

文章编号:1007-9629(2022)12-1277-07

# 电压对锈裂钢筋混凝土电泳沉积修复效果的影响

王月明<sup>1,2</sup>, 王长丹<sup>1,2,\*</sup>, 周顺华<sup>1,2</sup>, 刘开伟<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 3. 安徽建筑大学 安徽省先进建筑材料工程实验室, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**提出了以高性能环氧树脂溶液为修复溶液的电泳沉积修复法,研究了修复过程中各电压下锈胀开裂钢筋混凝土试件裂缝面形貌、电阻、沉积膜厚度的变化规律,以及电压对修复后试件防水和抗碳化性能的影响.结果表明:电泳沉积修复 24 h 后各试件的裂缝皆可完全愈合,电压越高,锈胀裂缝愈合越快,裂缝面环氧树脂沉积膜越厚,电阻越大;修复后试件的防水和抗碳化性能显著提升,相较于高电压,低电压修复后试件的防水性能更好;电压对修复后试件的抗碳化性能影响不大.

**关键词:**锈胀开裂钢筋混凝土;电泳沉积修复;电压;环氧树脂;防水性能;抗碳化性能

中图分类号: TG174.41

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.12.009

## Influence of Voltage on the Repair Effect of Electrophoretic Deposition of Rust-Cracked Reinforced Concrete

WANG Yueming<sup>1,2</sup>, WANG Changdan<sup>1,2,\*</sup>, ZHOU Shunhua<sup>1,2</sup>, LIU Kaiwei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Anhui Province Engineering Laboratory of Advanced Building Materials, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The electrophoretic deposition repair method with high-performance epoxy resin solution as the repair solution was proposed. The crack surface morphology, resistance and deposition film thickness of the specimen under various voltages during the repair process, as well as the influence of voltage on the waterproof and carbonation resistance of the repaired specimen were studied. The results show that all the cracks heal completely after 24 hours of electrophoretic deposition. The higher the voltage is, the faster the cracks heal, the thicker the epoxy resin deposition film on the crack surface is, and the higher the resistance is. The waterproofing and carbonation resistance of the repaired specimens were significantly improved. Compared with high voltage, the waterproofing performance of the repaired specimens was better after low voltage, while the voltage level had little effect on the carbonation resistance of the repaired specimens.

**Key words:** rust-cracked reinforced concrete; electrophoretic deposition repair; voltage; epoxy resin; waterproof performance; carbonation resistance

钢筋混凝土结构的锈胀开裂每年为世界各国带来数以亿计的经济损失,并容易引发安全事故<sup>[1-2]</sup>.因

收稿日期:2021-09-28; 修订日期:2021-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778485,51608384)

第一作者:王月明(1993—),男,黑龙江佳木斯人,同济大学博士生. E-mail:2395771145@qq.com

通讯作者:王长丹(1982—),男,山西太原人,同济大学副教授,博士生导师,博士. E-mail:2008wangchangdan@tongji.edu.cn

此,对于该结构的有效修复极其重要.现有的开裂损伤钢筋混凝土修复方法主要包括混凝土置换法、注浆法和电化学沉积法等.混凝土置换法是使用修补材料代替局部性能劣化的混凝土保护层,从而实现钢筋混凝土结构补强的一种方法<sup>[3-4]</sup>.但该方法工艺复杂且修复效果易受多方面因素的影响,同时修补材料和原混凝土之间易发生宏电偶腐蚀<sup>[5]</sup>.注浆法一般用于修复对结构整体性有影响的混凝土裂缝,但对于细小裂缝和深层次裂缝较难实现有效渗透,进而影响其修复效果<sup>[6-8]</sup>.电化学沉积法特别适用于修复海工混凝土结构.该方法分别以混凝土内部钢筋和外置在盐溶液中的导电材料为阴阳极,两极通以直流电后,经过一系列电化学反应生成不溶性沉积盐来填充修复混凝土裂缝<sup>[9-13]</sup>.但电化学沉积法修复周期较长,沉积盐的孔隙较大,无法有效阻止水及有害离子侵入混凝土内部,为钢筋混凝土的再次锈胀开裂埋下了隐患.

