**文章编号:**1007-9629(2022)10-1007-08

# 引气剂对冻融循环前后砂浆毛细吸水规律的影响

王俊洁1, 薛善彬1, 张 鹏1.2.\*, 李春云1, 高世壮1

(1.青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266525; 2.青岛理工大学 山东蓝色经济区 工程建设与安全协同创新中心,山东 青岛 266525)

摘要:通过称重法研究了引气剂掺量对冻融循环前后砂浆毛细吸水规律的影响,并借助低场核磁共振和扫描电子显微镜从微观角度讨论了其影响机理.结果表明:在冻融循环作用前,砂浆的毛细吸水 性系数随着引气剂掺量的增加而降低,气孔切断了毛细孔的连通性,导致水分传输通道更为曲折;在 冻融循环作用后,砂浆试件的吸水曲线均呈现双线性特征;冻融损伤裂纹可以快速吸水并向毛细孔 和气孔中传导水分,导致砂浆试件的前期吸水加速,该现象在低引气剂掺量砂浆中更为显著;随着裂 纹充水度的提高,砂浆试件的后续吸水主要通过毛细孔及气孔进行,吸水速度下降;砂浆冻融循环前 后的毛细吸水性系数与毛细孔体积占比均存在明显的线性相关性.

关键词:引气砂浆;低场核磁共振;冻融循环;微结构;毛细吸水

中图分类号:TU528.01 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.002

## Effect of Air Entraining Agent on Capillary Water Absorption of Mortar before and after Freeze-Thaw Cycle

WANG Junjie<sup>1</sup>, XUE Shanbin<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2,\*</sup>, LI Chunyun<sup>1</sup>, GAO Shizhuang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** The influence of air entraining agent content on the capillary water absorption test of mortar before and after freeze-thaw cycle was conducted by weighing method, and its mechanism was investigated from the microscopic point of view by low field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy. The results show that the capillary water absorption coefficient of mortar decreases with the increase of air entrainment without freeze-thaw cycle. The air voids cut off the connectivity of pores, resulting in increase of the tortuosity of water transport channel. After freeze-thaw cycle, the water absorption curves of mortar specimens show bilinear characteristics. Freeze-thaw damage cracks can quickly absorb water and transmit water to the pores and air voids, resulting in acceleration of early water absorption of mortar specimens, which is more significant in low air entrainment mortar. As the moisture in the crack increases gradually, the subsequent water absorption of mortar specimen is mainly through the capillary pores and air voids, and the water absorption rate decreases. There is an obvious linear correlation between the capillary water absorption coefficient of mortar and the volumetric percentage of capillary pores of air entrained mortar with and without freeze-thaw cycle.

**Key words:** air entrained mortar; low field nuclear magnetic resonance; freeze-thaw cycle; microstructure; capillary water absorption

第一作者:王俊洁(1996—),女,山东烟台人,青岛理工大学硕士生.E-mail:wang17852326721@163.com

收稿日期:2021-08-12;修订日期:2021-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51922052,52008222);山东省自然科学基金资助项目(ZR202103040019, ZR2019PEE001)

通讯作者:张 鹏(1981—),男,山东潍坊人,青岛理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zhp0221@163.com

在寒冷地区,水分入渗可以加速水泥基材料的 冻融劣化进程<sup>[1-2]</sup>.同时,水泥基材料内部的水分传输 受其微结构的控制.研究表明<sup>[3]</sup>,在水泥基材料中引 入一定数量的气孔,可以延缓外部水分的侵入,并在 冻融循环过程中缓冲其冻胀压力,在一定程度上提 高材料的抗冻性.但是,冻融循环作用后砂浆内部可 能形成损伤裂纹,改变其吸水规律,并进一步影响后 续的冻融循环进程.

