



交通基础设施腐蚀的现状^{*}

沈 坚¹, 何晓宇¹, 侯保荣², 夏宏杰³, 方泽兴¹

(1. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310006; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071;
3. 岱山县疏港公路工程建设管理中心, 浙江 舟山 316000)

摘要: 针对码头、桥梁等交通基础设施的腐蚀防护问题, 收集、整理大量的数据, 分析阐述了国内外码头、公路桥梁等交通基础设施腐蚀防护的基本情况和成本投入。调研结果表明: 交通基础设施的腐蚀成本巨大, 采用先进腐蚀防护技术、提升主动腐蚀防护意识可以显著降低腐蚀成本。该结论对于交通基础设施腐蚀防护工作的宏观分析、统筹规划、项目方案设计及实施具有积极意义。

关键词: 交通设施; 腐蚀现状; 腐蚀防护; 成本

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0015-07

Current situation of corrosion of transportation infrastructure

SHEN Jian¹, HE Xiao-yu¹, HOU Bao-rong², XIA Hong-jie³, FANG Ze-xing¹

(1.Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310006, China;

2.Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

3.Shugang Highway Engineering Construction Management Center, Daishan County, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Regarding the problem of corrosion protection of transportation infrastructure such as wharfs and bridges, a large amount of data is collected and sorted, and the basic situation and cost investment of corrosion protection of domestic and foreign wharfs, highways and bridges and other transportation infrastructures are analyzed and explained. The research results show that the corrosion cost of transportation infrastructure is huge, through the adoption of advanced corrosion protection technology and improvement of the awareness of active corrosion protection, the corrosion cost can be significantly reduced. The research results have positive significance for the macro analysis, overall planning, project scheme design and implementation of corrosion protection of transportation infrastructure.

Keywords: transportation facilities; corrosion status; corrosion protection; cost

我国交通基础设施规模存量巨大、发展稳定, 码头、桥梁等建造技术都取得了突破性进展。随着我国基础设施投产年份的增长, 交通基础设施结构腐蚀防护问题不断凸显。相对于发达国家, 我国尚缺乏主动的腐蚀防护意识, 先进的腐蚀控制技术没有得到积极的推广和应用, 各类由腐蚀引起的交通基础设施破坏的事故触目惊心, 严重

地影响到社会经济的发展。

基础设施的腐蚀防护问题一直受到广泛关注, 国内外学者在交通基础设施腐蚀防护方面做了大量的研究工作和生产实践, 主要关注于码头钢管桩^[1]、码头钢混结构^[2-6]、钢筋混凝土桥梁^[7-10]、公路桥涵^[11]腐蚀的成因、类型以及防护措施, 对腐蚀防护成本的关注度明显不足。

收稿日期: 2022-01-18

*基金项目: 浙江省交通运输厅科研计划项目(2020003); 交通运输行业重点科技项目(2020-GT-010)

作者简介: 沈坚(1969—), 男, 正高级工程师, 从事公路、水运交通工程建设与管理的研究。

随着我国基础设施投产年份的增长，交通基础设施的腐蚀防护问题不断凸显，全国各地区、各级行业主管部门、建设单位逐渐开展了一些调查和分析工作^[12]。笔者收集、整理数据，分析阐述了国内外交通基础设施腐蚀防护的基本情况和成本投入情况，对于交通基础设施腐蚀防护工作的宏观分析、统筹规划、项目方案设计及实施具有积极意义，为交通领域的腐蚀防护工作提供参考。

1 国内外交通基础设施腐蚀情况分析

1.1 港口码头腐蚀情况分析

1.1.1 国外港口码头腐蚀情况

港口码头多以钢筋混凝土结构为主，沿海码头混凝土内钢筋锈蚀现象十分普遍，尤其以水位变动区、浪溅区及水上区域更为突出。据调查，美国建筑材料的腐蚀损失中与钢筋锈蚀相关的损失高达 40%；欧洲国家和日本的码头腐蚀情况^[13-15]见表 1。

