

# 记忆合金接头适航审查符合性方法研究

徐海<sup>1</sup> 王征<sup>2</sup> 张磊<sup>1</sup> 谷峰<sup>2</sup> 盖迪<sup>3</sup>

(1 中国民用航空沈阳航空器适航审定中心, 沈阳 110043)

(2 航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 哈尔滨 150066)

(3 沈阳航空航天大学安全工程学院, 沈阳 110136)

**文 摘** 形状记忆合金已广泛应用于美国军机及空客、波音民用机型,并首次在国产运12F型机成功应用且通过适航审查。为突破进口管接头适航验证技术壁垒,建立自主适航审定标准,本文基于运12F进口产品适航验证经验,首次对国产形状记忆合金管接头开展系统性试验。结果表明:国产接头在火焰耐受性(5 min无失效)、爆破强度(临界值35 MPa)、耐压稳定性(21 MPa保压合格)及重复装配性能(8次拆装后密封达标)等核心指标上均达到进口产品水平,符合国际适航标准。确定了国产记忆合金管接头的主要失效模式及可采用的符合性方法,并依据相应符合性方法初步建立了适航验证方法,为建立国产记忆合金管接头适航审定方法和标准奠定了基础。

**关键词** 液压系统,适航审查,形状记忆合金,符合性验证,持续适航

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.014

## Study on Conformity of Airworthiness Examination of Memory Alloy Joints

XU Hai<sup>1</sup> WANG Zheng<sup>2</sup> ZHANG Lei<sup>1</sup> GU Feng<sup>2</sup> GAI Di<sup>3</sup>

(1 Shenyang Aircraft Airworthiness Certification Center of Civil Aviation of China, Shenyang 110043)

(2 AVIC Harbin Aircraft Industry Group Co. LTD, Harbin 150066)

(3 School of Safety Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136)

**Abstract** Shape memory alloys have been widely used in U. S. military aircraft and Airbus/Boeing civil aircraft models, and were first successfully applied in the domestic Yun12F aircraft with airworthiness certification approval. To break through the airworthiness verification technical barriers of imported pipe joints and establish independent airworthiness certification standards, this study conducted systematic tests on domestic shape memory alloy pipe joints for the first time, based on airworthiness verification experience with imported products from the Yun12F. Results demonstrate that domestic joints have reached imported product levels in core performance metrics: flame resistance (5 min exposure without failure), burst strength (critical value 35 MPa), pressure stability (21 MPa pressure maintenance qualified), and repeated assembly performance (maintained sealing after 8 disassemblies), all complying with international airworthiness standards. The research identified primary failure modes of domestic memory alloy pipe joints and applicable compliance methods, preliminarily establishing airworthiness verification methodologies. This lays the foundation for developing domestic airworthiness certification methods and standards for shape memory alloy pipe joints.

**Key words** Hydraulic system, Airworthiness review, Shape memory alloy, Conformity verification, Continued airworthiness

### 0 引言

记忆合金拥有超弹性特性能使材料在频繁形变下仍能恢复原状,适用于高循环应力部件,延长使用寿命并降低维护频率,利用超弹性特性吸收振动能量,耐受

高空低温、高速高温,保持性能稳定。研究人员被其良好的性能所吸引。运用形状记忆合金管接头替代传统的钢制管接头具有更高的紧固力,提高了管接头与连接管之间的密封程度,使飞机更加安全可靠<sup>[1-4]</sup>。形

收稿日期:2023-07-07

基金项目:民航安全能力建设基金(AADSA2021018)

第一作者简介:徐海,1981年出生,主要从事飞行器适航管理与审定技术工作。E-mail: xuhai\_acc@caac.gov.cn

通信作者:盖迪,1985年出生,副教授,博士,研究生导师,主要从事飞机材料及结构件适航审定技术的研究工作。E-mail:gd\_hero@163.com

状记忆合金最早作为永久接头应用于F-14液压系统钛合金管路,并逐步推广到民用飞机中,连接工作压力高达35 MPa的铝合金、钛合金和不锈钢液压管路中。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。记忆合金管接头已经广泛应用于Airbus的A320/A340/A350、Boeing的B747/B787/C17等机型中。记忆合金接头可以应用于13.8~34.5 MPa压力系统中,满足SAE的AS7003<sup>[5]</sup>/AS85421<sup>[6]</sup>/AS85720<sup>[7]</sup>/AS18280<sup>[8]</sup>/AS4459<sup>[9]</sup>标准。

