



# 电沉积法修补混凝土裂缝技术

方翔, 陈龙, 汤雁冰, 李海洪

(中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东广州 510230)

**摘要:** 裂缝对混凝土耐久性具有重要的影响。电沉积是一种有潜力的混凝土裂缝修补方法, 但要发展成为一种成熟、实用的技术尚有许多问题亟待解决。对电沉积方法修补混凝土裂缝的技术参数进行研究。结果表明在硝酸镁 ( $Mg(NO_3)_2$ ) 溶液中, 以  $0.5 A/m^2$  电流密度进行电沉积的修复效果较好, 修复后试件抗压性能得到提高。

**关键词:** 电沉积; 混凝土; 裂缝修补; 电解质溶液

中图分类号: TV 431

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0118-05

## On electro-deposition for concrete crack closure

FANG Xiang, CHEN Long, TANG Yan-bing, LI Hai-hong

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology, Ministry of Communications,  
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Cracks have significant impact on concrete durability. Electro-deposition is a potential rehabilitation method. Nevertheless much effort has to be devoted before it becomes a mature technique. The investigation on the parameters of crack closure by electrodeposition shows that satisfactory rehabilitation effect can be achieved using solution of  $Mg(NO_3)_2$  and current density of  $0.5 A/m^2$ . The compressive strength of concrete is improved after treatment.

**Keywords:** electro-deposition; concrete; crack closure; electrolyte solution

裂缝是导致混凝土耐久性下降的一个重要因素。Aldea 等<sup>[1]</sup>的研究表明氯离子渗透会随着裂缝宽度的增加而变快。对混凝土出现的宽度大于  $0.2 mm$  的裂缝, 必须及早进行处理。

电沉积方法是修复混凝土结构裂缝的一项新的技术。20 世纪 80 年代末, 日本学者首先尝试利用电沉积方法修复混凝土结构的裂缝<sup>[2]</sup>。电沉积以混凝土中的钢筋为阴极, 在混凝土结构附近设置阳极, 以海水或特制的溶液作为电解质, 采用外加电流的方式将电解质中的金属离子输运至裂缝处, 并与钢筋阴极反应产生的  $OH^-$  阴离子化合, 形成不溶产物并在裂缝处沉积以封堵裂缝。目前

研究主要集中在室内实验, 对电沉积实验条件的摸索中<sup>[3-6]</sup>。

对电沉积法修复混凝土裂缝的试验研究表明, 该技术用于愈合钢筋混凝土中的裂纹是可行的。尽管如此, 电沉积法要发展成为一种成熟的修复混凝土裂缝的实用技术尚有许多问题函待解决, 如电解质溶液的选取、裂缝特性对电沉积的影响、电沉积对混凝土性能的影响等。

首先通过比较筛选出最适合电沉积的电解质溶液。而后研究通电电流密度大小、通电时间及混凝土裂缝宽度对电沉积效果的影响。最后研究电沉积对混凝土性能的影响。

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 方翔 (1983—), 男, 工程师, 从事海洋腐蚀与防护的研究工作。

## 1 实验

整套实验体系包括以下主要部分:带裂缝的钢筋混凝土试件、电解质溶液、阳极、外部电源。

成型 100 mm × 100 mm × 100 mm 钢筋混凝土试件,钢筋为  $\phi 10$  mm 光圆钢筋。混凝土配合比如表 1 所示,水灰比 0.35。

kg/m <sup>3</sup>						
水	砂	石			水	减水剂
		小(5~10 mm)	中(10~16 mm)	大(16~25 mm)		
420	738	110.8	221.6	775.6	147	3.36

试件裂缝采用插钢片的方法制作。在混凝土入模后立即将厚度为 0.3 mm 及 0.7 mm 的钢片分别从各个试件的上表面(工作面)插入,直至接触到钢筋。待混凝土开始终凝时拔除钢片,形成 2 种宽度的带裂缝试件。在混凝土养护完成后,测量裂缝实际宽度,采用 0.3 mm 钢片制备的裂缝宽度约为 0.5 mm,采用 0.7 mm 钢片制备的裂缝宽度约为 1.0 mm。试件在浇筑 24 h 后拆模,养护 27 d。

