

# 飞机铝合金管材拉杆收口工艺

王 强

(成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092)

**摘要:** 针对飞机铝合金管材拉杆零件, 进行管端收口工艺研究, 分析工艺方案、旋锻模具设计、旋锻工艺参数设计并进行试验验证。研究表明: 拉杆收口旋锻成形工艺相对冷挤压、热挤压成形更高效; 旋锻成形过程中, 实际操作的工艺参数中轴向进给量的影响起主要作用; 为保证拉杆内外表面质量, 避免加工缺陷, 随着收口外径尺寸的减小, 轴向进给量也要相应地减小。轴向进给量与模具锥角和单组径向压缩量相关, 对于过渡区锥角为  $19^\circ$  的拉杆, 外圆直径为  $\Phi 35 \sim \Phi 40$  mm 时, 每组初锻轴向进给量应小于 3.0 mm; 当外圆直径为  $\Phi 30 \sim \Phi 35$  mm 时, 轴向进给量应小于 1.8 mm; 当外圆直径小于  $\Phi 30$  mm 时, 轴向进给量应小于 1.2 mm。

**关键词:** 铝合金管材; 拉杆; 管端收口工艺; 旋锻模具; 轴向进给量

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.009

**中图分类号:** TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 03-0060-06

## Closing process on pull rod for aircraft aluminum alloy pipe

Wang Qiang

(Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**Abstract:** For the pull rod parts of aircraft aluminum alloy pipe, the pipe end closing technology was studied, and the process scheme, die design and process parameter design of rotary forging were analyzed and verified by experiments. The research shows that the rotary forging process used for pull rod is more efficient than cold extrusion and hot extrusion forming. In the process of rotary forging, the influence of axial feeding amount plays a major role in the actual operation process. In order to ensure the quality of inner and outer surfaces of pull rod and avoid the processing defect, the axial feeding amount should be reduced accordingly with the reduction of outer diameter of closing part. The axial feeding amount is related to the mold cone angle and the radial compression amount of a single group. For the pull rod with the transition zone taper of  $19^\circ$ , when the outside diameter of each group of initial forging is  $\Phi 35 \sim \Phi 40$  mm, the appropriate selection of axial feeding amount should be less than 3.0 mm; when the outside diameter is  $\Phi 30 \sim \Phi 35$  mm, the appropriate selection of axial feeding amount should be less than 1.8 mm; when the outside diameter is less than  $\Phi 30$  mm, the appropriate selection of axial feeding amount should be less than 1.2 mm.

**Key words:** aluminum alloy pipe; pull rod; pipe end closing process; rotary forging die; axial feeding amount

飞行操纵系统是飞机的重要功能系统, 其中拉杆为主要的部件<sup>[1]</sup>。随着冷成形工艺的发展, 采用铝合金管材收口的拉杆结构形式被广泛采用<sup>[2-4]</sup>。图 1 为飞机选用的典型拉杆零件, 其结构包括管体杆部和两端收口部位。零件材料为 2A12-O 铝合金, 最终热处理至 T42 (自然失效)。本文对图 1 所示的拉杆零件的收口工艺进行了分析研究, 并确定了最终的优化方案。

