

典型海岸带城市烟台重点领域腐蚀状况调查与分析

王建华^{1,2} 吕剑^{1,2} 张宇轩^{1,2} 侯保荣^{2,3} 马秀敏^{2,3}

1 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003

2 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071

3 中国科学院海洋研究所 青岛 266071

摘要 针对典型海岸带城市的腐蚀问题,本工作以烟台为例进行了调查。采用问卷调查与实地调查相结合的方法,对该市40座桥梁、3个港口码头、12家市政管网单位、13家工业企业、20个旅游娱乐单位进行腐蚀状况调查。调查共取得了88个调查对象的腐蚀及防护状况数据,表明烟台各行业领域的腐蚀现象严重:钢筋混凝土结构均出现不同程度的蜂窝麻面、裂缝、锈斑、脱落漏筋、锈胀开裂等现象;钢结构设施也存在不同程度的锈蚀,防护漆膜变薄或破损,有腐蚀漏点检出。运用Hoar法估算了烟台市的年腐蚀损失约为2,354,336.4万元,占国民经济总值的3.9%。

关键词 腐蚀调查 腐蚀防护 腐蚀损失 Hoar法 烟台

中图分类号 TG174

文章编号 1002-6495(2019)06-0691-08

Survey and Analysis on Corrosion Events in Several Important Fields at Coastal City Yantai

WANG Jianhua^{1,2}, LV Jian^{1,2}, ZHANG Yuxuan^{1,2}, HOU Baorong^{2,3}, MA Xiumin^{2,3}

1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

2 Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

3 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Correspondent: LV Jian, E-mail: jlu@yic.ac.cn

Supported by Project of Yantai Science and Technology (2016ZH073), Taishan Scholar Program of Shandong Province (tsqn201812116) and Two-Hundred Talents Plan of Yantai (Y739011021)

Manuscript received 2019-03-30, in revised form 2019-04-18

ABSTRACT In view of serious corrosion in typical coastal cities, taking Yantai as an example, we made a corrosion survey concerning the corrosion status of 40 bridges, 3 ports and wharfs, 12 municipal pipe network units, 13 industrial enterprises and 20 tourism and entertainment units in the city of Yantai by means of questionnaire survey and field survey. The data related with corrosion and protection status of 88 investigation objects were obtained, and it was found that the corrosion events were serious in various industrial fields of Yantai. The general status of corrosion issue in the city is seriously that, reinforced concrete structures all suffered from corrosion of diversified types, such as surface voids and pits, cracks, rust spots, exposed reinforcing bars, corrosion cracking and so on. Steel structures also suffered from corrosion of different severities, such as damages or thinning of protective coatings and corrosion induced leakage points etc. With the Hoar method, the annual corrosion cost of Yantai city was estimated to be 2,354,336.4 ten-thousand RMB, accounting for 3.9% of the national gross domestic product.

资助项目 烟台市科技计划项目 (2016ZH073),泰山学者工程专项 (tsqn201812116) 和烟台市双百计划人才项目 (Y739011021)

收稿日期 2019-03-30 定稿日期 2019-04-18

作者简介 王建华,女,1982年生,助理研究员

通讯作者 吕剑,E-mail:jlu@yic.ac.cn,研究方向为海岸带水环境保护与可持续利用

DOI 10.11903/1002.6495.2019.087

KEY WORDS corrosion survey, corrosion prevention, corrosion cost, Hoar method, Yantai

腐蚀是金属材料和周围环境发生化学或电化学反应而被破坏的现象,是自发运行的一种冶金的逆过程,给人类带来巨大的经济损失和社会危害^[1]。自然环境(大气、土壤、海洋、生物和微生物等^[2-6])和工业介质(酸、碱、盐、工业水、熔盐、燃气等^[7-11])都影响着腐蚀的速度。烟台市地处中纬度,位于山东半岛中部,濒临黄海与渤海之间,是环渤海经济圈以及东亚地区国际性港城、商城、旅游城。气候属暖温带季风型大陆性气候,四季变化和季风进退较为明显,雨水适中,空气湿润。烟台海域潮流方向以东北向西南为主,平均高潮位 237 cm,平均低潮位 62 cm。沿海岸线海水较为清澈,透明度在 40~320 cm 之间,海水盐度 32‰ 左右,pH 值 8.1,显弱碱性。全市年平均气温 12.1~13.4 °C,近十年极端最高温 39 °C,最低温 -19.8 °C。沿海地区年平均风速 4~6 m/s,瞬时最大风速达 32 m/s。全市历年平均相对湿度为 66%~70%,属于半湿润地带。

