

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.02.002

航天用 T9A-D 弹簧表面离子液体镀 Al 工艺研究

宋启良*, 李吉丹, 郑玉杰, 张联英, 陈林辉, 杨宇

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘要: 针对弹性金属材料在表面电镀处理过程中易发生析氢现象, 进而降低材料的安全稳定性, 产生氢脆隐患, 采用离子液体镀 Al 技术在 T9A-D 弹簧和同材质试片的表面进行改性处理, 并对离子液体镀 Al 弹簧和试片进行形貌表征和相关性能研究。研究发现: 宏观上, 离子液体镀 Al 层连续、均匀、致密、色泽一致; 微观上, Al 镀层晶粒大小均匀, 排列致密, 无缺陷产生, 截面上镀层与基体间结合良好, 界面分明, 无空隙, 镀厚介于 8.91~11.20 μm , 镀厚均匀。经盐雾实验测试, 96 h 无白色腐蚀产物出现, 336 h 无红色腐蚀产物出现, 耐蚀性良好。经过氢含量测试, 弹簧基体氢含量无增加趋势, 弹簧镀 Al 后无氢脆倾向。弹簧镀铝前、后力值波动小于 1.8 N; 经划格法检测, 镀 Al 层与弹基体间结合力良好, 无脱落现象。

关键词: 铝镀层; 离子液体; 耐蚀性; 弹簧; 晶粒

中图分类号: TQ153.1 **文献标识码:** A

Study on ionic liquid Al plating technology on surface of T9A-D spring for aerospace applications

Song Qiliang*, Li Jidan, Zheng Yujie, Zhang Lianying, Chen Linhui, Yang Yu

(Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China)

Abstract: The phenomenon of hydrogen evolution is easy to occur in the surface electroplating process of elastic metal materials, which reduces the safety and stability of the materials and causes the hidden danger of hydrogen embrittlement. The surface of T9A-D spring and sample was modified by ionic liquid plating technology, and the morphology characterization and related properties of the spring and sample were studied. The results show that the ionic liquid plating Al layer is macroscopically continuous, uniform, dense and consistent color. Microcosmically, Al coating has uniform grain size, compact arrangement and no defect. The coating on the cross section is well combined with the substrate, the interface is clear, no gap, the plating thickness is between 8.91–11.20 μm , the plating thickness is uniform. In terms of performance, after salt spray test, no white corrosion products appear at 96 h and no red corrosion products appear at 336 h, showing good corrosion resistance. After hydrogen content test, the spring hydrogen content does not change, spring after electroplating Al has no hydrogen embrittlement tendency. The fluctuation of spring elasticity value before and after aluminum plating is less than 1.8 N. The bonding force between the Al plating layer and the elastic matrix is good after grid detection and there is no shedding phenomenon.

Keywords: Al plating; ionic liquid; corrosion resistance; spring; grain

收稿日期: 2022-04-18

修回日期: 2022-07-10

*通信作者: 宋启良(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面工程与智能制造, email: song_qiliang@163.com

铝及其合金具有质量轻、高的耐蚀性、导热性、导电性以及良好的延展性,如今铝合金已成为国防工业、航空航天、海洋与船舶工程等领域不可或缺的重要原材料^[1-5]。金属铝的获取方式有多种,但通过离子液体电镀技术来获取金属铝镀层是一种较为先进的工艺^[1, 3]。离子液体镀Al溶液是在室温环境下由有机熔盐组成,具有无水无氧的特点,能在电沉积条件下析出Al等在水溶液中无法沉积的金属或合金^[6-10]。传统的机械零件表面改性处理多为增强材料的耐蚀性、提高材料的硬度以及增加其导电、导热的物理特性^[11-14]。在增加零件的耐蚀性方面,传统表面处理均以电镀锌、电镀镉处理为主,对于应用在关键部位或工况环境恶劣条件下的零件,表面处理工艺的选择尤为慎重。其中弹性件或硬度较高(HRC≥32.5)的零件在普通电镀锌、镉后,容易出现氢脆的现象^[15-20]。目前在工程应用中普遍采用电镀后4 h内,在加热箱中190~210℃范围内除氢相应时间,以减小产品氢脆隐患,但该方法生产周期长、生产成本高、浪费人力物力。因此,寻求一种特殊工况环境下65Mn、45钢(淬火处理)等材质弹性件表面改性处理的工艺已是迫在眉睫,也是保障生产效率所必要的^[21-25]。

