

管材成形

## 管模间隙对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材数控弯曲成形质量的影响

王金明, 王 华, 徐振华, 董凌浩, 汪 健

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211800)

**摘要:** 建立了 Ti-2Al-2.5Zr (TA16) 钛合金管材数控弯曲成形过程的有限元模型, 并通过实验验证了该有限元模型的有效性。基于建立的模型研究了管模间隙在数控弯曲过程中对截面畸变率和管材壁厚变化的影响规律, 并利用熵值法得到了最佳的管模间隙值。结果表明: 减小管材/弯曲模间隙和管材/压块间隙以及增大管材/防皱块间隙可以降低外侧壁的减薄率, 随着管材/芯轴间隙的增加, 外侧壁的减薄率先减小后增大; 增大管材/弯曲模间隙和减小管材/芯轴间隙可以降低内侧壁的增厚率; 减小管材/弯曲模间隙和管材/芯轴间隙可以有效地降低截面畸变率; 改变管材/压块间隙和管材/防皱块间隙对内侧壁增厚率和截面畸变率的影响不明显。通过熵值法获得了较佳的管材/弯曲模间隙为 0.10 mm, 管材/芯轴间隙为 0.10 mm, 管材/压块间隙为 0.05 mm, 管材/防皱块间隙为 0.15 mm。

**关键词:** Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管; 数控弯曲成形; 管模间隙; 壁厚变化; 截面畸变率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.011

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 01-0081-08

## Influence of clearance between pipe and die on CNC bending quality for Ti-2Al-2.5Zr titanium alloy pipe

Wang Jinming, Wang Hua, Xu Zhenhua, Dong Linghao, Wang Jian

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

**Abstract:** A finite element model of the CNC bending process for Ti-2Al-2.5Zr (TA16) titanium alloy pipe was established, and the effectiveness of the finite element model was verified by experiments. Then, based on the established model, the influence laws of clearance between pipe and die on the cross-section distortion rate and pipe wall thickness changes during the CNC bending process were studied, and the optimal clearance value between pipe and die was obtained by the entropy method. The results show that decreasing the clearance between pipe and bending die and the clearance between pipe and pressing block and increasing the clearance between pipe and anti-wrinkle block can reduce the thinning rate of outer wall. With the increasing of the clearance between pipe and mandrel, the thinning rate of outer wall first decreases and then increases. Increasing the clearance between pipe and bending die and decreasing the clearance between pipe and mandrel can reduce the thickness rate of inner wall, and decreasing the clearance between pipe and bending die and the clearance between pipe and mandrel can effectively reduce the cross-section distortion rate. Changing the clearance between pipe and press block and the clearance between pipe and anti-wrinkle block has no obvious effect on the thickening rate of inner wall and the cross-section distortion rate. Through the entropy method, the optimal clearance between pipe and bending die is 0.10 mm, the clearance between pipe and mandrel is 0.10 mm, the clearance between pipe and press block is 0.05 mm, and the clearance between pipe and anti-wrinkle block is 0.15 mm.

**Key words:** Ti-2Al-2.5Zr titanium alloy pipe; CNC bending; clearance between pipe and die; wall thickness change; cross-section distortion rate

TA16 钛合金是一种单相  $\alpha$  型钛合金, 名义成

分为 Ti-2Al-2.5Zr, 相变点约为 930  $^{\circ}\text{C}$ 。TA16 钛合金的塑性较高、强度适中, 高温力学性能、热稳定性、耐蚀性及可焊接性等良好, 其主要成形形式为管材, 应用领域多在航空航天、船舶化工等领域<sup>[1-2]</sup>。管材构件数控弯曲成形是一个复杂的非线性物理成形过程, 受到多模具约束及多种因素耦合影响, 可以提高多种金属导管的成形精度、质量和效率, 有效降低复杂弯曲构件的研制成本<sup>[3]</sup>, 但也

收稿日期: 2023-06-21; 修订日期: 2023-09-29

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目 (BE2019007-3); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (KYCX23\_1437)

作者简介: 王金明 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1512036775@qq.com

通信作者: 王 华 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: wanghua@njtech.edu.cn

会在成形过程中存在壁厚变化、截面畸变等诸多缺陷。相较于不锈钢管和铝合金管,由于 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材在室温下具有不同的独特材料属性,塑性和可加工性高,因此 TA16 钛合金在弯曲成形过程中,外侧壁减薄破裂、内侧壁失稳起皱以及截面畸变等缺陷更易出现<sup>[4-5]</sup>。因此,研究管模间隙对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材数控弯曲成形质量的影响,具有重要的理论和应用价值。

