航空装备腐蚀维护维修新材料研究进展

姜海勋[1]，姜国杰[2,3]，孙志华[2,3]，史晓南[2,3]，汤智慧[2,3]
（1.海军驻北京地区第五军事代表室，北京 100041；2.中国航发北京航空材料研究院，北京 100095；3.中国航空发动机集团 航空材料先进腐蚀与防护重点实验室，北京 100095）

摘要：针对海洋环境下服役航空装备极易发生腐蚀的问题，介绍了清洗剂、去腐蚀产物膏、缓蚀剂等腐蚀维护维修新材料的研究进展，包括功能、分类、技术指标等。清洗剂用于航空装备的日常清洗、维护以及维修，去除油污等污染物，防止腐蚀；去腐蚀产物膏用于外场航空装备腐蚀产物的原位去除；缓蚀剂用于在不能对现役航空装备的防护体系进行大幅改动的情况下，针对海洋环境下航空装备的防腐蚀需求，对航空装备进行附加防护或临时防护。综合运用腐蚀维护维修新材料进行航空装备的腐蚀防护，可以预防和减少腐蚀的发生，及时对腐蚀部位进行修复，保障航空装备的使用性能和战斗力。

关键词：腐蚀；维护维修；清洗剂；去腐蚀产物膏；缓蚀剂
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2019.12.004
中图分类号：TG174 **文献标识码：**A
文章编号：1672-9242(2019)12-0022-06

Research Progress of New Corrosion Maintenance or Repair Materials for Aviation Equipments

JIANG Hai-xun[1], *JIANG Guo-jie*[2,3], *SUN Zhi-hua*[2,3], *SHI Xiao-nan*[2,3], *TANG Zhi-hui*[2,3]
(1. Navy Fifth Military Delegate Department in Beijing Area, Beijing 100041, China; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. AECC Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: Aiming at the corrosion problem of naval aviation equipments, research progresses of new corrosion maintenance or repair materials, such as cleaners, rust removal pastes and corrosion inhibitors were introduced, including functions, classifications and requirements. Cleaners were used to clean aviation equipments to prevent corrosion. Rust removal pastes were intended to remove the corrosion products in situ. Corrosion inhibitors were used for the additional or temporary protection of aviation equipment according to the anti-corrosion needs of aviation equipment in marine environment without substantial change on the protective system of the aeronautic equipment in service. The wide application of these materials in naval aviation equipment corrosion maintenance or repair may prevent or reduce aviation equipment corrosion, repair corrosion parts, and improve the service lifetime of aviation equipment.

KEY WORDS: corrosion; maintenance or repair; cleaner; rust removal paste; corrosion inhibitor

随着我国深海和远海战略的实施，在海洋环境下服役的战斗机、直升机、预警机等各型航空装备将会越来越多。与陆地服役环境相比，海洋服役环境非常恶劣，主要表现为：1）飞机及发动机等航空装备长期暴露于含盐量高且温暖潮湿的海洋大气环境中，温度、湿度、Cl^-含量较内陆地区高得多，Cl^-本身具有

收稿日期：2019-07-29；**修订日期：**2019-08-23
作者简介：姜海勋（1980—），男，硕士，主要研究方向为航空装备保障。
通讯作者：姜国杰（1985—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为清洗剂、缓蚀剂、腐蚀维护维修等。

较强的侵蚀性，加重航空装备的腐蚀；2）武器装备运转以及工作人员生活排放大量含硫废气等腐蚀性气体，使航空装备处于酸性腐蚀环境中；3）海洋潮湿环境易于各种微生物生长；4）受季候风、雨水、海浪冲刷严重等。

由于各型航空装备的防护体系基本沿用于陆基航空装备，针对腐蚀的防护措施较少，在恶劣海洋服役环境下极易发生腐蚀，将严重影响航空装备的性能和战斗力。针对海洋环境下服役航空装备极易发生腐蚀的问题，借鉴国外先进技术和经验，需要综合使用清洗剂、去腐蚀产物膏、缓蚀剂等腐蚀维护维修新材料进行航空装备的腐蚀维护维修，以预防和减少腐蚀的发生，并及时对腐蚀部位进行修复，保障航空装备的使用性能和战斗力[1-6]。

