

## 钛合金导管内径滚压连接数值模拟与试验研究

## Numerical Simulation and Experimental Research on Internal Rolling Connection of Titanium Alloy Tubes

北京航空制造工程研究所 张荣霞 吴为 曾元松  
中国人民解放军驻西飞公司军事代表室 郭敏骁  
沈阳发动机设计研究所 邱明星

**[摘要]** 利用有限元方法,对钛合金导管内径滚压连接成形进行数值模拟,通过对导管、管套卸载前后的回弹分析,以及材料流动规律分析,掌握内径滚压连接成形机理;通过试验研究,获得导管材料和管套结构对滚压连接成形的影响规律;并通过耐压试验对不同材料导管连接件的密封性能进行了验证。

**关键词:** 钛合金 内径滚压 连接 数值模拟

**[ABSTRACT]** Using the method of numerical simulation, the analysis on the internal rolling connection process is finished. Through the analyses on the spring-back of the tube and sleeve and the law of material flowing the connecting mechanics is mastered. The experimental research points out the effect law of the tube material and the structure of the sleeve to the internal rolling forming. The experiment of compression resistance proves that the seal performance of the tube union is well.

**Keywords:** Titanium alloy Internal rolling Connection Numerical simulation

连接管件广泛用于航空航天、交通运输、石油化工、电力系统、管道等领域的气体、液体输送管路,在金属结构中的应用也十分广泛。随着对管件的高减重效果和高耐压力的要求不断提高,一些特殊的连接管件如内径滚压连接管件被广泛应用于航空航天领域<sup>[1-2]</sup>。

导管内径滚压连接技术特别适合薄壁高强钛合金导管的连接成形,主要用于飞机发动机液压管路中。工作压力可达 28MPa,适应新一代飞机和发动机液压管路系统轻量化、长寿命和高可靠性的需求。与扩口连接相比,具有高密封性、自锁抗振性、重量轻、寿命高等特点。国外该技术已经发展成熟,实现计算机控制,并成功应用于空客、Su-27 等多种型号飞机上。国内起步较晚,与国外差距较大。北京航空制造工程研究所从“十五”期间,开始对该技术进行一系列研究,取得了一定成果。本文对内径滚压连接成形关键技术进行研究,包括成形机理分析、导管下料、不同导管材料工艺参数选择以及验证试验等,全面掌握该工艺的成形特点。

90 航空制造技术·2011年第16期

## 1 导管内径滚压连接成形过程

采用周向滚动的滚柱径向施加力的作用将管壁材料压入带槽的管套,从而使导管和管套实现连接,见图 1。连接成形时首先是芯轴旋转,在摩擦力作用下驱动滚柱边自转边沿管坯内壁周向滚动,保持架又在滚柱的带动下随动,同时芯轴沿轴向不断送进,使滚柱径向进给,导管材料在滚压力作用下嵌入管套凹槽。

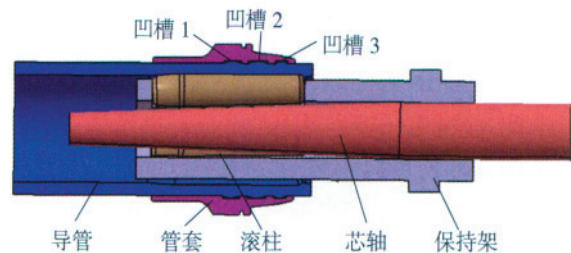


图1 内径滚压连接成形原理

Fig.1 Forming principle of internal rolling connection

## 2 连接成形机理有限元分析

采用有限元方法对成形过程进行模拟,从回弹和材料流动等方面分析导管内径滚压连接成形机理。分析软件为 ABAQUS,算法为 ABAQUS/Standard。

## 2.1 有限元模型的简化

模拟时做以下假设:

- 材料为各向同性;
- 成形时有三个滚柱高速旋转,导管未受力的时间非常短,因此可以把滚柱与导管之间看作是连续接触;
- 耐压试验时导管内部液压均匀分布<sup>[3-4]</sup>。

做了以上假设后,连接过程可视为轴对称结构,问题简化为二维,只截取一纵向平面进行模拟。

## 2.2 材料模型

导管材料为 TA18,规格为  $\phi 14 \times 1.35$ ;管套材料为 TC4。材料参数见表 1<sup>[5]</sup>,材料模型为弹塑性模型,离散为轴对称实体单元,采用 Von Mises 屈服准则。

## 2.3 约束加载

连接成形模拟过程共分 4 个分析步:(1)滚柱径向

表1 材料参数

材料名称	参数名称				
	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸系数
TA18	96	0.3	570	757	15%
TC4	109	0.34	830	895	12%

运行一定位移(0.2mm)使得滚柱与导管刚好建立接触;(2)滚柱继续进给完成径向行程;(3)成形完毕滚柱回到初始位置;(4)去掉边界条件约束,计算回弹。以径向行程(滚柱从接触导管内壁开始计的抬起量)0.25mm为例,滚柱位移随时间变化如图2所示。滚压时,夹具始终保持在平面内不动,夹具对管套的固定作用,可以简化为管套外廓边缘的位移约束,回弹计算时,滚柱回到初始位置,与导管脱离接触,管套和导管自由回弹。

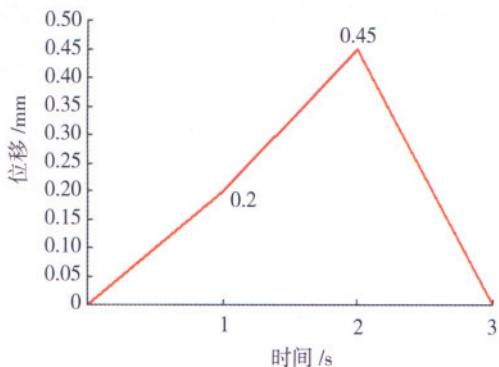


图2 滚柱位移载荷  
Fig.2 Displacement load of roller

各组件间切向接触采用摩擦系数为0.1的罚函数(Penalty)摩擦公式,法向接触设为硬接触(Hard Contact)。图3为连接过程有限元模型。

## 2.4 模拟结果分析

### (1) 回弹分析。

图4为成形后径向位移分布云图,在导管与管套上,分别取图中所示7个典型位置处卸载前后节点的径向位移,根据位移变化,计算回弹率,对比分析导管与管套回弹规律。回弹率计算公式如下:

$$\gamma = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\%$$

其中,  $m_0$  为卸载前径向位移量,  $m_t$  为卸载后径向位移量。

图5为导管与管套典型位置回弹率分布曲线,可见回弹率都为正值,说明导管与管套卸载前都有弹性变形,卸载后均发生回弹,但两者回弹规律不同,导管凹槽区域材料回弹率小于两凹槽间的凸台区域,而管套回弹规律与之相反;两者在1、3、

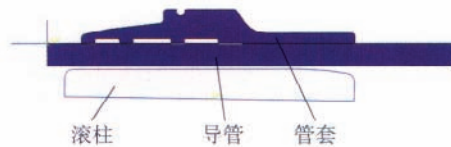


图3 连接过程有限元模型

Fig.3 Finite element model of the connection process

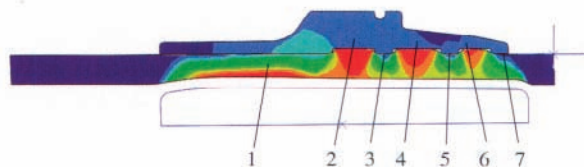


图4 成形后径向位移分布

Fig.4 Radial displacement distribution after forming

5、7处,回弹率相同,说明回弹前后两者在此处保持接触;2、4、6处,管套回弹率大于导管,从整体趋势来看,管套回弹率大于导管,因此,回弹后管套会紧紧包住导管,两者间保留一定残余接触力,保证两者紧密连接在一起。如图6所示,最终两者间的残余接触力大小为61.3N。