针对数控弯曲成形,国内外众多学者多采用理论分析、实验研究及数值模拟等研究方法,研究内容包括模具结构、工艺参数以及材料参数对成形质量、成形精度以及成形极限的影响。唐金星<sup>[5]</sup>模拟分析了不同模具组合对航空航天领域常用导管(0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管材)数控弯曲成形过程中的应力、应变、壁厚、截面畸变的影响规律,并确定了最佳的模具组合。杨睿萌等<sup>[6]</sup>针对 0Cr18Ni9 不锈钢连续多弯导管在实际生产中成形质量差、尺寸精度低的问题,采用数控弯曲成形数值仿真的方法优化了工艺参数,提高了产品的成形质量。Fang J 等<sup>[7]</sup>为了精确预测和有效控制壁厚,提出了考虑圆周变形的理论模型,揭示了壁厚分布与管几何参数的内在关系,采用有限元仿真结合正交实验,研究了高强度 Ti-3Al-2.5V 钛合金数控弯管工艺参数的影响规律和意义。Heng L 等<sup>[8]</sup>结合实验,从起皱、壁厚变薄和截面变形等方面,对不同管材与各种模具之间间隙下的管材弯曲行为和弯曲性能进行了数值研究。Liu K X 等<sup>[9]</sup>为预测和控制薄壁矩形 3A21 铝合金管的壁厚分布,在多模约束下进行了旋转拉伸弯曲工艺实验,研究发现,中弯区的壁厚变化率较大,在管脊附近得到最大值。芯模、压模、弯曲模对壁厚变化率的影响显著。壁厚减薄率随着弯曲速度、管材/压模间隙和芯轴伸出量的增加而增大,但随着弯曲半径和压模推进速度的提高而减小。壁厚增厚率随着压模推进速度的提高而增大,但随着弯曲半径和弯曲速度的增加而减小。许杰等<sup>[10]</sup>针对薄壁铝合金管小弯曲半径数控弯曲,采用析因因子设计分析工艺参数对成形质量的影响,获得管与防皱模间间隙的最优值,并确定管与模具间的间隙和摩擦、芯棒伸出量和助推速度的参数值。结果应用于规格为  $\Phi 50\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 75\text{ mm}$  和  $\Phi 70\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 105\text{ mm}$  的铝合金管弯曲成形,获得了合格的管件。而针对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管模间隙对管材数控弯曲成形质量的影响规律的报道较少,并且大部分学者基于对数据的主观分析得出结论,因此,本文建立了

Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管三维有限元弹塑性模型,研究管模间隙对各种成形缺陷的影响规律,并结合熵值法分析给出较佳的管模间隙值。

## 1 管材构件数控弯曲成形弹塑性模型的建立及实验验证

### 1.1 有限元模型的建立

基于 ABAQUS/Explicit 平台,根据管材构件数控弯曲成形原理,建立了如图 1 所示的 Ti-2Al-2.5Zr (TA16) 钛合金管材数控弯曲三维弹塑性模型。由于管材为可变形壳体,故使用四边形壳单元 S4R 进行网格划分,可以有效地进行沙漏控制;为准确分析材料的非线性行为,在厚度方向设置 9 个单元积分点。在实际工况中,夹块、弯曲模、防皱块、压块、芯轴等的变形很小,故设置为离散型刚体,并采用四结点三维双线性刚性四边形单元 R3D4 进行划分,分析步设置为动力显示,接触设为通用接触,管模间的摩擦因数设为 0.1,管坯长度为 560 mm。

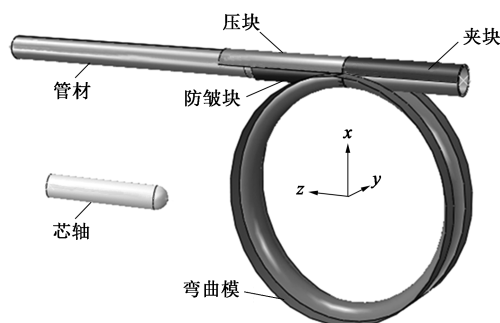


图 1 数控弯曲成形有限元模型

Fig. 1 Finite element model of CNC bending

管材数控弯曲成形过程中伴随的回弹、壁厚变化、截面畸变现象源于管件材料属性的变化。所以仿真模型中材料参数的准确性将直接影响最终结果的准确性<sup>[11]</sup>,按照 GB/T 228.1—2021<sup>[12]</sup>进行室温拉伸实验获得管材的力学性能参数,如表 1 所示。

表 1 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of Ti-2Al-2.5Zr titanium alloy pipe

参数	数值
弹性模量 $E/\text{GPa}$	101
泊松比 $\nu$	0.3
屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	418
抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	566
伸长率 $A/\%$	27