综上,本文提出了电泳沉积修复法,在电场条件下使带电环氧树脂胶体粒子向锈胀开裂钢筋混凝土裂缝处泳动、聚集、沉积,在封堵锈胀裂缝之后生成环氧树脂保护膜.电压强度决定了带电胶体粒子的电泳沉积速度,对锈胀开裂钢筋混凝土的电泳沉积修复效果有重要影响.

## 1 试验

### 1.1 高性能环氧树脂胶体溶液的制备

高性能环氧树脂胶体溶液由水性阳离子环氧树脂溶液及水性阳离子氨类固化剂溶液组成.水性阳离子环氧树脂的合成方法:首先,在 $N_2$ 保护条件下,向装有搅拌器、冷凝管、恒压漏斗、温度计的四口烧瓶中加入一定量的双酚A型环氧树脂E-51,在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 下搅拌预热,再缓慢滴二乙醇胺,并升温至 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 反应180 min;然后,降温至 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 并滴加冰乙酸反应30 min,其中环氧树脂、二乙醇胺和冰乙酸的摩尔比为1.0:1.0:0.8.

单独的环氧树脂并不能固化胶结,需要辅以相应的固化剂,本试验使用自制的水性阳离子氨类固化剂作为水性阳离子环氧树脂的固化剂.合成方法:首先,在 $N_2$ 保护下,向装有三乙烯四胺的四口烧瓶中滴加环氧树脂E51,在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下反应180 min;然后,滴加封端剂苜基缩水甘油醚至四口烧瓶中,温度控制在 $75\text{ }^\circ\text{C}$ ,反应时间为180 min;最后,滴加冰乙酸反应30 min,即制得黄色透明胶状的水性阳离子氨类固化剂,其中三乙烯四胺、环氧树脂、苜基缩水甘油醚与冰乙酸之间的摩尔比为2.1:1.0:2.2:2.1.

分别向水性阳离子环氧树脂及水性阳离子环氧树脂氨类固化剂加入去离子水,制备环氧基浓度为 $0.1\text{ mol/L}$ 的水性阳离子环氧树脂溶液及胺基浓度为 $0.1\text{ mol/L}$ 的水性阳离子环氧树脂氨类固化剂溶液.然后将两者按质量比1:1混合,即制得高性能环氧树脂胶体溶液,其基本性能如表1所示.

表1 高性能环氧树脂胶体溶液的基本性能

Table 1 Basic properties of high performance epoxy resin colloid solution

Viscosity/ (Pa·s)	Conductivity/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	pH value	Amine value(KOH)/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
$3\times 10^{-3}$	1 102	8.7	10.1

### 1.2 锈胀开裂试件制作

水泥砂浆试件尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ ,水泥为P·I 42.5级普通硅酸盐水泥,水泥的化学组成(质量分数)如表2所示.砂为中国ISO标准砂,水为自来水,水泥与砂、水的质量比为1.0:3.0:0.5,钢筋的直径为6 mm,埋置在试件中间位置.待试件成型后在标准条件下养护28 d,然后在外露钢筋表面焊接导线并用聚氨酯胶将除预留面(预留面用于制造锈胀裂缝)外的5个面包裹,再将试件转移到5%(质量分数,下同)的NaCl溶液中,以钢筋为正极,不锈钢片为负极,通以 $0.1\text{ A/m}^2$ 的直流电,制造宽度约为0.6 mm的锈胀裂缝,制造的顺筋锈胀开裂砂浆试件如图1所示.