1　清洗剂

清洗剂主要用于航空装备的日常清洗、维护以及维修，去除油污等污染物，防止腐蚀[7-12]。海洋环境下服役飞机及发动机等航空装备在使用和停放过程中，不可避免地遭受来自大气、地面、燃料废气等方面的盐雾、灰尘、油污、积碳、氧化物和橡胶等的沉积。这些沉积污染物一方面不仅影响航空装备内外表面的美观，而且容易引发航空装备的腐蚀，造成航空装备性能降低和使用寿命缩短等问题；另一方面会使发动机叶片型面改变，通道变狭，进气量减少，从而造成热效率下降、燃烧性能变坏、油耗增加、推力降低等现象，直接影响发动机的工作性能。因此，在航空装备的日常维护中，需要使用专用的航空装备清洗剂定期地进行清洗，以保障航空装备的性能和战斗力。此外，使用专用的航空装备清洗剂替代汽油等传统易燃溶剂进行清洗，可以提高清洗的安全性，减少安全事故的发生。如某部使用汽油清洗航空装备引发火灾，造成了严重的生命和财产损失。

清洗剂包括水基清洗剂、溶剂型清洗剂和发动机清洗剂。在国外，波音、空客等公司均在各自的飞机维修手册中对符合要求、可供选用的清洗剂品种进行了严格规定。如 B&B 系列航空装备清洗剂、Cee-Bee 系列清洗剂等。法国 TM 公司在 WZ8 发动机大修手册中明确规定了进气道清洗剂 Ardrox 6345。英国皇家空军通过对多架次 Tomado GRl 型飞机进行清洗试验证明，清洗使飞机表面腐蚀性介质浓度大大降低，如清洗后硫酸盐浓度降低 75%~85%（质量分数，后同），氯离子浓度降低 80%~90%。此外，通过清洗剂与自来水的清洗效果试验对比，采用清洗剂清洗明显优于单纯用自来水清洗。军用飞机外表面清洗剂的美军标准是 MIL-PRF-85570D[13]，包含了水基型、含芳烃型、含非摩擦橡胶颗粒型和含研磨颗粒型四类表面清洗剂。其中，水基型清洗剂具有无污染、运输方便、操作安全等优点，因而应用范围最广。对于航空装备内表面、特殊部位、零部件以及涂层破损部位的清洗，则选用溶剂型清洗剂，不需用水漂洗，可自然挥干，无残留，与之对应的美军标准是 MIL-PRF-32295[14]。发动机清洗剂的美军标是 MIL-PRF-85704C[15]，符合该规范的清洗剂可以用于发动机的“离线”或“在线”清洗。

为解决航空装备顽固型油污的清洗问题，并提高清洗剂使用的安全性，中国航发北京航空材料研究院研制了 AHC-7 水基清洗剂和 RJ-1 溶剂型清洗剂，并进行了全面性能考核、适应性研究、工艺研究等应用研究工作[16]。AHC-7 水基清洗剂符合美军标 MIL-PRF-85570D 的技术指标要求（见表 1），不含磷酸盐、聚磷酸盐等容易造成环境水体富营养化以及铬酸盐、亚硝酸盐等污染环境的物质，对航空装备表面油漆、丙烯酸塑料等非金属材料无不良影响。其具有优良的

