

6061铝合金管自由弯曲螺旋成形工艺研究*

李 涛,陈 浩,魏文斌,陶 杰

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

[摘要] 主要通过数值模拟与试验相结合的方法研究螺距以及螺旋直径的变化对6061铝合金螺旋管成形工艺的影响,发现在螺距一定时,螺旋直径的增大会使螺旋管的截面畸变减轻;螺旋直径一定时,螺距的增大会使螺旋管的截面畸变加重,壁厚中性层的向外偏移量会随着螺旋半径的增大而逐渐减小。基于数值模拟结果得到的实际螺旋管件成形效果良好,螺旋线平滑且接近标准圆,外观尺寸以及截面畸变都与数值模拟结果符合良好,很好地验证了数值模拟对实际试验的良好预测性。

关键词: 螺旋管;自由弯曲;有限元;模拟试验验证;铝合金

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.064



李 涛

硕士研究生,研究方向为空间复杂构件的三维自由弯曲成形。

空间螺旋管在相同体积空间内管道面积大,故工业上经常作为传热热能的管件使用。与传统光管相比,传热面积是光管的2.5~5.0倍,传热效率提高30%~40%,具有传热表面积大以及换热能力高的优势。螺旋管件被广泛应用于各个行业,包括航空航天、汽车、建筑、管道运输、城市集中供热及船舶制造等。此类螺旋弯管的成形工艺非常复杂,有着较高的成形精度要求,需要严格控制螺旋成形中的各个工艺参数,故目前我国仍采用小批量、单批次生产模式,还未形成大批量的工厂化生产模式^[1-2]。

螺旋管件通常通过传统方式进行弯曲成形,包括绕弯、滚弯、中频感应加热弯曲和火焰加热弯曲等成形工艺。绕弯技术操作较为简单可控,但无法实现螺旋管弯曲半径的实时变化,另外成形管件有壁厚不均匀的

缺陷;中频感应和火焰加热弯曲成形技术受生产设备限制分别仅适用于大直径和薄壁螺旋管的成形^[3-5]。传统弯曲方式能够获得所需要的弯曲件,但弯曲成本高,且存在各种成形缺陷。

三维自由弯曲技术是近年来塑性成形领域的一项重要技术突破,它将多轴联动控制技术与传统管材弯曲成形技术相结合,能保证管材在各种弯曲半径条件下的精确成形,对于螺旋管的成形具有重要的指导意义。无需复杂的开模过程,能实现弯曲一根螺旋管时弯曲半径的实时改变,所成形出的螺旋管截面质量等指标参数较好,这些优势使得三维自由弯曲作为一种螺旋管件高效精确制造的柔性成形技术,在螺旋管成形制造技术领域受到广泛关注和重要应用。

*基金项目:江苏高校优势学科建设工程;南京航空航天大学研究生创新基地实验室开放基金(kfj20180612)。

自由弯曲成形原理

三维自由弯曲成形系统的主要原理如图1所示,该系统主要由管材、弯曲模、球面轴承、导向机构和送料机构5部分组成^[6-7]。在自由弯曲成形过程中,管材被压紧装置压紧后,在Z向伺服电机的推动作用沿Z方向运动。管材经过弯曲模后,球面轴承在X和Y向电机的驱动作用下,带动内部弯曲模沿X轴和Y轴运动,同时带动弯曲模绕着导向机构转动^[8-10]。

导向机构的中心轴线与弯曲模的中心轴线之间的距离为偏心距 U ,弯曲模中心与导向机构前端距离为 A ,管材Z向送料速度为 v 。弯曲模对管材施加垂直于管材轴线方向的力 P_u ,管材被轴向作用的力 P_L 从导向机构中推入弯曲模中。成形过程中,一般 A 值不发生主动变化, P_u 的大小取决于偏心距 U 及 A 的大小,同时 U 和 A 又决定了弯曲半径大小。 P_u 和 P_L 的共同作用下产生弯矩 M ,使管材产生弯曲,其中: $M=P_u \times A+P_L \times U$ ^[11-13]。

铝合金管材的自由弯曲过程,是一个典型的材料弹塑性成形过程,其材料本构关系和屈服准则的确定是

研究管件弯曲成形力学过程的基础。

金属材料在塑性成形过程中,既有弹性变形阶段,又有塑性变形阶段,而且在其塑性变形阶段,材料硬化规律类似幂指数函数,符合该变化规律的材料本构模型数学表达式为^[14]:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & (\varepsilon \leq \sigma_s / E) \\ K\varepsilon^n & (\varepsilon > \sigma_s / E) \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ 为真实应力; E 为杨氏模量; ε 为真实应变; σ_s 为屈服应力; K 为应变强度系数, $K=\sigma_s$; n 为应变硬化指数,本文 $n=1$ 。

屈服准则对于弹塑性材料来说,是判断材料是否从弹性状态进入了塑

性状态的理论依据。在金属材料中,常使用米塞斯屈服准则分析金属材料的弹塑性变形,其数学表达式为:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s \quad (2)$$

