

铝合金与复合材料组合构件的涂装工艺

吴键, 刘秀梅, 陈亮, 周学梅, 李晓龙, 张小华, 李步云

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 解决底/面漆涂层在铝合金与复合材料基材表面经常出现剥离、起泡、开裂等缺陷问题。**方法** 通过对问题涂层部件的结构设计合理性分析, 指出了封闭式蒙皮结构部件出现的设计缺陷。对铝合金与复合材料的加工工艺进行了分析, 用对比试验的方法, 验证了铝合金阳极氧化处理工艺所生成的保护膜对涂层性能的影响。通过改进表面前处理工艺, 验证了复合材料表层残留的脱模剂是影响涂层附着力的主要原因。以改善涂层应力变化适应能力为目的, 调整了涂料韧性配方, 涂覆不同的基材和相关结构部件, 用可模拟产品试验考核状态的“温度冲击+振动+湿热”联合加载试验方法, 验证了设计与工艺改进后的涂层性能。**结果** 合理设计通气孔后, 消除了封闭式蒙皮结构部件内部气体的膨胀效应, 改进铝合金与复合材料表面前处理工艺和涂料韧性后, 涂层不再出现起层开裂现象。**结论** 封闭式蒙皮结构部件应设置内外通气工艺孔, 彻底清除复合材料表面脱模剂渗透层和铝合金表面的阳极氧化膜, 选用韧性好的涂料体系, 能够有效提升铝合金与复合材料组合构件表面涂层的环境适应性能。

关键词: 铝合金与复合材料; 涂层; 表面处理; 阳极氧化

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)08-0061-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.010

Coating Process for Aluminum Alloy and Composite Material Components

WU Jian, LIU Xiu-mei, CHEN Liang, ZHOU Xue-mei, LI Xiao-long, ZHANG Xiao-hua, LI Bu-yun

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to remove defects usually present on primer/finish coatings including peeling, blistering, cracking on the surface of aluminum alloy and composite material substrate. The designing defects of the closed thin-gauge skin structural components were figured out based upon structural design rationality analysis of defective coating components. By analyzing process technique for aluminum alloy and composite materials, effects of protective layer generated by aluminum alloy anodizing on coating properties were validated in contrast test method. By improving the surface pretreatment technology, release agent left over the composite materials was verified to be main factor affecting coating adhesion. The coating toughness formula was adjusted and coated on different substrates and relevant structural components to improve adaptability of coating to stress changes. Coating properties featuring in improved design and process were verified in combined loading test method “thermal shock+vibration+shock+dampness-heat”, which could be used to simulate testing state of the product. The coating was completely free from delamination and cracking after venthole was designed reasonably, gas expansion effect in the closed thin-gauge skin structural components was eliminated, and coating toughness and surface pretreatment of aluminum alloy and composite materials were improved. Closed thin-gauge skin structural components shall be equipped with venthole inside and

收稿日期: 2017-02-28; 修订日期: 2017-04-05

Received: 2017-02-28; Revised: 2017-04-05

作者简介: 吴键 (1965—), 男, 研究员, 主要研究方向为功能复合材料。

Biography: WU Jian(1965—), Male, Researcher, Research focus: functional composites.

outside. Complete removal of surface release agent pervious layer on composite materials and anodic oxide film on aluminum alloy, and selection of coating system exhibiting good toughness can improve environmental adaptability of surface coatings on aluminum alloy and composite material composite components.

KEY WORDS: aluminum alloy and composite material; coatings; surface treatment; anodizing

纤维增强树脂基复合材料具有比强度高、性价比高、设计多样化等优点,随着制造工艺成熟度及可靠性不断提高,越来越多地用于航空、航天飞行器相关部件,比较有代表性的部件有翼展翼尾、舱段蒙皮、前后整流罩等,出于装配、连接的需要,它们往往用碳纤维或玻璃纤维等复合材料与铝合金构件复合为一体。多种复合材料与铝合金材料成为飞行器用轻质结构材料的主流材料体系。因此,飞行器及其部件的表面基材的种类主要由碳纤维/玻璃纤维复合材料及铝合金组成。通常,这些部件的表面防护涂层要随整机或部件通过 GJB 150 规定的相关环境试验标准的考核,能否承受规定荷载的试验考核,除与产品基材自身品质有关外,还取决于涂料类型、基材表面前处理质量和涂装施工质量。然而,笔者所接触的若干产品研制及生产过程中,经常发现产品表面涂层经历了相应研制阶段的环境适应性考核试验或批产后的抽样检测试验,会不同程度地出现起层、开裂、剥落等缺陷,一次性顺利通过考核试验的几率较低。为了找到出现问题的原因,从产品研制的源头开始,系统性查找设计、工艺的全过程质量影响环节,合理地设计部件结构,针对复合材料与铝合金基材表面工艺特性的差异,以制定合适的前处理工艺,提升整机的涂层质量^[1]。

