

文章编号: 1000-6893(2006)02-034-06

# 高强度钢表面镀锌、镉层加速腐蚀试验研究

朱立群<sup>1</sup>, 李敏伟<sup>1</sup>, 刘慧丛<sup>1</sup>, 赵波<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 北京特种车辆研究所, 北京 100072)

## Research of Accelerated Corrosion Test of Zinc, Cadmium Coating on High2strength Steel

ZHU L2qun<sup>1</sup>, LI Min2wei<sup>1</sup>, LIU Hui2cong<sup>1</sup>, ZHAO Bo<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Institute of Special Type Cars, Beijing 100072, China)

**摘要:** 通过模拟海洋大气环境所设计的中性盐雾、加速盐雾、多因子复合 3 种加速腐蚀试验方法, 考察了高强度钢表面镀锌、镉层的腐蚀性能与特点, 并将实验室加速试验结果与厦门海洋大气腐蚀结果进行了相关性分析。研究表明: 中性盐雾试验对镀锌层具有一定的加速腐蚀效应, 对镀镉层的腐蚀则比较缓慢, 而且与海洋大气环境的腐蚀结果相关性差; 采用含有  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH 等环境成分因子的加速盐雾试验, 对镀镉、镀锌层具有较好的加速腐蚀效应, 且镀锌层腐蚀结果与海洋大气环境腐蚀具有一定的相关性; 多因子复合加速腐蚀试验方法将  $\text{SO}_2$  气氛、湿热、紫外线照射、加速盐雾等环境因子引入试验, 明显加快了镀锌、镀镉层的腐蚀速度, 且镀锌层腐蚀结果与海洋大气环境的腐蚀结果存在着对应的线性关系, 线性相关系数为 0.9889, 与厦门外场腐蚀环境具有较好的相关性。

**关键词:** 高强度钢; 镀锌层; 镀镉层; 加速腐蚀试验

**中图分类号:** TG174.3<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A

**Abstract:** The article studies the corrosion capability and specialty of the zinc, cadmium coating of high2strength steel by three accelerated corrosion tests such as neutral salt spray test, accelerated salt spray test, complex mult2factor accelerated corrosion test, which were designed for simulating the marine atmospheric corrosion environment, also we analyze the relativity of accelerated corrosion result in the lab and XIAMEN marine atmospheric corrosion result. The results show that, the accelerating effect of neutral salt spray test is definite for zinc plating, while the corrosive speed of cadmium coating is slow comparatively, moreover the results have a bad relativity with that of corrosion in the outfield. s environment, We adopts accelerated salt spray test containing the environmental factors of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH and so on, the condition of accelerated salt spray have a preferable accelerating effect for both zinc and cadmium coating, and there is a definite relativity existing in the results between accelerated salt spray test and the outfield. s environment. The complex mult2factor accelerated corrosion test is a method making the ambience of  $\text{SO}_2$ , the humidity and the temperature, the irradiation of ultraviolet radiation and the accelerated salt spray into a complex corrosion environment, where the corrosive speed of zinc and cadmium coating is obviously accelerated, the results of complex mult2factor accelerated corrosion test and the outfield. s atmospheric corrosion have a linear relationship and the linearly dependent coefficient is 0.9889, which is a preferable evidence for the relativity of the two tests.

**Key words:** high2strength steel; zinc coating; cadmium coating; accelerated corrosion testing

人类已经进入海洋开发的新时代, 作为结构材料的高强度钢的应用变得十分广泛, 然而恶劣复杂的海洋大气环境对高强度钢的腐蚀是相当严重的, 因此在其表面施加防护性镀层是防止大气

腐蚀的重要措施之一。锌、镉镀层是我国航空工业碳钢和低合金钢的主要防护层<sup>[1]</sup>, 其防腐蚀效果受自然环境的影响很大, 尤其是海洋大气环境的复杂性造成了这些镀层在实际使用中防护性能差异很大, 因此研究锌、镉镀层在典型海洋大气环境中的腐蚀数据及其变化规律, 并在实验室开展

