

## 芯模对小弯曲半径管材数控弯曲成形的作用效应

尚文瑄<sup>1</sup>, 向军淮<sup>1</sup>, 方 军<sup>2</sup>, 万 涛<sup>2</sup>, 李旻纯<sup>1</sup>, 王克鲁<sup>3</sup>, 鲁世强<sup>3</sup>

(1. 江西科技师范大学 材料与能源学院, 江西 南昌 330038;

2. 江西科技师范大学 信息与机电工程学院, 江西 南昌 330038; 3. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 为了揭示芯模对小弯曲半径管材数控弯曲成形的作用效应, 根据管材数控弯曲成形过程中模具与管材之间的几何位置关系, 推导出了芯模伸出量和芯模直径的解析模型, 建立了小弯曲半径高锰高氧奥氏体不锈钢管数控弯曲成形有限元模型, 并通过实验验证了模型的可靠性; 然后, 利用所建立的有限元模型模拟分析了芯模类型、芯模伸出量及芯模直径对小弯曲半径高强不锈钢管数控弯曲成形切向应力应变分布、壁厚增厚、壁厚减薄和截面畸变的影响。结果表明: 半球式芯模可以获得最佳的成形性能; 随着芯模伸出量、芯模直径的增加, 壁厚减薄率增加, 截面畸变率减小, 而壁厚增厚率变化不明显; 获得了合适的芯模伸出量和芯模直径, 范围分别为 0.5~1.5 mm 和  $\Phi 5.23 \sim \Phi 5.43$  mm。

**关键词:** 21-6-9 高强不锈钢管; 小弯曲半径; 芯模类型; 芯模伸出量; 芯模直径

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.006

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0037-10

## Action effects of mandrel on numerical control bending of tube with small bending radius

Shang Wenxuan<sup>1</sup>, Xiang Junhui<sup>1</sup>, Fang Jun<sup>2</sup>, Wan Tao<sup>2</sup>, Li Minchun<sup>1</sup>, Wang Kelu<sup>3</sup>, Lu Shiqiang<sup>3</sup>

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

2. School of Information and Mechatronics Engineering, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China;

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

**Abstract:** In order to reveal the action effect of mandrel on numerical control (NC) bending tube with small bending radius, according to the geometric position relationship between dies and tube in the NC bending process of tube, the analytical models of mandrel extension amount and mandrel diameter were deduced, the finite element (FE) model of NC bending for 21-6-9 high strength stainless steel tube with small bending radius was built, and the reliability of the model was verified by experiment. Then, the influences of mandrel types, mandrel extension amount and mandrel diameter on tangential stress/strain distribution, wall thickness thickening, wall thickness thinning and cross-section distortion of high strength stainless steel tube with small bending radius in NC bending were analyzed by using the FE model. The results show that the hemispherical mandrel can obtain the best forming performance. With the increasing of mandrel extension amount and mandrel diameter, the wall thickness thinning rate increases and the cross-section distortion rate decreases, while the wall thickness thickening rate does not change significantly. In addition, the ranges of suitable mandrel extension amount and mandrel diameter are 0.5~1.5 mm and  $\Phi 5.23 \sim \Phi 5.43$  mm, respectively.

**Key words:** 21-6-9 high strength stainless steel tube; small bending radius; mandrel type; mandrel extension amount; mandrel diameter

近年来, 随着现代工业技术的快速发展, 航空、航天等高科技领域愈发需要具有高性能、轻量化特点的弯管件。为了达到整体管件节约空间、节省成本, 实现轻量化的目的<sup>[1-4]</sup>, 高效的小弯曲半径管

材精确数控弯曲成形技术亟待研究。高锰高氮奥氏体不锈钢管管材具有高强度、耐腐蚀、耐高温等优异性能, 在液压管路系统中得到了广泛的应用, 但由于其屈服比大、屈弹比高等特点, 导致其弯曲成形较为困难, 容易出现壁厚过度减薄、截面过度畸变和卸载回弹大等问题<sup>[5-6]</sup>, 特别是小弯曲半径(弯曲半径/管径 $\leq 2$ )管件弯曲时, 上述缺陷更容易发生。为了弯制出成形质量高的小弯曲半径弯管件, 需要采取相应措施对成形缺陷进行控制, 而芯模的合理选取和设计有利于控制弯管件的成形缺陷, 提高弯管件的成形质量<sup>[7]</sup>。因此, 对于数控弯曲成

收稿日期: 2024-01-09; 修订日期: 2024-04-12

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)

作者简介: 尚文瑄 (1999-), 女, 硕士研究生

E-mail: 1344871703@qq.com

通信作者: 方 军 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: fangjun020j13@163.com

形小弯曲半径管材, 研究芯模的作用效应具有重要的理论意义和实际运用价值。

目前, 国内外学者已经进行了大量研究, 以探讨芯模对管材弯曲成形质量的影响。Safdarian R<sup>[8-9]</sup>采用数值模拟与实验相结合的方法, 研究了芯模位置、芯球个数、管材与压块摩擦、压块助推速度和压块压力对 BS 3059 钢管的绕弯成形起皱、截面椭圆度和破裂的影响。结果表明: 芯模位置是影响椭圆度的主要参数, 随着芯模位置与弯曲中心之间距离的增大, 椭圆度和起皱程度增大; 随着芯球数的增加和芯模位置与弯曲中心之间距离的减小, 弯管断裂的可能性增大, 而椭圆度减小。Ancellotti S 等<sup>[10]</sup>基于 ABAQUS CAE 环境建立了采用新型弹性平行六面体芯模的 S235JR 矩形焊管绕弯成形有限元模型, 研究了芯模位置、间隙和摩擦对 S235JR 矩形焊管绕弯成形壁厚减薄和截面畸变的影响。Zhu Y X 等<sup>[11]</sup>采用有限元模拟结合实验方法, 研究了 PVC 芯模对 H96 矩形铜管绕弯成形损伤分布、壁厚变化、截面畸变和回弹的影响, 并与传统球窝节式芯模的结果进行对比, 发现采用 PVC 芯模可以减小最大损伤值, 获得均匀的壁厚分布和小的壁厚变化以及阻止截面高度变形; 回弹角随着 PVC 芯模塑性硬化的增大而减小。王子昂<sup>[12]</sup>基于 ABAQUS 有限元模拟平台, 并结合正交实验设计, 研究了芯模与管材间隙、芯模端部曲率半径、芯模曲线段长度和芯模伸出量对管材弯曲成形指标的影响, 利用综合评分法分析获得了各影响因子的最优水平, 并研究了最优工艺参数随管径变化的规律。李恒等<sup>[13-14]</sup>根据数控弯曲过程中管材与模具的几何位置关系, 建立了管材绕弯成形过程中芯模的解析模型, 研究获得了合适的芯模参数 (芯模直径  $d_m$ 、芯模伸出量  $e$ 、芯球数  $n$ 、芯球的厚度  $k$  等), 并采用数值模拟方法研究了芯模对弯曲过程中应力、应变分布的影响, 揭示了芯模防止弯管起皱的作用机制。蒋兰芳等<sup>[15]</sup>建立了超薄壁 304 不锈钢管数控绕弯有限元模型, 模拟研究了芯球个数、芯球厚度和芯模支撑角度等芯模参数对弯管成形质量的影响, 总结出了合理的芯模支撑角度范围。Xu J 等<sup>[16]</sup>提出了基于显著性的工艺参数优化方法, 分析了工艺参数对最大壁厚减薄率和最大截面畸变率的显著性, 获得了芯模参数的最优值。方军等<sup>[17-18]</sup>在 ABAQUS 有限元平台上, 构建了一个数控弯曲成形有限元模型, 该模型用于研究相对弯曲半径为 3 的 21-6-9 高强不锈钢管, 研究了无芯弯曲以及不同芯模类型对管材数控绕弯成形质量的影