1 涂层开裂、起层剥落的原因分析

1.1 结构设计缺陷

从整机涂层出现问题分布的部位来看,两翼翼面、尾翼及舱体表面均有数量不等的漆膜开裂、起层剥落点,通过对包括其他类似产品试验记录和生产交付检验记录等资料的查询,发现两翼、尾翼部件的漆膜出现问题的几率最高,特别是在高温环境试验及高低温冲击试验后,一般都有出现起泡层、开裂现象(见图1)。在排除涂料品质及涂装工艺因素的影响下,对此类产品的结构及基材品性进行了分析(见图2)。其结构主要由复合材料蒙皮与内置金属或非金属骨架组成,部件制造完成后,蒙皮构造了一个完全封闭的结构。当部件处于高温环境中,内部空气会发生膨胀,通过复合材料蒙皮中的孔隙将漆膜涨起,若漆膜韧性不够,就会出现起层、开裂现象。

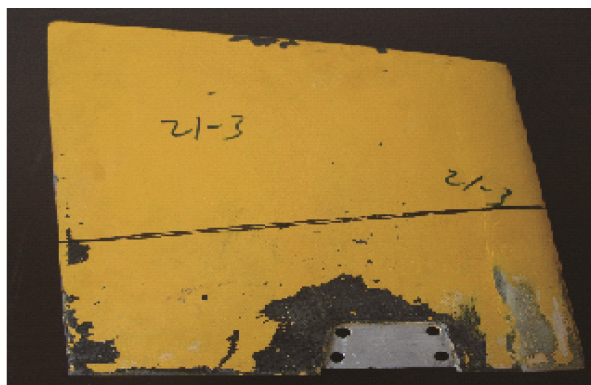


图1 某尾翼表面漆膜损伤状态

Fig.1 The coating damage state of some tail surface

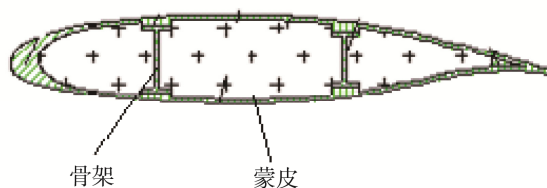


图2 两翼、尾翼部件结构

Fig.2 Component structure of tail and wing

1.2 基材表面处理不到位

1.2.1 复合材料表面处理存在的问题

首先分析制件的工艺过程。飞行器的舱段、翼面一般用玻璃纤维、碳纤维等树脂基复合材料制作而成,构件的制造工艺多采用模压热固化成形,为了制件的完整、无损取出脱模,压制前在模腔内大多涂敷了一层脱模剂,如石蜡、油脂等,它们都是极性很弱的分子结构链,该类材料对复合材料具有一定的渗透能力,特别是在热压状态下,可达数百微米的浸入深度,如果不清除干净,会严重削弱涂装后的涂层附着力。而目前对复合材料表面涂装的前处理工艺往往还停留在粗化表面状态为主要目的,对脱模剂对涂层附着力的影响重视不够,常用的前处理工艺流程如图3所示。再者,复合材料不同于金属材料,因胶液的浸润程度不够均匀、透彻,或铺层压制过程中的空气残留,其内部或多或少地存在泡孔、沟槽纹路等缺陷,这也会影响漆膜在环境试验过程中的表现,出现图1所示的局部漆膜起层/泡、开裂现象^[2-5]。

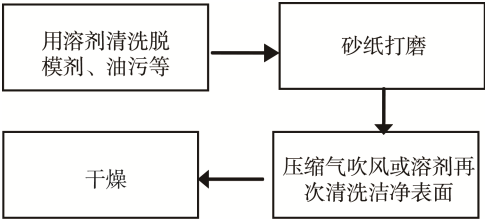


图 3 复合材料表面处理工艺流程
Fig.3 The technological process of composite materiel surface treatment

