

专题——材料腐蚀损伤的监测技术与结构完整性管理

市政常见金属结构大气腐蚀防护方法及薄弱环节调查

黄彦良^{1,2,3}, 许勇^{1,2,3,4}, 杨丹^{1,3,4}, 张琦超^{1,3,4}, 王文成^{1,3,4},
路东柱^{1,2,3}, 杨黎晖^{1,2,3}, 王秀通^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室
海洋腐蚀与防护开放工作室, 山东 青岛 266237; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 文中对山东省17个市的常见市政金属结构的大气环境腐蚀防护现状进行了现场调查, 分析了防护方法失效的原因。地理位置、温度、污染物、应力、焊接等因素直接或间接影响腐蚀防护的效果, 氯离子沉积和大气污染是加速大气腐蚀防护失效的主要因素。防护方法的合理选择和防护方案的设计对于延长金属结构的使用寿命有重要作用。部分设施虽采用了较好的防护措施, 但忽略了薄弱环节导致失效。其中, 螺栓的腐蚀防护是一个薄弱环节, 情况较为普遍。

关键词: 金属结构; 大气腐蚀; 防护方法; 现场调查

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.04.001

中图分类号: TG172.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)04-0001-07

On Site Investigation on Atmospheric Corrosion Prevention Methods and Overlooked Aspects of Municipal Common Metal Structures

HUANG Yan-liang^{1,2,3}, XU Yong^{1,2,3,4}, YANG Dan^{1,3,4}, ZHANG Qi-chao^{1,3,4}, WANG Wen-cheng^{1,3,4},
LU Dong-zhu^{1,2,3}, YANG Li-hui^{1,2,3}, WANG Xiu-tong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Marine Environment of Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071, China;
3. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: In this paper, the atmospheric corrosion protection status of common municipal metal structures in 17 cities of Shandong province was investigated, and the reasons for the failure of some protection methods were analyzed. Geographical location, temperature, pollutants, stress, welding and other factors affect the corrosion protection directly or indirectly. The deposition of chloride ions and the adsorption of air pollutants are the most important factors accelerating the failure of atmospheric corrosion protection methods. The reasonable selection of protection methods and the design of protection schemes are

收稿日期: 2018-07-23; 修订日期: 2018-08-23

Received: 2018-07-23; Revised: 2018-08-23

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2017GSF217010)

Fund: Key R & D Projects of Shandong Province (2017GSF217010)

作者简介: 黄彦良 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: HUANG Yan-liang (1966—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: corrosion and protection.

very important for prolonging the service life of metal structures. Good protective measures were taken for some facilities, but they failed for neglecting of weak portions. Among them, the corrosion protection of bolts is a common problem that did not receive proper attention.

KEY WORDS: metal structure; atmospheric corrosion; protection method; onsite investigation

钢铁材料在大气环境下将遭受腐蚀破坏,影响工程结构的安全^[1-6],同时也使观赏性下降,因此,一般需对其进行保护^[4]。据统计,材料腐蚀成本占国民生产总值的 3.34%^[7],其中因大气腐蚀造成的经济损失约占总腐蚀损失的 1/2 以上^[8]。正因为如此,大气腐蚀防护就显得十分重要。GB/T 20852—2007《金属和合金的腐蚀大气腐蚀防护方法的选择导则》^[9]指出,可通过降低环境的腐蚀性、防腐蚀设计、选择合适的材料和采用合适的防护层覆盖产品对大气腐蚀进行防护。关于大气腐蚀性,美国曾在 523 个城市进行为期 25 年的大气腐蚀调查,绘制了大气腐蚀图^[10]。英国^[11]、澳大利亚^[12]、新西兰^[13]等国均开展过较大范围的区域性大气腐蚀调查。我国台湾省也开展过较详细的大气腐蚀调查。我国大陆在 20 世纪 80 年代后期陆续有以大气腐蚀性为主题的调查工作开展。先后在辽宁、海南、贵州、山东以及其他部分地区开展了大气腐蚀性调查工作^[14-19]。由于市政设施所处的环境为自然大气腐蚀环境,是一种自然属性,一般无法或很难通过降低腐蚀性来进行防腐蚀。可选择的防腐蚀措施有防腐蚀设计、选择合适的材料和采用合适的防护层覆盖产品。在设计和材料确定后,一般是通过防护层进行保护,也是一种主要的防护方式。近几年来,关于防护层,在无机富锌涂层^[20]、55%Al-Zn-Mg 涂层钢^[21]、喷涂铝涂层^[22]、环氧镀锌双涂层^[23]、氧化聚合型覆盖防腐技术^[24]、石墨烯重防腐涂层^[25]、等离子喷涂 FeCr 纳米复合涂层^[26]、超疏水涂层^[27]、新型绿色溶剂环氧涂料^[28]、钝化处理^[29]等方面开展了

