

文章编号:1674-8190(2015)03-372-05

大飞机整体油箱用密封剂性能分析及应用

李绪忠,李素琴

(中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院,西安 710089)

摘要:整体油箱密封剂是确保飞机油箱安全的重要因素之一,高性能、长寿命密封剂是目前大飞机油箱选用的趋势。介绍了三种大飞机整体油箱用密封剂(高粘附力贴合面密封剂、低密度填角密封剂、低粘附力密封剂)材料,重点分析了密封剂工艺、物理力学及耐环境性能特点;结合大飞机整体油箱结构密封形式及要求,给出了大飞机整体油箱不同部位密封剂的选用建议,以期为大型飞机整体油箱密封剂选材提供参考和借鉴,从而促进油箱用密封剂材料的推广和应用。

关键词:大飞机;整体油箱;密封剂

中图分类号: V254.1

文献标识码: A

Property Analysis and Application of Large Aircraft Integral Fuel Tank Sealant

Li Xuzhong, Li Suqin

(The First Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Integral fuel tank sealant is one of the important factors for the safety of the tank, so the high-performance and long-life sealant is the trends in integral fuel tank sealing development. High adhesion, low adhesion and low density sealants are introduced. The physical properties, processing technology and environment resistance are mainly analyzed. According to the demand of the air tightness and structure design of the tank, the proposals of sealant selection and application in different regions are presented. The research achievement can be the reference for sealant selection and application, and promote to extend the applications of the integral fuel tank sealant.

Key words: large aircraft; integral fuel tank; sealant

0 引言

大飞机整体油箱是将部分机身和机翼的承力结构设计为可储存燃油的结构油箱,既可以充分利用结构空间来多装燃油,增加飞机的航程和续航时间,又可以减少飞机重量,已成为现代飞机设计优先采用的结构方案。目前,包括波音777、787和空客A380在内的所有当代先进大飞机都采用了整体油箱结构。随着对飞机安全性、舒适性和适航性等要求的提高,大飞机整体油箱的密封已成为一项

复杂的设计和制造工艺技术。

巴秀娟^[1]研究了关于选择快速拆装油箱口盖的密封材料;胡琳^[2]初步分析了飞机整体油箱密封剂的特点,并提出了未来飞机整体油箱密封材料需具备的性能;林松^[3]研究了某型飞机机翼整体油箱的工艺。国内将集密封剂材料、工艺性能、选材建议集于一体的研究较少,而国外相关资料也较少。

因此,本文研究大飞机整体油箱用密封剂的性能及应用。介绍大飞机整体油箱用密封剂的材料;通过对大飞机整体油箱用密封剂性能特点的分析,给出密封剂工艺性能、物理力学性能、耐环境性能的要求;结合大飞机整体油箱的密封要求及结构设计形式,分析油箱不同部位对密封剂的选用要求,

收稿日期:2015-05-11; 修回日期:2015-06-18

通信作者:李绪忠,578731695@qq.com

给出具体的选材建议,为大飞机整体油箱密封材料的选用提供参考和借鉴。

1 整体油箱用密封剂的材料

目前,美国和欧洲使用的大飞机整体油箱密封由高粘附力贴合面密封剂、低密度填角密封剂、低粘附力密封剂三种材料组成一个完整的密封体系。高粘附力贴合面密封剂粘接稳定、密封可靠,成本相对较低,适用于整体油箱的贴合面装配密封;低密度填角密封剂以耐老化性能提高的液体改性聚硫橡胶 Permapol P-5 为原料,寿命长、重量轻,适用于整体油箱壁板装配后夹角的填角密封和紧固螺栓的表面密封;低粘附力密封剂则主要用于油箱可卸口盖的密封。上述三种密封剂材料满足了包括波音 777、787 和空客 A380 在内的当代大飞机整体油箱密封。国外强调材料的施工工艺性能和使用可靠性,对材料本身的强度要求不高。为了保证密封质量,不仅在规范中对密封材料提出了全面而详细的性能要求,还将密封剂的供应、混炼、施工、硫化等全过程高度规范化^[2,4-5]。

