



牺牲阳极导电砂浆对破损环氧钢筋的阴极保护效果研究 *

陈昊翔^{1,2}, 张东方^{1,2}, 刘国强¹, 范志宏^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 广东港珠澳大桥材料腐蚀与工程安全国家野外科学观测研究站, 广东 珠海 519060)

摘要: 针对海工结构使用环氧钢筋破损修复难的问题, 利用牺牲阳极复合导电砂浆阴极保护技术, 研究导电砂浆电阻率随龄期的变化趋势, 以及在导电砂浆中牺牲阳极对不同破损率的环氧钢筋阴极保护效果, 包括保护电位、发射电流、钢筋表观变化等, 并结合牺牲阳极状态变化的数据评估其使用寿命。结果表明, 此牺牲阳极导电砂浆对破损环氧钢筋均有保护效果, 且钢筋破损率越低, 体系中的保护电流达到平衡的时间就越短; 此牺牲阳极砂浆对破损率小于 10% 的环氧钢筋保护时间长达 53 a。

关键词: 牺牲阳极; 导电砂浆; 环氧钢筋; 破损涂层; 阴极保护

中图分类号: U 654; U 657.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0051-05

Cathodic protection effect of sacrificial anode conductive mortar on damaged epoxy coated steel bar

CHEN Haixiang¹, ZHANG Dongfang^{1,2}, LIU Guoqiang¹, FAN Zhihong^{1,2}

(1.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. National Observation and Research Station of Material Corrosion and Structural Safety of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge in Guangdong Province, Zhuhai 519060, China)

Abstract: As it is difficult to repair the damage of epoxy coated steel bar in marine engineering structures, this paper uses the cathodic protection technology combining sacrificial anode and conductive mortar to study the change trend of conductive mortar resistivity along with age. It studies the cathodic protection effects of the sacrificial anode on epoxy coated steel bars with different damage rates in the conductive mortar, including the protection potential, emission current, and steel bar apparent changes. In addition, the service life of the sacrificial anode is evaluated based on the data of its state change. The results show that the sacrificial anode and conductive mortar can protect the damaged epoxy coated steel bars, and the lower damage rate of the steel bars is accompanied by the shorter time needed for the protection current in the system to reach equilibrium. The sacrificial anode mortar can protect the epoxy coated steel bars with a breakage rate less than 10% for 53 years.

Keywords: sacrificial anode; conductive mortar; epoxy coated steel bar; damaged coating; cathodic protection

随着沿海地区经济的快速发展, 跨海工程结构大批涌现, 而受到海洋环境影响, 普通钢筋已满足不了重大跨海工程的设计使用需求, 因此环氧钢筋逐渐在国内外重大跨海工程得到了广泛应

用^[1]。而根据长期调研结果显示, 环氧涂层钢筋在施工过程中易受到搬运、加工、绑扎、振捣等作用而导致涂层表面出现微孔、划痕、破损等缺陷。工程中通常采用重新涂刷环氧漆的方式, 修

收稿日期: 2022-08-19

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFB1600700)

作者简介: 陈昊翔 (1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为海洋工程材料的腐蚀与防护。

补环氧涂层钢筋破损区域。但环氧涂层钢筋微小损伤区域用肉眼难以发现并进行修补，在严苛的海洋环境作用下，随着时间发展势必会发生腐蚀，极大影响环氧涂层钢筋的耐蚀性能，降低环氧涂层钢筋服役寿命。因此，如何提升劣化环氧涂层钢筋耐久性，保障工程结构的使用寿命至关重要。

当混凝土内部钢筋发生锈蚀时，对其修复的常规方法有：凿除、电脱盐、外加电流阴极保护等。而实际工程中，凿除旧混凝土耗时耗力，人工维护成本高；由于各涂层钢筋之间没有实现电连接，传统电化学修复技术应用也受限。因此亟需研究开发对失效环氧涂层钢筋混凝土结构耐久性修复的新技术。

