

·学科进展与展望·

电沉积法修复混凝土裂缝的初步进展

姚武 郑晓芳

(同济大学材料科学与工程学院智能与结构材料研究所,上海 200092)

[摘要] 电沉积法是通过电解作用把某些物质沉积在电极的表面,利用这一方法可以愈合混凝土的裂缝,它具有独特的优势,特别适用于传统的修复技术难以奏效的海工混凝土结构。本文对国内外利用电沉积法修复混凝土裂缝的研究进行了评述,并介绍了近年来在国家自然科学基金资助下我们在这一领域取得的最新研究成果。

[关键词] 电沉积,混凝土,裂缝修复

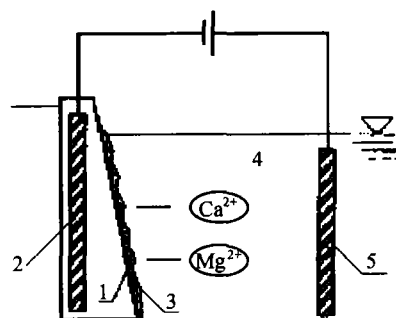
前言

混凝土是一种非均质多孔性的脆性材料,其内部存在大量微细裂缝和不同大小的孔隙,抗拉强度远远低于其抗压强度,对冲击、开裂的抵抗能力差。混凝土在受力或其他诸多因素的作用下,易在其内部或者表面出现裂缝,导致其性能劣化、耐久性下降,并可能进一步引起其内部钢筋的腐蚀。因此钢筋混凝土结构的裂缝预防和修复,长期以来一直是学术界和工程界所关注的重要课题。

电沉积方法是最近兴起的修复混凝土结构裂缝的一项新的技术。20世纪90年代的初期,日本学者首先尝试利用电沉积方法修复海工混凝土结构的裂缝^[1]。研究表明,施加电流可使钢筋混凝土结构的裂缝封闭起来。这种现象对海上结构十分有利,因为传统的修补方法是很不经济的,在很多情况下甚至是无效的。具体见图1。

把带裂缝的海工混凝土结构中的钢筋作为阴极,在海水中外加辅助的阳极,在两者之间施加微弱的低压直流电,因为混凝土是一种多孔材料,而其孔隙液中就有一种电解质,所以在混凝土中就会发生电迁移,在海工混凝土结构的表面和裂缝处就有沉积物(主要成分为 CaCO_3 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$)生成,从而修复裂缝。该方法特别适用于传统的修复技术难以奏效的海工结构,因为海水本身就是良好的电解质。

生成的电解沉积物保护层,减少了混凝土内部的气体和液体的流动。



1 - 混凝土表面;2 - 钢筋;3 - 电解沉积物;

4 - 海水;5 - 外加电极

图1 海岸结构的电解沉积法示意图

试验从水的渗透性、氯离子的渗入程度、以及碳化深度等评估了电解沉积法修复混凝土裂缝的效果。试验表明:电沉积修复后混凝土试件的渗透系数已经接近无裂缝状态,而碳化深度浅于参照试件的碳化深度,并且氯离子渗透深度仅为完好试件的一半。电沉积修复后混凝土的耐久性得到显著改善。

1 陆地混凝土结构的电沉积修复

电沉积法应用于海工混凝土结构时,海水本身就是良好的电沉积溶液。但当该技术应用于陆地

国家自然科学基金重点资助项目。

本文于2005年2月25日收到。

混凝土结构裂缝的修复时,就必须先考虑电解质溶液的优选问题,因为不同的电沉积溶液决定了所生成的沉积物的种类,并直接影响电沉积修复的效果。Ostuki^[2]等对电沉积溶液的选择进行了试验研究。分别选取了氯化镁、硫酸锌、硝酸银、氯化铜、硫酸铜、氢氧化钙、碳酸氢钠、硝酸镁等8种溶液进行试验。施加0.5 A/m²的直流电一周。结果发现:氯化铜、硫酸铜、氢氧化钙、碳酸氢钠4种溶液中的试块上面没有沉积物生成;硝酸银溶液中的试块上的沉积物(银)只分布在裂缝的周围;氯化镁、硫酸锌、硝酸镁溶液中的试块表面的沉积物较多;将有沉积物生成的溶液中的试块纵向切开,观察到沉积物在裂缝中的分布情况见图2所示。