## 1.2 成形质量的表征

如图2所示,在数控弯曲成形管材构件的横截面处会产生截面畸变,管材的外侧由于受到切向拉应力会造成外侧壁减薄并产生凹陷,使得纵向尺寸变小<sup>[13]</sup>。弯曲模对管材内侧有一定的固定作用,横向尺寸变化很小,由此可知,截面畸变的主要原因是纵向尺寸减小,可通过计算纵向尺寸变化获得截面畸变率 $\Delta D$ :

$$\Delta D = (D - d) / D \times 100\% \quad (1)$$

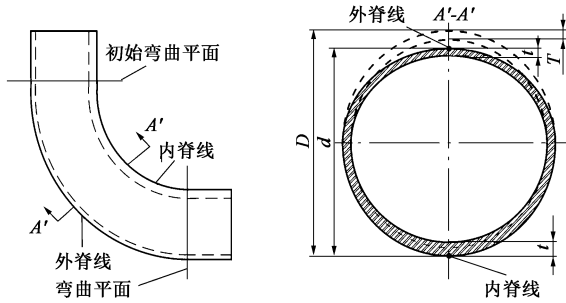
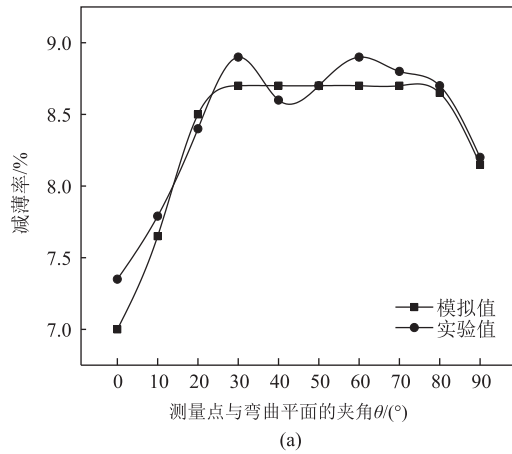
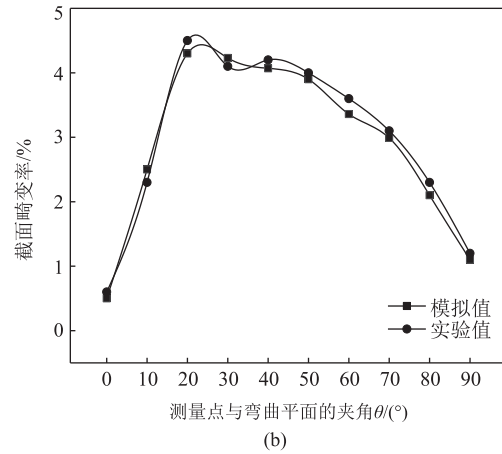


图2 弯曲时截面畸变变形示意图

Fig.2 Schematic diagram of cross-section distortion deformation during bending



(a)



(b)

图3 模拟结果与实验结果对比

(a) 减薄率 (b) 截面畸变率

Fig.3 Comparison of simulation and experimental results

(a) Thinning rate (b) Cross-section distortion rate

## 2 结果与分析讨论

### 2.1 研究方案与方法

熵值法属于一种综合评价方法,通过各项指标的变异程度来确定指标的权重<sup>[15]</sup>,可以客观评定管模间隙对管材壁厚变化率、截面畸变率等成形质量指标影响的权重占比,分析后可以获得准确的评

定。

管材数控弯曲成形时,外侧受切向拉应力致使外侧壁减薄,内侧受切向压应力致使内侧壁堆积增厚,因此,使用内侧壁增厚率和外侧壁减薄率可以更加直观地描述壁厚的变化。此外,由于弯曲过程中的壁厚变化最大处为内外脊线处,因此,选用脊线处的壁厚来表征管材的壁厚变化最为直观。

$$\Delta T = (T - t) / T \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta T$ 为管材壁厚变化率; $T$ 为管材原始壁厚; $t$ 为管材变形后的脊线处壁厚。

### 1.3 有限元模型的实验验证

为了验证模型的可靠性,本文进行数控弯曲成形实验,实验设备为WFCNC-16数控弯管机,实验材料为 $\Phi 16 \text{ mm} \times 1.25 \text{ mm}$ 管材。将模拟与实验得到的外侧壁减薄率和截面畸变率结果进行对比(图3),二者模拟值和实验值的最大相对误差均在12%以内<sup>[14]</sup>,表明本文所建模型是可靠的,可以反应真实成形过程。

定。

熵值法的具体实现步骤如下:

(1) 首先将各个指标进行去量纲化处理,具体处理方法如式(3)所示。

$$z_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

式中: $z_{ij}$ 为第*i*个方案下指标*j*的去量纲化值; $x_{ij}$ 为第*i*个方案下指标*j*的值; $\min(x_{ij})$ 为第*i*个方案下