根据以往研究成果<sup>[3]</sup>,选取 ZnSO<sub>4</sub>、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>及氯化镁 MgCl<sub>2</sub>共 3 种溶液进行实验,溶液浓度为 0.1 mol/L。阳极采用金属氧化物钛网阳极。电源采用恒电流输出。

将混凝土试件置于装有电解质溶液的容器中,带有裂缝的工作面朝上,阳极放置在距离工作面 1~2 cm 处。电源负极与试件中的钢筋相连,正极与阳极相连。

实验体系建立后,开始通电实验。采用 0.5、1、1.5 A/m<sup>2</sup> 3 个电流密度。通电周期为 5 d。每一通电周期完成后,取出试件,称量试件质量,拍摄试件工作面照片,而后再将试件重新置于容器中继续下一通电周期。如此循环,直至裂缝基本愈合。

试件在完成全部电沉积实验循环后,测试其抗压强度。并沿着裂缝剖开,观察产物在裂缝中沉积的深度。利用 X 射线衍射仪对沉积产物进行成份分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 电解质溶液选取

电解质溶液是电沉积实验能否成功的关键。对 ZnSO<sub>4</sub>、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>及 MgCl<sub>2</sub> 3 种溶液的电沉积效果进行评价,从中选取效果最佳的电解质溶液。

图 1 为 ZnSO<sub>4</sub>、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>及 MgCl<sub>2</sub> 3 种不同溶液中进行电沉积后得到的沉积物 XRD 图。从图中可看出, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>与 MgCl<sub>2</sub>溶液沉积物都为单一组分 Mg(OH)<sub>2</sub>。而采用 ZnSO<sub>4</sub>溶液得到的沉积物为 ZnO 与 Zn(OH)<sub>2</sub>混合物。

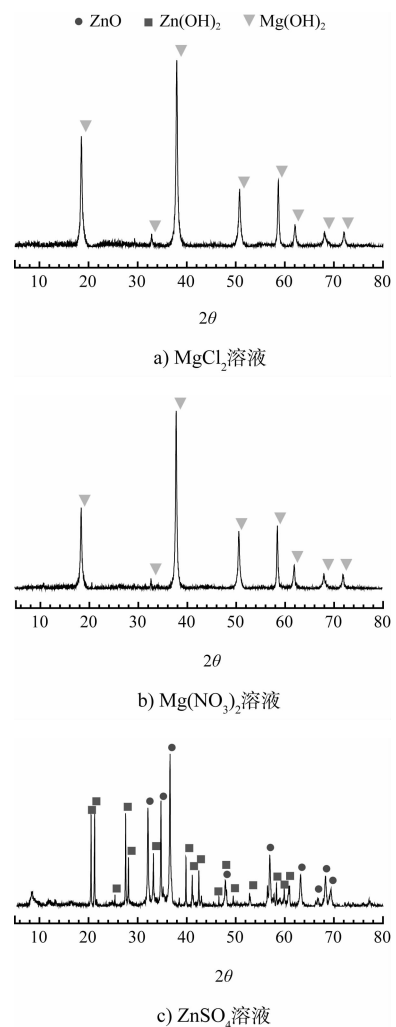


图 1 沉积产物 XRD 图

通过观察试件的质量增加率随时间的变化,可了解产物在试件中沉积的速度及沉积的量。图 2 为通电沉积过程中,每隔 5 d 测得的试件质量变化。由图中可看出,无论选用何种电解质溶液,在刚开始通电的 10 d 内,试件质量增加明显。而

后质量增加逐渐放缓，至 25 d 后试件质量不再增加。

Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>与 ZnSO<sub>4</sub>溶液下试件质量增加较快，同时最终质量增加量也较 MgCl<sub>2</sub>溶液下的多。如前所述，Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液的沉积产物为 Mg(OH)<sub>2</sub>，ZnSO<sub>4</sub>溶液的沉积产物主要为 ZnO 和 Zn(OH)<sub>2</sub>。Mg(OH)<sub>2</sub>的摩尔质量较 ZnO 和 Zn(OH)<sub>2</sub>小。由于电解质溶液中金属离子的浓度都是一样的，可知 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液沉积效率更高，有更多的金属离子沉积在试件上。

