

热镀锌层在模拟湿热酸性大气环境中的耐蚀性研究

刘胜林¹, 孙亮², 袁毅³, 卢才⁴

1. 长安大学, 西安 710064; 2. 国网智能电网研究院, 北京 102211;

3. 国网长春供电公司, 长春 130021; 4. 国网吉林东辽县供电有限公司, 吉林 东辽 136200)

摘要: 目的 研究 Q420 钢表面热镀锌工艺中, Zn 和 Zn-Al-Ni-RE 合金镀层在酸性铜离子加速盐雾试验条件下的耐蚀性能。方法 Q420 钢表面预处理后进行热镀锌, 根据 GB 6460—1986 进行铜加速醋酸盐雾腐蚀试验, 对比纯 Zn 镀层与 Zn-Al-Ni-RE 合金镀层的耐蚀性。结果 Ni, RE 等元素的加入使镀层表面光亮, 组织更加细密。在酸性铜离子加速实验进行到 192 h 时, 纯锌镀层的腐蚀质量损失是合金镀层的 2.7 倍; 72 h 后纯锌镀层出现红锈, 120 h 后合金镀层出现红锈, 说明 Zn-Al-Ni-RE 合金镀层比纯 Zn 镀层更耐腐蚀。结论 通过适量添加 Al, Ni 与稀土元素, 能使 Q420 钢合金镀层的耐蚀性能大幅度提高。

关键词: 热浸镀; 锌铝镍稀土合金; 耐蚀性

中图分类号: TG174.443; TG172.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)02-0099-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.02.019

Research on the Corrosion Resistance of Hot Dip Galvanized Coating in Simulated Hot and Humid Acidic Atmospheric Environment

LIU Sheng-lin¹, SUN Liang², YUAN Yi³, LU Cai⁴

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102211, China;

3. State Grid Changchun Power Supply Company, Changchun 130021, China;

4. State Grid Jilin Dongliao Power Supply Company Limited, Dongliao 136200, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the corrosion resistance of hot dip galvanized pure Zn and Zn-Al-Ni-RE alloy coatings of high-strength steel Q420 under the acidic and copper accelerated salt spray corrosion condition. **Methods** On the basis of surface pre-treatment, the Q420 steel was treated by hot dip galvanizing. Copper accelerated acetic acid salt spray corrosion test was carried out according to GB 6460—1986, and the corrosion resistance of the pure Zn coating and Zn-Al-Ni-RE coating was compared. **Results** With the addition of Ni, RE and other elements, the coating surface was bright and the microstructure became finer. After 192 h, the corrosion weight loss of pure zinc coating was 2.7 times higher than the corrosion weight loss of Zn-Al-Ni-RE alloy coatings under the acidic and copper accelerated salt spray corrosion condition. Pure zinc coating showed red rust after 72 h, while Zn-Al-Ni-RE alloy coating showed red rust after 120 h, so Zn-Al-Ni-RE alloy coating was more corrosion resistant than the pure Zn coating. **Conclusion** By means of adding nickel aluminum elements and rare earth elements, the corrosion resistance of alloy coating was greatly improved.

KEY WORDS: hot-dip coating; Zn-Al-Ni-RE alloy; anticorrosion performance

收稿日期: 2014-10-24; 修订日期: 2014-12-15

Received: 2014-10-24; Revised: 2014-12-15

作者简介: 刘胜林(1975—), 男, 甘肃人, 博士, 副教授, 主要从事材料表面改性技术方面的研究。

Biography: LIU Sheng-lin(1975—), Male, from Gansu, Ph. D., Associate professor, Research focus: material surface modification.

输电线路铁塔结构件服役环境多是野外,主要承受大气环境腐蚀、工业大气环境腐蚀与海洋环境腐蚀^[1-3]。

目前对于这些结构件的防腐措施主要为热镀锌,因此,制约输电铁塔耐蚀性能的主要因素是镀层的耐蚀性能^[4-5]。热镀锌层耐腐蚀性能直接关系到输电铁塔的承载能力与使用寿命。随着我国工业的快速发展,二氧化硫等酸性气体的排放日益增多^[6],相关资料显示:在工业发达沿海某城市周围的输电铁塔由于海洋环境腐蚀与酸性工业气体腐蚀的复合作用,输电铁塔的服役寿命还达不到设计寿命的一半。