低场核磁共振(LF-NMR)技术可以获取样品内 部的孔径分布信息,在水泥基材料、岩土介质微结构 的研究中发挥了重要作用<sup>[4-6]</sup>. Wang等<sup>[7]</sup>利用 LF-NMR分析不同含气量浮石混凝土冻融损伤前后 的孔隙扩展损伤特征,发现过量引气对混凝土的抗 冻性起到了负面作用.Deng等<sup>[8]</sup>发现加入引气剂可 以有效增加混凝土内部的中、大孔占比,混凝土内部 连通孔隙的分布和占比对材料的抗冻性至关重要.Li 等<sup>[9]</sup>研究发现,当试件饱和度超过86%~88%时,即 使在很少的冻融循环次数下,引气混凝土的冻融损 伤也不可避免.

目前,相关研究大多关注于冻融损伤前后引气 砂浆力学性能的演变规律,而对于砂浆内部冻融损 伤微裂纹对吸水规律影响的研究相对较少.Yang 等<sup>[10]</sup>通过试验证实了裂缝的存在会加剧混凝土冻融循环损伤的速度,导致其吸水率线性增加和电导率双线性增加,但该研究未考虑引气剂掺量的影响.事实上,引气量对冻融循环作用前砂浆的吸水规律以及冻融循环作用后砂浆的损伤程度与吸水性能均有重要影响,相关定量化研究值得进一步开展.

本文采用称重法研究了引气剂掺量对20次冻融 循环作用前后砂浆毛细吸水过程的影响规律,并借 助LF-NMR和扫描电子显微镜(SEM),从微观角度 讨论了其影响机理,进而建立砂浆宏观性能与微观 特征之间的关系,以期为寒冷地区混凝土结构的抗 冻性设计提供理论支撑.

## 1 试验

#### 1.1 原材料及试件制备

山东山水水泥有限公司生产的 P·O 42.5 普通 硅酸盐水泥;青岛出产的河砂,最大粒径为 5 mm; 青岛本地自来水.竹本油脂(苏州)有限公司生产的 CHUPOL AE-200型液体引气剂,主要组成为烷基 醚类阴离子表面活性剂.砂浆的配合比如表 1 所示.

	表1	砂浆的配合比
Table 1	Mix	proportions of mortars

Specimen	/	Mix <sub>I</sub>	proportion/(kg•m	-3)		( . ) / 0 /
	$m_{ m W}/m_{ m C}$	Cement	Sand	Water	- w(air entraining agent)/ %	$\varphi(air)/\gamma_0$
M0	0.6	500	1 350	300	0	1.5
M005	0.6	500	1 350	300	0.005	8.3
M010	0.6	500	1 350	300	0.010	10.9
M015	0.6	500	1 350	300	0.015	15.0

首先,将水泥和砂子倒入搅拌锅中干拌2min, 再称量所需要的引气剂和水,将引气剂加入水中搅 拌均匀(若不加引气剂,此步骤忽略),随后将其倒入 已经干拌好的水泥砂子中搅拌3min;其次,取出一部 分砂浆测定含气量,并将剩余的拌和物倒入模具中, 振捣后用保鲜膜覆盖试件表面,避免砂浆中的水分 流失,待24h后拆模,并将试件放置在(20±2)℃、相 对湿度不低于95%的标准养护室中养护28d.养护结束 后,选取尺寸为40mm×40mm×160mm的长方体试 块、¢25×33mm的圆柱体试块和10mm×10mm× 10mm的立方体试块,分别进行力学性能、毛细吸 水、LF-NMR及SEM测试.试验流程如图1所示.为 保证试验数据的准确性,每种引气剂掺量取3块试 件同时进行试验,结果取其平均值.