响, 获得了合适的芯模类型及参数。

综上所述, 目前研究主要集中于常规弯曲半径 (弯曲半径/管径  $\geq 3$ ), 关于小弯曲半径条件下芯模参数及类型对管材弯曲成形质量的影响的报道较为有限, 鲜有芯模类型及参数对小弯曲半径高强不锈钢管数控弯曲成形影响的报道。因此, 本文首先根据管材弯曲成形过程中各部位的几何位置关系, 建立芯模伸出量和直径的理论解析模型; 其次, 利用 ABAQUS 有限元平台, 建立了一个数控弯曲成形有限元模型, 该模型用于研究小弯曲半径为 2 的 21-6-9 高强不锈钢管。通过与实验结果的比较, 确认了有限元模型的可靠性。然后, 模拟研究不同芯模类型对管材成形的影响 (应力应变分布、壁厚变化率和截面畸变率), 确定合理的芯模类型; 最后, 基于合理的芯模类型, 模拟分析芯模参数对管材成形的影响规律, 获得合适的芯模伸出量和直径范围。研究结果可为小弯曲半径高强不锈钢管数控弯曲成形过程中芯模的选取和设计提供理论指导。

## 1 芯模相关参数的理论建模

### 1.1 芯模伸出量的理论解析模型

图 1 为管材数控弯曲成形示意图。图 1 中,  $D$  为管材外径、 $D_0$  为管材内径、 $D_1$  为管材弯曲后沿半径方向的截面尺寸、 $t$  为管材壁厚、 $t_0$  和  $t_i$  分别为弯曲后外侧最小壁厚和内侧最大壁厚、 $d_m$  为芯模直径、 $R$  为弯曲半径、 $e$  为芯模伸出量、 $\theta$  为弯曲平面与测量平面的夹角、 $\omega$  为绕弯速度。根据模具与管材之间的相对位置关系, 结合勾股定理可得:

$$l_{OA} = R + \frac{d_m}{2} \quad (1)$$

$$l_{OA}^2 + e^2 = l_{OB}^2 \quad (2)$$

式中:  $l_{OA}$ 、 $l_{OB}$  分别为线段  $OA$ 、 $OB$  的长度。

虽然芯模能有效地提高管材弯曲成形质量, 但不合适的芯模伸出量会导致管材弯曲时产生严重的壁厚减薄、截面畸变等缺陷。根据模具和管材的相对位置关系, 可知芯模圆柱球头切点  $B$  不应与管材内壁接触, 即:

$$l_{OB} < R + \frac{D_0}{2} \quad (3)$$

结合式 (2) 和式 (3), 可以获得芯模伸出量的合适取值范围, 即:

$$e < \sqrt{\left(R + \frac{D_0}{2}\right)^2 - \left(R + \frac{d_m}{2}\right)^2} \quad (4)$$

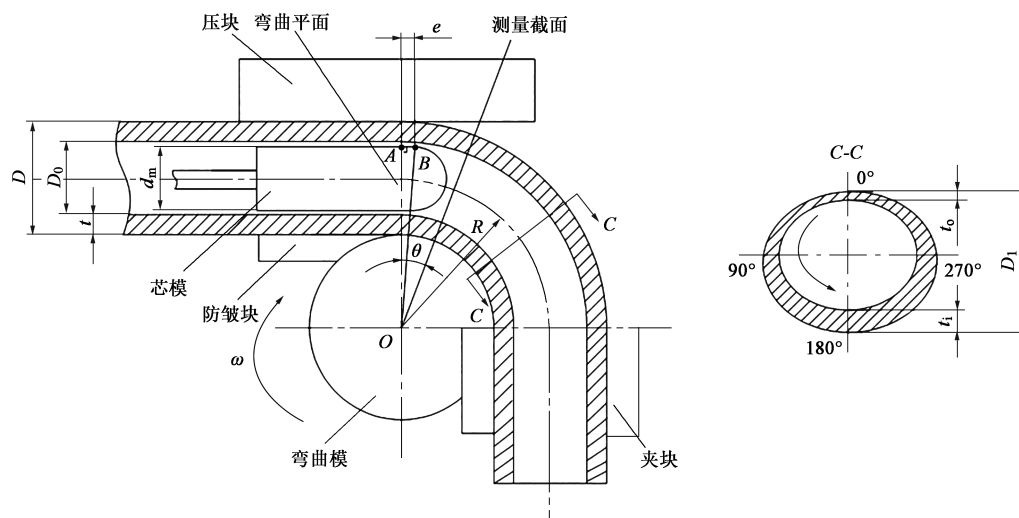


图 1 管材数控弯曲成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of NC bending for tube