本文采用离子液体镀Al工艺技术,在航天用T9A-D弹簧和同材质的试片表面,进行离子液体电沉积Al金属镀层表面改性处理。为减少弹性零件的氢脆隐患,提高弹性件的综合性能,实验对T9A-D材质的弹簧离子液体镀Al的工艺进行了研究;同时对弹簧和试片表面的离子液体镀Al层的形貌进行表征及分析,对其耐蚀性、氢脆性和结合力等相关性能开展研究。

1 实验

1.1 实验材料

主要材料:镀铝基体为T9A-D弹簧(线径 $d=5$ mm;弹簧直径 $D=50$ mm;高度 $h=60$ mm)、T9A-D试片(长×宽×高=10 mm×5 mm×2 mm);离子液体镀Al液为无水 AlCl_3 与EMIC(1-乙基-3-甲基咪唑氯盐)按摩尔比2:1混合而成的酸性 AlCl_3 -EMIC镀液;阳极板为纯铝板(铝含量:99.999%),面积为10 dm²。辅助材料:TXS-8050FI型电镀电源、ZY-HC型系列烘干箱、去离子水、无水乙醇、压缩氮气、四氯化碳、NaOH(分析纯)、吹风机等。

1.2 实验方法

通过离子液体电镀Al工艺对T9A-D弹簧进行表面改性处理,离子液体镀Al过程采用恒电流法,以纯铝板作为阳极,将T9A-D弹簧和试片作为阴极,电镀Al时需在全密闭充氮气环境下进行,工艺参数选择:电流密度10~15 mA/cm²,镀覆时间45~55 min,镀覆温度40~50℃。

首先对T9A-D弹簧和试片进行镀前处理,采用有机溶剂丙酮超声浸泡10 min,再吹砂5~10 min的方式对其表面除油;为防止零件表面二次产生氧化皮同时活化基体,除油后将弹簧和试片接通阳极电源,在活化液中反向拉阳极的方式去除表面轻微的氧化皮,保证镀层结合力。镀前处理完成后,将弹簧和试片浸入电镀Al液中,接通阴极电源,按既定工艺参数镀覆45~55 min。离子液体镀Al后的弹簧试样和随槽试片需进行重铬酸盐钝化处理,该处理过程包含:酒精超声清洗、抛丸、碱洗、铬酸盐浸泡,最后放入烘干箱烘干处理。随后对随槽试片和镀铝弹簧进行形貌表征和性能检测,用4XC-TV标准型金相显微镜和捷克生产的Hitachi SU-70热场发射电子扫描显微镜观察铝镀层的微观形貌,并利用电子扫描显微镜上附带的X-Max能谱分析仪表征镀铝层的相关成分组成;利用划格法和热震实验对离子液体镀Al层与基体结合力进行研究;利用中性盐雾实验和湿热实验对镀铝层的耐蚀性进行研究。

2 结果与讨论

2.1 形貌表征

2.1.1 宏观形貌

实验利用无水的 AlCl_3 -EMIC镀液对T9A-D材质的弹簧和试片表面进行离子液体镀Al改性处理,宏观形貌如图1所示。由宏观形貌可以看出,镀铝弹簧表面为深黄色,该颜色为Al金属镀层与重铬酸盐反应产物所致,弹簧整体Al镀层连续,分布均匀,无漏镀、起皮等缺陷产生,符合弹簧表面电镀产品的外观要求。

2.1.2 微观形貌

利用扫描电镜对离子镀铝弹簧和试片分别进行微观形貌表征,如图2、3所示。图2(a)、(b)、(c)为同一位置放大不同倍数的微观形貌,从图2(a)、图2(b)可以看出,镀铝层致密,无漏镀起皮等缺陷产生,但可以看出弹簧表面铝镀层在微观上部分位置出现