#### 1.2 试验内容及试验方法

#### 1.2.1 毛细吸水试验

本文采用称重法测试 20次冻融循环作用前后砂 浆试件毛细吸水性能的演化规律.试验开始前,将尺 寸为 $\phi$ 25×33 mm、不同引气剂掺量的圆柱体试件置 于45℃烘箱中干燥直至恒重,并用铝箔胶带密封试 件四周.在吸水过程中,保持液面高度高出试件底面 约5 mm,间隔一定时间监测试件的吸水质量.采用 毛细吸水性系数(S)来评价水分在砂浆试件中的传 输速率.在不考虑重力影响的情况下,水泥基材料单 位面积的毛细吸水量( $\Delta$ W)与吸水时间(t)的平方根 呈线性关系,如式(1)所示<sup>[11]</sup>.



$$\Delta W = S\sqrt{t} \tag{1}$$

#### 1.2.2 核磁共振试验

采用北京拉莫尔科技发展有限公司生产的 LMR-25型LF-NMR测试20次冻融循环作用前后饱 水引气砂浆试件的*T*₂谱,测试参数如表2所示.在测 试前将试件放入45℃烘箱中干燥14d,并记录试件 的干燥质量,随后将试件真空饱水24h后进行 LF-NMR测试.根据真空饱水前后试件的质量变化 计算其体积含水率(试件内部水分体积与样品体积 的比值),并以此判断不同试件的连通孔隙率.冻融 循环作用前,试件M0、M005、M010、M015的体积含 水率分别为0.186、0.197、0.240、0.264;20次冻融循 环作用后的体积含水率分别为0.485、0.350、0.248、 0.272.

表 2 低场核磁共振的测试参数 Table 2 Testing parameters of the LF-NMR

Magnetic field	Number	Number	Echo	Waiting
intensity/MHz	of scan	of echo	spacing/μs	time/ms
6.87	200	30 000	150	8 000

#### 1.2.3 微观形貌试验

采用日本电子生产的JSM-7610F型SEM,分别 对20次冻融损伤前后的砂浆试件进行表面形貌观 测.测试前将尺寸为10mm×10mm×10mm的砂 浆试件进行表面清理,然后放入45℃烘箱中干燥直 至恒重,在其表面镀金后进行测试.

#### 1.2.4 冻融循环试验

将制备好的试件一维吸水直至恒重后,按照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》 中的要求进行冻融循环试验.冻融试验前,试件 M0、 M005、M010、M015的相对饱和度(试件泡水后的含 水率与饱和含水率的比值)分别为1.00、0.97、0.75、0.66. 冻融箱的温度控制在-15~18℃之间,冻融循环1次历时约4h. 当冻融循环次数(N)为20次时,将试件取出,再次进行毛细吸水、LF-NMR及SEM测试.

## 2 结果与讨论

#### 2.1 强度变化规律

图 2 为引气砂浆试件的 28 d 抗压强度.由图 2 可 知:试件的抗压强度随着引气剂掺量的增加而逐渐 降低,这是由于引气剂引入的微小封闭气泡降低了 试件的密实度所致;与试件 M0 相比,试件 M005、 M010、M015 的抗压强度分别降低了 16%、19%、 23%.





#### 2.2 毛细吸水规律

#### 2.2.1 未受冻引气砂浆的毛细吸水规律

引气砂浆试件的单位面积毛细吸水量如图3所示.由图3可见:

(1)在吸水初期,砂浆试件的单位面积吸水量与

吸水时间的平方根几乎呈线性关系,随着吸水时间 的延长,吸水曲线逐渐趋于平缓.这是因为砂浆试件 底部水分的不断侵入使其内部逐渐趋于饱和,毛细 吸附力减小,砂浆中的吸水速率减慢<sup>[12]</sup>.

(2)选取不同引气砂浆前10h的毛细吸水数据, 利用式(1)进行线性拟合以计算试件的毛细吸水性 系数,发现引气砂浆的毛细吸水性系数范围为 0.022~0.028 g/(cm<sup>2</sup>·min<sup>0.5</sup>). 当引气剂掺量从 0% 增 加至0.005%时,二者的毛细吸水性系数变化不大, 其主要原因是引气剂掺量较低.当引气剂掺量由0% 增加到 0.010% 和 0.015% 时,砂浆试件的毛细吸水 性系数随着引气剂掺量的增加而逐渐降低.一方面 是由于气孔内部的毛细作用远弱于原生毛细孔,在 毛细吸水过程中不能有效传输水分,气孔含量的增 加减小了同体积水泥砂浆试件内部毛细孔的占比, 进而使得在相同的吸水时间内砂浆单位面积吸水量 逐渐降低.另一方面是由于引气剂分子会将阴离子 亲水基团吸附在带正电的水泥颗粒表面,疏水基团 背离水泥颗粒,从而在水泥颗粒表面形成不易被拌 和水润湿的疏水膜[13],气孔不会被水快速充填,水分 在毛细孔中的传输通道更为曲折,导致砂浆单位面 积吸水量降低.因此,0.015%掺量的引气剂对延缓 水分传输更有效.