近年来，牺牲阳极导电砂浆技术因其施工成本低、保护效果好，受到了广泛关注。牺牲阳极复合导电砂浆技术是一种针对混凝土内部钢筋修复的新型技术，其原理是将导线连接被保护钢筋和牺牲阳极，同时利用低电阻率的导电砂浆实现牺牲阳极与钢筋形成电通路，从而达到对钢筋长效阴极保护的目的。本文利用该技术，针对混凝土内部环氧钢筋破损修复问题，系统开展基于混凝土结构的牺牲阳极导电砂浆修复技术研究，并对其保护效果和使用寿命进行详细研究。

1 试验方法

1.1 牺牲阳极复合砂浆配制

结合文献，本文砂浆原料采用 P·II 42.5 R 型水泥、标准砂、工业级 LiBr、水，配合比为 1:3:0.27:0.6。砂浆内部牺牲阳极为锌合金阳极。LiBr 在砂浆中充当牺牲阳极活化剂，能够防止牺牲阳极在砂浆中钝化，保证牺牲阳极持续输出电流。同时，LiBr 也作为一种具有高吸湿性的无机盐类，加入导电砂浆中可增加砂浆保水性，同时可减小砂浆电阻率。

将砂浆成型为 300 mm×100 mm×100 mm(长×宽×高)的试样后，均放置于室内常温干燥环境下，不做养护，以模拟工程现场实际使用条件。在砂浆内部放入人为破损的环氧涂层钢筋，其中钢筋直径 20 mm、长度 300 mm，使用前用打磨机在钢筋中心处打磨去一定长度的涂层以达到破损的目

的，钢筋破损率分别为 0%、1%、10%、20%，将普通钢筋作为对比样，其破损率定为 100%，如图 1 所示。因而钢筋试样根据破损率不同依次命名为 R-0、R-0.01、R-0.1、R-0.2、R-1。在砂浆初凝时，插入预制好的牺牲阳极(长度为 50 mm，横截面宽 8.73 mm、高 10.32 mm)，保持与钢筋的水平间隔距离约 20 mm，根据环氧钢筋破损率不同，对应的牺牲阳极依次命名为 S-0、S-0.01、S-0.1、S-0.2、S-1。同时，采用相同的砂浆配合比以及预破損的环氧涂层钢筋作为对比，观测试验前后钢筋表面状态变化。

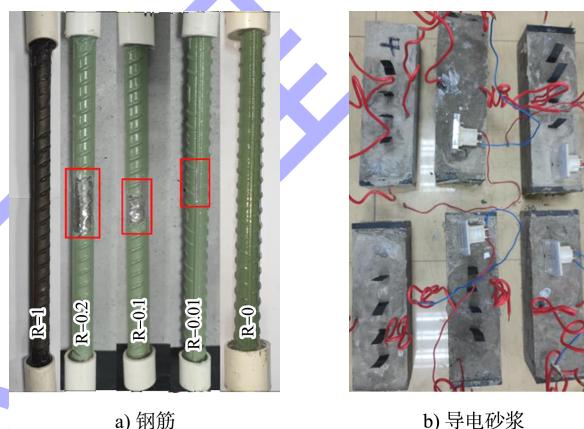


图 1 不同破损率的钢筋及导电砂浆

1.2 电阻率测试

在导电砂浆上间隔 45 mm 距离均匀插入 4 片钛网，利用四探针法，每隔 7 d 测试 1 次导电砂浆的电阻率。电阻率测试方法见文献[5]。最后，将试块长时间浸入水中，测试砂浆试块电阻率变化。

1.3 电化学性能测试

对牺牲阳极和不同破损率的钢筋进行电位测试，持续观测其在导电砂浆中的电位变化。初始 3 d 不进行电连接，确保钢筋以模拟现场工程的状况而发生腐蚀。此后利用指针式电流表(内阻约 150 Ω)串联连接钢筋和牺牲阳极，用以长时间测试钢筋与牺牲阳极间的电流变化。每 3 d 记录 1 次电位和电流数据，观测其变化规律。最后，断开牺牲阳极与钢筋，记录各自的电位变化。