表 1 欧洲国家和日本的码头腐蚀情况

国家	码头腐蚀情况
挪威	200 座沿海结构物中，60% 的码头使用时间在 20~50 a，38% 的浪溅区桩柱发生严重钢筋锈蚀破损，20% 的梁板发生严重钢筋锈蚀破损
荷兰	64 座码头、泄水闸的使用时间 3~63 a，使用年限低于 30 a 的结构物未见明显腐蚀现象
以色列	阿希道德港、埃特拉港、海法港部分码头使用时间 7~27 a，码头使用 7~8 a 时出现腐蚀早期现象，使用 15 a 预应力面板保护层脱落、预应力筋完全锈蚀，使用 27 a 后水上钢筋混凝土桩严重锈蚀
日本	103 座海港混凝土码头中，使用年限 20 a 以上的码头都有相当多的顺筋裂缝，21.4% 的钢筋混凝土结构损坏由钢筋锈蚀引起

1.1.2 我国港口码头腐蚀情况

我国交通运输部曾针对不同区域、不同建设年代的沿海码头组织了多次调查工作，部分码头腐蚀情况见图 1。调查的区域包括华南、华东以及

北方地区，调查的码头对象建设年代包括 1986 年以前、1986—1996 年以及 1996 年之后。调查后的主要腐蚀情况见表 2。

表 2 我国沿海港口码头腐蚀情况调查

建设年代	码头腐蚀情况
1986 年之前	运行 10~15 a，有严重破坏构件的码头数量约占 50%；浪溅区Ⅳ级破坏的构件达到 50%~100%
1986—1996 年	运行 10~15 a 的情况有所改善；Ⅱ~Ⅲ 级破坏较为普遍；多数构件表面出现锈迹，混凝土中钢筋已发生锈蚀
1996 年之后	运行 10 a 左右的码头基本未出现钢筋锈蚀情况

注：Ⅱ 级为一般破坏，构件出现长度占布筋方向 30%~80%、宽度为 1~3 mm 的顺筋裂缝；Ⅲ 级为构件存在小面积的锈斑和锈迹，出现较短的、宽度为 0.3~1 mm 的顺筋裂缝；Ⅳ 级为构件存在少量的锈斑和锈迹，出现很短很细的、宽度小于 0.3 mm 的顺筋裂缝。

调查结果发现：码头结构物耐久性的提升与耐久性相关标准的完善、高性能混凝土的应用、

腐蚀防护措施的应用以及设计施工水平的提高息息相关。



a) 混凝土桩基保护层脱落



b) 梁板底部钢筋锈蚀



c) 纵梁底部开裂

图 1 我国部分码头腐蚀情况

1.2 公路桥梁腐蚀情况分析

1.2.1 国外公路桥梁腐蚀情况

目前,发达国家的桥梁已进入维护高峰期,需维修桥梁占比达到25%~39%,见图2。国际上普遍关注的桥梁问题包括结构损伤、功能退化以及承载力不足等。

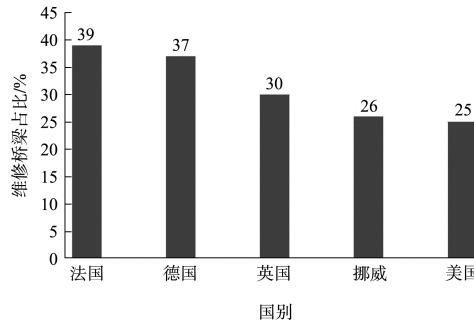


图2 国外部分国家维修桥梁占比

欧美桥梁多且老龄化,每年需要大量维修和更换成本。据FHWA(美国联邦公路局)预测,未来美国每年需要维修资金达200亿美元以上^[16]。欧洲国家国有桥梁仅占桥梁总数的一小部分,例如法国仅占10%,每年桥梁维修费用为0.73亿~3.18亿欧元,年更换费用为60亿~300亿欧元。2004年统计的欧洲国家国有桥梁年维修和更换费用^[17]见表3。

表3 欧洲国家国有桥梁年维修和更换费用

国家	国有桥梁数量/万座	年维修费用/亿欧元	年更换费用/亿欧元
法国	2.80	0.73	149
德国	3.46	3.18	300
挪威	1.70	0.37	60
英国	0.95	2.25	225
瑞典、西班牙、芬兰、比利时	4.86	1.45	161

1.2.2 我国公路桥梁腐蚀情况

2006—2012年交通运输部“桥梁耐久性关键技术研究”重大专项对我国13个省份的132座桥梁的耐久性进行了专项调研,并对我国西部各省区及部分东部沿海省区的1200余座混凝土桥梁技术状况及病害资料文献进行整理分析,同时对我

