

基于工业扫描分析混凝土气泡结构与抗盐冻性能

张家科¹, 袁捷¹, 刘文博², 吴越¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 利用工业扫描(CT)技术对混凝土盐冻过程中气泡结构变化进行可视化表征和定量计算. 研究发现引气是提高混凝土抗盐冻性能最重要的手段, 建议含气量为5%~7%, 同时气泡间距系数与混凝土抗盐冻性能有直接关系, 气泡间距系数小于238 μm 时混凝土具有较好的抗盐冻性能. 引气混凝土由于内部有大量小而封闭的气泡, 其气泡间距系数较小, 盐冻过程中气泡能够缓解结冰压, 降低盐冻破坏的程度; 非引气混凝土由于结冰压无法释放, 当结冰压大于混凝土所能承受的膨胀力时, 会在表面产生微裂缝并逐渐扩展, 最终造成表面浆体剥落, 形成盐冻破坏.

关键词: 混凝土抗冻性; 工业扫描; 微观结构; 盐冻剥蚀
中图分类号: TU528.37; U416.222 **文献标志码:** A

Application of Industrial Computerized Tomography to Analyze Air Voids Structure and Salt Scaling Resistance of Concrete

ZHANG Jiakē¹, YUAN Jié¹, LIU Wenbo², WU Yue¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200092)

Abstract: This paper utilizes the industrial computerized tomography to visualize and to calculate the microstructure change of concrete during cyclic freeze-thaw test. The results indicate that entraining air is the sufficient way for improving the frost resistance of concrete, and the suggested air content is 5%~7%. Also, the air void space directly affects the frost resistance of concrete, and concrete can well resist frost damage when the air void space is shorter than 238 μm . The air-entrained concrete has significant amount of fine air voids with shortened air void space, and the fine air voids can release the ice forming pressure during freezing, thus protecting the concrete from frost damage. The ice forming pressure can barely release for non-air entrained concrete,

and micro-cracks forms when the ice forming pressure exceeded the allowable stress of concrete, and finally results in material loss or frost damage.

Key words: frost resistance of concrete; industrial computerized tomography; microstructure; salt scaling

冻融破坏以及盐冻破坏是影响寒冻地区混凝土设施耐久性的一个重大问题. 在过去的几十年里, 世界各地对混凝土的冻融破坏以及盐冻破坏进行了大量研究^[1-4]. 其主要原因为当温度降低至结冰点时, 混凝土中的可冻水结冰体积膨胀, 过冷水在混凝土内部发生迁移, 引起各种压力, 当压力超过混凝土能承受的应力时, 混凝土内部孔隙及微裂纹逐渐增大, 扩展并互相连通, 强度逐渐降低, 造成混凝土破坏^[5-6]. 孔结构是混凝土细观结构的重要组成部分, 对水在混凝土体系内的流动有较大的影响^[7]. Zhang等^[8]利用压汞法测得硬化水泥浆体的孔径为0.04~0.2 μm 时, 试件的抗冻性较差, 此外控制水灰比能够有效改善混凝土的抗冻性. 张士萍等^[9]通过抗冻性试验、压汞试验、气泡间距系数分析、岩相分析以及扫描电镜分析, 研究了孔结构对混凝土抗冻性的影响关系, 发现掺入引气剂能够细化混凝土的孔隙, 减少大孔, 增加微小孔, 从而提高混凝土的抗冻性. 杨全兵等^[10]的研究表明, 提高含气量会降低混凝土的饱水度和到达平衡饱水度的时间, 从而提高混凝土的抗冻性. 我国《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTGF30—2003)^[11]规定在严寒和寒冷地区混凝土路面的最大平均气泡间距系数分别要小于225 μm 和275 μm .

目前混凝土的孔结构主要通过压汞法和扫描电镜等测试方法获得, 而气泡主要通过直线导线法测得. 压汞法和扫描电镜均为取样测试, 在表征整个试

收稿日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(51678444)

第一作者: 张家科(1983—), 男, 工学博士, 副研究员, 主要研究方向为道路工程. E-mail: zhjiak@tongji.edu.cn

通讯作者: 袁捷(1971—), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为机场工程. E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn

