

# 混凝土气孔参数与抗盐冻性能研究

陈彦文,张益腾,卜可,马芮

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究混凝土硬化前后以及在 NaCl 溶液的冻融作用下,混凝土的气孔参数变化,分析混凝土气孔参数对混凝土抗盐冻性能的影响. 方法 制备含气量为 3%、4.5% 和 6% 的 C50 混凝土,测试混凝土的含气量,通过气泡间距法、MIP 法测试硬化混凝土及盐冻后混凝土的气孔变化. 结果 随着含气量的增加,混凝土平均孔径减小,气孔比表面积增加,气泡间距系数由 340  $\mu\text{m}$  最低降至 230  $\mu\text{m}$ ,直径小于 50  $\mu\text{m}$  的气孔数量提高了 30%. 在质量分数为 3%、5% 的 NaCl 盐溶液中,冻融循环 28 次后混凝土气泡间距系数都有所降低;其中含气量 6% 的混凝土中气泡间距系数降低较小. 在质量分数为 3% 的 NaCl 溶液环境下,14 次盐冻循环对混凝土抗冻影响较大,28 次盐冻循环后混凝土的气泡间距系数和孔径分布趋于稳定,42 次循环后,气泡间距系数提高到初始值. 结论 用硬化混凝土气孔参数评价混凝土抗冻性比用含气量评价更加准确. 初始的盐冻可提高混凝土的密实程度,随着盐冻时间延长,混凝土内部孔结构劣化,提高含气量可增加混凝土的抗冻性.

**关键词** 混凝土;含气量;盐冻循环;孔隙参数

中图分类号 TU526

文献标志码 A

## Stomata Parameter and Frost-Salt Resistance in Concrete

CHEN Yanwen, ZHANG Yiteng, BU Ke, MA Rui

(School of Material and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to study influence of concrete stomata parameters on the salt-freezing resistance of concrete, their changes before and after hardening and under the effect of freezing and thawing of NaCl solution are analyzed. C50 concrete with 3%, 4.5% and 6% air content were prepared. The air content of concrete is tested to analyze the pore changes of hardened concrete and concrete after salt freezing by the bubble spacing method and MIP method. As the air content increases, the average pore diameter of the concrete decreases, the specific surface area of the pores increases, and the bubble spacing coefficient decreases from 340  $\mu\text{m}$  to 230  $\mu\text{m}$ , the number of pores with a diameter of less than 50  $\mu\text{m}$  increased by 30%. In a NaCl salt solution with a mass fraction of 3%

收稿日期:2020-01-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YF0C0700807)

作者简介:陈彦文(1965—),女,教授研究员级高级实验师,主要从事高性能混凝土、固体废弃物方面研究.

and 5%, the bubble spacing coefficient in concrete with 3%, 4.5%, 6% air content all decreased after 28 freeze-thaw cycles. The reduction value with 6% air content is smallest. In a NaCl salt solution with a mass fraction of 3%, 14 anti-salt freezing cycles have a great influence on the frost resistance of concrete. After 28 cycles, the bubble spacing coefficient and pore size distribution of concrete tend to be stable. After 42 cycles, the bubble spacing coefficient is increased to the initial value. The conclusion is that the evaluation of the frost resistance of concrete by hardened concrete pore parameters is more accurate than the evaluation of air content. The initial salt freezing can increase the compactness of the concrete. As the salt freezing time increases, the internal pores of the concrete deteriorating structure and increasing air content can increase the frost resistance of concrete.

