

# 300M 钢表面冷喷涂锌镍复合涂层性能研究

石仲川<sup>1</sup>, 张晓云<sup>2</sup>, 汤智慧<sup>2</sup>, 陆峰<sup>2</sup>

(1. 中国航空工业集团公司 北京中航长力能源科技有限公司, 北京 100041;

2. 中国航空工业集团公司 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 目的 研究 300M 高强钢表面的冷喷涂锌镍复合涂层的涂层性能。方法 采用机械混合的方式将锌粉和镍粉进行混合, 利用低温气动喷涂技术在 300M 高强钢表面制备锌镍复合涂层, 采用扫描电子显微镜、能量色散谱和显微硬度测试仪研究涂层的微观组织结构。采用普通中性盐雾加速实验、涂层破损盐雾加速试验及户外暴晒试验, 对冷喷涂锌镍涂层的抗腐蚀性能进行综合评价。考核冷喷涂对 300M 钢基材疲劳性能的影响。结果 根据 SEM 的表面及截面图片分析, 冷喷涂锌镍复合涂层十分致密, 且无孔隙及裂纹, 涂层的孔隙率平均为 0.4%, 结合强度 40 MPa 左右。根据 EDS 结果分析, 锌镍复合涂层中锌的质量分数为 85% 左右, 镍的质量分数为 15% 左右。锌镍复合涂层的显微硬度为 70.8HV0.49。锌镍复合涂层中镍粒子的强化作用, 提高了涂层的硬度。冷喷涂锌镍复合涂层具有非常好的抗腐蚀性能, 盐雾实验超过 770 h, 即使涂层破损也可以达到 600 h。户外暴晒实验 12 个月表面无明显腐蚀, 并且冷喷涂对 300M 钢基材的疲劳性能没有影响。结论 冷喷涂锌镍复合涂层作为抗腐蚀涂层, 可以对 300M 高强钢提供保护。

**关键词:** 冷喷涂; 锌镍复合涂层; 微观结构; 硬度; 盐雾试验; 抗腐蚀性能

中图分类号: 174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)06-0100-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.015

## Properties of Cold Spray Zn/Ni Coatings on 300M Steel

SHI Zhong-chuan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-yun<sup>2</sup>, TANG Zhi-hui<sup>2</sup>, LU Feng<sup>2</sup>

(1. Beijing AVIC-Changli Energy Science and Technology Co., Ltd, AVIC, Beijing 100041, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, AVIC, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the performance of Zn/Ni composite coatings on 300M high-strength steel surface, which were deposited by cold gas dynamic spray. **Methods** The coating was sprayed by Zn and Ni physical mixture powder on 300M high-strength steel surface. The morphology and microstructure of the coatings were analyzed by the SEM images, EDS and microhardness tester. The corrosion resistance of Zn/Ni coatings was comprehensively investigated by neutral salt-spray test, coating furcated test and atmospheric exposure test. The effect of cold spray on the fatigue property of 300M steel substrate was tested. **Results** The surface and cross-section SEM images indicated that the cold sprayed Zn/Ni composite coatings were very compact, without pores and cracks, the porosity of Zn/Ni coatings was 0.4% and the bonding strength was 40 MPa. The

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-05-21

Received: 2016-01-21; Revised: 2016-05-21

作者简介: 石仲川 (1986—), 男, 硕士, 副总工程师, 主要从事航空材料加工工艺及制造方面的研究。

**Biography:** SHI Zhong-chuan (1986—), Male, Master, Deputy chief engineer, Research focus: manufacturing and engineering of aeronautical materials.

EDS analysis result showed that the mass fractions of Zn and Ni in the Zn/Ni composite coatings were about 85% and 15%, respectively. The microhardness of Zn/Ni coatings was 70.8HV0.49, this is because the hardness of the coatings was improved by the strengthening effect of Ni in the Zn/Ni coatings. Cold sprayed Zn/Ni composite coatings had very good corrosion resistance. The salt spray result of Zn/Ni coatings could reach 770 h, and it could reach 600 h even at coatings failure. No obvious corrosion was observed on the surface after 12-month atmospheric exposure test, and cold spray had no influence on the fatigue property of 300M steel substrate. **Conclusion** Cold sprayed Zn/Ni composite coatings could be used as efficient corrosion-resistant coatings on 300M high strength steel surfaces.

