

空间管件弯扭组合加载成形及回弹规律研究

张增坤, 吴建军, 尚琪, 李非凡, 展学鹏

(西北工业大学机电学院, 西安 710072)

[摘要] 基于弹塑性力学理论和有限元数值模拟技术, 构建空间管件定心弯扭组合加载成形工艺的数值模拟模型。研究弯扭组合条件下空间管件的成形规律、成形过程中工艺参数随固定模离心率 e 的变化规律, 以及夹钳扭转角速度一定时固定模离心率 e 和成形轴线挠率修正因子 ϑ 之间的非线性关系。研究发现以下规律: (1) 在空间管件定心弯扭组合加载成形工艺中, 管件的真正弯曲半径受到弯曲模转角和夹钳扭转角度的双重影响。(2) 在纯弯曲条件下所获得的等效弯曲点不能适用于定心模式下空间管件的成形, 原因在于管件在等效弯曲点处的挠率修正因子与固定模离心率 e 、夹钳角速度与送进速度的比值 ω/v 等多种因素有关。(3) 若固定模离心率 e 、活动模回转半径和转角不变, 则挠率修正因子 ϑ 随夹钳角速度与送进速度的比值 ω/v 的增大而增大; 若夹钳角速度与送进速度的比值 ω/v 、活动模回转半径和转角不变, 则挠率修正因子 ϑ 随固定模离心率 e 的增大而减小。

关键词: 空间管件; 回弹规律; 数值模拟; 弯扭成形工艺; 挠率修正因子

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.16.026



张增坤

博士研究生, 主要从事金属管材塑性弯曲成形工艺研究。

空间管件因易于满足轻质量、低能耗、高强度、高精度和高效率等方面的要求, 而被广泛应用于大型客机、航空发动机和宇宙飞船等复杂工业装备中, 用来实现油气输送或机构运动控制等功能^[1]。

根据空间管件轴线外形的不同, 可将其分为空间多拐型管件和空间变曲率管件。空间多拐型管件本质上仍属于平面定曲率弯曲成形件, 可根据传统弯曲成形工艺(拉弯、滚弯和绕弯等)进行加工。与空间多拐型构件相比, 空间变曲率管件由于曲率变化相对均匀, 能够降低油气输送过程中的能耗, 稳定流速并减少管件振颤。目前, 国内相关航空企业在进行空间变曲率管件的批量成形时, 仍主要采用模弯成形工艺^[2-3], 即用外力将管材毛坯压入空间类型的模具沟槽中。该工艺需要经过多次修模

来解决管件回弹问题, 成形效率较低且不具有柔性。

国外学者在近几年的研究中陆续提出了三辊道推弯成形工艺^[4-8]、扭矩叠加控制成形工艺^[9-11]和弯扭组合成形工艺^[12-13]。借助于数值模拟技术和工程试验, 研究人员对不同弯曲工艺下空间管件成形问题进行了较为深入的研究。Plettke^[4-6]和Peter等^[7]构建了三辊道推弯成形工艺的有限元数值模拟模型, 在不考虑扭转影响的条件下建立了活动轮的位置坐标与弯曲半径之间的对应关系, 并针对典型空间管件研究了工艺参数与成形轴线几何特征之间的关系, 首次发现了夹钳扭转角度和成形轴线挠率之间的非线性关系并提出了挠率修正因子的概念。Staupendahl等^[8]基于理论解析和试验建立了三辊道推弯成形工艺中扭

矩与成形挠率之间的近似关系,但该关系中仅考虑了成形过程中扭转回弹的影响,而忽略了材料塑性和弯曲半径变化对分析结果的影响。Chatti等^[9]首先提出了空间管件/型材的扭矩叠加空间弯曲成形法(Torque Superposed Spatial (TSS) Bending Method)的基本原理。Hudovernik等^[10]基于数值模拟技术,建立了空间管件/型材的扭矩叠加空间弯曲成形的有限元数值模拟模型,通过该数值模拟模型和试验分析,得到了成形过程中所需的力和力矩等重要参数的变化规律。此外,Hudovernik等^[11]还基于弹塑性力学理论,建立了矩形管件扭矩叠加空间弯曲成形的解析模型,通过比较数值模拟、试验和解析计算所获得的成形工艺参数,验证了解析模型的有效性。Zhang^[12]和Wu等^[13]建立了弯扭组合加载的回弹分析模型,研究了弯曲半径和扭转角度与成形管件几何参数之间的变化关系,以及材料参数(弹性模量、硬化指数等)对回弹结果的影响。

