**文章编号:**1007-9629(2025)04-0375-11

# 电沉积法封堵混凝土裂缝的效果与机理

任亮<sup>1</sup>, 朱洪波<sup>1,\*</sup>, 陈 庆<sup>1</sup>, 段立辉<sup>2</sup>

(1.同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室,上海 201804;

2.上海振济工程技术发展有限公司,上海 200436)

摘要:采用Cu、Zn、Fe阳极材料及CuSO4、ZnSO4、Fe2(SO4)3电解液,通过电化学沉积方法(EDM)来 封堵钢筋混凝土裂缝,对比分析了电流密度、电解质溶液浓度和电沉积时间对裂缝表面闭合率、裂缝 抗渗系数、离子在裂缝中的扩散深度及电极质量损失率等的影响,并通过X射线衍射和扫描电镜分 析了电沉积产物的组成与形貌.结果表明:愈合裂缝中电沉积物的结晶程度较高,形态各异;较低的 电流密度和电解液浓度最有利于EDM的堵漏效果.

关键词:电化学沉积;电解阳极;混凝土;裂缝修复

**中图分类号:**TU528.01 文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.011

# Effect and Mechanism of Electrochemical Deposition Method for Plugging Concrete Cracks

REN Liang<sup>1</sup>, ZHU Hongbo<sup>1,\*</sup>, CHEN Qing<sup>1</sup>, DUAN Lihui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Zhenji Engineering Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**Abstract:** Cracks in reinforced concrete were sealed by electrochemical deposition method (EDM). Three types of anode materials, Cu, Zn, Fe and their corresponding CuSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> electrolytes were used in EDM. The effects of current density, electrolyte solution concentration, and electrodeposition time on crack surface closure rate, crack impermeability coefficient, ion diffusion depth in cracks, and electrode quality loss rate, were analyzed. The composition of the electrodeposited products was analyzed by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results indicate that the degree of crystallization of electrodeposits is relatively high, and their shapes vary overall. Lower current density and lower electrolyte concentrations are most beneficial for the plugging effect of DEM on concrete cracks.

Key words: electrochemical deposition; electrolytic anode; concrete; crack repair

地下结构因混凝土开裂引起的渗漏问题普遍存 在,传统方法利用环氧树脂<sup>[1]</sup>、微生物<sup>[2-3]</sup>和预埋聚氨 酯胶囊<sup>[4]</sup>等来堵漏,其方法各有优缺点.有学者提出 了电化学沉积法(EDM,下称电沉积)堵漏技术<sup>[5]</sup>,通 过直流电诱导离子进入裂缝后沉积并结晶<sup>[6]</sup>.该方法 早期被用于预防海工混凝土的钢筋腐蚀和膨胀开 裂<sup>[7-8]</sup>,其最佳组合为乙酸镁溶液与铝电极<sup>[9]</sup>.有人认 为EDM可使裂缝在20d内愈合,如果混凝土中掺加 碳纤维和石墨烯材料则效果更好<sup>[10]</sup>.也有人认为高温 可以提高裂纹的修复率,最高可达4倍多<sup>[11-12]</sup>.Chu 等<sup>[13-17]</sup>认为,裂缝在前5d内的愈合速度最快,脉冲电 流比恒流电的愈合速度和效果更好,采用ZnSO<sub>4</sub>和 MgSO<sub>4</sub>电解液的效果最佳,其电沉积物的形态各异. 相关研究还发现,在混凝土下水管表面电沉积Cu<sub>2</sub>O

收稿日期:2024-05-30;修订日期:2024-09-08

基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFC3803104)

第一作者:任 亮(1998—),男,甘肃张掖人,同济大学硕士生.E-mail:renliang@njust.edu.cn

通讯作者:朱洪波(1965-),男,河南驻马店人,同济大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:08013@tongji.edu.cn

可以保护其免受微生物腐蚀<sup>[18-20]</sup>.Chen等<sup>[21-23]</sup>建立了 多种理论模型来表征电沉积反应的机理,评价修复 效果和指导工艺优化,并通过改进电沉积装置和优 化电解液组成来提高填充物的相容性和填充率<sup>[24-25]</sup>. 有研究认为,电流密度越大则沉积物越多<sup>[18,26]</sup>,还可 直接以海水为电解液,电流密度应在0.25~0.50 A/ m<sup>2</sup>之间<sup>[27]</sup>.

