

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.014

硅酸根电迁移反应法处理砂浆的耐久性

徐金霞,单鸿猷,唐力,高国福,蒋林华,徐怡

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 211100)

摘要:为提升砂浆的耐久性,用硅酸根电迁移反应法处理砂浆。通过对比试验,研究了基准砂浆、去除表面涂层的被处理砂浆、带有表面涂层的被处理砂浆试件的抗碳化、抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子扩散和抗钢筋氯离子腐蚀的耐久性能。应用扫描电子显微镜(SEM)与压汞仪(MIP)研究了硅酸根电迁移反应法影响砂浆耐久性的微观作用机制。结果表明:砂浆试件的抗碳化、抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子扩散与抗钢筋氯离子腐蚀的耐久性能由小到大的顺序为:基准砂浆、去除表面涂层的被处理砂浆试件、带有表面涂层的被处理砂浆试件;硅酸根电迁移反应法对耐久性的提升作用缘于它能致密化砂浆并生成表面涂层的双重效果;由于生成的表面涂层较薄,且含有众多微米级孔隙,使表面涂层对砂浆耐久性影响减弱,砂浆致密化在耐久性的提升中起主要作用。

关键词:硅酸根;电迁移反应;水泥砂浆;砂浆致密化;砂浆耐久性;砂浆碳化;硫酸盐侵蚀;氯离子扩散;钢筋氯离子腐蚀

中图分类号:TU57⁺8.1

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2015)05-0489-06

Durabilities of mortar treated with method of electro-migration reaction of silicate ion

XU Jinxia, SHAN Hongyou, TANG Li, GAO Guofu, JIANG Linhua, XU Yi

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to improve the durability of mortar, the method of electro-migration reaction of silicate ion was used to treat mortar. Through comparison tests, the durabilities of different mortar specimens, including a control mortar specimen, a treated mortar specimen without surface coating, and a treated mortar specimen with surface coating, in resisting carbonization, sulfate attack, chloride diffusion, and corrosion of rebar by chloride ions were investigated. The microcosmic mechanism of the effects of this method on the durabilities of mortar was analyzed using a scanning electron microscope (SEM) and a mercury intrusion porosimeter (MIP). The results indicate that the durabilities of the mortar specimens in resisting carbonization, sulfate attack, chloride diffusion, and corrosion of rebar by chloride ions can be sequenced from low to high in the following order: control specimen, treated specimen without coating, and treated specimen with coating. The effect of the method of electro-migration reaction of silicate ion in improving the durability is due to its contribution in production of surface coating and mortar densification. Compared with densification of mortar, the produced coating has a relatively smaller effect on the improvement of durability due to its low thickness and numerous micron-grade pores.

Key words: silicate ion; electro-migration reaction; cement mortar; densification of mortar; durability of mortar; carbonization of mortar; sulfate attack; diffusion of chloride ion; attack of chloride ion in rebar

水泥混凝土因其独有的优异性能而被广泛用于建筑、道路、市政、水工、地下等各种工程中。但是,由于认识不足,早期人们往往只重视强度而忽视耐久性,给混凝土工程正常使用埋下了隐患,造成很多不良后果。

收稿日期:2015-03-16

基金项目:国家自然科学基金(51278168,51278167,51478164);2012年度江苏省高校“青蓝工程”人才计划(苏教师[2012]39号)

作者简介:徐金霞(1972—),男,安徽庐江人,副教授,博士,主要从事混凝土结构耐久性研究。E-mail: xujinxia@hhu.edu.cn

目前,水泥混凝土的耐久性问题已成为人们普遍关注与研究的重点^[1-2]。

水泥混凝土耐久性劣化直接或间接源于环境中侵蚀性介质,如水、 O_2 、 CO_2 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等的渗透侵入,因此多数学者通过降低混凝土的渗透性来提高水泥混凝土的耐久性^[3-5]。最基本的方法是提高混凝土密实性,制备高性能混凝土。高性能混凝土一般采用降低水胶比、掺入足够多的活性掺合料(如硅粉和矿渣微粉等)与高效减水剂的方法制备,但是,此方法会引起混凝土自收缩增加,早期易开裂,使得混凝土耐久性达不到预期效果^[6-7]。

