

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.058



不同电流密度下混凝土裂缝电沉积产物的分布特性

金伟良^{1,2}, 彭文浩¹, 毛江鸿², 王金权³, 樊玮洁², 潘崇根²

(1. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 浙江大学宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100;
3. 宁波市杭州湾大桥发展有限公司, 浙江 宁波 315317)

摘要: 选用 $ZnSO_4$ 作为电沉积溶液, 以混凝土裂缝处电阻及裂缝填充深度为评价指标, 研究电流密度对电沉积修复钢筋混凝土裂缝效果的影响及对沉积物矿物成分和微观形貌的影响。研究结果表明: 经过电沉积修复 36 d, 混凝土试件电阻显著增加, 电阻增加速率随着通电时间增加而减小, 电流密度越大, 早期电阻增加速率越快, 但裂缝填充深度越小。X 射线衍射结果表明, 沉积物主要矿物成分为 ZnO 。电镜扫描结果表明, 沉积物颗粒大小随着电流密度增大而变大, 电流密度越小, 沉积物排列越有序, 结构越致密。

关键词: 电沉积; 电流密度; 混凝土裂缝修复; 效果评估

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)03-0127-07

Distribution characteristics of electrodeposition products of concrete cracks under different current densities

Jin Weiliang^{1,2}, Peng Wenhao¹, Mao Jianghong², Wang Jinqun³, Fan Weijie², Pan Chonggen²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 2. School of Civil Engineering & Architecture, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China; 3. Ningbo Hangzhou Bay Bridge Development Co., Ltd, Ningbo 315317, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: The solution with $ZnSO_4$ was chosen to repair the crack of concrete by electro-migration. To explore the influence of current density on electrodeposition repairing performance, mineral composition and microstructure of the sediments, the electrical resistance and crack filling depth were used in this study. Results show that the resistance of concrete specimens increased significantly after the electrodeposition repair for 36 days, and the growth rate of resistance decreased with increase of energization days. The early rate of the resistance increase was faster, and the depth of crack filling was

收稿日期: 2018-10-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51638013, 51578490, 51820105012); 浙江省自然科学基金 (LQ19E080012, LY18E080003); 宁波市自然科学基金 (2018A610359)

作者简介: 金伟良 (1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性研究, E-mail: jinwl@zju.edu.cn.
毛江鸿 (通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: jhmao@nit.zju.edu.cn.

Received: 2018-10-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51638013, 51578490, 51820105012); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LQ19E080012, LY18E080003); Natural Science Foundation of Ningbo (No. 2018A610359).

Author brief: Jin Weiliang (1961-), professor, PhD, main research interest: concrete durability, E-mail: jinwl@zju.edu.cn.

Mao Jianghong (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: jhmao@nit.zju.edu.cn.

more shallow with increase of current density. Besides, X-ray diffraction results showed that ZnO was the main mineral component of the sediments. Scanning electron microscopy results showed that the size of sediment particles increased with increase of current density. The rank of sediments was more ordered and the microstructure was more compacted as the current density decreased.

Keywords: electrodeposition; current density; concrete crack repair; effect evaluation

钢筋混凝土结构在使用过程中将产生微裂缝,甚至贯穿裂缝,裂缝会引起渗漏、保护层剥落、钢筋腐蚀、混凝土碳化等,直接影响混凝土结构耐久性。特别是在海洋环境中,裂缝会加速氯离子的侵蚀,混凝土的自由氯离子和总氯离子均随着裂缝宽度增加而呈二次函数增加^[1]。一方面,在毛细作用下,外部氯离子会沿裂缝快速侵入到钢筋表面,引起钝化膜局部破坏而使钢筋提前发生坑蚀;另一方面,裂缝的存在容易使钢筋发生“小阳极、大阴极”的电化学腐蚀,从而加快钢筋锈蚀的发展。因此,研究水环境中混凝土结构裂缝的修复方法具有重要意义。