较详细的研究。这些防护方法在大气腐蚀防护方面有潜在的应用价值。文中对山东省 17 个市市政常见的栏杆、指示灯杆、照明灯杆、指示牌、信号塔等的腐蚀情况进行了调查,了解大气腐蚀防护措施的应用情况、与防护方法研究推广的联系、存在的问题,提出了改进建议。

1 材料选择

从调查的山东省 17 个城市市政设施金属材料的使用来看,主要分为碳钢和不锈钢两类。碳钢一般均经过保护,不锈钢在各地均有使用,一般未进行进一步保护。不锈钢被认为是一种耐蚀材料,但在实际大气环境使用过程中也发现有腐蚀发生。烟台、威海、青岛、日照、淄博的不锈钢结构均有腐蚀现象,出现较严重的腐蚀锈斑,如图 1 所示。其他各地不锈钢除局部锈斑外,未见较明显的腐蚀。从公布的各地气温和主要污染物排放情况看^[30],各地气温差别不大,温差在 2.4 °C 以内,温度应不是这些地区腐蚀较重的原因,且平均最高气温并不是这些地区。平均气温最高的为菏泽和济宁,为 15.7 °C。烟台、威海、青岛、日照不锈钢较重的腐蚀与沿海城市钢结构表面较多的氯离子沉积有关。淄博为内陆城市,从污染物的单位面积排放情况来看,淄博的 SO₂ 和 NO_x 的排放量最高,在内陆城市中它的钢结构腐蚀情况也是较重的,较重的腐蚀与较高的 SO₂ 和 NO_x 的排放量有关。



图 1 烟台、威海、青岛、日照、淄博不锈钢结构的腐蚀
Fig.1 Corrosion of stainless steel structures in Yantai, Weihai, Qingdao, Rizhao and Zibo of Shandong, China

2 碳钢的大气腐蚀防护现状

2.1 锌镀层防腐

在日照万平口海滨见到锌镀层保护的碳钢指示

牌柱,如图 2 所示。可以看到,部分锌镀层已经消耗,主要是朝向大海一侧。锌镀层除起一定的物理隔离作用外,在涂层局部破损后,还对碳钢基体起一定的阴极保护作用。由于单纯的锌镀层一般较薄,保护作用有限,如与其他保护方法(如有机涂层防腐)配合使

用，可延长使用寿命。

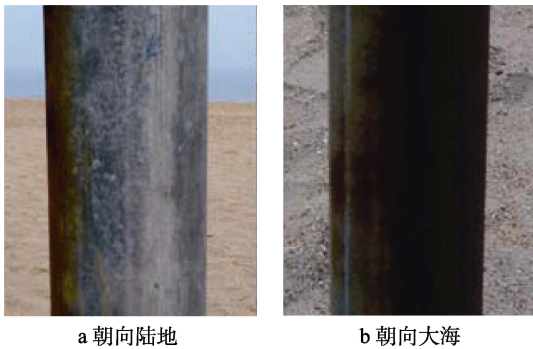


图 2 日照万平口海滨某碳钢指示牌的镀锌层防腐
Fig.2 Corrosion appearance of a galvanized steel indicator column on the beach of Wanpingkou, Rizhao: a) facing the land; b) facing the sea

2.2 涂料防腐

在碳钢的大气腐蚀防护中，涂料的使用十分普遍，在调查的 17 个城市中均大量使用。滨州和泰安银粉漆涂装的碳钢街道照明灯柱如图 3 所示。泰安和烟台街道上灯柱涂装使用的普通油漆如图 4 所示。由于涂层老化，基体金属腐蚀等原因，用涂料防腐有涂层脱落现象，如图 5 所示。