指标  $j$  的最小值;  $\max(x_{ij})$  为第  $i$  个方案下指标  $j$  的最大值。

(2) 计算第  $i$  个方案下指标  $j$  的特征比重  $p_{ij}$ , 如式 (4) 所示。

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^m z_{ij}} \quad (4)$$

式中:  $m$  为总方案数。

(3) 求各指标的信息熵。

$$e_j = -\ln(m)^{-1} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

式中:  $e_j$  为指标  $j$  的熵值。

(4) 计算指标  $j$  的差异系数  $d_j$ 。

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

(5) 计算指标  $j$  的权重系数  $w_j$ 。

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (7)$$

式中:  $n$  为指标总数。

(6) 计算指标  $j$  的综合评价得分  $s_j$ 。

$$s_j = \sum_{i=1}^n w_j p_{ij} \quad (8)$$

## 2.2 管材/弯曲模间隙对成形质量的影响

图 4 为管材/弯曲模间隙  $C_b$  对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材成形质量的影响曲线。由图 4 可知, 在初始弯曲平面, 壁厚变化和截面畸变程度较小, 在弯曲中段截面部位壁厚变化和截面畸变程度最为严重, 弯曲平面处显著下降。由图 4a 可以看出, 减薄率随着管材/弯曲模间隙的增加而逐渐变大, 这是由于  $C_b$  的增加使管材所受摩擦力推力减少, 使得材料供给不及时, 导致管材外侧壁切向拉应力增大、外壁减薄。由图 4b 可以看出, 增厚率随着  $C_b$  的增加逐渐降低, 这是由于  $C_b$  的增加, 管材与弯曲模间的空隙变大, 摩擦力减小, 材料流动性好, 避免材料堆积增厚。由图 4c 可知, 管材截面畸变率最大值随着  $C_b$  的增加而增加, 这是因为弯曲模有一定的固定约束管材变形作用, 弯曲模与管材间的摩擦力可以抵消部分畸变力。

综合考虑管材/弯曲模间隙对截面畸变率和壁厚变化率等成形质量指标的影响规律, 结合表 2 可知, 管材/弯曲模间隙取 0.10 mm 有利于成形质量的控制。

## 2.3 管材/芯轴间隙对成形质量的影响

图 5 为管材/芯轴间隙  $C_m$  对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材数控弯曲成形质量的影响曲线。由图 5a 可

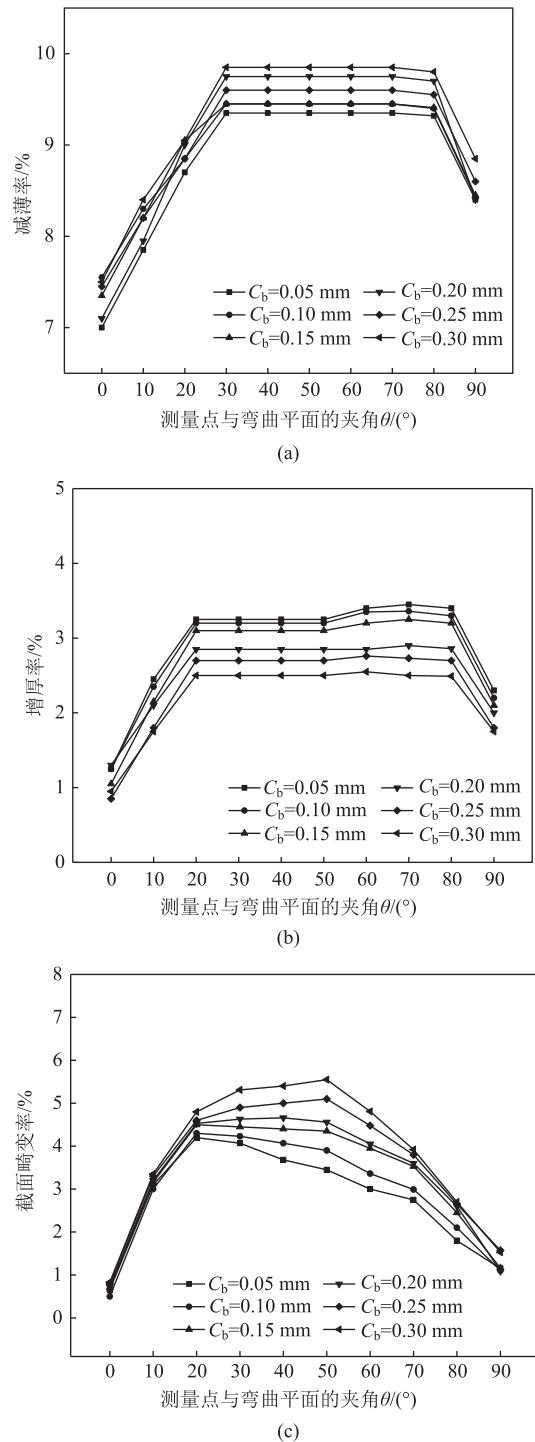


图 4 管材/弯曲模间隙对成形质量影响

(a) 壁厚减薄率 (b) 壁厚增厚率 (c) 截面畸变率

Fig. 4 Influence of clearance between pipe and bending die on forming quality

(a) Thinning rate of wall thickness (b) Thickening rate of wall thickness (c) Cross-section distortion rate

知, 管材减薄率随着  $C_m$  的增大先减小再增大, 这是由于管材受到的摩擦力减小, 材料流动性变好、外侧切向拉应力变小, 管材减薄率降低, 间隙逐渐



表 2 各组管材/弯曲模间隙综合评价得分

Table 2 Comprehensive evaluation scores of clearance between pipe and bending die for each group