加速腐蚀试验,获取实验室加速腐蚀与海洋大气腐蚀之间的相关性,对建立准确地表征和评估材料的腐蚀损伤的试验方法具有重要的意义。

近年来模拟大气腐蚀的加速腐蚀试验方法向着多因子复合的方向发展,考察大气环境中多种腐蚀因子的协同效应,提高加速试验与室外大气暴露试验的相关性是今后加速腐蚀试验发展的方向<sup>[2,3]</sup>。目前实验室加速腐蚀试验多采用中性盐雾试验,这种方法环境因子单一,与实际海洋大气腐蚀相关性较差。

本文是在前期大量实验室盐雾试验<sup>[4]</sup>的基础上,根据实际海洋大气中的湿度、温度、紫外线、微量加速腐蚀气氛(包括  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  等离子,主要为  $\text{SO}_2$ ) 等环境影响因子进行设计,形成了镀层加速盐雾腐蚀试验和多因子复合加速腐蚀试验的方法,在考察多种环境因子对高强度钢材料表面镀锌、镀镉层腐蚀的协同作用中,得到了重现性较好的实验室加速腐蚀试验结果;同时对对比已进行 1~2 年的厦门海洋大气环境中镀层腐蚀试验结果(目前正进行第 3 年的腐蚀试验),探讨了实验室加速腐蚀试验结果与厦门外场海洋大气环境下同种镀层的腐蚀试验结果的相关性,为建立一种与外场海洋大气环境的镀层腐蚀具有相关性的实验室加速腐蚀试验方法打下了基础。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

试样为 30CrMnSiA 高强度钢板材,尺寸为 50 mm @40 mm @1 mm。按航空标准(HB/Z 5086-92)<sup>[5]</sup>进行氰化镀锌和氰化镀镉处理,并采用低铬酸钝化,在 180~200 e 下除氢 2 h。

### 1.2 腐蚀试验方法

1 厦门海洋大气暴露试验 选择亚热带海洋气候的厦门鼓浪屿腐蚀试验站作为镀层的外场腐蚀暴露试验点,该试验站年平均气温 20 e,相对湿度 80%,年降雨量 1100~2000 mm,年日照 1500~2100 h,年均风速 21.9~31.9 m/s。试验架与地面角度约 24°(与厦门纬度一致),试验架距海岸 80 m。前 3 个月每天观察,3 个月后每月观察一次镀层表面腐蚀情况,由试样表面出现腐蚀点的时间和腐蚀面积比进行评定。

° 中性盐雾试验 参照 GB/T 10125-1997<sup>[6]</sup>标准进行中性盐雾试验,一个周期为 24 h。

» 加速盐雾试验 参照 GB/T 10125-1997<sup>[6]</sup>标准进行加速盐雾试验,喷雾溶液组成如表 1 所示,一个试验周期为 24 h:连续喷雾 16 h,停喷 8 h。试验箱温度保持在  $35 \pm 2$  e,将  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH 等环境成分因子进行复合加速设计。

表 1 加速盐雾试验喷雾成分组成

Table 1 The solution's composition of the accelerated spray test

介质名称	NaCl	$\text{Na}_2\text{SO}_3$	$\text{NaNO}_3$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	pH
含量	50 g/L	5 g/L	2 g/L	0.2~0.3 mL/L	5.0

¼ 多因子复合加速腐蚀试验 模拟海洋大气环境中的盐雾气氛、太阳照射、较高的温度和湿度、微量的腐蚀气氛(主要为  $\text{SO}_2$ ) 等环境因子,形成多因子协同作用的加速腐蚀试验方法。试验分为两个阶段:1 先在复合  $\text{SO}_2$  腐蚀气氛、温度  $50 \pm 2$  e、相对湿度为  $75 \pm 5\%$ 、紫外线 4 种腐蚀因子的环境中腐蚀 8 h;° 然后在加速盐雾试验的环境中腐蚀 16 h。 $\text{SO}_2$  腐蚀气氛与厦门海洋大气环境中的  $\text{SO}_2$  的摩尔百分含量一致,由  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和稀硫酸反应生成。