1.2.2 铝合金组件表面处理存在的问题

铝合金组件主要用于舱段、两翼、整流罩等部件的接口连接部位，与复合材料构件复合为一体，其表面前处理工序基本沿用图 3 的复合材料表面处理工艺流程。通常情况下，铝合金件加工完后，在暴露环境下，表面会生成一层氧化膜，这种膜非常薄、易破损，不能真正起到抗腐蚀作用^[6]。为了在工序流转期间避免暴露腐蚀，一般都要进行表面阳极氧化处理，生成一种 Al₂O₃ 保护膜，它是由致密的阻碍层和柱状结构的多孔层组成的双层结构，膜厚一般为 10~40 μm，具备一定的抗酸碱环境腐蚀能力^[7-11]。然而，为了提高涂层与铝合金表面的附着力，涂漆前都有一道打磨粗化工序，以提高铝材表面的粗糙度。正是由于这道工序，破坏了铝合金氧化膜层的孔隙结构，在涂漆前，铝件表面会受到酸碱、潮湿及温度变化的环境侵蚀作用，被漆膜封闭于孔层内的腐蚀介质的膨胀效应会将表面漆膜鼓起，从而出现起泡、起层剥离现象^[12-14]。该分析结果可通过对比试验进行验证：分别取一组经阳极氧化处理过的铝合金试板和未经阳极氧化处理过的铝合金试板各 5 块（尺寸 300 mm×300 mm），按规定工艺喷涂 TH52-80 牌号底漆，固化达标后浸泡于酸性溶液中，快速加热升温至 70 ℃，保持 1 h 后取出，结果表明未经阳极氧化处理过的铝合金试板表面漆膜正常，而经阳极氧化处理过的铝合金试板的漆膜表面出现了局部斑点起泡现象（见图 4）。

1.3 涂料种类选择不当

以玻璃钢、碳纤维复合材料及铝合金为代表的轻质复合材料基材，面对温度冲击、湿热、振动等典型环境试验考核，会有不同的物理变化反应。通常，纤维复合材料对热膨胀/收缩导致的伸缩形变反应较弱，但在湿热环境下往往会产生较强的伸缩形变。铝合金对温度变化较敏感，会产生较大的伸缩形变。产品所用的轻质结构材料多为薄壁构件，在振动环境下会产生一定频率的弹性弯曲变形，这些因素都会影响漆膜与基材的结合质量。以某产品表面涂装用漆为例，针对不同基材选用的漆种见表 1。

从表 1 所列的漆种类型来看，复合材料选用了环氧有机硅耐热底漆与环氧有机硅耐热磁漆面漆配套，

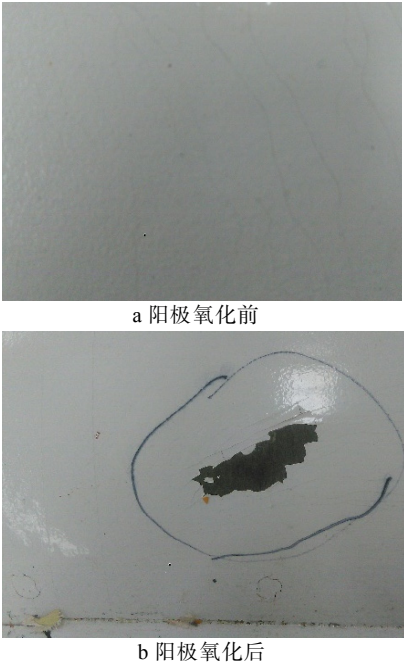


图 4 铝合金表面阳极氧化前后漆膜状态对比
Fig.4 The contrast of the coating before and after anodic oxidation of aluminum alloy

表 1 某产品表面基材选用的漆种
Tab.1 The paint choice of a product surface

基材	底漆	面漆
复合 材料	环氧有机硅耐热底漆 (GJB 1592—1993)	环氧有机硅耐热磁漆 (GJB 1592—1993)
铝/铝 合金	H06-2 锌黄环氧酯底漆 (HG/T 2239—1996)	H04-2I 型环氧硝基磁漆 (GJB 384A—1996)

这两种漆的树脂体系因有机硅分子的掺混改性，虽然提高了漆膜的耐热性能，改善了环氧树脂体系的脆性，却降低了漆膜与基材的附着力，仍然不利于承受基材热变形状态下的考核，在基材表面前处理达标的前提下，也会出现漆膜局部起层、层间起层现象。铝合金基材选用的是锌黄环氧酯底漆与环氧硝基磁漆面漆配套涂层，涂层的韧性较差，难以适应基材的热变形效应，往往也会出现漆膜开裂现象。

