

# 混凝土冻融循环退化过程中的孔隙发展与钢筋锈蚀试验研究

张海龙<sup>1</sup>, 王社良<sup>1,2</sup>, 袁晓洒<sup>1</sup>

(1. 西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**[摘要]** 针对混凝土在冻融循环过程中的退化问题,对退化过程中的孔隙发展以及孔隙发展引起的钢筋锈蚀进行研究。提出采用核磁共振技术对混凝土在冻融循环退化过程中的孔隙发展进行表征,采用电化学工作站对钢筋混凝土在冻融循环退化过程中的钢筋锈蚀发展进行研究。结果表明:混凝土在冻融循环退化过程中, $T_2$ (弛豫值)谱中有3个波峰,其中表示试件内部的微细小裂缝的主峰面积占总面积的80%左右。随着冻融循环的进行, $T_2$ 谱中第一波峰(主峰)的面积呈指数形式增长。腐蚀电流密度和冻融循环次数之间服从指数关系,腐蚀电流密度和孔隙率之间服从线性关系。在175个循环后A-2组钢筋均已达到中等锈蚀状态,而B-2组试件则仍处于低锈蚀状态,表明添加粉煤灰可以提高混凝土的抗盐冻性能。

**[关键词]** 混凝土; 冻融循环; 核磁共振;  $T_2$ 谱; 极化曲线

**[中图分类号]** TU525 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0190

**[文章编号]** 1001-1560(2022)07-0102-08

## Experimental Study on Pore Formation and Reinforcement Corrosion in Concrete During Freeze-Thaw Cycles

ZHANG Hai-long<sup>1</sup>, WANG She-liang<sup>1,2</sup>, YUAN Xiao-sa<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability of Shanxi Province, Xijing University, Xi'an 710123, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the degradation of concrete in freeze-thaw cycles, the pore formation and the consequent reinforcement corrosion in the degradation process were studied. The nuclear magnetic resonance (NMR) technology was proposed to characterize the pore formation of concrete during the freeze-thaw cycle degradation, and the electrochemical workstation was used to study the development of reinforcement corrosion in the reinforced concrete in the process of above-mentioned degradation. Results showed that there were three peaks in  $T_2$  (relaxation value) spectrum of concrete during the freeze-thaw cycle degradation. The main peak area representing the micro cracks in the specimen accounted for about 80% of the total area. As the freeze-thaw cycle progressed, the area of the first peak (main peak) in  $T_2$  spectrum increased exponentially. Meanwhile, the relation between the corrosion current density and the number of freeze-thaw cycles was exponential, and the relation between corrosion current density and porosity was linear. After 175 cycles, the reinforcements of group A-2 reached a medium corrosion state, while the specimens of group B-2 were still in a low corrosion state, indicating that adding fly ash could improve the salt-freezing resistance of the concrete.

**Key words:** concrete; freeze-thaw cycle; nuclear magnetic resonance (NMR);  $T_2$  spectrum; polarization curve

## 0 前言

在建筑材料中,混凝土因其优异的可塑性,用量最大、使用范围最广<sup>[1]</sup>。然而,混凝土建筑在使用过程中受环境因素的影响,不可避免地会造成其使用寿命缩短的现象。根据其服役环境,此过程中的主要影响因

素有冻融循环<sup>[2,3]</sup>、氯离子侵蚀<sup>[4,5]</sup>、硫酸根离子侵蚀<sup>[6,7]</sup>、紫外线辐射<sup>[8,9]</sup>、大温差<sup>[10,11]</sup>的影响等。上述因素对混凝土建筑服役的影响主要体现在钢筋的锈蚀、裂缝的发展、混凝土质量损失3个方面,并且这3个方面在混凝土建筑退化过程中是相互影响、相互促进的。

[收稿日期] 2022-01-27

[基金项目] 陕西省教育厅专项科学研究项目(19JK0911)资助

[通信作者] 张海龙(1982-),硕士研究生,副教授,主要从事混凝土耐久性的研究,E-mail: yiyunhai@foxmail.com

混凝土的裂缝发展是由微小孔隙逐步贯通造成的,而目前的研究对裂缝主要的表征方法有超声波探伤法<sup>[12-15]</sup>、X-CT技术<sup>[16-19]</sup>。超声波探伤主要是利用超声波波速在不同物质中的传播速度不同来对同一探测位置损伤前后的超声波波速变化进行分析,从而对裂缝的发展进行研究<sup>[14,15]</sup>。X-CT技术主要是利用X射线穿透不同密度物质的衰减不同,从而实现对试件内部裂缝的区分,最后通过空间几何学实现不同物质的重构。裂缝的发展是由孔隙的贯通造成的,而超声波技术对孔隙的变化反应不灵敏,X-CT技术虽然可以实现对孔隙的量化,但仅针对密度变化不大的试件,并且对试件尺寸具有一定要求<sup>[18,19]</sup>。孔隙发展是裂缝形成的前提,裂缝是孔隙发展的最终形态,当混凝土建筑表面有裂缝形成时,其或将面临破坏,因此有必要对混凝土在退化过程中的孔隙发展进行分析。压汞仪法为传统的混凝土试件孔隙表征方法,但是其很难测量试件内部的闭口孔隙。核磁共振(NMR)技术具有精度高、测试速度快等优点,目前被广泛应用于医疗<sup>[20]</sup>、煤矿<sup>[21]</sup>、生物<sup>[22]</sup>等领域中。NMR技术也被应用于土木工程领域。宋勇军等<sup>[23]</sup>、李杰林等<sup>[24]</sup>采用NMR技术分别对干湿循环、冻融循环下岩石的孔隙率变化进行研究,并采用 $T_2$ 谱对岩石在损伤过程中孔隙率的变化进行分析,发现 $T_2$ 谱面积及孔隙率随干湿循环、冻融循环次数的增加逐渐增大。杨耀<sup>[25]</sup>采用NMR对干湿冻融循环下混凝土的孔隙率变化进行研究,发现在相同水胶比条件下,掺加引气剂可以使得混凝土中微小孔隙增多。电化学方法是目前用于混凝土内部钢筋锈蚀检测较为成熟的方法。如王鹏辉等<sup>[26-28]</sup>、李薛忠<sup>[29]</sup>、许晨<sup>[30]</sup>采用电化学方法对混凝土中钢筋的锈蚀进行研究,并通过分析测得的极化曲线对钢筋的锈蚀程度进行表征。

