

管材成形

## 工艺参数对弹性模量变化条件下高强不锈钢管绕弯回弹行为的影响

方 军<sup>1</sup>, 欧阳芳<sup>2</sup>, 尚文瑄<sup>1</sup>, 鲁世强<sup>2</sup>, 王克鲁<sup>2</sup>, 向军淮<sup>1</sup>

(1. 江西科技师范大学 材料与机电学院, 江西 南昌 330038; 2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 采用反复加载-卸载拉伸试验获得了高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管的弹性模量随塑性变形的变化规律, 构建了弹性模量与塑性应变之间的函数关系, 并嵌入 ABAQUS 软件中模拟了工艺参数对高强不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响, 分析了回弹对工艺参数的敏感性。结果表明: 弹性模量变化和恒定条件下, 工艺参数对高强不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响的变化趋势相似, 只是弹性模量变化条件下的回弹值增大了; 回弹角和回弹半径随着芯棒伸出量、弯曲速度、助推速度的增大或管材/芯棒间隙、管材/弯曲模间隙、管材/弯曲模摩擦因数的减小而减小。回弹半径对工艺参数更为敏感, 其敏感性大小依次为: 管材/弯曲模间隙、管材/弯曲模摩擦因数、助推速度、弯曲速度、芯棒伸出量和管材/芯棒间隙, 而回弹角对各工艺参数的敏感性不显著。

**关键词:** 高强不锈钢管; 回弹; 弹性模量; 数控绕弯; 塑性应变

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.019

**中图分类号:** TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 11-0137-09

## Influence of process parameters on springback behavior in rotary draw bending under variable elastic modulus condition for high strength stainless steel tube

Fang Jun<sup>1</sup>, Ouyang Fang<sup>2</sup>, Shang Wenxuan<sup>1</sup>, Lu Shiqiang<sup>2</sup>, Wang Kelu<sup>2</sup>, Xiang Junhui<sup>1</sup>

(1. School of Materials and Mechatronics, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China;

2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The change law of elastic modulus for high strength 0Cr21Ni6Mn9N stainless steel tube versus plastic deformation was obtained by using the repeated loading-unloading tensile tests, and the function relationship between elastic modulus and plastic strain was established, which was embedded into software ABAQUS to simulate the influences of process parameters on springback behavior in numerical control (NC) rotary draw bending for high strength stainless steel tube. Then, the sensitivity of springback to process parameters was analyzed. The results show that the change trend of the influence of process parameters on springback behavior in NC rotary draw bending for high strength stainless steel tube is similar under the conditions of variable elastic modulus and constant elastic modulus, but only the value of springback under the condition of variable elastic modulus increases. Springback angle and radius decrease with the increasing of mandrel extension length, bending speed and push assistant speed or with the decreasing of clearance between tube and mandrel, clearance between tube and bending die and friction coefficient between tube and bending die. The springback radius is more sensitive to the process parameters, and its sensitivity sorts from the largest to the smallest is clearance between tube and bending die, friction coefficient between tube and bending die, push assistant speed, bending speed, mandrel extension length and clearance between tube and mandrel, while the sensitivity of springback angle to various process parameters is not significant.

**Key words:** high strength stainless steel tube; springback; elastic modulus; NC rotary draw bending; plastic strain

高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢弯管构件由于具有

高强度、耐腐蚀、耐高温和抗高温氧化性等优点, 在飞机的喷管和液压、燃油、环控等管路系统得到了越来越多的关注和应用<sup>[1]</sup>。相对于钛合金管, 其不但能够承受较大的工作压力, 满足航空航天领域对薄壁轻量化构件的迫切需求, 而且价格相对便宜<sup>[1]</sup>。在推弯、滚弯等众多管材弯曲成形方法中,

收稿日期: 2021-12-04; 修订日期: 2022-03-06

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目 (20192BAB216022);  
江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ201126, GJJ180615)

作者简介: 方 军 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: fangjun020j13@163.com

数控绕弯具有精确、高效、智能和数字化等特点,是实现高强不锈钢管精确、高效弯曲成形的首选方法<sup>[2]</sup>。然而,由于具有屈弹比高的特性,高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管弯曲成形后会产生显著的回弹现象<sup>[3-4]</sup>,严重影响高强不锈钢弯管构件的尺寸和形状精度,从而影响与其他部件的连接和密封性能。回弹依赖于弯管的弹性变形,而弹性模量是评价弯管抵抗弹性变形能力的关键参数,对回弹有着重要影响,并且弹性模量通常是随着塑性变形的增加而变化的。另外,回弹与管材弯曲历史密切相关,而且受工艺参数的影响。因此,研究工艺参数对弹性模量变化条件下高强不锈钢管绕弯回弹行为的影响,对精确预测和有效控制回弹、实现高强不锈钢管精确绕弯成形具有重要的理论意义和工程运用价值。

