# 基于自由弯曲技术的 6061 铝合金管的弯曲 成形性能研究

魏文斌<sup>1a,2</sup>,程旋<sup>1a,2</sup>,余耀晖<sup>1a,2</sup>,王成<sup>1a,2</sup>,熊昊<sup>1a,2</sup>,王辉<sup>1b,2</sup>

(1. 南京航空航天大学 a. 材料科学与技术学院; b. 机电学院, 南京 210016;2. 江苏省核能装备材料工程实验室, 南京 210016)

摘要:目的 对 6061 铝合金管开展三维自由弯曲成形的研究。方法 对不同弯曲半径的铝合金管进行了弯曲 模拟成形,并根据模拟结果对铝合金管进行实际成形研究。结果 根据对 6061 铝合金管进行的弯曲半径为 60,70,80 mm 的有限元模拟成形结果,发现管材壁厚中性层向弯曲外侧发生明显偏移,且弯曲半径越小, 向弯曲外侧的偏移量越大;管材内侧管壁增厚,最大增厚为 17.2%,管材外侧壁厚减薄,最大减薄不超过 4%,发现随着弯曲半径的减小,管材内侧增厚愈发明显,而减薄变化较小,同时对管材截面畸变进行分析, 发现最大椭圆度不超过 8%;通过对比模拟结果、实验结果与设计模型,发现管材模拟的弯曲半径最大偏差 不超过 8%,实验结果则不超过 6.5%,而管材模拟的弯曲角度最大偏差不超过 4.5%,实验结果则不超过 3%, 同时发现当弯曲较小时,内侧发生明显起皱,而弯曲外侧也有轻微壁厚减薄导致的畸变缺陷,这与模拟结 果吻合。结论 管材壁厚中性层向弯曲外侧偏移与自由弯曲系统轴向推力 P<sub>L</sub>有关,轴向推力使得管材的受压 区域增加,而受拉区域减小,导致壁厚中性层外移;实验结果与模拟结果相吻合,验证了模拟对实验成形 指导的可靠性。

关键词: 6061 铝合金管; 自由弯曲; 有限元模拟; 实验成形 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.004 中图分类号: TG306 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2018)04-0028-07

# Study on Bending Formability of 6061 Aluminum Alloy Tube Based on Free Bending Technology

WEI Wen-bin<sup>1a,2</sup>, CHENG Xuan<sup>1a,2</sup>, YU Yao-hui<sup>1a,2</sup>, WANG Cheng<sup>1a,2</sup>, XIONG Hao<sup>1a,2</sup>, WANG Hui<sup>1b,2</sup>

(1. a. College of Material Science and Technology; b. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Nuclear Energy Equipment Materials Engineering, Nanjing 210016, China; 3.)

**ABSTRACT:** This paper aims to study the three-dimensional free bending of 6061 aluminum alloy tube. The aluminum alloy tubes with different bending radii were simulated, and the actual forming of aluminum alloy tubes was studied based on the simulation results. According to the finite element simulation forming of the 6061 aluminum alloy tube with bending radii of 60mm, 70 mm and 80 mm, it was found that the neutral thickness of the tube wall was significantly shifted toward the outside of the curve, and the smaller the bending radius, the greater the deflection to the outside of the curve. Others, the inner wall thickness of the tube was thickening, the maximum thickening was 17.2%. The thickness of the outer wall of the tube was thinned, and the maximum thinning did not exceed 4%. It was found that as the bending radius decreased, the thickening of the inside of the tube

收稿日期: 2018-06-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(NS2016052)

