

航空双组分密封胶适航与验证技术研究

叶李薇 张帆 李林 张亚博 彭华乔* 苏正良

(中国民用航空局第二研究所,成都 610041)

摘 要 在美国的航空标准 SAE AS 5127/1 和 SAE AS 5127/2 的基础上,分析国外航空双组分密封胶适航审定技术验证的实验方法和步骤,包括密封胶施工性能、应用性能、材料相容性、力学性能、可修补性能及阻燃性能等评估方法,为我国民航开展航空双组分密封胶性能检测和研究工作,以及国产航空双组分密封胶的适航审定提供技术支持。

关键词 航空密封胶,适航,验证技术,审定

中图分类号 TQ436.6

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2020)07-0238-06

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.054

Study on airworthiness and verification technology of aerospace two-component sealant

Ye Liwei Zhang Fan Li Lin Zhang Yabo Peng Huaqiao Su Zhengliang

(the Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041)

Abstract Based on SAE AS 5127/1 and SAE AS 5127/2, the test methods and procedures for the verification of airworthiness certification of foreign aviation two-component sealants were analyzed. The evaluation methods included sealant construction performance, application performance, material compatibility, mechanics, reparability, flame retardant performance and so on. Technical support was provided for the performance testing and research of aviation two-component sealant in China's civil aviation, and the airworthiness certification of domestic aviation two-component sealant.

Key words aviation sealant, airworthiness, verification technology, certification

航空密封胶属于液体密封结构,是民用飞机的重要组成部分。在航空工业中,密封材料主要有有机硅密封胶、聚硫密封胶和聚氨酯密封胶等。有机硅密封胶具有耐辐射、耐高低温、无毒和无污染等性能,广泛应用于各种密封舱的密封。聚硫密封胶具有良好的耐油性,主要运用于飞机整体油箱密封、口盖密封和机身防腐蚀密封。聚氨酯密封胶具有良好的超低温性能,主要用于飞机窗门、座舱等元件的密封。国外密封胶向着耐油系统方向发展主要采用氟、氟硅、氟醚橡胶,乙丙橡胶和全氟醚橡胶。外露的系统主要采用乙丙橡胶和有机硅橡胶;动密封主要采用具有导热性能和低摩擦系数的橡胶;静密封主要采用具有在低温下有高度的灵活性和可压缩变形的橡胶。在整体油箱上主要采用含氟密封胶和聚硫醚密封胶。在电子设备上主要采用氟硅和有机

硅密封胶。航空双组分密封胶多为聚硫密封胶和有机硅密封胶。

目前,我国民用飞机使用的密封胶全部依赖进口,主要的供应商有 PPG 航空材料有限公司、AC Teck 航空材料有限公司、Chemetall 航空材料有限公司、Dow Corning 公司和 Flamemaster 公司等^[1-3]。国产航空密封胶需经过飞机制造商的适航性能验证,一系列评估认证合格后才能列入合格产品清单,最终获得飞机和发动机制造商(OEM)的批准应用到民用飞机上。或经过适航当局的适航认证,批准后适用于该国籍航空器的维修、改装等。

随着我国自主研发国产大飞机项目进行,以航空密封胶为代表的航空化学产品的研发和适航验证也同步进行着。所谓适航,是指航空器(包括部件及子系统)的整体性能和操作特性在预期运行环境

作者简介:叶李薇(1988-),女,硕士,工程师,从事航空化学产品适航验证与研究。

联系人:彭华乔。

和使用限制下都得到安全和物理完整。不合格的航化产品会腐蚀民用航空产品(指民用航空器、发动机、螺旋桨、机载设备、零部件及航空材料),缩短其使用寿命。因此,航化产品的适航管理是民用航空安全管理的重要环节。