通过构建空间管件定心弯扭组合加载成形工艺的数值模拟模型,本文重点研究弯扭组合条件下空间管件的成形规律、成形过程中工艺参数随固定模离心率 e 的变化规律,以及夹钳扭转角速度一定时,固定模离心率 e 和成形轴线挠率修正因子 g 之间的非线性关系。

空间管件的弯扭组合成形原理

空间管件的弯扭组合成形原理如图1所示,由活动模、固定模、夹钳和管材毛坯等组成。其基本原理是将管材毛坯推入一个可在空间一定角度范围内自由转动的活动模中,在管材毛坯的送进过程中,通过不断改变活动模的所在位置来改变弯曲半径和弯曲平面,进而实现空间变曲率管件的弯曲成形。

活动模的运动自由度数目是影响工艺参数制定的重要因素。根据

活动模自由度数目的不同,可将空间管件的弯扭组合成形工艺进一步划分为平动弯曲和定心弯曲两种模式。

平动弯曲模式如图2(a)所示,弯曲半径取决于活动模和移动模之间的水平距离 l_0 和活动模的垂直平动距离 ΔH 。文献[14]针对该弯曲模式进行了数值模拟,研究结果发现成形曲率随 ΔH 的增加而线性增加。

定心弯曲模式如图2(b)所示,活动模绕弯曲中心 A' 旋转一定角度 φ ,实现管材毛坯的弯曲。弯曲半径取决于活动模与转动中心的距离 l_0 、固定模与转动中心的距离 l_1 和活动模旋转角度 φ 。本文将基于定心弯曲模式,研究成形曲率半径与 φ 之间的关系,并在此基础上分析夹钳扭转角度和成形轴线的挠率之间的非线性关系。

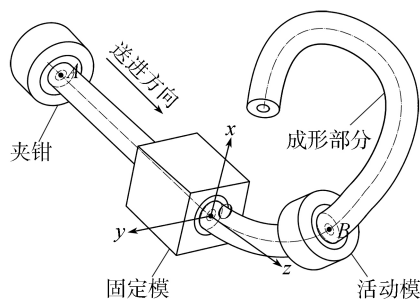


图1 空间管件的弯扭组合成形原理
Fig.1 Principle of spatial tube bending-twisting process

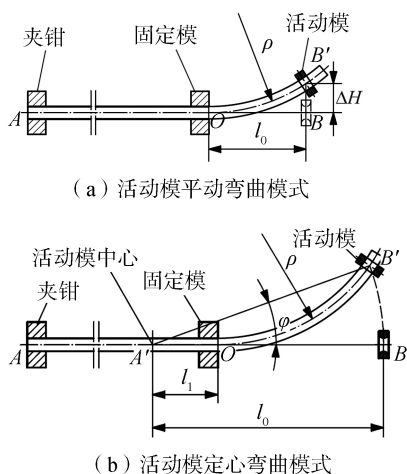


图2 空间管件弯扭组合成形工艺的弯曲模式
Fig.2 Bending modes for spatial tubes bending-twisting process

影响空间管件成形与回弹的重要物理量

1 挠率修正因子

挠率修正因子 g 是描述空间管件成形与回弹的一个重要的物理参数,用来反映夹钳扭转角度与成形管件轴线挠率之间的非线性对应关系。文献[4]~[6]中挠率修正因子 g 的计算方法为:

$$g = \frac{\Delta\theta}{\Delta s} \frac{1}{\tau} \quad (1)$$

式中, $\Delta\theta$ 和 Δs 表示单位时间内夹钳的扭转角度和送进距离, τ 表示成形管件轴线上任一点处的挠率。

2 固定模的离心率

在空间管件定心弯扭组合加载成形工艺中,活动模回转半径(图2中 A' 、 B')通常为定值,而固定模可在一定程度上偏离回转中心。固定模与回转中心之间的偏移量对空间管件成形和回弹也具有较大影响,因此需要引入固定模离心率的概念。