作者简介:魏文斌(1995--),男,硕士研究生,主要研究方向为管材三维自由弯曲成形。

通讯作者:王辉(1978-),男,讲师,博士,主要研究方向为金属塑性成形工艺及装备。

became more pronounced and the change in thinning was small. At the same time, the distortion of the tube section was analyzed and the maximum ellipticity was not more than 8%. By comparing the simulation results, experimental result and design model, it was found that the maximum deflection of the bending radius of the tube simulation did not exceed 8%. The experimental result was not more than 6.5%, but the maximum deflection of the tube simulation bending angle did not exceed 4.5%, the experimental result did not exceed 3%, and it was found that when the bending was small, the inner side was obviously wrinkled, and the distortion defect caused by slight ground thickness thinning was also found on the lateral side of the bend, which was consistent with the simulation results. The deviation of the neutral thickness of the tube wall to the outside of the bending is related to the axial thrust  $P_{\rm L}$  of the free bending system. The thrust of the tube increases the pressure area of the tube, while the tension area decreases, resulting in the shift of the thickness of the neutral layer. The experiment result is in consistence with the simulation result. The reliability of simulation for experimental forming instruction is verified.

KEY WORDS: 6061 aluminum alloy tube; free bending; finite element simulation; experimental forming

6061 铝合金管是一种具有加工性能极佳、焊接 性及电镀性优良、抗腐蚀性良好、韧性高及加工后不 易变形、材料致密无缺陷、易于抛光、上色膜容易、 氧化效果极佳等优良特点的铝合金管,其弯曲件被广 泛应用于各个行业,包括航空航天、汽车、管道运输 以及船舶制造等<sup>[1-3]</sup>。铝合金弯曲构件通常通过传统 的方式进行弯曲成形,包括推弯、绕弯、滚弯、拉弯、 压弯等<sup>[4-5]</sup>。传统弯曲方式能够获得所需要的弯曲 件,但弯曲成本高,且不能成形弯曲半径连续变化的 结构件。

三维自由弯曲技术是近年来在塑性成形领域出现的一项重要的技术创新,可以实现管材、型材的精确无模成形<sup>[6]</sup>。相比于传统弯曲方式,三维自由弯曲技术可以实现弯曲半径的连续变化,成形复杂的空间弯曲构件,同时具有成形质量高、弯曲成本低等优点,在航空航天等领域具有广泛的应用前景<sup>[7-9]</sup>。

在管材弯曲领域,相关学者做了各方面的研究。 詹梅<sup>[10]</sup>等研究了管材在数控弯曲过程中的回弹规律, 发现回弹角随弯曲角、芯棒与管壁间隙以及材料硬化 系数的增大而增大,随材料硬化指数的增大而减小。 鄂大辛[11]等研究了管材在弯曲过程的应变中性层,发 现弯管应变中性层向弯曲中心方向移动,其移动量随 相对弯曲半径增大而减小,并计算出常用小直径薄壁 管无芯弯曲时(R/d<sub>0</sub>)应变中性层内移量小于 0.8 mm。 闫晶<sup>[12]</sup>等进行了大直径铝合金管的弯曲成形极限的 探究,发现在满足小弯曲半径弯管成形质量要求的模 具和摩擦参数组合的合理范围内,减小芯棒球头厚度 和直径,并施加轴向压缩载荷,能够实现管材的极限 弯曲成形。Pengfei Li<sup>[13]</sup>等通过三维自由弯曲技术研 究了不锈钢管和型材的弯曲成形过程,验证了自由弯 曲技术对于成形连续变化弯曲半径的管材和型材是 可行的,并通过多组成形实验验证了模拟对实际成形 的准确指导。P. Gantner<sup>[14]</sup>等对三维自由弯曲技术进 行了系统的工艺分析,对型材、管材成形提供了工艺 理论基础,并进行实际成形与模拟结果对比,验证了 模型的可靠性。

文中首先对 6061 铝合金管的三维自由弯曲成形 过程进行了有限元模拟,分析了成形过程管壁的壁厚 变化,截面畸变以及应力应变状态,同时进行了自由 弯曲成形实验,通过与模拟结果的对比,验证了有限 元模拟对实际成形的可靠性。

### 1 三维弯曲技术原理

三轴自由弯曲系统主要由弯曲模、球面轴承、导向机构、压紧机构和推进机构5部分组成,其中弯曲模与球面轴承相接触的球面半径相同。在系统工作过程中,管材在推进机构的连续推动作用下,依次通过压紧机构、导向机构和弯曲模,当管材通过弯曲模时,球面轴承在 x/y 平面内作偏心运动,而弯曲模在球面轴承的推动下发生转动,当球面轴承在 x/y 平面内偏离平衡位置为 U 时,实现管材的弯曲成形,其中 U称为偏心距<sup>[15–16]</sup>。其工作原理见图 1。





