

航天用一维线性卷筒式伸杆连续拉弯成形设备

李占华¹, 韩静涛², 张玉凤¹, 路瑞龙²

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:以卷筒式伸杆为研究对象, 考虑到由于弹性卷筒的高度非线性结构所导致的成形工艺与设备开发困难的问题, 在通过数值模拟的方式分析卷筒式伸杆连续拉弯成形工艺过程的基础上, 开展了成形设备功能与结构的研究, 解决了连续拉弯成形设备制造中模具结构设计、恒张力控制等难点问题。提出了一种可用于实际生产的无张力辊带材恒张力控制模型, 应用测试结果表明, 后张力波动幅值小于4%, 前张力波动幅值小于3%, 简化了设备结构, 避免了张力辊对成形精度的影响, 实现了稳定控制的效果。完成了卷筒式伸杆连续拉弯成形设备的开发, 并利用开发的设备成功研制了长度为6 m的弹性卷筒, 制件的直线度偏差小于5 mm, 获得了可供飞行应用的弹性卷筒制件。研究内容对提高我国自有弹性卷筒的批量化生产能力具有一定意义。

关键词:伸杆机构; 弹性卷筒; 连续拉弯成形; 恒张力控制; 开卷系统; 收卷系统

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.029

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0208-08

Continuous stretch bending equipment of one-dimensional linear reel-type stretch rod for aerospace

Li Zhanhua¹, Han Jingtao², Zhang Yufeng¹, Lu Ruilong²

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: For the reel-type stretch rod, considering the difficulty in developing the forming process and equipment due to the highly non-linear structure of stacer, based on analyzing the continuous stretch bending process of reel-type stretch rod by numerical simulation, the function and structure of forming equipment were studied, and the difficult problems such as die structure design and constant tension control in the manufacturing of continuous stretch bending equipment were solved. Then, a constant tension control model of steel strip without tension roller was proposed which could be used in actual production. Application test results show that the post tension fluctuation amplitude is less than 4% and the front tension fluctuation amplitude is less than 3%, which simplifies the equipment structure, avoids the influence of tension roller on the forming accuracy, and realizes the effect of stable control. The development of continuous stretch bending equipment for the reel-type stretch rod is completed, and the stacer with the length of 6 m is successfully obtained by the developed equipment. The straightness deviation of the part is less than 5 mm, and the stacer workpieces for flight application are obtained. Thus, the research is of certain significance to improve the own stacer mass production capacity in our country.

Key words: stretch rod device; stacer; continuous stretch bending; constant tension control; uncoiling system; coiling system

卫星进入轨道后, 需将探测仪器伸展至远离本体的位置, 进行空间电磁场探测, 为防止星载仪器对测试精度的干扰, 此过程依靠伸杆机构实现^[1-4]。伸杆机构是一种收拢状态下体积小, 伸展后可进

行长距离传输的机械装置。传统伸杆机构常采用桁架结构, 其展开可靠, 但体积庞大、结构复杂^[5]。套筒式结构采用多层套筒嵌套形式, 相较于桁架结构, 其质量大幅降低, 但展开需要电机驱动, 使环境的电磁场强度增加, 极易干扰探测任务, 影响测量精度。近年来, 人们对自驱动式伸杆机构进行了大量研究, 弹性元件驱动的铰链式结构由于排除了机构自身电磁场的影响而被采用^[6], 但对于小型卫星结构, 尤其是对于“一星多载”的空间布局形式, 显得体积过大, 结构设计困难。

收稿日期: 2021-11-01; 修订日期: 2022-01-30

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目 (QN2019192, QN2021231); 河北省自然科学基金面上项目 (E2021210116)

作者简介: 李占华 (1983-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师

E-mail: Lizhanhua78@163.com

管状杆 (Storable Tubular Extendible Member, STEM) 为典型的薄壁管类线性结构^[7], 其管壁带有缺口且可收拢至体积很小的带卷状, 但缺口的存在使管状杆的刚度减小, 指向性受到限制。人字型杆 (Triangular Retractable and Collapsible, TRAC) 存在同样的问题^[8]。豆芽杆 (Collapsible Tubular Mast, CTM) 具有封闭薄壁截面结构^[9], 从结构上使刚度更易于保证, 但其截面为单层, 刚度可控性不足。弹性卷筒为逐层螺旋包覆的线性管状结构, 在收拢情况下仅为原始带宽的长度 (小于 140 mm), 但伸展距离可达十几米以上^[10], 层间叠率可通过螺旋角灵活控制, 具有自驱动、重量轻、收纳比大、刚度与指向精度高等一系列优势, 在伸杆机构领域得到了越来越广泛的应用^[11-12]。目前, 国际上已有超过 700 套弹性卷筒被用于执行各类空间探测任务^[12-13]。

但由于弹性卷筒高度的非线性结构, 传统的成形工艺无法满足其成形需求, 成形制造困难, 成形工艺复杂^[10,12,14]。国外也仅有美国的 Hunter 公司与加拿大的 Spar 公司具有弹性卷筒的生产能力。弹性卷筒在我国的应用受到了极大限制, 为此, 本课题组提出了连续拉弯成形原理, 使冷成形制件能够满足很高的稳定性应用需求, 避免了传统弯曲后、热处理过程中由于自然直径干涉导致的制件精度损失的问题, 该技术使我国跻身伸杆机构前沿制造领域, 扩展了自干涉薄壁弹簧制件的生产方法。