国际航空领域运用形状记忆合金已愈加广泛。国内记忆合金在不断发展中形成了一些相关标准,如《钛镍形状记忆合金化学分析方法-第1部分:镍量的测定-丁二酮肟沉淀分离-EDTA络合-氯化锌返滴定法》<sup>[10]</sup>,《钛镍形状记忆合金化学分析方法-第2部分:钴、铜、铬、铁、铌量的测定-电感耦合等离子体发射光谱》<sup>[11]</sup>,《医疗器械和外科植入物用镍-钛形状记忆合金加工材》<sup>[12]</sup>,《镍钛铌形状记忆合金棒材规范》<sup>[13]</sup>,《形状记忆合金紧固环规范》<sup>[14]</sup>。近几年来,国内有多家单位对形状记忆合金管接头的应用进行了研究<sup>[15-16]</sup>。韩立军等<sup>[17]</sup>讨论了冷热循环对TiNi记忆合金接头相变温度的影响;张凌云等<sup>[18]</sup>对记忆合金接头航空导管随机振动进行了仿真与实验研究,建立了有效模拟记忆合金接头振动的数学模型;文献<sup>[19]</sup>发明了一种钛镍铁记忆合金接头低温失效检测装置;尹向前等<sup>[20]</sup>研究了TiNiNb形状记忆合金管接头特性;林成新等<sup>[21-22]</sup>对Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni形状记忆合金接头特性进行了研究分析;韩冬等<sup>[23]</sup>对不同壁厚的TiNiFe形状记忆合金管接头紧固力的模拟计算;陈翔等<sup>[24-25]</sup>对NiTiNb记忆合金接头进行了特性研究分析。在不降低密封性能及强度的情况下,使用记忆合金接头,省去了管路端面加工设备、挤压设备及力矩扳手等工具,大大简化了管接头安装的工作量。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、可靠性高、不易泄漏、质量轻、无须X射线等复杂检测、安装快捷并节省装配空间、无高温作业环保性强等多方面优势。

航空液压管接头在飞机液压系统中数量多、分布广泛,任何一处出现泄漏都将造成飞机液压系故障,导致飞机无法正常操作,进而引发重大的飞行事故。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,这种新型的液压管路连接技术在国内民航适航取证中尚属首例应用,该形状记忆合金接头已通过美国FAA审查,完成气压、脉冲压力、爆破压力等多项试验验证。同时,其作为飞机零部件通过了中国CAAC沈阳审定中心的适航审查。如图1所示,这是此项新技术在国内民用航空器领域的首次应用的一个重大突破<sup>[26]</sup>。同时国内形状记忆合金管接头的研发还面临一些技术难点:(1)材料制备,在《镍钛铌形状记忆合金棒

材规范》中,镍钛铌合金成分虽简单,但加工精度要求极高,需突破材料制备关键技术;(2)设计制造,需通过大量试验确定过盈配合的壁厚与过盈量参数,且低温扩径时10%的变形量易导致接头损伤。



图1 运12F飞机液压系统应用记忆合金接头技术  
Fig. 1 Application of memory alloy joint technology in 12F aircraft hydraulic system

当前国产产品在航空领域应用尚处初期,缺乏成熟产品和统一行业标准,不同的院所、高校以及企业的接头设计差异较大。而进口产品价格攀升及技术垄断的现状,与国内技术逐步成熟的趋势形成反差。不同航空器类型的液压系统 in 应用场景、作业环境和功能需求上存在明显的差异,因此在审定过程中需要根据具体应用场景和需求制定专门的审定方案。需加快国产化进程,制定统一行业标准及适航审查指南,推动国产记忆合金接头在航空领域的规模化应用,建立国产液压系统记忆合金管接头相应的适航标准体系,是目前国内民航适航审查部门需要面临的一个迫切任务和

挑战。  
本文开展管接头性能评价试验,对国产记忆合金管接头进行防火、爆破、耐压及重复装配试验,拟建立自主适航审定标准。

## 1 试验

对管接头进行了防火、爆破、耐压及重复装配4项试验。试验内容中提到的最大、最小拧紧力矩应符合《挤压式无扩口导管安装拧紧力矩及试验要求》<sup>[27]</sup>、《扩口管路连接件技术条件》<sup>[28]</sup>的有关规定,试验件目录见表1。