本工作基于普通钢筋混凝土在冻融循环作用下的退化性能试验,采用NMR技术对混凝土劣化过程中的孔隙发展进行研究,采用电化学测试方法对混凝土劣化过程中的钢筋锈蚀进行研究,试图对钢筋锈蚀、孔隙发展在混凝土退化过程中的作用规律以及相互间的作用关系进行探讨。

## 1 试验

### 1.1 试件制备

水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥。细集料为中砂,粗集料为粒径为5~10 mm和10~25 mm的碎石,级配为连续级配,大小石子的质量比为7:3。减水剂为UNF-1型聚羧酸系高效减水剂,减水效率为18%左右。粉煤

灰为II级粉煤灰,其比表面积为353 m<sup>2</sup>/kg。按照表1制备A、B 2组混凝土试件,每组3个试件,尺寸100 mm×100 mm×100 mm。表1中 $m_w/m_b$ 表示水与水泥+粉煤灰的质量比。将A、B组试件分别编号为A-1、A-2、B-1、B-2。制备脱模后将试件养护28 d,然后采用钻机取样机将A-1和B-1加工成 $\phi \times H = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ( $\phi$ 为直径, $H$ 为高)的圆柱体。A-2、B-2为保护层厚度为25 mm的钢筋混凝土试件。钢筋为HRB400,直径12 mm。

表1 混凝土配合比

Table 1 Concrete mix proportion

No.	Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Fly ash	Water reducer	$m_w/m_b$
A	450	158	634	1 167	-	2.14	0.35
B	310	158	634	1 167	140	2.14	0.35

### 2.2 试验过程

A-1、A-2、B-1、B-2 每组3块。试件制备完成后,对A-1、B-1组试件进行基准核磁共振测试(Cycle 0),对A-2、B-2进行电化学试验(Cycle 0)。对A、B组试件进行冻融循环试验。冻融方法参考GB/T 50082-2009“普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准”,前期每50个循环对试件进行一次外观检查,然后对A-1、B-1试件进行一次NMR试验。每25个循环对A-2、B-2进行电化学试验,电化学试验采用三电极系统,饱和甘汞电极作为参比电极,本工作中的电位值均相对于此参比电极,三电极测试系统如图1所示。

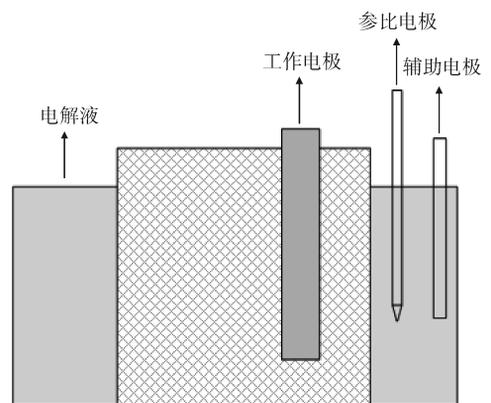


图1 三电极测试系统

Fig. 1 Three-electrode test system

后期当 $T_2$ 谱变化较明显时,每25个循环对试件进行一次NMR试验。试验采用Macro MR型NMR仪,磁场强度:(0.30±0.05) T,仪器主频率:12.8 MHz。电化学试验采用LK2010型电化学工作站,电位范围为-10~10 V,扫描速度为 $1.0 \times (10^{-6} \sim 10^4)$  V/s,电流范围为 $1.0 \times (10^{-6} \sim 10^3)$  mA。腐蚀电流密度与钢筋锈蚀

程度对应关系如表 2 所示<sup>[31]</sup>。采用 TDRF-I 型快速冻融试验机进行冻融试验。

表 2 腐蚀电流密度与钢筋锈蚀程度的对应关系

Table 2 Corresponding relation between corrosion current density and steel corrosion degree

$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$J_{\text{corr}} < 0.1$	$0.1 < J_{\text{corr}} < 0.5$	$0.5 < J_{\text{corr}} < 1.0$	$J_{\text{corr}} > 1.0$
锈蚀情况	无锈蚀	低锈蚀	中等锈蚀	严重锈蚀