航空密封胶的技术要求主要依据国外军方、行业协会和主机厂发布的技术标准来制定。SAE AS 5127/1^[4]航空用双组分合成橡胶类密封胶测试标准是由美国汽车工程师协会制定并颁布的航空标准,该标准规定了室温硫化双组分航空密封胶的性能测试方法,是通用的验证方法。此外,SAE AS 5127/2^[5]航空防火板密封胶火焰穿透性的实验方法规定了密封胶防火性能验证方法。以下是常用室温硫化双组分航空密封胶产品标准中对应的测试项目。

1 航空双组分密封胶测试方法

航空密封胶的通用性能主要分为理化性能、施工性能、应用性能、耐烃类性能、剥离强度和储存稳定性六大类。其中理化性能和剥离强度是密封胶的实验室常规检测指标,其中非挥发物含量会影响填缝密封胶的填充量。施工性能直接影响相关工作人员制造、维修飞机过程中的操作难易,如流淌性表示密封胶的触变性,判断在垂直面涂覆密封胶是否容易流淌;适用期表示密封胶的活性时间,超过则硫化加快导致硬度迅速增加等。应用性能表示密封胶涂覆到飞机上后,在服役环境中是否能发挥充分作用,如水解稳定性检测密封胶是否耐高温高湿环境。耐烃类性能是检测密封胶是否耐燃油等介质,如在烃类/盐水混合液中的腐蚀性检测密封胶是否耐高盐和油的双重作用,低温柔韧性是检测密封胶在高空-55℃低温环境中是否保持柔韧性而不会因变脆而受力断裂失效。储存稳定性是验证密封胶的货架寿命,即储存后性能不能下降的周期。

表 1 是双组分室温硫化密封胶所有检测项目的汇总,某种具体密封胶通常只需要进行其中部分实验。后面介绍聚硫密封胶的产品分类及主要技术要求。

2 聚硫密封胶的产品分类及主要技术要求

2.1 聚硫密封胶

2.1.1 飞机整体油箱密封胶

飞机整体油箱密封胶体系^[6-8]通常由 3 种密封

表 1 SAE AS 5127/1C 航空双组分密封胶测试方法汇总

性能类型	实验项目	性能类型	实验项目
理化性能	非挥发物含量	耐烃类性能	粉化
	黏度		耐热裂性
	基膏		耐流体破裂性
	硫化膏		质量损失及柔韧性
	空气含量		体积膨胀
	可溶性铬酸含量		低温柔韧性
施工性能	流淌性		交替低温柔韧性
	适用期		低温柔韧性(挡风玻璃用)
	装配时间		拉伸强度及伸长率
	不黏期		剪切强度
	硫化期		在烃类/盐水混合液中的
	标准硫化		腐蚀性
	低温硫化		装配腐蚀
	浸渍液体的硫化		装配应力腐蚀性
应用性能	比重		异金属腐蚀性
	14 天硬度		暴露条件下腐蚀性
	射线密度		银纹
	热膨胀性	剥离强度	常规剥离强度
	热恢复性		浸渍液体的剥离强度
	水解稳定性		可修补性剥离强度
	修整打磨	贮存稳定性	加速贮存稳定性
	可喷涂性		长期贮存
	耐候性		

胶共同组成:用于整体油箱和燃料单元腔的耐温型高粘附力密封胶^[9]、用于整体油箱和燃料单元腔的低密度聚硫合成橡胶型密封胶(间歇使用至 360 F, 182℃)^[10]、用于移动面板和油箱检查板的低粘附力型密封胶^[11]。这 3 种密封胶的不挥发物含量、流动性、剥离强度等指标要求,根据使用部位和功能不同而差异较大,相关技术要求见表 2。

2.1.2 机身密封胶及快速固化密封胶

飞机蒙皮搭接处经常涂覆密封胶以防止雨水浸入而引起腐蚀,早期常用含有铬酸盐的聚硫密封胶以增强机身腐蚀抑制功能,随着环保要求越来越高,逐步用替代铬酸盐。另一方面,机身蒙皮修理时会破坏搭接面、铆钉等位置填充的密封胶,修理完成后再次涂覆密封胶进行密封处理,然而现场修补时常要求快速固化,满足此类要求的密封胶通常以聚硫醚为生胶制备而成,其优点是固化过程不受温度和