**KEY WORDS:** cold spray; Zn/Ni coatings; microstructure; hardness; salt spray; anticorrosion performance

300M 钢 (40CrNi2Si2MoVA) 是我国在 20 世纪 90 年代自行研制成功的一种低合金超强度钢, 目前国内广泛应用于飞机起落架等关键零件的制造<sup>[1-2]</sup>。现有的 300M 钢构件防护广泛采用电镀镉镀层和电镀镉-钛镀层, 但镉为重金属, 电镀镉工艺一方面有毒, 不利环保, 另一方面镉镀层在高温下有使 300M 钢产生镉脆的危险, 不能应用于 230 °C 以上的工作环境<sup>[3]</sup>, 因此发展新型的环保代镉涂层技术需求迫切。

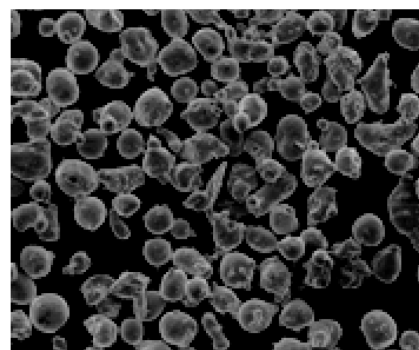
为了提高对 300M 的高耐蚀保护, 1984 年, 波音公司首次提出了电镀锌镍合金的工艺, 以此来替代电镀镉工艺。波音的实验表明<sup>[4]</sup>, 当镍的质量分数为 10% ~ 15% 时, 锌镍合金镀层在大气和海洋环境中的耐蚀性均与电镀镉镀层相当, 是电镀纯锌的 3 ~ 6 倍, 也优于电镀纯铝。锌镍合金镀层具有优异的机加工性能<sup>[5]</sup>, 特别适合高强钢零件, 尤其是 300M 钢零件的表面防护。但是, 电镀锌镍合金工艺的镀液会对环境造成较大污染, 科研人员便采用喷涂工艺来取代电镀工艺。通过喷涂工艺来制备锌镍复合涂层<sup>[6]</sup>, 对环境污染小, 还可以提高涂层的厚度, 实现对基体的长效保护。

冷喷涂技术是 20 世纪末才发展起来的新型喷涂技术<sup>[7]</sup>。传统的热喷涂工艺都存在着喷涂过程中粉末会发生氧化、相变, 改变粉末粒子原有物理和化学特性的问题<sup>[8]</sup>。而冷喷涂过程是利用经过预热的高压 (1~3.5 MPa) 气体让粉末粒子在喷枪 (Laval nozzle) 中进行加速, 在粉末粒子完全固态的情况下以超音速撞击基体, 通过发生较大的变形而沉积于基体表面形成涂层<sup>[9]</sup>。由于粉末粒子在撞击基体前的温度低于本身的熔点, 因此在冷喷涂过程中, 涂层不会发生氧化、相变, 并可保持喷涂粒子的各种微观组织和特征, 且对喷涂粒子和基体热影响较小<sup>[10]</sup>。

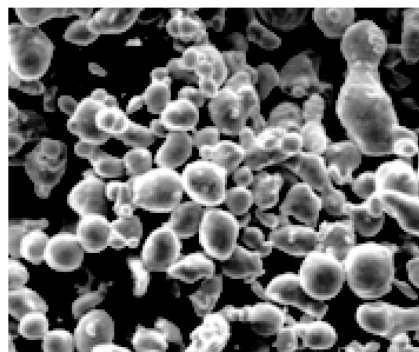
## 1 实验

### 1.1 设备及材料

基体材料所用 300M 钢, 是由美国国际镍公司于 20 世纪 50 年代研制成功的一种低合金高强钢, 试验前进行吹砂处理。喷涂粉末选用北京矿冶研究总院金属材料研究所制备的球状锌粉和电解镍粉, 纯度均在 99.99% 以上, 其表面形貌如图 1 所示。纯锌粉的粒径范围为 10~60  $\mu\text{m}$ , 纯镍粉的平均粒径约为 47  $\mu\text{m}$ , 粉末颗粒均以圆形为主, 有利于冷喷涂涂层沉积。



a 镍粉



b 锌粉

图 1 镍粉及锌粉微观形貌

Fig.1 SEM images of Ni powder and Zn powder:

a) Ni powder, b) Zn powder

实验所用冷喷涂设备是北京航空 621 所从俄罗斯科学院新西伯利亚分院理论力学及应用研究所引进,进行喷涂的工作参数:运载气体为压缩空气,气体温度 300~400 °C,气体压力 2.0~2.5 MPa,移动速度 30~50 mm/s。

## 1.2 实验方法

1) 涂层形貌。采用 Quanta600 型 SEM 对冷喷涂锌镍复合涂层的表面和截面形貌进行观察,结合 Energy dispersive spectrometry 对涂层的元素含量进行分析,通过处理 SEM 图片对涂层的孔隙率进行分析。