组号	管材/弯曲模间隙/mm	综合评价得分
1	0.05	0.6237
2	0.10	0.6869
3	0.15	0.5446
4	0.20	0.6000
5	0.25	0.5817
6	0.30	0.5329

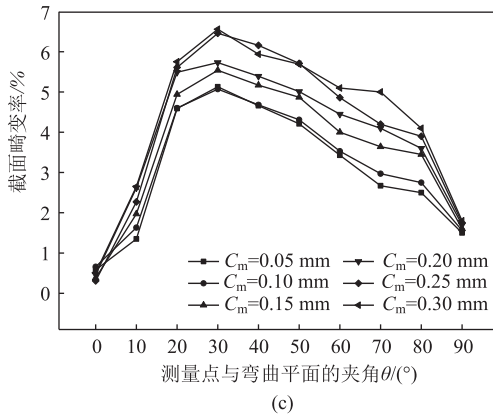
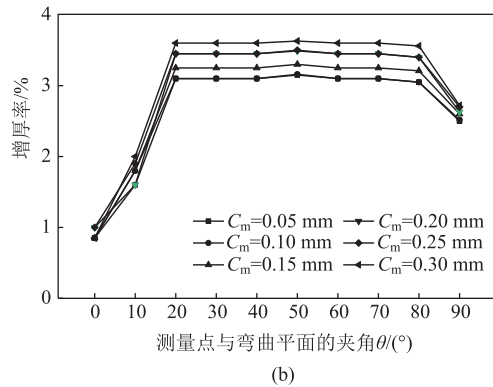
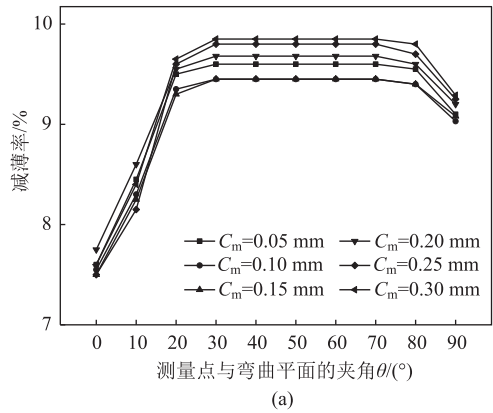


图 5 管材/芯轴间隙对成形质量影响

(a) 壁厚减薄率 (b) 壁厚增厚率 (c) 截面畸变率

Fig.5 Influence of clearance between pipe and meandrel on forming quality  
(a) Thinning rate of wall thickness (b) Thickening rate of wall thickness  
(c) Cross-section distortion rate

变大，管材的约束力减弱，致使弯曲时间不充分，导致管材减薄率有所提升。由图 5b 可知，增厚率随着  $C_m$  的增大而增大，这是由于随着  $C_m$  的增大，管材内侧壁所受切向拉应力不断增大，致使管壁不断增厚。由图 5c 可知，管材截面畸变率随着  $C_m$  的增加而增大，这是由于芯轴对于管材截面尺寸有一定的支撑作用，管材/芯轴间隙越小，芯轴对管材的支撑作用越大，截面畸变率越低。

综合考虑  $C_m$  对壁厚变化率和截面畸变率等成形质量指标的影响规律，结合表 3 可知，管材/芯轴间隙取 0.10 mm 有利于成形质量的控制。

表 3 各组管材/芯轴间隙综合评价得分

Table 3 Comprehensive evaluation scores of clearance between pipe and mandrel for each group

组号	管材/芯轴间隙/mm	综合评价得分
1	0.05	0.4934
2	0.10	0.6043
3	0.15	0.5879
4	0.20	0.4223
5	0.25	0.3285
6	0.30	0.3698

2.4 管材/压块间隙对成形质量的影响

图 6 为管材/压块间隙  $C_p$  对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材成形质量的影响曲线。由图 6a 可知，减薄率随着  $C_p$  的减小而降低。这是因为随着  $C_p$  的减小，压块与管材之间的摩擦力对管材有一定的推动作用，材料流动性好，管材外侧切向拉应力小，因此减薄率降低。由图 6b 可知，除  $C_p = 0.05$  mm 外，增厚率几乎不变，这是因为  $C_p$  的增加减弱了压块的助推作用，摩擦力变化不显著，导致壁厚变化不明显。由图 6c 可知，管材/压块间隙在 0.05~0.10 mm 之间时，截面畸变率随  $C_p$  的增加而有所增加，在  $C_p$  超过 0.10 mm 后，截面畸变率变化不明显，这是由于随着  $C_p$  的增大，摩擦力减小，管材外侧切向拉应力增大，压块对管材的约束作用减弱，使得截面畸变率增大，而  $C_p$  继续增大，摩擦力作用不明显，截面畸变率响应不显著。

