

电镀锌镍合金与热渗锌涂层热带海洋大气环境腐蚀规律对比分析

郭强¹, 白鹏英¹, 孟庆保², 赵永涛³

(1.北京机械设备研究所, 北京 100854; 2.北京特种机械研究所, 北京 100143;
3.中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072)

摘要: **目的** 解决钢铁表面金属涂层在热带海洋大气环境中易腐蚀损伤或失效的问题, 选择对热带海洋大气环境耐腐蚀性能优良的金属涂层, 提高钢铁工件的使用寿命。**方法** 在某热带海域进行户外暴露试验, 对钢铁试片电镀锌镍合金和热渗锌 2 种金属涂层的腐蚀规律进行研究。通过扫描电镜、X 射线能谱仪、光学显微镜、划格试验等, 对锌镍合金镀层和热渗锌涂层的表面形貌、化学成分、截面形貌、涂层厚度及附着力等分别进行观察与测试。**结果** 电镀锌镍合金镀层主要发生选择性腐蚀和点蚀, 在 720 d 内具有较好的腐蚀防护性能。热渗锌层以均匀腐蚀为主, 涂层微裂纹促进了腐蚀, 在 90 d 内基体无腐蚀, 360~720 d 涂层的腐蚀速率较快。**结论** 在采用的 2 种金属涂层工艺中, 电镀锌镍合金镀层的耐腐蚀性能远优于热渗锌涂层。相对于该热渗锌涂层, 电镀锌镍合金镀层更加适合作为钢铁工件金属涂层在该海域大气环境中长期使用。

关键词: 电镀锌镍合金; 热渗锌; 热带海洋大气; 腐蚀规律; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)07-0127-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.016

Comparative Analysis on Corrosion Rule of Electrodeposited Zn-Ni Alloy and Hot Diffusion Zinc Coatings in Tropical Marine Atmospheric Environment

GUO Qiang¹, BAI Peng-ying¹, MENG Qing-bao², ZHAO Yong-tao³

(1. Beijing Institute of Machinery and Equipment, Beijing 100854, China; 2. Beijing Specialized Machinery Institute, Beijing 100143, China; 3. Troop 92228 of PLA, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: The work aims to solve high susceptibility to corrosion damage or failure of metal coatings on steel in tropicad marine atmospheric environment, and select the metal coatings with high corrosion resistance in a tropical marine atmospheric environment to improve the service life of steel parts. The outdoor exposure test was carried out in certain island reef, and the corrosion rule of electrodeposited Zn-Ni alloy and hot diffusion zinc coatings was studied. By the means of scanning electron microscope, energy diffraction spectrum (EDS), optical microscope, and adherence force tester, the surface morphology, chemical composition, section morphology, thickness and adherent force of the two coatings were observed and tested. The electrodeposited Zn-Ni alloy coating showed main corrosion form including selective corrosion and pitting corrosion, and better

收稿日期: 2022-10-26; 修订日期: 2022-12-05

Received: 2022-10-26; Revised: 2022-12-05

作者简介: 郭强 (1983—), 男, 博士。

Biography: GUO Qiang (1983-), Male, Doctor.

引文格式: 郭强, 白鹏英, 孟庆保, 等. 电镀锌镍合金与热渗锌涂层热带海洋岛礁大气环境腐蚀规律对比分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 127-134.

GUO Qiang, BAI Peng-ying, MENG Qing-bao, et al. Comparative Analysis on Corrosion Rule of Electrodeposited Zn-Ni Alloy and Hot Diffusion Zinc Coatings in Tropical Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 127-134.

corrosion resistance within 720 d. Hot diffusion zinc coating showed main form of general corrosion, the micro-crack in the coating promoted corrosion rate and within 90 d, the substrate showed no corrosion, and the coating corrosion rate was faster within 360 d ~ 720 d. Between the two kinds of metal coatings used on the steel, the electrodeposited Zn-Ni alloy coating shows much better corrosion resistance than the hot diffusion zinc coating. Compared with the hot diffusion zinc coating, the electrodeposited Zn-Ni alloy coating on steel is much better suitable for long time service in the marine atmospheric environment.

KEY WORDS: electrodeposited Zn-Ni alloy; hot diffusion zinc; island reef; tropical marine atmosphere; corrosion rule; corrosion resistance

电镀锌镍合金镀层一般指的是镍含量在 20%(质量分数)以下的锌合金电镀层,其具有耐腐蚀、耐磨、低氢脆等优点^[1-6],是相同厚度电镀锌涂层耐蚀性的 3~10 倍左右^[5-6],在中性盐雾试验中出现红锈时间可超过 1 000 h。热扩散渗锌技术具有厚度均匀、抗高温性能好、不降低钢铁强度、高耐蚀性等特点,也具有电镀技术不具备的环保、无氢脆等优点^[7-12],其中热扩散粉末渗锌涂层近年来发展成为一种高质量、优良性能、成熟的钢铁结构表面防腐蚀技术。电镀锌镍合金镀层和热渗锌涂层能够对钢铁具有较好的防护作用^[13],广泛应用于航空、汽车、船舶、海上平台等产品上。由于热渗锌具有无氢脆等突出优点^[14-16],热渗锌涂层经常替代电镀锌镍合金镀层用作海洋装备的标准件、弹簧等零部件的防护^[17-19]。