## 1.2 芯模直径的理论解析模型

芯模在管材数控弯曲过程中主要起支撑作用，芯模直径过小，会导致管材弯曲时支撑力不足，使得弯管截面塌陷。根据 HB 4-55—2002<sup>[19]</sup>，截面畸变率  $\Delta D$  小于 5%，即：

$$\Delta D = (D - D_1) / D \times 100\% < 5\% \quad (5)$$

由于芯模为刚体，管材数控弯曲结束后， $D_1$  恒大于  $d_m$ ，取  $D_1 = d_m$ ，并将其代入式 (5)，得到芯模直径的合理取值范围，如式 (6) 所示。

$$d_m > 0.95D_0 \quad (6)$$

## 2 小弯曲半径管材数控弯曲成形有限元模型的建立及验证

### 2.1 有限元模型的建立

研究对象选择规格为  $\Phi 6.35 \text{ mm} \times 0.41 \text{ mm}$ （管材外径×管材壁厚）的高锰高氮奥氏体不锈钢管材，

设计合理的弯管模具尺寸，使用商业软件 ABAQUS，建立相对弯曲半径为 2 的小弯曲半径高强不锈钢管数控弯曲成形有限元模型，如图 2 所示。

高锰高氮奥氏体不锈钢管材的力学性能参数由单向拉伸实验获得，如表 1 所示。采用弹塑性本构模型描述高锰高氮奥氏体不锈钢管材的特性，其中，弹性阶段采用胡克定律  $\bar{\sigma} = E\bar{\varepsilon}$ （其中， $\bar{\sigma}$  为等效应力， $E$  为弹性模量， $\bar{\varepsilon}$  为等效应变）描述，塑性阶段采用 Mises 屈服准则描述管材的塑性变形行为，并采用 Ludwigs 方程表征管材的冷加工硬化特征<sup>[20]</sup>。

### 2.2 有限元模型的验证

为了确保所建的有限元模型的可靠性，根据现有实验条件，对规格为  $\Phi 6.35 \text{ mm} \times 0.41 \text{ mm}$  的高锰高氮奥氏体不锈钢管开展数控弯曲成形实验研究，其中，弯曲半径  $R$  为 20 mm，弯曲角度  $\alpha$  为  $90^\circ$ 。图 3 为模拟和实验得到的弯管外形轮廓，由图 3 可以看出，弯管外形轮廓的模拟和实验结果非常相似。

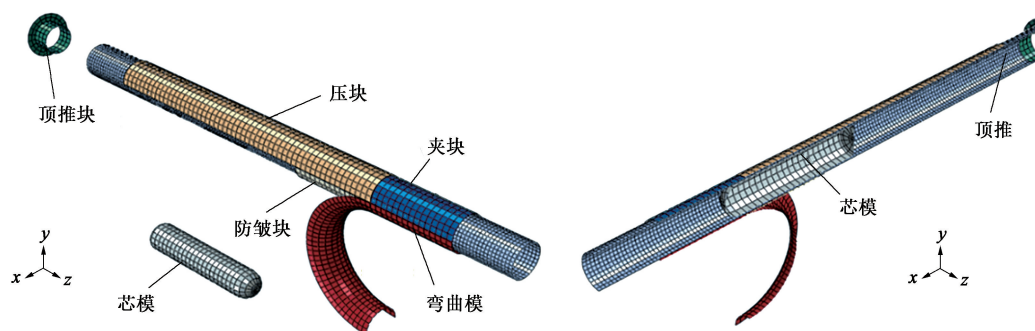


图 2 小弯曲半径管材数控弯曲成形有限元模型

Fig. 2 Finite element model of NC bending for tube with small bending radius

表 1 21-6-9 高强不锈钢管材力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of 21-6-9 high strength stainless steel tube

参数	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	强度系数/MPa	抗拉强度/MPa	硬化系数	伸长率/%
数值	197	0.28	923	1648.2	1135	0.175	21

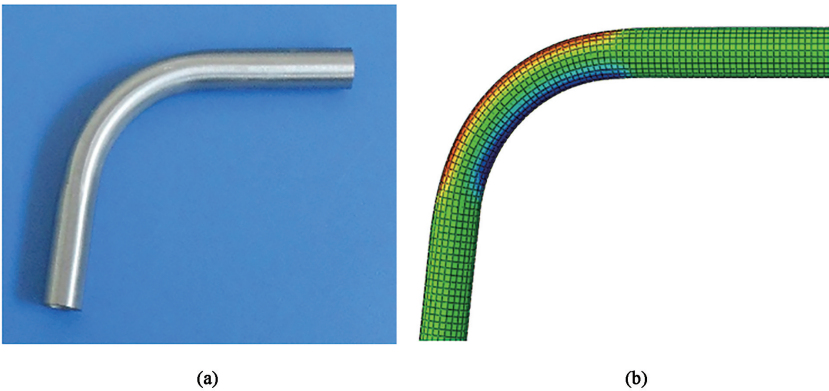


图 3 模拟 (a) 和实验 (b) 得到的弯管构件外形轮廓对比

Fig. 3 Comparison of bent-tube profiles between simulation (a) and experiment (b)

图 4 为弯管成形质量指标的有限元模拟结果与实验结果对比。观察图 4 可以发现，模拟与实验结

果的匹配度吻合良好，壁厚增厚率  $\Delta t_i$  [ $\Delta t_i = (t_i - t)/t \times 100\%$ ]、壁厚减薄率  $\Delta t_o$  [ $\Delta t_o = (t - t_o)/t \times$

