

我国湿热海上风电大气区金属重防腐涂料的性能研究

陈川¹, 黄海军¹, 王俊¹, 赵钺¹, 詹耀²

(1. 中国电器科学研究院有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广州 510663;
2. 广东明阳风电产业集团有限公司, 广东 中山 528437)

摘要: 目的 对海上风电涂料在我国湿热海洋地区的环境适应性、耐久性开展针对性研究, 积累试验数据。方法 通过对国内外共7家知名风电涂料企业大气区样板展开征集, 参考国内外相关行业测试标准及技术, 结合我国湿热海上大气环境特点, 并向风电主机企业及涂料企业征集意见, 设计并开展实验室环境模拟试验, 包括紫外老化试验、圆盘耐磨试验、中性盐雾试验等。结果 大部分企业的涂层样板耐老、耐盐雾等性能均较好, 海洋大气区涂料相对成熟, 国外企业、合资企业和国内企业的涂料上差异较小。结论 大气区涂料体系的技术相对成熟, 国外知名企业在性能市场上仍占主导地位, 但对于设计要求的15年以上使用寿命是否能够实现仍有待进一步研究。

关键词: 海上风电; 重防腐涂料; 测试评价技术

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.017

中图分类号: TJ04; TG 172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0089-06

Performance of Metal Heavy-duty Coating in Atmospheric Zone of Humid-Hot Sea

CHEN Chuan¹, HUANG Hai-jun¹, WANG Jun¹, ZHAO Yue¹, ZHAN Yao²

(1. State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510663, China;
2. Mingyang Wind power Co., Ltd, Zhongshan 411102, China)

ABSTRACT: Objective To conduct a specific study on environmental adaptability and durability of offshore wind power coatings in the humid-hot sea in our nation and accumulate research data. **Methods** Through collecting sample plates used in atmospheric zone from 7 well-known domestic and foreign enterprises of wind power coatings, referring to related test standards and technology at home and abroad, combining with the characteristics of hot and humid

收稿日期: 2015-05-24; 修订日期: 2015-06-08

Received: 2015-05-24; Revised: 2015-06-08

基金项目: 广东省中国电器院风电装备腐蚀控制关键技术院士工作站项目(2013B090400023)

Fund: The Key Technology of Corrosion Control on Wind Power Equipment Academician Workstation Project(2013B090400023)

作者简介: 陈川(1987—), 男, 四川富顺人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为产品与材料环境适应性技术。

Biography: CHEN Chuan(1987—), Male, from Fushun, Sichuan, Master, Engineer, Research focus: environmental adaptability of the product and material.

maritime atmospheric environment, and collecting opinions from the enterprises of wind power and coatings, environmental simulation tests in laboratories were designed and carried out, including the ultraviolet aging test, the disk abrasion test and the neutral salt spray test. **Results** Coating plates from most enterprises had good aging resistance, salt- and fog-resistance and other properties, the coating in marine atmosphere was relatively mature, differences in coatings of foreign enterprises, joint enterprises and domestic enterprises were small. **Conclusion** Coating system in atmospheric zone is relatively mature, the well-known foreign enterprises still occupy the leading position in the property market. Further research is needed for realization of coatings with a service life of more than 15 years.

KEY WORDS: offshore wind power; heavy-duty coating; testing and evaluation technology

涂料是保护风力发电机组塔筒等外壳在恶劣环境下运行的重要手段。相对陆上风电,海上风电的运行维护成本高出许多,因此,海上风电涂料一般都是按15年以上的服役寿命要求进行设计的。我国海域多为湿热海洋性气候,环境条件恶劣,空气温度、湿度均较高,涂层寿命其间须进行多次重涂和维护,大大增加了设备的维护成本和安全隐患。风电设备的现场再涂装极为困难,装卸、运输以及停机维修的费用高昂,远高于初次涂装的涂料本身的成本费用。目前我国海上风电涂料在湿热海洋地区的环境适应性数据缺乏,针对性的腐蚀测试评价方法与标准都尚未建立,从而无法对湿热海上风电重防腐涂料的质量进行评价与控制^[1-2]。

1 涂装工艺与涂装体系

海洋大气区涂装体系中,环氧富锌底漆的厚度由60 μm 增加到80 μm ,增强其牺牲阳极保护的能力,环氧云铁中间漆的厚度也较常规涂装厚度有所增加。考虑在高温高湿环境下延缓水汽及盐粒子的扩散速度,面漆采用一道聚氨酯面漆加一层氟碳面漆,降低成本的同时且有更好的结合力^[3]。