式中, σ 为等效应力; σ_1 为第一主应力; σ_2 为第二主应力; σ_3 为第三主应力。

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,管壁会愈来愈厚,且易出现起皱缺陷。而管材外侧处于受拉状态,管壁愈来愈薄,会出现管壁破裂等缺陷^[15-17]。弯曲管材内外侧的应力-应变状态如图2所示。

在自由弯曲成形过程中,推进机

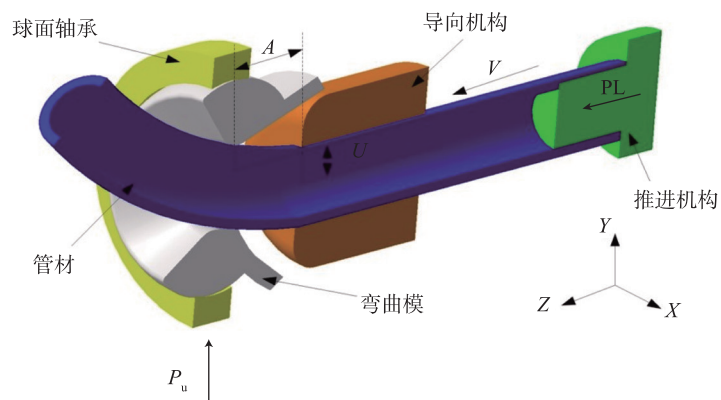


图1 三维自由弯曲成形技术原理图

Fig.1 Principle of three dimensional free bending forming technology

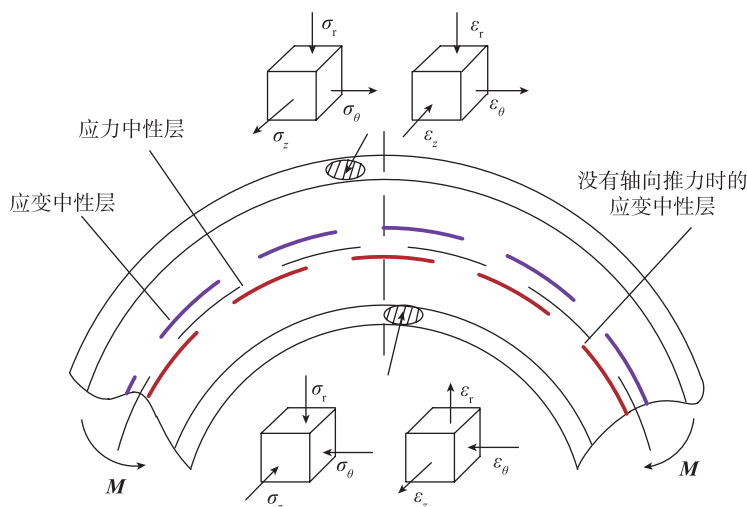


图2 管材弯曲的应力-应变状态分析

Fig.2 Stress-strain state analysis of tube bending

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^[18-19],因此,自由弯曲成形技术对管材的弯曲成形质量有较大的影响。

自由弯曲螺旋成形工艺

螺旋管有着广泛的应用,其紧密程度主要由螺旋直径 D 和螺距 S 同时决定,如图 3 所示。可以观察到,螺旋直径 D 和螺距 S 通过影响螺旋角来改变螺旋成件的紧密程度;也就是说,螺旋直径 D 和螺距 S 数值越小,螺旋管整体致密性就越高。

在自由弯曲过程中,通过改变偏心距 U 、 A 值等参数来成形复杂空心构件。而在螺旋管的成形过程中,主要的成形工艺参数为螺旋直径 D 、螺距 S 、螺旋圈数 m ,通过各参数在空间位置上的几何关系构建相关方程并解算,得到通过自由弯曲技术成形螺旋管的工艺解析。工艺解析如图 4 所示。

首先根据螺旋直径 D 来确定弯曲半径 R ,并通过弯曲半径 R 和弯曲模中心与导向机构前端的距离 A 值

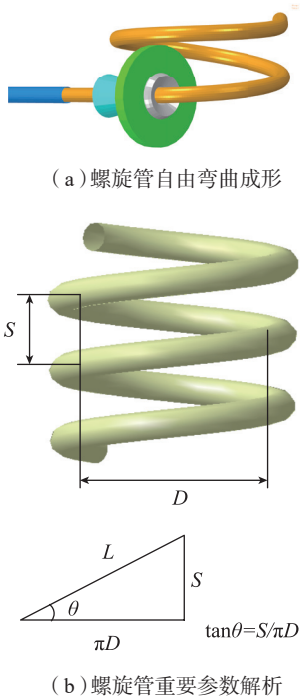


图3 螺旋管的参数解析

Fig.3 Parametric analysis of spiral tube

来确定 Y 向偏心距 U_y 、运动时间 t_1 以及停留时间 t_2 。根据螺旋圈数 m 确定弯曲模从 U_y 位置运动至 U_x 位置过程中弯曲模偏转次数 N 及偏转角度 θ_N 。