2 改进后的结构与涂装工艺

2.1 改进相关部件的结构设计

飞行器的两翼、尾翼部件通常由复合材料蒙皮与铝合金组件构成了独立的封闭结构。为了避免这种封闭结构带来的内部空气热膨胀效应，需要在不影响部件工作性能和结构强度的前提下，开设一定数量、大小的通气孔，通气孔的开设部位一般选择在铝合金件上。对某产品的翼形部件做出改进后的工艺结构设计如图 5 所示，选择铝合金组件的连接部位，设计了若

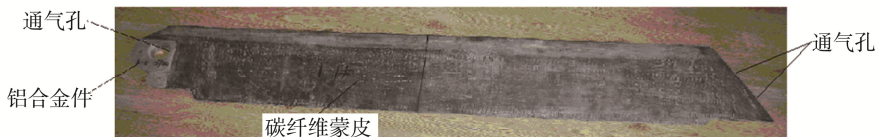


图 5 某翼形部件通气孔设置
Fig.5 The wing component vent hole design

干直径为 2~3 mm 的贯通孔,在后续的试验验证中取得了良好效果。

2.2 基材表面前处理

2.2.1 复合材料表面前处理

针对复合材料表面前处理工艺存在的问题,改进后的前处理工艺流程如图 6。与现有工艺不同的是直接去除渗有脱模剂材料的面层,直至彻底清理干净。

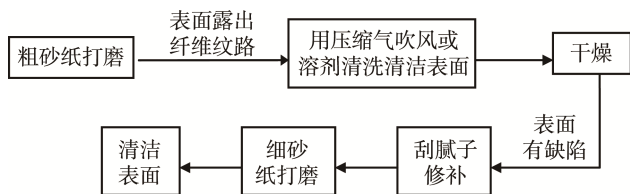


图 6 改进后的复合材料表面前处理工艺流程
Fig.6 The technological process of the improved pretreatment for composite materiel

2.2.2 铝合金表面前处理

在常规的铝合金表面前处理的基础上,针对表面特有阳极氧化层,制定了如图 7 所示工艺流程。

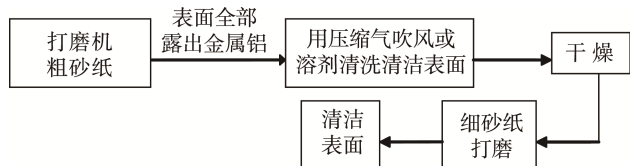


图 7 铝合金表面前处理工艺流程
Fig.7 The pretreatment technological process of aluminum alloy surface treatment

2.3 涂料体系选择

由前文对基材表面特性及表面漆树脂体系特性的分析,在保持涂层附着力不降的前提下,增强涂层的韧性,是提高涂层耐温度冲击、湿热、振动环境试验能力的有效途径。按此思路调整了底、面漆涂料配方,确认了表 2 所示的涂料配套体系。

表 2 改进后产品表面基材选用的漆种
Tab.2 The paint choice of a improved product surface

基材	底漆	面漆
复合 材料	TH52-80 锆铬黄防腐底 漆(QCD 350—2014)	TS55-80 型面漆
铝/铝 合金	TH52-80 锆铬黄防腐底 漆(QCD 350—2014)	B04-9 丙烯酸聚氨酯磁 漆(Q/AAAH 007—2012)

3 涂层性能试验与考核结果分析

首先准备试验样品,主要有 2 种:一是铝合金、碳纤维和玻璃纤维复合材料蒙皮材料试板,材料由产品单位提供,规格 300 mm×200 mm×3 mm,数量各 4 块,按照改进后的前处理工艺进行表面处理,正反面按照表 2 给出的涂料体系及相应的施工工艺要求,涂覆不同组合的底漆和面漆(见表 3);二是对图 5 所示的翼形部件按照改进后的前处理工艺进行表面处理,按照表 2 给出的涂料体系及相应的施工工艺要求涂覆底漆和面漆,试验结果见图 8。

其次,选用的试验设备是“三综合实验系统”,可

表 3 样板涂装及试验前后状态

Tab.3 The sample coating and the state contrast of the coating before and after test