综合考虑  $C_p$  对截面畸变率和壁厚变化率等成形质量指标的影响规律，结合表 4 可得， $C_p$  取 0.05 mm 有利于成形质量的控制。

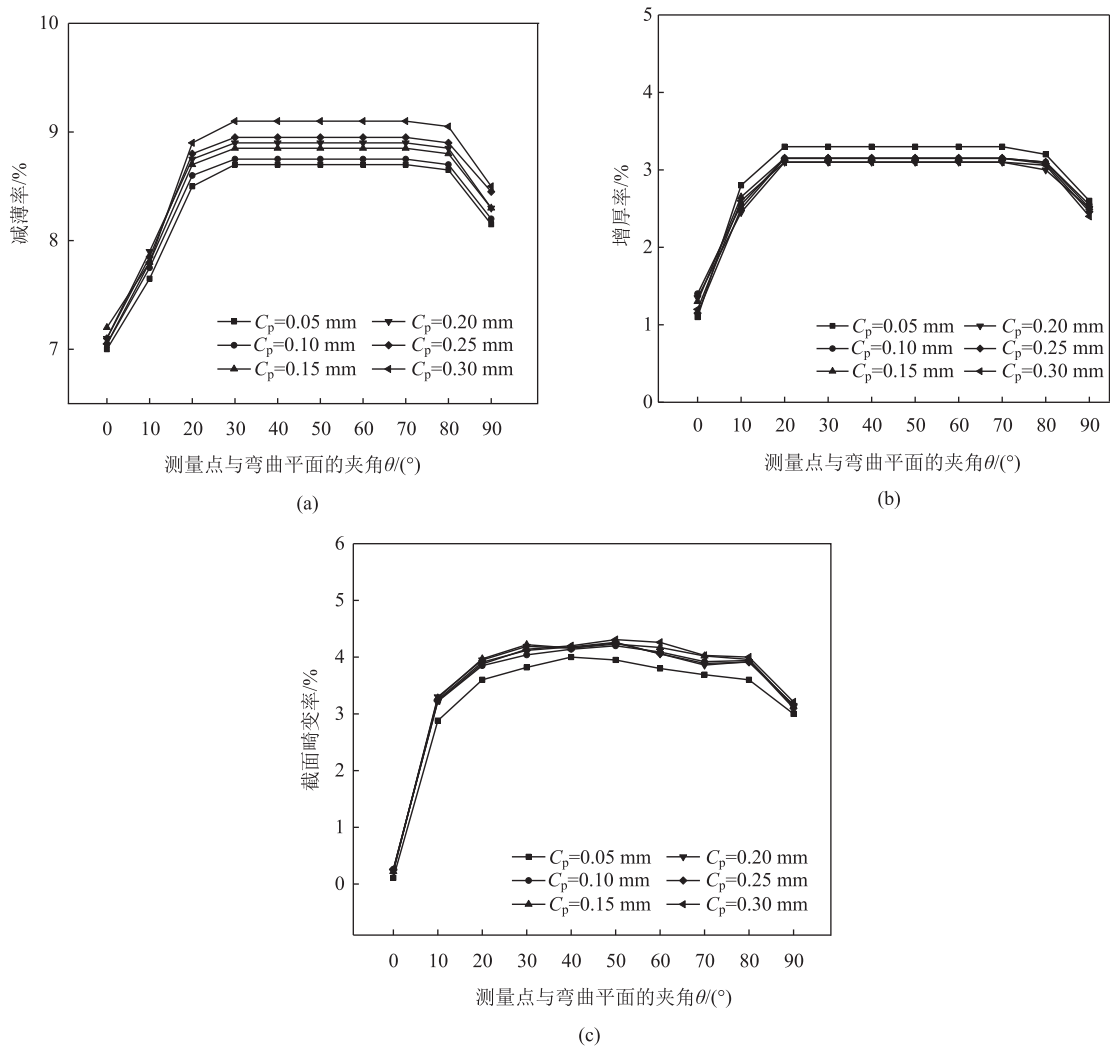


图 6 管材/压块间隙对成形质量影响  
(a) 壁厚减薄率 (b) 壁厚增厚率 (c) 截面畸变率

Fig. 6 Influence of clearance between pipe and pressing block on forming quality

(a) Thinning rate of wall thickness (b) Thickening rate of wall thickness (c) Cross-section distortion rate

表 4 各组管材/压块间隙综合评价得分

Table 4 Comprehensive evaluation scores of clearance between pipe and pressing block for each group

组号	管材/压块间隙/mm	综合评价得分
1	0.05	0.6296
2	0.10	0.5047
3	0.15	0.4720
4	0.20	0.4988
5	0.25	0.5391
6	0.30	0.4698

2.5 管材/防皱块间隙对成形质量的影响

图 7 为管材/防皱块间隙  $C_w$  对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材数控弯曲成形质量的影响曲线。由图 7a 可知,随着  $C_w$  的增加,外侧壁减薄率减小,这是因

