

航空导管接头旋压连接装置逆向建模及工艺参数优化

王伟^{1,2}, 王涓僊¹, 肖军雷³, 杨宝林³, 张双杰^{1,2}, 苏 孺^{1,2}

(1. 河北科技大学 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北 石家庄 050018; 2. 河北科技大学 航空轻质复合材料与加工技术河北省工程实验室, 河北 石家庄 050018; 3. 石家庄海山实业发展总公司, 河北 石家庄 050200)

摘要: 针对无扩口型钛合金航空导管接头的旋压连接, 采用逆向技术对旋压连接装置进行建模。基于 Deform-3D 有限元软件, 建立航空导管连接接头旋压连接的有限元模型。基于有限元分析, 采用响应曲面法, 以主要工艺参数为变量, 以填充率为优化目标, 建立完全二阶响应曲面函数模型。通过对响应曲面函数模型的寻优求解, 获得合理的工艺参数组合为: 芯轴自转速率为 $2.68 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 、芯轴轴向进给速度为 $0.11 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 模型预测的填充率为 93.3%。采用优化参数数值模拟的填充率为 93.1%, 与模型预测值的相对误差为 0.21%; 试验制件的填充率为 92.8%, 与模型预测值的相对误差为 0.54%, 同时亦对试验制件的主要性能进行了检测。结果表明, 构建的响应曲面函数模型具有良好的精度, 采用优化参数后, 导管内壁变形均匀, 管套凹槽填充效果良好, 导管连接接头性能优良。

关键词: 航空导管接头; 旋压连接; 逆向建模; 响应曲面法; 填充率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.016

中图分类号: TG386; V262.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0106-07

Reverse modeling and optimization of process parameters for aviation pipe joint spinning connection device

Wang Wei^{1,2}, Wang Juanxi¹, Xiao Junlei³, Yang Baolin³, Zhang Shuangjie^{1,2}, Su Ru^{1,2}

(1. Hebei Key Laboratory of Material Near-net Forming Technology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Hebei Engineering Laboratory of Aviation Lightweight Composite Materials and Processing Technology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 3. Shijiazhuang Haishan Industrial Development Corporation, Shijiazhuang 050200, China)

Abstract: For the spinning connection of unflared titanium alloy aviation pipe joint, the spinning connection device was modeled by reverse technology, and the finite element model of the spinning connection for aviation pipe joint was established by finite element software Deform-3D. Then, based on finite element analysis, taking the main process parameters as variables and the filling rate as the optimization objective, a complete second-order response surface function model was established by the response surface method. And through the optimal solution of the response surface function model, the reasonable combination of process parameters was obtained as the rotation speed of mandrel of $2.68 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$, the axial feeding speed of mandrel of $0.11 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and the filling rate predicted by the model of 93.3%. Furthermore, the filling rate of numerical simulation with the optimized parameters was 93.1%, and the relative error with the model predicted value was 0.21%. The filling rate of the experimental workpiece was 92.8%, and the relative error with the model predicted value was 0.54%. In addition, the main properties of the experimental workpiece were tested. The results show that the constructed response surface function model has high precision, after the optimized parameters are used, the inner wall of pipe is deformed uniformly, the filling effect of pipe sleeve groove is good, and the performance of pipe connection joint is excellent.

Key words: aviation pipe joint; spinning connection; reverse modeling; response surface method; filling rate

在飞机的诸多管路中, 负责输送油液的液压管路是飞机的生命线, 其性能不仅影响飞机的整体性

能, 还直接影响飞行安全。其中, 导管连接接头是飞机液压管路系统中最为重要的环节, 决定着整套管路系统的稳定性和可靠性^[1]。目前, 我国主流的航空导管连接接头的形式为扩口型, 材质多选用不锈钢。扩口型导管连接接头的特点是结构简单、易于加工。但是, 通过多年使用与维护经验的积累, 已逐渐发现扩口型导管连接接头存在以下弊端: (1) 密封面的面积较大, 密闭性下降; (2) 不具备

收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-03-30

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (19251019D); 2020 年河北省重点研究项目 (JMRH); 快速扶持项目 (61400020112)

