

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.05.005

30CrMnSiNi2A钢紧固件磁控溅射铝膜的腐蚀 和氢脆性能*

胡芳, 代明江, 侯惠君, 林松盛, 韦春贝, 石倩

(广东省新材料研究所 a. 现代材料表面工程技术国家工程实验室, b. 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: 为提高30CrMnSiNi2A螺栓紧固件的耐腐蚀性能, 采用磁控溅射技术在30CrMnSiNi2A试样和螺栓表面制备铝薄膜。采用SEM观察铝膜层的微观形貌。选取与镀铝薄膜厚度相同的氰化镀锌试样为对比件, 采用电化学工作站和中性盐雾试验测试薄膜的耐腐蚀性能; 采用氢脆试验测试基体和镀铝后处理试样的氢脆性能。结果表明: 螺栓表面铝薄膜的厚度为7.26~10.47 μm , 厚度不均匀性为 $\pm 17.2\%$; 镀铝薄膜的螺栓耐盐雾腐蚀性能比氰化镀锌的耐腐蚀性能好; 化学转化后处理和喷丸+化学转化复合后处理的镀铝螺栓的耐盐雾腐蚀性能优异, 自腐蚀电流与30CrMnSiNi2A基体相比下降了1~2个数量级; 磁控溅射镀铝薄膜和后处理工艺对30CrMnSiNi2A钢基体的氢脆性能没有影响。

关键词: 30CrMnSiNi2A高强度钢; 螺栓紧固件; 铝薄膜; 耐腐蚀性; 氢脆性能

中图分类号: TG174.444; TG113.23

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)05-0041-08

Corrosion Resistance and Hydrogen Embrittlement Performance of Al Film Deposited by Magnetron Sputtering on Fasteners of 30CrMnSiNi2A Steel

HU Fang, DAI Ming-jiang, HOU Hui-jun, LIN Song-sheng, WEI Chun-bei, SHI Qian

(a. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface, b. Guangdong Province Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510651)

Abstract: The Al film was prepared by magnetron sputtering on 30CrMnSiNi2A specimens and bolts in order to improve the corrosion resistance of the bolts. The surface and cross section morphology of the Al film were observed by SEM. The cyanide zinc plating samples with the same thickness of Al films were chosen as comparison in this paper. The anti-corrosion performance of the samples with different treatment types were measured by electrochemical working station and neutral salt spray test. The hydrogen embrittlement performance of the substrate and the Al film was measured by hydrogen embrittlement test. The results show that the thickness of films on the bolts is 7.26-10.47 μm , and the non-uniform of film thickness on bolts is $\pm 17.2\%$. The corrosion resistance performance of the bolts coated by Al film is much better than that of the cyanide zinc plating. The bolts treated by chemical conversion and compound of blasting and chemical conversion show excellent anti-corrosion performance, and the self etching current is reduced about one or two orders of magnitude. The Al films deposited by magnetron sputtering and the post treatment processing have no effect on hydrogen embrittlement of 30CrMnSiNi2A steel.

Keywords: high strength steel 30CrMnSiNi2A; bolt fasteners; Al film; corrosion resistance; hydrogen embrittlement

收稿日期: 2016-02-03; 修回日期: 2016-08-18; 基金项目: *广东省省级科技计划项目(2013B090500115, 2014A020217013, 2015B070701024); 科技部科研院所项目(2014EG115005)

通讯作者: 胡芳(1984—), 女(汉), 工程师, 硕士; 研究方向: 材料表面处理; Tel: (020) 6108 6657; E-mail: hufangleaf@163.com

网络出版日期: 2016-09-30 13:53; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160930.1353.028.html>

引文格式: 胡芳, 代明江, 侯惠君, 等. 30CrMnSiNi2A钢紧固件磁控溅射铝膜的腐蚀和氢脆性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 41-48. HU F, DAI M J, HOU H J, et al. Corrosion resistance and hydrogen embrittlement performance of Al film deposited by magnetron sputtering on fasteners of 30CrMnSiNi2A steel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 41-48.

0 引言

30CrMnSiNi2A合金结构钢经热处理后可获得高的强度、好的塑性和韧性、良好的抗疲劳性能和断裂韧度、低的疲劳裂纹扩展速率,其淬透性较高,切削加工性和焊接性好^[1],因此被广泛应用于航空紧固件。紧固件是航空产品中一种量大面广的通用基础件,包括螺栓、螺柱、螺母、铆钉等。紧固件的品质对工程装备的工作性能和结构安全性起着重要作用,其可靠性直接关系到设备的可靠性,也关系到工程装备总体的安全性^[2-3]。许多长期暴露在潮湿或海洋环境中的紧固件腐蚀非常严重,而腐蚀会导致紧固件难以拆卸,连接强度下降等问题,这给紧固件正常服役和维护保养造成了极大的困难,甚至会因紧固件的失效而酿成重大事故^[4]。因此,为了解决30CrMnSiNi2A高强钢紧固件的金属腐蚀和电偶腐蚀的问题,常常需在高强钢表面制备防护涂层用以提高其耐蚀性能。