对于水环境中的钢筋混凝土结构裂缝修复,传统的裂缝修复技术(结构加固法、表面处理法、灌浆法、填充法等)存在很大的局限性^[2-4],而对于裂缝自修复技术^[5-6],渗透结晶法在裂缝宽度大于 0.4 mm 后,自修复效果不佳。结晶沉淀法在水流速度很快时,难以形成碳酸钙沉淀,从而影响修复效果。聚合物固化法仍有关键问题尚未解决。电沉积法是用电化学方法修复混凝土结构裂缝的一种方法,对于传统修复方法不经济,甚至是难以实施的水下钢筋混凝土结构裂缝的修复特别适用。其通过施加弱电流,将水环境中的电解质进行电解沉积,在混凝土裂缝及表面生成一层化合物,填充、愈合混凝土裂缝。根据这一原理,研究者们从电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的可行性、机理、混凝土参数(水灰比、保护层厚度)、电沉积系统技术参数(电解液浓度、电流密度、通电量)等方面开展了一系列研究^[7-11]。

如何有效评价钢筋混凝土裂缝的愈合效果一直是电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝研究的重点与难点。蒋正武等^[12]采用多孔混凝土模拟带裂缝混凝土,以透水系数、质量增加量及超声波声速作为评价指标,研究电解质浓度及电流密度对电沉积的影响;Ostuki 等^[13-14]以及储洪强等^[15-16]提出以裂缝填充深度、裂缝闭合率、表面覆盖率、质量增加率作为评价指标,研究不同因素对电沉积效果的影响。研究发现,较宽的裂缝,即使裂缝壁有沉积物覆盖,但沉积物并不一定将裂缝覆盖完全,此时,计算裂缝愈合率时是否将该处裂缝列为已愈合裂缝值得讨论。电沉积产物大部分覆盖在试件表面,裂缝中沉积物

的质量占沉积物总质量的小部分,而且,沉积物在试件表面的覆盖情况以及沉积物质量的增加情况但并不能完全反映裂缝的愈合情况,因此,将表面覆盖率、质量增加率作为评价指标,具有一定的局限性;混凝土裂缝处的透水系数能直接反映裂缝的愈合情况,普通无裂缝混凝土的透水系数常用带压力的透气、透水试验,但并不适用于带裂缝混凝土透水系数的测量,因为裂缝的存在使压力不能有效保持,因此,只能采用自然渗透的测试方法,但自然渗透方法测试周期长,试验不方便。Ostuki 等^[17-18]根据通电机理,选定通电条件,以研究裂缝处的电流密度,结果表明,裂缝处的电流约为总电流的 15%~19%。姚武等^[19]通过测量相同外加电压下同一试件在破坏前后的电流密度,发现破坏后的试件在相同电压下所通过的电流明显增大,裂缝处的电流密度相对试件其他未裂部位高出数百倍。宋显辉等^[20]利用有限元定量模拟混凝土试件和溶液中电流密度的分布情况,结果表明,裂纹尖端附近的电流密度相对于其他部位高出 570 倍。由此可见:裂缝中电流密度远大于无裂缝处混凝土的电流密度。把电路中的电阻分为裂缝中的电阻 R_1 和混凝土试件的电阻 R_2 ,两者为并联关系,裂缝未愈合时, R_1 很小,此时,裂缝不仅是主要的电流通道,也是主要的离子通道(阴极产生的 OH^- 与溶液中的 Zn^{2+} 在离子通道中生成 ZnO 沉淀),沉积物在裂缝中快速沉积,根据并联电阻公式, R_1 增加导致 $R_{\text{总}}$ 增加明显。随着通电的进行,裂缝逐渐愈合,电流通道与离子通道由裂缝处向无裂缝处分散, R_1 增加速率变缓,并且,由于 R_1 变大, R_1 变化对 $R_{\text{总}}$ 的影响变小,此时, $R_{\text{总}}$ 增加变缓。在通电前期,沉积物主要在裂缝中生成, R_1 增加明显,裂缝愈合后,沉积物在整个试件中生成,此时, R_1 与 R_2 增加缓慢,导致 $R_{\text{总}}$ 增加缓慢。由此可知,混凝土电阻 $R_{\text{总}}$ 变化能有效反映裂缝处电阻的变化情况,进而反映裂缝的愈合情况。据此,本文设计了电化学沉积修复钢筋混凝土裂缝的试验装置,采用阴极、阳极间的电阻及裂缝最终填充深度评价愈合效果,探究电流密度对电沉积修复的影响。此外,为对沉积物进行深入分析,引入扫描电镜、X 射线衍射法分析了沉积物的矿物成分、微观形貌。