表2 水泥的化学组成

Table 2 Chemical composition of cement

										$w/\%$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	f-CaO	IL	
4.97	3.76	63.57	2.29	0.64	20.58	0.53	2.00	0.29	1.40	

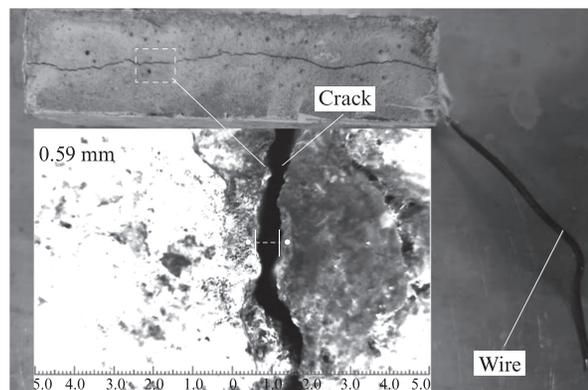


图1 锈胀开裂砂浆试件

Fig. 1 Rust-cracked mortar specimen

### 1.3 电泳沉积修复制度

使用尺寸为 $210\text{ mm}\times 120\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 的塑料盒作为承液容器,盒底部放置尺寸为 $120\text{ mm}\times$

130 mm×5 mm的石墨板.进行修复试验时,将砂浆试件置于2根不锈钢丝架上,裂缝面朝向石墨板.将制备好的胶体溶液倒入承液盒后,以石墨板为阳极,试件内部锈蚀钢筋为阴极进行通电修复.电泳沉积修复法选用恒电压模式进行修复工作,最大电流0.25 A,环境温度控制在(20±2)℃,修复时间为24 h.为保证修复效果,胶体溶液需现配现用,每12 h更换1次.修复系统示意图如图2所示.

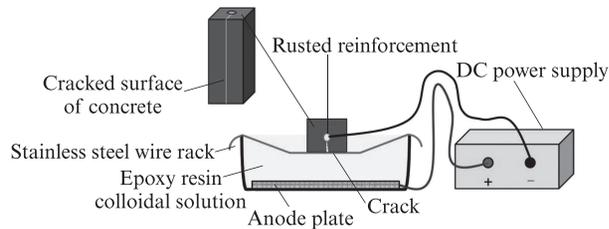


图2 修复系统示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of repair system

## 2 电泳沉积修复效果评价

### 2.1 质量增长量

使用感量为0.1 g的电子天平测量钢筋混凝土试件在修复后不同时间的质量.单位面积质量增长量( $W$ )的计算公式如下:

$$W = \frac{M_t - M_0}{S_0} \quad (1)$$

式中: $M_0$ 为修复前的试件初始质量平均值,kg; $M_t$ 为修复 $t$ 小时后的试件质量平均值,kg; $S_0$ 为锈胀裂缝面的面积,取3个试件的平均值为最终试验数值,0.006 4 m<sup>2</sup>.

### 2.2 裂缝填充深度及裂缝面沉积膜厚度

在对锈胀开裂水泥砂浆试件电泳沉积修复后,沿裂缝将试件劈裂,使用游标卡尺每隔1 cm量取1次填充深度,取3个试件的平均值为最终试验数值.使用游标卡尺每隔2 cm量取1次试件的总厚度,将该厚度值减去初始试件厚度(40 mm)即为环氧树脂沉积厚度,取3个试件的平均值为最终试验数值.

### 2.3 电阻

试验所使用的直流电源可以显示实时电流大小,通过式(2)计算修复过程中砂浆的电阻( $R$ ).

$$R = \frac{U}{I_t} \quad (2)$$

式中: $U$ 为设置电压值,V; $I_t$ 为修复过程中不同时间的电流值,A.取3个试件的平均值为最终试验数值.

### 2.4 吸水量

试验前,先将试件放到干燥箱以40℃烘干直至恒重(前后2次质量差小于0.1 g),之后将试件表面浸入水中2 mm左右,在规定时间测试其质量,单位面积吸水量( $I$ )的计算如式(3)所示.

$$I = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (3)$$

式中: $m_t$ 为试件在 $t$ 时刻的质量,kg; $m_0$ 为试件在初始时刻的质量,kg; $A$ 为试件与水的接触截面面积,m<sup>2</sup>.取3个试件平均值为最终试验数值.

