# 航空发动机0Cr18Ni9不锈钢导管数控弯曲回弹规律

潘 林[1],王睿乾[2],张林嘉[3],夏方科[1],周华博[2],刘 伟[2]
(1. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司,贵阳 550000;2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,哈尔滨 150001;
3. 海军装备部驻贵阳地区军事代表室,贵阳 550000)

**摘要:**为了有效地解决航空发动机导管弯曲成形时的回弹问题,开展了0Cr18Ni9不锈钢管数控弯曲工艺试验,采用单一变量法研究了管径、壁厚、相对弯曲半径、弯曲角对回弹的影响规律,并通过数值仿真和正交试验法分析了弯曲速度、弯模间隙等工艺参数,以及弹性模量、屈服强度、硬化指数对弯曲回弹角的影响。结果表明:回弹角与弯曲角呈显著的线性关系,当弯曲角在180°以内时,回弹角为1.6°~6.0°;建立了回弹角预测线性方程,预测误差在[-0.425°,0.502°]内的概率为99.74%,并基于此方程开展了全尺寸导管的回弹角预测和补偿工艺试验;在各工艺参数中弯曲速度和弯模间隙对回弹角的影响较大,可引起大于0.5°的偏差,而因材料参数变化导致的回弹角变化不超过0.05°。

**关键词:**0Cr18Ni9不锈钢;导管;回弹角;外部管路;航空发动机
**中图分类号:** V263.1 **文献标识码:**A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.05.023

## Research on the Computer Numerical Controlled Bending Springback Law of 0Cr18Ni9 Stainless Steel Pipes for Aeroengine External Pipeline

PAN Lin[1], WANG Rui-qian[2], ZHANG Lin-jia[3], XIA Fang-ke[1], ZHOU Hua-bo[2], LIU Wei[2]
(1. AECC Guizhou Liyang Aviation Power Co,Ltd,Guiyang 550000, China;2. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;3. Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Guiyang, Guiyang 550000, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the springback problem during the bending forming of aeroengine tubes. The experiments were performed for computer numerical control bending process of 0Cr18Ni9 stainless steel pipes, and the single variable method was used to analyze the law of springback with varied pipe diameter, thickness, specific bending radius and bend angle. Numerical simulations and orthogonal experiment method were conducted on the effect of springback angle by considering of process parameters and material parameters, such as bending speed, bending die gap, yield strength, elastic modulus and hardening exponent. The results show that: there's a significant linear relationship between the springback angle and the bending angle. The springback angle is 1.6°~6°, when the bending angle is within 180°. A linear equation was established for the prediction of springback angle, and the prediction accuracy of the equation is 99.74% within the error range of [-0.425°,0.502°]. Based on this equation, the CNC bending of a full-sized pipeline was experi-mentally studied on the springback prediction and compensation. Among the various process parameters, the bending speed and the bending die gap have a great influence on the springback angle, which can cause a deviation greater than 0.5°. However, the springback angle is not exceed 0.05° caused by the variation of material parameters.

**Key words:** 0Cr18Ni9,duct, springback angle, external pipeline, aeroengine

## 0 引言

航空发动机导管有“航空血管”之称,在航空领域中扮演着极其重要的角色。航空发动机导管本身是一种复杂的空间3维管件组合,其成形工艺以弯曲为主。数控(Computer Numerical Control, CNC)弯曲因具有工艺灵活、生产效率高、产品质量好等特点备受青睐,是这类零件的主要成形方式[1-2]。目前,弯曲后

**收稿日期:**2020-10-24 **基金项目:**航空动力基础研究项目资助
**作者简介:**潘林(1986),男,硕士,工程师,从事金属导管的成形与焊接工作;E-mail:panlin1986618@163.com。

**引用格式:***潘林,王睿乾,张林嘉,等.航空发动机0Cr18Ni9不锈钢导管数控弯曲回弹规律[J].航空发动机,2022,48(5):185-190. PAN Lin, WANG Ruiqian, ZHANG Linjia, et al. Research on the computer numerical controlled bending springback law of 0Cr18Ni9 stainless steel pipes for aeroengine external pipeline[J]. Aeroengine, 2022, 48(5): 185-190.*