截止目前,国内外研究机构和学者对管材弯曲回弹行为进行了大量的研究。Al-Qureshi H A 等<sup>[5]</sup>基于理想弹塑性、平面应变且不考虑包辛格效应等假设,采用梁弯曲理论推导出管材纯弯曲的回弹解析公式,并用于铝合金薄壁管纯弯曲回弹的预测。Lu S Q 等<sup>[6]</sup>根据虚功原理和回弹前后中性层长度保持不变的原则,推导出回弹角和回弹半径的近似计算公式。方军等<sup>[7]</sup>根据弹塑性理论推导出管材弯曲回弹角和回弹半径的解析公式,并用于 21-6-9 高强不锈钢管数控弯曲回弹的预测。Ma J 等<sup>[8]</sup>通过综合考虑材料、几何和工艺等关键参数,建立了管材弯曲回弹的广义解析模型,实现了管材弯曲回弹的高效、准确预测,特别是拉压不对称的管材。Zhan M 等<sup>[9]</sup>根据静力平衡条件,并考虑焊缝材料性能、收缩应变比的连续变化以及焊缝位置的影响,建立了焊管弯曲回弹的解析模型。陈光耀等<sup>[10]</sup>采用基于优化的误差反向传播神经网络的机器学习算法建模,提出了考虑材料和几何参数等的弯管回弹预测与控制方法,并应用于铝合金管数控弯曲回弹的预测。Wu W Y 等<sup>[11]</sup>采用数控弯管机研究了温度、弯曲速度和原始晶粒尺寸对变形镁合金 AM30 管数控绕弯回弹的影响,发现中等温度、小弯曲速度以及小原始晶粒尺寸可以减小回弹率。Li H 等<sup>[12]</sup>研究了弯曲角度、弯曲速度、芯棒伸出量和芯球个数对 6061-T4 铝合金薄壁管数控弯曲回弹角的影响。Saleem M 等<sup>[13]</sup>试验研究了链环芯棒对 AISI304 钢管数控弯曲回弹的影响,发现链环芯棒有利于减小回弹,并显著提高了薄壁管的弯曲成形性能和成形质量。蔡伟等<sup>[14]</sup>研究了弯曲角度、弯曲速度、管材壁厚对

0Cr18Ni9 钢管材大曲率无芯弯曲回弹的影响,发现回弹角随着弯曲角、弯曲速度的增大或管材壁厚的减小而增大。方军等<sup>[15]</sup>通过数值模拟研究了材料参数对 21-6-9 高强不锈钢管数控绕弯回弹的影响,并揭示了回弹对材料参数的敏感性。Zhu Y X 等<sup>[16]</sup>采用有限元模拟结合敏感性分析数学模型,研究和对比了工艺条件对矩形 H96 铜管绕弯回弹和截面畸变的影响,揭示了管材绕弯过程中回弹和截面畸变的耦合影响。Xue X 等<sup>[17]</sup>建立了 AA6060-T4 铝合金薄壁不对称管材有芯绕弯成形有限元模型,利用该模型评估了芯棒伸出量和顶推加载对扭转回弹的控制效果。李恒等<sup>[18-19]</sup>基于 ABAQUS Explicit/Implicit 有限元软件建立了高强 Ti-3Al-2.5V 钛管绕弯回弹全过程的有限元模型,研究了其绕弯回弹行为,提出了两级迭代回弹补偿的方法,以实现高强钛管的精确绕弯成形。Fang J 等<sup>[20-21]</sup>揭示了 21-6-9 高强不锈钢管的弹性模量随塑性应变的变化规律,并将其嵌入管材弯曲有限元模型中,模拟研究了弹性模量变化对回弹、壁厚减薄和截面畸变的影响,以及几何和工艺参数对壁厚减薄的影响。以上研究发现,在管材弯曲回弹的研究过程中常常忽略了弹性模量随塑性应变的增加而变化的特征,这种处理方式,尤其对于屈弹比高的高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管,在一定程度上会影响回弹预测的精度,显然不能满足高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯精确成形技术发展的需求。因此,为了实现高强不锈钢管数控绕弯精确成形,本文以规格为  $\Phi 9.53 \text{ mm} \times 0.51 \text{ mm}$  (管径 $\times$ 壁厚)的高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管为对象,在获得高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管弹性模量随塑性应变的增加而变化的基础上,建立弹性模量变化和恒定条件下的高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯成形及回弹全过程有限元模型,研究和对比弹性模量变化和恒定条件下不同工艺参数对其数控绕弯回弹行为的影响规律,并基于修正的敏感性分析模型,揭示弹性模量变化条件下回弹对工艺参数的敏感性。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用材料为进口高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管,是一种用氮固溶强化的 Cr-Ni-Mn-N 系奥氏体不锈钢,其化学成分如表 1 所示<sup>[1]</sup>。从表 1 中可以看出,高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管中 Ni 的含量

表 1 高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管材的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of high strength 0Cr21Ni6Mn9N stainless steel tube (%, mass fraction)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N	Mo	Cu
≤0.04	8.00~10.00	≤1.00	≤0.03	≤0.03	19.00~21.50	5.50~7.50	0.15~0.40	≤0.75	≤0.75

少, Mn、N 的含量高, 是用 Mn、N 代替部分 Ni 来稳定奥氏体组织, 以节约稀有贵金属 Ni 的高锰高氮少镍奥氏体不锈钢。

1.2 管材单向拉伸实验

根据 GB/T 228.1—2021<sup>[22]</sup> 设计管段拉伸试样和管塞, 然后在 TNSRTON8801 材料伺服实验机上进行单向拉伸实验, 获得高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管的真应力-真应变曲线以及材料力学性能参数, 如图 1 和表 2 所示<sup>[23]</sup>。采用 Ludwigson 方程  $\sigma = K\varepsilon^n + \exp(a+b\varepsilon)$  表征管材的加工硬化行为, 其中,  $\sigma$  为真应力,  $\varepsilon$  为真应变,  $K$  为强度系数,  $n$  为硬化指数,  $a$  和  $b$  为常数。

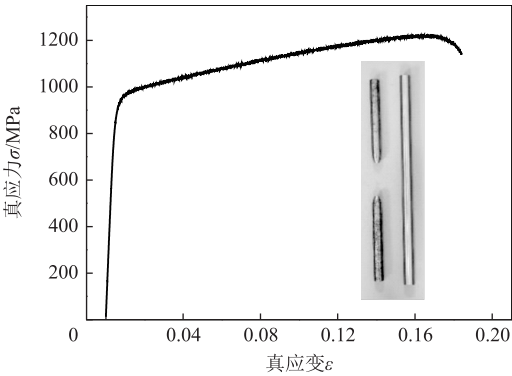


图 1 高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管的真应力-真应变曲线

Fig. 1 Ture stress-true strain curve of high strength 0Cr21Ni6Mn9N stainless steel tube

表 2 高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of high strength 0Cr21Ni6Mn9N stainless steel tube

