

形状记忆合金管接头技术在民用 23 部飞机液压系统中应用的适航考虑

徐海¹, 李保良¹, 杜荃², 张磊¹

(1. 中国民用航空沈阳航空器适航审定中心, 沈阳 110043;
2. 中航工业哈尔滨飞机工业集团飞机设计研究所, 哈尔滨 150066)

[摘要] 国产民用运-12F 飞机正在进行中国民用航空局和美国联邦航空管理局型号合格证适航取证工作。针对该飞机液压系统设计过程中应用了形状记忆合金管接头技术的实例, 依据中国民用航空规章 CCAR-23-R3 中适用于这种新型管路连接技术的适航条款, 对其适航审定方面的要求及符合性验证工作进行论述, 最终证明符合适航规章的具体要求。

关键词: 液压系统; 适航条款; 形状记忆合金; 通勤类飞机; 持续适航

Airworthiness for SMA Coupler Technology of Hydraulic System in Part 23 Airplane

XU Hai¹, LI Baoliang¹, DU Quan², ZHANG Lei¹

(1. Shenyang Aircraft Airworthiness Certification Center of CAAC, Shenyang 110043, China;
2. Aircraft Design and Research Institute, AVIC Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China)

[ABSTRACT] Domestic civil aircraft Y-12F is working for application for type certificate of CAAC and FAA. For the case of initial application of shape memory alloy (SMA) coupler on Y-12F airplane hydraulic system design process, according to the applicable airworthiness requirements of this new type of pipeline connection technology contained in CCAR-23-R3, its airworthiness certification requirements and compliance verification considerations are discussed in the paper. Finally, compliance with all applicable requirements has been shown.

Keywords: Hydraulic System; Airworthiness item; Shape memory alloy (SMA); Commuter category airplanes; Continued airworthiness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.12.096

航空液压系统中, 管路连接件是保证系统能量传输的通道, 既要保持内部通畅, 流阻小, 又要相对系统外部无泄漏, 管接头在这其中起到了重要作用。管接头作为飞机液压系统能量传输的重要环节, 敷设于全机各个部位, 数量众多, 并且与飞机液压系统安全性关系重大, 任何一个接头损坏, 都可能造成重大事故。因此, 选择并应用一种可靠性高、维修性好、重量轻及寿命长的管路连接接头是飞机液压系统设计工作的一项重大课题。

国产民用运-12F 飞机的液压系统设计中, 应用了新型记忆合金管接头技术, 这种新型的液压管路连接技术在国内外民航适航取证中尚属首例应用, 因此探究和解析其适航审定方法和符合性验证思路很有意义。

1 飞机液压系统管路传统连接形式

飞机液压系统管路传统连接形式一般可分为可拆

卸连接和永久性连接两种形式。

可拆卸连接形式主要有 74° 扩口连接和无扩口导管连接两种形式。永久性连接方式有钎焊接头、焊接接头、挤压式接头和热装接头。目前国内航空液压系统设计中, 永久性连接常用钎焊挤压接头和双挤压式接头两种连接形式^[1]。

管路传统连接形式需要保证较好的可达性和足够的操作空间, 另外, 由于安装受操作技术等主观因素影响较多, 容易发生跑冒滴漏等故障。因此, 在航空液压系统管路设计中应用一种新式的连接形式十分必要。

2 记忆合金管接头技术简要介绍

自发现记忆合金特殊的形状可记忆特点以来, 多国科研人员已经基于不同常规金属, 如 TiNi、Cu、Fe 等合成了多达数十种记忆合金, 并形成了多学科应用。

目前在航空液压领域中应用比较广的是 TiNiFe 低温记忆合金,记忆合金管接头的记忆功能源于 TiNiFe 记忆合金存在两个稳定相,即高温相 - 奥氏体相和低温相 - 马氏体相^[2]。

当温度低于马氏体相变温度,奥氏体相 (B2 结构) 经无扩散相变转变为孪晶马氏体相 (B19' 结构),在外力作用下孪晶马氏体去孪晶形成形变马氏体。当温度高于逆马氏体相变温度,伴随形状恢复,形变马氏体转变为奥氏体相,同时原有形状得以恢复^[3]。图 1 是 TiNi 记忆合金相变过程中结构变化示意图。

在较高温度下,记忆合金的奥氏体结构拥有和大多数金属类似的压力 - 张力曲线。而在较低温度下,其马氏体结构的压力 - 张力曲线则表现出其在“稳定”的压力下所具有的弹性特征,如图 2 所示^[4]。