$$R = \frac{D}{2} \quad (3)$$

$$U_y = \left[R - R \cos \frac{v t_1}{R} + \tan \frac{v t_1}{R} (A - R \sin \frac{v t_1}{R}) \right] \quad (4)$$

$$t_1 = \frac{\pi R \arcsin \frac{A}{R}}{180 v} \quad (5)$$

$$t_2 = \frac{\pi R}{2 v} - \frac{\pi R \arcsin \frac{A}{R}}{180 v} \quad (6)$$

$$N = 2m - 1 \quad (7)$$

$$\tan \theta = \frac{S}{\pi D} \quad (8)$$

通过直径 D 和螺距 S 确定单圈螺旋线长 L 和半圈螺旋线长 $L/2$,并根据螺旋线长、弯曲模偏转角速度 ω 及管材匀速送进的速度 v 来确定弯曲模每次的偏转时间 t_p 、 t_e 和停留时间 t_{pp} 、 t_{ee} 。当弯曲模运动至 X 向偏心距 U_x 位置后不作停留,立即返回初始

位置 O 。

$$L = \sqrt{\pi^2 D^2 + S^2} \quad (9)$$

$$t_p = 2t_e = \frac{\pi}{2n\omega} \quad (10)$$

$$t_p + t_{pp} = 2(t_e + t_{ee}) = \frac{L}{v} \quad (11)$$

$$U_x = R - R \sqrt{1 - \left(\frac{A - v t_3}{R} \right)^2} \quad (12)$$

$$t_3 = \frac{A}{V} \quad (13)$$

6061 铝合金自由弯曲螺旋成形的有限元模拟

基于三维自由弯曲成形机理,本文构建了自由弯曲螺旋成形的有限元模型,并且根据成形原理对关键工艺参数进行了设置,从而展开了 6061 铝合金自由弯曲螺旋成形的有限元模拟。首先通过三维建模软件建立三维自由弯曲系统模型,如图 5 所示。然后将该模型导入 ABAQUS 软件中对相关工艺参数进行设置。

本次模拟管坯采用直径为 15mm,壁厚为 1mm 的 6061 铝合金

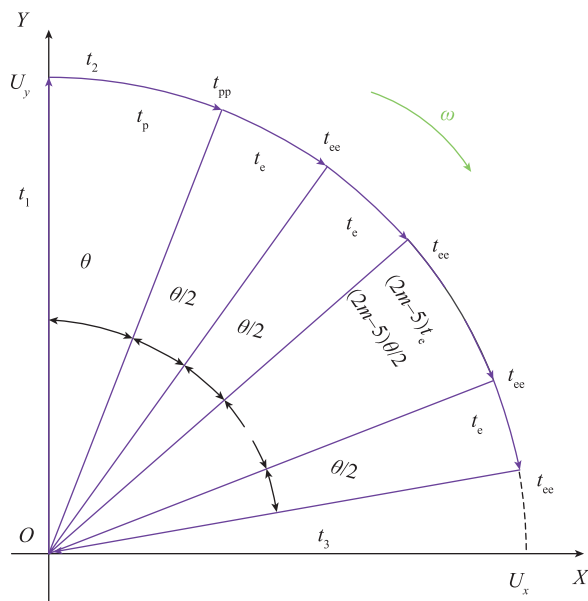


图4 螺旋管自由弯曲工艺解析

Fig.4 Analysis of free bending process for spiral tube

管,弯曲模材料为 YG8 合金,其材料性能如表 1 所示。模拟过程中的接触为一般接触,系统摩擦系数统一设置为 0.02。

本文主要研究在螺旋直径一定时,螺距的变化对管材成形质量的影响以及在螺距一定时,螺旋直径的变化对管材成形质量的影响。图 6 为旋管自由弯曲成形数值模拟的应力云图,可以看出,螺旋管整体模拟成形效果良好,螺旋线平滑且接近标准圆。此外,在弯曲模摆动位置产生了明显的应力集中,故该位置易产生截面畸变成形缺陷。其中图 6 (a)、(b)、(c) 3 幅应力云图表示了当螺距 $S=90\text{mm}$,螺旋直径分别为 $D_1=120\text{mm}$ 、 $D_2=130\text{mm}$ 、 $D_3=140\text{mm}$ 时螺旋管的成形质量,可以看到随着弯曲半径的增

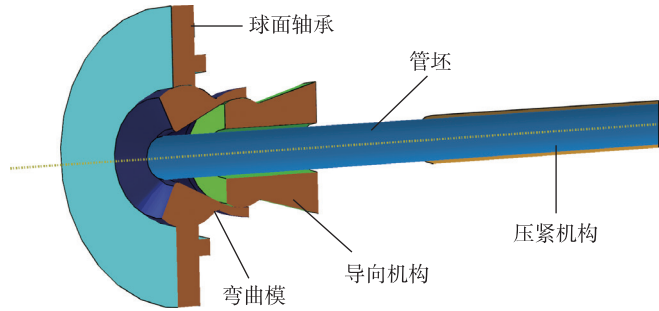


图5 自由弯曲有限元模型

Fig.5 Free bending finite element model

表1 材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of materials

| 材料 | 密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 杨氏模量 /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 | * |