硅酸根电迁移反应法是以 SiO_3^{2-} 为原材料,通过施加外加电场,电迁移驱动进入混凝土,利用 SiO_3^{2-} 与孔溶液中 $Ca(OH)_2$ 反应生成C-S-H来致密化混凝土,由此获取高性能混凝土。由于该方法是以硬化混凝土为密实处理对象,因此克服了传统方法制备高性能混凝土在早期收缩过大的缺陷。研究表明,硅酸根电迁移反应法不仅能够致密化砂浆,还能在砂浆表面生成表面涂层,由此显著提高电阻率,显示出大幅度提升混凝土耐久性的潜力^[8-9]。本文在已有工作基础上,通过对比试验,研究硅酸根电迁移反应法对砂浆的抗碳化、抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子扩散和钢筋氯离子腐蚀性能等耐久性能的提升效果,探讨影响砂浆耐久性的微观作用机制,以期为该方法的实际应用提供理论与试验基础。

1 试验过程与方法

1.1 试验过程

试验所用原材料及硅酸根电迁移反应法处理砂浆的试验装置同文献^[5-6]。砂浆试件尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,水灰比为0.5,胶砂比为0.4,成型24 h后拆模,标准养护27 d后从养护室中取出,安装到硅酸根电迁移反应法处理砂浆的试验装置上(砂浆试件面向阳极池与阴极池的外暴露面积为 $40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$)。安装完毕后,分别在阳极池和阴极池倒入由蒸馏水配制的饱和氢氧化钙溶液与 0.05 mol/L 的硅酸钠溶液,并平行置入钛网电极,然后通电对试件进行硅酸根电迁移反应法处理。通电采用等压加载方式,外加电压为 24 V/cm (相对于试件厚度),溶液温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,通电时间28 d。硅酸钠溶液每3 d更换一次,以保持其浓度基本不变。为了进行对比,同时也成型了未进行硅酸根电迁移反应法处理的控制砂浆试件(基准砂浆)。

用于研究钢筋氯离子腐蚀的砂浆试件,所用的钢筋为 $2\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的A3钢片,平行固定在砂浆试件中心位置。钢片在使用前已经过砂纸逐级抛光、丙酮去油等表面预处理。钢片的两端用热缩管密封,固定裸露长度为50 mm。硅酸根电迁移反应法处理时,钢片接地保护,以防受到杂散电流腐蚀。

1.2 耐久性测试

将经硅酸根电迁移反应法处理的砂浆试件取出,分成数目相同的2组。由于硅酸根电迁移反应法在致密化砂浆试件的同时,还能在硅酸钠接触的砂浆试件表面生成涂层,因此,为了区分砂浆的致密化、生成表面涂层对砂浆耐久性提升的影响,去除1组砂浆试件表面涂层。此外,为了验证被处理试件的耐久性提升效果,也取相同数量的基准砂浆试件进行对比试验。在进行耐久性测试时,仅暴露 $40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的被处理面,其他面用环氧树脂密封。

1.2.1 碳化

参照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[10]进行加速碳化试验,所用仪器为江苏省建筑科学研究院研制的CCB-70型碳化试验箱,箱内 CO_2 浓度(体积分数)为 $20\% \pm 3\%$,温度及湿度分别保持在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、 $70\% \pm 5\%$;到达规定龄期 T (3 d、7 d、14 d、28 d)后取出相应试件劈开,刷去断裂面上的粉沫,随即喷上1%酚酞乙醇指示液以测定其碳化深度。