1.4 钢筋腐蚀状况及牺牲阳极寿命分析

将砂浆试块破型后，取出钢筋及牺牲阳极，人工观测评估钢筋表面腐蚀状况，对比分析有无

阴极保护下的钢筋腐蚀状况。称牺牲阳极的损失质量, 根据相关理论公式计算分析牺牲阳极寿命。

2 试验结果

2.1 牺牲阳极导电砂浆电阻率变化结果

测试结果见图 2。由图 2a) 可看出, R-1 试块砂浆电阻率从 1 d 的 $1.56 \Omega \cdot \text{m}$ 增长至 56 d 的 $12.60 \Omega \cdot \text{m}$, 表明此砂浆随着水化过程进行以及水分蒸发作用, 电阻率持续地缓慢增大。其余试块的电阻率也表现出相同的趋势, 说明此试验所用配合比制作的砂浆电阻率差别较小, 且在无养护条件下 64 d 内其电阻率均小于 $15.00 \Omega \cdot \text{m}$, 均可满足实际应用要求。而实际工程中, 海工结构所处环境湿度大, 且其导电砂浆具有一定的吸湿性, 电阻率会低于试验测值, 因而砂浆电阻率不会随着时间变化持续上升进而超出使用范围。由图 2b) 可看出, 试块在水中浸泡一段时间后, 其电阻率逐渐缓慢下降, 浸泡至 6 d 时, 砂浆电阻率降至 $11.50 \Omega \cdot \text{m}$, 表明此砂浆在有水浸渍的条件下电阻率降低, 能满足现场使用要求。

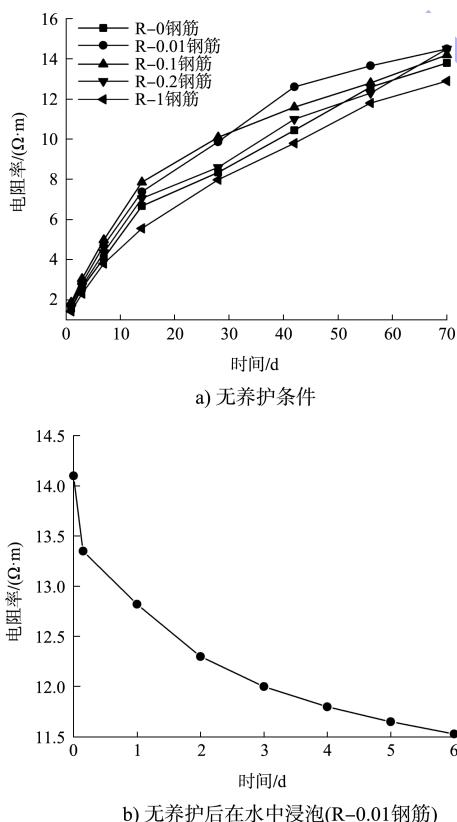


图 2 导电砂浆电阻率测试结果

2.2 电化学性能测试结果

对不同破损能率的环氧涂层钢筋进行牺牲阳极阴极保护试验, 其电位变化如图 3 所示。可以看出, 经过 64 d 的测试, R-0、R-0.01、R-0.1 钢筋的电位仍低于初始值(-0.5 V), 且都维持在 -0.9 V 以下, 表明 R-0、R-0.01、R-0.1 钢筋一直处于阴极保护状态。而 R-0.2 试样在 40 d 后钢筋电位逐渐正移, 与初始电位差最终稳定在 -0.2 V 左右, 表明此时钢筋仍处于阴极保护状态。R-1 试样也逐渐正移, 考虑是因为 R-0.2、R-1 试样钢筋需要保护的面积过大, 牺牲阳极无法维持较高的负电位, 导致钢筋电位正移。

