

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.01.010

## 飞机零部件原位修复用钝化膏的制备及性能评价

董 楹<sup>1</sup>, 王朝琳<sup>1</sup>, 文颖慧<sup>1</sup>, 宋 斌<sup>1</sup>, 米 南<sup>1</sup>, 戴晓亮<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>2\*</sup>

(1. 哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 工程技术部, 黑龙江 哈尔滨 150066;

2. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对飞机上不锈钢零部件原位修复过程中所使用的刷涂钝化溶液流淌并污染周边区域的问题, 本文以有机酸制备钝化膏, 并开展了性能验证评价, 为钝化溶液的替代奠定基础。研究表明: 钝化膏呈无色透明凝胶状, 粘度 600 mPa s, 在 5 °C 和 38 °C 下存放 6 个月无变化; 以水擦拭易去除; 钝化后不锈钢材料表面无挂灰、暴露的结晶组织、麻坑等现象。金相显微镜下观测处理后的试件, 组织无改变。利用 X 射线光电子能谱表征与化学置换法检测试件成分, 试件表面不含 Fe 元素。按照 GJB 150.11A 进行 96 h 干湿交替盐雾试验, 试件表面无红色锈蚀。钝化膏性能可满足机上零部件损伤后的原位修复需求。

**关键词:** 膏剂; 水溶性; 刷涂钝化; 膜层完整性; 耐腐蚀性

**中图分类号:** TQ153.2

**文献标识码:** A

## Preparation and performance evaluation of passivation paste for in-situ repair of aircraft components and parts

Dong Ying<sup>1</sup>, Wang Zhaolin<sup>1</sup>, Wen Yinghui<sup>1</sup>, Song Bin<sup>1</sup>, Mi Nan<sup>1</sup>,  
Dai Xiaoliang<sup>1</sup>, Liu Zhigang<sup>2\*</sup>(1. Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Engineering and Technology Department,  
Harbin 150066, China; 2. College of Chemical Engineering and Chemistry,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of brush passivation solution flowing and contaminating the surrounding parts during the in-situ repair of stainless steel components and parts on aircraft, passivation paste was prepared with organic acid, and performance evaluation of the passivation paste was carried out, laying the foundation for the replacement of brush passivation solution. The results showed that the passivation paste was colorless and transparent gel, with a viscosity of 600 mPa s, and remained unchanged at 5 °C and 38 °C for 6 months. It is easy to remove by wiping with water. After passivation, the surface of stainless steel parts has no hanging ash, exposed crystalline structure, pits and other phenomena. The microstructure of the specimen was not changed after observation under metallographic microscope. The composition of the specimen was detected by X-ray photoelectron spectroscopy and chemical substitution method, and the surface of the specimen did not contain Fe element. According to GJB 150.11A, the dry-wet alternating salt spray test was carried out for 96 h, and no red rust was found on the surface of the specimen. The performance of passivation paste can meet the needs of in-situ repair

收稿日期: 2024-07-11

修回日期: 2024-08-25

作者简介: 董楹 (1982—) 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为飞行器制造, email: 1357495@qq.com

通信作者: 刘志刚, email: lzgbs@163.com

of damaged components and parts on aircraft.

**Keywords:** paste; water solubility; brush passivation; film integrity; corrosion resistance

不锈钢因其具有较好的耐高温性能及耐空气、蒸汽、水等弱腐蚀介质和酸、碱、盐等化学浸蚀介质腐蚀的性能,在飞机发动机及周边零部件中得到广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。钝化所需设备简单、操作方便,是不锈钢材料较为常用的表面处理方式<sup>[3]</sup>,按照操作方式分为槽液钝化和刷涂钝化。其中刷涂钝化一般用于以下情况:1) 不锈钢零部件在装配过程中局部钝化膜损伤的修复;2) 已装机无法拆卸零部件在局部防护层损伤后的修复<sup>[4]</sup>;3) 因尺寸过大,受钝化槽体尺寸限制无法入槽钝化零部件表面防护层的制备。钝化是通过化学溶解的方法从不锈钢表面去除铁或铁化合物,最典型的是用酸溶液去除不锈钢表面污染但对不锈钢本身无明显的影响,促进保护性金属氧化膜的自然形成。其过程是在去除不锈钢表面易锈蚀的Fe元素,促进镍、铬氧化物的生成,提高材料化学稳定性<sup>[5-7]</sup>,满足产品设计、生产制造及再制造需求,提升飞机可靠性、延长装备服役寿命<sup>[8]</sup>。国内不锈钢刷涂钝化工艺一般使用自行配制的25%~35%的硝酸溶液,或市售主要成分为稀硝酸的溶液<sup>[9-10]</sup>。施工过程易出现以下问题:

(1) 机上零部件局部防护层制备及原位修复施工中,由于钝化溶液流淌,存在污染周边零部件表面镀层、漆层、氧化膜层、金属基体等的风险,从而引发更为严重的质量问题。

(2) 硝酸溶液具有强氧化性,环境友好性差,施工操作安全性差。

(3) 市售某刷涂钝化溶液为国外进口溶液,保质期为2年,采购周期为6~8个月,价格较高、有效期短。

基于以上问题,本文重点开展了刷涂钝化膏的

研制和性能评价。对研制的不锈钢刷涂钝化膏的性能、粘度及其在贮存环境极限温度下的性状变化,施工中的流淌性、膜层外观、膜层完整性和耐蚀性等进行了系统的研究验证。为膏剂式钝化技术在机上零部件防护层损伤后的原位修复中的应用提供支撑,同时为零部件制造、部装和总装中局部防护层的制备提供手段。

## 1 试验材料与实验方法

### 1.1 钝化膏制备

改进常用的硝酸或硝酸—氢氟酸体系的不锈钢刷涂钝化溶液<sup>[11]</sup>,以柠檬酸等有机酸为腐蚀剂,依托低聚合物及凝胶载体配制合成钝化膏。钝化膏主要由有机酸、缓释剂、粘稠剂等按照一定比例构成,在此基础上调整优化、验证获得最佳配比,通过搅拌及超声工艺制备成凝胶状。钝化膏各组分及含量见表1。

表 1 钝化膏组分

Tab.1 The components of passivation paste

功能	药品	含量/(wt.%)
树脂	丙烯酸树脂	5
腐蚀剂	35%的有机酸	75
增稠剂	纤维素类	10
	无机增稠剂	5
填料	硝酸镁	3
缓蚀剂	乌洛托品	1
流平剂及浸润剂	流平剂、膨润土	1

### 1.2 测试及表征方法

#### 1.2.1 钝化膏性能测试方法

钝化膏性能测试方法见表2。

表 2 钝化膏性能测试方法

Tab.2 Performance testing methods for passivation paste

检测内容	检测方法
外观	自然光线下目视检查,钝化膏呈凝胶状
贮存验证	分别取膏剂放置于 5℃ 和 38℃ 下,每半个月目视检查膏剂是否有分解,并检测 pH 值的变化
粘度	用上海保圣 V1-10 型旋转粘度计检测粘度
流淌性及水溶性	涂覆于试件表面,试件呈不同角度,膏剂 1 min 内无流淌 用毛刷蘸取钝化膏,观察 1 min 内有无膏剂滴落现象,去除钝化膏后,以 pH 值试纸检测呈中性

