

浅析飞机复合材料整体油箱静电安全评估方法

Analysis of Electrostatic Safety Assessment Methods for Integrated Composite Fuel Tank of Aircraft

沈阳航空航天大学安全工程学院 陈 磊

[摘要] 复合材料是一种新材料,用在飞机结构上可明显提高飞行性能。但作为制造油箱的材料,必须进行防静电设计。本文介绍了飞机复合材料整体油箱静电安全性的研究背景,论证了对复合材料整体油箱进行静电安全评估的必要性,介绍了静电安全性评估的试验项目及评估办法。

关键词: 复合材料整体油箱 静电安全性评估 试验项目 适航性验证

[ABSTRACT] Composite materials is a new material. Using composites can significantly improve flight performance. But as used in manufacturing tank, the anti-static design must be done. In this paper the research background of the electrostatic safety of the integrated composite fuel tank is described and the necessity for the electrostatic safety assessment of the integrated composite fuel tank is demonstrated. The pilot projects and approach of the assessment are described at the end.

Keywords: Integrated composite fuel tank Electrostatic safety assessment Pilot project Airworthiness verification

飞机在飞行过程中,燃油箱内的燃油始终处于一种振动状态,燃油与油箱内壁及其他内部结构之间的相对运动,甚至燃油本身的搅动,都会导致静电的产生和静电荷的积聚。航空煤油电导率低,复合材料与金属材料相比导电性能差,因此油箱内静电泄漏的速度很慢。当静电积累到一定程度就有可能产生静电放电火花,点燃航空煤油蒸汽和空气的混合物,引发火灾或爆炸事故。为了防止飞机因静电引起灾难事故,复合材料整体油箱必须进行静电防护设计,并通过试验加以验证。

1 燃油箱静电安全性的研究背景

据美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)统计,自1959年以来,有18架飞机发生过燃油箱爆炸事故,导致542人丧生,11架飞机完全损坏,3架飞机重要部件被毁。FAA调查发现,油箱被引爆是因为油

箱内油面上方存在的航空煤油蒸汽与空气的混合物被点火源引燃。在这18起爆炸事故中,有4起是由于油箱内产生的静电引起的^[1]。

自20世纪60年代,复合材料迅速崛起^[2]。它具有优越的力学性能和易于整体成形等优异特性,将其用在飞机结构上,可比常规的金属结构减重25%~30%,并可明显改善飞机气动弹性特性,提高飞行性能,这是其他材料无法或难以实现的,但作为制造油箱的材料,复材的导电性却不如金属材料。为了保证防静电设计的安全性和可靠性,应根据相应的适航标准进行充分的验证试验。

提到适航标准,不得不承认到目前为止,FAA占据了该行业的绝对领先地位^[1]。国际上最大的适航组织——国际民航组织(ICAO)在其适航标准中大量采纳了FAA的条款,欧洲最大的民航机构EASA在适航标准方面也与FAA保持密切的合作,而其他国家的适航标准大多是在FAA的基础上制定的。中国民航总局(The Civil Aviation Administration of China, CAAC)颁发的CCAR25经过不断修订完善,现行有效版本CCAR 25R4与FAA颁发的FAR25基本等同并能够做到同步修订。

油箱静电安全性在FAA和我国适航标准中的重要体现在:

(1) FAR25的第25.981条和AC 25.981-1C: FUEL TANK IGNITION SOURCE PREVENTION GUIDELINES中所列举的点火源里,燃油静电是其中之一。

(2) AC25.981-1C第8项: Fuel Vapor Ignition Sources中,分析了静电产生的原因并列举了若干减少静电荷积聚和加速静电荷泄放措施,其中一部分是来源于SAE的Air 1662A: Minimization of Electrostatic Hazards in Aircraft Fuel Systems。

(3) AC25.981-1C第10项: Safety Analysis中要求,在可能由于燃油或其蒸气的点燃导致灾难性失效发生的燃油箱或燃油箱系统内的任一点不得有点火源存在。

(4) 我国相应的适航标准: 运输类飞机适航标准, CCAR25-R4中也对静电防护作出了要求,其中第25.899条为电搭接和防静电保护,其要求如下。

(a) 电搭接和防静电保护的设计,必须使得造成如下危害的静电积聚最小:人员电击受伤,点燃可燃蒸气,或干扰安装的电子电气设备。

(b) 通过如下方法,以证明符合本条(a)段的要求:将部件对机身可靠搭接,或采取其他可接受的方法消除静电,使其不再危及飞机、人员或其他安装的电子电气系统的正常运行。

通过以上适航标准来看,虽然没有提出明确的试验及评估办法,但对复合材料燃油箱静电安全性的验证性试验和评估是必须做的。

2 静电安全性的评估办法概述

2.1 静电电位法

该试验的内容是:进行复合材料整体油箱盒段和金属整体油箱盒段的平动和晃动试验,对比两种油箱在相同的含油量、接地状态以及动作频率幅度的条件下,同一测量部位的静电电位值,用以验证复合材料整体油箱抗静电设计的有效性和安全性。测量时测试部位应以静电电位水平较高、电荷密度较大及可能出现放电的原则选取,同时选取的部位应能够反映油箱内静电分布的规律。

