

文章编号:1673-2049(2014)03-0085-05

冻融环境下引气混凝土的抗钢筋锈蚀能力研究

马志鸣^{1,2}, 赵铁军², 巴光忠¹, 管庭²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:对带钢筋的普通混凝土及引气混凝土试件进行抗冻融循环试验,在不同冻融损伤程度下对试件进行氯离子侵蚀试验。利用半电池电位法和线性极化法分别测定经过不同冻融循环次数下混凝土试件内部钢筋的电位和腐蚀电流密度,从而定量地确定混凝土内部钢筋的锈蚀情况。研究结果表明:向混凝土内部掺入一定比例引气剂,可以提高混凝土的抗冻性能,从而增强其在腐蚀环境下抗钢筋锈蚀能力,提高了混凝土的耐久性能;对试件进行劈裂试验后,钢筋的实际锈蚀情况与利用由化学方法测定结果一致。

关键词:混凝土;引气剂;冻融循环;钢筋锈蚀;抗冻性能;腐蚀电流密度

中图分类号:TU528.59 **文献标志码:**A

Study on Ability of Resistance to Steel Corrosion of Air Entraining Concrete Under Freeze-thaw Environment

MA Zhi-ming^{1,2}, ZHAO Tie-jun², BA Guang-zhong¹, GUAN Ting²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: The freeze-thaw cycle tests of the ordinary concrete specimen and the air entraining concrete specimen with steel were carried out, and the chloride corrosion tests under different freeze-thaw damage degrees were done. The potential values and corrosion current density of steel in concrete specimens were determined under different freeze-thaw cycle times by using half-cell potential method and linear polarization method, then the steel corrosion condition in concrete was qualitatively determined. The study results show that adding air entraining agent can improve the anti-freeze property of concrete, promote the ability of resistance to steel corrosion, and prolong the durability of concrete structure. After specimen splitting test, the actual steel corrosion condition has the same result with the result by chemical approach.

Key words: concrete; air entraining agent; freeze-thaw cycle; steel corrosion; anti-freeze property; corrosion current density

0 引言

混凝土耐久性是影响其使用寿命的主要原因,混凝土提前发生破坏往往是由于其耐久性不足导致的,同时在恶劣外界环境下,由于其多孔的特殊结构

形式,更容易发生混凝土耐久性破坏。大量试验研究表明,影响混凝土耐久性最主要的 2 个因素是氯离子侵蚀和冻融循环破坏,且在二者的耦合作用下,混凝土耐久性的劣化速率会加快,尤其对于已广泛应用于建筑行业的钢筋混凝土结构,氯离子侵

收稿日期:2014-04-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2009CB623203);国家自然科学基金项目(50739001)

作者简介:马志鸣(1987-),男,河北玉田人,同济大学工学博士研究生,E-mail:mzm10351163@163.com。

入到混凝土内部发生钢筋锈蚀等一系列化学反应,使其体积迅速膨胀而造成结构耐久性破坏^[1-5]。

向混凝土中掺入一定比例的引气剂是提高混凝土抗冻性的有效方法,各国学者研究的主要方面是引气剂对混凝土抗冻性能的影响,但是对不同冻融损伤下的引气混凝土耐久性研究少之又少^[6-10]。基于此,本文中笔者研究引气钢筋混凝土在不同冻融损伤下的抗氯离子侵蚀(抗钢筋锈蚀)性能,通过冻融循环试验、氯离子侵蚀试验,利用半电池电位法和线性极化法测定不同冻融损伤下试件内部的钢筋锈蚀情况,从而定量评定引气混凝土在冻融损伤后的耐久性能,为今后引气混凝土在工程中的应用提供理论依据。

1 原材料与配合比

为使混凝土试件受冻融损伤明显,本试验采用水灰比为 0.6 的混凝土,引气剂采用 SJ-3 型三萜系粉末状引气剂,呈浅黄色。试验中的原材料均来自于山东青岛,混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比
Tab. 1 Concrete Mix Proportions

混凝土种类	水灰比	各材料用量/(kg·m ⁻³)				引气剂 掺量/%
		水泥	砂	碎石	水	
普通混凝土	0.6	300	699	1 191	180	
引气混凝土	0.6	300	699	1 191	180	0.3