烟台是我国典型的海岸带城市,工业发达,同时有众多的桥梁、港口码头、旅游娱乐等基础设施,输油、供热、供气、给排水等各类管线,化工、食品、船舶重工等各类工业企业等,所涉工程或设施造价极大,设计使用寿命一般几十年到上百年,是极其重要的国家资产。这些设施通常为钢结构和钢筋混凝土结构,都存在着腐蚀安全隐患。因此,针对烟台市重点领域开展腐蚀及其防护状况的调查,对了解烟台市的腐蚀状况,确保重点工业和公共设施长期、有效、安全运行具有极其重要的意义。

1 烟台各行业腐蚀情况调研结果

1.1 腐蚀调研总体情况

本次调查参照国内外调查经验^[12,13],结合烟台市的实际情况,采用问卷调查与实地调查相结合、典型部位调查与统计相结合的方法。调查共取得了烟台市重点领域 88 个调查对象的腐蚀数据,调查范围涉及桥梁(40 座)、港口码头(3 个)、市政管网(12 家)、工业企业(13 家)、旅游娱乐(20 个)等多个领域。

运用相机、测厚仪、钢筋位置测定仪、钢筋锈蚀仪及电火花检漏仪等便携式专业仪器设备对所涉钢结构及钢筋混凝土结构的腐蚀情况进行了外观普查,对典型部位的防护漆膜厚度、钢筋混凝土保护层厚度、腐蚀电位及防护漏点个数/面积等进行了测量,掌握了烟台市各领域典型设施腐蚀状况的一手数据。

1.2 桥梁的腐蚀状况

受环境因素影响,烟台市的桥梁大多为梁桥、拱桥、梁拱组合桥,还有少数的悬索桥及其他类型组合桥。桥梁设施所涉及的主要结构为钢筋混凝土结构及钢结构。所有被调查桥梁的钢筋混凝土结构均出现不同程度的蜂窝麻面、裂缝、锈斑、脱落漏筋、锈胀开裂等现象,甚至连刚刚建成尚未通车的桥梁也不例外,腐蚀电位梯度差均在 100 mV 以上(发生腐蚀的概率为 20%),47% 的桥梁腐蚀电位在 150~200 mV 之间(发生腐蚀的概率为 50%),17.6% 的桥梁腐蚀电位差在 200 mV 以上(发生腐蚀的概率在 80%),部分桥梁腐蚀电位差甚至在 250 mV 以上。桥梁的附属结构如防水系统、护栏、路灯、螺栓螺母等钢结构设施均出现不同程度的锈蚀,防护漆膜变薄或破损。

1.2.1 跨海桥梁 由于烟台特殊的地理位置,跨海大桥成了烟台的一道靓丽风景线。2012 年建成的 DZW 大桥和 2004 年建成的 YMD 大桥是烟台两座典型的跨海大桥,各个部位如桥柱、桥台、桥板、桥梁、桥面上护栏或路基护坡均存在蜂窝麻面、锈斑、脱落露筋、锈胀开裂等腐蚀现象。DZW 跨海大桥因为年限较短,蜂窝不足 10%,腐蚀电位差低于 150 mV,漆膜厚度相对极差低于 0.5,螺栓螺母有少量锈蚀;而 YMD 跨海大桥桥柱蜂窝高达 90% (图 1a),腐蚀电位差也在 200 mV 以上,漆膜厚度相对极差达 0.8,螺栓螺母锈蚀率在 60% 以上。海水、海风对跨海大桥的影响也较大,如 YMD 跨海大桥部分浸入海水的路基护坡损坏严重,甚至完全破碎,如图 1b 所示;浸入海水中的桥柱多有海洋生物附着,如藤壶、牡蛎、贻贝等;靠海一侧即近海侧的设施明显要比内陆侧腐蚀严重,如跨海大桥 A,锈斑、脱落露筋等大部分分布在近海侧桥柱上。