为  $C_w$  越大,摩擦力越小,切向拉应力越小,材料流动性好,管材减薄率减小。由图 7b 可知,随着  $C_w$  的变化,管材内侧壁增厚率变化不明显,因为防皱块主要防止内侧失稳起皱,对管材增厚率影响不大。由图 7c 可知,随着  $C_w$  的增大,截面畸变率先有所减小再趋于不变。 $C_w$  小,摩擦力大,阻碍材料的流动,使得弯曲平面处所需的弯曲力大,截面畸变率大;随着  $C_w$  的增大,摩擦力减小,摩擦力对于截面畸变的影响不明显,致使截面畸变率趋于不变。

综合考虑管材/防皱块间隙对壁厚变化率和截面畸变率等成形质量指标的影响规律,结合表 5 得出,管材/防皱块间隙取 0.15 mm 有利于成形质量的控制。

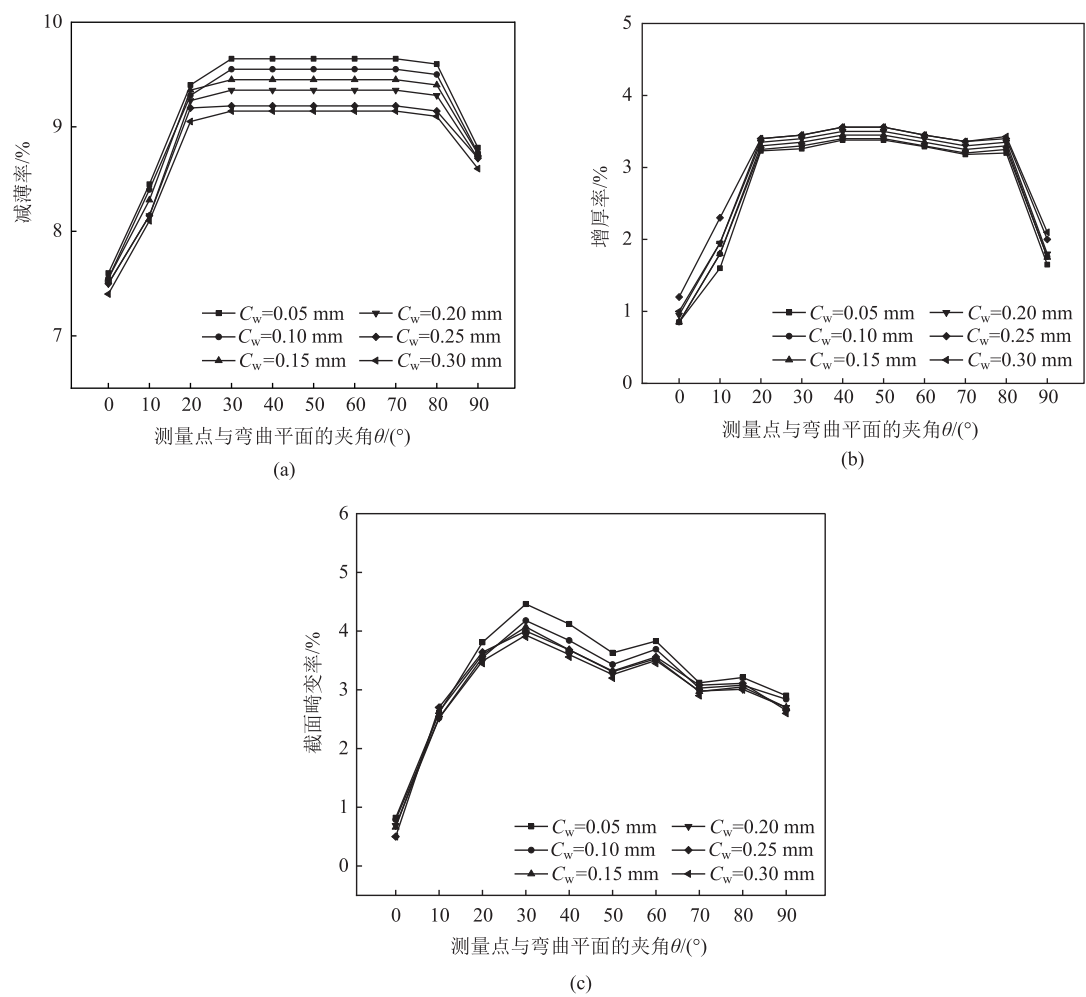


图 7 管材/防皱块间隙对成形质量影响

(a) 壁厚减薄率 (b) 壁厚增厚率 (c) 截面畸变率

Fig. 7 Influence of clearance between pipe and anti-wrinkle block on forming quality

(a) Thinning rate of wall thickness (b) Thickening rate of wall thickness (c) Cross-section distortion rate

表 5 各组管材/防皱块间隙综合评价得分

Table 5 Comprehensive evaluation scores of clearance between pipe and anti-wrinkle block for each group

