

芯棒参数对超薄壁管数控绕弯成形质量的影响

蒋兰芳¹, 王亚群², 林姚辰³, 张树有⁴, 李恒⁵, 张飞³, 冯毅雄⁴, 郭训忠⁶

(1. 浙江工业大学之江学院, 312030, 浙江绍兴; 2. 浙江工业大学机械工程学院, 310014, 杭州;

3. 浙江金马逊机械有限公司, 321403, 浙江丽水; 4. 浙江大学机械工程学院, 310058, 杭州; 5. 西北工业大学材料科学与工程学院, 710072, 西安; 6. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 211106, 南京)

摘要: 为提高超薄壁管材的弯曲成形质量,研究了芯球个数、芯球厚度和芯棒支撑角度等芯棒参数对壁厚变化和椭圆度的影响。设计了3种芯球厚度和7种芯球个数,组合得到21种不同的芯棒支撑角度方案,建立了超薄壁不锈钢管材数控绕弯成型有限元分析模型进行仿真计算,并进行了试验验证。结果表明:芯球个数对壁厚减薄的均匀性有一定的影响,芯球个数相同时,芯球厚度越小,最大壁厚减薄率也越小,最大壁厚减薄率随着芯棒支撑角度的增大而变大;随着芯球个数、芯球厚度或芯棒支撑角度的增加或变大,椭圆度都有减小的趋势;同时总结出超薄壁不锈钢管材的合理的芯棒支撑角度范围为 $\theta/3 \sim \theta/2$ 。此项研究对指导芯棒参数设计、提高超薄壁管材的成形质量具有重要意义。

关键词: 超薄壁管;数控绕弯成形;芯棒参数;芯棒支撑角度

中图分类号: TG386.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004018 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0144-11



OSID 码

Effects of Mandrel Parameters on NC RDB Forming Quality of Ultra-Thin-Walled Tube

JIANG Lanfang¹, WANG Yaqun², LIN Yaochen³, ZHANG Shuyou⁴, LI Heng⁵,

ZHANG Fei³, FENG Yixiong⁴, GUO Xunzhong⁶

(1. Zhijiang College of Zhejiang University of Technology, Shaoxing, Zhejiang 312030, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

3. Zhejiang King-Mazon Machinery Co. Ltd., Lishui, Zhejiang 321403, China;

4. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

5. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

6. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To improve the bending formation quality of ultra-thin-walled tube, the effects of the mandrel parameters, including number of mandrel ball, mandrel ball thickness, and mandrel support angle, on wall thickness variation and ovality are discussed. 21 differently combined mandrel support angle schemes are designed by combining three different mandrel ball thicknesses with seven different mandrel ball numbers. The results show that the number of mandrel ball exerts a certain influence on the wall thinning uniformity. For same number of mandrel ball, the smaller the mandrel ball thickness, the smaller the maximum wall-thinning ratio. The maximum wall-thinning ratio becomes larger as the mandrel support angle increases. with the increase in

收稿日期: 2019-07-06。 作者简介: 蒋兰芳(1979—),女,教授;林姚辰(通信作者),女,工程师。 基金项目: 浙江省重点研发计划资助项目(2020C05008);国家自然科学基金资助项目(51675478);浙江工业大学柯桥创新研究院科技计划资助项目(2018KQ012)。

网络出版时间: 2019-12-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191212.1500.004.html>

the number of mandrel ball, mandrel ball thickness or mandrel support angle, the ovality tends to reduce. It is concluded that the reasonable mandrel support angle for ultra-thin-walled stainless steel tube is ranged from $\theta/3$ to $\theta/2$.

Keywords: ultra-thin-walled tube; NC RDB forming; mandrel parameters; mandrel support angle

由于超薄壁管材($D/t > 100$, D 为外径, t 为壁厚)具有高强度、高性能、轻量化等优点,在航空航天领域中得到了广泛的运用^[1-2]。数控绕弯成形技术具有高效率、高稳定性、高精度等优势,成为超薄壁管材弯曲成形的重要技术之一。然而,由于超薄壁管材口径大、壁厚薄等特点,在绕弯成形时非常容易出现起皱、拉裂、截面畸变等缺陷,成形难度非常大。因此,迫切需要研究此类超薄壁管材的弯曲成形关键理论与技术,以提高超薄壁弯管的成形质量。

目前,有很多学者对薄壁管($D/t > 20$)的弯曲成形开展了研究,但关于超薄壁管弯曲成形方面的研究不多。文献[3]研究了不同压缩变形区最大起皱系数与和成型率之间的变化关系,以及不同模具和管材之间的间隙和摩擦对最大起皱系数的影响。文献[4]得出了不同径厚比铝合金管材($D/t = 70, 80, 100$)的弯曲成形极限,并揭示了工艺参数组合在实现极限弯曲过程中的作用。文献[5]提出了一种缺陷扰动方法,为绕弯过程中管内起皱提供了预测依据。文献[6]发现管材的硬化指数、厚向异性指数和杨氏模量对弯曲成形性能有很大影响,起皱是主要的弯曲成形缺陷。文献[7]分析了超薄壁铝合金管($D127 \times t1.25$)弯曲成形时压块助推速度、压块与管材间的摩擦系数对壁厚减薄和回弹的影响规律。

有学者研究了超薄壁管材的其他弯曲成形工艺。文献[8]研究了双层管充液压弯成形下内层超薄壁不锈钢管($D/t = 180$)的壁厚变化情况。文献[9]对 6061 铝合金超薄壁管($D50.5 \times t0.5$)的充液压弯工艺进行优化,与绕弯工艺相比,充液压弯工艺复杂、效率低,且文献[8]中压弯前,需要将内层超薄壁弯材装入外层低碳钢保护管材;压弯成形后,需要割开外层金属管,只留用内层的超薄壁弯管,流程复杂、成本高。

超薄壁管数控绕弯成形时非常容易出现拉裂、起皱甚至塌陷等问题。为尽量减少上述缺陷,通常在管材内安装芯棒以提供内部支撑,可见芯棒对管材的成形质量起到非常重要的作用^[10]。关于芯棒对成形质量的影响方面, Li Heng 等建立了球窝式芯棒参数的分析模型,推导出了芯棒直径 d 、芯棒伸长 e_m 、芯球个数 n 、芯球厚度 k 、芯球间距 p 和芯球

