}} = \frac{1}{j} \sum_{m=1}^j L_m \quad (3)$$

$$W_{\text{mean}} = \frac{S_C}{\sum_{m=1}^j L_m} \quad (4)$$

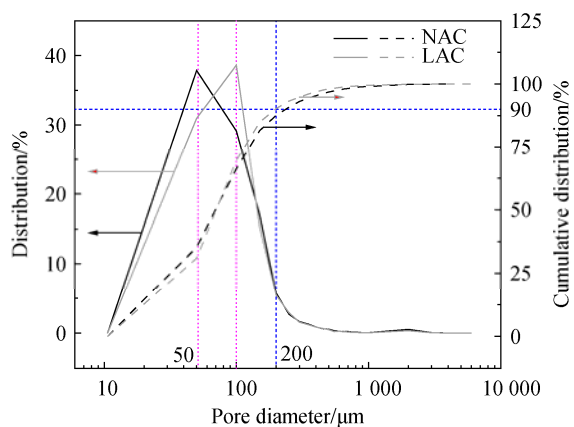
式中: L_{mean} 为微裂纹平均长度, μm ; W_{mean} 为微裂纹平均宽度, μm 。

微裂纹平均长度(L_{mean})反映了冻融作用下混凝土内部微裂纹在长度方向的扩展; 微裂纹平均宽度(W_{mean})反映了冻融作用下混凝土内部微裂纹在宽度方向的扩展。

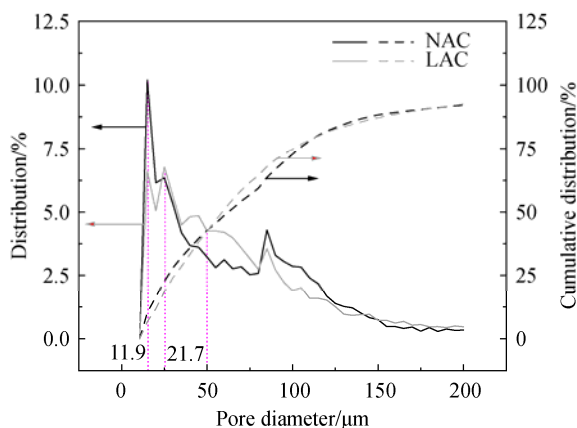
3 结果

3.1 基于 DIP 方法的混凝土孔参数

3.1.1 冻融试验前 NAC 与 LAC 的孔径分布 2 种混凝土在冻融试验前的孔径分布测试结果如图 6 所示。



(a) Pore size distribution



(b) Pore size distribution (10–200 μm)

图6 LAC和NAC的孔径分布

Fig. 6 Pore size distribution of LAC and NAC

如图6a, 2种混凝土均有90%的孔分布在10~200 μm的孔径范围内, 为了清晰显示2种混凝土孔径分布差异, 取2种混凝土在孔径10~200 μm的孔径分布如图6b所示。结果表明, 冻融试验前NAC的最可几孔径为11.9 μm, 而LAC的最可几孔径为21.7 μm, 比NAC大82%。另外, 当孔径小于50 μm时, NAC的孔累计数量占比略高于LAC, 当孔径大于50 μm时则相反。依据表2中新拌混凝土的含气量测试结果, LAC的含气量比NAC多150%, 这是由于页岩陶粒表面存在不规则的开口孔, 裹挟空气参与混凝土拌和, 向新拌混凝土中引入部分较大的气孔^[42], 改变了LAC中的孔径分布, 使LAC的孔径分布更加分散, 表现为分布曲线出现多个尖峰。

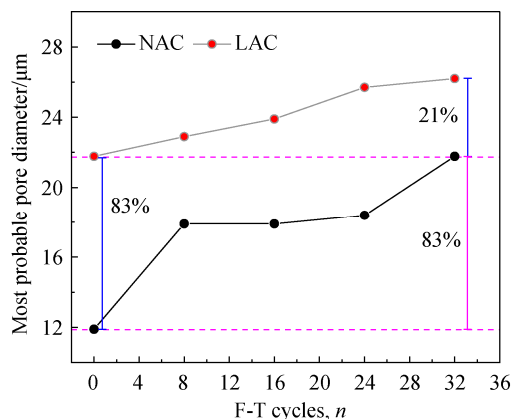
3.1.2 混凝土孔参数随冻融循环的演化 依据式(5)~式(7)统计2种混凝土的最可几孔径(d_M), 平均孔径($\bar{d}$)和孔径分布离散程度(d_σ)随冻融循环次数(n)的演化, 结果见图7。