表1 试验件目录  
Tab. 1 List of test parts

| 名称        | 材料标准        | 内径/mm       | 外径/mm       |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 液压管路      | Z2CN1810    | 5           | 6           |
|           |             | 6.8         | 8           |
|           |             | 8.6         | 10          |
| 记忆合金直通管接头 | SCD921984C  | 6.08~6.17   | 8.55~8.75   |
|           |             | 10.08~10.23 | 13.83~14.05 |
| 记忆合金连接螺母  | SCD921456TC | 8.15~8.24   | 17          |
|           |             | 6           | 7.9         |
| 密封内接头     |             | 10.2        | 13.4        |
|           |             | 8.15~8.24   | 17          |
| 连接螺母      | 标准件         | 14.15~14.26 | 24          |
|           |             | 7.5         | 12          |
| 塞子        |             | 8.5         | 14          |
|           |             | 11.5        | 16          |

### 1.1 防火试验

防火试验件的管路外径为 $\Phi 10$  mm(1件),试验件结构示意图见图2。试验采用型号为T-SB11-0的防火试验系统,用S分度的铠装铂铑-铂热电偶精确测量火焰温度,控制实验条件。试验在温度为5~38℃环境下进行,试验中火焰温度为 $(1090\pm 80)$ ℃,热流量的密度为 $(116\pm 3)$  kW/m<sup>2</sup>,并要求火焰面积 $\geq 0.018$  m<sup>2</sup>。试件经受火焰作用的一端同时应经受振动作用。利用DF1405C的函数信号发生器营造试验件承受的规定振动,振动可以沿横向或纵向进行。振幅为 $\pm 1.59$  mm,频率为33 Hz,振幅和频率的允许误差为 $\pm 2\%$ 。工作介质采用15#航空液压油,油液温度93~110℃,油液压力为14 MPa,采用LWGY-6B的流量传感器监测工作介质的流量。试验要求:在5 min火焰作用时间内,试件不应出现破裂或渗漏;在试验期间,试验件应水平安装,并且记忆合金直通管接头和127 mm长度应受到火焰包围;试验件表面距燃烧器喷嘴断面距离约为75 mm;试验前须对燃烧器进行校准,使火焰温度和热流量密度达到稳定状态。实验设备及试验件安装见图3。

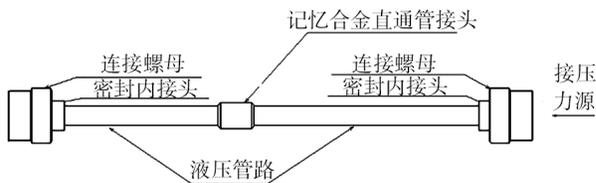


图2 试验件结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the test piece



图3 实验设备及试验件安装

Fig. 3 Installation of experimental equipment and test pieces

### 1.2 爆破试验

爆破试验件的管路外径为 $\Phi 6$  mm(1件),试验件结构示意图见图4。试验用仪器设备与型号及其精度见表2,表中仪器设备均有合格证并在检定有效期内。导管 $\Phi$ 为6 mm时,规定的最小拧紧力矩值为7.6 N·m,最大拧紧力矩值为17 N·m。试验安装示意图见图5。试验件的一端用塞子堵住,按最小拧紧力矩拧紧,并使其处于自由状态;试验件的另一端接到手打泵上,按最大拧紧力矩拧紧,由手打泵提供压

力,通过压力表观察试验压力,用球阀保持试验压力;试验过程中将试验件放置于安全箱内。爆破试验应在环境温度下进行,在施加压力之前,要排放系统中的空气,按35 MPa压力进行爆破压力试验,试验时间为3 min,升压速率为 $(150\pm 37.5)$  MPa/min。试验期间不出现渗漏及破坏现象即为试验成功。

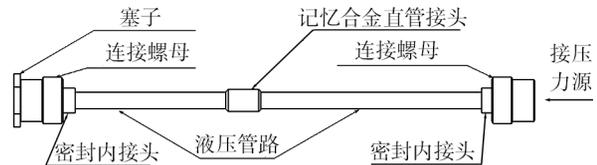


图4 试验件结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of the test piece

表2 爆破试验仪器设备与型号及其精度

Tab. 2 Bursting test instruments and equipment and their model accuracy

| 名称   | 型号         | 精度           |
|------|------------|--------------|
| 定力扳手 | WEC3-135AN | $\pm 2\%$    |
| 压力表  | 0~40 MPa   | 1.5级         |
| 秒表   | TS2101-2   | $\pm 0.01$ s |
| 手打泵  | WRAN       | -            |