1.2.2 硫酸盐侵蚀

在室温状态下将各种砂浆试件浸泡于质量分数为10%的硫酸钠溶液中,分别至15 d、30 d、60 d取出,测试各个侵蚀龄期砂浆的质量与抗折强度。与此同时,测试在自来水浸泡至相同龄期砂浆的抗折强度。试件的质量损失率为

$$\Delta m = \frac{m_0 - m}{m_0} \quad (1)$$

式中: m_0 、 m ——砂浆试件硫酸盐侵蚀前的初始质量与硫酸盐侵蚀后到一定龄期的质量。

砂浆试件的抗折强度(f_k)参照水泥胶砂强度检验方法(ISO法)进行测试。利用式(2)计算抗蚀系数 K :

$$K = \frac{f_k}{f'_k} \quad (2)$$

式中: f_k 、 f'_k ——在硫酸盐溶液和自来水中浸泡至相同龄期的砂浆试件抗折强度。

1.2.3 氯离子扩散

采用自然浸泡法测试各种砂浆的氯离子扩散特性,将各种砂浆试件一同放入室温下的3.5%氯化钠溶液中,90 d后取出试件,沿不同深度(0~5 mm、5~10 mm、10~15 mm、15~20 mm、20~25 mm、25~30 mm、30~35 mm、35~40 mm)取样。将所取样品磨细成粉后,过0.16 mm筛。按照SL 352—2006《水工混凝土试验规程》^[11]中水溶性氯离子含量测定方法,确定砂浆不同深度的游离氯离子含量。

1.2.4 钢筋氯离子腐蚀

将内置钢片砂浆试件自然浸泡在3.5%氯化钠溶液中150 d后,进行内部钢片腐蚀性能测试,所用设备为PARSTAT 2273型电化学工作站,以饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂电极为辅助电极。测试方法是交流阻抗谱法(EIS),扫描频率范围为 $10^{-2} \sim 10^5$ Hz,测试信号是幅值5 mV的正弦波,对数扫描取点40个。测得的电化学阻抗数据由随机配送的ZsimpWin软件进行等效电路模拟,从而获得极化电阻 R_p ,将其代入Stern-Geary公式,计算腐蚀电流密度 I_{corr} :

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (3)$$

式中: B ——Stern-Geary常数,一般认为钢筋处于钝化状态时 $B=52$ mV,钢筋处于活化状态时 $B=26$ mV^[12-13]。

1.3 微观测试

将经硅酸根电迁移反应方法致密化处理的砂浆沿被处理的表面及砂浆内部分别取样,用酒精浸泡终止水化后,真空下60℃烘干。用Hitachi-3400N扫描电子显微镜(SEM)观察表面涂层的形貌,用Poremaster GT-60压汞仪(MIP)观察被处理前、后砂浆孔隙的变化,所用最大汞压为210 MPa。

2 结果与讨论

2.1 硅酸根电迁移反应法对砂浆耐久性的影响

2.1.1 对抗碳化的影响

表1为试验得到的各种砂浆碳化深度随碳化时间的变化数据。由表1可知,随着碳化时间的延长,各种砂浆的碳化深度都逐渐增加;而当碳化时间相同时,砂浆的碳化深度顺序为:基准砂浆>去除涂层被处理砂浆>保留涂层被处理砂浆。尽管被处理后砂浆表面有涂层防护作用,但带有表面涂层的被处理砂浆在不同的时间仍然有相当高的碳化深度。在同等碳化时间时,带有表面涂层的被处理砂浆与去除表面涂层的被处理砂浆碳化深度之差要比去除表面涂层的被处理砂浆与基准砂浆的碳化深度之差小。

表1 各种砂浆试件在不同碳化时间下的碳化深度

Table 1 Carbonation depths of different mortar specimens with different carbonation time

试样类型	碳化深度/mm			
	$T=3$ d	$T=7$ d	$T=14$ d	$T=28$ d
基准砂浆	8.1	12.5	15.8	19.6
去除涂层被处理砂浆	7.4	11.5	15.0	18.5
带有涂层被处理砂浆	6.9	11.0	14.4	17.8