表 2 飞机整体油箱密封胶技术要求(以 Class B-2 为例)

技术指标	SAE AMS-S-8802	SAE AMS 3284	SAE AMS 3281
颜色	—	微红色	—
不挥发物含量/%	≥90%	≥97%	≥92%
空气含量	≤4%	—	—
基料黏度/(Pa·s)	900~1400	600~1400	700~1600
固化剂黏度/(Pa·s)	—	—	40~160
流动性/mm	2.5~19.0	≤19.0	1.2~19.0
适用期/h(初始挤出量≥15g/min)	2	2	2
不黏期/h	≤40	≤24	≤24
标准固化时间/h(硬度 30A)	≤72	≤72	≤72
比重	≤1.65	≤1.65	1 级:1.20~1.35;2 级:1.06~1.19;3 级:≤1.05
热恢复性	—	—	不能变为液体或膏状稠度,不能变脆或失黏
耐热性	—	无明显变软、收缩、裂纹或断裂	—
水解稳定性	硬度 30A	硬度 30A	硬度 30A
修整打磨	—	—	不能扯裂
可喷涂性	—	—	涂层不脱落
耐候性	—	—	无开裂、粉化、剥离或失黏
粉化	轻微	—	轻微
耐热破裂性	≤3.0mm;无气泡或收缩	—	烘箱 149℃,69kPa,30min;≤3.0mm;无气泡或收缩
质量损失率/%	≤8	—	≤8
柔韧性率/%	无破裂或裂纹	—	无破裂或裂纹
体积膨胀	—	—	5~20
低温柔韧性	目视无破裂或裂纹,无失黏现象	—	目视无破裂或裂纹,无失黏现象
拉伸强度和伸长率	标准固化:1380kPa,200%	—	标准固化:1379kPa,250%
	14 天 60℃ AMS2629,Type I;345kPa,200%	—	标准固化后 AMS2629,Type I 中 12 天 60℃+60h 71℃+6h 82℃:862kPa,100%
	7 天 121℃空气:862kPa,100%	—	标准固化后 AMS2629,Type I 12 天 60℃+60h 71℃+6h 82℃+24h 49℃+标准热循环:862kPa,25%
	72h 60℃ AMS2629,Type I+72h 49℃空气+7 天 121℃空气:1380kPa,75%	—	标准固化+标准热循环:689kPa,25%
	24h 121℃+7 天 60℃ AMS 2629,Type I;690kPa,150%	—	标准固化+72h 标准条件 AMS3021;862kPa,100%
耐烃类/盐水腐蚀性	无明显降解腐蚀	—	无明显降解腐蚀
剥离强度	100%内聚破坏	≥720N/m;98%内聚破坏	≥3503N/m;100%内聚破坏
老化 7 天	3580N/m	—	—
老化 70 天	1250N/m	—	—
可修复性	同种胶或 AMS 3284;1750N/m,100%内聚破坏	—	≥3503N/m;100%内聚破坏

注:不挥发物含量为质量分数,下同。

湿度影响。目前常用的机身密封胶是国外某飞机制造商标准 PRESSURE AND ENVIRONMENTAL SEALANT-CHROMATE TYPE(压力和环境密封胶-铬酸盐型);常用的快速固化密封胶是 SAE AMS 3277 F Sealing Compound, Polythioether Rubber Fast Curing for Integral Fuel Tanks and

General Purpose, Intermittent Use to 360 °F (182℃) (用于整体油箱和通用型快速固化聚硫醚密封胶^[12],间歇工作温度达 182℃)。两种密封胶分别对应制造生产过程和现场修补过程,不同的环节对双组分密封胶施工性能、剥离强度等等指标要求差异较大,具体技术要求见表 3。