某热带海域大部分处于赤道气候带,具有高温、高湿、高盐雾、多降水、强太阳辐射、多台风和风暴潮等热带海洋性气候特征^[20-23]。根据 ISO 9223—ISO 9226 系列标准,该海域大气环境腐蚀严酷度达到了最高的腐蚀等级,大部分金属及金属涂层腐蚀等级达到了 C5(很高)或 CX(极高)等级^[24-25]。在产品长期暴露在该海域大气环境的过程中,钢铁结构表面金属涂层很容易发生腐蚀损伤或失效等现象,钢结构难以长期稳定地使用。针对产品在使用过程中出现的腐蚀现象,本文选取电镀锌镍合金和热渗锌等 2 种金属涂层在某岛礁进行户外暴露试验,对 2 种金属涂层的腐蚀规律和耐腐蚀性能进行对比分析,选取更加适合钢铁工件在该海域大气环境中长期暴露使用的金属涂层。

1 试验

1.1 基体材料与表面处理

试片基体材料为 40Cr,尺寸为 150 mm×70 mm×3 mm。试片表面经喷砂、酸洗处理后,分别采用碱性电镀锌镍合金技术(涂层厚度为 25~40 μm)和粉末热扩散渗锌技术(涂层厚度为 190~200 μm)进行表面处理。

1.2 环境试验

户外暴露试验参考 GJB 8893.2—2017《军用装备

自然环境试验方法 第 2 部分:户外大气自然环境试验》,试验地点选在某热带岛礁,户外暴露试验为 90、180、360、720 d,每个周期的平行试验件为 5 件。

1.3 综合评级

通过观察电镀锌镍合金镀层和热渗锌涂层表面的宏观腐蚀形貌,对 2 种涂层进行腐蚀评级,参照 GB/T 6461—2002《金属基体上金属和其他无机覆盖层经腐蚀试验后的试样和试件的评级》执行。

1.4 形貌观察

采用扫描电子显微镜(Apollo 300, CamScan, 英国)对电镀锌镍合金镀层和热渗锌涂层表面的微观腐蚀形貌进行观察,并采用电镜附带的 X 射线能谱仪(EDS, Link, 荷兰)对 2 种涂层表面的化学成分进行测试。试样采用胶木粉镶嵌,经砂纸 400#、800#、1000#、2000#打磨,抛光膏精抛光后,采用金相显微镜(LeiCa, DM4000 M, 德国)分别对 2 种涂层的截面形貌、厚度进行观察、测量。

1.5 附着力测试

参考 GB/T 9286—1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》对热渗锌涂层附着力进行测试,划格间距为 3 mm,每个周期试片测试数量不少于 3 处。

1.6 涂层厚度测试

采用 CTG-10A 数字式测厚仪对涂层厚度进行测量,在每个试片上、中、下 3 个区域测 5 个点,精确至 0.1 μm,并与光学显微镜截面形貌涂层厚度值进行对比分析,获得涂层平均厚度。

2 结果与讨论

2.1 外观及性能评级

电镀锌镍合金镀层在 90 d 出现灰色腐蚀产物,少于 10%涂层面积出现了严重腐蚀;180、360 d 时,25%~50%面积被白锈附着;90~360 d 基体未腐蚀;360 d 时,试片边缘区域腐蚀相对严重,试片边缘涂层主要呈现深灰色,试片边缘少部分涂层呈现暗灰色;720 d 时,钢铁基体出现少量腐蚀,涂层超过 50%

面积出现了严重腐蚀, 镀层呈暗灰色。

热渗锌涂层 90 d 时, 基体未腐蚀, 涂层表面存在少量的点状白锈; 180 d 时, 少量基体出现腐蚀, 点状白锈面积增大, 出现了较多白色腐蚀产物; 360 d 时, 少于 10% 的基体面积出现腐蚀, 白锈占到表面积的 1/2; 在 720 d 时, 不超过 25% 基体面积发生腐蚀, 大量红锈附着表面, 超过 50% 涂层发生重度腐蚀。电镀锌镍合金和热渗锌涂层外观及性能评级见表 1。在 720 d 暴露周期内, 电镀锌镍合金镀层的耐腐蚀性能优于热渗锌涂层。

2.2 表面形貌与成分组成

电镀锌镍合金不同暴露时间的宏观、微观表面形貌以及 EDS 结果如图 1 所示。在暴露 90 d 时, 镀层表面形貌斑驳, 存在镀层表面腐蚀剥落的宏观形貌特征, 镀层保持了电沉积 Zn-Ni 合金颗粒的微观表面形

表 1 电镀锌镍合金和热渗锌涂层宏观观察结果

Tab.1 Macroscopic observation results of the electrodeposited Zn-Ni alloy and hot diffusion zinc coatings

序号	涂层类型	试验时间/d	R_p/R_A	表面腐蚀形貌现象
1	电镀锌镍合金镀层	90	10/2 xC	基体未腐蚀, 10%涂层严重腐蚀
2		180	10/1 xC	基体未腐蚀, 40%涂层严重腐蚀
3		360	10/1xC	基体未腐蚀, 50%涂层严重腐蚀
4		720	9/0xC, vsE	基体腐蚀<0.1%, >50%涂层重度腐蚀, 涂层点蚀、颜色变暗
5	热渗锌涂层	90	10/2 xC	基体未腐蚀, 10%涂层严重腐蚀
6		180	8/1 xC	基体腐蚀≤0.25%, 少于 50%涂层严重腐蚀
7		360	3/1xC	基体腐蚀≤10%, 少于 50%涂层严重腐蚀
8		720	2/0xC	基体腐蚀≤25%, 超过 50%涂层严重腐蚀