固定模的离心率 e 用来反映在活动模转动半径一定时,活动模、固定模与管材毛坯三者之间的位置关系。固定模的离心率 e 可定义为固定模和转动中心的距离 l_1 与活动模和转动中心的距离 l_0 之间的比值,当活动模转动中心 A' 位于固定模 O 和活动模 B 之间时, l_1 取正值。

成形过程分析与试验

定心弯曲模式下,影响空间管件弯曲半径和成形挠率的主要因素包括活动模与转动中心的距离 l_0 、固定模与转动中心的距离 l_1 、活动模旋转角度 φ 、夹钳扭转角速度与送进速度的比值 ω/v ,以及管材截面尺寸(外径 D 和厚度 t)和材料属性(弹性模量 E 、硬化指数 n 和强度系数 K)等因素。

研究过程中,以截面为 10mm × 3mm (直径 D × 厚度 t) 的铝管(材料属性如图 3 所示)为研究对象,活动模与转动中心的距离 $l_0=44\text{mm}$ 。

在空间管件弯扭组合成形工艺中,固定模离心率 e 的取值范围通常为 $[-2.0, 2.0]$ 。本文在研究管件成形规律与固定模离心率 e 的关系时,将 e 依次取值为 $-2.0, -1.0, 0, 1.0$ 和 2.0 (沿区间等距取点)。在研究不同 ω/v 下管件的回弹规律时,以 ω/v 取值为 0 代表纯弯曲过程,其他取值代表弯扭组合加载过程。

1 成形过程数值模拟

在 ABAQUS/Explicit 中构建定心弯曲模式下空间管件的弯扭组合成形过程有限元分析模型(见图 4),模拟典型螺旋管件的成形过程。管材毛坯为变形体,网格类型为 C3D8R。活动模、固定模和夹钳为刚体,单元类型为 R3D4。部件之间接触类型为罚接触,摩擦系数为 0.1。

2 试验方案

弯管试验在由计算机控制的空间管件弯扭组合成形试验机(见图 5)上进行。弯曲模的机械结构如图 6 所示,固定模内部设置有间距调节块,用以改变固定模模口与活动模的间距。借助于 ATOS 三维激光扫描仪对成形管件进行点云扫描(见图 7),并在 Creo 三维软件环境下用标准螺旋逼近点云数据,以获得最佳成形结果。

成形螺旋管上任一点处的弯曲半径 ρ 和挠率 τ 可通过式(2)计算得到。

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} = \frac{a}{a^2 + b^2} \\ \tau = \frac{b}{a^2 + b^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, a 和 b 分别为三维软件系统下所获得的最佳螺旋线的基圆半径和螺距。