参数	初始弹性模量 $E_0$ /GPa	屈服强度 $R_{el}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	伸长率 $A$ /%	强度系数 $K$ /MPa	硬化指数 $n$	常数 $a$	常数 $b$
数值	206.30	906.46	1043.73	24.00	1553.40	0.13	5.30	-47.40

1.3 管材反复加载-卸载拉伸实验

为了建立弹性模量与塑性应变两者之间的精确关系, 在 TNSRTON8801 材料伺服实验机上开展高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管反复加载-卸载拉伸实验。拉伸试样和管塞与单向拉伸实验相同。在进行反复加载-卸载拉伸实验时, 通常将单个试样拉伸至某一应变, 然后将载荷卸载至零, 重复进行加载-卸载循环以获得足够的实验数据。每次实验进行 3 次以消除误差的影响。通过弹性阶段的应力-应变曲线 (图 2, 其中  $\varepsilon_0$  为初始应变,  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$  为某

一应变,  $E_1 \sim E_4$  为应变对应的弹性模量), 采用线性回归方法可以获得不同塑性应变条件下的弹性模量值, 如图 3 所示<sup>[20]</sup>。从图 3 中可以看出, 高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管的弹性模量随着塑性应变的增加先急剧下降, 然后缓慢下降, 最后趋于稳定。

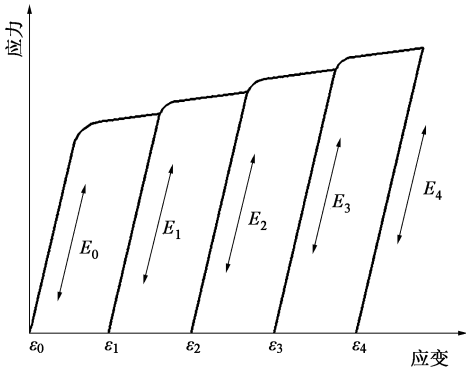


图 2 弹性模量的计算方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculate method for elastic modulus

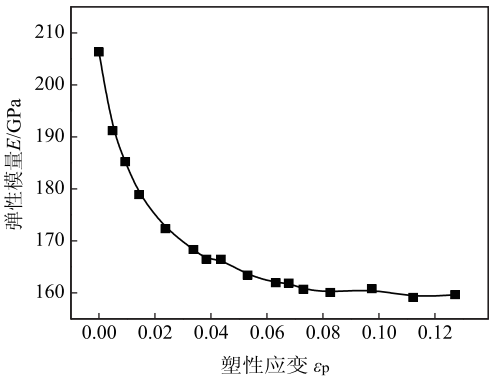


图 3 弹性模量随塑性应变的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of elastic modulus with plastic strain

采用一阶指数衰减函数描述弹性模量随塑性应变的变化规律, 如式 (1) 所示。

$$E_c = E_s + (E_0 - E_s) \exp(-\zeta \varepsilon_p) \quad (1)$$

式中:  $E_c$  为弹性模量的瞬时值;  $E_s$  为弹性模量的稳

定值;  $\varepsilon_p$  为塑性应变;  $\zeta$  为确定  $E_c$  下降率的力学参量。

采用反复加载-卸载拉伸实验的实验数据可以拟合获得弹性模量与塑性应变之间的函数关系, 如式 (2) 所示。

$$E_c = 160.5 + (206.3 - 160.5) \exp(-57.6\varepsilon_p) \quad (2)$$

#### 1.4 管材数控绕弯成形质量表征

采用外侧壁厚减薄率  $\Delta t$ 、截面畸变率  $\Delta D$ 、回弹角  $\Delta\theta$  和回弹半径  $\Delta R$  来评价管材数控绕弯成形质

量。

$$\Delta t = (t - t')/t \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta D = (D - D')/D \times 100\% \quad (4)$$

$$\Delta\theta = \theta - \theta' \quad (5)$$

$$\Delta R = R' - R \quad (6)$$

式中:  $t$  为管材原始壁厚;  $t'$  为弯曲后管材最小壁厚;  $D$  为管材原始外径;  $D'$  为弯曲后管材纵向外径;  $\theta$  为弯曲角;  $\theta'$  为成形角;  $R$  为弯曲半径;  $R'$  为成形半径。以上参数具体如图 4 所示。

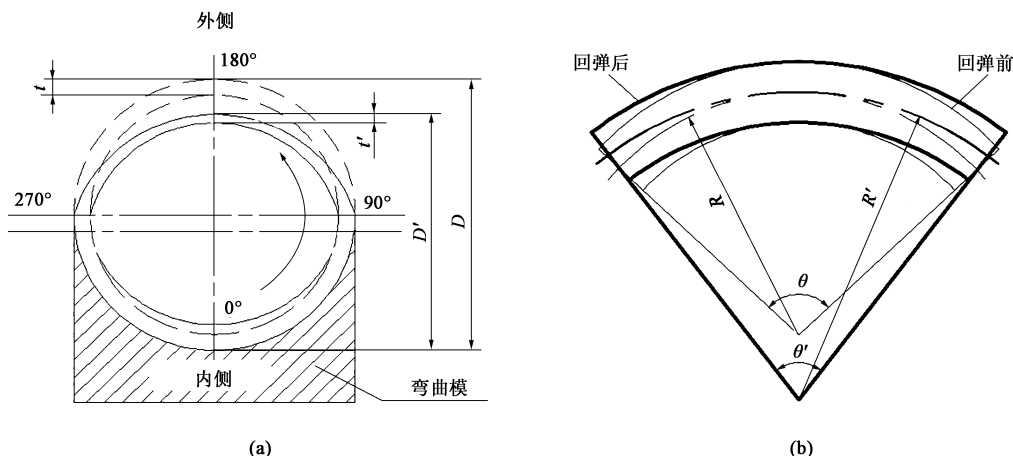


图 4 弯管变形示意图

(a) 壁厚减薄和截面畸变 (b) 回弹

Fig. 4 Schematic diagrams of bent tube deformation

(a) Wall thickness thinning and cross section distortion (b) Springback

#### 1.5 有限元模型建立及可靠性验证

根据数控弯管机的工作原理, 基于 ABAQUS Explicit/Implicit 有限元软件, 建立  $\Phi 9.53 \text{ mm} \times 0.51 \text{ mm}$  的高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯成形及回弹全过程有限元模型, 如图 5 所示。其