注: * 表示实际模拟中使用该材料的零件设置为刚体。

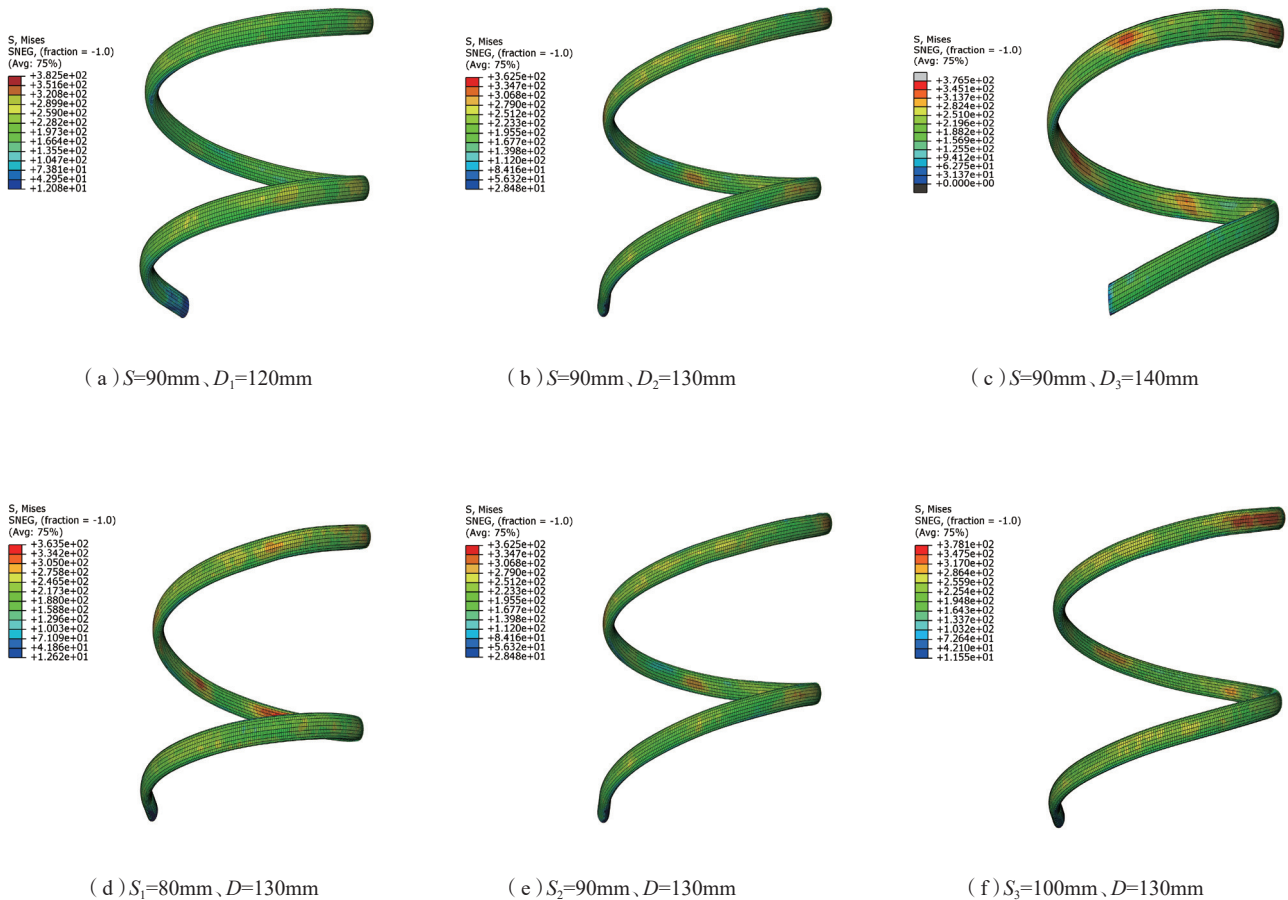


图6 螺旋管自由弯曲成形数值模拟的应力云图

Fig.6 Stress cloud diagram of numerical simulation of spiral tube free bending forming

大,弯曲模摆动位置处的应力集中逐渐减小。图6(d)、(e)、(f)3幅应力云图表示了当螺旋直径 $D=130\text{mm}$,螺距分别为 $S_1=80\text{mm}$ 、 $S_2=90\text{mm}$ 、 $S_3=100\text{mm}$ 时螺旋管的成形质量,可以看出随着螺距的增大,弯曲模摆动位置处的应力集中也逐渐增大。

在螺旋管的弯曲过程中,螺距及螺旋直径的改变是通过弯曲模摆动不同的角度及位置实现的,每摆动一次都会产生弯曲模对管材的径向作用力,且随着弯曲模的摆动角度变大,管材受到的径向作用力也增大。为了方便描述径向作用力下产生的截面畸变的程度,在螺旋管上进行编号,如图7所示。