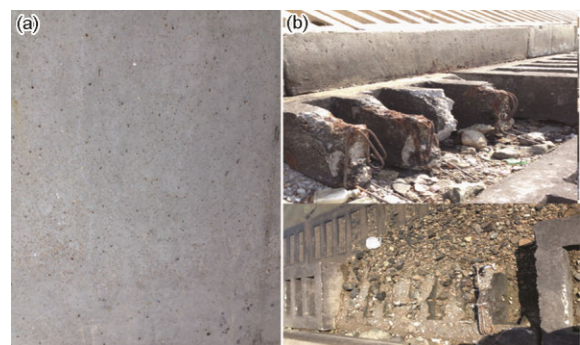


图 1 YMD 跨海大桥的腐蚀现象

Fig.1 Corrosion phenomena on piers (a) and embankment with crushed-rock slope protection (b) in YMD cross-sea bridge

1.2.2 跨河桥梁 烟台市河流众多,因此存在诸多的跨河桥梁。靠海近的桥梁,由于海水的倒灌,使得河水中海洋生物丰富,因此浸入水中的桥柱或墩台基础上附着有大量的污损生物,如藤壶、贻贝、牡蛎等。随着离海的距离越来越远,海洋生物的附着量逐渐减少,直至没有。例如,滨海路跨河大桥(距离海边约50 m)的桥柱上附着有大量藤壶、贻贝等污损生物,荣乌高速跨河大桥(距离海边约1 km)的桥柱上也有藤壶附着,但S302线跨河大桥(距离海边约3 km)的桥柱上没有任何污损生物附着,详见图2。从腐蚀程度上看,离海近的桥梁腐蚀相对较为严重,如滨海路跨大桥与荣乌高速跨大桥相比,虽然滨海路跨河大桥建成时间比荣乌高速跨河大桥晚10年左右,但其蜂窝面积比率、腐蚀电位差均高于后者,桥面护栏的漆膜破损较之后者也更为严重。

1.2.3 立交桥 随着烟台市经济的飞速发展,立交桥越来越多。受烟台市海洋环境气候的影响,这些立交桥均出现不同程度的腐蚀现象。桥台和桥柱因为承重较多,一般是所有结构中腐蚀最为严重的部位,如ZF立交桥的桥台蜂窝高达90%(图3a),

腐蚀电位差高于150 mV;FS立交桥桥柱蜂窝达80%,腐蚀电位差达150 mV。立交桥上安全护栏一般为组合式护栏,底部是钢筋混凝土结构,其中钢筋混凝土结构部分都出现不同程度的蜂窝麻面,主要集中在底部(图3b);上部是钢结构,其上的螺栓螺母也出现了不同程度的锈蚀,有的锈蚀率高达100%。此外,靠近海边的立交桥腐蚀较为严重,如ZFD立交桥、HHL立交桥、JGZ立交桥、YTSN立交桥,均较内陆同期建设的桥梁腐蚀更为严重,这几座桥的腐蚀电位差大多都在150 mV以上,护栏漆膜破损严重,相对极差高达1.3,其螺栓螺母等小配件的锈蚀率也很高。

1.3 港口码头腐蚀状况

受烟台地区气候、潮汐、海水盐度、运输情况等多重因素的影响,YTW港、LK港、ZHLZ港等港口码头腐蚀现象较为普遍,所有被调查港口码头上的钢筋混凝土结构均出现不同程度的蜂窝麻面、裂缝、锈斑、脱落漏筋、锈胀开裂等现象,腐蚀电位差大部分在100~200 mV之间(腐蚀概率为20%到50%)。港区混凝土支座出现最多的是蜂窝病害,如YTW港计量区的油管支座、ZHLZ港输油管的支座,其他近海