图5 试验件安装

Fig. 5 Installation of test parts

### 1.3 耐压试验

耐压试验件共2件,其中1件管路外径为 $\Phi 6$  mm,另1件管路外径为 $\Phi 10$  mm。两种试验件结构均与爆破试验件的结构相同,示意图见图6。试验在环境温度下进行,在施加压力之前,排放系统中的空气。将试验组件一端拧紧接到压力源上,另一端用塞子拧紧,使其自由活动。对接好的试验件进行耐压试验(压力为0.5、6、9、10.5、14、21 MPa),每阶段试验时间均为3 min,试验压力为0.5、6、9 MPa时,升压速率应为 $(30\pm 7.5)$  MPa/min;试验压力为10.5、14、21 MPa时,升压速率应为 $(150\pm 37.5)$  MPa/min。每组试验组件必须经过验证压力试验的验证,当验证试验时,不允许有渗漏现象,系统的任何零件不得损坏、出故障或产生永久变形。



图6 外径为Φ6 mm的试验件安装

Fig. 6 Installation of test parts with an outside diameter of Φ6 mm

### 1.4 重复装配试验

重复装配试验件的管路外径为Φ8 mm的液压导管1件,试验件结构示意图见图7。试验用仪器设备及型号及其精度与爆破试验相同。导管直径为Φ8 mm时,规定的最小拧紧力矩值为9.6 N·m,最大拧紧力矩值为21.4 N·m。将试验组件一端用塞子按规定的最小拧紧力矩值拧紧,另一端用塞子按规定的最大拧紧力矩值拧紧,并对导管组件和塞子等连续进行8次分解和重新安装,每次分解包括将导管组件和塞子完全分开,再用原拧紧力矩重新拧紧,安装时要求螺母不应变形导致其六方面无法与开口扳手啮合;应能够徒手把连接件装到连接点;最终试验后分解时,螺母应能够用手自由转动。

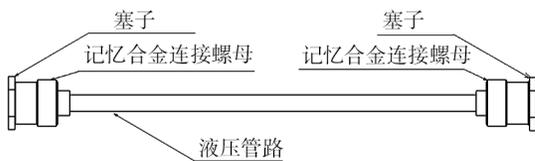


图7 试验件结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of the test piece

在重复装配试验中,在第1次、4次和8次装配后,以21 MPa进行3 min的耐压试验,试验升压速率为(150±37.5) MPa/min,在任何一次耐压试验中记忆合金直通管接头和记忆合金连接螺母应均无渗漏。耐压试验安装示意图见图8。试验组件在完成重复装配试验后,须进行验证压力试验,试验时不允许有渗漏现象,系统的任何零件不得损坏、出故障或产生永久变形。



图8 耐压试验安装示意图

Fig. 8 Installation diagram of pressure test

## 2 结果分析及讨论

由于记忆合金管接头自身的特点,可将其失效模式分为显性和隐性,易发现的可称之为显性失效模式,而通过分析、测量、验证以及试验等才能发现的则可称之为隐性故障,目前国内的研究基本处于显性故障的研究阶段,隐性故障的分析及验证方法需进一步研究。在适航审定的过程中,满足条款要求,识别全部故障,保证其安全性是适航审定工作的要点。运12F飞机在当年中美两国适航当局同步审查期间,申请人所用的记忆合金接头为美国 Aerofit 公司生产并提供,根据CCAR-21-R3中关于零部件、机载设备批准方式的规定,沈阳审定中心审查组代表对其进行了装机批准审查,重点关注了液压系统机上安装检查、系统压力验证试验、系统机上海面功能试验、功能可靠性试飞、高低温条件试飞等验证,针对运12F飞机记忆合金连接技术所适用的CCAR-23-R3主要适航条款以及所做的符合性验证方法,归纳如表3所示。

表3 记忆合金接头适用的适航条款及符合性方法表  
Tab. 3 Airworthiness terms and compliance methods applicable to memory alloy joints

| 序号         | 适航条款 | 条款名称    | 符合性验证方法   |
|------------|------|---------|-----------|
| F章:设备      |      |         |           |
| 1          | 1301 | 功能和安装   | 1、2、4、5、6 |
| 2          | 1309 | 设备系统和安装 | 1、2、3、5   |
| 3          | 1435 | 液压系统    | 1、2、5、7   |
| G章:使用限制和资料 |      |         |           |
| 4          | 1529 | 持续适航文件  | 1         |

### 2.1 防火试验结果

液压记忆合金管路防火试验结果显示,试验件在各项规定试验条件下,经5 min火焰作用后未出现破裂或渗漏现象,满足试验合格判据,试验成功,防火试验后试验件状态见图9。