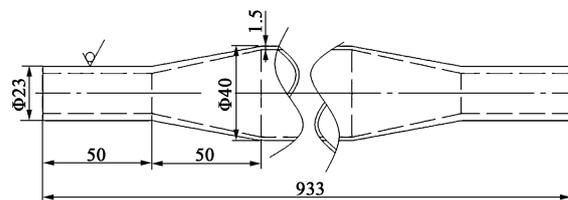


图 1 拉杆结构图

Fig. 1 Structure diagram of pull rod

### 1 拉杆收口加工工艺方案选择

因拉杆本身长度较长, 拉杆在收口时基本采用

卧式装夹方式, 具体示意图如图 2 所示。

结合此种装夹方式, 拉杆收口工艺有冷挤压收口<sup>[5]</sup>、热挤压收口<sup>[6]</sup>、旋锻收口<sup>[7]</sup>。

冷挤压收口是比较成熟的一种高效加工工艺, 但因加工硬化和收口变形程度的限制, 在管材收口应用过程中, 其成形次数较多。以本文研究零件为

收稿日期: 2023-07-07; 修订日期: 2023-10-08

作者简介: 王 强 (1972-), 男, 工程硕士, 高级工程师

E-mail: sur. f@ 163. com

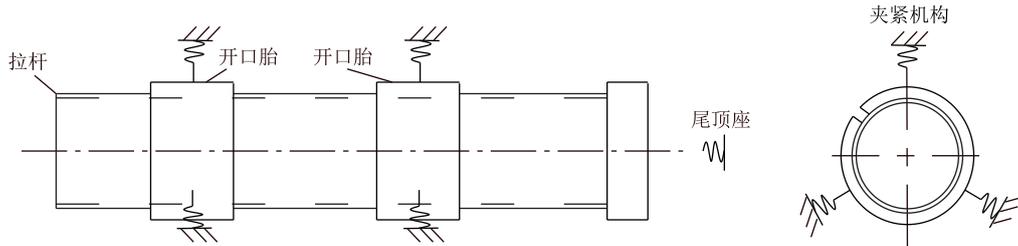


图2 拉杆装夹形式

Fig. 2 Clamping form of pull rod

例, 收口变形程度以收口后工件直径与收口前毛坯直径之比来表示<sup>[8]</sup>, 此比值称为收口系数。收口系数  $K$  为:

$$K = d/D \quad (1)$$

式中:  $d$  为收口后工件的直径, mm;  $D$  为收口前毛坯的直径, mm。

本文中该零件的收口系数  $K = \Phi 23 \text{ mm} / \Phi 40 \text{ mm} = 0.575$ 。对于硬铝合金材料, 平均收口系数  $K_a$  为  $0.73 \sim 0.80$ <sup>[8]</sup>。因此, 收口系数  $K$  小于平均收口系数  $K_a$ , 需多次收口成形。成形次数  $N$  为:

$$N = \frac{\lg K_a}{\lg K} \quad (2)$$

本文中该零件冷挤压收口成形次数  $N = \lg 0.8 / \lg 0.575 = 2.78 \approx 3$ 。成形次数较多, 投入的模具也较多, 影响加工效率。

热挤压收口是将管材收口部位局部进行加热, 增加塑性、降低载荷、降低摩擦因数、改善材料流动的一种高效方法<sup>[9]</sup>。因热挤压收口对加热过程控制较严, 在实际工程应用中存在材料氧化、晶粒粗大、加工润滑以及安全环保操作方面的控制难点, 不建议在多品种、少批量的飞机拉杆收口工程应用中推荐。

旋锻工艺是一种利用连续径向锤击力缩小金属棒料或管料截面直径的自由锻打成形方法。文献[10]中将旋锻描述为一种减小金属棒料或管料截面直径的自由成形方法, 它以两个或多个锤头部分或全部地环绕于要减小的截面, 在绕其转动的同时进行径向的压下进行。随着现代航天航空、汽车、电子元件等制造行业的迅猛发展, 对管类、轴类等零件的生产采用了高精度、高效率和高质量的旋锻加工方法<sup>[11]</sup>。

以本文研究零件为例, 其旋锻变形程度以断面缩减系数表示。断面缩减系数  $q$  表示为:

$$q = (D - d)/d \quad (3)$$

本文零件的断面缩减系数  $q = (\Phi 40 \text{ mm} -$

$\Phi 23 \text{ mm}) / \Phi 23 \text{ mm} = 0.74$ 。对于硬铝合金材料, 允许断面缩减系数为  $0.80 \sim 0.85$ <sup>[12]</sup>。因此, 断面缩减系数小于允许断面缩减系数, 可以一次成形。

根据以上分析, 选用旋锻收口是相对高效的工艺方案。

## 2 拉杆收口旋锻模具设计

旋锻模作为旋锻加工重要的因素, 其结构参数对产品加工表面质量和尺寸精度具有重要影响。因此, 旋锻模设计过程需要注意以下几点。

### (1) 模具侧向有效间隙

根据旋锻加工过程中金属材料流动特点可知, 旋锻模需要有侧向间隙, 一方面可以起到一定的缓冲作用, 另一方面也有利于金属流动。否则可能在旋锻过程中导致工件与模具粘结。