**Key words:** concrete; stomata parameters; anti-salt freezing cycle; porosity parameters

混凝土的含气量对混凝土抗冻性的影响存在一个临界范围. 在水中冻融循环条件下, 该临界含气量为 2.0% ~ 3.0%, 在盐冻环境下混凝土的临界含气量为 4.5% ~ 5.0%, 具有较高抗盐冻性能的混凝土含气量应提高 5.0% 以上<sup>[1-2]</sup>. 为了提高北方地区长期处于海水侵蚀和冰盐环境下的混凝土抗冻能力, 可以通过掺入引气剂增大混凝土的含气量. 塑性混凝土经过运输、浇筑、成型、硬化等过程后, 混凝土所含气孔体积比例、气孔分布、形状、直径、气泡间距等将发生较大变化, 仅通过测定新拌混凝土含气量来评价抗冻性, 可能会出现较大偏差<sup>[3]</sup>, 而硬化混凝土中的实际含气量、气泡间距指数才是影响混凝土抗冻性的决定性因素<sup>[4]</sup>. 并且不同的孔隙特征参数对混凝土抗冻性能的影响不尽相同<sup>[5-7]</sup>. 在盐冻条件下, 混凝土抗盐冻性能随气泡间距系数减小而迅速提高, 并具有很好的相关性; 当混凝土气泡间距系数在 0.2 mm 以下时, 混凝土盐冻剥蚀量的下降幅度随气泡间距系数减小而减缓<sup>[8-10]</sup>; 在试验过程中发现混凝土在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中盐冻后, 随着冻融循环次数增大, 孔径大于 100 nm 孔的数量明显提高, 可见 NaCl 溶液的盐冻破坏是导致混凝土耐久性不足的重要原因之一<sup>[11-12]</sup>. 混凝土气泡间距系数较小, 气泡含量大、单个气泡体积小而独立封闭, 在盐冻过程中能够缓解结冰压, 降低盐冻

破坏能力<sup>[13]</sup>. 控制气泡间距系数可很好地改善混凝土的抗盐冻性能<sup>[14]</sup>. 所以提高混凝土抗冻盐冻性, 优化硬化混凝土孔隙特征及孔隙分布是关键. 笔者研究含气量对硬化前后混凝土气孔参数的影响, 并通过在 NaCl 溶液中冻融循环后混凝土气孔参数的变化分析混凝土气孔参数对混凝土抗盐冻性能的影响.

## 1 试验

### 1.1 试验原料

(1) 水泥: P·O52.5 水泥, 28 d 为抗折强度 8.8 MPa; 抗压强度为 58.9 MPa.

(2) 掺合料: I 级粉煤灰; 本钢 S95 级矿粉.

(3) 骨料: 碎石, 粒径 5 ~ 20 mm 连续级配, 压碎指标 10.8%, 密度为 2.72 g/cm<sup>3</sup>, 堆积密度为 1 580 kg/m<sup>3</sup>, 含泥量为 0.8%; 河砂, 细度模数为 2.7, 密度为 2.68 g/cm<sup>3</sup>, 堆积密度为 1 610 kg/m<sup>3</sup>, 含泥量为 0.4%.

(4) 外加剂: 减水剂, 不挥发成分质量分数为 25%, 减水率为 25% ~ 30%; 高效引气剂, 掺量为胶凝材料总量的 0.005% ~ 0.01%.

### 1.2 试验方法

(1) 试验试件的配合比设计为  $m$  (胶凝材料):  $m$  (水):  $m$  (砂):  $m$  (石子) = 440: 154: 764: 1 055, 通过掺加引气剂制得含气量为

3%、4.5%、6%的C50混凝土。

(2)混凝土含气量测定仪测得混凝土的含气量。硬化混凝土气泡参数测定仪采集数据并计算得到硬化后混凝土的气泡特征参数。

(3)采用慢冻法、在质量分数为3%和5%的NaCl溶液中进行冻融循环试验,用气泡间距测试得到冻融循环后混凝土的气泡间距系数,用MIP法得到冻融循环后混凝土的孔隙率和孔径分布。

1.3 试件制备

将原料按配合比称量,其中掺入的引气剂为水泥总质量的0.005%~0.01%,将原料混合搅拌后放入容器,测得混凝土拌合物含气量后装模,模具长宽高为100 mm×100 mm×100 mm,振捣密实后静置,待试件成型后拆模放入湿度95%、温度(20±2)℃条件下标准养护28 d。将含气量为3%、4.5%、6%的C50混凝土分别编号为C50-

A3、C50-A4.5、C50-A6。

1.4 试验仪器设备

日本三洋混凝土含气量测定仪、丹麦产RapidAir-475硬化混凝土气孔结构分析仪、美国AutoPore IV950孔结构分析仪。

2 试验结果分析

2.1 含气量与硬化混凝土气泡特征参数

含气量和气孔分析测试结果如表1所示。硬化混凝土含气量较新拌混凝土含气量低,且新拌混凝土含气量越高,混凝土硬化后的含气量与其差距越大。C50-A3混凝土平均气泡直径超过318 μm,气泡间距系数339 μm,而C50-A6和C50-A4.5混凝土平均气泡直径在270 μm左右,比C50-A3混凝土气泡平均直径小50 μm。C50-A6和C50-A4.5混凝土气泡间距系数在225~240 μm,单位体积内气泡比表面积比C50-A3混凝土提高15%。