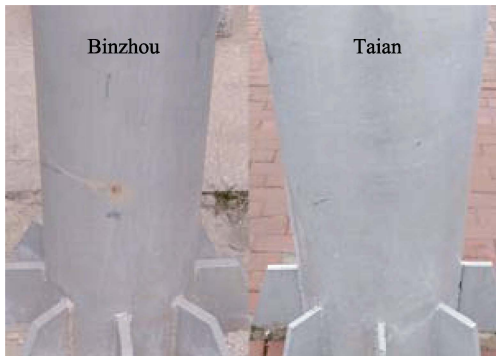


图 3 滨州和泰安街道上银粉漆涂装的街道照明灯柱
Fig.3 Street lighting lampost coated with aluminum paint in Binzhou and Tai'an



图 4 泰安和烟台街道上普通油漆涂装的街道照明灯柱
Fig.4 Street lighting lampost coated with aluminum paint in Tai'an and Yantai



图 5 枣庄滕州和济南街道上碳钢结构涂层破损情况
Fig.5 Coating damage of carbon steel structures in streets of Tengzhou of Zaozhuang and Ji'nan

2.3 包覆防腐

有些城市的某些碳钢结构采用包覆防腐。包覆的材料有玻璃钢、混凝土、不锈钢和塑料等。在滨州和东营街道上分别见到碳钢结构的玻璃钢包覆防腐和不锈钢包覆防腐（见图 6、图 7）。在青岛汇泉广场见到某碳钢结构的混凝土包覆防腐（见图 8）。在青岛黄岛区见到海滨景观碳钢锁链的塑料管包覆防腐（见图 9）。



图 6 滨州和东营街道上碳钢结构的玻璃钢包覆防腐
Fig.6 FRP coated anticorrosion of carbon steel structure in streets of Binzhou and Dongying



图 7 滨州和东营街道上碳钢结构的不锈钢包覆防腐
Fig.7 Stainless steel covered anticorrosion of carbon steel structure in streets of Binzhou and Dongying



图 8 青岛汇泉广场某碳钢结构的混凝土包覆防腐
Fig.8 Anticorrosion of a carbon steel structure by concrete cover in Huiquan Square, Qingdao

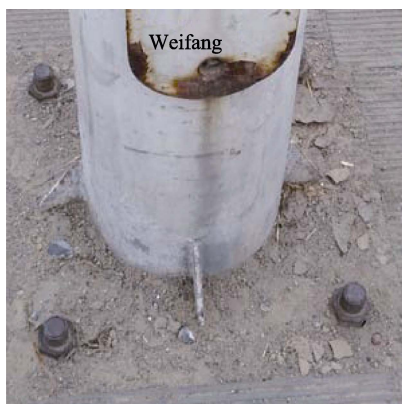


图 9 青岛黄岛区海滨景观碳钢锁链的塑料管包覆防腐
Fig.9 Plastic pipe cover anticorrosion for carbon steel chain in Seaside Landscape of Huangdao District, Qingdao

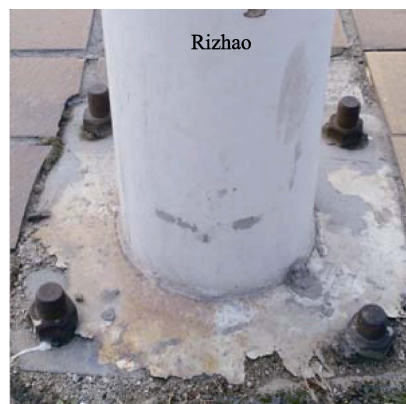
2.4 碳钢螺栓的防腐

碳钢螺栓的防腐是一个容易被忽视的部分。在调查的金属结构中,大部分碳钢螺栓没有进行保护或保护不完善。如图 10 所示,碳钢结构主体进行了涂料保护,但地脚螺栓没有得到保护,腐蚀已经比较严重。在个别地区(如济南和德州)见到地脚螺栓得到较好保护的例子,如图 11 所示,对螺栓保护的方法和主体结构保护的方法相同,均使用涂料进行保护。这种保护方法在初始阶段对螺栓能够起到一定的保护作用