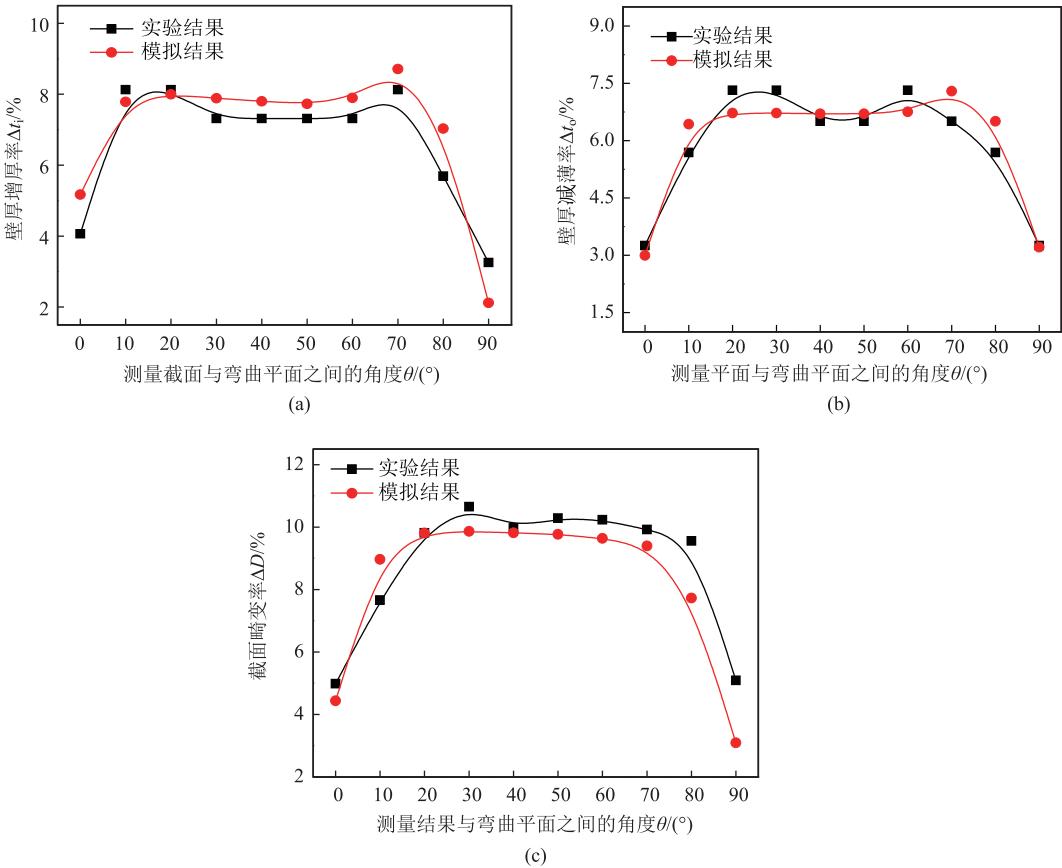


图 4 管材弯曲成形质量指标有限元模拟结果与实验结果对比

(a) 壁厚增厚率 (b) 壁厚减薄率 (c) 截面畸变率

Fig. 4 Comparison of quality indexes for tube bending between finite element simulation results and experiment results

(a) Wall thickness thickening rate (b) Wall thickness thinning rate (c) Section distortion ratio



100%] 和截面畸变率的最大值的相对误差分别为 7.160%、0.335% 和 7.420%，表明所建立的有限元模型是可靠的，可以用于研究芯模对小弯曲半径管材数控弯曲成形的作用效应。

### 3 结果与讨论

管材数控弯曲成形过程中的芯模类型主要包括圆柱式芯模、半球式芯模和球窝节式芯模<sup>[21]</sup>，如图 5 所示。为了研究不同芯模类型对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形中切向应力应变

分布、壁厚增厚、壁厚减薄和截面畸变的影响，在其他条件相同的情况下，选取无芯模、圆柱式芯模、半球式芯模和球窝节式芯模进行模拟实验。

#### 3.1 芯模类型对小弯曲半径管材数控弯曲成形切向应力应变的影响

图 6 为不同芯模类型对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形结束时切向应力分布的影响。从图 6 可以看出，由于管材数控弯曲属于局部渐近弯曲成形，即变形主要发生在弯曲切点附近的区域，无芯弯曲和有芯弯曲（芯模类型为圆柱式芯模、半球式芯模和球窝节式芯模）内外侧切向应

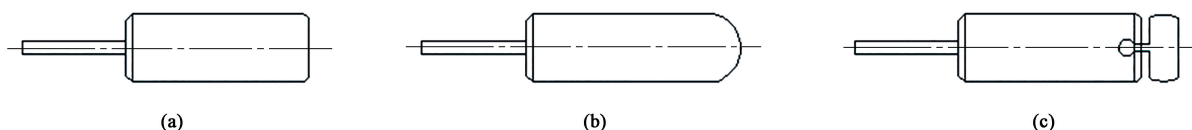


图 5 芯模的类型

(a) 圆柱式芯模 (b) 半球式芯模 (c) 球窝节式芯模

Fig. 5 Types of mandrel

(a) Cylindrical mandrel (b) Hemispherical mandrel (c) Ball-and-socket mandrel

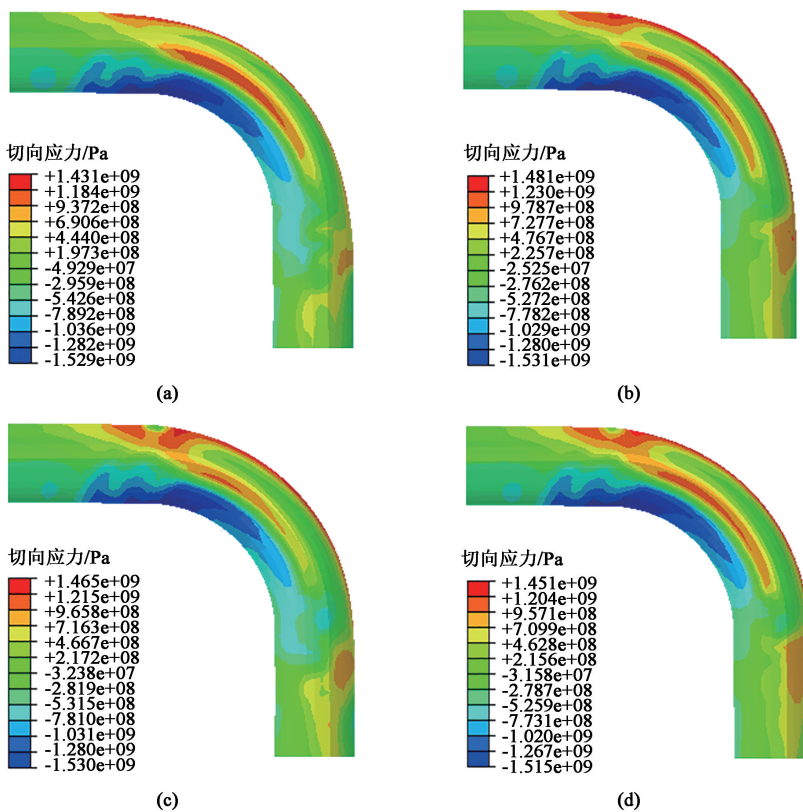


图 6 芯模类型对切向应力分布的影响

(a) 无芯模 (b) 圆柱式芯模 (c) 半球式芯模 (d) 球窝节式芯模

Fig. 6 Effect of mandrel type on tangential stress distribution

(a) Without mandrel (b) Cylindrical mandrel (c) Hemispherical mandrel (d) Ball-and-socket mandrel