隆起、呈现阶梯状态分布,这是由于T9A-D弹簧丝外表面为圆柱面,且弹簧钢丝经过机械弯曲加工至环形排布,因此在进行离子液体镀Al过程中弹簧表面晶粒的生长方向具有多样性,致使镀层微观上出现隆起;由图2(c)可以看出镀铝层有明显的晶体生长特点,晶粒尺寸细小,形核分布比较均匀,结构致密,且晶间距小,晶粒排列紧密,微观上无明显缺陷产生,镀层致密。其中镀Al层晶粒呈现颗粒状,这是由于形核过程中Al原子围绕基体中形核质点进行生长,并以颗粒形式长大,由于在弹簧不同位置的沉积速度不同,故图2(c)中颗粒大小也略有不同,但无缺陷产生,镀层完整,可以起到保护机体的作用。



图1 离子镀铝弹簧宏观形貌

Fig.1 Macromorphology of ion-plated aluminum spring

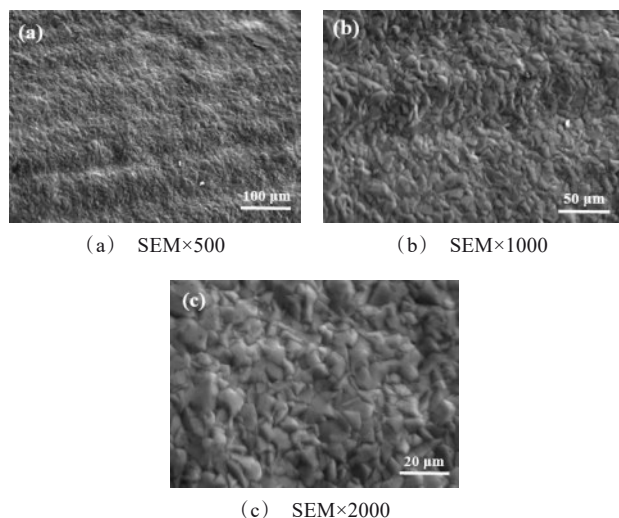


图2 弹簧离子液体镀Al微观形貌图

Fig.2 Microstructure of ionic liquid plating Al on the surface of spring

图3为随镀试片镀Al后微观形貌,由图3可以看出,试片表面离子液体镀Al层致密,表面无漏的现象,铝镀层组织呈颗粒状生长,晶粒分布均匀。在高倍数电镜下观察可看到,Al镀层均匀地分布在基体表面,结合紧密,且镀层内部无裂纹、气孔等缺陷产生,相比于弹簧表面,试片表面更为平整,因此试片镀Al层微观上没有出现隆起现象,晶粒生长方向一致,镀层组织平整度相对较高。

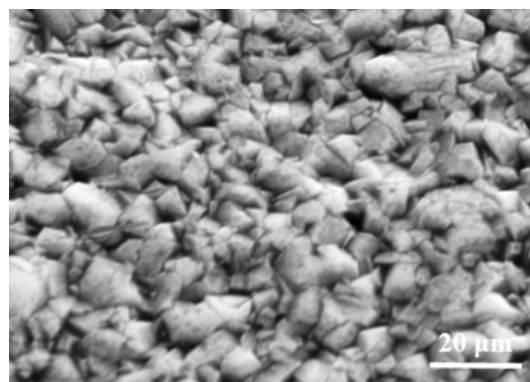


图3 试片离子液体镀Al微观形貌图

Fig.3 Micromorphology of ionic liquid plating Al on the surface of samples

2.1.3 截面形貌

利用电火花线切割机将镀铝T9A-D弹簧沿轴向刨切,取中间环放入镶样粉中镶嵌、磨样。再利用SEM对镀铝弹簧截面进行观察,结果如图4所示。图4(a)为低倍数下弹簧整体截面形貌,可以看出铝镀层分布在弹簧钢丝表面,镀层厚度整体较为均匀,其中位于弹簧孔径外圈的镀层较内圈的厚度偏大,位于弹簧孔径内圈的镀层厚度较薄。这是由于弹簧孔径内圈空间相对狭小,因而镀液的流动性较差,无法提供充足浓度的Al离子沉积,而位于弹簧孔径外圈的镀液分散性与流动性较好,可以为弹簧提供更多的Al离子进行得电子,沉积为铝金属,这也是离子液体镀铝工艺应用于弹簧产品后续需要加强研究之处。由图4(b)、(c)图可知,在高倍数电镜下观察铝镀层截面形貌时,发现铝镀层与弹簧基体间结合良好,界面分明,无空隙,且镀层内部无裂纹、气孔等缺陷产生,镀厚均匀,镀层厚度分别为11.2 μm、8.91 μm,厚度满足金属镀层相关使用标准,且厚度可控。