弯曲模球心到导向机构前端在 z 向的距离为 A, A 值和偏心距 U 的大小共同决定了弯曲半径 R 的大 小,当 U 很大, A 值很小时,弯曲半径 R 将会很小。 在三轴自由弯曲系统中,管材在弯曲时受到轴向推进 机构所施加的推力 P<sub>L</sub> 和球面轴承所施加的弯曲力  $P_{U\circ}$  在  $P_L$  和  $P_U$ 的共同作用下产生弯矩  $M^{[17]}$ , 使管材 发生弯曲, 其中:  $M = P_U \times A + P_L \times U$ 。

通过两个伺服电机在 x 方向和 y 方向的位移以及 导向机构和弯曲模之间的相互作用,可以实现弯曲运 动的持续变化。 根据管材弯曲的塑性成形理论,管材弯曲内侧处 于受压状态,管壁趋于增厚,且易出现起皱缺 陷<sup>[18-20]</sup>。而管材外侧处于受拉状态,管壁趋于减薄, 会出现管壁破裂等缺陷。弯曲管材内外侧的应力应变 状态见图 2。



图 2 管材弯曲的应力应变状态分析 Fig.2 Stress-strain state analysis of tube bending

在自由弯曲成形过程中,推进机构在轴向对成形 管材的轴向推力,使得管材外侧受拉的状态减轻,开 裂等质量问题得到缓解,因此,自由弯曲成形技术对 管材的弯曲成形质量有比较大的影响。

# 2 6061 铝合金管的有限元模拟

基于三维自由弯曲成形原理,对 6061 铝合金的 自由弯曲成形过程进行了有限元模拟。首先,通过三 维制图软件画出三维自由弯曲装置模型,调整好配合 关系,导入有限元模拟软件 ABAQUS,完成模拟模 型的绘制,如图 3 所示。



在模型参数设置过程中,分析步设置为动态显

式,接触设置为一般接触,系统中的摩擦因数统一设 置为 0.02,管材直径为 15 mm,且壁厚为 1 mm。另 外,管材被设置为 6061 铝合金管,弯曲模设置为 YG8 合金,具体参数见表 1。

表 1 材料的力学性能 Tab.1 Mechanical properties of materials

材料	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa
6061 铝合金	2.7	80.7	0.3	260
YG8 合金	14.5	71	0.3	

基于有限元模型参数的设置,对 6061 铝合金管 进行了 U 型的弯曲模拟,如图 4 所示。图 4a 是弯曲 模在球面轴承的带动下向上运动,管材开始弯曲成 形;当偏心距达到设定值时,弯曲模静止,管材稳定 成形,如图 4b;图 4c 为管材成形完成时弯曲模向下 运动,恢复原位。

管材弯曲过程中,弯曲内侧受压,外侧则处于受 拉状态,此受力状态对最终的成形质量有重要影响, 而管材在弯曲成形过程中的应力应变状态直观反映 成形过程的受力情况。

不同弯曲半径的应力云图见图 5。随着管材弯曲



图 4 管材自由弯曲成形过程 Fig.4 Free bending forming process of tube 半径从 60 mm 到 80 mm 的不断增大,弯曲内侧的压 应力和弯曲外侧的拉应力不断减小,即随着弯曲半径 的增大,应力不断减小。同时,在弯曲初始段的应力 大于弯曲弧段和弯曲末端的应力,即在管材成形初始 阶段,管材受到弯曲模向上的力的挤压,使得弯曲外 侧拉应力和弯曲内侧压应力较大。 管材的弯曲应变云图见图 6。可以看出,管材成 形的应变值随着弯曲半径的不断增大而减小,即在弯 曲半径增大的过程中,管材弯曲外侧的壁厚减薄趋势 减小,弯曲内侧的壁厚起皱的趋势也减小,成形质量 更好。可以观察到,在弯曲初始段的应变值较高,内 侧增厚、外侧减薄以及截面畸变的趋势较大。