半径 r 等参数初步选择的参考公式,并借助 ABAQUS 软件仿真研究了芯棒对弯曲过程中应力分布的影响,还研究了大口径薄壁管弯曲成形过程芯棒的结构参数对起皱、开裂和截面畸变的影响^[10]。刘婧瑶等推导出了芯球个数和芯棒伸出量的计算公式,分析了芯棒参数对管件成形质量的影响,验证了计算公式的准确性^[11]。李思漪等研究了车用水冷 304 不锈钢管接头($D25 \times t0.4$)的芯棒伸出量、防皱块与管坯间隙以及芯棒直径等工艺参数对冷弯成形质量的影响^[12]。田玉丽等研究了 6061-T4 大直径薄壁铝管($D50 \times t0.889$)数控绕弯过程中弯曲角度、芯棒伸出量、芯球个数和弯曲速度等参数对壁厚的影响规律^[13]。王刘安等建立了 6061-T6 铝合金管($D50.8 \times t1$)的材料本构方程,研究了芯棒与管材间隙、芯棒伸出量、芯头个数对弯管成形质量的影响规律^[14]。Xu 等提出了一种芯棒参数的设计与优化方法,并进行了试验验证^[15]。刘志文等以汽车防护栏用大口径薄壁钢管($D76 \times t1.2$)为对象,建立了芯棒参数理论模型,推导出了芯棒参数的选取公式,研究材料、有无芯轴、芯头个数和芯棒伸出量对不锈钢管绕弯成形质量的影响,并得出最优的成形参数^[16]。Mentella 等分别采用有无芯棒和轴向助推的自由绕弯成形方法,研究小口径铜管的管材几何形状和截面畸变的关系^[17]。

另外,还有学者针对芯棒结构进行了创新设计。Zhang 等以双脊矩形管为研究对象,提出了一种非连接式刚性芯棒以及两种 PVC 弹性芯棒^[18]。Salem 等提出一种链式单向芯棒,用于管材的内部支撑^[19]。Xue 等则提出了一种基于面耦合 HINGE 约束的活动芯球来提高链式芯棒的数值仿真精确性^[20]。Jiang 等提出了一种新型的仿生弹性连接芯棒,还提出了仿生弹性芯棒连接体的设计方法^[21-22]。Sedighi 等研究了管材内部不同的填充材料对绕弯成形过程起皱和截面畸变的影响^[23]。

关于芯棒参数的文献中,大多是研究某单一芯棒参数对管材成形质量的影响规律,文献[10-11]建立了芯轴参数的分析模型,推导出了一些芯棒参数的计算公式,为芯棒参数的快速选取提供理论性的指导。从这些芯棒参数计算公式中可以发现,芯棒

参数中芯轴与各个芯球转角总和对管材的弯曲成形质量影响很大,而目前关于这方面的研究鲜有报道。

本文将芯轴与各个芯球的转角总和定义为芯棒支撑角度,以外径 $D=91.6\text{ mm}$ 、壁厚 $t=0.9\text{ mm}$ ($D/t=101.8$) 的超薄壁 304 不锈钢管材为研究对象,以弯曲角度 $\theta=57^\circ$ 、弯曲半径 $R=190\text{ mm}$ 为例,研究芯棒支撑角度、芯球个数和芯球厚度对超薄壁管材弯曲成形质量的影响,以及合理的芯棒支撑范围。

1 芯棒支撑角度

1.1 绕弯成形原理

管材数控绕弯成形原理如图 1 所示。从图中可以看出,绕弯成形的主要模具有夹紧模、压模、防皱模、弯曲模、弯曲模镶块以及芯棒,其中芯棒包含芯轴和芯球两部分。弯曲成形前,管材的一端由夹紧模与弯曲模镶块夹紧固定在弯曲模上,弯曲外侧由压模压紧,内侧设有防皱模,安装在管材与弯曲模的切点位置。绕弯成形时,弯曲模以 ω 的角速度在 O 点绕 Z 轴转动,夹紧模和弯曲模镶块夹紧管材与弯曲模同步转动,压模以速度 v 沿 X 轴方向移动,防皱模与芯轴保持静止。

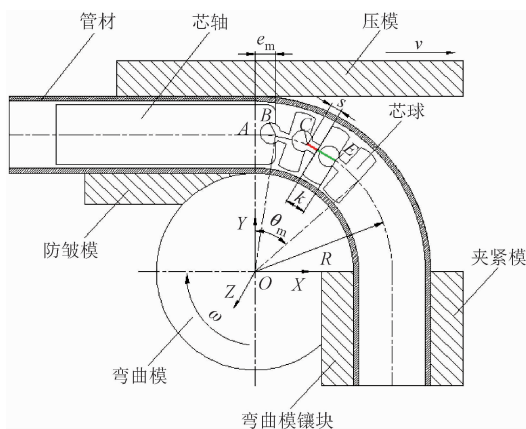


图1 金属管材数控弯曲示意图

1.2 芯棒的作用

超薄壁管数控绕弯成形时,通常在管材内部安装芯棒,对管材内部提供一定的支撑,用来防止管材外侧塌陷,改善弯管的截面畸变问题,同时与防皱模配合,抑制管材内侧失稳起皱。芯棒主要由芯轴和芯球组成,芯轴用于支撑管材的直线段,芯球用于支撑管材的弯曲段。根据连接方式的不同,芯棒可分为球窝式芯棒^[10]、链式芯棒^[19]和弹性连接芯棒^[22]等。其中,球窝式芯棒的芯球与芯轴之间、芯球间通过球链连接,可实现芯球的多自由度旋转,是较为常用的一种芯棒,如图 1 所示。

1.3 芯棒支撑角度

芯棒支撑角度指的是芯棒在管材弯曲段内的有效支撑段所对应的圆心角,包括芯棒伸出量所对应的支撑角度(即图 1 中线段 AB 所对应的圆心角)、芯球厚度和芯球间隙所对应的支撑角度(即图 1 中线段 CE 所对应的圆心角)。文献[10-11]提到芯棒支撑角度,但都没有做深入研究,如刘婧瑶等仅推导出了芯棒支撑角度与芯球个数、球头节间距的几何关系式^[11]。为便于开展后续研究,这里对文献[11]的芯棒支撑角度与芯球个数的关系进行了修正,将球头节间距所对应的支撑角度转化为芯球厚度与芯球间隙所对应的支撑角度。改进后的芯棒支撑角度

$$\theta_m = \arctan \frac{e_m}{R} + 2n \arcsin \frac{k+s}{2R} \quad (1)$$

式中: e_m 为芯棒伸出量; R 为管件弯曲半径; n 为芯球个数; k 为芯球厚度; s 为芯球间隙。

1.4 芯棒支撑方案设计

首先根据经验和前期预研,采用 3 个厚度为 24.0 mm 的芯球对管材进行内部支撑,芯球间的间隙为 2 mm,以下均保持不变。然后,以此为依据,设计不同的芯球个数和芯球厚度来实现相同的芯棒支撑角度。采用 4 个芯球时,芯球厚度为 17.5 mm;采用 5 个芯球时,芯球厚度为 13.6 mm,从而确定出 3 种不同的芯球厚度。

