

变电站预制舱舱体不同防腐蚀材料性能评价

周继承¹, 李 浩¹, 樊俊鹏¹, 梁伟锋¹, 李家乐²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523120; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

[摘 要] 预制舱的防腐蚀性能是确保预制舱模块化变电站 40 a 使用寿命的重要指标, 所使用的腐蚀防护材料至关重要。选取了 8 种舱体防护材料, 包括: 电镀锌层、热镀锌镀层、热镀锌增厚镀层、锌铝镁镀层、氟碳漆复合涂层、石墨烯富锌涂层、热镀锌+聚氨酯双层涂层和热镀锌+聚氨酯超疏水双层涂层, 研究了基底与这些涂/镀层结合性能以及防腐性能, 以为后续变电站防腐蚀材料的选择提供参考。涂层附着力试验结果表明, 所有涂/镀层材料与基底的结合性能均较好; 中性盐雾结果表明热镀锌或者热镀锌镁铝工艺相比于电镀锌板显示出较好的耐腐蚀性, 热镀锌+聚氨酯双层涂层工艺显示出了更好的耐腐蚀性, 若赋予表面疏水性能, 则可在大幅度提高其耐腐蚀性外还具有一定的自清洁功能。

[关键词] 预制舱; 模块化变电站; 防腐蚀材料; 热镀锌涂层; 聚氨酯涂层; 性能

[中图分类号] TG174.4 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0253

[文章编号] 1001-1560(2023)10-0219-06

Performance Evaluation of Anti-Corrosive Materials for Prefabricated Cabin in Substations

ZHOU Jicheng¹, LI Hao¹, FAN Junpeng¹, LIANG Weifeng¹, LI Jiale²

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523120, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The corrosion resistance performance of prefabricated cabin is an important indicator assuring the 40 a service life of the prefabricated module cabin substation, so the selection of the anti-corrosion materials used is crucial. In this research, eight cabin protection materials (electro-galvanized coating, hot-dip galvanized coating, hot-dip galvanized thickened coating, zinc aluminum magnesium coating, fluorocarbon paint composite coating, graphene zinc-rich coating, hot-dip galvanized + polyurethane double layer coating and hot-dip galvanized + polyurethane superhydrophobic double layer coating) were selected to study the bonding performance and anti-corrosion performance between the substrate and these coatings/plating layers and had provided a reference for the selection of subsequent anti-corrosion materials for substations. The coating adhesion test results showed that all coating/plating materials had good bonding properties with the substrate; the neutral salt spray (NSS) test results showed that the hot-dip galvanized and hot-dip galvanized magnesium-aluminum process showed better resistance to corrosion than the electro-galvanized sheet. The hot-dip galvanized + polyurethane double-coating process showed better corrosion resistance. In addition, if the surface is given hydrophobic properties, its corrosion resistance can be greatly improved and it also has a certain self-cleaning function.

Key words: prefabricated cabin; module substation; hot-dip galvanized coating; polyurethane coating

0 前 言

预制舱式变电站是基于户外箱式变电站产品的成熟制造技术。相比于传统的变电站建设模式, 预制舱式变电站具有以下特点: ①建造周期短; ②占地面积小, 便于移动; ③现场工作少; ④产品质量可靠。

由于预制舱需要代替原来变电站中的二次基建房屋使用, 因此预制舱体设计的最大难题是防腐技术和

使用寿命。根据 DL 5457-2012“变电站建筑结构设计技术规程”的要求, 预制舱式变电站构架及设备最低使用年限为 25~50 a, 按最高设计年限 50 a 设计^[1], 因此对于防腐材料的选择是至关重要的。广东地处南亚热带季风气候且临海, 高温、高湿且高盐的海洋性大气环境, 容易引起大气环境腐蚀, 再加上重工业发展带来的工业环境污染大气使户外布置变电设备容易发生腐蚀和故障, 其腐蚀性远远超过我国北方大部分区域, 变电