随着我国航空工业的发展,整体油箱建立在先进结构密封设计的基础上,对密封材料的要求越来越高。整体油箱密封剂作为防止飞机燃料泄漏、确保整体油箱安全的关键材料,涂敷于飞机整体油箱壁板的贴合面、紧固件钉头、飞机壁板夹角和紧固件与壁板的衔接表面等处,与飞机结构紧密结合在一起,无法拆卸与更换。我国 ARJ21-700 的整体油箱密封亦选用了美国 PRC 公司的上述三种密封剂材料。国内各型号飞机使用的整体油箱密封材料与国外同类产品相比,差距主要体现在以下四个方面:①缺少适合贴合面密封和表面刷涂密封的材

料;②缺少长施工期材料;③缺少精细密封的工艺施工配套工具及施工方法;④缺少低密度材料^[4]。因此,为了满足大飞机整体油箱的密封要求,同时满足大飞机对飞行技术性能、飞行安全可靠性能及长寿命、低成本的要求,整体油箱密封材料必须具备低密度、低成本、低重量、高可靠、长寿命、粘接性能稳定等性能。

2 整体油箱用密封剂的性能特点

针对大飞机整体油箱尺寸大、结构复杂、与整机同寿、不可拆卸等特点,要求所使用的密封剂必须具有良好的施工工艺性能和物理机械性能,具有足够的强度、良好的弹性和粘结性能;能够承受大飞机整体油箱部位的温度、压力、振动、动态载荷及防止介质的浸蚀作用;具备耐油、耐腐蚀、毒性小、不易燃、不易爆、易贮存等性能,并能保证密封质量的可靠性和稳定性。目前,国内外大飞机整体油箱用密封剂主要以液体聚硫橡胶为原料,采用了改性方式,使密封剂的粘结性能更可靠,寿命更长,达到与整机同寿,同时,尽量减轻其重量,减少成本。

2.1 工艺性能

由于大飞机整体油箱尺寸较大,对密封剂装配期、活性期等性能要求较严,同时由于整体油箱的结构密封形式复杂,要求密封剂的基膏粘度、流淌性等性能与施工工艺、工具等相匹配,满足不同部位、不同形式的密封要求,使得在施工时工具更简单、工人操作更容易、粘接可靠性更高,在后期的维修中更方便。目前,大飞机整体油箱密封剂的主要工艺性能如表 1 所示。

表 1 主要工艺性能

Table 1 Major processing property

序号	项目	类别及指标要求			测试标准
		A类	B类	C类	
1	外观	无结皮、硬化、无其他不利于分散的成份	无结皮、硬化、无其他不利于分散的成份	无结皮、硬化、无其他不利于分散的成份	—
2	基膏粘度/(Pa·S·min ⁻¹)	50(10)	1 600(600)	400(100)	AS 5127/1 5.3
3	流淌性/(mm·min ⁻¹)	—	≥0.19	1.2~19	AS 5127/1 5.5
4	活性期/(h·min ⁻¹)	2,4,6	1/2,2,4,6,8	8,12,24	AS 5127/1 5.6
5	装配期/h	—	—	20~80	AS 5127/1 5.7
6	不粘期/h	24~48	48~96	≤96	AS5127/1 5.8
7	硫化期/h	72~90	24~48	≤672	AS5127/1 5.9
8	不挥发份含量/(%·min ⁻¹)	84	92	90	HB 6743

2.2 物理力学性能

由于整体油箱是飞机承力结构的一部分,且要求与飞机同寿、不可拆卸,因此,要求密封剂具有寿命长、粘接稳定、密封可靠等性能特点,同时,根据不同的密封部位的特点,选择相应的密封剂,达到减重、易维护等要求,提高整体油箱的密封性能。整体油箱用聚硫类密封剂具有可靠稳定的粘接强度、长寿命、不透气性及优良的低温挠曲性等特点,对各种金属及复合材料均有极好的粘接力,使用温度范围为 $-55\sim+110\text{ }^{\circ}\text{C}$,已广泛应用于大飞机机翼、机身整体油箱的密封等。具体的物理力学性能如表 2 所示^[6-9]。