早期研究专注于电解液阳离子种类对沉积效果 的影响且主要利用电解液中的阳离子来堵漏,因此 需要持续补充电解液,导致操作复杂和成本增加<sup>[28-29]</sup>. 本研究为此设计了电解阳极沉积堵漏的新方法,并 评价了堵漏效果,分析了作用机理.

# 1 试验

#### 1.1 原材料

南京小野田水泥厂生产的P•II 52.5水泥(C),其 物理性能如表1所示,化学组成(质量分数,文中涉及 的组成、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量 比)如表2所示.ISO标准砂;Cu、Zn、Fe金属片,网购; CuSO<sub>4</sub>、ZnSO<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>等化学试剂,市售化学纯.

表 1 水泥的物理性能 Table 1 Physical properties of cement								
(2, 1, -1)	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa			
Specific surface area/(m·kg)	Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d		
398	117	170	5.2	8.3	38.5	59.2		

表 2 水泥的化学组成 Table 2 Chemical composition(by mass) of cement								
							Unit: ½	
Na <sub>2</sub> O	MgO	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{SiO}_2$	$\mathrm{SO}_3$	Cl	$K_2O$	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
0.08	0.65	4.56	20.90	2.65	0.05	0.87	3.23	

## 1.2 试件制备

按照水灰比为0.50、胶砂比为1:3的配合比,成 型尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的砂浆棱柱试样: 首先,向模具内浇筑20 mm高度的砂浆,振动60次 后,在浆体表面的中央位置放置1根  $\phi$ 8×140 mm的 螺纹钢筋,再在其一端连接1根导线;然后,向模具内 浇筑满砂浆并再次振动60次,刮去多余浆体后抹平, 并保持连接导线露出抹平面;最后,1d后将试样拆模 并将其标准养护28 d.

利用水泥抗折强度试验机,通过三点弯曲方法 将试样从中间压裂,控制加载制度可使各试样的裂 缝表面宽度保持在(0.12±0.02) mm.可利用带微 尺测宽功能的放大镜来验证裂缝宽度是否满足要 求,如图1所示.在对试样进行电沉积堵漏试验前, 先将试样的5个侧面用石蜡密封,只暴露出1个裂缝 表面.

#### 1.3 试验方法

将试样放入装有电解液的水槽中,使暴露裂缝的一面处于竖直状态.试验装置如图2所示.

分别采用尺寸为 $3 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} 左右$ 的 $Cu_{Xn}$ Fe金属片作为阳极,并采用与阳极金属离 子对应的硫酸盐(CuSO<sub>4</sub>、ZnSO<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)电解液, 阳极片平行于裂缝暴露面放置在相距(40±5) mm 的位置.设置电流密度(*I*)分别为0.5、1.0、 $2.0 \text{ A/m}^2$ ,



图 1 裂缝表面的宽度 Fig. 1 Width of crack surface(size:mm)



Fig. 2 Sketch of experimental device

电解质溶液浓度(c)分别为0.05、0.10、0.20 mol/L,持续通电时间(t)分别为1、3、5 d.

### 1.4 修复效果评价方法

对于裂缝被修复后的外观,在试验完成后,通过 3点弯曲法将试样沿裂缝折断,露出其内部表面进行 观察和测量.分别采用裂缝闭合率(R)、渗透系数(k) 以及离子扩散深度(H)等参数,来综合评估对混凝土 裂缝的修复效果<sup>[8,10,12]</sup>.同时,根据阳极电解质材料的 质量变化率(M)来评估电解速率与修复情况.

### 1.4.1 裂缝表面闭合率

R的计算公式如下:

$$R = \frac{L_c}{L} \tag{1}$$

式中:L。为裂缝闭合长度,mm;L为裂缝总长度,mm. 值得注意的是,R=100%并不意味着裂缝被完全填 充满,但当裂缝表面被全部闭合后,一般可消除或大 幅度减轻漏水程度,所以参数R具有实际工程意义.