$$d_M = \{d_{\text{most}} | d_1, d_2, d_3, \dots, d_k\} \quad (5)$$

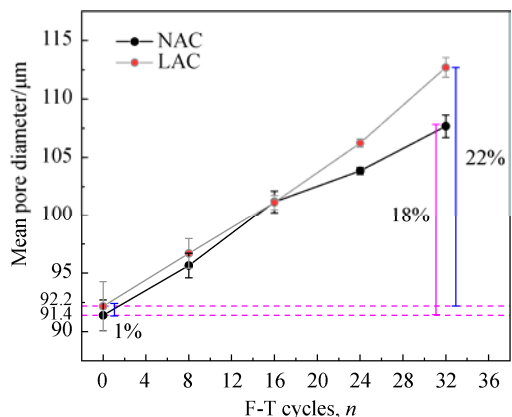
$$\bar{d} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k d_i \quad (6)$$

$$d_\sigma = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (d_i - \bar{d})^2} \quad (7)$$

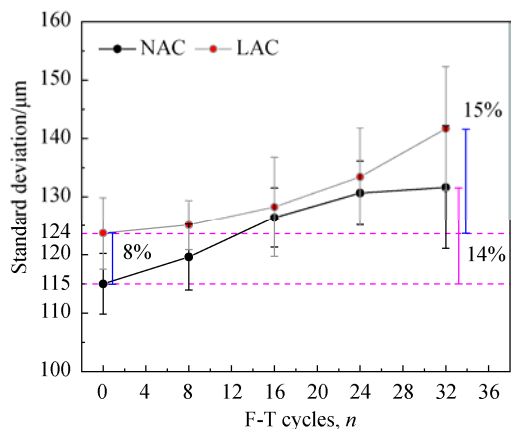
式中: d_M 为最可几孔径, μm; d_{most} 为出现次数最多的孔径, μm; $\bar{d}$ 为平均孔径, μm; d_σ 为孔径分布离散程度, μm; d_k 和 d_i 分别为第 k 个孔和第 i 个孔的孔径。



(a) Most probable pore diameter



(b) Mean pore diameter



(c) Standard deviation of pore diameter

n is number of freeze-thaw cycles

图7 孔参数随冻融循环次数的演化

Fig. 7 Evolution of pore parameters with freeze-thaw cycles

如图 7a 所示, 在冻融试验前, LAC 的 d_M 比 NAC 多 83%, 表明页岩陶粒向混凝土内引入的气泡孔显著增大了最可几孔径。随冻融循环次数增加, 2 种混凝土的 d_M 均持续增加, 32 次冻融循环结束时, NAC 和 LAC 的 d_M 分别增加了 83% 和 21%。

根据图 7b, 在冻融试验前, LAC 的 D_{mean} 比 NAC 仅多 1%, 表明尽管页岩陶粒向混凝土内引入了气泡孔增大了最可几孔径, 但初始平均孔径方面 LAC 与 NAC 几乎没有差异。随冻融循环次数增加, 2 种混凝土的平均孔径均持续增加, 32 次单面盐冻循环结束时, NAC 和 LAC 的 $\bar{d}$ 分别增加了 18% 和 22%。

图 7c 显示, 在冻融试验前, LAC 的 d_σ 比 NAC 多 8%, 表明页岩陶粒向混凝土内引入的气泡孔的孔径并不集中, 因此增加了孔径分布的离散程度。随冻融循环次数增加, 2 种混凝土的 d_σ 均持续增加, 32 次冻融循环结束时, NAC 和 LAC 的 d_σ 分别增加了 14% 和 15%。

上述结果表明, 随着单面盐冻循环次数的增加, 2 种混凝土均出现了孔径扩张, 表现在最可几孔径增加、平均孔径增加和孔径分布的离散程度增加 3 个方面, 这是混凝土在单面盐冻作用下内部损伤的表现形式之一[16, 33, 43-44]。