2.2.2 冻融循环作用后引气砂浆的毛细吸水规律

图4为引气砂浆试件20次冻融循环作用后毛细 吸水性系数的拟合曲线.根据吸水速率变化规律,将 试件M0、M005、M010和M015的吸水过程分为2个 阶段:第1阶段吸水阶段和第2吸水阶段.2个阶段的 毛细吸水性系数分别定义为前期毛细吸水性系数 (*S*<sub>1</sub>)和后期毛细吸水性系数(*S*<sub>2</sub>).由图4可见:

(1)试件 M0 和 M005 经历 20 次冻融循环作用
 后, S<sub>1</sub>分别由 0.028、0.027 g/(cm<sup>2</sup>·min<sup>0.5</sup>) 增长至

0.405、0.063 g/( $cm^2 \cdot min^{0.5}$ ),分别为冻融循环作用前的14.5、2.3倍.在20次冻融循环作用后,试件M010和M015的 $S_1$ 分别由0.025、0.022 g/( $cm^2 \cdot min^{0.5}$ )降低至0.022、0.020 g/( $cm^2 \cdot min^{0.5}$ ),变化不明显.综合分析发现,低引气剂掺量砂浆冻融循环作用后的毛细吸水性系数显著增加,高引气剂掺量砂浆冻融循环作用后的毛细

(2)试件 M0、M005、M010 和 M015 的 S<sub>1</sub>值高于 S<sub>2</sub>值,表明随着吸水时间的延长,吸水速率逐渐减慢. 引气剂掺量越多,这2个阶段之间的拐点出现时间越 晚.由此可见,试件 M015 的抗冻性较好,M0 的抗冻 性最差.

#### 2.3 孔径分布特征

2.3.1 未受冻引气砂浆的孔径分布特征

饱水引气砂浆的 T₂谱分布如图 5 所示. 图中 T₂ 谱有3个主峰,本文根据T2分布特征,按照孔隙尺 寸将所测得的孔隙分为3类:T2<6ms为小孔,主要 为水泥水化过程中形成的毛细孔;6ms<T<sub>2</sub><500ms 为中孔,该类孔隙可能分布于界面过渡区;T<sub>2</sub>>500 ms 为大孔,这类孔隙为引气剂引入的气孔.由于本试 验采用的回波间隔为150 µs,所得T₂谱主要反映毛 细孔及更大尺寸孔隙的微结构信息.由图5可见: 随着引气剂掺量的增加,T。谱上中孔及大孔的核磁 信号量增加;试件 M005、M010 和 M015 中孔和大 孔核磁信号量与总信号量的比值相对于试件 M0 分别提高了185%、525%和901%,说明引气剂的 加入增加了砂浆中孔及大孔的数量,改变了砂浆的 孔径分布;小孔信号幅值随着引气剂掺量的增加有 所降低,主要由于引气剂的掺入增加了中孔及大孔 的体积占比,挤占了单位体积样品中可形成毛细孔 的浆体空间.

2.3.2 冻融循环作用前后引气砂浆的孔径分布特征

20次冻融循环作用前后引气砂浆试件的T<sub>2</sub>谱分 布曲线对比如图6所示.由图6可见:在20次冻融循 环作用后,由于损伤裂纹的生成和扩展,4组试件的 中孔和大孔信号量增加;在冻胀和融解过程中,部分 基体从砂浆试件中剥落,导致试件M0的小孔信号量 降低,而引气剂掺量相对较高试件M005、M010、 M015的小孔信号量下降幅度相对较小,测试中未发 现明显的剥落现象.

