

钛合金无扩口组合导管滚压连接工艺研究

张海宝 耿育科 任国辉 王 辉 毛晓博
(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 文章采用试验和有限元仿真对比及迭代优化的方法, 分析了钛合金导管无扩口滚压过程中管材的变形过程, 确定了滚压工艺参数(滚压力矩)、滚柱角度对滚压连接成形过程的影响规律; 开展了气密、耐压、爆破、连接强度和弯曲疲劳等多组参数试验, 对钛合金导管无扩口连接件的密封性能进行对比测试, 确定了最优钛合金导管无扩口滚压工艺参数, 为钛合金导管接头质量和可靠性的提高提供理论基础。

关键词: 钛合金; 无扩口; 导管; 滚压连接

中图分类号: TH13, V229.5 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.07.021

Research on the rolling connection technology of titanium alloy non-flaring combined ducts

ZHANG Haibao, GENG Yuke, REN Guohui, WANG Hui, MAO Xiaobo

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, CHN)

Abstract: A method of combining experiments and finite element simulation was adopted in this article, which is analyzed the deformation process of titanium duct without expansion and rolling process. Influence of rolling process parameters (rolling torque) and roller angle on the forming process of rolling connections was determined. Multiple groups of parameter experiments such as air dense, pressure resistance, blasting, connection strength, and bending fatigue are carried out. Comparative testing was conducted on the sealing performance of titanium alloy conduit without expansion joints. The optimal titanium ducts without expansion and rolling process parameters are determined, which is providing a theoretical basis for improving the quality and reliability of the catheter joint.

Keywords: titanium alloy; non-flaring; catheter; rolling connection

在现代飞机上, 飞机液压系统是保证飞机正常飞行和安全的 key 操纵系统, 一般由多套相互独立、相互备份的液压系统组成, 是一个多余度、大功率的复杂综合系统^[1]。液压系统按照功能划分由动力元件、控制元件、执行元件、管路元件、辅助元件以及液压工作介质等部分组成^[2]。其中, 管路元件系统包括管路、管接头、管路附件等元件, 从分布上看, 是飞机液压能源传递到各个元件的纽带, 相当于人体的血管; 从重量上看, 占据了液压系统总重量的 30%~50%^[3]; 从重要性来看, 如果系统中任意一根管路或一个管接头损坏都可能造成液压系统甚至整个飞机的重大事故。管路系统中广泛采用管接头进行连接。随着飞机轻量化高性能的需求, 液压管路系统的重量和体积也随之降低, 且耐压性能要求更高, 钛合金作为一种先进的轻量化结构材料,

具有优异的综合性能, 其密度小, 比强度高, 疲劳强度和抗裂纹扩展能力好, 抗蚀性能优异, 焊接性能良好, 在航空、航天等诸多领域具有广泛应用前景。

目前飞机上常用导管连接技术包括焊接连接、扩口连接和无扩口连接等, 其中无扩口导管连接具有操作便捷、高压密封性能好、重量轻、可靠、不需要金属保险丝、不需要扩口加工等, 具有更好的密封性、牢固性和抗腐蚀性。钛合金属于难加工材料, 并不适合扩口加工。无扩口内径滚压技术被认为是钛合金导管连接的最有效的技术方法之一^[4]。随着技术的发展, 无扩口连接技术将会在管路连接领域有着更加广泛的应用。

国外在钛合金内径滚压连接技术研究方面相对成熟, 已实现零件的高精度成形和计算机自动控制,

国内对该技术的研究与国外还有相当大的差距。北京航空制造研究所的张荣霞等^[5]采用 MARC 软件对内径滚压连接成形过程进行了有限元模拟,发现在成形过程中导管管套主要为弹性变形,卸载后导管管套都有弹性恢复且导管管套之间存在残余接触力。李光俊等^[6]对钛合金导管内径滚压成型中的关键问题进行了有限元模拟分析,试验结果与模拟结果一致。张荣霞等^[7-8]采用 ABAQUS 有限元模拟软件,分析了内径滚压连接接头强度的产生是由导管与管套径向接触力和管材嵌入管套凹槽形成的轴向抗拉脱阻力共同形成的,且分析了管套结构对连接强度的影响规律,但对实际滚压工艺的影响尚无详细研究。本文以无扩口滚压连接技术为研究对象,通过典型实例及有限元分析模拟来说明钛合金无扩口导管滚压参数的变化对滚压控制过程的影响。