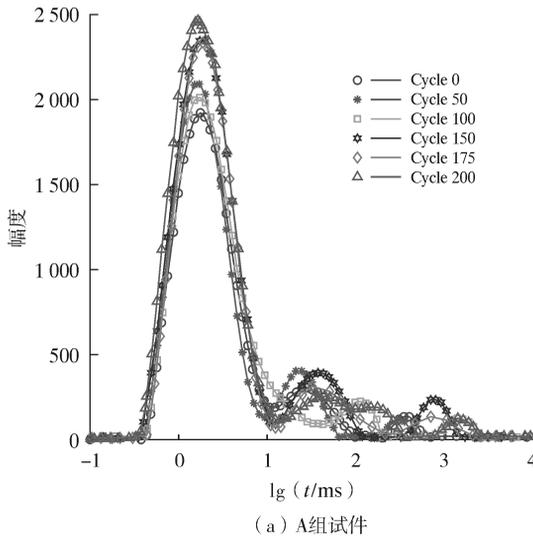
## 2 试验结果

### 2.1 NMR 试验结果

#### 2.1.1 $T_2$ 谱分析

在核磁共振试验中通常采用  $T_2$  弛豫值及孔隙率来反映混凝土在冻融循环过程中的退化过程。其原理主要是通过外梯度场的作用,使外加磁场中混凝土内部孔隙中的水分与梯度场产生核磁共振,然后将水分在共振时的能量变化信号转化为  $T_2$  弛豫值,通过弛豫值来反映混凝土的孔隙信息。弛豫时间和孔隙之间的关系式如下所示<sup>[23,24]</sup>

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (1)$$



式中: $T_2$  为弛豫值,ms; $\rho$  为材料的弛豫强度, $\mu\text{m}/\text{ms}$ ; $S$  为孔隙的面积, $\text{cm}^2$ ; $V$  为孔隙的体积, $\text{cm}^3$ 。

取冻融循环下 A、B 组试件中的一块为例进行分析,其  $T_2$  谱如图 2 所示。图 2 中横轴的大小与试件内部孔隙的尺寸大小成正比,纵轴波峰的大小反映了孔隙数量的多少。从基础 NMR 试验可以得出,B 组较 A 组的波峰高度有显著的降低,即通过添加粉煤灰显著减小了混凝土试件内部孔隙的数量。图 2 中每个  $T_2$  谱中有 3 个波峰,随着冻融循环的进行,3 个波峰的面积不断发生变化,即不同孔径的孔隙所占的比例不断发生变化。将弛豫时间在 0.1~10.0 ms 的峰定义为第一波峰,其表示试件内部微小尺寸的孔隙,弛豫时间在 10.0~340.0 ms 的峰定义为第二波峰,其表示试件内部小尺寸的孔隙,弛豫时间在 450.0~900.0 ms 的峰定义为第三波峰,其表示试件内部大尺寸的孔隙。每个波峰的峰值分别为 1 930、210、30,随着冻融循环的不断进行,第一波峰的峰值明显提高,表明试件内部孔隙不断增多,试件损伤不断加重;而第二和第三波峰则明显有增加和减小的波动,这个过程表明小尺寸孔隙转换为了大尺寸的孔隙。

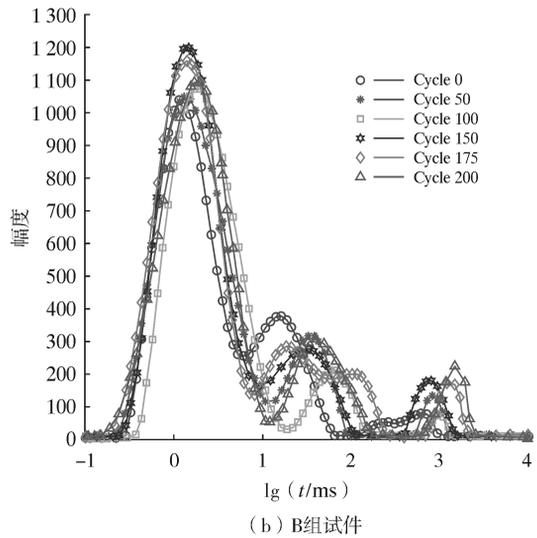


图 2 冻融循环下 A、B 组混凝土试件的  $T_2$  谱

Fig. 2  $T_2$  spectra of group A and B concrete test piece under freeze-thaw cycle

#### 2.1.2 $T_2$ 谱面积分析

从图 2 中可以明显看出试件退化过程中孔隙的变化,其中波峰面积可以很好地反映试件中孔隙尺寸和数量的变化<sup>[28]</sup>,因此对第一波峰(主峰)的面积变化进行分析。冻融循环下  $T_2$  谱的面积计算结果如表 3 所示,从表 3 中可知,试件 A 的微小孔隙占比可达 80.64%,B 试件中微小孔隙的占比可达 74.69%,而 A、B 试件中小尺寸孔隙和大尺寸孔隙的占比则分别为 19.36%和 25.31%。现对表 2 中 A、B 组试件冻融循环