件的孔结构存在一定的偏差^[12]。此外,压汞法只能测连通孔,不包括封闭的或堵塞的孔,并且在高压条件下该方法容易破坏低强度混凝土的孔结构,造成较大误差^[13]。直线导线法在测试混凝土气泡过程中是人为决定导线的走向,具有一定的随意性。鉴于传统方法在表征混凝土细观结构方面存在的局限性,本文采用工业扫描(computerized tomography,CT)计算机层析扫描成像技术对混凝土的细观结构进行分析,得到试件的三维立体图像和气泡结构参数,直观地表征混凝土的微观结构与抗盐冻性能之间的关

系。此外,利用 CT 计算机层析扫描无损检测的特点,可以实现对盐冻循环作用下混凝土微观结构的变化进行跟踪检测。

1 试验

1.1 原材料及配合比

本次试验采用 P·O 52.5 的普通硅酸盐水泥,粗骨料采用玄武岩,细集料采用中粗砂,砂和粗骨料的各项性能指标见表 1、表 2。

表 1 砂的性能指标

Tab.1 Property index of sand

表观密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细度模数	颗粒级配							底盘
		筛孔尺寸/mm	5.0	2.5	1.25	0.63	0.351	0.16	
2 632	2.75	筛余/%	1.8	7.1	19.9	25.3	34.2	10.9	0.8

表 2 粗骨料性能指标

Tab.2 Property index of coarse aggregate

骨料尺寸 /mm	表观密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	吸水率 /%	颗粒级配				底盘	
				筛孔尺寸/mm	40	20	10		5
10~20	2 498	1 312	0.79	筛余/%	0	66.8	33.0	0.1	0.1
5~10	2 688	1 403	1.14	筛余/%	0	0	51.5	46	2.5

本试验设计了 4 种不同配合比的混凝土,如表 3 所示。按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080—2002)^[14] 搅拌振捣成型 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 160 \text{ cm}$ 试件,24 h 后拆模,放入标准养护室进行养护 28 d。在盐冻试验前需要将试件在水中浸泡 7d,使其达到饱水状态。

表 3 混凝土的配合比

Tab.3 Mix proportion of concrete samples

编号	水泥/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	碎石/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂 /%	引气剂 /%
A	340	142.8	643	1 256	1	0
B	340	142.8	597	1 237	0.5	0.01
C	340	142.8	590	1 222	0.4	0.02
D	340	142.8	583	1 220	0.3	0.03

注:减水剂和引气剂为水泥含量的百分比。

1.2 试验方法

将成型的 A、B、C、D 四组试件分别置于浓度为 4% 醋酸钾溶液中进行盐冻循环试验,采用单面浸入溶液的方式,利用快冻/慢冻两用冻融循环仪器,设定每次冻融循环为 6 h,循环模式如图 1 所示。

待试件完成设定的冻融次数后进行剥落量测试,本试验选取单位面积剥落量(试件剥落物质量与试件接触溶液的面积之比)作为评价指标进行表征,通过收集混凝土剥落碎片的方法,将接触溶液面剥蚀的碎片收集,并在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重,然后用碎片的质量除以表面积即为试件的剥落量。

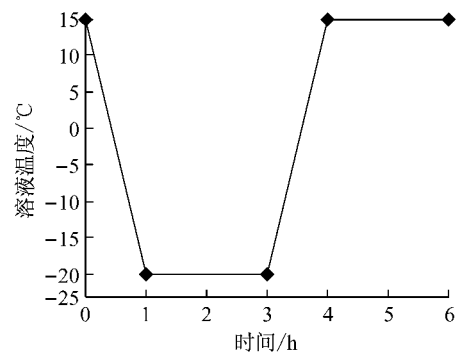


图 1 冻融循环模式

Fig.1 Freeze-thaw cycle sequence

$$M_n = \frac{m_n}{s} \quad (1)$$

式中: M_n 为 n 次盐冻循环后试件的累积单位面积剥落量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; m_n 为 n 次盐冻循环后累积烘干剥落物质量, kg ; s 为测试试件接触溶液的表面积, m^2 。

对同一个试件在 25 次盐冻循环前后分别进行 CT 扫描,采用 YXLON CT Precision 工业 CT 推荐配置的三维可视化软件 VG Studio Max2.2,软件可根据核磁共振图像(MRI)等数据来生成扫描试件的 3D 模型。硬化水泥混凝土试件扫描后重建数据的三维可视化效果,利用 VG Studio Max2.2 可以获得试件正面、立面和侧面三个角度的二维切片图像,并通过重建算法实现三维立体效果图及数据分析。