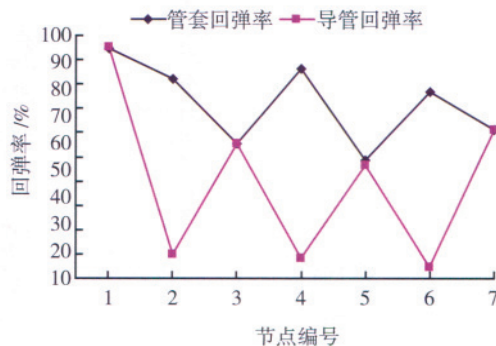


图5 导管与管套回弹率对比

Fig.5 Equivalent elastic strain distribution springback comparison

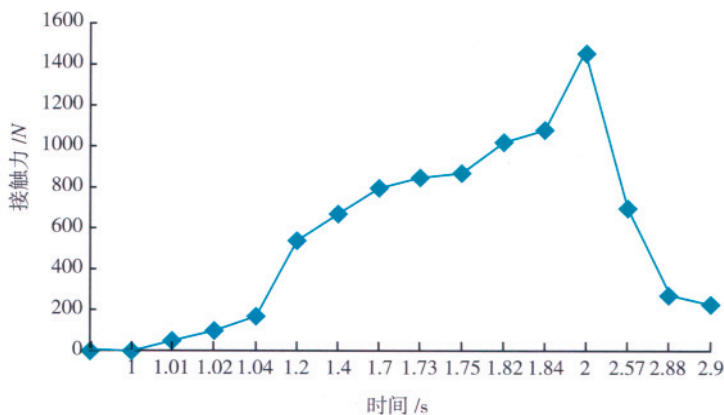


图6 成形过程接触力变化曲线

Fig.6 Curve of contact force in forming process

(2) 材料流动分析。

图7为成形后导管材料流动情况,可见导管在摩擦力和挤压力共同作用下,既有轴向流动又有径向流动,根据最小成形阻力原理,导管材料径向流动会嵌入管套凹槽,形成拉脱阻力,而轴向流动量主要是由管套非凹槽区域的导管受挤压作用延展引起的。

综上所述,导管内径滚压连接成形机理实质是导管材料在最小成形阻力作用下填充到管套凹槽,形成拉脱阻力,由于管套卸载后回弹量大于导管,从而使管套紧紧包住导管,最终两者间保留残余接触力,从而使两者紧密连接在一起。