新型的形状记忆合金接头也是一种新型的永久性连接方式。已经广泛应用于国产运 -12F 飞机液压系统管路中,具体应用连接形式如图 3 所示。

TiNi 基形状记忆合金管接头连接技术目前是国际

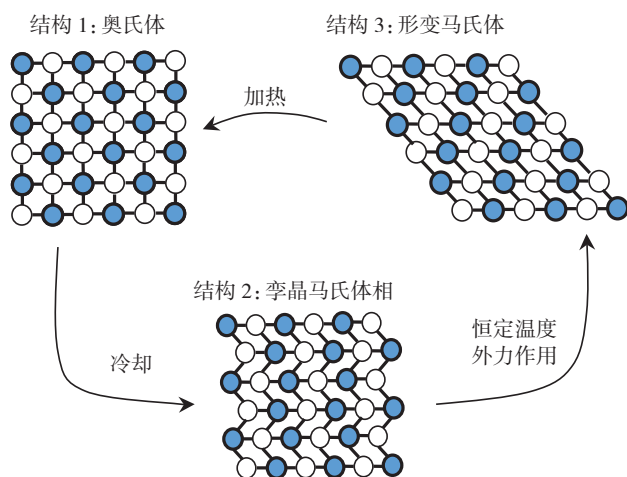


图1 TiNi记忆合金相变过程中结构变化示意图

Fig.1 Schematic diagram of structure change of TiNi memory alloy during phase transformation

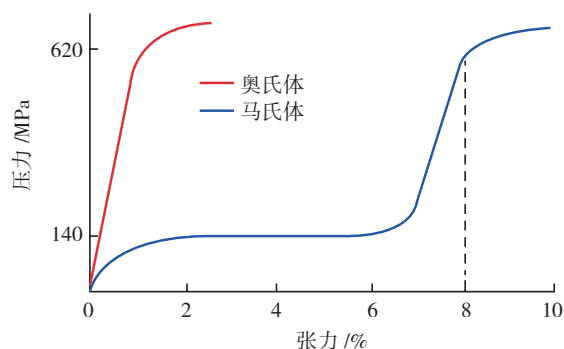


图2 压力-张力曲线

Fig.2 Curve of pressure-tension



图3 运-12F飞机液压系统应用记忆合金接头形式

Fig.3 Shape memory alloy coupler application in Y12F aircraft hydraulic system

上比较先进的管路连接技术,相较于传统的螺纹连接无扩口式管接头,具有安装工具简便、安装空间狭小、不易泄漏、重量轻、无需 X 射线等复杂检测、安装快捷、无高温作业环保性强等多方面优势。

由于具有以上众多优点,形状记忆合金技术工程化后,被迅速地应用于航空工业领域。美国 F-14 型军用战斗机的液压系统中,平均每架要用 800 多个形状记忆合金接头^[5]。此外,波音、空客、庞巴迪、塞斯纳、贝尔等众多国外民用飞机制造厂商的大量型号都不同程度地应用了此项新技术。由于记忆合金良好的适应性,其连接已经可以适用于多种不同材质的常规导管,最新的记忆合金管路连接件耐压强度已经可以达到 8000Psi。从美、欧等先进航空制造国家对记忆合金的应用历史来看,记忆管路连接件应用超过百万数量级,但泄漏案例从未见诸于公开文献。

20 世纪 60 年代至今,国内航空业生产中各种管路的连接一直沿用传统的压配、扩口螺纹连接和焊接等技术,制造工艺复杂、影响因素多、可靠性差。各类飞机中 20% 的事故出现在管路系统,管路连接是航空器研制和生产中亟待解决的关键技术问题。伴随着航空器技术的进步,管路系统的功能指标和复杂程度不断提高,传统连接技术无法满足使用要求。在这种情况下,运 -12F 飞机在设计中考虑在液压系统设计中采用记忆合金管件来实现快捷可靠的安装。

3 液压系统中应用记忆合金管接头的适航审定要求和符合性验证思路

运 -12F 飞机液压系统管路设计过程中,应用了记忆合金管接头技术,这是此项新技术在国内民用航空器领域的首次应用,是一个重大突破,也是国内民航适航审查部门需要面临的一个严峻的挑战。需要明确针对此项新技术在通勤类飞机液压系统上的应用的适航验

证思路,并结合具体的验证过程实践完善,最终完成相关的适航验证工作。通过总结相关的验证过程,最终形成民用航空器中记忆合金接头的适航审定方法,为将来此项技术在航空机载系统上的广泛应用提供实用案例及适航审定指导。

