

计算机应用

基于VB的JCO成形压下量计算智能化系统

刘雨洁¹, 张琛¹, 李强², 桂海莲¹, 温佳慧¹

(1. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西工程科技职业大学 智能制造学院, 山西 太原 030031)

摘要: 基于弹塑性弯曲理论, 对板材弯曲成形机理进行研究。建立了板材弯曲的力矩模型, 并根据卸载定律求解回弹量, 进而得出回弹前的理论压下量。根据该理论体系以VB6.0软件作为开发平台, 开发了一种JCO成形压下量智能化计算软件, 其界面简单, 可实现智能化计算以及工艺参数优化设计, 提高生产效率。以718镍基合金为研究对象进行数值分析, 将该理论体系下的智能化界面与数值模拟互相验证。结果表明, 以该智能化系统所得回弹前的理论压下量进行管材成形, 成形效果较好, 开口较小。该研究可实现管坯每道次精准弯曲成形, 提高生产效率。

关键词: 板材弯曲; 回弹; 压下量; 718镍基合金; JCO成形; 智能化计算

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.032

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 04-0267-09

Intelligent system on JCO forming reduction calculation based on VB

Liu Yujie¹, Zhang Chen¹, Li Qiang², Gui Hailian¹, Wen Jiahui¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Intelligent Manufacturing, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Based on elastoplastic bending theory, the bending forming mechanism of sheet metal was studied. The bending moment model of sheet metal was established, and the springback amount was calculated according to the unloading law to obtain the theoretical reduction before springback. According to the theoretical system, software VB6.0 was used as the development platform to develop an intelligent calculation software for JCO forming reduction, which had a simple interface and could realize the intelligent calculation and the optimization design of process parameters to improve the production efficiency. For 718 nickel-based alloy, the numerical analysis was conducted and the intelligent interface and numerical simulation under the theoretical system were mutually verified. The results show that using the theoretical reduction before springback obtained by this intelligent system to form the tube has a better forming effect and a smaller opening. Thus, the research realizes accurate bending of the tube blank in each pass and improves the production efficiency.

Key words: sheet metal bending; springback; reduction; 718 nickel-base alloy; JCO forming; intelligent calculation

目前, 大口径厚壁管^[1]在运输天然气、石油等领域有着广泛的应用^[2-3]。我国油气输送形成了“主干互联、区域成网”的模式, 而镍基合金厚壁直缝焊管具有高强度、高耐腐蚀性, 可以进一步提

高管道的输送效率、降低经营成本。因此, 市场对该焊管的需求急增。但我国有近半的高端管材依赖进口, 国产产品的精度和性能仍有不足, 在技术要求和标准上, 阻碍了我国相关行业的发展。

大口径厚壁焊管的主要成形方式为JCO成形^[4], 影响其精度的主要因素为板材的弯曲回弹^[5]。关于弯曲回弹问题, 国内外许多学者已经做了大量工作并取得了诸多成果。Crandall S H^[6]将板材视为理想弹塑性材料, 推导出纯弯曲回弹计算公式。Queener C A等^[7]推导出硬化条件下板材纯弯曲回弹的计算公式。Kuwabara T等^[8]对板材4种不同弯曲条件下卸载后的变化过程进行了研究。Zhang Z T等^[9]研究了板材不同弯曲情况及回弹后的应力分布情况。

随着计算机水平的发展和数值计算技术的成熟,

收稿日期: 2024-03-11; **修订日期:** 2024-06-18

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (YDZJSX20240054); 山西省研究生创新项目 (2024KY635); 国家自然科学基金联合基金资助项目 (U22A20188); 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目 (20230032); 太原科技大学研究生联合培养示范基地 (JD2022002); 2022年度淮南市“淮上英才计划”创新创业团队; 山西省大学生创新创业训练计划项目 (20230666)

作者简介: 刘雨洁 (2004-), 女, 本科生

E-mail: tyust35591294@163.com

通信作者: 桂海莲 (1982-), 女, 博士, 教授

E-mail: guihailian@tyust.edu.cn

有限元、边界元^[10]等数值方法在塑性成形分析中的应用, 以及与 VB、VC 等面向对象式的高级语言的结合^[11], 使工艺设计走向智能化、界面化, 成为学者们研究的热点问题。桂海莲根据塑性弯曲理论, 给出了中性层偏移公式并进行了模拟和讨论^[12-14]。Thome M 等^[15]在 Shape 系统中, 设计和优化了 JCO 管材成形工艺, 并实现了大直径管件成形的闭环控制。Konstantinos A 等^[16]提出了一种基于数值模拟方法的 JCO-E 管材制造, 准确模拟了焊接过程。