国31个省、直辖市或自治区的253个公路桥梁管理部门进行函调,开展了一次大规模的公路桥梁技术状况调查统计工作。对我国65万余座桥梁,按级别进行了技术等级划分,根据我国《公路桥梁技术状况评定标准》^[18],技术状况等级为四、五类的桥梁不能保证其正常使用,甚至会危及桥梁安全,所以急需大修、加固改建甚至重建。

调研结果表明:随着道路行政等级的提升,四、五类桥梁占比从24%减少到1%。在所有调查桥梁中,四、五类桥梁(需维修加固桥梁)占比14.21%。

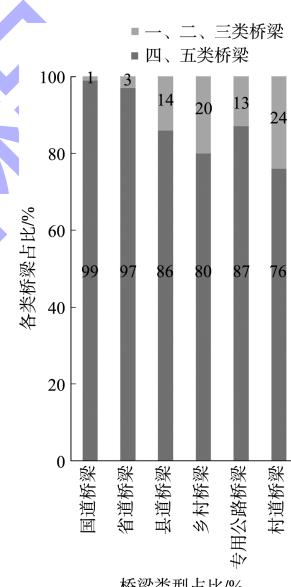


图3 我国公路桥梁技术状况调查

桥梁腐蚀中,拉吊体系腐蚀是重点问题。拉吊体系主要的腐蚀现象有:PE护套开裂、防水罩失效、锚头进水和拉索锈蚀断裂等,见图4。



a) PE护套开裂



b) 防水罩失效锚头进水



c) 拉索锈蚀、断裂

图 4 桥梁拉吊体系腐蚀典型问题

根据拉吊体系桥梁的调查统计数据, 更换桥梁吊杆多发生在通车后 5~16 a, 平均使用寿命 11.8 a, 远低于吊杆 20 a 的设计使用寿命, 见图 5。

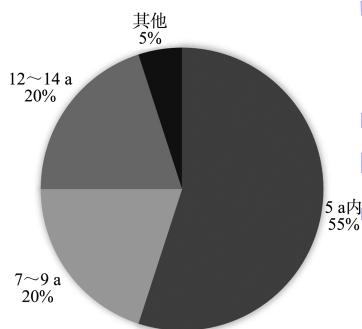


图 5 桥梁拉吊体系腐蚀发生年份

梁式体系和其他体系中桥墩、桥梁和桥塔等部位的钢筋混凝土腐蚀问题也较为严重。混凝土的腐蚀现象主要有混凝土保护层剥落和钢筋锈蚀, 我国东部沿海地区位于水位变动区、浪溅区的墩柱腐蚀现象最为严重^[19]。桥梁钢筋混凝土的腐蚀会严重影响桥梁的耐久性, 降低其使用年限。根据 2004 年对东南沿海公路桥梁耐久性调查发现, 梁式体系的主梁和支座等上部结构的耐久性损害占总体损害的比重最大, 桥墩、基础等下部结构的耐久性损害比重位居第二^[20], 图 6 为海水潮汐区和浪溅区桥梁的损害部位统计。

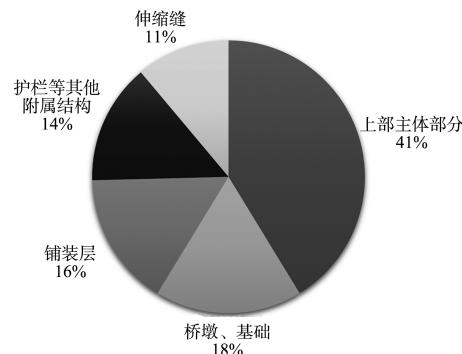
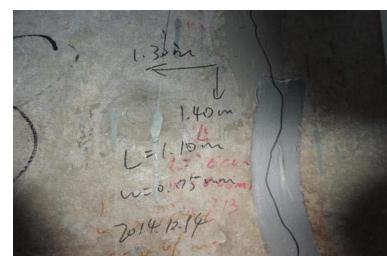
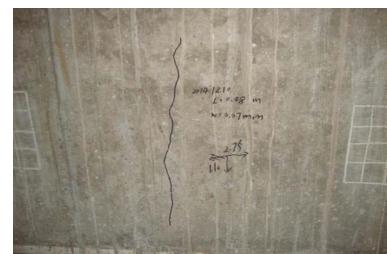


