

钛合金两轴柔性滚弯技术应用研究

赵 淘, 李晓龙, 杜春峰, 鹿启栋, 孙敏杰, 娄一峰

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要: 针对钛合金筒形件采用常规滚弯工艺成形时存在的直边长、质量不稳定、加工周期长等问题, 选取典型航天产品进行钛合金两轴柔性滚弯工艺验证。试验结果表明: 两轴柔性滚弯成形能力强, 无需多次滚弯, 且得到的工件直边短, 单个钛合金筒形件成形周期可控制在 1 min 以内; 两轴柔性滚弯技术中, 超弹性材料的应用提高了钛合金成形精度, 得到的试验件全部符合成形技术指标要求; 经典弯曲回弹公式可用于计算钛合金两轴柔性滚弯时的刚性辊直径, 得到的工件内表面曲率半径的理论值和实际值偏差在 0.7 mm 内。因此, 两轴柔性滚弯技术可实现钛合金筒形件的高效率、高质量冷成形, 具备很好的工程应用前景。

关键词: 钛合金; 筒形件; 两轴柔性滚弯; 超弹性材料; 弯曲回弹

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.012

中图分类号: TG379

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0083-05

Study on application of two-axis flexible roll bending technology for titanium alloy

Zhao Tao, Li Xiaolong, Du Chunfeng, Lu Qidong, Sun Minjie, Lou Yifeng

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract: Aiming at the problems of long straight-flange, unstable quality and long processing cycle that exist when titanium alloy cylindrical parts are formed by conventional roll bending process, for typical aerospace product, two-axis flexible roll bending process validation was conducted. The test results show that two-axis roll bending has strong forming ability without multi-pass roll bending, the straight-flange of part obtained is short, and the forming cycle of a titanium alloy cylindrical part is controlled within 1 min. Then, the application of superelastic material in two-axis flexible roll bending technology improves the forming accuracy of titanium alloy parts, and all the test parts obtained meet the requirements of forming technical indicators. Furthermore, the classical formula of bending springback is used to calculate the diameter of rigid roller during the two-axis flexible roll bending of titanium alloy, and the deviation between theoretical value and actual value of the curvature radius for the part inner surface obtained is within 0.7 mm. Thus, the two-axis flexible roll bending technology can realize cold forming of titanium alloy cylindrical part with high efficiency and high quality, and has a good prospect in engineering application.

Key words: titanium alloy; cylindrical part; two-axis flexible roll bending; superelastic material; bending springback

钛合金是 20 世纪 50 年代发展起来的新型结构材料和功能材料。钛合金具有比强度高、高温和低温性能好、抗腐蚀、无磁性等优点, 不仅可以实现结构减重, 而且可以满足高温、低温、腐蚀等诸多恶劣环境下的使用要求, 在航天、航空、船舶、汽车等工业领域得到了广泛应用^[1-2]。钛合金筒形件是钛合金钣金件中较为常见的一类, 其典型产品主要有导弹舱体壳体、航空发动机和船舶的输送管路、汽车排气系统等。滚弯成形是加工钛合金筒形件的重要工艺方法, 首先在滚弯机床上将板材卷制成开

缝的圆筒, 然后通过纵缝焊接实现工件的封闭, 该方法具有工艺简单、通用性强、制造成本低等优势。然而, 常温下钛合金的强度高、屈强比大、弹性模量小的特点给板材滚弯成形带来了巨大的挑战, 滚弯过程中成形困难且回弹量大。江双双^[3]采用电脉冲辅助滚弯工艺进行钛合金薄板的成形, 在三轴滚弯成形过程中使用电流对钛板局部进行加热, 虽然可明显降低材料的变形抗力和回弹量, 但是滚弯成形后工件直边较长, 而且工艺复杂, 技术成熟度不高。韦超等^[4-5]采用四轴滚弯工艺实现了小曲率半径钛合金筒形件的冷成形, 但是, 存在工件直边长、成形效率低等问题。

针对钛合金滚弯成形难度大的问题, 本文提出了一种钛合金冷滚弯的新工艺——两轴柔性滚弯技

收稿日期: 2020-12-16; 修订日期: 2021-03-15

作者简介: 赵 淘 (1989-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: tonyzhao1009@163.com