目前,高强钢表面常采用电镀锌和镀锌^[5-6]、电镀镉^[7-8]、达克罗涂层^[9]、离子镀铝等表面涂层处理技术^[10-12]。但电镀技术存在废水的排放问题,会造成环境污染,尤其是氰化物的排放对环境污染极为严重;电镀镉工艺会引起紧固件在使用过程中产生“镉脆”现象^[13]。磁控溅射技术作为一种绿色环保的真空镀膜技术可替代传统电镀工艺。铝薄膜由于其电位相对较低,紧固件镀铝薄膜后其耐腐蚀性和电偶相容性好^[14];使用温度达到496℃^[15],可用于中高温防护层,而且不会引起基体疲劳性能下降等,因此成为真空镀膜处理首选的耐蚀防护涂层之一^[13]。目前,离子镀铝已在国外有较多的使用,美军标甚至规定离子镀铝工艺可作为钢铁零件的替代镉工艺^[10,16]。国内也有离子镀铝的工艺研究^[11],但由于离子镀铝成本较高,设备昂贵等问题,因此,国内对离子镀铝的相关工艺研究的并不多,目前还未见镀铝技术应用用于航空工业高强钢的防护的相关报道。

文中采用磁控溅射技术在典型30CrMnSiNi2A螺栓紧固件表面制备铝薄膜,研究镀铝螺栓的相关性能,以期将这种镀铝技术应用用于螺栓等紧固件表面,提高30CrMnSiNi2A高强钢紧固件在海洋或潮湿环境中的耐蚀性,延长其使用寿命。

1 试验与方法

1.1 Al膜的制备

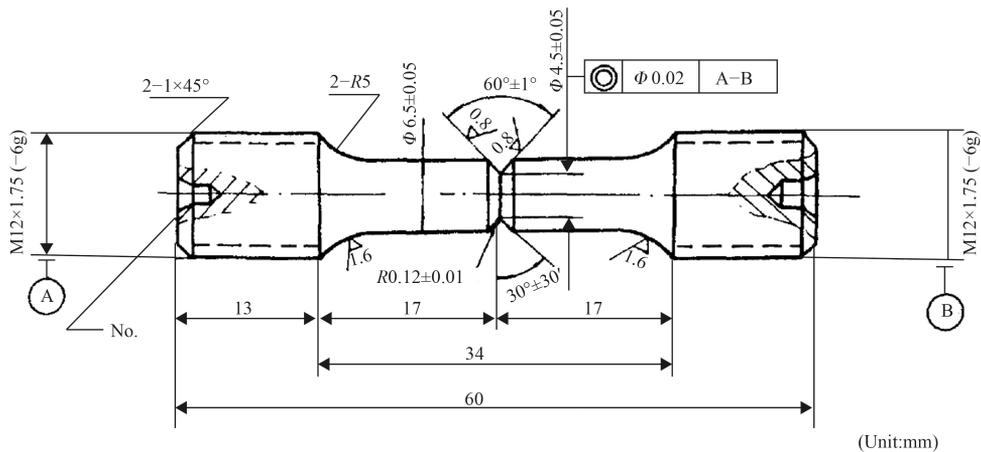
镀膜设备为J-1250型柱靶直流脉冲磁控溅射镀膜机。试验使用的30CrMnSiNi2A试样尺寸为100 mm×50 mm×3 mm,螺栓的尺寸为M8。采用粒径为178 μm(80目)的玻璃珠和棕刚玉的混合砂对试样和螺栓进行喷砂预处理,然后在CCl₄溶液中超声清洗30 min,烘干后装炉。先使用氩离子清洗试样和螺栓表面,炉压0.6 Pa,负偏压-800 V,清洗时间30 min;离子清洗结束后镀Al膜,炉压0.4 Pa,Al靶电流25 A,靶电压520 V,负偏压-250 V,占空比50%,Al膜沉积时间4 h。

试样和紧固件表面镀铝处理后,分别进行化学转化后处理、喷丸和化学转化后处理。化学转化处理采用阿洛丁试剂,浓度8~12 g/L,处理温度30~35℃,时间100~120 s。采用粒径为105 μm(150目)的玻璃珠喷丸,压力为0.2~0.3 MPa,玻璃珠均匀横扫试样表面,喷丸覆盖率为100%。对比件是氰化镀锌的螺栓,按照航空标准HB/Z5086—92^[17]进行制备,并采用低铬酸钝化后处理。

1.2 性能测试

使用JEOL JSM-5910型扫描电镜观察铝薄膜的形貌并测试膜层的厚度;使用X'pertPro MRD X射线衍射仪表征膜层的晶体结构,扫描角度10°~90°,扫描速度0.05°/s。使用PARSTAT 4000型电化学工作站测试电化学性能,测试时采用三电极体系:参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂电极,工作电极为试样。测试溶液为3.5%的NaCl溶液,测试频率为10⁻²~10⁵ Hz,测试面积为1.766 cm²。