### 3 内径滚压连接成形试验研究

#### 3.1 导管下料

图7中“1”处导管端部,由于受挤压作用,材料轴向延伸,导管内侧凸出端面,这会影响连接件的装配精度,因此,试验前下料时需要对导管端部内侧进行倒角,如图8所示。

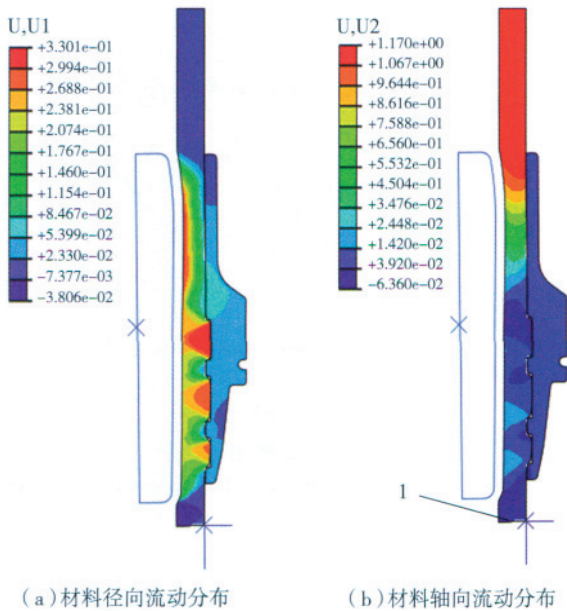


图7 材料流动云图  
Fig.7 Nephogram of material flowing

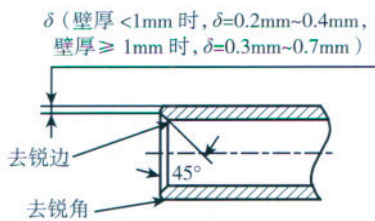


图8 导管端部倒角  
Fig.8 Chamfer of tube head

#### 3.2 材料对连接成形的影响

结合相关课题,选择两种材料导管,分别进行连接成形试验,工艺参数主要为滚柱径向行程,初选值与管套槽深相同(见表2)。

涉及到的材料参数见表3。两种材料导管中,TA16管材比TA18塑性好,屈服强度低。

表2 试验设计

试验编号	管套材料	管套槽深/mm	滚柱径向行程/mm	导管材料	导管规格
1	TC4	0.3	0.3	TA16	$\phi 16 \times 1$
3	TC4	0.27	0.27	TA18	$\phi 14 \times 1.35$

表3 材料参数

材料名称	参数名称				
	弹性模量 / GPa	泊松比	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸系数
TA16	101	0.3	418.	566	32%
TA18	96	0.3	570	757	15%

图9(a)和(b)分别为各连接件剖开图。可以看出,TA16导管填充效果比TA18好,说明填充度受导管材料影响较大,塑性越好,屈服强度越低,填充度越好。要使TA18导管填充较好,必须增大滚柱径向行程,因此,最佳滚柱径向行程一定大于管套凹槽深度,而TA16导管最佳滚柱径向行程与管套凹槽深度相同即可。

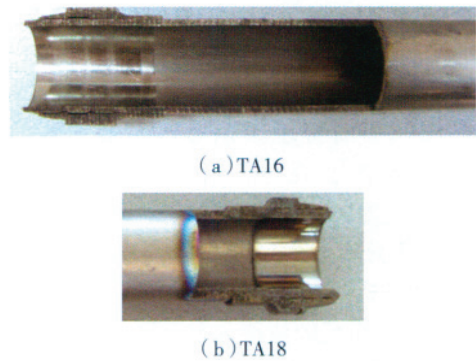


图9 不同材料连接件剖视图  
Fig.9 Cross-sectional view of connector about different tube materials

#### 3.3 不同管套结构对连接成形的影响

针对TA16  $\phi 16 \times 1$  导管,分别选择两槽和三槽管套进行连接成形试验,滚柱长度和滚柱径向抬起高度相同,图10(a)和(b)是连接件的剖开图。通过对比可以看出相同试验条件下,三槽管套连接件比两槽管套连接件成形深度深。这与滚柱的长度有关,三槽管套成形时,滚柱长度在管套长度范围内,而两槽管套成形时,滚柱长度超出管套长度。当滚柱长度大于管套长度时,导