术,该技术将超弹性材料与滚弯成形工艺相结合,实现了钛合金的高精度、高效率滚弯成形。本文选取航天领域典型的小曲率半径薄壁筒形件进行两轴柔性滚弯技术的应用验证。

1 两轴柔性滚弯成形原理

板材的两轴柔性滚弯成形原理如图 1 所示,其滚弯装置主要由超弹性材料(一般为聚氨酯橡胶)包覆的弹性辊和金属材质的刚性辊组成,弹性辊外侧的超弹性材料应具备高弹性、大变形、几乎不可压缩、耐磨性好等特点。两轴柔性滚弯技术通过采用超弹性材料将传统滚弯工艺的进给、弯曲运动合二为一,即板材通过刚性辊、弹性辊之间时,作用在板材上的正压力使之弯曲,作用在板材上的摩擦力使之前进。在板材两轴柔性滚弯成形过程中,弹性辊与刚性辊产生相对径向进给后,弹性辊发生弹性变形并产生分布载荷 p ,当载荷 p 达到一定值时板材产生局部塑性变形,通过连续的进给实现板材的滚弯成形^[6-8]。图 1 中, d 为刚性辊直径、 H 为弹性辊压入量。

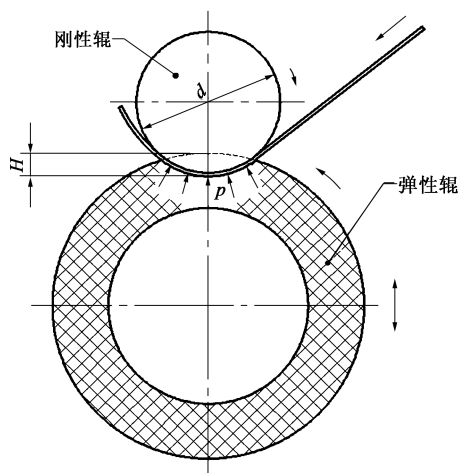


图 1 两轴柔性滚弯成形原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle for two-axis flexible roll bending

两轴柔性滚弯技术将超弹性材料应用于滚弯成形中,超弹性材料可降低甚至消除辊轴挠曲变形引起的材料变形不均匀现象,因此,可获得更高的成形精度。同时,采用三轴、四轴滚弯时各辊轴对板材的施力点存在一定间距,导致工件成形后存在较长的直边;而两轴柔性滚弯时弹性辊的超弹性材料使板材处于局部包覆状态,滚弯成形后工件直边短。相比于常规的三轴、四轴滚弯工艺,两轴柔性滚弯

技术具有产品直边短、成形质量好、加工效率高等技术优势。两轴柔性滚弯技术通过聚氨酯橡胶等超弹性材料施加力于板料,超弹性材料变形产生的弹性力相对有限,因此,两轴柔性滚弯技术适用于薄板的冷成形。

2 试验对象和材料

2.1 试验对象

本文以某型号航天产品为试验对象,其结构如图 2 所示,材料为 TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金。由于该产品对圆度要求较高,因此,采用“滚弯+热校形”的组合工艺,板材滚弯成形后焊接工件的纵缝,然后在真空热处理设备内进行热校形,通过热校形可提高工件的圆度,同时可改善工件的母线直线度、消除成形及焊接带来的残余应力。该产品滚弯成形工艺的技术难点如下:

- (1) TC4 钛合金冷成形性能差,常温下变形抗力和回弹量大;
- (2) 该产品为小曲率半径薄壁筒形件,且长径比 $L/D > 2$ (其中, L 和 D 分别为筒形件的长度和直径),滚弯成形时易因辊轴变形而出现腰鼓形缺陷。
- (3) 该产品的纵缝采用激光焊接工艺,激光焊接对焊前装配精度要求高,若滚弯成形后工件纵缝对接间隙超过 0.2 mm,易出现焊穿现象,进而导致产品报废。

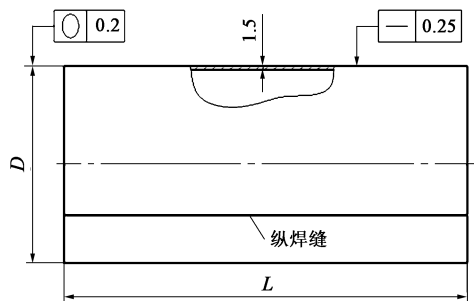


图 2 产品结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of product structure

前期该产品采用四轴滚弯工艺加工,由于四轴滚弯的直边比较长,滚弯前需在折弯机上对零件两侧端头进行预弯,而且滚弯时需要经过多次滚弯才能将钛板加工至规定的曲率半径。采用四轴滚弯工艺,产品存在纵缝对接间隙超差、产生腰鼓形缺陷、滚弯曲率一致性差等问题。本文研究的产品为小曲率半径薄壁钛合金筒形件,成形精度要求高,而且