1 试验过程

1.1 试件制备

试验采用的混凝土试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 内置两根直径为 10 mm 的 HPB235 圆钢, 钢筋一端置于混凝土内, 一端露出混凝土 20 mm , 用作阴极接头, 混凝土保护层厚度为 20 mm , 试件设计如图 1 所示。

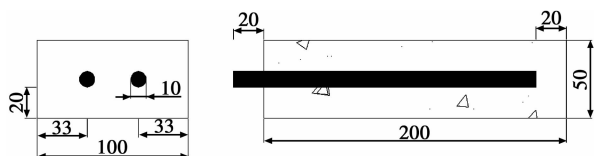


图 1 试件尺寸

Fig. 1 Specimen size

混凝土配合比如表 1 所示。其中, 水泥为 42.5 号普通硅酸盐水泥, 砂子为 II 区天然河砂, 石子为 $5\sim 16\text{ mm}$ 连续级配碎石。混凝土采用机械搅拌、振捣, 振捣成型后 24 h 拆模, 在标准条件下养护 28 d 。

表 1 混凝土试件配合比

Table 1 Mix proportion of concrete specimen

设计强度等级	水灰比	水/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水泥/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	砂/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	石子/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
C30	0.48	220	457	577	1 072

1.2 裂缝制作

将养护成型的试件在 JYS-2000 压力试验机下施加横向劈裂荷载, 使试件中部位置附近产生宽度为 $0.2\sim 0.4\text{ mm}$ 的贯穿裂缝, 裂缝宽度用裂缝卡尺读取。裂缝制作装置、试件表面裂缝以及试件侧面的裂缝情况见图 2。

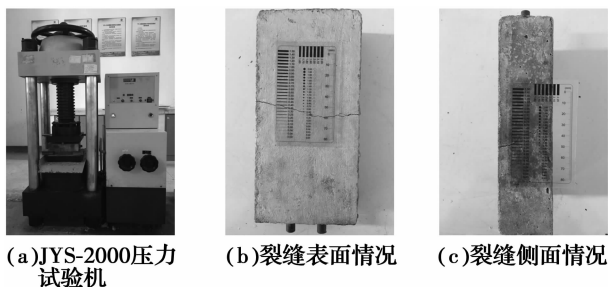


图 2 裂缝制作过程

Fig. 2 Crack making process

从图 2 可见, 裂缝在混凝土试件表面以及侧面均呈现出曲折的形态, 裂缝贯穿至钢筋表面, 裂缝宽度沿深度方向逐渐减小, 裂缝界面粗糙。

1.3 试验装置

将已制备裂缝的钢筋混凝土试件放入盛有电解

质的容器中, 采用 $0\sim 60\text{ V}$ 的可调直流稳压器作为电源, 采用钛板固定在容器壁并与电源正极相连作为阳极, 钢筋露出部位与电源负极相连作为阴极, 试件竖直放置, 以控制混凝土表面与阳极间距离为 2 cm 。电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的试验装置见图 3。

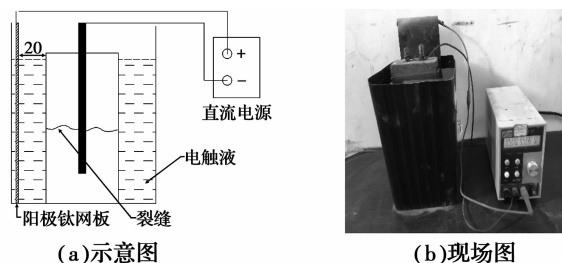


图 3 试验装置图

Fig. 3 Diagram of test set

对于陆地上的电沉积修复装置, 可以利用混凝土结构内部钢筋作为阴极, 在混凝土结构外表面布设阳极钛合金网片。在钛合金网片外铺设含 ZnSO_4 溶液的海绵层, 通过施加控制直流, 使钢筋和钛合金网片之间形成电场。对于海水中的电沉积修复, 由于海水含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 等离子, 所以, 海水本身就是良好的电沉积溶液, 因此, 仅需要将裂缝表面铺设阳极钛合金网片, 混凝土结构中的钢筋用作阴极, 然后, 通电使钛合金网片与钢筋之间形成电场。

