

塑性成形

考虑材料参数变化的高强钛管数控弯曲回弹行为研究

皇涛^{1,2}, 王锟^{1,3}, 詹梅⁴, 相楠^{1,2}, 陈拂晓^{1,2}, 白璐阁^{1,3}, 岳伟^{1,3}

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471023; 3. 河南省有色金属材料科学与工程重点实验室, 河南 洛阳 471023; 4. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究钛管数控弯曲回弹角、回弹半径的变化规律, 揭示回弹角和回弹半径变化特征的形成机制。**方法** 基于有限元软件平台, 建立考虑收缩应变比-弹性模量变化的 Ti-3Al-2.5V 钛管数控弯曲成形及回弹全过程的有限元模型。**结果** 回弹角随弯曲角和相对弯曲半径的增加而增加; 回弹半径在弯曲角小于 30° 时, 随弯曲角的增加而先变化很小, 后显著增加; 弯曲角大于 30° 时, 回弹半径随弯曲角的增加而逐渐减小。回弹半径随相对弯曲半径的增加而增加。弯曲角越大, 应力分布区域越大, 回弹变形越大; 相对弯曲半径越大, 弯管中处于弹性变形的区域占总变形区域的比例较大, 回弹变形越大。**结论** 考虑两参数变化时对回弹角和回弹半径的变化趋势无显著影响, 但获得的回弹角和回弹半径均大于忽略两参数变化时的值; 考虑收缩应变比-弹性模量变化时, 弯曲变形区沿外脊线的拉应力大于忽略两参数变化时的拉应力, 卸载回弹时, 管材发生大的弹性恢复, 表现为回弹角和回弹半径的增加。

关键词: 钛管; 数控弯曲; 回弹; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.013

中图分类号: TG386.3⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)04-0097-07

Springback Behavior of High Strength Titanium Tube in Numerical Control Bending Considering Variation of Material Parameters

HUANG Tao^{1,2}, WANG Kun^{1,3}, ZHAN Mei⁴, XIANG Nan^{1,2}, CHEN Fu-xiao^{1,2}, BAI Lu-ge^{1,3}, YUE Wei^{1,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals of Henan Province, Luoyang 471023, China;
3. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Processing Technology, Luoyang 471023, China;
4. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the variation law of springback angle and radius of titanium tube in numerical control bending, and to reveal the formation mechanism of the variation characteristics of springback angle and radius. Based on the finite element software platform, a finite element model for the numerical control bending forming and springback of Ti-3Al-2.5V titanium tube was established, considering the variation in the contractile strain ratio and elasticity modulus. The springback angle increased with the increase of bending angle and relative bending radius. When the bending angle was less than 30°, the springback radius first changed little with the increase of bending angle, and then increased significantly. When the bending an-

收稿日期: 2019-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51741503, 51875176); 中国博士后科学基金面上基金 (2016M590677); 河南省自然科学基金 (162300410085)

作者简介: 皇涛 (1983—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为轻量化、难变形材料精确塑性成形。

gle was greater than 30° , the springback radius decreased gradually with the increase of bending angle. The springback radius increased with the increase of the relative bending radius. The larger the bending angle, the larger the stress distribution area, and the larger the springback deformation. The larger the relative bending radius, the larger the proportion of the elastic deformation area to the total deformation area in the bending tube, and the larger the springback deformation. The change trend of the two parameters has no significant effects on springback angle and radius, but the springback angle and radius obtained are larger than the value when ignoring the change of the two parameters; when considering the change of contractile strain ratio and elasticity modulus, the tensile stress along the outer ridge of the bending deformation zone is greater than the tensile stress when ignoring the change of two parameters; and when the springback is unloaded, the tube has a large elastic recovery, which is manifested by an increase in the springback angle and radius.