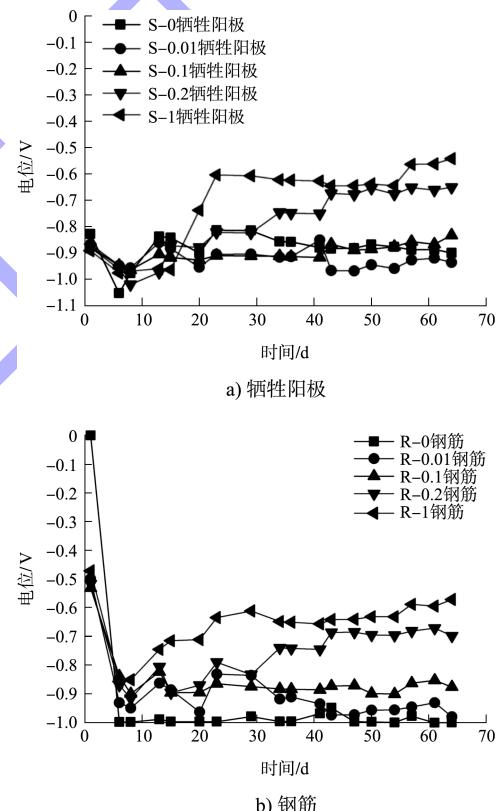


图 3 牺牲阳极和不同破损能率的钢筋在电连接下的电位变化

由图 3b) 可知, S-0、S-0.01、S-0.1 牺牲阳极试样经 64 d 后仍处于 -0.9 V 左右, 且电位波动小, 表明牺牲阳极仍处于正常工作状态。而 S-0.2、S-1 试样电位逐渐正移, 到 64 d 时电位达到 -0.631 、 -0.542 V , 考虑是钢筋破损能率过大, 牺牲阳极的电极电位也受到影响, 偏离其初始值(-1.0 V), 或是牺牲阳极即将消耗殆尽, 导致电位正移。基于此, 将牺牲阳极与钢筋断开连接后, 测量牺牲阳极和钢筋电位结果, 如图 4 所示。由图 4a) 可知, 各

牺牲阳极电位逐渐恢复到-0.9 V 以下，且保持相对稳定，表明各牺牲阳极并未全部消耗完，也验证了是由于钢筋破损面积过大导致的牺牲阳极电位正移；由图 4b) 可知，24 h 内钢筋断电电位变化均大于 0.1 V，证明各钢筋均已受到了有效的阴极保护。

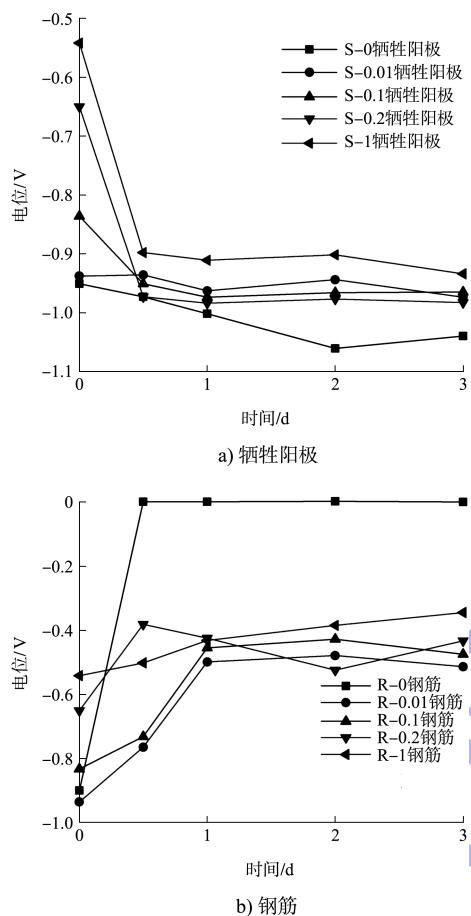


图 4 断电后的牺牲阳极和钢筋电位的变化情况

监测钢筋与牺牲阳极间的电流，见图 5。可以看出，初始电连接状态下电流都快速增大，在 5~15 d 内达到峰值，随后电流逐渐降低，直至达到稳定。各钢筋的电流峰值及达到阴极保护状态时的稳定值见表 1。可以看出，涂层破损率越高，其电连接时牺牲阳极输出的电流峰值越大，到达稳定状态的时间也越长，最后稳定时的电流值也越大。