1.2.2 钝化试件表征及性能测试方法

钝化后试件的表征及性能测试方法见表3。

表 3 表征及性能测试方法

Tab.3 Characterization and testing methods

检测内容	检测方法	执行标准
宏观形貌	天然散射光下目视观察刷涂钝化膏后的试件表面，应为基体金属本色，不允许试件表面有挂灰、暴露的结晶组织和麻坑等现象 <sup>[12]</sup>	HB 5292
微观形貌	在金相显微镜下放大 500 倍和 800 倍对不锈钢材料的未经处理件、不锈钢钝化生产线硝酸槽液钝化 <sup>[7-8]</sup> 及膏剂钝化三类试件进行观察，并进行金相显微镜照片对比分析	—
成分	利用 X 射线光电子能谱（XPS）表征材料的成分组成，同时表征各成分的化学状态，定性并半定量分析金属表面元素	—
膜层完整性	将刷涂钝化膏剂处理后的试件在室温下浸入测试溶液（含 16 g/L 硫酸铜（CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O）、4 mL/L 硫酸（H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 比重 1.84）、去离子水（余量））中，保持 5 min 取出，检查其表面是否有沉积铜；或在被检测试件表面滴 1~2 滴上述溶液，5 min 后擦拭干净，检查该处是否有接触铜出现 <sup>[12]</sup>	HB 5292
耐蚀性	进行 96 h 干湿交替中性盐雾试验，其中 48 h 在盐雾箱内，取出后不冲洗在试验室环境下放置 48 h，观察镀层表面是否出现红色锈蚀 <sup>[13-14]</sup>	GJB 150.11A
	24 h 中性盐雾试验 <sup>[15]</sup>	ASTM B117

1.3 应用验证

1.3.1 刷涂钝化工艺流程

不锈钢刷涂钝化工艺流程如下：

隔离（按需）→擦拭、清洗→打磨→擦拭、清洗→刷涂钝化膏→擦拭清洗→干燥

1.3.2 刷涂钝化方法

不锈钢刷涂钝化的具体操作方法如下：

（1）隔离：按需采用塑料布、胶带等材料对非刷涂区域进行隔离防护；

（2）隔离后的擦拭、清洗：采用洁净的脱脂棉或无尘擦拭布擦拭待刷涂表面，去表面的灰尘等污染物，必要时蘸取去离子水擦拭；

（3）打磨：使用800#以上砂纸或工业百洁布均匀打磨待刷涂区，至露出新鲜的基体；

（4）打磨后的擦拭、清洗：采用洁净的脱脂棉或无尘擦拭布直接擦拭或蘸取去离子水擦拭清理待刷涂表面；

（5）刷涂钝化膏：将钝化膏涂覆于待刷涂表面，用毛刷或无尘擦拭布等将膏剂推开，使其与待刷涂表面充分接触；用蘸有膏剂的毛刷等反复擦拭待刷涂表面30~60 s；

（6）刷涂后的擦拭、清洗：以脱脂棉或无尘擦拭布蘸去离子水擦拭去除钝化膏，而后更换新的脱脂棉蘸离子水擦拭刷涂表面。用pH试纸检查清洗质量，经检测pH值6~7为合格，否则重新擦洗并检查

至合格为止。

（7）干燥：用洁净的脱脂棉或纯棉布、无尘擦拭布吸去刷涂表面的清洗水，自然晾干或用洁净的压缩空气吹干。

2 结果与讨论

2.1 钝化膏性能

2.1.1 外观检测

在自然光线下进行目视检查，钝化膏呈无色透明的凝胶状。

2.1.2 贮存验证

钝化膏封装于塑料桶内，避光保存。经6个月（180 d）储存验证发现，在目视检测的各阶段，钝化膏无颜色变化、分层、水分析出等现象。经检测，pH值以及粘度亦未发生改变。表明膏剂在高、低温环境下稳定性较好，现场施工时可在5~38 ℃的环境温度下贮存。

2.1.3 粘度检测

以V1-10型旋转粘度计对钝化膏进行粘度测定，并在6个月储存期内每间隔15天检测一次。检测发现粘度未发生变化，均为600 mPa s。

2.1.4 流淌性及水溶性

膏剂储存6个月后，以毛刷蘸取膏剂观察其流淌情况，膏剂1 min内无滴落。取少量膏剂涂覆于15-5PH材料的试片表面，试件分别与水平面呈30 °和

90° 摆放,以秒表记录时间,测试发现膏剂停留在试片表面60 s内有流淌趋势但无明显位移,流淌性验证现象见图1。

以蘸有去离子水的脱脂棉擦拭去除试件表面

的钝化膏,用pH试纸检测试件表面,pH值为6~7。

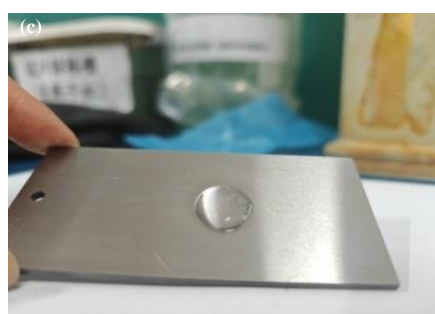
通过以上检测表明钝化膏流淌慢,可满足刷涂钝化施工30~60 s的施工参数要求;钝化膏水溶性好,在现场实施刷涂钝化后,以水擦拭即可清除。