次数和第一波峰面积平均值进行拟合,其结果如图 3 所示。从图 3 中拟合结果得出冻融循环作用下  $T_2$  谱的第一波峰面积可以用指数函数表示,其表达式为:

$$S = a \times \exp(b \times x) + c \quad (2)$$

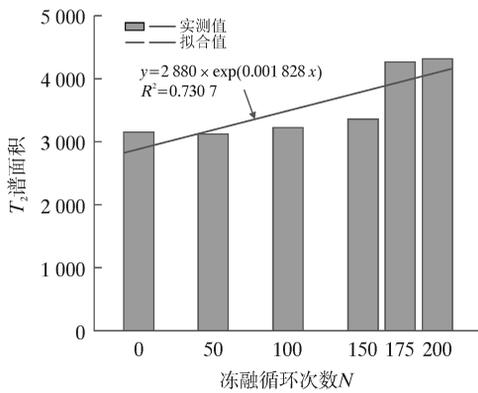
其中: $S$  为  $T_2$  谱中第一波峰面积, $x$  为冻融循环次数, $a$ , $b$ , $c$  为未知参数。从图 3 中可以得出,随着冻融循环次数的增加,试件内部微小孔隙面积逐渐增大。对于试件 A,在前 150 次冻融循环中孔隙发展较慢,在 150 次冻融循环后试件 A 的孔隙发展较快。而对于试件 B,

其内部微小孔在前期发展较快,后期发展较慢。

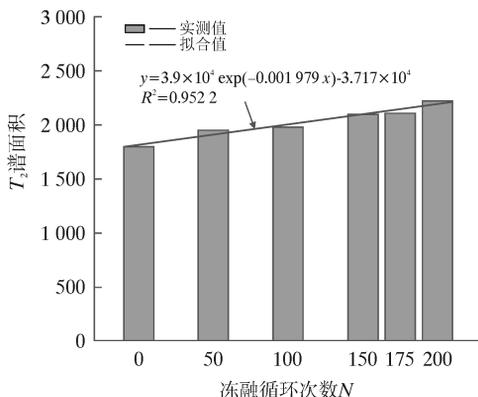
表3 冻融循环下  $T_2$  谱的面积

Table 3 Area of  $T_2$  spectrum under freeze-thaw cycles

No.	Cycles						
	0	50	100	150	175	200	
A	1	3 161.1	3 120.2	3 210.9	3 359.5	4 268.6	4 309.9
	2	3 141.7	3 122.5	3 223.4	3 347.1	4 232.8	4 300.5
	3	3 131.4	3 124.7	3 209.4	3 378.3	4 271.2	4 315.3
	mean	3 144.7	3 122.4	3 214.5	3 361.6	4 257.5	4 308.5
B	1	1 796.2	1 953.2	1 978.3	2 091.4	2 098.9	2 219.5
	2	1 785.3	1 943.5	1 967.2	2 088.5	2 102.1	2 213.2
	3	1 800.1	1 933.7	1 981.7	2 087.3	2 100.5	2 221.6
	mean	1 793.8	1 943.5	1 975.7	2 089.1	2 100.5	2 218.1
A	1	80.74	83.06	82.54	80.77	80.51	80.28
	2	80.55	83.12	82.21	80.64	80.25	80.16
	3	80.63	83.31	82.33	80.53	80.32	80.24
	mean	80.64	83.16	82.36	80.65	80.36	80.22
B	1	74.83	82.98	86.52	79.08	80.17	77.31
	2	74.21	83.15	86.11	78.88	80.34	76.56
	3	75.02	82.34	87.24	79.39	80.88	78.03
	mean	74.69	82.82	86.62	79.12	80.46	77.30



(a) A组试件



(b) B组试件

图3  $T_2$  谱主峰面积与冻融循环次数拟合图

Fig. 3 Fitting diagram of main peak area of  $T_2$  spectrum area with number of freeze-thaw cycles

### 2.1.3 孔隙率分析

每次冻融循环后对试件的孔隙率进行测量,冻融循环下混凝土孔隙率变化如表4所示。对冻融循环作用下试件孔隙率的平均值与冻融次数进行拟合,所得结果如图4所示。由图4可知在冻融循环作用下试件孔隙率可用指数函数表示。

表4 冻融循环下混凝土孔隙率变化

Table 4 Change of concrete porosity under freeze-thaw cycle

No.	Cycles						
	0	50	100	150	175	200	
A	1	2.85	3.04	3.15	3.66	4.29	4.98
	2	2.82	3.05	3.11	3.68	4.22	5.01
	3	2.83	3.02	3.13	3.64	4.23	4.94
	mean	2.83	3.04	3.13	3.66	4.25	4.98
B	1	2.62	2.83	2.89	3.14	3.44	3.78
	2	2.58	2.91	2.85	3.12	3.48	3.81
	3	2.64	2.79	2.87	3.17	3.43	3.74
	mean	2.61	2.84	2.87	3.14	3.45	3.78