2 试验结果及分析

2.1 盐冻循环

A、B、C、D 四组试件的统计剥落量结果如表 4 和图 2 所示,并计算 25 次冻融循环后,剥落量与混凝土含气量之间的关系如图 3 所示.通过图表可以看出,混凝土盐冻过程中的剥落量开始随混凝土含气量的增加而降低,但当含气量大于 6.4% 时,剥落量基本保持恒定,C 组和 D 组的剥落量几乎一样,这说明混凝土的含气量不是越高就越好,过度引气反而会降低其抗冻性.25 次盐冻循环后混凝土的剥落

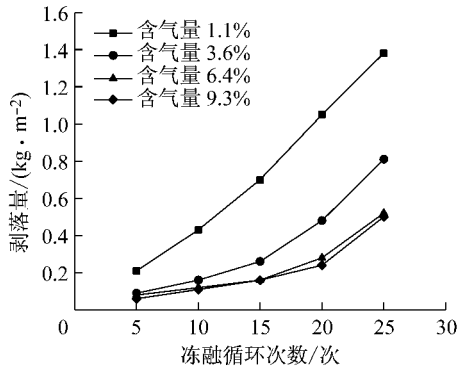


图 2 剥落量随冻融循环次数的变化关系

Fig. 2 Relationship between material loss and freeze-thaw cycles

美国联邦航空管理局规定 25 次盐冻循环试验剥落量小于等于 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 为合格,并且规定当剥落量大于 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时即可停止试验^[15].因此,由回归方程可以得到,在此配合比下混凝土抗盐冻性能要达到标准,即 25 次盐冻循环剥落量 M_{25} 小于 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,混凝土的含气量要大于 4.1%,结合机场道面混凝土强度、坍落度、经济效应等指标和公路相关规范,含气量应在 5%~7% 之间.

2.2 混凝土微观孔结构

从 A、B、C、D 四组试件中切取尺寸为 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的样本进行 CT 扫描,然后从扫描试件中选取 $10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 的区域进行统计分析,得到不同引气剂掺量混凝土的三维立体效果图,如图 4 所示.图像中混凝土内部黑色的阴影为孔隙,可以看出,随着引气剂掺量的增加,混凝土内部黑色面积增加,说明气泡逐渐增多.

2.2.1 含气量

根据分析软件可以直接得出试件的含气量,将工业 CT 装置和含气量测定仪得出的混凝土孔隙率进行对比,结果如表 5 所示,工业 CT 得到的孔隙率

量 $M_{25} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ 随着混凝土含气量 $A (\%)$ 变化的回归方程如下所示:

$$M_{25} = 0.02A^2 - 0.31A + 1.69, R^2 = 0.99 \quad (2)$$

表 4 混凝土试件在盐冻循环次数下的剥蚀量

Tab. 4 Material loss of samples after cyclic freeze-thaw test in salt solution

试件编号	含气量 / %	剥落量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)				
		5 次	10 次	15 次	20 次	25 次
A	1.1	0.21	0.43	0.70	1.05	1.38
B	3.6	0.09	0.16	0.26	0.48	0.81
C	6.4	0.08	0.12	0.16	0.28	0.52
D	9.3	0.06	0.11	0.16	0.24	0.50

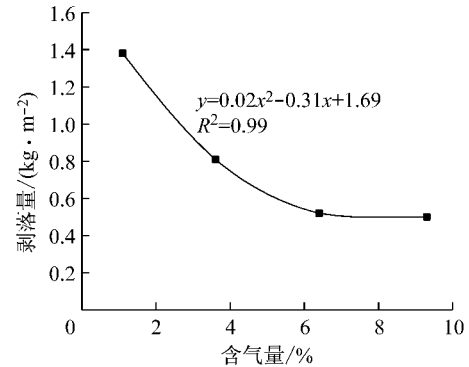


图 3 剥落量随含气量的变化关系

Fig. 3 Relationship between material loss and air content

要略大于含气量测定仪测得的含气量.

表 5 含气量测定仪和 CT 测定的孔隙率对比

Tab. 5 Comparison of measured air voids using air content meter and CT method

测试仪器	孔隙率 / %			
	A	B	C	D
含气量测定仪	1.10	3.60	6.40	9.30
工业 CT	1.24	3.72	6.59	9.87

2.2.2 气孔数量及孔径分布

高品质引气剂引入的气泡孔径一般在 $50 \sim 300 \mu\text{m}$,气泡的体积小于 0.015 mm^3 ,且为比较规则的圆形气泡^[16].为避免把混凝土中集料周围的裂隙作为被测对象,需要通过设置合理的球形度将小于设置值的孔隙去除,本文球形度取 0.6,将球形度小于 0.6 的孔隙去除后进行统计分析.