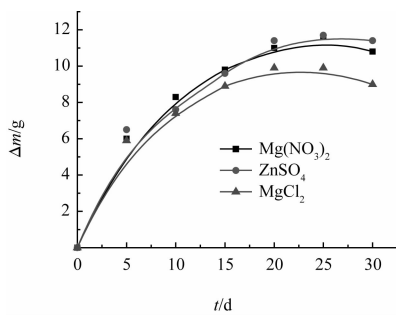
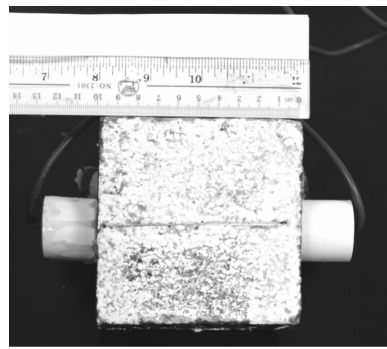


图2 试件质量随实验时间的增加关系

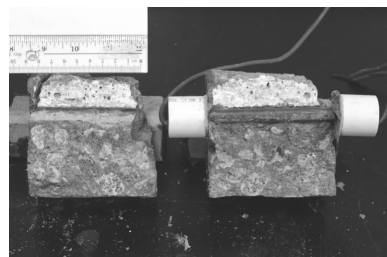
裂缝愈合率是评价电沉积效果的一个重要指标。从图3看到，Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液下，产物可沉积在裂缝处，并将裂缝完全密封。且产物趋于在裂缝及其周围沉积，说明 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液具有优先在裂缝处沉积的特性。而 ZnSO<sub>4</sub>溶液下，虽然产物也能在裂缝处沉积，但裂缝并不能完全被密封。且产物沉积几乎覆盖试件表面。ZnSO<sub>4</sub>溶液沉积不具有选择性。这可能与 ZnSO<sub>4</sub>溶液电阻率较高有关，较高的电阻率导致裂缝处电流密度增大不明显，不利于阳离子在裂缝处积聚。



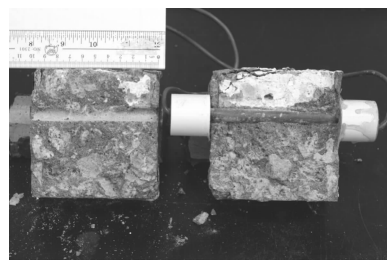
b) ZnSO<sub>4</sub>溶液

图3 试件沉积表面照片

良好的裂缝修补方法应能填充至裂缝根部，这样才可提供耐久性方面的有效保障，并提高整个构件的强度。图4显示了电沉积实验后，沿裂缝将试件劈开后的断面照片。



a) Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液



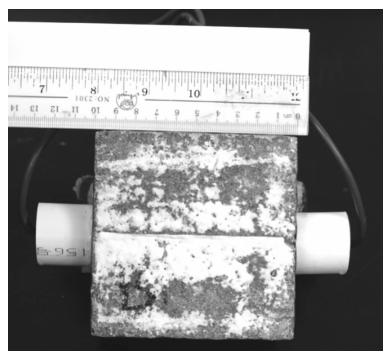
b) ZnSO<sub>4</sub>溶液

注：钢筋以上区域为裂缝，该区域覆盖的白色物质为沉积产物。

图4 试件沿裂缝剖开照片

由图4可看出，裂缝中都覆盖了沉积物质，且沉积物质覆盖区域一直深至钢筋处。说明电沉积产物能完好地封堵裂缝。

此外，由于 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液电阻率较低，在实验过程中，当施加同一电流密度 (0.5 A/m<sup>2</sup>) 时，采用 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液所需电压更小。说明采用



a) Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液

$Mg(NO_3)_2$ 电解质进行裂缝修补所需能量较少,更为经济。

综上所述,在上述实验条件下, $Mg(NO_3)_2$ 作为电解质溶液更好。

## 2.2 电流大小的影响

以  $Mg(NO_3)_2$  作为电沉积修复电解质溶液。研究不同实验条件对电沉积效果的影响。首先考虑通电电流大小的影响。实验采用 0.5、1.0、1.5  $A/m^2$  3 种不同的电流密度。