(a)膏剂在毛刷表面流淌状态 1



(b)膏剂在毛刷表面流淌状态 2



(c)膏剂在试片表面流淌状态 1



(d)膏剂在试片表面流淌状态 2



(e)膏剂在试片表面流淌状态 3



(f)膏剂在试片表面流淌状态 4

图 1 流淌性验证现象

Fig.1 Verification phenomenon of fluidity

## 2.2 钝化表面宏观形貌检测

目视检查试件钝化外观,结果如图2所示。目视检查发现,试件的外观颜色均匀一致,呈金属的银

白色<sup>[12]</sup>,符合HB 5292酸洗钝化质量控制中对外观的验收要求。



(a)钝化后的试棒



(b)钝化后的试片

图 2 试件钝化后外观

Fig.2 Appearance of specimens after passivation

## 2.3 微观表征

### 2.3.1 金相显微镜表征

采用金相显微镜表征金属微观形貌, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出: 经生产线硝酸钝化槽液钝

化和经自制钝化膏剂钝化的不锈钢试件, 与该材料试件原材的表面状态基本一致。表明钝化膏与硝酸槽液钝化效果相同, 对金属基材无腐蚀性, 不改变金属表面的组织结构。

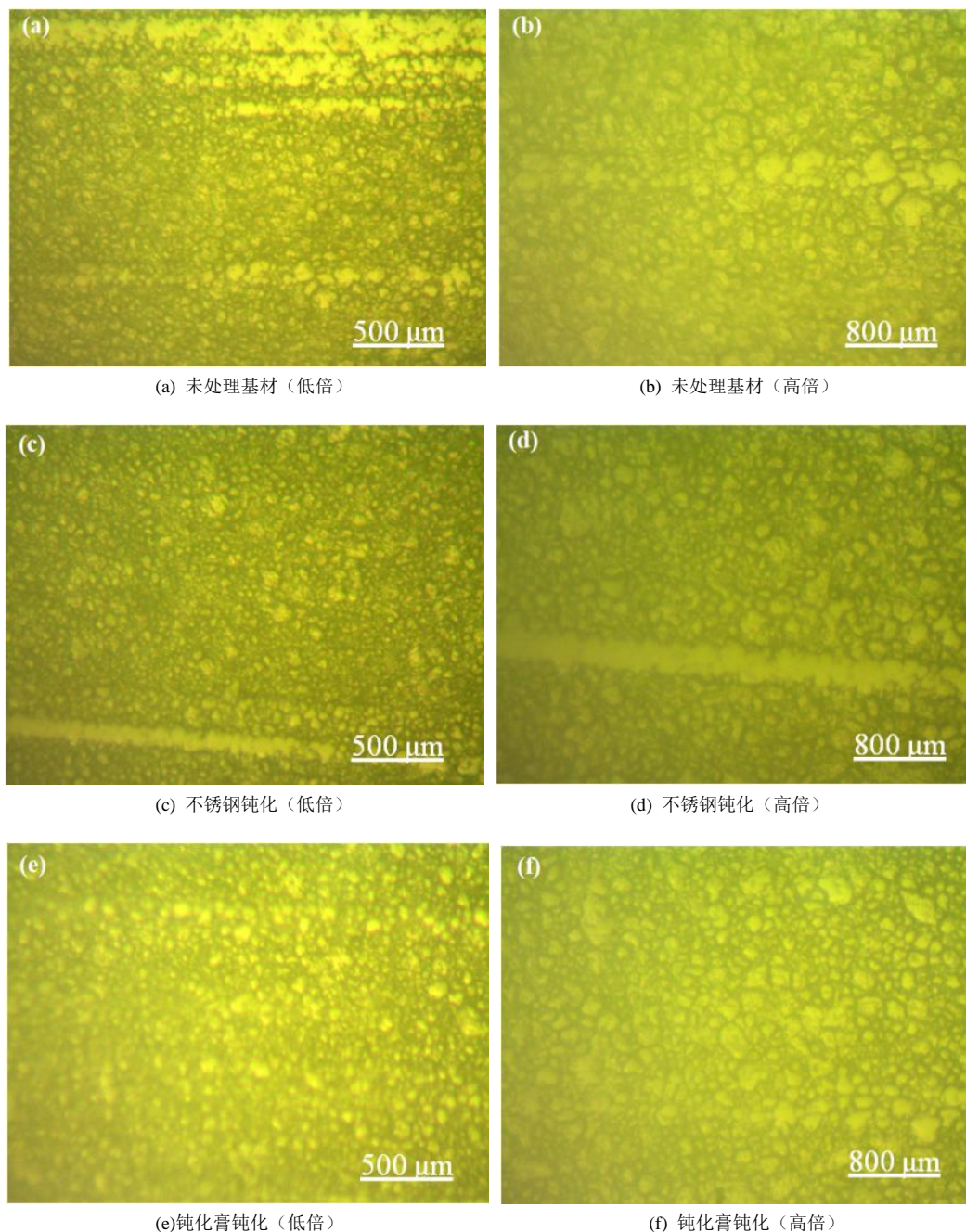


图 3 金相显微镜检测结果

Fig.3 Metallographic examination results

### 2.3.2 X 射线光电子能谱 (XPS) 表征

采用 X 射线光电子能谱表征材料的成分组成及相关成分的化学状态, 定性并半定量分析金属表面

元素情况。XPS 能谱测试结果如图 4 所示, 金属表面元素检测结果如图 5 和图 6 所示。



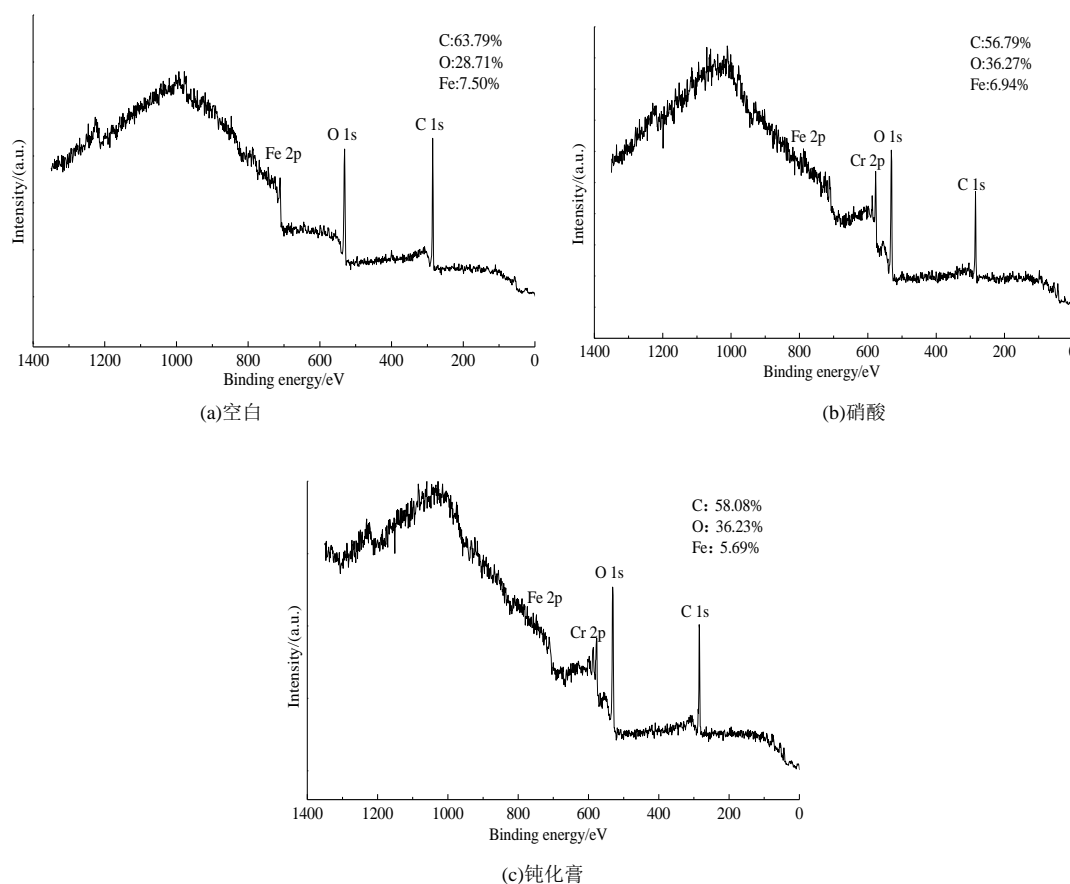


图4 XPS 能谱图分析结果

Fig.4 XPS energy spectra analysis results

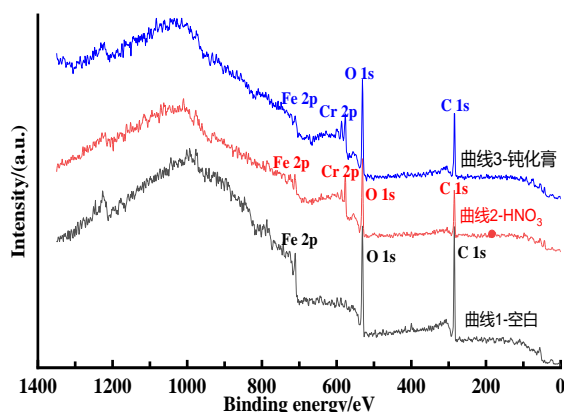


图5 处理前后样品的 Cr 元素分析

Fig.5 Cr element analysis of samples before and after treatment

由图4可以看出, 采用生产线上的硝酸槽液钝化后, Fe元素含量为6.94%, 比空白样品(7.50%)有所减少, 经钝化膏剂钝化处理后, Fe元素含量为

5.69%, 低于经钝化生产线硝酸槽液钝化处理后的结果。减少了铁元素含量, 即减少了产生Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>产物的几率。

由图5可以看出, 采用生产线硝酸槽液钝化和自制钝化膏剂钝化处理, 均使得不锈钢中Cr元素被氧化, 金属表面铬氧化物含量富集出现特征峰。这是由于硝酸溶液及钝化膏去除不锈钢表面的Fe元素后, 不锈钢基材表面的Cr在空气中与氧结合, 形成了铬的氧化物, 提高不锈钢材料表面的耐蚀性。

由图6可以看出, 采用经钝化生产线硝酸槽液钝化和自制钝化膏剂钝化处理, 均使得Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>转化为Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 且Fe信号减弱。以上检测结果符合酸洗钝化工艺的原理, 即酸洗钝化包含的去除部分游离的铁元素, 同时将金属氧化生成氧化膜的两个过程。