#### 1.4.2 抗渗系数

在文献[6]基础上,结合试样形状,改进了渗透 试验装置,如图3所示.





将1个底面直径为40mm的长颈玻璃漏斗倒置 在暴露裂缝表面,上玻璃管的直径为9mm,长度为 75 mm.将裂缝的周围用环氧树脂密封,并采用抛磨 机清除掉电沉积试验前封闭暴露裂缝背面的封闭层. 根据加注到漏斗中的水位变化来计算 *k*:

$$k = \frac{aL_1}{A(t_1 - t_0)} \ln \frac{h_0}{h_1}$$
(2)

式中:a为长颈玻璃管的横截面积, cm<sup>2</sup>; $L_1$ 为流过裂 缝的垂直距离, cm;A为与试样表面接触漏斗的横截 面积, cm<sup>2</sup>; $t_0$ 为初始时间, s; $t_1$ 为水位下降一段距离时 的时间, s; $h_0$ 为初始时间 $t_0$ 时的水位高度, cm; $h_1$ 为时 间为 $t_1$ 时的水位高度, cm. 由于不同组的渗透系数存 在数量级的差异, 为了简化数据, 将渗透系数的负对 数定义为抗渗系数(K):

$$K = -\lg k \tag{3}$$

1.4.3 离子扩散深度

通过电沉积法修复后,将试样沿裂缝劈开.选择 10个等距位置,根据不同沉积物的特殊颜色,用游标 卡尺测量*H*,结果取其平均值.

## 1.4.4 阳极质量变化率

M的计算公式如下:

$$M = \frac{m_{\rm c}}{m_0} \tag{4}$$

式中:m<sub>c</sub>为通电结束后的阳极质量,g;m<sub>0</sub>为通电前的阳极质量,g.

# 2 结果与分析

#### 2.1 试验现象

当测试系统的电路连通后,试样与阳极板表面 附近立即出现气泡.图4为电沉积5d后的试样表面. 由图4可见,3种阳极材料分别在试样表面形成了铜 锈色、银灰色和铁锈色等不同颜色的沉积物覆盖层, 显示出明显的电沉积效应.



图4 电沉积5d后的试样表面 Fig.4 Surface of sample after 5d

从3种阳极试样中各选1个裂缝表面完全闭合的试样,通过三点弯曲方法将试样沿裂缝破开,观

察裂缝断面,如图5所示.由图5可见:3种试样的 裂缝断面上都有与各自阳离子对应颜色的沉积物; Cu电极和Zn电极试样中,越靠近裂缝表面位置的 沉积量越多,而Fe电极试样的裂缝断面已经几乎 被完全充满,即电沉积物分布区域已经越过钢筋并 向裂缝深处扩展,其中以Fe电极试样最明显,但其 他试样在越过钢筋区域的沉积量相比钢筋之前区 域大幅度减少.分析认为,越过钢筋的这部分沉积 主要是受到离子在溶液中的自然扩散控制的,离子 能够达到此处的数量有限,并且有可能并未充满此 处裂缝.但此现象也说明,离子扩散区域不以钢筋 的位置为限,况且在实际工程结构中一般为钢筋 笼,所以在裂缝深处仍会有钢筋,能够吸引离子进 入裂缝深处.



图 5 试样裂缝界面的沉积物状态 Fig. 5 Deposition state of crack interface in sample

从图4、5可知,利用Cu和Fe这2种阳极材料所 形成的深色沉积物,有利于观察试验效果,而Zn电极 因为呈现与混凝土相近的灰白色,不会显著影响原 有的结构外观.

### 2.2 修复效果

## 2.2.1 裂缝表面闭合率

图6为在不同条件下R随t的变化.从图6可见:

(1)*I*或*c*变化对Cu电极试样的*R*影响不明显,但 对Zn和Fe电极试样的*R*影响显著.Cu电极试样的*R* 均随着时间的延长持续增加,至5d时接近100%; 当*I*=2.0 A/m<sup>2</sup>时,Zn电极与Cu电极试样的*R*在各 个*c*条件下都可在1d内快速增加到95%以上;当 *I*=0.5 A/m<sup>2</sup>时,Fe电极试样的*R*均在3d内快速增 加至接近100%.这与传统*I*与*R*正相关的结论<sup>[18,26]</sup>不 完全相同,即针对不同的金属电极及其配套的电解 液,即便在传统认为<sup>[12-13,25,27]</sup>合理的*I*区间(2.0 A/m<sup>2</sup> 以下)内,*I*与*R*的关系也是有变化的.