2) 涂层硬度。用 Duramin 型显微硬度仪测试涂层的显微硬度,载荷 0.025 kg,加载时间 15 s。

3) 耐腐蚀性能。按 ASTM B117 标准进行中性盐雾试验,采用纯度 $\geq 95.5\%$ 的工业氯化钠配制 5% (质量分数) 的中性溶液作为腐蚀加速溶液, pH 为 6.5~7.2,加压成细雾状,使之均匀分布在试样表面。同时放入 300M 钢基体和涂层对比,定期观察盐雾腐蚀情况。按 ASTM G50 的规定分别在北京户外暴晒场及青岛团岛户外暴晒场进行户外暴晒试验,综合测试冷喷涂锌镍复合涂层的抗腐蚀能力。

4) 疲劳性能。在疲劳试验机上按 HB 5287 的规定分别进行 300M 钢裸材及带冷喷涂锌镍复合涂层 300M 钢的轴向加载疲劳试验,通过对比试验来评价复合涂层对基体疲劳性能的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层形貌

图 2a 是冷喷涂锌镍复合涂层的宏观照片,可以

看出涂层与粉末的颜色一致,都是灰色,与裸材吹砂后颜色接近,并且由于喷涂后粗糙度较小,存在很多小的反光面。图 2b 为冷喷涂锌镍复合涂层的表面微观形貌,可以看到涂层表面的微裂纹很小。图 2c 为冷喷涂锌镍复合涂层的截面微观图,可知锌镍复合涂层中几乎看不到孔隙及裂纹,且与 300M 基体结合处非常致密,这从另一个方面说明在喷涂过程中,粒子变形比较彻底,形成了非常致密的涂层。

从图 2 中可以看出,复合涂层均匀、致密,扫描电镜分析出涂层平均孔隙率为 0.4%。试验显示,火焰喷涂的孔隙率为 10%~20%,电弧喷涂孔隙率一般为 10%左右,等离子喷涂为 2%~5%<sup>[11]</sup>。由此可见,与其他喷涂工艺相比,冷喷涂技术的涂层孔隙率非常优异。涂层非常致密,没有明显的孔隙和微裂纹,这主要归因于涂层在沉积过程中后续粒子不断撞击先前沉积的粒子,可将体积收缩过程中产生的空隙不断填实。复合涂层的粒子与 300M 钢的基体吹砂面凹凸处形成机械咬合,涂层与基体之间无过渡层,有明显的分界线,在电镜下看不到明显的孔隙与微裂纹,这可以证明锌镍复合涂层的结合强度非常好。按 ASTM C633 的标准,采用 Instron5885 拉伸机进行试验,拉伸速率 1 mm/min,得到冷喷涂锌镍复合涂层的结合强度约为 40 MPa。

由于锌粉末颗粒的体积大于镍,而且锌的硬度小,在喷涂过程中变形比较充分,机械咬合现象非常明显。镍的硬度远大于锌,而且粒子体积较小,大部分嵌在变形后的锌粒子之间,从微观图中可辨别出锌镍两种粒子,这可以证明在冷喷涂过程中,锌镍两种粒子没有发生相互反应,也未生成金属间化合物,均保持着各自的成分。采用能量分析仪 (EDS) 对涂层表面及截面进行元素含量分析,结果见图 3。

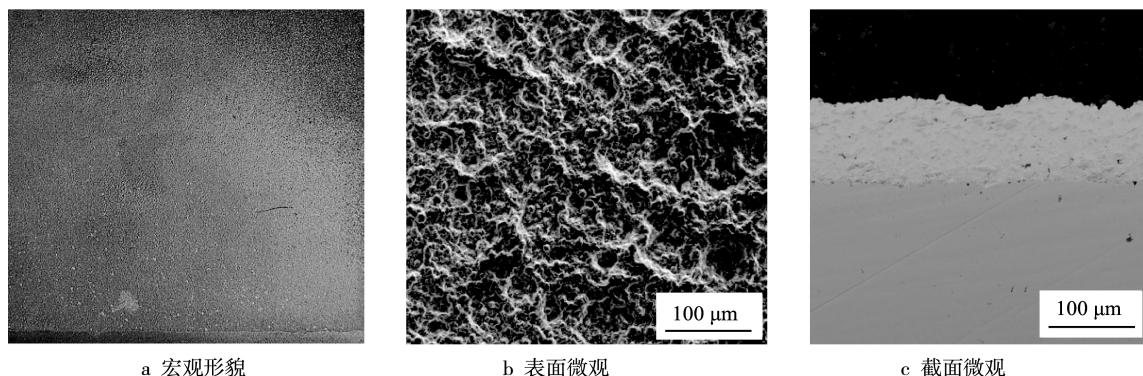


图 2 冷喷涂锌镍复合涂层形貌

Fig.2 SEM images of cold spray Zn/Ni coating: a) macrograph, b) surface, c) cross-section