### 2.2 电化学试验结果

以A-2、B-2中的一个试件为例进行极化曲线分析。冻融循环各个阶段的极化曲线如图5所示,其中0循环为A-2、B-2养护28d时的基准极化曲线。对于试件A-2来说,在0次循环时的腐蚀电位为-0.25V左右,在第25次冻融循环的时候腐蚀电位为-0.43V左右,在第50次冻融循环腐蚀电位为-0.38V左右,第70、100、125、150、175、200次冻融循环的腐蚀电位分别为-0.40、-0.51、-0.43、-0.42、-0.50、-0.70V,腐蚀电位的正向移动和负向移动与钢筋的锈蚀难易程度有关,腐蚀电位正向移动表明钢筋较难发生锈蚀,负向移动表明较容易发生锈蚀<sup>[28]</sup>。相比试件A-2而言,试件B-2在整个冻融循环周期内钢筋的腐蚀电位的波动程度不剧烈,这可能是因为试件B在冻融循环同周期内的孔隙率小于试件A的,因此试件B内部的氧气含量相对于试件A而言更少,使得试件B中的钢筋比试件A钢筋的锈蚀发生程度要低。对于钢筋锈蚀而言,腐蚀电流密度更能准确地反映其锈蚀程度,因此对2组试件的腐蚀电流密度进行计算,其结果如表5所示。根据表2可知,在75个循环后A-2、B-2组钢筋已达到低锈蚀状态。在175个循环后A-2组钢筋均已达到中等锈蚀状态,而B-2组试件则仍处于低锈蚀状态。图6为腐蚀电流密度与冻融循环次数的拟合图。从图6可知,腐蚀电流密度和冻融循环次数之间服从指数关系。

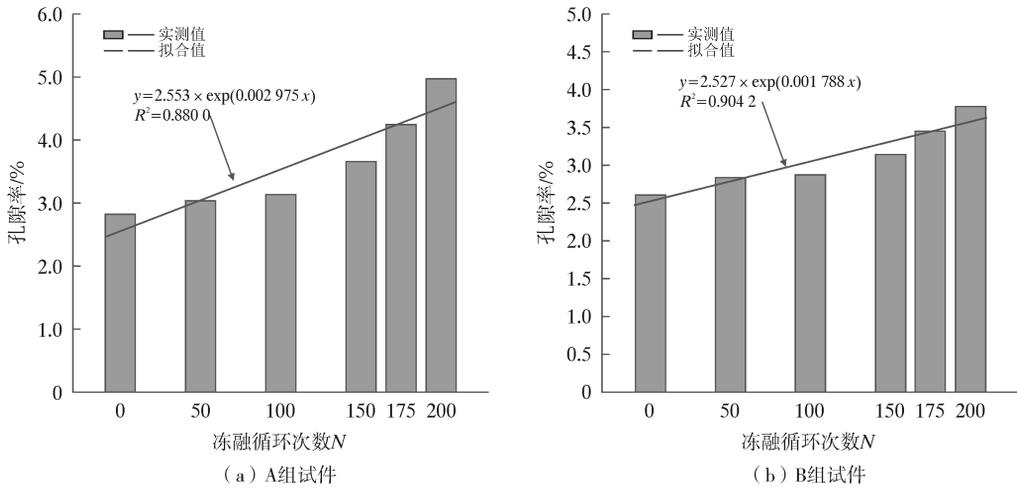


图4 孔隙率与冻融循环次数拟合图

Fig. 4 Fitting diagram of porosity and number of freeze-thaw cycles

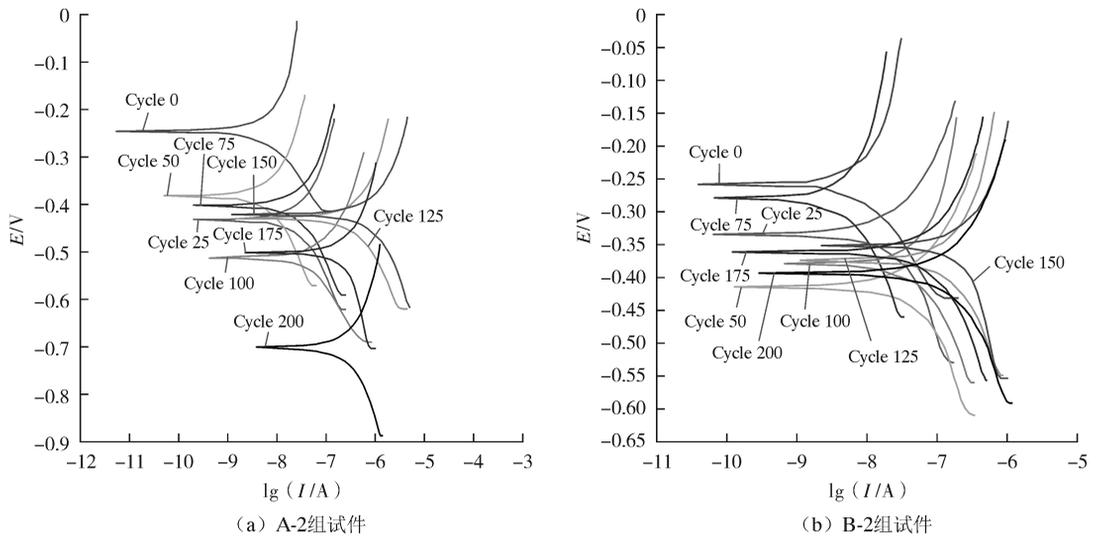


图5 不同冻融循环阶段的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of different freeze-thaw cycle stages

