

## 铝合金管路快卸卡箍柔性连接技术

李光俊<sup>1</sup>, 段晓艳<sup>1</sup>, 杨景超<sup>1</sup>, 郭伟<sup>1</sup>, 杨金<sup>2</sup>, 李恒<sup>2</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092; 2. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 介绍了一种新型铝合金管路快卸卡箍柔性连接的结构形式, 通过开展管材性能参数测试、五柱六槽管端滚压连接工艺建模、工艺仿真和工艺试验, 探究了扭矩等工艺参数对于滚压连接成形质量的影响规律, 确定了大直径铝合金管端滚压连接工艺参数。结果表明: 扭矩与管套凹槽的填充率成正比, 扭矩过小, 管套凹槽填充不足, 扭矩过大, 导管材料填充完管套凹槽后会继续伸长, 在实际生产中应将扭矩控制在合理范围。研制的铝合金管路快卸卡箍柔性连接导管组件通过了性能考核试验, 验证了快卸卡箍柔性连接结构的可行性和可靠性, 为后续工程化应用奠定了基础。

**关键词:** 滚压连接; 扭矩; 滚压深度; 快卸卡箍; 柔性连接

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.011

**中图分类号:** V262.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0079-08

## Flexible connection technology on quick-release clamp for aluminum alloy pipeline

Li Guangjun<sup>1</sup>, Duan Xiaoyan<sup>1</sup>, Yang Jingchao<sup>1</sup>, Guo Wei<sup>1</sup>, Yang Jin<sup>2</sup>, Li Heng<sup>2</sup>

(1. Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. School of Materials, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A new structural form of flexible connection for aluminum alloy pipeline quick-release clamp was introduced. Then, through the test of pipe performance parameters, modeling of five-column and six-groove pipe end rolling connection process, process simulation and process test, the influence law of process parameters such as torque on the forming quality of rolling connection was explored, and the process parameters of rolling connection for large diameter aluminum alloy pipe end were determined. The results show that the torque is proportional to the filling rate of pipe sleeve groove. If the torque is too small, the pipe sleeve groove is filled insufficient. If the torque is too large, the pipe material continues to elongate after filling the pipe sleeve groove, so the torque should be controlled within a reasonable range in the actual production. The developed flexible connecting pipe assembly of aluminum alloy pipeline quick-release clamp passes the performance assessment test, which verifies the feasibility and reliability of the quick-release clamp flexible connecting structure and lays the foundation for subsequent engineering application.

**Key words:** rolling connection; torque; rolling depth; quick-release clamp; flexible connection

犹如人体的血管, 飞机管路系统承担了全机液压油、燃油、冷气、暖气等多种工作介质的输送任务, 是现代飞机液压、燃油、环境控制系统中最重要零组件之一<sup>[1-2]</sup>。一旦管路系统失效, 极可能出现飞机故障症候, 甚至出现机毁人亡等重大飞行事故。因此, 管路系统的连接结构及连接性能直接影响了飞机整个管路系统的使用性能和使用寿命, 高可靠的管路连接结构是保证飞机管路系统正常工作的首要前提。以燃油系统为例, 采用长距离、大直径的铝合金管路将燃油从机翼(或机身中部)输

送至机身尾部, 向发动机提供额定流量和压力的燃油是现代军用飞机的总体结构布局。为解决管路过长导致的制造、安装、维护困难, 并减少飞行中机体变形引发的管路连接应力, 需将燃油管路分为多根导管串行连接, 其中前后两根导管之间使用柔性连接结构。这种连接结构允许前后两段导管有一定的轴向间隙偏差和径向角度偏差, 在确保密封性的同时, 能够减小机体变形引发的管路连接应力。因此, 管路柔性连接技术已经成为现代飞机管路制造的核心技术, 并得到航空制造企业的高度重视。

美国航空工业对管路系统的柔性连接技术研究较早, 并重点对导管与管套之间的滚压连接开展了深入的研究, 研制了滚压连接设备, 申请了发明专利。美国波音公司在管路柔性连接方面形成了系列

收稿日期: 2023-01-13; 修订日期: 2023-04-12

作者简介: 李光俊(1970-), 男, 硕士, 研究员级高级工程师

E-mail: lgjwcl@sina.com

化的技术标准,并由专业化的制造商提供柔性连接接头产品。中国商用飞机公司针对密封圈磨损导致的飞机燃油系统柔性连接接头泄漏情况开展了研究,建立了飞机燃油系统柔性连接接头泄漏量的计算模型,进行了泄漏量的分析、计算与验证,确定了高精度的泄漏量计算方法<sup>[3]</sup>。中国航空综合技术研究所、沈阳飞机设计研究所对管路连接快卸卡箍的结构进行了标准化研究,并在国内航空工业进行了推广应用<sup>[4-7]</sup>。北京航空制造技术研究院、成都飞机工业(集团)有限公司针对工作压力为 28 MPa 的高强钛管开展了小直径( $\Phi 6 \sim \Phi 20$  mm)的管端滚压连接工艺研究,进行了三柱三槽滚压连接的成形机理分析,掌握了内径滚压连接成形机理,建立了滚压连接全过程三维数值模型,探明了滚压过程中的不均匀变形规律及材料流动规律,所研制的典型规格的管路连接件通过了连接强度、振动疲劳等性能考核试验,实现了工程化应用<sup>[8-12]</sup>。