中, 弯曲半径  $R = 28.59 \text{ mm}$ ,  $v_p$  为助推速度,  $w$  为弯曲速度。采用显式算法计算弯管和抽芯过程, 采用隐式算法求解回弹过程。通过 ABAQUS/Explicit 子程序接口 VUMAT 将考虑弹性模量变化的本构方程嵌入有限元模型中以模拟弯管和抽芯过

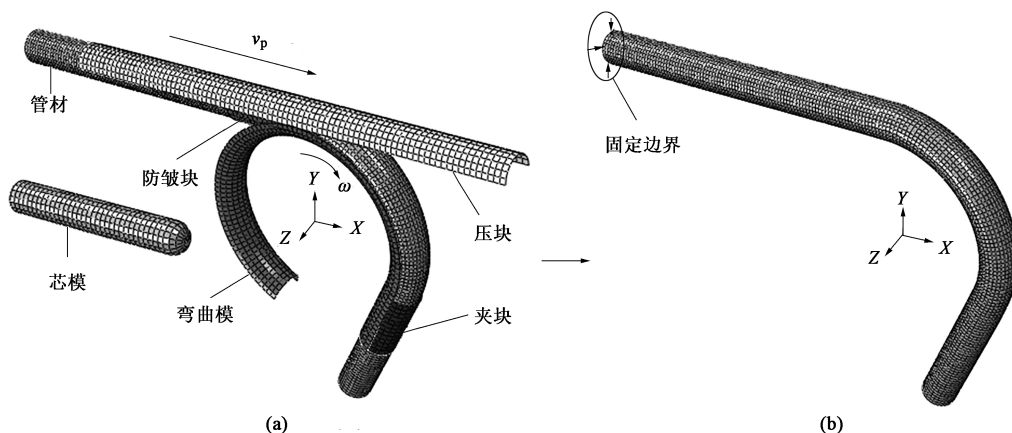


图 5 高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管的全过程有限元模型

(a) 数控绕弯成形 (b) 回弹

Fig. 5 Finite element model of the whole process for high strength 0Cr21Ni6Mn9N stainless steel tube

(a) NC rotary draw bending (b) Springback



程。由于回弹被假设为纯弹性卸载过程，且未有反向屈服发生，因此，通过 ABAQUS/Standard 子程序接口 UMAT 将考虑弹性模量变化的本构方程嵌入有限元模型中来模拟回弹过程。采用管材基本力学性能参数和屈服后的真应力-真应变曲线来模拟恒定弹性模量条件下管材数控绕弯成形及回弹过程。详细的建模过程可以参考文献 [20] 和文献 [21]。

为了验证有限元模型的可靠性，对高强

0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管进行了弯曲角度为 180° 的数控绕弯成形实验研究，其中，弯曲实验条件与模拟条件一致。图 6 为高强不锈钢弯管构件外形的模拟结果和实验结果对比，从图 6 中可以看出，考虑弹性模量变化的模拟结果与实验结果吻合更好。表 3 为高强不锈钢管数控绕弯回弹的模拟结果与实验结果对比。从表 3 可以看出，考虑弹性模量变化的模拟结果更接近实验结果，其回弹角和回弹半径的预测精度分别提高了 11.98% 和 7.62%。

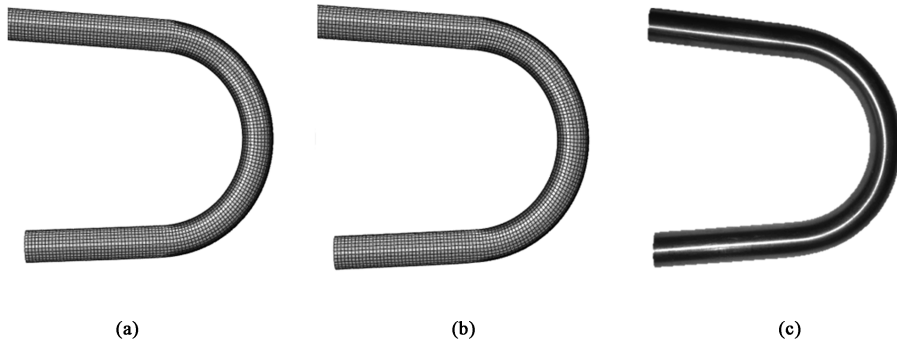


图 6 弯管件外形对比  
(a) 弹性模量恒定的模拟结果 (b) 弹性模量变化的模拟结果 (c) 实验结果  
Fig. 6 Comparison of configuration for bent tube parts  
(a) Simulative result with constant elastic modulus (b) Simulative result with variation elastic modulus  
(c) Experimental result

表 3 回弹模拟结果与实验结果对比  
Table 3 Comparison of springback between simulation results and experimental results

成形质量 指标	实验结果	模拟结果		相对误差/%	
		弹性模量 变化	弹性模量 恒定	弹性模量 变化	弹性模量 恒定
回弹角 $\Delta\theta/(\text{°})$	8.10	6.96	5.99	14.07	26.05
回弹半径 $\Delta R/\text{mm}$	1.05	0.89	0.81	15.24	22.86