因回弹导致形状和尺寸超差是CNC弯曲管件生产、装配及服役时的最大问题,一直没有得到很好地解决。

国内外学者从理论分析、有限元仿真、工艺试验等方面对管材CNC弯曲的回弹问题展开了研究。在弯曲回弹理论方面通常采用数学解析的方法,结合弹塑性力学和材料力学等相关理论,计算出成形时管材变形区上的位移场,进而得到其应变分布,并据此推导出回弹值的定量计算公式[3-4]。El Megharbel等[5]引入幂律强化材料模型,预测了不同截面形状管材的回弹问题。Al-Qureshi等[6]通过弹塑性理论分析建立了薄壁铝管的回弹与残余应力数学模型;李殿起等[7]基于弹性-幂指数强化材料本构模型,建立了弯管回弹预测的数学模型。总体来看,理论计算公式囿于条件较为理想,需充分考虑中性层偏移、变形区卸载产生包辛格效应等方面带来的影响方能得到较准确的预测结果,建模困难且普适性较差。

有限元仿真为回弹规律的研究提供了高效可行的方法,通过该方法可较为全面地分析管材弯曲后的回弹行为,揭示各因素对回弹的影响[8-10]。ZHANG等[11]采用数值模拟和多参数敏感性分析方法,研究了材料参数对TA18钛合金管材回弹的影响规律;Xue等[12]引入各向异性屈服准则,建立了较高精度的非对称薄壁管弯曲回弹预测模型;Zhu等[13]通过有限元模拟研究了芯棒对矩形H96管弯曲回弹的影响规律。由于材料模型、摩擦条件、边界条件等因素与试验存在一定偏差,回弹预测的仿真精度较难提升。

工艺试验与管材CNC弯曲成形的实际条件完全一致,其结果是最为可靠的,但存在成本较高且部分因素难以量化等问题[14-16]。因此,采用工艺试验和数值仿真相结合的方法是研究回弹影响规律的最佳手段。

本文针对0Cr18Ni9不锈钢管材的CNC弯曲成形,对几何参数、工艺参数、材料参数等主要因素对回弹的影响规律进行工艺试验和数值仿真。

## 1 试验材料

本文采用的试验材料为无缝冷拔0Cr18Ni9不锈钢管,管材的规格为2种,其管径分别为6和8 mm,壁厚分别为0.8和1.0 mm。管材来料热处理状态为固溶态,根据《金属管材室温拉伸试验方法》(HB 5145-1996)[18],分别开展了2种规格管材的整管单拉测试,每种规格重复2次,获得的0Cr18Ni9不锈钢真实应力-应变曲线如图1所示。

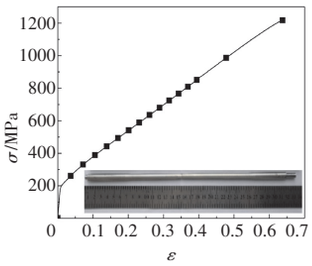



图1 0Cr18Ni9不锈钢真实应力-应变曲线

采用胡克定律和幂指数方程对图1的真实应力-应变曲线进行拟合

$$\sigma=\begin{cases} E\varepsilon_e \\ \sigma_s + K(\varepsilon - \varepsilon_e)^n \end{cases} \quad (1)$$

式中:$\sigma$为应力;$\varepsilon$为应变;$\sigma_s$为屈服强度;$E$为弹性模量;$K$为强度系数;$n$为硬化指数。

根据式(1)计算出0Cr18Ni9不锈钢管材的主要力学性能指标,见表1。

表1 0Cr18Ni9不锈钢管材的主要力学性能指标

| $E$/GPa | $\sigma_s$/MPa | $K$/MPa | $n$ |
|---|---|---|---|
| 205 | 210 | 1400 | 0.59 |

## 2 管材CNC弯曲工艺试验

工艺试验用CNC弯曲设备为ELECT-M型数控弯管机。为保证试验的可重复性,对弯曲速度和弯模间隙进行统一控制,确保同规格的试验中这2项工艺参数严格一致。试验开展前需对模具型面进行去污处理,以免影响管件成形质量,同时,需对原始管件进行直线度检查并打磨切口毛刺。所有试验均在室温条件下开展,利用RA-7125型3坐标测量仪对弯曲后管材的空间管型进行检测,进而通过计算获得回弹角。该设备采用非接触式激光打点的方式来检测管型,针对小直径管件,其检测精度较高,点重复性为0.05 mm。