在此基础上,针对上述 3 种不同的芯球厚度,分别采用 2~8 个芯球,对弯管内部进行支撑,从而设计出 21 种芯棒支撑角度方案。

2 有限元模型建立

2.1 几何建模

借助动态显式有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,建立超薄壁管数控绕弯成型过程的三维弹塑性有限元分析模型。表 1 为超薄壁管数控绕弯用各成形模具的结构参数。其中,根据弯管成形要求、经验公式^[10]以及实际生产,芯棒伸出量最终确定为 6 mm。夹紧模、弯曲模镶块、防皱模与管材的间隙均设为 0,压模与管材的间隙设为 0.15 mm,芯球与芯轴的间隙为 2 mm。

2.2 单元类型

为提高 CPU 计算效率,管材、弯曲模、弯曲模镶块、夹紧模、压模、防皱模选用 shell163 单元,中性层建模,采用缩减单点积分(Belytschko-Tsay)公式。芯球和芯轴选用 solid164 实体单元,采用常应力单元公式。

表 1 成形模具的结构参数

参数	数值
弯曲模镶块长度/mm	220.0
夹紧模长度/mm	215.0
压模长度/mm	500.0
防皱模长度/mm	255.0
芯轴长度/mm	250.0
芯轴直径/mm	89.2
芯球直径/mm	88.9
芯棒伸出量/mm	6.0

2.3 材料本构模型

管材的材料模型选用双线性动态硬化模型。该模型用 von Mises 的屈服准则、相关的流动法则和运动硬化。304 超薄壁不锈钢管材的力学性能参数见表 2。各个成形模具被定义为刚体,材料选用 45 号钢,其材料力学性能参数见表 3。

表 2 304 超薄壁不锈钢管材的力学性能参数

参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$	7.93×10^{-6}
弹性模量 E/MPa	2.08×10^5
屈服强度 σ_s/MPa	353
抗拉强度 σ_b/MPa	663
泊松比 ν	0.3

表 3 各成型模具材料的力学性能参数

参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$	7.85×10^{-6}
弹性模量 E/MPa	2.1×10^5
泊松比 ν	0.269

2.4 边界条件

管材绕弯成形过程仿真分析的工艺参数如表 4 所示。基于已有研究,设置弯曲模在 O 点以 0.1 rad/s 绕 Z 轴转动。弯曲模镶块和夹紧模与弯曲模同步转动;压模以弯曲模的切向线速度 19 mm/s 沿 X 轴方向移动。防皱模和芯轴保持静止,约束所有自由度;芯球不受任何约束,保留所有自由度。

接触类型选择面面自动接触,接触算法为罚函数法,设置初始罚函数刚度因子为 0.01。管材与各成型模具间的摩擦对管材的成形质量有重要影响,因此在模拟时需引入摩擦模型。根据管材绕弯成形的特点,采用经典库伦摩擦描述管材与各成形模具

间的摩擦属性。管材与各成形模具间的摩擦系数见表 5。

表 4 管材绕弯成形仿真的工艺参数

参数	数值
弯曲角度 $\theta/(\text{^\circ})$	57
弯曲半径 R/mm	190
压模速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	19
弯曲角速度 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.1
弯曲时间 T/s	10

表 5 管材与各成型模具间的摩擦系数

接触对	摩擦系数
管材与弯曲模	0.45
管材与弯曲模镶块	0.90
管材与夹紧模	0.90
管材与压模	0.45
管材与防皱模	0.35
管材与芯棒	0.2

最后,建立了 304 超薄壁不锈钢管材绕弯成形过程的三有限元模型,如图 2 所示。

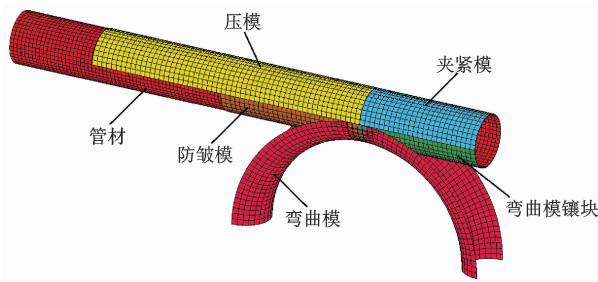


图 2 超薄不锈钢管材绕弯成形有限元模型

3 结果与分析

3.1 弯曲成形质量评价指标

(1)壁厚减薄率。管材弯曲过程中,管材外侧受拉而壁厚减薄,直接影响弯管的强度和使用性能,通常用壁厚减薄率来衡量壁厚减薄情况。壁厚减薄率为

$$\zeta_1 = (t - t_1)/t \tag{2}$$

式中: t_1 为弯曲后弯管减薄的壁厚。当 t_1 取弯管的最小壁厚 $t_{1,\min}$ 时, ζ_1 对应弯管最大壁厚减薄率 $\zeta_{1,\max}$ 。

(2)壁厚增厚率。管材弯曲过程中,管材内侧受压,壁厚增厚甚至失稳起皱,这样会影响管材使用过

程中的流通性能及外观,通常用壁厚增厚率来评价管材的起皱趋势。壁厚增厚率为

$$\zeta_2 = (t_2 - t)/t \tag{3}$$

式中: t_2 为弯曲后弯管增厚的壁厚。当 t_2 取弯管的最大壁厚 $t_{2,\max}$ 时, ζ_2 对应最大壁厚增厚率 $\zeta_{2,\max}$ 。

(3)椭圆度。弯曲过程中,弯管外侧受拉,内侧受压,二者的合力使弯管截面畸变,通常采用椭圆度来描述弯管截面畸变的程度,公式为

$$\varphi = (D_{\max} - D_{\min})/D \tag{4}$$

式中: $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ 为弯管某一截面的最大、最小外径。畸变最严重截面对应弯管最大椭圆度 $\varphi_{\max}$ 。

3.2 仿真分析模型验证

将上述超薄壁管在 KM-A100-CNC-E120 数控弯管机上进行弯曲试验,如图 3 所示。成形模具的结构参数、弯曲成形工艺均与仿真分析的参数相同,具体见表 1 和表 4,取芯球厚度 24 mm,芯球个数 3 个。管材与压模间为干摩擦;夹紧模、弯曲模镶块的内凹面做磨毛处理来增大摩擦力,防止相对滑动;其他成形模具均采用润滑脂润滑。



图 3 KM-A100-CNC-E120 数控弯管机

将弯管的壁厚分布与弯曲试验得到的弯管样件进行对比,如图 4 所示,可以看出,弯管内侧没有出现起皱现象。弯曲试验得到的弯管样件与仿真分析得到的弯管外形基本一致。对上述弯管样件中脊线外侧和内侧处的壁厚进行测量,如图 5 所示。同时,提取弯管相应弯曲角度的壁厚仿真计算值,绘制不同测量角度的超薄壁弯管中脊线内、外侧壁厚变化