## 1.3 腐蚀程度的评定

1 统计方法 试验用了 54 块镀锌试样和 54 块镀镉试样,每种加速试验包括 6 组平行试样。在腐蚀不同阶段,取出腐蚀程度接近的 3 块试样作为平行试样,根据 3 块试样的平均腐蚀程度进行评定。

° 测试仪器 用 S2530 型电子显微镜对腐蚀试样的微观形貌进行观察,用 Link2ISIS 型能谱仪对腐蚀试样的表面成分进行分析,选择腐蚀最严重的部位制成金相试样,用 XJZ6 型金相显微镜测量试样的腐蚀深度等。

» 评定方法 定期记录镀层腐蚀扩展情况,用腐蚀率(试样表面镀层的腐蚀面积/试样表面面积,体现镀层的腐蚀程度)、单位厚度腐蚀率(腐蚀率/镀层厚度,它是单位化的腐蚀率)、红锈率(红锈面积/试样表面面积,体现基体腐蚀的程度)来进行腐蚀程度的评定。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 厦门外场大气腐蚀试验

表 2 是锌、镉镀层及裸露的高强钢试样在厦门外场海洋环境中暴露 2 年后的表面腐蚀情况。

表 2 厦门海域自然暴晒腐蚀情况

Table 2 The instance of natural insulating corrosion in XIAMEN s maritime space

时间	240 h (10 d)	360 h (15 d)	480 h (20 d)	720 h (30 d)	1 680 h (70 d)	5 040 h (210 d)	8 760 h (365 d)	17 520 h (730 d)
裸露试样	腐蚀面积 50%	全部腐蚀	)	)	)	)	)	)
镀锌试样 (钝化)	)	)	基本无变化 中间开始有 小蚀点	试样开孔周 围镀层表面 有腐蚀	开孔和上端 腐蚀点扩大	试样腐蚀率 约 10% (开 孔周围)	试样腐蚀率 35%~ 40%, 红锈率为 20%	试样腐蚀率 为 100%, 红 锈率为 90%
镀镉试样 (钝化)	)	)	)	表面无变化	无变化	无腐蚀	表面颜色有 改变, 失光, 显微镜观测有 轻微腐蚀点	表面颜色明 显变浅, 局 部有钝化膜 脱落, 发生 较小面积腐 蚀

裸露的 30CrMnSiA 钢试样经过 15 d 的自然暴露, 表面腐蚀面积达到了 100%; 镀锌试样经过 730 d 暴露腐蚀后腐蚀面积达到了 100%; 镀镉试样自然暴露 730 d 后只发生很小面积的腐蚀且腐蚀较浅, 说明在厦门自然暴露海洋大气环境下, 镀锌、镀镉层对高强钢材料都起到一定的防护作用, 且镀镉层防护性能较为优异。

从厦门外场环境暴露 730 d 后试样表面的微观形貌(图 1)可以看出: 裸露钢试样表面有大量铁的氧化物的腐蚀产物, 并且有产物剥离; 镀锌试样表面也有大量腐蚀产物, 腐蚀产物覆盖层有较多的微裂纹, 表面产物主要是铁的氧化物和少量锌镀层腐蚀产物; 镀镉试样则没有出现钢基体材料腐蚀, 只是出现一些镉镀层颗粒状腐蚀产物, 进一步说明镀层(尤其是镉镀层)对高强钢起到了较

好的防护作用。

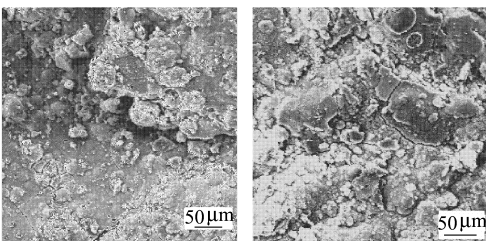
### 2.2 中性盐雾试验

表 3 为锌、镉镀层试样在中性盐雾试验的试验结果: 镀锌试样 96 h、镀镉试样 360 h 分别出现了镀层腐蚀, 说明镀层在中性盐雾试验条件比厦门外场暴露条件出腐蚀点的时间要快, 也说明在中性盐雾条件下镀镉试样的耐腐蚀性能明显优于镀锌层。图 2 是镀锌、镀镉试样经过 744 h 的中性盐雾试验后的表面形貌, 可以看出, 镀锌试样表面覆盖有大量松散的腐蚀产物, 成分分析表明这些是锌的氧化物, 而镀镉试样表面较为平整, 只有少量的腐蚀点。两种试样经过 744 h 均没有出现基体腐蚀(出红锈)。说明镀层在中性盐雾环境条件的腐蚀速度较慢, 应当建立比中性盐雾试验加速更明显而且与外场环境相吻合的试验方法。

