

国内外飞机缓蚀剂标准差异浅析

万蓉^{1,2}, 邱实^{2,3}, 陶威^{1,2}

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 中国特种飞行器研究所, 湖北荆门 448035;
3. 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北荆门 448035)

摘要: 对比分析了我国飞机缓蚀剂标准与部分国外标准存在的差异, 并提出了具体的优化改进措施。综述了国内外现有的飞机缓蚀剂相关标准, 从标准体系和技术要求 2 个方面入手, 分析了二者存在的差异。由于起步晚、经验不足等原因, 我国缓蚀剂尚未形成标准体系, 虽然部分技术要求上已满足国际先进水平, 但在部分细分指标上仍存在一定的差距。提出了我国缓蚀剂设计研发的方向, 同时提出了建立和健全我国缓蚀剂标准体系的建议, 对提升我国航空工业自主创新能力和国产飞机腐蚀防护与控制水平具有积极的推动作用。

关键词: 飞机; 缓蚀剂; 标准; 标准体系; 标准差异; 技术要求

中图分类号: TG174.42

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)11-0074-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.010

Difference of Aircraft Corrosion Inhibiting Compound Standards at Home and Abroad

WAN Rong^{1,2}, QIU Shi^{2,3}, TAO Wei^{1,2}

(1. School of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. China Special Vehicle Research Institute, Hubei Jingmen 448035, China; 3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Protection and Control, Hubei Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: The work aims to compare and analyze the differences between aircraft corrosion inhibiting compound standards at home and abroad, and propose specific optimization and enhancement measures. A comprehensive review of existing domestic and international standards for aircraft corrosion inhibiting compounds was conducted, with an analysis of differences from two perspectives: standard system and technical requirements. Due to delayed inception, insufficient experience, and other factors, China has yet to establish a cohesive standard system for corrosion inhibiting compounds. Although certain technical requirements have been aligned with internationally advanced levels, notable gaps remain in several sub-indicators. Recommendations are provided regarding the design and development direction of corrosion inhibiting compounds in China, alongside suggestions for establishing and refining the national standard system for these substances. Such initiatives will significantly contribute to enhancing the independent innovation capabilities within China's aviation sector as well as improving the corrosion protection and control standards of domestic aircraft.

收稿日期: 2024-09-05; 修订日期: 2024-10-15

Received: 2024-09-05; Revised: 2024-10-15

基金项目: 民航安全能力建设基金项目 (AADSA2022018)

Fund: Civil Aviation Safety Capacity Building Fund Project (AADSA2022018)

引文格式: 万蓉, 邱实, 陶威. 国内外飞机缓蚀剂标准差异浅析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 74-81.

WAN Rong, QIU Shi, TAO Wei. Difference of Aircraft Corrosion Inhibiting Compound Standards at Home and Abroad[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 74-81.

*通信作者 (Corresponding author)

KEY WORDS: aircraft; corrosion inhibiting compound; standard; standard system; standard differences; technical requirements

飞机作为现代科技与人类文明的结晶, 其高效、快速的运输能力不仅重塑了全球经济版图, 也深刻影响着军事战略与国防实力。然而, 随着航空工业的迅猛发展, 飞机金属部件的腐蚀问题日益凸显, 成为威胁飞行安全与延长使用寿命的隐形杀手。飞机缓蚀剂作为能够防御这一“隐形敌人”的有效防线, 其性能与标准的设定具有重要的意义。国外飞机维护过程中已广泛使用以缓蚀剂作为防腐手段的做法^[1-2], 国内也在积极推动缓蚀剂的应用^[3-6]。

国外飞机缓蚀剂技术的发展历史悠久, 国外企业更注重基础研究和技术创新, 在材料研发、性能测试、应用规范等方面积累了丰富的经验, 形成了严格完善的技术体系和标准体系, 确保产品的高质量与可靠性。与国际先进水平相比, 国内飞机缓蚀剂产业仍存在一些短板, 特别是在高性能、环保型缓蚀剂的研发与应用方面, 国内技术尚未完全突破国外技术壁垒, 部分关键原材料仍依赖进口, 这在一定程度上限制国内产品在高端市场的竞争力。国内缓蚀剂标准主要为产品规范, 标准体系还需进一步细化完善, 产品质量需持续提升。因此, 系统研究国外先进标准, 学习借鉴先进经验和技术成果, 对国产飞机缓蚀剂产品研发和应用具有重要意义。本文从标准体系和技术要求上对国内外飞机缓蚀剂标准的差异性进行了综合对比分析, 找出二者之间的差异, 提出我国缓蚀剂产品研发和标准体系构建的相关建议, 为国产缓蚀剂产业发展提供技术支持。