本文利用各 T<sub>2</sub>谱区间对应的不同类型空隙的体积与试样总体积的比值计算不同类型空隙体积分数,20次冻融作用前后砂浆试件中不同类型空隙的体积分数如图7所示.其中,左、右柱状图分别对应20次冻融循环作用前后的砂浆内部不同类型空隙体积







Fig. 5  $T_2$  spectra of water-saturated air entrained mortars

分数情况.由图7可见,经历20次冻融循环作用后, 砂浆试件的孔径分布变化趋势整体上较未冻融时有 所增大.中、大孔体积分数分别从0.006、0.020、 0.053、0.093增加至0.139、0.073、0.095、0.121,说明 冻融循环作用使砂浆内部的毛细孔隙逐渐扩展、粗 化、劣化为裂纹.上述现象在低引气剂掺量砂浆试件 中更为明显,而较高引气剂掺量砂浆试件表现出较 好的抗冻性.

由于裂纹与砂浆中引入气孔的T<sub>2</sub>均大于6ms, 该范围的核磁信号是裂纹和气孔共同贡献的.本文 通过计算冻融循环作用前后中、大孔体积分数的差 值来估算试件内部裂纹的体积分数.表3为20次冻 融循环作用后砂浆试件中裂纹的体积分数.由表3可 见,裂纹体积分数随着引气剂掺量的增加而逐渐降 低,表明在同样的冻融循环次数下,引气剂掺量越 大,裂纹的体积分数越小.原因是砂浆中引入的气孔 可以在冻融循环过程中缓冲冻胀压力,减缓裂纹在 砂浆中的产生及扩展<sup>[14]</sup>.同时也表明,低场核磁共振 技术可以有效追踪冻融循环过程中引气砂浆试件中 裂纹体积分数的演化情况.

以上关于孔径分布特征的分析,可以解释低引气 剂掺量砂浆冻融循环作用后毛细吸水性系数的显著 增加、高引气剂掺量砂浆冻融循环作用后毛细吸水性 系数无明显增加这一现象.分析原因有3点:一是试件 M010和M015的中孔及大孔比试件M0和M005多, 气孔延缓了水分传输.二是试件M0和M005的裂纹 体积分数比试件M010和M015多.在较低引气剂掺 量砂浆中,冻融产生的裂纹可以充当水分快速传输的 通道,裂纹贯通毛细孔隙,显著加速水分入渗;而在较 高引气剂掺量砂浆中,冻融产生的少量裂纹之间没有 完全贯通,其传输水分的作用有限.三是在冻融环境 下引气剂缓冲了砂浆内部因结冰产生的冻胀压力,从 而提高了砂浆的抗冻性能.同时,由于引气砂浆抗冻 融性能的提高,在冻融环境下其受冻损伤程度较小,



图 6 20次冻融循环作用前后引气砂浆试件的 T<sub>2</sub>谱分布曲线对比 Fig. 6 Comparison of T<sub>2</sub> spectrum distribution curves of air entrained mortar specimens before and after 20 freeze-thaw cycles





Fig. 7 Volume fraction of different voids in air entrained mortar specimens before and after 20 freeze-thaw cycles

表 3 20次冻融作用后砂浆试件中裂纹的体积分数 Table 3 Volume fraction of cracks in mortar specimens after 20 freeze-thaw cycles

Specimen	M0	M005	M010	M015
Volume fraction of cracks	0.133	0.053	0.042	0.028

砂浆内部的孔隙结构变化不大,从而导致其在吸水过 程中毛细吸水性系数的变化不大.尤其是冻融循环后, 引气砂浆比普通砂浆具有更好的抗渗性能.本文考虑的是非饱和区,如果是水下区域,气孔在长期泡水的情况下会充水,导致材料的整体抗冻性下降,后续可以用本文的研究方法针对该问题作进一步研究.