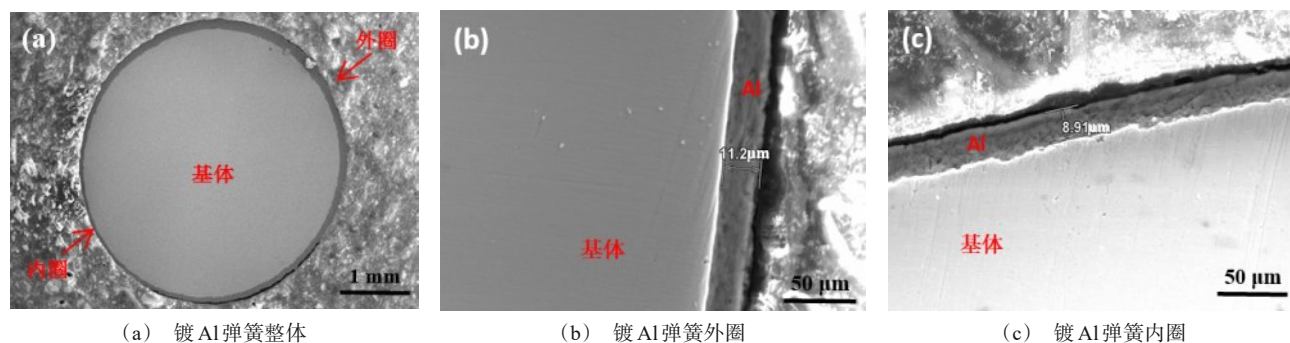


图 4 离子液体镀 Al 弹簧截面微观形貌图

Fig.4 Microstructure of spring section of ionic liquid plating Al

2.1.4 EDS 分析

实验利用 X-Max 能谱分析仪对镀铝弹簧截面进行 EDS 能谱分析,结果如图 5 所示。由图可以得出,T9A-D 弹簧表面金属镀层元素成分主要为 Al、Cr 两种,无其他杂质元素出现,其中 Al 元素的含量(质量分数)为 97.94%,Cr 元素含量为 2.06%。分析可知 Al 元素为镀层中主要元素,而 Cr 元素为弹簧在镀 Al 后进行重铬酸盐钝化而引入,主要位于镀铝层表面钝化膜。综上,采用离子液体镀 Al 工艺可对 T9A-D 弹簧进行表面改性处理,能够制备出质量优异的 Al 金属镀层,镀层中无其他杂质元素引入,镀覆效果良好,质量符合要求。

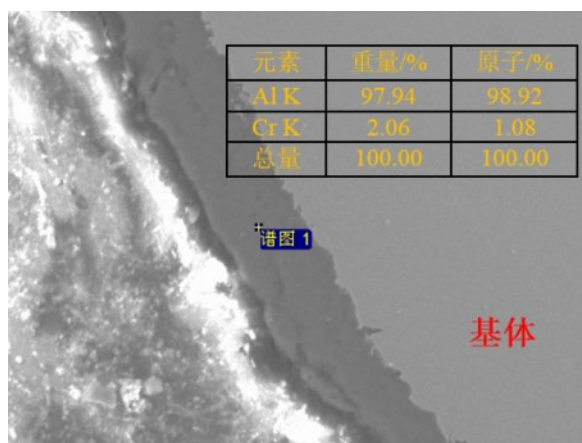


图 5 弹簧离子液体镀 Al 层 EDS 分析

Fig.5 EDS analysis of ionic liquid plating Al coating on the surface of spring

2.2 性能测试

2.2.1 力值检测

弹簧作为航天产品零部件,力值的稳定性是决定弹簧性能的重要指标。因此,实验选取 10 根弹簧

作为试样进行离子液体镀 Al,利用 TCD-A/2KN 数显弹簧拉压试验机对 T9A-D 弹簧在进行离子液体镀 Al 前、后力值的变化进行检测,如表 1 所示。由表 1 可以看出,经过相同固定点位力值测试,T9A-D 弹簧表面离子液体镀 Al 前、后力值变化量分别为 -0.8、-1.0、0.4、0.3、-1.2、-0.8、1.8、-1.4、-1.1、-3.8 N,其中 -3.8 N 为突变值,可忽略不计,力值变化量均小于 ± 1.8 N,为工程应用中所允许的范围内。T9A-D 弹簧镀铝前、后力值之所以有微量的变化,这是由于电镀过程中需要经过前处理,吹砂、除油除锈过程,会对弹簧基体产生微量变化;同时表面镀铝也会在微米量级内改变弹簧钢丝的线径,故离子液体镀 Al 处理会对弹簧力值有轻微改变。