本文对镍基合金厚板 JCO 弯曲成形行为进行了多尺度分析, 系统研究了成形过程中的关键技术参数, 建立了一套较为精确的弯曲成形受力模型, 为搭建智能化界面奠定了理论基础。利用 VB 软件为 JCO 成形压下量智能化计算进行软件开发, 用于考虑回弹压下量的精确计算, 指导弯曲成形工艺。实现了精细化弯曲成形, 为企业突破技术瓶颈、提升企业产品质量和市场竞争能力提供了技术支持。

1 理论基础

金属板材弯曲成形首先经过弹性弯曲, 然后达到塑性弯曲, 而塑性弯曲为板材成型的主要阶段。图 1 为弯曲过程中切向应力的分布图。其中, \widehat{AB} 为凸弯侧; \widehat{CD} 为凹弯侧; t 为板厚; R 为凸弯侧半径; ρ 为中性层半径; r 为凹弯侧半径; α 为弯曲角。卸载后, 板材会发生回弹, 塑性变形区不发生变化, 而弹性变形区会立即恢复。因此, 研究回弹最主要的是弯矩的准确计算。

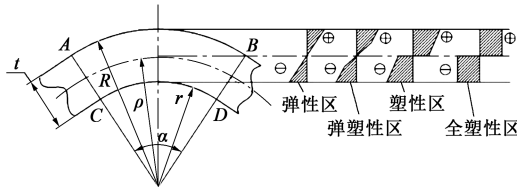


图 1 切向应力分布图

Fig. 1 Distribution map of tangential stress

图 2 为中性层偏移时的应力-应变图, 其中, a 、 b 分别为材料受拉和受压时的屈服极限, c 、 d 分别为材料受拉和受压时的强度极限, e 为中性层偏移量。如图 2 所示, 当 y_1 弹性区 $0 \leq y \leq \varepsilon_x^* R_1$ 和 y_2 弹性区 $-\varepsilon_x^* R_1 \leq y \leq 0$ 时, 其中, R_1 为弯曲时中性层的半径, ε_x^* 为理论屈服点处周向的应变, x 向应力分量为:

$$\sigma_x = Ey / [R_1(1 - \mu^2)] \quad (1)$$

式中: σ_x 为 x 方向的应力分量; E 为杨氏模量; y 为任意一点切向应变到中性层的距离, mm; μ 为泊松比。

当 y_4 塑性区 $-\frac{t}{2} + e \leq y \leq -\varepsilon_x^* R_1$ 时, $z = y + e$, z

为任意板层到中心层距离; y_3 塑性区 $\varepsilon_x^* R_1 \leq y \leq \frac{t}{2} + e$ 时, $z = y - e$ 。此时 x 向应力分量均为:

$$\sigma_x = K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{y}{R_1} \right)^n \cdot \left[1 + \beta \left(\frac{2z}{t} \right) \right] \quad (2)$$

式中: K 为硬化系数; n 为硬化指数; β 为厚向强度不均匀系数。

加载时 (回弹前) 板料所受的弯矩 M_b 为:

$$\begin{aligned} M_b = & 2B \int_0^{\varepsilon_x^* R_1} \frac{Ey}{[R_1(1 - \mu^2)]} y dy + \\ & B \int_{\varepsilon_x^* R_1}^{\frac{t}{2} + e} K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{y}{R_1} \right)^n \cdot \left[1 + \beta \left(\frac{2z}{t} \right) \right] y dy + \\ & B \int_{\varepsilon_x^* R_1}^{\frac{t}{2} - e} K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{y}{R_1} \right)^n \cdot \left[1 + \beta \left(\frac{2z}{t} \right) \right] y dy \quad (3) \end{aligned}$$

式中: B 为板材宽度, mm。

式 (3) 为厚板弯曲时的最大弯矩数学模型, 根据卸载定律以及弯矩求出回弹后中性层半径 R_2 , 假设回弹前后弧长相等, 即 $R_1 \alpha_1 = R_2 \alpha_2$, 进而计算出回弹后弯曲角 α_2 。其中, α_1 为回弹前弯曲角。