1 国内外飞机缓蚀剂标准体系对比

1.1 国外飞机缓蚀剂标准

在航空领域, 飞机及其他航空器的进口量数据反映了市场需求的变化, 而与此同时, 各大航空制造巨头如波音、空客以及美国军方, 对飞机缓蚀剂的标准也日趋严格。这些标准不仅关乎飞机结构的长期保护, 更直接关系到飞行安全及运营成本。国外飞机缓蚀剂标准主要由主机厂、军方和行业协会制定和发布。

波音公司作为全球领先的航空制造商, 其 BMS3 系列缓蚀剂标准颇具代表性。其中, BMS3-26^[7]标准为飞机结构部位提供了长效防护, 详细规范了缓蚀剂的成分及性能要求, 确保每一架出厂的飞机都能获得优质的防腐保护。BMS3-29^[8]标准则是对 BMS3-26 的有力补充, 它专注于增强飞机内部关键结构的防护效果, 特别是在极端环境下的防腐性能, 从而大幅提升了飞机的整体耐用性。最新一代的 BMS3-35^[9]标准则展现了波音在防腐技术上的创新成果, 该标准集成

了多种防腐技术, 旨在为飞机提供更为全面、持久的腐蚀防护。

空中客车公司 (Airbus) 所制定的 AIMS 系列标准占据着重要的地位。AIMS09-08-002^[10]标准针对飞机硬膜缓蚀剂的性能提出了具体要求, 包括渗透性、成膜性、耐候性等关键指标。这些指标的严格把控, 为空客飞机赢得了卓越的耐腐蚀性能。AIMS09-08-004^[11]标准进一步细化并补充了缓蚀剂在特殊环境条件下的性能要求, 以确保飞机在面临诸如高温、高湿度以及高盐雾浓度等极端环境挑战时, 仍能维持防腐性能, 从而保障飞机的安全稳定运行。

美国军用飞机对缓蚀剂的性能要求提出更为严苛的标准。MIL-DTL-85054^[12]标准规定了军用飞机缓蚀剂的最低性能要求, 确保在复杂的作战环境中, 飞机能够保持高度的可靠性。MIL-PRF-81309^[13]标准则针对特定类型的飞机结构设计, 特别强调了缓蚀剂与电子电气设备的兼容性要求, 从而确保军用飞机在执行多样化复杂任务时, 能有效抵御环境腐蚀, 全面保障军用飞机的作战效能与整体性能。

美国汽车工程师协会 (SAE) 鉴于材料表面膜层特性的多样性及其对宇航应用性能的关键影响, 制定了一系列详尽的宇航材料规范 (AMS) 标准。这些标准通过细致区分并规范各类膜层的特点与要求, 旨在为宇航领域提供一套科学、系统且符合实际应用需求的材料评估与选用准则, 确保航天器及其部件在极端环境下仍能保持卓越的性能与可靠性。国外主要飞机缓蚀剂标准见表 1。

1.2 国内飞机缓蚀剂标准

在当前全球航空工业快速发展的背景下, 飞机缓蚀剂作为保障飞机结构长期耐腐蚀性能的关键材料, 其标准的制定与实施显得尤为重要。尽管国际上已有多项成熟的飞机缓蚀剂标准可供借鉴, 但国内尚未形成专门针对飞机缓蚀剂的标准体系, 主要为军用标准及行业标准, 见表 2。这一现状对于我国航空工业的自主发展与国际竞争力提升构成了一定挑战。

目前, 民航行业标准《飞机缓蚀剂技术规范》^[30]已于 2024 年发布。该行业标准不仅参考了波音、美军标等国外标准, 还充分考虑了国内民航飞机在材料选择、使用环境等方面的独特性, 旨在制定出既符合国际潮流又贴合国内实际的缓蚀剂标准。标准内容全面覆盖缓蚀剂的理化性能评估, 包括外观、闪点及非挥发组分; 工艺性能的评估, 如施工便利性、与底材的附着力等; 成膜性能的评估, 包括膜层的致密性、硬度及耐候性等; 以及防护性能的验证, 特别是在复杂气候条件下的长效保护能力。标准中规定了缓蚀剂