1 无扩口导管滚压机理分析

导管滚压成型连接工艺过程是将管子与管套通过滚压的方式连接起来,其成形过程是利用滚压工装的滚柱逐步向外扩张,高硬度的滚柱与管子内壁滚压接触,加载过程中管子发生弹塑性变形,管子材料流动后进入管套的凹槽内,实现管子与管套的密封连接,如图 1 所示。高速旋转的滚针挤压管子的内表面,通过控制输入扭矩及滚针结构,保证滚压质量,卸载后管子发生弹性变形回复,但在管子内表面形成残余压应力层,能够有效提高导管的疲劳寿命,减少和延缓疲劳损伤的发生。

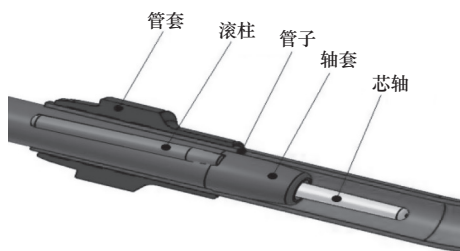


图 1 滚压成型原理

滚压连接工艺主要受到设备转速、滚压力矩以及滚针结构的影响。转速慢时,材料变形流动充分变形更加均匀,但是转速太慢会影响成形效率,同时需要更大的成形扭矩。滚压力矩直接影响管子的变形量,滚压力矩过大会造成管子的过度塑性变形,影响滚压连接后组合导管的疲劳寿命,滚压力矩过小会造成管子变形不充分,影响滚压连接后组合导

管的连接强度。滚柱长度会影响管子参与变形的管子长度,滚针越长,参与滚压变形的管子越长,滚针角度越大,滚压后管子变形区的导管内径差异越大。本文通过有限元分析,并结合实际工艺,研究组合导管滚压连接装配工艺以及性能验证。

2 无扩口导管连接模型及成形仿真

2.1 无扩口导管模型建立

采用三维 CAD 软件建立无扩口导管连接的几何模型,简化去除对仿真分析影响不大但是前处理比较困难的工艺倒角特征。几何模型具有旋转对称的特点,建立轴对称结构模型提高计算速度,将几何模型导入 Ansys Workbench 中,进行网格划分、材料本构模型选择、装配关系定义、边界条件、载荷条件和求解等设置,有限元模型如图 2 所示。网格类型为 solid186,网格数量为 2 250。

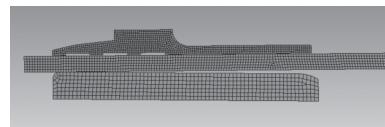


图 2 有限元网格模型

2.2 材料性能参数

管材为 TA18 钛合金,管套材料为 05Cr15Ni5Cu4Nb,滚针材料为 SKH51,滚针表面进行硬化处理,在有限元模型中处理为刚性体,具体的材料性能参数见表 1。

表 1 相关材料参数

类型	材料	弹性模量/GPa	密度/(kg/m ³)	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
管子	TA18	103	4 470	0.34	724	862
管套	05Cr15Ni5Cu4Nb	204	7 800	0.39	1 172	1 310
滚针	SKH51	212	7 900	0.39	1 960	1 600

2.3 滚压成型过程仿真分析

以 D16×1.2 钛合金管为例进行仿真分析。分析模型的边界条件及载荷施加如下:管套外表面固定约束,导管内侧面 X/Y/Z 方向固定约束,滚针外表面 X 和 Z 方向约束,对滚针施加 Y 方向的位移载荷,接触设置采用通用接触对 Target170 单元和 Contact174 单元,接触摩擦系数为 0.02。