运-12F 飞机液压系

统应用的记忆合金接头是由美国 AEROFIT 公司生产,天津美隆航科技发展有限公司代理的产品。该形状记忆合金接头在美国适航当局 FAA 审查监督下已经完成了接头本身的气压、脉冲压力、爆破压力、旋转弯曲、接头强度、热冲击、应力腐蚀和耐压试验的验证。但是作为零部件应用于运-12F 飞机中,还需要随整个液压系统进行适航符合性验证,来证明运-12F 飞机液压系统使用形状记忆合金接头后可以满足中国民航的适航审定基础要求。

3.1 液压系统中应用记忆合金接头的适用条款及符合性验证流程

国产民用运-12F 飞机属于通勤类飞机,其审定基础是《正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定》(CCAR-23-R3)^[6],该适航法规是依据《民航法》制定的适航标准和审定监督规则,具有国家法律效力,带有强制性,是必须执行的最低安全标准。在民用航空产品的设计、制造、试验和试飞等各个阶段,都要确保进入民用航空运输领域的民用飞机符合规章的要求,具有规章要求的最低安全水平^[7]。CCAR-23-R3 中涉及到液压系统的条款较多,但是针对该型号民用飞机液压系统的设

表1 液压系统记忆合金接头适用的适航条款及符合性方法表

序号	适航条款	条款名称	符合性验证方法 MC
F 章: 设备			
3	23.1301	功能和安装	1,4,5,6
4	23.1309	设备系统和安装	1,3,5
5	23.1435	液压系统	1,5
G 章: 使用限制和资料			
6	23.1529	持续适航文件	1
MC0—符合性声明	MC1—说明性文件		MC2—分析/计算
MC3—安全评估	MC4—试验室试验		MC5—地面试验
MC6—飞行试验	MC7—航空器检查		MC8—模拟器试验
MC9—设备合格性			

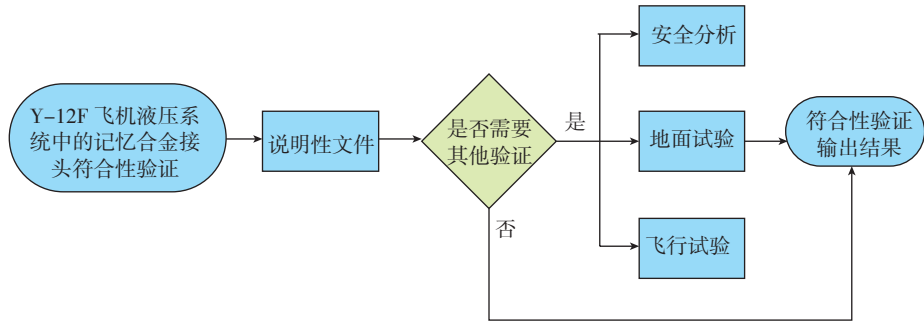


图4 形状记忆合金管接头符合性验证流程图

Fig.4 Flow chart of compliance verification of shape memory alloy coupler

计特点,对于这种新型形状记忆合金连接技术所适用的主要适航条款归纳如表 1 所示。

进行符合性验证的流程如图 4 所示。形状记忆合金管接头的符合性验证技术是试验类验证技术和安全性分析类验证技术的综合应用。

3.2 F分部: 设备适航条款

关于记忆合金管接头的设备系统方面的适航要求,规定中 23.1301 条主要是对飞机上所安装的设备的总要求。在符合性验证中,局方将组织领域专家,以工程评审的形式确定记忆合金接头是否符合相应的适航条款要求。记忆合金接头在液压系统的安装要按照专用的安装技术条件来保证其符合性,并补充全机液压系统地面试验内容及飞机试飞试验报告来证明记忆合金接头在使用过程中功能正常。典型连接形式防火试验如图 5 所示。

按照《正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定》中 23.1309 条规定,采用安全性分析说明的方法,按功能系统对形状记忆合金接头进行故障模式和影响分析(FMEA),并补充全机液压系统地面试验内容来证明记忆合金接头在使用过程中安全可靠。由于本项技术是在国内民用航空器领域的首次应用,受到资料有限、数据量少等诸多限制,增加了安全评估的难度,也是适



图5 形状记忆合金管接头典型连接形式防火试验

Fig.5 Fire-protection test of typical connection of shape memory alloy coupler

航验证技术的关键问题之一。虽然记忆合金接头本身在美国适航当局 FAA 的监督下完成了相关验证,但是由于管接头作为飞机液压系统能量传输的重要环节,敷设于全机各个部位,数量众多,与飞机液压系统安全性关系重大,决定了其安全评估工作量大,复杂性高。