2.1.2 对抗硫酸盐侵蚀的影响

在硫酸盐侵蚀过程中,影响砂浆性能及质量的主要因素有2个:(a)硫酸根离子与水泥水化产物反应生成的钙矾石或是石膏等物质不断地填充砂浆的内部孔隙,使得砂浆逐渐密实,由此增加了砂浆的质量;当没有达到砂浆内应力临界值时,还提升了砂浆的强度。(b)在反应过程中因C-S-H和CH等组分的分解和溶出,或是因侵蚀层的剥落,使砂浆的质量下降;当持续生成的钙矾石或石膏填充超出混凝土孔隙时,将会在孔隙内产生很大的内应力,一旦内应力累积超过混凝土的抗拉强度,将会引起砂浆开裂,降低砂浆的强度。实际的砂浆性能及质量变化依赖于这2个因素的竞争结果。

图1(a)是各种砂浆试件质量损失率随硫酸盐侵蚀龄期的变化曲线。由图1(a)可知,随着侵蚀龄期的延长,各种砂浆试件的质量损失率整体上逐渐增加;侵蚀龄期相同时,总体上经过硅酸根电迁移反应法处理的砂浆试件(带有表面涂层或去除表面涂层)的质量损失率低于基准试件,而带有表面涂层的被处理试件的

质量损失率最低。正因为前述的竞争关系,在某些时候(本次试验侵蚀龄期 30 d),甚至也出现了基准试件要比去除表面涂层试件的被处理试件质量损失率要低的情况。

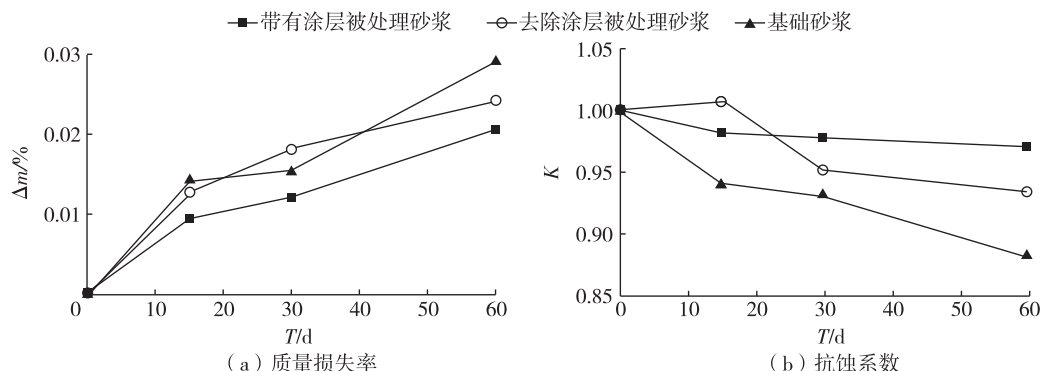


图1 各种砂浆试件 Δm 、 K 随硫酸盐侵蚀龄期 T 的变化曲线

Fig. 1 Variations of Δm and K with immersion time T of sulfate for mortar specimens

由图 1(b) 可知,随着侵蚀龄期的延长,除了去除表面涂层的被处理试件在硫酸盐侵蚀初期, K 出现增大外,其他时间各种砂浆试件的 K 都下降。与基准砂浆相比,经过硅酸根电迁移反应处理的砂浆试件的 K 总体要高一些,显示出更好的抗硫酸盐侵蚀能力。保留表面涂层的硅酸根电迁移反应方法处理试件的 K 随侵蚀龄期的延长下降最为缓慢,具有最强的抗硫酸盐侵蚀能力。

在侵蚀龄期后期,带有表面涂层的被处理砂浆与去除表面涂层的被处理砂浆试件的质量损失率与抗蚀系数之差要比去除表面涂层的被处理试件与基准试件的质量损失率与抗蚀系数之差小。