在现有热镀锌企业不进行设备改造等前提下通过在镀液中添加微量合金元素,在尽量不增加企业成本前提下就能较大幅度提高镀层在湿热以及酸性气体复合环境下的耐蚀性能这一问题的研究具有重要的意义^[7]。

文中采用热镀锌技术,在输电铁塔常用原材料Q420钢上得到Zn-Al-Ni-RE镀层,探讨其在模拟湿热与酸性大气环境中的耐腐蚀性能^[8],拟为输电铁塔的防腐提供参考。

1 实验

热镀锌基材为Q420钢,其化学成分(以质量分数计)为:C 0.20%,Si 0.55%,Mn 1.7%,P 0.045%,S 0.040%,V 0.2%,Nb 0.06%,Ti 0.2%。试样尺寸为50 mm×50 mm×2 mm。镀液成分为纯Zn和Zn-Al-Ni-Re合金两种。热镀锌工艺流程^[9]如下:预镀件→除油→水洗→除锈→水洗→助镀→烘干→热浸→冷却,热镀锌温度440℃,浸镀时间50 s。

试验分两组,每组5个试样。第一组为Q420钢浸镀纯Zn,第二组为Q420钢浸镀Zn-Al-Ni-RE合金。热镀锌层厚度为70~8 μm。

铜加速乙酸盐雾试验(CASS)按GB/T 10125—1997《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》进行。试验总时间为240 h,采用连续喷雾的方式。试验溶液为5%(质量分数,后同)NaCl溶液,pH值在3.1~3.3之间,盐雾箱温度为50℃。每24 h为一个周期,取样观察、称量一次。

用S-4800型场发射扫描电镜观察涂层腐蚀前后的形貌,采用日本理学(Rigaku)公司的D/MaX-RB型X射线衍射仪测定涂层腐蚀后的相组成。采用CHI660B电化学工作站测定涂层的电化学特性,涂层

在3.5%(质量分数,后同)的NaCl溶液中浸泡20 min后进行电化学试验。

2 结果与分析

2.1 涂层截面与表面形貌观察

图1为两种镀层试样的截面形貌。可以看出,纯锌和合金镀层与基体的结合界面无明显的裂纹和缝隙,说明基体与各镀层均有较好结合,热浸镀镀层和钢铁基体表面之间呈现冶金结合特征,纯锌镀层中分布着粗大灰暗组织。

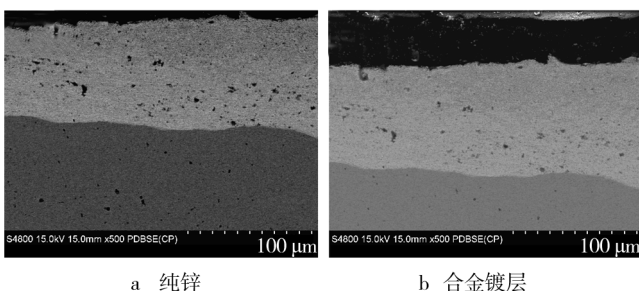


图1 镀层截面显微照片

Fig. 1 The cross-section SEM images of Zn and alloy coatings

图2分别为纯锌与合金镀层表面微观形貌。从图2a和图2b中可以看出,纯锌镀层表面组织较为粗大;合金镀层由于镍等元素的加入,镀层表面的晶粒尺寸显著降低,组织更加细致,组织细化,镀层表面质量提高。

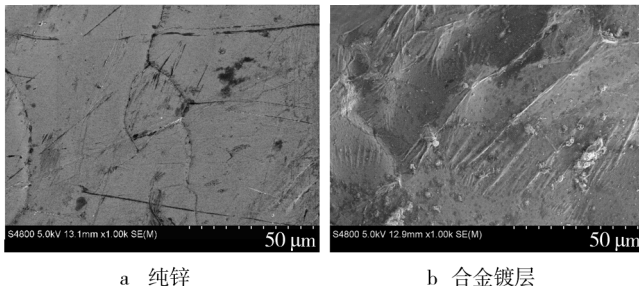


图2 镀层表面显微照片

Fig. 2 The SEM images for surface morphology of coating samples

2.2 涂层盐雾腐蚀表面形貌变化

在铜加速乙酸盐雾试验过程中,观察试样表面腐蚀状况及腐蚀产物,结果见表1。

由表1可以看出,经48 h盐雾腐蚀试验后,镀层表面只有不同程度的白锈生成,镀层除了失去金属光泽,颜色发暗以及生成白锈外,表面基本没有变化。

表 1 盐雾腐蚀实验镀层表现形貌变化状况

Tab.1 The surface morphology of coatings after different corrosion time of CASS test