按照要求筛选孔隙后,利用分析软件对混凝土内部不同孔径气孔数量、平均孔径进行统计,其结果如表 6 和图 5 所示,可以看出混凝土内部气泡数量随引气剂掺量的提高而增多,但不同大小气孔的数量分布并不均匀,气孔越小数量越多;当混凝土掺入

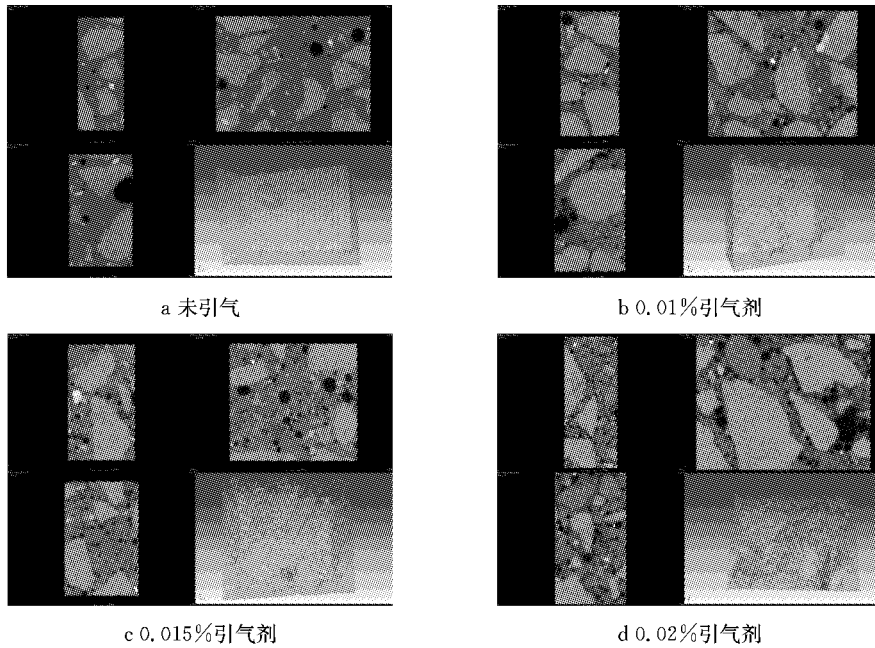


图 4 不同引气剂掺量的混凝土 CT 扫描图像

Fig.4 CT images of concrete samples with different air entrain admixture dosage

了引气剂,小孔径的气孔数量明显增加,三组引气混凝土孔径小于 134 μm 气孔数量占气孔总数 98% 以上. 由剥蚀量测试结果(表 4)可知, B、C、D 三组引气混凝土抗盐冻性能要远远优于未引气的 A 组, 正

为引气所引入大量小且均匀的气泡,这些气泡在正常环境下不易被水完全充满,导致混凝土饱水度降低,能够释放更多的结冰压,从而提高混凝土的抗盐冻性能^[17].

表 6 混凝土内部气泡孔径分布

Tab.6 Air void distributions in concrete samples

编号	气泡孔径比例/%							合计	平均孔径/ μm
	<62 μm	62~134 μm	134~229 μm	229~288 μm	288~492 μm	492~620 μm	>620 μm		
A	60.49	30.50	6.04	1.12	1.23	0.17	0.45	1 787	260
B	69.40	29.14	1.01	0.18	0.22	0.03	0.03	18 066	142
C	72.02	26.81	0.81	0.14	0.16	0.02	0.03	31 270	125
D	68.20	30.35	0.99	0.24	0.16	0.02	0.03	35 979	128

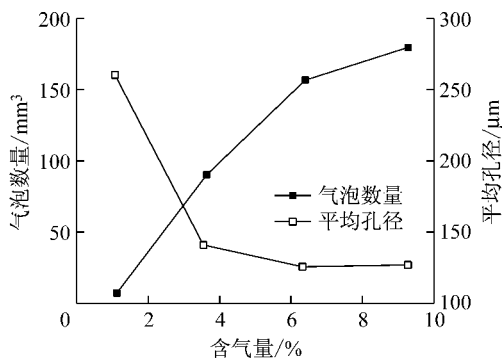


图 5 混凝土的单位体积气孔数和平均孔径随含气量的变化关系

Fig.5 Relationships between air voids and average air void size versus air content