成形结果讨论

在不施加扭矩的条件下,建立活

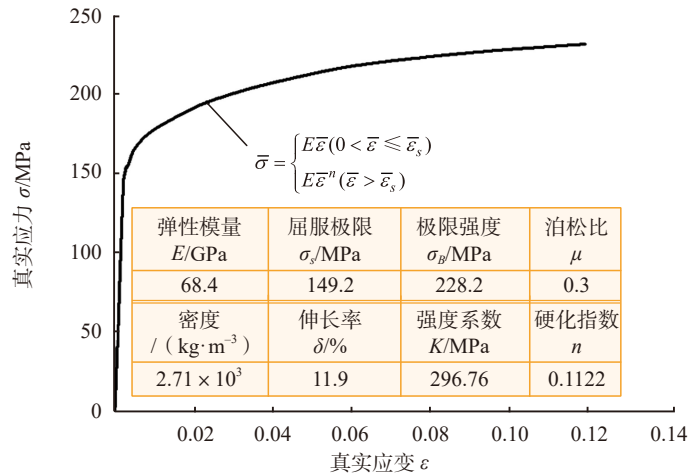


图3 纯铝应力应变关系及重要力学性能参数

Fig.3 Strain-stress curve and mechanical properties of pure aluminum

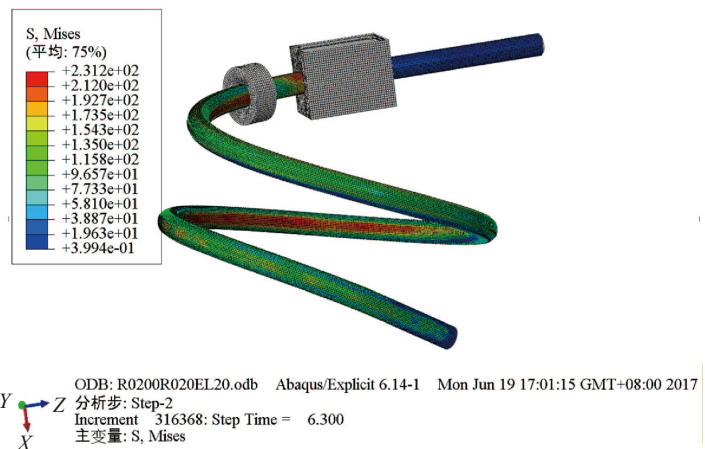


图4 典型空间管件成形过程数值模拟

Fig.4 Numerical model for typical spatial tubes forming

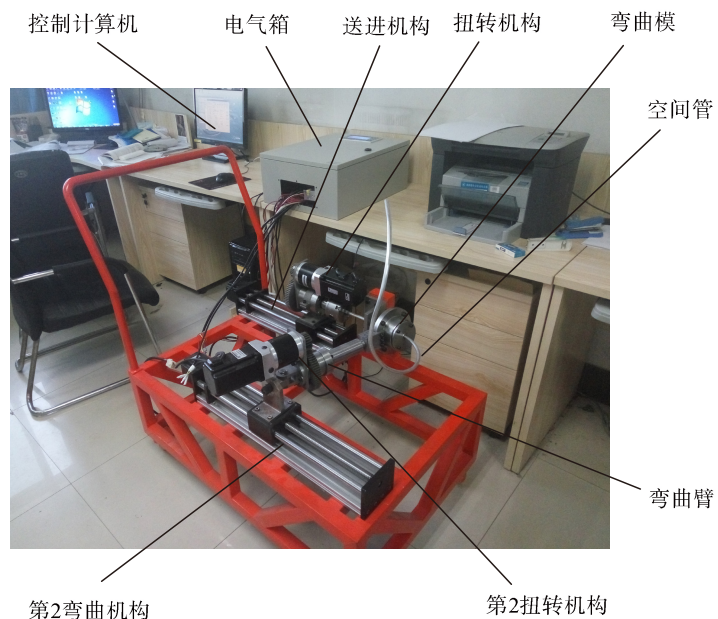


图5 典型空间管件弯扭组合成形试验机

Fig.5 Typical machine for spatial tubes bending and twisting

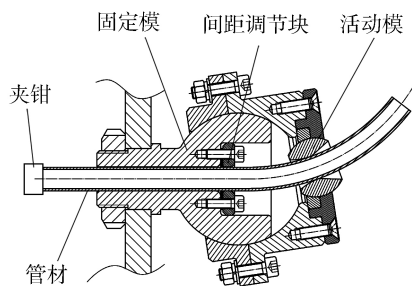


图6 弯曲模组的机械结构

Fig.6 Mechanical structure of the bending unit

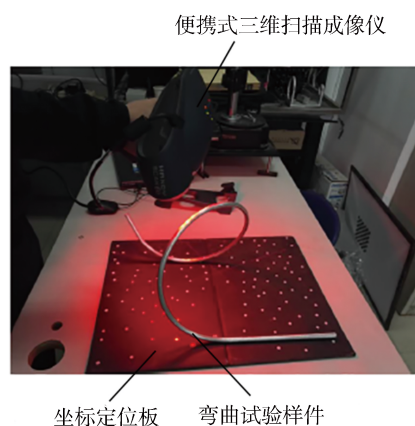


图7 成形试件的三维数字化扫描成像

Fig.7 Three dimensional digital scanning for specimen

动模转角 φ 与成形管件曲率之间的关系,如图8所示。固定模的离心率 e 是影响弯曲成形结果的重要因素。活动模转角一定时,成形曲率随着离心率 e 的增大而逐渐减小。

