

# 离子液体镀铝工艺在纵向解锁机构弹簧上的应用研究

乐晨<sup>1</sup> 张联英<sup>2</sup> 郭嘉<sup>1</sup> 宋启良<sup>2</sup> 张毅博<sup>1</sup> 王明杰<sup>2</sup>

(1 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

(2 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

**文 摘** 纵向解锁机构是一套用于运载火箭整流罩两半罩连接与分离用的机构产品,其核心组件锁钩在验收和总装过程中需要重复多次解锁装配,弹簧是锁钩分离时使用的驱动元件。为提高弹簧可靠性,本文研究使用离子液体镀铝工艺替代含有氢脆隐患的电镀锌进行表面处理。首先通过典型产品试镀形成工艺方法,随后进行弹簧试制,最后开展热环境和锁钩机构试验验证弹簧可靠性。结果表明,离子液体镀铝工艺中的喷丸工艺会导致弹簧力值略微下降;这种状态的弹簧能够满足环境适应性要求,重复解锁会造成弹簧镀层磨损,力值下降约5%,但仍满足设计要求。弹簧使用离子镀铝工艺表面处理能够替代电镀锌,工艺实施过程中的喷丸后处理需要严格控制,重复使用时对弹簧镀层和力值的影响需要关注。

**关键词** 离子液体镀铝,纵向解锁机构,弹簧

中图分类号:TN249

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.02.014

## Research on the Application of Aluminum Electroplating in the Springs of Longitudinal Unlocking Mechanism

YUE Chen<sup>1</sup> ZHANG Lianying<sup>2</sup> GUO Jia<sup>1</sup> SONG Qiliang<sup>2</sup> ZHANG Yibo<sup>1</sup>  
WANG Mingjie<sup>2</sup>

(1 Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076)

(2 Capital Aerospace Machinery Co. LTD, Beijing 100076)

**Abstract** The longitudinal unlocking mechanism was a set of mechanism products for connecting and separating the two halves of the launch vehicle fairing. Its core component, the locking hook, need to be unlocked and assembled repeatedly during acceptance and assembly. The spring was the driving element used for the sparation of the locking hook. In order to improve the reliability of springs, this paper studied the use of aluminum electroplating in ionic liquid to replace the electrogalvanizing with hydrogen embrittlement. The process method was first formed through the typical product trial plating, and then the spring trial production was carried out, and finally the heat environment and the hook lock mechanism test were used to verify the reliability of the springs. The results show that shot peening in the process will cause the spring force to decrease slightly, where as the spring in this state also can meet the environmental adaptability requirements. Repeated unlocking can cause the spring plating layer to wear, and the force will decrease by about 5%, but still meet the design requirements.Spring using aluminum electroplating in ionic liquid can replace electro -galvanizing. The post-treatment of shot peening in process implementation needs to be strictly controlled, and the effect of repeated use on spring coating and force value needs to be concerned.

**Key words** Aluminum electroplating in ionic liquid, Longitudinal unlocking mechanism, Spring

### 0 引言

为增强金属零件环境耐腐蚀性和赋予材料表面某种功能特性,大量表面处理技术被开发出来。这些技术主要归为两种途径:一种是施加各种覆盖层,如电镀、化学镀等;一种是表面改性方法,如喷丸强

化、表面热处理等<sup>[1]</sup>。电镀是利用电解原理在某些金属表面上覆盖其他金属或者合金的过程,主要起到防锈,提高耐磨性、抗腐蚀性等作用。国内外金属制结构零件大量使用电镀工艺,包括电镀锌、镀镉等。

弹簧是机械机构中常见的驱动能源,包括圆柱

收稿日期:2023-11-28

第一作者简介:乐晨,1984年出生,硕士,工程师,主要从事弹箭体机构设计及结构设计强度分析工作。E-mail:swordman-yc@163.com

螺旋弹簧、扭簧、碟簧、板簧、涡卷弹簧等,其中圆柱螺旋弹簧主要采用高强度、高硬度和耐磨性好的钢丝(如70C、65Mn)材料制成。电镀是碳素弹簧钢丝常用表面处理工艺,但在实施过程中会发生析氢反应。如果除氢处理不彻底,弹簧容易因氢脆断裂失效,严重影响机构功能实现<sup>[2-5]</sup>。