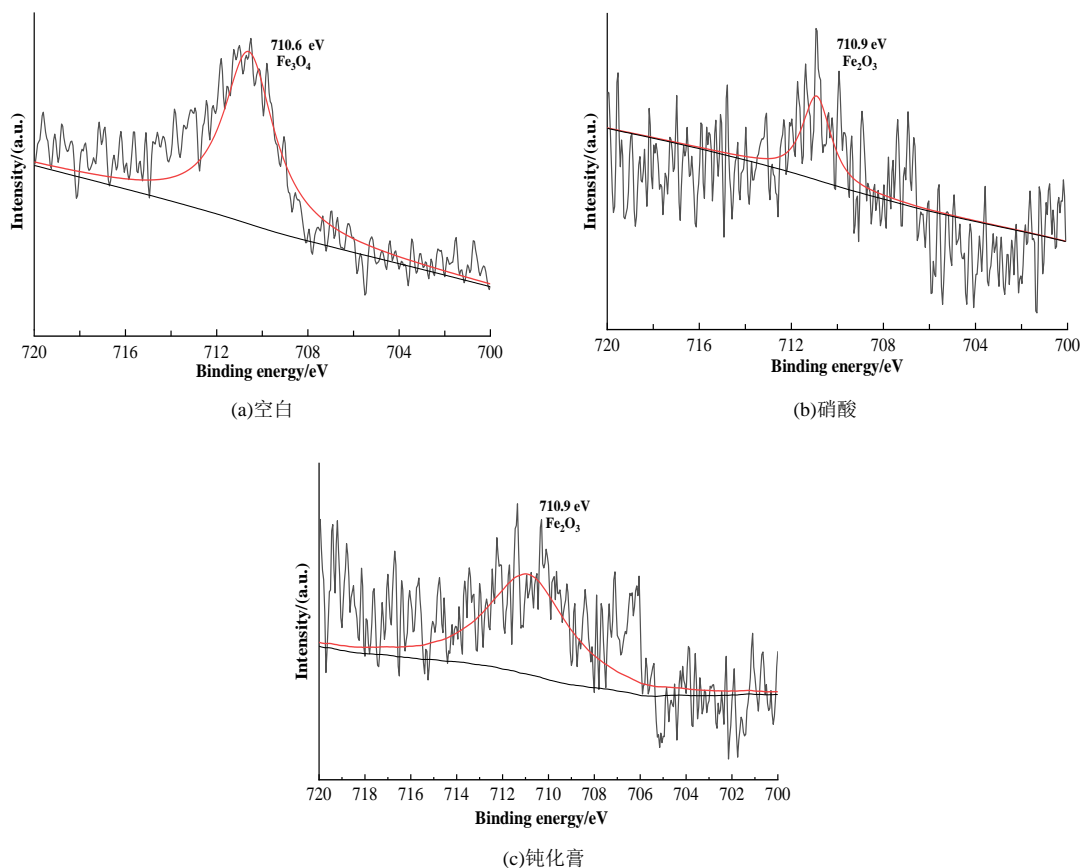
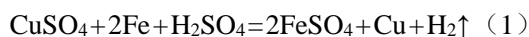


图 6 Fe 元素分析

Fig.6 Fe element analysis

## 2.4 膜层完整性

按照HB 5292采用硫酸—硫酸铜溶液对钝化后的试件表面进行膜层完整性检测, 反应方程式:



检测过程及实验现象如图7所示。经检测, 试件表面无红色铜析出, 表明经膏剂钝化后的试件表面膜层完整、连续, 无金属铁残留, 无法通过置换反应生成金属铜<sup>[12]</sup>。该检测结果与能谱检测结果相符。