3.2 基于 DIP 方法的混凝土的微裂纹参数

图 8 为 LAC 和 NAC 微裂纹平均长度(L_{mean})和平均宽度(W_{mean})随冻融循环的演化。

根据图 8, 在冻融试验前, 2 种混凝土内部均存在一定数量和长度微裂纹, 但 2 种混凝土的初始 L_{mean} 和初始 W_{mean} 几乎没有差异。如图 8a 所示, 随冻融循环次数增加, 2 种混凝土的 L_{mean} 持续增加, 32 次单面盐冻循环结束时, NAC 和 LAC 的 L_{mean} 分别增加了 16% 和 18%。值得注意的是, 如图 8b 所示, 在单面盐冻试验过程中, 2 种混凝土的 W_{mean} 随冻融循环次数增加而稍有下降且变化并不明显, 32 次单面盐冻循环结束时, 2 种混凝土的 W_{mean} 仅下降了约 4%。这种现象出现的原因是随着单面盐冻循环次数的增加, 2 种混凝土均萌生了新的微裂纹, 促进了微裂纹平均长度的增加, 而新萌生的微裂纹在宽度方向较窄, 因此降低了微裂纹平均宽度。

如 2.2.3 中所述, 分割微裂纹时开操作迭代次数为 3 次, 此时可识别的微裂纹宽度上限为 $63.6 \mu\text{m}$ 。图 8b 的测试结果表明 2 种混凝土在单面盐冻作用下微裂纹平均宽度约为 $44 \sim 48 \mu\text{m}$, 处于已有研究成果中可能的微裂纹范围, 同时约为可识

别的微裂纹宽度上限的约 $2/3$, 也证明了迭代次数选择的可靠性。

3.3 混凝土相对动弹性模量

图 9 为 NAC 和 LAC 每 8 次冻融循环后的相对动弹性模量 r_n 。随冻融循环次数增加, 2 种混凝土的 r_n 值均持续减小。当 32 次单面盐冻循环结束后,

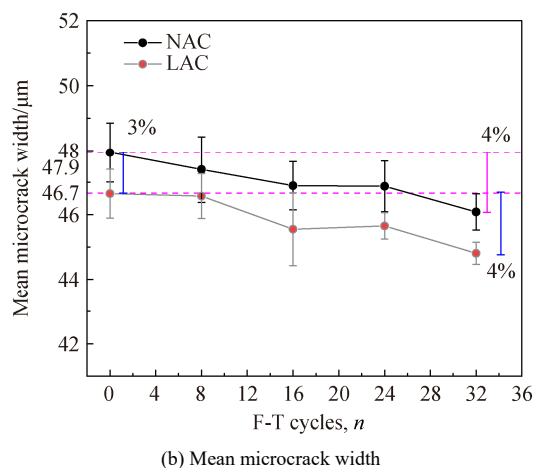
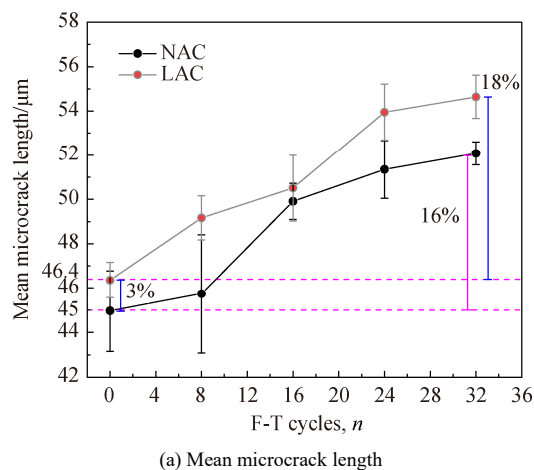


图 8 LAC 和 NAC 的微裂纹参数
Fig. 8 Microcrack parameters of LAC and NAC

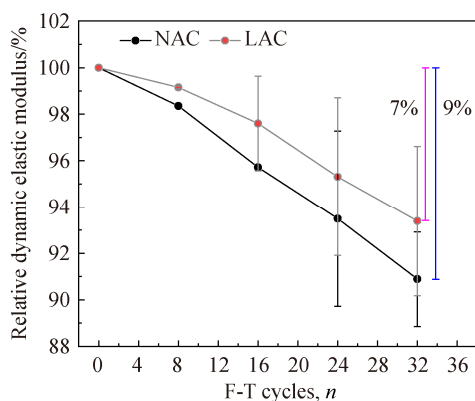


图 9 NAC 和 LAC 的相对动弹性模量
Fig. 9 Relative dynamic elastic modulus of NAC and LAC

LAC 和 NAC 的 r_n 分别为 93% 和 90%，表明单面盐冻作用下 2 种混凝土的内部损伤均表现为相对动弹性模量下降，但 LAC 的 r_n 损失略小于 NAC。