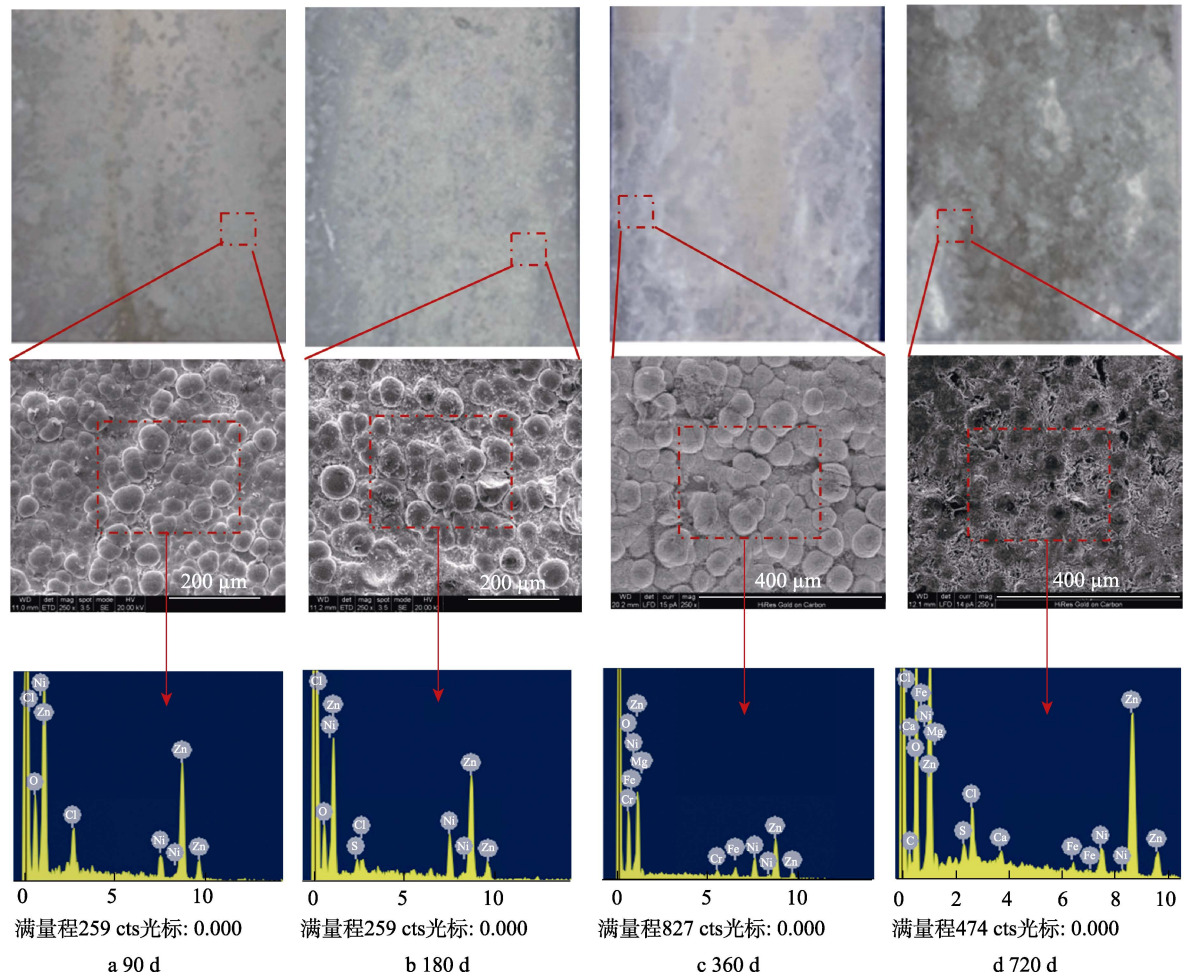


图 1 电镀锌镍合金镀层宏观形貌、微观形貌和 EDS 测试结果
Fig.1 Macroscopic and microscopic morphologies, and EDS results of the electrodeposited Zn-Ni alloy coating

貌；180 d 时，部分电沉积 Zn-Ni 合金颗粒被腐蚀掉；360 d 时，镀层已经全部出现了毛刺，镀层部分颗粒已经被腐蚀掉，说明镀层表面表面被腐蚀；720 d 时，镀层中的电沉积 Zn-Ni 合金颗粒全部腐蚀掉。

根据 EDS 测试结果（见表 2），在 90、180、360、720 d 时，涂层中锌镍的质量比分别为 9.24、4.98、4.45、14.24。表明在 90~360 d 时，涂层中锌镍含量比先增加、后降低，说明 Zn-Ni 合金涂层表面 Zn 的占比先逐渐减少，然后逐渐增多。结合扫描电镜表面

形貌可知，0~360 d，电沉积锌镍合金颗粒发生选择性腐蚀（或称“脱成分腐蚀”），Zn 被腐蚀脱落，所以镀层电沉积锌镍合金颗粒中 Zn 的相对含量降低，Ni 的相对含量增加。在 720 d 时，镀层电沉积颗粒中锌成分被大量腐蚀，形成大量 Zn 的腐蚀产物，将镀层表面覆盖，所以涂层中锌镍含量之比增加。