注:引气剂掺量为质量分数。

根据试验的需要计算并称取试验原材料,制备尺寸为 280 mm×150 mm×75 mm 的加钢筋混凝土试件,如图 1 所示。同时考虑保护层厚度对钢筋锈蚀的影响,本试验分别测定保护层厚度为 15 mm 和 30 mm 处混凝土内部钢筋锈蚀情况,通过试验结果对比分析可知,2 种位置处钢筋锈蚀变化趋势基本相同,故本文中仅讨论保护层厚度为 15 mm 处钢筋锈蚀情况。待试件成型 48 h 后拆模,将试件放入标准养护室[温度(20±2)℃、相对湿度 R≥95%]养护 24 d 后取出,直接浸水 4 d 后即可开始冻融循环试验。

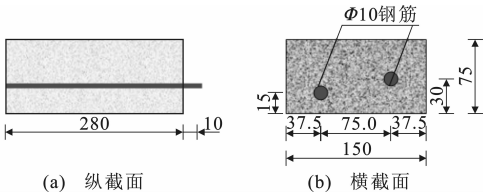


图 1 加钢筋试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Sizes of Reinforced Concrete Specimen (Unit:mm)

2 试验内容与试验方法

2.1 冻融循环与氯离子侵蚀试验

冻融循环试验:将饱水后的加钢筋混凝土试件取出,放入混凝土抗冻融循环试验机内进行抗冻融循环试验,在冻融循环次数 N 分别为 0(未受冻融损伤),10,50,100 时将试件取出,然后进行氯离子侵蚀试验,测定不同冻融损伤下,氯离子侵蚀对混凝土内部钢筋锈蚀的影响。

氯离子侵蚀试验:对不同冻融损伤后的试件进行烘干,并用石蜡将其除侧面以及对面外的 4 个面密封,保证氯离子在毛细吸收作用下沿试件内部一维扩散,加钢筋混凝土氯离子侵蚀试验示意如图 2 所示,从试件与盐水接触时开始定期测定钢筋的半电池电位及腐蚀电流密度。

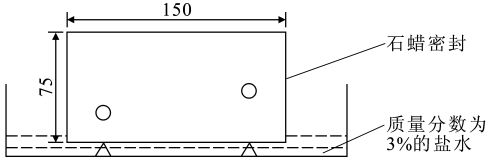


图 2 加钢筋混凝土氯离子侵蚀试验示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of Chloride Corrosion Test of Reinforced Concrete Specimen (Unit:mm)

2.2 钢筋锈蚀试验

试验中采用甘汞半电池对混凝土中钢筋的锈蚀状况进行检测,其由于电极的电位稳定、重现性好、结构简单、制作容易等优点而被广泛应用。当采用不同的标准半电池时,其测出的半电池电位与钢筋锈蚀状况的关系见表 2。在钢筋锈蚀试验中,用导线将钢筋和高阻抗电压表一端相连,电压表的另一端和电位已知的电极相连,然后将触点在混凝土表面上移动,如果混凝土中钢筋各处的状态不同,该标准电位与混凝土中钢筋表面的半电池之间的电位差就会出现,从而测定混凝土中钢筋的半电池电位变化,进而反映混凝土内部钢筋锈蚀状况。同时试验采用武汉科斯特公司生产的 CS 系列电化学工作站对钢筋的锈蚀状况进行测量,腐蚀电流密度与钢筋锈蚀状况的关系如表 3 所示^[11-12]。

3 试验结果与分析

3.1 混凝土的相对动弹性模量

表 4 为不同冻融循环次数下混凝土的相对动弹性模量。从表 4 可以看出:为研究不同冻融循环次数下不同混凝土的相对动弹性模量,经过 100 次冻融循环后,普通加钢筋混凝土的相对动弹性模量降

表 2 半电池检测钢筋锈蚀状况的 ASTM 判断标准

Tab. 2 Criteria for ASTM Used in Steel Corrosion

Condition by Half-cell Potential Test

钢筋锈蚀状况	锈蚀率/%	饱和甘汞半电池电位/mV
低度锈蚀	0~10	> -126
中度锈蚀	10~50	-276~-126
高度锈蚀	50~90	-426~-276
严重锈蚀	90~100	< -426

表 3 腐蚀电流密度与钢筋锈蚀状况的关系

Tab. 3 Relation Between Corrosion Current

Density and Steel Corrosion Condition

钢筋锈蚀状况	腐蚀电流密度/($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
钝化状态	< 0.1
低锈蚀速率~中锈蚀速率	0.1 ~ 0.5
中锈蚀速率~高锈蚀速率	0.5 ~ 1.0
高锈蚀速率	> 1.0

表 4 不同冻融循环次数下混凝土的相对动弹性模量

Tab. 4 Relative Dynamic Elastic Moduli of Concrete

Under Different Freeze-thaw Cycle Times

冻融循环次数	相对动弹性模量/%	
	普通混凝土	引气混凝土
0	100.0	100.0
10	89.8	97.7
25	76.1	96.5
50	55.0	95.5
75	34.0	95.2
100	20.0	95.2