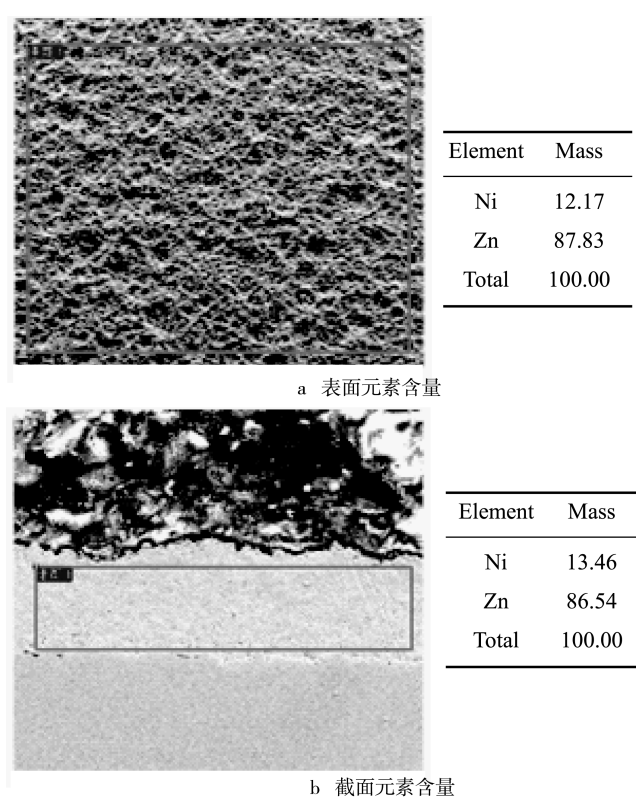


图 3 冷喷涂锌镍复合涂层元素含量分析  
Fig.3 Composition of cold spray Zn/Ni coating: a) surface composition result, b) cross-section composition result

2.2 涂层硬度

涂层硬度是涂层性能考核的重要指标,它可以表征涂层的耐磨性。对冷喷涂 Zn-Ni 涂层断面显微硬度进行测试,从表面向内部纵向取 10 个点,两点之间距离约为 40 μm,结果为 74.7、66.6、71.0、70.8、70.8、67.8、70.9、74.8、73.8、66.8HV0.49,取均值得到显微硬度值为 70.8HV0.49。

测试结果表明,冷喷涂锌镍复合涂层的硬度分布从表面到涂层内部基本均匀,这是因为在冷喷涂的粒子变形过程中,先变形沉积的粒子受到后续粒子的不断冲击,产生“夯实作用”形成微锻组织,使粒子与基材以及先前沉积的涂层更加致密,且复合涂层的硬度没有呈阶梯型变化而是均匀分布。另外,复合涂层的硬度大于纯锌涂层,是因为镍粒子在涂层中间作为强化相<sup>[12]</sup>,提高了整个涂层的硬度。

2.3 抗腐蚀性能

冷喷涂锌镍复合涂层是耐腐蚀的功能涂层,因此在评价涂层性能时,重点对其耐腐蚀性能进行考核。本实验采用户内中性盐雾加速试验及户外大气

暴晒试验,综合考察冷喷涂锌镍复合涂层的抗腐蚀性能,并与 300M 钢基体进行对比试验。图 4 为实验前 300M 和冷喷涂锌镍复合涂层的外观。

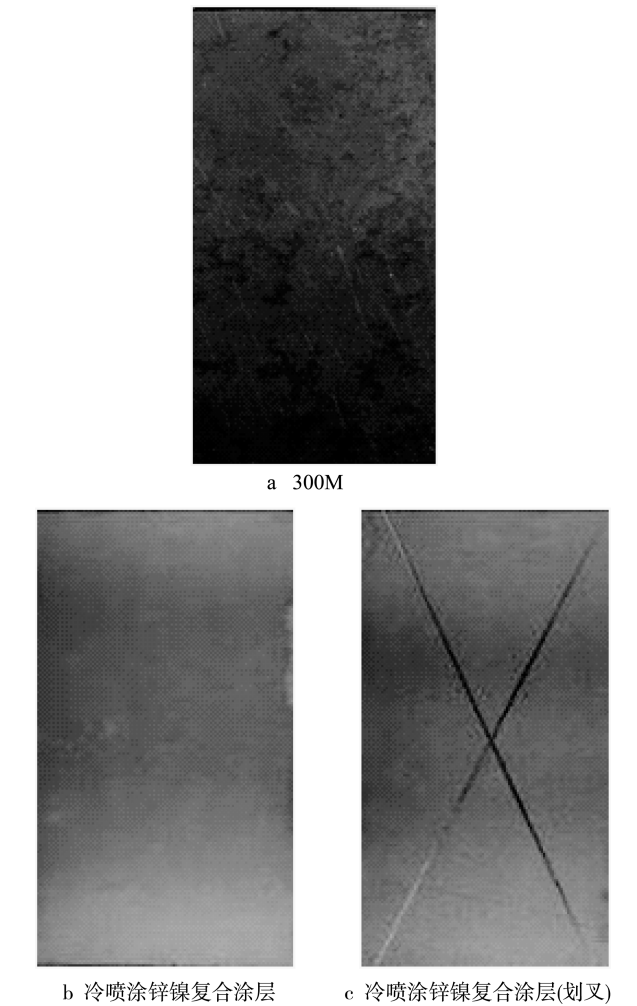


图 4 300M 和冷喷涂锌镍复合涂层的外观  
Fig.4 Appearance of 300M and cold spray Zn/Ni coating: a) 300M, b) cold spray Zn/Ni coating, c) cold spray Zn/Ni furcated coating