1.4 工作原理与试验分组

溶液中的 Zn^{2+} 首先与阴极附近产生的 OH^- 结合, 生成 $\text{Zn}(\text{OH})_2$, 随着 OH^- 的不断析出, $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 与 OH^- 反应生成 $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$, $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ 可以看做是 ZnO 与 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 的中间体, 当 $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ 在溶液中达到饱和时, 便缓慢地分解为 ZnO , ZnO 填充混凝土裂缝, 从而达到裂缝修复的目的。

将带裂缝混凝土的试件分为 3 组, 每组 2 个试件, 电流密度分别为 0.5 、 1.0 、 2.0 A/m^2 , 采用 ZnSO_4 作为电解质溶液, 配制浓度为 0.1 mol/L 。试验期间, 每 6 d 更换一次溶液, 以保持溶液浓度基本恒定, 每 3 d 测试通电电压, 试验通电持续 36 d 。

1.5 试验过程的参数跟踪检测

可调直流稳压电源显示的电压与电流大小的比值即为混凝土试件的电阻值, 电流密度根据钢筋表面积计算。电沉积试验 36 d 后, 将试件沿着裂缝横向切开, 以裂缝界面图片为背景, 做出裂缝界面 CAD 图像, 利用面积查询工具, 求出沉积物在裂缝界面面积, 裂缝填充面积与裂缝宽度比值, 即为裂缝平均填充深度。

2 试验结果与讨论

2.1 电沉积法修复混凝土裂缝过程中电阻的变化规律

将每个试验组的2个试件的电阻取均值,得到电流密度对电沉积过程中混凝土裂缝处电阻的影响(图4),由于初始裂缝宽度的差异,导致初始电阻不同,故选用电阻变化量作为纵坐标,探究电流密度对电沉积效果的影响。

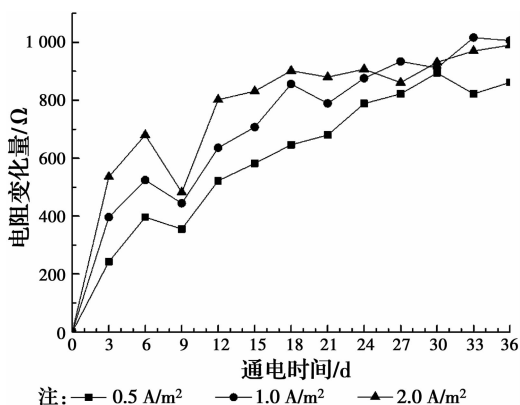


图4 电阻随时间的变化情况

Fig. 4 Change of electric resistance with time

试验过程中,第6 d更换电解质溶液,第9 d电阻明显下降,同时,试验过程中,第12、18、24、30 d也更换了溶液,但由于这些时间点电解质消耗量远小于试验前6 d的电解质消耗量,故电阻波动不明显。对比各电流密度下的电阻变化可知,电阻增加率随着通电时间增加而减缓。电沉积修复前6 d,电阻增加率随着电流密度增大而增大,在经过电沉积12 d后,0.5 A/m²试件混凝土电阻平稳增长,而电流密度为1、2 A/m²试件混凝土电阻增加量较少,在通电后期,0.5 A/m²的试件电阻仍有明显的增长趋势,而2 A/m²的试件电阻增长不明显。Ryu等^[21-22]研究了电流密度对电沉积效果的影响,结果表明,裂缝表面愈合率随电流密度的增大而加快,但裂缝填充深度随电流密度的增大而减小,电流密度越小,裂缝愈合需要的时间越长,裂缝填充越深,愈合效果越好,这与本文的研究结论是一致的。这是因为,在同一裂缝宽度下,沉积物首先在裂缝壁沉积,然后,逐渐愈合整个裂缝,当电流密度较小时,这个愈合的过程相对缓慢,导致通电前期小电流密度电阻增加缓慢,但沉积深度更大,沉积物更加紧密,而较大的电流密度沉积物尺寸较大,可能在某一位置沉积成核,阻塞裂缝中的电流通路,导致电流密度较大时,电阻增加的时间相对较短。

储洪强等^[15]研究了电沉积修复过程中电流密度对沉积物在混凝土表面覆盖率以及沉积物质量增加率的影响,结果表明,沉积物的表面覆盖率随着电流密度增加而增加,当电流密度变化时,质量增加率没有明显的变化规律;蒋正武等^[12]通过多孔混凝土模拟带裂缝混凝土,研究了电沉积过程中电流密度对沉积物的质量增加率的影响,结果表明,质量增加率随着电流密度的增加而增加,由此可知,二者关于质量增加率随电流密度的变化规律并不一致。