该项目中要求涂料企业针对湿热地区海上风电大气区涂料提供样板,为了试验具有可比性,涂层厚度统一规定为400 μm ,但对涂层体系不做要求。该项目所用的7家涂料企业包括国产企业、合资企业以及外资企业,其中厂家1—6采用的涂层体系及厚度为环氧富锌底漆80 μm +环氧云铁中间漆240 μm +聚氨酯面漆40 μm +氟碳面漆40 μm ,厂家7采用环氧富锌底漆80 μm +环氧中间漆240 μm +氟碳面漆80 μm 。

可见大部分涂料均采用了底漆(80 μm 厚度的环氧富锌底漆)、中间漆(240 μm 厚度的环氧云铁中间漆)和面漆(40 μm 厚度的聚氨酯面漆+40 μm 厚度的氟碳面漆组合)。虽然体系相同,但每个厂家所采用的组成差异、涂装工艺差别,使涂层的性能各有优劣^[4-6]。

2 测试评价方法

目前海上风电涂料的测试标准通常参考ISO 12944-6和ISO 20340—2009来进行^[7-8],文中参考以上标准,采用单因素的环境试验进行测试评价,针对我国湿热海洋环境长期高温、高湿、高盐雾的特点,主要考察海洋大气区涂料的耐候性及耐蚀性,设计试验参数。在风电企业及风电涂料企业内部开展了座谈调研,确定了单因素试验方案。其中紫外老化试验按GB/T 23987—2009中方法A执行,测试条件为UVB313,2000 h;中性盐雾试验按GB/T 1771—2007执行,测试条件为2000 h;耐磨试验按GB/T 1768—2006执行,测试条件为圆盘耐磨试验,2000转。

3 涂层厚度测量

参考GB/T 13452.2—2008中磁性法对样板进行厚度测量,采用涂层测厚仪PosiTector 6000为对涂料样板进行抽样测试^[9]。测试结果见表1。

表1 钢结构涂层样板干膜厚度

Table 1 Dry film thickness of metal coating plates

μm

编号	测量1	测量2	测量3	测量4	测量5	平均值
厂家1	432	4160	420	434	428	426.0
厂家2	422	576	530	522	564	522.8
厂家3	386	380	366	362	366	372.0
厂家4	394	384	366	382	354	376.0
厂家5	684	632	658	592	662	645.6
厂家6	544	502	530	480	468	504.8
厂家7	502	600	468	534	444	509.6

从表1中可以看出,部分厂家样板涂层总厚度相差较大,涂层厚度最大处与最小处差额高达156 μm 。其中厂家1、厂家3、厂家4涂层厚度较均匀,涂层厚度一致性较高,且与要求的400 μm 规定厚度相差较小,

其余厂家样品厚度一致性较差。

涂层厚度控制不当可能导致涂层缺陷,如第一道底漆厚度不达要求,可能导致涂层附着力下降等。同时涂装的主要成本大约有一半是涂料本身的成本,所以精确控制涂层厚度的喷涂比未能精确控制的喷涂所消耗的涂料相差约25%^[10]。

4 涂层表面圆盘耐磨试验

参考 GB/T 1768—2006,采用泰伯尔磨耗试验仪 5135,负载为 1000 g,磨轮型号为 CS-17,圈数为 2000 转^[11]。厂家 1—7 样板耐磨试验后涂层的平均质量损失分别为 0.30,0.22,0.27,0.18,0.58,0.32,0.20 g,平均减薄厚度分别为 90,64,76,74,114,88,72 μm。试验后样板如图 1 所示,所有样板均有明显划痕,但均未磨至基材。

从图 1 可以看出,厂家 1、厂家 4、厂家 5、厂家 6 和厂家 7 的样品均磨穿到中间漆部分,根据涂层减薄厚度测算,氟碳面漆均已被磨穿。结合样品磨耗程度,仅厂家 2 和厂家 3 整体耐磨性较好。涂层在磨损中会出现有选择性的磨损现象,涂料中填料的种类、粒径、含量、基料的种类、配比对涂层耐磨性影响较大^[12]。