2.3.1 中性盐雾试验

中性盐雾试验是针对冷喷涂锌镍复合涂层进行人工加速模拟腐蚀的抗腐蚀性能考核。对高强钢基体及冷喷涂锌镍复合涂层试样同时进行中性盐雾试验,观察表面状况,综合两者的实验结果进行对比。为了考察涂层破损后对基体的保护能力,先将涂层表面划叉使涂层破损至基体,再进行盐雾试验。

按照 ASTM B117 的标准<sup>[13]</sup>进行中性盐雾试验 1 h 后,300M 基材整片出现红锈。由图 5 试验结果可见,表面完整无破损的涂层在盐雾试验开始 72 h 后,表面出现三道腐蚀痕迹,内部有白色腐蚀产物;350 h 后整片涂层的表面均泛白,有明显的颗粒感;770 h 后,整片涂层表面仍无明显腐蚀痕迹,腐蚀

形貌均匀致密,无基体红锈及明显腐蚀坑和腐蚀裂纹,这说明冷喷涂锌镍复合涂层的抗腐蚀性能非常好。划叉试样涂层在盐雾试验开始 72 h 后,破损处被白色腐蚀产物完全覆盖;350 h 后表面出现了红色锈蚀,为基体钢的腐蚀产物。这说明即使涂层在破损的状态下,仍可对基体在 350 h 内进行保护。

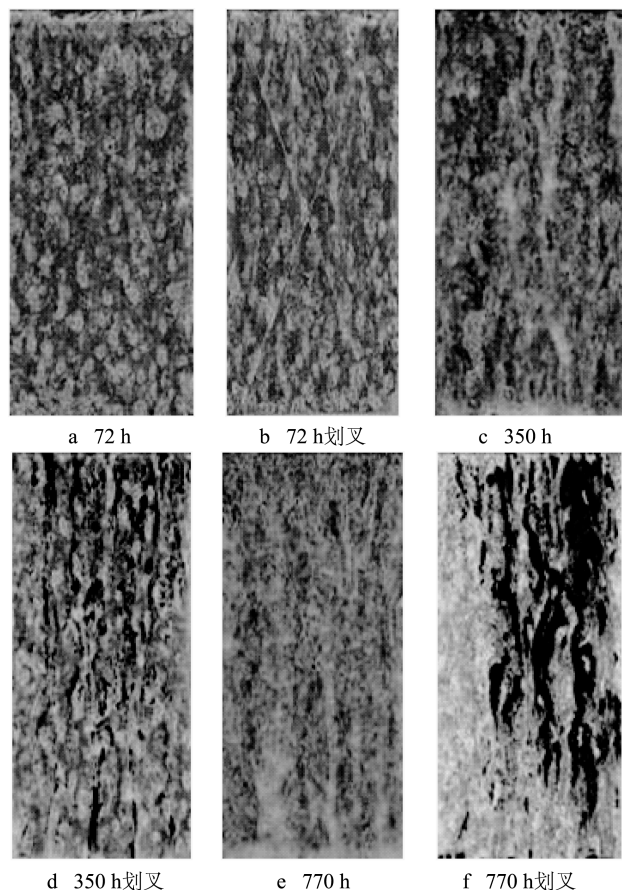


图 5 冷喷涂锌镍复合涂层试样中性盐雾试验后外观  
Fig.5 Appearance of cold spray Zn/Ni coating after neutral salt spray test

冷喷涂纯锌涂层的中性盐雾试验是 360 h<sup>[14]</sup>,冷喷涂锌镍复合涂层的中性盐雾试验是 770 h,因此冷喷涂锌镍复合涂层的抗腐蚀性能是纯锌涂层的 2 倍<sup>[15]</sup>。在盐雾试验初期,复合涂层内的 Zn 失去电子生成  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 。随着腐蚀的进一步发生, $\text{Zn}(\text{OH})_2$  会和盐雾箱中的  $\text{Cl}^-$  结合构成涂层表面主要的腐蚀产物  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,并生成少量的  $\text{Zn}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>[16]</sup>。与纯锌涂层的腐蚀原理不同,冷喷涂锌镍复合涂层的腐蚀产物中没有  $\text{ZnO}$ <sup>[17]</sup>,主要原因是涂层中的镍可有效稳定  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ,使其难以转变为  $\text{ZnO}$ <sup>[18]</sup>。另外与电镀锌镍合金的抗腐蚀原理不同,冷喷涂锌镍复合涂层中没有稳定的  $\gamma$  相锌镍合金<sup>[19]</sup>,但由于镍的作用,涂