力的最大值主要分布在弯曲平面附近的区域。无芯弯曲和圆柱式芯模弯曲时,弯曲平面附近的切向拉应力分布较均匀且连续,而半球式芯模和球窝节式芯模时则出现间断现象,如图 6c 和图 6d 所示。这是由于半球式芯模和球窝节式芯模伸出量的外面还存在半球和芯球,从而导致切向拉应力出现间断现象。无芯弯曲时,切向压应力的分布形状、大小、位置与有芯弯曲的相似。从切向应力的大小可以看出,无芯弯曲和不同芯模下有芯弯曲的切向压应力最大值相差不大,这是由于弯管内侧均受到弯曲模型腔的约束导致的<sup>[22]</sup>;无芯弯曲时切向拉应力最大值较有芯弯曲的小,这是由于无芯弯曲过程中弯管内无芯模的支撑,不存在芯模与管壁之间的摩擦阻力,

使得管材更易弯曲成形,因此,切向拉应力较小。

图 7 为不同芯模类型对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形结束时切向应变分布的影响。从图 7 可以看出,无芯弯曲和不同芯模下有芯弯曲的内外侧切向应变分布均匀连续,且形状、大小和位置相似;弯曲段中间部分的切向应变较大,两端的切向应变较小。从切向应变的大小可以看出,无芯弯曲时切向拉应变的最大值最小,这是由于无芯弯曲过程中无芯模的支撑约束作用导致的;有芯弯曲时,不同芯模下的切向应变的最大值相差不大,这是因为在芯模参数及其他工艺条件一致的情况下,改变芯模的部分结构对切向应变最大值的影响不大。

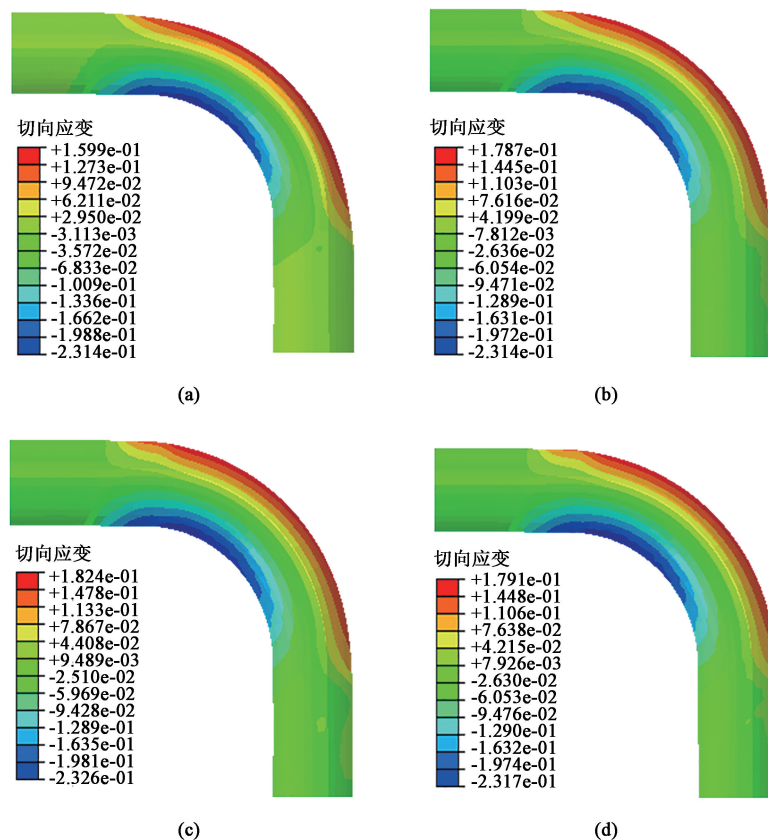


图 7 芯模类型对切向应变分布的影响

(a) 无芯模 (b) 圆柱式芯模 (c) 半球式芯模 (d) 球窝节式芯模

Fig. 7 Effect of mandrel type on tangential strain distribution

(a) Without mandrel (b) Cylindrical mandrel (c) Hemispherical mandrel (d) Ball-and-socket mandrel

### 3.2 芯模类型对小弯曲半径管材数控弯曲成形质量的影响

图 8 为不同芯模类型对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形质量的影响。从图 8a 可以看出,无芯弯曲时,管材内侧壁厚增厚高于有芯

弯曲,且 3 种芯模下有芯弯曲时,管材内侧壁厚的变化均不明显。这是由于有芯弯曲时,芯模对管材的支撑作用,限制了弯管内侧壁厚的变化,使得有芯弯曲时的壁厚增厚率相对于无芯弯曲要小,而 3 种芯模下芯模对弯管内侧的约束支撑作用基本一致,