表 1 国外主要飞机缓蚀剂标准

Tab.1 Foreign aircraft corrosion inhibiting compound standards

序号	标准编号	发布日期	标准名称	发布单位	标准状态	缓蚀剂类型
1	BMS3-23J ^[14]	2015-04-03	有机缓蚀剂	波音公司	有效	硬膜
2	BMS3-26B ^[7]	2015-03-10	耐久型有机缓蚀剂	波音公司	有效	硬膜
3	BMS3-29B ^[8]	2015-04-17	高级有机缓蚀剂	波音公司	有效	硬膜
4	BMS3-35B ^[9]	2015-04-10	耐久型缓蚀剂	波音公司	有效	硬膜
5	AIMS 09-08-000 ^[15]	2011-08	临时保护技术规范	空客公司	有效	软膜
6	AIMS 09-08-001 ^[16]	2004-04	临时保护 I 型技术规范	空客公司	有效	软膜
7	AIMS 09-08-002 ^[10]	2004-04	临时保护 II 型技术规范	空客公司	有效	硬膜
8	AIMS 09-08-003 ^[17]	2004-09	临时保护 III 型技术规范	空客公司	有效	硬膜
9	AIMS 09-08-004 ^[11]	2011-08	提高耐久型缓蚀剂	空客公司	有效	硬膜
10	MIL-C-11796C ^[18]	1986-11-04	凡士林类缓蚀剂的应用	美国国防部	限制使用	软膜、硬膜、中膜
11	MIL-PRF-16173E ^[19]	2006-09-07	冷敷溶剂还原型缓蚀剂	美国国防部	有效	软膜、硬膜
12	MIL-PRF-32033A ^[20]	2016-07-07	润滑油, 一般用途, 缓蚀剂, (水置换, 低温)	美国国防部	有效	润滑剂
13	MIL-PRF-63460F ^[21]	2017-03-26	武器和武器系统用润滑剂、清洁剂和缓蚀剂	美国国防部	有效	润滑剂
14	MIL-PRF-81309H ^[13]	2018-07-18	超薄、水置换型缓蚀剂	美国国防部	有效	软膜
15	MIL-L-87177B ^[22]	2014-09-23	润滑油, 缓蚀剂, 水置换, 合成	美国国防部	有效	软膜
16	MIL-DTL-85054D (AS) ^[12]	2010-09-21	透明、水置换型缓蚀剂 (原硬膜)	美国国防部	有效	硬膜
17	AMS3065H ^[23]	2021-08-06	指纹去除薄膜缓蚀剂	美国汽车工程师协会 (SAE)	有效	薄膜
18	AMS3072E ^[24]	2007-04-05	飞机发动机缓蚀剂	美国汽车工程师协会 (SAE)	取消	硬膜
19	AMS3075F ^[25]	2021-08-09	硬膜缓蚀剂, 热应用	美国汽车工程师协会 (SAE)	有效	硬膜
20	AMS3076C ^[26]	2000-12-01	化合物、腐蚀、预防、硬膜、冷应用	美国汽车工程师协会 (SAE)	取消	硬膜
21	AMS3077A ^[27]	2018-04-24	化合物、防腐蚀、软膜、触变性、冷应用	美国汽车工程师协会 (SAE)	有效	软膜
22	AMS3078B ^[28]	1998-05-01	化合物、防腐蚀、软膜、冷应用	美国汽车工程师协会 (SAE)	取消	软膜
23	AMS3079C ^[29]	2017-09-19	化合物, 防腐蚀, 软膜, 热应用	美国汽车工程师协会 (SAE)	有效	软膜

表 2 国内飞机缓蚀剂标准

Tab.2 Domestic aircraft corrosion inhibiting compound standards

序号	标准编号	发布日期	标准名称	发布单位	标准状态	缓蚀剂类型
1	GJB 1388A—2015 ^[31]	2015-12-19	高耐久性结构胶接用缓蚀底胶规范	中国人民解放军总装备部	现行	—
2	GJB 5205A—2021 ^[32]	2021-07-06	水置换型防护油规范	中央军委装备发展部	现行	—
3	GJB 3459A—2021 ^[33]	2021-07-06	军用溶剂稀释型防护渗透油规范	中央军委装备发展部	现行	—
4	GJB 10314—2021 ^[34]	2021-12-30	飞机硬膜脱水防锈剂规范	中央军委装备发展部	现行	硬膜
5	MH/T 6133—2024 ^[30]	2024-08-26	飞机缓蚀剂技术规范	中国民航局	现行	软膜、硬膜、电子电气