镀层	24 h	48 h	72 h	120 h	168 h
纯锌	30%	60%	10%	65%	90%
	白锈	白锈	红锈	红锈	红锈
Zn-Al-Ni-Re	20%	30%	45%	30%	80%
	白锈	白锈	白锈	红锈	红锈

与纯锌镀层相比,合金镀层耐蚀性有较为显著提高。经 72 h 盐雾腐蚀试验后,纯锌镀层出现红锈,120 h 后合金镀层出现红锈。

图 3 为盐雾实验前和实验 216 h 后,两种镀层试样的表面宏观形貌。纯锌在盐雾实验中腐蚀严重,表面出现了大量红褐色腐蚀产物;纯锌镀层在实验 24 h 后有少量白锈出现,随着时间的延长,白锈明显增多,48 h 后白锈布满整个镀层;合金镀层实验 48 h 后出现少量白锈,随着腐蚀的进行,镀层颜色由镀层的白亮色逐渐变暗,并且表面白锈逐渐增多。纯锌镀层 72 h 后出现红锈,合金镀层 120 h 后出现红锈,说明合金镀层表现出优异的耐蚀性能。

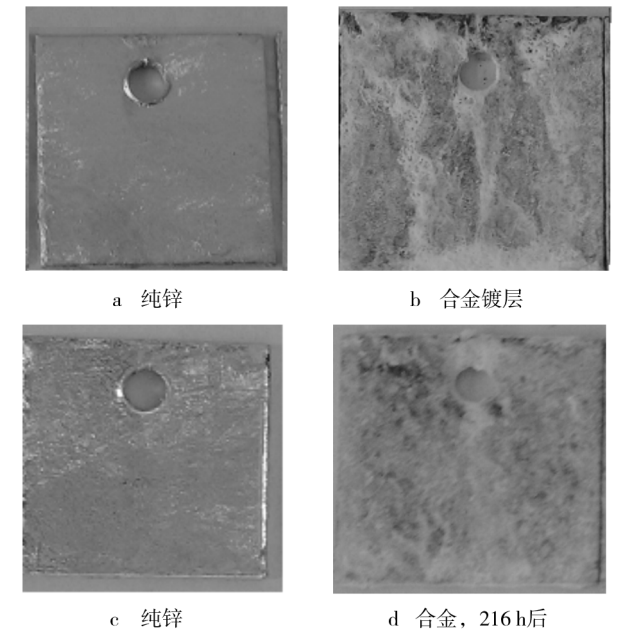


图 3 铜加速乙酸盐雾实验前后试样的宏观形貌

Fig.3 The surface morphology of samples before and after CASS test

2.3 涂层盐雾腐蚀质量损失

试样盐雾腐蚀质量损失随时间的变化如图 4 所

示,在 24 h 后和 48 h 后两种试样的质量损失相差不大,而且腐蚀速度处于较为缓慢的状态。在 72 h 后纯 Zn 镀层的质量损失大于合金镀层,纯锌镀层是合金镀层的大约 3 倍。在 96 h 后纯锌镀层的质量损失加速,合金镀层损失较为缓慢。在 120 h 后合金镀层与纯锌镀层一样开始加速腐蚀。在 192 h 后纯锌镀层的质量损失是合金镀层的 2.7 倍。从两条曲线的总体趋势可以得出,合金镀层耐蚀性显著优于纯 Zn 镀层。

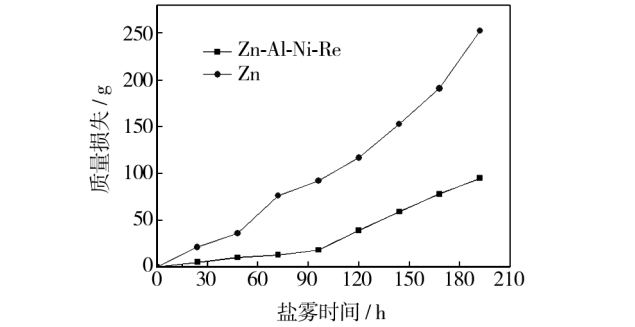


图 4 镀层盐雾腐蚀试验质量损失曲线

Fig.4 The weight loss curves of hot dipped coating in salt spray corrosion test

2.4 镀层腐蚀产物分析

对两种镀层盐雾腐蚀 216 h 后的腐蚀产物进行 XRD 分析,结果如图 5 所示。纯 Zn 镀层腐蚀产物的主要成分为 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 与 $Zn(OH)_2$ 。合金

