

基于悬臂梁解析的管材自由弯曲加载曲线优化研究

徐鑫良^{1,2}, 吴 为^{1,2}, 闫 晶^{1,2}, 张 喆³, 韩秀全^{1,2}

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024; 2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024;
3. 航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089)

摘要: 自由弯曲成形技术通过同时控制管材的轴向推进及弯曲模的运动实现了复杂轴线导管的成形。通过自由弯曲成形过程分析和弹塑性变形理论, 并结合成形区悬臂梁形状假设, 探讨了管材自由弯曲工艺中成形区的控制方程, 推导得到基于成形区悬臂梁形状假设的弯曲工艺参数(位移和转角)与成形特定曲率半径的函数关系。此外, 针对 GH4169 高温合金导管自由弯曲成形过程进行了有限元数值模拟, 对比了基于圆弧解析和悬臂梁解析的加载曲线成形的导管形状, 表明基于悬臂梁解析的加载曲线的成形尺寸更接近设计尺寸。最后, 分析确定了弯曲模转角是造成上述两种加载曲线差异的原因, 悬臂梁解析加载曲线中的转角与当前弯曲导管的形状和弯曲模的位移相协调。

关键词: 自由弯曲; 加载曲线; 悬臂梁; 弯曲模; 弯曲导管

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.019

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0138-05

Optimization research on free bending loading curve for pipe based on cantilever beam analysis

Xu Xinliang^{1,2}, Wu Wei^{1,2}, Yan Jing^{1,2}, Zhang Zhe³, Han Xiuquan^{1,2}

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Plastic Forming, Beijing 100024, China;

3. Institute of Standard Process Material Design, AVIC First Aircraft Design Research Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Free bending technology can realize the forming of conduits with complex axis by simultaneously controlling the axial propulsion of pipe and the movement of bending die. Therefore, through the analysis of free bending process and the theory of elastic-plastic deformation, combined with the assumption of cantilever beam shape in the forming area, the control equation of the forming area in the free bending process of pipe was discussed, and the function relationship between the bending process parameters (displacement and rotation angle) based on the assumption of cantilever beam shape in the forming area and the specific curvature radius of forming was derived. Furthermore, the free bending process of superalloy GH4169 conduits was numerically simulated by finite element software, and the shapes of the conduits formed based on the arc analytical and cantilever beam analytical loading curves were compared. It is shown that the formed is closer to the design size based on the cantilever beam analytical loading curves. Finally, it is determined that the bending die rotation angle is the reason for the difference in the above two loading curvatures, and the rotation angle in the cantilever beam analytical loading curve is coordinated with the shape of the current bent conduit and the displacement of the bending die.

Key words: free bending; loading curve; cantilever beam; bending die; bent conduit

三维自由弯曲技术是一种新兴的管材塑性加工技术^[1], 可以在不更换弯曲模具的情况下, 通过弯曲模姿态的变化, 实现不同弯曲半径管件的弯曲成形, 大大提高了复杂弯曲管件的加工效率, 因此受到广泛关注^[2-3]。弯曲模的加载曲线是实现导管形状控制的关键之一, 国内外学者对控制方程和加载

曲线开展了研究^[4]。

自从提出了三维自由弯曲技术的概念后, 国外很多学者对其展开了研究, 不仅提出了成形过程中的运动控制方程, 还研制出了三轴、四轴、五轴、六轴等构型的自由弯曲设备^[5]。相比之下, 国内自由弯曲技术的研究起步较晚, 南京航空航天大学、西北工业大学等主要采用有限元模拟方式, 给出了三轴自由弯曲工艺的运动控制方程^[6], 确定了自由弯曲模型分析对弯曲半径和成形质量的影响因素,

收稿日期: 2023-04-21; 修订日期: 2023-07-25

作者简介: 徐鑫良 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: xuxinl@qq.com

并研制了自由弯曲设备用于加工以验证模拟实验结果^[7-8]。

对于四轴及以上设备的过渡段（弯曲模运动过程中形成的导管形状）的运动控制方程还无法很好地根据弯曲半径解析得到弯曲模的运动姿态^[9]。

自由弯曲成形过程主要受加载曲线（弯曲模的运动姿态）、摩擦条件、模具结构和材料性能等因素的影响，其中，加载曲线对成形性能的影响尤为重要^[10]。现有的研究认为弯曲成形从成形开始时管材的轴线为固定曲率半径为 R 的圆弧段，没有考虑到自由弯曲过程中曲率半径从 ∞ 到 R 的过程，存在曲率半径的突变；而且认为弯曲模的角速度始终为恒定值，而成形过程中弯曲模不能与成形过程中的管材轴线保持垂直，导致在较小弯曲半径成形时，在成形管材的直段与圆弧段之间出现折弯现象。