4 讨论

4.1 冻融作用诱导混凝土孔结构损伤致使微裂纹萌生

依据经典的结晶压理论^[12]和微冰透镜理论^[45]，混凝土在冻融作用下的内部损伤来自孔隙水迁移与相变产生的应力对孔壁的破坏，导致裂纹的萌生和扩展。同时，孔内水分的冰点与孔径大小有关，大孔内水分将更早结冰并更容易破坏孔壁^[43]，因此冻融作用下混凝土内部微裂纹的萌生与扩展通常与孔结构密切相关。本节基于 DIP 方法的测试结果，讨论两种混凝土在单面盐冻作用下孔结构损伤的差异。

4.1.1 孔结构损伤随冻融循环的演化 数字图像中，圆形和近似圆形的 ROI 代表未发生损伤的孔，这也在较多研究中得到证实^[16, 20, 36]，因此利用孔的总数量 i 与未损伤的孔数量 i_{cir} 做差即可获得产生损伤的孔的数量，该结果与孔总数量的比值即为产生损伤的孔占比。依据式(8)计算获得每 8 次冻融循环后 2 种混凝土产生损伤的孔占比 P_{dam} ，结果如图 10 所示。

$$P_{\text{dam}} = \frac{i - i_{\text{cir}}}{i} \times 100 \quad (8)$$

式中： P_{dam} 为产生损伤的孔的占比，%。

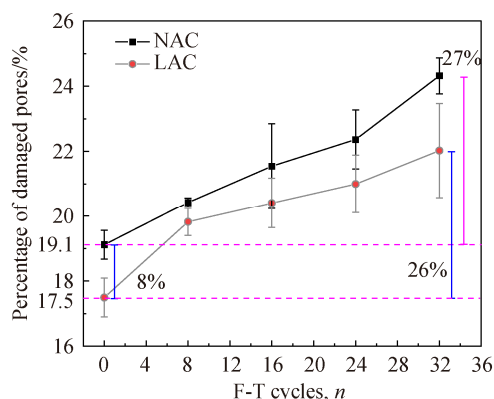


图 10 NAC 和 LAC 的受损伤的孔数量占比

Fig. 10 Percentage of damaged pores of NAC and LAC

根据图 10，2 种混凝土在冻融循环前已经存在受损伤的孔， P_{dam} 差异约为 8%。随着冻融循环次数增加，2 种混凝土的 P_{dam} 均持续增加，当 32 次冻融循环结束时，NAC 和 LAC 的 P_{dam} 分别

比试验前增加了 27% 和 26%。依据 Scherer 的结晶压理论^[12]，低温会导致孔内水分结冰产生压力挤压孔壁，使孔壁承受拉应力而开裂，萌生微裂纹。所提出的 DIP 方法的测试结果显示，冻融作用诱导混凝土孔结构的损伤符合经典理论描述，单面盐冻作用下，两种混凝土均从孔壁处萌生微裂纹，导致孔结构损伤。

4.1.2 孔均微裂纹参数随冻融循环的演化 研究孔均微裂纹参数随冻融循环的演化是基于统计学原理的一种分析方法，用于分析 2 种混凝土在单面盐冻作用下孔结构损伤的差异。

根据式(9)和式(10)计算 2 种混凝土孔均微裂纹长度(L_{cp})和孔均微裂纹数量(N_{cp})，结果如图 11 所示。

$$L_{\text{cp}} = \frac{1}{i} \sum_{m=1}^j L_m \quad (9)$$

$$N_{\text{cp}} = \frac{j}{i} \quad (10)$$

式中： L_{cp} 为孔均微裂纹长度， μm ； i 为孔的总数量； L_m 为每个微裂纹长度； j 为微裂纹总数量； N_{cp} 为孔均微裂纹数量。

根据图 11，在冻融试验前，LAC 的 L_{cp} 和 N_{cp} 分别比 NAC 少 6% 和少 5%，表明 2 种混凝土内部的孔均微裂纹长度和数量差异并不明显。随冻融循环次数增加，2 种混凝土的 L_{cp} 和 N_{cp} 均持续增加，32 次单面盐冻循环结束时，NAC 的 L_{cp} 和 N_{cp} 分别增加了 21% 和 19%，而 LAC 的 L_{cp} 和 N_{cp} 分别增加了 62% 和 40%。当 32 次冻融循环结束时，LAC 的 L_{cp} 和 N_{cp} 分别比 NAC 多 26% 和 12%。