表 1 各钢筋的电流峰值及达到阴极保护状态时的稳定值

试样	电流峰值/mA	稳定值/mA	稳定时间/d
R-0	0	0	1
R-0.01	0.10	0.03	8
R-0.1	0.40	0.24	8
R-0.2	1.30	0.30	20
R-1	2.00	0.56	34

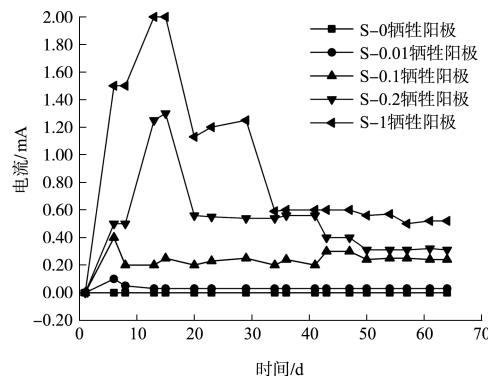
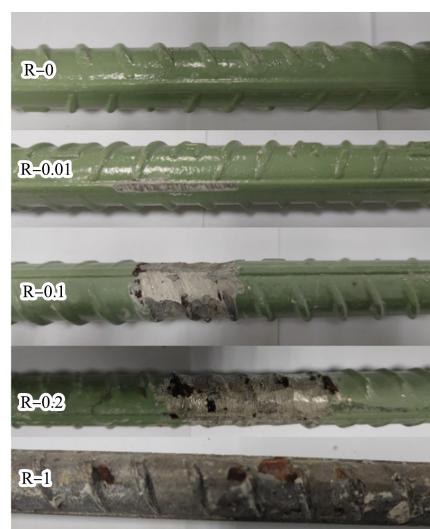


图 5 不同破损率的钢筋和牺牲阳极在电连接下的电流变化

2.3 钢筋表面锈蚀状况

有无阴极保护条件下的钢筋锈蚀情况见图 6。可以看出，受保护状态下的钢筋试样基本腐蚀状况较轻微。其中，R-0、R-0.01 钢筋未观察到有腐蚀发生；R-0.1、R-0.2 钢筋在涂层破损处观察到轻微的点蚀痕迹；R-1 钢筋多处出现了红褐色的锈蚀斑点，可能是由于未将钢筋与牺牲阳极电连接期间导致发生锈蚀。与图 6b) 对比可看出，未受到阴极保护状态下的钢筋均受到严重的腐蚀，且破损处均生成了一层黑色松软的锈层，严重影响环氧钢筋的服役寿命，表明在无阴极保护条件下，LiBr 与 NaCl 类似，会引发钢筋锈蚀。因此，此导电砂浆宜在环氧钢筋与牺牲阳极电连接处局部使用，不宜在钢筋未破损部位滥用，以免对钢筋造成不良影响。