考虑到回弹与弯曲变形历史密切相关，因此，对弯管壁厚减薄和截面畸变也进行了对比验证。图 7 为高强不锈钢管数控绕弯成形壁厚减薄和截面畸变的有限元模拟结果与实验结果对比，从图 7 中可以看出，弹性模量变化和恒定条件下的模拟结果的变化趋势相似，只是前者的数值增大了，且考虑弹性模量变化的模拟结果更接近实验值。弹性模量变化和恒定条件下的最大壁厚减薄率的模拟结果与实验结果的相对误差分别为 7.72% 和 19.27%，最大截面畸变率的模拟结果与实验结果的相对误差分别

为 5.23% 和 40.76%，最大壁厚减薄率和最大截面畸变率的预测精度分别提高了 11.55% 和 35.53%。这说明考虑弹性模量变化的有限元模型更准确、可靠，能够更好地反映实际弯曲变形过程，可用于研究工艺参数对高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响。

2 结果与讨论

采用所建立的考虑弹性模量变化的高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯成形及回弹全过程有限元模型，研究工艺参数对弹性模量变化条件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响，并与弹性模量恒定条件下的高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为进行对比。在模拟过程中，工艺参数的波动范围如表 4 所示，其中粗体字为基准状态下的值。其他弯曲条件为：弯曲半径为 28.59 mm，弯曲角为 180°，管材/压块间隙及摩擦因数分别为 0.1 mm 和 0.25，管材/防皱块间隙及摩擦因数分别为 0.1 mm 和 0.1，管材/芯棒摩擦因数为 0.05。

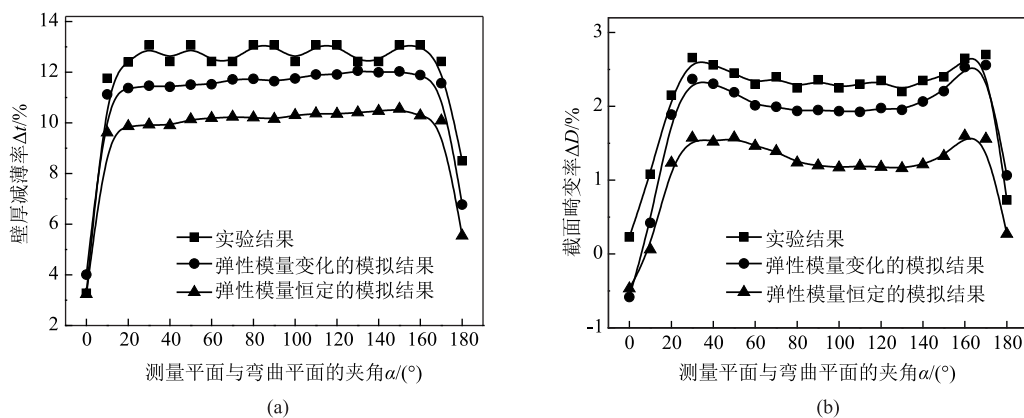


图 7 壁厚减薄率 (a) 和截面畸变率 (b) 的模拟结果与实验结果对比

Fig. 7 Comparison of wall thickness thinning ratios (a) and cross section distortion ratios (b) between simulation and experimental results

表 4 工艺参数波动范围

Table 4 Fluctuation ranges of process parameters

参数	波动范围					
芯棒伸出量 $e/\text{mm}$	0.0	0.5	1.0	1.5	<b>2.0</b>	2.5
弯曲速度 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.2	<b>0.4</b>	0.8	1.0	1.2	—
助推速度 $v_p$	0.8	0.9	<b>1.0</b>	1.1	1.2	—
管材/芯棒间隙 $C_m/\text{mm}$	<b>0.075</b>	0.100	0.150	0.200	0.300	—
管材/弯曲模间隙 $C_b/\text{mm}$	0.075	<b>0.100</b>	0.125	0.150	0.200	—
管材/弯曲模摩擦因数 $f_b$	0.05	<b>0.10</b>	0.20	0.30	0.50	—

注:  $v_p$  = 压块速度/弯曲模切向线速度。

## 2.1 工艺参数对管材数控绕弯回弹行为的影响

图 8a 为芯棒伸出量  $e$  对弹性模量变化和恒定条件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响。从图 8a 可以看出, 两种情况下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹的变化趋势相似, 但考虑弹性模量变化下的回弹角和回弹半径增大。当芯棒伸出量从 0.0 mm 增加至 2.5 mm 时, 回弹角和回弹半径均减小, 即弹性模量变化条件下的回弹角从  $8.1^\circ$  降低至  $7.0^\circ$ , 降幅为  $0.9^\circ$ , 回弹半径从 1.12 mm 降低至 0.88 mm, 降幅为 0.24 mm; 弹性模量恒定条件下的回弹角从  $6.6^\circ$  降低至  $6.0^\circ$ , 降幅为  $0.6^\circ$ , 回弹半径从 0.99 mm 降低至 0.77 mm, 降幅为 0.22 mm。这与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢薄壁管数控绕弯回弹行为不同<sup>[24]</sup>, 这是由于: (1) 随着芯棒伸出量的增加, 轴向拉应力增加, 相应的弯矩减小, 从而导致回弹角和回弹半径减小; (2) 随着芯棒伸出量的增加, 芯棒对管材的支撑作用增加, 使得横截面畸变程度减小, 相应的弯曲刚度增加, 从而导致回弹角和回弹半径减小。

图 8b 为弯曲速度  $\omega$  对弹性模量变化和恒定条

件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响。从图 8b 可以看出, 两种情况下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹的变化趋势相似, 但考虑弹性模量变化下的回弹角和回弹半径更大。当弯曲速度从  $0.2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  增加至  $1.2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 弹性模量变化条件下的回弹角从  $7.3^\circ$  降低至  $6.3^\circ$ , 降幅为  $1.0^\circ$ , 回弹半径从 0.91 mm 降低至 0.76 mm, 降幅为 0.15 mm; 弹性模量恒定条件下的回弹角从  $6.0^\circ$  降低至  $4.9^\circ$ , 降幅为  $1.1^\circ$ , 回弹半径从 0.85 mm 降低至 0.72 mm, 降幅为 0.13 mm。这是由于: (1) 随着弯曲速度的增加, 管材的屈服强度增大, 从而产生更多的弹性应变能, 使得回弹角和回弹半径增加; (2) 管材在高速弯曲变形时由于摩擦及应变能的作用, 使得金属管材产生一定的温升而软化, 温度升高使得回弹减小。以上两方面综合作用的结果使得回弹角和回弹半径随着弯曲速度的增加而减小。