图 5 为试件质量增加率随时间的变化。图中曲线的斜率可表征质量增加的速度。在 3 种电流密度下,试件的质量在通电前期(10~20 d)增加较快。其中电流密度为 0.5  $A/m^2$  的试件质量增加速度最快。而随着电流密度的上升,试件质量增加速度反而下降。3 个试件在经历前期(10~20 d)质量快速增加的阶段后,进入质量缓慢增加的阶段。其中 0.5  $A/m^2$  的试件这一阶段持续的时间较短(仅 10 d 左右),而 1.0  $A/m^2$  及 1.5  $A/m^2$  的试件持续时间较长(前者约为 60 d,后者约为 40 d)。另外从图 5 中还可看出,0.5  $A/m^2$  的试件质量的总相对增加量约为 0.35%,而 1.0  $A/m^2$  及 1.5  $A/m^2$  的试件仅分别为 0.2% 及 0.1%。可见采用 0.5  $A/m^2$  的电流密度沉积到试件中的产物更多。

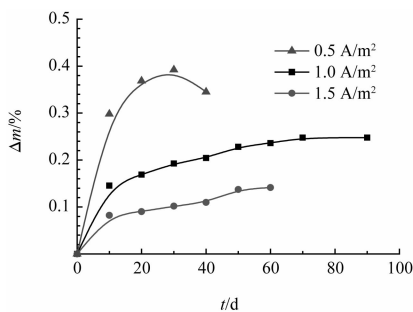


图 5 试件质量增加率随实验时间变化的关系

图 6 为 3 个试件在以不同电流密度通电 40 d 后拍摄的表面形貌照片。从照片中可看出,3 个试件裂缝基本已封闭。但仔细观察裂缝可看到 1.0  $A/m^2$  及 1.5  $A/m^2$  两试件的裂缝处仍有针孔,且电流密度的越大,针孔的数量越多。这是因为在阴极(钢筋)处发生了析氢反应。并随着电流

密度的增加,析氢量会增多。氢气积聚在裂缝中并顺着裂缝排出。针孔正是氢气排出的通道。

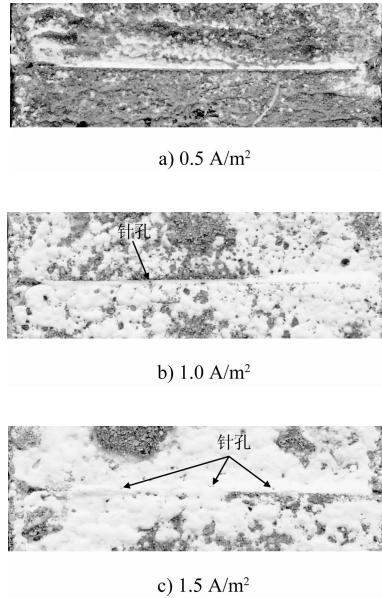


图 6 试件裂缝处表面照片

通电结束后,将试件沿裂缝剖开,可看到对于施加不同的电流密度,产物都可沉积到裂缝最深处(即钢筋表面)。

## 2.3 通电时间的影响

对试件进行通电,每隔 10 d 观察混凝土表面沉积形貌,从而确定完成电沉积所需要时间。在前 20 d 内,仍可看到裂缝,但大量产物逐渐在裂缝中沉积,裂缝逐渐缩小。经过约 40 d 后,裂缝完全封闭,仅留下小针孔。继续通电沉积,针孔逐渐缩小,但缩小的速度很慢,这段时间内,产物更多地沉积到工作面上。不同电流密度下,通电时间对沉积效果的影响基本相同。