[收稿日期] 2023-04-25

[基金项目] 广东电网有限责任公司基建技术创新课题服务项目(2021 预制舱)资助

[通信作者] 周继承(1985-), 工程师, 主要从事电网输变电工程建设, E-mail: 13686656148@139.com

站承受最严重的大气环境腐蚀作用等级应为 C5 级。为此,本工作选择 5 种传统涂镀/层(电镀锌层、热镀锌板、热镀锌增厚镀层、热镀锌+聚氨酯涂层、氟碳漆复合涂层)以及环氧石墨烯涂层、热镀锌铝镁镀层、热镀锌+超疏水涂层 3 种新涂层开展了不同涂层体系粘结强度试验和中性盐雾加速等腐蚀试验,根据中性盐雾及腐蚀失重率结果,总结出适合预制舱式变电站构架的防腐蚀方法。

1 试验

1.1 3 种新防腐涂层技术简介

(1)钢板+石墨烯富锌涂层 石墨烯具有优异的化学稳定性,对小分子具有不渗透性,具有导电性^[2]。石墨烯与有机相界面作用力较大,利用氧化石墨烯改性和还原制备在有机涂层中分散性较好的还原氧化石墨烯,可以增强石墨烯改性富锌涂层的耐蚀性能^[3]。

石墨烯/环氧富锌涂层耐蚀机理主要包含:①物理抑制,涂层中不可渗透的片状石墨烯可延长腐蚀介质到基体的渗透路径;②化学抑制,随着腐蚀介质扩散至钢铁基体表面,石墨烯起到“电桥”的链接作用,涂层中锌粉粒子与基体之间形成牺牲阳极保护作用,从而抑制腐蚀并可以达到降低 Zn 粉含量的功能^[4]。

(2)钢板+锌铝镁(HGAM)镀层 Zn-Al-Mg 合金镀层是在热浸镀技术高速发展的大环境下出现的,具有优异的耐蚀性、成型性、涂漆性^[5]。Zn-Al-Mg 镀层发生腐蚀时,MgZn₂相、Al 相会逐步发生电离,结合 OH⁻生成均匀致密的碱性锌盐、Zn-Al 或 Mg-Al 层状双金属氢氧化物膜层等腐蚀产物,降低阴极反应速率,抑制腐蚀^[6,7]。但是现在锌铝镁技术多应用于连续镀锌板带,其锌层厚度较薄,在应用于传统批量热镀锌中,不能满足 GB/T 13912“金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法”中对锌层厚度的要求。本文试验时将锌铝镁板带技术引入到批量热镀锌中,镀锌层厚度满足标准要求,而耐腐蚀大幅提高。

(3)钢板+热镀锌+聚氨酯超疏水涂层 当液滴滴在固体表面时,由于润湿性不同可以出现不同的形状。根据接触角(液滴在固液接触边缘的切线与固体平面间的夹角 θ)的大小,固体材料被分为亲水材料和疏水材料。当水接触角大于 150°的材料被认为是超疏水材料^[8,9],它是一种仿生材料,表面具有良好的自清洁性,腐蚀介质不容易残留在表面,同时,超疏水表面存在一层空气层,在超疏水涂层浸泡到腐蚀介质中时,可以阻

挡腐蚀介质的侵蚀^[10]。

1.2 涂层的制备

8 种涂/镀层,基材都选用 Q235 低碳钢板,将其裁剪成尺寸 150 mm × 75 mm × 2 mm。

1.2.1 传统涂层的制备

对于传统的涂层制备,按照表 1 厚度标准进行制备,并得到试验样品,经过测量得到以下数据。其中氟碳漆复合涂层底漆厚度为 80 μm ,中间漆厚度为 165 μm ,面漆厚度为 123 μm 。钢板+热镀锌+聚氨酯涂层的热镀锌层厚度为 83 μm ,聚氨酯漆层厚度为 90 μm 。

表 1 传统涂层试验样品厚度要求及试验样品厚度

Table 1 Traditional coating experimental sample thickness standard and experimental sample thickness

涂层	厚度标准/ μm	样品厚度/ μm
电镀锌层	3~5	3.7
钢板+氟碳漆涂层	≥ 360	368
钢板+热镀锌板	85~95	89.8
钢板+热镀锌增厚镀层	95~110	107
钢板+热镀锌+普通聚氨酯涂层	170~180	173