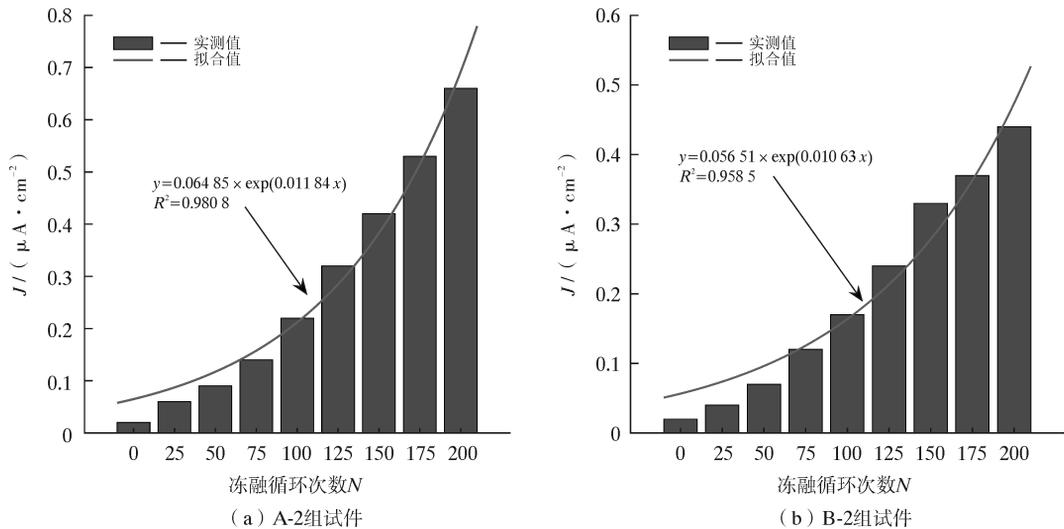


图6 腐蚀电流密度与冻融循环次数拟合图

Fig. 6 Fitting diagram of corrosion current density and number of freeze-thaw cycle

图7为腐蚀电流密度与孔隙率拟合图。从图7中可以看出腐蚀电流密度和孔隙率之间服从线性关系,

随着孔隙率的逐渐增加,腐蚀电流密度逐渐增加。

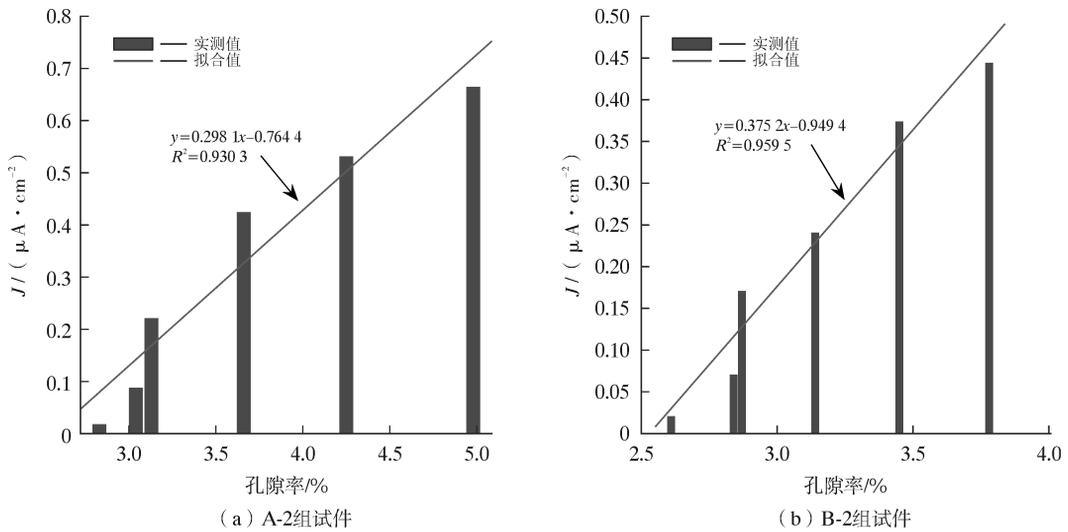


图7 腐蚀电流密度与孔隙率拟合图

Fig. 7 Fitting diagram of corrosion current density and porosity

表5 试件在各冻融循环阶段的腐蚀电流密度值  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

Table 5 Corrosion current density values of test piece in each freeze-thaw cycle stage  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

No.	Cycles									
	0	25	50	75	100	125	150	175	200	
A-2	1	0.02	0.05	0.09	0.13	0.21	0.32	0.43	0.52	0.66
	2	0.01	0.06	0.08	0.15	0.22	0.33	0.42	0.54	0.65
	3	0.02	0.06	0.09	0.14	0.23	0.31	0.42	0.53	0.68
	mean	0.02	0.06	0.09	0.14	0.22	0.32	0.42	0.53	0.66
B-2	1	0.01	0.03	0.08	0.12	0.18	0.25	0.32	0.38	0.44
	2	0.03	0.04	0.06	0.13	0.17	0.24	0.33	0.37	0.45
	3	0.02	0.04	0.07	0.12	0.16	0.23	0.34	0.37	0.44
	mean	0.02	0.04	0.07	0.12	0.17	0.24	0.33	0.37	0.44

通过对 A、B 组试件在冻融循环过程中的孔隙率变化、钢筋锈蚀程度进行分析可以得出,在混凝土中添加粉煤灰可以一定程度上降低混凝土内部的孔隙率进而减缓钢筋锈蚀。因此可以通过调整混凝土配合比来减缓冻融循环下混凝土中钢筋的锈蚀程度。