图 6 海水潮汐区和浪溅区桥梁的损害部位统计

广东省珠海市 1995 年建成通车的海燕大桥在 2003 年的养护中发现其桥墩混凝土剥离、混凝土钢筋锈蚀胀裂、箍筋已断落丧失作用; 2002 年竣工的灵昆大桥在投入使用的第 5 a 维护检测时, 桥墩已出现较为严重的混凝土脱落及钢筋锈蚀问题; 天津滨海盐渍地的 3 座排架墩桥在投入使用 8~10 a 已出现墩柱混凝土脱落、钢筋腐蚀的问题, 桥梁被迫重建; 2016 年舟山某跨海大桥调研中发现部分混凝土索塔、箱梁、锚碇等结构出现病害, 见图 7。



a) 桥梁索塔出现竖向裂缝1



b) 桥梁索塔出现竖向裂缝2



c) 桥梁钢混结合段处混凝土箱梁裂缝



d) 桥梁锚碇混凝土结构裂缝

图 7 舟山某跨海大桥混凝土结构病害

2 腐蚀防护成本情况

交通行业是用钢大户, 每亿元投资中, 城市轨道交通、铁路和机场的用钢量分别为 1 万 t、3 330 t 和 1 000 t; 高速公路建设中用钢量约 450 t/km^[21]; 每个港口码头泊位建设用钢量约 2 000 t。因此, 腐蚀防护需求市场较大, 见表 4。

表 4 交通细分行业钢材应用范围和用钢量

行业	钢材应用范围	用钢量
铁路	新建铁路, 铁路维修和改造, 机车及车辆制造维修, 铁路桥粱建设	3 330 t/亿元投资
城市轨道交通	车站, 设备	1.0 万 t/亿元投资
机场	-	1 000 t/亿元投资
公路	高速公路, 一级公路, 二级公路, 其他路网	400~500 t/km
混凝土桩基港口码头泊位	码头, 引桥, 护岸, 堆场	1 000~2 000 t/泊位
钢桩基港口码头泊位	码头, 引桥, 护岸, 堆场	2 500 t/泊位

注: 数据来源自《中国腐蚀与防护网》。

2.1 典型国家腐蚀损失情况

国际范围内的腐蚀调查显示: 由结构物腐蚀带来的经济损失大约占 GDP 的 1%~5%, 采用有效的控制和防护措施, 能够避免的损失大约为 14%~35%, 见表 5。腐蚀损失包括直接损失和间

接损失。直接损失是腐蚀构件对营运商造成的直接损失, 相对容易估算; 而间接损失是除直接损失之外的所有损失, 如对人员安全、营运时间、环境等造成的所有影响, 间接损失显著高于直接损失。

表 5 各国码头腐蚀情况

国家	年份	腐蚀成本/美元	占当年 GDP 或 GNP 比例/%	可避免损失占比/%
美国	1949	55 亿	2.1(GNP)	-
	1970	-	-	20~25
	1975	700 亿	4.5(GDP)	14
美国、挪威、德国联合	2014	25 050 亿(全球、直接损失)	3.4(GDP)	15~35
日本	1977	92 亿(直接成本)	2(GNP)	-
澳大利亚	1983	20 亿	1.5(GNP)	-
德国	1969	60 亿	3(GNP)	25
芬兰	1965	4 700 万~6 200 万	-	-
瑞典	1965	5 800 万~7 500 万	-	25~35
科威特	1995	10 亿	5.2(GDP)	18
印度	1961	3.2 亿	-	-

2.2 我国腐蚀成本总体情况

我国开展过两次大规模的腐蚀调查, 1999 年“中国工业与自然环境腐蚀问题调查与对策”项

目中提出, 1999—2001 年我国年腐蚀损失约为 5 000 亿元^[22], 间接腐蚀损失是直接腐蚀损失的 1.5~2.0 倍; 2015 年“我国腐蚀状况及控制战略