飞机拉杆对产品表面粗糙度和尺寸精度要求较高, 本产品旋锻模设计过程中选用如图3所示的带  $240^\circ$  包角的结构。其中, 上下两个  $120^\circ$  范围的圆弧按拉杆最终成形半径加工, 并将旋锻设备锤头位移量 (本文研究的旋锻设备的锤头位移量为  $0.25 \text{ mm}$ ) 进行双边偏心后形成的中心距离作为侧向间隙。

### (2) 口壁圆角

旋锻过程属于较大冲击过程, 因此, 旋锻模所有锐边需要倒圆以提高模具的疲劳寿命。同时, 为了避免冲击过程型腔口壁锐边对工件产生压伤、划痕, 所有口壁均需要设计倒圆。本文研究零件的锻模出入口倒圆按  $R5 \text{ mm}$  设计, 上下两半的分界口壁倒圆同时产生侧向有效间隙作用, 在确保侧向间隙  $R$  圆弧的基础上也按  $R5 \text{ mm}$  过渡。

### (3) 锻模锥形段

旋锻过程中, 材料是对着模具锥形喇叭口送进的, 在成形力的作用下, 部分材料会逆送进材料方向流动而产生反流情况。同时, 径向锤锻力在锥角

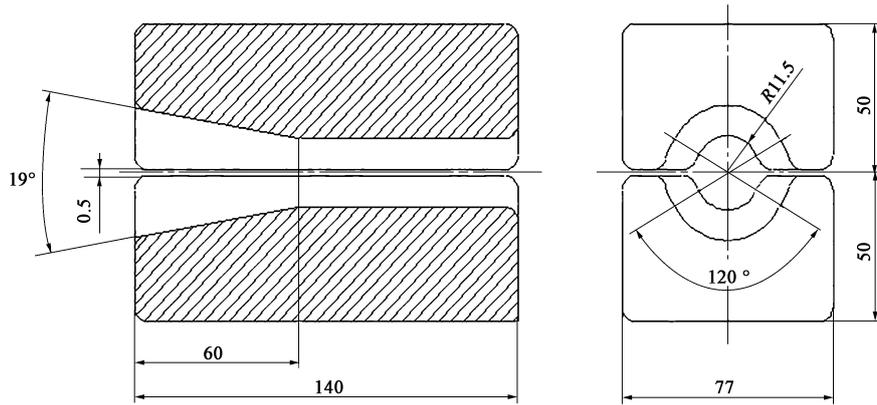


图 3 旋锻模结构图

Fig. 3 Structure diagram of rotary forging die

的影响下也会产生逆轴向送进的分力，给材料送进带来较大的阻力。因此，旋锻模锥形段锥角一般不宜大于  $30^\circ$ 。本文研究对象的拉杆产品自身的锥角为  $19^\circ$ ，故只需按产品本身锥角设计模具锥形段锥角，即能保证最后成形。同时，考虑锥形段在旋锻初期对材料的引导作用及入口圆角影响，锥形段长度在产品锥形段长度  $50\text{ mm}$  尺寸的基础上增加  $10\text{ mm}$ ，即按  $60\text{ mm}$  设计。

### 3 拉杆收口旋锻工艺设计

本文研究的拉杆零件的管坯相对直径 = 管坯直径/壁厚 =  $\Phi 40\text{ mm}/1.5\text{ mm} = 26.67$ ，满足管坯相对直径小于  $30^{[12]}$  才能顺利进行无芯棒旋锻的要求。结合成都飞机工业（集团）有限责任公司现有的设备能力，故采用两模无芯棒旋锻加工方法，并采取分组的渐进式径向锻打方式，金属管材的外表面从圆形→非圆形→圆形的过程为一组锻打方式，通过模具锥角和轴向进给实现多组小变形量的径向锻打，逐步达到最终的成品尺寸，如图 4 所示。