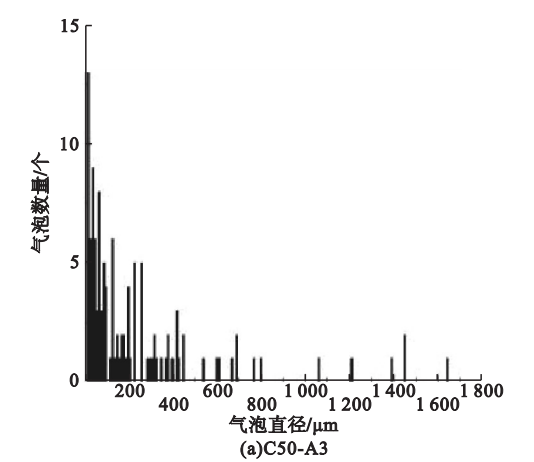
表1 混凝土含气量及特征参数

试件编号	含气量/%		平均气泡 直径/μm	气泡比表面积/ (μm <sup>2</sup> ·μm <sup>-3</sup> )	气泡间距 系数/μm
	新拌混凝土	硬化混凝土			
C50-A3	3.3	2.7	318.0	0.020	338.9
C50-A4.5	4.4	4.0	268.4	0.023	241.4
C50-A6	5.8	4.8	270.4	0.023	224.5

根据表1试验结果分析,引气剂掺量的增加,使新拌混凝土含气量得以提高,引气量越大,硬化混凝土中的孔隙总体积越大,孔径平均值与气泡间距系数减小,表明气泡数量增多。但是硬化后气泡数量和比表面积并不随含气量的增大而成比例的增大,当含气量达到4.5%后,硬化混凝土的平均气泡直径差别不大且气泡比表面积相同,表示单个气泡体积无明显增加,含气量与气泡间距数量增加幅度显著降低,表示气泡数量增幅降低。

图1为硬化混凝土孔径分布。由图1气孔数量分布可知,C50-A3混凝土200 μm孔径的气泡数量比例较少,大于200 μm的大

孔气泡数量明显较多。C50-A4.5混凝土气孔总数量增大,且孔径小于200 μm的气孔数



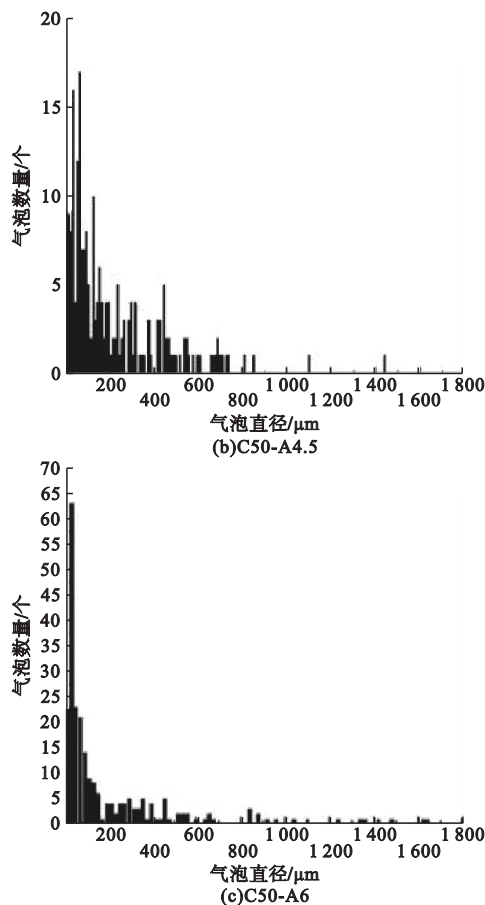


图 1 硬化混凝土孔径分布

Fig. 1 Pore size distribution of hardened concrete

量比例增大,200 ~ 600  $\mu\text{m}$  气泡数量明显高于 C50-A3 的混凝土. C50-A6 混凝土总体气泡数量最大,孔径小于 200  $\mu\text{m}$  的气泡数量超过气泡总数的 60%.