因此，研究自由弯曲成形加载曲线的控制方法，探索自由弯曲成形加载曲线的优化规律具有十分重要的研究意义。

1 自由弯曲成形过程

如图 1 所示，自由弯曲成形过程中，送料机构推动导管，穿过固定模和弯曲模。通过弯曲模的平动和转动，使导管产生相应的变形^[11-12]，其中， X 轴为导管送进方向， Y 、 Z 为弯曲模的运动方向，原点 O 为固定模的出口， A 点为弯曲模位置， OA 段为成形区。成形过程中，固定模出口和弯曲模入口间的导管为成形区，可以视作悬臂梁。为了成形出指定形状的自由弯曲导管，本文针对可主动控制弯曲模偏转的弯曲设备，结合悬臂梁挠曲线对自由弯曲导管成形中的加载曲线进行了优化。

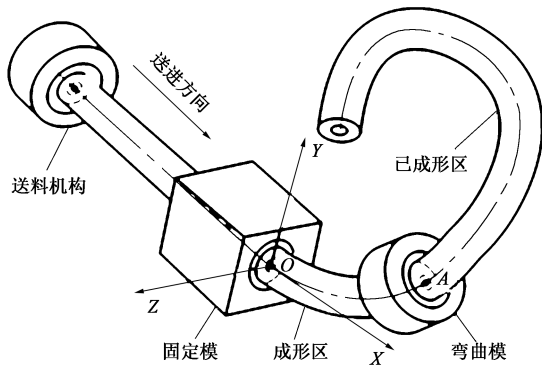


图 1 三维自由弯曲原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D free-bending principle

2 悬臂梁加载曲线推算

为方便几何推导说明，简化导管为轴线，成形区的示意图如图 2 所示，其中， O_r 为该时刻弯曲段成形圆弧段圆心， r 为该时刻弯曲段成形圆弧段半径， O_R 为最终成形弯曲段成形圆弧段圆心， R 为最终成形弯曲段成形圆弧段半径， $C(A, U)$ 为第 1 过渡段结束时刻弯曲模的位置点及其坐标， U_1 为弯曲段贡献弯曲模偏距， U_2 为直线段贡献弯曲模偏距， U 为弯曲模第 1 过渡段所需移动总偏距。

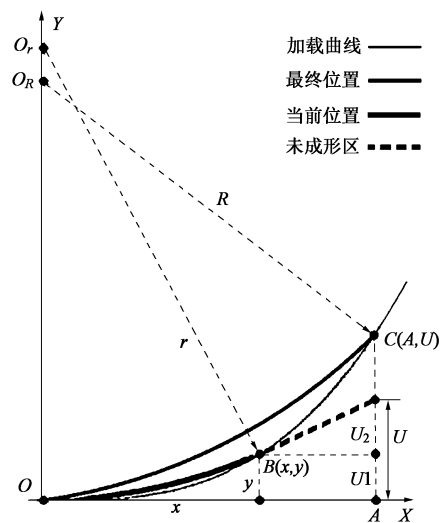


图 2 成形区导管轴线几何关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geometric relationship for tube axis in forming area

假定成形区的轴线为悬臂梁，其长度 l 为变值，此时曲线和直线的交点始终落在变长度悬臂梁端点处，此时刻端点 $B(x, y)$ 的轨迹曲线方程为：

$$\begin{cases} y = Kx^2(3l - x), & 0 \leq x \leq l_A \\ l = x, & 0 \leq x \leq l_A \end{cases} \quad (1)$$

整理可得：

$$y = 2Kx^3, \quad 0 \leq x \leq l_A \quad (2)$$

式中： l_A 为弯曲模与固定模的距离； K 为系数， $K = \frac{U_{\max}}{2l_A^3}$ ； U_{\max} 为最终弯曲模位移。

如图 2 所示，用细实线表示点 B 的迹线，但考虑到成形要求，假设从此处到管材轨道出口的管材轴线为标准的圆弧曲线。管材成形轴线由粗实曲线和粗虚直线组成。随着管材进给， B 点沿着