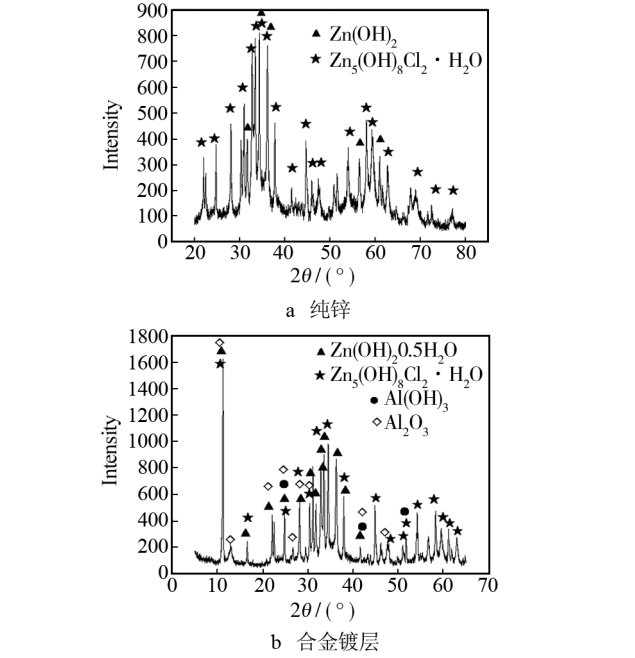


图 5 镀层盐雾腐蚀产物 XRD 谱

Fig.5 XRD spectra of the salt spray corrosion products of the coating

镀层腐蚀产物的成分较为复杂,主要有 $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 , $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 。合金镀层的腐蚀产物比纯锌镀层的腐蚀产物多了难溶的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 与 Al_2O_3 。

合金镀层腐蚀产物中的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 与 Al_2O_3 化学性质比较稳定,不溶于水,且耐腐蚀性好。在胶凝物 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的胶粘作用下可以使 Al_2O_3 与难溶物 $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 以及 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 较好地覆盖在基体表面,且附着力较强,能够防止镀层腐蚀向内部发展,提高耐蚀性。与纯锌镀层的腐蚀产物相比,由于合金镀层表面腐蚀产物中 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 与 Al_2O_3 的存在,使得合金镀层表面的腐蚀产物比纯锌镀层表面的腐蚀产物更难以溶解,这种腐蚀产物能够更加有效地把镀层与腐蚀介质隔离,保证了合金镀层的高耐蚀性。同时合金镀层腐蚀产物中的 Al_2O_3 能够形成致密的氧化物薄膜,使得腐蚀反应放缓,耐蚀性能提高。

2.5 涂层腐蚀表面形貌与 EDS 分析

经过 216 h 的盐雾试验后,通过扫描电镜观察试样表面如图 6 所示,在相同倍数条件下可以发现纯锌镀层表面的腐蚀产物主要是细小的不均匀针状物分布,这些针状物形成颗粒状分布(如图 6a 和图 6b 所示)。对不同位置的腐蚀产物进行 EDS 成分分析,结果见表 2,表明纯锌镀层表面的腐蚀产物主要为含锌、氧的化合物,锌、氧原子比例大约为 6 : 9,结合 X 衍射结果可以确认该腐蚀产物为 $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