### 2.1 几何参数影响规律

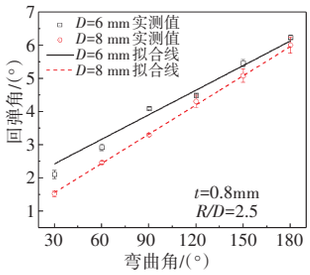
通过控制单一变量法开展不同规格和不同弯曲参数的管材CNC弯曲工艺试验,进一步深入研究各几何因素对管材CNC弯曲回弹的影响规律。试验包括2种管径、2种壁厚、2种相对弯曲半径和6种弯曲角的参数组合,每组参数组合重复3次试验,测量数据为至少3次测量结果的平均值,对于数据偏差较大的组别,增加试验次数以对测量数据进行修正,试验样本总量为144组。此外,用于检验的数据样本为30组,共计174组。具体试验方案见表2。

表2 管材CNC弯曲工艺试验方案

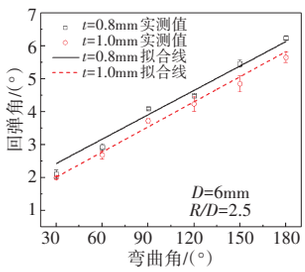
| 参数 | 管径$D$/mm | 壁厚$t$/mm | 相对弯曲半径$R/D$* | 弯曲角/(°) |
|---|---|---|---|---|
| 数值 | 6、8 | 0.8、1.0 | 2.0、2.5 | 30、60、90、120、150、180 |

*:$R/D$中的$R$为导管的弯曲半径。

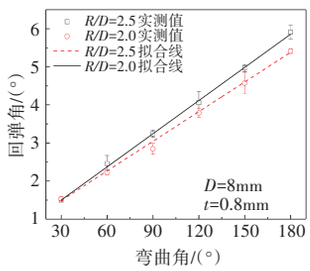
根据表2中的研究方案开展管材的CNC弯曲工艺试验,在试验过程中严格控制压模压力、夹模力、压模助推速度、润滑及弯曲速度等工艺条件,确保同一组试验的工艺参数均保持一致。不同几何参数下弯曲角与回弹角的关系如图2所示。




(a) 管径的影响




(b) 壁厚的影响




(c) 相对弯曲半径的影响

**图2　不同几何参数下弯曲角与回弹角的关系**

从图2(a)中可见,在相同条件下,管径越大,回弹角越小,特别是弯曲角较小时管径影响更为明显;从图2(b)中可见,当弯曲角相同时,随着壁厚的增大,回弹角略有减小;从图2(c)中可见,在相同条件下,相对弯曲半径越大,回弹角越大,在弯曲角较小时,2组相对弯曲半径对应的回弹角非常接近,而随着弯曲角的增大,回弹角之间的差别也在逐渐增大。此外,从图2(a)~(c)中均可见,在不同管径、壁厚、相对弯曲半径条件下,回弹角随弯曲角的增大均成线性增大关系,当弯曲角在30°~180°变化时,回弹角的变化范围约为1.6°~6.0°。

## 2.2　回弹角预测线性方程

根据图2中回弹角与弯曲角之间的线性相关特性,建立回弹角$\Delta\theta$与弯曲角$\theta$间的线性方程

$$\Delta\theta_D^t = a\theta + b \tag{2}$$

式中,$a$和$b$分别为线性方程式的斜率和截距,与管径、壁厚和相对弯曲半径有关。

根据试验测量数据($D$6 mm×0.8 mm、$D$6 mm×1.0 mm、$D$8 mm×0.8 mm、$D$8 mm×1.0 mm),按式(2)拟合获得0Cr18Ni9不锈钢回弹角线性方程参数$a$和$b$的值,见表3。

该线性方程可直接用于回弹角预测,为验证其预测回弹角的准确度,开展了1组导管CNC弯曲工艺试验,弯曲角分别为15°、45°、75°、105°、135°、165°,而其他工艺条件则与前述试验过程完全一致,预测结果验证如图3所示。

**表3　0Cr18Ni9不锈钢回弹角线性方程参数值**

| $D$/mm | $t$/mm | $a$ | $b$ |
|---|---|---|---|
| 6 | 0.8 | 0.02468 | 1.69476 |
| | 1.0 | 0.02541 | 1.26163 |
| 8 | 0.8 | 0.02936 | 0.68741 |
| | 1.0 | 0.02904 | 0.62891 |