#### 2.4 冻融循环作用后的微观形貌

图 8 为砂浆试件冻融循环作用前后的微观形 貌.由图8可见:普通砂浆经历20次冻融循环作用 后产生了较多裂纹且相互贯穿;引气剂掺量为 0.010%的砂浆内部存在不同尺寸的气孔,这些气 孔能够切断毛细孔道,降低毛细孔的连通性,提高 砂浆的抗毛细入渗性能;在冻融循环作用后,砂浆 基质中产生裂纹,且有部分裂纹贯穿气孔,Yang 等<sup>10]</sup>也观察到类似的现象.上述结果反映出低引 气剂掺量砂浆中的冻融损伤裂纹数量比高引气剂 掺量砂浆多,更多相互贯通的裂纹充当了水分快 速传输的通道;较高引气剂掺量砂浆中因冻融产 生的少量裂纹之间没有完全贯通,此刻的裂纹水 分传输作用有限.因此,以上对于试件微观形貌的 分析解释了冻融损伤后低引气剂掺量砂浆的毛细 吸水性系数显著增加、高引气剂掺量砂浆的毛细 吸水性系数略有降低这一现象.



(a) M0, N=20 times

(b) M010, *N*=0 times

(c) M010, *N*=20 times



#### 2.5 宏观参数与微结构的关联

#### 2.5.1 抗压强度与核磁累计信号量的关联

水泥砂浆孔隙结构的演化与抗压强度之间联系密切<sup>[15]</sup>,核磁累计信号量间接反映了砂浆试件的孔结构变化.图9为引气砂浆累计信号量与抗压强度的关系.由图9可见,引气剂掺量越高,核磁累计信号量越大,水泥砂浆内部的孔隙越多.与此同时,引气剂引入的微小封闭气泡降低了试件的密实度,导致试件的抗压强度降低.因此,水泥砂浆内部的孔隙越多,其抗压强度越低.

#### 2.5.2 毛细吸水性系数与微结构的关联

Ghasemzadeh等<sup>[16]</sup>研究发现,裂纹对混凝土毛细







(a) Water transport in lower air entrainment mortar

吸水性系数的影响较大.事实上,冻融损伤引气砂浆 孔隙大小等微结构参数与毛细吸水性系数之间存在 关联,其毛细吸水性系数受微结构的控制.因此,基 于核磁数据计算冻融循环作用前后不同引气剂掺量 砂浆的毛细孔体积占比,即毛细孔核磁信号量与总 信号量的比值,讨论其与毛细吸水性系数之间的关 系.对20次冻融循环作用前后引气砂浆的毛细孔体 积占比与毛细吸水性系数进行拟合(由于试件M0经 历20次冻融循环后已不完整,因此未对其冻融循环 作用后的数据进行分析),得到表4中毛细吸水性系 数与毛细孔体积占比的拟合方程.由表4可见,冻融 循环作用前后引气砂浆的毛细吸水性系数与毛细孔 体积占比均呈现出良好的线性相关性.

表 4 毛细吸水性系数与毛细孔体积占比的拟合方程 Table 4 Fitting equations between capillary water absorption coefficient and youmetric percentage of capillary pores

coefficient and volumetric percentage of capitaly pores				
N/times	Fitting equation	$R^{2}$		
0	$y=1.92\times10^{-4}x+0.0097$	0.989		
20	$y=1.99\times10^{-3}x+0.0955$	0.911		

冻融损伤引气砂浆的毛细吸水性系数与其微结构联系密切,其水分传输本质上取决于毛细孔、气孔和裂纹三者的共同作用.图10为冻融损伤引气砂浆的吸水示意图.由图10可见:由于较低引气剂掺量砂浆中裂纹的体积分数大,裂纹贯通毛细孔隙,充当水分传输的通道,显著加速水分入渗;较高引气剂掺量



(b) Water transport in higher air entrainment mortar

图 10 冻融损伤引气砂浆的吸水示意图

Fig. 10 Schematic diagram of water absorption in freeze-thaw damaged air entrained mortar

砂浆中因冻融循环作用产生的裂纹体积分数较低, 且裂纹未相互贯通,延缓了水分扩散,导致其毛细吸 水性系数略有减小.