a) 有阴极保护

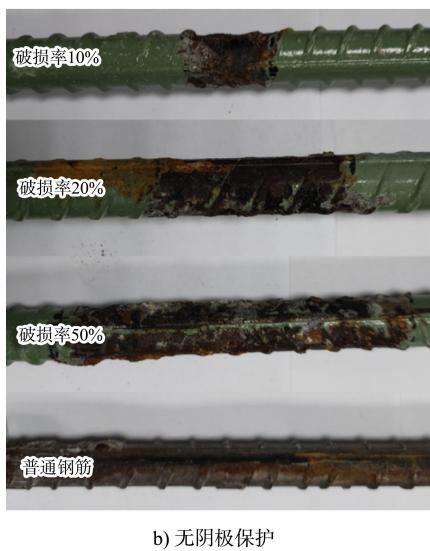


图 6 有无阴极保护条件下的钢筋锈蚀状况

2.4 牺牲阳极使用寿命分析

称牺牲阳极试验前后的质量, 得到结果见表 2。可以看出, 钢筋破损率越高, 对应的牺牲阳极质量损失越大。其中, 普通钢筋所消耗的牺牲阳极质量为 1.759 g, 远超破损的环氧钢筋。且 S-0.2 牺牲阳极消耗质量也远大于 S-0.1、S-0.01、S-0 牺牲阳极。

表 2 牺牲阳极质量损失状况

编号	试验前质量/g	试验后质量/g	质量差/g	损失率/%
S-0	20.855	20.729	0.126	0.60
S-0.01	22.310	22.091	0.219	0.98
S-0.1	18.838	18.609	0.240	1.27
S-0.2	20.690	19.815	0.875	4.23
S-1	21.151	19.392	1.759	8.32

结合电流测试结果, 对牺牲阳极进行寿命评估计算。根据 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》^[9]牺牲阳极的使用年限采用以下公式评估:

$$t = \frac{W_i \mu}{E_g I_a} \quad (1)$$

式中: t 为牺牲阳极使用寿命年限, a; W_i 为牺牲阳极净质量, kg; μ 为牺牲阳极利用系数, 长条形阳极取 0.85~0.90; E_g 为牺牲阳极消耗率, kg/(A·a); I_a 为牺牲阳极在使用年限内的平均输出电流, A。

结合式(1), 若将牺牲阳极质量统一定为 20 g, 按损失率计算对应损失质量, 牺牲阳极利用系数取 0.85, 并利用表 1 中监测到的稳定电流值, 可计算 S-0.1、S-0.2、S-1 牺牲阳极的保护寿命依次为: 53.7、13.0、3.6 a。而 S-0、S-0.01 由于体系所需的保护电流小, 理论保护年限结果远大于 100 a, 认为可满足工程使用需求。因此, 基于本文的环氧钢筋长度及牺牲阳极质量可知, 对于破损率不超过 10% 的钢筋, 牺牲阳极可实现较为长效的阴极保护。而对于破损率超过 10% 的环氧钢筋, 需要增加导电砂浆中牺牲阳极质量或者定期对牺牲阳极导电砂浆进行更换修复, 从而确保结构健康和安全运营。

3 结论

1) 在无养护条件下, 掺入 LiBr 的导电砂浆电阻率随着时间增加而增大, 约 70 d 时, 电阻率会增大到 15.00 Ω·m。但其在浸泡水中后, 电阻率会缓慢下降, 因此可确保在实际工程浪溅区和潮差区使用不会出现砂浆电阻率过大的状况。

2) 通过对钢筋及牺牲阳极电位和电流等测试发现, 环氧钢筋破损率越大, 牺牲阳极和环氧钢筋的电位越正, 牺牲阳极发射电流也越大, 电流稳定时间也越长。

3) 在无阴极保护条件下, LiBr 会加剧钢筋破损处腐蚀。因此, 为避免大面积使用含 LiBr 的砂浆会对钢筋产生不利影响, 此牺牲阳极导电砂浆作为一种耐久性修复方法, 可通过钻孔填充导电砂浆的方式在环氧钢筋破损处使用。

4) 利用牺牲阳极发射电流和损失质量计算结果发现, 本文中的牺牲阳极对破损率低于 10% 的钢筋保护年限大于 53 a, 而对于普通钢筋, 保护年限只有 3.6 a。

参考文献:

- [1] SWAMY R N, KOYAMA S. Epoxy coated rebars the panacea for steel corrosion in concrete [J]. Construction and building materials, 1989, 3(2): 86-91.

(下转第 159 页)