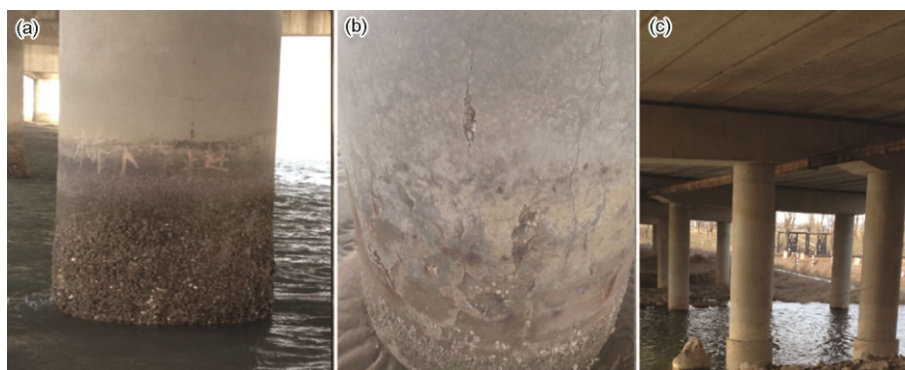


图2 3种路上跨河大桥桥柱上污损生物附着情况

Fig.2 Biofouling on the piers of river crossing bridges on Binhai road (a), Rongwu expressway (b) and S302 road (c)



图3 ZFD立交桥桥台和护栏上的蜂窝

Fig.3 Honeycomb on abutment (a) and guardrail (b) of ZFD flyover

或海上设施出现不同程度的蜂窝麻面、裂缝、锈斑、脱落漏筋、锈胀开裂等病害,如LK港的百年栈桥码头(图4a)、ZJ的泰山吊等,从外观上看,近海或海上设施腐蚀更为严重,腐蚀电位差可达150 mV以上。钢结构设施如输油管线、装卸设备、海上平台等均出现不同程度的锈蚀,防护漆漆膜变薄或破损,严重的腐蚀漏点检出率甚至高达100%,如ZHLZ港的门座起重机、ZJ的小船坞等。此外,一些螺栓螺母等小部件的锈蚀更加严重,如YTW港变电站的螺栓螺母、ZHLZ港起重机上的螺栓螺母,锈蚀率同样高达100%(图4b,c)。

1.4 市政管网的腐蚀状况

为满足人民生活需要,烟台市地上、地下遍布各类管网。这些管网设施上钢筋混凝土结构主要为墙壁、支座(支柱)、工艺池等,均出现不同程度的蜂窝麻面、裂缝、锈斑、脱落漏筋、锈胀开裂等现象,腐蚀电位差大部分在100~200 mV之间;钢结构设施如给排水管线、供电管线、供热管线、供气管线、螺栓螺母、阀门、泵体、钢支架等均有不同程度的锈蚀,防护漆漆膜变薄或破损,漆膜厚度相对极差甚至达到2.0以上,如福山区某小区地下室换热站及某供热公司地下管道及螺栓螺母均出现此类现象。

从腐蚀程度上分析,地下管道的锈蚀比地上严重,主要因为烟台地下水含盐分较高,土壤潮湿等,例如,开发区某热力公司地面管道总阀(1994年)与地下管道阀门(2015年)相比,前者已使用二十余年,漆膜相对厚度极差却远小于后者;芝罘区某热力公司地下运行8 a、3 a左右的管道、阀门与地上运行10 a左右的管道、阀门相比,锈蚀程度要大得多(图5)。

1.5 工业企业的腐蚀状况

烟台企业内部设施受海岸环境及企业生产环境的影响,腐蚀现象普遍,各类企业腐蚀程度不一。所有被调查企业内部的钢筋混凝土结构均出现不同程度的蜂窝麻面、裂缝、锈斑、脱落漏筋、锈胀开裂等现象,化工类相对较重,运行2 a左右,腐蚀电位差就达到150 mV以上;企业的钢结构设施,如蒸馏塔、反应罐等生产装置,输送水、气、溶剂等的管线,起重机、铲车等小工具,螺栓螺母、阀门等配件,钢架支座等均出现不同程度的锈蚀,防护漆漆膜变薄或破损,有70%以上的管线漆膜厚度相对极差在1.0以上,化工类企业最高的甚至超过2.0。