研究”项目中提出，2014 年我国腐蚀成本(包括直接和间接成本)约为 21 278.2 亿元，约占当年国内生产总值(GDP)的 3.34%。从防腐技术统计口径，各类技术的腐蚀成本比例见图 8。

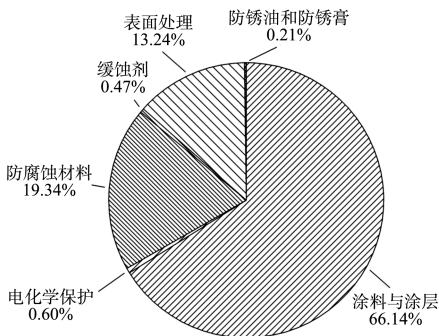


图 8 2014 年腐蚀成本分析

2.3 我国交通基础设施防腐蚀投入

2.3.1 总体投入

“我国腐蚀状况及控制战略研究”项目对 2014 年基础设施防腐蚀总成本(包括新建基础设施的防腐蚀费用和老旧基础设施的维护费用)测算为 814.5 亿元，占各行业防腐蚀总成本的 7%。其中公路桥梁防腐蚀成本 624.7 亿元、港口码头防腐蚀成本总计 26.3 亿元，见图 9。据 2014 年交通行业发展统计公报，当年公路建设投资 15 460.94 亿元和水运建设投资 1 459.98 亿元，公路桥梁腐蚀成本占当年公路桥梁行业建设投资总额的 4.0%，港口码头腐蚀成本占当年水运行业建设投资总额的 1.8%。

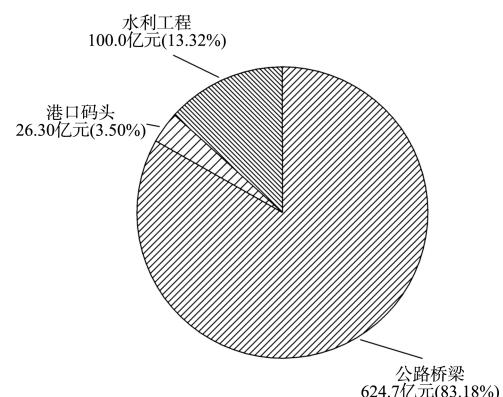


图 9 基础设施领域成本分析

2.3.2 典型工程腐蚀防护

2.3.2.1 宁波舟山港大榭港区码头

海港工程混凝土碳化一般较小，碳化对其耐久性的影响有限^[23]。海洋环境中因氯离子侵蚀而导致的钢筋混凝土腐蚀破坏是海港码头钢筋混凝土结构最为普遍和严峻的腐蚀破损形式^[24]。杭州湾地区海港工程混凝土结构耐久性调查发现，已遭腐蚀破坏的海港工程混凝土，采用局部修补及全面封闭的处理措施有一定的局限性，其修复的耐久性明显不足，一般使用 5 a、甚至有的只有 2 a 就会出现局部混凝土二次开裂。宁波舟山港大榭港区实华码头为高桩墩式码头，2001 年竣工投产，2010 年对其进行全面的耐久性调查发现：各类型混凝土结构基本未发生碳化，混凝土保护层基本完好，但涂层老化严重，表 6 为大榭港区混凝土结构耐久性调查结果。

表 6 2010 年宁波舟山港大榭港区混凝土结构耐久性调查

调查项目	混凝土强度/MPa	钢筋保护层厚度/mm	混凝土碳化程度	氯离子含量/% (相对于混凝土)	电阻率/(kΩ·cm)
横梁	29.1~49.4	62~81(底面) 45~68(侧面)	基本未碳化	0.002~0.010	26.09~40.23
纵梁	30.7~52.9	69~81(底面) 45~75(侧面)	基本未碳化	0.002~0.045	12.11~20.55
墩台	28.1~57.5	78~104	基本未碳化	0.004~0.098	12.02~18.25
备注	设计值: C30 70; 横梁与纵梁的底面设计 值: 50; 墩台设计值: 70	横梁与纵梁的侧面设计值: 70; 横梁与纵梁的底面设计 值: 50; 墩台设计值: 70	-	浪溅区钢筋锈蚀氯离子 临界值 0.059~0.107	10~50 时活化钢筋可 出现中高锈蚀速率 ^[25]