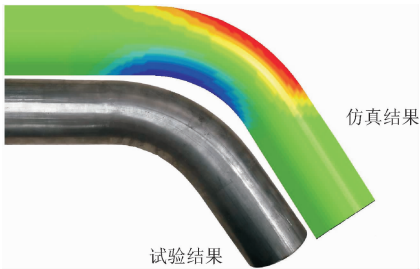


图 4 超薄壁弯管仿真和试验结果对比

曲线图,如图 6 所示。



图 5 弯管试件壁厚测量

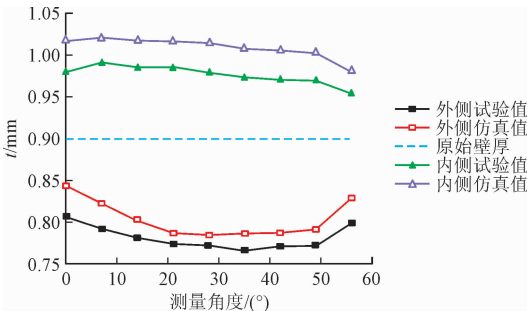


图 6 仿真与试验的壁厚变化对比

从图 6 看出,仿真计算和试验测量得到的壁厚变化趋势基本一致。其中,弯管外侧壁厚减薄曲线中,弯曲起始位置 $0^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 附近的壁厚误差稍大,约为 4.58%,弯管内侧壁在测量角度 28° 附近的壁厚误差稍大,约为 4.95%,但是均在合理误差范围内。

根据式(2)(3),计算出仿真分析的弯管最大壁厚减薄率为 12.78%,最大壁厚增厚率为 13.44%;弯曲试验的弯管最大壁厚减薄率为 14.89%,最大壁厚增厚率为 9.11%,均符合相关要求。

图 7 为弯管不同测量角度椭圆度的仿真与试验结果对比。从图中可以看出,仿真计算和试验得到的弯管椭圆度的变化趋势基本一致,弯管的椭圆度,起弯处较小, 21° 附近开始逐渐变大, 49° 附近最大,弯曲末端又开始变小。仿真计算得到的弯管最大椭圆度为 2.91%,试验得到的弯管最大椭圆度为 3.25%。

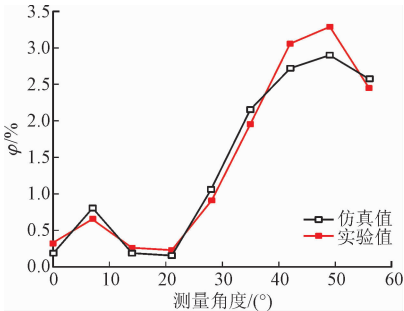


图 7 弯管椭圆度试验与仿真的对比

综上,通过对比仿真和试验得到的弯管外形、壁厚变化以及椭圆度,证明了仿真与试验结果基本一致,验证了本文建立的有限元分析模型的合理性。

3.3 结果分析

3.3.1 壁厚减薄率 图 8 为 21 种芯棒支撑角度方案的弯管壁厚减薄率的变化情况。从图中可以看出,芯球个数 n 对弯管外侧壁厚减薄率的变化有一定影响。当 n 较少时,弯管外侧壁厚减薄率不均匀,且最大壁厚减薄率出现在靠近弯管的起弯处,如图 8a 中 $n=2$ 、图 8b 中 $n=2,3$ 、图 8c 中 $n=2,3$ 。随着

芯球个数的增加,弯管外侧壁厚减薄率逐渐均匀,且最大壁厚减薄率出现的位置往弯曲中心移动。当芯球个数增加到一定时,弯管外侧壁厚减薄率又开始变得不均匀,且最大壁厚减薄率出现在弯曲末端。

图 9 为 21 种芯棒支撑方案的芯球个数与最大壁厚减薄率 $\zeta_{1,max}$ 的关系曲线。由图可知:随着芯球个数的增加, $\zeta_{1,max}$ 都呈现先增大后减小的变化趋势;芯球个数相等时,芯球厚度越小,对应的支撑角度就小, $\zeta_{1,max}$ 也越小。

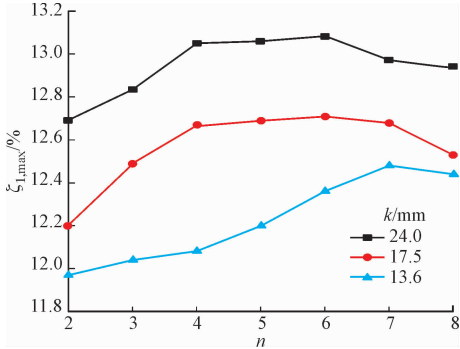


图 9 最大壁厚减薄率随芯球个数的变化

将 21 种不同芯棒支撑方案换算成芯棒支撑角度,绘制出芯棒支撑角与最大壁厚减薄率的关系曲线,图 10 所示。从图中可知:芯棒支撑角在 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 时,采用不同芯球厚度的弯管最大壁厚减薄率都随着芯棒支撑角的增大而增大;相同芯棒支撑角时,芯球厚度越小,最大壁厚减薄率也越小。

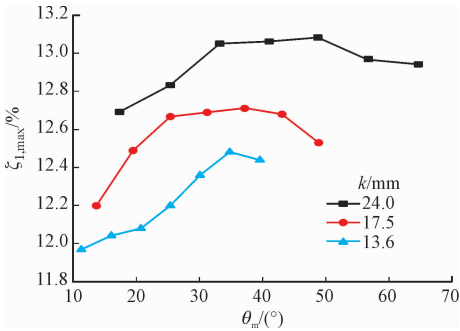
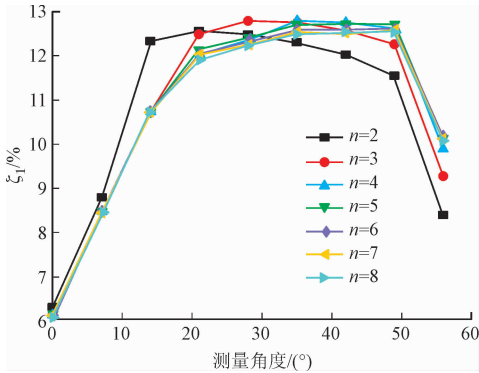