5 荧光紫外灯耐候试验

选取每种样品的标准样板 3 块做荧光紫外灯耐候试验,试验参考 GB/T 23987—2009 中方法 A 进行试验,光源为 UVB-313,光照段为 60 ℃+4 h,冷凝段为 40 ℃+4 h 交替进行^[13]。试验设备为紫外线/冷凝老化试验箱 ATLAS UVCON,试验后参考 GB/T 1766—2008 对涂层的破坏、失光、变色、粉化、开裂、起泡、生锈、剥落进行评定^[14]。7 种试验样板破坏、粉化、开裂、起泡、

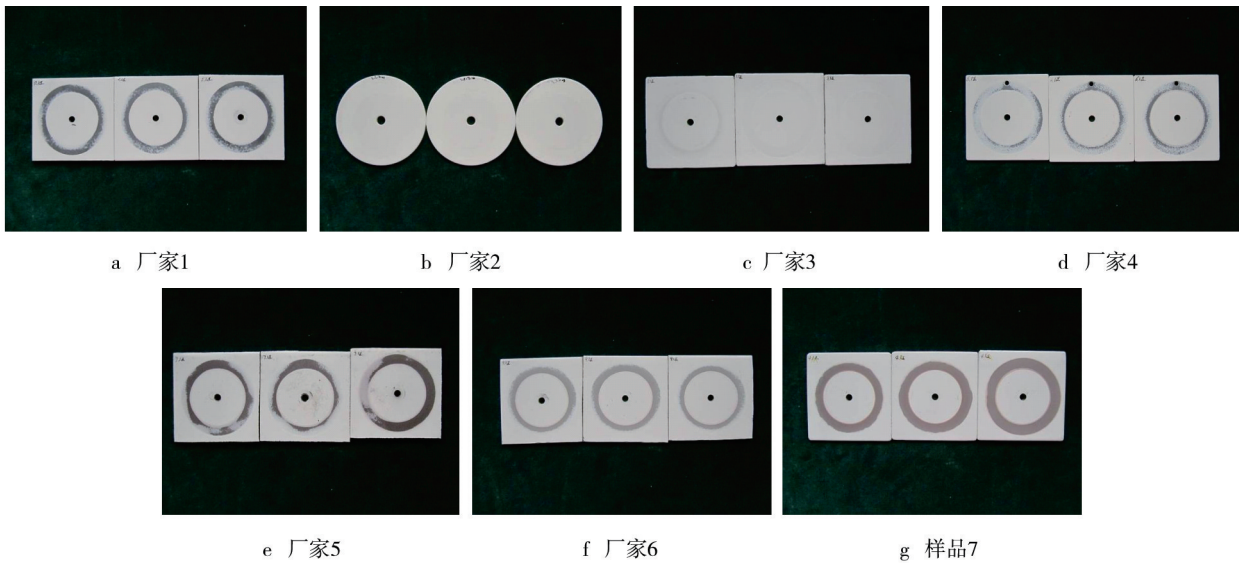


图 1 圆盘耐磨试验后样板
Fig.1 Plates after disk abrasion test

生锈、剥落等级均为 0 级,光泽、色差变化平均值见表 2、表 3。采用 X-Rite 948 分光光度计测试涂层样板光泽度,采用三角度光泽计 BYK 4430 测试涂层样板色差变化。

从表 2 和表 3 中可以看出,各个厂家的涂层样板,经人工模拟紫外老化试验后,光泽色差均略有变化,失光等级均在 1~3 级,变色等级为 0 级或 1 级。其中光泽变化方面,2000 h 紫外老化试验后的荧光紫外灯耐候试验表明,钢结构大气区涂料耐光老化性能总体良好,各个涂料厂家样板之间差异也较小。氟碳涂料较聚氨酯涂料有着更优异的耐候性,氟碳涂

料的应用大大增加了风电钢结构涂料体系中面漆耐老化的性能。

6 耐中性盐雾试验

依据 GB/T 1771—2007,对试样进行 5000 h 中性盐雾试验项目的检验。试验设备为湿热盐雾试验箱 WKNE-0185,试验温度为 35 ℃,氯化钠溶液的质量浓度为 50 g/L,pH 值为 6.5~7.2,盐雾沉降量为 1~2 mL/80 cm²/h,样品放置方式为垂直悬挂^[15]。5000 h 耐中性盐雾试验后试样照片如图 2 所示。