KEY WORDS: titanium tube; numerical control bending; springback; numerical simulation

随着航空航天等领域的迅速发展,迫切要求发展耐高压、精确化的液压管路弯管件,以达到航天飞行器、军机等长寿命、机动性能好等目的^[1-2]。高强钛合金管具有密度小、比强度高优点,可以满足上述应用需求,将获得越来越广泛的应用。高强钛管的材料特性使其数控弯曲后的卸载回弹与不锈钢和铝合金管的显著不同,其回弹角较不锈钢和铝合金管大得多^[3]。由于不贴模和截面畸变缺陷增加了弯曲段曲率分布的复杂性,回弹半径也与不锈钢和铝合金管有所不同^[4]。这些差异表明高强钛管的弯曲件形状尺寸精度较不锈钢和铝合金管的更不易控制,迫切需要对高强钛管数控弯曲成形卸载回弹展开研究。

针对弯管件的卸载回弹行为,国内外学者开展了较多研究。在理论解析方面, Pan 等^[5]通过解析的方法建立了管件在弯曲过程中横截面的近似位移场,用位移场描述管材的应变,基于全量理论和最小能量原理获得了绕弯回弹的理论公式,但简化较多,预测精度有待提高。Qureshi 等^[6]对管件的弯曲成形进行了弹塑性理论分析,得出了定量预测回弹及残余应力分布规律的近似公式。也有学者考虑了材料加工硬化效应,如 Megharbel 等^[7]发展了 Qureshi 和 Russo 的回弹预测模型; Zhan 等^[8-9]提出了预测弯管回弹的数值-解析方法,该方法具有数值模拟方法和理论解析方法的综合优点,已成功用于不锈钢管和铝合金管数控弯曲回弹角的预测。在数值模拟方面,为提高计算效率并考虑计算精度要求,近年来,采用显式和隐式有限元相结合的方法预测弯管回弹已成为一种趋势。Gu 等^[10-11]研究了薄壁管数控弯曲回弹全过程变形机理及几何、材料和工艺参数对薄壁管数控弯曲回弹的影响,并从回弹的减小和补偿两个方面对薄壁管数控弯曲回弹的控制进行了研究。岳永保^[12]以中强钛管为主要研究对象,采用数值模拟方法,研究了中强钛管数控弯曲成形过程中应力应变的分布及变化规律,揭示了中强钛管的回弹规律。江志强^[13]建立了中强钛管数控弯曲回弹有限元模型,研究了弯管弯曲过程中切向应力应变及回弹角随弯曲角的变化规律。

高强钛管具有和不锈钢管及铝合金管不同的材

料特性,如强度高、塑性差、弹性模量小、厚向异性显著等特点^[14-15],而且其收缩应变比和弹性模量会随塑性变形而变化。收缩应变比和弹性模量是影响高强钛管塑性成形质量的重要参数,然而,从国内外研究现状发现,现有研究中常忽略其随变形而变化的特征,显然这不能满足对高强钛管数控弯曲精确成形分析的需要。文中以 Ti-3Al-2.5V 高强钛管的数控弯曲回弹行为为研究对象,考虑了收缩应变比和弹性模量的变化规律,建立了高强钛管数控弯曲及回弹有限元模型,分析了 Ti-3Al-2.5V 高强钛管回弹特征并揭示了回弹特征机制,旨在为管材弯曲成形提供指导。

1 有限元建模及验证

1.1 材料基本性能

实验材料为 Ti-3Al-2.5V 高强钛管,管材规格为 $\Phi 12 \text{ mm} \times t 0.9 \text{ mm}$ 。管材的轧制工艺为:冷轧+去应力退火。基本力学性能参数,如表 1 所示。测得的弹性模量、收缩应变比随应变发生的变化规律满足式(1)。

表 1 Ti-3Al-2.5V 钛管的力学性能参数
Tab.1 Mechanical properties of Ti-3Al-2.5V titanium tube

屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	强度系数/ MPa	硬化 指数
812.26	1043.94	14.50	1267.14	0.064

$$\begin{cases} E = 100.38 - (100.38 - 94.11)[1 - \exp(-59.08\varepsilon)] \\ r_{\text{CSR}} = 1.11687 + 1.02701 \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0.02799}\right) + \\ 3.25907 \exp\left(-\frac{\varepsilon}{0.00409}\right) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 有限元建模

基于有限元软件 ABAQUS 平台,针对 Ti-3Al-2.5V 钛管 $\Phi 12 \text{ mm} \times t 0.9 \text{ mm}$ 建立考虑收缩应变比-弹性模量变化规律的管弯曲成形有限元模型,如图 1 所示。由于管材具有对称性,采用 1/2 模型进行计算