为 20%，降低幅度为 80%；掺入引气剂的加钢筋混凝土相对动弹性模量降为 95.2%，降低幅度为 4.8%。对比上述数据结果可知，向混凝土中掺入一定比例的引气剂可以有效地提高混凝土的抗冻融性能。究其原因有：引气混凝土冻融破坏主要是由混凝土内部孔隙自由水产生的，孔隙自由水在冻融循环作用下反复冻融，对孔隙壁产生膨胀压力作用，最终导致混凝土疲劳破坏；向混凝土掺入引气剂后，通过引气剂的作用在混凝土内部产生许多独立且均匀分布、稳定而封闭的微小气泡，在冻融循环作用下，可以大幅度缓解混凝土内部膨胀压力的作用，从而提高混凝土的抗冻性能。

3.2 半电池电位法测定钢筋锈蚀

图 3,4 分别为普通混凝土试件和引气混凝土试件半电池电位随氯离子侵蚀时间变化曲线。从图 3,4 可以看出，试件的半电池电位均随着冻融循环次数及侵蚀时间的增加而增加，并且普通混凝土试件半电池电位曲线变化幅度较引气混凝土剧烈。当冻融循环次数为 0 时，普通混凝土试件和引气混

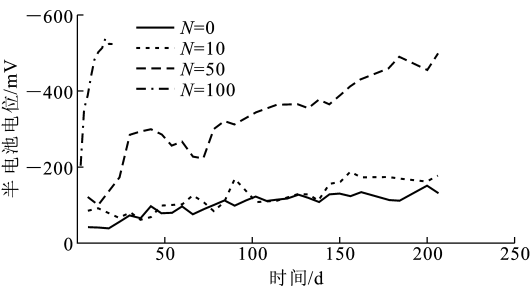


图 3 普通混凝土试件半电池电位随时间变化曲线

Fig. 3 Variation Curves of Half-cell Potential with Time in Ordinary Concrete Specimen

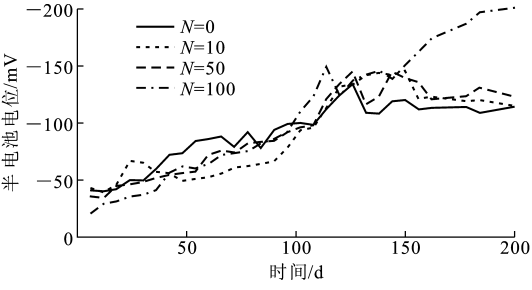


图 4 引气混凝土试件半电池电位随时间变化曲线

Fig. 4 Variation Curves of Half-cell Potential with Time in Air Entraining Concrete Specimen

凝土试件的初始半电池电位均较低。由表 2 可知，钢筋均为低度锈蚀。当冻融循环次数为 50 时，普通混凝土试件的初始半电池电位为 -125 mV，钢筋接近于中度锈蚀；引气混凝土试件的初始半电池电位为 -45 mV，钢筋处于低度锈蚀。当冻融循环次数为 100 时，普通混凝土试件的初始半电池电位为 -200 mV。由表 2 还可知，此时钢筋处于中度锈蚀。究其原因有：在冻融环境下由于水中氯离子的存在，当试件受到严重的冻融损伤时，混凝土对钢筋的保护程度大大降低，氯离子迅速侵入到试件内部造成钢筋的锈蚀，导致试件初始半电池电位较高，且当侵蚀龄期达到 25 d 时，钢筋已处于高度锈蚀状态；引气混凝土试件初始半电池电位较低，钢筋为低度锈蚀，当侵蚀龄期为 200 d 时，钢筋仅处于中度锈蚀。

根据半电池电位法测定钢筋锈蚀数据可知，在相同冻融循环作用下，引气混凝土试件内部钢筋具有较低的锈蚀程度，这是由于引气剂的存在提高了混凝土的抗冻性能，降低冻融损伤程度，从而提高了试件抗氯离子侵蚀性能，降低了抗钢筋锈蚀风险。

3.3 线性极化法测定钢筋锈蚀

图 5,6 分别为采用线性极化法测定普通混凝土试件和引气混凝土试件腐蚀电流密度随氯离子侵蚀时间变化曲线。从图 5,6 可以看出，试件的腐蚀电流密度均随着冻融循环次数和侵蚀龄期的增加而增