## 2.4 混凝土裂缝宽度的影响

图 7 显示不同裂缝宽度的试件电沉积过程中裂缝愈合率随时间的变化。由图中可看出,裂缝宽度越小,愈合速度更快。对于 0.5 mm 的裂缝,在通电 30 d 后完全愈合,对于 1.0 mm 宽的裂缝,需通电 40 d 后才能愈合。可见,裂缝宽度决定了通电的时间。对于不同裂缝宽度,产物都可沉积到裂缝最深处(即钢筋表面),可见裂缝宽度对裂缝愈合深度无影响。

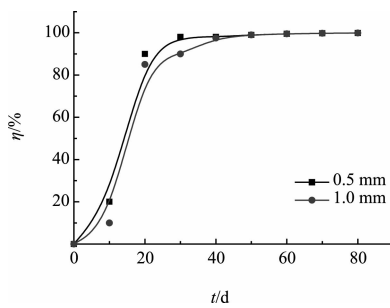


图7 试件质量裂缝愈合率随实验时间变化的关系

## 2.5 对混凝土的影响

表2为各试件电沉积实验后的抗压强度变化。其中A14及B14为未进行通电实验的空白试件。表中编号以A开头的试件(裂缝宽度约为0.5 mm),其抗压强度与A14相比,而编号以B开头的试件(裂缝宽度约为1.0 mm),其抗压强度与B14相比。

表2 试件抗压强度变化

编号	裂缝宽度/mm	溶液	电流密度/ ( $A \cdot m^{-2}$ )	抗压强度/ MPa	抗压强度 变化/%
A14	0.5			59.5	0
A11	0.5	$Mg(NO_3)_2$	1.0	70.1	17.8
A12	0.5	$Mg(NO_3)_2$	1.5	70.5	18.5
A13	0.5	$ZnSO_4$	1.0	61.7	3.7
A15	0.5	$Mg(NO_3)_2$	0.5	71.1	19.5
B14	1.0			66.4	0
B11	1.0	$Mg(NO_3)_2$	1.0	72.8	9.6
B12	1.0	$Mg(NO_3)_2$	1.5	76.6	15.4
B13	1.0	$ZnSO_4$	1.0	67.6	1.8
B15	1.0	$Mg(NO_3)_2$	0.5	69.0	3.9

从表中可看出,电沉积试验后,试件的抗压强度有不同程度的增强。采用 $ZnSO_4$ 溶液对试件抗压强度的增加远小于采用 $Mg(NO_3)_2$ 溶液。无论采用哪种溶液,裂缝宽度越大,抗压强度的增加越小。

## 3 结论

- 1) 采用 $Mg(NO_3)_2$ 溶液电沉积效果最好。
- 2) 0.5  $A/m^2$ 电流密度沉积效果最佳。电流密度越大,钢筋越容易析氢,气体在裂缝处难以排出,阻碍沉积的进行。
- 3) 在通电后前10~20 d内裂缝填充速度较快。经过约40 d后,裂缝基本封闭,但在裂缝处仍留下小针孔。继续通电沉积,可逐渐封闭针孔,但产物更多地沉积到混凝土表面。
- 4) 裂缝宽度对电沉积的影响表现在裂缝宽度越大,所需要的沉积时间越长。无论哪种裂缝宽度,产物都可沉积到裂缝最深处。
- 5) 电沉积可提高混凝土的抗压性能,最大可提高约20%。

## 参考文献:

- [1] Aldea C M, Shah S P, Karr A. Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete[J]. J Mater Civ Eng, 1999(11): 181-197.
- [2] Ryu J S. An experimental study on the repair of concrete crack by electrochemical technique[J]. Mater Struct, 2001, 34: 433-437.
- [3] Otsuki N, Ryu J S. Use of electrodeposition for repair of concrete with shrinkage cracks[J]. J Mater Civ Eng, 2001, 13: 136-142.
- [4] Yeih W, Hsu H, Chang J, et al. A study on repairing internal defects inside concrete using the electrochemical deposition method[J]. J Mar Sci Tech, 2010, 18: 424-429.
- [5] 蒋正武, 刑锋, 孙振平, 等. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝的基础研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 5-8.
- [6] 储洪强, 蒋林华, 华卫兵. 辅助电极及电极距离对沉积效果的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(4): 456-461.

(本文编辑 郭雪珍)

## 著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。