表 2 物理力学性能
Table 2 Physical and mechanics property

密封剂种类	物理—力学特性
高粘附力	剥离强度 $\geq 4.2\text{ kN/m}$ 100%内聚破坏
	剪切强度 $\geq 3.5\text{ MPa}$ 100%内聚破坏
	低温脆性到达 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$
低密度	密度范围 $1.2\sim 1.3\text{ g/cm}^3$
	剥离强度 $\geq 3.5\text{ kN/m}$ 100%内聚破坏
	拉伸强度 $\geq 1.7\text{ MPa}$ 扯断伸长率 $\geq 250\%$
	剥离强度 $\leq 0.7\text{ kN/m}$ 界面破坏率 $\geq 98\%$ 低温脆性到达 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$
低粘附力	

国内,第二、第三代军机设计的飞行小时数多数为 $3\ 000\sim 5\ 000\text{ h}$,日历寿命多为 $20\sim 25\text{ 年}$ 。按目前国内改性聚硫类密封剂的研制技术水平,可以达到上述寿命指标要求。

2.3 耐环境性能

大飞机整体油箱用密封剂的最大环境特点是耐航空煤油,并且与整体油箱的结构材料(例如铝合金、钛合金或复合材料等)均不产生腐蚀迹象。通过各项试验验证考核,密封剂还具备优异的耐高温($200\text{ }^{\circ}\text{C}\times 120\text{ h}$)、耐湿热($80\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ d}$, RH90%)、耐介质性(RP-3 燃油)、耐寒性($-55\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$)、耐紫外线(高原环境密封盒段考核)、耐自

然老化(海洋环境平台大气暴晒密封盒段考核)等特点,满足整体油箱的气密、水密和油密等要求,满足大飞机在各种复杂环境条件下的工作要求^[10-14]。

3 整体油箱的结构密封形式及要求

大飞机的整体油箱通常包括机翼和机身整体油箱两个部分。整体油箱的形状各不相同,结构包括梁、壁板、纵墙、隔板、框、肋、桁条和口盖等部位,密封形式包括贴合面密封、填角密封、填隙密封及紧固件密封、口盖密封等。结合大飞机整体油箱的结构特点和密封剂的性能特点,下文将介绍高粘附力贴合面密封剂、低密度填角密封剂、低粘附力密封剂的应用部位,并针对不同的结构密封形式,介绍相应的使用工艺,例如刷涂、刮涂、挤注、灌胶、堆砌等。刷涂专指贴合面 A 类密封剂施工,挤注、灌胶、堆砌是指 B 类填角密封、紧固件封包和填缝的施工,刮涂是指密封边缘的修补。上述工艺中,刷涂应用范围最广。

3.1 贴合面密封

由于整体油箱壁板中含有大量的结构件之间的连接、紧固件穿透整体油箱壁的结构形式,而该结构件之间的贴合面密封是整体油箱中关键的密封形式,要求密封剂涂覆均匀、粘结持久稳定。在整体油箱中,肋缘条与壁板贴合面、密封角盒与肋腹板、长桁及壁板贴合面等部位需进行贴合面密封。整体油箱壁贴合面密封示意图如图 1 所示。

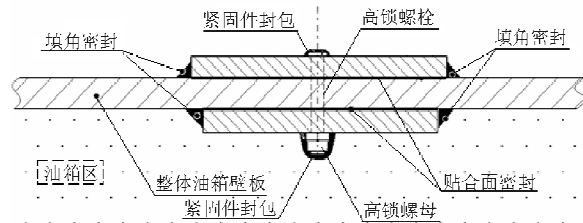


图 1 整体油箱壁贴合面密封示意图

Fig. 1 Binding surface sealing of the integral fuel tank wallboard

同时,在飞机整体油箱的制造和装配过程中,贴合面密封与油箱壁板连接装配是同时进行的,而大飞机整体油箱壁板尺寸大、所需的装配时间长,而高粘附力贴合面密封剂具有足够的活性期,较长