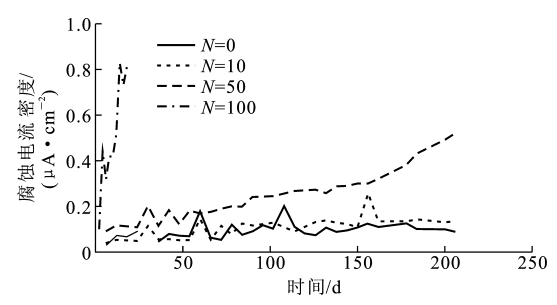


图 5 普通混凝土试件线性极化法测试结果随时间变化曲线

Fig. 5 Variation Curves of Linear Polarization Method Test Results with Time in Ordinary Concrete Specimen

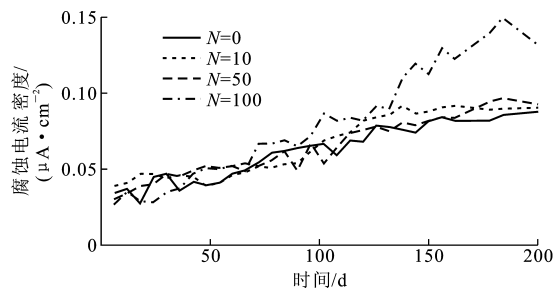


图 6 引气混凝土试件线性极化法测试结果随时间变化曲线

Fig. 6 Variation Curves of Linear Polarization Method Test Results with Time in Air Entraining Concrete Specimen

加。当冻融循环次数为 0 时,根据不同试件的初始腐蚀电流密度及表 3 可知,普通混凝土试件和引气混凝土试件内部钢筋均处于钝化状态。当冻融循环次数为 50 时,普通混凝土试件的初始腐蚀电流密度为 $0.1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,此时钢筋趋近于低锈蚀速率至中锈蚀速率,引气混凝土试件初始腐蚀电流密度约为 $0.03 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,处于钝化状态,当侵蚀龄期为 200 d 时,普通混凝土试件和引气混凝土试件钢筋分别处于中锈蚀速率至高锈蚀速率和钝化状态。当冻融循环次数为 100 时,普通混凝土试件腐蚀电流密度随侵蚀时间变化呈突变式增加,在较短侵蚀时间内钢筋处于中锈蚀速率至高锈蚀速率,而对于引气混凝土试件,即使侵蚀龄期达到 200 d 时,试件内部钢筋锈蚀速率仍较低,说明引气混凝土试件在不同冻融损伤下仍具有较好的抗氯离子侵蚀性能和抗钢筋锈蚀能力。

对不同冻融循环次数下、侵蚀龄期为 200 d 的普通混凝土试件和引气混凝土试件进行劈裂试验,实际情况下不同试件内部钢筋锈蚀情况分别如图 7,8 所示。从图 7,8 可以看出,掺入引气剂混凝土内部钢筋几乎无锈蚀,而普通混凝土试件内部钢筋

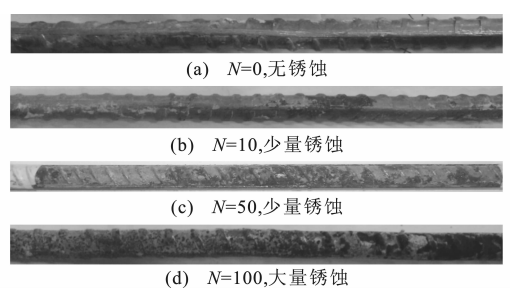


图 7 普通混凝土试件内部钢筋锈蚀情况

Fig. 7 Steel Corrosion Conditions in Ordinary Concrete Specimen

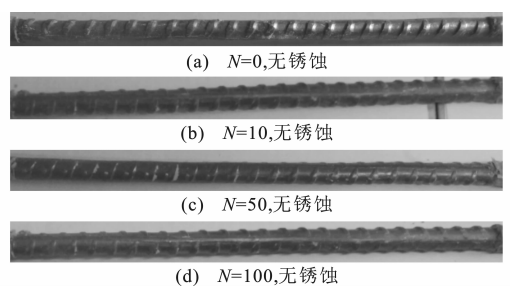


图 8 引气混凝土试件内部钢筋锈蚀情况

Fig. 8 Steel Corrosion Conditions in Air Entraining Concrete Specimen

锈蚀程度随着冻融循环次数的增加而加重,由实际情况得出的钢筋锈蚀程度与通过半电池电位法及线性极化法测定出的结果相一致。这说明引气剂的掺入不仅可以提高混凝土抗冻性能,同时也提高了不同冻融损伤下抗钢筋锈蚀能力,从而也提高了混凝土的耐久性能。