表2 荧光紫外灯耐候试验平均光泽变化(60°)
Table 2 Average gloss change after UV lamp test

样品 编号	初始 值	100 h取样光 泽失光率/%	250 h取样光 泽失光率/%	500 h取样光 泽失光率/%	1000 h取样光 泽失光率/%	2000 h取样光 泽失光率/%	失光 等级
1	81.8	1.7	2.8	4.2	7.2	13.6	1
2	71.7	2.1	5.0	16.7	20.2	21.8	2
3	85.4	3.9	6.8	8.1	11.0	19.1	2
4	78.4	—	0.9	1.9	9.9	12.5	1
5	81.5	5.6	7.7	7.5	8.6	12.5	1
6	74.7	5.9	7.4	8.9	8.8	9.8	1
7	63.6	13.1	14.9	19.4	20.1	22.5	2

表3 荧光紫外灯耐候试验平均色差变化
Table 3 Average color difference after UV lamp test

样品 编号	初始值			ΔE_{ab}^*					变色 等级
	L^*	a^*	b^*	100 h取样	250 h取样	500 h取样	1000 h取样	2000 h取样	
1	93.36	-0.68	2.60	0.07	1.13	1.17	1.17	1.46	0
2	91.95	-0.12	4.87	0.21	1.33	1.58	2.15	2.91	1
3	97.22	-0.90	2.22	0.27	0.81	1.32	2.03	2.45	1
4	92.85	-0.73	2.75	0.72	0.92	0.91	1.06	1.73	1
5	90.72	-0.85	-0.15	0.25	0.26	0.32	0.88	2.29	1
6	93.62	-0.88	1.36	0.43	0.61	1.21	1.27	1.92	1
7	90.29	-0.80	1.47	0.34	0.79	0.94	1.14	1.19	0

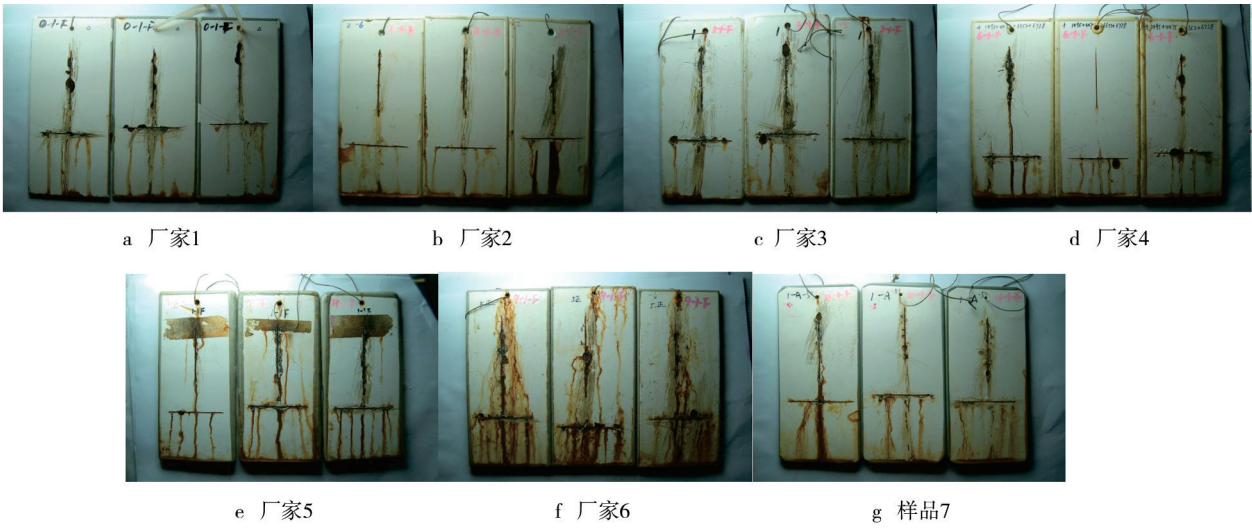


图2 涂层样板5000 h耐中性盐雾试验后样板照片
Fig.2 Plates after 5000-hour neutral salt spray test

5000 h后的取样结果表明,厂家6所有3块样板非划痕区均有直径在5 mm以上的起泡。对于划痕区,采用单边腐蚀扩展最大宽度来衡量样板腐蚀情况,如表4所示,其中厂家1、厂家3、厂家4、厂家5、厂家6,厂家7的样板均有裂纹单边扩展宽度达到5 mm,厂家6样板在非划痕区也有大面积起泡现象,只有厂家2样板腐蚀扩展程度较轻。各个厂家涂层腐蚀最大扩展度差异不明显,耐中性盐雾性能差异较小。