2.1.3 对抗氯离子扩散的影响

由图 2 可知,随扩散深度 x 的增加,各种试件中游离氯离子质量分数 ($w(\text{Cl}^-)$, 相对于水泥质量) 均逐步降低; 在相同 x 时,各种砂浆试件中 $w(\text{Cl}^-)$, 有很大区别,基准砂浆的 $w(\text{Cl}^-)$ 最高,其次是去除表面涂层的被处理砂浆,带有表面涂层的被处理砂浆中 $w(\text{Cl}^-)$ 最低。如在 $x = 0.5 \text{ cm}$ 时, $w(\text{Cl}^-)$ 在基准砂浆中为 0.526%, 在去除表面涂层被处理砂浆中为 0.161% (约为基准试件的 1/3), 而在带有表面涂层的被处理砂浆中仅为 0.072% (约为比基准试件的 1/7)。因此在同等深度,带有表面涂层的被处理砂浆与去除表面涂层的被处理砂浆试件 $w(\text{Cl}^-)$ 之差要比去除表面涂层的被处理试件与基准试件的 $w(\text{Cl}^-)$ 含量之差大很多。

将图 2 中数据用 Fick 第二定律进行拟合,拟合方程为

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (4)$$

式中: $C(x, t)$ ——以时间 t 和扩散深度 x 为参数的氯离子质量分数; C_0 ——砂浆内初始氯离子质量分数, %; C_s ——砂浆暴露表面的氯离子质量分数; D ——表观氯离子扩散系数。

经拟合得到基准试件、去除表面涂层的被处理试件、带有表面涂层的被处理试件中表观氯离子的扩散系数分别为 $6.12 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $2.75 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $2.45 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。由此表明,硅酸根电迁移反应处理砂浆的致密化和生成的表面涂层都能降低氯离子扩散系数,而在这 2 个因素中,致密化作用降低氯离子扩散的效果更显著。

2.1.4 对抗钢筋氯离子腐蚀的影响

图 3 为各种砂浆试件中钢片腐蚀电化学阻抗谱的 Nyquist 曲线。由图 3 可知,各种砂浆试件钢片腐蚀在低频处有一个明显的容抗弧,但在钢筋混凝土中一般在高频处会出现的容抗弧在本次试验中并不明显,这与张倩

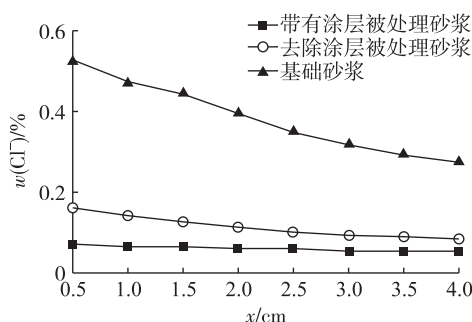


图2 各种砂浆试件中 $w(\text{Cl}^-)$ 随 x 的分布曲线

Fig. 2 Variation of $w(\text{Cl}^-)$ in mortar specimens with x

倩等^[14]的研究结果一致。各种砂浆试件中钢片腐蚀在低频处容抗弧的半径由小到大顺序是:基准试件、去除表面涂层的被处理试件、带有表面涂层的被处理试件,这样的结果表明这些砂浆中钢片的腐蚀速度有相反的大小顺序,也即在基准砂浆中钢片腐蚀最快,其次是去除表面涂层的砂浆试件,而带有表面涂层的被处理砂浆试件中钢片腐蚀速度是最慢的。由此可见,硅酸根电迁移反应处理砂浆的致密化和生成的表面涂层对砂浆试件中钢片氯离子腐蚀都有抑制作用。利用常用的混凝土中钢筋腐蚀的等效电路^[15-17],将图3中阻抗谱数据由等效电路模拟计算,由此得到极化电阻,再计算各种砂浆试件中钢片氯离子腐蚀的电流密度,其中,基准砂浆为 $1.067 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,去除表面涂层的被处理砂浆为 $0.099 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,而带有表面涂层的被处理砂浆仅为 $0.0602 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