本文通过椭圆度反映截面的畸变情况,如图8所示。可以明显观察到,6组模拟的椭圆度大约稳定在 $6.7\%\sim 7.7\%$ 之间,说明6组螺旋管的模拟成形效果良好。另外还可以观察到,在螺距一定时,随着螺旋直径的逐渐增大,螺旋管截面的椭圆度逐渐减小,即截面畸变越来越小,成形质量相对越来越好;在螺旋直径一定时,随着螺距的逐渐增大,螺旋管截面的椭圆度逐渐增大,即截面畸变越来越大,成形质量相对越来越差。

根据螺旋弯管的成形原理,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_L ,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9所示。在螺旋管外侧不开裂,内侧不起皱的前提下,管材壁厚中性层在弯曲过程外移量越大,管材的成形质量越好,另外螺距的变化对壁厚中性层的外移量影响非常小,所以只研究螺旋直径对壁厚中性层的影响。

图10为6061铝合金螺旋管在弯曲过程中的壁厚中性层偏移量。可以观察到,随着螺旋直径的增大,壁厚中性层的偏移量逐渐减小,螺旋

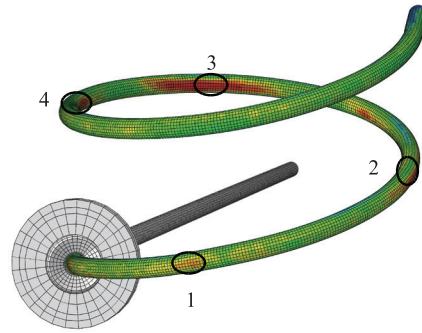


图7 螺旋管的位置编号

Fig.7 Position number of the spiral tube

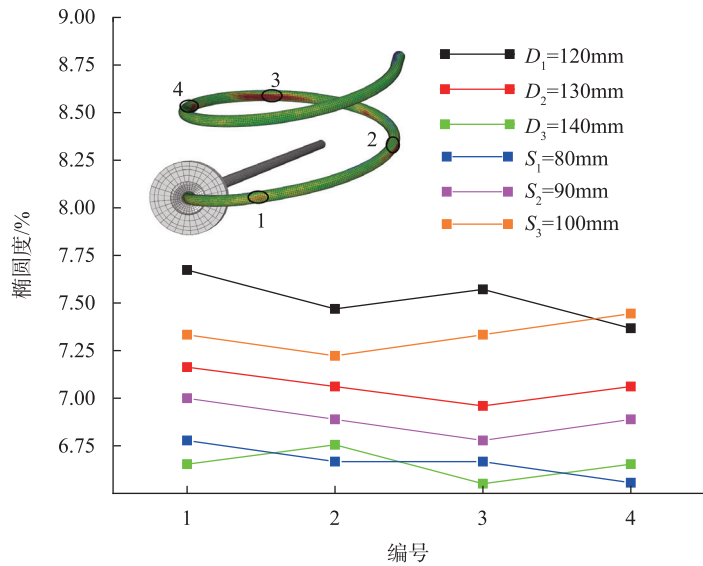


图8 各组模拟参数下螺旋管的截面畸变

Fig.8 Cross-sectional distortion of the spiral tube under the simulation parameters of each group

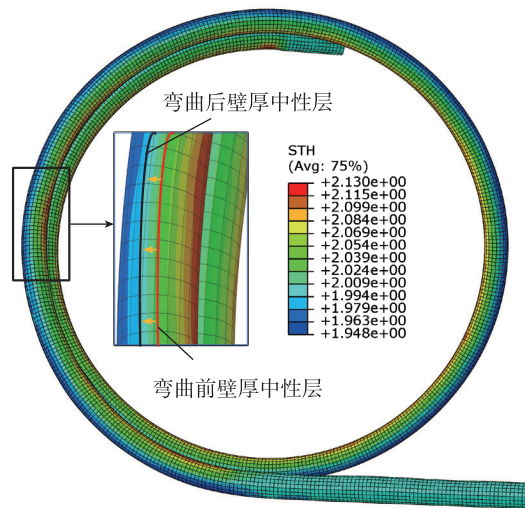


图9 螺旋管弯曲前后壁厚中性层的变化

Fig.9 Variation of the neutral layer thickness before and after the spiral tube bending

管受到的径向作用力逐渐减小。

6061 铝合金自由弯曲成形试验研究

通过对 6061 铝合金管自由弯曲螺旋成形的数值模拟可以发现,螺旋直径和螺距的改变会对截面畸变以

及壁厚中性层的偏移产生相应的影响,从而影响螺旋管的成形质量。基于数值模拟的结果,本文进行了实际的螺旋管自由弯曲试验。本次试验在三轴自由弯曲机上进行,使用壁厚为 1mm,直径为 15mm 的 6061 铝合金管材,如图 11 所示。