	铝合金板	玻璃钢板	碳纤维板
涂 漆 前			
涂 漆 后			
试 验 后			

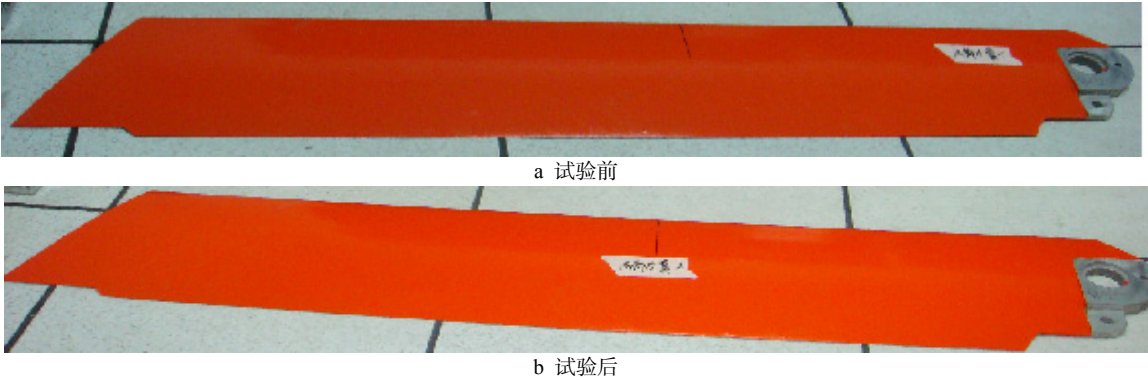


图 8 某翼形部件涂漆及试验后状态
Fig.8 The wing component coating and the state after test

模拟产品可靠性增长考核试验状态。主要由 WSZ 型温湿度试验箱、DY-1000-8-06 数字式电动振动台及试验台架组成,可同时进行高、低温冲击+振动+湿热性能试验。

试验过程及要求是:每组试板各选 1 块,预先按 GB/T 9286—2008 进行漆层与基材之间的附着力测

试;其余试板全部放在台架上紧固,再将台架安装于振动试验台上;按产品执行的温度应力数据曲线、振动应力数据曲线及湿热环境要求(见图 9),设置试验系统参数,统一按 10 个循环周期进行试验;试验完成后,每组试板任选 1 块进行漆层与基材之间的附着力测试^[15],与试验前进行对比。

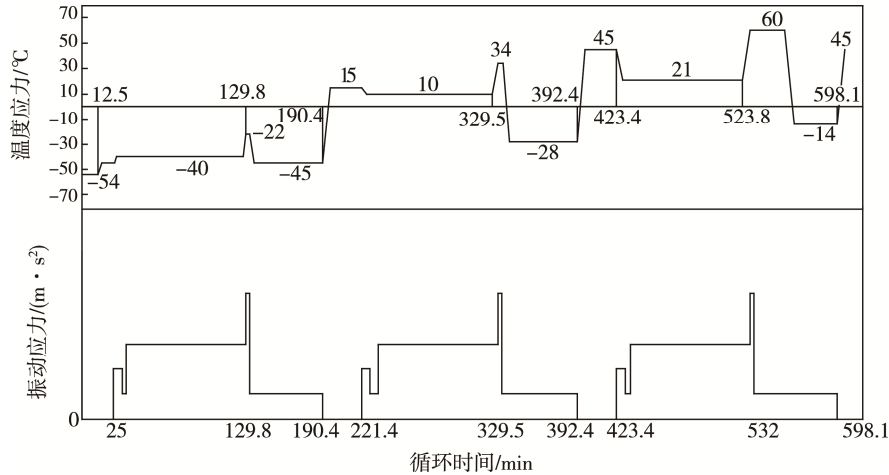


图 9 温度、振动应力试验谱线
Fig.9 Temperature-vibration-stress test curve

由表 3 试板外观图片及图 8 部件外观图片可以看到,经过温度-湿度-振动试验后,所有样板漆膜外观均完好,部件均无起层、开裂和剥落等破坏现象。附着力检测结果表明,试验后的试板漆膜附着力与试验前相比基本无下降。

4 结论

- 1) 解决涂层体系质量问题,必须从产品的设计开始。对于两翼、尾翼、油箱等闭式结构部件,需要考虑通气口的设计。
- 2) 铝合金、复合材料表面的涂装前处理工艺不再仅仅是通常的表面状态粗化,还需要针对制件的工艺流程特性出现的不利影响,彻底清除表面的脱模

- 剂、油脂、氧化保护层。
- 3) 应熟悉产品工作环境的特殊要求。飞行器用轻质结构材料的防护涂层侧重于温度冲击、振动、湿热变化承受能力,涂料产品选择应更加关注涂层柔韧性指标的提升。

参考文献:

[1] 齐祥安. 涂装涂层系统设计阶段的质量控制[J]. 现代涂料与涂装, 2009(6): 46-52.
QI Xiang-an. Quality Control in Design of Coating System[J]. Modern Paint & Finishing, 2009(6): 46-52.