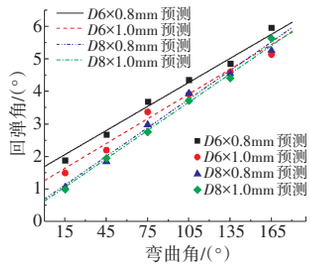



**图3　回弹角线性方程预测结果验证**

从图中可见,利用线性方程计算得到的回弹角预测值与其测量值的误差在[−0.425°,0.502范围内的概率为99.74%。为进一步验证线性方程对回弹角的预测精度,以$D$6 mm×1.0 mm的某全尺寸航空发动机导管为例,进行回弹角预测和补偿,其结果见表4,回弹补偿前后的导管形状对比如图4所示。

**表4　导管CNC弯曲回弹角预测和补偿结果　(°)**

| 序号 | 目标成形角 | 补偿前回弹角 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 测量值 | 预测值 | 偏差 |
| 1 | 18.745 | 1.307 | 1.738 | 0.431 |
| 2 | 10.961 | 0.976 | 1.54 | 0.564 |
| 3 | 89.384 | 3.099 | 3.533 | 0.434 |
| 4 | 90.000 | 3.525 | 3.549 | 0.024 |
| 5 | 23.959 | 1.377 | 1.87 | 0.493 |
| 6 | 90.000 | 3.328 | 3.549 | 0.221 |

| 序号 | 目标成形角 | 弯曲角补偿 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 补偿值 | 测量值 | 实测值与目标成形角的偏差 |
| 1 | 18.745 | 20.529 | 19.315 | −0.570 |
| 2 | 10.961 | 12.541 | 11.428 | −0.467 |
| 3 | 89.384 | 93.009 | 89.665 | −0.281 |
| 4 | 90.000 | 93.641 | 90.173 | −0.173 |
| 5 | 23.959 | 25.878 | 24.497 | −0.538 |
| 6 | 90.000 | 93.641 | 90.321 | −0.321 |

注:表中数据为$D$6 mm×1.0mm、$R/D$=2.5导管的验证结果。

从表4中可见,补偿前最大回弹角为3.525°,回弹角预测值与测量值的最大偏差为0.564°;利用线性方程进行回弹角补偿后,实测值与目标成形角之间的最大偏差为0.570°。可见该方法简单易行且对于实际生产具有较高的指导意义。

## 3 管材CNC弯曲数值仿真

### 3.1 仿真模型的建立

基于ABAQUS有限元仿真软件，针对$D$8 mm×1.0 mm的0Cr18Ni9不锈钢管材，建立CNC弯曲及回弹的仿真模型，如图5所示。材料模型选用式(1)的双线性方程，具体参数值见表1。

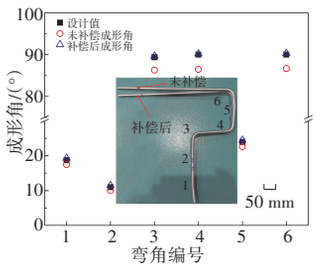



图4 回弹补偿前后的导管形状对比

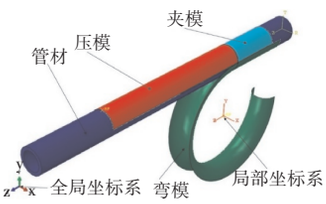



图5 管材CNC弯曲及回弹的仿真模型

采用库伦摩擦模型来描述各接触面间的摩擦状态，其中摩擦系数取值参见文献[17]，弯模摩擦系数为0.25，压模摩擦系数为0.12，夹模为粗糙状态。接触模型统一设置为面对面接触，除夹模-管材间为小滑移模式外，其他接触面均为有限滑移模式。管坯单元类型为实体单元C3D8R，网格尺寸为0.5 mm。去除模具约束，引用管材弯曲成形后的网格单元、残余应力等状态文件，并将弯管的某一截面作为边界完全固定，通过静力隐式算法求解管材CNC弯曲卸载后的回弹角。

为验证该仿真模型的可靠性，针对相同参数的导管CNC弯曲，分别开展工艺试验和数值仿真，对其回弹角进行对比，结果如图6所示。从图中可见，仿真预测误差随着弯曲角增大略有增大，当弯曲角为180°时预测偏差最大，偏差值为0.5°。