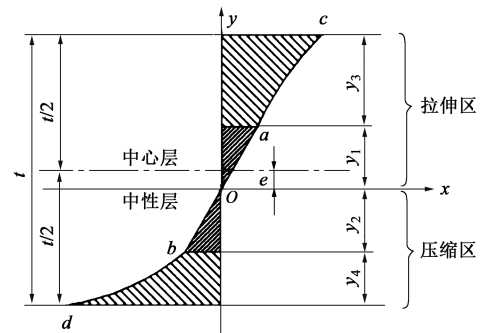


图 2 中性层偏移应力-应变图

Fig. 2 Stress-strain diagram of neutral layer offset

板料进入弹塑性弯曲状态后, 卸除外载, 板料不能完全恢复, 其弹复应力 σ_c 与弹复应变 ε_c 的表达式分别为:

$$\sigma_c = E \left(\frac{y}{R_1} - \frac{y}{R_2} \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_c = \frac{y}{R_1} - \frac{y}{R_2} \quad (5)$$

板料的弹复弯矩 M_c 为:

$$M_c = 2B \int_0^{\varepsilon_x^* R_1} \sigma_c y dy + B \int_{\varepsilon_x^* R_1}^{\frac{t}{2} + e} \sigma_c y dy - B \int_{\frac{t}{2} - e}^{\varepsilon_x^* R_1} \sigma_c y dy =$$

$$\frac{1}{24} BE \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) [(t + 2e)^3 + (t - 2e)^3] \quad (6)$$

由卸载定律可知, 弹复弯矩等于加载弯矩, 即 $M_b = M_c$, 根据式 (3) 和式 (6) 可得:

$$R_2 = \frac{ER_1 [(t + 2e)^3 + (t - 2e)^3]}{E [(t + 2e)^3 + (t - 2e)^3] - 24 \frac{M_b R_1}{B}} \quad (7)$$

当板材弯曲时, 板料包覆凸模。板料与凸模被包覆段末端处相切, 由图 3 可得凸模压下量 h 表达式为:

$$h = \frac{L}{2} \tan \frac{\alpha}{2} - (R_p + R_d + t) \left(\frac{1}{\cos(\alpha/2)} - 1 \right) \quad (8)$$

式中: h 为凸模压下量, mm; R_p 为凸模半径, mm; R_d 为凹模半径, mm; L 为凹模圆点距离, mm。

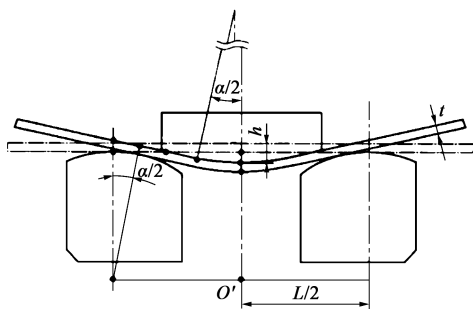


图3 对称弯曲示意图

Fig. 3 Schematic diagram of symmetric bending

该理论根据板料弯曲变形特点, 对板材弯曲变形机理进行了分析, 建立了厚板弯曲最大弯矩数学模型, 进而求得回弹量。各变量之间的关系如图 4 所示。

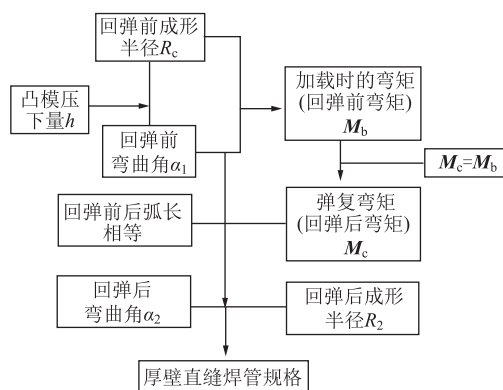


图4 理论逻辑关系图

Fig. 4 Relationship diagram of theoretical logic

2 智能化系统设计步骤

Visual Basic (VB) 是基于通用 PC 的 Windows 环境下, 用于开发 Windows 环境下的各类应用程序, 其实质是人机交互的语言编程方式。