由表 1 中气泡特征参数及图 1 中气泡数量可知,随着含气量增加,孔隙总体增大,大孔减少,小孔增加,20 ~ 160  $\mu\text{m}$  孔比例增加,气泡平均直径越小,气泡个数越多,气泡间距系数越小,抗冻性越好<sup>[15]</sup>. 含气量较大的混凝土,经过振捣、静置、养护等过程后,含气量的损失较大,一些微小的孔隙随着水化进程的发展,一部分孔会被水化产物细化分割成小孔,一部分孔被填充密实,还有一部分孔也有可能转变连通孔,使原来的微孔粗大化,含气量较大的混凝土硬化后气孔含量降低较多. 所以硬化混凝土的气孔特征和耐久性不

能只用含气量来评价.

2.2 不同的盐冻环境条件下,混凝土气泡结构分析

2.2.1 不同质量分数的盐溶液冻融循环对混凝土气泡间距系数影响

将 C50-A3、C50-A4.5、C50-A6 这 3 组混凝土放入质量分数为 3% 和 5% 的 NaCl 溶液中进行盐冻循环 28 次作为试验组,再将同样的 3 组混凝土放入清水中浸泡作为对照组,其浸泡时长与试验组冻融循环所用时长相同. 测试混凝土的气泡间距系数,试验结果如图 2 所示.

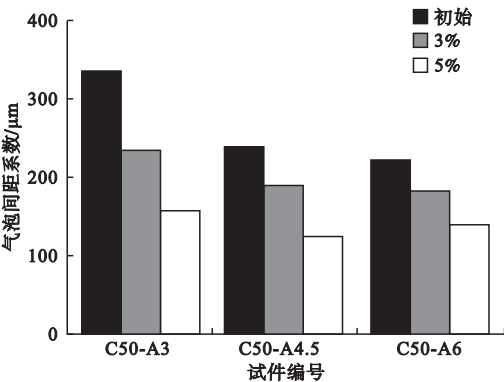


图 2 混凝土气泡间距系数

Fig. 2 Concrete bubble spacing coefficient

根据图 2 中试验组与对照组试验结果的对比分析,在质量分数为 3% 和 5% 的 NaCl 溶液中,28 次盐冻循环以后,混凝土的气泡间距系数都减小,这表现为孔结构优化,说明混凝土中矿物掺合料还未水化完全,仍不断水化填充孔隙,使混凝土结构更密实. 质量分数为 3% 的 NaCl 溶液冻融循环后的混凝土气泡间距系数降低较小,质量分数为 5% 的 NaCl 溶液冻融循环后的混凝土气泡间距系数降低较大. 随着 NaCl 溶液中 NaCl 质量分数的增加,溶液的结冰膨胀率和结冰压也显著降低,不足以对混凝土产生破坏影响,有利于提高混凝土的抗冻性<sup>[16-17]</sup>. 与初始的气泡间距系数相比,盐冻循环后 C50-A6 混凝土气泡间距系数降低最小;C50-A3 混凝土气泡间

距系数降低量最大,在质量分数为 5% 的盐溶液下,气泡间距系数降低了 55%; C50-A4.5 混凝土气泡间距系数降低量较大,在质量分数为 5% 的盐溶液下,气泡间距降系数低了 42%. 不同的盐溶液冻融循环对 C50-A6 混凝土气泡间距系数影响最小,这表明 C50-A6 混凝土抗盐冻性能最好.

2.2.2 不同质量分数的盐溶液对混凝土气孔的影响

将抗盐冻性能最好的 C50-A6 混凝土放入质量分数为 3% 和 5% 的 NaCl 溶液中进行盐冻循环 28 次,并将初始 C50-A6 混凝土设为对照组,用 MIP 法测试混凝土的孔结构,结果如图 3 所示.

