

面向先进检漏技术的航空产品密封实现及保证

Realization and Secusity of Aviation Product Seal for Advanced Leak Testing Technology

中航工业北京航空制造工程研究所 许国康
北京航维捷飞机自动钻铆技术服务有限公司

[摘要] 简要介绍了航空结构密封及其意义。对航空结构密封检漏方法及问题、密封性的实现及其保证手段进行了分析,并提供了整体油箱采用先进检漏技术实施方案,最后提出了航空密封结构应用先进检漏方法的实施思路。

关键词: 航空结构 密封 泄漏检测 氦质谱检漏 整体油箱

[ABSTRACT] The aviation structure seal and its significance is briefly described. Aviation structure seal and leak testing methods and problems, seal realization and security instrument for seal are analyzed, and implementing plan for integral fuel tank using advanced leak testing technology is provided, and implementing thinking for application of advanced leak testing method for aviation seal structure is concluded.

Keywords: Aviation structure Seal Leak testing Leak testing using helium mass spectrometer Integrated fuel tank

密封及其检测技术是一门涉及力学、热学、材料学、摩擦学、物理和化学、电子学、信息科学等多学科交叉的边缘基础学科,尤其在航空领域,系统的密封性对保证飞行安全和正常营运起着重要作用,航空结构的密封可靠性成为航空系统的关键性能之一。系统发生泄漏是飞机制造和使用过程中常见的故障,若不能及时排除就会严重威胁飞机的运行安全,甚至会发生灾难性事故。而在飞机等航空产品制造、维护和修理时,传统的密封和泄漏检测工艺过程复杂,技术难度较大,是航空制造和维修过程中的一大难题。针对航空产品不同的使用要求,选取高效合理的密封和检漏方法,并制定相应的检漏标准,从而更好地控制产品密封质量,提高检漏精度和效率,改善航空密封结构制造、使用和维修的经济性和安全性,对保障飞机等航空产品的使用性能、安全性和可靠性具有重要的现实意义。

1 航空结构密封及其意义

密封是阻止流体(气体、液体)介质通过结构缝隙、

空穴、孔洞从一个部位流向另一个部位及渗漏到密封结构之外的措施。航空产品密封的目的是防止结构漏油、漏气、漏水和腐蚀,满足结构、系统和飞机的使用性、安全性、可靠性和长寿命的要求。航空密封结构分为油密结构、气密结构、水密结构及其他密封结构几类。

油密结构是指能保证燃油、润滑油、液压油等油类液体不从结构中泄漏或不从外部流入、渗漏到结构内的结构。航空油密结构包括:

(1)整体油箱、燃油箱舱、副油箱等油箱结构,用于保证飞机航程和安全;

(2)燃油系统、液压系统、滑油系统等管路系统(特别是其连接接头和连接法兰等部位),用于保证发动机、系统等正常工作;

(3)起落架缓冲支柱等其他油密结构,用于保证飞机结构功能实现(如起落架缓冲支柱用于保证飞机起降)、安全和可靠性。

气密结构指能保证空气等工作气体介质不从结构中泄漏或不从外部流入、渗漏到结构内的结构。航空气密结构包括:

(1)气密座舱(如客舱、驾驶舱),用于保证在飞行过程中在飞机中形成一个乘客及机组人员的正常和安全的居住环境;

(2)空调管路等,用于保证舱内适宜的环境,满足人员舒适的要求;

(3)航空气动系统等,用于保证系统功能实现;

(4)航空轮胎、仪器仪表、航空电子等其他气密结构,用于保证组件、元器件功能实现及飞机安全和可靠性。

水密结构指能保证水汽、雨水、海水等水液不从外部流入、渗漏到结构内的结构或不从结构中泄漏的结构。例如,水上飞机的水密隔舱、浮筒等水密结构,可以保证飞机水上起降、停放功能;飞机的座舱(客舱、驾驶舱)需要保证对水的密封性,以满足飞机在雨天的正常飞行;而消防用飞机配备的密封水箱则可保证飞机能运送足够的水去灭火。