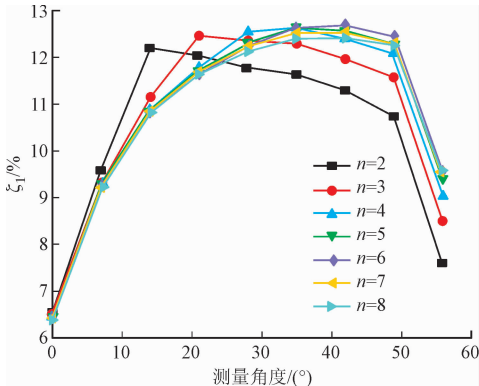
图 10 芯棒支撑角度与最大壁厚减薄率的关系

3.3.2 壁厚增厚率 图 11 为 21 种芯棒支撑方案的弯管壁厚增厚率的变化情况。从图中可以看出,芯球个数对弯管壁厚增厚率的变化影响较小,对弯管最大壁厚增厚率的出现位置的影响也不大,基本都集中在 7° 附近。

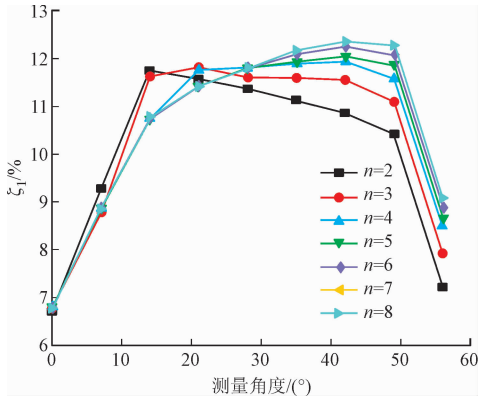
图 12 为 21 种芯棒支撑方案的 n 与 $\zeta_{2,max}$ 的关系曲线。从图中可以发现:随着芯球个数增加, $\zeta_{2,max}$ 没有明显的变化规律;芯球厚度取 24 mm 时的最大壁厚增厚率整体都大于另外两个芯球厚度对应



(a) $k=24.0\text{ mm}$

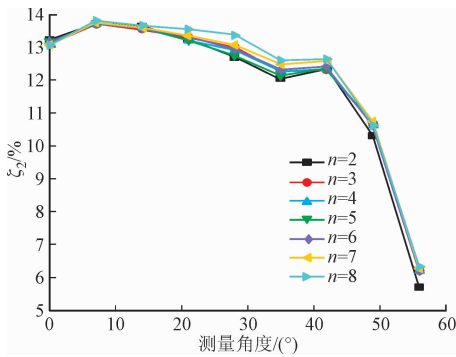


(b) $k=17.5\text{ mm}$

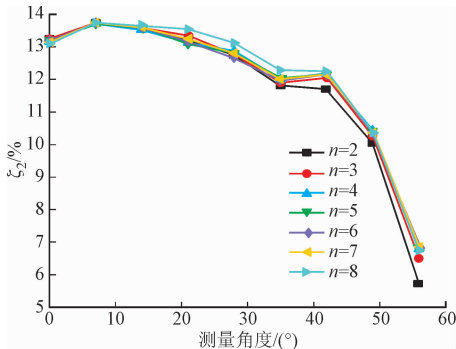


(c) $k=13.6\text{ mm}$

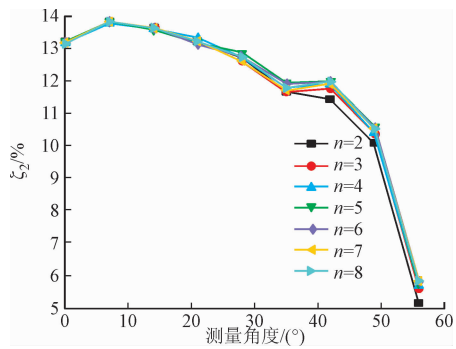
图 8 不同芯棒支撑方案的弯管壁厚减薄率变化



(a) $k=24.0\text{ mm}$



(b) $k=17.5\text{ mm}$



(c) $k=13.6\text{ mm}$

图 11 不同芯棒支撑方案的弯管壁厚增厚率变化

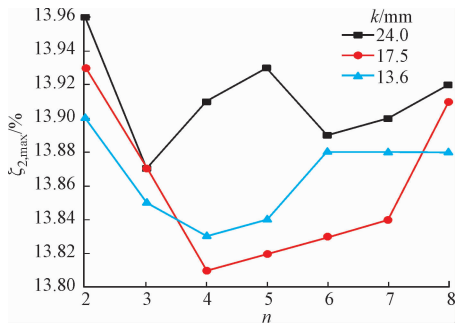


图 12 最大壁厚增厚率随芯球个数的变化

图 13 为芯棒支撑角度与 $\zeta_{2,\max}$ 的关系曲线。由图可知:在一定芯棒支撑角度范围内,随着芯棒支撑角度的增大,弯管 $\zeta_{2,\max}$ 呈现先减小后增大的变化趋势,超出这一范围后, $\zeta_{2,\max}$ 没有明显的变化规律;芯棒支撑角度在 20° 内,芯球厚度越小, $\zeta_{2,\max}$ 越小;芯球厚度取 17.5 mm 时的 $\zeta_{2,\max}$ 最小。

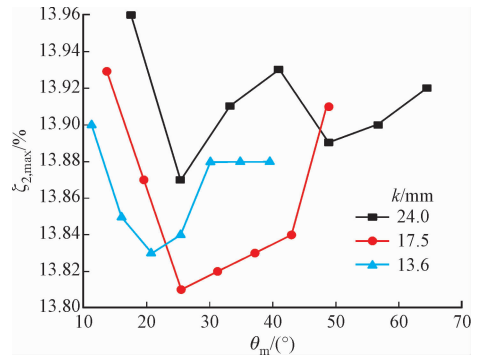
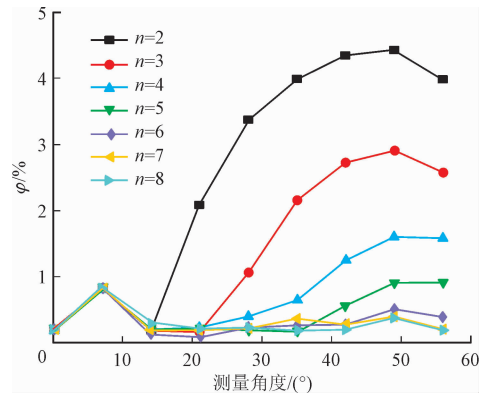
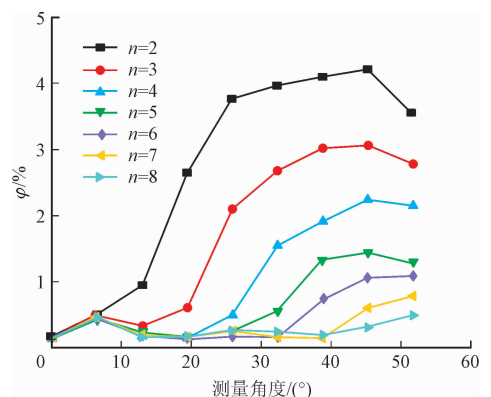