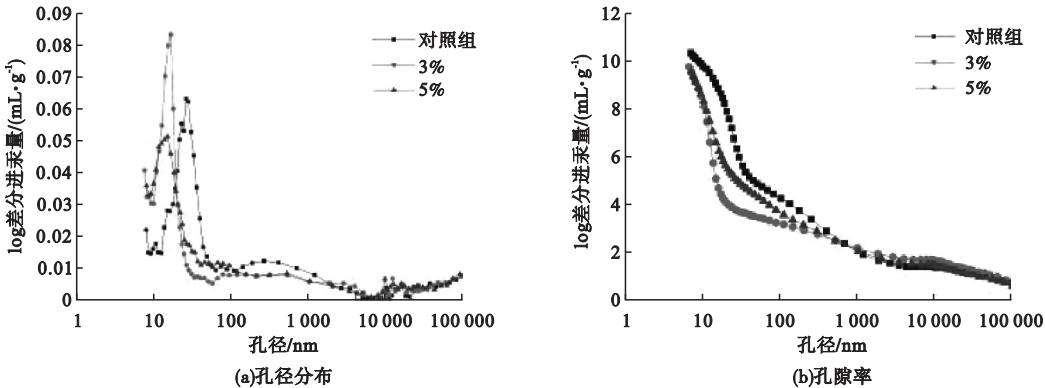


图3 不同质量分数的盐溶液冻融后混凝土的孔结构

Fig. 3 pore structure of concrete after salt freezing at different salt solution concentrations

在质量分数为 3%、5% 的 NaCl 溶液环境下 28 次冻融后,质量分数为 3% 的 NaCl 溶液环境下冻融循环后混凝土孔径集中在 10 ~ 30 nm,但质量分数为 5% 的 NaCl 溶液环境下混凝土冻融后孔径集中在 20 ~ 70 nm,且数量大于质量分数 3% 的 NaCl 溶液环境冻融条件下的混凝土的孔径. 反应在孔隙率中,质量分数 5% 的 NaCl 溶液冻融后大孔径孔隙率明显提高. 在两种质量分数的 NaCl 溶液环境下,混凝土的可几孔径减小,质量分数 5% 的 NaCl 溶液中盐冻后,混凝土中直径 <20 nm 的孔数量更少一些. 盐冻循环条件下,孔结构不断细化,盐溶液在孔隙中不断析出晶体并填充孔隙,盐溶液中盐的质量分数越高,填充的越密实,留下的连通孔隙越少. 两种质量分数的盐溶液条件下的混凝土冻融后,100 nm 直径以上的孔数量和临界孔径基本相同. 质量分数 3% 的 NaCl 溶液盐冻后的混凝土孔隙率较小. 一方面是因为盐结晶填充作用;另一方面是因为盐的质量分

数较小,结冰膨胀率和结冰压较高.

2.3 质量分数 3% 的 NaCl 溶液条件下,冻融循环次数对混凝土气孔结构影响

2.3.1 气泡间距法分析混凝土气孔结构

将抗盐冻性能最好的 C50-A6 混凝土在质量分数 3% 的 NaCl 溶液条件下进行 14 次、28 次、42 次冻融循环,将初始混凝土设为对照组. 测得冻融后混凝土的气泡间距系数,试验结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出,在未盐冻之前, C50-A6 的气泡间距系数小于 250 μm,即有着良好的抗冻性,当冻循环 14 次时,气泡间距系数下降到 160 μm 左右,随着盐冻循环次数的增加,气泡间距系数逐渐增加,在盐冻循环 42 次时,已经接近初始的气泡间距系数. 在盐冻循环过程中,由于混凝土中矿物掺合料占胶凝材料总量达 50%,总体水化过程较慢,混凝土中矿物掺合料在冻融的过程中进一步发生水化反应,混凝土水化产物填充,混凝土不断密实,随着盐冻循环次数增加,膨胀收缩应力的反复作用,混凝土



结构劣化,小孔间连通,混凝土的气孔间距表现出先降低后升高的趋势。

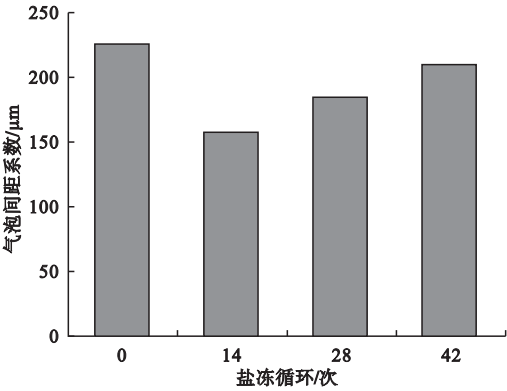


图 4 不同次数的盐冻循环后混凝土的气泡间距系数  
Fig. 4 Concrete bubble spacing coefficient after salt freezing