2.1 主界面的编制

通过使用 VB6.0 应用软件对 JCO 成形过程涉及的各项工艺参数和材料参数之间的关系进行程序编制。工艺参数包括坯料参数和模具参数, 各参数之间的逻辑关系如图 4 所示。其中, 坯料参数包括: 板材厚度、板材宽度、成形道次和成形目标半径。模具参数包括: 凸模半径、凹模半径和凹模圆点距离。材料参数包括: 杨氏模量、应变硬化系数、泊松比、应变硬化指数、厚向强度不均匀系数、屈服极限和板材弯曲时大变形段近似直线与坐标轴的截距。可计算所得的目标参数主要有两个: 板材回弹前所受弯矩和凸模压下量, 所设计的界面结构如图 5 所示。

Form1 JCO弯曲成形上模压下量计算程序

工艺参数: 板材厚度 t (mm): 板材宽度 B (mm): 成形道次:
 凸模半径 R_p (mm): 凹模半径 R_d (mm):
 凹模圆点距离 L (mm): 目标半径 R_0 (mm):

材料参数: 杨氏模量 E (MPa): 应变硬化系数 K : 泊松比 μ :
 应变硬化指数 n : 厚向强度不均匀系数 β : 屈服极限 σ_s :
 板材弯曲时大变形段近似直线与坐标轴的截距 S_0 :

计算所得的参数: 屈服点处周向应变 ε : 回弹前板材所受弯矩 M_b : 力矩计算
 目标弯曲角 α_1 (°):
 回弹后弯曲角 α_2 (°): 压下量 h (mm): 压下量计算
 回弹后成形半径 R_2 (mm):

— 太原科技大学 材料科学与工程学院 轧制工程技术研究中心

图5 JCO 弯曲成形凸模压下量的计算程序界面

Fig. 5 Calculation program interface of upper mold reduction for JCO bending forming

2.2 VB 6.0 软件环境下借助 VB 语言编程

下面给出部分用 VB 语言编制 JCO 弯曲成形压下量的计算程序:

```
Option Explicit
Private Sub Command1_Click()
    Dim R0 As Double, K As Double, B As Double, t As Double,
    S0 As Double, m As Double
    R0 = Val (Text6.Text)    K = Val (Text8.Text)    B =
    Val (Text2.Text)    t = Val (Text1.Text)
    S0 = Val (Text11.Text)    m = Val (Text14.Text)
    Text14.Text = Str (K / (3.75 * S0 * t) * (Math.Log (R0 /
    (R0 - t))))
    Dim D As Double, α1 As Double
    D = Val (Text23.Text)    α1 = Val (Text24.Text)
    Text24.Text = Str (360 / (D + 1))
    Dim E1 As Double, num As Double
    E1 = Val (Text15.Text)    num = R0 * (R0 - t)    t =
    Val (Text1.Text)
    Text15.Text = Str ((Math.Sqrt (num)) * ((4.6 * R0 *
    (R0 - t) / ((2 * R0 - t) ^ 2)) ^ m) - (R0 - t / 2))
    Dim R1 As Double
    R1 = Val (Text16.Text)    Text16.Text = Str (R0 - 20 + E1)
    Dim μ As Double, σs As Double, ε As Double, E As Double
    μ = Val (Text12.Text)    σs = Val (Text13.Text)    ε =
    Val (Text17.Text)
    E = Val (Text7.Text)    Text17.Text = Str ((1 - μ ^ 2) *
    σs / (((1 - μ + μ ^ 2) ^ 0.5) * E))
    Dim n As Double, β As Double, p1 As Double, p2 As Double,
    M1 As Double
    n = Val (Text9.Text)    β = Val (Text10.Text)
    For p1 = 0 To (ε * (R0 - 20 + E1)) Step 0.0001
        p2 = (E * ((p1 ^ 2)) / ((R0 - 20 + E1) * (1 -
        ((μ) ^ 2))))
        M1 = (M1) + (p2) * 0.0001
    Next
    Dim p3 As Double, p4 As Double, M2 As Double
    For p3 = (ε * (R0 - 20 + E1)) To (t/2 + (E1))
    Step 0.0001
        p4 = ((4/3) ^ ((n + 1)/2)) * K * ((p3) ^ (n + 1)) *
        ((1/(R0 - 20 + E1)) ^ n) * (1 + β * (2 * ((p3) -
        (E1))/t))
        M2 = (M2) + (p4) * 0.0001
    Next
    Dim p5 As Double, p6 As Double, M3 As Double
    For p5 = (ε * (R0 - 20 + E1)) To (t/2 - (E1))
    Step 0.0001
        p6 = ((4/3) ^ ((n + 1)/2)) * K * ((p5) ^ (n + 1)) *
        ((1/(R0 - 20 + E1)) ^ n) * (1 + β * (2 * ((p5) + (E1))/
```

t))

$$M_3 = (M_3) + (p_6) * 0.0001$$

Next

Text18.Text = Str (B * (2 * (M₁) + (M₂) + (M₃)))