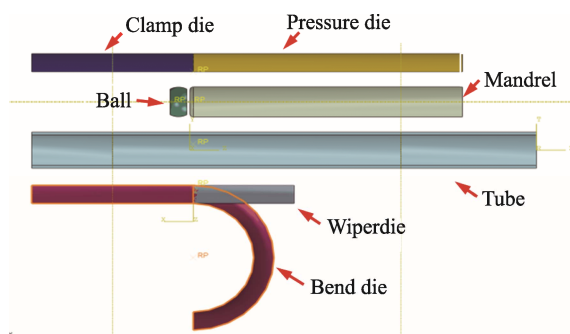


图 1 Ti-3Al-2.5V 钛管数控弯曲三维有限元模型
Fig.1 3D FE model for the NC bending of
Ti-3Al-2.5V titanium tube

以提高计算效率。为能够得到较为精确的模拟结果, 采用三维实体建模的方法对模具进行处理, 建立的几何模型主要包括管材、弯曲模、防皱模、夹持模、压力模和芯模。管材定义为三维可变形体, 采用八节点六面体线性减缩积分实体单元 C3D8R 描述, 各模具为离散刚体, 采用离散刚体单元 R3D4 进行离散。对管材的弯曲变形区域采用较细小的网格划分, 细小网格尺寸为 0.800 mm (轴向) $\times 0.700\text{ mm}$ (周向), 而其余部位采用较粗的网格划分, 较粗网格尺寸为 1.500 mm (轴向) $\times 0.700\text{ mm}$ (周向)。为了得到准确的壁厚变化信息和减小网格畸变, 在管壁厚度方向

上至少划分 4 层单元网格。

回弹模型中只有弯管件, 无需进行接触摩擦等设置, 但需要定义边界条件。卸载后管件在自身应力下达到静力平衡, 为保证回弹计算过程系统能量保持不变, 同时避免管件发生刚体位移, 需要施加足够的约束。在初始步中约束管件一端所有的平动与转动自由度, 在回弹步中去除该区域约束使管件自由变形。由于采用的是半管模型, 在整个计算中还应对管材的对称面施加边界条件。

1.3 模型验证

系统动能 (ALLKE) 与内能 (ALLIE) 比值小于 10% 时, 可以防止明显的动态效应, 伪应变能 (ALLAE) 与内能 (ALLIE) 比值较小时, 可反映沙漏控制情况。图 2 所示为 Ti-3Al-2.5V 钛管数控弯曲过程中的能量曲线。由图 2 可以看出, 动能与内能比在数控弯曲起始的很短时间内较大, 这是模具启动时加速运动所引起的必然结果, 但在绝大部分时间内, 系统的动能与内能比值都小于 10%, 则模型未引入明显的动态效应。系统的伪应变能与内能之比在整个弯曲过程中一直都很小, 说明沙漏情况得到了有效控制, 因此, 验证了所建立的有限元模型的稳定性和可靠性。