### 2.5 加速碳化深度

将修复后试件的5个非裂缝面进行密封后放入碳化箱中进行加速碳化.试件碳化28 d后,使用切割机将其均匀切割成8个20 mm×40 mm×40 mm的试块,在试块的切割面喷1%(质量分数,下同)的酚酞酒精溶液,待溶液蒸发后,使用游标卡尺测量碳化深度,取3个试样平均值为试件最终的碳化深度.

## 3 结果与讨论

### 3.1 修复过程中试件锈胀裂缝面的形貌变化

图3为试件裂缝面形貌的变化.由图3可见:随着修复时间的延长,在电场作用下环氧树脂首先在裂缝位置开始聚集沉积,呈白色絮状;当试件锈胀裂缝被封堵后,环氧树脂开始在裂缝面沉积,并逐步对整个裂缝面实现覆盖;随着修复时间的继续延长,试件裂缝面生成具有一定厚度的黄色透明环氧树脂膜,修复完成后裂缝处沉积的环氧树脂厚度明显大于周围;修复电压越高,环氧树脂在裂缝及裂缝面的沉积速度越快,以修复1 h后试件裂缝面形貌为例,20 V电压修复后试件仅裂缝中出现白色环氧树脂填充,40 V电压修复后表面已生成环氧树脂薄膜,而60、80 V电压修复后试件裂缝面的环氧树脂膜已具有一定的厚度.

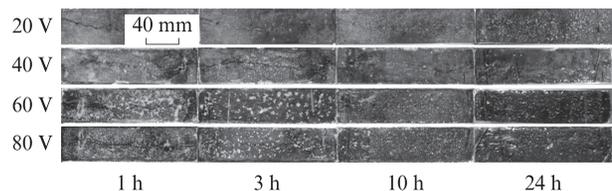


图3 试件裂缝面形貌的变化

Fig. 3 Changes of crack surface morphology of specimens

### 3.2 修复过程中试件裂缝面的沉积膜厚度变化

图4为沉积膜的平均厚度.由图4可见:电泳沉积修复时的电压越高,修复过程中各阶段环氧树脂沉积膜的厚度越大,在20、40、60、80 V电压下24 h电

泳沉积修复后,试件裂缝面环氧树脂沉积膜厚度分别为2.2、3.5、3.8、4.4 mm,这与对试件裂缝面形貌的观测结果相对应;电泳沉积修复过程中环氧树脂沉积膜厚度增长可划分为2个阶段,在阶段1(0~12 h)环氧树脂膜厚度增长速率较快,在阶段2(12~24 h)环氧树脂膜厚度增长速率减缓。

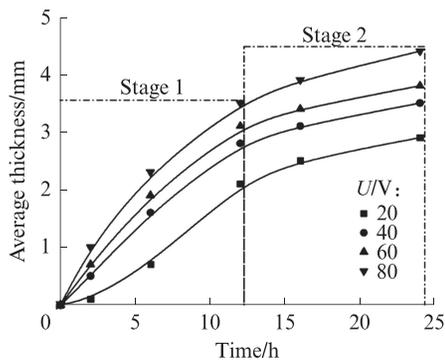


图4 沉积膜的平均厚度

Fig. 4 Average thickness of deposition film

### 3.3 修复过程中试件的质量增长量变化

图5为试件质量的增加量.由图5可见:随着修复时间的延长,试件的质量随之增加,修复电压越大,试件质量增长越快,最终质量增长量越大;在20、40、60、80 V电压下24 h电泳沉积修复后,试件质量增长量分别为0.60、1.15、2.04、2.37 kg/m<sup>2</sup>;试件的质量增长速率可以划分为2个阶段,阶段1为0~12 h,此阶段试件质量增长速率较快,阶段2为12~24 h,此阶段试件质量增长速率减缓,这与修复过程中试件的平均沉积膜厚度变化规律相对应。