事实上,以质量增加率以及表面覆盖率作为电沉积修复的评价指标,具有一定的缺陷,首先是沉积物质量与混凝土试件质量相比非常小,沉积物的在裂缝中的增加只是整个沉积物总量的一部分,特别当裂缝较窄时,裂缝中沉积物的量非常少,这种情况下,计算沉积物质量增加率误差较大。且电流密度对沉积物微观形貌的影响表明,沉积物颗粒随着电流密度的增大而增大,因此,不同的电流密度下,沉积物在裂缝以及混凝土表面的分配并不是固定比例,此时,利用质量增加率以及表面覆盖率评价沉积物在裂缝中的填充情况,存在较大的局限性。

综上,电沉积修复过程中,混凝土电阻随着时间逐步增大,电阻增长速率随着通电时间增长而减缓,电流密度越大,通电前期电阻增长速率越快,电流密度越小,电阻有效增长的时间越长。电流密度的选取应该根据裂缝宽度以及通电时间具体分析,裂缝越宽,通电时间越短,则应选取较大的电流密度,反之,则选取较小的电流密度,同时,电沉积通电结束时间可以以电阻基本不再变化为标志。

2.2 不同电流密度下平均裂缝填充深度的规律

电沉积结束后,将试件沿着裂缝横向切开,绘制电沉积裂缝修复深度曲线,图中浅色区域为裂缝中沉积物覆盖区域,结果如图5所示。

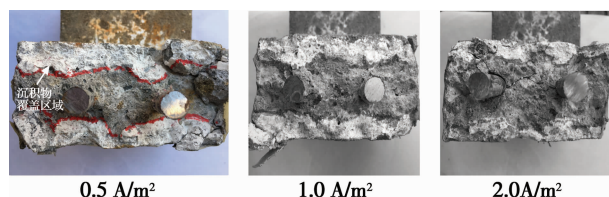


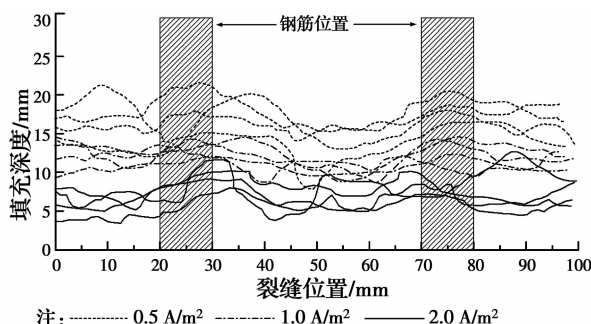
图5 裂缝中沉积物空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of sediments in the fracture

由图5可知,沉积物首先在裂缝表面沉积,然后向裂缝内部发展。不同电流密度下裂缝填充深度见图6,其中,横轴为裂缝沿着试件宽度方向的位置(图2(b)中宽度方向),纵轴为裂缝填充深度,黑色填充矩形为钢筋位置,每个电流密度试验有2个试

件,每个试件上下表面裂缝均有沉积物生成。用CAD面积查询工具求得裂缝横截面沉积物覆盖区域面积,裂缝填充面积与裂缝宽度比值即为裂缝平均填充深度。按照上述方法求得电流密度为0.5、1.0、2.0 A/m²时,裂缝平均填充深度分别为31.8、23.4、15.2 mm(初始裂缝深度50 mm),这与文献[7]中沉积物能将整个裂缝界面填充完全不同。这是由于文献[7]采用人工预插钢片的方法制作裂缝,裂缝表面与钢筋处宽度均达到0.5 mm以及1.0 mm,裂缝界面光滑,裂缝在混凝土表面呈直线。本文中横向劈裂形成的裂缝在混凝土表面宽度为0.2~0.4 mm,但是在钢筋处宽度则小于该值,裂缝宽度沿深度方向逐渐减小,裂缝在混凝土表面呈曲线,裂缝界面上混凝土粗糙,这些裂缝特征与实际工程的结构裂缝特征相同,因此,使用劈裂产生的裂缝能更真实地评价电沉积的修复效果。较小的裂缝宽度、裂缝表面曲折以及裂缝界面粗糙都将导致裂缝更容易被沉积物阻塞,因此,导致试验结果存在差异。这说明电沉积修复的效果在裂缝宽度很小时有一定的局限性。