因此,以美国为首的国外航空制造企业的管路系统快卸卡箍柔性连接技术水平已经相当高,因涉及国外航空航天军工产品的关键技术指标,国外航空制造企业对此技术一直严格保密,相关文献也罕见报道。国内对小直径钛管滚压连接工艺研究较多,对燃油管路的快卸卡箍标准化研究也比较深入,但将管端滚压连接工艺与快卸卡箍连接结合起来,在飞机燃油系统大直径( $\Phi 25 \sim \Phi 100$  mm)铝合金管路快卸卡箍柔性连接技术的研究方面尚未成熟,与国外相比差距甚大,还需要开展更多的滚压工艺研究与连接性能考核。

## 1 研究方案

飞机燃油管路的柔性连接主要有螺纹柔性连接和快卸卡箍柔性连接两种。螺纹柔性连接由 2 个管套、1 个密封圈、1 个螺套、1 个螺母组成,如图 1 所示。导管 A、导管 B 分别与管套五柱五槽滚压连接后,在管套的环形槽安装两个密封圈,通过螺母将螺套压在密封圈外缘实现密封。密封圈是橡胶材料,有一定的压缩量,既保证了密封性和可靠性,又具备轴向间隙为 3~6 mm 和径向角度为  $0^\circ \sim 3^\circ$  的补偿能力。由于螺母与螺套之间是螺纹连接,螺母、螺套均为整体构件,尺寸比较大,结构较重,不方便安装与拆卸,主要用于传统的飞机机型。

快卸卡箍柔性连接是在螺纹柔性连接的基础上发展起来的,其结构形式如图 2 所示。管套内壁从

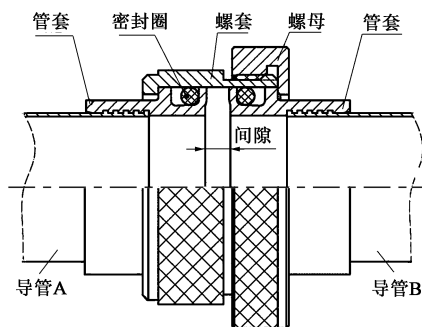


图 1 螺纹柔性连接结构

Fig. 1 Threaded flexible connection structure

5 个槽变为 6 个槽,导管与管套采用五柱六槽滚压连接;用整体式薄套筒和分体式快卸卡箍取代了螺纹柔性连接结构中的螺套和螺母,不但减轻了重量,实现了结构轻量化,还方便了安装与拆卸,提高了管路系统的维护性能。快卸卡箍柔性连接的最大工作压力可达 0.8 MPa;工作温度范围为  $-55 \sim 100^\circ\text{C}$ ;具备轴向间隙为 3~6 mm 和径向角度为  $0^\circ \sim 3^\circ$  的补偿能力;适用的导管外径为  $\Phi 25 \sim \Phi 100$  mm,安装后允许在连接部位进行  $0.5^\circ$  的径向挠动,能够满足现代飞机的使用需求。

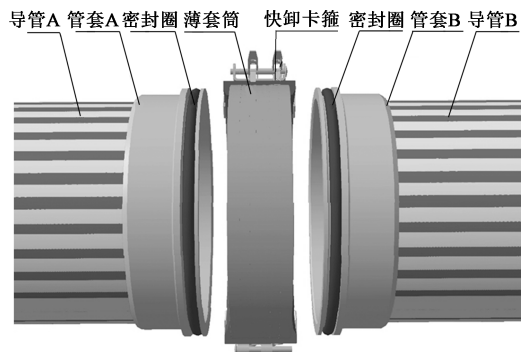


图 2 快卸卡箍柔性连接结构

Fig. 2 Flexible connection structure for quick-release clamp

快卸卡箍柔性连接结构中可能的泄漏有密封圈泄漏和管端滚压连接泄漏两种。对于密封圈泄漏,可通过更换不同尺寸的密封胶圈、性能考核试验加以解决;对于管端滚压连接泄漏,则需改进五柱六槽滚压连接工艺,重新生产并更换导管,影响范围较大。因此,本文以五柱六槽管端滚压连接工艺为关键突破口,采用理论分析、数值模拟和试验验证有机结合的方法,选择外径为  $\Phi 75$  mm 的铝合金导管,开展管材性能参数测试、五柱六槽管端滚压连接工艺建模、工艺仿真和工艺试验研究,研制大直径铝合金滚压连接导管,并与快卸卡箍、密封胶圈

组成快卸卡箍柔性连接组件进行性能考核试验，评估快卸卡箍柔性连接结构的可行性和可靠性。

2 试验研究及讨论

2.1 管材性能参数测试

2.1.1 弧形试样制备

本文选择材料牌号为 LF2M、直径为  $\Phi 75$  mm、壁厚为 1.5 mm 的铝合金管材（记为 LF2M-G75×1.5 铝合金管材），按照 GB/T 228.1—2021<sup>[13]</sup>，使用纵向弧形试样进行管材性能测试。采用线切割方法沿管材纵向截取 4 个试样，见图 3 和图 4。试样需在管件不同方位选取，最后取其中 3 个的平均值，另外 1 个试样备用。