铝作为常见金属材料,密度低、无毒、导热和电性良好,耐蚀性、抗氧化性和与其他金属的易接性优异<sup>[6]</sup>。对金属表面镀铝并形成致密的氧化层,即可实现防护功能。美军提出铝涂层可作为替代镉涂层的重要选择<sup>[7]</sup>。

相较于电镀锌、镀镉等存在的氢脆质量隐患,离子液体镀铝更有优势。这种技术使用离子液体作为电镀液,通过电解在零件表面制备纯铝或铝合金膜层。它的生产过程无水,不产生析氢反应<sup>[8]</sup>,从根本上杜绝了对基体材料尤其是高强钢、弹簧钢的氢脆隐患。另外它还具有工作在室温、能耗较低等优点,在国内外得到了越来越多的研究和应用。

关于离子液体的研究首次出现于1914年,由WALDEN提出并描述了一种室温下的液态盐<sup>[9]</sup>。1951年Hurdly和Weir含有 $\text{AlCl}_3$ 的卤化铝型离子液体用于金属沉积<sup>[10]</sup>。20世纪70年代,OSTERYOUNG等人发现了 $\text{AlCl}_3$ -BPC室温离子液体<sup>[11]</sup>。1982年HUSSEY报道了 $\text{AlCl}_3$ -EMIC效果更好,从此相关研究开始大范围开展<sup>[12]</sup>。以上卤化铝型离子液体也被称为第一代离子液体,对水氧高度敏感,需要在惰性气体环境下操作。1992年,WIKES合成了以 $\text{BF}_4$ 为阴离子的离子液体,这种液体与水相融,被称为第二代离子液体,研究门槛大幅降低<sup>[13]</sup>。2002年,可在开放环境处理的第三代离子液体被开发出来,随后离子液体的研究进入了高速发展期。离子液体从最初的主要用于镀铝也逐渐发展到镀铬、锌、银、镍等其他金属。

国内离子液体镀铝工艺研究工作使用第一代卤化铝型离子液体较多。浙江大学团队利用EMIC- $\text{AlCl}_3$ 离子液体进行了镁及镁合金、奥氏体不锈钢管道的镀铝涂层研究,探索了工艺可实施性<sup>[14-17]</sup>。中国科学技术大学的江奕东研究了铀与EMIC- $\text{AlCl}_3$ 离子液体相容性研究并完成铀的铝镀层<sup>[18]</sup>。太原理工大学的杨志开展了多种离子液体进行镀铝的试片级研究,验证了耐腐蚀性<sup>[19]</sup>。北京航空材料研究所的詹中伟等人利用典型试片也开展了相关研究,验证了离子液体镀铝具有良好的耐腐蚀性能,不会引起氢脆<sup>[20]</sup>。以上成果表明使用EMIC- $\text{AlCl}_3$ 离子镀铝技术在国内外发展已比较成熟,镀层质量较好。

近年来,为了提高航天产品的质量可靠性,高硬度、高强度产品的电镀锌工艺被列为禁用工艺,尤其在弹簧类产品上,迫切需要替代工艺。离子液体镀铝工艺不受零件复杂几何形关的限制,对环境、温度无特别需求,比较适合航天产品使用。本文使用EMIC- $\text{AlCl}_3$ 离子液体开展纵向解锁机构弹簧镀层上的应用研究,旨在提高机构功能可靠性,同时考察重复使用对弹簧镀层及力学特性的影响。

## 1 离子液体镀铝工艺初步应用

电镀工艺一般包括前处理、电镀和清洗三个阶段,离子液体镀铝的工艺过程与电镀过程基本相似,参考电镀建立了研究用的离子镀铝工艺试制生产线。

工艺实施按照三阶段划分,设立了三个独立密封舱,密封舱之间通过过渡舱进行连接。各个舱段内充氮气保护,使离子液体隔绝空气。试件在密封舱内按工序完成镀铝试制加工。舱外设置橡胶手套完成必要的操作。