(2)在1、3d内,在相同c下R值从高到低的顺序 为Fe、Zn、Cu,其中Cu电极试样R的增速明显慢于 Fe、Zn电极试样.相应地,各电极试样达到R=100% 的时间存在一定的差异,Zn电极或Fe电极在合适的 I/c条件下只需1d即可达到完全闭合,而Cu电极在 各种I/c条件下都需要5d才能达到满闭合状态.

综合分析认为,合理的 *I* 应小于 1.0 A/m<sup>2</sup>,而 *c*=0.05 mol/L 即可满足 3 种电极试样在 5 d 内的 *R* 

达到100%.

有文献<sup>[15]</sup>认为,*c*增加会提高*R*,但上述结果显示 并非如此,这可能与试验条件不同,特别是原始裂缝 宽度不同有关.3d后裂缝*R*的增长速度都明显下降, 这可以用电化学沉积引起的离子扩散速率降低来解 释,当裂缝浅层内壁被电沉积物部分填充后,导致离 子进入裂缝的通道受阻,离子向裂缝中扩散的速率 下降,导致*R*的增速减缓.

2.2.2 离子扩散深度

根据 2.1 的观察,越过钢筋的电沉积物明显减 少,所以对离子扩散深度的测量只记录到从裂缝表 面到钢筋中心的位置,即最大扩散深度为 20 mm,越 过钢筋的扩散距离不予考虑.图7为不同条件下 H 随 t 的变化.由图7可知:

(1)除 I=0.5 A/m<sup>2</sup>时的 Fe电极试样外, c 在各种 I条件下都显著影响 3 种阳极试样的 H, 总体表现为 c 越大则 H 越大; 当 I=2.0 A/m<sup>2</sup>时, 会大幅度降低 Cu 和 Zn 电极试样的 H, 但对 Fe 电极试样的 H影响 不大.

(2)从电沉积时间来看,3种电极试样的H均在I= 0.5 A/m<sup>2</sup>时随着电沉积时间的延长不断增加;在I= 1.0 A/m<sup>2</sup>时则表现为前3d的H增加很快,随后则基 本不再增加;在I=2.0 A/m<sup>2</sup>时,虽然Cu电极和Zn电 极试样的H仍随着时间的延长持续增加,但可以看 出这是在H值较低基础上的表现,而Fe电极试样的



Fig. 6 Change of R with t at different conditions

H仍呈现出与I=1.0 A/m<sup>2</sup>时类似的变化规律.

(3)3种阳极试样在 I=0.5 A/m<sup>2</sup>时在 1~5 d内 可以持续地向裂缝中扩散,而在 I=1.0 A/m<sup>2</sup>时至 3 d 时就基本达到最深处,其后不再增加或增加量很少. I=2.0 A/m<sup>2</sup>时,Cu和Zn电极试样的H大幅度降低, 而Fe电极试样的H对c变化比较敏感,只有高c才能 驱动Fe向裂缝深处扩散.

虽然电沉积离子在裂缝中的扩散深度并不直接 影响堵漏效果,即进入裂缝深处的离子不一定填满 裂缝内部,但可以推测其扩散的距离越深,则产生的 长期堵漏效果越好.

#### 2.2.3 阳极质量变化率

表4为不同条件下阳极板的M值.由表4可知:3 种阳极板的M值随着I/c和t的增幅表现出不同的特 点;Fe电极的M值最大,在相同的电沉积时间内都超 过前2种电极1倍以上,最高超出近70%,即Fe电极 在*I*=2.0 A/m<sup>2</sup>和*c*=0.20 mol/L条件下通电5d时已 经消耗大半;对于同一电极来说,Zn电极在3~5d期 间的*M*值最大,而Cu电极从1~3d之间的*M*值最 大;Fe电极的*M*值因*I*和*c*的不同而无规律变化,但 也多数表现为3~5d期间的*M*值较大;在3种电极中 Fe电极的电解速率是最快的.