表 1 T9A-D 弹簧离子液体镀 Al 前后力值

Tab.1 Force values of T9A-D spring before and after ionic liquid plating Al

弹簧序号	镀前/N	镀后/N	变化量/N
1	98.4	97.6	-0.8
2	97.2	96.2	-1.0
3	98.5	98.9	0.4
4	96.8	96.5	0.3
5	97.9	96.7	-1.2
6	99.5	98.7	-0.8
7	96.4	98.2	1.8
8	99.8	98.4	-1.4
9	97.2	96.1	-1.1
10	99.1	95.3	-3.8

2.2.2 氢含量检测

传统水溶液电镀过程中,弹性待镀零件在进行弱腐蚀工序时会接触氢原子,氢原子会不断在晶格

间聚集形成位错堆积,阻碍位错运动进而产生氢脆现象。为此本文利用与T9A-D弹簧同材质的试棒,对其表面进行离子液体镀Al,并对前、后基体的氢含量进行检测。测氢方法参考YB/T 4307—2012,采用脉冲加热惰气熔融-飞行时间质谱法。将预先制备好的试样置于加样口,投入经脱气处理的石墨坩埚中,在氦气流中高温熔融,试样中的氢以氢气析出,经支流扩散式接口,导入飞行时间质谱器进行测定。测氢实验所需材料:高纯氮气(质量分数不小99.99%)、动力气、四氯化碳、丙酮、真空油脂、无水高氯酸镁、氢氧化钠等。

实验选取3根T9A-D弹簧进行镀铝前、后基体的氢含量对比,由表2可知,T9A-D弹簧在离子液体镀Al前氢含量分别为0.00017%、0.00023%和0.00044%,而T9A-D弹簧在离子液体镀Al后氢含量分别为0.000169%、0.000231%和0.000439%,变化量分别为0.000001%、0、0.000001%,相比较下镀铝前、后氢含量无明显变化,有效地避免了水溶液电镀过程中产生的析氢现象,降低材料的氢脆隐患。

表2 T9A-D弹簧离子液体镀Al前后氢含量对比

Tab.2 Comparison of hydrogen content of T9A-D spring before and after ionic liquid plating Al

序号	镀Al前/%	镀Al后/%	变化量(镀后—镀前)/%
1	0.00017	0.000169	0.000001
2	0.00023	0.000231	0
3	0.00044	0.000439	0.000001

2.2.3 结合力检测

镀层与基体的结合力是评价电镀工艺的重要指标。实验依据国标《SJ 1282—1977金属镀层结合力的检验方法》对离子液体镀Al试片表面镀铝层进行结合力定性检测,为加严检测结果,同时在原检测标准之外增加了胶带黏贴检测。利用专用划格刀在试片表面交叉90°划格,划格间距1 mm,再利用专用3 M胶带黏贴后,撕离胶带,结果如图6所示。其中图6(a)为实验用划格刀,图6(b)为划格后宏观形貌,而图6(c)为划格后金相形貌。从图6(b)、(c)中可以看出,经过划格法测试和撕离胶带后,镀铝层并未出现脱落情况,镀层与基体间结合力良好,满足金属镀层在航天产品中的使用标准。