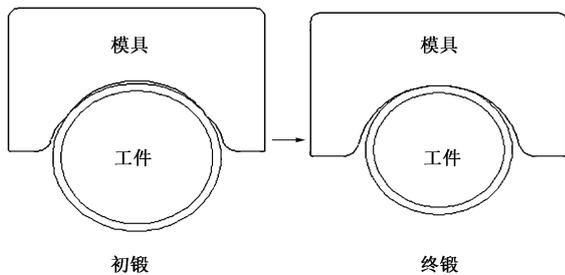


图 4 旋锻锻打过程

Fig. 4 Rotary forging process

在实行分组渐进式径向锻打过程中，坯料的旋

转和径向锻打压缩量是影响加工质量的主要工艺因素，转变为实际加工过程中具有操作指导性的工艺参数为坯料的旋转速度和轴向进给量。

#### 3.1 坯料旋转速度

分组的渐进式旋锻过程中，在满足加工效率的情况下，要确保间隙区内的金属全部转动至锻压区之内，在每组最小锻打间隔数  $M$  与每个锻锤的间隙区角度  $A_1$ 、坯料旋转角度  $A$  相互关联。

$$M = A_1/A = A_1/[(S_1 - S_2) \times 360^\circ/f] \quad (4)$$

式中： $S_1$  为设备旋转速度，( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )； $S_2$  为坯料旋转速度，( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )； $f$  为锻打频率，( $\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

结合成都飞机工业（集团）有限责任公司现有旋锻设备的实际情况，设备转速  $S_1$  固定为  $100\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，锻打频率  $f$  固定为  $1200\text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$ ，并针对本文研究所设计的模具结构， $A_1 = 60^\circ$ ，则  $M = 60/[(100 - S_2) \times 360/1200] = 200/(100 - S_2)$ ，其中  $M$  为正整数。

当  $M = 1$  时， $S_2 = -100\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，此时需要坯料相对设备旋转速度反向进行旋转，且旋转速度较大，不利于操作；当  $M = 2$  时， $S_2 = 0\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，此时坯料旋转速度为  $0$ ，有利于操作；当  $M = 3$  时， $S_2 = 33.33\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，此时需要坯料不但相对设备旋转速度同向进行旋转，还增加了锻打次数，已不再具有效率性。故  $M = 2$  为最佳的最小锻打间隔数，即每组需要锻打 3 次即可以满足间隙区内的金属恰好全部转动至锻压区之内。此时，坯料的绝对旋转速度为  $0\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，相对锻模旋转速度为  $100\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

#### 3.2 单组径向锻打压缩量

无芯棒式旋锻分组的渐进式径向锻打方式是每组径向锻打完成后再进行下一组径向锻打的不连续的间断进给方式。径向锻打进给控制不当，将会导致内表面产生压溃或折叠。为保证良好的内表面圆

度质量、精准的尺寸并预防加工缺陷，必须控制每组径向锻打压缩量。旋锻模是两个圆弧型面，旋锻过程中坯料内外径尺寸会随着模具圆弧接触面的变化而变化，随着不断的轴向进给，坯料的外径越锻越小，零件外径的曲率半径差越来越大，若单组径向锻打压缩量过大，会造成内外表面非圆度程度加大，特别是无芯旋锻时内表面无芯棒支撑，内壁金属流动的不均匀性更剧烈，更容易导致圆度变差，甚至产生内部折叠折皱。此外，由于材料加工的冷作硬化特性，旋锻后期还需要减小相应的压入量。

根据以上分析，以不同外圆直径和不同单组径向锻打压缩量作为正交试验因素，选取 3 个试验水平创建正交试验因素水平表（表 1）对管材收口进行工艺试验，测量不同参数下的内表面收口圆度和外表面渗透线性检查（表 2），并以满足较稳定内表面圆度为标准，选取最优工艺参数。

表 1 正交试验因素水平表 (mm)

Table 1 Factors and levels of orthogonal test (mm)

因素	水平		
	1	2	3
外圆直径	Φ35	Φ30	Φ25
单组径向锻打压缩量	0.5	0.3	0.2

表 2 正交试验方案及结果

Table 2 Schemes and results of orthogonal tests

试验序号	外圆直径/mm	径向锻打压缩量/mm	圆度/mm	外表面渗透结果
1	Φ35	0.5	0.58	无线性显示
2	Φ35	0.3	0.55	无线性显示
3	Φ35	0.2	0.48	无线性显示
4	Φ30	0.5	0.96	有线性显示
5	Φ30	0.3	0.48	无线性显示
6	Φ30	0.2	0.45	无线性显示
7	Φ25	0.5	1.40	有线性显示
8	Φ25	0.3	0.90	有线性显示
9	Φ25	0.2	0.50	无线性显示