《正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定》中 23.1435 条是 23 部民用飞机液压系统的专用条款,规定了系统成品设备和零部件的设计和试验、整机液压系统设计和系统级试验的适航要求^[8]。记忆合金接头供应商应提供相应的适航支持文件,用以证明其最小设计破坏压力符合 2.5 倍的工作压力,以及耐压压力符合 1.5 倍工作压力的适航条款要求。由于 Y12F 液压系统功能较为单一,没有专门组建地面铁鸟模拟试验台,因此液压系统功能性和耐久性试验考核通过飞机机上天面试验来加以验证,同时形状记忆合金接头的安装适航验证要求也随整个系统试验进行考核。

3.3 G分部:使用限制和资料

《正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定》中 23.1529 条款是关于持续适航文件的要求,23 部规章附件 G 中详细说明了持续适航文件需要包括的内容和格式。此外,附件 G 还规定了对于通勤类飞机必须提供用于该型飞机的专门修理方法。由于形状记忆合金管接头技术在国内民用航空器中应用尚处于起步阶段,其安装、检验、储存、运输,以及维修更换等操作都与传统的管接头有很大的差异,都需要在持续适航文件中加以详细说明。专门用来运输和储存记忆合金接头的专用保温容器内有不同大小和数量的分格以储存和区分不同型号的记忆合金管件,并且可循环使用。

在维修手册中一定要针对记忆合金接头安装和维修等新技术特点详细说明其具体操作规程,并应得到局方批准认可。此外,还应该在持续适航文件中列出安装和维修记忆合金接头所需要的专用工具清单,以方便相关人员在日后飞机液压系统维修和换装时参照使用。

4 结束语

根据前面几个章节的说明与介绍,可以清晰地看到,尽管记忆合金管接头在国内是一种新材料、新技术,但在中国民航的适航审定条款中已经涵盖了对自身安全性与可靠性的要求与限制,可以通过多种符合性验证方法对其进行考核、检查。必须指出的是,民用航空适航条例仅仅是对民用航空器研制过程的总体管控,是航空器所要满足的最基本安全要求。具体型号的航空器液压系统如果想要达到更高安全性能标准,还必须通过申请人更科学系统的设计和质量保证体系以及更合理可行的适航符合性验证工作来实现。今后深入

研究记忆合金接头专用的适航审定方法、符合性验证试验以及完善持续适航等要求,是下一步开展形状记忆合金管接头技术适航审定方法研究的重要课题。

参考文献

[1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 12 册. 北京: 航空工业出版社, 2003.

Aircraft Design Manual Editorial Committee. Aircraft design manual chapter 12. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.

[2] SDL F, URBINA C, FERRANDO F. Constitutive model of shape memory alloys: theoretical formulation and experimental validation[J]. Geochemistry International, 2006,427(1-2):112.

[3] Humbeeck J V. Shape memory alloys: a material and a technology[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(11):837-850.

[4] DU Q X H. Shape memory alloy in various aviation field[J]. Procedia Engineering, 2015,99:1241-1246.

[5] 杨冠军, 杨华斌, 曹继敏. 我国形状记忆合金研究与应用的新进展 [J], 材料导报, 2004, 18(2):42-44.

YANG Guanjun, YANG Huabin, CAO Jimin. New advances in research and applications of shape memory alloys in china[J]. Materials Review, 2004,18(2):42-44.

[6] 中国民用航空局. CCAR-23R3 正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定 [S], 2005.

CAAC. CCAR-23R3 airworthiness standards: normal, utility, acrobatic and commuter category airplanes[S], 2005.

[7] 赵越让. 适航理念与原则 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.

ZHAO Yuerang. The concept and principle of airworthiness[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2012.

[8] 张瑞华. 民机液压能源系统防火安全性适航条款符合性分析 [J]. 航空科学技术, 2012(5):70-71.

ZHANG Ruihua. Analysis to compliance with the airworthiness item of fire-protection of hydraulic system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(5):70-71.

(责编 大漠)

(上接第 95 页)

international BBS of aeronautics and astronautics welding. The Chinese Mechanical Engineering Society, 2004.

[3] 门向南, 童国权, 徐雪峰, 等. TC4 钛合金双层板结构超塑成型 / 扩散连接工艺 [J]. 机械工程材料, 2010(5):86-89.

MEN Xiangnan, TONG Guoquan, XU Xuefeng, et al. Processing of superplastic forming and diffusion bonding for two-sheet structure of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010(5): 86-89.

[4] 赵林博, 徐姗姗. 钛合金超塑成形工艺及应用 [J]. 创新科技导报, 2011(19): 59.

ZHAO Linbo, XU Shanshan. Technology and application of superplastic forming of titanium alloy[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011(19): 59.

(责编 大漠)