的施工期和组装期,可保证在施工期内完成所有的油箱壁板部位紧固件的固定并紧固,同时内聚强度较低,适宜于大面积的表面刷涂,可有效保证整体油箱壁板等部位贴合面密封的可靠性、密封性及可施工性。

3.2 填角、填隙密封

填角、填隙密封是确保油箱持久密封的两种重要密封形式。在贴合面密封的零件安装前,对应的配合面有空穴、间隙、下陷或其他表面缺陷的部位(例如油箱结构的孔道、内腔、缝隙、结构下陷等处)需用填角密封剂预先填充,并沿着安装零件贴合面边缘或缝隙,施加密封剂形成一个连续的波纹状涂层的密封环境,完成填角密封。同时,在贴合面密封的结构件周边完成填角密封。在飞机整体油箱中,盖板与梁缘条和壁板连接、盖板与对接长桁和壁板连接的紧固件安装时,螺母用密封剂湿安装封包;同时,梁缘条与对接长桁之间的间隙在盖板长度范围内用密封剂进行填隙密封,外表面壁板与相近壁板弦向及展向的缝隙均用密封剂进行整形密封。壁板末端盖板密封示意如图 2 所示。

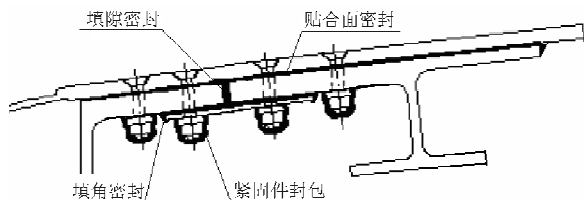


图 2 壁板末端盖板密封示意图

Fig. 2 Sealing of the covering cap on the bottom of wallboard

在飞机整体油箱中使用大量的紧固件,紧固件钉头与飞机壁板夹角的填角和填隙密封,所需的密封剂的用量特别大,所以,采用 B 类低密度填角密封剂,不仅满足整体油箱粘接稳定、密封可靠等要求,还可有效降低飞机自重、提高载荷、增加航程。同时,刷涂型的 A 类密封剂用于紧固件与壁板衔接表面的密封,则有效地提高了施工效率。

3.3 口盖密封

位于大飞机整体油箱区壁板上方的维护口盖是重要的密封部位。为了便于大飞机整体油箱的

维护,要求口盖具有可拆卸功能。由于大飞机整体油箱口盖的尺寸相对较大,在口盖加工过程中存在零件自身变形的缺陷,为了弥补这一缺陷,同时兼顾密封可靠和拆卸简单的要求,在设计壁板与口盖装配时,将壁板夹在压环和口盖之间,并采用紧固件连接压环和口盖的结构密封方式。壁板与口盖的密封如图 3 所示,紧固件密封如图 4 所示。

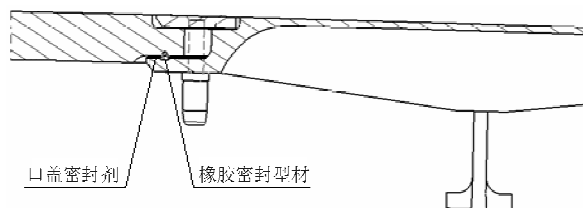


图 3 口盖与壁板的密封示意图

Fig. 3 Sealing of the covering cap and the wallboard

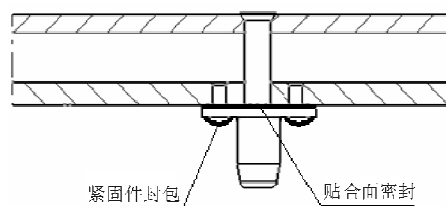


图 4 连接口盖的紧固件密封示意图

Fig. 4 Sealing on the fastener connected to covering cap

在飞机服役期间,由于油箱口盖需要经常开启,密封剂不能与口盖发生粘连;同时随着飞机性能的不不断提升和新型燃料对密封剂破坏作用的不断增强,口盖密封剂长期浸泡在燃油中,受湿热环境影响和新型燃油的破坏日益增强,口盖密封剂虽然不是必须与整机同寿,但多次更换也会造成维修成本上升,因此需具备长寿命特性。结合结构设计要求 and 低粘附力密封剂的特点,整体油箱口盖一般选用 A 类或 B 类低粘附力密封剂^[1,15]。