需要满足批量化生产要求。鉴于两轴柔性滚弯技术具有产品直边短、成形精度高、加工速度快的特点，因此，该产品适合采用两轴柔性滚弯技术进行加工。

2.2 试验材料

试验对象采用的材料为 $\alpha+\beta$ 型 TC4 钛合金，其综合性能优异，是目前使用最为广泛的一种钛合金^[9]。试验材料采购于西北有色金属研究院，其工程应力-工程应变曲线如图 3 所示，测得的材料力学性能数据如表 1 所示。

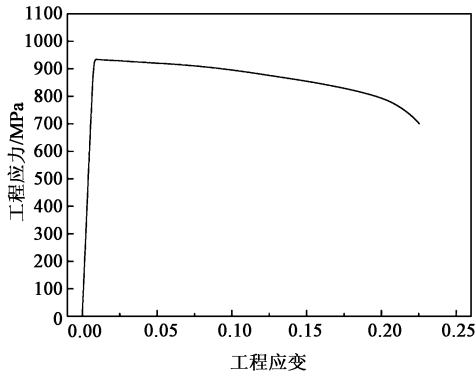


图 3 TC4 钛合金的工程应力-工程应变曲线
Fig. 3 Curve of engineering stress-engineering strain for TC4 titanium alloy

表 1 TC4 钛合金的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of TC4 titanium alloy

参数	弹性模量 E/GPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_{m}/MPa
数值	114.6	911	943

3 工艺试验

3.1 试验装置

在 W10-3×650 型数控两辊卷板机上进行 TC4 钛合金两轴柔性滚弯工艺试验，如图 4 所示。试验装置为胶辊下置式结构，弹性辊为主动辊轴，转速为



图 4 TC4 钛合金两轴柔性滚弯试验装置
Fig. 4 Test device of two-axe flexible roll bending for TC4 titanium alloy

$2.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，直径为 $\Phi 390 \text{ mm}$ ，其外侧包覆的聚氨酯橡胶厚度为 50 mm 、邵氏硬度为 90 A。试验装置具备上料定位、自动卸料的功能，可提高成形精度和生产效率。

3.2 试验结果

采用两轴柔性滚弯技术加工的试验件如图 5 所示，利用该技术仅 1 次滚弯就可以完成钛合金筒形件的成形，而且直边短，直边长度约为 $3\sim 5 \text{ mm}$ ，端头无需预弯，因此，单件成形周期可控制在 1 min 内，生产效率较“预弯+四轴滚弯”工艺提高了 20 倍以上。



图 5 两轴柔性滚弯试验件
Fig. 5 Test parts of two-axe flexible roll bending

钛合金筒形件滚弯成形的技术指标主要有纵缝对接间隙、母线直线度，其中纵缝对接间隙最为关键。在焊接工装上对纵缝对接间隙进行检测，母线直线度取周向均布的 4 处进行测量，数据取测量结果的最大值。试验件纵缝对接间隙、母线直线度检测结果如图 6 和图 7 所示，可以看出，采用两轴柔性滚弯技术加工的钛合金筒形件的成形精度高，满足技术指标要求。

在试验装置和材料固定的前提下，两轴柔性滚弯技术成形中影响工件曲率半径的工艺参数主要有刚性辊直径 d 和弹性辊压入量 H 。根据左敦稳等^[10]、屈晓敏等^[11]和余国庆等^[12]的研究结果，在刚性辊直径一定时，工件曲率半径随弹性辊压入量的增加而变小，但当弹性辊压入量达到一定值时，工件曲率半径不再改变，工件进入稳定变形阶段，此时工件的成形质量最佳。因此，根据工件曲率半径计算稳定变形阶段的刚性辊直径是两轴柔性滚弯工艺设计的关键。

根据经典弯曲回弹公式计算刚性辊直径：

$$d = \frac{2R_0}{1 + \frac{3R_{\text{eL}}}{E} \times \frac{R_0}{t}}$$

(1)