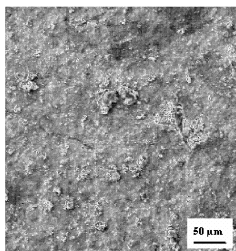
表 3 锌、镉镀层中性盐雾试验结果

Table 3 The results of Zinc, Cadmium coating in the neutral salt spray test

试 样	出腐蚀点时间	出红锈(基体腐蚀)时间
镀锌钝化	96 h	744 h 未出现红锈
镀镉钝化	360 h	744 h 未出现红锈

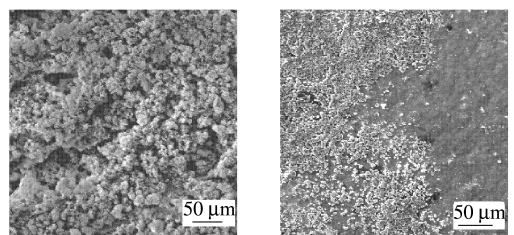


(a) 裸露钢试样 (b) 镀锌试样



(c) 镀镉试样

图 1 厦门海洋自然暴晒条件下试样表面腐蚀微观形貌(730 d)  
Fig 1 The corrosive micrographs of samples exposed to the marine natural environment of XIAMEN(730 d)



(a) 镀锌试样 (b) 镀镉试样

图 2 中性盐雾腐蚀后试样的微观形貌(744 h)  
Fig 2 The corrosive micrographs of samples in the neutral salt spray test (744 h)

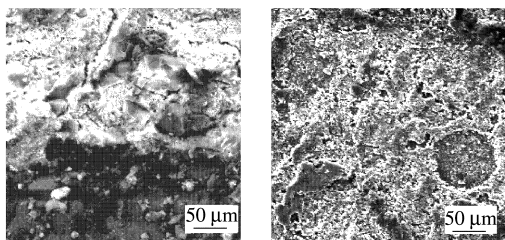
### 2.1.3 加速盐雾试验

加速盐雾试验考察了海洋大气环境中的  $SO_3^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , pH 等腐蚀因子对镀层腐蚀的协同作用,表4是这种加速盐雾试验的结果,可以看出试样表面出现腐蚀点的时间比外场环境中出现腐蚀的时间明显缩短,表明海洋环境中的  $SO_3^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , pH 等腐蚀因子对镀镉、镀锌层的腐蚀有明显的加速作用。

表4 镀锌、镀镉试样加速盐雾试验腐蚀率与时间的关系  
Table 4 The relationship between corrosive ratio and corrosive time of Zinc, Cadmium coating in the accelerated salt spray test

发生腐蚀时间/h	24	48	96	192	240
腐蚀率 镀锌试样 /%	2	15	50	75	85
腐蚀率 镀镉试样 /%	< 1	5	30	50	70

图3是镀锌试样经过288 h、镀镉试样经过192 h加速盐雾腐蚀后的微观形貌。镀锌试样腐蚀初期发生片状腐蚀,腐蚀面积较大深度较浅,随着腐蚀时间的延长,上面的腐蚀产物逐渐扩展并出现裂纹,然后腐蚀产物逐渐剥落,致使基体发生腐蚀;而镀镉层则先出现腐蚀小坑,腐蚀坑逐渐增大,深度加深,腐蚀产物增多并出现腐蚀产物剥落的现象,露出钢铁基体。