图 8c 为助推速度  $v_p$  对弹性模量变化和恒定条件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响。从图 8c 可以看出, 两种情况下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹的变化趋势相似, 但考虑弹性模量变化下的回弹角和回弹半径更大。当助推速度从 0.8 增加至 1.2 时, 弹性模量变化条件下的回弹角从  $7.1^\circ$  降低至  $6.7^\circ$ , 降幅为  $0.4^\circ$ , 回弹半径从 0.92 mm 降低至 0.85 mm, 降幅为 0.07 mm; 弹性模量恒定条件下的回弹角从  $6.2^\circ$  降低至  $5.7^\circ$ , 降幅为  $0.5^\circ$ , 回弹半径从 0.87 mm 降低至 0.78 mm, 降幅为 0.09 mm。这与 6061-T4 铝合金薄壁管数控弯曲回弹的结果不同<sup>[12]</sup>, 这是因为: 随着助推速度的增加, 外侧变形程度变化不大, 内侧变形程度增加, 从而导致弹性应变成分占总应变成分略有减小, 表现为回弹角和回弹半径略有

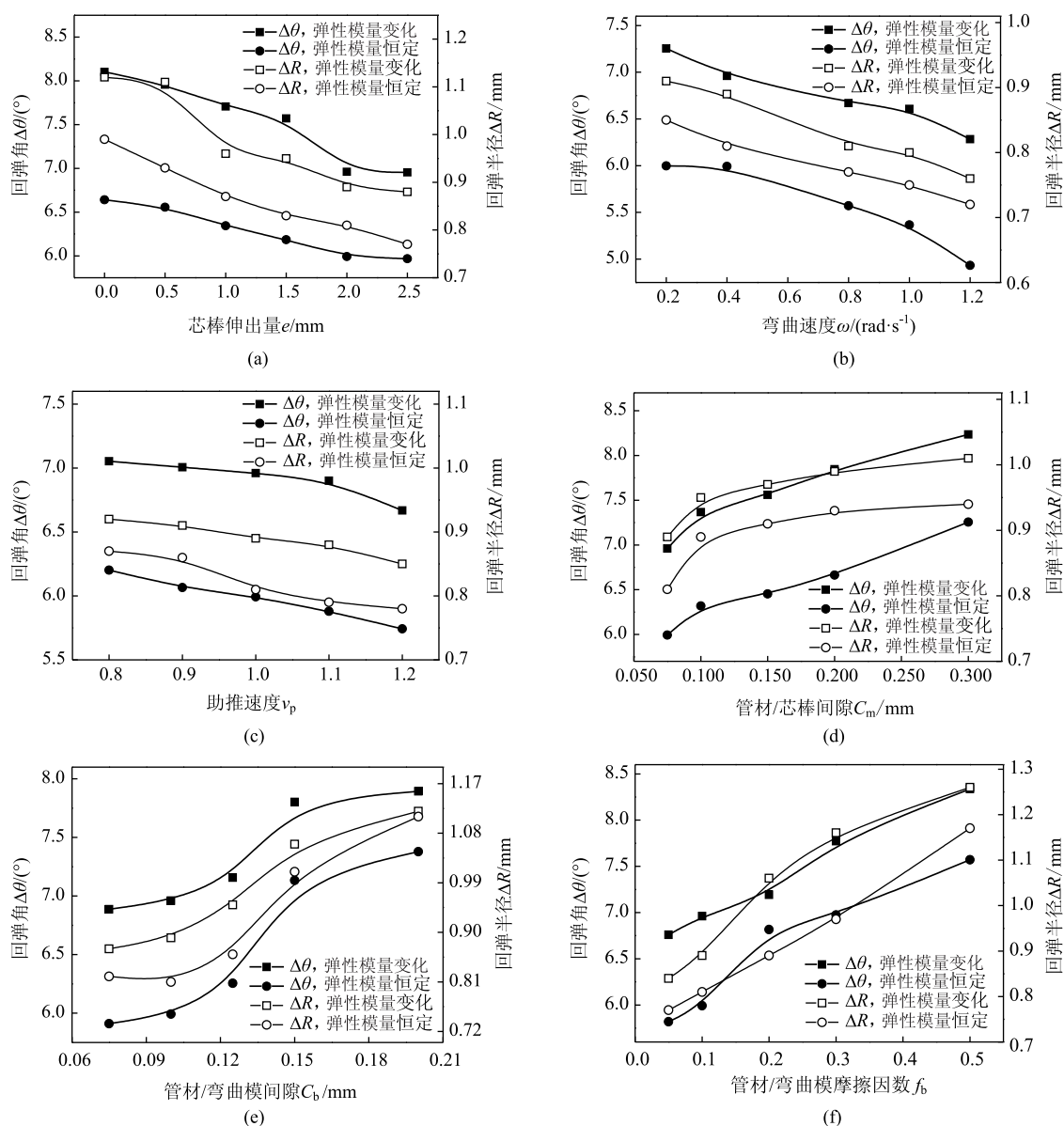


图 8 工艺参数对回弹的影响

(a)  $e$  (b)  $\omega$  (c)  $v_p$  (d)  $C_m$  (e)  $C_b$  (f)  $f_b$ 

Fig. 8 Effects of process parameters on springback

减小<sup>[24]</sup>。

图 8d 为管材/芯棒间隙  $C_m$  对弹性模量变化和恒定条件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响。从图 8d 可以看出, 两种情况下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹的变化趋势相似, 但考虑弹性模量变化下的回弹角和回弹半径更大。当管材/芯棒间隙  $C_m$  从 0.075 mm 增加至 0.300 mm 时, 弹性模量变化条件下的回弹角从  $7.0^\circ$  增加至  $8.2^\circ$ , 增幅为  $1.2^\circ$ , 回弹半径从 0.89 mm 增加至 1.01 mm, 增幅为 0.12 mm; 弹性模量恒定条件下的回弹角从  $6.0^\circ$  增加至  $7.3^\circ$ , 增幅为  $1.3^\circ$ , 回弹半径从 0.81 mm 增加至 0.94 mm, 增