图1 离子液体镀铝工艺生产线

Fig. 1 The process production line of aluminum electroplating in ionic liquid

### 1.1 试制流程

#### 1.1.1 前处理

前处理采用有机溶剂除油,除油时间5~15 min。

#### 1.1.2 电镀

采用EMIC- $\text{AlCl}_3$ 离子液体电镀溶液体系通过电镀的方式在产品表面沉积纯铝镀层。电镀使用纯铝作为阳极,镀液温度一般控制在30~60 °C,电镀的电流密度控制在2~4 A/dm<sup>2</sup>。通过控制电镀时间、电流密度实现设计需求镀层的厚度7~12 μm。

#### 1.1.3 镀后处理

使用酒精清洗零件表面残留的离子液体,随后吹干。

### 1.2 试制方案

为实现航天结构零件的应用,初步挑选了垫圈、带螺纹的直通接头、氢脆检测用试棒等典型产品用于离子液体镀铝试制试验,主要进行以下研究。

(1)摸索典型产品镀铝过程的工艺参数,完成最终试验件镀铝。

(2)表征试验件离子液体镀铝膜层性能指标,明确要求,并检测试验件镀层性能是否达标。

### 1.3 检验方法及性能指标要求

#### 1.3.1 镀铝层的外观及厚度

(a)外观:离子液体镀铝膜层应平滑、连续、细致、均匀。

(b)镀层厚度:7~12  $\mu\text{m}$ 。

#### 1.3.2 镀铝层的性能要求

(1)结合力:采用划格法检验时,离子液体镀铝涂层结合力应不低于0级;采用其他方法检验时,离子液体镀铝涂层应不起皮、分层、脱落。

(2)耐蚀性:钢零件离子液体镀铝后,96 h内不出现白色腐蚀产物,336 h内不出现红色腐蚀产物。

(3)氢脆性:该性能为验证性检测,要求离子液体镀铝后标准试棒经载荷相当于下料缺口试样极限抗拉强度75%的氢脆试验至少保持200 h持久拉伸,试样不断裂为氢脆合格。

#### 1.4 试验结果

(1)镀层外观性能:离子液体镀铝后表面均呈现银白色,经过对试棒镀层外观和直通接头的螺纹进行检查,发现试棒外观部分螺纹处镀铝层不完整,直通接头镀层均匀性较差,且螺纹部位镀层不连续,见图2。



图2 直通接头表面情况<sup>[21]</sup>

Fig. 2 The surface of threaded specimen<sup>[21]</sup>

(2)镀层厚度:对平垫圈镀铝层的厚度进行检测,显示镀层均匀性较差,镀层总体厚度为5~13  $\mu\text{m}$ ,但侧面镀层厚度较平面镀层厚度薄,厚度仅为5~8  $\mu\text{m}$ ,厚度均匀性较差;对螺纹试件螺牙和螺纹根部镀层厚度与其他部位厚度差异较大,螺纹根部局部镀层不连续,不符合镀层厚度7~12  $\mu\text{m}$ 要求,具体见图3。

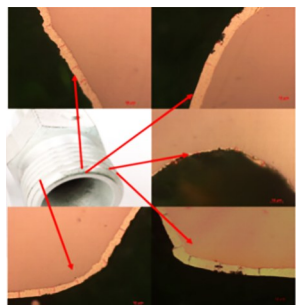


图3 试件膜层厚度微观形貌

Fig. 3 Micromorphology of the thickness of the film layer of the specimen

(3)结合力:平垫圈离子液体镀铝后表面均呈现银白色,采用划格试验测试镀层结合力,镀层结合力良好。

(4)耐蚀性:观察镀后零件,规定时长内未发现腐蚀情况。

(5)氢脆性能:镀铝后的氢脆试棒经200 h延迟拉伸,试棒未显现出氢脆敏感性问题的。

#### 1.5 试验结论

通过航天产品试镀生产,对照性能指标的检查要求,发现该工艺镀层结合力良好,无氢脆,但暴露出两方面问题:镀层厚度均匀性差、镀层完整连续性差。

### 2 工艺改进及效果

#### 2.1 问题分析

在上轮试镀的工作中,除了典型航天产品外,也包括小菱形片、圆柱体等几何形状简单的陪镀物作为旁证。检查这些零件镀层厚度和完整性良好。对比航天零件和陪镀物,前者形状更复杂,表面存在一定油污和氧化皮。