用,但随着时间的推移,由于螺栓在涂料施工前,表面处理困难,涂层施工质量可能比平整表面低,导致螺栓腐蚀提早发生。图 11a 中,部分螺栓已有腐蚀发生的迹象。从图 10b 来看,螺栓周围尚残存部分涂层,表明在螺栓腐蚀之前,也曾涂刷了涂料进行防腐。图 10、图 11 说明单纯的涂料很难对螺栓进行有效保护。调查中发现,部分结构为避免螺栓的大气腐蚀,将螺栓完全埋入地下。



a 潍坊



b 日照

图 10 潍坊和日照街道地脚螺栓腐蚀
Fig.10 Corrosion of anchor bolts in streets of Weifang (a) and Rizhao (b)



a 济南



b 德州

图 11 济南和德州街道地脚螺栓的涂料防腐
Fig.11 Corrosion prevention of anchor bolts by painting in streets of Ji'nan (a) and Dezhou (b)

在德州和枣庄滕州发现有专门对螺栓进行特殊保护的情况。如图 12 所示, 德州街道部分地脚螺栓采用塑料套管灌入混凝土的方法进行保护, 表明已经注意到螺栓采用通常的涂料较难进行有效防护。枣庄滕州某信号塔底座地脚螺栓腐蚀的防护情况如图 13 所示, 螺栓上部已用塑料袋包裹油脂进行防腐。在下部混凝土底座和金属结构之间缝隙内的螺栓连接部分并未进行防腐, 腐蚀已比较严重, 有一定风险。



图 12 采用塑料套管灌入混凝土的方法防腐
Fig.12 Corrosion prevention by plastic tubes filled with concrete



图 13 枣庄滕州某信号塔底座地脚螺栓腐蚀防护情况
Fig.13 Corrosion protection for the anchor bolts of a signal tower in Tengzhou of Zaozhuang

3 大气腐蚀防护中存在的问题

使用耐蚀材料(如不锈钢)是防止大气腐蚀的措施之一。但在沿海或大气污染物排放量大的大气腐蚀性较强区域, 普通不锈钢仍有较重的腐蚀发生, 建议进行适当的防护或选用更耐蚀的不锈钢(如 316L)等。在选用不锈钢进行包覆防腐时, 建议应包覆完整, 同时使用相同的材料。如图 7a 所示, 下部没有包覆完整, 不仅下部未包覆部分发生了腐蚀, 水汽还可以通过下部的缝隙进入上部, 内部仍然可能发生腐蚀。从图 7b 可以看出, 整体施行了包覆不锈钢的防腐, 但上面安装的合页及螺钉仍然使用碳钢, 其中螺钉已经腐蚀。碳钢和不锈钢在腐蚀介质中具有不同的电位, 易发生电偶腐蚀, 使碳钢腐蚀加速。同样, 在选择不锈钢作为金属结构材料时, 螺栓也应选择不锈

钢, 否则碳钢螺栓因电偶腐蚀将加速破坏, 起不到应有的效果。如图 14 所示, 临沂沂水街道的一不锈钢结构倒伏, 其中不锈钢部分光亮如新, 但由于螺栓为碳钢, 因碳钢螺栓完全腐蚀而发生整体结构失效。包覆防腐需要注意端部的封堵, 如不封堵将引起端部金属裸露部分的腐蚀(见图 9)。不锈钢在焊接或表面有擦伤时, 在焊缝擦伤处易引起腐蚀, 如图 15 所示。因此, 不锈钢在焊接后应进行适当的处理并避免表面擦伤。



图 14 临沂沂水街道的一不锈钢结构因碳钢螺栓完全腐蚀而倒伏
Fig.14 A lodged stainless steel structure in street of Yishui, Linyi due to fully corrosion of carbon steel bolts



图 15 不锈钢在焊接或表面擦伤处发生腐蚀
Fig.15 Corrosion of stainless steel at welding points or surface scratches

如 2.4 小节所述, 碳钢螺栓的腐蚀防护是一个薄弱环节, 防腐施工要到位, 不仅要注意表面(如图 13 所示), 也要注意视线不易到达的部位, 做到全面保护。否则, 即使其他部位防腐做得很好, 结构或设施也会因薄弱处首先失效而造成整体失效。