采用盐雾试验测试紧固件的耐腐蚀性能,在SH-90盐雾腐蚀试验箱中进行,采用5%NaCl溶液,箱内温度为(35±2)℃,溶液pH值为6.5~7.2,压力范围为0.8~1.2 Pa,以试样表面出现第一点红锈的时间作为耐盐雾腐蚀时间,取厚度相同的氰化镀锌螺栓紧固件作为对比件。在WDML-5悬臂应力试验机上进行氢脆性能测试,按照HB-5067.1—2005^[18]进行,氢脆试样的尺寸如图1所示。根据试样缺口截面积计算试验加载载荷,所加载载荷为试样缺口截面积乘以缺口极限抗拉强

图1 氢脆试样的尺寸示意图^[18]Fig. 1 Schematic diagram of the hydrogen embrittlement sample^[18]

度的75%；根据计算载荷对试样加载，持续拉伸时间达到200 h后未发生断裂则氢脆试验合格。

2 结果与分析

2.1 薄膜的表面形貌

图2(a)是30CrMnSiNi2A螺栓镀铝后的表面形貌，可以看出铝晶粒尺寸为2~3 μm，且晶粒之间边界清晰。螺栓表面的铝薄膜经化学转化处理后，晶粒尺寸减小并呈圆球状，晶粒之间的孔隙

明显减少(图2(b))，膜层表面形成一层含有铬化合物的化学转化膜。图2(c)是喷丸和化学转化复合处理后铝膜的微观形貌，可以看出喷丸处理使得铝膜层被夯实，膜层表面的柱状晶结构消失，但其表面仍存在少许微孔缺陷，这可能是由于喷丸处理时铝晶粒在玻璃珠的撞击下，少许疏松的铝晶粒被玻璃珠切削带走所致。同时可以看出，经复合处理后的铝膜表面均匀、连续和致密，这有利于阻碍腐蚀液到达基体，提高基体的耐腐蚀性能。

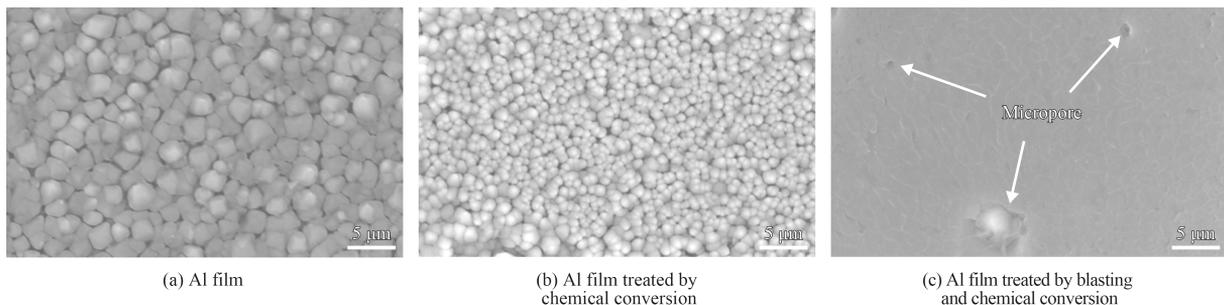


图2 30CrMnSiNi2A螺栓表面不同处理类型铝膜层的表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of the Al films with different treatment deposited on 30CrMnSiNi2A bolts

2.2 薄膜的晶体结构

图3是30CrMnSiNi2A表面不同处理类型的镀铝试样的XRD图谱。如图3(a)所示：在30CrMnSiNi2A基体表面所制备的Al膜在10°~90°范围内出现5个特征峰，峰位2θ分别位于38.5°、44.7°、65.1°、78.2°和82.4°，其衍射指数分别为(111)、(200)、(220)、(311)和(222)，最强峰出现在(111)晶面。所制备的铝膜经化学转化后处理和铝膜的XRD衍射峰基本相同，最强峰也出现在(111)晶面，这表明化学转化后处理对

30CrMnSiNi2A表面铝膜的晶体结构基本没有影响，这与文献[19]的结果一致。

采用喷丸和化学转化复合处理的铝膜的XRD图谱见图3(c)，其衍射最强峰仍出现在2θ=44.7°处，与未处理的铝膜相比，经复合处理的铝膜(200)、(311)晶面峰强度减弱，(222)晶面衍射峰消失，但是喷丸和化学转化复合处理并未改变铝膜晶面的择优取向。