幅为 0.13 mm。这是因为: (1) 增加管材/芯棒间隙使得作用在管材上的轴向拉应力减小, 且由于中性层向外侧移动使得弯矩增加, 因此回弹增加; (2) 增大管材/芯棒间隙使得芯棒对管材的支撑作用减弱, 导致截面畸变增大, 从而使得弯曲刚度减小, 因此回弹增加。

图 8e 为管材/弯曲模间隙  $C_b$  对弹性模量变化和恒定条件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响。从图 8e 可以看出, 两种情况下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹的变化趋势相似, 但考虑弹性模量变化下的回弹角和回弹半径更大。当管材/弯曲模间隙  $C_b$  从 0.075 mm 增加

至 0.200 mm 时,弹性模量变化条件下的回弹角从 6.9° 增加至 7.9°,增幅为 1.0°,回弹半径从 0.87 mm 增加至 1.12 mm,增幅为 0.25 mm;弹性模量恒定条件下的回弹角从 5.9° 增加至 7.4°,增幅为 1.5°,回弹半径从 0.82 mm 增加至 1.11 mm,增幅为 0.29 mm。这是因为:随着管材/弯曲模间隙的增加,截面畸变程度增加<sup>[25]</sup>,导致管材弯曲刚度减小,从而使得回弹角和回弹半径增加。

图 8f 为管材/弯曲模摩擦因数  $f_b$  对弹性模量变化和恒定条件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响。从图 8f 可以看出,两种情况下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹的变化趋势相似,但考虑弹性模量变化的回弹角和回弹半径更大。当管材/弯曲模摩擦因数从 0.05 增加至 0.50 时,弹性模量变化条件下的回弹角从 6.8° 增加至 8.3°,增幅为 1.5°,回弹半径从 0.84 mm 增加至 1.26 mm,增幅为 0.42 mm;弹性模量恒定条件下的回弹角从 5.8° 增加至 7.6°,增幅为 1.8°,回弹半径从 0.77 mm 增加至 1.17 mm,增幅为 0.40 mm。这是因为:增大管材/弯曲模摩擦因数,促进管材弯曲变形,使得轴向拉应力减小,相应的弯矩增加,从而导致回弹角和回弹半径增加。

综上分析,当仅考虑回弹这一特征时,增大芯棒伸出量、弯曲速度、助推速度和减小管材/芯棒间隙、管材/弯曲模间隙、管材/弯曲模摩擦因数有利于减小回弹,但管材数控绕弯成形是多模具约束、多因素耦合影响的复杂成形过程,存在多个成形质量缺陷,需要综合考虑工艺参数对各成形质量指标的影响,并在满足使用要求的前提下,选择合适的工艺参数范围,实现成形质量指标的最优化。

## 2.2 管材数控绕弯回弹对工艺参数的敏感性

基于 2.1 节中获得的工艺参数对弹性模量变化条件下高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响,利用经过修正的多因素敏感性分析模型,如式 (7) 所示<sup>[15]</sup>,求解出各工艺参数对回弹的敏感性因子  $S_k(a_k)$ ,该因子越大,则表明回弹对该工艺参数越敏感<sup>[15]</sup>。

$$S_k(a_k) = \left| \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} \left( \frac{P_k^i - P_k^{i+1}}{a_k^i - a_k^{i+1}} \cdot \frac{a_k^{i+1}}{P_k^{i+1}} \right) \right|$$

$$(i = 1, 2, \dots, m-1; k = 1, 2, \dots, v) \quad (7)$$

式中:  $a_k$  为影响因素,即各工艺参数;  $v$  为影响因素个数;  $m$  为每个  $a_k$  的取值个数;  $a_k^i$  为  $a_k$  的第  $i$  个值;  $P_k^i$  为  $a_k^i$  所对应的系统特性,其中系统特性  $P =$

$f(a_k)$ ,代表回弹角或者回弹半径。

图 9 为回弹对工艺参数的敏感性比较。从图 9 中可以看出,回弹对管材/弯曲模间隙最为敏感。相对于回弹角,回弹半径对工艺参数更为敏感,其敏感性大小依次为:管材/弯曲模间隙  $C_b$ 、管材/弯曲模摩擦因数  $f_b$ 、助推速度  $v_p$ 、弯曲速度  $\omega$ 、芯棒伸出量  $e$  和管材/芯棒间隙  $C_m$ ,而回弹角对工艺参数的敏感性大小相差不大。

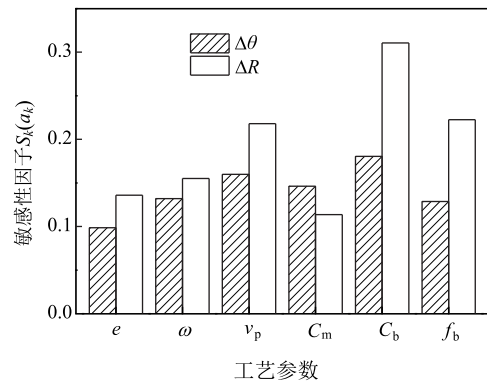


图 9 回弹对工艺参数的敏感性比较

Fig. 9 Comparison of sensitivity for springback to process parameters

## 3 结论

(1) 获得了高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管的弹性模量随塑性应变的增加先急剧下降,然后缓慢下降,最后趋于稳定的变化规律,构建了弹性模量与塑性应变之间的一阶指数衰减函数关系,建立了考虑弹性模量变化的高强不锈钢管数控绕弯成形及回弹全过程有限元模型,并验证了有限元模型的可靠性。