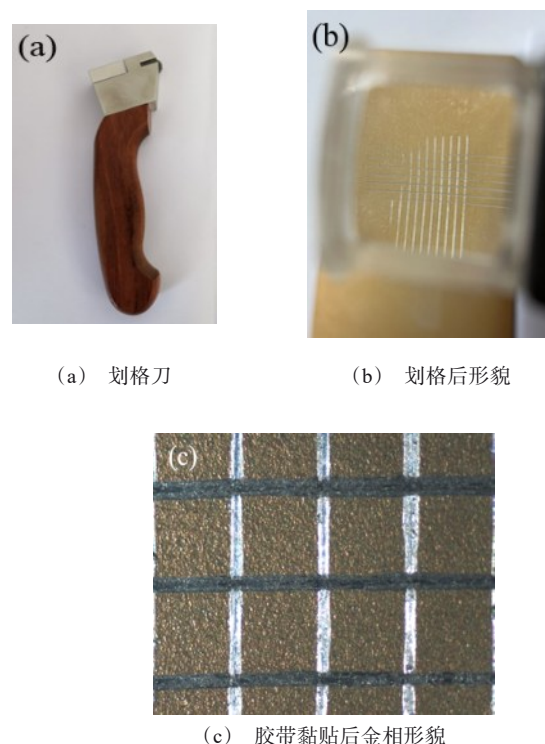
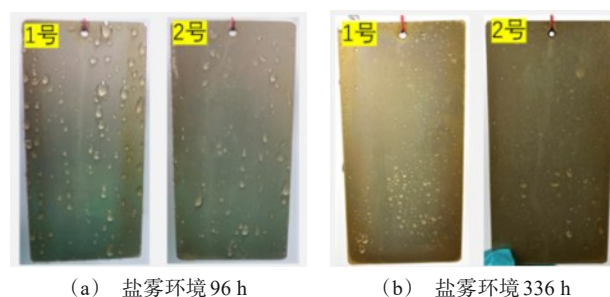


图6 划格法测试镀Al结合力形貌

Fig.6 Morphology of bonding force of Al plating tested by partition method

2.2.4 耐蚀性检测

T9A-D弹簧表面离子液体镀Al处理旨在增加弹簧的耐蚀性,延长弹簧的使用寿命。实验针对离子液体镀Al后的T9A-D弹簧和试片进行了中性盐雾实验研究,依据相应的国家标准要求,分别将试片在盐雾环境存放至96 h和336 h,记录实验数据,其宏观形貌如图7所示。



(a) 盐雾环境96 h (b) 盐雾环境336 h

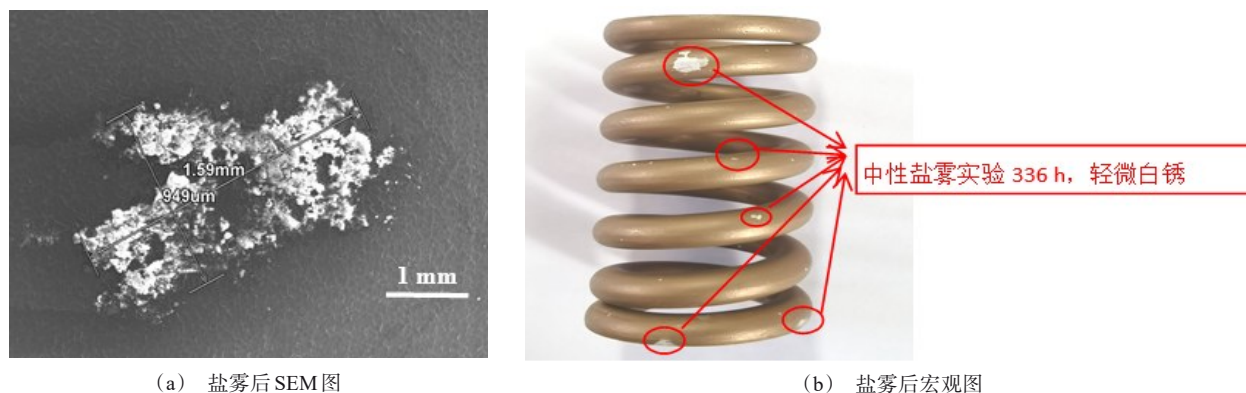
图7 离子液体镀Al试片中性盐雾实验宏观形貌

Fig.7 Macroscopic morphology of Al sample by ionic liquid plating after neutral salt spray test

由图 7 可以看出,离子液体镀 Al 试片在中性盐雾实验 96 h 内无白色锈蚀(镀铝层腐蚀)出现,在 336 h 内无红色锈蚀(基体腐蚀)出现,故可以初步判断离子液体镀铝试片在盐雾实验 96 h 时镀 Al 层无腐蚀,336 h 时试片无基体腐蚀出现,符合国家金属镀层耐蚀性检测。