表 3 机身及快速固化密封胶技术要求(以 Class B-2 为例)

技术指标		某飞机制造商标准	SAE AMS 3277
不挥发物含量/%	≥90		≥96
空气含量/%	≤4		≤4
基料黏度/(Pa•s)	900~1800		900~1800
固化剂黏度/(Pa•s)	—		70~160
流动性/mm	0.50inch		2.5~19.0
适用期/h(初始挤出量 ≥15g/min)	2		2
不黏期/h	≤36		标准固化≤12;-7℃≤96
固化时间/h(硬度 25A)	≤48		标准固化≤16;-7℃≤96
水溶性铬酸盐含量/%	≥2.7		—
比重	—		1 级:1.35~1.50;2 级:1.16~1.34;3 级:≤1.15
14 天硬度/邵氏 A	—		≥30
耐热膨胀	—		测试段宽端+0.25~-0.08mm 范围内;窄端+0.13~-0.08mm 范围内
热恢复性	—		不能变为液体或膏状稠度,不能变脆或失黏
耐热性	无明显变软、膨胀、鼓泡、裂纹或收缩;粘接失效≤5%;邵氏 A 硬度增加≤15		—
水解稳定性	—		硬度≥20A
修整打磨	—		不能卷起或扯裂
可喷涂性	—		涂层不脱落
耐候性	720±8h 的加速老化,无开裂、粉化、剥离或失黏		—
粉化	—		无粉化
耐热破裂性	—		烘箱 160℃,69kPa,30min:4.0mm
质量损失率/%	≤10		≤8
柔韧性	—		无破裂或裂纹
体积膨胀率/%	—		5~25
低温柔韧性	浸泡烃类后,半径 0.125in 的圆柱 180°弯曲,无裂纹		目视无破裂或裂纹,无失黏现象
拉伸强度和伸长率	浸泡烃类后,拉伸强度≥200psi,断裂伸长≥150%		标准固化:1724kPa,250%
	浸泡 120±5°F 下 ASTM D471 液体 B 中 168±2h,拉伸强度≥100psi,断裂伸长率≥150%		标准固化后 2h 182℃:1035kPa,250%
			标准固化后 AMS2629, Type I 12 天 60℃+6h 71℃+6h 82℃:862kPa,100%
			标准固化后 AMS2629, Type I 12 天 60℃+60h 71℃+6h 82℃+24h 49℃+标准热循环:862kPa,25%
			标准固化+标准热循环:689kPa,50%
			标准固化+48h 60℃的 MIL-PRF-83282:862kPa,100%
			标准固化+72h 标准条件 AMS3021:862kPa,100%
			标准固化+72h 标准条件 AMS3020:862kPa,100%

续表

技术指标	某飞机制造商标准	SAE AMS 3277
应力银纹化	塑料板无裂纹、断裂或变色	
耐烃类/盐水腐蚀性	—	无明显降解腐蚀
收缩率	线性收缩率 $\leq 1.0\%$; a. 起始:固化后,终止:720 $\pm$ 8h 加速老化(见 8.2.19); b. 起始:固化后,终止:60 天标准环境	—
剥离强度	≥ 20 pounds/inch; $\geq 95\%$ 内聚破坏	≥ 3500 N/m; 100% 内聚破坏
可修复性	同种胶; ≥ 20 pounds/inch; $\geq 95\%$ 内聚破坏	≥ 1750 N/m; 100% 内聚破坏
挤出时间	挤出时间 6h 的最大密封胶厚度为 0.004inch	—
加速储存稳定性	—	基料黏度、固化剂黏度、活性期、不黏期、标准固化时间、剥离强度同上述指标
长期储存稳定性	6 个月后,基料黏度、固化剂黏度、不挥发物含量、流淌性、活性期、不黏期、标准固化时间、剥离强度同上	活性期、不黏期、标准固化时间同上

2.2 有机硅密封胶

2.2.1 通用型有机硅密封胶(非耐燃油)