已有研究普遍认为混凝土在降温过程中，孔内水分结冰存在先后顺序，即大孔中水分先结冰，而小孔中水分结冰较晚甚至不结冰^[11, 45]。因此小孔内水分结冰较晚，冰晶生长时间较短，对孔壁破坏较小^[16, 46]。而大孔内水分较早地结冰使得冰晶更容易破坏孔壁，萌生微裂纹，因此 2 种混凝土初始孔径的差异影响了孔结构损伤的演化。结合图 6~图 8 所示结果，在单面盐冻作用下，NAC 由于孔径偏小，孔内水分结冰对孔壁的挤压能力较小，导致孔壁处不容易萌生微裂纹；而对于 LAC，由于孔径偏大，孔内水分结冰对孔壁破坏能力较强，使得孔壁更容易萌生更多微裂纹。但从应力集中的角度分析，孔壁萌生微裂纹是对孔内冰晶挤压孔壁应力的释放作用，使得微裂纹很难进一步扩展，因此 LAC 中较大的气泡孔对提高混凝土的抗冻性有积极作用。

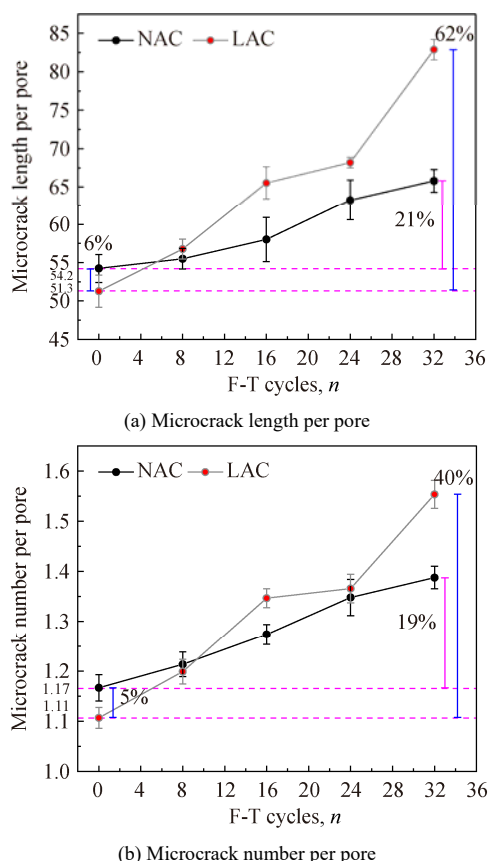


图 11 NAC 和 LAC 的孔均微裂纹参数

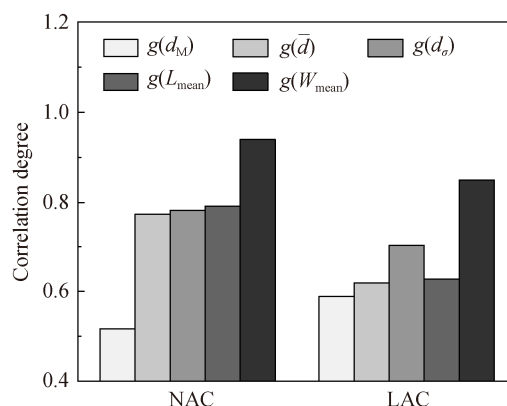
Fig. 11 Microcrack parameters per pore of NAC and LAC