2.3 薄膜的均匀性

紧固件防护涂层的要求与一般的防护涂层不

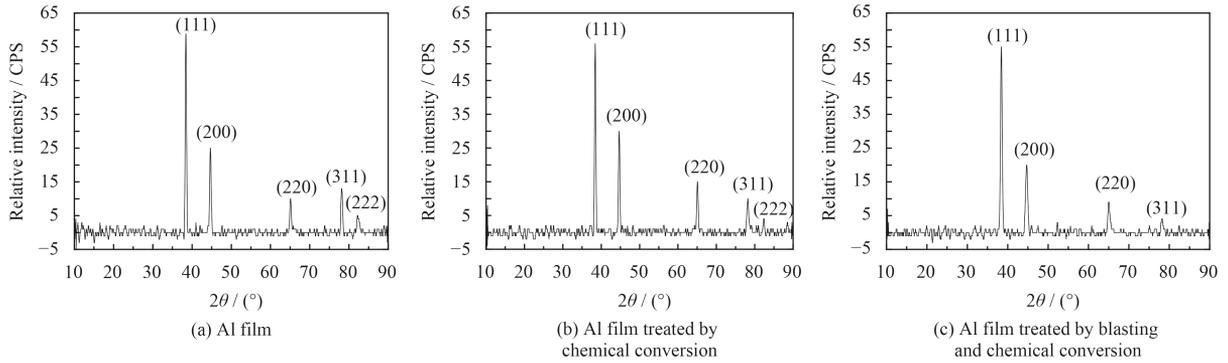


图3 30CrMnSiNi2A基体表面不同处理类型铝膜的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of the Al films with different treatment on 30CrMnSiNi2A substrate

同,它不仅需要有良好的耐腐蚀性能,而且涂层应厚度适宜且均匀一致,以保证螺栓与螺母或构件之间的良好配合^[3]。螺栓表面经磁控溅射镀铝处理后,将其沿横断面切开,测试螺栓各个位置铝膜层的厚度,图4是螺栓的横断面照片,图5是螺栓各个位置处膜层的截面形貌,可以看出:铝膜致密均匀,膜层内部没有明显的缺陷,但是受装夹方式和螺栓复杂几何形状的影响,螺栓各个位置处的铝膜层厚度并不相同。其中,螺栓顶部、螺纹齿顶和螺栓底部铝膜层最厚,分别为10.47、10.07和9.52 μm ,而螺纹齿根处的铝薄膜最薄为



图4 螺栓的横断面照片

Fig. 4 Cross section picture of the screw

7.26 μm 。这是由于在氩离子的作用下,从磁控溅射靶溅射出的铝离子容易到达平整的表面和工件的边缘,因此,螺栓顶部和底部的平整端面及螺

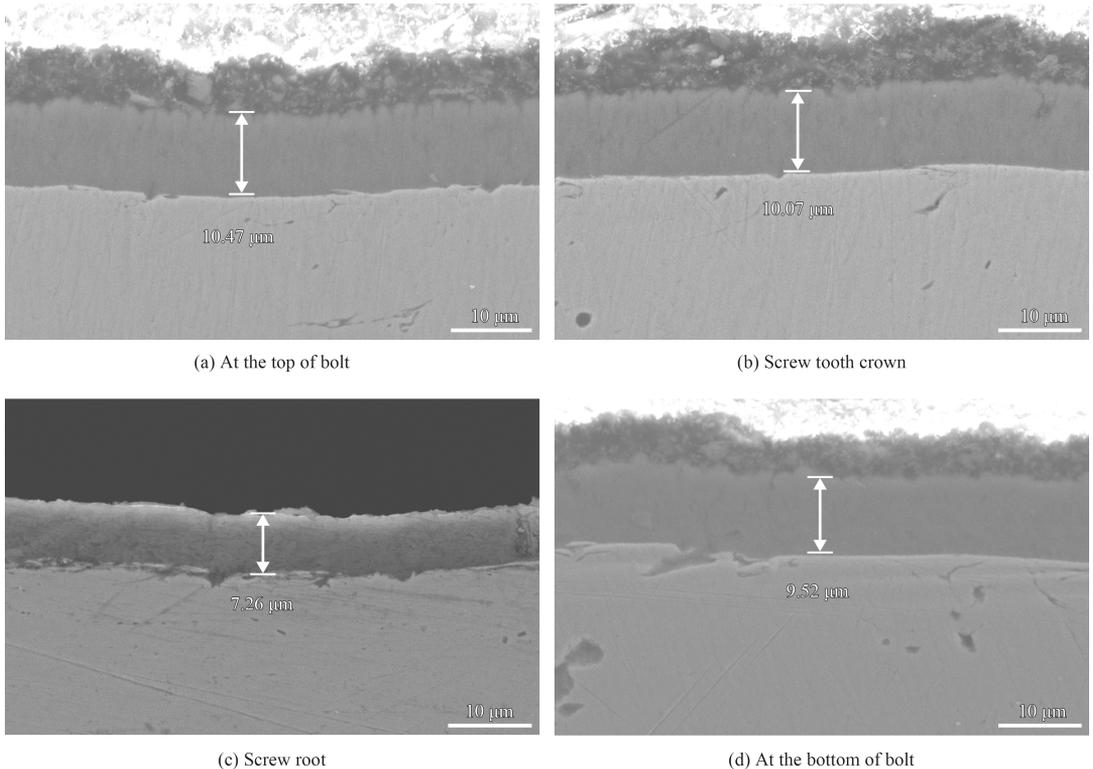


图5 30CrMnSiNi2A螺栓不同位置处铝薄膜的截面形貌

Fig. 5 Cross section morphologies of the Al films in different positions of 30CrMnSiNi2A bolt

纹齿顶处的铝薄膜较厚, 而到达螺纹齿根受螺纹遮挡, 铝离子数量减少, 从而导致螺纹齿根的铝薄膜较薄。同时试验表明: 在螺栓表面所制备的铝膜层的厚度范围为7.26~10.47 μm, 平均膜层厚度为9.33 μm, 其厚度不均匀为±17.2%。