由图6可知,沉积物未将整个裂缝界面填充密实,填充深度随着电流密度增大而减小。在3个电流密度下,钢筋及周围位置裂缝填充深度均较大,钢筋之间沉积物深度明显小于钢筋处,电流密度越小,



注: ····· 0.5 A/m² - - - - - 1.0 A/m² ——— 2.0 A/m²

图6 不同电流密度下裂缝填充深度

Fig. 6 Crack filling depth under different current density

该现象越明显。主要原因是,较大的电流密度生成沉积物尺寸大,在裂缝较窄部位沉积成核,阻塞了沉积物继续生成,而在同一电流密度下,钢筋周围电流密度较大,有利于沉积物的生成,故钢筋周围填充深度更大。

2.3 电流密度对裂缝中沉积物矿物成分的影响

图7为X射线衍射分析不同电流密度下混凝土裂缝中沉积物的结果。由图7可以看出,不同电流密度下,裂缝中沉积物的主要矿物成分为ZnO,其他矿物成分含量明显低于ZnO。表2列出了裂缝中沉积物的矿物成分含量。由表2可以看出,ZnO含量随着电流密度增大而有少量增长,这是由于电流密度增大,阴极产生的OH⁻增加,有利于ZnO沉淀的生成。

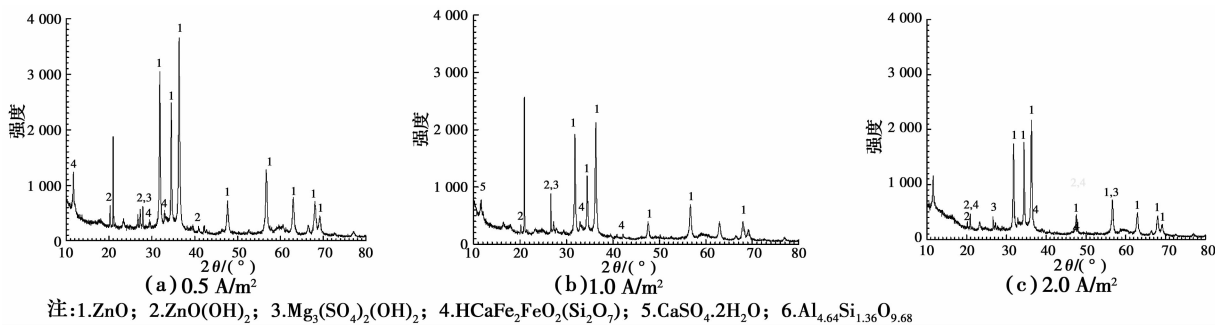


图7 沉积物XRD图

Fig. 7 Patterns of X-ray diffraction of electrodeposits

表2 矿物成分含量

Table 2 Mineral content

电流密度/(A·m ⁻²)	ZnO/%	Zn(OH) ₂ /%	Mg ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₂ /%	HCaFe ₂ FeO ₂ (Si ₂ O ₇)/%	CaSO ₄ ·2H ₂ O/%	Al _{4.64} Si _{1.36} O _{9.68}
0.5	44.9	7.0	10.3	25.5	5.8	6.6
1.0	52.4	12.1	11.0	16.6	3.0	4.9
2.0	61.9	8.3	22.7		7.1	

2.4 电流密度对裂缝中沉积物微观结构的影响

图8为沉积物电镜扫描1000倍图,从图8中可以看出(图中裂缝为样本处理过程中受压导致):电流密度为0.5 A/m²时,沉积物呈颗粒状且排列致密;电

流密度为1.0 A/m²时,沉积物呈块状;电流密度为2.0 A/m²时,沉积物出现片状分层现象。图9为沉积物电镜扫描放大5000倍图,由图9可见,电流密度为0.5 A/m²时,沉积物在空间里排列致密规律、结构