对金属及非金属材料的潜在影响,确保其在应用过程中不会对飞机结构造成二次损害。

与此同时,部分在飞机制造与维修领域处于领先地位的企业,也已认识到制定企业标准的重要性。这些企业根据自身的生产实践、材料体系及客户需求,制定了更为具体、细致的内部缓蚀剂使用标准。这些企业标准不仅涵盖了行业标准中的基本要求,还融入了企业自身的技术创新与质量控制理念,为飞机制造与维修过程中的防腐工作提供了更为精准、高效的指导。

1.3 国内外标准差异性

从表 1、表 2 看出,从波音到空客,再到美国军方、行业协会,国外标准体系已相对成熟,不仅覆盖了从材料选择、性能评估到应用指导的全方位要求,还融入了各国航空工业发展的独特经验和技术创新

成果。国内飞机缓蚀剂标准在近年来虽然取得了长足进步,但仍处于不断完善与追赶国际先进水平的阶段。相比国外,国内飞机缓蚀剂标准十分匮乏。从标准更新速度的角度来看,国外标准不断修订更新,能够更快地反映缓蚀剂的最新技术和发展趋势。这种快速响应的能力对于保持标准的先进性和引领性至关重要。国内标准在更新速度上虽然也在不断努力加快步伐,但与国际相比仍有很大差距。

2 国内外飞机缓蚀剂标准技术要求对比分析

以硬膜缓蚀剂为例,在性能项目、关键性能指标等技术要求方面分析国内外标准差异,具体见表 3、表 4。

表 3 国内外主要飞机硬膜缓蚀剂标准性能分类及项目
Tab.3 Standard performance classification and items of some aircraft hard film corrosion inhibiting compound at home and abroad

标准编号	性能分类	性能项目	数量(项)
BMS3-35B	物理性能	闪点、非挥发组分、膜层可见性、膜层透明性、可去除性	20
	性能	可喷涂性、表干时间、低温结合力、储存稳定性、质量变化腐蚀性、功能渗透、储存寿命、实际渗透、耐剥蚀、耐中性盐雾、水置换性、低温柔韧性、高温流动性、耐水性	
	其他性能	外观	
AIMS09-08-004	物理性能	密度、非挥发组分、粘度、闪点、溶剂类型、储存稳定性和条件、红外跟踪非挥发物、气相色谱、挥发性有机化合物含量、应用条件	41
	膜层性能	膜类型、颜色、最小膜厚、可探测性、可渗透性(24 小时后)、水置换性、再洗效果、无流挂、无下垂、检查透明度、表干时间、喷涂涂层质量、低温柔韧性、与复合材料的兼容性、气味、可去除性、易燃性	
	干膜的化学耐性	耐水性、耐腐蚀性、耐二氧化硫性、耐厕液、耐除冰液、耐 5%w/v NaOH、耐 5%v/v HCl、10%v/v HNO ₃ 、耐 10%v/v CH ₃ COOH、耐 45%v/v C ₂ H ₅ OH、耐中性盐雾、采用 QCT 法进行耐腐蚀性能测试	
	其他性能	外观	
MIL-DTL-85054D (AS)	性能	干燥度、耐中性盐雾、人造海水置换性、可喷涂性、储存稳定性、膜层可见性、膜层透明性、可去除性、表干时间、低温结合力、高温结合力、与聚酰亚胺电线绝缘的高温粘接兼容性	13
	其他性能	外观	
GJB 10314—2021	理化性能	外观、闪点、不挥发分	21
	使用性能	干燥时间、干燥度、可喷涂性、人造海水置换性、可渗透性、金属腐蚀性	
	膜层性能	膜层透明性、膜层可鉴别性、膜层可去除性、耐中性盐雾、耐人造海水-亚硫酸盐雾、耐剥落剥蚀、耐水性、耐紫外老化性、低温结合力、低温柔韧性、高温流动性	
	其他性能	储存稳定性及储存寿命	
MH/T 6133—2024	理化性能	外观、闪点和非挥发组分	23
	工艺性能及成膜性能	表干时间、干燥度、可喷涂性、可去除性、膜层透明性、膜层可见性、可渗透性、低温结合力、低温柔韧性和高温流动性	
	防护性能	耐剥蚀、耐水性、耐中性盐雾、耐人造海水-亚硫酸盐雾和人造海水置换性	
	对金属、非金属的影响	金属腐蚀性、对密封胶的影响、对复合材料的影响、对有机涂料的影响、氢脆	
	其他性能	储存稳定性及储存寿命	