## 3 结论

(1)在冻融循环作用前,砂浆的毛细吸水性系数 随着引气剂掺量的增加而逐渐降低,其值在10h左 右出现转折性变化.冻融循环作用后,不同试件的吸 水曲线同样出现转折性变化,引气剂掺量较低砂浆 的前期毛细吸水性系数较未冻融循环作用时明显增 加,引气剂掺量较高砂浆的前期毛细吸水性系数较 未冻融循环作用时无明显增加.

(2)未冻融试件的中、大孔随着引气剂掺量的增加而逐渐增加.在20次冻融循环作用后,砂浆T₂谱的中孔与大孔信号量均较未冻融时有所增加,但冻融循环作用产生的裂纹随着引气剂掺量的增加而逐渐减小.

(3)未冻融试件的抗压强度随着引气剂掺量的 增加而逐渐降低,砂浆内部的空隙越多,抗压强度 越低.

(4)不同引气剂掺量的水泥砂浆在冻融循环前 后的毛细吸水性系数与其微结构密切相关,其水分 传输本质上取决于毛细孔、气孔、裂纹三者的共同作 用.毛细孔体积占比与毛细吸水性系数之间呈现良 好的线性相关性.

#### 参考文献:

- FAGERLUND G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete[J]. Materials and Structures, 1977, 10(1):217-229.
- [2] SMITH S H, QIAO C, SURANENI P, et al. Service-life of concrete in freeze-thaw environments: Critical degree of saturation and calcium oxychloride formation [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 122:93-106.
- [3] 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, 88:43-59.
- [4] LIJL, KAUNDA R B, ZHOU K P. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154:133-141.
- [5] 薛慧君,申向东,邹春霞,等.基于NMR的风积沙混凝土冻融 孔隙演变研究[J].建筑材料学报,2019,22(2):199-205.

XUE Huijun, SHEN Xiangdong, ZOU Chunxia, et al. Freeze-thaw pore evolution of aeolian sand concrete based on nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):199-205. (in Chinese)

 [6] 郎泽军,金丹,姚武.基于低场核磁共振技术的水泥浆体 凝结时间及早期强度分析[J].建筑材料学报,2020,23(1): 25-28.

LANG Zejun, JIN Dan, YAO Wu. Analysis of setting time and early strength of cement paste by low field nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):25-28. (in Chinese)

- [7] WANG X X, SHEN X D, WANG H L, et al. Nuclear magnetic resonance analysis of concrete-lined channel freeze-thaw damage
   [J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2015, 123(1): 43-51.
- [8] DENG X H, GAO X Y, WANG R, et al. Investigation of microstructural damage in air-entrained recycled concrete under a freeze-thaw environment [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268:121219.
- [9] LIW, 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):299-307.
- [10] YANG Z F, WEISS W J, OLEK J. Water transport in concrete damaged by tensile loading and freeze-thaw cycling[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(3):424-434.
- [11] HANŽIČ L, ILIĆ R. Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(9):1385-1388.
- [12] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGEL M, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 60-67.
- [13] 夏艺.引气剂结构、性能与作用机理的研究[J].新型建筑材料, 2021,48(7):131-135.
  XIA Yi. Research on chemical structure, performance and mechanism of air entrainers[J]. New Building Materials, 2021, 48(7):131-135. (in Chinese)
- [14] 杨钱荣. 混凝土渗透性及引气作用对耐久性的影响[J]. 同济大 学学报(自然科学版), 2009, 37(6):744-748.
  YANG Qianrong. Effect of permeability of concrete and air entrainment on durability of concrete [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37(6):744-748. (in Chinese)
- [15] 朱华, 姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2011: 20-68.
  ZHU Hua, JI Cuicui. Fractal theory and its application[M]. Beijing:Science Press, 2011:20-68. (in Chinese)
- [16] GHASEMZADEH F, POUR-GHAZ M. Effect of damage on moisture transport in concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(9):04014242.