表4 钢结构涂层样板耐中性盐雾5000 h取样结果

Table 4 Result analysis of metal plates after 5000 h neutral salt spray test

编号	生锈	腐蚀扩展宽度		
		起泡(直径)/ mm	划痕1(竖)/ mm	划痕2(横)/ mm
厂家1	1	—	—	5
	2	—	—	3.5
	3	—	—	5
厂家2	1	—	—	1
	2	—	—	—
	3	—	—	2
厂家3	1	—	—	4
	2	—	—	5
	3	—	—	4
厂家4	1	—	—	3
	2	—	—	—
	3	—	—	2
厂家5	1	—	—	5
	2	—	—	5
	3	—	—	9
厂家6	1	—	6	4
	2	—	8.5	5
	3	—	5.5	7
厂家7	1	—	—	3
	2	—	—	3
	3	—	—	6

7 结语

我国海洋大气区金属结构防腐涂层仍沿用欧洲风电涂料体系,各个厂家的涂料样品各方面性能差异不大,但在施工工艺、涂层一致性方面仍需要严格控制,涂层耐老化性能、耐蚀性能均较好,可见我国市场上现有主流企业在海洋大气区涂料这一块较为成熟,但仍存在可以提高的空间,以满足海上风电涂料15年的设计寿命要求。

参考文献:

[1] 陈川,王俊,黄海军,等.我国东南沿海与欧洲沿海风电机组服役环境条件的差异性分析[J].装备环境工程,2013,10(5):22—25.

CHEN Chuan, WANG Jun, HUANG Hai-jun, et al. Discrep-
ant Analysis between Service Conditions of Offshore Wind
Turbine in Southeast China Coast and Europe Caost[J]. Equip-
ment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 22—25.

[2] 李慧,黄海军,王俊,等.湿热沿海地区环境条件对风电机组的影响分析[J].装备环境工程,2013,10(5):17—20.

LI Hui, HUANG Hai-jun, WANG Jun, et al. Influence of En-
vironment Conditions on Wind Generating Set in Hot and Hu-
mid Coastal Areas[J]. Equipment Environmental Engineering,
2013, 10(5): 17—20.

[3] 张晓东,王俊,黄海军,等.我国东南沿海海上风电塔架防
护涂装体系设计与评价思考[J].装备环境工程,2013,10
(5):7—10.

ZHANG Xiao-dong, WANG Jun, HUANG Hai-jun, et al.
Consideration on Design and Evaluation of Protective Coating
System for Offshore Wind Tower in Southeast Coast of China
[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 7—
10.

[4] 邓静伟,唐囡,尹桂来,等.一种高分散性富锌底漆的制备
及性能研究[J].表面技术,2013,42(6):101—105.

DENG Jing-wei, TANG Nan, YIN Gui-lai, et al. Study of
Preparation and Properties of High Dispersed Zinc-rich Coat-
ing[J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 101—105.

[5] 李赛,杨飞,李卫平,等.含氟丙烯酸聚氨酯涂层的环境失
效行为研究[J].表面技术,2014,43(6):138—143.

LI Sai, YANG Fei, LI Wei-ping, et al. Study on Failure Be-
havior of Fluorinated Polyurethane-acrylic Coatings[J]. Sur-
face Technology, 2014, 43(6): 138—143.

[6] 尹建军,石振华,马想生,等.几种涂料的防腐蚀性能研究
(II)——环氧富锌底漆锌基组成的研究[J].涂料工业,
2008,38(8):5—9.

YIN Jian-jun, SHI Zhen-hua, MA Xiang-sheng, et al. Corro-
sion Protective Performance of Coatings (II) —Study on Zinc
Ingredient in Zinc-rich Epoxy Primers[J]. Paint & Coatings
Industry, 2008, 38(8)5—9.

[7] ISO 20340, Paints and Varnishes—Performance Requirements
for Protective Paint Systems for Offshore and Related Struc-
tures[S].

[8] ISO12944-6, Paints and Varnishes—Corrosion Protection of
Steel Structures by Protective Paint Systems Part 6: Laborato-
ry Performance Test Methods[S].

[9] GB/T 13452.2—2008,色漆和清漆 漆膜厚度的测定[S].

GB/T 13452.2—2008, Paints and Varnishes—Determination of
Film Thickness[S].