从图 5 可以得到气孔平均孔径和混凝土含气量呈递减关系,引气剂掺量越大,混凝土含气量越大,

气孔平均孔径越小,但含气量为 9.3% 的 D 组试件的平均孔径要略大于含气量为 6.4% 的 C 组试件,因为 D 组引气剂的掺量过大,混凝土无法容纳更多的微小气泡,振捣成型的时候这些小气泡容易形成大气泡(图 4d),导致平均孔径增大,从而进一步证实 D 组试件出现了过度引气的情况.

2.2.3 气泡间距系数

含气量与气泡间距系数(L)的关系是混凝土抗冻抗盐冻设计中对引气剂掺量进行控制的一个重要依据,混凝土气泡间距系数可以根据《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2003)^[11] 给出的下列公式计算得到:当混凝土中浆气比 $P/A \leq 4.33$ 时, $L = P/\alpha A_s$; 当混凝土中浆气比 $P/A > 4.33$ 时, $L = \frac{3}{\alpha} [1.49 (\frac{P}{A_s} + 1)^{\frac{1}{3}} - 1]$. 式中: α 为气泡比表面

积, $\text{mm}^2 \cdot \text{mm}^{-3}$; P 为混凝土中水泥净浆体积含量, %; A_s 为硬化混凝土中的空气体积含量, %。

通过计算 A、B、C、D 四组混凝土试件的气泡间距系数, 并与 25 次盐冻循环剥落量进行拟合, 可以得到剥落量与气泡间距系数的拟合关系曲线, 如图 6 所示。根据剥落量 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的合格临界值, 计算得到混凝土气泡间距系数小于 $238 \mu\text{m}$ 时, 具有良好的抗盐冻性能。

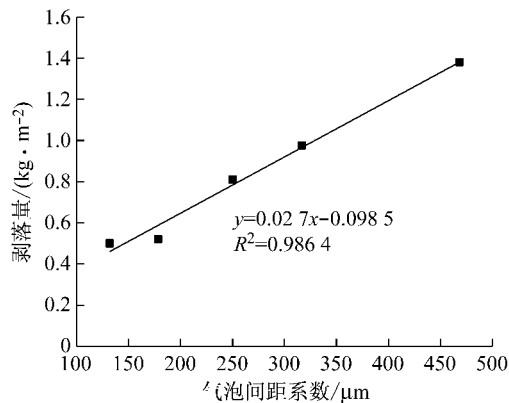


图 6 剥落量与气泡间距系数的拟合关系

Fig. 6 Regression relationship between material loss and air void space coefficient

2.3 盐冻作用下混凝土孔结构变化

基于工业 CT 技术无损检测的特点, 对同一个试件在 25 次盐冻作用前后分别进行扫描, 得到其孔结构的变化规律。由于盐冻破坏仅发生在混凝土表面, 故选取溶液接触面 5 mm 深度的区域进行统计分析。

2.3.1 接触面总孔隙率的变化

盐冻循环前后总孔隙率的统计结果如表 7 所示, 由表可知, C 组试件混凝土孔隙率变化较小, 而非引气 A 组孔隙率变化是引气型 C 组的 3 倍左右, 这是由于非引气混凝土发生严重的盐冻破坏, 冻结时所产生结冰压足以使混凝土表面产生大量的微裂纹和孔隙, 使孔隙率变大, 而在引气型混凝土内由于饱水度较低产生的结冰压对混凝土造成的影响较小。

表 7 盐冻循环前后总孔隙率变化

Tab.7 Air voids change after cyclic freeze-thaw test in salt solution

试件编号	试验前孔隙率/%	试验后孔隙率/%	变化率/%
A(非引气)	1.01	1.37	35.6
C(引气)	4.96	5.59	12.7

2.3.2 气泡间距系数的变化

盐冻循环前后气泡间距系数的计算结果如表 8

所示, 盐冻循环后非引气混凝土气泡间距系数继续增大, 在盐冻过程中混凝土微观孔隙发生劣化。

表 8 盐冻循环前后气泡间距系数变化

Tab.8 Air void spacing change after cyclic freeze-thaw test in salt solution

试件编号	试验前气泡间距系数/ μm	试验后气泡间距系数/ μm
A(非引气)	468	605
C(引气)	179	193

2.3.3 可视化软件生成效果图中孔隙分布的变化

利用可视化软件 VG Studio Max2.2, 根据混凝土内部孔隙大小对其渲染, 从图中可以直观地看到孔隙分布和孔隙大小, 标定孔隙从大到小的颜色依次为红 > 橙 > 黄 > 绿 > 蓝。