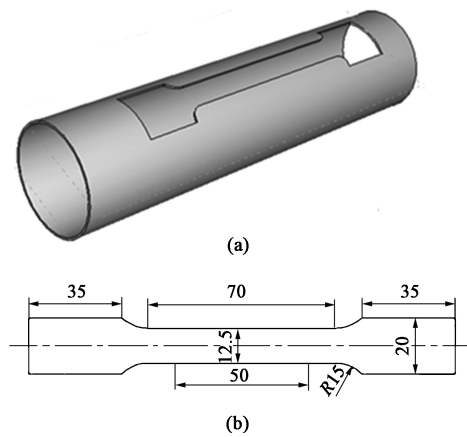


图 3 管材弧形试样取样部位 (a) 及尺寸 (b)

Fig. 3 Sampling position (a) and sizes (b) of arc sample on pipe

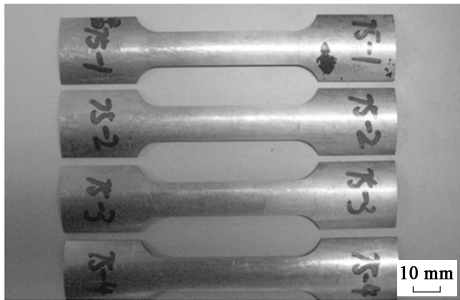


图 4 LF2M-G75×1.5 铝合金管材弧形试样

Fig. 4 Arc samples of LF2M-G75×1.5 aluminum alloy pipe

2.1.2 性能参数测试

分别将 LF2M-G75×1.5 铝合金管材弧形试样安装在电子万能试验机进行拉伸试验，见图 5，获得连续的拉力、位移数据，通过数据处理后获得弧形试样的真实应力-真实应变曲线和管材性能参数，见图 6 和表 1。

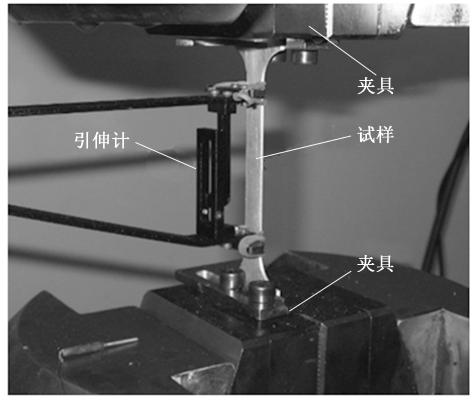


图 5 弧形试样拉伸过程

Fig. 5 Tensile process of arc sample

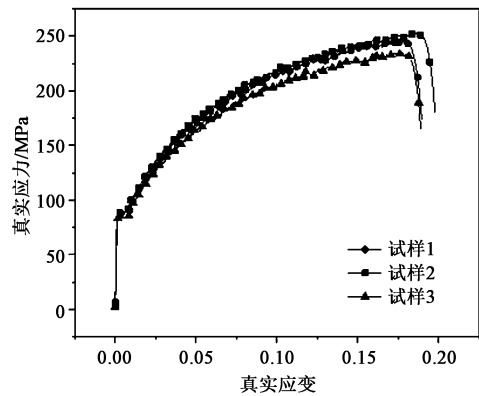


图 6 弧形试样的真实应力-真实应变曲线

Fig. 6 True stress-true strain curves of arc samples

表 1 弧形试样的性能参数

Table 1 Performance parameters of arc samples

参数	试样 1	试样 2	试样 3	平均值
弹性模量 $E/\text{GPa}$	62.297	82.662	73.870	72.943
伸长率 $A/\%$	20.846	21.836	20.771	21.151
屈服强度 $R_{\text{eL}}/\text{MPa}$	87.554	87.955	83.310	86.273
抗拉强度 $R_{\text{m}}/\text{MPa}$	207.250	210.695	197.378	205.1077
强度系数 $K/\text{MPa}$	414.644	417.246	392.561	408.1503
硬化指数 $n$	0.286	0.284	0.282	0.284
材料常数 $b$	0.004580	0.003940	0.004640	0.004387

2.2 五柱六槽管端滚压连接工艺建模

2.2.1 滚压连接工艺模型构建

五柱六槽管端滚压连接主要由滚压芯轴、滚柱支架、转接头、滚柱、夹模共同实现，工艺模型见图 7。滚柱支架为桶形体，内部安装锥形滚压芯轴，在滚压端头均匀分布 5 个锥形滚柱。滚压芯轴主动旋转、前进，带动 5 个滚柱连续旋压导管端头内壁，导管材料发生轴向和周向流动，外壁材料填满管套