4 整体油箱用密封剂的选用建议

通过对大飞机整体油箱密封剂的性能以及密封结构形式分析,要满足大飞机整体油箱安全可靠、长寿命、低成本的要求,密封剂的选用应符合以下条件:

(1) 高粘附力贴合面密封剂粘接性能稳定、密封可靠、成本相对较低,通常用于整体油箱壁板的贴合面装配密封。

(2) 低密度填角密封剂密度小、重量轻、粘接性能稳定、密封可靠、寿命长,通常用于整体油箱壁板装配后夹角的填角密封和紧固螺栓等的表面密封。

(3) 低粘附力密封剂寿命长、高弹性保持效果好,既确保密封可靠,又容易反复拆卸,通常用于整体油箱可拆卸口盖的密封。

5 结束语

立足国内液体聚硫橡胶原材料的稳定生产供货状况和目前航空密封剂材料的技术发展条件,按照美国相关标准,通过液体聚硫橡胶改性、高粘附力贴合面密封剂、低密度填角密封剂、低粘附力密封剂的深入研究,重点突破改性剂与改性聚硫橡胶合成工程化、改性聚硫密封剂轻质化、脱粘和高粘附力聚硫密封剂的长装配期等关键技术并形成批次稳定性的工程化制造及供货能力,将对未来我国大飞机的发展发挥重要的支持作用,并具有良好的经济和技术效益。