1.2.2 新涂层的制备

(1)钢板+石墨烯富锌涂层 制备 60%(质量分数)锌粉及 0.3%(质量分数)石墨烯含量的富锌漆,然后经过喷涂制备成钢板+石墨烯板,喷涂后在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 48 h 使漆膜固化。所制备的涂层经过 3 道喷涂后涂层厚度约为 180~190 μm 。

(2)钢板+锌铝镁(HGAM)镀层 试样采用如下工艺进行前处理:碱洗除油→水洗→酸洗除锈→水洗→锌铝镁专用助镀→烘干。

取配制好的 Zn-Al-Mg 合金锭置于石墨坩埚中加热至(450 $\pm$ 2) $^{\circ}\text{C}$ 。试样在前处理完成后进行镀锌,镀锌时间为 3 min,镀锌后采用水冷。所制备的铝镁镀层锌层厚度为 50~60 μm ,比传统的钢板+热镀锌层厚度减薄 40%以上。

(3)钢板+热镀锌+聚氨酯超疏水涂层 基材经打磨并在乙醇超声清洗 20 min 后用吹风机吹干,将超疏水粉末在机械搅拌下均匀分散至聚氨酯粉末中,直接喷涂至热镀锌层表面,经高温烘烤固化成膜,水冷后即可在热镀锌层表面成功制备超疏水聚氨酯粉末涂层。制备的聚氨酯涂层总涂层厚度在 170~180 μm ,其中锌层厚度 90~100 μm ,聚氨酯粉末超疏水涂层厚度约 70~80 μm 。

1.3 测试分析

1.3.1 结合力测试

涂层试样附着力的测试方法采用 GB/T 9286-

2021“色漆和清漆漆膜的划格试验”进行:用划格刀在涂层表面划出5×5 一共 25 个小方格,用胶布紧紧粘贴在划格处后撕开,观察划格处涂层剥离情况。

1.3.2 中性盐雾加速腐蚀试验

参照 GB/T 10125-2012“人造气氛腐蚀试验盐雾试验”进行试验,盐雾试验时间分别为 480,960,1 440 h,电镀锌样品进行 480 h 盐雾试验。

1.3.3 腐蚀失重测试

钢板+热镀锌层、钢板+热镀锌增厚以及锌铝镁镀层经过盐雾试验后,采用乙酸铵去除样品表面的白锈,与原始试样的质量进行对比,算出失重率。

2 结果与讨论

2.1 不同漆层体系附着力试验

不管是现有传统涂层制备的钢板+氟碳酸漆复合涂层,还是钢板+环氧石墨烯富锌涂层、钢板+热镀锌+普通聚氨酯涂层以及钢板+热镀锌+聚氨酯超疏水涂层,经过划格试验后,未观察到漆层剥落,附着力等级为 0 级,表明涂层与基体的结合力都较好。

2.2 中性盐雾加速腐蚀试验

(1)电镀锌板 经过 480 h 盐雾后,钢板+电镀锌板试片表面布满红锈,说明其耐腐蚀性较差。这是因为电镀锌层厚度仅有 3~5 μm 左右,在盐雾条件下,电镀锌层快速被腐蚀完,铁基体暴露后产生红锈。经过 1 440 h 盐雾后,表面已经形成非常厚的一层红锈层。因此室外的工件,不建议采用电镀锌板。

(2)钢板+热镀锌、钢板+热镀锌增厚镀层及钢板+锌铝镁镀层 经过 480 h 盐雾后,热镀锌层表面已经整体覆盖一层白锈,白锈由 Zn(OH)₂/ZnO、碱式碳酸锌、碱式氯化锌组成。随着盐雾时间的延长,镀锌层表面的白锈逐渐增多,镀锌层增厚后的镀件也存在一样的现象。经过 480 h 盐雾后,锌铝镁镀层表面大部分区域出现白色腐蚀产物,但是仍有部分区域没有覆盖白色产物,并且腐蚀产物不厚,说明在相同的盐雾时间下,锌铝镁镀层比纯锌层被腐蚀的程度更轻,锌铝镁镀层显示出更好的耐腐蚀性。与纯锌层相比,经过 960 h 和 1 440 h 盐雾的锌铝镁镀层仍然显示出更少白锈,表示出更好的耐腐蚀性。