2.1 性能项目差异

通过表 3 对比看出,对于外观、表干时间、可喷涂性、可去除性、低温结合力、耐中性盐雾、水置换性及储存稳定性等性能项目均有相关规定。对于其他性能,不同的标准差异较大。空客公司标准 AIMS 09-08-004 包含的性能项目最多,共计 41 项。相比而言,我国标准 MH/T 6133—2024 性能项目仅有 23 项,缺少最小膜厚、可探测性、耐二氧化硫性、耐厕液、耐除冰液等性能项目。但 MH/T 6133—2024 针对目前飞机应用实际情况,增加了对密封胶、复合材料、有机涂料的影响及氢脆等 4 项性能项目,用于评估缓蚀剂对飞机上对于非金属材料的兼容性。综合来看,国内标准还需进一步完善缓蚀剂指标体系,借鉴国外标准细化性能项目和要求,逐步与国外标准接轨,提升国产缓蚀剂质量。

2.2 关键性能指标差异

如表 4 所示,通过对关键性能指标对比,国内标准 MH/T 6133—2024 在少数性能指标上已达到或超过国际水平。闪点(闭口杯)性能指标为 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,在所有标准中指标值最高,表明缓蚀剂安全性较高;高温流动性指标最高,表明缓蚀剂在高温条件下膜层的完整性和功能性较好;在 BMS3-35B 金属腐蚀性能要求基础上,增加锌、钛、不锈钢、铜及黄铜等飞机常用金属的性能要求,扩大缓蚀剂对飞机所用的金属材料损伤评估范围,更具有普适性。在测试方法层面,国外标准采用 ISO 9227^[35]、ISO 13736^[36]、ASTM B117^[37]、ASTM D 93^[38]等先进测试标准。国内标准大多借鉴并参考 BMS3-35B^[9]、MIL-C-16173E^[19]国外测试标准,并逐渐引入了国际先进的试验方法和设备。但在试验条件的控制、评价指标的设定以及数据处理的分析方法上,仍存在一定的差距。

表 4 关键性能指标差异分析
Tab.4 Analysis on differences of key performance indicators

项目	国外标准			国内标准		国内外差异
	BMS3-35B	AIMS09-08-004	MIL-DTL-85054D (AS)	GJB 10314—2021	MH/T 6133—2024	
闪点(闭口杯)	不低于 100°F(38℃)	38℃	无规定	$\geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	国内标准 MH/T 6133—2024 最高
表干时间	24 h	24 h	24h	$\leq 24\text{ h}$ (室温)	24 h	国内外标准一致
可渗透性	24 h 内,任何面板表面的浸湿面积不小于 80%; 24 h 内浸湿, 3 个面板的平均湿度达到 85%或更高。	按相关产品规格书规定	无规定	润湿 24 h 后,任何单个试片表面被润湿区域不低于 80%, 三个试片平均被润湿区域不低于 85%	试验 24 h 后,任何单个试片表面被润湿区域不低于 80%, 三个试片平均被润湿区域不低于 85%	国内外标准一致,测试方法参考 BMS3-35B
高温流动性	90℃温度下,流动不超过 1.3 mm	无规定	(90.6~96.1)℃温度下,流动不超过 1.3 mm,没有变色或柔韧性损失。	(125±2)℃流动距离不大于 1.3mm	在(130±2)℃环境下试验后,流动距离不大于 1.3 mm	国内标准 MH/T 6133—2024 最高,测试方法参考 BMS3-35B
耐中性盐雾	露在盐雾环境中 1500 h 后,每 10 平方英寸(64.52 cm ²)不超过 3 个蚀点(>1 mm)	>3000 h; <3%腐蚀面积; 腐蚀度 C12	2024-T3 铝材 28 d 后无明显腐蚀	1500 h 盐雾试验后,铝合金试样表面大于 1 mm 的腐蚀点少于 3 个,不允许出现大于 3 mm 的腐蚀点	1500 h 盐雾试验后,详细目视检查试片表面无明显腐蚀	国外标准规定更细致
水置换性	无蚀点、麻点或污渍	无锈蚀	无明显腐蚀	钢试样无明显腐蚀	详细目视检查试片无可见腐蚀	国内外标准一致,测试方法参考 MIL-C-16173
金属腐蚀性	两相同试片平均质量变化如下: 镉最多 ±5.0 mg/cm ² ; 镁最多 ±0.5 mg/cm ² ; 铝最多 ±0.2 mg/cm ² ; 钢最多 ±0.2 mg/cm ²	无规定	无规定	镁合金 ZM5、Zn-3、镉 Cd-3: $\leq 0.5\text{ mg/cm}^2$; 铝合金 2Al2、铜 T2、黄铜 H62: $\leq 0.2\text{ mg/cm}^2$	试验 7 d 后,试片质量变化平均值: 镉 -5.0~5.0 mg/cm ² ; 镁、锌、钛、不锈钢 -0.5~0.5 mg/cm ² ; 铝、铜、黄铜 -0.2~0.2 mg/cm ²	国内标准 MH/T 6133—2024 金属种类最多,测试方法参考 BMS3-35B