End Sub

该段程序为板材弯曲成形回弹前力矩的求解,为了程序简明易懂且便于修改,将力矩的复杂公式分为弹性变形区力矩 M_1 , 塑性变形区拉应力所产生力矩 M_2 和塑性变形区压应力所产生力矩 M_3 共 3 部分之和。

Private Sub Command2_Click()

Dim R₀ As Double, B As Double, t As Double, E₁ As Double,
 E As Double, C₁ As Double

R₀ = Val (Text6.Text) B = Val (Text2.Text) t =
 Val (Text1.Text)

E₁ = Val (Text15.Text) E = Val (Text7.Text) C₁ = Str ((t +
 2 * E₁) ^ 3 + (t - 2 * E₁) ^ 3)

Dim R₁ As Double, M_b As Double, R₂ As Double

R₁ = Val (Text16.Text) M_b = Val (Text18.Text) R₂ =
 Val (Text19.Text)

Text19.Text = Str (E * R₁ * C₁ / (E * C₁ - 24 * M_b * R₁ /
 B))

Dim D As Double, α₁ As Double, R_z As Double

D = Val (Text23.Text) α₁ = Val (Text24.Text) R_z =
 Val (Text21.Text) Text21.Text = Str (R₂ * R₀ / R₁)

Dim α₂ As Double

α₂ = Val (Text20.Text) Text20.Text = Str ((R₁ * α₁) /
 (Text19.Text))

Dim L As Double, R_p As Double, R_d As Double, h As Double

L = Val (Text5.Text) R_p = Val (Text3.Text) R_d =
 Val (Text4.Text) h = Val (Text22.Text)

Text22.Text = Str (L/2 * (Tan (α₁ * 3.1415926/180/2)) -
 (R_p + R_d + t) * (1/(Cos (α₁ * 3.1415926/180/2)) - 1))

End Sub

该段程序为每道次弯曲成形回弹前凸模压下量的求解,其最终得到的回弹前理论压下量是为了使板材卸载回弹后的弯曲角与目标弯曲角一致,提高成形精度。

2.3 设计实例

目标管材规格为 Φ1219 mm×40 mm, 所用板材宽度为 200 mm、长度为 3720 mm, 且已经过预弯。目标弯曲角为 20°, 共 17 个道次逐步压弯。凸模半径为 380 mm, 凹模半径为 150 mm, 凹模圆点距离为 320 mm。其装配尺寸如图 6 所示。

管材所用材料为 718 镍基合金, 其杨氏模量 E 为 199900 MPa、应变硬化系数 K 为 1499、泊松比 μ 为 0.03、应变硬化指数 n 为 0.48、厚向强度不均匀系数 β 为 0.11、屈服强度为 550、板材弯曲时大变

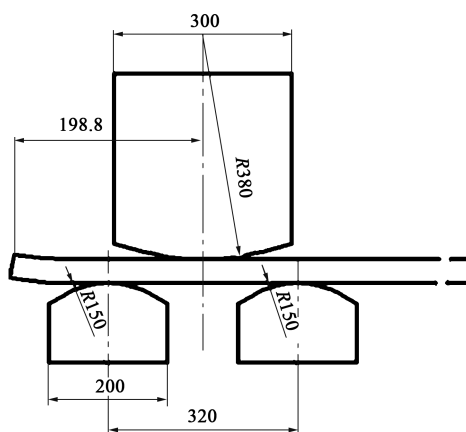


图6 JCO 成形的装配图

Fig. 6 Assembly drawing of JCO forming

形段近似直线与坐标轴的截距 S_0 为 820 MPa。将以上参数输入界面进行计算, 所得结果如图 7 所示。

若不考虑回弹, 以目标半径为 609.5 mm 进行计算, 所得凸模压下量为 19.42 mm, 但回弹后的成形半径为 655.87 mm, 回弹后的弯曲角为 18.586°, 小于目标弯曲角 20°, 以此压下量所得产品未达到成形规格。