(a) 镀锌288 h (b) 镀镉192 h

图3 加速盐雾腐蚀后试样的微观形貌

Fig 3 The corrosive micrographs of samples in the accelerated salt spray test

在镀层的腐蚀形貌扩展特征上,加速盐雾试验与厦门海洋大气暴露试验较为一致,干-湿交替在镀层表面形成薄液膜,使得  $Cl^-$  等活性离子穿透钝化膜发生表面吸附形成点蚀,此后封闭氧浓差电池成为腐蚀扩展的主要动力,由于锌的化学活性较高,使得腐蚀初期扩展很快出现类似于全面腐蚀的特征,而镉的化学活性低、钝化膜致密,其腐蚀呈现点蚀特征,这表明两种试验条件下镀层腐蚀的类型具有一定的相似性。试验结果还表明介质的弱酸性微溶解作用、阴离子( $SO_3^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ )的活性吸附对镀层腐蚀产生了较大加速作用。

在腐蚀产物成分上,加速盐雾试验与厦门海

洋大气环境腐蚀相近:镀锌试样的腐蚀产物以 Zn, Fe 的氢氧化物和氧化物为主,含有少量的硫化盐、硫酸盐和氯化盐;镀镉试样的腐蚀产物以镉、铁的氧化物和氢氧化物为主,这也说明两者之间存在相关性。

采用一元线性回归的数学模型对两种试验条件下镀锌试样的数据进行处理,得到大致的线性回归方程:  $y = 1441.86x + 2121.72$  (x, y 分别代表加速盐雾腐蚀和外场腐蚀达到相同单位厚度腐蚀率所需的时间),其相关系数为 0.9621,大于临界值 0.9500,进一步体现出两者腐蚀规律具有一定的线性对应关系。镀镉试样由于外场试验时间短需要得到后续的外场海洋环境腐蚀试验结果后再进行相关性分析讨论。

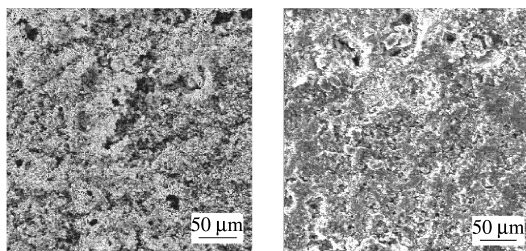
### 2.1.4 多因子复合加速腐蚀试验

表5是锌、镉镀层试样的多因子复合加速腐蚀试验的结果,可以看出多因子复合加速腐蚀试验较加速盐雾试验具有更好的加速腐蚀性。图4为镀锌、镀镉试样分别经过192 h多因子复合加速腐蚀后的表面微观形貌,可以看出,镀锌试样同样首先发生片状腐蚀,腐蚀产物逐渐增多成膜,但是这种膜较加速盐雾试样的疏松,膜上有较多小孔和微裂纹,随着腐蚀时间的延长,腐蚀产物膜逐渐破坏露出基体出现红锈。而镀镉试样仍然是以出现小腐蚀坑为主,腐蚀逐渐扩展至基体。

表5 镀锌、镀镉试样多因子复合加速腐蚀试验的腐蚀率与时间的关系

Table 5 The relationship between corrosive ratio and corrosive time of Zinc, Cadmium coating in the complex multi-factor accelerated corrosion test

发生腐蚀时间/h	24	48	96	192	240
腐蚀率 镀锌试样 /%	5	30	75	100	红锈率 10%
腐蚀率 镀镉试样 /%	< 1	10	50	80	红锈率 < 1%



(a) 镀锌192 h (b) 镀镉192 h

图4 多因子复合加速腐蚀后试样的微观形貌

Fig 4 The corrosive micrographs of samples in the complex multi-factor accelerated corrosion test

在镀层的腐蚀形貌扩展特征上,多因子复合加速腐蚀试验与厦门海洋大气暴露试验体现了较好一致性,都以镀层表面薄液膜中的电化学腐蚀为主,Cl<sup>-</sup>等活性离子在薄液膜中富集,使其极易穿透钝化膜吸附于镀层表面形成点蚀,氧浓差电池促使腐蚀进一步扩展,锌镀层仍呈现出类似全面腐蚀的特征,而镉镀层呈现出明显点蚀特征。同时介质的弱酸性微溶解作用、盐类的沉积、SO<sub>2</sub>氧化水合、紫外线穿透和加热效应等因子的协同作用对镀层加速腐蚀作用更加明显,这不仅表明多因子复合加速腐蚀试验与厦门海洋大气环境腐蚀具有一定的相关性,而且也表明其具有更好的加速性。