热渗锌涂层不同暴露时间的宏观、微观表面形貌以及 EDS 结果如图 2 所示。在 90 d 时，热渗锌涂层表面的宏观形貌较为均匀、一致，表面分布较多微小

表 2 电镀锌镍合金镀层 EDS 结果
Tab.2 EDS results of electrodeposited Zn-Ni alloy coating

元素	90 d		180 d		360 d		720 d	
	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%
C K	—	—	—	—	—	—	6.41	15.04
O K	22.90	53.26	15.96	42.38	24.30	54.20	31.09	54.82
Cl K	5.01	5.26	1.70	2.04	6.63	6.49	4.51	4.33
Ni K	7.04	4.46	13.49	9.76	12.21	7.42	3.66	1.76
Zn K	65.05	37.02	67.30	43.75	54.40	29.69	52.11	22.49
Fe K	—	—	1.56	2.06	3.45	2.21	2.23	1.57

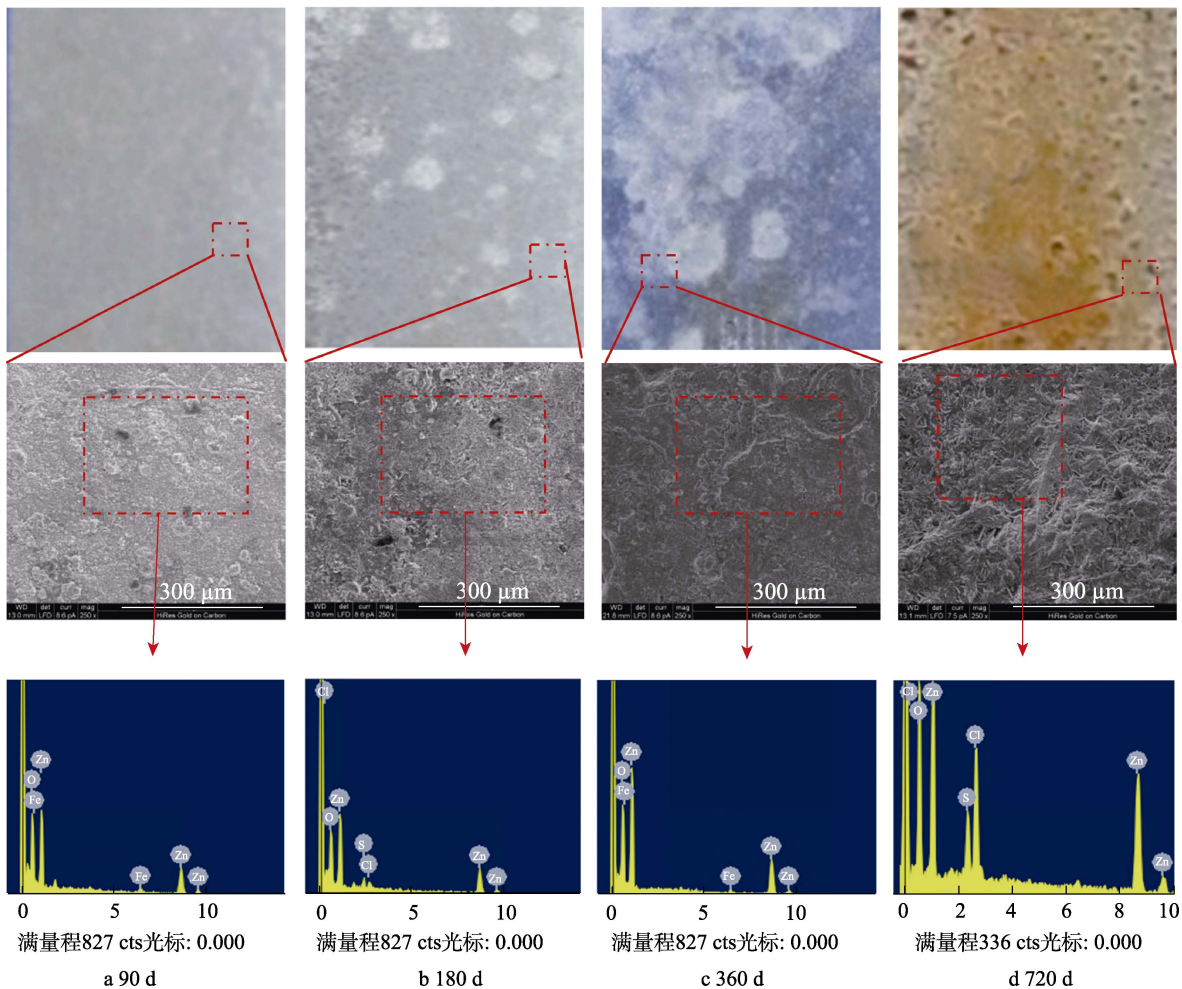


图 2 热渗锌涂层宏观形貌、微观形貌和 EDS 测试结果
Fig.2 Macroscopic and microscopic morphologies and EDS results of the hot diffusion zinc coating

的点状白色腐蚀产物, 微观形貌中含有较多不同粒径的颗粒状腐蚀产物; 在 180 d 时, 涂层表面宏观形貌凹凸不平, 存在较多点状的白色腐蚀产物, 微观形貌存在较多针状、片状和颗粒状腐蚀产物; 在 360 d 时, 热渗锌涂层表面宏观形貌中覆盖大面积白色腐蚀产物, 微观形貌高低不平, 存在较多的微裂纹、腐蚀坑、

颗粒和台阶面; 在 720 d 时, 涂层宏观形貌中含有大量鼓泡, 表面微观形貌含有较多晶须状的腐蚀产物。通过 EDS 测试, 不同腐蚀周期的涂层中, Zn、O 的含量之比相近, 说明涂层表面主要由 Zn 和 Zn 的腐蚀产物组成, 见表 3。热渗锌层在海洋环境中腐蚀后, 腐蚀产物主要是由 $\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等物质组成^[17]。