作者简介: 王伟 (1986-), 男, 博士, 讲师

E-mail: 18631175658@163.com

通信作者: 张双杰 (1966-), 男, 博士, 教授

E-mail: zsjzili@163.com

自锁能力,需保险丝锁紧,影响系统的可靠性和装配周期;(3)扩口成形所需的塑性变形量较大,产生较大的残余应力,增加疲劳断裂源;(4)拆装过程中易产生形状误差和表面划伤,不利于保养和维护^[2-4]。

鉴于扩口型连接接头的弊端,我国于21世纪初开始胀形式无扩口连接接头的研制,其原理是借助预装机,利用胶套压缩产生的胀形力挤压导管内壁,将导管压在管套环形槽内,实现导管和管套的密封。该技术解决了中等屈服强度的轻质合金导管连接接头的加工问题^[5]。

但是,在钛合金导管取代不锈钢导管这一发展趋势下,胀形制造技术已无法完全满足高强度钛合金导管的需求。内孔胀形工艺不能制造钛合金导管连接接头的主要原因是极限胀形力低于钛合金所需的成形力。因此,提高极限胀形力和降低成形力是实现钛合金导管连接接头精确成形的两个主要技术途径。极限胀形力受填充材料的强度极限的制约,难以大幅提高。因此,可行的方法是设法降低成形力。将内孔胀形整体成形转变为内孔旋压局部连续成形,可有效降低成形力,解决钛合金导管的连接问题^[6-7]。

本文首先采用逆向技术对航空导管连接接头旋压连接装置的主要部件进行逆向建模,得到航空导管连接接头旋压连接装置的三维模型。基于 Deform-3D 有限元软件,建立航空导管连接接头旋压连接的有限元模型。以主要工艺参数为变量,以填充率为优化目标,采用响应曲面法,对旋压连接主要工艺参数进行优化设计,最终获得合理的工艺参数组合,并完成了试验验证和试验制件主要性能的检测。

1 导管接头旋压连接原理及逆向建模

1.1 旋压连接原理

导管接头旋压连接原理如图1所示^[2],将数个滚柱嵌入保持架的固定槽中,均匀分布,芯轴从保持架的中心孔穿过。旋压连接时,芯轴在电机驱动下产生自转,芯轴自转的同时具有轴向进给运动,芯轴带动保持架转动,进而使滚柱产生以导管轴线为中心的公转;芯轴与滚柱之间的摩擦作用,使滚柱产生自转。由于芯轴具有锥度,芯轴的轴向进给使滚柱产生径向进给,芯轴的运动构成为“自转+公转+径向进给”,导管材料在旋压作用下发生塑性变形,材料流入管套的凹槽内,加工完成后,导管

与管套之间残余一定的接触应力,实现导管与管套的紧密连接^[8]。由于是冷加工,且滚柱的自转是通过芯轴与滚柱之间的摩擦作用产生的,因此,加工时保证各部件的表面光滑无杂质即可,不需要润滑处理。

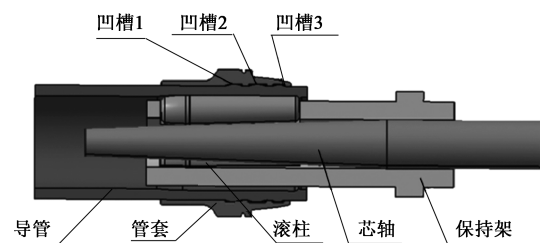


图1 导管接头旋压连接原理

Fig. 1 Principle of spinning connection for pipe joint

1.2 装置逆向建模

图2为旋压连接装置,该装置适用于公称直径为 $\Phi 12$ mm的航空导管接头加工,其核心零部件有:芯轴、保持架、3个结构尺寸相同的滚柱。利用逆向技术获得旋压连接装置主要部件的三维模型,为工艺参数的优化奠定基础。



图2 旋压连接装置

Fig. 2 Device of spinning connection

逆向设备为 RA-7520SI 柔性关节臂测量仪,点重复性为 0.016 mm,空间长度精度为 0.023 mm。图3为逆向扫描获得的点云。采用 Geomagic Studio 软件对点云进行处理,获得三维实体模型,如图4所示,其中芯轴的锥度为 1.5° ,滚柱成形段的锥度为 0.5° 。导管的公称直径为 $\Phi 12$ mm,管套根据 HB 6058—2008^[9]设计,图5为导管和管套的示意图。使用 CATIA 三维造型软件完成旋压连接装置、导管和管套的装配,如图6所示。