图 13 芯棒支撑角度与最大壁厚增厚率的关系

3.3.3 椭圆度 图 14 为 21 种芯棒支撑方案的弯管 φ 的变化情况。从图中可以发现, n 对弯管 φ 的影响非常明显,且随着 n 的增加,弯管 φ 不断减小。芯球厚度一定且芯球个数较少时,弯管弯曲段由于

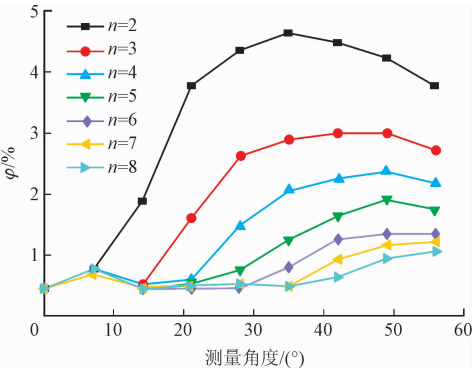


(a) $k=24.0\text{ mm}$



(b) $k=17.5\text{ mm}$

的值;不同芯球个数和芯球厚度下的 $\zeta_{2,\max}$ 的整体变化幅度很小,不超过 0.16% 。



(c) $k=13.6\text{ mm}$

图 14 不同芯棒支撑方案的弯管椭圆度变化

支撑不足而导致 φ 较大,如图 14a 中 $n=2$ 、图 14b 中 $n=2,3$ 、图 14c 中 $n=2,3$ 。当 n 达到一定数量时,弯管 φ 减小量较小,如图 14a 中 $n=5\sim 8$ 、图 14b 中 $n=6\sim 8$ 、图 14c 中 $n=7,8$ 。在测量角度为 7° 附近,弯管的椭圆度都有一定程度增大,且随着芯球厚度的减小,此处的椭圆度的增大程度也随之减小。这是因为芯棒处于弯曲状态时,外侧芯球间隙较大,在有芯球支撑处的弯管椭圆度较小,而处于芯球间隙位置的弯管椭圆度就会较大。

图 15 为 21 种芯棒支撑方案与弯管最大椭圆度的关系曲线。从图中可以发现,随着 n 的增加,弯管的截面椭圆度逐渐减小并有趋于稳定的趋势。当 n 相等时,芯球厚度越大,弯管的截面椭圆度越小。这

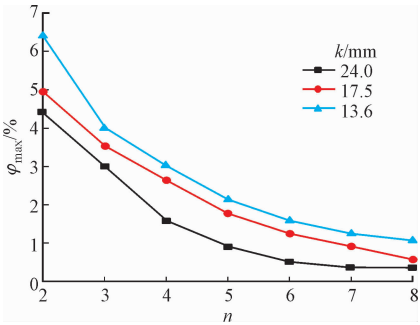


图 15 最大椭圆度随芯球个数的变化

是因为 n 的增加和芯球厚度的增大,都会使芯棒支撑角度变大,从而使弯管的截面椭圆度减小。

图 16 为芯棒支撑角度与弯管最大椭圆度的关系曲线。从图中可以发现,随着 θ_m 的增大,弯管的最大椭圆度不断减小,当 θ_m 达到一定值后,弯管的最大椭圆度开始趋于稳定。 θ_m 在 $15^\circ\sim 35^\circ$ 范围内,相同支撑角度时,芯球厚度越小,弯管的最大椭圆度也越小。这是由于相同支撑角度时,芯球厚度越小,所需的芯球个数就多,对芯棒的支撑效果就越好。

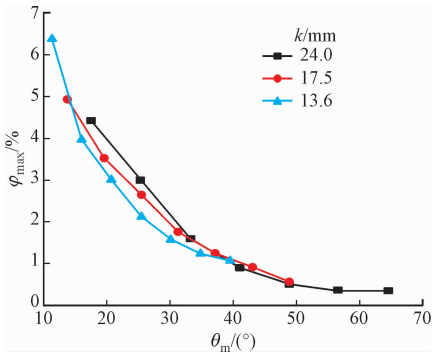


图 16 最大椭圆度随芯棒支撑角度的变化

4 芯棒支撑角度

4.1 芯棒支撑角度范围

根据航天用超薄壁弯管的技术要求,弯管内侧无明显起皱,外侧无塌陷,弯管的 $\zeta_{1,\max}$ 和 $\zeta_{2,\max}$ 都不超过 15%,且最大椭圆度不超过 3.5%。由于 k 一定时, n 的增加会使最大椭圆度减小,当 n 大于一定值后,最大椭圆度的减小量就很小。考虑到抽芯难度及制造成本,要求最大椭圆度在 1.5%~3.5%之间,以便于控制抽芯难度和经济性。

根据 k 的不同,将 21 种芯棒支撑方案的弯管 $\zeta_{1,\max}$ 、 $\zeta_{2,\max}$ 和最大椭圆度分成 3 组分别进行分析,筛选出符合要求的弯管。 k 为 24.0 mm 时的仿真结果见表 6。

从表 6 可以看出, k 为 24.0 mm 时, n 从 2~8 所对应的 $\zeta_{1,\max}$ 和 $\zeta_{2,\max}$ 都在技术要求的范围之内。

表 6 芯球厚度为 24.0 mm 时的仿真结果

参数	数值						
n	2	3	4	5	6	7	8
$\zeta_{1,\max}$	12.69	12.83	13.05	13.06	13.08	12.97	12.94
$\zeta_{2,\max}$	13.96	13.87	13.91	13.93	13.89	13.90	13.92
$\varphi_{\max}$	4.428	2.997	1.585	0.902	0.503	0.360	0.357

当 $n=2$ 时,弯管的最大椭圆度为 4.428% ;当 $n=5, 6, 7, 8$ 时,弯管的最大椭圆度都小于 1.5% ,也不符合要求。最终, $k=24.0\text{ mm}$ 时, $n=3, 4$ 的这两种芯棒支撑方案符合要求。同理,对 $k=17.5\text{ mm}$ 的仿真结果进行分析和筛选,得到 $n=4, 5$ 的这两种芯棒支撑方案符合要求;当 $k=13.6\text{ mm}$ 时, $n=4, 5, 6$ 的这 3 种芯棒支撑方案符合要求。

将以上 7 种不同芯棒支撑方案换算成芯棒支撑角度,如表 7 所示。为研究芯棒支撑角度与管材的弯曲角度 θ 的关系,以弯曲角度作为参照,用芯棒支撑角度与弯曲角度的比值来表示。