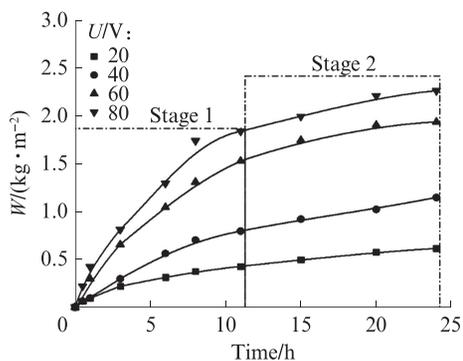


图5 试件质量的增加量

Fig. 5 Mass increment of specimens

### 3.4 修复过程中试件的电阻变化

图6为试件的电阻值.由图6可见:随着修复时间的延长,试件的电阻加大;电压越大,修复过程中试件的电阻值越大,在修复6 h后这种趋势变得明显;修复24 h后,40、60、80 V电压下修复的试件电阻

值较为接近,分别为1 739、1 818、1 861 Ω,而20 V电压下修复试件的电阻值仅为1 000 Ω.这是因为电压越大,在锈蚀钢筋与阳极石墨板之间的电场力越大,导致试件裂缝面电泳沉积的环氧树脂胶体粒子数量越多、速度越快,相同时间内环氧树脂在试件裂缝面堆积厚度也就越大(见图4).而环氧树脂具有良好的绝缘性<sup>[14-15]</sup>,所以电压越大修复后试件的电阻越大.伴随试件电阻的增加,电极之间的电场力被逐步削弱,进一步地使环氧树脂带电胶体粒子在试件裂缝面的电泳沉积速率减小,这也就解释了为何修复后期试件的沉积膜厚度和质量增加量上升速率减缓。

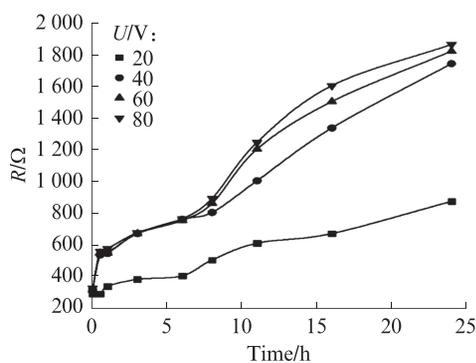


图6 试件的电阻值

Fig. 6 Resistance values of specimens

### 3.5 电压对环氧树脂在裂缝中填充深度影响

图7为修复后环氧树脂在裂缝中的填充分布情况.表3对修复后环氧树脂在裂缝中的平均填充深度进行了统计.由图7、表3可知,与高电压(60、80 V)修复相比,低电压(20、40 V)修复后环氧树脂的填充面积和深度更大.这可能是因为高电压下环氧树脂胶体粒子更易在浅层裂缝位置快速堆积,封堵了胶体粒子向其深层裂缝电泳的路径,所以很难在裂缝深处观测到环氧树脂聚集沉积.而低电压下环氧树脂胶体粒子向裂缝中的电泳沉积速度较缓,浅层裂缝不会快速封闭,使得环氧树脂在不同深度裂缝中的沉积变得均匀致密,所以相对于高电压,低电压修复后环氧树脂在锈胀裂缝中的沉积深度更深,沉积面积更广。

### 3.6 电压对修复后试件的吸水量影响

图8为不同试件的吸水量.由图8可知,与未修复试件相比,修复后试件各时间段吸水量明显下降,甚至低于未损伤试件.其中在40 V电压下修复试件的各时段吸水量最低,7 d最大吸水量仅为0.089 kg/m<sup>2</sup>,为未修复试件最大吸水量(1.391 kg/m<sup>2</sup>)的6.3%,而20、60、80 V电压下修复试件的7 d最大吸水量分别为未修复试件的13.5%、24.7%、25.4%,可知低电压(20、40 V)修复试件吸水量的下降幅度要比高电压