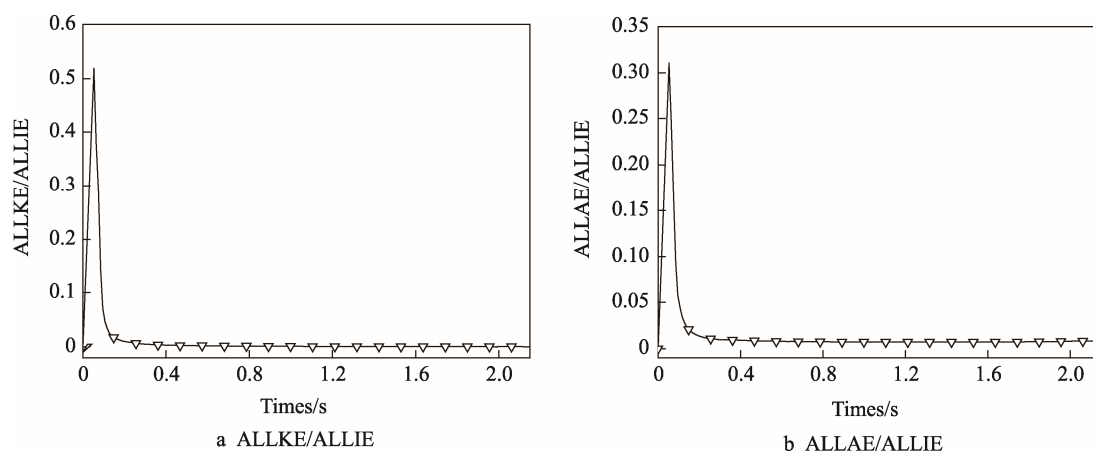


图 2 有限元模型的能量曲线

Fig.2 Energy curves of FE models

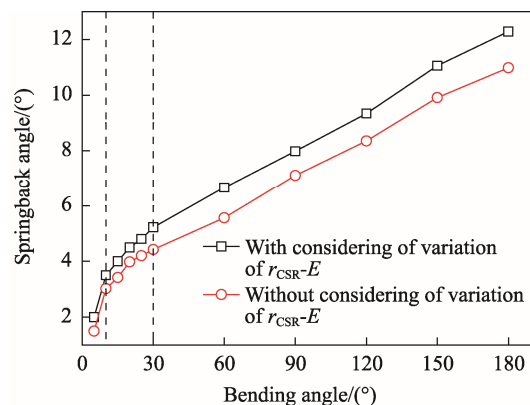
2 结果与讨论

2.1 回弹角变化特征

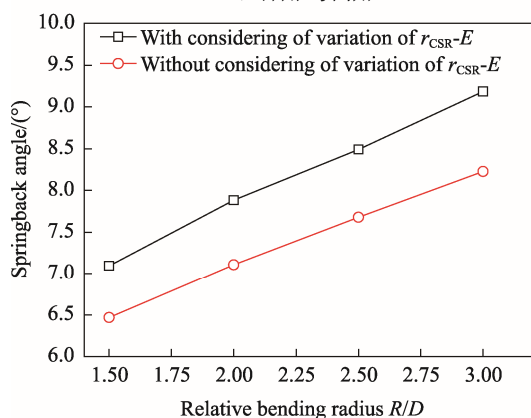
图 3 为回弹角随弯曲角和相对弯曲半径的变化特征。由图 3a 可以看出, 在数值上, 考虑收缩应变比-弹性模量变化规律时的回弹角大于收缩应变比-弹性模量均取常数时的回弹角。说明无论是否考虑了收缩应变比-弹性模量的变化规律, 回弹角随弯曲角的增加均呈相似的变化规律。即回弹角随弯曲角增加均呈线性快速增加、非线性缓慢增加和线性缓慢增加特

征, 其中的非线性缓慢增加阶段的弯曲角范围大致为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。当弯曲角大于 30° 时, 回弹角与弯曲角基本呈线性关系。由图 3b 可以看出, 在数值上, 考虑收缩应变比-弹性模量变化规律时的回弹角大于收缩应变比-弹性模量均取常数时的回弹角。说明无论是否考虑了收缩应变比-弹性模量的变化规律, 回弹角随相对弯曲半径的增加均呈相似的变化规律, 即回弹角随相对弯曲半径的增加而增大。