内壁 6 个凹槽, 形成一道密封线, 从而使导管与管套连接为一体。

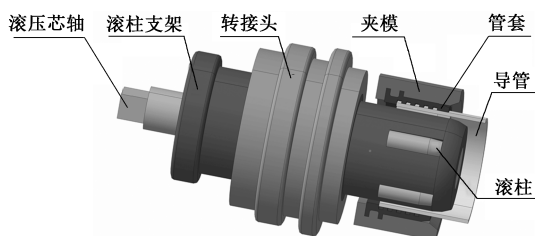


图 7 导管端头滚压连接工艺模型

Fig. 7 Process model of rolling connection for pipe end

### 2.2.2 滚压连接运动分析

五柱六槽管端滚压连接过程中, 在滚压芯轴上施加一定的滚压扭矩, 滚压芯轴主动旋转 (角速度为  $\omega_1$ )、进给 (进给速度为  $v_1$ ), 通过锥形结构产生的径向挤压力及切向摩擦力带动 5 个滚柱随动公转 (角速度为  $\omega_2$ )、自转 (角速度为  $\omega_3$ )。随着滚压扭矩的增加, 在滚压芯轴径向挤压力和切向摩擦力的反复作用下, 5 个滚柱与导管、滚压芯轴之间的接触力增大, 导管内径随之增大, 导管外壁材料逐渐填满管套 6 个环形凹槽, 滚压前后导管内径之差为滚压深度, 整个运动模型如图 8 所示。由于滚压深度直接决定了管套凹槽的填充情况及其密封性, 滚压连接过程中主要的工艺参数为滚压扭矩和滚压深度。

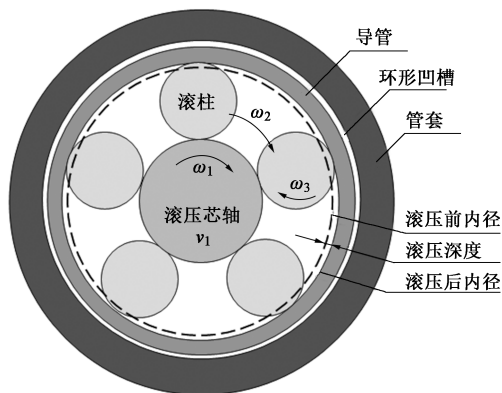


图 8 导管端头滚压连接运动模型

Fig. 8 Motion model of rolling connection for pipe end

### 2.2.3 滚压连接工艺模型简化

工艺仿真的目的为分析滚压连接工艺参数对管套与导管连接质量的影响规律, 以获得最佳的滚压扭矩和滚压深度。在五柱六槽管端滚压连接过程中, 滚柱支架维持 5 个滚柱的轴向位置、周向相对位置不变; 转接头实现不同直径滚柱支架与滚压设备之间的连接; 夹模维持管套的位置不变, 滚柱支架、

转接头、夹模均不直接参与滚压连接, 可以省略。滚压芯轴主要是向 5 个滚柱传递作用力, 不直接参与滚压连接, 可以省略, 但需要通过仿真软件在 5 个滚柱上施加相应的运动轨迹。因此, 简化最终的导管端头滚压连接工艺模型, 仅仅保留直接参与的导管、管套和 5 个滚柱, 如图 9 所示。

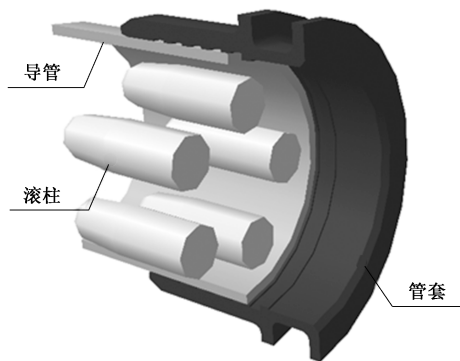


图 9 导管端头滚压连接工艺简化模型

Fig. 9 Simplified model of rolling connection process for pipe end

## 2.3 导管端头滚压连接工艺仿真

### 2.3.1 不同滚压深度工艺参数仿真

管端滚压连接过程中的滚压深度直接决定了管套凹槽的填充情况: 滚压深度过小, 导管材料未能填满管套凹槽, 凹槽内有较大间隙, 此类型属于填充不足, 见图 10a; 滚压深度适中, 导管材料恰能完成所有凹槽的填充, 此类型属于最佳填充, 见图 10b; 滚压深度过大, 凹槽均完成填充后, 导管开始轴向伸长, 凸出管套, 此类型属于填充过量, 见图 10c。

鉴于管端滚压连接过程中滚压深度直接决定了管套凹槽的填充情况, 需用不同的滚压深度参数进行仿真分析, 以了解导管外壁材料填充管套凹槽的情况。分别进行滚压深度为 0.28、0.46、0.48、0.50、0.52 和 0.54 mm 的 6 组有限元模拟仿真, 不同滚压深度下的凹槽填充情况见图 11。

通过仿真分析发现: 在滚压过程中的第 1 阶段, 导管材料以径向流动为主, 开始对 6 个凹槽进行填充, 如图 11a 所示; 第 2 阶段, 导管材料同时发生轴向流动和径向流动, 逐步完成所有凹槽的填充, 如图 11b、图 11c 和图 11d 所示; 第 3 阶段, 当 6 个凹槽均完成填充时, 导管材料主要发生轴向流动, 滚压处管材壁厚减薄加剧, 导管开始轴向伸长, 凸出管套, 如图 11e 和图 11f 所示。从连接密封性和可靠性分析, 应使管套凹槽填充完整, 且导管材料不可超过管套过长。由图 11 可知, 当滚压深度为