在腐蚀产物成分上,多因子复合加速腐蚀试验与厦门海洋大气环境腐蚀较为接近:镀锌试样腐蚀产物以Zn、Fe的氢氧化物和氧化物为主,含有少量的硫化盐、硫酸盐和氯化盐,硫元素的含量比外场试样略高;镀镉试样的腐蚀产物以镉、铁的氧化物和氢氧化物为主,这同样说明两者之间存在一定的相关性。

将这两种试验条件下镀锌试样的数据进行一元线性回归处理。得到线性回归方程:  $y = 2251.47x + 1701.53$  ( $x, y$  分别代表多因子复合加速腐蚀和外场腐蚀达到相同单位厚度腐蚀率所需的时间),其相关系数为0.9889,远大于回归效果检验临界值0.9500,回归效果显著,进而说明多因子复合加速腐蚀试验与厦门海洋大气环境中的镀锌层腐蚀具有一种较好的线性对应性。

### 3 结 论

(1) 对高强度钢表面锌、镉镀层根据厦门外场海洋环境设计了中性盐雾、加速盐雾、多因子复合加速腐蚀等3种加速腐蚀试验方法,通过这些试验方法取得了高强度钢表面镀层的实验室加速腐蚀试验结果,镀镉层的防护性能要明显优于镀锌层,与厦门外场海洋大气暴露试验的结果一致。

(2) 实验室加速盐雾试验与厦门海洋大气腐蚀试验结果相比,这种方法对镀镉层、镀锌层的腐蚀具有较好的加速性,而且镀锌试样的腐蚀与厦门海洋大气环境的腐蚀规律具有一定的相关性。

(3) 多因子复合加速腐蚀试验与厦门海洋大气环境具有较好的模拟性,对镀锌层、镀镉层腐蚀具有明显的加速效应,SO<sub>2</sub>腐蚀气氛、湿热、紫外线照射、加速盐雾等因子的协同作用对于镀锌、镀镉层的腐蚀非常明显。可以根据镀锌试样的腐蚀

扩展形态、腐蚀产物成分等结果,初步建立与厦门海洋大气暴露试验的相关性关系为:  $y = 2251.47x + 1701.53$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 李家柱, 马颐军. 锌镀层与镉镀层抗大气腐蚀性能的比较[J]. 材料工程, 1998(5): 28- 30, 33.  
Li J Z, Ma Y J. Comparison of atmospheric corrosion resistance between Zinc coatings and Cadmium coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 1998 (5): 28- 30, 33. (in Chinese)
- [2] 牟献良, 田月娥, 汪学华. 碳钢和低合金钢模拟加速试验与大气腐蚀试验的相关性[J]. 环境技术, 2000(4): 14- 17.  
Mu X L, Tian Y E, Wang X H. The relativity of the simulated accelerated test of carbon steel and low alloy steel and atmospheric corrosion test[J]. Environmental Technology, 2000(4): 14- 17. (in Chinese)
- [3] Drazic D M. The correlation between accelerated laboratory corrosion test and atmospheric corrosion station tests on steel[J]. Corrosion Science, 1989, 29(10): 1197- 1204.
- [4] 刘慧丛, 朱立群, 杜岩滨. 几种镀层海洋大气暴露与实验室盐雾试验条件下的耐腐蚀性研究[J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2002(10): 110- 113.  
Liu H C, Zhu L Q, Du Y B. The Anticorrosion character research of some plating material[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Natural Science), 2002(10): 110- 113. (in Chinese)
- [5] HB/Z 5068- 92, 电镀锌、镉工艺[S]. 1992.  
HB/Z 5068- 92, The technics of electroplating Zinc, cadmium[S]. 1992. (in Chinese)
- [6] GB/T 10125- 1997, 人造气氛腐蚀试验—盐雾试验[S]. 1992.  
GB/T 10125- 1997, Artificial corrosion test) salt spray test[S]. 1992. (in Chinese)
- [7] 屈庆, 严川伟, 张蕾. Zn初期大气腐蚀中NaCl和SO<sub>2</sub>的协同效应[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1272- 1276.  
Qu Q, Yan C W, Zhang L. The cooperative effect of NaCl and SO<sub>2</sub> on Zinc in the earlier atmospheric corrosion[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1272- 1276. (in Chinese)
- [8] Henriksen J F, Mikhailov A A. Atmospheric corrosion tests of metals in SO<sub>2</sub>polluted cold atmosphere in northern Norway and along its border with Russia[J]. Protection of Metals, 2002, 38(6): 579- 589.
- [9] Panchenko Y M, Strekalov P V. Comparative assessment of Zinc and Cadmium electroplates by the weight of retained corrosion products and the total weight[J]. Protection of Metals, 2001, 37(4): 367- 384.
- [10] 王振尧, 于国才, 韩薇. 我国若干典型大气环境中的锌腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(4): 191- 195.  
Wang Z R, Yu G C, Han W. Atmospheric corrosion performance of Zinc at several selected test sites in China[J].