然而,只有一部分阳极消耗沉积到了裂缝中,另一部分则沉积在试样的表面,所以*M*与前面的*R*或 *H*并不一定完全对应,即文献中关于*I*/*c*变化对沉积 物量的影响<sup>[18,26]</sup>,并非直接反映其对裂缝堵漏效果的 影响.但通过对比*M*与*R*和*H*,能够反映出不同阳极 材料及其*I*/*c*条件对填充裂缝速度的影响,比如Fe电 极在各种*I*/*c*条件下的消耗速度都很快,所以其*R*和 *H*达到最大值的时间都明显更快.



图7 不同余件下H随t的受化 Fig.7 Change of *H* with *t* at different conditions

#### 2.2.4 抗渗系数

表 5 为各试样在不同条件下的 R 与 K. 由表 5 可见:

(1)未经电沉积试样(control)的 K=1.5,经 EDM试验后各试样的K均显著提升至4.0以上.总 体比较3种电极试样中K与R的变化趋势能够看出, 两者的走向关联性较高,即R越大则K也越大.所 以,利用R来反映对裂缝的堵漏效果具有一定合 理性.

(2)K与R的变化规律并不完全一致,一方面是因为K不仅反映了裂缝的透水程度,也包含了试样本身的透水性,另外一方面还因为R只是反映了裂缝表面的闭合率,而裂缝内部的填充程度也会影响K.所以,R对堵漏效果的评价也具有一定的局限性.

# 2.3 微观分析

# 2.3.1 XRD

从3种阳极试样裂缝断面刮取粉体,进行电解沉

积物的XRD测试,结果如图8所示.从图8可以看出, 3种阳极的沉积物分别为其氧化物ZnO、Cu<sub>2</sub>O/ Cu(OH)<sub>2</sub>和Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,并且除了上述氧化物的特征峰 以外没有其他晶体物相,说明这些氧化物的结晶发 育非常完好,已经完全掩盖了取样时可能混入的、少 量水泥石材料的特征峰.这种结果也得到了文献[9, 15,27]的证实.

#### 2.3.2 SEM-EDS

对所有试样进行 SEM 分析,并对 3种电极试样 进行 EDS 分析,结果如图 9 所示.由图 9 可见:Zn 和 Fe 这 2 种金属阳极板的电沉积物在不同条件下的分 布和形貌接近,而 Cu 电极的电沉积产物变化较大; Cu 电极的沉积物形态包括团簇状或大板状,Fe 电极 沉积物呈团簇状,团簇之间存在有一定的间隙,Zn 电 极沉积物则呈连续的蜂窝状;Cu 电极沉积物的微观 形貌多样,包括板状、海绵状等,Zn 电极沉积物呈平 直的大板状,Fe 电极沉积物为相互交织的薄卷铂状.

Table 4       M values of anodes under different conditions								
Code	$I/(\mathbf{A} \cdot \mathbf{m}^{-2})$	$c/(\text{mol} \cdot L^{-1})$	t/d	Cu	Zn	Fe		
1			1	3.08	1.94	9.97		
2		0.05	3	5.22	1.97	12.90		
3			5	7.47	9.55	28.76		
4			1	4.20	3.32	21.20		
5	0.5	0.10	3	8.71	5.77	24.00		
6			5	9.66	8.97	33.00		
7			1	5.50	2.59	24.00		
8		0.20	3	6.50	3.25	32.90		
9			5	9.50	9.50	48.76		
10			1	2.61	6.84	9.54		
11		0.05	3	12.66	14.10	0.13		
12			5	16.18	18.30	29.26		
13			1	4.32	3.69	21.97		
14	1.0	0.10	3	9.85	7.29	26.51		
15			5	16.37	21.03	31.62		
16			1	4.90	5.35	41.74		
17		0.20	3	4.77	1.69	49.60		
18			5	22.77	3.41	47.37		
19			1	4.60	3.64	10.78		
20		0.05	3	10.63	2.34	14.60		
21			5	21.20	19.47	30.23		
22			1	4.00	3.00	22.30		
23	2.0	0.10	3	11.53	7.00	28.83		
24			5	17.74	19.21	54.71		
25			1	5.00	6.00	41.51		
26		0.20	3	10.56	15.00	48.52		
27			5	16.98	21.50	82.66		