另外,航空电子元器件、机载设备和航空仪器仪表、机载导弹等在贮存和使用过程中,需要防止空气、水汽、

液体等外部介质渗入或本身自带工作介质泄漏,以保证其使用功能实现、安全、可靠性及长寿命要求。航空结构密封除防止泄漏外,还具有保证结构耐腐蚀、绝缘、防爆等功能。

密封技术除应用于航空产品使用过程中,在其制造过程中也涉及到密封问题,这类问题包括:

(1) 航空复合材料结构,如在热压罐成型、真空辅助 RTM (树脂传递模塑)、RFI (树脂膜渗透成形) 等制造过程中要用到密封技术;

(2) 超塑成型 - 扩散连接结构及蠕变成形结构^[1],其成形设备及模具要保证密封;

(3) 真空钎焊、电子束焊接、真空激光焊接及等离子焊接等真空环境下实现的焊接结构,所需真空工作室要保证良好的密封性;

(4) 磁控溅射等表面工程结构,需要应用密封严密的真空室;

(5) 数控加工等制造过程中要用到保证密封性能的真空吸附工装结构等。

为了防止结构漏油、漏气、漏水和腐蚀,需要在结构上采用各种密封胶和密封形式,使结构获得良好的密封性能。图 1 显示了航空结构上采用的典型密封形式。

为了对航空结构的密封性能进行检验和评估,需要对结构进行泄漏检测。泄漏检测简称检漏,在航空领域通常称密封试验。检漏是指检测是否泄漏、或查找泄漏位置(定位)、或测量漏率大小(定量)、或三者兼有的方法和过程^[2]。

检漏属于无损检测范畴。在航空结构装配过程中,检漏既是工艺手段,又是检验方法。现代检漏的概念认为漏是绝对的,不漏是相对的,不同的产品有不同的漏率要求^[3]。因此,检漏的任务不仅是检测工件漏或不漏,而且要给出漏率多少(定量检漏),以评估漏率是否在允许的范围内;同时还需要确定漏点位置(定位检漏),以便进行修补^[4]。目前已应用的检漏方法如图 2 所示。先进检漏方法的发展趋势是数字化、自动化、高灵敏度、高效率、低成本、更高的安全和环境友好(绿色化)。

航空领域常用的检漏方法有:气泡检漏法、压力变化检漏法、煤油渗透检漏法、流量法、听音法(声波检漏)、淋雨试验、卤素检漏法、质谱检漏法等。表 1 列出了航空结构可用的检漏方法的技术特征。整体油箱常用的气密试验包括气泡检漏法和压力变化检漏法,而油密试验则综合了压力变化检漏法、煤油渗透检漏法。航空领域常用的传统检漏方法存在着灵敏度低、效率低、