Fig.6 Bending strain cloud diagram of tube

管材在三维自由弯曲成形系统中,受到推进机构的轴向推力 *P*<sub>L</sub>,因而管材的外侧受拉状态减缓,外侧减薄趋势减小,增厚区域变大,壁厚的中性层向弯曲外侧移动,如图 7 所示。管材的壁厚中性层由弯曲前的轴线位置向外移动了一定距离,并随着弯曲半径的不断减小,外移距离增大。



图 7 壁厚中性层的外移(mm) Fig.7 Outward migration of wall thickness neutral layer

针对不同弯曲半径,对管材不同位置的壁厚和截 面畸变进行分析,因此,对管材的不同位置进行编号, 如图 8 所示。



图 8 U型官的位直编号 Fig.8 Position number of U tube

管材不同弯曲半径的内侧壁厚见图 9。可观察到, 管材内侧发生了管壁增厚,且随着弯曲半径的减小, 增厚趋势越明显,这与管材内侧受到的压应力密切相 关。当弯曲半径较小时,弯曲模施加于管材的力 P<sub>U</sub> 更大,使得管材内侧压应力较大,最终导致内侧管壁 的增厚。从图 9 可观察到,最大增厚达 17.2%,增厚 明显,有起皱风险。



图 9 不同弯曲半径不同位置的弯管内侧壁厚分布 Fig.9 Distribution of inner wall thickness of bends with different bending radii and positions

根据模拟结果,在弯曲内侧管壁增厚的同时,外 侧管壁减薄,尤其是弯曲初始和弯曲末端。同时随着 弯曲半径的减小,壁厚减薄越明显,具体结果见图 10。可以观察到,壁厚最小为 0.962 mm,最大减薄 不超过 4%。



图 10 不同弯曲半径不同位置的弯管外侧壁厚分布 Fig.10 Distribution of outer wall thickness of bends with different bending radii and positions

在推进机构推动以及弯曲模挤压的作用下,管材 截面会产生一定的变形。从图 11 可以观察到,管材



图 11 不同弯曲半径不同位置的管材椭圆度分布 Fig.11 Elliptic distribution of pipes with different bending radii and positions

截面的椭圆度会随着弯曲半径的不断减小而增加。同时,在弯曲的不同位置椭圆度也不同,在弯曲初始段和弯曲末端的截面畸变较严重,椭圆度最大接近8%。从整体观察,铝合金管材在三维自由弯曲成形系统中截面畸变发生率较低,可以成形出较高质量的零件。

# 3 6061 铝合金管的成形实验

基于对铝合金管材自由弯曲成形的模拟结果, 也对铝合金进行了实际的三维自由弯曲成形实验。 管材选取壁厚为1mm、管径为15mm的6061铝合 金管,弯曲实验在三轴自由弯曲设备上进行,如图 12a所示。



a 三轴自由弯曲设备
 b 实验弯曲成形的管材
 图 12 自由弯曲成形实验
 Fig.12 Free bending forming experiments

管材弯曲实验结果见图 12b,分别进行了弯曲半 径为 60,70,80 mm 的成形实验。对管材实际弯曲半 径和实际弯曲角度的测量,并与设计模型和模拟结果 进行对比,见表 2。可以观察到,管材模拟的弯曲半 径最大偏差不超过 8%,实验结果则不超过 6.5%;而 管材模拟的弯曲角度最大偏差不超过 4.5%,实验结 果则不超过 3%。

表 2 设计模型、模拟成形以及实验结果的对比 Tab.2 Comparison results of design model, simulated forming and experimental forming

	弯曲半径 /mm	偏差/%	弯曲角度 /(°)	偏差/%
设计模型	60		180	
	70		180	
	80		180	
模拟结果	61	1.67	188	4.44
	75	7.14	185	2.78
	86	7.50	174	3.33
实验结果	58	3.33	184	2.22
	72	2.86	185	2.78
	85	6.25	177	1.67