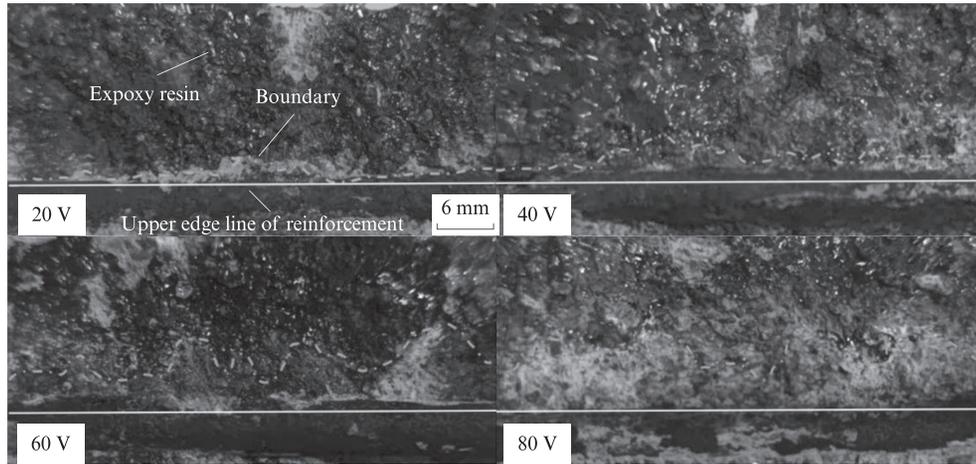


图7 修复后环氧树脂在裂缝中的填充分布情况  
Fig. 7 Filled distribution of epoxy resin in cracks after repair

表3 修复后环氧树脂在裂缝中的平均填充深度  
Table 3 Average filled depth of epoxy resin in cracks after repair

U/V	20	40	60	80
Average filled depth/mm	16.7	16.1	14.4	13.2

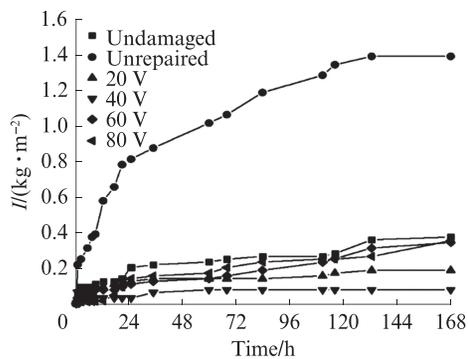


图8 不同试件的吸水量  
Fig. 8 Water absorption of different specimens

(60、80 V)修复试件更为明显.表明电泳沉积修复法可以大幅提升修复后混凝土的防水性能,降低其吸水量.在混凝土干燥情况下,外界环境中的以水为介质的氯离子及硫酸根等有害离子很难进入混凝土内部,同时干燥混凝土较湿润混凝土电阻更大<sup>[16-17]</sup>,其抵抗杂散电流侵蚀性能更强,因此电泳沉积修复后钢筋混凝土结构的整体防水性上升有助于提升其耐久性.

### 3.7 电压对修复后试件的加速碳化深度影响

统计了修复后不同试件的28 d加速碳化深度,发现相较于未损伤试件,修复后试件的加速碳化深度明显下降.电压对修复后试件加速碳化深度影响不大,在20、40、60、80 V电压下修复后试件的28 d加速碳化深度分别为0.02、0、0、0.02 mm,而无损伤试件加速碳化深度高达3.64 mm.表明电泳沉积修复法可以大幅提升钢筋混凝土的抗碳化性能,但电压大

小对修复后试件加速碳化深度影响不大,各试件都未见明显的碳化现象.