2 工艺参数优化

2.1 有限元模型

使用 Deform-3D 有限元软件,建立导管连接接头旋压连接的有限元模型,如图7所示,模型参数如表1所示。滚柱的运动由“自转+公转+径向进

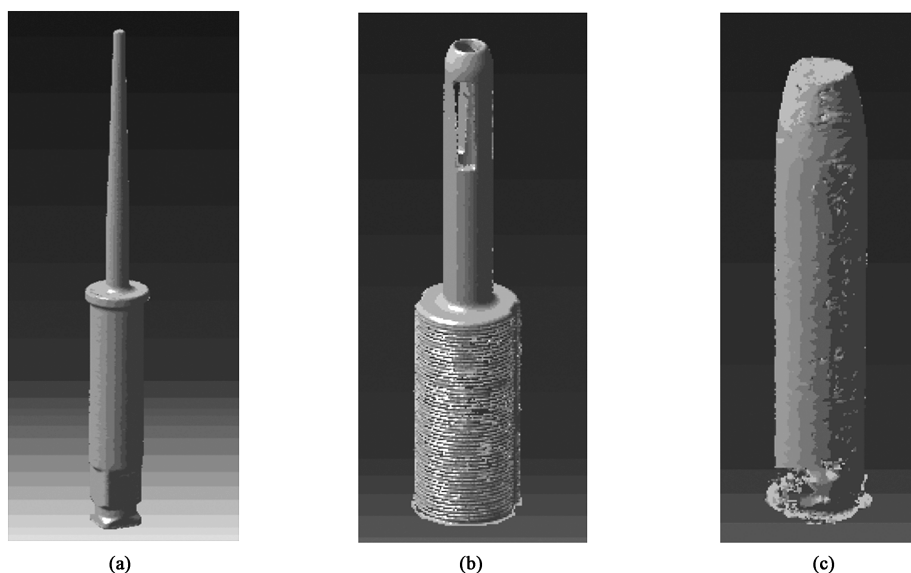


图 3 逆向扫描的点云

(a) 芯轴点云 (b) 保持架点云 (c) 滚柱点云

Fig. 3 Point clouds by reverse scanning

(a) Point cloud of mandrel (b) Point cloud of cage (c) Point cloud of pin roller

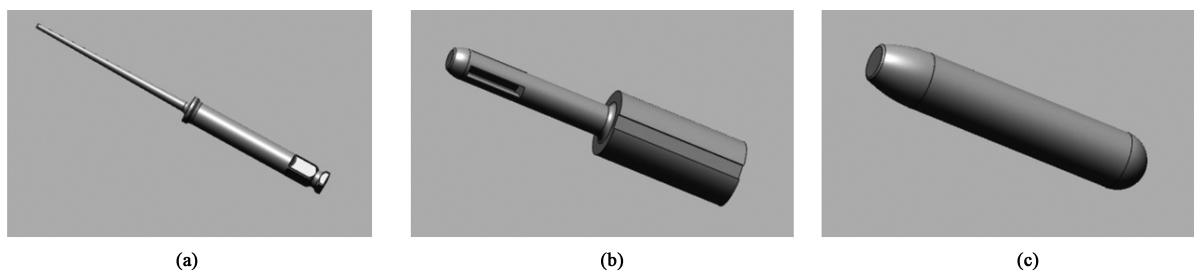


图 4 逆向建模的三维实体

(a) 芯轴 (b) 保持架 (c) 滚柱

Fig. 4 3D solid of reverse modeling

(a) Mandrel (b) Cage (c) Pin roller

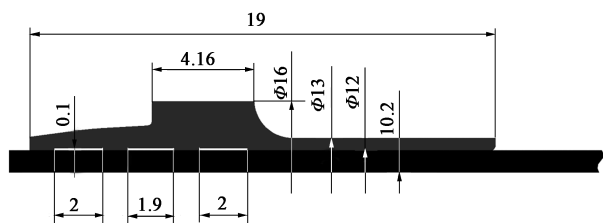


图 5 导管和管套示意图

Fig. 5 Schematic diagram of pipe and sleeve

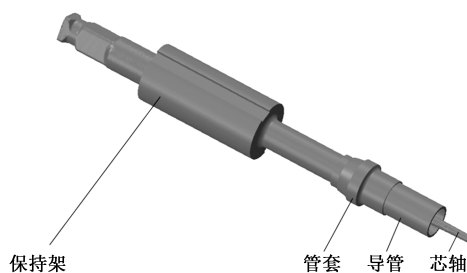


图 6 三维装配图

Fig. 6 3D assembly diagram

给”构成,运动耦合关系复杂^[10-11]。首先使用 Deform-3D 有限元软件对运动耦合进行分析,结果发现“自转+公转+径向进给”的运动耦合是无法实现的。通过对“公转+径向进给”、“自转+公转”和“自转+径向进给”3种运动耦合关系的分析,