然而, 采用连续拉弯成形原理进行批量化成形设备的开发存在诸多难点, 本文采用数值模拟方式开展弹性卷筒成形工艺过程分析, 揭示连续拉弯成形使冷成形制件达到高稳定性的机理。并以此为基础, 开展设备的功能与结构分析, 解决连续拉弯成形设备制造中模具结构与无张力辊恒张力控制等难点问题, 完成连续拉弯成形设备的开发, 并试制得到可供飞行应用的弹性卷筒制件。研究对打破国外对生产该类制件的垄断地位、提高我国自有弹性卷筒的量化生产能力具有一定意义。

1 连续拉弯成形原理

连续拉弯成形原理如图 1 和图 2 所示, 是一种以薄带材为坯料, 使其在两侧张力作用下通过具有一定圆角半径的凸模与凹模构成的间隙, 然后将带材连续拉出而弯曲成形的加工方法。该方法可用于成形薄带类弯曲制件。成形模具组件由凸模与凹模构成, 凸模圆角半径为 r_d , 带厚为 t_0 的薄带卷 O_c

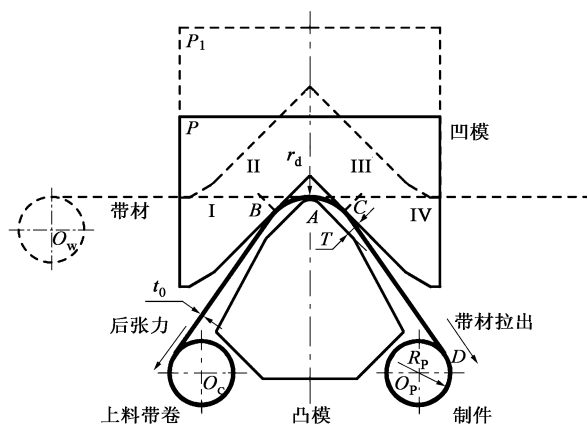


图 1 连续拉弯成形原理图

Fig. 1 Principle diagram of continuous stretch bending

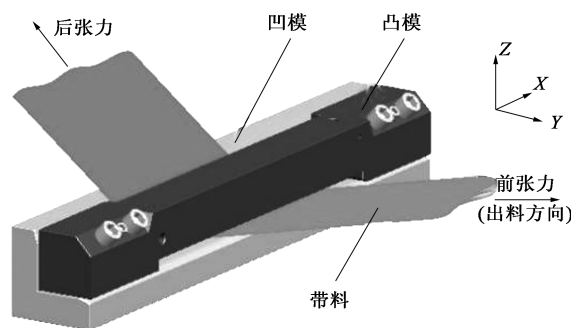


图 2 连续拉弯成形原理模型图

Fig. 2 Model diagram of principle for continuous stretch bending

经引带后, 以预定的成形角 α_f (带长方向与模具法向的夹角) 置于两模具间, 该角度与制件的螺旋角 α 直接相关。依据成形直径, 凹模自 P_1 位置下压至 P 位置, 调整凸凹模间的模具间隙 T 。在上料侧 O_c 施加与带材运行方向反向的后张力, 以保持送料稳定性, 然后自收料侧 O_p 施加拉力将薄带连续拉出; 坯料在两模具的 A 、 B 、 C 这 3 点弯矩作用下实现弯曲成形, 进而在张力下迅速反向弯曲, 直至拉至平直状态。成形过程中带料经历了未变形阶段 I、正向弯曲阶段 II、反向弯曲阶段 III 以及成形完成阶段 IV。成形依赖于两侧张力的调节, 使残余应力得以消除或取向于有利方向, 以提高制件的稳定性。在 D 点后将已成形薄带以半径为 R_p 的带卷形式完成收集, 去除约束后得到成形制件。

与传统的薄带弯曲工艺相比, 连续拉弯成形具有如下特点:

- (1) 生产效率高, 可实现带材连续弯曲成形;
- (2) 成形范围大, 可用于成形自然曲率 (卷层不受任何约束时的曲率) 存在几何干涉的薄带弯曲制件, 成形曲率易于调整、范围大, 坯料的长度、

宽度不受限制；

(3) 缩短了生产周期，与传统方式相比，由于不再需要稳定化处理工序，使生产周期大幅缩短；

(4) 设备占地空间小，带材的开卷与收卷采用带卷形式，结构简单，收料方便；

(5) 模具的制造成本低，易于修整，使用寿命长；

(6) 带材成形一致性与成形精度高。

2 连续拉弯成形过程分析

数值模拟可用于板料成形力学状态信息的分析，具有成本低、效率高等特点^[15-16]，依据连续拉弯成形原理，本文采用数值模拟方式对成形过程进行分析，如图 3 所示。模拟采用的参数为：坯料带厚 $t_0 = 0.15 \text{ mm}$ ，带宽 $b = 140 \text{ mm}$ ，凸模圆角半径 $r_d =$