为了提高电镀质量,面向工艺过程,工艺改进方向包括加强零件前处理、扩大镀中面积、优化镀后工艺参数等。

#### 2.2 工艺改进

##### 2.2.1 前处理

在前处理方面增加吹砂处理及镀前阳极活化处理,加强除油效果,净化零件表面不受杂质影响。

##### 2.2.2 电镀

设计专用工装,将原有滚镀更改为挂镀,并增量产品的电力线分布,从而增加了电镀面积,力图改善镀层厚度的均匀性。

##### 2.2.3 后处理

镀后处理增加喷丸、碱洗、钝化等工序,进一步提高镀层的致密性和耐蚀性。有研究工作表明喷丸等后处理对镀层没有影响<sup>[22]</sup>。

改进后的工艺流程如下,共分12个步骤,见图4。

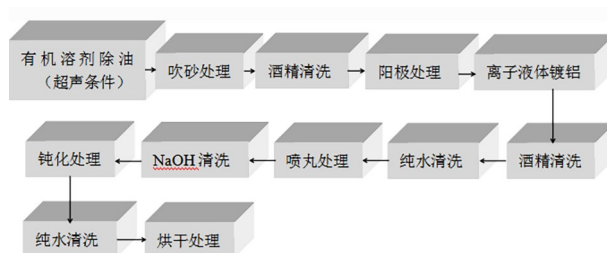


图4 改进后的离子液体镀铝工艺流程

Fig. 4 Improved process of the aluminum electroplating in ionic liquid

### 2.3 实施效果

经过工艺改进后,对螺栓、垫片等零件进行试验,然后按照相关规范对镀层性能进行检查。

(1)镀层外观性能:离子液体镀铝后各零件外观平滑、连续、均匀,如图5所示。



图5 试件外观

Fig. 5 Specimen appearance

(2)镀层厚度:采用扫描电子显微镜(Hitachi, S-3400 I)观察试件不同区域的厚度及表面形貌、截面镀层质量,厚度及微观形貌如图6、图7所示。

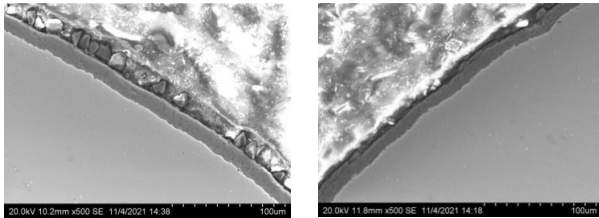


图6 螺栓镀层的扫描电镜图像

Fig. 6 The scanning electron microscopy images of bolt plating

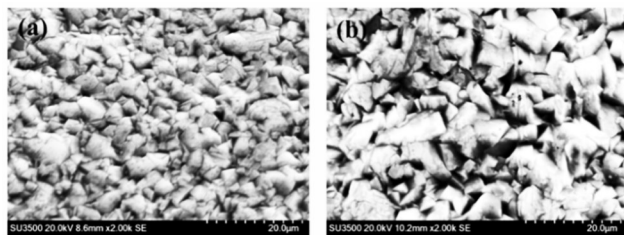


图7 试件铝镀层表面形貌

Fig. 7 Surface topography of aluminum plating of the test piece

由图可知,试件镀层厚度范围在8~12  $\mu\text{m}$ 间,符合7~12  $\mu\text{m}$ 设计要求。镀层表面微观形貌可知镀层与基体结合良好,镀层整体均匀、致密、连续,镀层的平整度较高,晶粒尺寸细致。