### 3.8 修复后钢筋混凝土界面的细观形貌

图9为40 V电压修复后试件的剖面形貌.由图9可见:修复完成后会有一定厚度的环氧树脂膜紧密附着在试件表面;锈胀裂缝被胶状环氧树脂密实填充.由此可知,电泳沉积修复后试件的防水性能及抗碳化性能大幅提升,与环氧树脂在裂缝的沉积及裂缝面环氧树脂膜的形成有关.首先,环氧树脂在试件裂缝的填充封堵了外界水分、有害离子及二氧化碳进入混凝土内部的直接通道;其次,裂缝面环氧树脂膜的形成可以阻碍外界有害物质与混凝土直接接触,进一步提升了钢筋混凝土抗外界有害物质侵蚀的性能.同时应该指出环氧树脂是一种绝缘材料,由3.3的讨论可知,修复后钢筋混凝土的电阻得到一定幅度的提升,因此其抗杂散电流侵蚀性能相应提高,体现了电泳沉积法在提升钢筋混凝土耐久性方面的巨大潜力.

修复电压增加所带来的环氧树脂膜厚度增厚,并不意味着混凝土防水性能和抗碳化性能的提升.由以上研究结果可知,混凝土抗碳化性能的提升与沉积膜的厚度关系不大,这可能是因为环氧树脂沉积膜在小厚度条件下已经具有足够的封闭性,可以有效阻止外界二氧化碳与混凝土表层接触.而修复后混凝土防水性能不仅与环氧树脂沉积膜厚度有关,也与其沉积密度、深度和均匀度有关.低电压条件下,虽然环氧树脂分子沉积速度减缓,但是其在试件裂缝面的堆积密度提升,覆盖更加均匀(见图3),同时在裂缝中的沉积深度加大(见表3).当电压为40 V时,修复后试件拥有足够的环氧树脂沉积膜厚度、堆积密度和填充深度,因此其7 d最大吸水量最低.

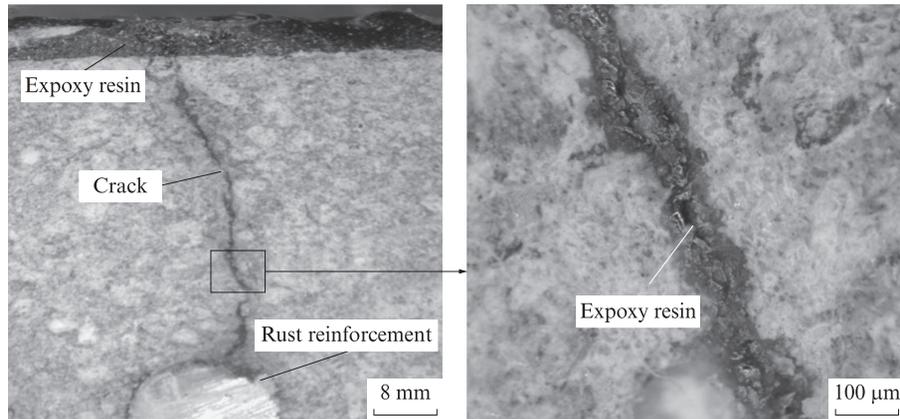


图9 40 V电压修复后试件的剖面形貌

Fig. 9 Specimen profile morphology after 40 V voltage repaired

## 4 结论

(1)电泳沉积修复电压越高,锈胀开裂试件表面的裂缝愈合速度及环氧树脂沉积速度越快,修复过程中各阶段试件裂缝面环氧树脂沉积膜的厚度越大,电阻越大。

(2)相较于未修复的锈胀开裂试件,电泳沉积修复后试件的防水性能显著提升,吸水量明显下降,甚至低于无损伤试件,在40 V电压下修复后试件的7 d最大吸水量最低,仅为未修复试件的6.3%。

(3)电泳沉积修复后锈胀开裂试件的抗碳化性能明显上升,40 V电压下修复后试件的28 d加速碳化深度为0 mm,而修复电压对试件修复后抗碳化性能影响并不大。

(4)环氧树脂在试件裂缝中的沉积封堵可以阻碍水分及CO<sub>2</sub>气体通过锈胀裂缝直接进入混凝土内部,修复后试件裂缝面环氧树脂沉积膜的生成可以阻隔混凝土与外界有害介质的直接接触,因此电泳沉积修复后试件的防水和抗碳化能力显著提升。

### 参考文献:

[ 1 ] 柯伟. 中国腐蚀调查报告[M]. 北京:化学工业出版社, 2003: 6-8.  
KE Wei. Corrosion survey report in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003:6-8.(in Chinese)

[ 2 ] ZHANG J Y, MAILVAGANAM N P. Corrosion of concrete reinforcement and electrochemical factors in concrete patch repair [J]. Revue Canadienne De Génie Civil, 2006, 33(6):785-793.