有一点值得说明,采用盒段作为静电测量的对象测得的静电电位并不能真实反映同样试验条件下全尺寸油箱内的静电水平。尽管在油内静电电位满足拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (1)$$

$$U(S) = 0, \quad (2)$$

式中, S 为接地容器内表面,其上电位为“0”。

设 (x_1, y_1, z_1) 为盒段油内任意一点, (X_1, Y_1, Z_1) 为全尺寸整体油箱油内一点,且满足 $x_1=KX_1, y_1=KY_1, z_1=KZ_1$ 其中 $K=\left(\frac{\text{实际体积}}{\text{式样体积}}\right)^{\frac{1}{3}}$,为体积系数。

假设电荷密度 ρ 为常数时,盒段油内电位与全尺寸油箱油内电位之间的关系满足:

$$U(x_1, y_1, z_1) = \frac{U(X_1, Y_1, Z_1)}{K^2}, \quad (3)$$

由式(3)可知,全尺寸装置内对应点静电电位为盒段内某点的静电电位的 $\frac{1}{K^2}$ 。

但实际情况是,电荷密度 ρ 不是常数,改变油箱尺寸后的平动和晃动试验中, ρ 是一个非线性的复杂变量,而且在不接地的情况下,边界条件不再满足(2)式,而是变得比较复杂,无法用公式去描述,况且对于复合材料油箱来说,接地时也只有金属材料的壁面电位为0,

复合材料壁面还是有电位存在的,故(2)式对于复合材料壁面也不能成立。因此,当油箱尺寸不同时,电位并不是简单的线性关系,但不能否认上述的公式推导能够说明油内电位随油箱尺寸变化的趋势。

由于金属整体油箱在多年使用和飞行过程中并未出现过静电火灾事故,复合材料油箱与金属油箱的试验对比结果还是有一定参考价值的。如果从对试验结果的分析中能够得出复合材料油箱静电电位水平低于金属油箱的结论,则能够证明复合材料油箱的防静电设计是有效的、可靠的。

2.2 材料电性能法

对油箱各壁所使用的复合材料试样分别进行体积电阻及体积电阻率、表面电阻及表面电阻率、介电常数和静电衰减时间常数的测量。对航空煤油进行不同温度下电导率、介电常数和静电衰减时间常数(或称静电放电时间常数、半衰期等)的测量。不同电导率或电阻率的物质带电情况及电位范围见表1^[3]。

表1 不同电阻率和不同电导率的物质带电状况和电位范围

材料			带电状况	带静电电位大致范围 / kV
电导率 / ($S \cdot m^{-1}$)	体积电阻率 / ($\Omega \cdot m$)	表面电阻率 / ($\Omega \cdot m^{-2}$)		
$>10^{-8}$	$<10^8$	$<10^{10}$	极小	<0.1
$10^{-8} \sim 10^{-10}$	$10^8 \sim 10^{10}$	$10^{10} \sim 10^{12}$	少量	$0.1 \sim 1.0$
$10^{-10} \sim 10^{-12}$	$10^{10} \sim 10^{12}$	$10^{12} \sim 10^{14}$	一般	$1.0 \sim 10.0$
$<10^{-12}$	$>10^{12}$	$>10^{14}$	多	>10.0

材料电性能的实际测量值与表1对比,可得出材料带电状况及大致的带电范围。

在上述参数中,静电衰减时间常数反映的是材料静电泄漏所需时间的长短,是衡量材料防静电性能的重要参数,对于时间常数数值较大的材料,由于静电泄漏所需时间较长,容易形成静电荷积累而产生高电压,以至发生局部空气击穿的剧烈放电现象。

目前,国内外常用的静电衰减测试方法有摩擦法、充电法和电晕喷电法3种^[4-6]。摩擦带电法比较接近材料的实际使用情况,可以比较全面的评价材料的摩擦起电能力和静电衰减能力,但由于材料带电序列、摩擦方法、标准摩擦和环境温湿度等条件的影响,使得采用摩擦法测量材料的静电衰减时间的重复性比较差。电晕喷电法操作简单、重复性较好,测试电压和极性均可人为地控制,测试结果在一定程度上反映了材料的静电衰减性能。电晕喷电法与摩擦法具有比较好的相关性^[3]。但对于不同试样,这种测量方法能够喷上的电荷量相差很大,甚至有的试样喷不上电。充电法适用于测量均匀材料,而不适于复合材料^[7],FED-STD-101C测得的