### 3 结论

对具有不同混凝土配合比的 A 和 B 2 组钢筋混凝土试件进行测试,结果表明:

(1)混凝土内部孔隙主要为微细小尺寸孔隙,在 NMR 的  $T_2$  谱中第一波峰的面积占总面积的 80%左右。随着冻融循环的不断进行,  $T_2$  谱逐步向右移动,并且此过程中第二波峰和第三波峰的峰值波动明显。

(2)随着冻融循环的进行,  $T_2$  谱中第一波峰的面积呈指数形式增长。在 A 组试件的第一波峰增长过程中,175 次冻融循环前增长缓慢,175 次冻融循环后增长迅速,而 B 试件与其相反。B 组试件内部的孔隙率比 A 组增长得慢。

(3)随着冻融循环的进行,试件 A-2、B-2 的腐蚀电流密度不断增大,且同时期 B-2 的腐蚀电流密度值小于 A-2。在 75 个循环后 A-2、B-2 组钢筋均已达到低锈蚀状态;在 175 个循环后 A-2 组钢筋已达到中等锈蚀状态,而 B-2 组试件则仍处于低锈蚀状态。腐蚀电流密度和冻融循环次数之间服从指数关系,腐蚀电流密度和孔隙率之间服从线性关系。

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 白丽飞,李艳佳,张佳强.经济发展与交通基础设施建设二者间的关系研究——以“一带一路”沿线我国西北五省为例[J].综合运输,2019,41(12):34-39.  
BAI L F, LI Y J, ZHANG J Q. Study on the Relation Ship Between Economic Development and Transportation Infrastructure Construction Taking Five Provinces in Northwest China along the Belt and Road as an Example[J]. China Transportation Review,2019,41(12):34-39.

[ 2 ] 吴倩云,马芹永,王莹.冻融循环作用下玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土抗压强度试验与细观结构[J].复合材料学报,2021,38(3):953-965.  
WU Q Y, MA Q Y, WANG Y. Compression - tensile tests and meso - structure of basalt fiber - slag powder - fly ash concrete under freeze - thaw cycles[J]. Acta Materiae Composi-

- tae Sinica, 2021, 38(3):953-965.
- [ 3 ] 张 帅. 纤维再生混凝土在冻融循环下性能研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- ZHANG S. Study on the performance of fiber regenerated concrete under freeze-thaw cycle[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.
- [ 4 ] 吴彰钰, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚混凝土中钢筋锈蚀的氯离子阈值研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5):1 078-1 085.
- WU Z Y, YU H F, MA H Y, et al. Determination of Chloride Threshold Value in Reinforced Coral Aggregate Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1 078-1 085.
- [ 5 ] 庄华夏. 潮差区混凝土氯离子侵蚀试验及钢筋初锈时间研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- ZHUANG H X. Study on Experiment of Chloride Ion Erosion and Initial Corrosion Time of Steel Bar in Concrete under the Tidal Area[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [ 6 ] 张中亚, 周建庭, 邹 杨, 等. 硫酸盐侵蚀对混凝土抗剪性能的影响[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7):64-72.
- ZHANG Z Y, ZHOU J T, ZOU Y, et al. Effect of sulfate attack on the shear performance of concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(7):64-72.
- [ 7 ] 李大贺. 再生粗骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- LI D H. Study on Sulfate Corrosion Resistance of Recycled Coarse Aggregate Concrete[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [ 8 ] 余 杰. 紫外线对水泥基材料表面结构和性质的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- YU J. Effect of Ultraviolet Radiation on the Surface Structure and Properties of Cement-based Material[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [ 9 ] 贺新星. 考虑紫外线辐射影响的高寒区面板混凝土耐久性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- HE X X. Study On Durability of Panel Concrete Considering the Influence of Ultraviolet Radiation in Alpine Area[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [ 10 ] 赵文斌. 干寒大温差地区不同养护方式下预制混凝土箱梁开裂规律及机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- ZHAO W B. Study on Cracking Law and Mechanism of Precast Concrete Box Girder Under Different Curing Methods in Dry - Cold and Large Temperature Difference Areas [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [ 11 ] 张东东. 温差效应下混凝土楼板工作性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHANG D D. Research on Working Performance of Concrete Floor Under Temperature Variation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [ 12 ] 马少宁. 钢管混凝土脱空无损检测技术试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- MA S N. Experimental Study on Non - destructive Testing Technology of Concrete Filled Steel Tube[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [ 13 ] 张 娣. 评估钢筋—混凝土界面损伤的超声导波法[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- ZHANG D. Ultrasonic Guided Wave - Based Evaluation Method for RC Structures with Interface Damage[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [ 14 ] 吴 婵, 傅梦媛. 超声波检测桩基混凝土缺陷的分析及处治[J]. 中国公路, 2019(20):110-111.
- WU C, FU M Y. Analysis and Treatment of Pile Foundation Concrete Defects Detected By Ultrasonic [J]. China Highway, 2019(20):110-111.
- [ 15 ] 孔志豪. 混凝土中超声波传播的衰减及随机特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- KONG Z H. The Research on Attenuation and Randomness of Ultrasound Propagating in Concrete [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [ 16 ] 杜红秀, 樊亚男. 基于 X-CT 的 C60 高性能混凝土高温微观结构损伤研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):210-215.
- DU H X, FAN Y N. Meso - structure Damage of C60 High Performance Concrete at High Temperature Based on X - CT [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):210-215.
- [ 17 ] 杜红秀, 吴振戌, 杜 帆. PP 纤维和钢筋对高温下 C60HPC 板热应变的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2):142-149.
- DU H X, WU Z X, DU F. Effect of Polypropylene Fiber and Steel Bar on Thermal Strain of C60 High Performance Concrete Slab at High Temperature [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):142-149.
- [ 18 ] 王志强. 基于 X-CT 的钢筋混凝土锈胀开裂研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WANG Z Q. Research on Correlation Induced Cracking of Reinforced Concrete Based on X - CT [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [ 19 ] 杨 彬. 基于高分辨 X-CT 的水泥基材料界面微结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- YANG B. Study on interface microstructure of cement-based materials based on high resolution X - CT [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [ 20 ] 孙秋原, 李 骥, 牛亚峰. 外伤性膝关节隐性骨折的核磁