表 1　AHC–7 水基清洗剂技术指标

项目	技术指标
外观	均质液体
pH 值	7.0 ~ 10.0
闪点（闭口杯）	≥60 ℃
全浸腐蚀	试样无可见腐蚀；铝合金（7A04-T6）、钛合金（TC4）、钢（45#）质量变化不超过 0.04 mg/(cm^2·24 h)；镁合金（MB2，铬酸盐化学氧化）质量变化不超过 0.20 mg/(cm^2·24 h)
对镉镀层的腐蚀	质量变化不超过 0.20 mg/(cm^2·24 h)
对镉-钛镀层的腐蚀	质量变化不超过 0.20 mg/(cm^2·24 h)
缝隙腐蚀	清洗剂润湿的滤纸接触的铝合金表面允许轻微变色，腐蚀面积不超过 5%
氢脆	150 h 不断
对漆层表面影响	漆层无变色、裂纹及起泡，表面铅笔硬度变化不超过 1 个单位
对有机玻璃的影响	有机玻璃加载 8h 不产生银纹
对绝缘导线影响	无漏电，无裂纹
对橡胶的影响	表面硬度变化不超过 5 个邵氏 A 硬度单位
对密封剂的影响	表面硬度变化不超过 5 个邵氏 A 硬度单位
清洗效率	≥85%
对非涂漆表面的影响	表面无条纹或斑点
对涂盐表面的可漂洗性	表面无漂洗不净的残余膜
乳化性	均匀，不分层
硬水稳定性	清洗剂与硬水混合后呈均匀乳液，不分层
低温稳定性	均匀，不分层
加速贮存稳定性	加速试验后钢试样无腐蚀，清洗剂不分层，清洗效率≥85%

稳定性和贮存性能，尤其是其高效缓蚀剂组分能有效地抑制航空装备表面结构钢、铝合金、镁合金等金属材料的均匀腐蚀、点蚀和缝隙腐蚀，不会引起高强度钢的氢脆，综合性能达到国外同类材料的技术水平，是符合环保要求的航空装备表面用抗腐蚀清洗剂。RJ-1 溶剂型清洗剂符合美军标 MIL-PRF-32295 的技术指标要求（见表 2）。与传统的清洗用 180 或 200 号汽油相比，该材料闪点大于 60 ℃，使用安全，并且可自然挥干，无残留。该材料可用于航空装备内表面、特殊部位、零部件以及涂层破损部位的清洗。

在发动机清洗研究方面，中国航发北京航空材料研究院研制了 GT-1 发动机水基清洗剂，不仅清洗能力良好，而且缓蚀性能优异。对发动机上各种金属及非金属材料无腐蚀和加速腐蚀作用，对硬水、盐水、酸、低温等具有良好的稳定性，达到了美军标 MIL-PRF-85704C 的Ⅲ型清洗剂的技术指标要求（见表 3）。既可以用于发动机的“离线”清洗（冷态清洗），也可以用于发动机的“在线”清洗（热态清洗）。

表 2　RJ-1 溶剂型清洗剂技术指标

项目	技术指标
外观	均质液体
酸值	≤0.02 mg KOH/g
闪点（闭口杯）	≥60 ℃
全浸腐蚀	试样无可见腐蚀；铝合金（7A04-T6）、钛合金（TC4）、钢（45#）质量变化不超过 0.04 mg/(cm^2·24 h)；镁合金（MB2，铬酸盐化学氧化）质量变化不超过 0.20 mg/(cm^2·24 h)
对镉镀层的腐蚀	质量变化不超过 0.20 mg/(cm^2·24 h)
对镉-钛镀层的腐蚀	质量变化不超过 0.20 mg/(cm^2·24 h)
缝隙腐蚀	清洗剂润湿的滤纸接触的铝合金表面允许轻微变色，腐蚀面积不超过 5%
氢脆	150 h 不断
铜腐蚀	38 ℃浸泡 24 h 后铜片腐蚀等级不高于 1b 级
钛合金应力腐蚀	在 500 倍显微镜下观察无任何微裂纹
对漆层表面影响	漆层无变色、裂纹及起泡，表面铅笔硬度变化不超过 1 个单位
对有机玻璃的影响	有机玻璃加载 8 h 不产生银纹
对绝缘导线影响	无漏电，无裂纹
对橡胶的影响	表面硬度变化不超过 5 个邵氏 A 硬度单位
对密封剂的影响	表面硬度变化不超过 5 个邵氏 A 硬度单位
清洗效率	≥85%
对非涂漆表面的影响	表面无条纹或斑点
干燥时间	≤50 min
非挥发性残留物	≤5 mg/100 mL
低温稳定性	均匀，不分层
加速贮存稳定性	加速试验后钢试样无腐蚀，清洗剂不分层，清洗效率≥85%