1.6 旅游娱乐设施的腐蚀情况

烟台市是重要的旅游城市,所有被调查的旅游



图4 港口码头的腐蚀情况

Fig.4 Corrosion phenomena in LK (a), YTW (b) and ZHLZ (c)



图5 烟台某供热公司地下管线运行3和8 a,地上管线运行10 a的锈蚀情况

Fig.5 Corrosion situation of the underground pipelines working for 3 a (a) and 8 a (b), the overground pipelines working for 10 a in a heating power company

休闲娱乐设施中的钢筋混凝土结构如墙壁、支座(支柱)、栈桥等,均出现不同程度的蜂窝麻面、裂缝、锈斑、脱落漏筋、锈胀开裂等现象,如开发区某栈桥桥面上楼梯处,蓬莱某景区临海顶板等(图6);腐蚀电位差均在100 mV以上,部分桥梁腐蚀电位差甚至高达500 mV。该行业领域内的钢架结构如支架、座椅架、体育器材、灯杆、娱乐设施、护栏、铁门、淋浴房等,普遍出现漆膜变薄或破损,腐蚀漏点检出率甚至高达100%,例如芝罘区某公园激流勇进水下轨道、蓬莱某景区索道支柱爬梯等。

从腐蚀程度上分析,调查对象所处位置对腐蚀状况影响极大,如某博览中心的室内钢架和室外钢架,室内钢架10年未维护,漆膜依然完好,室外钢架2015年进行防护,重新涂装防护漆,漏点个数依然比室内高。近海或海上设施依然腐蚀最为严重,如蓬莱某景区的东北和西北两个方向的顶板、承重柱等,腐蚀均较为严重,出现大面积的脱落露筋(图6),腐蚀电位差最高可达500 mV。

2 烟台市重点领域腐蚀损失分析

本次调查只针对烟台地区,通过调查问卷、面对面咨询及文献调研等方式取得了各领域的腐蚀损失和防护费用,因此采用Hoar法^[13-15]对该市的腐蚀损失情况进行评估。

根据各类企业的腐蚀成本平均比值、烟台市各类企业的数量比值及烟台市工业企业的年总产值,估测烟台市工业企业的腐蚀损失为1,338,279.8万元;根据国际腐蚀数据、烟台市国民生产总值、桥梁腐蚀占总腐蚀比例及钢筋锈蚀有关损失占总腐蚀的比例,再考虑烟台市海岸带环境的影响,估测桥梁、码头等建筑设施的年腐蚀损失为963,308.8万元;根据烟台市各类管道腐蚀损失数据、各类管网长度及市总人口,估算烟台市政管网的年腐蚀损失为28,641.9万元;参照已调查过的旅游景区的腐蚀损失数据及烟台市年旅游收入值,估算烟台旅游业的年腐蚀损失为24,105.9万元。根据各类腐蚀损失数据及



图6 某景区东北和西北承重柱、顶板的锈蚀情况

Fig.6 Corrosion situation of the piers and roof in northeast (a) and northwest (b) of a scenic spot

烟台市年国民生产总值,估测烟台市年腐蚀损失为2,354,336.4单位万元,约占国民经济总值的3.9%,统计结果见表1。与近年其他国家及国内其他地区的调查对比,我市的腐蚀损失占国民生产总值的比例高于此次全国的调查结果3.34%^[16],也高于1998年美国的调查结果(2.76%)^[17],低于1999年柯伟等^[12]的调查结果(6%)。

3 腐蚀原因分析

本次调查涉及烟台市各类桥梁、港口码头、市政管网、工业企业、旅游娱乐等重点领域88个调查对象,导致这些设施出现腐蚀的原因十分复杂,唯一肯定的是烟台市特殊的地理位置和气候环境是重要的原因,现对其原因逐一探究。

3.1 盐度

海水最大的特点就是盐度高,而盐度是发生腐蚀最大的助力之一^[4,7,10]。烟台市的河流大多起源于内陆,最终汇入大海,这就造就了烟台市河流独有的特点——盐分含量的梯度变化,而盐度直接影响腐蚀的速度。这就造成离海近的跨河桥梁的腐蚀速率要比离海远的快,腐蚀现象也更为严重。此外,离海近的河流区域容易与海水发生交换,海洋生物聚集,