0.5 mm ，后张力 $F_p = 500 \text{ N}$ ，成形角 $\alpha_f = 60^\circ$ ，模具间隙 $T = 1.5 \text{ mm}$ 。薄带连续拉弯成形所受应力如图 3a 所示，应力变化可分为 3 个区域： AB 为坯料正向弯曲区，该区域内随着弯曲应变程度的增加，如图 3b 所示，应力随之增加并在凸模圆角位置达到最大值，凸模圆角与坯料间有较强的摩擦作用而易于磨损； BC 为弹性性能释放区，此时坯料反向弯曲，应力迅速减小，凸模受力随之减小； CD 为坯料在张力下的反向弯曲区，应力反向增加，对模具的摩擦作用减小，模具的受力情况改善。 D 点后带材为平直状态，应力、应变趋于稳定。在约束释放后坯料发生回弹，形成弹性卷筒制件，如图 3c 和图 3d 所示，制件的残余应力、应变在长度方向具有较高的一致性，残余应力较冷成形制件明显减小。

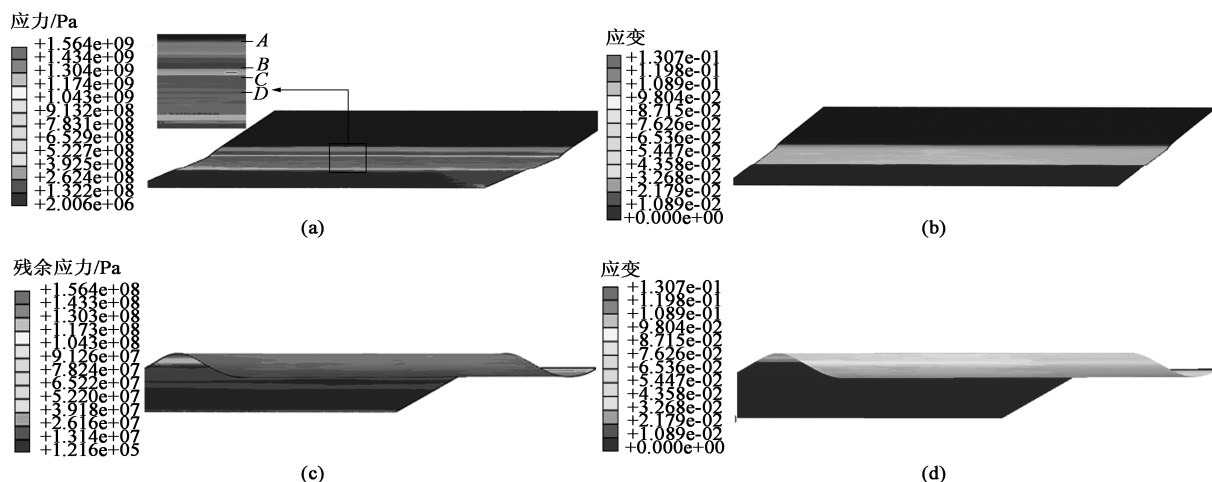


图 3 弹性卷筒连续拉弯成形模拟结果

(a) 成形应力图 (b) 成形应变图 (c) 制件残余应力图 (d) 制件应变图

Fig. 3 Simulation results of continuous stretch bending for stacer

(a) Forming stress diagram (b) Forming strain diagram (c) Residual stress diagram of workpiece (d) Strain diagram of workpiece

可见，连续拉弯成形中，入口侧凸模圆角及凹模局部区域与坯料有较强的摩擦作用，出口侧其次，要求局部应具有较高的硬度，在批量加工情况下可采用便于替换的镶块式结构。两侧的张力作用对薄带反向弯曲有较大的影响，为保证带料成形的一致性，后张力及拉力需保持恒定，带料的开卷及收卷装置需考虑带卷直径的变化。连续拉弯成形过程中板料较宽，受力过程复杂，需着重考虑保证板形和避免褶皱。带料长距离运行与受力条件复杂变化易使带料发生偏移，需引入纠偏系统加以控制。

3 成形设备开发

3.1 连续拉弯成形工艺流程

依据前述对连续拉弯成形原理及工艺过程的分析，

连续拉弯成形设备的结构需包括如下部分，如图 4 所示：

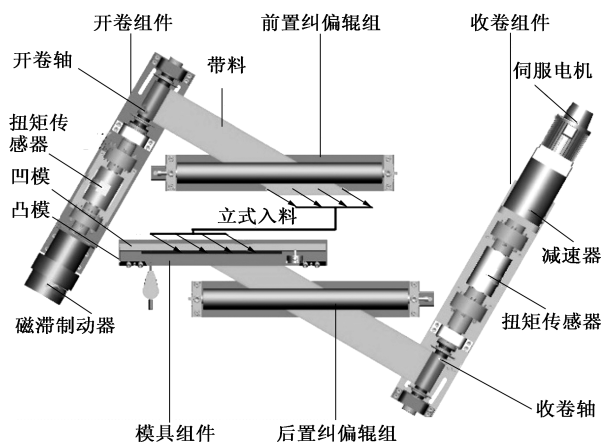


图 4 连续拉弯成形设备结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of continuous stretch bending equipment structure