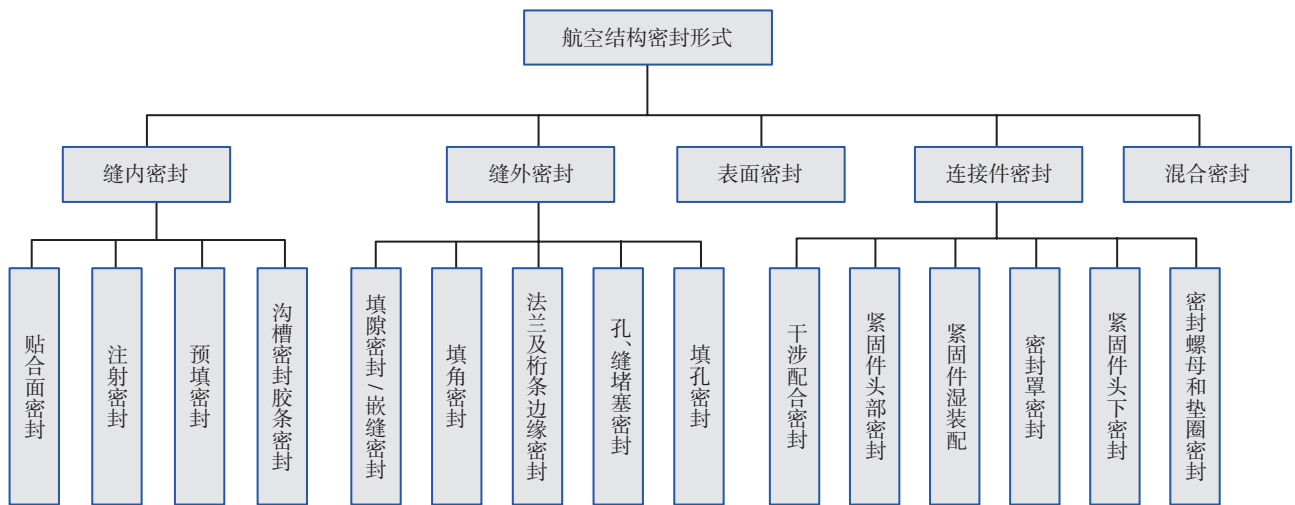


图1 航空结构密封形式分类
Fig.1 Classification of aviation structure seal form

2 航空结构密封检漏及问题

航空产品中,不同的结构其密封性要求是不同的。如飞机整体油箱对密封要求很严,其密封部位不允许有任何轻微渗漏发生。而飞机气密座舱允许存在一定程度的轻微漏气现象,但漏气量必须符合设计规定,如伊尔-76的气密座舱的气密性要求,是在 10668m 高空可保持 3048m 高度的气压(必要时可给驾驶舱增压)。

操作人员劳动强度大、有安全隐患、难以量化、成本高和检漏标准不统一等不足,进而会导致航空结构的密封可靠性不足,影响飞机产品使用性能的发挥。因此急需采用先进的检漏方法。图 3 是飞机整体油箱和气密座舱的不同的检漏方法比较,从图中可以看出,采用氦质谱检漏、差压检漏等先进检漏方法可以取代整体油箱和气密座舱传统的气密试验和油密试验方法。