表 3 热渗锌涂层 EDS 结果
Tab.3 EDS results of the hot diffusion zinc coating

元素	90 d		180 d		360 d		720 d	
	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%	质量 分数/%	原子 分数/%
O K	39.83	72.81	36.12	67.95	37.35	70.79	32.74	62.90
S K	—	—	3.27	3.07	—	—	3.87	3.71
Cl K	—	—	2.75	2.34	—	—	9.04	7.83
Zn K	56.64	25.34	57.86	26.64	60.87	28.24	54.35	25.55
Fe K	3.53	1.85	—	—	1.78	0.97	—	—

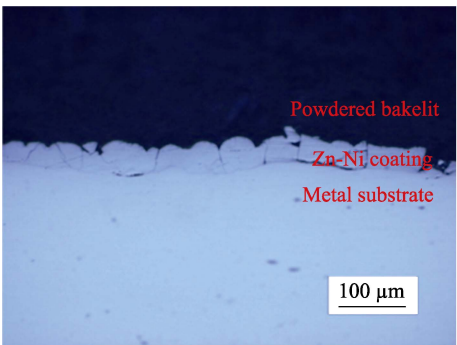
2.3 截面形貌

电镀锌镍合金镀层在暴露 90、360 d 后的截面形貌如图 3 所示, 截面形貌分别由镶嵌层、Zn-Ni 合金镀层和金属基体等组成。90 d 时, Zn-Ni 合金镀层相对平整; 相对于 90 d, 暴露 360 d 后, Zn-Ni 合金镀层的截面形貌呈现凹凸不平状, 镀层中出现了较多的点蚀孔, 镀层没有蚀穿, 镀层平均厚度明显减薄。说明镀层发生了选择性腐蚀, Zn 逐渐被腐蚀掉后, 镀层出现减薄, 并在涂层局部位置, Zn 不断向下腐蚀, 腐蚀产物脱落后, 形成点蚀孔。由于截面试样取自试片边缘区域, 涂层点蚀孔使得涂层呈现凹凸状, 在加上可见光漫散射, 使得涂层颜色在视觉上变成深灰色或暗灰色, 与试片边缘涂层宏观形貌保持一致。

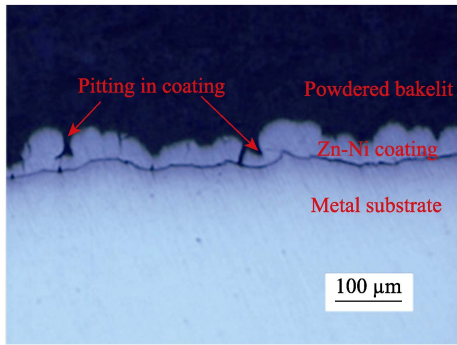
热渗锌涂层在暴露 90、360 d 后的截面形貌如图 4 所示。截面形貌中, 由镶嵌层、热渗锌层和钢铁基体等组成。热渗锌层由纯锌层和热扩散形成的 Fe-Zn 合金层组成^[19]。镀层截面形貌中含有微裂纹, 有的裂纹贯穿整个涂层。在 90 d 时, 涂层与基体之间也存在着明显的裂纹, 说明腐蚀性离子沿着微裂纹扩散至 Fe-Zn 合金层, 出现了腐蚀。360 d 时, 涂层中微裂纹宽度增加, 贯穿涂层的裂纹变得更宽, 钢铁基体与渗锌层之间出现了更宽的裂纹。说明腐蚀性离子沿着微裂纹向下渗透, 微裂纹中的 Zn 腐蚀, 使裂纹宽度增加, 贯穿状的微裂纹输送更多的腐蚀性离子, Fe-Zn 合金的腐蚀更加严重, 热渗锌层与金属基体出现了剥离。

2.4 镀层厚度损失速率

结合显微截面形貌, 采用测厚仪获得电镀锌镍合



a 90 d



b 360 d

图 3 电镀锌 Ni 合金镀层截面形貌
Fig.3 Section morphology of the electrodeposited Zn-Ni alloy coating

金镀层、热渗锌涂层的平均厚度。电镀锌镍合金和热渗锌涂层在不同暴露周期的厚度损失率如图 5 所示。涂层厚度损失速率的计算见式 (1)。电镀锌镍合金 720 d 内的厚度损失在 20%以内, 而热渗锌涂层 720 d 内的厚度损失在 35%左右。热渗锌涂层主要发生均匀腐蚀, 热渗锌在 0~360 d 内, 厚度损失速率较慢, 360~720 d 内, 涂层的厚度损失速率较快。720 d 时,