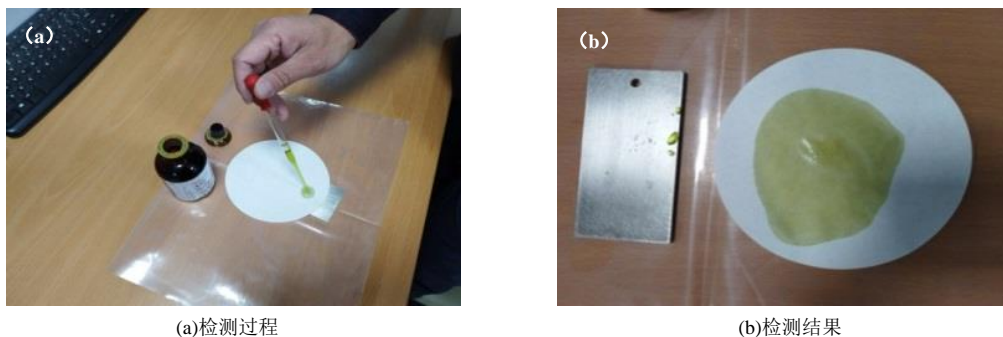


图 7 膜层完整性检测过程及结果

Fig.7 The process and results of membrane integrity testing

## 2.5 耐蚀性检测

耐蚀性检测结果见表4。试件分别按照GJB

150.11A进行96 h干湿交替盐雾试验和ASTM B117中性盐雾试验, 试验后试件表面无红色锈蚀。试验

结果进一步表明,在钝化膏作用下去除了试件材料表面的Fe元素,使不锈钢材料在5%氯化钠盐雾作用下,无 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 红色锈蚀产生<sup>[12]</sup>。膏剂钝化处理可提高不锈钢材料的耐蚀性能。

表4 耐蚀性检测结果

Tab.4 Corrosion resistance test results

检测项目	检验依据	检测结果
耐蚀性(96 h)	GJB 150.11A	试件表面无红色锈蚀
耐蚀性(24 h)	ASTM B117	试件表面无红色锈蚀

### 3 结论

制备飞机零部件原位修复用钝化膏,并对其性能进行评价、开展工艺应用验证,得到以下结论:

(1)制备的钝化膏剂呈凝胶状,经6个月(180 d)储存无分解,粘度600 mPa·s无变化。流淌性慢,可满足刷涂施工30~60 s的施工要求,可以水擦拭去除。

(2)刷涂钝化效果达到并高于槽液钝化效果,对金属基材无腐蚀,不改变其组织结构;同一基材表面Fe元素含量5.69%,低于槽液钝化;钝化膜层完整,耐中性盐雾腐蚀时间可达到24 h。

### 参考文献

- [1] 张栓,张桐,孙越.航空发动机海洋大气环境下“三防”能力分析及试验验证[C]//中国航空学会.探索创新交流——第六届中国航空学会青年科技论坛文集(下册).中国辽宁沈阳:中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司,2014: 111-115.
- [2] 冯国岩.直升机机身结构的腐蚀与防腐[C]//中国航空学会直升机分会.第三十一届(2015)全国直升机年会论文集.北京:中航出版传媒有限责任公司,2015: 324-328.
- [3] 汪志良.航空空制造工程手册[M].北京:航空工业出

版社,1993: 237-238.

- [4] 王朝琳,隋金江,杨雄飞.直升机金属件局部镀覆层的制备及修复技术浅析[C]//中国航空学会.第九届中国航空学会青年科技论坛论文集.北京:中航出版传媒有限责任公司,2020: 313-317.
- [5] 美国材料与试验协会. ASTM A380/A380M 不锈钢零件,设备和系统的清洗、除锈和钝化标准规范[S]. 美国: 美国材料与试验协会, 2017.
- [6] 赵向博,顾彩春,张小磊. 不锈钢腐蚀影响因素分析及防腐蚀性能研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2014, 28(3): 52-56.
- [7] 李巧霞,王振尧,韩薇,等. 不锈钢的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(6): 549-552.
- [8] 骆鸿,李晓刚,肖葵,等. 304 不锈钢放在西沙海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(3): 332-338.
- [9] 闫建中,吴荫顺,张琳,等. 316L 不锈钢在 NaCl 溶液微动过程中局部腐蚀作用研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(4): 237-242.
- [10] 王勋龙,于青,王燕. 深海材料及腐蚀防护技术研究现状[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(10): 80-86.
- [11] 美国材料与试验协会. ASTM A967M 不锈钢部件化学钝化处理的标准规范[S]. 美国: 美国材料与试验协会, 2017.
- [12] 中华人民共和国航空工业部. HB 5292 不锈钢酸洗钝化质量检验[S]. 北京: 中华人民共和国航空工业部, 1985.
- [13] 张宁,刘亚鹏,李开伟,等. 南海大气环境下 304 不锈钢点蚀特性研究[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 44-50.
- [14] 国防科学技术工业委员会. GJB 150.11A—2009 军用装备实验室环境试验方法第 11 部分: 盐雾试验[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2009.
- [15] 美国材料与试验协会. ASTM B117 盐雾试验设备操作的标准程序[S]. 美国: 美国材料与试验协会, 2019.