稳定;电流密度为 1.0 A/m^2 时,沉积颗粒较大;电流密度为 2.0 A/m^2 时,沉积物呈针状,尺寸大,且无序排列。这表明:电流密度是影响沉积物微观形貌的重要因素,低电流密度下,沉积物呈颗粒状,尺寸小,结构规律排列,整体稳定性强;高电流密度下,沉积物呈现块状,尺寸大,结构出现断层。出现这种现象的原因可能是,电流密度增大导致阴极产生的 OH^- 增多,沉积物的生成速度加快,离子在溶液中受到的作用力发生变化,从而导致沉积物微观形貌发生变化。

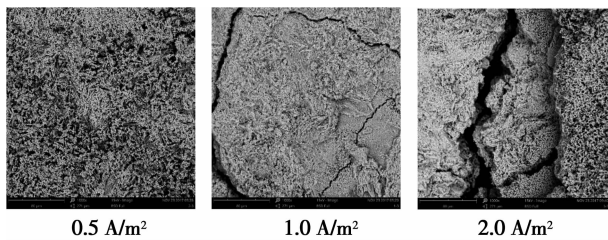


图8 沉积物 SEM 照片

Fig. 8 Scanning electron micrograph of electrodeposits(1 000 倍)

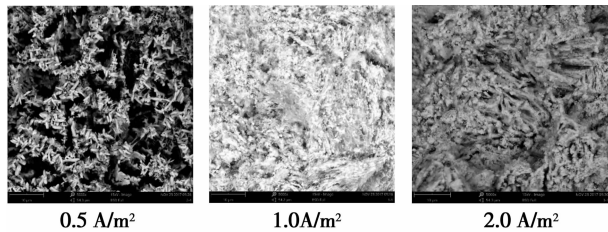


图9 沉积物 SEM 照片

Fig. 9 Scanning electron micrograph of electrodeposits(5 000 倍)

3 结论

试验结果表明,电沉积过程中,电流密度大小对裂缝修复过程及效果存在一定影响,表现于沉积物在裂缝中的空间分布、沉积物微观形貌等方面,主要结论如下:

1)电沉积修复混凝土裂缝过程中,电沉积速率随着通电时间增加而减慢;电流密度越大,通电前期电阻增加速率越快;电流密度越小,裂缝电阻有效增加时间越长。沉积物自裂缝表面向内部填充,平均填充深度随着电流密度增大而减小。

2)裂缝中沉积物的矿物成分主要为 ZnO ,电流密度对沉积物矿物成分的影响不大;高电流密度下,生成的沉积物尺寸较大、排列杂乱,且出现分层,结构稳定性弱;低电流密度下,沉积速率慢,沉积物颗粒尺寸小,排列规律,结构稳定紧密。

3)研究表明,沉积物并不能完全填充裂缝界面,将电沉积技术应用于修复海洋氯盐环境中的钢筋混凝土裂缝仍存在耐久性问题,为将电沉积修复技术应用于海洋环境中,还需要进一步研究电沉积修复过程中,混凝土中氯离子的排除效率,以及电沉积修复后,混凝土裂缝处抗氯离子的再渗透能力。

参考文献:

- [1] 金祖权,侯保荣,赵铁军,等. 收缩裂缝对混凝土氯离子渗透及碳化的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 7-11.
JIN Z Q, HOU B R, ZHAO T J, et al. Influence of shrinkage cracks on chloride penetration and carbonation of concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33 (1): 7-11. (in Chinese)
- [2] 全世海,吴芳,谢元亮,等. 预埋管混凝土裂缝灌浆修补技术试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28 (1): 131-134.
QUAN S H, WU F, XIE Y L, et al. Experimental study on concrete crack repairing by grouting through embedded pipe [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(1): 131-134. (in Chinese)
- [3] 时旭东,汪文强,李俊林,等. 基于某混凝土框剪结构损伤现状的加固方法探讨[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(4): 123-130.
SHI X D, WANG W Q, LI J L, et al. Discussion of strengthening method based on the current damage of a concrete frame-shear wall structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(4): 123-130. (in Chinese)
- [4] 黄微波,李晶,伯忠维,等. 混凝土结构裂缝修复技术研究进展[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(6): 80-83.
HUANG W B, LI J, BO Z W, et al. The research progress on cracks repair technology of concrete structure [J]. New Building Materials, 2014, 41(6): 80-83. (in Chinese)
- [5] RESTUCCIA L, REGGIO A, FERRO G A, et al. New self-healing techniques for cement-based materials [J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 3: 253-260.
- [6] 张士萍,刘俊亮. 混凝土裂缝自修复技术的研究现状[J]. 混凝土, 2017(6): 17-20.
ZHANG S P, LIU J L. Research progress on self-sealing of cracking in concrete [J]. Concrete, 2017(6): 17-20. (in Chinese)
- [7] 方翔,陈龙,汤雁冰,等. 电沉积法修补混凝土裂缝技