2.2 硅酸根电迁移反应法影响耐久性的微观作用机制

砂浆试件经硅酸根电迁移反应法处理后,其表面生成具有强黏附性的涂层。该涂层的厚度较薄,仅约 1.0 mm ,主要成分是硅胶和C-S-H凝胶^[5-6]。从耐久性的试验结果可知,去除表面涂层的被处理试件的耐久性弱于未去除表面涂层的砂浆试件,说明表面涂层对提升被处理砂浆的耐久性有贡献,这种贡献是由于表面涂层对环境侵蚀介质的阻碍作用。但是,表面涂层的SEM图片也显示(图略),虽然表面涂层宏观上似乎较为致密,但实际上它含有大量的微米级孔洞(约占40%~50%)。这些孔洞为环境侵蚀性介质提供通道,因此,尽管表面涂层能够阻碍侵蚀性介质侵入,在一定程度上提升了砂浆的耐久性,但并不能完全隔绝,很大程度限制了对砂浆耐久性的提升作用。

图4是被处理砂浆与基准砂浆的孔径分布微分曲线,图中 V 为压入汞的体积, d 为粒径。图4显示,经硅酸根电迁移反应法处理砂浆孔径显著减小,最可积孔径由基准砂浆的 149.0 nm 降为 122.8 nm ,证明已成功实现了砂浆的致密化。这种致密化作用,使砂浆总的孔隙率由 9.05% 降低到 8.38% ,且使被处理砂浆的小于 50 nm 、 $50 \sim 100 \text{ nm}$ 、大于 100 nm 的孔隙所占比例分别由基准砂浆的 4.69% 、 4.73% 、 90.05% 变为 9.20% 、 9.04% 、 81.86% 。因此,硅酸根电迁移反应法使砂浆中尺寸在 100 nm 以上的多害孔数量大幅度减少,而在 $50 \sim 100 \text{ nm}$ 之间的少害孔与 50 nm 以下无害孔的数目增大,这极大地限制了环境侵蚀性介质的侵入,提升了砂浆的耐久性。从耐久性试验结果可知,尽管经硅酸根电迁移反应法处理砂浆中表面涂层对砂浆耐久性的提升有一定的贡献,但致密化的作用要大于表面涂层的贡献,起到了主要的作用。

3 结 语

与基准砂浆相比,经硅酸根电迁移反应法处理的砂浆试件有更好的抗碳化、抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子扩散与抗钢筋氯离子腐蚀性能,证实该方法是一种很好的耐久性提升方法。与去除表面涂层的被处理砂浆试件相比,带有表面涂层的被处理砂浆试件的抗碳化、抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子扩散与抗钢筋氯离子腐蚀性能的耐久性能更佳,表明硅酸根电迁移反应法对耐久性的提升作用是缘于它能致密化砂浆与生成表面涂层的双重效果,是这2个方面因素共同作用的结果。但是,由于经硅酸根电迁移反应法处理砂浆试件生成的表面涂层较薄,且含有众多微米级孔隙,使表面涂层对砂浆耐久性影响减弱,而砂浆致密化在耐久性的提升中起主要作用。

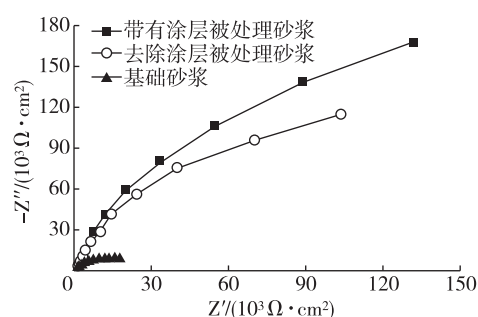


图3 各种砂浆试件中钢片腐蚀
电化学阻抗谱的Nyquist曲线

Fig. 3 Nyquist plots of electrochemical impedance spectroscopy of corrosion of steel sheets in mortar specimens