根据试验结果，本文研究的拉杆的最优单组径向锻打压缩量见表 3，由表 3 可知：当外圆直径为 Φ35~Φ40 mm 时，初锻的单组径向锻打压缩量为 0.5 mm；当外圆直径为 Φ30~Φ35 mm 时，单组径向锻打压缩量为 0.3 mm；当外圆直径小于 Φ30 mm 时，单组径向锻打压缩量为 0.2 mm。

表 3 单组径向锻打压缩量推荐值 (mm)

Table 3 Recommend values of compression amount for single radial forging (mm)

外圆直径	Φ35~Φ40	Φ30~Φ35	≤Φ30
单组径向锻打压缩量	0.5	0.3	0.2

### 3.3 轴向进给间隔

无芯棒式旋锻分组的渐进式径向锻打期间的间断时间  $T$  由每组锻打次数  $N'$  和锻打频率  $f$  决定，如式 (5) 所示。

$$T = N' / f \tag{5}$$

为了确保每组锻打更充分，实际操作过程中将理论计算的每组锻打 3 次提高至 4 次。

则轴向进给间隔时间  $T = 4/1200 \text{ min} = 1/300 \text{ min} = 0.2 \text{ s}$

### 3.4 轴向进给量

在旋锻模具数量、旋锻模具锥角确定的情况下，单组径向锻打压缩量仅由坯料轴向进给量决定。轴向进给量  $S$  与单组径向锻打压缩量  $h$  以及模具锥角  $\theta$  的关系为：

$$S = h \times \cot(\theta/2) \tag{6}$$

则本文研究对象在成形不同阶段下的轴向进给量如表 4 所示。

表 4 轴向进给量推荐值 (mm)

Table 4 Recommend values of axial feeding amount (mm)

外圆直径	Φ40~Φ35	Φ35~Φ30	≤Φ30
轴向进给量	3.0	1.8	1.2

## 4 拉杆收口旋锻加工验证

### 4.1 缺陷验证

基于工艺分析选取坯料绝对旋转速度为 0，在 0.2 s 轴向间隔期内以 3 mm 的恒定的轴向进给工艺参数（即单组径向锻打压缩量均为 0.5 mm）进行试制，产品如图 5 所示，经肉眼观察，管材试样外表面收口处外圆部位有深度极浅的线性显示（图 5 圈示部分及箭头处），形貌笔直，平行于轴向分布。