(1) 预布置开卷组件，以带卷形式完成上料，节约设备占地空间，结合成形特征，采用立式入料方式，并为带料提供反向恒定的后张力；

(2) 在入料及出料侧设置纠偏装置，保证入料方向与成形的精确性；

(3) 模具组件为设备的核心组件，带料在具有相适应结构的模具内完成连续拉弯成

形，模具的强摩擦区域应具有足够的硬度与耐磨性；

(4) 由收卷组件提供驱动力，完成已成形带料的收集。设备采用伺服电机结合 PLC 控制模式，提高成形控制精度。为增加设备适应范围，引入成形角调整机构。

弹性卷筒的成形工艺流程如图 5 所示。

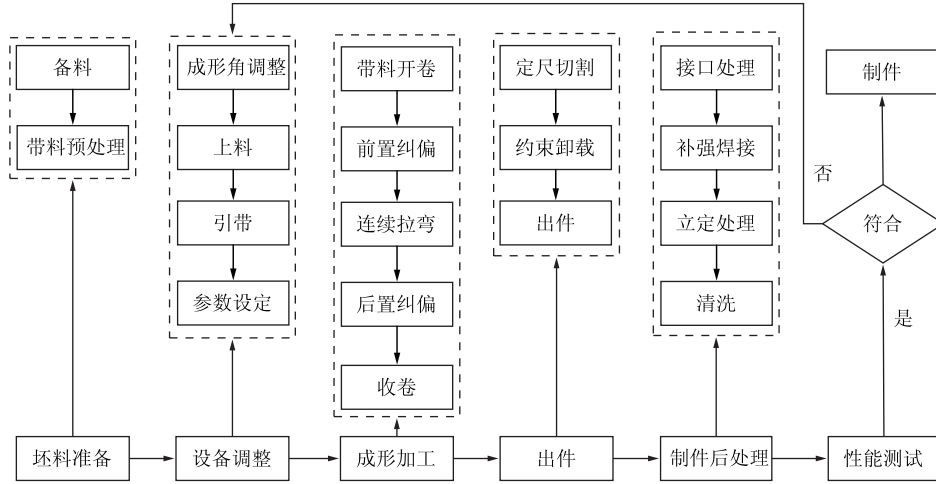


图 5 弹性卷筒成形工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of forming process for stacer

3.2 开卷系统的设计

弹性卷筒的成形坯料以开卷机进行开卷，并完成带料紧实，提供恒定后张力，设备异常时紧急停车。其中，开卷机的设计关键点在于后张力的恒定控制，这对连续拉弯成形设备的稳定运行及制件的精确性有重要影响。

开卷机工作时，随着开卷的进行，卷料直径逐渐减小，恒力矩输出无法满足恒定后张力的控制需要。目前，传统的方式常采用张力辊测量张力并反馈调整的形式，但对于薄带成形，张力辊的引入必然对成形直径产生不良影响，且增加了设备的复杂程度。为此，本文通过推导扭矩控制模型，在不附加机械装置的情况下实现后张力的恒定控制。

(1) 实时卷径的计算

开卷及收卷工作示意图如图 6 所示。在后张力 F_p 作用下，直径为 d_{ro} 的收卷轴以转速 n_s 旋转驱动，带动直径为 D_{uo} 的开卷轴以转速 n_k 旋转，开卷机实时料卷直径 D_u 逐渐减小，而收卷机料卷直径 D_r 逐渐增加，直至完成带料的开卷及收卷过程。

则收卷机实时料卷直径为：

$$D_r = d_{ro} + \frac{2t_0 N_p}{k N_{p0}} \quad (1)$$

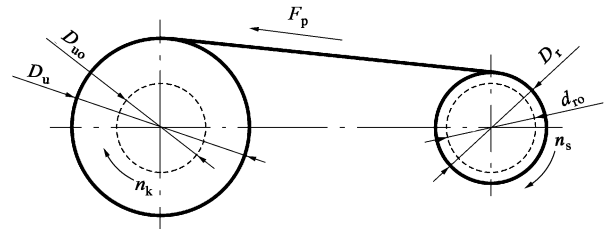


图 6 带料开卷与收卷示意图

Fig. 6 Schematic diagram of uncoiling and coiling for strip

式中： N_p 为电机编码器反馈脉冲总数； N_{p0} 为电机旋转 1 周发出的脉冲数； k 为减速器的减速比。

由开卷向收卷转移的带料体积相等可得：

$$\begin{cases} \Delta V_r = \Delta V_u \\ \Delta V_r = \frac{\pi}{4} (D_r^2 - d_{ro}^2) b \\ \Delta V_u = \frac{\pi}{4} (D_{uo}^2 - D_u^2) b \end{cases} \quad (2)$$

式中： ΔV_r 、 ΔV_u 分别为收卷机与开卷机带卷体积变化量； b 为带料宽度。

联立式 (1) 与式 (2)，则开卷机实时卷料直径为：

$$D_u = \sqrt{D_{uo}^2 - \frac{4t_0^2 N_p^2}{k^2 N_{p0}^2} - \frac{4t_0 N_p d_{ro}}{k N_{p0}}} \quad (3)$$

令电机旋转圈数 $n = N_p / N_{p0}$, 可得:

$$D_u = \sqrt{D_{u0}^2 - 4 \frac{1}{k^2} t_0^2 n^2 - 4 \frac{1}{k} t_0 n d_{r0}} \quad (4)$$

(2) 开卷机张力计算与控制

设后张力为 F_p , 开卷机卷轴扭矩 $M_p(n)$ 可通过式 (5) 得到:

$$M_p(n) = \frac{1}{2} F_p \sqrt{D_{u0}^2 - 4 \frac{1}{k^2} t_0^2 n^2 - 4 \frac{1}{k} t_0 n d_{r0}} \quad (5)$$