[2] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 238-240.

- WO Ding-zhu. Encycloped of Composites[M]. Beijing: Chemical Ind Press, 2000: 238-240.
- [3] 姚双, 李敏, 顾轶卓, 等. 碳纤维复合材料 C 型结构热隔膜成型工艺[J]. 北京航空航天大学学报, 2013(1): 95-99.
- YAO Shuang, LI Min, GU Yi-zhuo, et al. Hot Diaphragm Forming of Carbon Fiber Composite with C-shaped Structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013(1): 95-99.
- [4] 何亚飞, 矫维成, 杨帆, 等. 树脂基复合材料成型工艺的发展[J]. 纤维复合材料, 2011(2): 7-13.
- HE Ya-fei, JIAO Wei-cheng, YANG Fan, et al. The Development of Polymer Composites Forming Process[J]. Fiber Composites, 2011(2): 7-13.
- [5] 马祥林, 任婷, 徐卫平. 大型碳纤维复合材料风机叶片成型工艺与发展[J]. 纤维复合材料, 2011(3): 26-29.
- MA Xiang-lin, REN Ting, XU Wei-ping. The Development and Molding Process of Carbon Fiber Reinforced Polymer in Large Wind Turbine Blades[J]. Fiber Composites, 2011(3): 26-29.
- [6] 《轻金属材料加工手册》编写组. 轻金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- Editorial Committee of Light Metal Material Processing Manual. Light Metal Material Processing Manual[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980.
- [7] 王英才, 陈岁元, 刘平平. LC4 铝合金表面硬质阳极氧化膜制备及表征[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 37-42.
- WANG Ying-cai, CHEN Sui-yuan, LIU Ping-ping. Preparation and Characterization of Hard Anodic Oxidation Film on LC4 Aluminum Alloy Surface [J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 37-42.
- [8] 杨巍, 蒋百灵, 时惠英. LY12 铝合金微弧氧化膜层的形成与生长机制[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10): 1949-1954.
- YANG Wei, JANG Bai-ling, SHI Hui-Ying. Formation and Growth Mechanism of Micro-arc Oxidation Coating on LY12 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10): 1949-1954.
- [9] 吴敏, 孙勇. 铝及其合金表面处理的研究现状[J]. 表面技术, 2003, 32(3): 13-15.
- WU Min, SUN Yong. Development of Surface Treatment for Aluminum and Its Alloys[J]. Surface Technology, 2003, 32(3): 13-15.
- [10] 唐艳茹, 潘利华, 常宇, 等. 微弧氧化提高铝合金耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 48-54.
- TANG Yan-ru, PAN Li-hua, CHANG Yu, et al. Improving the Wear Resistance of Aluminum Alloy through the Micro-arc Oxidation Technology[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 48-54.
- [11] MI T, JIANG B, LIU Z, et al. Plasma Formation Mechanism of Microarc Oxidation[J]. Electrochimica Acta, 2014, 123(4): 369-377.
- [12] 杨哲龙. 铝合金常温硬质阳极氧化工艺研究[J]. 材料保护, 1998, 31(12): 8-9.
- YANG Zhe-long. Study on Hard Anodic Oxidation of Aluminum Alloy at Ambient Temperature[J]. Materiel Protection, 1998, 31(12): 8-9.
- [13] 钱建刚, 李获, 郭宝兰. 镁合金化学转化膜[J]. 材料保护, 2002, 35(3): 5.
- QIAN Jian-gang, LI DI, GUO Bao-lan. Chemical Converting Film of Magnesium Alloys[J]. Materials Protection. 2002, 35(3): 5.
- [14] 陈小丽, 麻彦龙, 黄伟九, 等. 环保型铝合金阳极氧化表面前处理研究进展[J]. 材料导报, 2015(7): 107-112.
- CHEN Xiao-li, MA Yan-long, HUANG Wei-jiu, et al. Researches on Environmentally Friendly Anodizing Surface Treatments of Aluminum Alloys[J]. Materials Review, 2015(7): 107-112.
- [15] 李焱. 防腐蚀涂层相关质量检测[J]. 现代涂料与涂装, 2009(6): 40-43.
- LI Yan. Quality Inspection Anti-corrosive Coating Film [J]. Modern Paint & Finishing, 2009(6): 40-43.