对程序进行优化, 其目标是对输出的回弹后的成形半径 R_z 进行判断。若 $(R_z - 609.5) / 609.5 > 0.0001$, 则目标压下量 $R_0 + 0.01$ 重新输入 R_0 进行程序计算; 若 $(R_z - 609.5) / 609.5 \leq 0.0001$, 则输出凸模压下量 h 。优化后所得回弹前的成形半径为

图7 718 镍基合金 JCO 弯曲成形上模压下量的计算程序界面

Fig. 7 Calculation program interface of upper mold reduction for JCO bending of 718 nickel base alloy

568.05753 mm, 回弹前的弯曲角约为 21.466°, 回弹后的成形半径为 609.49997 mm, 回弹后的弯曲角约为 20.006°, 符合产品规格, 此时凸模压下量 h 为 20.2 mm。

3 Deform 有限元模拟

自 20 世纪 80 年代末以来, 一些学者在板料加工工艺数值模拟上做了大量工作, 有限元和边界元等技术进一步发展。Deform-3D 是一个有限元数值分析计算系统, 可以分析金属成形过程中多个有接触关系或者连接要求的互相关联对象的大变形和热特性。由于 JCO 成形本质上是多道次的 3 点弯曲, 在多道次和复杂工艺方面, Deform 有限元模拟软件有操作简单、自主性强等优势。对已经过预弯的 3720 mm×200 mm×40 mm 的板材进行 17 个道次的逐步压弯, 凸模压下量已知, 目标弯曲角为 20°。

模拟所得各道次等效应力云图如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 板材在弯曲过程中受凸模和凹模力的影响, 材料有挤向曲率中心的取向, 使得板材外表面在厚度方向上形成了拉应力, 而在板材的内表面形成了压应力。加载时, 等效应力从外表面拉伸区向内表面压缩区逐渐减小。由于机械加工会造成残余应力的释放, 所以, 每道次 (除第 1 道次外) 对上一道次均会有影响, 会消除一部分上一道次的残余应力。由于板材的多道次弯曲, 会使部分组织反复拉压, 产生一定的包辛格效应。

为了对成形后的工件尺寸精度进行评价, 引入了椭圆度和开口度。应用 Meshmixer 对成形后工件的相关尺寸进行测量, 如图 9 所示。管坯椭圆度计算公式如下:

$$\tau = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100\% \quad (9)$$

式中: τ 为管坯椭圆度; D_{\max} 为管坯最大直径; D_{\min}

为管坯最小直径； D 为管坯公称直径。

开口度计算公式为：

$$\gamma = \frac{360L_D}{\pi D_{\max}} \quad (10)$$

式中： γ 为管坯开口度； L_D 为管坯开口端部直线距离。

根据式 (8) 和式 (9)，可得管坯椭圆度 $\tau = 2.23\%$ ，管坯开口度 $\gamma = 16.63^\circ$ ，在该凸模压下量下，第 17 道次完成后的成形效果较好，开口较小，