冻融前后试件与溶液相接触面的二维切片图像如图 7 所示。从图中可以看出引气混凝土相比于非引气混凝土内部有大量小气孔, 引气效果明显。对比盐冻前后的照片发现两组试件中部分孔隙的体积都有所增大, 发生变化的孔隙已用箭头标出, 其中未引气型混凝土孔隙变化较为明显, 许多小孔隙经过盐冻环变成了较大的孔隙, 而引气型混凝土孔隙变化较小, 少量搅拌过程中生成的气泡变大, 而通过引气剂引入的气泡未发生明显变化。

通过三维立体效果图可以得到盐冻前后混凝土试件孔隙的变化, 冻融前后与溶液相接触面的三维效果图如图 8 所示。可以看出未引气混凝土在盐冻前孔隙数量很少, 且分布较为稀疏, 经过 25 次盐冻循环后孔隙数量明显增多, 小孔隙布满了整个试件, 孔隙体积较大的模块也出现在效果图当中, 说明混凝土劣化严重, 出现了大量裂纹和大孔隙。而引气型混凝土试件两张图片的变化并不大, 说明没有发生严重的盐冻破坏, 试件自身含有大量的气孔, 试验前后孔隙模块都布满了整个试件, 从而进一步说明大量微小的气泡有助于提高混凝土的抗盐冻性能^[18]。

3 结论

(1) 引气是提高混凝土抗盐冻性能的重要手段。混凝土的含气量存在一个最佳值, 过度引气将引起负面效应, 研究结果表明混凝土的含气量为 5% ~ 7% 时抗冻性较好。

(2) 通过工业 CT 技术可以测得混凝土气泡结构参数: 孔隙率、气孔数量、气孔分布情况、平均孔径和气泡间距系数, 且工业 CT 测得的气泡结构参数略大于传统含气量测定仪测得的气泡结构参数。