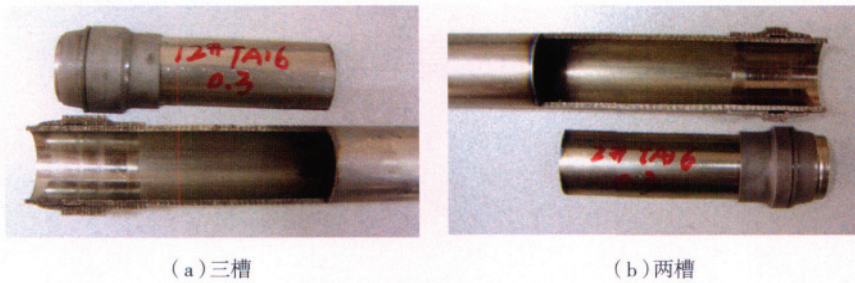


图10 不同管套结构连接件剖视图

Fig.10 Cross-sectional view of connector about different sleeve structures

管材料轴向流动更明显,从而使径向流动量减少,成形深度降低。因此,滚柱长度一定要小于管套长度。

#### 4 验证试验

为了研究不同材料导管滚压连接件的密封性能,对表1中两种材料的导管连接件分别进行耐压试验验证,试验件见图11。试验时连接件一端与堵头连接,堵头与管套圆弧面线接触达到密封效果,另一端与耐压试验台连接。连接件内部充高压水,直到泄露、导管拉断或管套拉脱为止。试验结果见表4。



图11 耐压试验件

Fig.11 Parts of experiment of compression resistance

表4 耐压试验结果

导管材料	导管规格/mm	最终压力/MPa	试验结果
TA16	$\phi 16 \times 1$	98	导管破裂
TA18	$\phi 14 \times 1.35$	149	管套拉脱

从试验结果分析,导管内径滚压连接结构可以承受较高内压,具有很好密封性能。连接件密封性能高低主要取决于导管材料承压能力,TA18导管性能优于TA16导管。

#### 5 结论

(1) 导管内径滚压连接机理: 导管材料在最小成形

阻力作用下填充到管套凹槽,形成拉脱阻力,由于管套卸载后回弹量大于导管,从而使管套紧紧包住导管,最终两着间保留残余接触力,从而使两者紧密连接在一起;

(2) 从装配精度角度考虑,导管下料时要对端部内侧进行倒角;

(3) 导管材料塑性越好,屈服强度越低,管套凹槽填充效果越好;

(4) 滚柱长度一定要小于管套

长度;

(5) 导管内径滚压连接结构可以承受较高内压,具有很好密封性能。

#### 参考文献

- [1] 王同海. 管材塑性加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 曾元松, 李志强. 连接管件的先进塑性成形技术试验研究. 金属成形工艺. 2003, 21(3): 4-7.
- [3] 吕昕宇, 张士宏, 曾元松, 等. 连接管内径滚压成形有限元模型的建立及分析. 塑性工程学报, 2005(2): 85-88.
- [4] Yuansong Zenga. Finite element simulation and experimental research on the internal rolling connection for titanium alloy tubes. Materials Science Forum, 2005, 475-479: 3287-3200.
- [5] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册(飞机钣金工艺). 北京: 航空工业出版社, 1992. 552-555.

(责编 晓立)

(上接第89页)

#### 参考文献

- [1] 李梁, 孙健科, 孟祥军, 等. 钛合金的应用现状及发展前景. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19-24.
- [2] 毛军锋, 张冶. 宇航钛管弯曲成形技术. 情报与信息, 2000(2): 49-52.
- [3] Kim J, Kim Y W, Kang B S, et al. Finite element analysis for bursting failure prediction in bulge forming of a seamed tube. Finite Element in Analysis and Design, 2004(40): 953-966.
- [4] 张士宏. 拼焊板方盒件拉深非均匀变形的计算机模拟研究. 塑性工程学报, 2001, 8(2): 49-51.
- [5] Zhan M, Du H F, Liu J, et al. A method for establishing the plastic constitutive relationship of the weld bead and heat-affected zone of welded tubes based on the rule of mixtures and a microhardness test. Materials Science and Engineering A, 2010(527): 2864-2874.
- [6] 孙克锐, 杨连发. 焊缝管液压成形技术及热影响区对成形的影响. 桂林电子科技大学学报, 2006, 26(5): 380-384.
- [7] 孙克锐, 杨连发. 无缝管与有缝管液压成形性比较. 中国机械工程, 2006, 17: 27-31.
- [8] 张立玲. 拼焊板焊缝力学性能实验研究. 机械设计与制造, 2006, 8: 113-115.
- [9] 王光祥. 工艺参数对薄壁管数控弯曲成形质量影响的实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

(责编 晓立)