粗实曲线从 O 点最终运动到 C 点；曲线段弯曲半径 r 从 ∞ 逐渐减小至目标弯曲半径 R ；曲线段不断增加，直线段不断减少。在这个过程中，粗实曲线最终变为 OC 实曲线，粗虚直线全部被推出成形区 OA 外。

此时管材成形区的圆弧段方程为：

$$x^2 + (y - r)^2 = r^2 \quad (3)$$

B 点坐标满足上述圆方程，解得：

$$\begin{cases} r(x) = \frac{1 + 4K^2x^4}{4Kx} \\ \theta(x) = \arcsin\left(\frac{4Kx^2}{1 + 4K^2x^4}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中： θ 为弯曲模轴线与 X 轴的夹角。

此时圆弧段弧长 s 与管材进给速度 v 和时间 t 的关系为：

$$\begin{cases} s = vt \\ s = \int ds = \int r d\theta + \int \theta dr \end{cases} \quad (5)$$

其中，

$$\begin{cases} dr = \frac{12K^2x^4 - 1}{4Kx^2} dx \\ d\theta = \left[-\frac{\left(\frac{64K^3x^5}{(4K^2x^4 + 1)^2} - \frac{8Kx}{4K^2x^4 + 1}\right)}{\left(1 - \frac{16K^2x^4}{(4K^2x^4 + 1)^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \right] dx \end{cases} \quad (6)$$

将式 (5) 和式 (6) 联立，可解得隐函数 $x(t)$ 为：

$$\begin{aligned} vt = & -\int_0^{l_A} \left(\frac{1 + 4K^2x^4}{4Kx} \right) \times \\ & \left[-\frac{\left(\frac{64K^3x^5}{(4K^2x^4 + 1)^2} - \frac{8Kx}{4K^2x^4 + 1}\right)}{\left(1 - \frac{16K^2x^4}{(4K^2x^4 + 1)^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \right] dx + \\ & \int_0^{l_A} \left(\frac{12K^2x^4 - 1}{4Kx^2} \right) \arcsin\left(\frac{4Kx^2}{1 + 4K^2x^4}\right) dx \quad (7) \end{aligned}$$

其中，弯曲模位移 U 和转角 θ 由图 2 所示几何关系可得：

$$\begin{cases} U = \left(\frac{l_A - x}{r - 2Kx^3} \right) x + 2Kx^3 \\ \theta = \arcsin\left(\frac{4Kx^2}{1 + 4K^2x^4}\right) \end{cases} \quad (8)$$

代入隐函数 $x(t)$ ，可解得函数 $U(t)$ 和 $\theta(t)$ ，即：

$$\begin{cases} U(t) = \left[\frac{l_A - x(t)}{r - 2Kx^3(t)} \right] x + 2Kx^3(t) \\ \theta(t) = \arcsin\left[\frac{4Kx^2(t)}{1 + 4K^2x^4(t)}\right] \end{cases} \quad (9)$$

加载曲线由式 (9) 得到，如图 3 和图 4 所示。

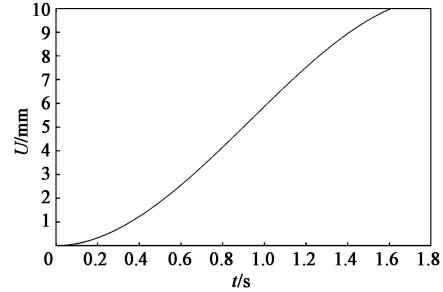


图 3 位移-时间加载曲线

Fig. 3 Displacement-time loading curve

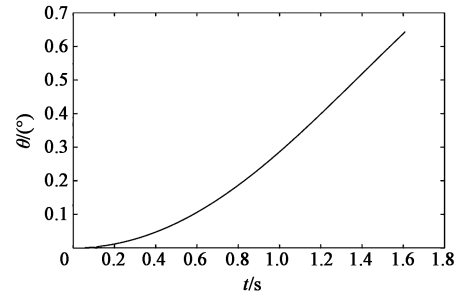


图 4 转角-时间加载曲线

Fig. 4 Rotation angle-time loading curve

3 自由弯曲有限元模拟验证

3.1 有限元模型建立

以规格 $\Phi 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的 GH4169 高温合金导管为有限元分析对象，进行成形半径为 45 mm 的自由弯曲成形工艺分析，分别利用圆弧解析和悬臂梁解析加载曲线控制弯曲模运动，进行成形模拟。