为维持后张力 F_p 不变, 后扭矩应为 n 的函数, 开卷实时后张力可通过式 (5) 计算得到, 但利用式 (5) 进行 PLC 编程时, 较多的浮点运算使控制器响应速度缓慢, 闭环控制延迟过大。为解决此问题, 假定当前电机的旋转圈数为 n_t 时, 计算的已收料长 L_c 为:

$$L_c = \sum_{n=1}^{n_t} \pi (d_{r0} + 2 \frac{1}{k} n t_0) \quad (6)$$

联立式 (2), 可得:

$$D_u = \sqrt{D_{u0}^2 - 4 t_0 \sum_{n=1}^{n_t} (d_{r0} + 2 \frac{1}{k} n t_0)} \quad (7)$$

则开卷机卷轴的实时扭矩为:

$$M_p(n) = \frac{1}{2} F_p \sqrt{D_{u0}^2 - 4 t_0 \sum_{n=1}^{n_t} (d_{r0} + 2 \frac{1}{k} n t_0)} \quad (8)$$

考虑制动器的扭矩输出为电流控制的非线性函数, 为提高控制精度, 以扭矩传感器测量扭矩值, 通过 PID 控制器实现后张力闭环控制。实际后张力及前张力控制效果如图 7 所示。试验中, 后张力给定为 500 N, 其实际波动幅值范围小于 20 N, 小于后张力给定值的 4%。由于后张力、系统摩擦、成形力的波动等因素, 前张力随之存在一定的波动, 但整体波动幅值小于 3%, 实现了良好的稳定控制效果。

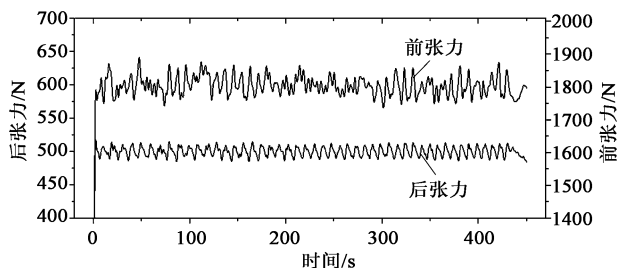


图 7 后张力与前张力实际控制效果

Fig. 7 Actual control effects of post tension and front tension

3.3 收卷系统的设计

为使成形与收卷过程稳定, 收卷常采用恒张力或匀速控制, 但前张力受开卷机、纠偏装置、成形机构等的影响, 受力情况复杂, 常有较大波动, 前

张力恒定控制难以实现, 本文采用匀速控制的形式进行收卷系统的研究。

随着收卷过程的进行, 收料轴带卷的直径增加, 收料轴的旋转速度应逐渐减小, 即伺服电机转速 $w_r(n)$ 为其出轴位置的函数:

$$w_r(n) = \frac{k v_{i0}}{\pi (k d_{r0} + 2 t_0 n)} \quad (9)$$

式中: $w_r(n)$ 为伺服电机转速; v_{i0} 为收料线速度。

设备采用 PLC 编程的方式实现收卷控制。并在收卷机设扭矩传感器, 监测成形过程中扭矩与驱动力的实时状态。

3.4 连续拉弯成形模具设计

成形模具为连续拉弯成形设备的核心部件, 模具组件主要由凸模和凹模构成。为方便进料, 防止带料与模具刮蹭, 模具两侧开锥口, 锥角 $\theta_d = 15^\circ$ 。模具间隙为成形直径的决定性因素, 为简化结构, 两侧模具间隙 T 采用等间隙调节方式, 凸模与凹模呈 45° 方向并以螺钉固定调节。凸模圆角为模具的关键参数, 对成形的影响较为复杂。

图 8 为不同凸模圆角下模具间隙与成形直径的关系曲线。各种凸模圆角半径 r_d 下 ($r_d = 0.5$ 、 1.0 与 2.0 mm), 弹性卷筒成形直径均随模具间隙 T 的减小而减小, 且减小的趋势逐渐趋于平缓, 这是因为: 模具间隙的减小使带料正向弯曲半径减小的同时, 反向弯曲变形程度增加。凸模圆角半径减小, 整体上可得到更小的成形直径, 且凸模圆角半径对模具间隙的影响敏感性降低, 这有利于成形直径的精确控制。当凸模圆角半径小于 0.5 mm 时, 模具成形制造困难, 凸模圆角在长度上的一致性难以保证, 使凸模圆角的磨损程度加剧, 成形制件的表面质量与精度降低, 模具寿命下降。综合考虑取凸模圆角半径 $r_d = 0.5$ mm。

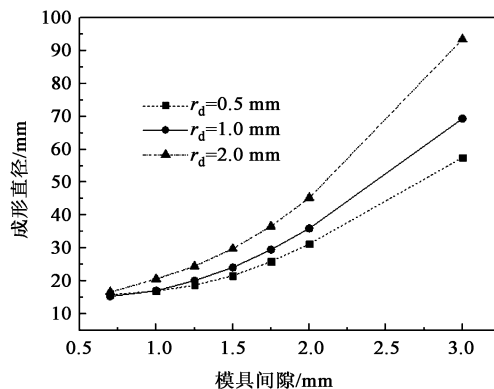


图 8 不同凸模圆角半径下的模具间隙与成形直径关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between die clearance and forming diameter under different punch fillet radii