层的腐蚀产物  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  可以致密地生长在涂层表面,从而阻止腐蚀进一步发生,使得冷喷涂锌镍复合涂层具有良好的抗腐蚀性能<sup>[20]</sup>。

### 2.3.2 户外暴晒试验

户外暴晒试验是针对冷喷涂锌镍复合涂层进行大气环境下的耐腐蚀性能考核<sup>[21]</sup>。大气环境下的暴露试验在北京大气试验站和青岛团岛试验站进行,分别为南温带亚湿润区半乡村大气和南温带湿润区半工业海洋大气<sup>[22-23]</sup>。共进行 12 个月的暴晒试验,对比观察高强钢及冷喷涂锌镍复合涂层在不同环境下的表面腐蚀状况。

300M 基材在北京及团岛户外暴晒 12 个月后,整片均出现红锈;而冷喷涂铝锌复合涂层在北京和青岛外暴晒 6 个月,表面变化并不明显。大气暴露 12 个月后,北京的试样表面均开始变色泛黄,但涂层并未出现任何腐蚀迹象,青岛的试样表面出现少量白色产物(见图 6)。这是因为青岛海洋性大

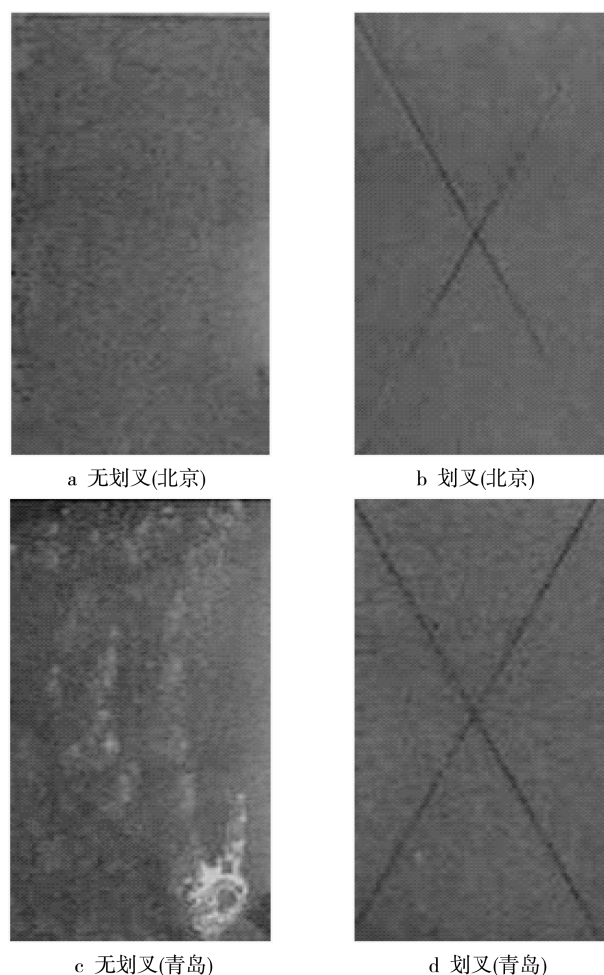


图 6 冷喷涂锌镍复合涂层试样大气暴露 12 个月后的外观  
Fig.6 Appearance of cold spray Zn/Ni coating after 12-month atmospheric exposure test

气环境的腐蚀性比北京半乡村大气环境的腐蚀性强，涂层腐蚀主要是涂层中锌的腐蚀，腐蚀初期生成了少量锌的腐蚀产物。

综合 300M 钢基体及冷喷涂锌镍复合涂层的室内中性盐雾加速试验和户外大气暴晒试验结果：中性盐雾加速试验中，300M 钢基体 1 h 就产生红锈，冷喷涂锌镍复合涂层可以超过 770 h，即使涂层破损，其对基体的保护也可以达到 600 h。户外大气暴晒试验中，300M 钢基体在 12 个月后发现严重腐蚀，冷喷涂锌镍复合涂层表面仅出现泛黄，无大面积腐蚀发生。这些都可以说明冷喷涂锌镍复合涂层对 300M 钢基体具有非常好的抗腐蚀保护。