以上结果表明改进后的工艺满足指标要求。

### 3 纵向解锁机构弹簧的应用

#### 3.1 机构简介及需求

当前运载火箭正从一次性使用向可重复使用方向发展,国内外学者开展了大量非火工驱动连接分离机构产品研究<sup>[23-25]</sup>。纵向解锁机构是一套用于运载火箭整流罩两半罩连接与分离用的机构产品,由驱动装置、拉杆和锁钩组成,其中核心部件锁钩具有高可靠、低冲击、可重复使用等优点<sup>[26]</sup>,符合当前发

展趋势。

锁钩锁定和解锁状态如图8、图9所示<sup>[26]</sup>,原理见相关文献,其中的弹簧用于机构解锁后的分离。整套纵向解锁机构使用拉杆系统在全罩串联多个锁钩,通过总装精确调整实现同步解锁<sup>[27]</sup>。在整套机构调整过程中,锁钩机构多次解锁,因此需要关注弹簧多次解锁后的力学特性及镀层情况,确保最终使用时的状态。

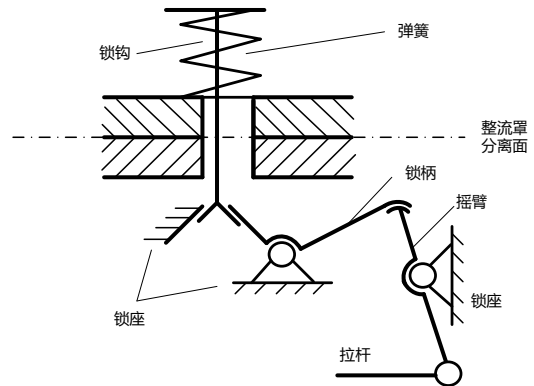


图8 锁钩机构构成及锁定状态<sup>[26]</sup>

Fig. 8 Composition and locking status of unlocking mechanism<sup>[26]</sup>

锁钩弹簧制造时首先使用碳钢丝卷制,然后进行热处理去应力,最后使用离子液体镀铝完成表面处理。

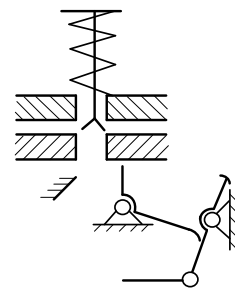


图9 锁钩解锁状态<sup>[26]</sup>

Fig. 9 The unlocked state of the unlocking mechanism<sup>[26]</sup>

#### 3.2 弹簧镀层性能检查结果

对于锁钩弹簧,主要关注其力学特性(一定行程下的弹簧力值)和耐环境适应性。将改进后的离子镀铝工艺用于锁钩弹簧样件试制,随后按照标准检查镀层各项指标见表1,满足相关指标要求。部分镀后弹簧外观见图10,镀层厚度微观情况见图11。

弹簧最重要的特性是力学特性,即一定行程下的力值,可表征刚度。检查镀前镀后的弹簧力值,镀前后变化小于1%,但趋势是略微降低,具体见表2。这是由于改进后的工艺对弹簧钢丝进行了喷丸等处理,钢丝丝径有微小的变化,从而影响了力值。因此后续弹簧生产时需要严格控制喷丸次数和时长,并进行力学特性复测,确保实测值在要求范围内。

表1 使用离子液体镀铝工艺弹簧检查项目

Tab. 1 Spring inspection items using the aluminum electroplating in ionic liquid

序号	性能指标		产品情况	结论
	名称	要求		
1	外观	膜层连续、均匀	膜层连续、均匀	满足
2	耐腐蚀性	96 h内不出现白锈;336 h内不出现红锈	96 h内没出现白锈;336 h内没出现红锈	满足
3	均匀性	7~12 μm	8.91~11.2 μm	满足
4	结合力	不低于0级	0级	满足
5	氢脆	200 h延迟拉伸不断裂	200 h延迟拉伸未断裂,氢含量小于 $1 \times 10^{-4} \%$	满足
6	基体硬度	镀层硬度不应该低于基体或者工程图样要求的最低值	镀层硬度35~40HV	满足
7	力值	符合图纸要求	镀前后变化小于1%,且符合图纸要求	满足