依据模具的工作环境，模具与带料存在较强的摩擦，且在前、后张力的作用下，受到较大的弯矩作用。这要求模具具有较高的硬度、耐磨性及韧性^[17-18]。综合考虑选取模具材质为高耐磨、高弹性极限的冷作模具钢 Cr12MoV，热处理硬度为 62 HRC。

综上所述所得的连续拉弯成形设备如图 9 所示，设备由开卷机、前置纠偏辊组、模具组件、后置纠偏辊组、收卷机等结构组成。

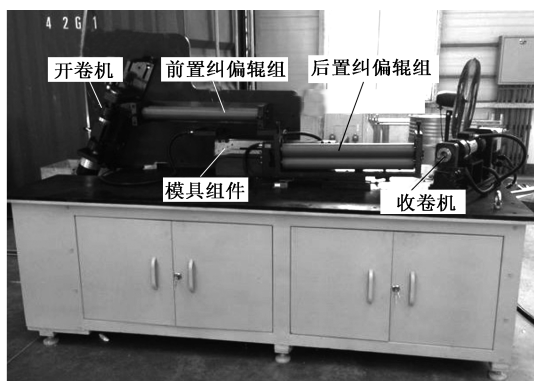


图 9 弹性卷筒连续拉弯成形设备

Fig. 9 Continuous stretch bending equipment of stacer

4 弹性卷筒制备过程

考虑弹性卷筒的应用需求，本文采用冷轧态恒弹性合金 3J21 进行弹性卷筒的制备。3J21 合金具有较高的弹性极限、疲劳强度和热稳定性，同时具有无磁性、耐蚀性等特点，常用于精密弹簧元件的制造^[19-20]。现采用前述连续拉弯成形设备加工弹性卷筒，如图 10 所示，对其过程分析如下。

(1) 展开计算

依据成形制件的长度，计算带料的展开长度 L_a ：

$$L_a = \frac{L_s}{\cos \alpha} + c_y \quad (10)$$

式中： L_s 为弹性卷筒伸杆的长度； α 为弹性卷筒的自然螺旋角； c_y 为引带长度。

(2) 设备参数调整

试验中，通过调整开卷机、收卷机及成形组件的相对位置预先完成入料、出料方向及成形角 α_f 的调整，调整模具间隙 T ，通过上位机输入后张力 F_p 、成形速率 v 等成形参数。试验参数如下： $t_0 = 0.15 \text{ mm}$ ， $b = 140 \text{ mm}$ ， $r_d = 0.5 \text{ mm}$ ， $F_p = 500 \text{ N}$ ， $\alpha_f = 60^\circ$ ， $T = 1.5 \text{ mm}$ ， $v = 600 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

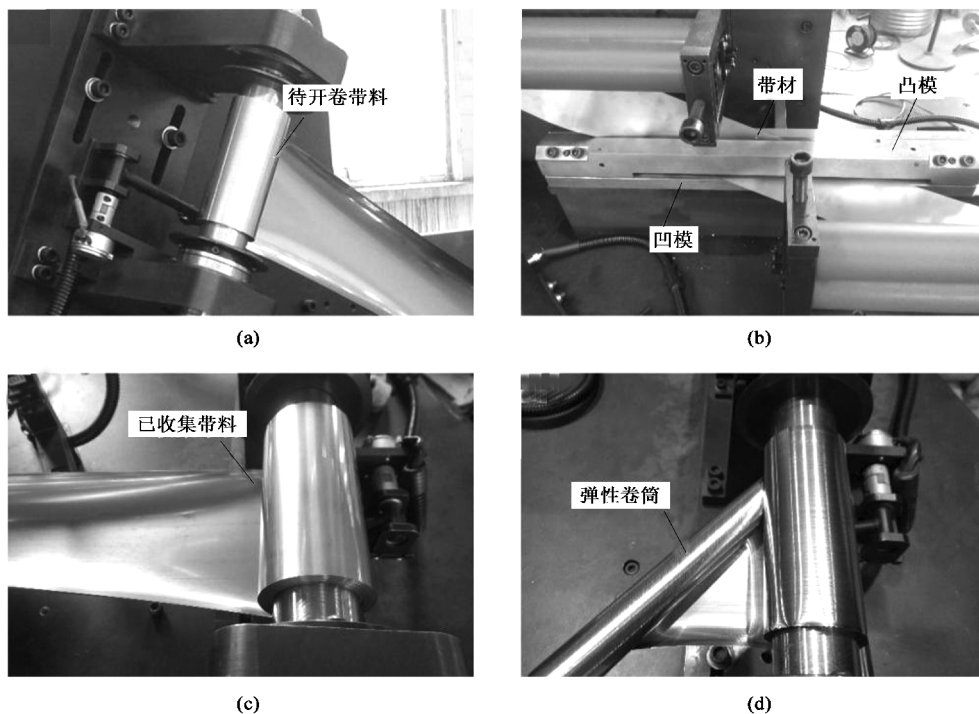


图 10 弹性卷筒加工过程

(a) 带料开卷 (b) 连续拉弯成形 (c) 已成形带料收集 (d) 出件

Fig. 10 Machining process of stacer

(a) Strip uncoiling (b) Continuous stretch bending (c) Collection of formed strip (d) Outgoing part

(3) 成形加工

在后张力作用下,带料经开卷机开卷,经前置纠偏组件矫正,在模具组件内实现连续拉弯,再次经后置纠偏组件矫正方向后,由收卷机完成已成形带料的收集。带料成形至预定长度后,由 PLC 控制自动停机。