采用乙酸铵去除样品表面的白锈,与原始试样的质量进行对比,算出失重率,结果如表 2 所示。图 1 为 3 种涂层在盐雾条件下的失重随时间的变化图,从图可以看出,钢板+热镀锌层及钢板+热镀锌增厚镀层在盐雾条件下的腐蚀速率基本一样,在前期腐蚀快一些,随

着腐蚀的进行,涂层表面覆盖的腐蚀产物增多后,适当减缓了腐蚀的发生,腐蚀速率变缓,2 种镀层的腐蚀行为基本一样。而钢板+热镀锌增厚涂层因为具有更厚的涂层,在相等腐蚀速率下,可显示出更长时间的耐腐蚀性。钢板+锌铝镁镀层的腐蚀速率更低,在盐雾条件下其腐蚀失重为纯锌层的 1/3,耐腐蚀性比传统热镀锌层的提高了 2 倍。所以对于室外的一些热镀锌件,为响应国家节能降耗的要求,可以使用锌铝镁镀层,这样在适当减薄镀层的条件下耐腐蚀性并未下降,或者与传统热镀锌层相等的镀层厚度下,可以获得更好的耐腐蚀性及更长的使用寿命。

表 2 不同镀层经不同时间盐雾的腐蚀速率
Table 2 Corrosion rate of different coatings with different time salt spray

编号	样品	腐蚀程度/(mg·cm ⁻²)		
		480 h	960 h	1 440 h
1	钢板+热镀锌板	23.62	41.28	59.11
2	钢板+热镀锌增厚镀层	22.98	42.41	60.11
3	钢板+锌铝镁镀层	8.68	16.18	22.08

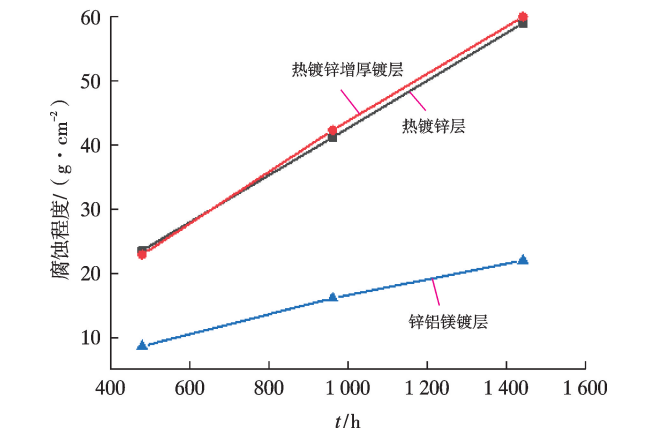


图 1 不同镀层经不同盐雾试验后的腐蚀程度
Fig. 1 Corrosion degree of different coatings after different salt spray tests

热镀锌涂层在不同环境下的首次维修寿命及耐用度如表 3 所示(参考标准 GB/T 13912)。根据表 3 可知,85 μm 的热镀锌层在 C5 大气环境下首次维护时间为 10~20 a,而 140 μm 的镀锌层的首次维护时间为 17~33 a。锌层厚度 85 μm 和 140 μm 的镀层在 C5 环境下最短首次维护时间为 10 a 和 17 a,要满足 C5 环境下 15 a 不锈蚀的要求,需要锌层厚度达到 140 μm。对于预制舱室外的一些热镀锌件,可以选择热镀锌层适当增厚的工艺,或者选用锌铝镁镀层,但锌铝镁镀层的长期耐腐蚀性需要在现实应用中验证。同时,可选择热镀锌+涂漆工艺。

表 3 热镀锌涂层在不同腐蚀环境中首次维修寿命和耐用度

Table 3 First service life and durability of hot-dip galvanized zinc coating in different corrosive environments

最小厚度/ μm	腐蚀等级 (GB/T 19292.1)							
	C3		C4		C5		CX	
	首次维修寿命/a	耐用性级别	首次维修寿命/a	耐用性级别	首次维修寿命/a	耐用性级别	首次维修寿命/a	耐用性级别
85	40~100	VH	20~40	VH	10~20	H	3~10	M
140	67~100	VH	33~67	VH	17~33	VH	6~17	H
200	95~100	VH	48~95	VH	24~48	VH	8~24	H