4 结语

通过大气腐蚀防护方法调查发现, 人们已经掌握了一些基本的大气腐蚀防护方法, 如选择耐蚀材料、涂料防腐、包覆防腐等。一些地区对螺栓防腐这一薄弱环节也有一定程度的重视, 但还不够理想。一些腐蚀防护中的专业问题没能注意到, 如异种金属接触的电偶腐蚀, 在腐蚀防护中还较欠缺系统的防护设计。新近研发的防腐技术还没能很好地推广应用, 研究与应用的联系需加强。这可能与新技术工艺复杂、不利

于施工有关,也可能在新技术推广方面需要加强。不过,研发新型低成本施工工艺简单的防护技术应是大气腐蚀防护技术研发的方向。

参考文献:

- [1] CAI Y K, ZHAO Y, MA X B, et al. Long-term Prediction of Atmospheric Corrosion Loss in Various Field Environments[J]. *Corrosion*, 2018, 74(6): 669-682.
- [2] LI D L, FU G Q, ZHU M Y, et al. Effect of Ni on the Corrosion Resistance of Bridge Steel in a Simulated Hot and Humid Coastal-industrial Atmosphere[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2018, 25(3): 325-338.
- [3] 李东亮, 付贵勤, 朱苗勇. 钙处理对桥梁钢耐大气腐蚀性能的影响[J]. *电化学*, 2017, 23(6): 724-731.
LI Dong-liang, FU Gui-qin, ZHU Miao-yong. Effect of Calcium on Atmospheric Corrosion Resistance of Bridge Steel[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2017, 23(6): 724-731.
- [4] KALLIAS A N, IMAM B, CHRYSSANTHOPOULOS M K. Performance Profiles of Metallic Bridges Subject to Coating Degradation and Atmospheric Corrosion[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(4): 440-453.
- [5] GONG L H, XING Q, WANG H H. Corrosion Behaviors of Weathering Steel 09CuPCrNi Welded Joints in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2016, 63(4): 295-300.
- [6] URBAN V, KRIVY V, KREISLOVA K. Study of Corrosion Processes on Typical Surfaces of Weathering Steel Road Bridges[J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(S10): 305-310.
- [7] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
HOU Bao-rong. *Corrosion Cost in China*[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [8] 林翠, 王凤平, 李晓刚. 大气腐蚀研究方法进展[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2004, 24(4): 249-256.
LIN Cui, WANG Feng-ping, LI Xiao-gang. The Progress of Research Methods on Atmospheric Corrosion[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2004, 24(4): 249-256.
- [9] GB/T 20852—2007, 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀防护方法的选择导则[S].
GB/T 20852—2007, *Corrosion of Metals and Alloys—Guidelines for Selection of Protection Methods against Atmospheric Corrosion*[S].
- [10] OSTROFF A G. 腐蚀控制手册[M]. 王向农, 张清玉译. 北京: 石油工业出版社, 1988.
OSTROFF A G. *Corrosion control manual*[M]. WANG Xiang-nong, ZHANG Qing-yu translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988.
- [11] AILOR W H. *Atmospheric Corrosion*[M]. New York: Wiley-interscience Publication, 1982.
- [12] EADIE G R, JOHNSTON R R M. Some Atmospheric Factors Determining Corrosivity in Molburne Area[C]// *Proceedings of Australia Corrosion Conference*. Australia, 1974.
- [13] CORDNER R J. Atmospheric corrosion survey of New Zealand [J]. *Br Corros*, 1990, 25(2): 115-118.
- [14] 黄春晓, 吴维岌, 孙成, 等. 辽宁省大气腐蚀性调查——低碳钢、耐候钢暴露两年试验结果[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1993, 13(1): 19-26.
HUANG Chun-xiao, WU Wei-tao, SUN Cheng, et al. Atmospheric Corrosion Survey of Steels in Liaoning[J]. *Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection*, 1993, 13(1): 19-26.
- [15] 孙成, 吴维岌, 黄春晓. 辽宁省典型地区的大气腐蚀调查研究[J]. *全面腐蚀控制*, 1998, 12(1): 1-4.
SUN Cheng, WU Wei-tao, HUANG Chun-xiao. Investigation of Atmospheric Corrosion in Typical Areas of Liaoning Province[J]. *Total Corrosion Control*, 1998, 12(1): 1-4.
- [16] 孙成, 吴维岌, 黄春晓, 等. 辽宁省乡村大气腐蚀调查研究[J]. *全面腐蚀控制*, 1999, 13(2): 10-12.
SUN Cheng, WU Wei-tao, HUANG Chun-xiao, et al. Investigation of Atmospheric Corrosion in Typical Areas of Liaoning Province[J]. *Total Corrosion Control*, 1999, 13(2): 10-12.
- [17] 孙成, 吴维岌, 黄春晓. 辽宁城市污染大气腐蚀调查研究[J]. *全面腐蚀控制*, 2000, 14(3): 1-3.
SUN Cheng, WU Wei-tao, HUANG Chun-xiao. Investigation on the Polluted Atmospheric Corrosion in Liaoning City[J]. *Total Corrosion Control*, 2000, 14(3): 1-3.
- [18] 孙成, 吴维岌, 黄春晓. 沈阳地区大气腐蚀调查研究[J]. *环境科学与技术*, 1998, 82(3): 22-24.
SUN Cheng, WU Wei-tao, HUANG Chun-xiao. Survey of Atmospheric Corrosion in Shenyang Area[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 82(3): 22-24.
- [19] 王振尧, 陈鸿川, 于国才, 等. 海南省的大气腐蚀性调查[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1996, 16(3): 225-229.
WANG Zhen-yao, CHEN Hong-chuan, YU Guo-cai, et al. An Investigation on Atmospheric Corrosiveness in Hainan Province[J]. *Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection*, 1996, 16(3): 225-229.
- [20] NAGASAWA M, OKADA N, OTSUKA N, et al. Corrosion Process of Inorganic Zinc-Rich Painted Steel Exposed to a High-Chloride Atmospheric Environment[J]. *ISIJ International*, 2018, 58(2): 316-322.
- [21] TOKUDA S, MUTO I, SUGAWARA Y, et al. Micro-electrochemical Investigation on the Role of Mg in Sacrificial Corrosion Protection of Coated Steel[J]. *Corrosion Science*, 2017, 129: 126-135.
- [22] LI N, LI W Y, YANG X W, et al. Effect of Powder Size on the Long-term Corrosion Performance of Pure Aluminium Coatings on Mild Steel by Cold Spraying[J]. *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion*, 2017, 68(5): 1-10.