图 5 缺陷零件外表面形貌

Fig. 5 Appearance of outer surface for defective part

将管材用“酒精+超声波”清洗过后分别置于扫描电镜下观察,发现管材外表面的缺陷形貌为细直的线性缺陷,如图6所示。高倍下可见外表面缺陷呈开口特征,如图7所示。

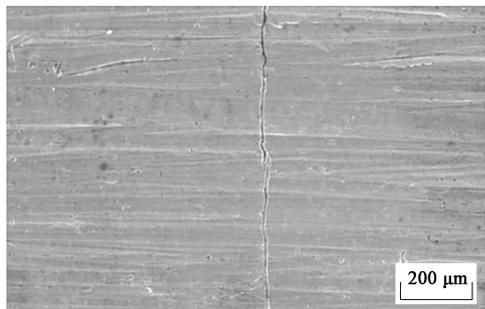


图6 外表面缺陷低倍形貌

Fig. 6 Low magnification morphology of outer surface defect

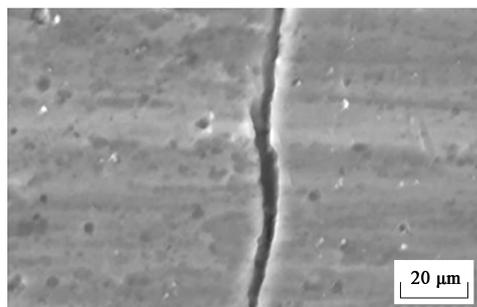


图7 外表面缺陷高倍形貌

Fig. 7 High magnification morphology of outer surface defect

在管材外表面缺陷部位沿垂直于轴向的方向制取金相试样,分别在抛光状态和使用混合酸(HF:HCl:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:1.5:2.5:95)腐蚀剂腐蚀后的状态下进行检查。抛光状态下,管材外表面的缺陷均有一定的深度,在取样部位测得外表面缺陷最大深度约为0.03 mm,缺陷大部分呈直线开口状(个别略呈曲折状),尾端圆秃,缺陷的两侧耦合性不佳(图8),具备一定的折叠特征。同时,在管材内表面同样观察到多处与外表面类似的缺陷形貌(图9)。验证了3.2节中单组径向锻打压缩量控制不当将会导致内表面产生压溃或折叠的结论。

#### 4.2 优化后工艺参数验证

基于工艺分析,选取优化后的工艺参数,即坯料绝对旋转速度为0,不同收口外径对应不同轴向进给量的工艺参数进行试制,经渗透检测,内外表面无线性显示。

通过试验验证,本文推荐的旋锻工艺参数可以有效地避免旋锻过程中内外表面折叠和裂纹等缺陷,确保内外圆可获得良好圆度,加工尺寸也能够符合

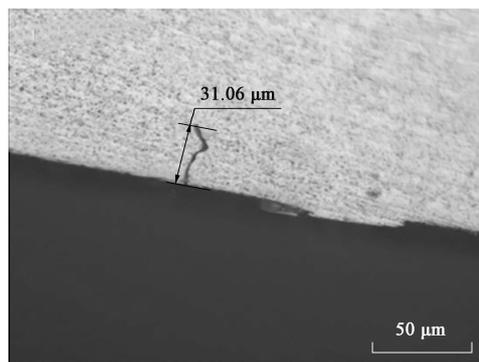


图8 缺陷件外表面金相组织

Fig. 8 Metallographic structure of outer surface for defective part

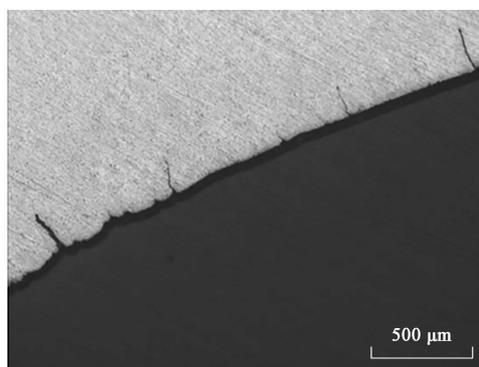


图9 缺陷件内表面金相组织

Fig. 9 Metallographic structure of inner surface for defective part

设计图纸要求,既确保了成形质量也提高了加工效率。同时验证了工艺分析设计、模具设计的正确性和可靠性。

## 5 结论

(1) 拉杆收口旋锻成形工艺相对冷挤压、热挤压成形更高效。

(2) 拉杆收口旋锻成形过程中,具体指导操作的工艺参数中轴向进给量的影响起主要作用。

(3) 为保证拉杆内外表面质量,避免加工缺陷,随着收口外径尺寸的减小,轴向进给量也要相应地减小。轴向进给量与模具锥角和单组径向锻打压缩量相关。

(4) 本文研究的模具锥角为19°的拉杆,当外圆直径为Φ35~Φ40 mm时,初锻的单组轴向进给量应小于3.0 mm;当外圆直径为Φ30~Φ35 mm时,单组轴向进给量应小于1.8 mm;当外圆直径小于Φ30 mm时,单组轴向进给量应小于1.2 mm。