表 3　GT-1 发动机水基清洗剂技术指标

项目	技术指标
外观	均质液体
pH	7.0 ~ 9.5
闭口闪点	≥95 ℃
运动黏度	≤25 mm^2/s
不溶物含量	≤0.025%
灰分含量	≤0.05%
清洗效率	≥85%
全浸腐蚀（质量变化，mg/(cm^2·24 h)）	铝合金（2A12-T3、6A02-0）≤1.0；镁合金（MB2，铬酸盐化学氧化）≤5.0；钛合金（TC4）≤1.0；碳钢（20 钢或 45 钢）≤2.0；不锈钢（1Cr13 或 2Cr13）≤2.0；高温合金（GH22 或 GH536）≤1.0；镀镉钢（碳钢上镀镉(15±2) μm）≤5.0；镀镍镉钢（扩散）≤5.0
热腐蚀	目视无可见腐蚀；显微镜下观察无明显局部腐蚀，腐蚀深度不大于 0.0076 mm
缝隙腐蚀	无可见腐蚀，允许轻微变色
钛合金应力腐蚀	在 500 倍显微镜下观察无任何微裂纹
漂洗性	表面无漂洗不净的残余膜
硬水稳定性	均匀，不分层
盐水稳定性	均匀，不分层
低温稳定性	均匀，不分层
酸稳定性	均匀，不分层
加速存储稳定性	清洗剂颜色无明显变化，不分层；钢试样不腐蚀
对漆层表面的影响	硬度变化不超过 2 个铅笔硬度值
对环氧树脂黏合剂影响	硬度变化不超过 2 个铅笔硬度值
对硅烷弹性体的影响	邵氏硬度值变化不超过 7

2　去腐蚀产物膏

去腐蚀产物膏用于外场航空装备腐蚀产物的原位去除。航空装备长期处于盐雾腐蚀、污染物和霉菌腐蚀、高温辐射、高温水蒸气等环境中，各零部件极易腐蚀失效，并且随着航空装备服役时间的增加，腐蚀程度会不断累积。针对这种不可避免的腐蚀问题，需要通过对在海洋环境下服役的航空装备进行外场的及时腐蚀维护及维修，来应对恶劣的服役条件，保持航空装备性能良好。军用航空装备外场维修的环境

条件、施工条件等均受到限制，允许的维修时间非常有限，因此需要高效的去腐蚀产物膏，不仅可以有效去除钢、铝合金表面的腐蚀产物，而且可以生成一层与涂层结合力好、具有一定防护能力的防护膜。

去腐蚀产物膏主要包括铝合金去腐蚀产物膏、铝合金局部化学氧化膏和钢去腐蚀产物膏。在国外，俄罗斯发展了去腐蚀化学软膏技术。通常对于腐蚀金属表面采取的现场局部除锈方法包括手工除锈或机械喷丸（砂）等物理除锈以及酸溶液浸泡或喷淋等化学除锈。手工除锈效果较差，锈层不易完全去除；机械喷丸（砂）可以将锈蚀完全去除，但丸（砂）容易扩散，粉尘多，后处理复杂；使用酸溶液浸泡或喷淋等普通化学除锈的方法，酸溶液容易流淌，不仅会因在待处理表面停留时间短而影响处理效果，而且流淌后容易对未锈蚀表面造成腐蚀。俄罗斯的去腐蚀化学软膏为黏稠膏状体，不易流淌，易于控制，可以较长时间停留在局部，不会对不需处理表面产生腐蚀。此外，该化学膏自然干燥后容易清理收集，不会造成污染物扩散。该技术已在俄罗斯航空装备制造和维护维修中大量使用。