[ 3 ] 洪定海. 钢筋腐蚀引起混凝土结构破坏的修复对策[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(3):271-277.  
HONG Dinghai. Repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion[J]. Journal of Building Materials, 1998, 1(3):271-277. (in Chinese)

[ 4 ] 徐玲玲, 刘俊萍, 李晓, 等. MMA基混凝土修补材料的变形、强度及耐久性[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2004, 26(5):37-41.  
XU Lingling, LIU Junping, LI Xiao, et al. Deformation, strength and durability of MMA-based repair materials for concrete[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science), 2004, 26(5):37-41. (in Chinese)

[ 5 ] RIBEIRO J L S, PANOSSIAN Z, SELMO S M S. Proposed criterion to assess the electrochemical behavior of carbon steel reinforcements under corrosion in carbonated concrete structures after patch repairs[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:40-49.

[ 6 ] GUO T X, WENG X Z, LIU C, et al. Evaluation of the bonding and fatigue properties of an innovative rapid repair structure for concrete pavement [J]. Construction and Building Materials, 2020, 235:117484.

[ 7 ] GALLAGHER S. Mechanical resistance of cracked dam mass concrete repaired by grouting: An experimental study [D]. Montréal:École Polytechnique De Montreal, 2012.

[ 8 ] BRAS A, GIO R, LÚCIO V, et al. Development of an injectable grout for concrete repair and strengthening [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37(3):185-195.

[ 9 ] CHU H Q, JIANG L H, SONG Z J, et al. Repair of concrete crack by pulse electro-deposition technique[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148:241-248.

[ 10 ] 陈庆, 朱合华, 闫治国, 等. 基于自洽法的电化学沉积修复饱和和混凝土微观描述[J]. 力学学报, 2015, 47(1):98-103.  
CHEN Qing, ZHU Hehua, YAN Zhiguo, et al. Micro-structure description of the saturated concrete repaired by electrochemical deposition method based on self-consistent method[J]. Mechanics Journal, 2015, 47(1):98-103. (in Chinese)

[ 11 ] 储洪强, 蒋林华. 电沉积处理对砂浆 BET 比表面积及微孔结构的影响研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(5):627-632.  
CHU Hongqiang, JIANG Linhua. Effect of Electrodeposition on BET surface area and microstructure of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(5):627-632. (in Chinese)

[ 12 ] 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):103-107.

- CHU Hongqiang, JIANG Linhua, XU Yi. Influence of current density in electrodeposition method for repair of concrete cracks [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6):103-107. (in Chinese)
- [13] 蒋正武,孙振平,王培铭.电沉积法修复钢筋混凝土裂缝的机理[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(11):1471-1475.
- JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Peiming. Mechanism on rehabilitation of cracks in reinforced concrete using electrodeposition technique [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(11):1471-1475. (in Chinese)
- [14] 于浩,路太平.环氧树脂耐热绝缘材料的研究[J].热固性树脂,1997(2):18-21.
- YU Hao, LU Taiping. Epoxy resin heat-resistant insulation material[J]. Thermosetting Resin, 1997(2):18-21. (in Chinese)
- [15] XIANG Q, XIAO F P. Applications of epoxy materials in pavement engineering[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235:117484.
- [16] 李美利,钱觉时,徐姗姗,等.养护条件对混凝土表面层性能的影响[J].建筑材料学报,2009,12(6):724-728.
- LI Meili, QIAN Jueshi, XU Shanshan, et al. Influence of maintenance conditions on the surface layer of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6):724-728. (in Chinese)
- [17] FU X L, CHUNG D D L. Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(9):1313-1318.