设计模型、模拟成形以及实验结果的管材形状见 图 13。通过对比发现,模拟结果和实验成形的管材 形状与设计模型相似,弯曲角度和弯曲半径接近,验 证了三维自由弯曲成形技术的可靠性。

管材弯曲总体成形质量良好,但在实际成形过程 中发现,当成形弯曲半径较小时,管材产生成形缺陷, 如图 14 所示。弯曲内侧壁厚增加导致起皱缺陷,而 弯曲外侧因有减薄而有轻微的畸变产生。这与模拟结 果相吻合,验证了模拟对实验的指导意义。



图 13 设计模型、模拟结果以及实验结果的管材形状 Fig.13 Tube shapes of design model, simulation results, and experimental results



图 14 铝合金管弯曲的成形缺陷 Fig.14 Forming defects of aluminum alloy tube bending

# 4 结论

1) 对 6061 铝合金管进行了弯曲半径为 60, 70, 80 mm 的有限元模拟成形,发现管材壁厚中性层向弯 曲外侧发生明显偏移,且弯曲半径越小,向弯曲外侧 的偏移量越大。认为这与自由弯曲系统轴向推力 P<sub>L</sub> 有关,轴向推力使得管材的受压区域增加,而受拉区 域减小,导致壁厚中性层外移。

2)根据模拟结果,管材内侧管壁增厚,最大增 厚为17.2%;管材外侧壁厚减薄,最大减薄不超过4%, 发现随着弯曲半径的减小,管材内侧增厚愈发明显, 而减薄变化较小。同时对管材截面畸变进行分析,发 现最大椭圆度不超过8%,截面畸变不明显。

3) 基于模拟结果,也对管材进行了实际成形。 通过对比模拟结果、实验结果与设计模型,发现管材 模拟的弯曲半径最大偏差不超过 8%,实验结果则不 超过 6.5%;而管材模拟的弯曲角度最大偏差不超过 4.5%,实验结果则不超过 3%。同时发现当弯曲较小 时,内侧发生明显起皱,而弯曲外侧也有轻微壁厚减 薄导致的畸变缺陷,这与模拟结果吻合,验证了模拟 对实际成形指导的可靠性。

#### 参考文献:

[1] 盈亮, 戴明华, 胡平, 等. 6061-T6 铝合金高温本构模型 及温成形数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2015(7): 1815-1821.

YING Liang, DAI Ming-hua, HU Ping, et al. Thermal Constitutive Model and Numerical Simulation of Hot Forming for 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015(7): 1815—1821.

- [2] 赵培峰,任广升,沈智,等. 6061 铝合金热压缩变形条 件对流变应力的影响及其本构方程的研究[J]. 塑性工程 学报, 2007, 14(6): 130—133.
  ZHAO Pei-feng, REN Guang-sheng, SHEN Zhi, et al. Influence of Hot Compressive Deformation Conditions of 6061 Aluminum Alloy on Now Stress and Research on Its Constitutive Equation[J]. Journal of Plastic Engineering, 2007, 14(6): 130—133.
- [3] 朱浩,齐芳娟,张洋. 剪应力状态下 6061 铝合金的力学 性能及断裂行为[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1570—1576.

ZHU Hao, QI Fang-juan, ZHANG Yang. Mechanical Properties and Fracture Behavior of 6061 Aluminum Alloy Under Shear Stress States[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1570—1576.

 [4] 白雪山,李雪罡,李小强,等. 5B02 铝合金管材数控弯曲成形试验与数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2015, 40(7): 68—72.

BAI Xue-shan, LI Xue-gang, LI Xiao-qiang, et al. Experiment and Numerical Simulation Research on Numerical-controlled Bending for 5B02 Aluminum Alloy Tubes[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(7): 68–72.

[5] 郭训忠,陶杰,唐巧生,等. TA1-Al 双金属复合管冷推 弯模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1053—1062.

GUO Xun-zhong, TAO Jie, TANG Qiao-sheng, et al. Cold Push-bending Simulation and Experiment on TA1-Al Bimetallic Clad Tube[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4): 1053—1062.