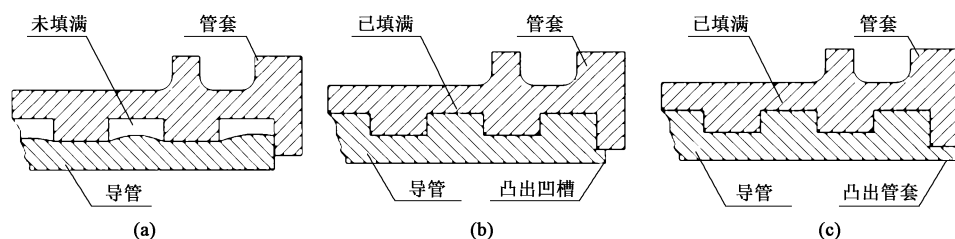


图10 管套凹槽的填充类型

(a) 填充不足 (b) 最佳填充 (c) 填充过量

Fig. 10 Filling types of pipe sleeve groove

(a) Underfilling (b) Optimum filling (c) Overfilling

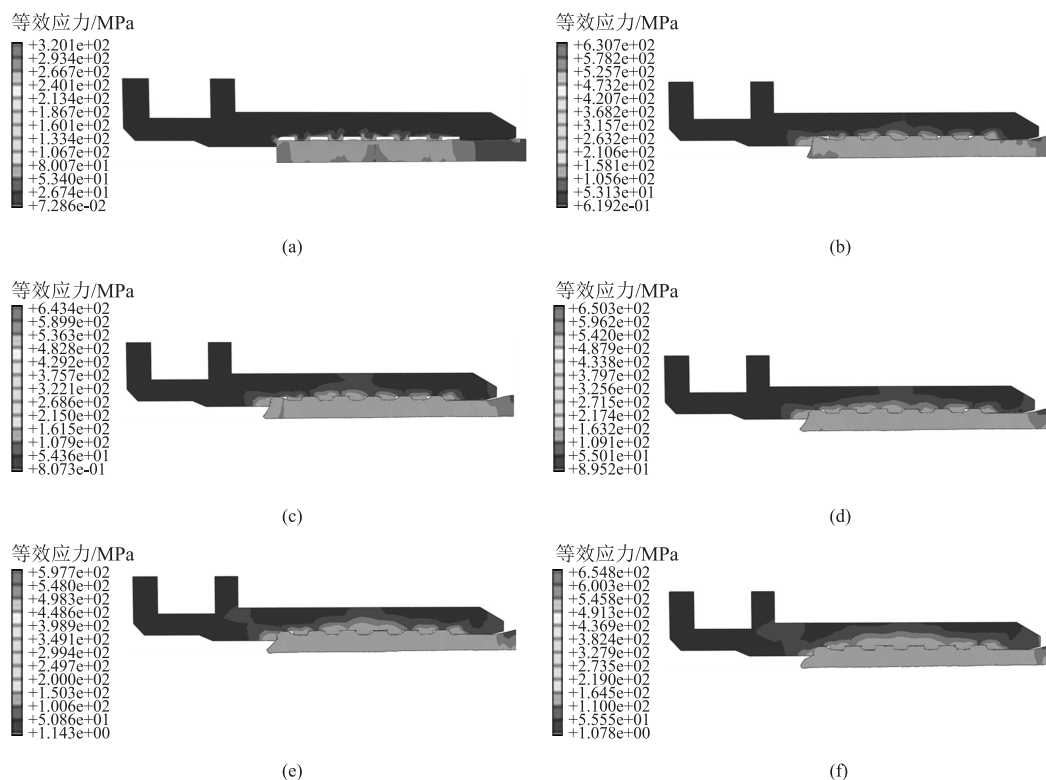


图11 不同滚压深度下凹槽填充情况

(a) 0.28 mm (b) 0.46 mm (c) 0.48 mm (d) 0.50 mm (e) 0.52 mm (f) 0.54 mm

Fig. 11 Filling conditions of groove under different rolling depths

0.28 mm 时, 管套凹槽有较大间隙, 并未完成填充, 属于填充不足; 随着滚压深度的增大, 管套凹槽的填充效果越来越好, 当滚压深度达到 0.50 mm 时, 管套的 6 个凹槽基本填满, 导管突出管套的距离合适; 当滚压深度为 0.52 和 0.54 mm 时, 导管突出管套的距离过长, 且壁厚减薄, 此时的滚压深度已经超过最佳滚压深度数值, 属于填充过量。

### 2.3.2 滚压扭矩工艺参数

在管套、导管、滚柱几何尺寸不变的情况下, 通过多次导管端面滚压连接工艺仿真, 在滚压深度为 0.50 mm 时, 导管材料基本能够填充管套凹槽,

达到最佳填充状态。在实际生产中扭矩是控制滚压深度的重要参数, 在模拟运行过程中无法直接对扭矩变量进行调控, 因此, 通过在模拟运算中调整滚压深度来间接实现对于扭矩的调控。本节探究了滚压深度与扭矩之间的关系。