中国航发北京航空材料研究院通过对外合作项目，引进了“从铝合金零件上去除腐蚀产物工艺”、“铝合金化学氧化工艺”和“从结构钢零件上去除腐蚀产物工艺”三项工艺，研制了 ALT-1 铝合金去腐蚀产物膏、LYG-2 铝合金局部化学氧化膏以及 BT-2G 钢去腐蚀产物膏[17]。ALT-1 铝合金去腐蚀产物膏用于航空装备上铝合金零件腐蚀产物的去除，可以有效去除铝合金表面的腐蚀产物，技术指标见表 4。LYG-2 铝合金局部化学氧化膏用于航空装备上铝合金零件局部化学氧化，在铝合金表面生成一层与涂层结合力好、具有一定防护能力的氧化膜，技术指标见表 5。BT-2G 钢去腐蚀产物膏用于航空装备上结构钢以及不锈钢零件腐蚀产物的去除，有效去除钢表面的腐蚀产物的同时，生成一层与涂层结合力好、具有一定防护能力的磷化膜，技术指标见表 6。三种去腐蚀产物膏证实在外场使用方便，可以处理任一倾角及尺寸的零件，包括带顶板、焊缝的零件。

表 4　ALT-1 铝合金去腐蚀产物膏技术指标

项目	技术指标
外观	均匀浓稠膏体，为亮橙色
流淌度	≤1 mm
去腐蚀效率	≥70%
干燥时间	< 3 h
金属基体腐蚀性	≤10 mg/dm^2

表 5　LYG-2 铝合金局部化学氧化膏技术指标

项目	技术指标
外观	均匀浓稠膏体，为橙色
流淌度	≤1 mm
干燥时间	< 3 h
漆膜结合力	不低于 1 级
耐蚀性	≥72 h

表 6　BT-2G 钢去腐蚀产物膏技术指标

项目	技术指标
外观	均匀浓稠膏体，为白色
流淌度	≤1 mm
处理时间	< 3 h
漆膜结合力	不低于 1 级
氢脆	200 h 不破断

3　缓蚀剂

缓蚀剂用于在不能对现役航空装备的防护体系进行大幅改动的情况下，针对海洋环境下航空装备的防腐蚀需求，对航空装备进行附加防护或临时防护[18-20]。缓蚀剂渗透能力和水置换能力优异，喷涂或刷涂在航空装备金属结构上，可以进入极小的缝隙和孔内，将金属结构表面的水分和盐分置换出来，溶剂挥发后，覆盖一层具有防腐蚀作用的透明膜层，对航空装备上钢、铝、铜、镁等多种金属以及镉、锌等镀层均有良好防护作用。为减少航空装备腐蚀的发生，保障航空装备的使用性能和战斗力，不仅要在航空装备的总装和大修过程中使用缓蚀剂材料，而且在航空装备服役过程中也要使用缓蚀剂进行外场维护。

缓蚀剂主要分为硬膜缓蚀剂和软膜缓蚀剂。硬膜缓蚀剂干燥后形成硬膜，膜层较厚（30~40 μm），不易破坏，不沾灰，有效防护期较长。适用于航空装备上紧固件、调整片、接缝、焊缝、未涂覆的金属表面等不要求润滑的非运动部件和大表面上，也可以作为涂层破坏后的修补手段之一，涂覆在涂层开裂、损坏部位。硬膜缓蚀剂材料标准主要有美军标 MIL-DTL-85054D(AS)[21]以及波音公司的规范 BMS 3-35[22]等，其中用于航空装备外场维护的硬膜缓蚀剂应符合 MIL-DTL-85054D(AS)的要求，用于航空装备总装和大修期间舱内部重点结构附加防护的硬膜缓蚀剂应符合 BMS 3-35 的要求。软膜缓蚀剂的特点是形成的膜较软，有一定的润滑作用，可以擦洗掉，用于滑轮、操纵索等运动部件的腐蚀防护，材料标准主要有美军标 MIL-PRF-81309F[23]。缓蚀剂已经在国外航空装备生产、维护中得到广泛应用，美海军 ES-3A 型反潜机、S-3B 型反潜机等采用 ACF-50 缓蚀剂，使航空装备腐蚀率大大降低。海鹰直升机上使用部位有机尾内表面、低凹区域及舱底等。美军的应用研究表明，采用缓蚀剂进行外场维护，不仅降低了费用，而且减少了工时和劳动强度。采用缓蚀剂前，美军每架飞机每个维护周期平均需要 2000 美