- [6] 郭训忠,马燕楠,徐勇,等. 三维自由弯曲成形技术及 在航空制造业中的潜在应用[J]. 航空制造技术, 2016, 518(23): 16—24.
  GUO Xun-zhong, MA Yan-nan, XU Yong, et al. State-of-the-Arts in 3D Free Bending Technology and the Future Application in Aviation Manufacture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 518(23): 16—24.
- [7] 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 Yan-nan, XIONG Hao, WANG Hui, 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.

- [8] GANTNER P, BAUER H, HARRISON D K, et al. Free-Bending A New Bending Technique in the Hydroforming Process Chain[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2): 302—308.
- [9] 熊昊,马燕楠,周曙君,等.三维复杂轴线空心构件自由弯曲成形技术研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(1): 100—110.

XIONG Hao, MA Yan-nan, ZHOU Shu-jun, et al. Free Bending Forming Technology of Three Dimensional Complex Axis Hollow Component[J]. Journal of Plastic Engineering, 2018, 25(1): 100—110.

- [10] 詹梅,杨合,栗振斌. 管材数控弯曲回弹规律的有限元 分析[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(4): 349—352.
  ZHAN Mei, YANG He, LI Zhen-bin. FEM Numerical Analysis of Springback Law of NC Tube Bending[J]. Materials Science and Technology, 2004, 12(4): 349—352.
- [11] 鄂大辛, 郭学东, 宁汝新. 管材弯曲中应变中性层位移的分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 307—310.
  E Da-xin, GUO Xue-dong, NING Ru-xin. Analysis of Strain Neutral Layer Displacement in Tube-bending Process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 307—310.
- [12] 闫晶,杨合,詹梅,等.基于多成形指标的大直径铝合 金薄壁管数控弯曲成形极限[J].中国科学:技术科学, 2010(6): 601—618.
  YAN Jing, YANG He, ZHAN Mei, et al. Forming Limits Under Multi-Index Constraints in NC Bending of Aluminum Alloy Thin-walled Tubes with Large Diameters[J]. Science China Technology Science, 2010, 53(6): 326—342.
- [13] LI Peng-fei, WANG Li-yan, LI Ming-zhe. Flexible-bending of Profiles and Tubes of Continuous Varying Radii[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88(5/6/7/8): 1—7.
- [14] GANTNER P, HARRISON D K, SILVA A K D, et al. The Development of a Simulation Model and the Determination of the Die Control Data for the Free-Bending Technique[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221(2):

163-171.

- [15] GANTNER P, HARRISON D K, SILVA A K M D, et al. New Bending Technologies for the Automobile Manufacturing Industry[J]. 2004.
- [16] MURATA M, KUBOKI T. CNC Tube Forming Method for Manufacturing Flexibly and 3-Dimensionally Bent Tubes[C]// 60 Excellent Inventions in Metal Forming, Springer Berlin Heidelberg, 2015: 363—368.
- [17] 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: 2488—2492.
- [18] 杨合,李恒,张志勇,等. 弯管成形理论和技术研究进展与发展趋势[J]. 中国航空学报, 2012, 25(1): 1—12.
  YANG He, LI Heng, ZHANG Zhi-yong, et al. Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics: English Edition, 2012, 25(1): 1—12.
- [19] 宋飞飞,杨合,杨英丽,等. 钛合金管冷弯回弹及其控制研究现状[J]. 钛工业进展, 2014, 31(6): 7—11.
  SONG Fei-fei, YANG He, YANG Ying-li, et al. Research Status in Springback and Its Control of Titanium Alloy Tube Cold-bending[J]. Titanium Industry Progress, 2014, 31(6): 7—11.
- [20] 冯璐,李宏伟,李云海,等. 等厚面内弯曲成形机理及 参数影响规律模拟[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(1): 94—100.

FENG Lu, LI Hong-wei, LI Yun-hai, et al. Simulation of Forming Mechanism and Influence of Processing Parameters in Equal-thickness In-plane Roll-bending[J]. Journal of Plastic Engineering, 2014, 21(1): 94—100.