表 7 7 种弯管芯棒支撑角度对比			
k/mm	n	$\theta_m/(\text{^\circ})$	$\theta_m \cdot \theta^{-1}$
24	3	25.3	0.44
	4	33.2	0.58
17.5	4	25.3	0.44
	5	31.2	0.55
13.6	4	20.6	0.36
	5	25.3	0.44
	6	30.0	0.53

从表 7 可以看出,随着 k 的减小, θ_m 的下限越来越接近 $\frac{\theta}{2}$,所以将 θ_m 的下限定为 $\frac{\theta}{2}$ 。表中难以直接确定 θ_m 的上限。但已知,当 $k=13.6\text{ mm}$ 、 $n=4$ 、 $\theta_m=0.36\theta$ 时,计算得出的弯管是符合要求的;而当 $k=17.5\text{ mm}$ 、 $n=3$ 、 $\theta_m=0.33\theta$,以及 $k=24\text{ mm}$ 、 $n=2$ 、 $\theta_m=0.31\theta$ 时,计算出的弯管不符合要求的。所以,可以得出, θ_m 的上限约在 $0.33\theta\sim0.36\theta$ 之间,考虑到误差,这里将 θ_m 的上限定为 $\frac{\theta}{3}$ 。最终,可以得出合理的 θ_m 范围为 $\frac{\theta}{3}\sim\frac{\theta}{2}$ 。这里需要说明的是:当 θ_m 小于 $\frac{\theta}{3}$ 时,管材可能会由于支撑不足而出现较大的椭圆度,甚至扁化、塌陷,所以 θ_m 至少为 $\frac{\theta}{3}$;当 θ_m 大于 $\frac{\theta}{2}$ 时,弯管的壁厚减薄率、壁厚增厚率以及椭圆度变化不是很大,但是为了控制抽芯难度和经济性,所以 θ_m 不宜超过 $\frac{\theta}{2}$ 。

从 3.3 节的结果分析可以发现,在上述 θ_m 范围内,随着芯球厚度的减小,弯管最大壁厚减薄率和最大椭圆度都有所减小,最大壁厚增厚率没有明显的

规律,且变化幅度很小,可以忽略。因此,在上述 θ_m 范围内,采用厚度较小的芯球有利于提高弯管的成形质量。

4.2 芯棒支撑角度范围验证

4.2.1 验证方案设计 根据上节得出的 θ_m 范围,可以计算出 $\theta=90^\circ$ 时所对应的 θ_m 为 $30^\circ\sim45^\circ$ 之间,即该 θ_m 至少为 30° ,最大不超过 45° 。选取 $k=13.6\text{ mm}$ 、 $n=5\sim9$,对应的 θ_m 见表 8。

表 8 芯棒支撑角度范围验证方案设计		
k/mm	n	$\theta_m/(\text{^\circ})$
13.6	5	25.3
	6	30.0
	7	34.7
	8	39.5
	9	44.2

4.2.2 仿真与结果分析 对表 8 这 5 种芯棒支撑方案进行仿真计算,并对结果进行分析。当弯管弯曲角度为 90° 时,不同芯球个数下测得的弯管壁厚减薄率、增厚率以及椭圆度见图 17~图 19。从图中可以看出,当 $\theta_m < \frac{\theta}{3}$,即 $n=5$ 时,弯管的壁厚减薄率和增厚率都较好,但弯管的最大椭圆度超过了 3.5% ,所以不满足要求。当 $\theta_m = \frac{\theta}{3}$,即 $n=6$ 时,弯管的壁厚减薄率、增厚率以及椭圆度都满足要求,从而验证了 θ_m 至少为 $\frac{\theta}{3}$ 的有效性。当 $\theta_m > \frac{\theta}{3}$,即 $n=7, 8, 9$ 时,弯管的壁厚减薄率和椭圆度都较好。但 $n=8, 9$ 时,即 $\theta_m=39.5^\circ$ 和 44.2° 时,弯管的最大壁厚增厚率超过了 15% ,不满足要求。因此,只有 $n=7$ 时,即 $\theta_m=34.7^\circ$ 时满足所有技术指标要求,且 34.7° 的芯棒支撑角度处于 $30^\circ\sim45^\circ$,即处于 $\frac{\theta}{3}\sim\frac{\theta}{2}$ 范围内。

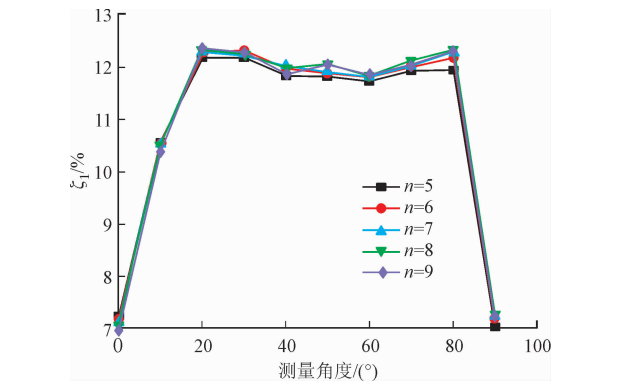


图 17 壁厚减薄率变化曲线

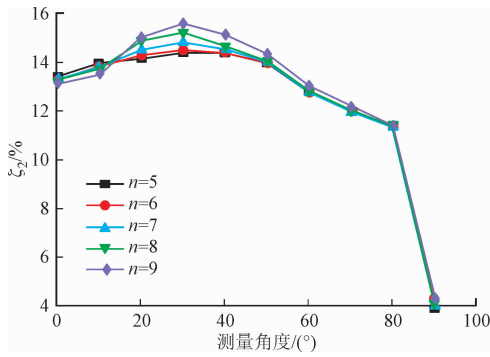


图18 壁厚增厚率变化曲线

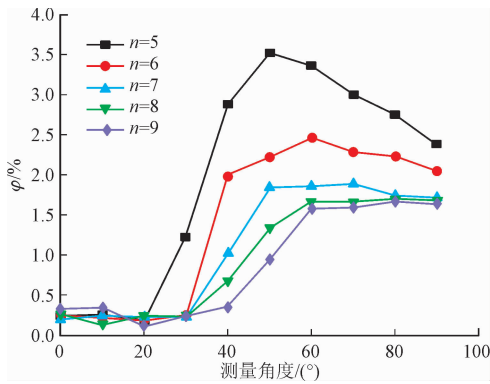


图19 椭圆度变化曲线图

5 总结

(1) 芯球个数对弯管外侧壁厚减薄率的变化有一定的影响。芯球个数适中时,壁厚减薄率比较均匀,最大壁厚减薄率出现的位置随着芯球个数的增加,由起弯处往弯曲中心移动。芯球个数相同时,芯球厚度越小,最大壁厚减薄率也越小。在一定芯棒支撑角度范围内,最大壁厚减薄率随着芯棒支撑角度的增大而变大。