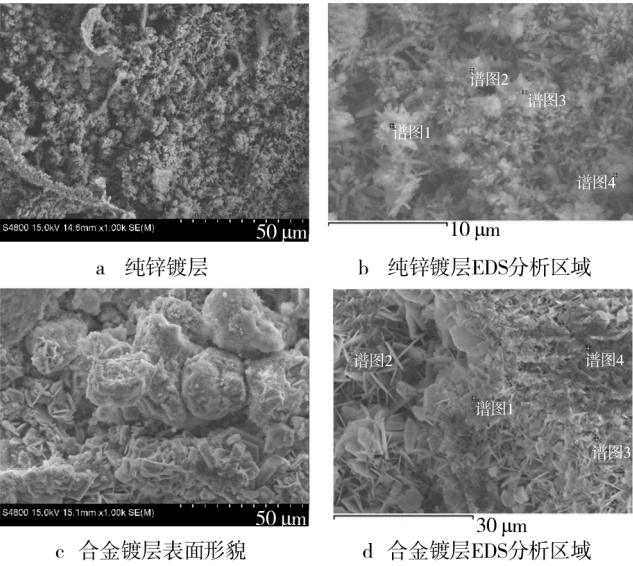


图 6 镀层钢板经过盐雾腐蚀 216 h 后表面微观形貌及 EDS 分析区域

Fig. 6 Surface morphologies and EDS analysis zone of coated steel sheet after 216 h exposure to salt spray corrosion

与 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 。

从图 6 可以发现,镀层表面的腐蚀产物呈现着粗大的不均匀块状物分布(如图 6c 和图 6d 所示),对不同位置的腐蚀产物进行 EDS 成分分析,结果见表 3,表明合金镀层表面的腐蚀产物主要为含锌、氧、氯的化合物,它们的原子比例大约为 5 : 8 : 2,根据本试验采用的盐雾试验条件和 X 衍射分析结果以及有关的文献可以确认腐蚀产物中主要是 $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3 , $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ^[9]。 Al_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 均为难溶物,随着这些难溶腐蚀产物的逐步形成,这些难溶腐蚀产物更加严密地覆盖在镀层表面,该区域腐蚀介质的进一步向镀层表面扩散也变得更加困难,致使该区域腐蚀过程随之减缓,因此合金镀层的腐蚀速率降低。

表 2 图 6b 中选区的能谱分析结果
Tab.2 EDS analysis result for selected areas in Fig. 6b

谱图	质量分数/%				
	C	O	Mg	Zn	总计
谱图 1		21.14		78.86	100.00
谱图 2	2.29	23.96	0.73	73.02	100.00
谱图 3	2.03	24.48	0.61	72.88	100.00
谱图 4		25.59	1.09	73.32	100.00

表 3 图 6d 中选区的能谱分析结果
Tab.3 EDS analysis result for selected areas in Fig. 6d

谱图	质量分数/%					
	C	O	Cl	Fe	Zn	总计
谱图 1	5.23	25.66	11.18	1.05	56.88	100.00
谱图 2		27.29	14.47		58.24	100.00
谱图 3	5.29	28.44	10.06		56.21	100.00
谱图 4	4.08	27.58	10.99		57.34	100.00

3 腐蚀机理分析

两种镀层的 Tafel 极化曲线如图 7 所示,用电化学工作站自带软件进行拟合,由 Tafel 公式计算得到镀层的极化曲线参数,结果见表 4。

从 Tafel 极化曲线和表 4 中电化学参数值可知:镀层中添加少量合金元素对极化曲线形状影响不大,合金镀层的自腐蚀电位最高,自腐蚀电流密度最小,耐蚀性最好,说明加入合金元素后可以对镀层的电化学腐蚀起抑制作用。自腐蚀电位与自腐蚀电流的变化规律大致相吻合,随自腐蚀电位的正移,自腐蚀电流的数值逐渐减小。

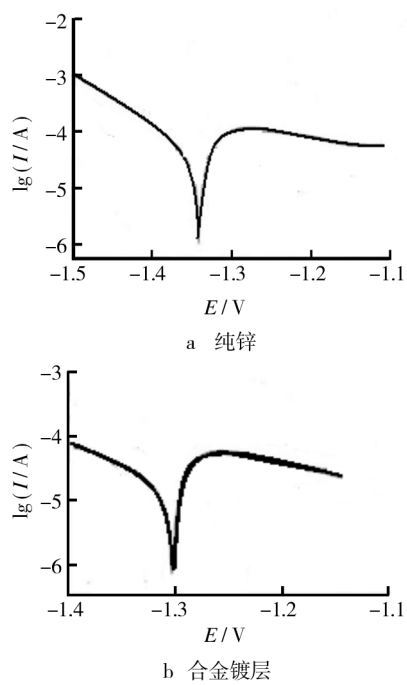


图 7 镀层在 3.5% NaCl 溶液中的 Tafel 极化曲线
Fig. 7 Tafel polarization curves of coatings in 3.5% NaCl solution

表 4 镀层样品 Tafel 极化曲线参数
Tab. 4 The parameters of Tafel polarization curves of coating samples