目前国内航空产品密封结构在设计、制造、使用和

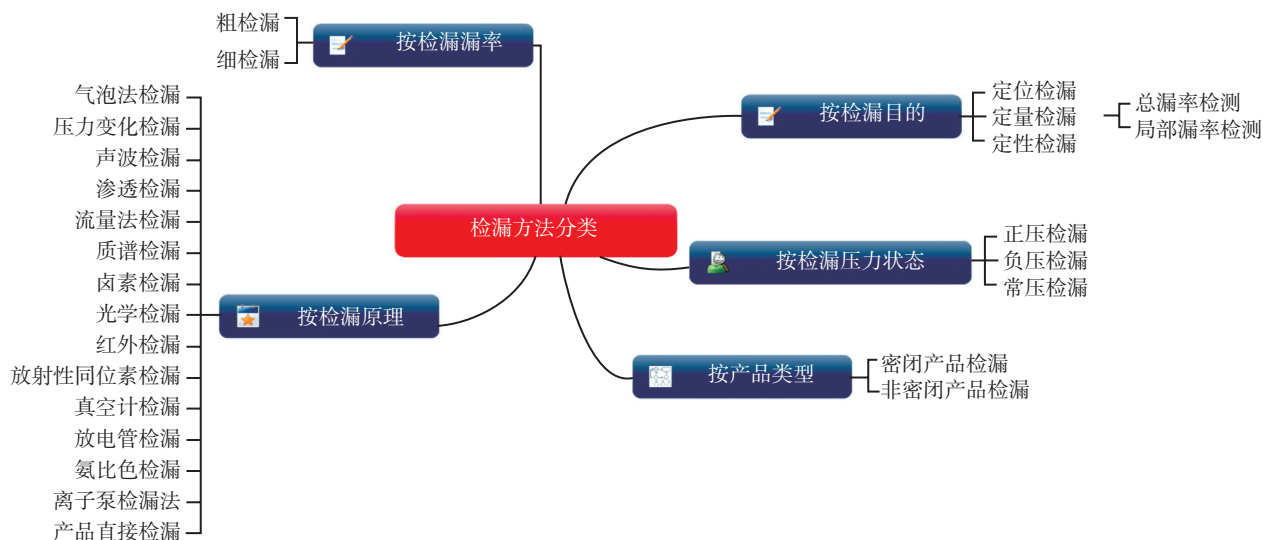


图2 检漏方法分类
Fig.2 Classification of leak testing methods

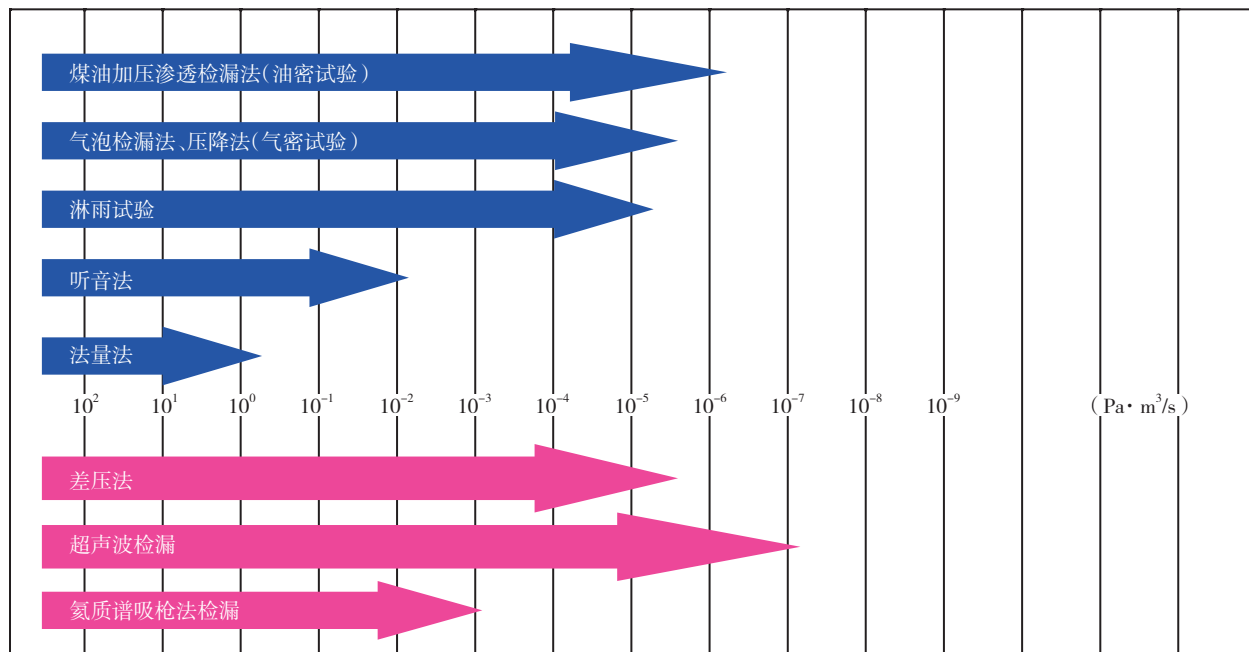


图3 不同检漏方法最小可检漏率比较
Fig.3 Comparison of minimum detectable leak rate of leak testing methods

维护过程中面临与检漏有关的一系列问题,主要体现在以下几个方面:

- (1) 缺乏面向先进检漏方法的产品密封设计理念;
- (2) 缺乏面向先进检漏方法的航空产品密封技术指标;
- (3) 型号生产密封检测主要应用气密试验、油密试验、淋雨试验等传统方法;
- (4) 密封检测未纳入无损检测体系管理;
- (5) 检漏人员缺少专业培训,很少开展资格取证工

作;