(2) 芯球个数和芯球厚度对弯管壁厚增厚率的影响都较小。在一定芯棒支撑角度范围内,随着芯棒支撑角度的增大,弯管最大壁厚增厚率有先减小后增大的变化趋势。

(3) 芯球个数、芯球厚度和芯棒支撑角度对弯管椭圆度均有明显影响。随着芯球个数和芯球厚度的增加,椭圆度逐渐减小。随着芯棒支撑角度的增大,椭圆度先减小后趋于稳定。

(4) 针对超薄壁不锈钢管材,合理的芯棒支撑角度为 $\frac{\theta}{3} \sim \frac{\theta}{2}$ 。在上述范围内,采用厚度较小的芯球有利于提高弯管的成形质量,并进行了应用验证。

参考文献:

- [1] LI Heng, YANG He, YAN Jing, et al. Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube NC bending with large diameter and small bending radius [J]. Computational Materials Science, 2009, 45: 921-934.
- [2] 方军, 鲁世强, 王克鲁, 等. 21-6-9 高强不锈钢管数控弯曲回弹对材料参数的敏感性 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 59(3): 136-142.
FANG Jun, LU Shiqing, WANG Kelu, et al. Sensitivity analysis of springback to material parameters in high strength 21-6-9 stainless steel tube NC bending [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 59(3): 136-142.
- [3] YANG He, YAN Jing, ZHAN Mei, et al. 3D numerical study on wrinkling characteristics in NC bending of aluminum alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints [J]. Computational Materials Science, 2009, 45: 1052-1067.
- [4] 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: Technological Sciences, 2010, 53(2): 326-342.
- [5] LIU Nan, YANG He, LI Heng, et al. An imperfection-based perturbation method for plastic wrinkling prediction in tube bending under multi-die constraints [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 98: 178-194.
- [6] LI Guangjun, YANG Heng, XU Xudong, et al. Formability of thin-walled commercial pure titanium tube upon rotary draw bending [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(1): 26-32.
- [7] 张静静, 杨合, 詹梅, 等. 助推作用对大口径铝合金薄壁管数控弯曲壁厚减薄和回弹的影响 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1): 60-65.
ZHANG Jingjing, YANG He, ZHAN Mei, et al. Effects of pressing die's boosting function on wall thinning and springback in NC bending process of thin-walled tube with large diameter [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(1): 60-65.
- [8] WANG Xiaosong, LI Feng. Analysis of wall thickness variation in the hydro-bending of a double-layered tube [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 67-72.
- [9] 金先玉, 李华冠, 凌娟, 等. 6061 铝合金超薄壁管的充液压弯数值模拟与试验 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22(5): 69-75.

- JIN Xianyu, LI Huaguan, LING Juan, et al. Numerical simulation and experimental investigation on press-bending with internal pressure of ultra thin-walled tube of 6061 aluminum alloy [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2015, 22(5): 69-75.
- [10] LI Heng, YANG He, ZHAN Mei, et al. Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47: 1164-1175.
- [11] 刘婧瑶, 唐承统, 宁汝新, 等. 薄壁管数控弯曲成形中芯轴参数的确定 [J]. *机械设计与研究*, 2008, 24(5): 70-73.
- LIU Jingyao, TANG Chengtong, NING Ruxin, et al. Ensuring the mandrel parameter in NC bending process of thin-walled tube [J]. *Machine Design and Research*, 2008, 24(5): 70-73.
- [12] 李思漪, 夏琴香, 盛湘飞, 等. 基于数值模拟的薄壁管冷弯成形工艺研究 [J]. *锻压技术*, 2011, 36(4): 163-167.
- LI Siyi, XIA Qinxian, SHENG Xiangfei, et al. Study of forming process for thin-walled tube rotary bending based on numerical simulation [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2011, 36(4): 163-167.
- [13] 田玉丽, 杨合, 李恒, 等. 6061-T4 大直径薄壁管数控弯曲壁厚变化实验研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2012, 20(2): 23-29, 34.
- TIAN Yuli, YANG He, LI Heng, et al. Experimental study on wall thickness variation in NC bending of 6061-T4 large diameter thin-walled tubes [J]. *Materials Science & Technology*, 2012, 20(2): 23-29, 34.
- [14] 王刘安, 王颖, 刘忠利, 等. 6061 铝合金薄壁管绕弯成形数值模拟及实验研究 [J]. *锻压技术*, 2015, 40(6): 60-66.
- WANG Liu'an, WANG Ying, LIU Zhongli, et al. Numerical simulation and experimental research on the rotary bending of 6061 aluminium alloy tube [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2015, 40(6): 60-66.
- [15] XU J, YANG H, ZHAN M, et al. Design and optimisation of mandrel parameters for thin walled aluminium alloy tube NC bending [J]. *Materials Research Innovations*, 2011, 15(S1): s365-s369.
- [16] 刘志文, 董菲菲, 李落星, 等. 汽车防护杠用大口径薄壁钢管绕弯成形工艺参数优化 [J]. *汽车工程*, 2015, 37(7): 853-860.
- LIU Zhiwen, DONG Feifei, LI Luoxing, et al. Process parameters optimization of rotary draw bending for large diameter thin-walled steel tube for automotive bumper [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(7): 853-860.
- [17] MENTELLA A, STRANO M. Rotary draw bending of small diameter copper tubes; predicting the quality of the cross-section [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(2): 267-278.
- [18] ZHANG H L, LIU Y L, YANG H. Deformation behaviors of double-ridged rectangular H96 tube in rotary draw bending under different mandrel types [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82: 1569-1580.
- [19] SALEM M, FARZIN M, KADKHODAEI M, et al. A chain link mandrel for rotary draw bending: experimental and finite element study of operation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(5/6/7/8): 1071-1080.
- [20] XUE X, LIAO J, VINCZE G, et al. Modelling of mandrel rotary draw bending for accurate twist spring-back prediction of an asymmetric thin-walled tube [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015 (216): 405-417.
- [21] JIANG Lanfang, LIN Weiming, WEN Donghui, et al. A new bionic elastic mandrel for application in the spatial consecutive RDB with no straight line [J]. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 2015(25): 12-18.
- [22] JIANG Lanfang, ZHANG Shuyou, WANG Yaqu, et al. Research on a bending forming method for large diameter-to-thickness ratio thin-walled tubes for aerospace [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102 (9/10/11/12): 3037-3049.
- [23] SEDIGHI M, KAHNAMOEI J T. Role of filling material on defects of thin-walled tube bending process [J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 52(1): 227-233.

(编辑 杜秀杰)