注 1: 寿命采用舍入到整数的数值,耐用性级别是根据首次维修寿命的最小值和最大值的平均值确定。注 2: 非常低 (VL): 小于 2 a; 低 (L): 2~5 a; 中等 (M): 5~10 a; 高 (H): 10~20 a; 非常高 (VH): 不少于 20 a。

(3) 钢板+氟碳漆涂层与钢板+环氧石墨烯涂层
钢板+氟碳漆复合涂层与钢板+环氧石墨烯富锌涂层都是以钢板为基体,且都是在钢板表面直接进行涂装,所以将钢板+氟碳漆涂层与石墨烯富锌涂层进行对比,研究两者的耐腐蚀性。钢板+氟碳漆涂层经过 480 h 盐雾后,漆层并未发生明显变化,表面无起泡、脱落等现象,划痕处出现红锈,划痕处无起泡、脱落等现象,展现

了较窄的腐蚀扩展宽度。经 960 h 盐雾后,漆层仍未发生明显变化,划痕处的红锈增多,腐蚀宽度也增加不明显。经 1 440 h 盐雾后,漆层表面无起泡、脱落等现象,划痕处的腐蚀宽度与 960 h 差异不大,表明氟碳漆复合涂层具有良好的耐腐蚀性。

钢板+环氧石墨烯富锌涂层经过 480 h 盐雾后,漆层表面出现部分红锈,这是试验时样品四周封边未封好,样品板反面的钢基体腐蚀导致。划痕处未出现鼓泡或者漆层剥落现象。经过 960 h 盐雾和 1 440 h 盐雾后,划痕处仍未出现漆层起泡或者剥落现象。

钢板+氟碳漆复合涂层与钢板+环氧石墨烯富锌涂层经过 1 440 h 盐雾后,膜层的划痕处的涂层都未发生起泡或者剥落,都保持较好的耐腐蚀性。但是石墨烯富锌涂层厚度仅约为氟碳漆涂层厚度的 1/2。考虑成本因素,采用环氧石墨烯涂层可以在保持相同耐腐蚀性的前提下节约原材料。

钢结构涂层材料的选择及 C5 环境下的防腐蚀层厚度可参照 ISO 12944.5-2018“色漆和清漆-钢结构防腐蚀保护的防护涂装体系-第 5 部分:防护涂装体系”,见表 4。

表 4 ISO 12944.5-2018 腐蚀性级别 C5 下碳钢选用涂料体系

Table 4 Coating systems for carbon steel in corrosion class C5

体系编号	底涂层				后道涂层	涂料体系		耐久性 ^{注1}			
	基料 ^{注3}	底料类型	涂层数	干膜厚度/ μm	基料类型	总涂层数	干膜厚度/ μm	短(L)	中(M)	长(H)	超长(VH)
C5.01	EP,PUR,ESI	Misc.	1	80~160	EP,PUR,AY	2	180	√			
C5.02	EP,PUR,ESI	Misc.	1	80~160	EP,PUR,AY	2~3	240	√	√		
C5.03	EP,PUR,ESI	Misc.	1	80~240	EP,PUR,AY	2~4	300	√	√	√	
C5.04	EP,PUR,ESI	Misc.	1	80~200	EP,PUR,AY	3~4	360	√	√	√	√
C5.05	EP,PUR,ESI	Zn(R) ^{注2}	1	60~80	EP,PUR,AY	2	160	√			
C5.06	EP,PUR,ESI	Zn(R)	1	60~80	EP,PUR,AY	2~3	200	√	√		
C5.07	EP,PUR,ESI	Zn(R)	1	60~80	EP,PUR,AY	3~4	260	√	√	√	
C5.08	EP,PUR,ESI	Zn(R)	1	60~80	EP,PUR,AY	3~4	320	√	√	√	√

注 1: 根据 ISO 12944.1-2017 中耐久性:短(L)表示小于 7 a;中(M)表示 7~15 a;长(H)表示 15~25 a;超长(VH)表示超过 25 a。注 2: 根据 ISO 12944.5-2018 中底漆类型:Zn(R)表示富锌底漆(指形成涂层干膜中锌粉颜料质量分数不低于 80%的底漆)的干膜厚度通常在 40~80 μm ;Misc.表示除富锌底漆外的其他底漆。注 3:EP 代表环氧,PUR 代表聚氨酯,ESI 代表无机硅酸锌漆,AY 代表丙烯酸。