2.4 疲劳性能

按 HB 5287<sup>[24]</sup>对 300M 基材及冷喷涂锌镍复合涂层进行轴向加载疲劳试验，测试结果见表 1。结果表明，喷涂涂层后的 300M 钢的疲劳性能与 300M 钢裸材的疲劳性能几乎一致，疲劳极限分别为 430 MPa 和 460 MPa。因为冷喷涂是采用高压气体携带着粉末颗粒对零件表面进行喷涂，后续粒子无论是锌粒子，还是镍粒子，对基体材料均有“夯实”作用，这种喷涂方式沉积的涂层内部为压应力，并会对零件表面产生类“喷丸”效果，对零件的疲劳性能有增强作用。虽然在喷涂前进行前处理会造成基

表 1 300M 钢基材及冷喷涂锌镍复合涂层疲劳测试结果  
Tab.1 Fatigue test results of 300M steel and cold spray Zn/Ni coatings

材料	R	$\sigma_{\max}$ /MPa	N/( $\times 10^3$ circles)	Fatigue limit/MPa
300M	-1	600	16, 16, 19, 19, 69, 69, 103	430
		575	31, 53, 74, 406	
		440	1600, 3310, 3580, 3680, 8480	
		420	>10 000, >10 000, >10 000, >10 000, >10 000	
300M+Al/Zn coating	-1	600	36, 52, 73	460
		560	97	
		540	341, 1074, >10 000	
		520	51,114	
		500	83, 129, >10 000, >10 000	
		480	5724, >10 000, >10 000	
		460	>10 000	
		400	>10 000	

材疲劳性能的降低，但综合后，冷喷涂对 300 钢基材的疲劳性能不会造成影响。

3 结论

- 1) 冷喷涂锌镍复合涂层致密，无孔隙及裂纹，平均孔隙率在 0.4%以下，粒子变形比较充分，机械咬合现象明显，锌镍两种粒子没有发生相互反应，并未生成金属间化合物。
- 2) 冷喷涂锌镍复合涂层喷涂过程中的加工硬化行为，大大提高了涂层的硬度，平均硬度达到 70.8HV0.49。
- 3) 冷喷涂锌镍复合涂层有非常好的抗腐蚀性，中性盐雾试验超过 770 h，即使破损也可以达到 600 h，户外大气暴晒试验 12 个月表面无腐蚀发

生。

4) 冷喷涂锌镍复合涂层对 300M 钢的疲劳性能无影响。

参考文献

[1] PAPYRIN A. Cold Spray Technology [J]. Advanced Materials Process, 2001, 159(9):49—51.

[2] 曹强,汤智慧,程宗辉,等.300M 钢刷镀镉性能及在某型飞机起落架修理中的应用[J].装备环境工程, 2016, 13 (1): 39—45.

CAO Qiang, TANG Zhi-hui, CHENG Zong-hui, et al. Performance of Electric-brush Plating Cadmium on 300M Steel and Application in Landing Gear Repair for a Certain Type of Aircraft[J].Equipment Environmental Engineering, 2016,13(1):39—45.

[3] ALKIMOV A P, KOSAREV V F, PAPYRIN A N. A Method of Cold Gas Dynamic Deposition[J]. Dold Akad Nauk SSSR,1990, 315(5):1062—1065.