管材的回弹是应力卸载的过程, 应力越大或应力分布区域越大, 在发生卸载回弹时, 发生的回弹变形越大。为了解释回弹角随弯曲角增加而增加的规律,



a 回弹角-弯曲角

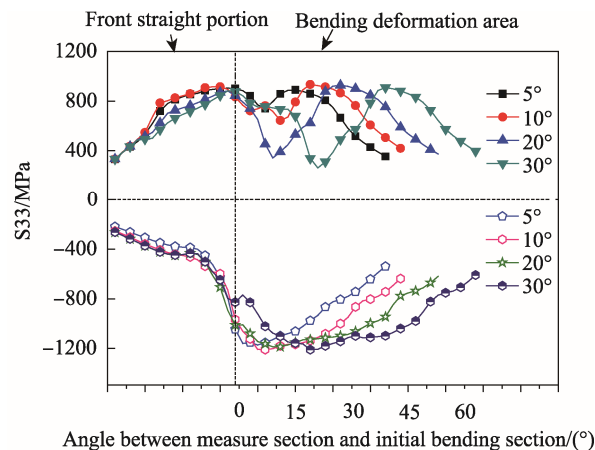


b 回弹角-相对弯曲半径

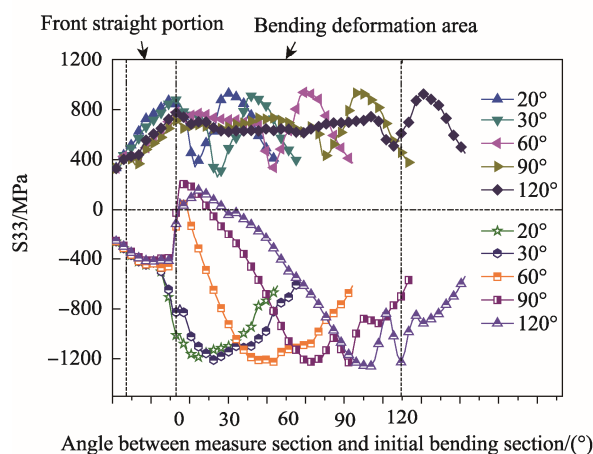
图3 回弹角随弯曲角和相对弯曲半径的变化规律
Fig.3 Variation law of springback angle with bending angle and relative bending radius

研究了不同角度下弯管内、外脊线上的应力分布。管材弯曲是多模具约束协调配合下的弯曲过程,小角度弯曲时属于管材不稳定的变形阶段。由于管材变形程度小,弯曲段弹性变形在总变形中所占比例较大。此外,弯曲角为 5° 时相较于弯曲角为 10° 时,其弯管前直线段受到的内侧轴向压力、外侧轴向拉力较小。弯曲角大于 10° 时,弯管前直线段受到的外侧轴向拉力随弯曲角的增加而有规律的减小,如图4a所示,导致卸载回弹后,弯曲角小于 10° 时回弹角随弯曲角的增加而线性快速增加。随着弯曲角的增加,管材逐渐进入稳定的弯曲变形阶段,弹性变形在总变形中所占的比例逐渐减小;同时管材参与变形的区域增加,整体上管材的受力区域增加,如图4a所示。在卸载回弹时,同样条件下受力区域较大,发生的弹性恢复也越大,故在由不稳定弯曲到稳定弯曲的过渡阶段(弯曲角为 $10^\circ \sim 30^\circ$),回弹角表现为非线性缓慢增加,随着弯曲角的增加,进入稳定阶段,回弹角表现为线性缓慢增加特征。

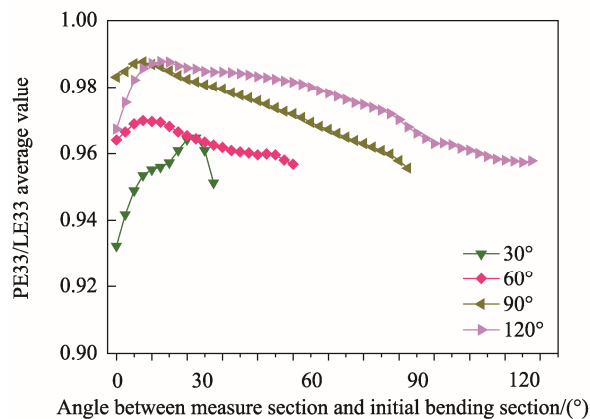
回弹角随相对弯曲半径的增加而增加,这主要归因于弯曲半径较大时,弯管件的变形程度较小,参与变形的管材区域较大,弯管中处于弹性变形的区域占总变形区域的比例较大,当外加载荷卸除后,发生了较大的回弹,最终表现为回弹角的增加。



a 小弯曲角度下轴向应力分布



b 大弯曲角度下轴向应力分布



c 平均PE33/LE33分布

图4 不同部位轴向应力和平均 PE33/LE33 分布
Fig.4 Distribution of axial stress and average PE33/LE33 at different positions

考虑收缩应变比-弹性模量变化规律时,考虑了收缩应变比-弹性模量的变化特征,在管材弯曲变形时,能更真实地反映收缩应变比-弹性模量随应变的增加而减小的变化特征。此外,考虑收缩应变比-弹性模量变化规律时,管材变形区及其相邻的靠近弯曲模部位的前、后直线段在弯曲变形时均产生较高的应力,相对薄的外侧壁在卸载回弹时一定程度上会减少