导管、滚柱和滚压芯轴三者的位置关系如图 12 所示, 其中,  $M_A$  为滚压芯轴的扭矩,  $M_B$  为滚柱的扭矩,  $M_C$  为滚压过程中芯轴向滚柱传递的损耗,  $M_n$  为滚压设备输出的扭矩。由于简化模型中不考虑滚压过程中芯轴向滚柱传递的损耗  $M_C$ , 则  $M_n = M_A = M_B$ 。  $M_n$  可根据式 (1) 得出。

$$M_n = 9550 \times P/a \quad (1)$$

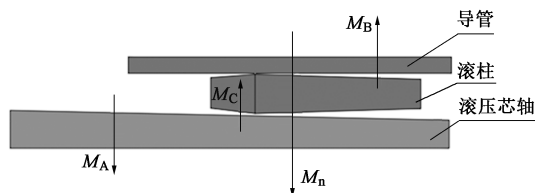


图 12 不同部件位置关系

Fig. 12 Position relationship of different components

式中： $P$  为滚压芯轴传递的功率，kW； $a$  为滚压芯轴的转速， $(r \cdot \min^{-1})$ 。

在实际加工过程中，滚压设备的输出功率是恒定的，则扭矩与滚压芯轴的转速成反比；在模拟过程中，对于设定的滚压圈数是恒定的，不同的滚压深度将会有不同的单圈下压量，单圈下压量越大，所受到的摩擦阻力越大，在实际模拟中滚柱的转速越慢，其扭矩越大。因此，可得出扭矩与滚压深度成正比。

扭矩可通过摩擦力乘以扭矩外侧与导管接触点到导管中心轴线之间的距离求得，不同的滚压深度会产生不同的摩擦力，以及不同的扭矩外侧与导管接触点到导管中心轴线之间的距离，因此，可通过滚压深度对扭矩进行调控，即通过摩擦力乘以滚柱至导管中心轴线之间的距离求得，如式 (2) 所示。

$$T = \mu \times RF \times r \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中： $T$  为有限元模拟的扭矩； $\mu$  为摩擦因数； $RF$  为滚柱反作用力； $r$  为滚柱至导管中心轴线之间的距离。

从工艺仿真结果中导出滚柱的反作用力， $RF1$  为径向反作用力， $RF2$  为周向反作用力， $RF3$  为轴向反作用力，如图 13 所示。在滚压深度为 0.48 mm 即最佳填充状态时，最大反作用力约为 23.58 kN，计算出滚压扭矩为 41.5 N·m，将该值作为 LF2M-G75×1.5 铝合金管材管端滚压有限元仿真得到的工艺参数。

### 2.3.3 工艺仿真结果验证

为了验证管端滚压连接有限元仿真得到的工艺参数的正确性，进行了 LF2M-G75×1.5 铝合金管材管端滚压连接试验，滚压后剖切以检查凹槽的填充情况，见图 14 和图 15。6 个凹槽均填充到管套环槽的顶部，除凹槽 1 有少量间隙外，其余 5 个凹槽均能够完整填充。整体来看，管套的 6 个凹槽能够完整填充，导管材料刚突出凹槽。

### 2.4 导管端头滚压连接工艺试验

将 LF2M-G75×1.5 铝合金导管与管套置于夹模

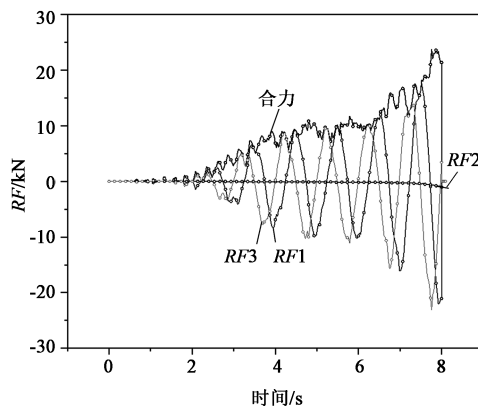


图 13 管端滚压连接中的滚柱反作用力

Fig. 13 Roller reaction forces of rolling connection for pipe end



图 14 管端滚压连接后剖切检查部位

Fig. 14 Section inspection positions of pipe end after rolling connection

中，将导管、管套夹紧，在 5 个滚柱上均匀涂上润滑脂，见图 16。以滚压扭矩为 41.5 N·m 为中间值，在 38.1~48.3 N·m 范围内设定 10 组不同的滚压扭矩，开展导管端头滚压连接工艺试验，并实测设备的最大输出扭矩，滚压连接后剖开检查管套环形凹槽的填充情况。管端滚压连接后的试验件见图 17。滚压扭矩与填充情况数据见表 2。

由表 2 中的工艺试验数据发现，实测最大输出扭矩明显比设定滚压扭矩偏大，其原因为设备的输出扭矩通过滚压芯轴、滚柱的传递才作用在导管内壁，中间存在一定的衰减，设备进行了必要的补偿。由表 2 可知，扭矩与凹槽的填充情况呈正相关：扭矩过小，导管材料填充到管套凹槽的部分少，凹槽填充不足；扭矩过大，导管材料在填充完整凹槽后，会继续伸长，造成导管材料凸出管套凹槽，凹槽填充过量，故应选取使导管恰好填满管套凹槽，并且导管尚未凸出管套时的扭矩。当设定滚压扭矩在 40.4~41.5 N·m 之间时，管套凹槽均达到最佳填充状态。为确保滚压连接可靠，选择 41.5 N·m 作为导管端头滚压连接的最优滚压扭矩。

### 2.5 柔性连接导管组件性能考核试验

采用 41.5 N·m 的滚压扭矩滚压 6 件 LF2M-G75×1.5 铝合金管材端头，并与 6 件密封圈、3 件套筒、3 件快卸卡箍连接成 3 套铝合金管路快卸卡