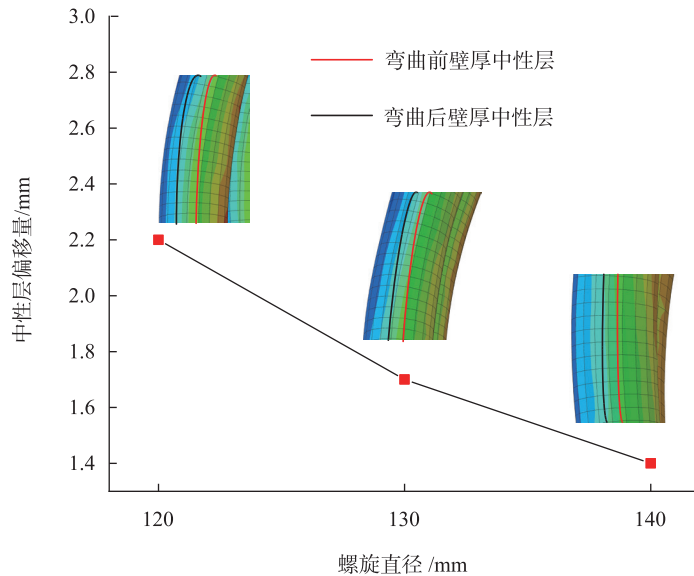
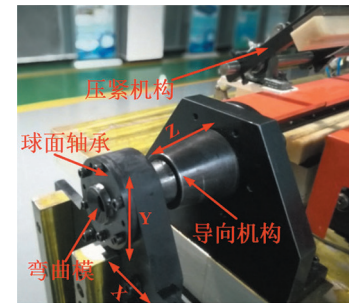


图10 螺旋管在不同螺旋直径下的中性层偏移量

Fig.10 Neutral layer offset of the spiral tube at different helical diameters

如图 12 所示为在 6 组参数下通过三轴自由弯曲机实际弯曲的铝合金螺旋管,可以观察到实际成形



(a) 三轴自由弯曲成形设备



(b) 螺旋管弯曲成形试验

图11 螺旋管自由弯曲成形试验
Fig.11 Experiment on free bending forming of spiral tube

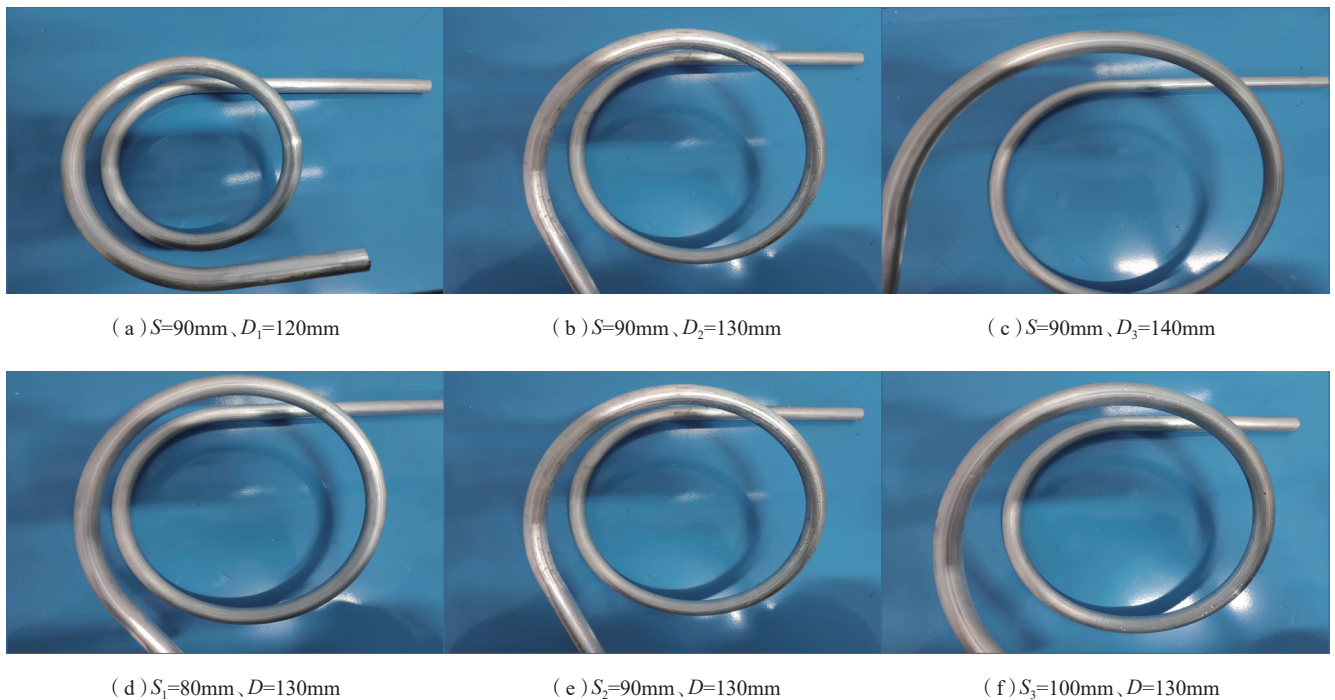


图12 实际弯曲的铝合金螺旋管

Fig.12 Actually bent aluminum alloy spiral tube

效果良好,螺旋管未出现外侧开裂、内侧起皱等成形缺陷,螺旋线平滑且接近标准圆。如表2所示,对比实际成形螺旋管与模拟成形螺旋管的螺旋直径与螺距之后发现,模拟结果外观尺寸与实际试验结果符合良好。