- 共振成像表现及其诊断价值分析[J].影像科学与光化学,2020,38(1):138-143.
- SUN Q Y, LI J, NIU Y F. MRI Findings and Diagnostic Value of Traumatic Knee Joint Recessive Fracture[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2020, 38(1): 138-143.
- [21] 王有智.珲春盆地八连城矿区煤岩孔隙分形特征[J].西南石油大学学报(自然科学版),2020,42(1):57-68.
- WANG Y Z. Fractal Characteristics of Coal Rock Pores in the Baliancheng Mining Area, Hunchun Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(1): 57-68.
- [22] LI N, WANG K W, ZHANG G, et al. Prediction of gas production incarbonates based on CT analysis and nuclear magnetic resonance (NMR) logging[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 167-174.
- [23] 宋勇军,张磊涛,任建喜,等.基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):825-831.
- SONG Y J, ZHANG L T, REN J X, et al. Study on damage characteristics of weak cementation sandstone under drying-wetting cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 825-831.
- [24] 李杰林,周科平,张亚民,等.基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1 208-1 214.
- LI L J, ZHOU K P, ZHANG Y M, et al. Experimental Study of Rock Porous Structure Damage Characteristics Under Condition of Freezing-Thawing Cycles Based on Nuclear Magnetic Resonance Technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1 208-1 214.
- [25] 杨耀.基于核磁共振技术的混凝土干湿—冻融循环破坏研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- YANG Y. Research on Destruction of Concrete Under Condition of Wetting-Drying And Freezing-Thawing Cycles Based on Nuclear Magnetic Resonance Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [26] 王鹏辉,乔宏霞,冯琼,等.氯氧镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐久性退化研究[J].建筑材料学报,2020,23(3):563-571.
- WANG P H, QIAO H X, FENG Q, et al. Study on Durability Degradation of Coated Steel Bar in Magnesium Oxychloride Cement Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 563-571.
- [27] 王鹏辉,乔宏霞,冯琼,等.氯氧镁涂层钢筋混凝土两重因素耦合作用下的耐久性模型[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(1):191-201.
- WANG P H, QIAO H X, FENG Q, et al. Durability Model of Magnesium Oxychloride-Coated Reinforced Concrete Under The Two Coupling Factors[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1): 191-201.
- [28] 王鹏辉,乔宏霞,冯琼,等.考虑个体差异的氯氧镁水泥混凝土涂层钢筋寿命预测[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(12):2 309-2 316.
- WANG P H, QIAO H X, FENG Q, et al. Life Prediction Of Coated Steel With Individual Difference In Magnesium Oxychloride Cement Concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(12): 2 309-2 316.
- [29] 李薛忠.基于钢筋锈蚀的海工混凝土结构耐久性能研究[D].镇江:江苏科技大学,2019.
- LI X Z. Study on Durability of Seawater Sea-sand Concrete Structure Based on Steel Corrosion [D]. Zhenjing: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [30] 许晨.混凝土结构钢筋锈蚀电化学表征与相关检/监测技术[D].杭州:浙江大学,2012.
- XU C. Electrochemical Characteristic and Related Testing and Monitoring Technology of the Steel Corrosion of Concrete structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [31] 乔宏霞,王鹏辉,李元可,等.基于Wiener退化对镁水泥混凝土中钢筋的锈蚀预测[J].西南交通大学学报,2019,54(6):1 252-1 257.
- QIAO H X, WANG P H, LI Y K, et al. Corrosion Prediction of Coated Steel in Magnesium Cement Concrete Based on Wiener Degradation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1 252-1 257.

[编校:宋媛]

## (上接第90页)

- [14] GURIKOV P, KOLNOOCHENKO A, GOLUBCHIKOV M, et al. A synchronous cellular automaton model of mass transport in porous media [J]. Computers and Chemical Engineering, 2016, 84(1): 446-457.
- [15] WANG H T, HAN E H. Cellular automata simulation of interactions between metastable corrosion pits on stainless steel [J]. Materials and Corrosion, 2015, 66(9): 925-930.
- [16] 付婷.涂层保护性能与失效程度的快速检测与评价研究[D].北京:北京化工大学,2017.
- FU T. The Rapid Detection and Evaluation of Coating Protection Performance and Failure Degree [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.

[编校:宋媛]