样品	E/V	I/A
纯锌	-1.348	4.873×10^{-5}
合金镀层	-1.312	4.296×10^{-5}

热镀锌镀层对钢基体的保护主要体现在物理隔离保护与电化学保护两方面。在大气腐蚀条件下镀锌层表面首先形成有 ZnO , $Zn(OH)_2$ 及碱式碳酸锌保护膜,一定程度上减缓镀层的腐蚀,这层保护膜(也称白锈)受到破坏又会形成新的膜层。当锌层破坏严重,腐蚀介质到达钢基体时才产生电化学保护,锌基镀层电位较钢更负,表现得更活泼,先腐蚀。

从物理隔离作用来说,锌的腐蚀产物较为疏松,隔离作用较小,所以纯锌镀层主要靠涂层厚度来保证防腐的时间。而合金镀层产生的腐蚀产物中由于氧化铝与氢氧化铝的存在而稳定、致密,在相当大的程度上延缓了腐蚀介质的渗入,因而在同样的条件下,其腐蚀速率较纯锌镀层低^[10]。

Al 是锌铝合金中最常使用的合金元素。Al 的加入可以在镀层表面生成致密的 Al_2O_3 的保护膜,防止镀层表面的腐蚀^[11]。锌液中加入镍后,提高钢的润湿性能,使组织细化,镀层表面质量提高^[12]。同时

Shibli 等^[13]认为,由于镍可以促使锌通过氧化层中的显微缺陷和裂纹扩散到铁基中,提高镀层的粘附性,形成更致密的合金相层,在暴露的过程中减小脱锌速度,富镍合金相层起到了保护屏障的作用。所以镍的存在,大大提高了镀层的耐蚀性能。稀土元素对镀层所起的作用主要有两方面:1) 在一定的冷却条件下稀土元素的存在能使镀层表面组织更细;2) 稀土能提高镀层表面膜的致密性^[14—15]。镀锌稀土元素分布在晶界上,具有细化晶粒的作用,同时抑制镀层的晶间腐蚀,提高镀层的稳定性。实验表明,稀土元素的加入可使镀层的耐盐雾腐蚀能力增加一倍^[16]。这也是合金镀层耐蚀性要优于纯锌镀层的原因。

4 结论

- 1) Ni, RE 等元素的加入使镀层表面光亮,组织更加细密。
- 2) 热镀锌加入 Ni 等合金元素后使镀层的耐蚀性明显优于纯锌镀层。

参考文献

[1] 穆山,李军念,王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程,2012,9(4):59—63.
MU Shan, LI Jun-nian, WANG Ling. Corrosion Control Technology of Electronic Facility in Marine Atmosphere [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 59—63.

[2] 穆山,李军念,王玲,等. 海洋大气环境金属防护涂层技术与工艺研究[J]. 装备环境工程,2012,9(1):81—84.
MU Shan, LI Jun-nian, WANG Ling, et al. Corrosion Protection Coating Technologies of Metal in Marine Atmosphere [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 81—84.

[3] 张琳,王振尧,赵春英,等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2014,11(1):1—5.
ZHANG Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 1—5.

[4] 卢锦堂,许乔瑜,孔纲. 热浸镀技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
LU Jin-tang, XU Qiao-yu, KONG Gang. Hot Dip Coating Technology and Application [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.