发现“自转+径向进给”是可以实现的,因此,有限元模型中滚柱采用了“自转+径向进给”的运动耦合。同时,将滚柱的“公转”转化为导管的“自转”,由于实际加工过程中导管与管套不发生

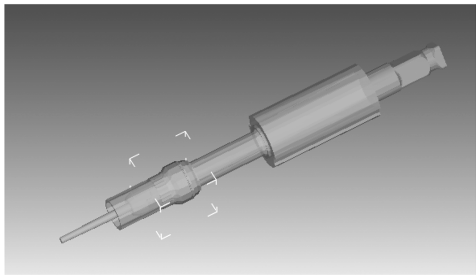


图 7 有限元模型
Fig.7 Finite element model

表 1 有限元模型参数

Table 1 Parameters of finite element model	
有限元建模参数	属性或数值
导管材料	Ti-3Al-2.5V
管套材料属性	刚体
芯轴材料属性	刚体
保持架材料属性	刚体
滚柱材料属性	刚体
网格数量	50000
摩擦因数	滚柱与导管为 0.08；导管与管套为 1.00

相对运动，因此，通过设置接触摩擦边界条件实现导管和管套的同步转动，以达到实际加工的仿真效果。

2.2 优化方案及结果

导管在滚柱的作用下发生变形，实现与管套的连接。因此，滚柱的运动参数与导管的变形行为有直接关系。滚柱的运动参数由自转、沿导管轴线的公转和径向进给构成。滚柱的自转速度和公转速度由芯轴的自转速度决定，类似于行星轮系。滚柱的径向进给速度由芯轴的轴向进给速度决定，与芯轴的锥度相关。即滚柱的运动参数可通过芯轴转速和芯轴轴向进给速度确定，因此，芯轴转速和芯轴轴向进给速度是需要优化的两个重要工艺参数。

本工艺方案是通过将导管材料旋压入管套的凹槽中来实现导管与管套的连接，需要指出的是，旋压连接过程中导管和管套会发生弹性变形，加工完成后产生弹复，这对连接效果有一定的影响，文献[2]和文献[7]已对该问题进行了报道，且指出弹复后导管与管套之间依然残留大量弹性变形，保证两者之间有残余接触力，确保导管和管套紧密连接。文献[11]指出管套凹槽的填充程度越大，接触应力越大，连接强度越高。因此，本优化设计的目标为管套凹槽的填充率，采用响应曲面法进行参

数优化，设计了 2 变量 3 水平的中心复合试验方案，方案的变量及水平如表 2 所示，响应曲面的试验方案及结果如表 3 所示。采用完全二阶函数模型构建填充率的响应曲面函数模型，如式（1）所示，图 8 为得到的响应曲面。

$$R = 606.21x + 6516.67y - 718.75xy - 99.17x^2 - 23041.67y^2 - 1047.01$$

(1)

式中： R 为填充率，%； x 为芯轴自转速度， $(r \cdot s^{-1})$ ； y 为芯轴轴向进给速度， $(mm \cdot s^{-1})$ 。

表 2 中心复合试验方案的变量及水平

Table 2 Variables and levels for central composite experimental scheme		
设计变量	芯轴自转速度/ ($r \cdot s^{-1}$)	芯轴轴向进给速度/ ($mm \cdot s^{-1}$)
低水平	2.6	0.08
中心点	2.8	0.10
高水平	3.0	0.12

表 3 响应曲面试验方案及结果

Table 3 Experimental scheme and results of response surface			
方案	芯轴自转速度/ ($r \cdot s^{-1}$)	芯轴轴向进给速度/ ($mm \cdot s^{-1}$)	填充率/%
1	3.0	0.08	79.2
2	3.0	0.12	70.4
3	2.6	0.10	93.1
4	2.8	0.12	81.2
5	2.6	0.08	82.6
6	2.8	0.10	91.5
7	2.6	0.12	85.3
8	2.8	0.08	87.6
9	3.0	0.10	86.2