为更有针对性地分析 T9A-D 弹簧离子液体镀 Al 处理的耐蚀性,实验将镀铝弹簧放入中性盐雾实

验环境进行检测,同时进行了 SEM 表征和 EDS 分析,结果如图 8、9 所示。在图 8(b)中可以发现,镀铝 T9A-D 弹簧在经过 336 h 中性盐雾实验后,表面有白色产物析出,即为弹簧表面镀铝层发生了轻微点腐蚀。图 8(a)为选取弹簧表面腐蚀点微观 SEM 形貌,可以看出该腐蚀区域长为 1.59 mm,宽为 949 μm ,局部腐蚀产物为亮白色,其他区域镀层状态良好,无腐蚀出现。



(a) 盐雾后 SEM 图

(b) 盐雾后宏观图

图 8 离子液体镀 Al 弹簧中性盐雾实验形貌

Fig.8 Morphology of ionic liquid plating Al spring after neutral salt spray test

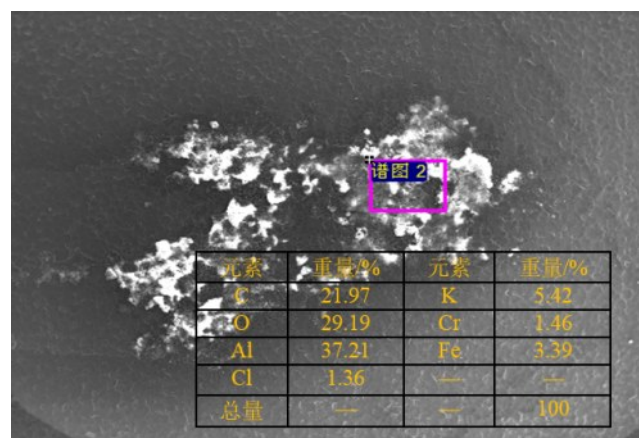


图 9 离子液体镀 Al 弹簧盐雾实验 EDS 分析

Fig.9 EDS analysis of ionic liquid plating Al spring after salt spray tests

实验针对镀铝 T9A-D 弹簧中性盐雾实验白色腐蚀产物,进行了 EDS 能谱分析,结果如图 9 所示。对腐蚀区域进行局部面扫,腐蚀产物组成分别为 C、O、Al、Cl、K、Cr 和 Fe 元素。通过结果分析可知,元素 C、O、Al、Cl 是由于在中性盐雾实验环境下,金属 Al 镀层发生了氧化反应生成了 Al_2O_3 、 AlCl_3 以及其他等腐蚀产物,盐雾介质为其提供了 C、O 和 Cl 等元

素;元素 K、Cr 则是由 T9A-D 弹簧离子液体镀 Al 后进行了钝化处理,钝化介质重铬酸盐提供了 K、Cr 元素;而 Fe 元素的出现,是由于 T9A-D 弹簧离子液体镀 Al 层在经过 336 h 盐雾实验后,Al 膜层发生点腐蚀,镀层表面变得疏松,厚度下降,故在进行腐蚀产物 EDS 分析时,穿透镀 Al 层至弹簧基体部分,因此 EDS 可以检测到 Fe 元素的存在,而在宏观表面状态无红色锈蚀出现。

综上,相比较而言试片镀铝后耐蚀性要优于 T9A-D 弹簧。这是由于随槽试片表面状态平整,而弹簧为圆柱状且经过加工弯曲,盐雾实验过程中 T9A-D 弹簧局部表面极易聚集盐雾小液滴,液滴内 NaCl 含量与其他雾气部位相比较,液滴聚集处盐雾腐蚀速度明显增加,进而导致弹簧在 336 h 内出现白色锈蚀,但没有红色锈蚀出现。综上,T9A-D 弹簧表面离子液体镀 Al 处理后耐腐蚀性符合金属镀层应用标准。

3 结论

(1) T9A-D 弹簧表面离子液体镀铝层晶粒细

小,分布均匀,结构致密,且晶间距小,晶粒排列紧密,微观上无明显缺陷产生,镀层致密,完整,可以起到保护基体的作用。

(2) 离子液体镀 Al 工艺可应用于 T9A-D 弹簧进行表面改性处理,增加了弹簧的耐蚀性,中性盐雾实验达到 96 h 无白色锈蚀,336 h 无红色锈蚀,T9A-D 弹簧离子液体镀 Al 层满足金属镀层的使用要求。