## 参考文献:

- [1] 徐鑫福, 冯亚昌. 飞机飞行操纵系统 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.  
Xu X F, Feng Y C. Aircraft Flight Control System [M]. Beijing: Beihang University Press, 1989.
- [2] HB 7181—1995, 飞机操纵拉杆通用规范 [S].  
HB 7181—1995, General specification for aircraft control rods [S].
- [3] HB 6475—1990, 收口操纵拉杆技术条件 [S].  
HB 6475—1990, Technical conditions for closing control rod [S].
- [4] 沈国丽, 蒲丽娟. 飞机铝合金收口拉杆的设计研究 [J]. 机械工程师, 2015, (4): 189-190.  
Shen G L, Pu L J. Design and research on aircraft aluminum alloy closing rod [J]. Mechanical Engineer, 2015, (4): 189-190.
- [5] 邢涛, 黄林, 聂兰启. 上拉杆螺管缩口工艺及模具设计 [J]. 精密成形工程, 2012, 4 (2): 64-66.  
Xing T, Huang L, Nie L Q. Necking process and die design of control link screw tube [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4 (2): 64-66.
- [6] 邱泽宇, 徐雪峰, 付春林, 等. 5A02 铝合金薄壁管材热挤压缩径增厚成形试验研究及优化 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (5): 7-14.  
Qiu Z Y, Xu X F, Fu C L, et al. Experimental research and optimization on hot extrusion shrinkage and thickening of 5A02 aluminium alloy thin-walled tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (5): 7-14.
- [7] 刘志卫, 胡圳威, 陈向阳, 等. 基于柔性送料的高频旋锻数值模拟 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 1-6.  
Liu Z W, Hu Z W, Chen X Y, et al. Numerical simulation on high frequency rotary forging based on flexible feeding [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 1-6.
- [8] 康俊远. 冲压成型技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.  
Kang J Y. Stamping Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008.
- [9] 李晓冬, 徐雪峰, 魏科, 等. 5A02 铝合金管材缩口增厚的影响显著性及成形规律研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 63-69.  
Li X D, Xu X F, Wei K, et al. Study on influence significance and forming law of necking and thickening of 5A02 aluminum tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 63-69.
- [10] 赵升吨, 张玉亭. 旋锻技术的研究现状及其应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2010, (2): 16-20.  
Zhao S D, Zhang Y T. Research status and its application of rotary swag technique [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2010, (2): 16-20.
- [11] 胡圳威. 基于弹性送料方式的薄壁管件旋锻成形数值模拟研究 [D]. 安徽: 安徽理工大学, 2022.  
Hu Z W. Numerical Simulation of Rotary Forging of Thin-walled Pipe Fittings Based on Elastic Feeding Method [D]. Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [12] 周大隼. 金属体积冷成形技术与实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
Zhou D J. Metal Volume Cold Forming Technology and Examples [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- 
- (上接第46页)
- [14] 苟建军, 王森, 王健, 等. 基于BP神经网络的金属薄板包辛格效应预测 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (8): 152-157.  
Gou J J, Wang S, Wang J, et al. Prediction of Bauschinger effect for metal thin sheet based on BP neural network [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (8): 152-157.
- [15] 罗云, 蒋文春, 杨滨, 等. 材料强化模型对回弹计算模拟精度的影响 [J]. 机械强度, 2015, 37 (3): 551-555.  
Luo Y, Jiang W C, Yang B, et al. Effect of material work hardening model on the simulation precision for springback [J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37 (3): 551-555.
- [16] 谌勇志. 大应变本构模型及其在扭曲回弹中的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.  
Chen Y Z. A Constitutive Model of Large Strain and Its Application to Twist Springback Simulation [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [17] 陈新力, 张军, 詹华. 超高强度钢 DP980 包辛格效应测量与参数识别 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (12): 183-187.  
Chen X L, Zhang J, Zhan H. Bauschinger effect measurement and parameter identification of ultra-high strength steel DP980 [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (12): 183-187.
- [18] 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].
- [19] GB/T 24171.2—2009, 金属材料 薄板和薄带 成形极限曲线的测定 第2部分: 实验室成形极限曲线的测定 [S].  
GB/T 24171.2—2009, Metallic materials—Sheet and strip—Determinations of forming limit curves—Part 2: Determinations of forming limit curves in laboratory [S].
- [20] GB/T 26077—2021, 金属材料 疲劳试验 轴向应变控制方法 [S].  
GB/T 26077—2021, Metallic materials—Fatigue testing—Axial-strain-controlled method [S].
- [21] GB/T 3075—2021, 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法 [S].  
GB/T 3075—2021, Metallic materials—Fatigue testing—Axial force-controlled method [S].