(4) 出件

定尺切割后进行弹性卷筒制件的出件,已成形带料的弹性能自动释放,带料卷曲形成弹性卷筒制件。

利用连续拉弯成形设备制得的弹性卷筒如图 11 所示,制件直径为 $\Phi 19.5$ mm,全长为 6 m,长度范围内弹性卷筒的直线度偏差小于 5 mm,各位置成形一致性极高,层间贴合紧密。经测试,弯曲刚度与薄壁管件相近,表面光洁,外观质量良好。

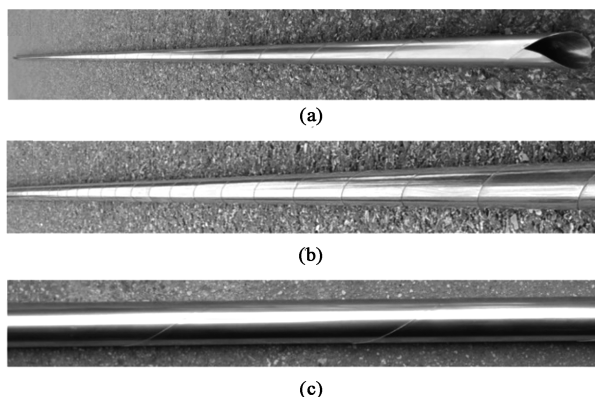


图 11 弹性卷筒制件

(a) 整体图 (b) 局部图 1 (c) 局部图 2

Fig. 11 Stacer workpiece

(a) The whole diagram (b) Partial diagram 1 (c) Partial diagram 2

5 结论

(1) 采用数值模拟的方式对连续拉弯成形过程进行了分析,成形存在明显的正向弯曲、弹性能释放及反向弯曲阶段,连续拉弯成形过程改善了冷成形制件的残余应力,提高了制件的稳定性。

(2) 对连续拉弯成形设备的功能、结构进行了分析,完成了连续拉弯成形设备的研发,设备由开卷机、纠偏组件、模具组件、收卷机等结构组成。为提高我国弹性卷筒类制件的批量化生产能力提供了基础。

(3) 提出了一种可用于实际生产的带材恒张力控制模型,在无传统张力辊及不引入附加张力测量装置的情况下,实现了张力的恒定控制。简化了设备结构,避免了张力辊对成形精度的影响。经应用

测试,后张力波动幅值小于 4%,前张力波动幅值小于 3%,实现了稳定控制的效果。

(4) 利用连续拉弯成形设备,成功研制得到了长度为 6 m 的弹性卷筒制件,全长直线度偏差小于 5 mm,验证了弹性卷筒成形工艺与连续拉弯成形设备的可行性与有效性,得到了可供飞行应用的弹性卷筒制件。

参考文献:

- [1] Huang J P, Lei J G, Li S X, et al. The electric field detector (EFD) onboard the ZH-1 satellite and first observational results [J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, (2): 469-478.
- [2] 袁仕耿, 朱兴鸿, 黄建平. 电磁监测试验卫星 (张衡一号) 系统设计与关键技术 [J]. *遥感学报*, 2018, 22 (S1): 32-38.
Yuan S G, Zhu X H, Huang J P. System design and key technology of China seismo-electromagnetic satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22 (S1): 32-38.
- [3] Chu Z Y, Lei Y A. Design theory and dynamic analysis of a deployable boom [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, (71): 126-141.
- [4] 张韬, 苏彦. 嫦娥四号低频射电频谱仪降低背景噪声方法的研究 [J]. *天文研究与技术*, 2019, 16 (3): 312-320.
Zhang T, Su Y. Research of the method for reducing background of very low frequency radio spectrum on Chang'E-4 [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2019, 16 (3): 312-320.
- [5] 周思达, 周小陈. 空间伸展臂的技术现状与难点 [J]. *中国空间科学技术*, 2014, (6): 38-50.
Zhou S D, Zhou X C. Development and technical difficulties of deployable spacemasts [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2014, (6): 38-50.
- [6] 刘志全, 黎彪, 丁锋. 球铰接杆式支撑臂展开过程中横向振动分析 [J]. *宇航学报*, 2014, 35 (7): 753-761.
Liu Z Q, Li B, Ding F. Analysis of transverse vibration of an AD-AM type mast in deployment process [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35 (7): 753-761.
- [7] Seriani S, Gallina P. A storable tubular extendible member (STEM) parallel robot: Modelization and evaluation [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2015, 90: 95-107.
- [8] 杨慧, 刘恋, 刘荣强, 等. 复合材料人形杆压扁过程数值模拟分析 [J]. *宇航学报*, 2019, 40 (5): 570-576.
Yang H, Liu L, Liu R Q, et al. Numerical simulation and analysis on flattening process of composite TRAC boom [J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40 (5): 570-576.
- [9] 郭一竹, 杨皓宇, 郭宏伟, 等. 空间薄壁弹性伸杆力学特性分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52 (1): 107-112.
Guo Y Z, Yang H Y, Guo H W, et al. Analysis of mechanical properties of spatial thin-walled elastic extension bar [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52 (1): 107-112.
- [10] Ullrich R, Mccauley J, Turin P, et al. The stereo impact boom