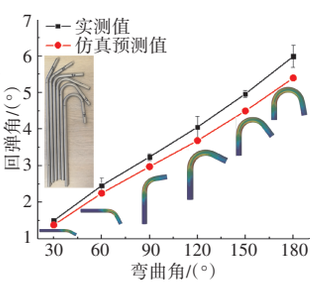



图6 管材CNC弯曲回弹角仿真与试验结果对比

### 3.2 工艺参数影响规律

管材CNC弯曲过程中的影响因素复杂且各影响因素的取值范围难以确定，给研究带来了极大困难，而基于工艺仿真的正交试验则能够快速、高效地对多因素、多取值范围问题进行分析。CNC弯管涉及到的主要工艺参数有6个，具体参数取值设置见表5。其中，工艺参数的取值根据生产现场情况而定，摩擦系数的取值参见文献[17]。

表5 CNC弯管主要工艺参数及其取值

| 序号 | 参数 | 取值 |
|---|---|---|
| 1 | 弯曲速度/((°)/s) | 90、180、270 |
| 2 | 压模压力/N | 2000、4000、6000 |
| 3 | 弯模间隙/mm | 0.05、0.10、0.15 |
| 4 | 压模间隙/mm | 0.05、0.08、0.10 |
| 5 | 弯模摩擦系数 | 0.12、0.20、0.25 |
| 6 | 压模摩擦系数 | 0.12、0.20、0.30 |

选取正交表$L_{18}(3^6)$，按照表5中所列的参数取值设计正交试验，并依次建立仿真模型进行计算。开展不同工艺参数组合下的管材CNC弯曲工艺仿真，为了更直观地对比管材CNC弯曲中各工艺参数不同取值对回弹角的影响程度，绘制平均回弹角随各工艺参数变化曲线，如图7所示。

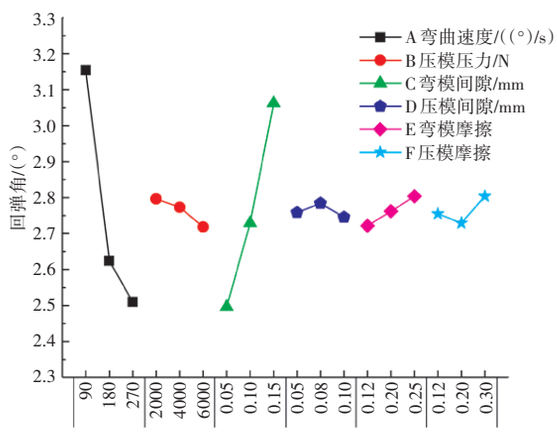



图7 平均回弹角随各工艺参数变化曲线对比

从图中可见，在各工艺参数中，回弹角与弯曲速度和压模压力成负相关，与弯模间隙和弯模摩擦成正相关；随压模间隙的增大，回弹角先增大后减小，随压模摩擦的增大，回弹角先减小后增大。

根据多因素方差分析，针对各工艺参数对回弹角影响的程度进行研究。查$F$分布表可知$F_{0.05}(2,5)=5.79$，$F_{0.01}(2,5)=13.27$。故而认定：当各工艺参数的统计量$F>F_{0.01}(2,5)$时，该参数对回弹角的影响极为显著；当$F_{0.05}(2,5)<F<F_{0.01}(2,5)$时，该参数对回弹角的影响显著；当$F<F_{0.05}(2,5)$时，该参数对回弹角的影响较小。回弹角各影响因素方差分析结果见表6。

表6　回弹角各影响因素方差分析结果

| 工艺参数 | 离差平方和 | 自由度 | 均方离差 | $F$值 |
|---|---|---|---|---|
| 弯曲速度 | 1.4172 | 2 | 0.7086 | 122.1767 |
| 压模压力 | 0.0191 | 2 | 0.0095 | 1.6425 |
| 弯模间隙 | 0.9718 | 2 | 0.4859 | 83.7748 |
| 压模间隙 | 0.0046 | 2 | 0.0023 | 0.3988 |
| 弯模摩擦 | 0.0202 | 2 | 0.0101 | 1.7407 |
| 压模摩擦 | 0.0172 | 2 | 0.0086 | 1.4829 |
| 误差 | 0.0291 | 5 | 0.0058 | |