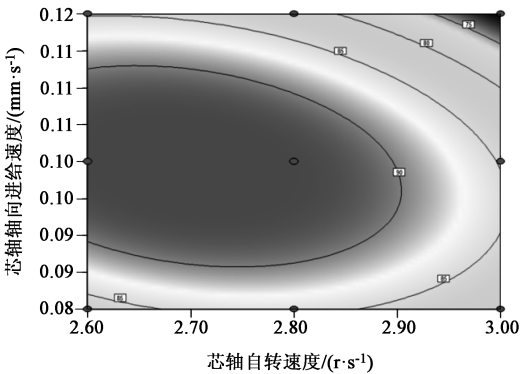


图 8 响应曲面
Fig.8 Response surface

采用方差分析检验响应曲面函数模型的显著性和精度^[12]，分析结果如表 4 所示。响应曲面函数模

表 4 响应曲面函数模型的显著性分析

Table 4 Significant analysis for response surface function model

项目	离差平方和	自由度	均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	366.31	5	73.26	22.18	0.0142
<i>x</i>	36.89	1	36.89	11.17	0.0443
<i>y</i>	171.30	1	171.30	51.86	0.0055
<i>xy</i>	33.06	1	33.06	10.01	0.0507
<i>x</i> ²	31.47	1	31.47	9.53	0.0539
<i>y</i> ²	169.89	1	169.89	51.44	0.0056
残项	9.91	3	3.30	—	—

型的 *F* 值为 22.18, *P* 值为 0.0142 (<0.0500), 表明响应曲面函数模型对响应值十分显著。响应曲面函数模型的拟合度 *R-Squared* 为 0.9737, 拟合近似度 *Adj R-Squared* 为 0.9298, 表明构建的响应曲面函数模型具有良好的精度。

在变量设计空间内, 基于构建的响应曲面函数模型, 以最大填充率 (Max (*R*)) 为寻优目标, 求解最优的变量组合。得到最优变量组合为: 芯轴自转速度为 $2.68 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 、芯轴轴向进给速度为 $0.11 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 模型预测的填充率为 93.3%。

采用优化参数进行数值模拟分析, 数值模拟结果如图9所示, 填充率为 93.1%, 与模型预测值的

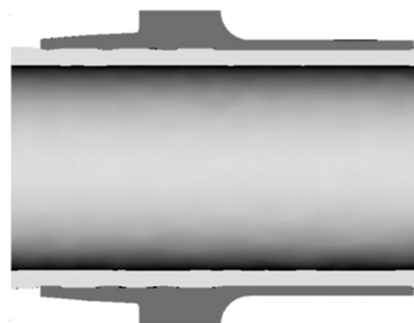


图 9 优化参数的模拟结果

Fig. 9 Simulated result of optimized parameters

相对误差为 0.21%。图 10 为加工过程中金属的流动速度, 图 11 为加工终了时金属的位移。结果表明, 变形区金属沿径向 (*Y* 向和 *Z* 向) 的流动速度和位移远大于轴向 (*X* 向), 由于金属的轴向流动十分有限, 因此, 导管壁厚的减薄主要是填充管套凹槽引起的正常减薄。若不考虑金属的轴向流动, 根据体积不变定律, 计算的理论壁厚减薄量为 $129.45 \mu\text{m}$, 相对壁厚减薄量为 14.38%; 通过对模拟制件的测量得到的壁厚减薄量为 $136.96 \mu\text{m}$, 相对壁厚减薄量为 15.22%。结果表明, 使用优化参数不会发生因材料大量轴向流动, 而导致导管壁厚非正常减薄和内壁材料堆积等问题, 导管内壁变形均匀, 管套凹槽填充效果良好。