图13为试验铝合金螺旋管的截面畸变情况,对螺旋管进行切割,测量切割截面试样的椭圆度。观察得知,实际螺旋试验中随着螺旋直径的增大,椭圆度逐渐减小,截面畸变情况逐渐减轻;随着螺距的增大,螺旋管的椭圆度逐渐增大,截面畸变越来越严重。该结论与数值模拟

结果符合良好,也验证了数值模拟对实际试验的良好预测性。

结论

(1)在螺距一定时,螺旋直径的增大会使螺旋管的截面畸变减轻;螺旋直径一定时,螺距的增大会使螺旋管的截面畸变加重。壁厚中性层的向外偏移量会随着螺旋半径的增大而逐渐减小。

(2)基于6061铝合金螺旋管的数值模拟结果,本文开展了实际的铝合金螺旋管弯曲试验,试验得到的螺旋管成形效果良好,螺旋线平滑且接近标准圆,外观尺寸以及

截面畸变都与数值模拟结果符合良好,很好地验证了数值模拟对实际试验的良好预测性。

参考文献

[1] 李博. 螺旋焊管成形技术分析[J]. 中国机械, 2014(9): 261-262.
 LI Bo. Analysis of spiral welded pipe forming technology[J]. China Machinery, 2014(9): 261-262.
 [2] 孙见君, 张国东. 螺旋管成形设备与成形工艺分析[J]. 通用机械, 2004(2): 77-78.
 SUN Jianjun, ZHANG Guodong. Analysis of spiral tube forming equipment and forming process[J]. General Machinery, 2004(2): 77-78.
 [3] 姜伟, 彭洁, 单长吉, 等. 螺旋槽管材滚压成形过程的有限元分析[J]. 锻压技术, 2007, 32(3): 42-45.
 JIANG Wei, PENG Jie, SHAN Changji, et al. Finite element analysis of spiral groove tube roll forming process[J]. Forging & Stamping Technology, 2007, 32(3): 42-45.
 [4] 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, 59(23): 16-24.
 GUOXunzhong, MA Yannan, XU Yong, et al. Three-dimensional free bending forming technology and its potential application in aeronautical manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(23): 16-24.
 [5] 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 Yannan, XIONG Hao, WANG Hui, et al. Simulation and experimental study on

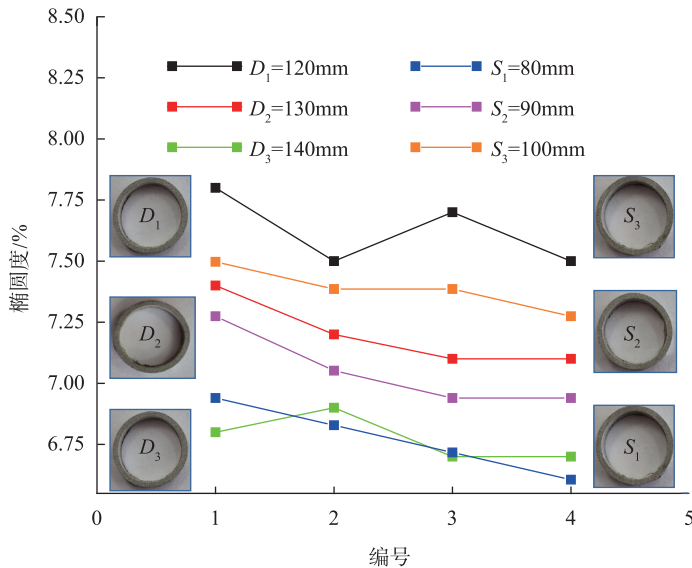


图13 试验铝合金螺旋管的截面畸变

Fig.13 Cross-sectional distortion of experimental aluminum alloy spiral tube

表2 铝合金螺旋管设计、有限元模拟以及试验尺寸对比

Table 2 Dimension comparison of design, finite element simulation and experiment of aluminum alloy spiral tube mm

| 铝合金螺旋管 | 设计尺寸 | | 模拟尺寸 | | 试验尺寸 | |
|----------|------|--------|------|--------|------|--------|
| | 螺距 S | 螺旋直径 D | 螺距 S | 螺旋直径 D | 螺距 S | 螺旋直径 D |
| 图 12 (a) | 90 | 120 | 92 | 123 | 93 | 125 |
| 图 12 (b) | 90 | 130 | 91 | 135 | 92 | 137 |
| 图 12 (c) | 90 | 140 | 91 | 142 | 93 | 144 |
| 图 12 (d) | 80 | 130 | 83 | 136 | 85 | 137 |
| 图 12 (e) | 90 | 130 | 91 | 135 | 92 | 137 |
| 图 12 (f) | 100 | 130 | 101 | 138 | 101 | 138 |

three dimensional free bending of complex space elbow[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(2): 20–26.