4.2 冻融作用下 LAC 的 r_n 损失的特殊原因

研究显示, 冻融作用诱导混凝土萌生的微裂纹宽度通常在 $100\ \mu\text{m}$ 以下^[16, 36], 主要引起混凝土性能出现下降, 如相对动弹性模量损失增加等; 当微裂纹宽度继续增加达到 $100\ \mu\text{m}$ 以上时, 微裂纹已肉眼可见, 则认为混凝土的劣化已经非常严重。本工作设计的具有相同水灰比和相同浆骨比的 LAC 与 NAC 受到盐冻作用诱导产生孔结构损伤和微裂纹演化存在显著差异, 但二者相对动弹性模量损失十分接近, 因此本节基于灰熵系统理论^[2, 47], 讨论 LAC 和 NAC 的最可几孔径(d_M)、平均孔径($\bar{d}$)、孔径分布离散程度(d_σ)、微裂纹平均长度(L_{mean})、微裂纹平均宽度(W_{mean})分别与其自身的相对动弹性模量下降的关联度, 关联度值分别为 $g(d_M)$ 、 $g(\bar{d})$ 、 $g(d_\sigma)$ 、 $g(L_{\text{mean}})$ 和 $g(W_{\text{mean}})$, 用于分析导致 LAC 相对动弹性模量损失的特殊原因, 如图 12 所示。

图 12 结果显示, 单面盐冻作用下, NAC 和 LAC 基体中微裂纹宽度扩展是导致二者相对动弹性模量下降的最主要因素。此外, 在 NAC 中, 单面盐冻作用导致的微裂纹平均长度增加是导致相对

动弹性模量下降的第二重要因素, 该结果进一步表明了单面盐冻作用下, 普通骨料混凝土内部尽管存在新的微裂纹萌生, 但更倾向于已有微裂纹扩展长度。而在 LAC 中, 单面盐冻作用导致的孔径分布离散程度增加是导致相对动弹性模量下降的第二重要因素, 这进一步说明了页岩陶粒向 LAC 基体中引入的气泡孔较大, 表现为孔径离散程度增加, 导致冻融作用下孔径扩张比较显著, 进一步促进了相对动弹性模量的下降。



$g(d_M)$, $g(\bar{d})$, $g(d_\sigma)$, $g(L_{\text{mean}})$ and $g(W_{\text{mean}})$ are the correlation values of most probable pore diameter, mean pore diameter, standard deviation, mean microcrack length and mean microcrack width, respectively.

图 12 NAC 和 LAC 的各参数序列的关联度

Fig. 12 Correlation degree of parameters' sequence of NAC and LAC

5 结论

提出的基于形态学原理的 DIP 方法, 实现了 LAC 数字图像中多孔轻骨料 ROI 的移除, 避免了轻骨料孔隙结构对 ROI 分析的干扰, 提高 ROI 的识别精度至 $10.6\ \mu\text{m}$, 突破了仅依靠形状因子无法独立统计图像中孔与微裂纹的局限性, 定量分析单面盐冻作用下具有相同浆骨比(0.50)及相同水灰比(0.60)的 LAC 与 NAC 孔和微裂纹差异。基于所提出的 DIP 方法, 获得了 LAC 孔结构损伤特点:

1) 页岩陶粒表面粗糙且具有开口孔, 拌和时裹挟较多空气, 在新拌 LAC 中引入较多大气泡; 相比于 NAC, LAC 最可几孔径偏大(83%), 且孔径分布离散程度较高(8%)。

2) 根据对 d_M 、 $\bar{d}$ 、 d_σ 、 L_{mean} 和 W_{mean} 的分析, 单面盐冻作用下 LAC 和 NAC 基体孔结构损伤表现为孔径扩张, 伴随着孔壁萌生微裂纹, 结果支持了经典结晶压理论的描述; 但与 NAC 相比, LAC 基体中的孔壁更倾向于萌生微裂纹。

3) 灰色关联度分析表明, 盐冻作用下 NAC 相

对动弹性模量下降主要由微裂纹萌生和扩展导致, 而 LAC 相对动弹性模量损失还与孔径分布离散程度较高有关。

参考文献:

- [1] WU Y W, LIU C, LIU H W, et al. Pore structure and durability of green concrete containing recycled powder and recycled coarse aggregate[J]. *J Build Eng*, 2022, 53: 104584.
- [2] 董瑞鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 风积沙混凝土的气泡参数对其强度的影响[J]. *材料导报*, 2022, 36(12): 105–109.
DONG Ruixin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. *Mater Rep (in Chinese)*, 2022, 36(12): 105–109.
- [3] CHOI P, YEON J H, YUN K K. Air-void structure, strength, and permeability of wet-mix shotcrete before and after shotcreting operation: the influences of silica fume and air-entraining agent[J]. *Cem Concr Compos*, 2016, 70: 69–77.
- [4] JH Pielert. Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials[M]. Philadelphia: ASTM, 1978
- [5] CHEN M, LI Z H, WU J F, et al. Shear behaviour and diagonal crack checking of shale ceramsite lightweight aggregate concrete beams with high-strength steel bars[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 249: 118730.
- [6] WANG X F, FANG C, KUANG W Q, et al. Experimental study on early cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 136: 173–183.
- [7] AKCAY B, ALI TASDEMIR M. Effects of distribution of lightweight aggregates on internal curing of concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2010, 32(8): 611–616.
- [8] WU X G, WANG S R, YANG J H, et al. Damage characteristics and constitutive model of lightweight shale ceramsite concrete under static-dynamic loading[J]. *Eng Fract Mech*, 2022, 259: 108137.
- [9] KARTHIKA R B, VIDYAPRIYA V, NANDHINI SRI K V, et al. Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate[J]. *Mater Today Proc*, 2021, 43: 1606–1613.
- [10] 丁建彤, 郭玉顺, 木村薰. 结构轻骨料混凝土的现状与发展趋势: 第二届结构轻骨料混凝土国际会议介绍[J]. *混凝土*, 2000(12): 23–26.
DING Jiantong, GUO Yushun, KAOLU KIMURA. *Concrete(in Chinese)*, 2000(12): 23–26.
- [11] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing[A]//*Proceedings of the Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board*[C]. Washington, D.C., 1953, 32: 285–297.
- [12] SCHERER G W. Freezing gels[J]. *J Non Cryst Solids*, 1993, 155(1): 1–25.
- [13] SUN Z H, SCHERER G W. Effect of air voids on salt scaling and internal freezing[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(2): 260–270.
- [14] SETZER M J. Micro ice lens formation and frost damage[A]//*International RILEM workshop on frost damage in concrete*[C]. University GH Essen, IBPM, Germany, 2002.
- [15] XU Y D, WANG L, ZHAO X. Analysis of Internal Frost Damage of Restrained Concrete[C]//*Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, 2018.
- [16] WANG Z D, ZENG Q, WANG L, et al. Characterizing frost damages of concrete with flatbed scanner[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 102: 872–883.
- [17] 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性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082-2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [18] Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing: ASTM C666[S]. ASTM, 2015.
- [19] SETZER M J, HEINE P, KASPAREK S, et al. Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: capillary suction, internal damage and freeze thaw test—reference method and alternative methods A and B[J]. *Mat Struct*, 2004, 37(10): 743–753.
- [20] SOROUSHIAN P, ELZAFRANEY M, NOSSONI A. Specimen preparation and image processing and analysis techniques for automated quantification of concrete microcracks and voids[J]. *Cem Concr Res*, 2003, 33(12): 1949–1962.
- [21] 吴浩, 姚燕, 王玲. 数字图像处理技术在水泥混凝土研究中的应用[J]. *混凝土与水泥制品*, 2007(4): 8–13.
WU Hao, YAO Yan, WANG Ling. *China Concr Cem Prod(in Chinese)*, 2007(4): 8–13.
- [22] 周双喜, 盛伟, 魏星, 等. 基于深度学习的混凝土孔结构图像法快速分析[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(5): 653–663.
ZHOU Shuangxi, SHENG Wei, WEI Xing, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2019, 47(5): 653–663.
- [23] RIMKUS A, PODVIEZKO A, GRIBNIAK V. Processing digital images for crack localization in reinforced concrete members[J]. *Procedia Eng*, 2015, 122: 239–243.
- [24] MAHAKAVI P, CHITHRA R. Impact resistance, microstructures and digital image processing on self-compacting concrete with hooked end and crimped steel fiber[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 220: 651–666.
- [25] LI S G, LU Y H, CHEN G X. Quantitative damage evaluation of AAR-affected concrete by DIP technique[J]. *Mag Concr Res*, 2013, 65(5): 332–342.
- [26] CHANG C W, CHEN P H, LIEN H S. Evaluation of residual stress in pre-stressed concrete material by digital image processing photoelastic coating and hole drilling method[J]. *Measurement*, 2009, 42(4): 552–558.
- [27] 高鹏, 陈阳, 黄浩良, 等. 干燥环境下混凝土内部损伤的量化[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 312–322.
GAO Peng, CHEN Yang, HUANG Haoliang, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(2): 312–322.
- [28] DARWIN D, ABOU-ZEID M N, KETCHAM K W. Automated crack identification for cement paste[J]. *Cem Concr Res*, 1995, 25(3): 605–616.
- [29] LANDIS E N, NAGY E N. Three-dimensional work of fracture for mortar in compression[J]. *Eng Fract Mech*, 2000, 65(2–3): 223–234.
- [30] FAN L F, GAO J W, WU Z J, et al. An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique[J]. *Appl Therm Eng*, 2018, 140: 505–519.
- [31] AVANTHI ISAKA B L, RANJITH P G, RATHNAWEERA T D, et al.