以 $e=-0.2$ 、 $\varphi=0.14$ 为例,对夹钳施加 1.0×10^{-3} rad/mm、 2.0×10^{-3} rad/mm、 3.0×10^{-3} rad/mm 和 4.0×10^{-3} rad/mm 的扭转速度成形螺旋形管件。成形结果如图9所示,随着夹钳扭转速度的增大,成形螺旋管件的底圆半径变化并不明显,但螺距有明显的增大趋势。在成形复杂三维管件时,成形曲率(或半径)通常根据式(2)获得。因此,当夹钳扭转速度增大时,为了保证弯曲半径 ρ 不变,需将增大后的螺距值代入式(2),反算出螺旋基圆半径后,结合图8中活动模转角与成形曲率之间的关系,修正活动模

转角 φ 。

螺旋管件的成形挠率 τ 和挠率修正因子 ϑ 随 ω/v 的变化规律如图10所示,在活动模转角 φ 和固定模离心率 e 为定值的条件下,成形挠率 τ 和挠率修正因子 ϑ 随 ω/v 的增大而增大。

在纯弯曲条件下,能够获得相同曲率的活动模所在点通常被称为等效弯曲点,如图8中 $P_1 \sim P_5$ 。以 $P_1 \sim P_5$ 5个等效弯曲点为研究对象,对夹钳施加 1.0×10^{-3} rad/mm 的扭

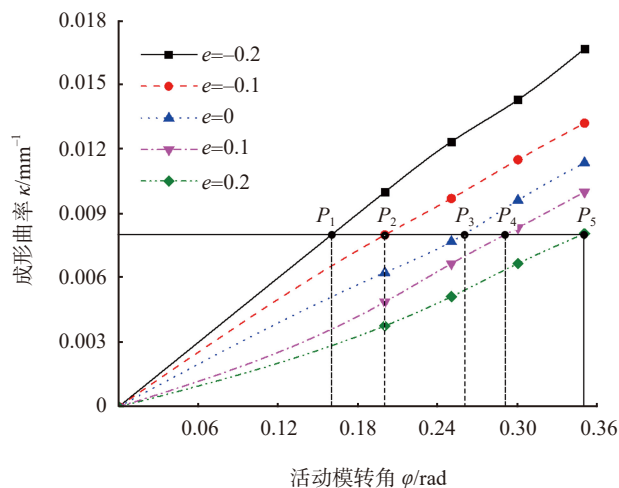
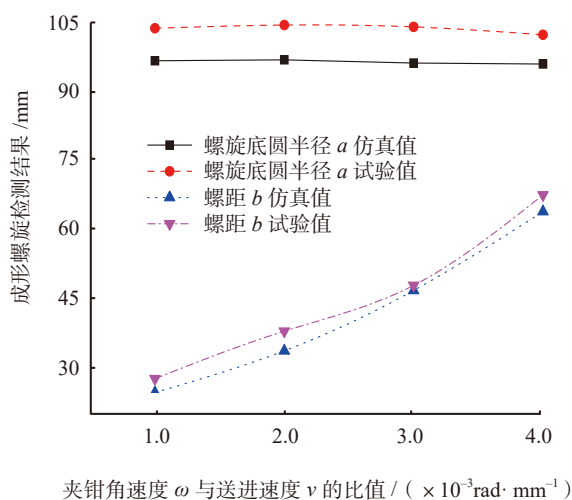
图8 纯弯曲条件下活动模转角 φ 与成形曲率 κ 之间的关系Fig.8 Relationship between rotation angle of mobile die φ and torsion κ (acquired from pure bending)

图9 螺旋形管件成形结果

Fig.9 Forming results for spiral tubes

转速度,成形结果如表1所示。

当固定模离心率 e 增大时,螺旋线底圆半径 a 近似保持不变,螺距 b 增大较为明显。而由此计算所得到的弯曲半径 ρ 和挠率 τ 也明显增大。根据式(2)计算得到的挠率修正因子 ϑ 呈减小趋势(如图11所示),该现象说明管件在等效弯曲点处的挠率修正因子 ϑ 要受到固定模离心率 e 的影响,即在纯弯曲条件下所获得的等效弯曲点不能适用于空间管件。