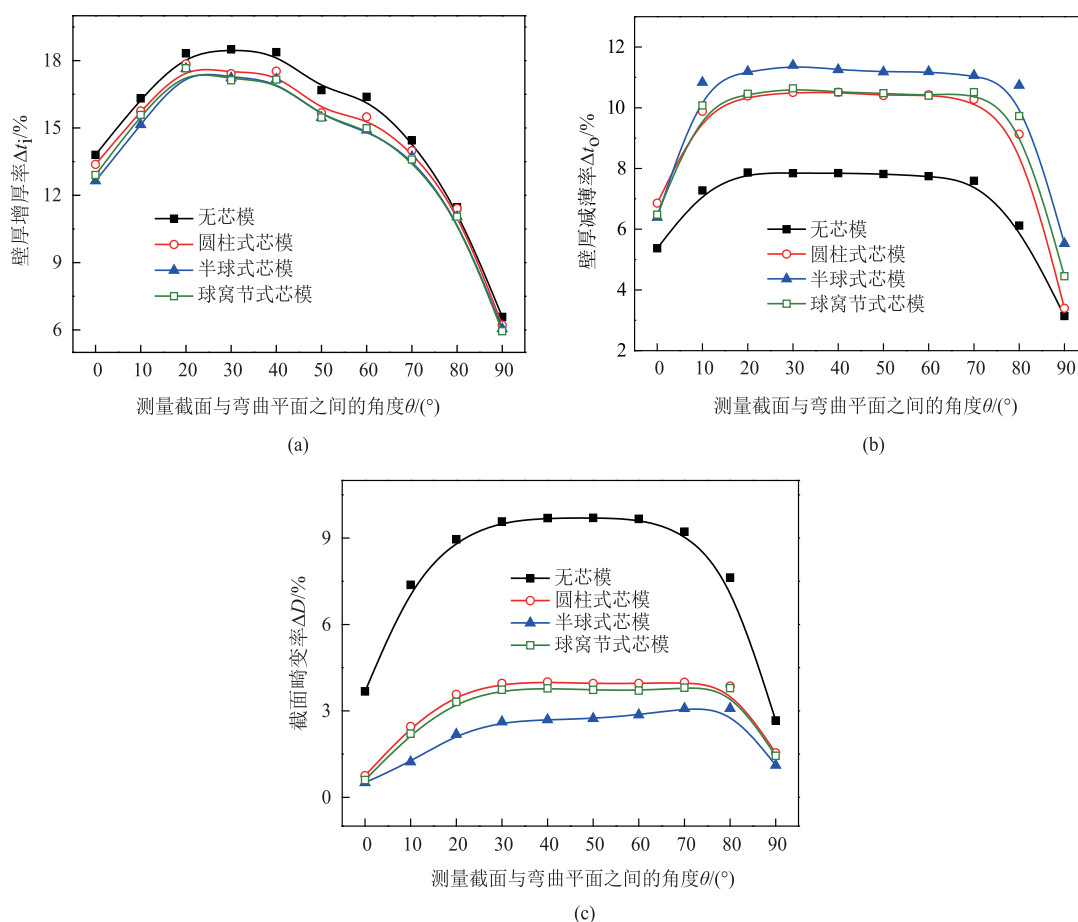


图 8 芯模类型对弯管成形的影响

(a) 壁厚增厚率 (b) 壁厚减薄率 (c) 截面畸变率

Fig. 8 Effect of mandrel type on tube bending

(a) Wall thickness thickening rate (b) Wall thickness thinning rate (c) Section distortion ratio

使得弯管内侧壁厚变化不明显。从图 8b 可以看出, 无芯弯曲时, 外侧壁厚减薄率远小于有芯弯曲, 且半球式芯模的外侧壁厚减薄率大于圆柱式芯模和球窝节式芯模。这是由于芯模与管材内表面接触并产生摩擦力, 阻碍了弯曲平面后面直线段的材料向弯曲段补给, 从而导致壁厚减薄率增大。芯模与管材的接触面积从小到大依次为半球式芯模、球窝节式芯模和圆柱式芯模, 而相同情况下接触面积越大, 摩擦力越大, 因此, 壁厚减薄率越大。从图 8c 可以看出, 无芯弯曲时, 管材的截面畸变率远大于有芯弯曲, 半球式芯模的弯管截面畸变率最小, 圆柱式芯模和球窝节式芯模的截面畸变率相近。这主要是因为无芯弯曲时, 管材内部无芯模的支撑, 截面易变形塌陷, 因此截面畸变最大; 有芯弯曲时, 管材内部得到芯模的支撑, 截面畸变较小, 并且截面畸变的大小与芯模支撑管材内部的面积大小有关, 接触面积越大, 截面畸变越小。

综合考虑小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形时, 芯模对管材成形的影响 (切向应力应变分布、壁厚变化率和截面畸变率), 以及芯模设计制造的容易程度等, 宜选用半球式芯模。

### 3.3 芯模伸出量对小弯曲半径管材数控弯曲成形质量的影响

在半球式芯模条件下, 选取芯模直径  $d_m = \Phi 5.38 \text{ mm}$ , 研究了芯模伸出量对壁厚变化和截面畸变的影响。图 9a 和图 9b 显示, 当芯模伸出量增加时, 壁厚增厚率变化不明显, 壁厚减薄率随之增加。这是由于数控弯曲成形主要发生在弯曲切点附近, 当弯曲成形发生时, 芯模与切点后面的管材内壁接触, 从而能够有效地抑制壁厚增厚, 而芯模与切点前端管材内壁不接触, 故对壁厚增厚影响不大。壁厚减薄率增加是因为: 芯模伸出量越大, 必然增大芯模对管材的摩擦力, 从而增加材料变形阻力,