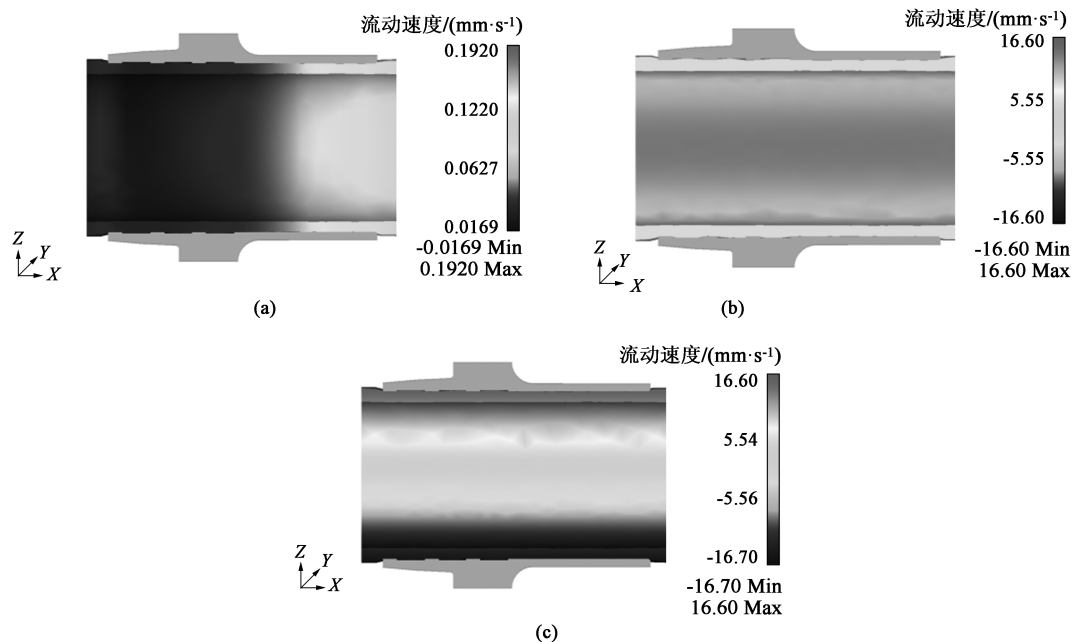


图 10 加工过程中金属流动速度云图

(a) *X* 向 (b) *Y* 向 (c) *Z* 向

Fig. 10 Cloud maps of flow velocity for metal during processing

(a) *X* direction (b) *Y* direction (c) *Z* direction

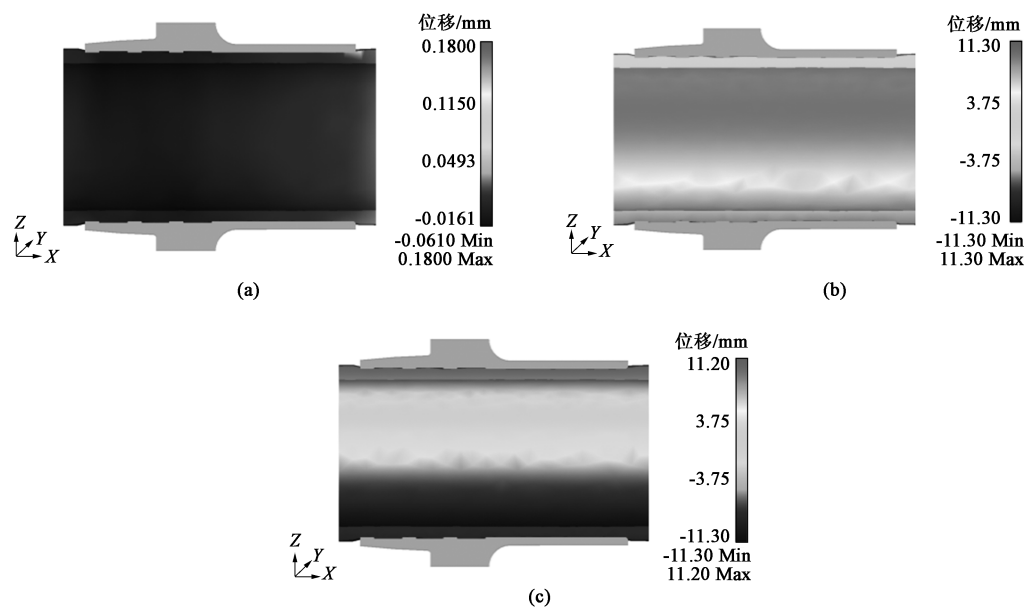


图 11 加工终了时金属位移云图
(a) X 向 (b) Y 向 (c) Z 向
Fig. 11 Cloud maps of displacement for metal at end processing
(a) X direction (b) Y direction (c) Z direction