高温合金 GH4169 的材料参数如表 1 所示。

表 1 GH4169 高温合金的材料参数

Table 1 Material parameters of superalloy GH4169

材料牌号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比
GH4169	8240	199	0.3

GH4169 高温合金在应变速率为 0.001 s^{-1} ，变形温度为 293 K 条件下的应力-应变曲线如图 5 所示。仿真工况如表 2 所示，其中， Δc 为管材与弯曲

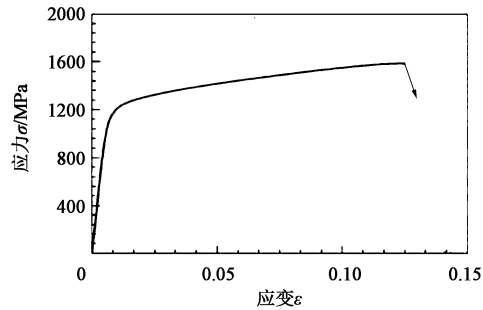


图 5 GH4169 高温合金的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curve of superalloy GH4169

模内孔之间的间隙， μ 为管材与弯曲模内孔之间的摩擦因数。

表 2 工况设置

Table 2 Condition settings

参数	R/mm	U/mm	$\Delta c/\text{mm}$	μ	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	l_A/mm
数值	45	11.459	0.05	0.05	20	30

3.2 成形结果分析

有限元分析结果如图 6 所示。提取图 6 的轴线，得到图 7。对比图 7 轴线可知，圆弧解析得到的成形轴线在直段和圆弧段出现折弯的现象，成形效果不理想，管型较差，形成 11° 的外倾角。

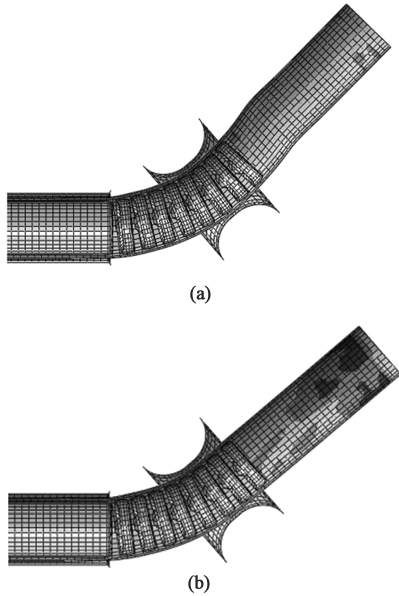


图 6 有限元仿真结果
(a) 圆弧解析加载曲线的成形结果
(b) 悬臂梁解析加载曲线的成形结果
Fig. 6 Finite element simulation results
(a) Forming result of arc analytical loading curve
(b) Forming result of cantilever beam analytical loading curve

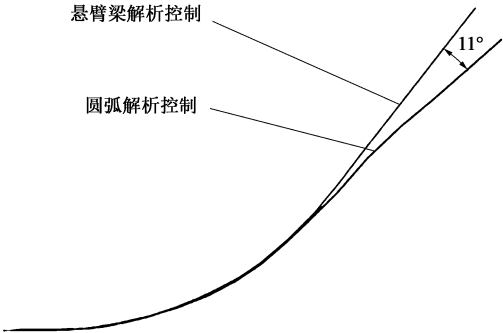


图 7 两种加载曲线的成形轴线对比
Fig. 7 Comparison of forming axis between two loading curves

通过分析各个阶段的成形过程，截取 0.5 和 1.25 s 时的弯曲模姿态，见图 8。可以看出，成形时弯曲模转角过大（图 8b），未与当前弯曲导管的形状和弯曲模的位移相协调，使得弯曲模中心轴线与弯曲轴线切线重合，造成了在初始阶段对导管施加了一个顺时针的弯矩，导致了初始成形段向外倾的现象。