对弹性恢复的抑制作用, 故弹性模量的减小、大的应力值和相对薄的外侧壁等因素的综合作用, 导致此时的回弹角大于忽略两参数变化规律时的回弹角。

2.2 回弹半径变化特征

Ti-3Al-2.5V 钛管弯曲回弹后, 其弯曲外侧脊线畸变较大, 内侧脊线畸变较小, 如图 5 所示。由于内

侧脊线更能反映弯管的实际弯曲程度, 因此选取弯管内侧脊线的圆弧半径来研究 Ti-3Al-2.5V 钛管回弹前后的实际变化特征。

文中选取 30°, 60°, 90°, 120° 的典型弯曲角度, 通过建立轨迹路径的方法获得弯管回弹前后内侧圆弧上各节点的位置坐标, 通过对其进行圆拟合获得回弹前后弯管中心对称面内侧圆弧半径, 从而获得回弹半径。

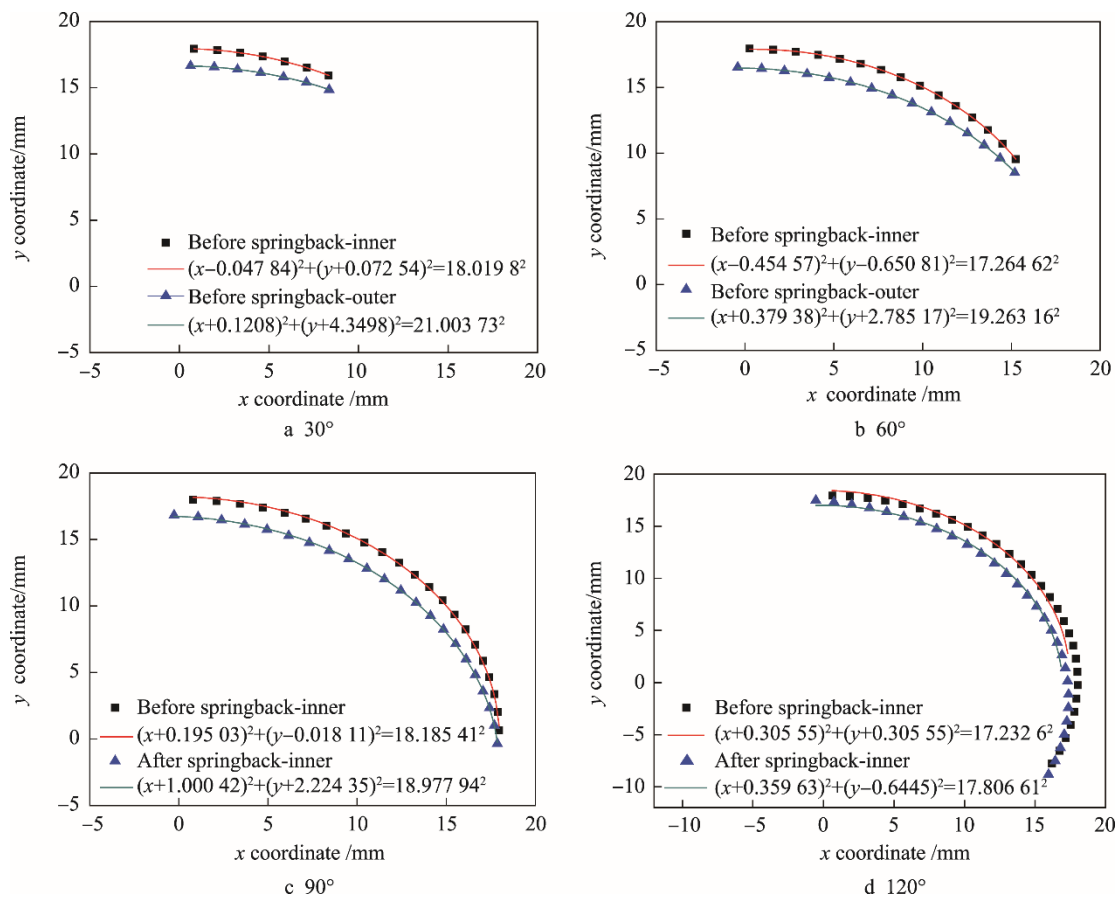


图 5 不同弯曲角度下弯管内侧节点坐标曲线拟合

Fig.5 Intrados of tube and its fitting at different bending angles

不同角度下的回弹半径如图 6a 所示。在数值上, 考虑收缩应变比-弹性模量变化规律时的回弹半径大于收缩应变比和弹性模量均为常数时的回弹半径, 在 30°~120° 范围内尤为显著。说明无论是否考虑了收缩应变比-弹性模量的变化规律, 回弹半径均具有相似的变化规律, 即随弯曲角度的增加, 当弯曲角度在 0°~20° 增加时, 回弹半径几乎不变且数值都很小; 当弯曲角度在 20°~30° 增加时, 回弹半径呈迅速增加趋势; 当弯曲角在 30°~90° 增加时, 回弹半径随弯曲角增加而迅速减小; 当弯曲角在 90°~180° 增加时, 回弹半径随弯曲角增加而缓慢减小。