此外, 螺栓使用过程中会有螺纹间的相互摩擦, 因此镀层与基体的结合力很重要。由图5可知: 螺栓不同位置处铝薄膜与钢基体界面平整, 结合程度良好。采用划格法测试30CrMnSiNi2A平面试样的膜基结合力, 结果表明无论是化学转化处理的30CrMnSiNi2A镀铝试样, 还是经过喷丸+化学转化复合处理的30CrMnSiNi2A镀铝试样, 切割边缘完全平滑, 无一格脱落, 结果也进一步验证

了铝薄膜与30CrMnSiNi2A基体具有较好的结合力。

为了研究镀铝膜层对30CrMnSiNi2A螺栓耐盐雾腐蚀性能的影响, 选取与铝膜层厚度基本相同的氰化镀锌处理的螺栓作为对比件, 所选取的氰化镀锌螺栓锌膜层的厚度范围为7.14~10.57 μm, 平均膜厚为9.19 μm。

2.4 薄膜的耐腐蚀性能

图6(a)(b)分别为30CrMnSiNi2A基体、镀铝膜和氰化镀锌膜以及不同后处理状态的铝膜和锌膜的极化曲线。采用计算机软件(Corrview)对各极化曲线进行Tafel拟合后得出试样的自腐蚀电位(E_{corr})和自腐蚀电流密度(I_{corr}), 其值见表1。

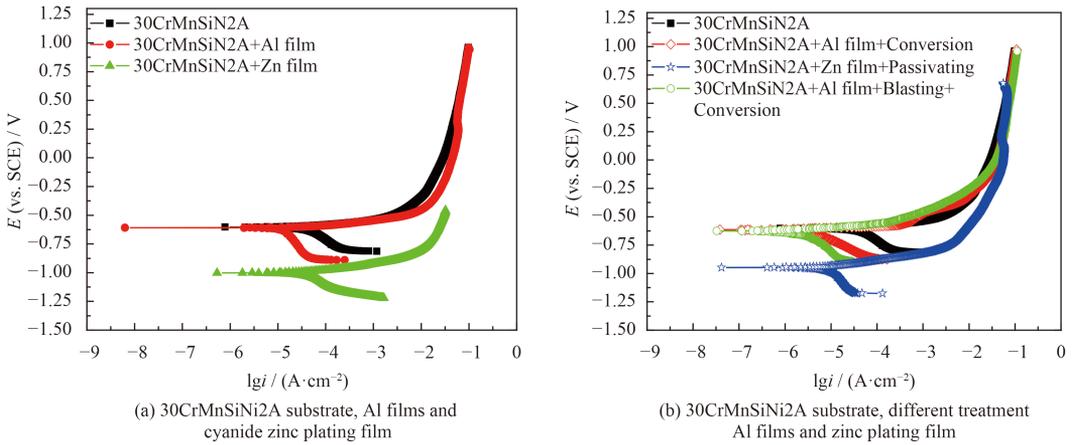


图6 经过不同表面处理的30CrMnSiNi2A试样在3.5%NaCl溶液中的动电位极化曲线

Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves of the 30CrMnSiNi2A with different treatment in 3.5% NaCl solution

表1 30CrMnSiNi2A试样在3.5%NaCl溶液中的腐蚀参数

Table 1 Results of potentiodynamic corrosion tests of the 30CrMnSiNi2A samples in 3.5% NaCl solution

Samples	E_{corr} / V	I_{corr} / ($A \cdot cm^{-2}$)
30CrMnSiNi2A substrate	-0.604	7.515×10^{-5}
30CrMnSiNi2A+Al film	-0.609	2.235×10^{-5}
30CrMnSiNi2A+Zn film	-1.002	2.526×10^{-5}
30CrMnSiNi2A+Al film+Conversion	-0.616	2.424×10^{-6}
30CrMnSiNi2A+Al film+Blasting+Conversion	-0.645	1.191×10^{-7}
30CrMnSiNi2A+Zn film+Passivating	-0.948	9.173×10^{-6}

可以看出: 经不同处理的30CrMnSiNi2A试样自腐蚀电流均有不同程度的下降。30CrMnSiNi2A经镀铝和氰化镀锌处理后的自腐蚀电流密度为同一数量级, 自腐蚀电位和自腐蚀电流较30CrMnSiNi2A基体均较低, 这说明镀铝薄膜和氰化镀锌薄膜作为牺牲阳极保护了30CrMnSiNi2A