- 546-551.
- [23] BANO H, MAHMOOD A, KAZMI S A. Atmospheric Corrosion Resistance of Epoxy Duplex Coated Electro-galvanized Steel Exposed in Marine, Industrial and Urban Sites at Pakistan[J]. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 2017, 39(4): 560-571.
- [24] QIAN Zhou-hai, WANG Jing, HOU Bao-rong, et al. Oxidative Polymerization-type Covering Anticorrosion Technology for Irregularly-shaped Steel Structure[J]. *Electroplating & Finishing*, 2017, 36(2): 110-13.
- [25] 刘栓, 周开河, 方云辉, 等. 石墨烯重防腐涂层在国网输电铁塔防护的应用研究[J]. *中国材料进展*, 2017, 36(6): 442-447.
- LIU Shuan, ZHOU Kai-he, FANG Yun-hui, et al. Research on the Graphene Based Heavy Coating in Protection of Transmission Power Tower[J]. *Materials China*, 2017, 36(6): 442-447.
- [26] SHI X, SHU M Y, ZHONG Q D, et al. Investigations of Local Corrosion Behavior of Plasma-Sprayed FeCr Nanocomposite Coating by SECM[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(3): 595-604.
- [27] PAN S, WANG N, XIONG D S, et al. Fabrication of Super Hydrophobic Coating Via Spraying Method and Its Applications in Anti-icing and Anti-corrosion[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389: 547-553.
- [28] MARTI M, MOLINA L, ALEMAN C, et al. Novel Epoxy Coating Based on DMSO as a Green Solvent, Reducing Drastically the Volatile Organic Compound Content and Using Conducting Polymers as a Nontoxic Anticorrosive Pigment[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2013(12): 1609-1618.
- [29] SEMILETOV A M, CHIRKUNOV A A, KUZNETSOV Y I, et al. Improving Steel Passivation with Aqueous Solutions of [3-(2-Aminoethylamino)Propyl]Trimethoxysilane[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2015, 89(12): 2271-2277.
- [30] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- Shandong Provincial Bureau of Statistics, Shandong Survey Team of National Bureau of Statistics. *Shandong Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.