- [J]. *Space Science Reviews*, 2008, 136 (1-4): 185-201.
- [11] Andersson L, Ergun R E, Delory G T, et al. The langmuir probe and waves (LPW) instrument for MAVEN [J]. *Space Science Reviews*, 2015, 195 (1-4): 173-198.
- [12] Li Z H, Han J T, Yu C Y, et al. Numerical and experimental investigation on forming stacer using compositing stretch and press bending process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, (92): 2525-2533.
- [13] Wu J, Wang C J, Li G Y. Research on the realization method of simulation system of the extension process of the reel-type stretching rod mechanism [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019, 339 (5): 49-53.
- [14] 韩静涛, 张从发, 李占华, 等. 一种高性能弹射形弹簧弹性卷筒的生产方法 [P]. 中国: ZL201410474629. X, 2015.
Han J T, Zhang C F, Li Z H, et al. Production method of a high performance ejection spring stacer [P]. China: ZL2014-10474629. X, 2015.
- [15] Nabeel Younas, Hocine Chalal, Farid Abed-Meraim. Finite element simulation of sheet metal forming processes using non-quadratic anisotropic plasticity models and solid-shell finite elements [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 47: 1416-1423.
- [16] Kai H, Xiao Q. Experimental and numerical study on the deformation mechanism of straight flanging by incremental sheet forming [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 160: 75-89.
- [17] 罗欢, 罗琪, 王奕博, 等. 基于各道次载荷近平均分配下的前轴辊锻模具型槽设计 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (1): 22-28.
Luo H, Luo Q, Wang Y B, et al. Groove design of front axle roll forging die based on near-equal load distribution of each pass [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (1): 22-28.
- [18] 刘启华, 周旭, 伍英, 等. 后地板冲压工艺分析及模具设计 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (4): 77-81.
Liu Q H, Zhou X, Wu Y, et al. Process analysis and die design of stamping of rear floor [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (4): 77-81.
- [19] Balat-Pichelin M, Sans J L, Escape C, et al. Emissivity of elgiloy and pure niobium at high temperature for the solar orbiter mission [J]. *Vacuum*, 2017, 142: 87-95.
- [20] Qureshi I N, Rani S, Yasmin F, et al. TEM study for strengthening mechanisms in elgiloy [J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 442: 268-274.

(上接第202页)

- Li W D. Effects of process parameters on the draught pressure of three-roll cross wedge hollow rolling [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2017, 9 (5): 220-224.
- [3] 束学道, 彭文飞, 聂广占. 楔横轧大型轴类件轧制力规律研究 [J]. *塑性工程学报*, 2009, 16 (1): 102-105.
Shu X D, Peng W F, Nie G Z. The study of rolling force on forming large-sized shaft-part by cross wedge rolling [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16 (1): 102-105.
- [4] 束学道, 闫波, 聂广占. 轧辊直径对楔横轧大型轴类件应力应变影响分析 [J]. *现代制造工程*, 2008, (9): 5-8.
Shu X D, Yan B, Nie G Z. Influence analysis of roller diameter on the stress and strain of large-sized shafts in cross wedge rolling [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008, (9): 5-8.
- [5] 胡正寰, 张康生, 王宝雨. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
Hu Z H, Zhang K S, Wang B Y. Forming Technology and Simulation of Cross Wedge Rolling Parts [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [6] Bartnicki J, Pater Z. The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156: 1867-1873.
- [7] 江洋, 王宝雨, 霍元明. 楔横轧成形 25CrMo4 厚壁空心轴件的不圆度分析 [J]. *工程科学学报*, 2019, 41 (3): 384-392.
Jiang Y, Wang B Y, Huo Y M. Roundness error analysis of 25CrMo4 thick-walled hollow shaft by cross wedge rolling [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41 (3): 384-392.
- [8] 朱德彪, 束学道. 工艺参数对楔横轧 GH4169 合金轴类件力能参数的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (1): 52-59.
Zhu D B, Shu X D. Influence of process parameters on force and energy parameters of cross wedge rolling GH4169 alloy shaft parts [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25 (1): 52-59.
- [9] 赵静, 许庆斌, 姜晓梅. 铝合金轴类零件楔横轧多楔成形机理分析 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45 (3): 121-124, 127.
Zhao J, Xu Q B, Jiang X M. Mechanism analysis of aluminum alloy shaft forming with multi-wedge cross wedge rolling [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45 (3): 121-124, 127.
- [10] 熊毅, 傅万堂, 孙淑华. 高碳钢棒件温楔横轧成形过程的有限元数值模拟 [J]. *塑性工程学报*, 2006, 13 (5): 36-40, 44.
Xiong Y, Fu W T, Sun S H. Finite element numerical simulation of warm cross wedge rolling for high carbon steel rods [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2006, 13 (5): 36-40, 44.
- [11] 霍元明, 王宝雨, 林建国. 楔横轧高铁车轴钢 25CrMo4 塑性损伤形成机理 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2013, 34 (11): 1625-1629.
Huo Y M, Wang B Y, Lin J G. Damage mechanisms research for the high-speed railway axle steel 25CrMo4 during hot cross wedge rolling [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2013, 34 (11): 1625-1629.
- [12] 黄超群, 来飞. 基于克里金模型和遗传算法的楔横轧连杆毛坯优化 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (8): 99-105.
Huang C Q, Lai F. Optimization on cross wedge rolling connecting rod blank based on Kriging model and genetic algorithm [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (8): 99-105.