表1 成形结果

参数	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
离心率 e	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2
半径 a/mm	120.3	121.7	123.8	121.3	122.4
螺距 b/mm	85.2	94.3	105.4	99.7	105.8
弯曲半径 ρ/mm	180.64	194.77	213.54	203.25	213.86
成形挠率 $\tau \times 10^{-3}$	3.921	3.9784	3.987	4.044	4.042
修正因子 ϑ	0.255	0.2514	0.2508	0.2473	0.2474

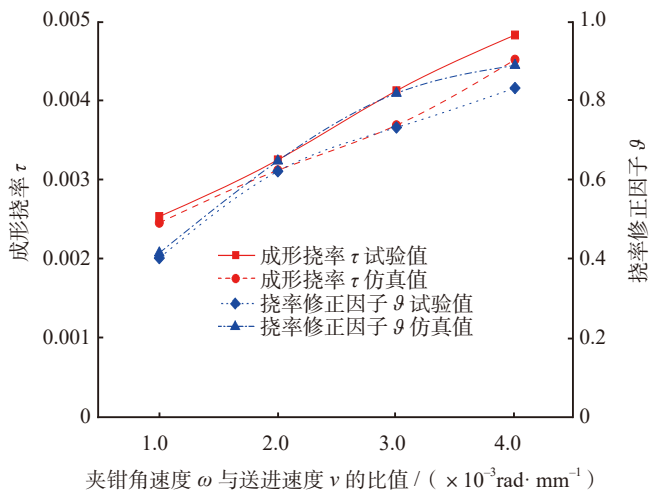


图10 成形挠率 τ 和挠率修正因子 ϑ 随 ω/v 的变化规律
Fig.10 Influence of ω/v on torsion τ and torsion adjust index ϑ

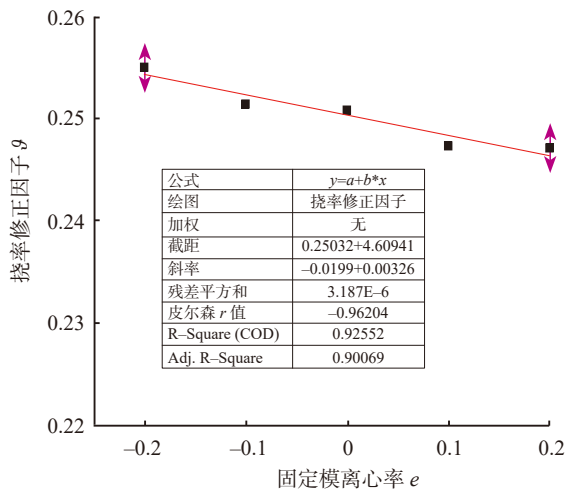


图11 挠率修正因子 ϑ 与固定模离心率 e 之间的关系
Fig.11 Relationship between torsion adjust index ϑ and eccentricities of fixed die e

结论

(1) 在空间管件定心弯扭组合加载成形工艺中,弯曲模转角仅仅决定着成形螺线的底圆半径。而管件的真正弯曲半径会受到弯曲模转角和夹钳扭转角度的双重影响(当夹钳扭转速度增大时,为了保证弯曲半径 ρ 不变,需将增大后的螺距值代入式(2),反算出螺旋基圆半径后,结合图8中活动模转角与成形曲率之间的关系,修正活动模转角 φ)。

(2) 在纯弯曲条件下所获得的等效弯曲点不能适用于空间管件,原因在于管件在等效弯曲点处的挠率修正因子要受到多种因素的影响,如夹钳角速度与送进速度的比值 ω/v 和固定模离心率 e 等。

(3) 活动模转角 φ 和离心率 e 为定值时,成形挠率 τ 和挠率修正因子 ϑ 随 ω/v 的增大而增大;活动模转角 φ 和 ω/v 为定值时,挠率修正因子 ϑ 随固定模离心率 e 的增大而减小。

参考文献

[1] 张深, 吴建军, 邓良才, 等. 小直径厚壁管材变曲率弯曲回弹预测[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(3): 1-6.