通用型密封胶主要用在客舱内部密封粘接用,长期使用温度是 $-54\sim 232^{\circ}\text{C}$,不可在有燃油的部位使用,是非耐燃油型的室温硫化密封胶,但能耐 SAE AS 1241 磷酸酯型阻燃液压油。通用型有机硅密封胶满足的技术规范是 SAE AMS 3378 Sealant, Silicone, Two-Part, General Purpose Room Temperature Vulcanizing Non-Fuel Resistant(通用型室温硫化双组分有机硅密封胶,非耐燃油型)^[13]。

2.2.2 防火墙密封胶

防火墙密封胶用于密封飞机防火墙结构,防止空气、蒸汽、火焰等通过防火墙结构。长期使用温度是 $-54\sim 204^{\circ}\text{C}$,同时要求耐 1093°C 的瞬燃温度,能够按照 SAE AMS 5127/2 进行耐火试验,是飞机密封材料中耐火性能等级最高的一种。防火墙密封胶满足的技术规范是 SAE AMS 3374 Sealing Compound Aircraft Firewall, Silicone(飞机防火墙有机硅密封化合物)^[14]。

以上两种是最典型的有机硅密封胶^[15],其具体技术要求见表 4。

表 4 通用型和防火墙有机硅密封胶技术要求

技术指标	SAE AMS 3378	SAE AMS 3374, Type 2
不挥发物含量/%	≥ 95	≥ 97
流动性/inch	≤ 0.75	≤ 0.5
适用期	初始挤出量 $\geq 15\text{g/min}$	初始挤出量 $\geq 25\text{g/min}$, 4h
不黏期/h	≤ 24	≤ 24
固化时间/h(硬度 40A)	≤ 48	≤ 48 (硬度 30A)
比重	≤ 1.50	≤ 1.6
耐热破裂	不能起泡或膨胀,在 69kPa 压力下,形变 $\leq 0.125\text{inch}$	不能起泡或膨胀,形变 $\leq 0.125\text{inch}$
水解稳定性	硬度变化 $\leq 5\text{A}$	—
耐油	—	无失黏、软化、起泡或回缩
低温柔韧性	目视无破裂或裂纹,无失黏现象	目视无破裂或裂纹,无失黏现象
耐烃类/盐水腐蚀性	基材无明显腐蚀;密封胶无明显降解	—
耐火性	—	无火焰穿透
剪切强度	—	$\geq 150\text{psi}$; $\geq 85\%$ 内聚破坏
剥离强度	—	$\geq 10\text{pounds/inch}$
耐水性	$\geq 4\text{pounds/inch}$, 100% 内聚破坏	—
耐热性	$\geq 2\text{pounds/inch}$, 100% 内聚破坏	—
可修复性	—	$\geq 10\text{pounds/inch}$
加速储存稳定性	流动性、适用期、不黏期、固化期不变	适用期、不黏期、固化期、剥离强度不变
混合-冷冻稳定性	流动性、适用期、不黏期、固化期不变	—
长期储存稳定性	—	适用期、不黏期、固化期、剥离强度不变

3 结语与建议

密封胶是民用飞机重要的组成材料之一,当飞机在高空低温飞行时,发挥着防油、防水、防空气等密封功能。上述列举了民用航空飞机中使用量较大的几种密封胶,通过详细解读航空双组分密封胶的常用验证方法及典型密封胶的关键参数要求,指导国内相关产业供应商进行产品研发,匹配国产大飞机的需求。同时契合国家自主知识产权的发展战略,打破国外 PPG、Dow Corning、Chemetall 等公司的垄断地位,刺激国内航空化工新兴产业的发展。

目前,如何按照国际标准完成适航验证是实现国产化的关键步骤。此外,为了进一步促进航空密封胶的研究和产业化进程,我国应积极开展相关标准体系的研究,并制定我国关于航空密封胶的技术标准。民航飞机主制造商通常按照相关指标进行质量控制,制定出我国标准是为将来规范产品市场做好技术储备。航空化工产业界只有提供直接满足国内外航空标准的对应产品,才能早日实现大飞机材料国产化的伟大目标。