图9 试验后试验件状态

Fig. 9 Test part status after test

在试验过程中火焰温度测量值为1 078~1 170 °C,标定水流量为226 L/h,热交换管两端温度差是2.8 °C,由此计算出热流量密度为114.78 kW/m<sup>2</sup>,均满足试验要求。同时试验环境及工况稳定,环境温度为19.8 °C,油液温度为94.8~99.7 °C,油液流量为0.44 L/min,油液压力为14 MPa,振动幅

度为 $\pm 1.60$  mm,均符合试验条件规定范围。这说明在实际应用中,即使在高温火焰环境下,管接头也能保持稳定,有效防止火灾对液压系统的破坏,从而保障飞机安全。

我们也必须清醒地认识到,形状记忆合金管接头在实际使用过程中存在一些显性失效模式。在储存和运输阶段,由于液氮极易快速挥发,这可能导致管接头失效。液氮作为一种常用的低温保存介质,在特定的储存和运输条件下,其挥发速度难以精准控制,一旦挥发过程失去控制,就可能对管接头的性能产生不利影响。在安装环节,如果操作人员缺乏专业培训,操作手法不当,就极有可能导致人员被冻伤。另外,温度的变化也是一个不可忽视的因素。无论是在管接头的安装过程中,还是在其后续的使用过程中,温度的波动都有可能致使记忆合金管接头无法顺利装配,或者即使勉强装配完成,也可能在后续的使用过程中出现失效的情况。一旦出现这些问题,管接头的密封性能和结构完整性必然会遭到严重破坏。在高温火焰环境下,原本稳定的管接头就极有可能出现破裂或渗漏现象,这将对飞机的安全构成严重威胁,可能引发一系列难以预估的飞行事故。

鉴于以上情况,严格规范操作流程就显得尤为重要。规范的操作流程不仅能够有效避免因操作不当导致的人员伤亡和设备损坏,还能确保管接头在各种复杂环境下始终保持良好的性能。因此,在进行符合性验证时,可通过资料审查、制造符合性审查等多种方式,确保记忆合金在从运输到装配的整个应用过程中,拥有完整、准确且有效的工艺流程,并且每一个环节都严格按照既定流程执行。资料审查能够对整个应用过程中的文件资料进行细致梳理,检查流程是否合理、是否存在漏洞;制造符合性审查则可以深入到生产制造的现场,对实际操作过程进行监督和检查,确保每一个操作步骤都符合规范要求。

## 2.2 爆破与耐压试验结果

液压记忆合金管路爆破试验期间,试验件无渗漏现象,系统内任何零件均未出现损坏、故障或产生永久变形,试验判定为合格。耐压试验也无渗漏现象,系统的任何零件无损坏、无故障且未产生永久变形。

综合爆破试验和耐压试验的结果来看,这充分表明在实际的飞机液压系统应用场景中,该记忆合金接头在面对高强度压力时,具备出色的稳定性和可靠性,能够持续保持稳定可靠的工作状态,为飞机液压系统的安全稳定运行提供了强有力的保障。飞

机液压系统作为飞机飞行安全的关键系统之一,其运行的可靠性直接关系到飞机的整体飞行安全。记忆合金接头作为液压系统中的重要部件,其稳定的性能对于整个液压系统的正常运转至关重要。这对于隐性失效模式的研究意义重大,因为在飞机的实际飞行过程中,管接头会面临多种复杂的环境因素影响。例如,飞机在飞行过程中会产生持续的振动,这种振动会使管接头不断受到交变应力的作用,长期积累下来可能导致管接头出现疲劳损伤。此外,飞机在不同的飞行高度和飞行阶段,环境温度会发生显著变化,管接头材料的性能会随着温度的波动而改变,这也可能引发管接头的失效。而本次试验所验证的稳定耐压性能,是管接头在复杂环境下可靠工作的基础。只有确保管接头在承受各种压力时都能保持稳定,才能进一步研究和应对其他复杂因素对管接头产生的隐性失效影响,从而为飞机液压系统的优化设计和安全运行提供更全面、更深入的理论依据和实践支持。

## 2.3 重复装配试验结果

液压记忆合金管路重复装配试验历经8次分解和重新安装。每一次操作,均对记忆合金连接螺母的性能进行了全面且严格的检验,发现螺母均能用手工自由转动,连接件可徒手装到连接点,螺母无变形,六方与开口扳手啮合良好。同时,在第1次、4次和8次装配后进行21 MPa、3 min的耐压试验,升压速率符合 $(150\pm 37.5)$  MPa/min的要求。每次耐压试验中,试验件均无渗漏和破坏现象,系统内任何零件都未出现损坏、故障或永久变形。试验组件完成重复装配试验后,经压力试验验证,无渗漏现象,系统零件状态良好,符合试验合格标准。