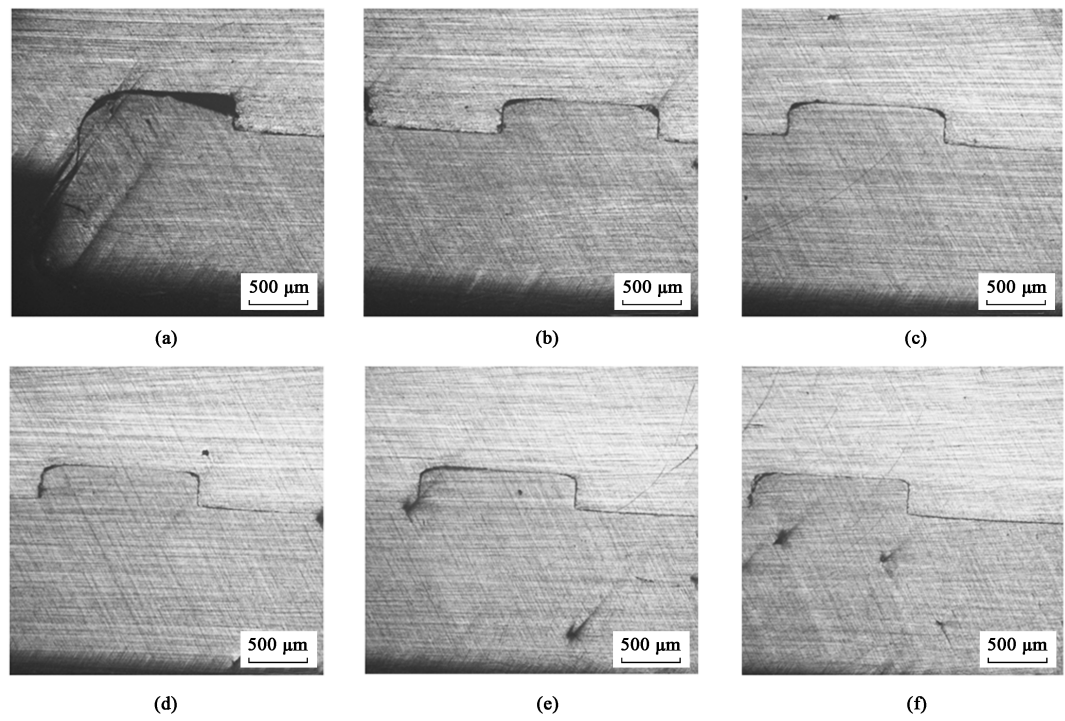


图 15 管端滚压连接后的剖切检查结果

(a) 凹槽 1 (b) 凹槽 2 (c) 凹槽 3 (d) 凹槽 4 (e) 凹槽 5 (f) 凹槽 6

Fig. 15 Section inspection results of pipe end after rolling connection

(a) Groove 1 (b) Groove 2 (c) Groove 3 (d) Groove 4 (e) Groove 5 (f) Groove 6

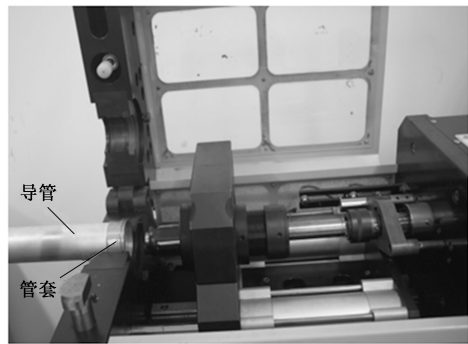


图 16 LF2M-G75×1.5 铝合金管材管端滚压连接试验

Fig. 16 Rolling connection test of pipe end for LF2M-G75×1.5 aluminum alloy pipe



图 17 LF2M-G75×1.5 铝合金管材管端滚压连接试验件

Fig. 17 Rolling connection test parts of pipe end for LF2M-G75×1.5 aluminum alloy pipe

表 2 管端滚压扭矩与凹槽填充情况

Table 2 Rolling torque and groove filling results of pipe end

序号	设定滚压 扭矩/ (N·m)	实测最大 输出扭矩/ (N·m)	凹槽填充 情况	备注
1	38.1	41.0	填充不足	导管材料未填满凹槽
2	39.3	42.0	填充不足	导管材料未填满凹槽
3	40.4	42.4	最佳填充	导管材料基本填满凹槽
4	41.5	44.0	最佳填充	导管材料刚填满凹槽
5	42.7	45.0	最佳填充	导管材料刚凸出凹槽
6	43.8	48.2	填充过量	导管材料凸出凹槽 1 mm
7	44.9	51.5	填充过量	导管材料凸出凹槽 2 mm
8	46.0	53.2	填充过量	导管材料凸出管套
9	47.2	54.6	填充过量	导管材料凸出管套
10	48.3	55.1	填充过量	导管材料凸出管套

箍柔性连接组件，见图 18。3 套连接组件分别进行气密试验、耐压试验和爆破试验 3 项性能考核试验；气密试验保压压力为 0.86 MPa，保压时间为 3 min；耐压试验工作压力为 1.72 MPa，保压时间为 3 min；爆破试验爆破压力为 2.59 MPa，保压时间为 3 min。检查密封性能，能够满足预定的技术指标要求，试验数据见表 3。