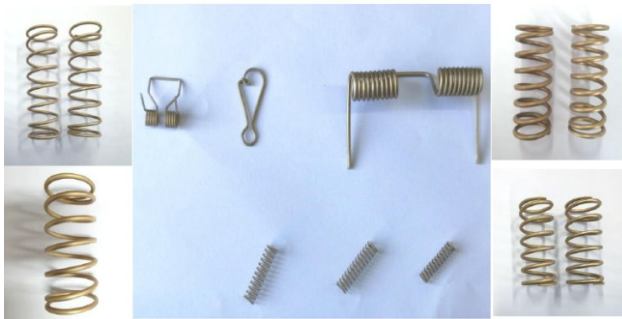


图10 几种弹簧产品镀后外观

Fig. 10 The appearance of several springs after plating

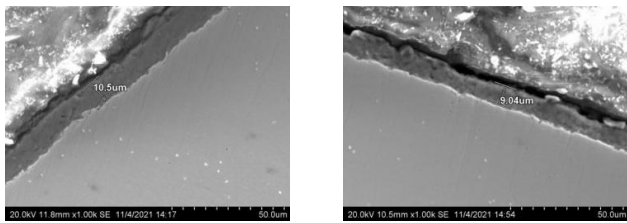


图11 弹簧镀层的扫描电镜图像

Fig. 11 The scanning electron microscopy images of spring plating

表2 某型锁弹簧的镀前镀后力学特性测量(已归一化处理)  
Tab. 2 The spring force value data for a certain type of the unlocking mechanism before and after plating (has been normalized)

序号	要求值	镀前	镀后	结论
1	1±10%	1.002	0.996	满足
2	1±10%	1.009	1.004	满足
3	1±10%	1.004	0.997	满足
4	1±10%	1.000	0.995	满足
5	1±10%	0.998	0.994	满足

### 3.3 机构试验情况

为了验证弹簧镀层可靠性,开展了弹簧零件级和锁钩机构级试验。将弹簧分为两组:一组开展热环境试验包括高低温及湿热环境;另外一组组成锁钩(2套)开展各种力学环境和热环境后的解锁试验

以及重复解锁等试验,每套锁钩解锁共计22次。

试验顺利通过,锁钩解锁过程与以往使用电镀锌状态弹簧相比无异常,解锁力在历史包络范围内。

### 3.4 试验后检查

参加热环境试验的弹簧试验后状态无变化,复测弹簧力值如表3所示,基本保持不变。

表3 某型锁弹簧热环境试验后力学特性测量(已归一化处理)  
Tab. 3 The spring force value data for a certain type of the unlocking mechanism before and after thermal environment test (has been normalized)

序号	要求值	试验前	试验后	结论
1	1±10%	0.996	0.998	满足
2	1±10%	1.004	1.004	满足
3	1±10%	0.997	0.997	满足

参加组锁的弹簧检查了试验后的外观,并与以往电镀锌状态弹簧进行对比,具体见图12,可以看出两种状态的弹簧都有轻微磨损,内圈比外圈磨损较大,露出铝金属白色膜层,这是由于多次解锁,锁零件与弹簧磕碰导致。



图12 两种镀覆工艺弹簧综合试验后对比

Fig. 12 Comparison of two coated process springs after comprehensive test

随后对镀铝弹簧镀层进行微观形貌检测,见图13。可以看出离子镀铝镀层与基体结合处无缝隙,起皮、脱落等现象,镀层平滑连续,无腐蚀现象发生。

对组锁后的弹簧力学特性进行了复测,力值下降约5%,这说明重复解锁对弹簧力学特性有一定影响,但依然在设计要求范围内,如表4所示。

以上结果表明,离子镀铝状态弹簧能够满足机构功能及环境适应性要求。

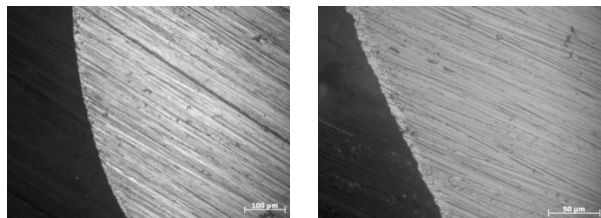


图13 综合试验后弹簧镀层微观图像

Fig. 13 Microscopic image of spring plating after comprehensive test

表4 某型锁弹簧的组锁前后力学特性测量(已归一化处理)  
Tab. 4 The spring force value data for a certain type of the unlocking mechanism before and after unlocking (has been normalized)