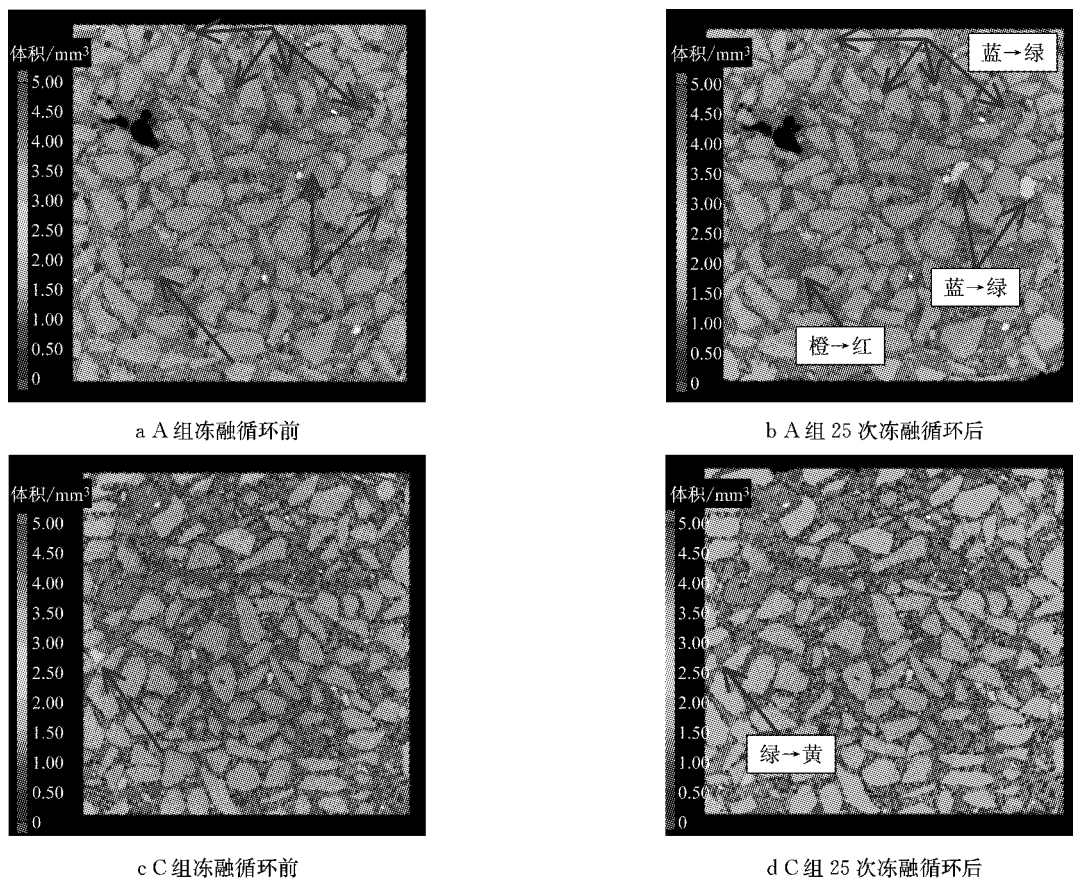


图 7 盐冻循环试验前后孔隙分布的变化

Fig. 7 Air void distribution change after samples experienced freeze-thaw cycles in salt solution

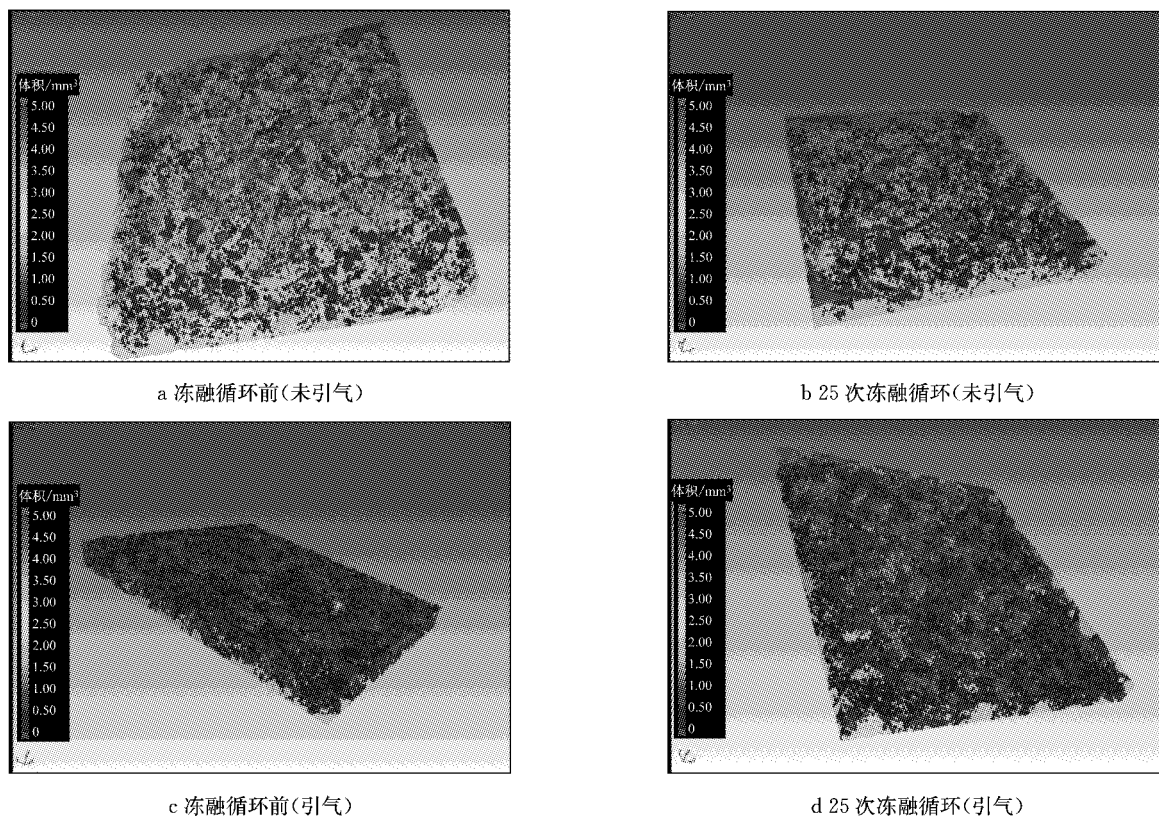


图 8 盐冻循环试验前后的三维效果图

Fig. 8 3-D images of samples before and after freeze-thaw cycles

(3)混凝土的孔隙率、气孔数量随引气剂掺量的增加而增大,平均孔径和气泡间距系数随引气剂掺量的增加而减小.其中气泡间距系数与混凝土抗盐冻性能有较好的相关性,试验结果发现当混凝土的气泡间距系数小于 $238\ \mu\text{m}$ 时其抗盐冻性能较好.