2.3.2.2 舟山跨海大桥

根据舟山跨海大桥养护规划及投入情况，

48 km 的五桥一线 20 a 内总养护费用约 20 亿元，合计每年平均养护费用约 1 亿元，折算年度单位

里程养护费用约为 215 万元/(a·km), 其中路基路面养护费用约占比 60%, 其他桥梁、涵洞、隧道的结构、机电等养护费用大部分与腐蚀等耐久性维护相关, 约占比 40%。其中, 西堠门大桥是我国最长的悬索桥, 主跨 1 650 m, 其养护项目中大部分与腐蚀防护相关。图 10 为西堠门大桥构件腐蚀情况, 表 7 为 2015 年西堠门大桥腐蚀状态年度常规检测病害情况, 表 8 为西堠门大桥构件养护规划情况。



a) 桥梁支座螺栓锈蚀



b) 吊索防腐涂装劣化

图 10 西堠门大桥构件腐蚀情况

表 7 2015 年西堠门大桥腐蚀状态年度常规检测病害情况

构件类别	涂装剥落、开裂	钢材腐蚀	螺栓腐蚀	螺栓缺失松动破损	积渗水、钢材变形、烧焦痕迹
加劲梁	75	116	36	-	16
缆索	93	144	332	11	-
索鞍	-	29	13	5	-
伸缩缝	-	40	-	-	-
支座	-	5	90	5	-
阻尼器	-	1	81	-	-

表 8 西堠门大桥构件养护规划情况

养护项目	频率	备注
混凝土结构涂装	8 a 一次	防腐措施
主缆缠丝涂装	5 a 一次	防腐措施
吊索涂装	6 a 一次	防腐措施
吊索分隔架更换	6 a 一次	分隔架易腐蚀
吊索更换	20~25 a	吊索腐蚀
阻尼器更换	20~30 a	连接部位易腐蚀
支座维修或更换	约 20 a	-

3 结语

1) 沿海码头混凝土内钢筋锈蚀现象普遍, 尤其是以水位变动区、浪溅区及水上区域更为突出。

2) 发达国家桥梁已经进入了维护高峰期, 我国四、五类桥梁占比逐渐提升, 即将进入维护高峰阶段。

3) 交通基础设施腐蚀成本巨大, 2014 年我国基础设施防腐蚀总成本为 814.5 亿元, 占各行业腐蚀总成本的 7%。其中公路桥梁腐蚀成本 624.7 亿元, 占行业投资总额 4.04%; 港口码头腐蚀成本 26.3 亿元, 占行业投资总额 1.8%。

4) 国内外实践经验及调研数据表明, 采用先进腐蚀防护技术、提升主动腐蚀防护意识可以显著降低腐蚀成本。我国交通基础设施即将进入维护高峰期阶段, 重视全生命周期腐蚀成本概念意义重大。

参考文献:

- [1] 张基沛, 陈兴磊. 海洋环境中码头钢管桩的腐蚀与防护[J]. 中国科技信息, 2006(4): 49.
- [2] 季辉, 徐永利. 海工钢筋混凝土结构防腐蚀技术研究现状及应用[J]. 公路, 2009(9): 188-191.
- [3] 张东东, 邵吉林. 海港码头钢筋混凝土建筑物的腐蚀和防护[J]. 交通科技, 2010(5): 104-106.
- [4] 贾春田. 海港工程钢筋混凝土腐蚀原因及防护技术措施[J]. 中国新技术新产品, 2010(12): 39.
- [5] 王胜年. 我国海港工程混凝土耐久性技术发展及现状[J]. 水运工程, 2010(10): 1-7, 118.
- [6] 王胜年, 黄君哲, 张举连, 等. 华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J]. 水运工程, 2000(6): 8-12.
- [7] 王琦, 王萍, 王世潜. 钢筋混凝土桥的腐蚀及其防护[J]. 中国市政工程, 2005(2): 40-42.
- [8] 李承昌, 郑晓华, 郭杨, 等. 沿海普通钢筋混凝土桥梁的腐蚀、防护现状与不锈钢筋应用综述[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(1): 19-22.
- [9] 李红专. 混凝土桥梁腐蚀防护措施探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(1): 48, 70.
- [10] 林国泉. 混凝土桥梁腐蚀的成因与防护[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(9): 69-71.

(下转第 79 页)