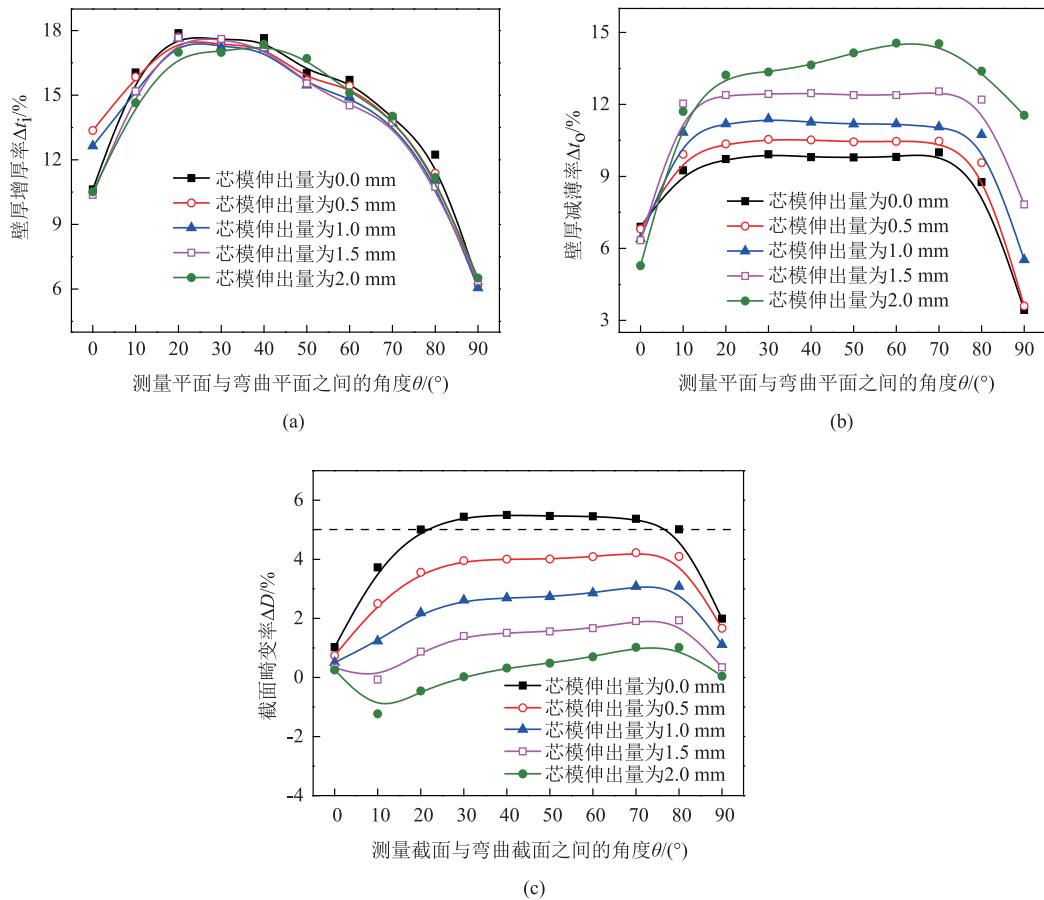


图9 芯模伸出量对弯管成形的影响

(a) 壁厚增厚率 (b) 壁厚减薄率 (c) 截面畸变率

Fig. 9 Effect of mandrel extension amount on tube bending

(a) Wall thickness thickening rate (b) Wall thickness thinning rate (c) Section distortion ratio

使材料不能顺畅地传递到弯曲段, 故外侧壁厚减薄率增大。

由图 9c 中可以看出, 截面畸变率与芯模伸出量呈负相关。这是因为, 一方面芯模伸出量越大, 芯模对管材的摩擦力越大, 使得切向拉应力越大, 从而导致截面畸变增大; 当芯模伸出量增大时, 芯模对管材的支撑作用也随之增强。这种增强的支撑作用能够减小截面畸变, 而且芯模的支撑作用在整个过程中起着主导作用。因此, 随着芯模伸出量的增大, 截面畸变率会相应减小。当芯模伸出量  $e = 0.0$  mm 时, 截面畸变率曲线的峰值已经高于 HB 4-55—2022<sup>[19]</sup> 规定的 5% 上限; 当芯模伸出量  $e = 2.0$  mm 时, 截面畸变率在弯曲平面附近分布情况与其他芯模伸出量不同, 呈现出先减小后增加的趋势, 这是由于芯模伸出量过大产生鼓包导致的。通过式 (4) 计算发现芯模伸出量  $e < 1.52$  mm, 进一步验证了  $e = 2.0$  mm 时, 芯模伸出量已超出了允

许值, 导致弯曲平面附近出现鼓包现象。

因此, 综合考虑芯模伸出量对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形质量的影响, 合适的芯模伸出量的取值范围为 0.5~1.5 mm。

### 3.4 芯模直径对小弯曲半径管材数控弯曲成形质量的影响

在半球式芯模条件下, 选取芯模伸出量  $e = 1.0$  mm, 研究芯模直径对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形质量的影响, 结果如图 10 所示。从图 10a 和图 10b 可以看出, 当芯模直径增加时, 壁厚增厚率稍微减少, 而壁厚减薄率则增加。这是由于增加芯模直径相当于减小了芯模与管材之间的间隙, 限制了内侧壁厚的增厚, 增加了管材弯曲成形的阻力, 从而使得管材内侧壁厚增厚率稍微减小, 外侧壁厚减薄率增大。

从图 10c 可以看出, 芯模直径越大, 截面畸变程度越小。这主要是因为: 芯模直径的增加使得与



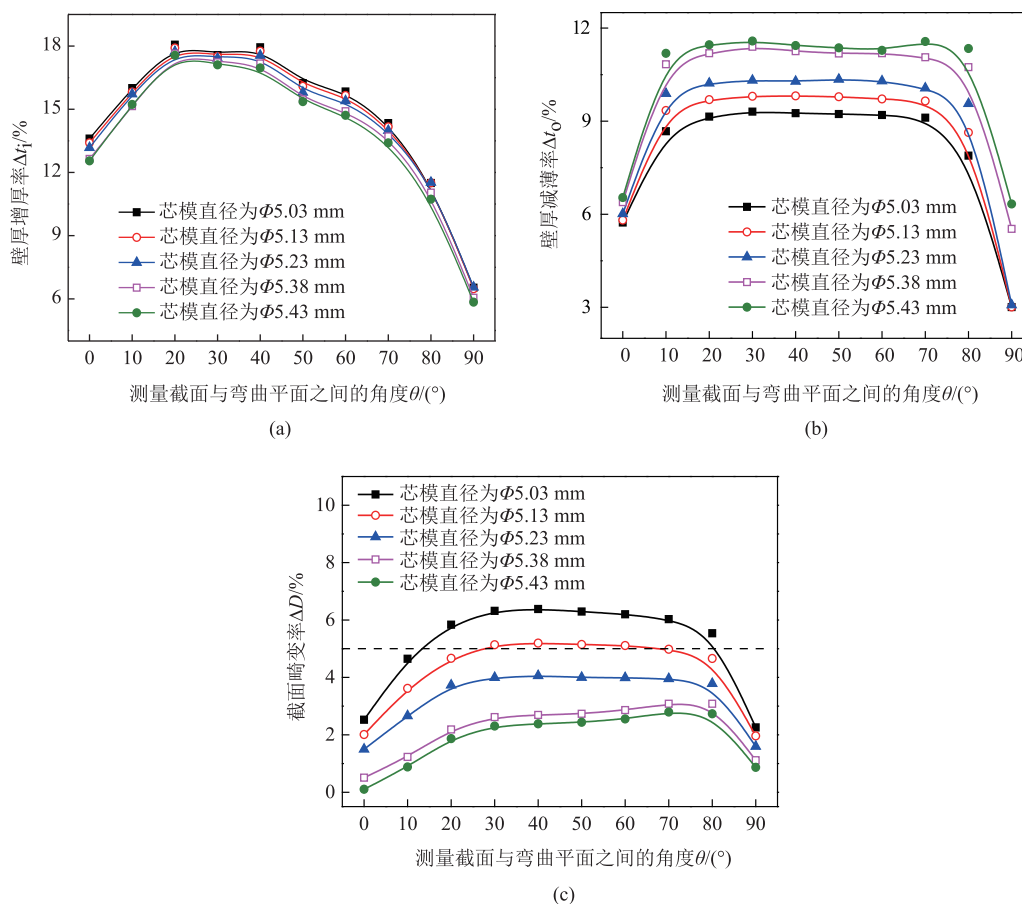


图 10 芯模直径对弯管成形的影响

(a) 壁厚增厚率 (b) 壁厚减薄率 (c) 截面畸变率

Fig. 10 Effect of mandrel diameter on tube bending

(a) Wall thickness thickening rate (b) Wall thickness thinning rate (c) Section distortion ratio