- Corrosion Science and Protection Technology, 2003, 15 (4): 191- 195. (in Chinese)
- [11] Palumbo G. The importance of subtle materials and chemical considerations in the development of accelerated tests for service performance prediction[J]. ASTM STP 1194, 1994: 252- 267.
- [12] 孙志华, 李金桂, 李牧铮. 金属材料大气腐蚀加速试验研究的发展趋势[J]. 材料工程, 1995(12): 41- 43.  
Sun Z H, Li J G, Li M Z. Future of accelerated atmospheric corrosion testing of metal materials[J]. Journal of Materials Engineering, 1995(12): 41- 43. (in Chinese)
- [13] 屈庆, 严川伟, 张蕾. NaCl 和 SO<sub>2</sub> 在 A3 钢初期大气腐蚀中的协同效应[J]. 金属学报, 2002, 38(10): 1062- 1066.  
Qu Q, Yan C W, Zhang L. The cooperative effect of NaCl and SO<sub>2</sub> on A3 steel in the earlier atmospheric corrosion[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(10): 1062- 1066. (in Chinese)
- [14] 韩薇, 贾薇, 汪俊. 凝露状态下 SO<sub>2</sub> 对 A3 钢腐蚀机理的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(6): 355- 358.  
Han W, Jia W, Wang J. Effect of SO<sub>2</sub> on corrosion mechanism of A3 steel at dewing environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(6): 355- 358. (in Chinese)
- [15] Zhirnov A D, Karimova S A, Ovsyannikova L V, et al. New protective coatings for replacing cadmium coatings on Steel Parts[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2003, 45(1/2): 23- 25.
- [16] 章葆澄. 电镀工艺学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993. 57, 77.  
Zhang B C. Electroplating technics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1993. 57, 77. (in Chinese)
- [17] 李家柱, 马颐军. 镉镀层的大气腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 11(6): 356- 358.  
Li J Z, Ma Y J. Atmospheric corrosion behavior of cadmium coatings[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1999, 11(6): 356- 358. (in Chinese)

#### 作者简介:



**朱立群**(1955- ) 男, 汉族, 北京航空航天大学材料科学与工程学院教授, 博士生导师, 长期从事材料表面腐蚀与防护方面的研究, 近年来在国内外重要刊物和国际会议上发表学术论文 50 多篇。出版教材和著作 5 本。Tel: 010 82317113; E-mail: zhulq@buaa.edu.cn

**李敏伟**(1981- ) 男, 土家族, 北京航空航天大学材料物理与化学专业硕士研究生, 目前主要进行材料的腐蚀与防护学科的学习和镀层加速腐蚀试验方面的研究工作。

Tel: 010 82317113; E-mail: ningfer2120@126.com

(责任编辑: 蔡斐)