衰减时间明显小于试样上电荷实际衰减时间^[8]。由于 Cross-Over 效应,材料初始电位高时衰减快,电位低时衰减慢。所以要正确评价不同材料的静电衰减性能,应该使不同材料从相同的初始电位开始衰减。为此,可采用悬浮喷电法,即喷电过程中材料不接地,当材料表面电位不再上升时试样夹接地,同时非接触式静电电位计开始测量试样上的电位衰减情况。

2.3 最小点火能和静电火花能量对比

测出试验用航煤的最小点火能及电位测试部位的电容值,根据公式: $U_{\max} = (2W_{\min}/C)^{1/2}$,推导出极限电位 U_{\max} 值,与测试所得电位值相比,若测试点电位值低于该极限电位值,则认为该点无静电放电引燃的危险。

或根据公式 $W = \frac{1}{2}U^2C$,由测试部位的电位值及电容值推算出该点的静电放电能量,与航煤的最小点火能相比,若低于最小点火能,则认为该点无静电放电引燃的危险。

3 结论

以上为常用的 3 种方式,参数比较易测,测试和对比结果比较直观。对以上几种评估方法的评估结果进行综合,评估复合材料整体油箱防静电措施设计的有效性和安全性。

静电安全评估试验项目应根据整体油箱的具体情况进行分析确定。确定项目后,根据试验目的,确定测试参数及部位,选取适宜的试验方法,根据相关标准设计试样,选择相应的测试仪器,最终制定试验大纲。试验后整理试验结果进行分析评估。

参考文献

[1] FAA Inspectors and Engineers, SFAR 88. Related Operating Rules Special Maintenance Requirements & Compliance Planning Briefing [EB/OL]. 2002-11-7. USA: <http://www.faa.gov>.

[2] 张兴金,邓忠林. 浅谈纤维复合材料与中国大飞机. 纤维复合材料, 2009, 26(2): 24-26.

[3] EIA-541. Packaging material standards for ESD sensitive items. 1988.

[4] Baumgartner G. Electrostatic decay measurement theory and applications. EOS/ESD Symposium, 1995:5.7.1-5.7.11.

[5] Chubb J N, Malinverni P. Experimental comparison of charge decay measurement for a variety of materials. Symposium EOS/ESD Dallas, 1992:5A.5.1-5A.6.9.

[6] 范立思,魏光辉,魏明,等. 静电衰减时间常数测试仪的原理与设计. 包装工程, 2001, 22(2): 41-42.

[7] 中国航空研究院编著. 复合材料设计手册. 北京: 航空工业出版社, 2001, 11: 225-237.

[8] 焦连跃,李华星. 从 FAA 看如何加强我国民航适航管理. 西北工业大学学报(社会科学版), 2009(9): 43-47. (责编 志一)

(上接第 97 页)

集中,促进疲劳裂纹萌生,所以喷丸试件在喷丸强度为 0.20mmA 时,表面粗糙度的大幅增加是影响 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能提高的一个主要原因。

光饰后试验件的表面残余压应力都出现降低,而疲劳寿命提高是由于光饰处理后虽然试验件的表面残余压应力降低,但同时表面的粗糙度也显著降低,基本与原始未表面强化的材料在一个数量级内,从而大幅降低了材料表面喷丸强化引起的应力集中因素的影响,所以光饰处理对改善 Ti6Al4V 钛合金的疲劳性能很有益处。

以上分析表明, Ti6Al4V 钛合金的疲劳性能不是由其表面层残余应力或表面粗糙度等某些单一因素决定的,而是由表面层微观组织结构特征、表面粗糙度和表层残余应力等众多综合因素的平衡来决定的,即由表面完整性来决定。

3 结论

(1) 在 0.10~0.20mmA 强度范围内喷丸强化时,喷丸表面粗糙度持续增加, Ti6Al4V 钛合金疲劳寿命增加值先升后降。

(2) 喷丸强化再经过光饰处理后,喷丸表层残余压应力降低,喷丸表面质量改善,其粗糙度可以达到强化前的水平,可使 Ti6Al4V 钛合金疲劳寿命进一步提高。

(3) 表面完整性控制,即表面层微观组织结构特征、表面粗糙度及表层残余应力等众多因素的综合平衡与协调,对改善和提高 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能非常重要。

参考文献

[1] Kim H, Kim J. Region-based shape descriptor invariant to rotation scale and translation. Signal processing: Image Communication, 2000, 16(1-2): 87-93.

[2] 王仁智. 残余应力测定的基本知识. 理化检验: 物理分册, 2007, 43(10): 535-539.

[3] Sudarshan T S, Reitz W, Stiglich J J. Surface modification technologies IX//Proceedings of the Ninth International Conference on Surface Modification Technologies. Cleveland, Ohio, USA, 1995: 50-52.

[4] 刘锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺. 北京: 国防工业出版社, 1977: 76-82.

[5] 田唐永. TC4 钛合金喷丸强化组织与性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

[6] 米谷茂. 残余应力的产生和对策. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[7] 高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1536-1539.

(责编 谷雨)