依据 ISO 12944.5-2018,暴露在阳光下时,大多数环氧涂层会粉化,而聚氨脂涂料有芳香族的也有脂肪型族的。因此,在 C5 大气环境下,室外暴晒的钢结构表面涂层材料应避免选用环氧及芳香族聚氨酯作为面涂层。除了上述涂装技术,其他涂装技术也可能是适合的,如聚硅氧烷、聚天门冬氨酸酯和氟聚合物等技术。但由于没有相关技术标准,在选用时需要根据该涂层技术的相关技术指标是否符合规定的耐久性要求,来加以确定。

试验中的氟碳体系,底漆层为 80 μm 环氧富锌底

漆,达到 ISO 12944.5-2018 的推荐要求;中间漆层为厚浆型环氧云铁,厚度 160 μm ,面漆层为 120 μm 的氟碳面漆,总厚度为 360 μm ,可满足 C5 环境下长期的使用,若是需要达到超长的一个防腐效果,建议漆层再适当增厚。同时,钢板表面覆盖石墨烯富锌涂层,虽然石墨烯富锌涂层的厚度仅有 180 μm ,但去其他涂层进行了相同时间的盐雾试验后,其显示出较好的耐腐蚀性。虽然钢铁表面+石墨烯涂层的耐盐雾性能较好,但是其作为一种新的涂层技术,其长久耐腐蚀性也需在实际应用中进行认证。

(4) 钢板+热镀锌+聚氨酯涂层及钢板+热镀锌+超疏水涂层 钢板+热镀锌+聚氨酯涂层经过 480 h 盐雾试验后,聚氨酯涂层表面未发生腐蚀,在划痕处存在白锈,为划痕处裸露锌层产生的白锈。而经过 960 h 及 1 440 h 盐雾后,划痕处腐蚀宽度持续增加至 2 mm,涂层表面仍然未发生腐蚀,未出现涂层起泡及脱落现象,仅是涂层处的白锈增多。

钢板+热镀锌+超疏水聚氨酯涂层经过 480 h 盐雾后,表面存在部分的白色产物,为封边不良导致(超疏水层的存在导致胶布与漆层的结合力较差)板周边的镀锌层产生白锈而扩散到表面,漆层划痕处不存在白锈,未出现漆层起泡、剥落等现象,划痕处腐蚀宽度较窄。继续延长盐雾时间至 960 h 和 1 440 h,漆层表面无明显变化,划痕处白锈增多,漆层无起泡剥落等现象。从盐雾结果看,聚氨酯涂层及超疏水聚氨酯涂层

无明显区别,划痕腐蚀宽度为 2 mm,显示出较好的耐腐蚀性。

从前面热镀锌层的盐雾腐蚀结果可知,热镀锌具有较好的耐腐蚀性,86 μm 厚度的锌层在 C5 环境下的不维护条件下的使用寿命至少可达 10 a。可进一步提高锌层厚度,也可以在镀锌层表面再涂漆来提高耐腐蚀性。热镀锌层+涂漆层不仅减少了基材腐蚀导致漆层从内被破坏,同时隔绝了腐蚀介质与锌层的直接物理接触,达到 1+1>2 的效果,即热镀锌+涂漆层的耐腐蚀的寿命比热镀锌层的寿命加涂漆层的寿命之和还高,约 1.2~2.0 倍。

钢构件热镀锌后的涂装要求,可依据 ISO 12944.5—2018“色漆和清漆-钢结构防腐蚀保护的防护涂装体系-第 5 部分:防护涂装体系”热镀锌钢表面涂装体系,在 C5 大气环境下具体要求见表 5。