4 结 语

(1)引气混凝土试件相对普通混凝土试件具有较好的抗冻性能,在相同冻融循环次数下,引气混凝土试件较普通混凝土试件的抗钢筋锈蚀能力大幅度提高。

(2)由半电池电位法和线性极化法测定试件钢筋锈蚀结果可知,试件的半电池电位和腐蚀电流密度均随着冻融循环次数及氯离子侵蚀时间的增加而增加,在相同条件下,引气混凝土试件相对普通混凝土试件具有较低的半电池电位和腐蚀电流密度,大大降低了试件内部钢筋的锈蚀程度和锈蚀速率。同时由实际试件的劈裂试验可知,混凝土试件内部钢筋实际锈蚀情况与电化学测定得出的结果一致。

参考文献:
References:

[1] 赵利军,翁军良,冯忠绪. 引气及搅拌作用对混凝土性

- 能的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 32-37.
- ZHAO Li-jun, WENG Jun-liang, FENG Zhong-xu. Effects of Air Entraining and Mixing on Concrete Performance[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 32-37.
- [2] 潘慧敏, 刘征, 李志业. 钢纤维对混凝土内钢筋锈蚀性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(3): 384-388.
- PAN Hui-min, LIU Zheng, LI Zhi-ye. Influences of Steel Fibre on Steel Bars in Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(3): 384-388.
- [3] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 等. 冻融和腐蚀因素作用下混凝土的损伤劣化参数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 1-8.
- YU Hong-fa, SUN Wei, MA Hai-yan, et al. Analysis of Damage Degradation Parameters of Concrete Subjected to Freezing-thawing Cycles and Chemical Attack[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4): 1-8.
- [4] 贺鸿珠, 崔玉理, 史美伦, 等. 混凝土中钢筋锈蚀测量的银库仑计法[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 572-575.
- HE Hong-zhu, CUI Yu-li, SHI Mei-lun, et al. Measurement of Corrosion of Rebar in Concrete by Silver Coulometer[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 572-575.
- [5] 杨晓明, 韩志强. 钢筋混凝土结构的病害[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(5): 898-902, 912.
- YANG Xiao-ming, HAN Zhi-qiang. Diseases of Reinforced Concrete Structure[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(5): 898-902, 912.
- [6] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环-氯盐侵蚀-荷载耦合作用下混凝土中钢筋的锈蚀行为[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(6): 1022-1027.
- WANG Zhen-di, YAO Yan, WANG Ling. Corrosion Behavior of Steel Bar Embedded in Concrete Subject to Freeze-thaw Cycles-chloride Attack-flexural Load[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(6): 1022-1027.
- [7] 沈德建, 吴胜兴. 大气环境锈蚀钢筋混凝土梁力学性能试验研究及分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 75-82.
- SHEN De-jian, WU Sheng-xing. Experimental Study and Analysis on the Mechanical Performance of Corroded Reinforcement Concrete Beams in Atmospheric Environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(8): 75-82.
- [8] 胡秉偃, 邢锋, 赵羽习, 等. 锈蚀钢筋与混凝土的环向粘结试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(5): 34-38.
- HU Bing-yan, XING Feng, ZHAO Yu-xi, et al. Experimental Study on Hoop Bond Between Corrosion Bar and Concrete[J]. Industrial Construction, 2011, 41(5): 34-38.
- [9] 施锦杰, 孙伟. 混凝土中钢筋锈蚀研究现状与热点问题分析[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(9): 1753-1764.
- SHI Jin-jie, SUN Wei. Recent Research on Steel Corrosion in Concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(9): 1753-1764.
- [10] 赵冰华, 赵宇, 李延波, 等. 高性能混凝土的渗透性与耐久性之间的相关性研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(11): 2311-2314.
- ZHAO Bing-hua, ZHAO Yu, LI Yan-bo, et al. Research on Relation Between Permeability and Durability of High Performance Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(11): 2311-2314.
- [11] 施锦杰, 孙伟. 弯曲荷载与氯盐耦合作用下混凝土中钢筋锈蚀程度评估[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1201-1208.
- SHI Jin-jie, SUN Wei. Evaluation of Steel Corrosion in Concrete Under Simultaneous Flexural Load and Chloride Attacks[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7): 1201-1208.
- [12] 冯兴国, 唐李明, 赵旭辉, 等. 混凝土结构中钢筋腐蚀电位与腐蚀电流在液面附近的分布[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(6): 459-464.
- FENG Xing-guo, TANG Yu-ming, ZHAO Xu-hui, et al. Distribution of Corrosion Potential and Corrosion Current of Rebars in Concrete Structure Nearby Liquid Level[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(6): 459-464.