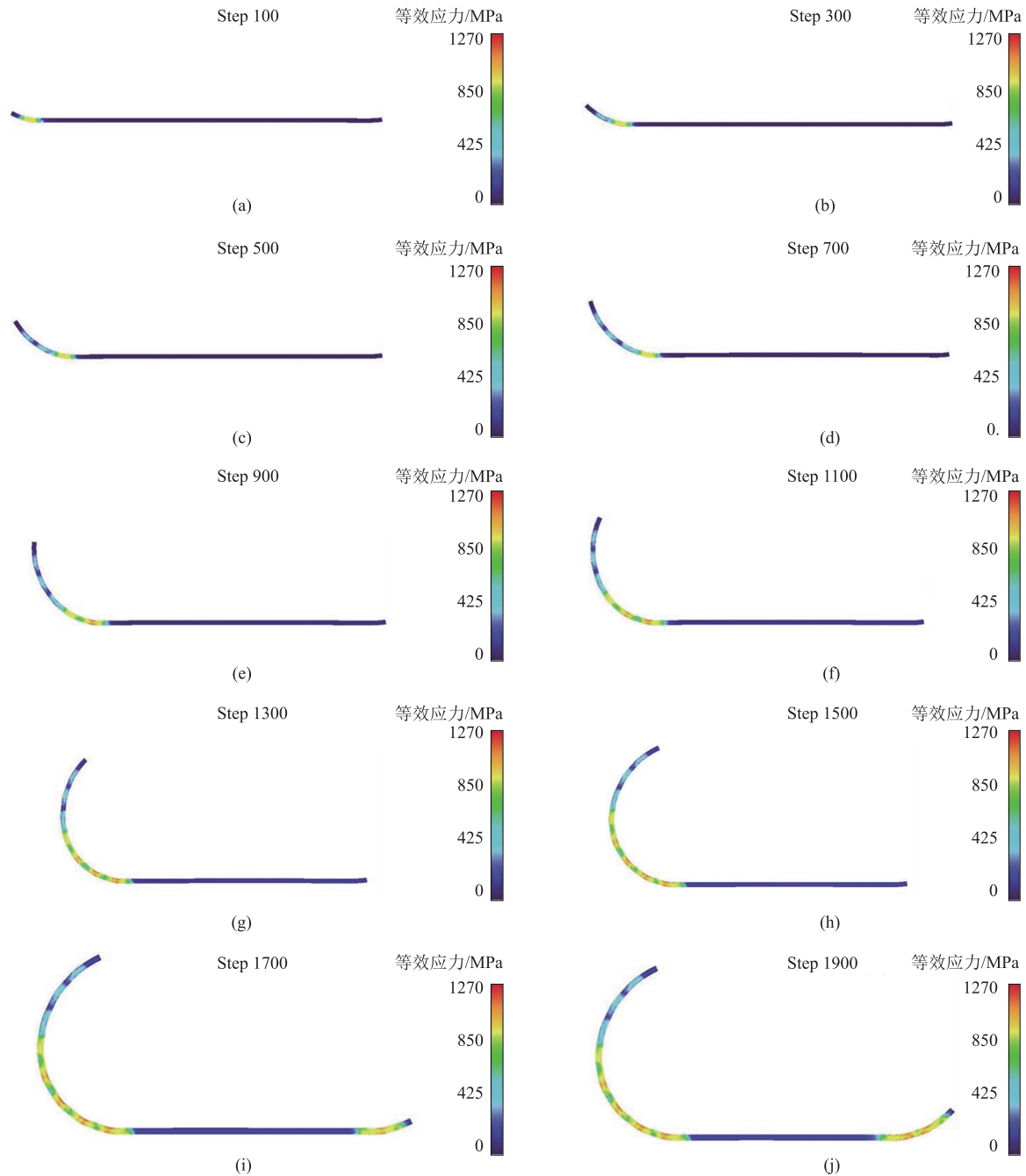


图 8 各道次等效应力云图

(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次 (c) 第 3 道次 (d) 第 4 道次 (e) 第 5 道次 (f) 第 6 道次 (g) 第 7 道次 (h) 第 8 道次
(i) 第 9 道次 (j) 第 10 道次 (k) 第 11 道次 (l) 第 12 道次 (m) 第 13 道次 (n) 第 14 道次
(o) 第 15 道次 (p) 第 16 道次 (q) 第 17 道次

Fig. 8 Equivalent stress cloud maps for each pass

(a) The 1st pass (b) The 2nd pass (c) The 3rd pass (d) The 4th pass (e) The 5th pass (f) The 6th pass (g) The 7th pass
(h) The 8th pass (i) The 9th pass (j) The 10th pass (k) The 11th pass (l) The 12th pass (m) The 13th pass
(n) The 14th pass (o) The 15th pass (p) The 16th pass (q) The 17th pass