[10] 卢淑芳.涂层厚度的探讨[J].现代涂料与涂装,2013,16
(7):26—28.

LU Shu-fang. Discussion on Coatings Film Thickness[J].
Modern Paint & Finishing, 2013, 16(7): 26—28.

[11] GB/T 1768—2006,色漆和清漆 耐磨性的测定 旋转橡胶砂
轮法[S].

GB/T 1768—2006, Paints and Varnishes—Determination of
Resistance to Filiform Corrosion on Steel[S].

- [12] 蔡森,王贵森,金日光,等. 影响涂料耐磨性的主要因素[J]. 材料保护,2003,36(1):15—18.
CAI Sen, WANG Gui-sen, JIN Ri-guang, et al. Factors Influencing Wear Resistance of Coating[J]. Materials Protection, 2003,36(1):15—18.
- [13] GB/T 23987—2009, 色漆和清漆 涂层的人工气候老化暴露 暴露于荧光紫外线和水[S].
GB/T 23987—2009, Paints and Varnishes—Exposure of Coatings to Artificial Weathering—Exposure To fluorescent UV Lamps and Water[S].
- [14] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S].
GB/T 1766—2008, Paints and Varnishes—Rating Schemes of Degradation of Coats[S].
- [15] GB/T 1771—2007, 色漆和清漆 耐中性盐雾的测定[S].
GB/T 1771—2007, Paints and Varnishes—Determination of Resistance to Neutral Salt Spray (Fog) [S].

(上接第75页)

- Engineering, 2002, 23(3):11—13.
- [7] 涂小珍,严楠,华琦,等. 电点火头药剂贮存失效的组分分析[J]. 含能材料,2004,12(6):346—349.
TU Xiao-zhen, YAN Nan, HUA Qi, et al. Composition Analysis on Deterioration of Electric Match Charge in Storage[J]. Energetic Materials, 2004, 12(6):346—349.
- [8] 龚继海,索卫东. 某电火头长贮失效研究[J]. 火工品,2003,6(1):22—25.
GONG Ji-hai, SUO Wei-dong. Study on Long Term Storage Invalidation of Electric Match[J]. Initiators Pyrotechnics, 2003, 6(1):22—25.
- [9] 涂小珍,韦兴文,王培,等. 电爆管失效模式及影响因素研究[J]. 含能材料,2012,20(1):117—119.
TU Xiao-zhen, WEI Xing-wei, WANG Pei, et al. Failure Modes of Electric Squib and Its Effect Factor[J]. Energetic Materials, 2012, 20(1):117—119.
- [10] 王宇翔. 电子设备元器件的防霉变技术[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009,27(2):29—32.
WANG Yu-xiang. Anti-mildew Techniques for Electronic Components[J]. Electronic Product Reliability and Environment Testing, 2009, 27(2):29—32.
- [11] GJB 150.10—1986, 军用装备环境试验方法——霉菌试验[S].
GJB 150.10—1986, Environment Test Method of Military Equipment—Mold Test[S].
- [12] 李慧艳,董超芳,邹士文,等. 霉菌对超强钢腐蚀行为的影
响[J]. 北京科技大学学报,2013,35(6):753—762.
LI Hui-yan, DONG Chao-fang, ZOU Shi-wen, et al. Effect of Mold on Corrosion Behavior of Ultra High Strength Steels [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(6):753—762.
- [13] 李霞,王友斌,丁培,等. 不同金属样品的抗菌性能研究[J]. 环境与健康杂志,2007,24(7):517—518.
LI Xia, WANG You-bin, DING Pei, et al. Institute for Environment Health and Related Product Safety[J]. Environment Health, 2007, 24(7):517—518.
- [14] 李慧艳,董超芳,邹士文,等. 超高强钢在不同单一霉菌环境中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2013,33(2):129—135.
LI Hui-yan, DONG Chao-fang, ZOU Shi-wen, et al. Corrosion Behavior of Ultra High Strength Steels in Different Single Mold Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(2):129—135.
- [15] 梁子原,林燕顺,叶德赞,等. 霉菌对金属材料腐蚀的研究[J]. 海洋学报,1986,8(2):251—254.
LIANG Zi-Yuan, LIN Yan-Shun, YE De-zan, et al. Study on Corrosion of Metal Materials by Mold[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(2):251—254.
- [16] 李历明. 环境工程、防腐与包装[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
LI Li-ming. Environment Engineering, Corrosion Protection and Packaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.