(4)工业CT技术测试发现引气混凝土相比于非引气混凝土内部有大量小气孔,盐冻前后未引气混凝土孔隙变化较为明显,而引气混凝土孔隙变化较小.因此,进一步说明大量微小的气泡有助于提高混凝土的抗盐冻性能.

参考文献:

- [1] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete [J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1945, 41(1): 245.
- [2] JACOBSEN S, SCHERER G W, SCHULSON E M. Concrete-ice abrasion mechanics [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 45(73): 79.
- [3] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(II):冻融饱和度与结冰压[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(6): 742.
YANG Quanbing, One of mechanisms on the deicer-frost scaling of concrete (II): degree of saturation and ice-formation pressure during freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(6): 742.
- [4] 段桂珍,方从启. 混凝土冻融破坏研究进展与新思考[J]. *混凝土*, 2013, 35(5): 16.
DUAN Guizhen, FANG Congqi, Research progress and new thinking of destruction of concrete due to freeze-thaw cycles [J]. *Concrete*, 2013, 35(5): 16.
- [5] PIGEON M, PLEAU R. *Durability of concrete in cold climates* [M]. London: E & FN Spon, 1995.
- [6] 蒋元驹,韩素芳. 混凝土工程病害与修补加固[M]. 北京:海洋出版社,1996.
JIANG Yuanjiong, HAN Sufang. *Failure, patching and strengthening of concrete engineer* [M]. Beijing: Ocean Press, 1996.
- [7] 刘军,刑锋,董必钦. 混凝土孔结构和渗透性能关系研究[J]. *混凝土*, 2007, 29(12): 35.
LIU Jun, XING Feng, DONG Biqin, Researchship between pore structure and permeability [J]. *Concrete*, 2007, 29(12): 35.
- [8] ZHANG J, TAYLOR P. Pore size distribution in cement pastes in relation to freeze-thaw distress [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(3): 04014123.
- [9] 张士萍,邓敏,吴建华,等. 孔结构对混凝土抗冻性的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(6): 56.
ZHANG Shiping, DENG Min, WU Jianhua, *et al.* Effect of pore Structure on the Frost Resistance of Concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(6): 56.
- [10] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏——机理、材料设计与防治措施 [D]. 上海:同济大学, 2006.
YANG Quanbing. *Deicer-frost deterioration of concrete-mechanisms, materials design and preventive measures* [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [11] 公路水泥混凝土路面施工技术规范: JTG F30—2003 [S]. 北京:人民交通出版社, 2003.
Technical specification for construction of highway cement concrete pavements; JTG F30—2003 [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [12] 闫西乐. 孔结构对水泥基材料抗盐冻性能影响规律的研究 [D]. 南京:东南大学, 2015.
YAN Xile. *Influence of pore structure on cement-based materials frost resistance property* [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [13] 周继凯,潘杨,陈徐东. 压汞法测定水泥基材料孔结构的研究进展[J]. *材料导报 A:综述篇*, 2013, 4(27): 72.
ZHOU Jikai, PAN Yang, CHEN Xudong, Research advances in mercury porosimetry study of pore structure in cement-based materials [J]. *Materials Review*, 2013, 4(27): 72.
- [14] 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T50080—2002 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
Standard for Test Method of Performance on Ordinary Fresh Concrete: GB/T50080—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [15] FAA. AC 150/5220-24. Airport Foreign object debris (FOD) detection equipment [R]. Washington D C: [s. n.], 2009.
- [16] PIERRE-CLAUDE A, ROBERT F. *Science and technology of concrete admixtures* [M]. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2015.
- [17] LI W, POUR-GHAZ M, CASTRO J, *et al.* Water absorption and critical degree of saturation relating to freeze-thaw damage in concrete pavement joints [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(3), 299.
- [18] MAYERCSIK N P, VANDAMME M, KURTIS K E. Assessing the efficiency of entrained air voids for freeze-thaw durability through modeling [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 88, 43.