序号	要求值	组锁前	组锁后	结论
4	1±10%	0.995	0.939	满足
5	1±10%	0.994	0.974	满足

#### 4 结论

(1)弹簧使用离子液体镀铝工艺形成的铝镀层能够满足机构功能及环境适应性要求,可以替代电镀锌工艺,完全规避氢脆风险,提高了可靠性。

(2)工艺后处理中的喷丸过程对弹簧丝径产生了轻微影响,造成弹簧力学特性略有下降,后续需要严格控制次数和时长。

(3)重复使用后的弹簧镀层会产生一定磨损但不影响防锈功能,弹簧力值下降约5%。

对于多次解锁的锁钩弹簧,力值下降和镀层彻底损失是两种重要的失效模式,应引起足够重视。后续可进一步开展锁钩解锁的弹簧极限寿命试验,为重复使用机构的弹簧设计提供参考。

#### 参考文献

[1] 钱苗根. 现代表面技术(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2023.

QIAN M G. Xiandai Biaomian Jishu (Second Edition) [M]. Beijing: China Machine Press, 2023.

[2] 邱文鹏,常序华,王仁智,等. 圆柱螺旋弹簧氢脆断裂失效分析[J]. 金属制品, 2007, 33(1): 24-27.

QIU W P, CHANG X H, WANG R Z, et al. Hydrogen brittle fracture failure analysis of column spiral spring[J]. Metal Products, 2007, 33(1): 24-37.

[3] 蒋江明,朱水珍. 重型镀锌弹簧垫圈断裂分析[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(6): 60-62.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第2期

JIANG J M, ZHU S Z. Fracture analysis of heavy-duty galvanized spring washer[J]. Rechulijishu Yu Zhuangbei, 2009, 30(6): 60-62.

[4] 陈再良,付海峰,吕东显. 55CrSi弹簧钢的氢脆断裂分析[J]. 金属热处理, 2011, 36(Sup): 383-387.

CHEN Z L, FU H F, LV D X. Hydrogen embrittlement analysis for 55CrSi spring steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(Sup): 383-387.

[5] 沈献民,邢献强,肖今春,等. 扭转弹簧断裂原因分析[J]. 金属制品, 2012, 38(1): 30-33.

SHEN X M, XING X Q, XIAO J C, et al. Fracture cause analysis of torsion spring[J]. Metal Products, 2012, 38(1): 30-33.

[6] 詹中伟,孙志华,彭超. 300M钢表面铝基涂层防护性能对比研究[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(9): 1-11.

ZHAN ZH W, SUN ZH H, PENG CH. Protective performance comparison of aluminium-based coatings on 300m steel surface[J]. Plating & Finishing, 2015, 37(9): 1-11.

[7] BROWN S A, BERMAN D E. Cadmium alternatives for high-strength steel [R]. ESTCP WP-0022 Final Report, 2011.

[8] LIU H T, LIU Y, Li J H. Ionic liquid in surface electrochemistry[J]. Phys Chem Chem Phys, 2010, 12(8): 1685-1697.

[9] WALDEN P. Molecular weights and electrical conductivity of several fused salts [J]. Bull. Acad. Imper. Sci. (St Petersburg), 1914(8): 405-422.

[10] HURLEY F H, WIER T P. Electrodeposition of metal from fused quaternary ammonium salts [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1951, 98(5): 203-206.

[11] ROBINSON J, OSTERYOUNG R A. An electrochemical and spectroscopic study of some aromatic hydrocarbons in the room temperature molten salt system aluminum chloride-n-butylpyridinium chlorolide[J]. Journal of the American Chemical Society, 1979, 101(2): 323-327.