这体现了记忆合金连接螺母良好的重复使用性能,在飞机维护等需要多次装配的场景中具有极高的实用价值。同时,也证明了在装配环节规范操作的重要性,故障的分析及验证方法需进行深入研究。目前,国内针对记忆合金的研究仅停留在基本的显性和简单隐性故障模式上,而形成的适航验证经验是否具有普适性也需进一步研究。

## 2.4 主要隐性失效模式及可采用的符合性方法

记忆合金管接头的隐性失效模式可根据典型机载环境要求,如温度环境、高度环境、振动环境等,通过正向分析法或故障分析法识别记忆合金管接头与管路连接后的风险要素。通过建立仿真分析模型和物理试验分析,根据有限元分析和试验结果、设计数据、工作条件、故障模式及失效影响等因素的分析建立可靠性评价模型,以实现记忆合金管接头与管路连接后的风险要素评估,掌握风险要素的有效规避

方法。

由于振动引发的隐性故障机理比较明确,可搭建记忆合金接头液压管路系统试验台,针对民用航空器液压管路系统空间受限、直径小、发动机等部位基础振动剧烈、高温影响、强压力脉动冲击等特殊

性,采用新型光纤光栅分布式传感测量技术,基于系统模型实验,研究接头失效工况下,结构参数、装配工艺参数和载荷参数对管路系统振动和应变的影响规律;确定记忆合金管接头隐性故障的影响,其具体路线图如图10所示。

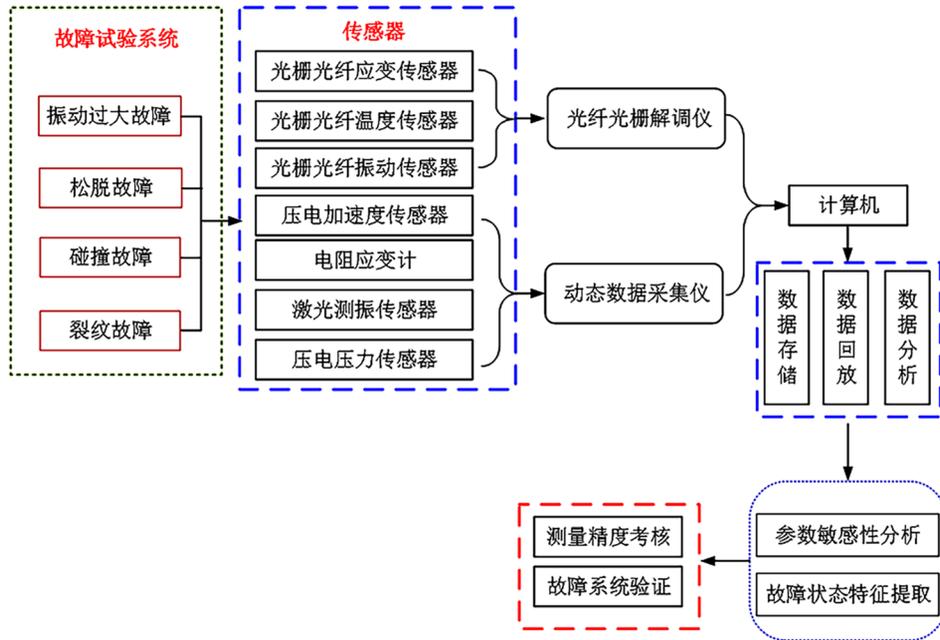


图10 具体技术路线图

Fig. 10 Specific technology roadmap

在符合性验证中,可通过故障分析法、试验室试验、装机试验等审查确保记忆合金的应用过程中不会出现隐性故障。

### 3 结论

(1)记忆合金接头适航审查方法在技术验证上进行了创新,首次对国产记忆合金管接头开展防火试验、爆破试验、耐压试验以及重复装配试验,试验结果显示,试件能承受 $(1\ 090\pm 80)$  °C火焰作用5 min;以 $(150\pm 37.5)$  MPa/min的升压速率施加35 MPa压力作用3 min;施加0.5、6、9、10.5、14、21 MPa压力分别作用3 min;多次重复装配且在第1次、4次、8次重复装配后进行21 MPa耐压试验,而保持未出现渗漏现象,系统的任何零件无损坏、无故障且未产生永久变形。这表明了国产记忆合金管接头与进口记忆合金接头性能相当,符合FAA、CAAC等相关审定标准。