实际加工过程中以第二道凹槽中间位置为测量基准点,为保证和实际加工过程的测量基准一致性,

仿真过程以滚针达到该点对应位置为初始位。将滚针的位移加载设置为 0.32 mm，采用自动步进模式，相隔两个步长有限元计算输出结果的滚针位移量为变化值，截取加载位移 0.1、0.15、0.23、0.32 mm 加载过程作为典型结果，得到加载过程位移如图 3 所示，等效应力分布如图 4 所示。

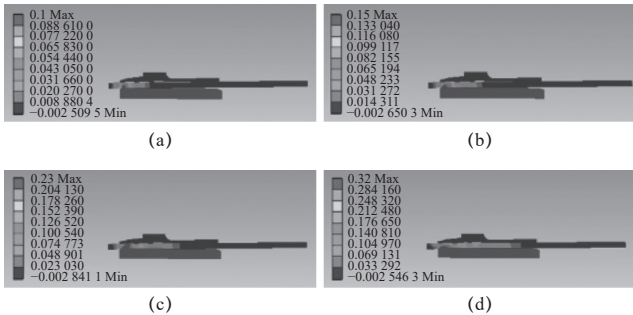


图 3 加载过程位移云图

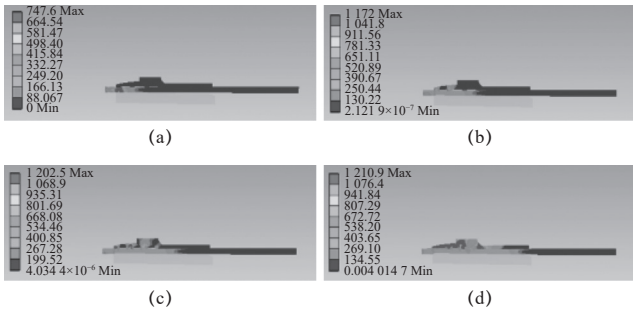


图 4 加载过程应力云图

随着滚针加载位移的增加，导管与滚针的接触处导管开始产生变形，随着加载量的不断增加，导管变形逐渐扩展到整个滚针与导管接触面。在滚针与管套的双重挤压作用下，导管的材料逐渐流向凹槽。从右端开始，依次将管套上的 3 个凹槽填满，管套凹槽旁的突出处也有非常小的变形量。

随着滚针加载位移的增加，导管与管套槽有明显的应力变化（图 4），导管的应力首先产生在导管与滚针接触处，随着加载量的增加，应力逐渐向整个导管与滚针接触面扩展。导管在滚针与管套的挤压作用下，管路内部形成了明显的剪切力，导管内部应力达到屈服极限 724 MPa，最终导管产生了明显的变形。管套的内应力首先产生在第一道凹槽右侧突出处并逐渐向左端扩展，最终在 3 个凹槽两侧都产生了较大的应力集中，部分区域应力值达到其屈服极限 1 210 MPa。

随着滚针的逐步卸载，导管和管套的变形表现有较大区别。其中，管套的变形主要表现为弹性变

形，在撤去滚针的加载后，整个管套有较大程度的弹性恢复，只有凹槽两侧应力集中处有极小的塑性变形，而导管的变形主要表现为塑性变形，滚针卸载后导管基本没有产生弹性恢复，导管材料充满了整个凹槽，形成了管套与导管的连接。管套的残余应力逐渐减小，最终只在凹槽两侧和导管相接触的非常小的区域内存在较大的残余应力，其他的区域残余应力值较小。导管的残余应力也逐渐减小，但最终仍有大面积存在的较大的残余应力，残余应力主要集中在导管与凹槽突出处接触面上，这与它们各自的残余变形是相互对应的，如图 5 所示。