参考文献

- [1] 刘星北,王慧珊,章康正,等.国内外航空聚硫密封剂产品概况[J].粘接,2015(3):83-87.
- [2] 刘嘉,苏正涛.航空橡胶与密封材料[M].北京:国防工业出版社,2014,2-8.
- [3] 李锦.聚硫代醚聚合物的研究进展[J].弹性体,2015,25(5):85-87.
- [4] SAE International.SAE AS 5127/1C, Aviation two-component sealant test methods[S].USA:SAE International,2014:7-43.

- [5] SAE International.SAE AS 5127/2B, test method for aerospace firewall sealant flame penetration[S].USA:SAE International,2014:2-8.
- [6] 宋英红,杨亚飞,吴松华.航空聚硫密封剂的发展现状分析[J].中国胶粘剂,2013,22(2):49-52.
- [7] 张宪武,赫萍,石阳秋.改性聚硫橡胶合成研究[J].弹性体,1999,9(1):19-23.
- [8] 曹守德,蔺艳琴,潘广萍,等.氨基树脂在改性聚硫密封剂中的应用研究[J].航空材料学报,2013,23(增刊):159-161.
- [9] SAE International.SAE AMS-S-8802D, sealing compound, temperature resistant, integral fuel tanks and fuel cell cavities, high adhesion[S].USA:SAE International,2015:4-7.
- [10] SAE International.SAE AMS 3281E, sealing compound, polysulfide (T) synthetic rubber for integral fuel tank and fuel cell cavities low density for intermittent use to 360 °F (182°C) [S].USA:SAE International,2010:4-7.
- [11] SAE International.SAE AMS 3284C, sealing compound, low adhesion, for removable panels and fuel tank inspection plates [S].USA:SAE International,2017:4-5.
- [12] SAE International.SAE AMS 3277G, sealing compound, polythioether rubber fast curing for integral fuel tanks and general purpose, intermittent use to 360 °F (182°C) [S]. USA: SAE International,2012:5-9.
- [13] SAE International.SAE AMS 3378B, sealant, silicone, two-part, general purpose room temperature vulcanizing non-fuel resistant[S].USA:SAE International,2012:3-6.
- [14] SAE International.SAE AMS 3374F, sealing compound aircraft firewall, silicone [S]. USA: SAE International, 2019:3-4.
- [15] 范召东,孙全吉,黄艳华,等.有机硅材料在航空工业的应用[J].有机硅材料,2015,29(6):491-498.

收稿日期:2019-11-05

修回日期:2020-05-03

(上接第 237 页)

等壁厚的 CFRP 机械臂铺层以 0°为主,90°和±45°为辅,相比于等壁厚铝合金材质机械臂可减重 89.4%。变壁厚 CFRP 机械臂针对不同区域铺层的进一步优化,重量相比等壁厚 CFRP 机械臂降低了 14.3%,相比于等壁厚铝合金材质的机械臂重量降低了 90.9%。

CFRP 机械臂在二段和第三段界面过渡区域容易产生应力集中,同时变壁厚 CFRP 机械臂在铺层过渡区域也容易产生应力集中,这需要在实际生产和使用过程中加以注意。

参考文献

- [1] 田龙飞.工业机器人用碳纤维复合材料上臂的设计[D].北京:中国科学院大学,2014:13-14.
- [2] 张林文.“工业 4.0”与复合材料工业发展——一个复合材料行业工作者的梦想[J].玻璃钢/复合材料,2015,(8):93-95.
- [3] 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报,2007,24(1):1-12.
- [4] 陈丰.碳纤维复合材料机械臂设计[J].郑州工学院学报,1992,13(4):95-99.

收稿日期:2019-03-19

修回日期:2020-04-28