表4 不同条件下阳极板的*M*值

有文献提到,I变化会影响Cu<sup>+</sup>的沉积物形态<sup>[15]</sup>, 当pH值分别为11.0和4.9时分别为四棱柱状和树枝 状<sup>[30]</sup>,当电压不同时,还会呈团簇状,采用脉冲电流会 改变晶体的择优取向,使Cu2O晶粒呈八面体<sup>[31-32]</sup>,不 过这些结论的实验条件与裂缝中的晶体生长条件相 差较大.本研究结果显示,I或c变化对Zn和Fe电极 的沉积物形态影响并不明显,主要是晶体尺寸有变 化,因为材料的结晶状态除了其自身特性外,还主要 受到其生长环境的影响,从图1显示的裂缝断面状态 可以推断,不同裂缝的内部空间复杂多样,这会导致 晶体生长的最终形态发生变化,比如在宽松空间中 生长的晶体尺寸就更粗壮,而在狭小空间中的晶体 就比较细小.但总体从外形能够看出3种晶体在各种 条件下的结晶情况良好,有利于其在裂缝中长期稳 定存在,可保持堵漏效果的持久性.对于Cu<sup>+</sup>,因其在 溶液中的溶解度很小,所以在获得合适的晶体生长 位置之前,Cu<sup>+</sup>会在已经形成的晶体表面上或者晶体

溶液中长出的新的晶核.这个过程会导致晶体的形态变化或者晶体的继续生长,导致多颗晶粒堆积.在不同的pH值下,Cu<sub>2</sub>O的生长会影响电化学反应,从而导致Cu<sub>2</sub>O沉积物的形状不同<sup>[7,15,31-32]</sup>.

这也可以解释 Cu电沉积试样 K 随着 I/c 的增加 先上升再下降的现象,当 Cu<sub>2</sub>O 刚开始生长时,因为 晶粒密集呈团簇状,较为紧凑的结构使抗渗系数先 上升.而当 I/c 增加时,容易形成更大尺寸的板状结 晶,其中有较多孔洞形成,导致抗渗系数下降.

对于Fe电极,因其M值随t的变化幅度非常大, 所以会迅速在表层裂缝中结晶并阻碍Fe离子继续扩 散进入裂缝深处的通道,但早期晶体发育尚未完善, 所以其在较高I并配合较高c条件下,仍能够促使Fe 离子穿过沉积在表层裂缝的沉积物而进入裂缝深处.

从图 9 中可以看出,裂缝中产生的沉积物分别是 比较纯净的3种金属氧化物晶体 Cu<sub>2</sub>O、ZnO和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,这与XRD结果完全一致.

Table 5R and K of samples under different conditions										
	<b>T</b> /(A = -2)	$c/(\text{mol}\bullet L^{-1})$	<i>t</i> /d -		$R/\sqrt[0]{0}$			Κ		
Code	Code I/(A•m )			Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe	
Control							1.50	1.50	1.50	
1			1	42.0	80.0	77.0	4.13	4.50	4.62	
2		0.05	3	77.0	98.0	100.0	5.20	5.12	5.10	
3			5	93.0	100.0	100.0	5.39	4.54	5.85	
4			1	45.0	80.0	63.0	5.02	4.20	4.53	
5	0.5	0.10	3	71.0	90.0	95.0	5.22	4.72	5.20	
6			5	90.0	98.0	100.0	5.35	3.91	5.50	
7			1	33.0	81.0	65.0	4.25	4.02	5.04	
8		0.20	3	69.0	85.0	100.0	5.25	5.63	5.20	
9			5	88.0	95.0	100.0	5.35	5.80	5.30	
10			1	45.0	86.0	100.0	5.10	4.60	5.09	
11		0.05	3	80.0	95.0	100.0	4.87	4.72	4.95	
12			5	98.0	95.0	100.0	5.02	4.82	5.85	
13			1	55.0	80.0	92.0	5.20	4.30	4.84	
14	1.0		3	88.0	88.0	95.0	5.15	5.03	4.72	
15			5	98.0	100.0	98.0	5.07	4.41	5.85	
16			1	69.0	71.0	79.0	5.65	4.40	4.98	
17		0.20	3	91.0	85.0	85.0	5.20	5.02	5.03	
18			5	93.0	98.0	100.0	5.55	4.66	5.85	
19			1	65.0	96.0	95.0	4.72	5.00	4.72	
20		0.05	3	80.0	98.0	100.0	5.15	5.43	4.78	
21			5	98.0	100.0	100.0	4.84	4.53	5.85	
22			1	33.0	97.0	90.0	4.00	5.10	4.72	
23	2.0	0.10	3	50.0	99.0	100.0	5.17	5.20	4.84	
24			5	84.0	100.0	100.0	5.39	5.29	5.85	
25			1	31.0	95.0	84.3	4.00	5.03	5.07	
26		0.20	3	61.0	97.0	84.8	4.85	5.26	5.07	
27			5	68.0	100.0	85.1	5.31	5.02	5.85	