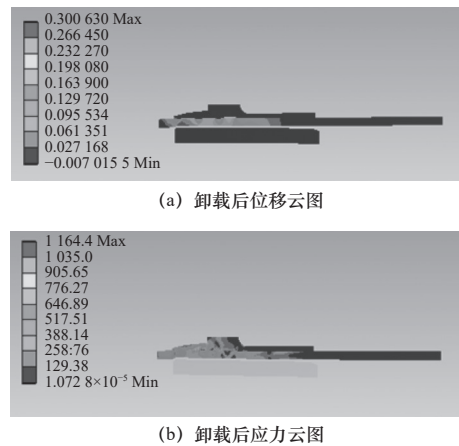


图 5 卸载后位移云图和应力云图

选择 0.5°、1.0°和 1.5°三种滚柱角度进行有限元分析，滚压过程中导管材料的变形机理基本一致，随着滚针加载位移的增加，导管开始在导管与滚针的接触处产生变形，随着加载量的增加，导管的变形逐渐扩展到整个滚针与导管接触面。在滚针与管套的双重挤压作用下，导管的材料逐渐流向凹槽，仿真结果如图 6 所示。

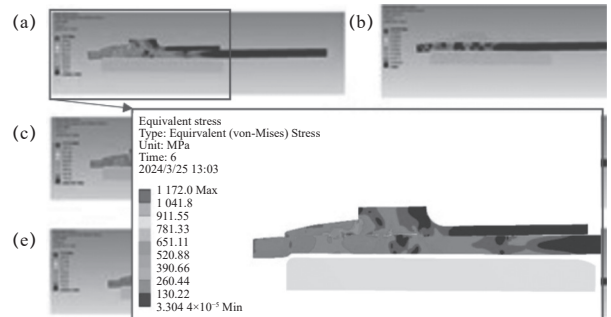


图 6 滚柱不同角度滚压成型后的应力云图

不同的滚针角度下，当滚针位移量相当时（此处均选择 0.32 的滚柱径向位移量），填充率差异基本相同，均能达到 90% 以上，但导管的减薄率不

同,随着滚针角度的增加,导管减薄率也呈现变大的趋势。不同滚针角度对应的管材减薄率具体数值见表2。保证填充率满足工艺要求的同时保证合理的减薄率对滚压连接质量的影响非常关键。

表2 不同滚柱角度对滚压填充率和减薄率的影响

序号	滚柱角度 $\alpha / (^{\circ})$	滚柱径向位移 h / mm	滚压填充率 $F / (\%)$	计算减薄率 / (%)
1	0.5	0.32	97	0.214
3	1.0	0.32	91	0.209
5	1.5	0.32	85	0.204

3 无扩口导管滚压连接成形工艺验证

以D16×1.2钛合金管为例开展无扩口滚压连接成形工艺研究,滚压连接组件结构包含滚柱、管子和管套三个部件。本文从滚压力矩和滚柱角度设计两个维度研究滚压连接装配工艺的影响,建立滚柱径向位移与滚压扭矩之间的关系,滚柱角度与滚压填充率的关系,管材尺寸与滚压内径的补偿关系。

3.1 滚柱径向位移与滚压扭矩之间的关系

试验件在设备不同滚压扭矩值条件下的滚柱径向位移数据汇总见表3(1英寸磅=0.113 N·m)。

表3 滚柱径向位移与滚压扭矩数据汇总

序号	管材外径 D / mm	管材内径 d / mm	扭矩 / 英寸磅	滚压内径 $d1 / \text{mm}$	径向位移 h / mm
1	16.06	13.62	44	14.09	0.235
2	16.06	13.61	48	14.12	0.255
3	16.06	13.60	50	14.13	0.265
4	16.05	13.61	52	14.15	0.27
5	16.06	13.61	54	14.18	0.285
6	16.05	13.62	56	14.21	0.295