表 5 ISO 12944.5—2018 腐蚀等级为 C5 下热浸锌钢用涂料体系

Table 5 Coating system for hot-dip galvanized steel with corrosion class C5

体系编号	底涂层			后道涂层		涂料体系		耐久性 ^{注1}		
	基料 ^{注2}	涂层数	干膜厚度/μm	基料类型		总涂层数	干膜厚度/μm	短(L)	中(M)	长(H)
C5.01	EP,PUR	1	80~120	EP,PUR,AY		1~2	120	√		
C5.02	AY	1	80	AY		2	160	√		
C5.03	EP,PUR	1	80	EP,PUR,AY		2	160	√	√	
C5.04	AY	1	80	AY		2~3	200	√	√	
C5.05	EP,PUR	1	80	EP,PUR,AY		2~3	200	√	√	√
C5.06	AY, EP,PUR	1	80	EP,PUR,AY		2~3	240	√	√	√

注 1:根据 ISO 12944.1—2017 中耐久性:短(L)表示小于 7 a;中(M)表示 7~15 a;长(H)表示 15~25 a;超长(VH)表示超过 25 a。注 2:除了 PUR 聚氨酯技术外,其他涂层技术也可能是合适的,如聚硅氧烷、聚天门冬氨酸酯和氟聚合物[氟乙烯/乙烯基醚共聚物(FEVE)]。

由表 5 可知,C5 大气环境下,热镀锌层表面再涂装可选用环氧、聚氨酯或丙烯酸涂层。但是依据 ISO 12944.5—2018,暴露在阳光下时,大多数环氧涂层会粉化,而聚氨脂涂料有芳香族的也有脂肪型族的。芳香族的不推荐用作面涂层,因为它们有粉化倾向。因此,C5 大气环境下,热镀锌层表面再涂装宜选用脂肪族的聚氨酯或丙烯酸涂层,环氧涂层可作为底涂层而不作为面涂层。除了上述涂装技术,其他涂装技术也可能是适合的,如聚硅氧烷、聚天门冬氨酸酯和氟聚合物等技术。但由于没有相关技术标准,在选用时需根据该涂层技术的相关技术指标是否符合规定的耐久性要求,来加以确定。

同时,由表 5 可知,在热镀锌层表面制备一层厚度为 240 μm 的涂漆层,可以保证其超长期(VH)的耐腐蚀性。本试验中选择在镀锌层表面制备一层 100 μm 的新型聚氨酯层和超疏水聚氨酯涂层,适当减薄了涂漆层的厚度,但从盐雾结果看其仍显示出非常好的耐腐蚀性。对于其在 C5 环境下的长久耐腐蚀性也需在现实应用中进行认证。

3 结 论

(1) 对 8 种试验涂/镀层进行 1 440 h 中性盐雾性能测试,发现电镀锌板耐腐蚀性能较差,电镀锌板因锌层薄,耐腐蚀性差,不建议直接作为户外的防腐材料。其他涂层经 1 440 h 中性盐雾后被破坏程度较低,显示出较好的耐腐蚀性。

(2) 热镀锌层板具有良好的户外耐腐蚀性,但是若用于 C5 环境下,为保证其良好的耐腐蚀性,需要对镀锌层适当增厚。锌铝镁镀层比传统热镀锌层显示出更好的耐腐蚀性,针对一些耐腐蚀要求高的热镀锌件可采用此工艺,但是因锌铝镁镀层技术为新型技术,实际效果需要在现实应用中进行验证。

(3) 钢板+环氧石墨烯涂层可在减薄涂层厚度的情况下保持良好的耐腐蚀性,且在锌粉浓度较低的情况下仍然具有阴极保护效果,具有成本优势,可在一些工程中选择试用。

(4) 钢板+热镀锌+涂层显示出比热镀锌层更好的

耐腐蚀性,钢板+热镀锌+涂漆可满足 C5 环境下的耐腐蚀需求。钢板+热镀锌+超疏水涂层表面具有超疏水性,大大提高了其耐腐蚀性,同时涂层表面具有自清洁性,可使得其保持良好的涂装外观。

(5) C5 环境下的预制舱的室外结构件不建议单独使用电镀锌板加工而成,而建议对钢结构进行涂装至涂层厚度 $360\text{ }\mu\text{m}$ 或者采用热镀锌(锌层厚度大于 $140\text{ }\mu\text{m}$)或热镀锌铝镁工艺,也可使用热镀锌+涂漆的双涂层工艺。另外,预制舱的防腐可以试用一些新型涂层工艺,如石墨烯富锌涂层和超疏水涂层,以适当降低涂层厚度,节约材料。