ZHANG Shen, WU Jianjun, DENG Liangcai, et al. Springback prediction and compensation of variable curvature bending for minor diameter thick-walled tube[J]. Materials

Science and Technology, 2014, 22(3): 1–6.

[2] 张深, 吴建军. 管材空间绕弯回弹补偿方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(5): 811–817.

ZHANG Shen, WU Jianjun. A new method for springback compensation for the bending of a thick-walled non-planar tube[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(5): 811–817.

[3] 张深, 吴建军. 空间弯管的回弹预测[J]. 航空学报, 2011, 32(5): 953–960.

ZHANG Shen, WU Jianjun. Spring-back prediction of non-planar tube bending[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 953–960.

[4] PLETTKE R, VATTER P H, VIPAVC D, et al. Investigation on the process parameters and process window of three-roll-push-bending[C]//Proceedings of the 36th International MATADOR Conference. London: Springer, 2010.

[5] PLETTKE R, VIPAVC D, VATTER P H, et al. Influence factors of three-roll-push-bending[C]//Proceedings of the 1st International Tube and Profile Bending Conference. Dortmund: Universität Dortmund, 2011.

[6] PLETTKE R, VATTER P H, VIPAVC D, et al. Basics of process design for 3D freeform bending[C]//Steel Research International: 14th International Conference on Metal Forming. Leuven, 2012.

[7] PETER H, VATTER P H, PLETTKE R. Process model for the design of bent 3-dimensional free-form geometries for the three-roll-push-bending process[C]//Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013. Amsterdam: Elsevier, 2013.

[8] STAUPENDAHL D, BECKER C, TEKKAYA A E. The impact of torsion on the bending curve during 3d bending of thin-walled tubes—a case study on forming helices[J]. Key Engineering Materials, 2015, 651–653(7): 1595–1601.

[9] CHATTI S, HERMES M, WEINRICH A, et al. New incremental methods for springback compensation by stress superposition[J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2(1): 817–820.

[10] HUDOVERNIK M, STAUPENDAHL D, GHARBI M, et al. 3D numerical analysis of 2D profile bending with the torque superposed spatial bending method[J].

Journal of Material Engineering, 2013, 59(3): 139–147.

[11] HUDOVERNIK M, KOSEL F, STAUPENDAHL D, et al. Application of the bending theory on square-hollow sections made from high-strength steel with a changing angle of the bending plane[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2505–2513.

[12] ZHANG Z K, WU J J, GUO R C, et al. A semi-analytical method for the springback prediction of thick-walled 3D tubes[J]. Materials and Design, 2016, 99: 57–67.

[13] WU J J, ZHANG Z K, SHANG Q, et al. A method for investigating the springback of 3D tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131–132: 191–204.

[14] LI P, WANG L, LI M, et al. Flexible-bending of profiles and tubes of continuous varying radii[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88(5–8): 1–7.

通讯作者: 吴建军, 教授、博士生导师, 研究方向为金属材料塑性加工及成形技术, E-mail: wujj@nwpu.edu.cn.

Investigation to Forming and Springback of Spatial Tubes in Bending-Twisting Process

ZHANG Zengkun, WU Jianjun, SHANG Qi, LI Feifan, ZHAN Xuepeng

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Based on the elastic-plastic forming theory and Finite Element Method (FEM), a numerical model is established to investigate the forming of spatial tubes in spatial tube bending-twisting process. Investigations are focused on three aspects, including the forming principles of spatial tubes under combined bending and twisting, the variations of forming parameters under different eccentricities of fixed die and the non-linear relationship between the eccentricities of fixed die and the torsion adjustment indexes. The conclusions are: (1) In spatial tubes bending-twisting process, the real bending radius can be influenced by the rotation angles of mobile die and clamp. (2) The equivalent bending points acquired from pure bending are not suitable for spatial tube bending, due to the fact that the torsion adjustment index at equivalent bending point can be influenced by other factors (eccentricity of fixed die, clamp rotation speed, etc). (3) If the twisting angle keeps constant, the torsion adjustment index will increase accordingly with the increasing of clamp rotation speed, and decrease with the increasing of eccentricity of fixed die.

Keywords: Spatial tube; Springback mechanism; Numerical simulation; Bending-twisting process; Torsion adjustment index

(责编 铃兰)