表1 Hoar方法调查结果

Table 1 Survey results obtained by Hoar method
(unit: Ten-thousand Yuan)

行业	腐蚀损失
工业企业	1,338,279.8
建筑业(桥梁、港口码头)	963,308.8
市政管网	28,641.9
旅游休闲娱乐	24,105.9
合计	2,354,336.4
占国民经济总产值的比例	3.9%

因此容易造成污损生物附着于浸入水中的桥柱或墩台基础上。

3.2 潮汐

潮汐河也是烟台市河流的一大特点。涨潮时,河口水量上涨,且盐分增加;退潮时,河口水量下降甚至断流,干湿交替的环境,也是烟台市近海桥梁发生腐蚀的一个重要原因。

3.3 气候

烟台地处海岸带地区,全市历年平均相对湿度为66%~70%,属于半湿润地带,且由于海水入侵,使得土壤盐碱度提高,也导致了埋地管线腐蚀速度的

加快^[6]。海水的挥发导致大气中盐分增加,因此该地区所有户外设施的腐蚀状况都较同等条件下内陆地区要严重的多。

此外,烟台市是著名的“雪窝”,冬季降雪量大,频率高,为保证道路畅行,会使用大量的融雪盐进行融雪,这也导致烟台的桥梁护栏底部钢筋混凝土部位腐蚀严重。

3.4 腐蚀防护现状

目前烟台市的腐蚀防护措施仍以传统防腐方法为主,如增大混凝土保护层厚度、涂刷防腐涂料等,先进的防护方法,如表面处理、缓蚀剂、电化学防护等方法应用较少。这就造成许多本可以避免或者减缓发生的腐蚀现象仍照旧发生了。

4 腐蚀防护结论与建议

通过对烟台市重点领域腐蚀防护状况进行调查,发现目前针对沿海桥梁及其他钢筋混凝土设施的防护已逐渐展开,如烟台市政养护管理处对部分腐蚀严重的桥梁墩柱进行加固,涂刷防护漆等;蓬莱八仙渡景区通过填放防浪锥、浇筑防护堤等方式防止海浪侵蚀,减缓腐蚀;工业企业逐渐开始重视腐蚀防护工作,如烟台万华、万润、泰和新材料,都已采用不锈钢管道输送化学药剂,输水管道内壁和外壁均进行了特殊处理,以降低腐蚀发生的概率;少数大型企业,如烟台万华设有专门的腐蚀监测机构,配备专业人员,定期对管道进行检测,一旦发现问题立即做出反应;近两年来,多家燃气、热力、供电、自来水、污水处理等市政管网类企业都在对管道进行升级换代,大量铸铁管、无缝钢管、螺旋钢管、PE管等新型管材被投入使用,防腐能力增强。

通过对烟台市重点领域腐蚀及防护状况进行调查,发现各行业领域腐蚀现象普遍较内陆地区严重,且该市目前的腐蚀防护措施仍以传统防腐方法为主,先进的防护方法应用较少。针对这些问题,提出以下几条建议:

(1) 加强领导,提高防腐意识,像关注水污染、雾霾一样关注腐蚀问题;

(2) 制定政策,注重设计、建设初期的腐蚀防护工作及后期的监、检测工作,可给予必要的政策引导、财政扶持和技术服务;

(3) 加强部门协调,实现部门间互通有无,联动管理,设立专门监、检测机构,或委托第三方专业机构,定期检测,发现问题及时修复;