建立滚柱径向位移与滚压扭矩之间的关系如图7所示。滚柱径向位移与滚压扭矩呈线性关系,随着滚压设备扭矩的增大滚柱径向位移呈现变大的趋势,而且随着滚柱径向位移的增大,滚压内径也呈现增大的趋势,滚压力矩由44英寸磅增大至56英寸磅时,滚柱径向位移量由0.235 mm增大至0.295 mm,滚柱径向位移量的变化为0.06 mm,而管子滚压内径由14.09 mm增大至14.21 mm,管子内径变化量为0.12 mm,管子内径对滚压力矩的变化更加敏感。

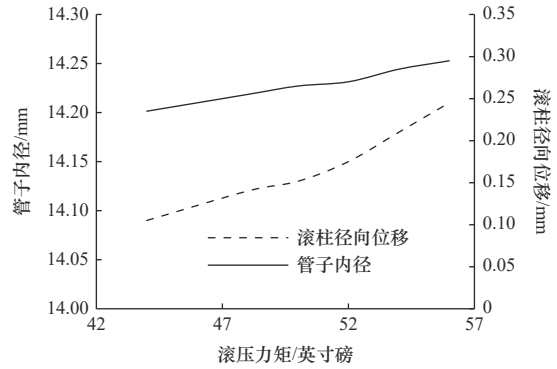


图7 滚柱径向位移与滚压扭矩之间的关系

3.2 滚柱角度与滚压填充率之间的关系

以相同的滚压力矩滚压试验件,保证相同的滚柱径向位移条件下,对比不同的滚柱角度对滚压填充率的影响。表4总结了相同的滚压力矩下不同滚柱角度下对应的滚柱径向位移及滚压填充率,滚压填充率随着滚柱角度的变化关系如图8所示。随着滚柱角度增加,滚压填充率呈下降趋势,滚柱角度由 0.5° 增大至 1.5° 时,滚压填充率由95%下降至82%,而根据内旋压成形工艺手册,滚压填充率最少达到85%才能保证滚压连接质量,此滚针角度设计不能大于 1.2° 。

表4 不同滚柱角度与滚压填充率数据

序号	滚柱角度 $\alpha / (^{\circ})$	设备扭矩 / 英寸磅	滚柱径向位移 h / mm	滚压填充率 $F / (\%)$
1	0.5	44	0.235	95
2	0.8	44	0.235	91
3	1.0	44	0.235	89
4	1.2	44	0.235	86
5	1.5	44	0.235	82

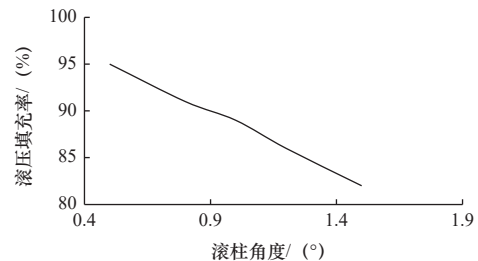


图8 滚柱角度与滚压填充率之间的关系

进一步对不同滚柱角度滚压连接成形后的试验件进行了剖切分析,试验件不同填充率的正面剖切如图9和图10所示,其中图9为对应滚针角度为 1.5° 的滚压连接组合导管剖面图,图10为对应滚针

角度 0.5° 的滚压连接组合导管剖面图。图 9 为非常明显的欠滚压状态，管套凹槽内的管子填料不足，填充率不满足 85% 的要求；图 10 为填充率大于 85% 的滚压状态，管套凹槽内均实现的管子填充，能够保证滚压连接性能。