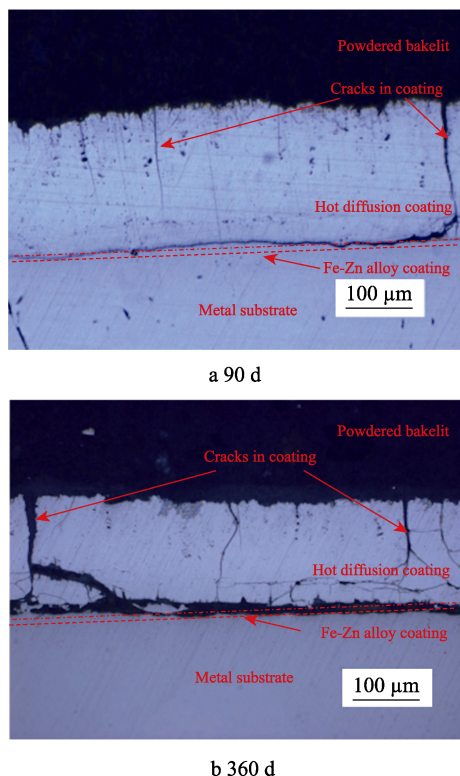


图4 热渗锌涂层截面形貌

Fig.4 Section morphology of the hot diffusion zinc coating

涂层表面被红锈覆盖,说明热渗锌涂层在 720 d 的暴露时间被腐蚀破坏,该涂层对钢铁基体已经失去了防护作用。

$$v = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \quad (1)$$

式中: v 为厚度损失率; H_1 为腐蚀试验后的涂层厚度; H_0 为腐蚀试验前的涂层厚度。

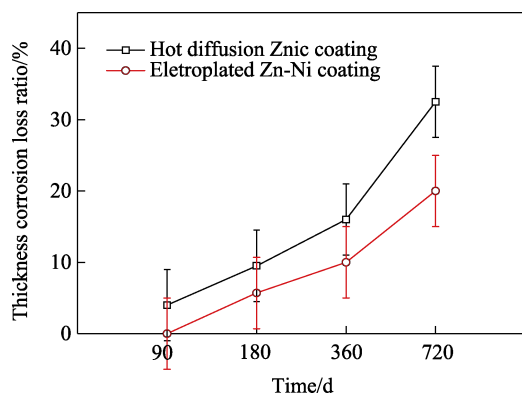


图5 电镀锌镍合金镀层和热渗锌涂层暴露 0~720 d 时的厚度腐蚀损失率

Fig.5 Thickness corrosion loss ratio of the electrodeposited Zn-Ni alloy and hot diffusion zinc coatings during exposure from 0 d to 720 d

2.5 涂层附着力

在暴露 0、90、180、360、720 d 后,热渗锌涂

层附着力的测试结果见表 4。热渗锌涂层在试验前的涂层附着力为 0 级,在涂层中间发生断裂;暴露 90 d 时,涂层附着力为 3 级;暴露 180、360、720 d 时,涂层附着力为 5 级,从涂层与底材之间发生破坏。随着腐蚀沿着渗锌层与钢铁基体之间的 Fe-Zn 合金层不断发展,锌层与钢铁基体之间的附着力不断降低。

表4 暴露时间 0 d~720 d 的热渗锌涂层附着力测试结果
Tab.4 Adherent force results of the hot diffusion zinc coating during exposure from 0 d to 720 d

暴露时间/d	附着力评级	破坏类型
0	0 级	涂层中间开裂
90	3 级	涂层与底材间开裂
180	5 级	涂层与底材间开裂
360	5 级	涂层与底材间开裂
720	5 级	涂层与底材间开裂

3 讨论

钢铁表面电镀锌镍合金和热渗锌涂层属于阳极性涂层,对钢铁起到了阴极保护的作用。综合宏观、微观表面形貌、截面形貌、成分组成、厚度腐蚀速率等结果,2 种涂层的腐蚀规律表明,2 种涂层的腐蚀类型不同,电镀锌镍合金镀层主要发生选择性腐蚀和点蚀,而热渗锌涂层主要发生均匀腐蚀。

电镀锌镍合金镀层的电沉积 Zn-Ni 合金颗粒中的 Zn 成分发生选择性腐蚀后,表面电沉积颗粒发生了脱落,形成宏观表面形貌中斑驳的形貌。同时,在微观上局部涂层中形成了点蚀坑,腐蚀向着涂层深度方向发展,涂层厚度在局部范围内变薄。在腐蚀 360 d 时,试片边缘点蚀坑较多;720 d 时,涂层中分布大量腐蚀坑,涂层由灰色变为暗灰色。在镀层 Zn 成分被大量腐蚀后,镀层表面被 Zn 腐蚀产物覆盖。当点蚀扩展到基体后,钢铁基体才会发生腐蚀。暴露 360 d 时,点蚀坑未蚀穿镀层,钢铁基体无宏观可见的腐蚀现象;在 720 d 时,只有很少量基体出现了腐蚀,说明在 720 d 时电镀锌镍合金镀层仍然对钢铁具有较好的腐蚀防护效果。

热渗锌涂层在暴露 0~720 d 内,涂层厚度不断腐蚀减薄。其中,在 0~360 d 内,涂层的厚度损失速率较慢,360~720 d 涂层厚度损失速率较快。由于热渗锌涂层厚度达到了 190 μm 以上,在涂层应力的作用下易产生微裂纹,为氯化物和水溶液等腐蚀性介质的扩散提供了通道,使 Cl^- 等腐蚀性离子扩展至涂层内部,造成热渗锌涂层的溶解,生成锌的水合氯化物。随着腐蚀性离子和水溶液的不断渗透,微裂纹不断扩展,当微裂纹扩展到 Fe-Zn 合金层后,Fe-Zn 合金层出现腐蚀。腐蚀沿着过渡层不断扩展,使涂层与基体发生了剥离,热渗锌涂层的防护作用逐渐减弱。因此,

当腐蚀周期为 90 d 时,钢铁基体未出现腐蚀,热渗锌涂层对钢铁基体仍然具有良好的防护作用;在 90~360 d 时,腐蚀性介质沿着微裂纹传递,微裂纹不断增宽和扩展至基体。其中,在 180 d 时,从宏观形貌上可见基体已经出现了腐蚀,热渗锌开始失去对钢铁基体防护作用;180~360 d 时,腐蚀性离子沿着 Fe-Zn 不断扩展,使得锌层与基体出现了剥离,热渗锌涂层已经不具备防护的效果。在腐蚀 360~720 d 时,Cl⁻等腐蚀性离子在涂层当中大量渗透,显著加快涂层的腐蚀速率,同时也造成钢铁基体大面积腐蚀。