- 术[J]. 水运工程, 2015(3): 118-122.
- FANG X, CHEN L, TANG Y B, et al. On electro-deposition for concrete crack closure [J]. Port & Waterway Engineering, 2015 (3): 118-122. (in Chinese)
- [8] 方翔, 陈龙, 汤雁冰, 等. 脱盐与裂缝愈合同步的混凝土修复技术研究[J]. 混凝土, 2016(2): 149-152.
- FANG X, CHEN L, TANG Y B, et al. Study on the synchronization of chloride extraction and crack closure for concrete [J]. Concrete, 2016 (2): 149-152. (in Chinese)
- [9] 姚武, 郑晓芳. 电沉积法修复混凝土裂缝的初步进展[J]. 中国科学基金, 2005, 19(4): 216-219.
- YAO W, ZHENG X F. Progress in studies on crack repair of concrete by electrodeposition technique [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2005, 19(4): 216-219. (in Chinese)
- [10] 李森林, 卢青法, 徐宁, 等. 电沉积修复混凝土裂缝技术研究进展及研究方向[J]. 混凝土, 2013(2): 139-142.
- LI S L, LU Q F, XU N, et al. Research progress and direction of electro-deposition method for repair of concrete cracks [J]. Concrete, 2013(2): 139-142. (in Chinese)
- [11] 张铁男, 陈正发, 刘桂凤, 等. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝效果的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(9): 25-29.
- ZHANG T N, CHEN Z F, LIU G F, et al. The effect of electrodeposition method on repairing reinforced concrete cracks [J]. New Building Materials, 2016, 43 (9): 25-29. (in Chinese)
- [12] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的愈合效果[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(Sup2): 129-134.
- JIANG Z W, SUN Z P, WANG P M. Healing effectiveness of crack rehabilitation in reinforced concrete using electrodeposition method [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(Sup2): 129-134. (in Chinese)
- [13] NISHIDA T, OTSUKI N, SATIO A. Development of improved electrodeposition method for repair of reinforced concrete structures [C]// International Conference on the Durability of Concrete Structures, 2014:393-402.
- [14] RYU J S, OTSUKI N. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1): 159-164.
- [15] 储洪强, 蒋林华, 徐怡. 电沉积法修复混凝土裂缝中电流密度的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 729-733.
- CHU H Q, JIANG L H, XU Y. Influence of current density in electrodeposition method for repair of concrete cracks [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6): 729-733. (in Chinese)
- [16] CHU H Q, JIANG L H, XIONG C S, et al. Use of electrochemical method for repair of concrete cracks [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 58-66.
- [17] OTSUKI N, HISADA M, RYU J, et al. Rehabilitation of concrete cracks by electrodeposition [J]. Concrete International, 1999, 21(3):58-63. (in Chinese)
- [18] OTSUKI N, RYU J S. Use of electrodeposition for repair of concrete with shrinkage cracks [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(2): 136-142.
- [19] 姚武, 郑晓芳. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(11): 1441-1444.
- YAO W, ZHENG X F. Experimental study on crack repair of reinforced concrete by electrodeposition technique [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(11): 1441-1444. (in Chinese)
- [20] 宋显辉, 张华, 李卓球. 碳纤维增强混凝土裂纹钝化的有限元模拟与实验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(3): 26-29.
- SONG X H, ZHANG H, LI Z Q. Study of crack blunting in carbon fibre reinforced concrete and finite element simulation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2003, 20(3): 26-29. (in Chinese)
- [21] RYU J S. An experimental study on the repair of concrete crack by electrochemical technique [J]. Materials and Structures, 2001, 241(34): 433-437.
- [22] RYU J S. Influence of crack width, cover depth, water-cement ratio and temperature on the formation of electrodeposits on the concrete surface [J]. Magazine of Concrete Research, 2003, 55(1): 35-40.