管材间的摩擦与相互作用增大, 摩擦力增大, 导致截面变形程度变大, 支撑作用增大导致截面畸变程度减小。当  $d_m \leq 5.13$  mm 时, 截面畸变率曲线的峰值已经高于 HB 4-55—2002<sup>[19]</sup> 规定的 5% 上限, 这是由于芯模直径太小, 不足以支撑截面扁化导致的。由式 (6) 计算获得  $d_m > \Phi 5.25$  mm, 进一步证明了上述结论。芯模直径太大, 即管材与芯模之间的间隙太小, 使得管材与芯模之间的摩擦力过大, 导致弯曲成形困难; 另外, 芯模直径太大, 易刮伤弯管内表面并加剧芯模的磨损。

因此, 综合考虑芯模直径对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形的壁厚增厚、壁厚减薄、截面畸变等的影响, 芯模直径在  $\Phi 5.23 \sim \Phi 5.43$  mm 范围内取值为佳。

## 4 结论

(1) 建立了芯模伸出量和芯模直径的理论解析

模型, 并通过有限元模拟结果验证了理论解析模型的可靠性。

(2) 揭示了无芯模、圆柱式芯模、半球式芯模和球窝节式芯模对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形的影响, 确定了小弯曲半径高强不锈钢管数控弯曲成形的合适的芯模类型为半球式芯模。

(3) 揭示了芯模伸出量和芯模直径对小弯曲半径高锰高氮奥氏体不锈钢管数控弯曲成形壁厚增厚、壁厚减薄和截面畸变的影响, 确定了合适的芯模伸出量和芯模直径取值范围分别为 0.5 ~ 1.5 mm 和  $\Phi 5.23 \sim \Phi 5.43$  mm。

## 参考文献:

- [1] 郭训忠, 陶杰, 王辉. 航空导管先进成形技术的研究进展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52 (1): 12-23.  
Guo X Z, Tao J, Wang H. Research progress on advanced forming technology for aviation tube [J]. Journal of Nanjing University of

- Aeronautics and Astronautics, 2020, 52 (1): 12–23.
- [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] 付颖, 张昭, 杨恒, 等. 高强小弯曲半径钛管热场辅助数控弯曲工艺参数确定性优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (4): 60–69.
- Fu Y, Zhang Z, Yang H, et al. Process parameters deterministic optimization of heat field-assisted numerical control bending for titanium tube with high strength and small bending radius [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (4): 60–69.
- [4] Fang J, Lu S Q, Wang K L, et al. Deformation behaviors of 21-6-9 stainless steel tube numerical control bending under different friction conditions [J]. Journal of Central South University, 2015, 22 (8): 2864–2874.
- [5] Jiang L F, Zhang S Y, Wang Y Q, et al. Research on bending forming method of large diameter-thickness ratio thin-walled tubes for aerospace [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102 (9–12): 3027–3049.
- [6] 欧阳芳, 鲁世强, 方军, 等. 几何参数对变弹性模量条件下 21-6-9 管绕弯成形质量的影响 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (1): 27–37.
- Ouyang F, Lu S Q, Fang J, et al. Effect of geometrical parameters on forming quality of 21-6-9 tube in rotary draw bending under condition of variable elastic modulus [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (1): 27–37.
- [7] Fang J, Liang C, Lu S Q, et al. Effect of geometrical parameters on forming quality of high-strength TA18 titanium alloy tube in numerical control bending [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28 (2): 309–318.
- [8] Safdarian R. Investigation of tube fracture in the rotary draw bending process using experimental and numerical methods [J]. International Journal of Material Forming, 2019, 13 (prepublish): 1–24.
- [9] Safdarian R. Experimental and numerical investigation of wrinkling and tube ovality in the rotary draw bending process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233 (16): 5568–5584.
- [10] Ancellotti S, Benedetti M, Fontanari V, et al. Rotary draw bending of rectangular tubes using a novel parallelepiped elastic mandrel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85 (5–8): 1089–1103.
- [11] Zhu Y X, Liu Y L, Li H P, et al. Comparison between the effects of PVC mandrel and mandrel-cores die on the forming quality of bending rectangular H96 tube [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 76: 132–143.
- [12] 王子昂. 管材冷弯工艺中无球芯棒改进方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- Wang Z A. Research on the Improvement Method of Non-ball Mandrel in Tube Cold Bending Process [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [13] Li H, Yang H, Zhan M, et al. Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2007, 47 (7–8): 1164–1175.
- [14] 李恒. 多模具约束下薄壁管数控弯曲成形过程失稳起皱行为 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- LI H. Research on Wrinkling in NC Bending of Thin-walled Tube in Multi-dies Constraints [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [15] 蒋兰芳, 王亚群, 林姚辰, 等. 芯棒参数对超薄壁管数控绕弯成形质量的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54 (4): 144–154.
- Jiang L F, Wang Y Q, Lin Y C, et al. Effect of mandrel parameters on NC RDB forming quality of ultra-thin-walled tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54 (4): 144–154.
- [16] Xu J, Yang H, Li H, et al. Significance-based optimization of processing parameters for thin-walled aluminum alloy tube NC bending with small bending radius [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (1): 147–156.
- [17] Fang J, Lu S Q, Wang K L, et al. Effect of mandrel on cross-section quality in numerical control bending process of stainless steel 2169 small diameter tube [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2013, 2013: 1–9.
- [18] 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.
- [19] HB 4-55—2002, 导管弯曲半径 [S].
- HB 4-55—2002, Radius for tube cook [S].
- [20] 唐金星. 多模具约束下管材数控弯曲成形数值模拟研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- Tang J X. Numerical Simulation Study of Tube NC Bending Forming Under Multi-die Constraints [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [21] Fang J, Lu S Q, Liang C, et al. Mandrel role in numerical control rotary draw bending process of TA18 high strength titanium alloy tube [A]. 2019 5th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology (ICAMMT 2019) [C]. Singapore, 2019.
- [22] Fang J, Lu S Q, Liang C, et al. Influences of mandrel types on forming quality of TA18 high strength tube in numerical control bending [A]. 2019 5th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology (ICAMMT 2019) [C]. Singapore, 2019.