[6] 乔立鹏. 螺旋管成形模具的 CAD/CAM 方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2004, 40(3): 11–12, 15.

QIAO Lipeng. Research on CAD/CAM method of spiral tube forming die[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2004, 40(3): 11–12, 15.

[7] 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 Yannan, ZHOU Shujun, et al. Free bending forming technology of three dimensional complex axis hollow component [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 100–110.

[8] 李霄, 熊庆人, 石凯, 等. 基于参数化的螺旋焊管成型模型建立及成型过程仿真[J]. 热加工工艺, 2010, 39(9): 120–122.

LI Xiao, XIONG Qingren, SHI Kai, et al. Modeling of spiral welded pipe forming model based on parameterization and simulation of molding process[J]. Thermal Engineering, 2010, 39(9): 120–122.

[9] 魏文斌, 程旋, 余耀晖, 等. 基于自由弯曲技术的 6061 铝合金管的弯曲成形性能研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 28–34.

WEI Wenbin, CHENG Xuan, YU Yaohui, et al. Study on bending formability of 6061

aluminum alloy tube based on free bending technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(4): 28–34.

[10] 李灵凤, 王林. 螺旋盘管滚弯成形的数值模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(5): 43–46.

LI Lingfeng, WANG Lin. Numerical simulation of rolling forming of spiral coil[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(5): 43–46.

[11] 白忠泉. 螺旋焊管的成型技术[J]. 焊管, 2004, 27(3): 48–56.

BAI Zhongquan. Forming technology of spiral welded pipe[J]. Welded Pipe and Tube, 2004, 27(3): 48–56.

[12] 武鹏林, 彭龙生. 水平圆管中螺旋流的形成与衰减[J]. 太原工业大学学报, 1997(4): 32–35.

WU Penglin, PENG Longsheng. Formation and attenuation of spiral flow in horizontal tube[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1997(4): 32–35.

[13] TARO T, YAMASAKI T, MURATA J, et al. Formability improvement by die-bearing grooves in tube extrusion with spiral inner projections[J]. Procedia Engineering, 2014, 81(10): 641–646.

[14] 鲁会. 关节摆动型自由弯管工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.

LU Hui. Process study on tube free-

bending with joint swing[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.

[15] 王劲, 李付国, 王伟, 等. 管材螺旋槽成形模具设计[J]. 锻压技术, 2007(1): 81–83.

WANG Jin, LI Fuguo, WANG Wei, et al. Design of forming die for pipe spiral groove[J]. Forging & Stamping Technology, 2007(1): 81–83.

[16] TANG N C. Plastic-deformation analysis in tube bending[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2000, 77(12): 751–759.

[17] HAO N, LI L. An analytical model for laser tube bending[J]. Applied Surface Science, 2003, 208(1): 432–436.

[18] SAFDAR S, LI L, SHEIKH M A, et al. Finite element simulation of laser tube bending: effect of scanning schemes on bending angle, distortions and stress distribution[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(6): 1101–1110.

[19] 陈少杰, 成永笑. 螺旋焊管挤压装置改进及摩擦分析[J]. 焊管, 1994(5): 16–18.

CHEN Shaojie, CHENG Yongxiao. Improvement and friction analysis of extrusion device for spiral welded pipe[J]. Welded Pipe and Tube, 1994(5): 16–18.

通讯作者: 陶杰, 教授, 博导, 研究方向为金属材料成形加工、金属材料表面功能涂层、纳米材料、复合材料等, E-mail: taojie@nuaa.edu.cn.

Study on Free Bending Spiral Forming Process of 6061 Aluminum Alloy Tube

LI Tao, CHEN Hao, WEI Wenbin, TAO Jie

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

[ABSTRACT] In this paper, the effects of pitch and spiral diameter on the forming process of 6061 aluminum alloy spiral tube are studied by numerical simulation and experiment. It is found that when the pitch is constant, the increase of the spiral diameter will reduce the cross-section distortion of the spiral tube; When the spiral diameter is constant, the increase of the pitch will aggravate the cross-section distortion of the spiral tube, and the outward offset of the neutral layer of the wall thickness will gradually decrease as the spiral radius increases. Based on the numerical simulation results, the actual spiral tube forming effect is good, the spiral is smooth and close to the standard circle, and the appearance size and section distortion are in good agreement with the numerical simulation results. It is a good proof of the good predictability of the numerical simulation for the actual experiment.

Keywords: Spiral tube; Free bending; Finite element; Simulation experimental verification; Aluminum alloy

(责编 大漠)