2.3.2 混凝土气孔结构分析

用 MIP 法测得的冻融循环后混凝土的孔径分布如图 5 所示。在 3 个盐冻周期下,14 次冻融循环周期的混凝土 10 nm 的孔隙数量最多,随着冻融周期的增大,10~50 nm 孔的数量逐渐增多,表现为孔隙体积在小孔范围内增加幅度较大,14 次和 28 次冻融周期的孔隙体积分别在 20 nm、60 nm 处产生陡降。而 42 次冻融混凝土的孔直径平均值的峰值拐点出现在 60 nm,比 14 次、28 次冻融周期后的平均直径大,孔隙数量随着孔径增大降幅较慢,14 次、28 次孔隙体积分别在 20、50 nm 处降幅较大。

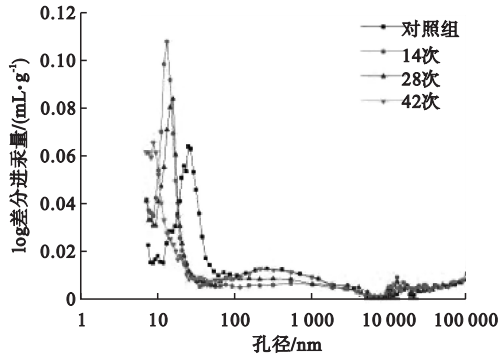


图 5 不同次数的盐冻循环后混凝土的孔径分布  
Fig. 5 Concrete pore size distribution after different salt freezing cycles

由孔径分布可知,14 次和 28 次冻融后

的混凝土中小于 100 nm 的孔隙数量显著降低,42 次冻融后的混凝土孔隙数量显著提高,并且大于初始混凝土的孔隙数量。综合气泡间距系数、孔径分布试验结果分析,在质量分数为 3% 的 NaCl 溶液环境下,混凝土的冻融过程中,初始的盐冻可提高混凝土密实程度,但是随着冻融循环时间的延长,由于膨胀收缩应力的反复作用,混凝土中一些薄壁孔、气泡间距比较小的孔会发生破坏,使混凝土内部孔隙组成发生变化,混凝土抗冻能力降低。但是含气量的增加,引入部分较小封闭的气孔,使混凝土在盐溶液下抗冻能力增强。

3 结 论

(1)硬化后混凝土气孔数量低于塑性混凝土的含气量,含气量为 4.5% 和 6% 混凝土硬化后,气孔参数相差较小,不能只用混凝土含气量大小来评价混凝土的抗冻性,还应进一步分析硬化后混凝土的气孔参数对抗冻性的影响。

(2)硬化混凝土气孔参数对混凝土抗冻性影响较大,可以评价混凝土的抗冻性。C50-A3 混凝土抗冻性能明显较弱,C50-A6 混凝土抗冻性能较强,质量分数 3% 的 NaCl 溶液中的盐冻循环对混凝土的孔结构影响较大。

(3)C50-A6 的混凝土在 3% NaCl 盐溶液环境下,14 次循环周期对混凝土抗冻影响较大,随着盐冻周期的延长,28 次循环周期混凝土的气泡间距系数和气孔率趋于稳定,42 次循环后,气泡间距系数提高到初始值。

(4)初始的盐冻可提高混凝土的密实程度,随着冻融循环时间的延长混凝土内部孔结构劣化,增加含气量可引入封闭气孔,提高混凝土的抗盐冻能力。

参考文献

[1] 张云清,余红发,王甲春. 气泡结构特征对混凝土抗盐冻性能的影响[J]. 华南理工大学学报,2010,38(11):7-11.  
(ZHANG Yunqing, YU Hongfa, WANG Jiachun. Influence of structural characteristics