参考文献

- [1] 巴秀娟. 选择快速拆装油箱口盖密封材料的研究[J]. 飞机设计, 1997(2): 32-38.
Ba Xiujuan. A research on quick disassembly of fuel tank for aircraft by sealant chosen[J]. Aircraft Design, 1997(2): 32-38. (in Chinese)
- [2] 胡琳. 飞机整体油箱密封剂分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2001(2): 20-31.
Hu Lin. Analysis on the integral fuel tanks sealant of jet[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2001(2): 20-31. (in Chinese)
- [3] 林松. 某型飞机机翼整体油箱工艺研究[J]. 洪都科技, 2010(3): 19-23.
Lin Song. Technological research on wing integrated tank for X aircraft[J]. Hong Du Science and Technology, 2010(3): 19-23. (in Chinese)
- [4] 曹寿德, 黄梅星. 航空密封剂性能及水平设置估价的探讨[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 347-348.
Cao Shoude, Huang meixing. Study on evaluation of set up of properties and level of property of aeronautical sealant[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 347-348. (in Chinese)
- [5] 曹寿德. 整体油箱密封剂寿命评估研究[J]. 航空制造工程, 1997(11): 20-22.
Cao Shoude. Study on life span assessment for the integral fuel tanks sealant[J]. Journal of Aviation Engineering & Maintenance, 1997(11): 20-22. (in Chinese)
- [6] 揭少卫, 杨黎明, 陈捷, 等. 原位聚合法制备壳聚糖/聚丙烯酸水凝胶磁微球及其性能表征[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(5): 850-854.
Jie Shaowei, Yang Liming, Chen Jie, et al. Chitosan-poly(acrylic acid) magnetic microspheres prepared by in situ polymerization method and their characterization[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(5): 850-854. (in Chinese)
- [7] 吴市, 陈来, 张峰君, 等. 电化学合成的含双键聚硅烷[J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(5): 64-66.
Wu Shi, Chen Lai, Zhang Fengjun, et al. Polysilane with double bonds by electrochemical synthesis[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2007, 23(5): 64-66. (in Chinese)
- [8] 欧玉春. 刚性粒子填充聚合物的增强增韧与界面相结构[J]. 高分子材料科学与工程, 1998, 14(2): 12-15.
Ou Yuchun. Enhanced toughening and interface phase structure of rigid particle filled polymers[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 1998, 14(2): 12-15. (in Chinese)
- [9] 王红艳, 倪忠斌, 杨成, 等. PSt种子与“花瓣”形PSt/PAN复合颗粒的制备[J]. 高分子学报, 2007(6): 503-508.
Wang Hongyan, Ni Zhongbin, Yang Cheng, et al. Preparation of polystyrene seeds and petal-like composite polymer particles[J]. Acta Polymerica Sinica, 2007(6): 503-508. (in Chinese)
- [10] 张洪刚, 陆书来, 成国祥. 悬浮聚合法制备磁性分子印迹聚合物微球[J]. 功能高分子学报, 2007, 19-20(3): 257-261.
Zhang Honggang, Lu Shulai, Cheng Guoxiang. Preparation of magnetic molecularly imprinted polymer microspheres by suspension polymerization[J]. Journal of Functional Polymers, 2007, 19-20(3): 257-261. (in Chinese)
- [11] 郭其魁, 桂宗彦, 龚飞荣, 等. 二乙酸甘油酯封端的齐聚L-丙交酯增塑改性聚L-丙交酯薄膜[J]. 功能高分子学报, 2009, 22(4): 373-377.
Guo Qikui, Gui Zongyan, Gong Feirong, et al. Properties of poly(L-lactide) plasticized with glycerol diacetate-terminated low molecular weight poly(L-lactide)[J]. Journal of Functional Polymers, 2009, 22(2): 373-377. (in Chinese)
- [12] 王雪珍, 汪辉亮. 具有规整结构和高强度的水凝胶研究进展[J]. 高分子通报, 2008(3): 1-6.
Wang Xuezheng, Wang Huiliang. Advances in the fabrication of hydrogels with well-defined structure and high mechanical strength[J]. Polymer Bulletin, 2008(3): 1-6. (in Chinese)
- [13] 吴松华, 益小苏, 秦蓬波, 等. 聚硫密封剂在航空煤油中的老化机理[J]. 航空材料学报, 2007, 27(6): 79-82.
Wu Songhua, Yi Xiaosu, Qin Pengbo, et al. Aging mechanism of polysulfide sealant in jet fuel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(6): 79-82. (in Chinese)

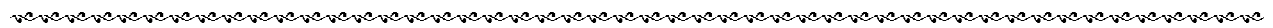
- cal and structure reliability-based robust design[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [16] 方柘林, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 基于车门结构的多目标优化设计方法研究[J]. 机械设计, 2014, 31(8): 60-64.
Fang Zhelin, Wang Lijuan, Chen Zongyu, et al. Study of multi-objective optimization design based on the vehicle door structure[J]. Journal of Mechanical Design, 2014, 31(8): 60-64. (in Chinese)

作者简介:

张 毅(1969—),男,博士,副教授。主要研究方向:先进制造技术。

郭银寰(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:先进制造技术。

(编辑:马文静)



(上接第 376 页)

- [14] 冯振宇, 陈磊, 周惠文. 飞机整体油箱的微生物腐蚀剂及维护[J]. 航空维修及工程, 2009(3): 54-56.
Feng Zhenyu, Chen Lei, Zhou Huiwen. Microbial corrosion of aircraft integral fuel tanks and related maintenance[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2009(3): 54-56. (in Chinese)
- [15] 王向明, 毕世权. 飞机口盖复合垫片密封结构设计研究[J]. 飞机设计, 2007, 27(4): 13-16.
Wang Xiangming, Bi Shiquan. A research on structural design for multiple seal packing for access doors on fighter airframe[J]. Aircraft Design, 2007, 27(4): 13-16. (in Chinese)

作者简介:

李绪忠(1969—),男,高级工程师。主要研究方向:高分子材料及航空电线电缆技术。

李素琴(1982—),女,高级工程师。主要研究方向:高分子材料。

(编辑:赵毓梅)