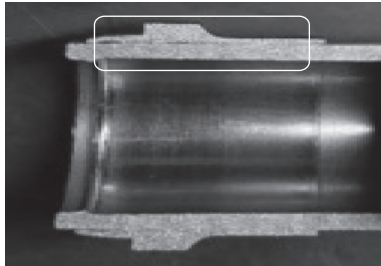


图 9 滚针角度为 1.5° 的连接剖面图

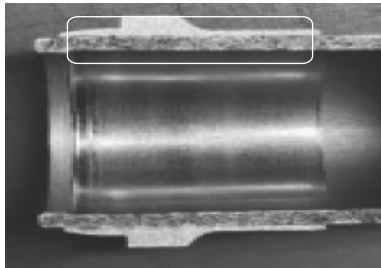


图 10 滚针角度为 0.5° 的连接剖面图

3.3 功能试验验证

选用滚压力矩 44 英寸磅和滚柱角度 0.8° 滚压加工一批组合导管试验件，进行功能验证试验，见表 5。试验结果合格，满足功能性能要求。

表 5 功能验证试验项目

序号	项目	功能指标	结果
1	产品检查	外形、尺寸检查符合规范及标准要求	合格
2	气压试验	保压时间 ≥ 5 min，加压 1 min，无泡沫及故障	合格
3	耐压试验	2倍系统压力保压时间 ≥ 5 min，无泄漏、明显的永久变形或者其他影响拆装的故障	合格
4	连接强度试验	在试件保持系统工作压力的同时使试件进行拉伸试验，破坏拉力达到规定的载荷前，导管不应破裂或脱出	合格
5	爆破试验	4倍系统工作压力保压时间 ≥ 5 min，无破裂或泄漏	合格
6	弯曲疲劳试验	规定的应力水平下疲劳弯曲次数 ≥ 1×10 ⁶ ，无泄漏	合格

4 结语

本文基于滚压连接成形连接工艺原理，结合有限元仿真分析技术，分析了滚压过程中管材的变形

过程，以及滚压工艺参数（滚压力矩）、滚柱角度对滚压连接成形过程的影响，主要形成以下结论：

(1) 基于 WB 建立了滚压连接成形过程有限元模型，加载过程中，管材发生弹塑性变形，管套主要发生弹性变形、局部塑性变形，卸载后导管基本没有产生弹性恢复，导管材料充满了整个凹槽，形成了管套与导管的连接。

(2) 滚柱径向位移与滚压扭矩呈线性关系，随着滚压设备扭矩的增大滚柱径向位移呈现变大的趋势，而且随着滚柱径向位移的增大，滚压内径也呈现增大的趋势，管子内径对滚压力矩的变化更加敏感。

(3) 随着滚柱角度的增加，滚压填充率呈下降的趋势，滚柱角度由 0.5° 增大至 1.5° 时，滚压填充率由 95% 下降至 82%，滚柱角度不大于 1.2° 时，能保证滚压后的填充率大于 85%。

(4) 选择 44 英寸磅和滚柱角度 0.8° 的滚压工艺，加工后的组合导管性能满足要求。

参考文献

[1] 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.

[2] 崔祥, 周帮伦, 高麒麟, 等. 飞机液压系统 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2021.

[3] 王海涛. 飞机液压元件与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

[4] 闫晶, 张荣霞, 吴为, 等. 航空液压钛合金导管组件制造关键技术应用 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(10): 44-51, 60.

[5] 张荣霞, 吴为, 曾元松. TA18 钛合金导管的内径滚压连接工艺 [J]. 锻压技术, 2017, 42(5): 43-47.

[6] 李光俊, 张荣霞, 吴为, 等. 钛合金导管无扩口内径滚压过程的数值分析 [J]. 锻压技术, 2010, 35(2): 79-81.

[7] 张荣霞, 吴为, 曾元松. 导管无扩口内径滚压连接接头连接强度性能研究 [J]. 航空制造技术, 2016, 517(22): 84-88.

[8] 张荣霞, 吴为, 郑文涛, 等. 基于扭矩控制的导管内径滚压连接成形特征分析 [J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(3): 52-57.

第一作者: 张海宝, 男, 1977 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事管成形及连接技术、板材高精度成形等方面的研究工作。E-mail: 362109532@qq.com

通信作者: 毛晓博, 男, 1986 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事数控机床金属切削、板材高精度成形及精准铣削加工技术研究。E-mail: maoxiaobo68@hust.edu.cn

(编辑 曲书瑶)

(收修改稿日期: 2024-04-01)

文章编号: 20240722

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。