从表6中可见,在管材CNC弯曲中,弯曲速度和弯模间隙对回弹角的影响极为显著,而其他各参数的影响较小。同时,根据各工艺参数对应的统计量$F$对其影响程度进行排序,结果为:弯曲速度>弯模间隙>弯模摩擦>压模压力>压模摩擦>压模间隙。因此,实际工艺中应重点控制弯曲速度和弯模间隙的影响,当弯曲速度在90~270(°)/s之间变化时,回弹角变化为0.644°,弯模间隙在0.05~0.15 mm之间变化时,回弹角变化为0.567°。其中,弯模摩擦、压模压力、压模摩擦、压模间隙这4个工艺参数对回弹的影响很小,在其取值范围内,导致回弹角产生的波动不超过0.1°。

### 3.3　材料参数影响规律

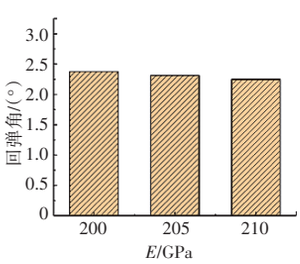
航空发动机导管材料严格遵照《航空用不锈钢无缝钢管规范》(GJB 2296A-2005)[19]定制,但在实际生产中,不同批次材料的某些性能仍存在一定的差异,本文基于数值仿真研究了0Cr18Ni9不锈钢的材料力学性能(弹性模量、屈服强度、硬化指数)波动对回弹角的影响规律。0Cr18Ni9不锈钢参数波动范围见表7。

表7　0Cr18Ni9不锈钢参数波动范围

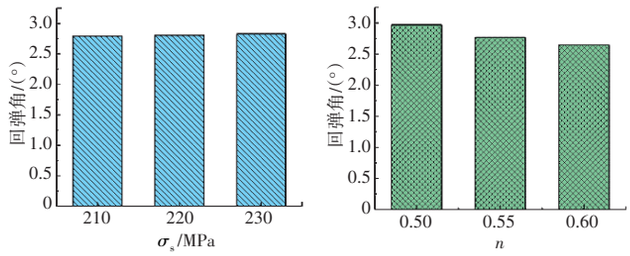
| 序号 | 研究对象 | 参数设置 | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $E$/GPa | 200 | 205 | 210 |
| 2 | $\sigma_s$/MPa | 210 | 220 | 230 |
| 3 | $n$ | 0.50 | 0.55 | 0.60 |

根据表7针对不同材料参数开展相应的数值仿真,得到的材料参数对回弹角的影响规律如图8所示。

从图中可见,在导管CNC弯曲成形中,材料的弹性模量和硬化指数越大,回弹角越小;屈服强度越大,回弹角越大。这主要是由于在相同条件下,弹性模量和硬化指数越小,屈服强度越大,因此在相同的应力下弹性应变在总应变中的占比就越大,进而使回弹角越大。而0Cr18Ni9不锈钢力学性能在公差范围内的上下波动对回弹角的影响较小,尤其是弹性模量和屈服强度的变化仅会给回弹角带来不超过0.05°的波动。



(a) 弹性模量的影响



(b) 屈服强度的影响　　(c) 硬化指数的影响

图8　材料参数对回弹角的影响规律

($D$8 mm × 1.0 mm, $R/D$=2.5, $\theta$=90°)

## 4　结论

(1)试验获得了管径(6和8 mm)、壁厚(0.8和1.0 mm)、相对弯曲半径(2.5和2.0)对回弹角的影响规律:回弹角随管径、壁厚的增大而减小,随相对弯曲半径、弯曲角的增大而增大;回弹角随弯曲角的变化呈显著的线性关系,当弯曲角在180°以内时,回弹角为1.6°~6.0°。

(2)在实测数据基础上建立了回弹角预测线性方程,其预测误差在[-0.425°, 0.502°]内的概率为99.74%;将回弹角预测线性方程应用于某全尺寸航空发动机导管的回弹预测和补偿,结果表明其对指导生产具有较好的实用价值。

(3)通过开展正交试验分析了工艺参数对回弹角的影响规律:弯曲速度和弯模间隙对回弹的影响最为显著,弯曲速度在90~270(°)/s之间变化时,回弹角变化为0.644°,弯模间隙在0.05~0.15 mm之间变化时,回弹角变化为0.567°,而因材料性能波动导致的回弹角变化不超过0.05°。

**参考文献:**

[1] 彭刚,于乃江,贾文强.航空发动机外部管路的结构与动力学特征参数分析[J].航空发动机,2017,43(5):1-6.
PENG Gang, YU Naijiang, JIA Wenqiang. Analysis of structural and dynamical characteristic parameters of external pipes for aeroengine[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 1-6.(in Chinese)

[2] 王萌.飞机导管数控弯曲成形技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
WANG Meng. Digital agile manufacture technology of airplane tube[D].