表 5 各试件在不同条件下的R = KTable 5 R and K of samples under different conditions







1-Cu<sub>2</sub>O; 2-Cu(OH)<sub>2</sub>; 3-ZnO; 4-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 图 8 裂缝中沉积物的 XRD 图谱

 $2\theta/(^{\circ})$ 

(b) Zn

Fig. 8 XRD patterns of electrodeposits materials in cracks





# 3 结论

(1)通过新型电化学沉积方法,分别采用Cu、Fe、 Zn等3种金属阳极材料及其相应的硫酸盐电解液, 控制其各自合理的电流密度和电解液密度,均可在 5d内完成对0.12 mm宽度裂缝的完全闭合堵漏,裂 缝中的电沉积物分别为纯净的Cu<sub>2</sub>O、ZnO和Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 其结晶程度都比较高.Cu电极沉积物呈板状等,Zn 电极沉积物呈平直的大板状,Fe电极沉积物为相互 交织的薄卷铂状.Zn和Fe阳极材料所形成的深色电 沉积物有利于观察实沉积果,而Zn电极的灰白色电 沉积物不影响堵漏混凝土的外观.

(2)较低的电流密度(I)有利于提高各种电极的 裂缝表面闭合率(R)和抗渗系数(K).过高的I会导致 裂缝表面达到完全闭合的时间延长,并大幅度降低 Cu和Zn离子在裂缝中的扩散深度.电解液浓度(c) 与Cu和Zn电极试样的R呈正比,但与Fe电极试样 的R呈反比;Fe电极因为电解速率远高于另外2种 电极,所以其堵漏裂缝的完全闭合时间与其离子达 到最大扩散深度的时间都明显更快.总体上,以较低 的I与较低的c配合最有利于电沉积方法对混凝土裂 缝的堵漏效果.

#### 参考文献:

- [1] 王信刚,周镇,赵华,等.环氧树脂修复水泥基材料微裂缝的 渗透机理[J].建筑材料学报,2021,24(6):1200-1207.
   WANG Xingang, ZHOU Zhen, ZHAO Hua, et al. Capillary transport mechanism of epoxy resin repairing micro-cracks in cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1200-1207. (in Chinese)
- [2] 刘士雨,俞缙,刘文强,等.基于MICP的珊瑚砂砂浆裂缝自修 复新型细菌载体[J].建筑材料学报,2021,24(4):687-93.
   LIU Shiyu, YU Jin, LIU Wenqiang, et al. New bacterial carrier for the crack self-healing in corals and mortar based on MICP[J].
   Journal of Building Materials, 2021, 24(4):687-693. (in Chinese)
- [3] 贾强,丁鹏. 微生物灌浆碳酸钙沉积规律[J]. 建筑材料学报,2021, 24(3):578-583,623.