采用优化参数进行旋压连接试验，图 12 为试验结果，试验制件的填充率为 92.8%，与模型预测值的相对误差为 0.54%。根据体积不变定律，计算的理论壁厚减薄量为 129.24 μm ，相对壁厚减薄量为 14.36%；使用 RA-7520SI 柔性关节臂测量仪测量的

试验制件的壁厚减薄量为 132.4 μm ，相对壁厚减薄量为 14.71%，与数值模拟结果较为吻合，进一步表明所构建的响应曲面函数模型具有较高的预测精度，并且使用优化参数可获得具有良好填充的导管连接接头。

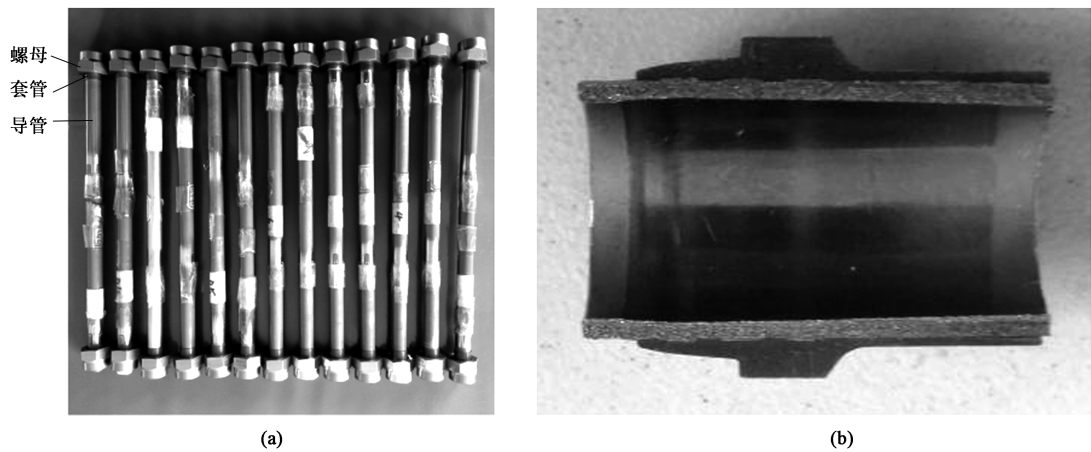


图 12 优化参数试验结果
(a) 试验制件 (b) 连接区剖切图
Fig. 12 Experimental results of optimized parameters
(a) Experimental workpiece (b) Sectional view of joining region

依据标准 HB/Z 20042—2016^[13]和 SAE AS85421^[14]规定的试验要求和办法，对试验制件的主要性能进行检测。试验制件通过了气压泄漏试验和 2 倍工作压力即 56 MPa 的耐压试验；连接强度试验结果为

导管断裂，未发生管套拉脱，表明导管与管套的连接强度已高于导管的抗拉强度，导管连接接头具有良好的连接性能；弯曲疲劳试验达到 10^7 次，未发生介质泄漏、损伤或断裂；脉冲试验达到 20 万次，

未发生介质渗漏或其他失效。所检测项目均达到 HB/Z 20042—2016^[13] 和 SAE AS85421^[14] 规定的技术指标要求,表明采用优化参数能够获得性能优良的导管连接接头。

3 结论

(1) 采用响应曲面法,以填充率为优化目标,对航空导管连接接头旋压连接工艺参数——芯轴自转速度和轴向进给速度进行了优化,建立了完全二阶响应曲面函数模型。响应曲面函数模型的 F 值为 22.18, P 值为 0.0142,表明函数模型对响应值十分显著。响应曲面函数模型的拟合度 R -Squared 为 0.9737,拟合近似度 Adj R -Squared 为 0.9298,表明构建的响应曲面函数模型具有良好的精度。通过对响应曲面函数的求解,获得最优的变量组合为:芯轴自转速度为 $2.68 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 、芯轴轴向进给速度为 $0.11 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,模型预测的填充率为 93.3%。