(2) 弹性模量变化和恒定条件下,工艺参数对高强 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控绕弯回弹行为的影响的变化趋势相似,但考虑弹性模量变化下的回弹角和回弹半径增大。

(3) 回弹角和回弹半径随着芯棒伸出量、弯曲速度、助推速度的增大或管材/芯棒间隙、管材/弯曲模间隙、管材/弯曲模摩擦因数的减小而减小。

(4) 回弹半径对工艺参数更为敏感,其敏感性大小依次为:管材/弯曲模间隙、管材/弯曲模摩擦因数、助推速度、弯曲速度、芯棒伸出量和管材/芯棒间隙,而回弹角对工艺参数的敏感性不显著。

## 参考文献:

- [1] SAE AMS 5561G—2007, Steel, corrosion and heat-resistant, welded and drawn or seamless and drawn tubing 9.0Mn-20Cr-6.5Ni-0.28N high-pressure hydraulic [S].
- [2] Yang H, Li H, Zhang Z Y, et al. Advances and trends on tube



- bending forming technologies [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25 (1): 1-12.
- [3] Fang J, Ouyang F, Lu S Q. Springback compensation of high strength 21-6-9 tube after NC bending [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1676: 012045.
- [4] 许小妹. 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管数控弯曲回弹的数值模拟研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- Xu X M. Numerical Simulation Study on Springback of 0Cr21Ni6Mn9N Stainless Steel Tube NC Bending [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014.
- [5] Al-Qureshi H A, Russo A. Springback and residual stresses in bending of thin-walled aluminum tubes [J]. Materials & Design, 2002, 23 (2): 217-222.
- [6] Lu S Q, Fang J, Wang K L. Plastic deformation analysis and forming quality prediction of tube NC bending [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29 (5): 1436-1444.
- [7] 方军, 鲁世强, 王克鲁, 等. 21-6-9 高强不锈钢管数控弯曲回弹的理论计算及有限元分析 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (3): 379-384.
- Fang J, Lu S Q, Wang K L, et al. Theoretical calculation and FE analysis of springback for 21-6-9 high strength stainless steel tube during NC bending [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26 (3): 379-384.
- [8] Ma J, Li H, Fu M W. Modelling of springback in tube bending: A generalized analytical approach [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 204: 106516.
- [9] Zhan M, Xing L, Cao P F, et al. An analytical springback model for bending of welded tube considering the weld characteristics [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 150 (1): 594-609.
- [10] 陈光耀, 李恒, 贺子芮, 等. 基于机器学习的管材弯曲回弹有效预测与补偿 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (22): 2745-2752.
- Chen G Y, Li H, He Z R, et al. Effective prediction and compensation of springbacks for tube bending using machine learning approach [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (22): 2745-2752.
- [11] Wu W Y, Zhang P, Zeng X Q, et al. Bendability of the wrought magnesium alloy AM30 tubes using a rotary draw bender [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 486 (1-2): 596-601.
- [12] Li H, Shi K P, Yang H, et al. Springback law of thin-walled 6061-T4 Al-alloy tube upon bending [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (S2): 357-363.
- [13] 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 (5-8): 1071-1080.
- [14] 蔡伟, 双远华, 荀毓俊, 等. 0Cr18Ni9 管材大曲率无芯弯曲回弹研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 70-76.
- Cai W, Shuang Y H, Gou Y J, et al. Springback of 0Cr18Ni9 tube in large curvature and non-mandrel bending process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 70-76.
- [15] 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, 49 (3): 136-142.
- Fang J, Lu S Q, Wang K L, 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, 49 (3): 136-142.
- [16] Zhu Y X, Chen W, Li P H, et al. Springback study of RDB of rectangular H96 tube [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138-139: 282-294.
- [17] Xue X, Liao J, Vincze G, et al. Control strategy of twist springback for aluminium alloy hybrid thin-walled tube under mandrel-rotary draw bending [J]. International Journal of Material Forming, 2018, 11 (1): 311-323.
- [18] Li H, Yang H, Song F F, et al. Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5V tube in cold rotary draw bending [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (9): 1973-1987.
- [19] 李恒, 杨合, 宋飞飞, 等. 材料性能波动下 TA18 钛管绕弯回弹行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43 (1): 64-71.
- Li H, Yang H, Song F F, et al. Springback rules of TA18 titanium tube upon rotary draw bending under variations of material properties [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43 (1): 64-71.
- [20] Fang J, Ouyang F, Lu S Q, et al. Variation of elastic modulus of high strength 21-6-9 tube and its influences on forming quality in numerical control rotary draw bending [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235 (21): 5684-5694.
- [21] Fang J, Ouyang F, Lu S Q, et al. Wall thinning behaviors of high strength 0Cr21Ni6Mn9N tube in numerical control bending considering variation of elastic modulus [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13 (5): 1-14.
- [22] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic material—Tensile test—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [23] 欧阳芳, 鲁世强, 方军, 等. 塑性应变对 21-6-9 高强不锈钢管瞬时弹性模量的影响 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 203-211.
- Ouyang F, Lu S Q, Fang J, et al. Effect of plastic strain on instantaneous elastic modulus of 21-6-9 high strength stainless steel tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 203-211.
- [24] 谷瑞杰. 薄壁管数控弯曲回弹研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2008.
- Gu R J. Study on Springback of Thin-walled Tube NC Bending [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008.
- [25] 方军. 21-6-9 高强不锈钢管数控绕弯成形规律研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- Fang J. Study on Forming Rules of 21-6-9 High-Strength Stainless Steel Tubes in NC Rotary Draw Bending Process [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.