- (6) 缺乏航空产品检漏方面的行业标准和规范等。将先进检漏方法应用于设计、制造、使用和维护等产品全生命周期阶段是解决上述问题的关键。

3 航空结构密封性实现与保证

为实现结构密封、保证密封可靠性,需要将先进检漏方法应用于航空密封结构的设计、制造、使用和维护等产品全生命周期阶段。如图4所示,实现和保证面向

表1 航空结构检漏方法的技术特征

检测方法		漏率检测范围 / (Pa· m ³ · s ⁻¹)	示踪介质	检漏目的	备注	
卤素加压检漏		10 ⁻³ ~10 ⁻⁹	氟里昂、六氟化硫等	定位 定量	检漏灵敏度与吸枪和被检件表面距离以及移动速度有关,结果受操作者影响大	
皂膜气泡检漏		≥ 5.0 × 10 ⁻⁶	空气、氮气等	定位	结果受人的影响很大	
质谱检漏	加压法	吸枪直接嗅探法	氦气	定位 定量	检测结果与吸枪移动速度、吸嘴与被检件间的距离、气体浓度、环境等因素有关	
		吸枪累积法	氦气	定位 定量	累积时间、累积容积、示漏气体的浓度影响测量结果	
	真空法	喷吹法	氦气	定位 定量	检测结果与喷枪移动速度和喷嘴与被检件间的距离有关	
		罩盒法	氦气	定位 定量	测量总漏率,也可局部进行定位,测量结果与示漏气体浓度有关	
声波检漏	超声波检漏法		≥ 10 ⁻³	空气、氮气等	定位	快速,可以远距离进行测试,适合相对大的漏孔;环境可能引起一定的噪音本底
	听音检漏法		≥ 10 ⁻²	空气、氮气等	定位	适于气密座舱等产品的检漏
渗透检漏	荧光渗透检漏法		≥ 10 ⁻⁹	荧光渗透剂	定位	适用于航空燃油系统、液压系统、空调制冷系统在线检测
	煤油加压渗透检漏法		≥ 5.0 × 10 ⁻⁶	煤油	定位	适用于飞机整体油箱等
	淋雨试验		≥ 10 ⁻⁵	水	定位	适用于气密座舱
压力变化检漏	压降法		≥ 10 ⁻⁵	空气、非可凝性气体	定量	灵敏度与测试条件、被检件形状、被检件内部的温度变化值、检测有效容积、测试时间等因素有关
	差压检漏方法		≥ 10 ⁻⁶	空气、非可凝性气体	定量	灵敏度与被检件的检测有效容积、温度变化值、测试时间等因素有关
红外线光声检漏		≥ 10 ⁻⁷	—	定位 定量	适于电子元器件等产品的检漏	
流量法检漏		>10 ⁻¹	空气	定量	适用于气密座舱	

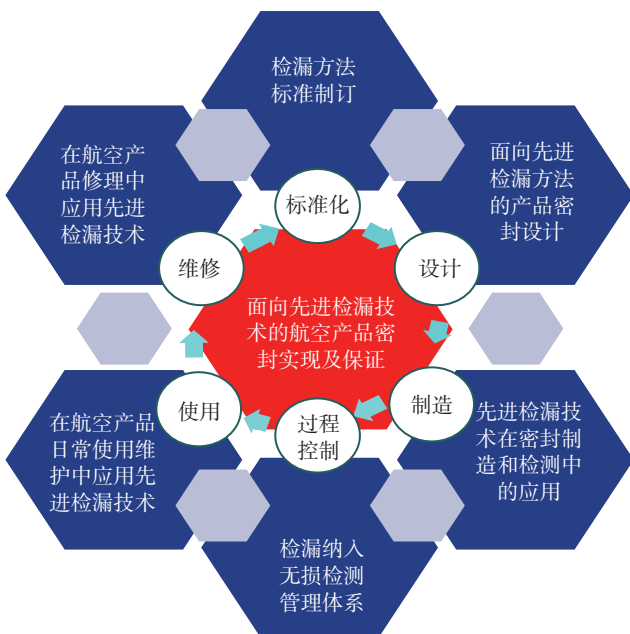


图4 面向先进检漏技术的航空产品密封实现及保证体系图
Fig.4 System chart of aviation product seal realization and security for advanced leak testing technologies

先进检漏技术的航空产品密封,需要从以下几个方面入手。

(1) 先进检漏方法标准制订。包括检漏基础标准、检漏方法标准、产品检漏标准等标准的制订。

(2) 面向先进检漏方法的产品密封设计。包括密封结构和密封方法的合理设计、先进检漏方法的选择和确定、产品密封合格性指标设计、产品维修检漏设计等方面。产品密封合格性指标与检漏方法是相关的,而产品维修检漏设计则用于规范产品使用和维修过程中的检漏问题。