[12] LAHER T M, HUSSEY C L. Electrochemical studies of chloro complex-formation in low temperature chloroaluminate metls. 1. IRON(II), IRON(III), AND NICKEL(II)[J]. J. Electrochem. Soc., 1997, 144(11): 3881-3886.

[13] WIKES J S, ZAWOROTKO J. Air and water stable 1-Ethyl-3-methylimidazolium based ionic liquids[J]. Journal of the Chemical Society Chemical Communications, 1992, 13: 965-967.

[14] 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.

LIU X X, LING G P, LIU K Z, et al. Microstructure of Fe-Al Intermetallics Prepared by Electroplating Al from Ionic Liquid at the Substrate of 304 Stainless Foils[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2012, 30(6): 889-899.

[15] 陈益明. 管道内壁离子液体镀铝技术的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.

CHEN Y M. Electroplating of Al on internal surface of tube in

ionic liquids[D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2015.

[16] 薛东朋. 奥氏体不锈钢在  $\text{AlCl}_3$ -EMIC 离子液体中的阳极行为及其相关机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

XUE D P. Study on the anodic behavior of austenite stainless steel in  $\text{AlCl}_3$ -EMIC ionic liquid and its mechanism [D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2018.

[17] 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.

JIN M J, Ling G P. Effect of oxidation time on adhesion strength of Al electrodeposited from ionic liquid on SUS430 stainless steel[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(1): 54-58.

[18] 江奕东. 铈在  $\text{AlCl}_3$ -EMIC 离子液体中的表面铝化及阳极化机制研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2018.

JIANG Y D. Study of the aluminized and anodic reaction mechanism of uranium in  $\text{AlCl}_3$ -EMIC ionic liquid [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.

[19] 杨志. 离子液体中电镀锌及电镀铝工艺研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.

YANG Z. Study on the technology of zinc and aluminum electroplating in ionic liquid [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.

[20] 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(5): 74-81.

ZHAN Z W, SUN Z H, TANG Z H, et al. Comparison study on performance of IVD and ILEP aluminum coatings [J]. Equipment Environmental Engineering & Finishing, 2017, 14(5): 74-81.

[21] 宋启良, 李吉丹, 郑玉杰, 等. 30CrMnSiA 合金钢航天零件表面离子液体电镀铝的性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(19): 13-20.

SONG Q L, LI J D, ZHENG Y J, et al. Properties of aluminum coatings electroplated in an ionic liquid on

30CrMnSiA alloy steel parts for aerospace [J]. Electropating & Finishing, 2023, 42(19): 13-20.

[22] 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]. 电镀与涂饰, 2015, 37(11): 1-6.

ZHAN Z W, SUN Z H, TANG Z H, et al. Effects of post-treatment on corrosion resistance of ionic liquid-based electroplating aluminum alloy coating [J]. Electropating & Finishing, 2015, 37(11): 1-6.

[23] CARPENTER B F. Shape memory actuation and release devices[R]. Lockheed Martin Astronautics Denver CO, 1996.

[24] WOLF P, OSE D E. Design and testing of a low shock discrete point spacecraft separation system [C]//Proceedings of the 38<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symposium: Langley Research Center, 2006: 149-156.

[25] 赫志亮, 于兵, 宋保永, 等. 一种涡卷弹簧分离螺母装置设计及仿真分析[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(5): 65-70.

HE Z L, YU B, SONG B Y, et al. Design and analysis of a separation nut based on vortex coil spring [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(5): 65-70.

[26] 范新中, 肖耘. 飞船整流罩纵向解锁机构设计与动力学[J]. 宇航学报, 2004, 25(5): 479-483.

FAN X Z, XIAO Y. Design and Dynamics Analysis of Longitudinal unlocking mechanism of manned launch vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(5): 479-483.

[27] 赵杰, 张为民, 鄢蓉. 整流罩纵向解锁机构装配与同步调整[J]. 航天工艺, 2001(2): 28-31.

ZHAO J, ZHANG W M, YAN R. Study on assembly and synchronization adjustment of longitudinal unlocking mechanism in faring [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2001(2): 28-31.