3 我国缓蚀剂产品的发展建议

3.1 我国缓蚀剂产品研发建议

1) 提高缓蚀剂的防腐能力。国外飞机缓蚀剂凭借其卓越的配方设计与先进的生产工艺,能够在金属表面迅速且均匀地形成一层致密且稳定的保护膜。这种保护膜不仅能够有效隔绝水分、氧气及其他腐蚀性介质的侵蚀,还能在微观层面上填补金属表面的微小缺陷,从而显著提升缓蚀效果。相比之下,国内产品在缓蚀效率上虽已取得长足进步,但在保护膜的形成速度、均匀性及致密性等方面仍有待提升,以更好地应对复杂多变的飞行环境对飞机部件的腐蚀挑战。

2) 提升缓蚀剂环保性能。随着全球对环境保护意识的增强,各国对化学品尤其是工业用缓蚀剂的环保要求日益严格。国外飞机缓蚀剂在研发过程中,广泛采用了低毒、低挥发性及可生物降解的原材料,并通过精细的化学反应控制,减少了有害副产物的生成。这些措施使得其产品不仅在使用过程中对环境的负面影响降到最低,而且在废弃处理时也更为安全环保。国内产品虽已逐步向绿色化转型,但在原材料选择、生产工艺优化及废弃处理等方面仍需加大研发力度,以缩小与国际先进水平的差距。

3) 强化缓蚀剂的持久效能。国外先进的航空缓蚀剂展现出了其非凡的效能,能在飞机部件表面构筑一层稳定且持久的防护涂层,即便在极端气候及复杂飞行工况下,仍能有效抵御腐蚀,保护金属基体。耐久性不仅显著延长了飞机部件的服役寿命,有效减轻了因腐蚀问题而产生的更换与维修负担,还极大提升了飞机的整体运行可靠性与安全水平。就国内而言,尽管缓蚀剂在耐久性方面已有显著进步,但鉴于更苛刻的使用条件与不断提升的性能标准,仍需不断深化技术创新,推动产品持续优化升级,以满足航空工业对飞机腐蚀防护与控制高标准要求。

3.2 我国缓蚀剂标准体系构建建议

1) 完善缓蚀剂技术指标体系。针对飞机缓蚀剂,应制定更为详尽且量化的技术指标体系。具体而言,需深入研究其耐腐蚀性,明确在不同介质、温度及压力条件下的腐蚀速率值。同时,强化成膜性的评估,确保缓蚀剂能在飞机金属表面形成均匀、致密且附着力强的保护膜,有效隔绝腐蚀介质。同时应注重环保性,应明确规定缓蚀剂中有害物质的含量限值,推动绿色航空材料的发展。通过细化这些技术指标,可显著提升飞机缓蚀剂的性能稳定性和可靠性。

2) 提升国内标准国际兼容性。为加速我国飞机缓蚀剂技术的国际化进程,应积极借鉴国际航空领域广泛认可的缓蚀剂标准,如美国军用标准(MIL)和波音、空客、SAE标准等。在充分理解这些标准的基

础上,结合我国航空工业的实际情况,进行适应性修改和完善,不断提升自身标准的科学性、合理性和有效性,形成既符合国际规范又具有中国特色的标准体系。此举不仅有助于提升我国飞机缓蚀剂产品的国际竞争力,还能促进国内外技术交流与合作。

4 结语

通过对比分析国内外飞机缓蚀剂的标准体系与技术要求,总结出国内飞机缓蚀剂标准有如下差异:

1) 标准体系构建方面,国外标准体系已相对成熟,不仅覆盖了从材料选择、性能评估到应用指导的全方位要求,还融入了各国航空工业发展的独特经验和技术创新成果。这种体系上的差异,不仅体现在标准的完备性和细致度上,更在于其背后对航空材料保护深层次需求的理解和把握。

2) 技术指标要求方面,国内标准倾向于强调材料的防腐性能、环保性和经济性,这反映了国内航空工业在保障飞行安全的同时,对环境保护和成本控制的高度重视。国外标准则更加注重材料的耐久性、适应性和在极端环境下的安全性,这些要求往往基于更为严苛的试验验证和长期的使用反馈,旨在确保飞机在复杂多变的全球航线上都能保持最佳的防腐状态。

3) 测试方法方面,国内尚未形成自主完善的测试方法标准体系,还处于学习借鉴阶段,与我国材料工业基础还不完全相适应。国外则凭借丰富的标准化经验和先进的技术手段,建立了更为科学和严格的测试体系,能够更准确地反映材料的真实性能。

针对这些差距,提出了我国缓蚀剂产品研发及标准体系构建建议,以高标准引领产业高质量发展。国内航空工业需持续加强与国际标准的对接与融合,借鉴国际先进经验和科技成果,不断提升自身标准的科学性、合理性和有效性。同时,还应注重本土化的创新与发展,结合国内航空工业的实际需求和技术特点,制定更加符合国情、更具针对性的标准体系,为航空材料保护事业的发展提供有力支撑。

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.
HUANG C L. Aircraft Corrosion and the Use of Preservatives[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 2001(1): 35-36.
- [2] 朱辰, 邱实. 缓蚀剂及其在飞机上的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 90-93.
ZHU C, QIU S. Corrosion Inhibitors and Their Application in Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 90-93.

- [3] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 72-77.
CHEN Q Z, FANG Z Q, KANG X H. Methods for Military Aircraft Field Corrosion Prevention and Control[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 72-77.
- [4] 陈群志, 程宗辉, 席慧智, 等. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 334-337.
CHEN Q Z, CHENG Z H, XI H Z, et al. Corrosion Behavior on Joint Section of Aircraft Aluminium Alloy Structure[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 334-337.
- [5] 李斌, 师华, 张晓云, 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, 37(6): 26-29.
LI B, SHI H, ZHANG X Y, et al. Study on Physical-Chemical and Performance Properties for YTF-1 Aircraft Water Displacing Corrosion Preventive Compound with Hard Film[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, 37(6): 26-29.
- [6] 孙祚东, 李云仲, 韦利军. 缓蚀剂在军用飞机维护中的应用研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 100-104.
SUN Z D, LI Y Z, WEI L J. Study on the Applications of Corrosion Inhibitor in Military Aircraft Maintenance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 100-104.
- [7] Boeing. Organic Corrosion Inhibiting Compounds, Heavy Duty: BMS 3-26[S]. Seattle: Boeing, 2015.
- [8] Boeing. Advanced Organic Corrosion Inhibiting Compounds: BMS 3-29[S]. Seattle: Boeing, 2015.
- [9] Boeing. Heavy Duty Corrosion Inhibiting Compounds: BMS 3-35 [S]. Seattle: Boeing, 2015.
- [10] AIRBUS S A S. Temporary Protectives-Type II Material Specification: AIMS09-08-002[S]. France: AIRBUS S A S, 2004.
- [11] AIRBUS S A S. Improved Durability Corrosion Prevention Compounds: AIMS 09-08-004[S]. France: AIRBUS S A S, 2011.
- [12] US Department of Defense. Corrosion Preventive Compound, Water-Displacing, Transparent: MIL-DTL-85054D[S]. Washington: US Government Publishing Office, 2010.
- [13] US Department of Defense. Corrosion Preventive Compound, Water-Displacing, Ultra-Thin Film: MIL-PRF-81309H[S]. Washington: US Government Publishing Office, 2018.
- [14] Boeing. Organic Corrosion Inhibiting Compound: BMS 3-23[S]. Seattle: Boeing, 2015.
- [15] AIRBUS S A S. Temporary Protectives Technical Specification: AIMS 09-08-000[S]. France: AIRBUS S A S, 2011.
- [16] AIRBUS S A S. Temporary Protectives-Type I Material Specification: AIMS 09-08-001[S]. France: AIRBUS S A S, 2004.
- [17] AIRBUS S.A.S. Temporary Protectives-Type III Material Specification: AIMS09-08-003[S]. France: AIRBUS S A S, 2004.
- [18] US Department of Defense. Corrosion Preventive Compound, Petrolatum, Hot Application: MIL-C-11796C [S]. Washington: US Government Publishing Office, 1986.
- [19] US Department of Defense. Corrosion Preventive Compound, Solvent Cutback, Cold-Application: MIL-PRF-16173E[S]. Washington: US Government Publishing Office, 2006.
- [20] US Department of Defense. Lubricating Oil, General Purpose, Preservative (Water-Displacing, Low Temperature): MIL-PRF-32033A[S]. Washington: US Government Publishing Office, 2016.
- [21] US Department of Defense. Cleaner, Lubricant, and Preservative for Weapons and Weapons Systems: MIL-PRF-63460F[S]. Washington: US Government Publishing Office, 2017.
- [22] US Department of Defense. Lubricants, Corrosion Preventive Compound, Water Displacing, Synthetic: MIL-L-87177B[S]. Washington: US Government Publishing Office, 2014.
- [23] SAE International. Compound, Corrosion Preventive Thin Film, Fingerprint Removing: SAEAMS3065H[S]. Warrendale: SAE Publication, 2021.
- [24] SAE International. Compound, Corrosion Preventive Aircraft Engine: SAE AMS3072E[S]. Warrendale: SAE Publication, 2007.
- [25] SAE International. Compound, Corrosion-Preventive Hard Film, Hot Application: SAE AMS3075F[S]. Warrendale: SAE Publication, 2021.
- [26] SAE International. Compound, Corrosion, Preventive, Hard Film, Cold Application: SAEAMS3076C[S]. Warrendale: SAE Publication, 2000.
- [27] SAE International. Compound, Corrosion Preventive, Soft Film, Thixotropic, Cold Application: SAE AMS 3077A[S]. Warrendale: SAE Publication, 2018.
- [28] SAE International. Compound, Corrosion Preventive, Soft Film, Cold Application: SAE AMS 3078B[S]. Warrendale: SAE Publication, 1998.
- [29] SAE International. Compound, Corrosion-Preventive, Soft Film, Hot Application: SAE AMS 3079C[S]. Warrendale: SAE Publication, 2017.
- [30] 中国民用航空局. 飞机缓蚀剂技术规范: MH/T 6133—2024[S]. 北京: 中国民航出版社, 2024.
Civil Aviation Administration of China. Technical Specification of Corrosion Inhibiting Compound for Aircraft: MH/T 6133—2024[S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing, 2024.
- [31] 中国人民解放军总装备部. 高耐久性结构胶接用缓蚀底胶规范: GJB 1388A—2015[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2016.
Chinese People's Liberation Army General Armament