元和花费 20 个工时更换零件；采用缓蚀剂后，只需要 100 美元和花费 5 个工时更换零件。

中国航发北京航空材料研究院研制了 YTF-3 硬膜缓蚀剂和 TSN-7 软膜缓蚀剂，性能优良，与国外同类材料水平相当[24]。YTF-3 硬膜缓蚀剂达到了耐中性盐雾 1500 h 的要求，符合美军标 MIL-DTL- 85054D (AS)以及波音公司规范 BMS 3-35 的技术指标要求（见表 7）。YTF-3 硬膜缓蚀剂适用于航空装备上不要求润滑的非运动部件和大表面上，既可以用于航空装备总装和大修期间舱内部重点结构附加防护，也可以作为涂层破坏后的修补手段之一，涂覆在涂层开裂、损坏部位。TSN-7 软膜缓蚀剂达到了耐中性盐雾 336 h 的要求，符合美军标 MIL- PRF-81309F 的技术指标要求（见表 8）。TSN-7 软膜缓蚀剂用于滑轮、操纵索等运动部件的腐蚀防护。

表 7　YTF–3 硬膜缓蚀剂技术指标

项目	技术指标
外观	均质液体
闪点	≥38 ℃
不挥发分	38%±3%
黏度（涂 4 杯）	25 ~ 31s
可喷涂性	2~7 ℃冷藏后可喷涂
干燥时间，室温	≤24 h
干燥度	≤0.01 g
磨蚀性	玻璃片无划痕
膜层透明性	目视可见模拟腐蚀点
膜层可鉴别性	在可见光下试片上被涂部分与未涂部分的分界线应能清晰可见
膜层可去除性	脂肪族溶剂可去除膜层
金属腐蚀性	ZM5 镁合金、Zn-3 锌、Cd-3 镉质量变化不超过 0.5 mg/cm^2；2A12-T4 铝合金、T2 铜、H62 黄铜质量变化不超过 0.2 mg/cm^2
可渗透性	任何单个试样表面被润湿区域不低于 80%，三个试样平均被润湿区域不低于 85%
人造海水置换性	钢试样无明显腐蚀
耐中性盐雾	1500 h，铝合金试样表面不小于 1 mm 的腐蚀点少于 3 个
耐人造海水-亚硫酸盐雾	12 个循环试样无腐蚀
耐剥落腐蚀耐水性	浸泡 48 h，铝合金不出现明显的腐蚀现象 (40 ± 2)℃水浸 28 d，不露出金属基材
高温流动性（(125 ± 2)℃）	流动距离不大于 1.3 mm
低温结合力（(–55±2)℃）	膜层表面剥落不大于 1.3 mm
低温柔韧性（(–55 ± 2)℃）	膜层破裂或剥落的宽度不大于 1.3 mm

表 8　TSN–7 软膜缓蚀剂技术指标

项目	技术指标
外观	均质液体
闪点	≥38 ℃
氢脆	150 h 不断
喷雾性	连续的油膜
油膜厚度	≤12.7 μm
脱水性	45 钢试片无锈蚀
磨蚀性	玻璃片无划痕
可喷涂性	2~7 ℃冷藏后可喷涂
膜层可去除性	脂肪族溶剂可去除膜层
金属腐蚀性	ZM5 镁合金、Zn-3 锌、Cd-3 镉质量变化不超过 0.5 mg/cm^2；2A12-T4 铝合金、T2 铜、H62 黄铜质量变化不超过 0.2 mg/cm^2
耐中性盐雾	336 h，铝合金试样表面不小于 1 mm 的腐蚀点少于 3 个