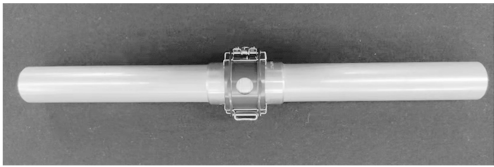


图 18 铝合金管路快卸卡箍柔性连接组件  
Fig. 18 Flexible connection component of quick-release clamp for aluminum pipeline

表 3 铝合金管路快卸卡箍柔性连接组件性能试验结果

Table 3 Performance test results for flexible connection components of quick-release clamp for aluminum alloy pipeline

试验名称	试验技术要求	1#试验件	2#试验件	3#试验件
气密试验	保压压力为 0.86 MPa			
	保压时间为 3 min	合格	合格	合格
	允许泄漏			
耐压试验	工作压力为 1.72 MPa			
	保压时间为 3 min	合格	合格	合格
	不允许泄漏			
爆破试验	爆破压力为 2.59 MPa			
	保压时间为 3 min	合格	合格	合格
	不允许泄漏			

3 结 语

通过开展管材性能参数测试、五柱六槽管端滚压连接工艺建模、工艺仿真和工艺试验，确定了大直径铝合金管端滚压连接工艺参数，研制的 LF2M-G75×1.5 铝合金管路快卸卡箍柔性连接导管组件通过了气密试验、耐压试验和爆破试验 3 项性能考核试验，验证了快卸卡箍柔性连接结构的可行性和可靠性。结果表明：滚压深度与扭矩成正比，滚压深度过小，扭矩过小，管套凹槽填充不足；滚压深度过大，扭矩过大，管套凹槽填充过量，导致导管材料凸出管套，故实际生产中应选择合适的扭矩。

本文对这种新型快卸卡箍柔性连接结构的性能考核还不全面，还需要进一步结合飞机使用环境，开展重复装配、高温试验、低温试验、振动试验、冲击试验、加速度试验、挠曲试验、脉冲试验、电搭接试验等性能试验，更加全面地掌握快卸卡箍柔性连接的可靠性，以达到工程化应用的目的。

参考文献：

[1] Adib A M L, Baptista C A R P, Barboza M J R, et al. Aircraft engine bleed system tubes: Material and failure mode analysis [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14 (8): 1605-1617.

[2] Yang H, Li H, Zhang Z Y, et al. Advances and trends on tube bending forming technologies [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25 (1): 1-12.

[3] 龚昊, 江华, 卞刚. 飞机燃油导管柔性接头泄漏量计算分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, (25): 358-363.

Gong H, Jiang H, Bian G. Calculation and analysis of leakage of flexible joint of aircraft fuel tube [J]. Science Technology and Engineering, 2019, (25): 358-363.

[4] 干正烈, 朱绍荷. 国外新型导管连接快卸卡箍 [J]. 航空标准化与质量, 1998, (5): 45-48.

Gan Z L, Zhu S H. New foreign quick-release clamp for conduit connection [J]. Aviation Standardization & Quality, 1998, (5): 45-48.

[5] 朱绍荷. 铝合金柔性导管连接卡箍简介 [J]. 航空标准化与质量, 2004, (3): 35-37.

Zhu S H. Brief introduction of aluminum alloy flexible coupling clamps for pipes [J]. Aviation Standardization & Quality, 2004, (3): 35-37.

[6] 郑敏, 张爽, 吴超. 国内外导管连接卡箍发展动态研究 [J]. 航空标准化与质量, 2010, (4): 15-18.

Zheng M, Zhang S, Wu C. Development trends of coupling clamps for pipes at home and abroad [J]. Aviation Standardization & Quality, 2010, (4): 15-18.

[7] 张宗华, 王宗武, 张哲, 等. 高温高压导管连接卡箍标准体系分析 [J]. 航空标准化与质量, 2014, (6): 7-10.

Zhang Z H, Wang Z W, Zhang Z, et al. Analysis on standard system of connecting clamp for high temperature and high-pressure pipe [J]. Aviation Standardization & Quality, 2014, (6): 7-10.

[8] 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.

Wu W, Zhang R X, Zeng Y S, et al. Research on the forming process of the flareless internal rolling for titanium alloy tube [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2009, (10): 68-70.

[9] 张荣霞, 吴为, 曾元松, 等. 钛合金导管内径滚压连接数值模拟与试验研究 [J]. 航空制造技术, 2011, (16): 90-93.

Zhang R X, Wu W, Zeng Y S, et al. Numerical simulation and experimental research on internal rolling connection of titanium alloy tubes [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2011, (16): 90-93.

[10] 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.

Zhang R X, Wu W, Zheng W T, et al. Analysis of forming characteristics of the inner tube rolling connection based on torque control [J]. Materials Science and Technology, 2017, 25 (3): 52-57.

[11] 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]. Aviation Manufacturing Technology, 2016, (22): 84-88.

[12] 邵闯, 益萱, 邱明星, 等. 滚压钛合金导管振动疲劳特性分析 [J]. 航空制造技术, 2014, (19): 98-101.

Shao C, Yi X, Qiu M X, et al. Vibration fatigue properties analysis of titanium alloy tubes connected by rolling [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2014, (19): 98-101.

[13] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].

GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].