(3) 先进检漏技术在密封制造和检测中的应用。涉及先进检漏设备及工装配置、制造验收技术条件制订、先进检漏技术和检漏工艺规范研究和应用等。制造验收技术条件同时与产品维护和修理要求,包括检漏要求相关。

(4) 检漏纳入无损检测管理体系。检漏工作纳入无损检测管理体系,可以从人、机、料、法、环等几个方面全面、综合地保证检漏过程和结果的可靠性和安全性,涉及检漏人员培训及资质认证、检漏设备、材料与环境

控制、检漏规范制订与实施等方面。在国内, GJB 9712 对国防科技工业包括泄漏检测人员在内的无损检测人员的资格鉴定和认证相关问题进行了规定。

(5) 在航空产品使用日常维护和修理中应用先进检漏技术。检漏过程贯穿航空产品从设计、制造到使用维护全生命周期阶段, 因此, 在航空产品使用、维护和修理中也需要应用先进检漏技术, 涉及面向先进检漏方法的产品维护、修理工艺规范制订, 产品维护和修理中检漏人员及设备控制及检漏过程控制等。

4 先进检漏技术实施方案

4.1 方案目标

综合采用差压法整体检漏与氦吸枪法单点漏源检漏, 以取代气密试验(气泡法检漏和压降法检漏)和油密试验(煤油渗透检漏和压降法检漏), 完成整体油箱密封试验(检漏)。

4.2 方案工作内容

(1) 先进泄漏检测技术与传统检漏技术的对比研究。包括机翼整体油箱总漏率合格指标和机翼整体油箱密封单点漏源漏率合格指标的初步确定。

(2) 通过差压检漏方法和氦检漏方法确定总漏率

和单点漏率的验证研究。包括系列标准漏孔及试验件的设计制作、传统检漏方法与差压及氦检漏方法的对比验证试验、总漏率和单点漏率的检测误差与修正。

(3) 制定整体油箱先进泄漏检测工艺规范。首先通过油箱模拟试件对比试验, 进行检漏技术指标验证, 确定检漏工艺方法, 初步制定检漏工艺规范; 通过大容积差压检漏技术及氦检漏技术在整体油箱检漏中的试用研究, 完善应用于整体油箱泄漏检测工艺规范。

(4) 制订飞机整体油箱先进检漏系统工装设备技术条件。包括确定用于飞机整体油箱检漏的大容积差压检漏系统的设备(含工装及辅助设备)技术条件, 确定用于飞机整体油箱检漏的氦检漏系统的设备(含工装及辅助设备)技术条件。图 5 为几种整体油箱先进检漏设备。

4.3 技术方案

技术方案从以下 3 个方面来考虑。

整体油箱氦吸枪法检测单点漏源检漏条件及相应合格漏率指标的确定。采用氦吸枪法进行检漏要考虑的检漏条件包括充压压力、氦气浓度、吸枪位置及移动速度、环境气氛的影响, 合格漏率指标要与油密试验煤油渗透正压检漏(灵敏度)相当。充压压力和氦气浓度



图5 整体油箱用先进检漏系统

Fig.5 Advance leak testing system for integrated fuel tank

由差压检测仪的旁路充气/配气系统保证。采用带罩盒吸枪法进行检漏(图6),以消除周围环境对检漏区域的影响,吸枪位置及移动速度参考相关标准,并由试验进行验证。

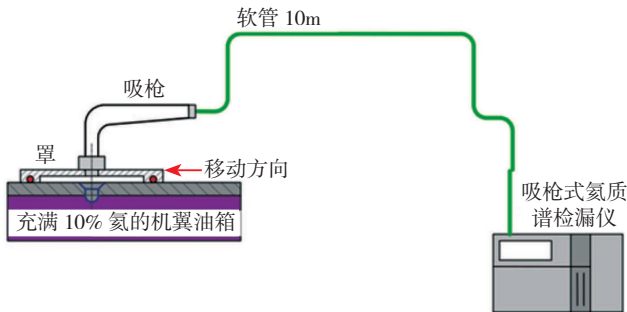


图6 氦质谱带罩盒吸枪法检漏示意图

Fig.6 Diagram of leak testing method using helium mass spectrometer with suction pistol and shroud box