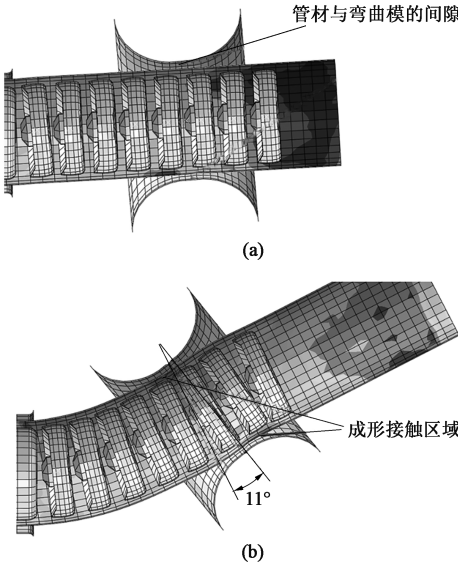


图 8 圆弧解析加载曲线的成形过程分析
(a) $t=0.50\text{ s}$ (b) $t=1.25\text{ s}$
Fig. 8 Forming process analysis of circular arc analytical loading curve

基于悬臂梁解析加载曲线得到的成形轴线过渡平滑，成形管型良好，没有向外偏折的现象。

4 结语

本文通过对自由弯曲成形过程成形区的形状进行分析，基于悬臂梁解析，给出了一种新的加载曲线控制方式，并通过数值模拟对比分析了现有圆弧解析和悬臂梁解析加载曲线对导管弯曲形状的影响。结果表明，基于悬臂梁解析推导得到的加载曲线可

成形无偏折顺滑的自由弯曲导管。这主要是因为自由弯曲成形过程中, 弯曲模转角影响导管形状, 悬臂梁解析加载曲线中的转角与当前弯曲导管的形状和弯曲模的位移相协调, 弯曲模的中心线与弯曲模处导管的切线基本重合。

参考文献:

- [1] Murata M, Ohashi N, Suzuki H. New flexible penetration bending of a tube (1st Report, A study of MOS bending method) [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1989, 55 (517): 2488-2492.
- [2] Guo X Z, Xiong H. Numerical simulation and experimental study on mechanism and characteristics of tube free-bending forming process [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 836-843.
- [3] Gantner P, Harrison D K, Silva A D, et al. The development of a simulation model and the determination of the die control data for the free-bending technique [A]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B [C]. Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221 (2): 163-171.
- [4] Ancellotti S, Fontanari V, Slaghenaufi S, et al. Forming rectangular tubes into complicated 3D shapes by combining three-roll push bending, twisting and rotary draw bending: The role of the fabrication loading history on the mechanical response [J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12 (6): 907-926.
- [5] 陶杰, 熊昊, 万柏方, 等. 三维自由弯曲成形装备及其关键技术 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (4): 1-13.
Tao J, Xiong H, Wan B F, et al. 3D free-bending forming equipment and key technology [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (4): 1-13.
- [6] 马燕楠, 熊昊, 王辉, 等. 复杂空间弯管三维自由弯曲成形有限元模拟及试验 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (2): 20-26.
Ma Y N, Xiong H, Wang H, et al. Simulation and experimental study on three dimensional free bending of complex space elbow [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (2): 20-26.
- [7] Sun S, Fu W Z, Li M Z, et al. Effect of forming parameters on flexible-bending of three-dimensional tubes [J]. Materials Science Forum, 2018, 10: 69-76.
- [8] 段晋昌, 梁卫抗, 马立安, 等. SUS430 不锈钢自由曲面弯曲回弹的预测和试验研究 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 220-228.
Duan J C, Liang W K, Ma L A, et al. Prediction and experimental research on bending springback for free-form surface of SUS430 stainless steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 220-228.
- [9] 熊昊, 万柏方, 陶杰, 等. 三维自由弯曲技术及变形区长度优化数值模拟研究 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (4): 14-21.
Xiong H, Wang B F, Tao J, et al. Three-dimensional free-bending technique and numerical simulation for optimization of deformation zone length [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (4): 14-21.
- [10] 郭训忠, 程诚, 郭嘉鑫, 等. 芯棒结构对薄壁管材自由弯曲成形质量的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 127-136.
Guo X Z, Cheng C, Guo J X, et al. Influence of mandrel structure on forming quality in free bending for thin-walled tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 127-136.
- [11] 张增坤, 吴建军, 尚琪, 等. 空间管件弯扭组合加载成形及回弹规律研究 [J]. 航空制造技术, 2018, 61 (16): 26-31.
Zhang Z K, Wu J J, Shang Q, et al. Investigation to forming and springback of spatial tubes in bending-twisting process [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61 (16): 26-31.
- [12] Takeda Y, Inada S, Kawasumi S, et al. Kinematic design of 3-RPSR parallel mechanism for movable-die drive mechanism of pipe bender [J]. Romanian Journal of Technical Science Applied Mechanic, 2013, 58: 71-96.