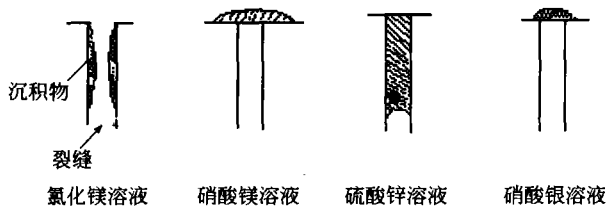


图2 沉积物在裂缝处的分布

近年来,Ryu等^[3-5]对利用电解沉积方法修复陆上混凝土结构裂缝的可行性方面进行初步试验研究。他们采用15 cm × 15 cm × 125 cm的混凝土梁试件通过18个月氯离子侵蚀以制作裂纹(最大裂缝宽度为0.6 mm),然后施加电流密度为0.5 A/m²的直流电。研究表明:在前两个星期,裂缝闭合速度最快,混凝土表面的电沉积覆盖层厚度约0.5—2 mm;施加电压后不久,在裂纹尖端先出现电沉积使裂纹钝化;实验结束时,混凝土试件的裂缝几乎完全闭合。此外,电沉积过程使大约70%的氯离子从钢筋传递到阳极,进入到外部的电沉积溶液,这有助于混凝土内钢筋的重新钝化,从而提高了抗锈蚀能力。

研究中还发现电沉积修复效果与通入的电流密度有密切关系。裂缝表面覆盖率和裂缝愈合率随电流密度的增大而加快;但电解沉积物渗入裂缝的深度则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,沉积物渗入裂缝的深度越深,愈合效果越好。所以在实际应用中要选择大小合适的电流密度,使裂缝的愈合时间和沉积物渗入裂缝的深度二者协调,从而保证裂缝达到较好的愈合效果。

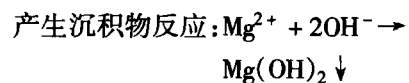
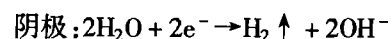
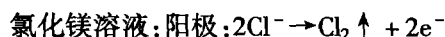
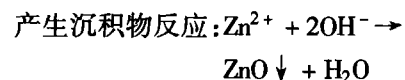
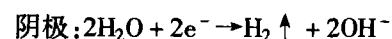
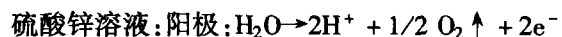
宋显辉^[6]等对碳纤维混凝土(CFRC)裂缝进行

了电沉积修复。试件在养护28天后采用三点弯曲静疲劳方法预制出15 mm左右长度的裂纹,采用0.75 mol/L硫酸镁溶液作为电沉积溶液,通入0.4 A/m²的直流电。4周后在试样表面的沉积厚度大约为0.5—0.8 mm。整个裂纹扩展方向都布满了比较密实的淡灰色颗粒,并且这些沉积物均匀地沿着裂纹方向分布,在显微镜下观察,明显地看到裂纹尖端被钝化,曲率半径增大;通电9周后的试验结果表明,裂纹尖端完全被钝化,试样表面也几乎完全被沉积物所覆盖,沉积物厚度大约为1—1.5 mm。分析试样表面和裂纹尖端处沉积物的化学成分,发现与混凝土本身的主要化学成分是一致的,证明试样表面和裂纹处的沉积物有助于混凝土本体材料的修复。

国内外学者对电沉积法修复混凝土裂缝的试验研究表明,该技术用来钝化甚至愈合混凝土的损伤和裂纹是可行的。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亟待解决。2002年,在国家自然科学基金重点项目的资助下,我们开展了电沉积修复钢筋混凝土裂缝的系统研究,并取得了较重要的研究进展。下面介绍有关最新研究成果。

2 电沉积过程中的电化学反应

不同的电解质溶液导致的电沉积修复效果也迥异。以国内外常用的电沉积溶液为样本,对电沉积修复混凝土裂缝过程中电化机理进行了系统研究与分析。以氯化镁和硫酸锌溶液为例,根据电化知识^[7,8]:在阴极上,电势越正者其氧化态愈先还原而析出;在阳极上,电势愈负者其还原态愈先氧化而析出。因此,通电时,在两种不同的溶液中发生的化学反应分别如下:



从上述所发生的化学反应来看,在硫酸锌溶液中,阳极上参加反应的是H₂O,而在氯化镁溶液中,由于氯离子反应生成氯气的标准电极电势

(-1.36V)比 H_2O 生成氧气的标准电极电势(-1.23V)的小,所以在阳极上参加反应的是 Cl^- 。根据法拉第电解定律^[7]知,当通过的电量为 Q 时,所沉积出物质的质量为

$$m = \frac{Q}{zF} M \quad (1)$$

式中 F 为法拉第常数($F = 96500\text{C/mol}$); M 为该析出物的摩尔质量; z 是出现在电极反应式中的电子计量系数。

由此可以得知在通电量相同的情况下,阴极析出物的质量与物质的摩尔质量和它的电子计量系数的比值成正比。由于析出物 ZnO 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的摩尔质量分别为 81g/mol 和 58g/mol ,且其电子计量系数相等,所以氧化锌的质量较大,从而揭示了采用硫酸锌溶液时电沉积物的质量增加量较大的内在机理。

3 裂缝处电流密度的集中效应

在电沉积过程中,由于裂缝的存在,通过的电流

将在试件裂缝处出现电流密度集中现象,使得沉积物在裂缝处快速堆积,从而导致裂缝尖端的钝化和愈合。为了定量考证裂缝处的高密度电流,分别测量了在相同外加电压情况下,同一试件(裂缝宽度为 0.4mm)在破坏前后的电流密度。测试结果列于表1中。由表1可以看出,破坏后的试件在相同的电压下通过的电流明显增大,说明裂缝处存在高密度电流,与试件其他未裂部位相比,电流密度高出数百倍。进一步分析发现,随着外加电压的增加,破坏前的电流密度基本呈等比例线性增加,但裂缝处的电流密度增加速率明显高得多,从而导致裂缝处与未裂部位电流密度的比值随外加电压的增加而递增。文献[6]利用有限元定量模拟实验中混凝土试件和溶液中电流密度的分布情况,理论计算裂纹尖端附近的最高电流密度比试件其他地方的电流密度高出了570倍。有限元模拟的结果与我们实际测试的结果比较接近。

表1 破坏前后电流及电流密度的比较

外加电压/V	破坏前电流/A	破坏后电流/A	破坏前的电流密度 /($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)	破坏后裂缝处的电流密度 /($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)	裂缝处与未裂部位 电流密度的比值
8.6	0.02	0.03	3.12	625	200
12.9	0.03	0.05	4.69	1250	267
17.3	0.04	0.07	6.25	1875	300
21.4	0.05	0.09	7.81	2500	320
25.1	0.06	0.12	9.38	3750	400

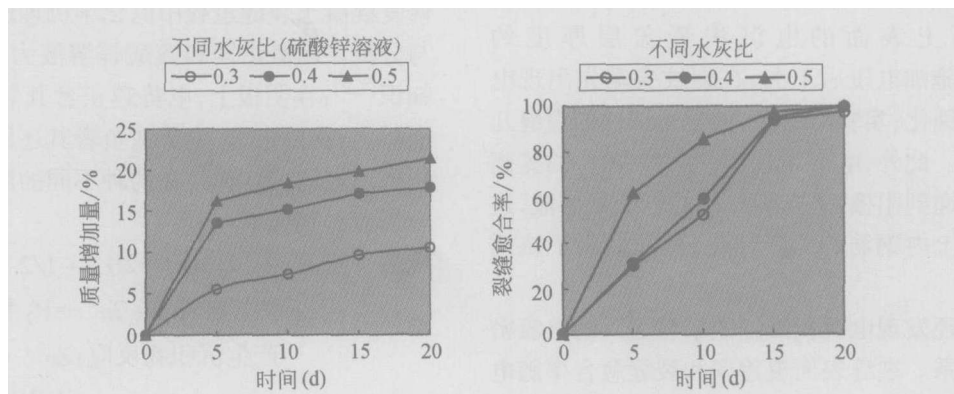


图3 不同水灰比对电沉积效果的影响:(a)质量增加量;(b)裂缝愈合率

4 混凝土水灰比对电沉积修复效果的影响

研究了在相同电沉积溶液(硫酸锌溶液)中不同水灰比(W/C分别为0.3、0.4、0.5)对电沉积修复效果的影响(见图3),主要结论如下:

(1)混凝土试件的质量增加量和裂缝的愈合率随水灰比的增大而加快。原因可能是随着水灰比的增大,混凝土中的孔隙率增大,一方面降低了混凝土本身的电阻;另一方面降低了氢氧根离子从混凝土中析出来的阻力,从而产生更大的电流,使得在混凝

土内部及离子间结合生成沉积物的几率相对增加,所以有更多的沉淀物生成,愈合速率加快。

(2) W/C 较大的试件在电沉积开始的前 5 天里,裂缝愈合的速率较快,随后逐渐趋缓;而 W/C 较小的试件,在电沉积开始后的 15 天内,裂缝愈合率基本呈线性增加,15 天后增长趋势逐渐减缓。通过微观测试,发现愈合率趋慢的原因是因为电沉积物愈合部分裂缝后导致试件的电阻增加,以及钢筋得到保护后极化电阻和膜电阻增加导致电流的降低,因此沉积物的生成速度随着电流的减小而逐渐变慢。

跟踪记录了电沉积过程中电流随时间的变化情况。结果显示,随着电沉积试验的进行,在恒定外加电压下,通过试件的电流逐渐减小,从而进一步说明试件的裂缝处有沉积物生成,引起试件的阻抗逐渐增大,导致沉积物继续生成的速率减缓。

5 结束语

用电解沉积法修复钢筋混凝土的裂缝,尤其适用于传统的修复技术难以奏效的海工结构或长期处于潮湿环境中的工程结构,是混凝土裂缝修复的一种实用的方法,有着广阔的应用前景。近年来,在国家自然科学基金的资助下,我们较为系统的开展了电沉积修复钢筋混凝土裂缝的试验研究,并取得了

一定的研究成果(更深入的研究还在进行),我们希望通过本项目的研究以及相关成果的应用,使电沉积技术日趋完善,成为修复混凝土裂缝的一种行之有效的办法,恢复甚至提高既有混凝土材料的强度和耐久性,延长混凝土结构的使用寿命。

参 考 文 献

- [1] Sasaki H, Yokoda M. Repair method of marine reinforced concrete by electrodeposition technique. Proceedings of Annual Conference of JCI. Japan Society of Civil Engineers. Japan Concrete Institute, Japan, 1992, 849—854.
- [2] Nobuaki Ostuki, Ryu Jae-Suk. Use of electrodeposition for repair of concrete with shrinkage cracks. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(2):136—142.
- [3] Ryu Jae-Suk. An experimental study on the repair of concrete crack by electrochemical technique. Materials and Structures, 2001, 34(3): 433—437.
- [4] Nobuaki Ostuki, Makoto Hisada, Ryu Jae-Suk. Rehabilitation of concrete cracks by electrodeposition. Concrete International, 1999, 21(1):58—63.
- [5] Ryu Jae-Suk. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1):159—164.
- [6] 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. 华中科技大学学报, 2003, 20(3):26—29.
- [7] 傅献彩,沈文霞,姚天扬. 物理化学(第四版). 北京:高等教育出版社,1990.
- [8] 武汉大学. 分析化学(第三版). 北京:高等教育出版社,1998.

PROGRESS IN STUDIES ON CRACK REPAIR OF CONCRETE BY ELECTRODEPOSITION TECHNIQUE

Yao Wu Zheng Xiaofang

(Institute of Smart and Structural Materials, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract Electrodeposition means precipitation of material on the surface of an electrode by electrolysis. It is possible to close the crack in concrete by applying an electric current, especially under marine environment where other traditional repair systems are inefficient or very expensive. In this paper, studies of electrodeposition from native and overseas were reviewed. Moreover, the current progress of our research work supported by NSFC in this study field was briefly introduced.

Key words Electrodeposition, Concrete, Repair of crack