图 6b 为不同相对弯曲半径下的回弹半径。在数值上, 考虑收缩应变比-弹性模量变化规律时的回弹半径大于收缩应变比和弹性模量均为常数时的回弹半径。两种条件下回弹半径具有相似的变化规律, 即回弹半径随着相对弯曲半

径的增大呈增加趋势, 且回弹半径随相对弯曲半径增大而增大的原因与回弹角随相对弯曲半径的增加而增大的原因相同。

当弯曲角大于 30° 后, 相同节点的平均轴向塑性应变/轴向真应变 (PE33/LE33) 随弯曲角的增加逐渐增大, 且增大幅度逐渐减小, 如图 4c 所示, 即弹性变形所占的比例逐渐减小, 且减小的幅度逐渐减小, 使得弯曲角在 30°~90° 增加时, 回弹半径表现为随弯曲角度的增加迅速减小; 当弯曲角在 90°~180° 增加时, 回弹半径随弯曲角增加缓慢减小。

回弹半径随相对弯曲半径增加而增加, 这主要归因于, 随相对弯曲半径增加, 弯曲相同角度时, 参与变形的管材区域较大, 受力区域也较大, 在卸载回弹时, 回弹程度越大, 回弹后内脊线张开弧度呈增大趋势。故回弹半径随相对弯曲半径增加而增加。

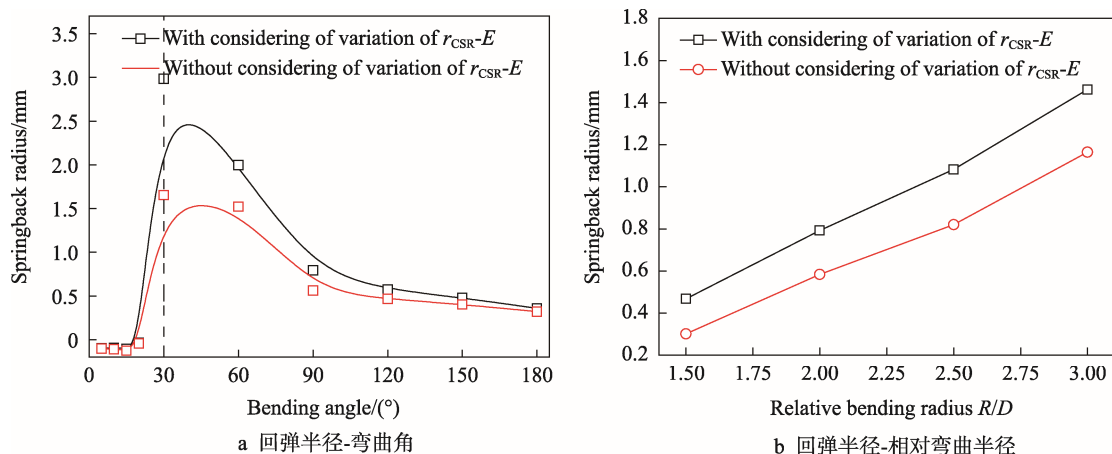


图6 回弹半径随弯曲角和相对弯曲半径的变化规律

Fig.6 Variation law of springback radius with bending angle and relative bending radius