- [4] 王晓磊,梁志权.內埋聚氨酯胶管混凝土自修复效果计算式[J]. 建筑材料学报,2020,23(4):794-800.
  WANG Xiaolei, LIANG Zhiquan. Calculation formula of self-repairing effect of concrete with polyurethane rubber hose embedded[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 794-800. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] RYU J S, OTSUKI N. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1):159-164.
- [7] MIRANDA J M, GONZALEZ J A, COBO A, et al. Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures[J]. Corrosion Science, 2006, 48 (8):2172-2188.
- [8] PINTA A, KHALILAH K, HIDENORI H. Non-destructive investigation of a 44-year-old RC structure exposed to actual marine tidal environments using electrochemical methods [J]. International Journal of Integrated Engineering, 2021, 13: 148-157.
- [9] NISHIDE T, OTSUKI N, SAITO A. Development of improved electrodeposition method for repair of reinforced concrete structures [C]//4th International Conference on the Durability of Concrete Structures. West Lafayette:Purdue University, 2014;393-402.
- YANG Q K, WANG J B, YUAN L W, et al. Effect of graphene and carbon fiber on repairing crack of concrete be electrodeposion
   Ceramics-Silikáty, 2019, 64(4):403-412.
- [11] XIA J, LIU Q F, MAO J H, et al. Effect of environmental temperature on efficiency of electrochemical chloride removal from concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193:189-195.
- [12] MENG Z Z, LIU Q F, SHE W, et al. Electrochemical deposition method for load-induced crack repair of reinforced concrete structures: A numerical study[J]. Engineering Structures, 2021, 246:112903.
- [13] 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 Hongqiang, JIANG Linhua, XU Yi. Influence of current density in electrodeposition method for repair of concrete crack[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6):729-733. (in Chinese)
- [14] CHU H Q, JIANG L H, XU N, et al. Influence of anion types on the electrodeposition healing effect of concrete cracks [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2012, 27(6):1154-1159.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] CHU H Q, LIANG Y C, GUO M Z, et al. Effect of electro-deposition on repair of cracks in reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238:117725.
- [18] DONG B Q, CHU H Q, GUO M Z, et al. Anti-microbial corrosion performance of concrete treated by Cu<sub>2</sub>O electrodeposition: Influence of different treatment parameters[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 123:104195.
- [19] ZHU Z Y, CHU H Q, JIANG S, et al. Improvement in the microbially induced corrosion resistance of concrete sewers using electrodeposition[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 134:104803.
- [20] MODARESI Z K, BAKHTIARI F, DAREZERESHKI E, et al. Electrodeposition of Cu<sub>2</sub>O particles on reinforced concrete substrate[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 24(4):140-147.
- [21] CHEN Q, JIANG Z W, ZHU H H, et al. Differential-scheme based micromechanical framework for saturated concrete repaired by the electrochemical deposition method [J]. Materials and Structures, 2016, 49(12):5183-5193.
- [22] CHEN Q, LIU X Y, ZHU H H, et al. Legendre polynomial-based stochastic micromechanical model for the unsaturated concrete repaired by EDM[J]. Archive of Applied Mechanics, 2020, 90:1267-1283.
- [23] ZHU H H, CHEN Q, JU J W, et al. Lectrochemical deposition induced continuum damage-healing framework for the cementitious composite [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2021, 30:945-963.
- [24] CHEN Q, CHEN G G, HUAGN A L, et al. Effects of simulated groundwater solutions with different Ca<sup>2+</sup> to Mg<sup>2+</sup> concentration ratios on asymmetric electrodeposition in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2024, 423:135882.
- [25] CHEN Q, XIE L J, ZHU H H, et al. Insight into ettringite induced concrete crack healing by electrodeposition: Effects of electrochemical parameters and numerical simulations[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 149:105504.
- [26] 樊玮洁,毛江鸿,金伟良,等.电化学沉积影响混凝土孔隙结构的试验及分析[J].哈尔滨工程大学学报,2019,40(12):1896-1911. FAN Weijie, MAO Jianghong, JIN Weiliang, et al. Experimental and analytical investigations of the effect of electrodeposition on the pore structure of concrete [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019,40(12):1896-1911. (in Chinese)
- [27] FENG G Y, JIN Z Q, ZHU D J, et al. Effect of seawater and various parameters on electro-deposition repairing cracks of reinforced concrete exposed to marine environment[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2022, 20(9):581-595.
- [28] 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 Wu, ZHENG Xiaofang. 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)