钢基体, 但镀铝膜的腐蚀速率更缓慢一些。因此, 镀铝薄膜与氰化镀锌膜相比, 能更好地保护基体。30CrMnSiNi2A基体镀铝化学转化和氰化镀锌钝化后处理后, 其自腐蚀电流较基体均下降了约1个数量级, 但前者的自腐蚀速率较后者更低, 因此, 镀铝后化学转化处理能进一步降低30CrMnSiNi2A钢基体的腐蚀速率。再者, 喷丸和化学转化复合后处理的30CrMnSiNi2A镀铝试样, 其自腐蚀电流为 $1.191 \times 10^{-7} A/cm^2$, 较30CrMnSiNi2A基体的自腐蚀电流 $7.515 \times 10^{-5} A/cm^2$ 下降了约2个数量级, 腐蚀速率最低, 这说明喷丸和化学转化复合后处理的方法能极大程度地提高30CrMnSiNi2A钢基体的耐腐蚀性能。由于磁控溅射所制备的铝膜具有明显的柱状晶结构, 先使用喷丸处理铝膜表面被夯实, 然后采用铬酸盐化学转化处理, 铝膜与铬离子($Cr_2O_7^{2-}$)反应, 生成氢氧化铬($CrOOH$)和氢氧化铝($AlOOH$)混合物组成的转化膜, 三价

铬元素的铬盐转化膜对铝膜起到物理保护作用,而六价铬离子很快从三价的氢氧化铬(CrOOH)中析出,这种六价铬元素的铬盐转化膜具有较好的自修复性能^[20-21],所以经过喷丸和铬酸盐化学转化处理的铝膜,其耐盐雾腐蚀性能能极大地提高。

为了进一步测试试样的耐腐蚀性能,将不同表面处理的30CrMnSiNi2A螺栓放入盐雾腐蚀试验箱中进行盐雾性能测试。图7是中性盐雾腐蚀试验前后试样的表面形貌。结果表明:磁控溅射镀铝处理的螺栓216 h盐雾试验后,在螺纹处出现少许

红锈,如图7(a)所示;而氰化镀锌处理的螺栓耐盐雾腐蚀时间为168 h,氰化镀锌的螺栓盐雾试验后,在螺纹处和顶部均出现大量红锈,表明磁控溅射镀铝处理的30CrMnSiNi2A螺栓比氰化镀锌处理的耐盐雾腐蚀性能好,铝镀层对螺栓起到了更好的保护作用,这与电化学性能测试的结果一致。铝薄膜在大气中易氧化,表面生成致密的氧化铝薄膜;虽然锌的电位也较负,但是表面不能像铝一样形成致密氧化膜,因此作为牺牲性阳极防护涂层的耐蚀性有限^[10]。



(a) Al films (b) Cyanide zinc plating films (c) Al films treated by chemical conversion (d) Al films treated by blasting and chemical conversion (e) Cyanide zinc plating films treated by passivation

图7 经过不同表面处理的30CrMnSiNi2A螺栓盐雾试验前后的宏观照片

Fig. 7 Macro photos of the 30CrMnSiNi2A bolts prepared by different surface treatment before and after salt spray test

30CrMnSiNi2A螺栓镀铝膜后再进行化学转化后处理,其耐盐雾腐蚀时间为740 h,而喷丸和化学转化复合处理的镀铝螺栓,其耐盐雾腐蚀时间达到1 344 h,氰化镀锌低铬钝化处理的螺栓耐盐雾腐蚀仅为420 h。很显然,与不同后处理的镀铝螺栓相比,氰化镀锌钝化后处理的螺栓耐蚀性较差,从电化学性能测试的数据来看,前两者较氰化镀锌钝化的试样自腐蚀电流密度更低,这与膜层的微观结构有关。

从图8可以看出:30CrMnSiNi2A螺栓氰化镀锌钝化处理后,锌膜层表面呈现不规则多面体结构,晶粒较粗大,晶粒之间存在明显孔隙甚至有裂纹产生,与化学转化处理的镀铝膜层、喷丸和化学转化复合处理的镀铝膜层相比(图2(b)(c)),钝化后处理的氰化镀锌膜层缺陷较多;从截面形貌来看,与磁控溅射镀铝膜层相比(图5),氰化镀锌钝化膜层结构较疏松,膜层内部存在较多微孔,这会导致 Cl^- 腐蚀介质容易到达30CrMnSiNi2A基

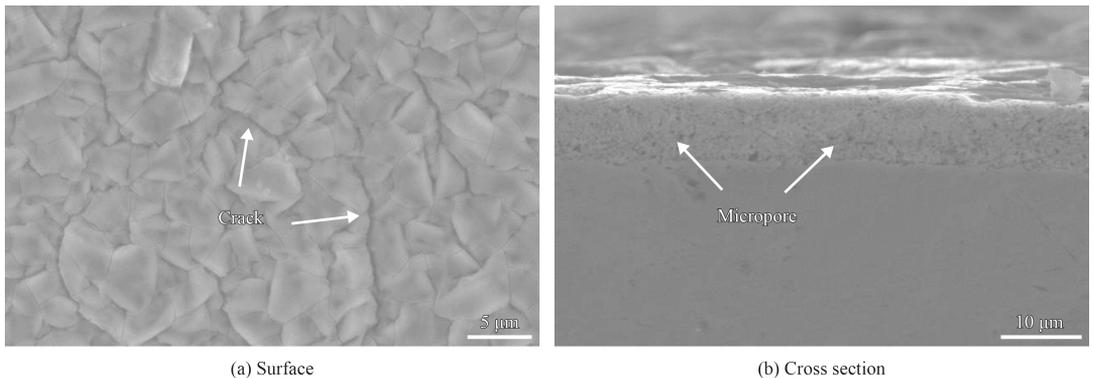


图8 经氰化镀锌钝化处理30CrMnSiNi2A螺栓的微观形貌

Fig. 8 Morphologies of the cyanide zinc plating films treated by passivation deposited on 30CrMnSiNi2A bolts