[5] 黄钰,程西云,彭美华,等. Zn-Al 伪合金涂层的耐蚀性能

- 研究[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 35—39.
- HUANG Yu, CHENG Xi-yun, PENG Mei-hua, et al. Corrosion Resistance Properties of Arc Sprayed Zn-Al Pseudo-alloy Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 35—39.
- [6] 周和荣, 李晓刚, 董超芳, 等. 铝合金在模拟 SO_2 污染大气环境中的腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2008, 28(2): 39—45.
- ZHOU He-rong, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, et al. Corrosion Behaviors of Aluminum Alloys in Simulated SO_2 Polluted Atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(2): 39—45.
- [7] 王绍明. 模拟大气环境加速腐蚀试验的研究[J]. 装备环境工程, 2005, 2(4): 65—68.
- WANG Shao-ming. Study on Accelerated Corrosion Test of Simulating Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(4): 65—68.
- [8] 邵大伟, 贺志荣, 张永宏. Ni 含量对热浸 Zn-Al-Ni 合金镀层组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 18—19.
- SHAO Da-wei, HE Zhi-rong, ZHANG Yong-hong. Effect of Ni Content on Microstructure and Corrosion Resistance of Hot-dip Zn-Al-Ni Alloy Coating[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 18—19.
- [9] 屈庆, 严川伟, 张蕾, 等. Zn 初期大气腐蚀中 NaCl 和 SO_2 的协同效应[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1272—1276.
- QU Qing, YAN Chuan-wei, ZHANG Lei, et al. Synergism of NaCl and SO_2 in Initial Atmospheric Corrosion of Zn[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1272—1276.
- [10] 谢兆钱, 芦玉峰, 楼森, 等. 电弧喷涂锌基防腐涂层在洞室环境中的耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 52—58.
- XIE Zhao-qian, LU Yu-feng, LOU Miao, et al. Study on Corrosion Resistance of Zinc Based Coatings in Cave Prepared by High Velocity Arc Spray[J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 52—58.
- [11] 陆伟, 严彪. 防腐锌铝合金的研究与应用[J]. 上海有色金属, 2002, 23(4): 153—155.
- LU Wei, YAN Biao. Corrosion of Zinc Aluminum Alloy Research and Application[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2002, 23(4): 153—155.
- [12] 陈新. 热镀锌中主要合金元素的作用及机理研究[J]. 云南冶金, 2009, 38(4): 45—47.
- CHEN Xin. The Effect and Mechanism of Main Alloy Element in Hot Dip Galvanized Zinc[J]. Yunnan Metallurgy, 2009, 38(4): 45—47.
- [13] SHIBIS M A, MANU R, DILIMON V S. Effect of Nickel-rich Barrier Layer on Improvement of Hot-dip Zinc Coating[J]. Applied Surface Science, 2005, 245(1): 179—185.
- [14] 杨云, 余宗森. 稀土对液态 Zn+5% Al 合金与工业纯铁板反应的抑制作用[J]. 金属学报, 1993, 29(12): 540—544.
- YANG Yun, YU Zong-sen. Effect of Mischmetal on Reaction between Solid Iron and Liquid Zn+5% Al Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1993, 29(12): 540—544.
- [15] 黄永智, 李运刚. 热镀锌液中添加微量元素的作用[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(1): 14—18.
- HUANG Yong-zhi, LI Yun-gang. Reviews on the Effect of Alloying Elements in Hot-dip Galvanizing Melt[J]. Plating and Finishing, 2013, 35(1): 14—18.
- [16] 吴俊玲, 余仲兴, 朱永达. 微量添加稀土对锌基合金镀层性能的影响[J]. 上海有色金属, 2002, 23(3): 97—102.
- WU Jun-ling, YU Zhong-xing, ZHU Yong-da. Influence of Adding Trace RE Elements on Performances of Hot Dipped Zinc Layer[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2002, 23(3): 97—102.
- (上接第 86 页)
- [13] LIU Yu-ting, WU Gang-ping, LU Chun-xiang, et al. Grafting of Carbon Nanotubes onto Carbon Fiber Surfaces by Step-wise Reduction of in-situ Generated Diazonium Salts for Enhancing Carbon/Epoxy Interfaces[J]. Materials Letters, 2014(134): 75—79.
- [14] LAACHACHI A, VIVET A, NOUET G, et al. A Chemical Method to Graft Carbon Nanotubes onto a Carbon Fiber[J]. Materials Letters, 2008, 62(3): 394—397.
- [15] 陈月华, 刘永永, 江德凤, 等. 化学镀镍施镀过程稳定性分析[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 74—76.
- CHEN Yue-hua, LIU Yong-yong, JIANG De-feng, et al. Evaluation on Plating Stability in Electroless Nickel Deposition[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 74—76.
- [16] 姚怀, 郭军华, 崔文聪, 等. 碳纤维化学镀镍表面改性研究[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 16—19.
- YAO Huai, GUO Jun-hua, CUI Wen-cong, et al. Study on Electroless Nickel Plating for Surface Modification of Carbon Fiber[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 16—19.
- [17] 陈广美, 黄毅. 聚己内酯与不同纤维素衍生物形成的共混体系的红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(3): 515—518.
- CHEN Guang-mei, HUANG Yi. Study on the Binary Blends of Poly(ϵ -caprolactone) with Different Cellulose Derivatives by Infrared Spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003, 23(3): 515—518.