(2) 采用优化参数数值模拟的填充率为 93.1%,与模型预测值的相对误差为 0.21%,计算的理论壁厚减薄量为 $129.45 \mu\text{m}$ 。相对壁厚减薄量为 14.38%;数值模拟的壁厚减薄量为 $136.96 \mu\text{m}$,相对壁厚减薄量为 15.22%。结果表明,使用优化参数不会发生因材料大量轴向流动,而导致导管壁厚非正常减薄和内壁材料堆积等问题,导管内壁变形均匀,管套凹槽填充效果良好。

(3) 采用优化参数试验制件的填充率为 92.8%,与模型预测值的相对误差为 0.54%,试验制件的壁厚减薄量为 $132.4 \mu\text{m}$,相对壁厚减薄量为 14.71%,与数值模拟结果比较吻合。依据标准 HB/Z 20042—2016 和 SAE AS85421,对试验制件的主要性能进行检测,所检测项目均达到标准规定的技术指标要求。结果表明,使用优化参数可获得填充良好、性能优良的导管连接接头。

参考文献:

- [1] 孙伟光. 无扩口导管成形连接工艺仿真与参数优化 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
Sun W G. Simulation and Parameter Optimization of Flareless Tube Forming Connection Process [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019.
- [2] 吴为, 张荣霞, 曾元松, 等. 钛合金导管无扩口内径滚压连接成形技术研究 [J]. 航空制造技术, 2009, (10): 68-70, 76.
Wu W, Zhang R X, Zeng Y S, et al. Research on the forming process of the flareless Internal rolling for titanium alloy tubes [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, (10): 68-70, 76.

- [3] 付成勇, 肖军雷, 刘振军. 挤压式无扩口导管密封性能改进研究 [J]. 航空维修与工程, 2015, (2): 68-69.
Fu C Y, Xiao J L, Liu Z J. Research on sealing property improvement of flareless tube fittings [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015, (2): 68-69.
- [4] 王梁栋, 张东生, 吕张来. 无扩口管路连接件的制造工艺技术研究 [J]. 制造业自动化, 2013, 35 (22): 46-48.
Wang L D, Zhang D S, Lyu Z L. Manufacturing technology on connectors of flare-less tube [J]. Manufacturing Automation, 2013, 35 (22): 46-48.
- [5] 王守财, 董宇, 孙忠志, 等. 航空液压系统无扩口管路件研究现状分析 [J]. 液压与气动, 2020, (7): 150-157.
Wang S C, Dong Y, Sun Z Z, et al. Analysis of research status on aviation hydraulic flareless fittings [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (7): 150-157.
- [6] 江志强, 杨合, 詹梅, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (4): 44-50, 84.
Jiang Z Q, Yang H, Zhan M, et al. State-of-the-arts and prospectives of manufacturing and application of titanium alloy tube in aviation industry [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (4): 44-50, 84.
- [7] 张荣霞, 吴为, 曾元松. 内径滚压连接三维有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2011, 18 (4): 85-89.
Zhang R X, Wu W, Zeng Y S. The three-dimensional finite element analysis on the internal rolling connection [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18 (4): 85-89.
- [8] 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, (22): 84-88.
Zhang R X, Wu W, Zeng Y S. Research on connection strength of flareless internal rolling tube joint [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, (22): 84-88.
- [9] HB 6058—2008, 挤压式无扩口管套 [S].
HB 6058—2008, Sleeve, swager, flarless tube [S].
- [10] 吕昕宇, 许沂, 张士宏, 等. 钛合金连接管内径滚压成形的数值模拟 [J]. 锻压装备与制造技术, 2004, (3): 82-84.
Lyu X Y, Xu Y, Zhang S H, et al. Simulation of connecting tube's roller swaging for titanium alloy [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2004, (3): 82-84.
- [11] 李军锋. 钛合金管材内滚压连接有限元分析与液压系统设备设计 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
Li J F. Finite Element Analysis on the Internal Rolling Connection for Titanium Alloy Tubes and the Design of the Connection Device of Hydraulic System [D]. Shenyang: Northeast University, 2010.
- [12] Li Z P, Lu D G, Gao X J. Optimization of mixture proportions by statistical experimental design using response surface method - A review [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 36: 102101.
- [13] HB/Z 20042—2016, 钛合金导管无扩口滚压连接试验要求 [S].
HB/Z 20042—2016, Test requirement for flareless roller connection of titanium alloy tube [S].
- [14] SAE AS85421, Fittings, tube, fluid systems, separable, beam seal, 3000/4000 psi, general specification for [S].