[参 考 文 献]

- [1] DL/T 5457-2012,变电站建筑结构设计技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
DL/T 5457-2012, Technical code for the design of substation buildings and structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [2] 徐超. 基于石墨烯材料的制备及其性能的研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
XU C. Synthesis and characterization of graphene-based materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
- [3] 胡耀娟,金娟,张卉,等.石墨烯的制备、功能化及在化学中的应用[J]. 物理化学学报,2010, 26(8): 2 073-2 086.
HU Y J, JIN J, ZHANG H, et al. Graphene: Synthesis, Functionalization and Applications in Chemistry[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2010, 26(8): 2 073-2 086.
- [4] 高正源,孙程锦,杨栋,等.石墨烯及其衍生物在防腐领域中的研究进展[J]. 表面技术,2021, 50(3): 116-127.
- [5] 孔纲,王丽平,车淳山.热浸镀 Zn-Al-Mg 合金镀层的研究与应用[J]. 材料保护,2014, 47(4): 45-47.
KONG G, WANG L P, CHE C S. Current Research Status and Application Prospect of Hot-Dipped Zn-Al-Mg Alloy Coating[J]. Materials Protection, 2014, 47(4): 45-47.
- [6] DE BRUYCKER E, DE COOMAN B C, DE MEYER M. Experimental study and microstructure simulation of Zn-Al-Mg coatings[J]. Metallurgical Research & Technology, 2005, 102(7/8): 543-550.
- [7] MORISHITA M, KOYAMA K, MORI Y. Inhibition of anodic dissolution of zinc-plated steel by electrodeposition of magnesium from a molten salt[J]. ISIJ International, 1997, 37(1): 55-58.
- [8] DANUSHIKA C M, DE SILVA ROHINI M, NALIN DE SILVA K M. Double layer approach to create durable superhydrophobicity on cotton fabric using nano silica and auxiliary non fluorinated materials[J]. Applied Surface Science, 2016, 360: 777-788.
- [9] JEAN-DENIS B, SARKAR D K, JEAN P. Studies of drag on the nanocomposite superhydrophobic surfaces[J]. Applied Surface Science, 2015, 324: 525-531.
- [10] 李昊原,谷笑雨,刘丽艳,等.超疏水表面的研究进展[J]. 应用化工,2016, 45(12): 2 347-2 350.
LI H Y, GOU X Y, LIU L Y, et al. Research progress of super-hydrophobic surfaces[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(12): 2 347-2 350.

[编校:郑霞]

特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室 2023 年开放基金课题申报指南

特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室(以下简称:实验室)依托于中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司建设,2015 年获得科技部批准建设。实验室在表面保护技术领域拥有齐全的专业布局、丰富的研究手段和完善的工艺设备,已经成为材料领域的一支重要科技力量。

为推动我国表面保护领域的共性技术研究和自主创新,发挥实验室培养高层次人才的作用,产出高水平研究成果,实验室面向国内外设立开放基金课题,提供相应的科研条件及经费,立项资助与本实验室研究方向相关并具有前瞻性、创新性和实用性的研究工作,以促进本领域学科发展和技术进步。

实验室开放基金课题主要用于支持与实验室研究方向相关的科学研究,尤其鼓励开展原创性探索以及前沿

与交叉研究,根据国内外特种表面保护材料及应用技术发展趋势与研究前沿,重点支持以下 3 个技术领域的相关研究:

1.特种表面材料研究 重点资助:耐高温、耐蚀、减摩耐磨表面材料等研究方向。

2.特种表面工程装备与涂层制备技术 重点资助:航空航天、海洋、新能源、轨道交通领域特种表面工程装备与涂层制备技术等研究方向。

3.特种表面涂层可靠性评价与智能运维 重点资助:重大装备关键部件极端环境服役损伤机理、表面涂层性能评价与使役寿命预测、腐蚀/磨损在线监测与智能运维等研究方向。

对相关内容有意者请与本实验室联系:瞿凡, E-mail: qufan@rimp.com.cn, 电话:027-83641629