(4) 加强腐蚀研究,开发出有效、低成本的防护技术,建立方便快捷的检测方法,降低监、检测及腐

蚀防护的成本。

参考文献

- [1] Ke W. Progress in public inquiry concerning corrosion in Chinese industrial and natural environments [J]. *Corros. Prot.*, 2004, 25: 1
(柯伟. 中国工业与自然环境腐蚀调查的进展 [J]. 腐蚀与防护, 2004, 25: 1)
- [2] Gu C X, Xia R, Zhu G J, et al. Study on corrosion of marine microbial of stainless steel [J]. *Ship Eng.*, 2017, 39(10): 57
(顾彩香, 夏瑞, 朱冠军等. 不锈钢海洋微生物腐蚀研究 [J]. 船舶工程, 2017, 39(10): 57)
- [3] Li D L, Fu G Q, Zhu M Y. Corrosion characteristics of low-carbon steel in hot and humid industrial-marine atmosphere [J]. *Chin. J. Eng.*, 2017, 39: 739
(李东亮, 付贵勤, 朱苗勇. 低碳钢在湿热工业海洋大气中的腐蚀特征 [J]. 工程科学学报, 2017, 39: 739)
- [4] Chen H J, Peng W L. Analysis of influence factors of marine environment on railway bridge project cost [J]. *Rail. Eng. Technol. Econ.*, 2018, 33(5): 16
(陈洪军, 彭伟力. 海洋环境对铁路桥梁工程造价影响因素分析 [J]. 铁路工程技术与经济, 2018, 33(5): 16)
- [5] Qi P, Zhang D, Wang Y, et al. Microbiologically influenced corrosion and protection of steel structure in wharf [J]. *Equip. Environ. Eng.*, 2018, 15(10): 45
(戚鹏, 张盾, 王毅等. 码头钢结构的微生物腐蚀及其防护 [J]. 装备环境工程, 2018, 15(10): 45)
- [6] Bai X. Investigation of soil corrosion in buried cables in China [J]. *Total Corros. Contr.*, 2017, 31(10): 49
(白雪. 我国地理电缆土壤腐蚀现状调查 [J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(10): 49)
- [7] Zhang X, Liu W H, Dai Q, et al. Corrosion and protection of oil and gas gathering pipeline in marine environment [J]. *China Energy Environ. Prot.*, 2018, 40(1): 87
(张旭, 刘卫华, 戴茜等. 海洋环境中油气集输管道的腐蚀与防护 [J]. 能源与环保, 2018, 40(1): 87)
- [8] Ma Y F. Investigation and analysis of corrosion mechanism of heavy oil catalytic cracking unit [J]. *Petro-Chem. Equip. Technol.*, 2018, 39(1): 50
(马云飞. 重油催化裂化装置重点腐蚀部位现状调查与腐蚀机理分析 [J]. 石油化工设备技术, 2018, 39(1): 50)
- [9] Tian Y, Zhang K. Investigation and analysis on the corrosion of X80 steel in the Changqing long oil and gas pipeline [J]. *Yunnan Chem. Technol.*, 2018, 45(7): 16
(田源, 张库. 长庆长输油气管道X80钢腐蚀调查分析 [J]. 云南化工, 2018, 45(7): 16)
- [10] Wang W, Wang L, Bi J Z, et al. Corrosion investigation and protections of concentrated seawater [J]. *Total Corros. Contr.*, 2016, 30(12): 74
(王伟, 王亮, 毕金柱等. 浓海水管道腐蚀调查与防护 [J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(12): 74)
- [11] Zhao Y Q. Survey and summary of corrosion situation of water tank structure in a sewage treatment plant [J]. *Spec. Struct.*, 2016, 33(5): 1

- (赵远清. 某城市污水处理厂水池结构腐蚀状况调查及分析 [J]. 特种结构, 2016, 33(5): 1)
- [12] Ke W. China Corrosion Investigation Report [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 9
(柯伟. 中国腐蚀调查报告 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 9)
- [13] Department of Trade and Industry. Report of the committee on corrosion and protection [R]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1971
- [14] Uhlig H. The cost of corrosion to the United States [J]. Corrosion, 1950, 6(1): 29
- [15] Payer J H, Boyd W K, Dippold D G, et al. NBS-Battelle cost of corrosion study (70 billion!), Part 1-7[J]. Mater. Perform., 1980, 19: 34
- [16] Hou B R, Lu D Z. Corrosion cost and preventive strategies in China [J]. Bull. Chin. Acad. Sci., 2018, 33: 601
(侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略 [J]. 中国科学院院刊, 2018, 33: 601)
- [17] Koch G H, Brongers M P H, Thompson N G, et al. Corrosion cost and preventive strategies in the United States [R]. Report FHWA-RD-01-156. Houston: NACE International