Harbin:Harbin Institute of Technology,2016.(in Chinese)

[3] 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.

[4] Kim Y W,Kim J I.An analysis to minimize the amount of spring back after coiling of helical steam generator tubes[J].International Journal of Pressure Vessels and Piping,2001,78(1):11-17.

[5] El Megharbel A,El Nasser G A,El Domiaty A. Bending of tube and section made of strain-hardening materials[J].Journal of Materials Processing Technology,2008,203(1-3):372-380.

[6] Al-Qureshi H A,Russo A.Spring-back and residual stresses in bending of thin-walled aluminium tubes[J].Materials and Design,2002,23(2):217-222.

[7] 李殿起,张少华,郑鹏,等.基于弹性-幂强化材料模型的金属管材弯曲回弹分析[J].锻压技术,2018,43(5):51-55.
LI Dianqi,ZHANG Shaohua,ZHENG Peng,et al. Bending springback analysis of metal pipe based on elasticity-exponentiation material model[J].Forging & Stamping Technology,2018,43(5):51-55.(in Chinese)

[8] Jiang Z Q,Yang H,Zhan M,et al.Coupling effects of mate-rial properties and the bending angle on the springback angle of a titanium alloy tube during numerically controlled bending[J]. Materials & Design,2010,31(4):2001-2010.

[9] Gu R.J,Yang H,Zhan M,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.

[10] Jeong H S,Ha M Y,Cho J R.Theoretical and FE analysis for inconel 625 fine tube bending to predict springback[J].International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,2012,13(12):2143-2148.

[11] Zhang P P,Zhan M,Huang T,et al. Sensitivity analysis of material parameters on spring-back of NC bending of high-strength TA18 tube [J].Advanced Materials Research,2012,472-475:1003-1008.

[12] Xue X,Liao J,Vincze G,et al. Modelling of mandrel rotary draw bending for accurate twist springback prediction of an asymmetric thin-walled tube[J]. Journal of Materials Processing Technology,2015,216:405-417.

[13] Zhu Y X,Liu Y. L,Yang H .Effect of mandrel-cores on springback and sectional deformation of rectangular H96 tube NC bending[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,78(1-4):351-360.

[14] Lou H Z,Stelson K A.Three-dimensional tube geometry control for rotary draw tube bending,part 1:bend angle and overall tube geometry control [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering,2001,123(2):258-265.

[15] Lou H Z,Stelson K A.Three-dimensional tube geometry control for rotary draw tube bending,part 2:statistical tube tolerance analysis and adaptive bend correction[J].Journal of Manufacturing Science and Engineering,2001,123(2):266-271.

[16] 古涛,鄂大辛,何花卉,等.1Cr18Ni9Ti管弯曲回弹的有限元模拟与试验分析[J].模具工业,2008(5):17-20.
GU Tao,E Daxin ,HE Huahui,et al.Finite element simulation and experimental analysis on the spring-back after bending of 1Cr18Ni9Ti pipe[J].Die & Mould Industry,2008(5):17-20.(in Chinese)

[17] 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 Jun,LU Shiqiang,WANG Kelu,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.(in Chinese)

[18] 中国航空工业总公司.金属管材室温拉伸试验方法:HB 5145-1996 [S].北京:中国标准出版社,1996:1-9.
Aviation Industry Corporation of China,Ltd.Method for tensile testing of matallic tubes at room temperature:HB 5145-1996[S].Beijing:China Quality and Standards Publishing & Media Co.,Ltd,1996:1-9.(in Chinese)

[19] 国防科学技术工业委员会.航空用不锈钢无缝钢管规范:GJB 2296A-2005 [S].北京:国防科工委军标出版发行部,2005:1-9.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense.Specification for stainless steel seamless steel tubes for aircraft: GJB 2296A-2005 [S].Beijing:Military Standard Publishing and Distribution Department of the Commission of Science, Technology and Industry for National Defense,2005:1-9.(in Chinese)

(编辑:刘 静)