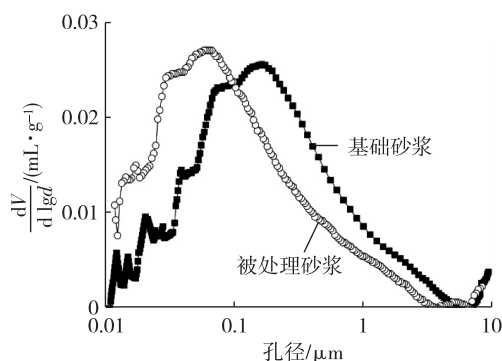


图4 砂浆的孔径分布微分曲线

Fig. 4 Differential curves of pore volume of mortar

参考文献:

- [1] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性[J]. 公路, 2001(2): 66-69. (HONG Naifeng. Corrosion of steel in concrete and structure durability[J]. Highway, 2001(2): 66-69. (in Chinese))
- [2] 金伟良, 吕清芳, 赵羽习, 等. 混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1): 7-13. (JIN Weiliang, LYU Qingfang, ZHAO Yuxi, et al. Research progress on the durability design and life prediction of concrete structures[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 7-13. (in Chinese))
- [3] 张士萍, 张厚先, 张才南, 等. 混凝土气体渗透性的评价方法研究[J]. 混凝土, 2014(5): 6-14. (ZHANG Shiping, ZHANG Houxian, ZHANG Cainan, et al. Research on measurement of air penetration in concrete[J]. Concrete, 2014(5): 6-14. (in Chinese))
- [4] BASHEER L, KROPP J, CLELAND D J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15: 93-103.
- [5] GUIMING W, JIANYING Y. Self-healing action of permeable crystalline coating on pores and cracks in cement-based materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2005, 20(1): 89-92.
- [6] NEVILLE A, AITCIN P-C. High performance concrete; an overview[J]. Materials and Structures, 1998, 31(2): 111-117.
- [7] BHARATKUMAR BH, NARAYANAN R, RAGHUPRASAD BK, et al. Mix proportioning of high performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(1): 71-80.
- [8] 徐金霞, 唐力, 蒋林华, 等. 硅酸根电迁移反应砂浆致密化方法的研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 487-493. (XU Jinxia, TANG Li, JIANG Linhua, et al. New method of densified cement mortar by electro-migration reaction of silicate ion [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3): 487-493. (in Chinese))
- [9] 徐金霞, 单鸿猷, 唐力, 等. 砂浆特性参数对硅酸根电迁移反应法致密化和表面涂覆效果影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 127-132. (XU Jinxia, SHAN Hongyou, TANG Li, et al. Effects of mortar properties on densification and surface coating through electro-migration reaction of silicate ions [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2015, 43(2): 127-132. (in Chinese))
- [10] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [11] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S].
- [12] MONTEMOR M F, SIMOES A M P, FERREIRA M G S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4/5): 491-502.
- [13] AHMAD S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction; a review[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4/5): 459-471.
- [14] 张倩倩, 孙伟, 施锦杰. 矿物掺合料对钢筋锈蚀临界氯离子含量的影响[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 633-637. (ZHANG Qianqian, SUN Wei, SHI Jinjie. Influence of mineral admixtures on chloride threshold level for corrosion of steel in concrete[J]. Journal of Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 633-637. (in Chinese))
- [15] XU Jinxia, JIANG Linhua, WANG Jingxiang. Influence of detection methods on chloride threshold value for the corrosion of steel reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 1902-1908.
- [16] XU Jinxia, JIANG Linhua, XING Feng. Influence of N,N'-dimethylaminoethanol as an inhibitor on the chloride threshold level for corrosion of steel reinforcement[J]. Materials and Corrosion, 2010, 61(9): 802-809.
- [17] FELIU V, GONZALEZ JA, ANDRADE C, et al. Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface: I. experimental evidence and theoretical predictions[J]. Corrosion Science, 1998, 40(6): 975-993.