(2)记忆合金接头适航审查方法在适航方法上进行了创新,结合符合性试验设计方案及试验结果,分析并验证了国产液压系统记忆合金及管路连接方法的特点。研究确定了国产记忆合金管接头的主要失效模式及可采用的符合性方法,并依据相应符合性方法初步建立了适航验证方法,确保了系统安全,提高了审查效率,便于航空器设计及制造企业使用

国产记忆合金管路连接方法,为建立国产记忆合金管接头适航审定方法和标准奠定了基础。

(3)为进一步掌握记忆合金接头显性及隐性失效模式,需提炼切实可行的具有普遍适用性的适航审定标准、审查关注要点及审定流程,保证其安全性。在今后的研究中应对国产记忆合金管接头开展包括但不限于耐压压力试验、爆破压力试验、液压脉冲试验、振动试验、压力脉冲试验以及耐火实验等,对其耐久性、可靠性和安全性进行系统分析。

### 参考文献

[1] XIAO L, LIU F S, XU H B. Phase transformation behaviors and shape memory effects of TiNiFeAl shape memory alloys [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 14(3): 256-260.

[2] ZHANG B C, CHEN J, CODDET Christian. Microstructure and transformation behavior of in-situ shape memory alloys by selective laser melting Ti-Ni mixed powder[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29 (9) : 863-867.

[3] 李志云,刘福顺,徐惠彬. Fe元素对TiNi形状记忆合金相变点和力学性能的影响[J]. 航空学报, 2004(1): 84-87.

LI Z Y, LIU F S, XU H B. Effect of Fe element on phase transition point and mechanical properties of TiNi shape memory alloy [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2004(1): 84-87.

[4] JIANG X, HIDA M, TAKEMOTO Y, et al. In situ observation of stress-induced martensitic transformation and plastic deformation in TiNi alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, 238(2):303-308.

[5] SAE AS 7003, National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program (Nadcap) Program Operation [S]. 1990.

[6] SAE AS 85421, Fitting, Union, Beam Seal, 3000/4000 Psi, Male Ends[S]. 1998.

[7] SAE AS 85720, Fittings, Tube, Fluid Systems, Separable, High Pressure Dynamic Beam Seal, 5000/8000 Psi, General Specification for AS85720[S]. 2004.

[8] SAE AS 18280, Fittings, 24° Cone Flareless, Fluid Connection, 3000 Psi[S]. 2021.

[9] SAE AS 4459, Fittings, Tube, Fluid System 3000 Psig (21 000 kPa) Rated Pressure, Externally Swaged, Specification for AS4459B[S]. 2013.

[10] 全国有色金属标准化技术委员会. 钛镍形状记忆合金化学分析方法-第1部分:镍量的测定-丁二酮肟沉淀分离-EDTA络合-氯化锌返滴定法:GB/T 23614. 1—2009[S]. 中国标准出版社, 2009.

National Technical Committee for Standardization of Nonferrous Metals . Chemical Analysis Methods for Titanium-Nickel Shape Memory Alloys-Part 1: Determination of Nickel Content-Butanedione Oxime Precipitation Separation-Edta Complexation-Zinc Chloride Back Titration Method: GB/T 23614. 1—2009[S]. China Standards Press, 2009.

[11] 全国有色金属标准化技术委员会. 钛镍形状记忆合金化学分析方法-第2部分:钴、铜、铬、铁、铌量的测定-电感耦合等离子体发射光谱法:GB/T 23614. 2—2009[S]. 中国标准出版社, 2009.

National Technical Committee for Standardization of Nonferrous Metals . Chemical Analysis Methods for Titanium-Nickel Shape Memory Alloys-Part2: Determination of Cobalt, Copper, Chromium, Iron and Niobium Contents-Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry: GB/T 23614. 2—2009[S]. China Standards Press, 2009.

[12] 全国外科植入物和矫形器械标准化技术委员会 (SAC/TC 110). 医疗器械和外科植入物用镍-钛形状记忆合金加工材:GB 24627—2009[S]. 中国标准出版社, 2009.

National Technical Committee for Standardization of Surgical Implants and Orthopedic Devices (SAC/TC 110). Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Processing Materials for Medical Devices and Surgical Implants: GB 24627—2009 [S]. China Standards Press, 2009.

[13] 镍钛铌形状记忆合金棒材规范[S]. 2015.

Specification for Niobium shape memory alloy bars [S]. 2015.

[14] 形状记忆合金紧固环规范[S]. 2015.

Shape memory alloy fastening ring specification[S]. 2015.