3 结论

基于考虑收缩应变比-弹性模量变化的 Ti-3Al-2.5V 钛管数控弯曲成形及回弹全过程的有限元模型,研究了 Ti-3Al-2.5V 钛管数控弯曲回弹特征与机制,主要结果如下。

1) 研究了考虑收缩应变比-弹性模量变化对 Ti-3Al-2.5V 钛管数控弯曲回弹角和回弹半径随弯曲角的影响,发现考虑两参数变化时对回弹角和回弹半径的变化趋势无显著影响,但获得的回弹角和回弹半径均大于忽略两参数变化时的值。回弹角随弯曲角和相对弯曲半径的增加而增加;回弹半径在弯曲角小于 30° 时,随弯曲角的增加而先变化很小,后显著增加,弯曲角大于 30° 时,随弯曲角的增加而逐渐减小。回弹半径随相对弯曲半径的增加而增加。

2) 揭示了回弹角和回弹半径的变化特征的形成机制:弯曲角越大,应力分布区域越大,回弹变形越大;相对弯曲半径越大,弯管中处于弹性变形的区域占总变形区域的比例较大,回弹变形越大;考虑收缩应变比-弹性模量变化时,弯曲变形区沿外脊线的拉应力大于忽略两参数变化时的拉应力,卸载回弹时,管材发生大的弹性恢复,表现为回弹角和回弹半径的增加。

参考文献:

- [1] YANG He, LI Heng, ZHANG Zhi-yong, et al. Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 1—12.
- [2] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(1): 17—21.
CAO Chun-xiao. Applications of Titanium Alloys on Large Transporter[J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(1): 17—21.
- [3] 王艳. TA18 高强钛管数控弯曲回弹规律的数值模拟研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2011.
WANG Yan. Numerical Simulation Study on Numerical Control Bending Springback of TA18 High Strength Titanium Tube[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011.
- [4] 张配配. 考虑弹性模量变化的高强 TA18 钛管数控弯曲回弹研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
ZHANG Pei-pe. Research on Numerical Control Bending Springback of High Strength TA18 Titanium Tube Considering the Change of Elastic Modulus[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013.
- [5] PAN K, STELSON K A. On the Plastic Deformation of a Tube During Bending[J]. Journal of Engineering for Industry, 1995, 117(4): 494—500.
- [6] AL-QURESHI H A, RUSSO A. Spring-back and Residual Stresses in Bending of Thin-walled Aluminium Tubes[J]. Materials & Design, 2002, 23(2): 217—222.
- [7] MEGHARBEL A E, NASSER G A E, DOMIATY A E. Bending of Tube and Section Made of Strain-hardening Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1/2/3): 372—380.
- [8] ZHAN Mei, YANG He, HUANG Liang. A Numerical-analytic Method for Quickly Predicting Springback of Numerical Control Bending of Thin-walled Tube[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2006, 22(5): 713—720.
- [9] ZHAN Mei, YANG He, HUANG Liang, et al. Spring-back Analysis of Numerical Control Bending of Thin-walled Tube Using Numerical-analytic Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 197—201.
- [10] GU Rui-jie, YANG He, ZHAN Mei, et al. Springback of Thin-walled Tube NC Precision Bending and Its Numerical Simulation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(s2): 631—638.

- [11] GU Rui-jie, YANG He, ZHAN Mei, et al. Research on the Springback of Thin-walled Tube NC Bending Based on the Numerical Simulation of the Whole Process[J]. Computational Materials Science, 2008, 42(4): 537—549.
- [12] 岳永保. 钛合金管数控弯曲成形过程数值模拟及实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
YUE Yong-bao. Numerical Simulation and Experiment Study on Ti-Alloy Tube NC Bending Process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2009.
- [13] 江志强. 不同条件下中强厚壁钛管数控弯曲成形规律[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
JIANG Zhi-qiang. Numerical Control Bending Forming of Medium-Strength Thick-Walled Titanium Tube under Different Conditions[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010.
- [14] MACKENZIE P M, WALKER C A, MCKELVIE J. A Method for Evaluating the Mechanical Performance of Thin-walled Titanium Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(4): 400—406.
- [15] KUMAR A, SAPP M, VINCELLI J, et al. A Study on Laser Cleaning and Pulsed Gas Tungsten Arc Welding of Ti-3Al-2.5V Alloy Tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 64—71.