组号	管材/防皱块间隙/mm	综合评价得分
1	0.05	0.5095
2	0.10	0.4389
3	0.15	0.5987
4	0.20	0.4064
5	0.25	0.4129
6	0.30	0.3695

3 结论

(1) 建立了 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材三维数控

弯曲成形有限元模型，并通过实验验证了该有限元模型的有效性。

(2) 通过对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金管材各管模间隙的壁厚减薄率、增厚率以及截面畸变率的折线图分析得出：减小管材/弯曲模间隙和管材/压块间隙以及增大管材/防皱块间隙可以降低外侧壁减薄率，随着管材/芯轴间隙的增加，外侧壁减薄率先减小后增大。增大管材/弯曲模间隙和减小管材/芯轴间隙可以降低内侧壁增厚率；减小管材/弯曲模间隙和管材/芯轴间隙可以有效地降低截面畸变率；改变管材/压块间隙和管材/防皱块间隙对内侧壁增厚率和截面畸变率的影响不明显。

(3) 采用熵值法，分析确定各管模间隙参数的最佳值，结果得出管材/弯曲模间隙值为 0.10 mm、

管材/芯轴间隙值为 0.10 mm、管材/压块间隙值为 0.05 mm 以及管材/防皱块间隙为 0.15 mm 时,可获得较高的成形质量。

#### 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 in advanced forming technology for aviation conduits [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 52 (1): 12-23.
- [2] 高文静. TA16 钛合金管材工艺研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (1): 163-165.  
Gao W J. Research on TA16 titanium alloy pipe process [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (1): 163-165.
- [3] 梁闯,鲁世强,方军,等. 间隙对 TA18 高强钛管数控弯曲成形截面畸变及壁厚变化的影响[J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (6): 87-93.  
Liang C, Lu S Q, Fang J, et al. Effect of clearance on cross-section distortion and wall thickness change of CNC bending forming of TA18 high-strength titanium tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (6): 87-93.
- [4] 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.
- [5] 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 of Numerical Control Bending Forming of Pipe Under Multi-mold Constraint [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [6] 杨睿萌,岳韬,林磊,等. 不锈钢连续多弯导管数控弯曲成形数值仿真与工艺优化[J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 105-111.  
Yang R M, Yue T, Lin L, et al. Numerical simulation and process optimization of CNC bending forming of stainless steel continuous multi bend conduits [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 105-111.
- [7] Fang J, Lu S Q, Wang K L, et al. Wall thinning characteristics and prediction in numerical control bending of high strength Ti-3Al-2.5V tube [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236 (19): 10321-10331.
- [8] Heng L, He Y. A study on multi-defect constrained bendability of thin-walled tube NC bending under different clearance [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24 (1): 102-112.
- [9] Liu K X, Liu Y L, Yang H, et al. Experimental study on cross-section distortion of thin-walled rectangular 3A21 aluminium alloy tube by rotary draw bending [J]. Int. J. of Materials and Product Technology, 2011, 42 (1/2): 110-120.
- [10] Xu J, Yang H, Li H, et al. Optimization of CNC bending process parameters for small bending radius of thin-walled aluminum alloy tube based on saliency [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (1): 147-156.
- [11] 张亚峰,于振涛,余森. TA16 钛合金管材拉伸性能及组织研究[J]. 广州化工, 2018, 46 (9): 30-32.  
Zhang Y F, Yu Z T, Yu S. Study on tensile properties and microstructure of TA16 titanium alloy pipe [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46 (9): 30-32.
- [12] 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 materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [13] 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.
- [14] Jiang Z Q, Yang H, Zhan M, et al. Establishment of a 3D FE model for the bending of a titanium alloy tube [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52 (9): 1115-1124.
- [15] Harju M, Liesio J, Virtanen K. Spatial multi-attribute decision analysis: Axiomatic foundations and incomplete preference information [J]. European Journal of Operational Research, 2019, 275 (1): 167-181.

## 2023 年发布的 2 项锻压领域团体标准内容简介

### 一、T/CMIF 235—2023 绿色设计产品评价技术规范 钢质模锻件

(本文件由中国机械工业联合会提出并归口。)

本文件规定了钢质模锻件绿色设计产品评价的总体要求、评价方法、评价指标、评价流程、评价要求、评价报告、评价结果判定及文档管理。

本文件适用于钢质模锻件绿色设计产品的评价活动。

### 二、T/CMES 01012—2023 机械基础装备制造成熟度评价规范 (铸造 锻压 焊接 热处理)

(本文件由中国机械工程学会提出, 由中国机械工程学会塑性工程分会归口。)

本文件规定了机械基础装备制造成熟度等级的划分、要素、基本条件及评价方法。

本文件适用于各类批量(含依据用户要求定制的非标单台或小批量)的铸造、锻压、焊接以及热处理等生产机械基础装备制造企业对具体产品的自我评价、用户及第三方评价。

全国锻压标准化技术委员会