- Quantification of thermally-induced microcracks in granite using X-ray CT imaging and analysis[J]. *Geothermics*, 2019, 81: 152–167.
- [32] 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]. *Constr Build Mater*, 2022, 319: 126097.
- [33] 韩女. 冻融循环作用下混凝土孔隙结构特征及损伤演化规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- HAN Nv. Study on pore structure characteristics and damage evolution law of concrete under freeze-thaw cycle(in Chinese, dissertation). Xi'an: Changan University, 2018.
- [34] [陈惠苏, 孙伟, STROEVEN Piet, 等. 计算混凝土中邻近集料表面间距平均值的体视学方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1511–1514.
- CHEN Huisu, SUN Wei, PIET S, et al. *J Harbin Inst Technol* (in Chinese), 2005, 37(11): 1511–1514.
- [35] AMMOUCHE A, BREYSSE D, HORNAIN H, et al. A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement-based materials[J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30(1): 25–35.
- [36] 李曙光, 陈改新, 鲁一晖. 基于微裂纹定量分析的混凝土冻融损伤评价方法[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 207–212.
- LI Shuguang, CHEN Gaixin, LU Yihui. *J Hydroelectr Eng* (in Chinese), 2013, 32(3): 207–212.
- [37] DEBNATH B, PRATIM SARKAR P. Quantification of random pore features of porous concrete mixes prepared with brick aggregate: an application of stereology and mathematical morphology[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 294: 123594.
- [38] MA K L, HUANG X Y, SHEN J T, et al. The morphological characteristics of brick-concrete recycled coarse aggregate based on the digital image processing technique[J]. *J Build Eng*, 2021, 44: 103292.
- [39] Fiji T. Fiji is an image processing package [EB/OL]. (2022) [2023-06-27]. <https://fiji.sc/#>
- [40] PREWITT J M, MENDELSON M L. The analysis of cell images[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 1966, 128(3): 1035–1053.
- [41] 李曙光, 陈改新, 鲁一晖. 基于数字图像处理的混凝土微裂纹定量分析技术[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1072–1077.
- LI Shuguang, CHEN Gaixin, LU Yihui. *J Build Mater*(in Chinese), 2013, 16(6): 1072–1077.
- [42] 罗祥, 王玲, 王振地. 混凝土中气泡的产生与发展: 机理和影响因素[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊2): 213–217.
- LUO Xiang, WANG Ling, WANG Zhendi. *Mater Rep*(in Chinese), 2021, 35(Suppl 2): 213–217.
- [43] 徐亚丁. 约束状态下混凝土盐冻破坏行为和机理的研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2017.
- XU Yading. Study on the behavior and mechanism of salt freezing failure of concrete in constrained state(in Chinese, dissertation). Beijing: China Building Materials Academy, 2017.
- [44] 高志浩. 约束应力调控及其对混凝土单面盐冻行为的影响[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2020.
- GAO Zhihao. Restrained stress regulation and its influence on salt freezing behavior of concrete on one side(in Chinese, dissertation). Beijing: China Building Materials Academy, 2020.
- [45] SETZER M J. Micro-ice-lens formation in porous solid[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2001, 243(1): 193–201.
- [46] ZENG Q, FEN-CHONG T, DANGLA P, et al. A study of freezing behavior of cementitious materials by poromechanical approach[J]. *Int J Solids Struct*, 2011, 48(22–23): 3267–3273.
- [47] DENG J L. Control problems of grey systems[J]. *Syst Control Lett*, 1982, 1(5): 288–294.