- [4] 石仲川, 刘德鑫, 张晓云, 等. 冷喷涂技术的研究现状及在航空工业领域内的应用[J]. 材料导报, 2012, 26(9):70—74.  
SHI Zhong-chuan, LIU De-xin, ZHANG Xiao-yun, et al. Research of Cold Gas Dynamic Spray Technology and Its Application in Aviation Industry [J]. Materials Review, 2012, 26(9):70—74.
- [5] 李文亚, 黄春杰, 余敏, 等. 冷喷涂制备复合材料涂层研究现状[J]. 材料工程, 2013(8): 1—8.  
LI Wen-ya, HUANG Chun-jie, YU Min, et al. State-of-the-art of Cold Spraying Composite Coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(8): 1—8.
- [6] LEE H, LEE S, KO K. Annealing Effects on the Intermetallic Compound Formation of Cold Sprayed Ni, Al Coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(2):937—943.
- [7] XU Y, HUTCHINGS L M. Cold Spray Deposition of Thermoplastic Powder[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6):3044—3050.
- [8] 周克崧, 邓春明, 刘敏, 等. 300M 钢基体上高速火焰喷涂 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳和抗盐雾腐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4):671—676.  
ZHOU Ke-song, DENG Chun-ming, LIU Min, et al. Characterizations of Fatigue and Salt Spray Corrosion Resistance of HVOF Sprayed WC-17Co and WC-10Co4Cr Coatings on the Substrate of 300M Steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(4): 671—676.
- [9] 苏贤涌, 周香林, 崔华, 等. 冷喷涂技术的研究进展[J]. 表面技术, 2007, 36(5):113—114.  
SU Xian-yong, ZHOU Xiang-lin, CUI Hua, et al. Research Progress in Cold Gas Dynamic Spray Technology[J]. Surface Technology, 2007, 36(5):113—114.
- [10] 石仲川, 王长亮, 汤智慧. 冷喷涂技术在轻合金再制造工程领域的研究现状[J]. 材料导报, 2014, 28(3):97—106.  
SHI Zhong-chuan, WANG Chang-liang, TANG Zhi-hui. Research Progress on Cold Spray in Light Alloy Remanufacturing Engineering [J]. Materials Review, 2014, 28(3): 97—106.
- [11] 刘德鑫, 石仲川, 张晓云, 等. ZM6 镁合金冷喷涂 Al 涂层结构与耐蚀性研究[J]. 材料工程, 2012(12):50—54.  
LIU De-xin, SHI Zhong-chuan, ZHANG Xiao-yun, et al. Structure and Anticorrosion Properties of Cold Sprayed Al Coatings on ZM6 Magnesium Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(12):50—54.
- [12] 郗雨林, 陈派明, 张新杰. 黄铜基体冷喷涂铜涂层的组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(S1):464—467.  
XI Yu-lin, CHEN Pai-ming, ZHANG Xin-jie. Microstructures and Properties of the Cold-sprayed Cu Coating on Brass Substrate [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(S1):464—467.
- [13] 李文亚. 基于冷喷涂的多孔钛与钛合金的制备与表征[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S3):260—263.  
LI Wen-ya. Preparation and Characterization of Porous Titanium and Titanium Alloy by Cold Spraying [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(S3):260—263.
- [14] JODOIN B, RALETZ F, VARDELLE M. Cold Spray Modeling and Validation Using an Optical Diagnostic Method[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(14/15): 4424—4432.
- [15] GRUJICIC M, ZHAO C L, DEROSSET W S, et al. Adiabatic Shear Instability Based Mechanism for Partial/Substrate Bonding in the Cold-gas Dynamic-spray Process[J]. Materials and Design, 2004, 25(8):681—688.
- [16] ZHANG Z, SHIPWAY P H. 工艺参数变化对冷喷涂铝沉积性能的影响[J]. 中国表面工程, 2008, 21(4):1—7.  
ZHANG Z, SHIPWAY P H. The Effect of Processing Variables on Deposition Characteristics of Aluminum by Cold Gas Dynamic Spraying [J]. China Surface Engineering, 2008, 21(4):1—7.
- [17] 李海洋, 李相波, 孙明先, 等. 冷喷涂 Zn-50Al 复合涂层在海水中的耐蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 62—65.  
LI Hai-yang, LI Xiang-bo, SUN Ming-xian, et al. Corrosion Resistance of Cold Sprayed Zn-50Al Coating in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 62—65.
- [18] 李文亚, 余敏. 冷喷涂技术的最新研究现状[J]. 表面技术, 2010, 39(5): 51—53.  
LI Wen-ya, YU Min. The Latest Development State of the Cold Spraying Technique[J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 51—53.
- [19] 汪水翔, 魏永黎, 汪卫华, 等. 基于材料分类的无人机部件中性盐雾加速实验研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(4): 14—18.  
WANG Shui-xiang, WEI Yong-li, WANG Wei-hua, et al. Study of Neutral Salt Spray Testing of the UAV Components Based on Material Categorization[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(4): 14—18.
- [20] 肖作安, 费锡明, 邹勇进. 锌镍合金镀层耐腐蚀性的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(3):15—17.  
XIAO Zuo-an, FEI Xi-ming, ZOU Yong-jin. Corrosion Resistance of Zinc-Nickel Alloy Plating [J]. Materials Protection, 2005, 38(3):15—17.
- [21] KREYE H, STOLTENHOFF T. Cold Spraying a Study of Process and Coating Characteristics[C]//The 1st International Thermal Spray Conference. Canada: Montreal, 2000: 419—422.
- [22] 石仲川, 张晓云, 陈昊, 等. 高强钢冷喷涂铝锌复合涂层性能研究[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 14—19.  
SHI Zhong-chuan, ZHANG Xiao-yun, CHEN Hao, et al. Properties of Cold Spray Al/Zn Coatings on High-strength Steel Spray Technology[J]. Journal of Materials of Engineering, 2015, 43(2): 14—19.
- [23] 石仲川, 汤智慧, 王长亮. 发动机中央传动机匣表面涂层的冷喷涂修复[J]. 航空维修与工程, 2014(6): 4—8.  
SHI Zhong-chuan, TANG Zhi-hui, WANG Chang-liang. Cold Spray Repair for Coating of Main Gearbox in Engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(6):4—8.
- [24] 钟历, 王昭银, 张华东. 冷喷涂沉积机理及其装备的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 13—16.  
ZHONG Li, WANG Zhao-yin, ZHANG Hua-dong. Research Progress of Precipitation Mechanism and Apparatus of Cold Spray [J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 13—16.