通过电镀锌镍合金镀层和热渗锌涂层腐蚀规律对比分析,文中采用的钢铁电镀锌镍合金镀层的耐蚀性远优于热渗锌涂层。从对钢铁基体的防护性来说,电镀锌镍合金镀层更加有利于钢铁工件提高长期暴露在大气环境中的腐蚀防护性能。由于电镀锌镍合金随着镍含量、钝化等工艺参数的变化,以及热渗锌随着粉末渗锌加热温度等工艺参数、后处理技术参数等的变化,其耐蚀性差异较大,后续可改进 2 种金属涂层的生产工艺参数,进一步改善 2 种涂层耐腐蚀性能,达到进一步提升钢铁工件使用寿命的目的。

4 结论

1) 在某热带海域环境中,电镀锌镍合金镀层主要发生选择性腐蚀和点蚀,热渗锌涂层主要发生均匀腐蚀。

2) 热渗锌涂层在 90 d 内对钢铁基体具有保护性,但微裂纹为腐蚀性离子提供了扩散通道,促进了腐蚀速率。90 d 后,纯锌层与钢铁之间的界面出现腐蚀。电镀锌镍合金试片在 360 d 内基体无腐蚀,720 d 内只有少量的基体出现腐蚀,说明在 720 d 内,电镀锌镍合金镀层对钢铁具有较好的腐蚀防护性能。

3) 采用的 2 种金属涂层工艺中,电镀锌镍合金镀层的耐蚀性远优于热渗锌涂层,该电镀锌镍合金镀层比热渗锌涂层更加适合作为钢铁工件的金属涂层在某热带海域大气环境中长期使用。

参考文献:

- [1] 刘军松,刘定富,苏琪,等.电镀锌-Ni-P 合金及其耐蚀性研究[J].电镀与精饰,2019,41(2): 1-5.
LIU Jun-song, LIU Ding-fu, SU Qi, et al. Study on Preparation and Corrosion Resistance of Zn-Ni-P Alloy[J]. Plating & Finishing, 2019, 41(2): 1-5.
- [2] 李景轩.一种新型锌镍合金电镀工艺及镀层的耐蚀性[J].材料保护,2018,51(9): 74-79.
LI Jing-xuan. Study on the Zn-Ni Alloy Electroplating and Corrosion Resistance of Coating[J]. Materials Protection, 2018, 51(9): 74-79.
- [3] 安茂忠,冯忠宝,任丽丽,等.电镀锌-Ni 合金研究进展与应用现状[J].材料科学与工艺,2017,25(4): 1-10.
AN Mao-zhong, FENG Zhong-bao, REN Li-li, et al. Research Progress and Application Status of Electrodeposited Zn-Ni Alloy Coatings[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(4): 1-10.
- [4] 曾邱,李智勇,马梦婷,等.镀液组成对碱性体系 Zn-Ni 合金镀层性能的影响[J].表面技术,2020,49(12): 244-251.
ZENG Qiu, LI Zhi-yong, MA Meng-ting, et al. Effect of Plating Bath Composition on the Properties of Zn-Ni Alloy Coating in Alkaline Electrolysis System[J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 244-251.
- [5] 陈伟,唐凌燕,周英,等.锌镍合金镀工艺优化及镀层耐腐蚀性的研究[J].表面技术,2015,44(2): 110-114.
CHEN Wei, TANG Ling-yan, ZHOU Ying, et al. Research on Process Optimization of Zn-Ni Alloy Plating and Coating Corrosion Resistance[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 110-114.
- [6] 王亚伟,乔永莲,沙春鹏,等.航空用 30CrMnSiNi2A 高强度电镀锌-镍合金层及其对氢脆性能的影响[J].材料保护,2013,46(12): 61-62.
WANG Ya-wei, QIAO Yong-lian, SHA Chun-peng, et al. Effect of Electroplated Zinc-Nickel Alloy Coating on Hydrogen Embrittlement Behavior of High Strength Steel Used in Aviation Industry[J]. Materials Protection, 2013, 46(12): 61-62.
- [7] 张志坚,李世亮,宋川,等.60Si₂Mn 钢表面热扩散渗锌涂层的组织及 SO₂ 腐蚀行为研究[J].材料保护,2021,54(10): 36-40.
ZHANG Zhi-jian, LI Shi-liang, SONG Chuan, et al. Study on the Structure and SO₂ Corrosion Behavior of Hot Diffusion Zinc Coating on the Surface of 60Si₂Mn Steel[J]. Materials Protection, 2021, 54(10): 36-40.
- [8] 张宝东,侯锐,张兵,等.履带限位块开裂分析[J].失效分析与预防,2020,15(4): 255-259.
ZHANG Bao-dong, HOU Rui, ZHANG Bing, et al. Cracking Analysis of Stop Blocks in Caterpillar Bands[J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(4): 255-259.
- [9] 张潇华,于思荣,刘彦,等.粉末渗锌钢渗层的形成机理及影响因素研究进展[J].表面技术,2020,49(11): 141-150.
ZHANG Xiao-hua, YU Si-rong, LIU Yan, et al. Research Progress of Formation Mechanism and Influencing Factors of Sherardizing Coating on Steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 141-150.
- [10] 东晓林,时小军,黄燕滨,等.稀土镧不同化合物对渗锌层耐蚀性能的影响[J].表面技术,2016,45(4): 193-197.
DONG Xiao-lin, SHI Xiao-jun, HUANG Yan-bin, et al. Effect of Different Compounds of Rare Earth Lanthanum on Corrosion Resistance of Zinc Layer[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 193-197.
- [11] 武传杰,林志峰,李相波,等.粉末渗锌工艺及应用发展趋势[J].热加工工艺,2013,42(22): 20-22.