4　结语

清洗剂可以用于航空装备的日常清洗、维护以及维修，去除油污等污染物，防止腐蚀；去腐蚀产物膏可以用于外场航空装备腐蚀产物的原位去除；缓蚀剂可以用于在不能对现役航空装备的防护体系进行大幅改动的情况下，针对海洋环境下航空装备的防腐蚀需求，对航空装备进行附加防护或临时防护。综合使用清洗剂、去腐蚀产物膏、缓蚀剂等腐蚀维护维修新材料进行航空装备的腐蚀维护维修，可以预防和减少腐蚀的发生，并及时对腐蚀部位进行修复，保障航空装备的使用性能和战斗力。

参考文献：

[1] 黄昌龙. 飞机腐蚀与防腐剂的使用[J]. 航空工程与维修, 2001(1): 35-36.

[2] 陈群志, 王逾涯, 崔常京, 等. 老龄飞机结构的腐蚀问题与对策[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 1-9.

[3] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.

[4] 张丹峰, 谭晓明, 戚佳睿. 飞机结构件腐蚀监测研究[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 32-34.

[5] 高延达, 李健, 李宗原, 等. 浅析直升机的外场腐蚀防护[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 135-139.

[6] 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.

[7] 陈跃良, 王安东, 卞贵学, 等. 海军某型飞机表面清洗技术[J]. 清洗世界, 2014, 30(4): 1-6.

[8] 张勇, 陈跃良, 樊伟杰, 等. 海军飞机清洗剂遴选方法研究[J]. 清洗世界, 2017, 33(11): 22-26.

[9] 李斌, 张晓云, 司徒振民. 飞机外表面清洗剂 AHC-1 的研制[J]. 材料工程, 1999(3): 28-31.

[10] 李斌, 张晓云, 汤智慧, 等. 飞机表面水基清洗剂对金

属材料腐蚀及氢脆性能影响研究[J]. 材料工程, 2007(6): 55-60.
[11] 李斌, 张晓云, 左新章, 等. AHC-1 及 AHC-5 飞机表面水基清洗剂应用研究[J]. 清洗世界, 2007, 23(1): 4-10.
[12] 李斌. 飞机系列清洗剂概述及技术要求综合分析[J]. 清洗世界, 2009, 25(2): 24-28.
[13] MIL-PRF-85570D, Cleaning Compounds, Aircraft, Exterior[S].
[14] MIL-PRF-32295, Cleaner, Non-aqueous, Low-VOC, Hap-free[S].
[15] MIL-PRF-85704C, Cleaning Compound, Turbine Engine Gas Path[S].
[16] 姜国杰, 杨勇进, 孙志华, 等. RJ-1 溶剂型飞机清洗剂应用研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 142-145.
[17] 王强, 刘波, 孙志华原, 等. 去腐蚀产物膏及氧化膏性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 29-32.
[18] 李斌, 张晓云, 汤智慧, 等. 飞机用硬膜脱水防锈剂中的脱水剂组分研究[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(4): 149-151.
[19] 李斌, 张晓云, 汤智慧, 等. 飞机硬膜脱水防锈剂 YTF-1 的研制[J]. 材料工程, 2000(10): 33-35.
[20] 李斌, 张晓云, 汤智慧, 等. YTF-1 飞机硬膜脱水防锈剂理化性能和使用性能研究[J]. 材料工程, 2009(6): 26-29.
[21] MIL-DTL-85054D(AS), Corrosion Preventive Compound, Water-displacing, Transparent (Formerly Amlguard)[S].
[22] BMS 3-35, Heavy Duty Corrosion Inhibiting Compounds[S].
[23] MIL-PRF-81309F, Corrosion Preventive Compounds, Water Displacing, Ultra-thin Film[S].
[24] 姜国杰, 杨勇进, 王强, 等. YTF-3 飞机硬膜缓蚀剂应用研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 19-23.