体,从而造成腐蚀。

2.5 薄膜的氢脆性能

30CrMnSiNi2A钢的淬透性较高,切削加工性和焊接性尚好,但对缺口和氢脆(包括环境氢脆)较敏感。材料所吸收的氢和应力的综合作用,在小于屈服强度的静载荷下,持续一段时间会发生材料的早期脆性断裂。因此施加防护涂层的紧固件的力学性能应符合要求,避免产生氢脆现象^[3]。为了研究磁控溅射镀铝工艺和后处理工艺对基体氢脆性能的影响,采用对氢脆敏感的缺口拉伸试样,然后施加静载荷进行氢脆试验(持久拉伸试验)。表2是30CrMnSiNi2A钢试样和镀铝薄膜后处理试样的氢脆性能。

按照HB5214—1996^[22]测试并计算30CrMnSiNi2A

高强钢的缺口强度为2 546.7 MPa,未镀铝薄膜的30CrMnSiNi2A钢氢脆试样(1号~6号)加载值为30 432 N,镀铝薄膜后处理的30CrMnSiNi2A氢脆试样(7号~12号)加载值为30 513 N。这两种类型的30CrMnSiNi2A高强钢试样均采用6根,每3根试样分为一组,氢脆试验结果为30CrMnSiNi2A高强钢经过262 h和284 h持久拉伸试验后,6根试样均未断裂;镀铝薄膜后进行喷丸和化学转化复合处理的30CrMnSiNi2A高强钢232 h和284 h持久拉伸试验后,所有试样未发生断裂现象,氢脆性能均合格。结果表明,磁控溅射镀铝、喷丸和化学转化复合后处理工艺对30CrMnSiNi2A钢的氢脆性能没有影响,这是由于磁控溅射镀铝工艺及喷丸+化学转化复合后处理工艺中并未引入氢的缘故。

表2 不同类型氢脆试样的试验结果

Table 2 Results of different types of samples treated by hydrogen embrittlement test

Sample types	No.	Gap diameter / mm	Persistence time / h	Sample state
30CrMnSiNi2A substrate	1	4.497	262	Without fracture
30CrMnSiNi2A substrate	2	4.510	262	Without fracture
30CrMnSiNi2A substrate	3	4.508	262	Without fracture
30CrMnSiNi2A substrate	4	4.500	284	Without fracture
30CrMnSiNi2A substrate	5	4.509	284	Without fracture
30CrMnSiNi2A substrate	6	4.500	284	Without fracture
30CrMnSiNi2A+Al film+ Blasting+Conversion	7	4.502	232	Without fracture
30CrMnSiNi2A+Al film+Blasting+Conversion	8	4.499	232	Without fracture
30CrMnSiNi2A+Al film+Blasting+Conversion	9	4.501	232	Without fracture
30CrMnSiNi2A+Al film+Blasting+Conversion	10	4.513	284	Without fracture
30CrMnSiNi2A+Al film+Blasting+Conversion	11	4.520	284	Without fracture
30CrMnSiNi2A+Al film+Blasting+Conversion	12	4.521	284	Without fracture

3 结论

(1) 采用磁控溅射技术在30CrMnSiNi2A螺栓上制备出纯铝薄膜,铝膜层表面质量良好;螺栓表面铝膜层的厚度为7.26~10.47 μm ,厚度不均匀性为 $\pm 17.2\%$ 。

(2) 30CrMnSiNi2A螺栓经磁控溅射镀铝薄膜处理后耐盐雾腐蚀时间为216 h,而氰化镀锌处理的耐盐雾腐蚀时间为168 h,铝薄膜对螺栓起到了更好的腐蚀保护作用。

(3) 30CrMnSiNi2A螺栓磁控溅射镀铝后,采用化学转化后处理、喷丸+化学转化复合后处理的耐腐蚀时间分别为740 h和1 344 h,均比氰化镀锌后处理的螺栓耐盐雾腐蚀性能优异。

(4) 磁控溅射镀铝薄膜工艺和后处理工艺对30CrMnSiNi2A钢基体的氢脆性能没有影响。

参考文献

- [1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册结构钢不锈钢[M]. 北京: 中国标准出版社出版, 1988: 305-348. The Handbook Editorial Committee of Chinese Aeronautical Materials. Chinese aeronautical materials handbook-structural steel and stainless steel[M]. Beijing: Standard Press of China, 1988: 305-348 (in Chinese).
- [2] 曹宏涛, 李雪亭. 基于海洋环境的紧固件腐蚀防护要求及技术措施[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 105-108. CAO H T, LI X T. Corrosion protection requirements and technical measures of fasteners based on the marine environment[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 105-108 (in