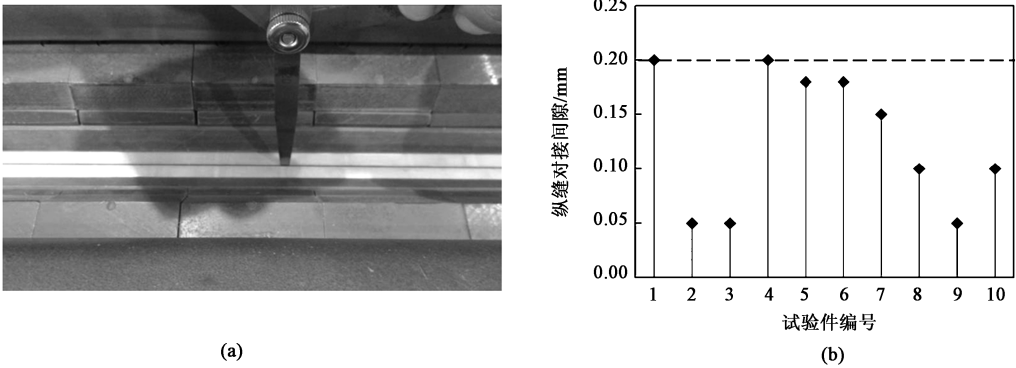


图 6 纵缝对接间隙检测结果
(a) 检测方法 (b) 检测数据
Fig. 6 Testing results of longitudinal weld clearance
(a) Testing method (b) Testing data

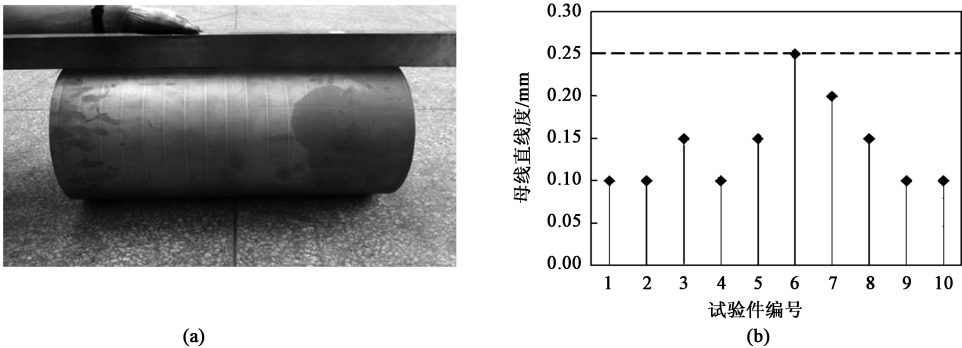


图 7 母线直线度检测结果
(a) 检测方法 (b) 检测数据
Fig. 7 Testing results of generatrix straightness
(a) Testing method (b) Testing data

式中： d 为刚性辊直径； R_0 为工件内表面曲率半径； t 为材料的厚度； R_{el} 为材料的屈服强度； E 为材料的弹性模量。

按照理论计算的刚性辊直径进行工艺试验，并将滚弯后的工件曲率半径实际值和理论值进行对比，如图 8 所示。

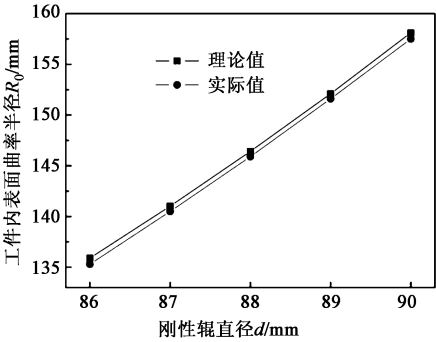


图 8 刚性辊直径对工件内表面曲率半径的影响
Fig. 8 Influence of rigid roller diameter on curvature radius of part inner surface

在弹性辊压入量足够大时，工件内表面曲率半径的理论值和实际值偏差在 0.7 mm 以内，因此，工艺设计时可采用经典弯曲回弹公式计算刚性辊直径。另外，在弹性辊压入量一定时，工件内表面曲率半径随着刚性辊直径的增大而增大。

4 结 论

(1) 经过原理分析和试验验证，两轴柔性滚弯技术可实现钛合金筒形件的高效率、高质量冷成形，具备很好的工程应用前景。两轴柔性滚弯技术的成形能力强，无需多次滚弯，且得到的工件直边短，直边长度约为 3~5 mm，无需端头预弯，单个钛合金筒形件的成形周期可控制在 1 min 内，生产效率较“预弯+四轴滚弯”工艺提高了 20 倍以上。此外，两轴柔性滚弯技术中超弹性材料的应用使钛合金成形精度得以提升，试验件的纵缝对接间隙不大于 0.2 mm、母

线直线度不大于 0.25 mm, 试验件全部符合成形技术指标要求。

(2) 经典弯曲回弹公式可用于计算钛合金两轴柔性滚弯技术稳定变形阶段的刚性辊直径, 工件内表面曲率半径的理论值和实际值偏差在 0.7 mm 内。同时, 在弹性辊压入量一定时, 工件内表面曲率半径随刚性辊直径的增大而增大。

参考文献:

- [1] 赵融, 廖金华. 先进材料与工艺在机载导弹上的研究与应用 [J]. 航空制造技术, 2016, (Z2): 120-125, 132.
Zhao R, Liao J H. Research of advanced materials and technologies on airborne missile [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, (Z2): 120-125, 132.
- [2] Zhao Z Y, Wang G F, Hou H L, et al. The effect of pulsed current on the shear deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy [J]. Scientific Reports, 2018, 8 (1): 14748-14756.
- [3] 江双双. 电脉冲辅助 TC4 钛合金板滚弯成形研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Jiang S S. Investigation into the Electrically-Assisted Roll Bending Process of A TC4 Titanium Alloy Sheet [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [4] 韦超, 曹雪峰, 姜恒, 等. 小曲率半径薄壁钛合金筒形件冷滚弯技术研究 [J]. 航天制造技术, 2014, (1): 15-17, 22.
Wei C, Cao X F, Jiang H, et al. Study on technology of cold roll bending thin-walled tube-shaped titanium alloy parts with small curvature radius [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014, (1): 15-17, 22.
- [5] 董文倩, 韦超. 小曲率薄壁钛合金筒形件冷滚弯成形数值模拟研究 [J]. 航天制造技术, 2014, (2): 55-59.
Dong W Q, Wei C. Numerical simulation of cold roll-bending process of small curvature thin-walled tubular workpieces for titanium alloy [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014, (2): 55-59.
- [6] 宋攀峰. 柔性滚弯成形技术研究进展 [J]. 机械制造与自动化, 2017, (5): 42-44.
Song P F. Research progress of flexible roll bending technologies [J]. Machine Building & Automation, 2017, (5): 42-44.
- [7] 毕高杰, 黎向锋, 李堃, 等. 聚氨酯轮硬度对小直径开缝衬套成形性能的影响 [J]. 现代制造工程, 2019, (7): 83-103.
Bi G J, Li X F, Li K, et al. Effect of polyurethane wheel hardness on the forming property of small diameter split sleeve [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019, (7): 83-103.
- [8] 杨昆瑛, 方刚, 曾攀, 等. 双辊柔性滚弯成形过程三维有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (8): 31-38.
Yang K Y, Fang G, Zeng P, et al. Three-dimensional finite element analysis of two-roller flexible bending process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (8): 31-38.
- [9] Tan H, Guo M L, Clare A T, et al. Microstructure and properties of Ti-6Al-4V fabricated by low-power pulsed laser directed energy deposition [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35 (9): 2027-2037.
- [10] 左敦敏, 王珉, 刘奎, 等. 双轴柔性滚弯技术的实验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30 (5): 473-478.
Zuo D W, Wang M, Liu K, et al. Experimental study on two-axle bending technique [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1998, 30 (5): 473-479.
- [11] 屈晓敏, 周云飞. 双轴滚弯成形机成形过程与设计 [J]. 洪都科技, 2003, (1): 9-15.
Qu X M, Zhou Y F. Forming process and design of dual-roller forming machine [J]. Hongdu Science & Technology, 2003, (1): 9-15.
- [12] 余国庆, 鲁世红. 基于有限元分析的二轴柔性滚弯过程影响因素的研究 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24 (10): 1187-1229.
Yu G Q, Lu S H. Study of the influence factors on two-roll bending with elastic medium based on finite element analysis [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24 (10): 1187-1229.

(上接第 29 页)

- Zhang W F, Wang Y H, Li X W, et al. Quantitative calculation and control of primary α phase for the variable sections in large TA15 titanium alloy forging [J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37 (1): 37-41.
- [10] 闵新华, 纪仁峰. 锻造工艺对 TA15 钛合金扁坯组织和力学性能的影响 [J]. 钛工业进展, 2016, 33 (6): 36-39.
Min X H, Ji R F. Effect of forging process on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy slab [J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33 (6): 36-39.
- [11] 王相钧, 王大勇, 王培涛, 等. 连接杆头模锻工艺参数优化研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 36-41.
Wang X J, Wang D Y, Wang P T, et al. Process parameters optimization of die forging for connecting rod head [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 36-41.
- [12] 姚泽坤, 孙红兰, 张东亚, 等. 工艺参数组合对 TA7 钛合金拉伸性能的影响 [J]. 重型机械, 2012, (3): 74-77.
Yao Z K, Sun H L, Zhang D Y, et al. Effect of process parameters on tensile property of TA7 titanium alloy [J]. Heavy Machinery, 2012, (3): 74-77.
- [13] 蔡建明, 曹春晓, 马济民, 等. TC11 钛合金异常双态组织的形成及控制 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34 (3): 517-521.
Cai J M, Cao C X, Mao J M, et al. Forming and restricting for α particle with abnormal shapes of duplex structure for TC11 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34 (3): 517-521.