差压法整体检漏大容积油箱充压变形及环境因素等对总漏率影响的消除。主要从以下几个方面来考虑:

(1) 差压检漏时测量温度、压力等对漏率值的影响;

(2) 借助一定的数据处理技术可将测量数据中的漏源和非漏源的因素区别开来,并将非漏源因素消除;

(3) 如经试验发现由于充压变形及温度等环境因素影响造成的数据波动与整体油箱总漏率合格指标相比较小,则其影响可以忽略。

整体油箱差压法总漏率检测检漏条件及合格漏率指标的确定。在进行差压整体检漏时,根据混合气体压力、氦浓度、检测时间、充气时间、平衡时间等的不同组合来进行试验。结合效率、精度和成本等因素的考虑,确定较优的检测条件。根据所确定的检测条件,按照总体方案的途径确定与油密试验压降法压力变化检漏相当的合格漏率指标。

在国内飞机制造中,部分主机厂已经将差压法整体检漏与氦吸枪法单点漏源检漏应用于整体油箱检漏中,并取得了很好的效果,这将促进先进检漏技术与检漏设计技术条件相结合,最终会实现用先进检漏方法取代传统气密试验和油密试验的目标。

5 结束语

航空领域传统的气密试验和油密试验存在着灵敏度低、效率低、操作人员劳动强度大、有安全隐患、没有量化等优点,难以满足新一代航空产品高密封可靠性的需求。在国内航空产品的设计、制造、使用和维护中急需采用先进的检漏方法。航空密封结构应用先进检漏技术和方法,建议采取如下实施措施:

(1) 积极推动先进检漏技术的交流和应用;

(2) 加快航空行业检漏方法标准的制订;

(3) 以航空产品设计院所为主导开展面向先进检漏方法的设计密封技术条件的制订和应用;

(4) 各主机厂等航空产品制造商大力开展先进检漏方法的工程应用研究;

(5) 开展航空密封结构先进检漏规范的制订和应用;

(6) 针对航空产品进行先进检漏系统技术要求的研究、制订和配置;

(7) 航空领域各检漏技术应用单位积极开展和参加航空领域检漏人员的培训和资质认证。

参考文献

- [1] 范玉青,梅中义,陶剑.大型飞机数字化制造工程.北京:航空工业出版社,2011.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局.GB/T 12604.7—1995 无损检测术语 泄漏检测.北京:国家质量监督检验检疫总局,1995.
- [3] 吴孝俭,闫荣鑫.泄漏检测.北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 闫荣鑫.常用密封检漏方法的注意事项.飞机先进泄漏检测技术交流会技术资料集,2013.

(责编 良辰)

(上接第 102 页)

理方式,精度较高,但需要编制复杂的干涉评估程序;后者适用于模型较简单、模型参数修改方便的情况,操作方便、不需要编制程序,当零件复杂时,精度会偏低。

4 总结

在大型飞机机身部件数字化装配过程中,易出现因理论数模和实际装配数据不一致导致的装配干涉现象。通过基于测量数据的数字化预装配方法可以在一定程度上,对干涉情况进行预测,并能对装配质量进行预评估。随着数字化测量技术的普及应用,高精度、自动化地获取装配实测数据越来越容易,基于实测数据数字化预装配技术在飞机装配领域将会得到更为广泛的应用和研究。

参考文献

- [1] 李泷泉,黄翔.飞机装配中的数字化测量系统.航空制造技术,2010(23):46-50.
- [2] 范玉青,梅中义,陶剑.大型飞机数字化制造工程.北京:航空工业出版社,2011:857-859.
- [3] 李剑.基于激光测量的自由曲面数字化制造基础技术研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [4] 戴国洪.数字化预装配建模与序列规划技术的研究[D].南京:南京理工大学,2007.
- [5] 梅中义,朱三山,杨鹏.飞机数字化柔性装配中的数字化测量技术.航空制造技术,2011(17):43-48. (责编 日午 亦非)