- WU Chuan-jie, LIN Zhi-feng, LI Xiang-bo, et al. Study on Zinc Powder Sherardizing Manufacturing Process and Its Application Trends[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(22): 20-22.
- [12] 边飞龙, 黄燕滨, 时小军, 等. 海洋环境下螺纹紧固件复合防腐技术[J]. 电镀与涂饰, 2010, 29(12): 64-66.
- BIAN Fei-long, HUANG Yan-bin, SHI Xiao-jun, et al. Composite Corrosion Protection Technique for Threaded Fasteners in Marine Environment[J]. Electroplating & Finishing, 2010, 29(12): 64-66.
- [13] 吴建平, 马启国, 周学杰, 等. 金属阳极涂层在化工大气环境中的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2017, 50(6): 48-51.
- WU Jian-ping, MA Qi-guo, ZHOU Xue-jie, et al. Corrosion Behavior of Metallic Anode Coatings in Industrial Atmosphere[J]. Materials Protection, 2017, 50(6): 48-51.
- [14] 朱孝培, 赵麦群, 高辉, 等. 紧固件的机械能助渗锌-低铬达克罗复合防护技术[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(23): 1260-1264.
- ZHU Xiao-pei, ZHAO Mai-qun, GAO Hui, et al. Protection Technology for Fasteners by Combination of Mechanical Energy-Assisted Sherardizing and Low-Chromium Dacromet Coating[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(23): 1260-1264.
- [15] 王洪伦, 林志峰, 张邦双. 濒海环境钢质紧固件防腐技术试验对比研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 93-97.
- WANG Hong-lun, LIN Zhi-feng, ZHANG Bang-shuang. Comparative Test on Anti-Corrosion Technology of Steel Fasteners in Coastal Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 93-97.
- [16] 吴勇, 李春燕, 李立群, 等. 舰船零部件真空渗锌的性能及应用研究[J]. 热加工工艺, 2002, 31(2): 23-25.
- WU Yong, LI Chun-yan, LI Li-qun, et al. Studying on Applying and Properties of Sherardised Ship Hardware[J]. Hot Working Technology, 2002, 31(2): 23-25.
- [17] 黄燕滨, 黄俊雄, 王期超, 等. 钢制紧固件稀土镧改性渗锌层的制备与性能研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 60-64.
- HUANG Yan-bin, HUANG Jun-xiong, WANG Qi-chao, et al. Preparation and Properties of Sherardizing Layer on Steel Fasteners Modified by Rare Earth Lanthanum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 60-64.
- [18] 刘鹏, 江社明, 李远鹏, 等. 高强度紧固件用涂层的耐腐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(12): 886-892.
- LIU Peng, JIANG She-ming, LI Yuan-peng, et al. Corrosion Resistance of Coatings for High-Strength Fastening Parts[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(12): 886-892.
- [19] 李海洪, 赵永韬, 王洪仁, 等. 海洋环境中渗锌层和锌铬涂层的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 14-16.
- LI Hai-hong, ZHAO Yong-tao, WANG Hong-ren, et al. Study on Corrosion Resistance of Sherardizing and Zinc-Chromium Coating in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(2): 14-16.
- [20] 刘雨薇, 赵洪涛, 王振尧. 碳钢和耐候钢在海洋大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1247-1254.
- LIU Yu-wei, ZHAO Hong-tao, WANG Zhen-yao. Initial Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Marine Atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1247-1254.
- [21] 向永华, 王争荣, 曹京宜, 等. 岛礁装备设施腐蚀现状及腐蚀控制策略研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 28-34.
- XIANG Yong-hua, WANG Zheng-rong, CAO Jing-yi, et al. Study on Corrosion Status and Corrosion Control Strategy for Equipment and Facilities Serving on Islands and Reefs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 28-34.
- [22] 郁大照, 张代国, 王琳, 等. 海洋环境下机载电子设备的腐蚀及外场防护对策[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 8-12.
- YU Da-zhao, ZHANG Dai-guo, WANG Lin, et al. Corrosion of Airborne Electronic Equipment and Field Protection Measures in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 8-12.
- [23] 马长李, 马瑞萍, 白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 65-69.
- MA Chang-li, MA Rui-ping, BAI Yun-hui. Characteristics of Atmospheric Environment in China's Coastal Areas and Atmospheric Corrosion in Typical Coastal Regions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 65-69.
- [24] 段体岗, 彭文山, 丁康康, 等. 岛礁环境下 304 不锈钢腐蚀行为分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 51-57.
- DUAN Ti-gang, PENG Wen-shan, DING Kang-kang, et al. Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in the Sea Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 51-57.
- [25] 刘亚鹏, 张慧霞, 王洪伦, 等. 2507 双相不锈钢南海大气腐蚀行为研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(S1): 106-113.
- LIU Ya-peng, ZHANG Hui-xia, WANG Hong-lun, et al. Corrosion Behavior of 2507DSS in the Atmospheric Environment[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(S1): 106-113.

责任编辑: 刘世忠