(3) T9A-D 弹簧经过离子液体镀 Al 处理后,弹簧基体氢含量没有增加趋势,保障了弹性件电镀金属镀层后无氢脆倾向;同时 T9A-D 弹簧离子液体镀 Al 前、后力值波动小于 1.8 N,符合一般工况环境的要求,离子液体镀 Al 处理提升了弹簧的综合力学性能。

(4) 镀铝层经过划格法测试,以及 3 M 胶带黏贴后,离子液体镀 Al 层无脱落现象,镀层与基体间结合力良好,满足金属镀层的使用标准。

参考文献

- [1] 张锁江,吕兴梅. 离子液体—从基础研究到工业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 柳泉,刘奎仁,韩庆,等. 低温电镀铝的研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(1): 40-46.
- [3] 李慕勤,李俊刚,吕迎. 材料表面工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [4] 芥鑫哲,魏琪,栗卓新,等. 铝合金及铝化物涂层发展现状[J]. 机械工程材料, 2005, 29(6): 5-9.
- [5] 刘小西,凌国平,刘柯钊,等. 304 不锈钢薄膜离子液体镀铝制备铁铝化合物的微观结构[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(6): 889-899.
- [6] 刘培生. 铝化物高温防护涂层的现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(9): 681-685.
- [7] 钟余发. 氧化铝基陶瓷微球的制备及其性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [8] 张伟,凌国平. 铝丝精制对 AlCl₃-EMIC 室温离子液体镀铝的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 66-69.
- [9] Abbott A P, McKenzie K J. Application of ionic liquids to the electrodeposition of metals[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2006, 8(37): 4265-4279.
- [10] Liu Q X, Zein E A S, Endres F, et al. Electrodeposition of nanocrystalline aluminum: Breakdown of imidazolium cations modifies the crystal size[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(5): 357-362.
- [11] 韩文生,谢锐兵,萧以德. 钎铁硼稀土永磁材料室温熔盐电镀铝的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(10): 1-4.
- [12] Xu B J, Chen J, Ling G P. Viscous layer formed in the anodic electrolytic etching of reactive metals in ionic liquid[J]. Electrochemical and Solid State Letters, 2012, 15(1): 1-3.
- [13] 詹中伟,孙志华,汤智慧,等. 离子镀铝与离子液体电镀铝涂层性能对比研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 74-81.
- [14] Yusuke S, Kazuhisa A. Al-Zn co-electrodeposition by a double counter electrode electrodeposition system from an AlCl₃-1-ethyl-3-methylimidazolium chloride ionic liquid bath[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 286(1): 256-261.
- [15] 鱼光楠,梅天庆,贺利敏. 离子液体中铝的电镀及其防护性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(2): 86-89.
- [16] 詹中伟,孙志华,汤智慧,等. 后处理对离子液体电镀铝合金涂层耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(11): 1-6.
- [17] 张骐,陈皓晖,詹中伟,等. AlCl₃-EMIC 型离子液体电镀铝工艺对基体疲劳性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(19): 1465-1469.
- [18] 金梦静,凌国平. 氧化时间对 SUS430 不锈钢离子液体镀铝结合力的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(1): 54-58, 67.
- [19] 张晓振. 离子液体中电沉积铝及其电结晶机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [20] 杨志,闫瑞景,梁镇海. 离子液体中脉冲电镀铝[J]. 材料保护, 2013, 46(1): 31-34, 8, 9.
- [21] 高丽霞,王丽娜,齐涛,等. 离子液体 AlCl₃/Et₃NHCl 中电沉积法制备金属铝[J]. 物理化学学报, 2008(6): 939-944.
- [22] 鱼光楠,梅天庆,贺利敏. 离子液体中铝的电镀及其防护性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(2): 86-89.
- [23] 冯秋元,丁志敏,贾利山,等. 低温熔融盐电镀铝的研究[J]. 材料保护, 2004(4): 1-3, 6.
- [24] 狄超群,张鹏远,徐联宾,等. 磁力搅拌下离子液体 AlCl₃/Et₃NHCl 恒电流法电沉积铝[J]. 化工进展, 2011(10): 2151-2157, 2219.
- [25] 李艳,华一新,张启波,等. 氯化胆碱添加剂对[Bmim] Cl-AlCl₃ 离子液体体系电解精炼铝的影响[J]. 过程工程学报, 2010(5): 981-986.