- Department. Specification for Primer, Adhesive, Corrosion-inhibiting for High Durability Structural Adhesive Bonding: GJB 1388A—2015[S]. Beijing: Military Logo Publishing Department of the General Armaments Department, 2016.
- [32] 中央军委装备发展部. 水置换型防护油规范: GJB 5205A—2021[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2021.
- Central Military Commission Equipment Development Department. Specification for Corrosion Preventive Compounds, Water Displacing: GJB 5205A—2021[S]. Beijing: National Military Standard Publishing and Distribution Department, 2021.
- [33] 中央军委装备发展部. 军用溶剂稀释型防护渗透油规范: GJB 3459A—2021[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2021.
- Central Military Commission Equipment Development Department. Specification for Solvent Cutback Corrosion-preventive and Osmotic Effect Compound for Military Application: GJB 3459A—2021[S]. Beijing: National Military Standard Publishing and Distribution Department, 2021.
- [34] 中央军委装备发展部. 飞机硬膜脱水防锈剂规范: GJB 10314—2021[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2021.
- Central Military Commission Equipment Development Department. Specification for Aircraft Water Displacing Corrosion Preventive Compound with Hard Film: GJB 10314—2021[S]. Beijing: National Military Standard Publishing and Distribution Department, 2021.
- [35] International Organization for Standardization. Corrosion Tests in Artificial Atmospheres Salt Spray Tests: ISO 9227[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [36] International Organization for Standardization. Petroleum Products and Other Liquids-Determination of Flash Point-Abel Closed Cup Method: ISO 13736[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.
- [37] ASTM International. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus: ASTM B117[S]. West Conshohocken, PA: ASTM Publication, 2019.
- [38] ASTM International. Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester: ASTM D 93[S]. West Conshohocken, PA: ASTM Publication, 2010.