- of air bubbles on salt frost resistance of concrete[J]. Journal of south China university of technology, 2010, 38(11): 7-11.)
- [2] 王庆石, 王起才, 张凯, 等. 不同含气量混凝土的孔结构及抗冻性分析[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1): 30-35.  
(WANG Qingshi, WANG Qicai, ZHANG Kai, et al. Analysis of pore structure and frost resistance of concrete with different air content [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2015, 34(1): 30-35.)
- [3] 张金喜, 郭明洋, 杨荣俊, 等. 引气剂对硬化混凝土结构和性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(5): 38-41.  
(ZHANG Jinxi, GUO Mingyang, YANG Rongjun, et al. Effect of air-entraining admixtures on the structure and properties of hardened concrete [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2008, 30(5): 38-41.)
- [4] 段献智, 于德龙, 丛亮, 等. 混凝土气泡结构和抗冻性的关系初探[J]. 山西建筑, 2012, 38(17): 137-138.  
(DUAN Xianzhi, YU Delong, CONG Liang, et al. Exploration on the relationship between concrete air void structure and frozen resistance [J]. Shanxi architecture, 2012, 38(17): 137-138.)
- [5] 张德思, 成秀珍. 硬化混凝土气孔参数的研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(1): 10-13.  
(ZHANG Desi, CHENG Xiuzhen. On better understanding of effect of air void parameters on freeze-thaw durability of concrete [J]. Journal of northwestern polytechnical university, 2002, 20(1): 10-13.)
- [6] 赵海军, 朱亚冲, 叶金库, 等. 混凝土抗冻性与气泡特征参数研究[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(9): 1-2.  
(ZHAO Haijun, ZHU Yachong, YE Jinku, et al. Research of frost resistance and air void parameter in concrete [J]. Low temperature architecture technology, 2016, 38(9): 1-2.)
- [7] 陈霞, 杨华全, 周世华, 等. 混凝土冻融耐久性与气泡特征参数的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2): 257-262.  
(CHEN Xia, YANG Huaquan, ZHOU Shihua, et al. Research on concrete freezing and thawing durability and characteristic parameters of bubbles [J]. Journal of building materials, 2011, 14(2): 257-262.)
- [8] 沈化荣, 卢小琳, 高培伟等. 气孔结构对水泥混凝土抗盐冻性能影响的研究[J]. 混凝土, 2012(8): 8-9.  
(SHEN Huarong, LU Xiaolin, GAO Peiwei, et al. Relationship between the air void system and frost-salt resistance of concrete [J]. Concrete, 2012(8): 8-9.)
- [9] 慕儒, 缪昌文, 刘加平, 等. 氯化钠、硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 523-529.  
(MU Ru, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Efficiency of NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution on the frost resistance of concrete and its mechanism [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2001, 29(6): 523-529.)
- [10] 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.)
- [11] 金祖权, 陈惠苏, 侯保荣, 等. 引气混凝土在冻融循环过程中的氯离子渗透与孔结构[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1963-1968.  
(JIN Zuquan, CHEN Huisu, HOU Baorong, et al. Chloride penetration and pore structure of air entrained concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of central south university (science and technology), 2012, 43(5): 1963-1968.)
- [12] 欧阳男. 不同盐类环境下混凝土的抗冻性研究[J]. 公路交通技术, 2018, 34(3): 24-28.  
(OUYANG Nan. Study on the concrete durability under different salt environment [J]. Technology of highway and transport, 2018, 34(3): 24-28.)
- [13] 张家科, 袁捷, 刘文博, 等. 基于工业扫描分析混凝土气泡结构与抗盐冻性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 53-59.  
(ZHANG Jiake, YUAN Jie, LIU Wenbo, et al. Application of industrial computerized tomography to analyze air voids structure and salt scaling resistance of concrete [J]. Journal of tongji university (natural science), 2018, 46(1): 53-59.)
- [14] COUSSY O, MONTEIRO P J M. Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures [J]. Cement & concrete research, 2008, 38(1): 40-48.
- [15] 杨钱荣, 张树青, 杨全兵, 等. 引气剂对混凝土气泡特征参数的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 374-378.  
(YANG Qianrong, ZHANG Shuqing, YANG Quanbing, et al. Effects of air-entraining agent on air void parameters of concrete [J]. Journal of tongji university (natural science), 2008, 36(3): 374-378.)
- [16] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(II): 冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 741-746.  
(YANG Quanbing. One of mechanisms on the deicer-frost scaling of concrete: degree of saturation and ice-formation pressure during freezing-thawing cycle [J]. Journal of building materials, 2012, 15(6): 741-746.)
- [17] 杨全兵. 混凝土盐冻剥蚀破坏评定参数的研究[J]. 低温建筑技术, 2004(5): 4-6.  
(YANG Quanbing. Parameters estimating the deicer-frost scaling of concrete [J]. Low temperature architecture technology, 2004(5): 4-6.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)