[15] 王磊, 闫德胜, 姜志民, 等. Ni-Ti-Nb宽滞后形状记忆合金管接头研究和进展[J]. *材料工程*, 2004(7):60-63.

WANG L, YAN D S, JIANG Z M, et al. Research and progress of Ni-Ti-Nb wide hysteresis shape memory alloy pipe joints[J]. *Materials Engineering*, 2004(7):60-63.

[16] 周旭昌, 曾光廷, 霍永忠, 等. 形状记忆合金管接头的工作原理及研究进展[J]. *机械*, 2002(3):1-3, 34.

ZHOU X C, ZENG G Y, HUO Y Z, et al. Working principle and research progress of shape memory alloy pipe joints [J]. *Machinery*, 2002(3):1-3, 34.

[17] 韩立军, 朱俊洁, 韩立红, 等. 冷热循环对TiNi记忆合金接头相变温度的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2002(12):5-8.

HAN L J, ZHU J J, HAN L H, et al. Effect of hot and cold cycling on phase transition temperature of TiNi memory alloy joints [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002 (12):5-8.

[18] 张凌云, 周帅, 孟伟琪, 等. 记忆合金接头航空导管随机振动实验研究[J]. *中国工程机械学报*, 2018, 16(2): 95-100.

ZHANG L Y, ZHOU S, MENG W Q, et al. Experimental study on random vibration of memory alloy joint aerial duct [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2018, 16 (2) : 95-100.

[19] 中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所. 一种钛镍铁记忆合金接头低温失效检测装置:201510512142. 0 [P]. 2015-11-18.

Xi'an Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China . A Low-Temperature Failure Detection Device For Titanium-Nickel-Iron Memory Alloy Joints:201510512142. 0[P]. 2015-11-18.

[20] 尹向前, 高宝东, 米绪军. TiNiNb形状记忆合金管接头径向压应力的模拟计算[J]. *稀有金属*, 2008(5):579-583.

YIN X Q, GAO B D, MI X J. Simulation of radial compressive stress of TiNiNb shape memory alloy pipe joint [J]. *Rare Metals*, 2008(5):579-583.

[21] 林成新, 谷南驹, 赵连城. Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni形状记忆合金管接头性能分析[J]. *材料工程*, 2001(11):16, 21-24.

LIN C X, GU N J, ZHAO L C. Performance analysis of Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni shape memory alloy pipe joint [J]. *Materials Engineering*, 2001(11):16, 21-24.

[22] 林成新, 谷南驹, 赵连城. Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni形状记忆合金管接头恢复特性分析[J]. *河北工业大学学报*, 2001(4):1-4.

LIN C X, GU N J, ZHAO L C. Recovery characteristics analysis of Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni shape memory alloy pipe joint [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2001 (4) : 1-4.

[23] 韩冬, 刘福顺, 李岩, 等. 不同壁厚的TiNiFe形状记忆合金管接头紧固力的模拟计算[J]. *航空学报*, 2006(4):

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第3期

703-707.

HAN D, LIU F, LI Y, et al. Simulation of fastening force of tinife shape memory alloy pipe joints with different wall thicknesses [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006(4):703-707.

[24] 陈翔,陈伟,赵洋,等. 考虑塑性变形和相变耦合效应的NiTiNb记忆合金管接头装配性能模拟[J]. *金属学报*, 2020,56(3):361-373.

CHEN X, CHEN W, ZHAO Y, et al. Assembly performance simulation of NiTiNb memory alloy pipe joint considering plastic deformation and phase change coupling effect [J]. *Acta Metalica Sinica*, 2020,56(3):361-373.

[25] 陈翔,陈伟,禄盛,等. NiTiNb记忆合金热力学性能的试验及其唯象本构模型[J]. *机械工程学报*, 2020,56(4):65-75.

CHEN X, CHEN W, LU S, et al. Experimental study on

thermodynamic properties of NiTiNb memory alloy and its phenomenological constitutive model [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020,56(4):65-75.

[26] 欧阳小平,方旭,朱莹,等. 航空液压管接头综述[J]. *中国机械工程*, 2015,26(16):2262-2271.

OUYANG X P, FANG X, ZHU Y, et al. Overview of aviation hydraulic pipe joints [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(16):2262-2271.

[27] 挤压式无扩口导管安装拧紧力矩及试验要求:HB 7000-2008[S],1994.

Tightening torque and test requirements for installation of extruded conduit without flapping:HB 7000-2008[S],1994.

[28] 扩口管路连接件技术条件:HB 4-1-1983[S],1984.

Technical conditions for flaring pipe connectors:HB 4-1-1983[S],1984.