- Chinese).
- [3] 黄晓霞, 李荣强, 张艳霞. 钛合金紧固件的腐蚀及其防护技术[J]. 材料保护, 2008, 41(6): 56-59.
HUANG X X, LI R Q, ZHANG Y X. Corrosion and protection technology of titanium alloy fasteners[J]. Material Protection, 2008, 41(6): 56-59 (in Chinese).
- [4] 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 F L, HUANG Y B, SHI X J, et al. Composite anticorrosion technology of screw fastener in marine environment[J]. Electroplating and Finishing, 2010, 29(12): 64-66 (in Chinese).
- [5] CONDE A, ARENAS M A, DAMBORENEA J J D. Electrodeposition of Zn-Ni coatings as Cd replacement for corrosion protection of high strength steel[J]. Corrosion Science, 2011, 53 (4): 1489-1497.
- [6] SRIRAMANA K R, STRAUSSA H W, BRAHIMI S, et al. Tribological behavior of electrodeposited Zn, Zn-Ni, Cd and Cd-Ti coatings on low carbon steel substrates[J]. Tribology International, 2012, 56(56): 107-120.
- [7] MIL-STD-870A. Cadmium plating, low embrittlement, electrodeposition[S]. 1978.
- [8] SRIRAMAN K.R, BRAHIMI S, SZPUNAR J.A, et al. Hydrogen embrittlement of Zn-, Zn-Ni-, and Cd-coated high strength steel[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2013, 43(4): 441-451.
- [9] 陈玲, 李平, 李宁, 等. 弹性零件和紧固件的腐蚀防护达克罗涂层[J]. 新材料新工艺, 2004(4): 31-32.
CHEN L, LI P, LI N, et al. Application of dacromet to elastic parts and fasteners for anticorrosion[J]. New Technology and New Process, 2004(4): 31-32 (in Chinese).
- [10] 汤智慧, 陆峰, 张晓云, 等. 航空高强度结构钢及不锈钢防护研究与发展[J]. 航空材料学报, 2003, 23: 261-266.
TANG Z H, LU F, ZHANG X Y, et al. Development of surface Protection for aeronautical high-strength structural steel and stainless steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23: 261-266 (in Chinese).
- [11] 谢发勤, 金石, 严密林, 等. 离子镀铝的钛合金紧固件的耐腐蚀性能研究[J]. 西北工业大学学报, 1995, 13(1): 147-150.
XIE F Q, JIN S, YAN M L, et al. On corrosion resistance of chinese titanium alloy fastener ion-plated with aluminum[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1995, 13(1): 147-150 (Chinese).
- [12] AMS 2427. Aerospace material specification, aluminum coating ion vapor deposition[S]. 2001.
- [13] 韩恩厚, 陈建敏, 宿彦京, 等. 海洋工程结构与船舶的腐蚀防护—现状与趋势[J]. 中国材料进展, 2014, 33(2): 65-76.
HAN E H, CHEN J M, SU Y J, et al. Corrosion protection techniques of marine engineering structure and ship equipment-current status and future trend[J]. Materials China, 2014, 33(2): 65-76 (in Chinese).
- [14] MIL-DTL-5002F. Surface treatment and inorganic coatings for metal surfaces of weapons systems[S]. 2011.
- [15] MIL-DTL-83488D. coating, aluminum, high purity[S]. 1985.
- [16] SAE Technical Paper 830691. Improved equipment productivity increases applications for ion vapor deposition of aluminum[S]. 1983.
- [17] HB/Z5086-92. 电镀锌、电镀镉工艺[S]. 1992.
HB/Z5086-92. The technics of electroplating zinc, cadmium[S].1992 (in Chinese).
- [18] HB-5067.1-2005. 镀覆工艺氢脆试验 第1部分: 机械方法[S]. 2006.
HB-5067.1-2005. Test methods for hydrogen embrittlement evaluation of plating process-part 1: mechanical method[S]. 2006 (in Chinese).
- [19] 许伟, 代明江, 胡芳. NdFeB永磁体表面磁控溅射铝防护镀层性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 77-80.
XU W, DAI M J, HU F. Corrosion resistance of aluminum film on NdFeB permanent magnets by magnetron sputtering[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 77-80 (in Chinese).
- [20] 胡信国. 铝及其合金的铬酸盐处理技术[J]. 电镀与环保, 1991, 11(5): 17-20.
HU X G. Chromate treatment technology for Al & its alloys[J]. Electroplating & Pollution Control, 1991, 11(5): 17-20 (in Chinese).
- [21] 陈延益, 王文慧, 路文. 铝合金表面腐蚀与化学处理及着色技术[J]. 金属功能材料, 2014, 21(1): 46-54.
CHEN Y Y, WANG W H, LU W. Review of the surface corrosion of aluminum and chemical processing and coloring technology[J]. Metallic Functional Materials, 2014, 21(1): 46-54 (in Chinese).
- [22] HB 5214-1996. 金属室温缺口拉伸试验方法[S]. 1997.
HB 5214-1996. Standard test method for room temperature notch tensile test[S]. 1997 (in Chinese).