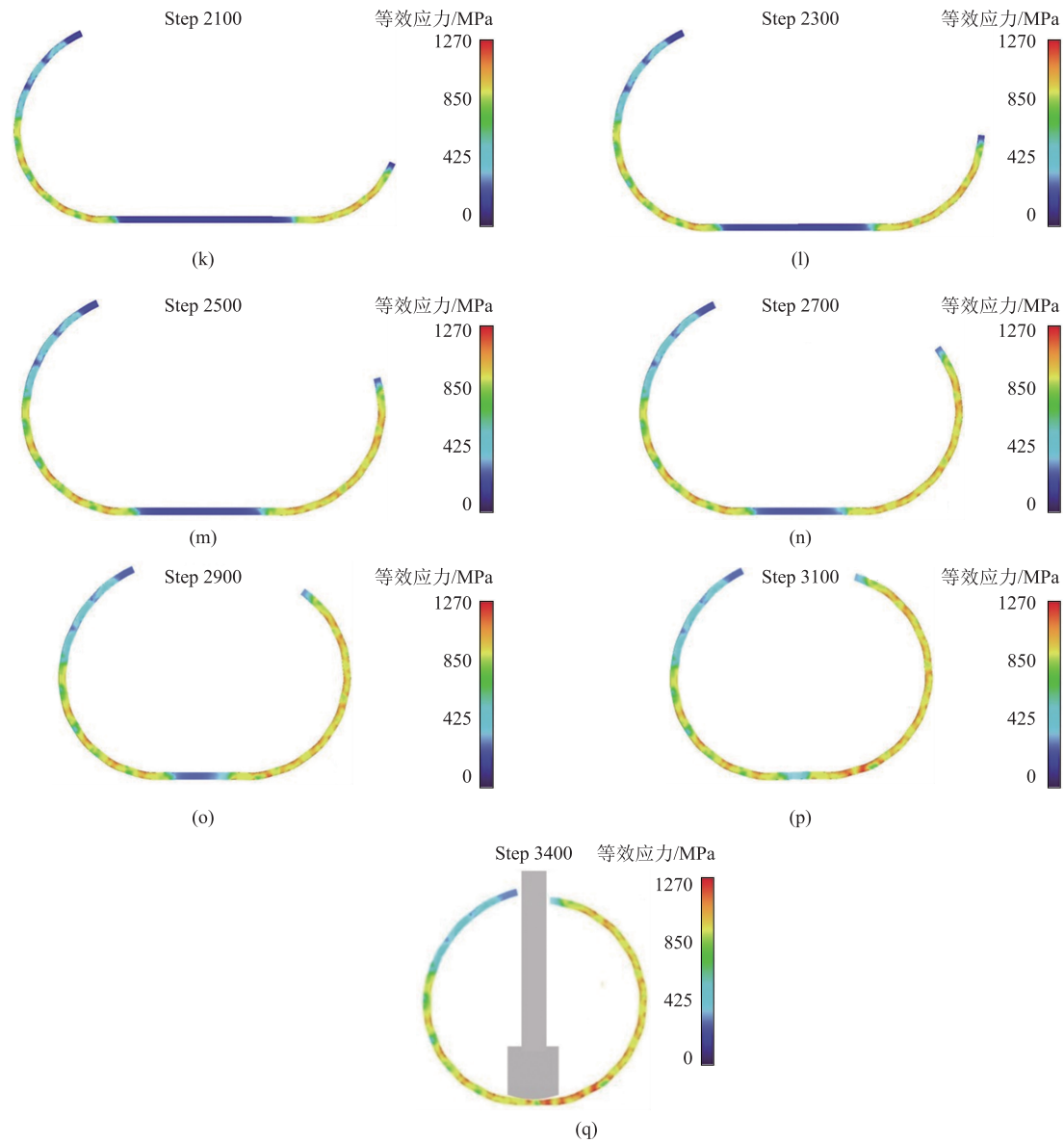


图 8 (续)
Fig. 8 (Continued)

便于合缝，成形性较好，验证了该智能优化系统的可靠性。

4 结论

(1) 首先，基于弹塑性理论，对 JCO 成形板材弯曲机理进行研究，建立了最大弯矩数学模型。然后，根据目标压下量求出回弹前的理论压下量，为智能优化系统提供可靠的理论支撑。

(2) 通过使用 VB6.0 应用软件对 JCO 成形压下量的计算进行界面设计和程序编制。对 718 镍基合金板材 JCO 成形 17 个道次的力矩和压下量进行计

算，并考虑回弹对成形效果的影响，对所得压下量进行智能优化，得到最优解。

(3) 通过 Deform 建立 JCO 成形 17 道次的整个成形过程，验证了该智能化系统所得的回弹前理论压下量，成形效果较好，椭圆度较小，开口较小。实现管坯每道次精准弯曲成形，便于后续合缝工艺的进行，提高生产效率。

参考文献：

[1] Lin S P, Li D L, Zhou Q Q, et al. Study on corrosion perforation behavior of copper nickel alloy pipe during service in marine environment [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 153:

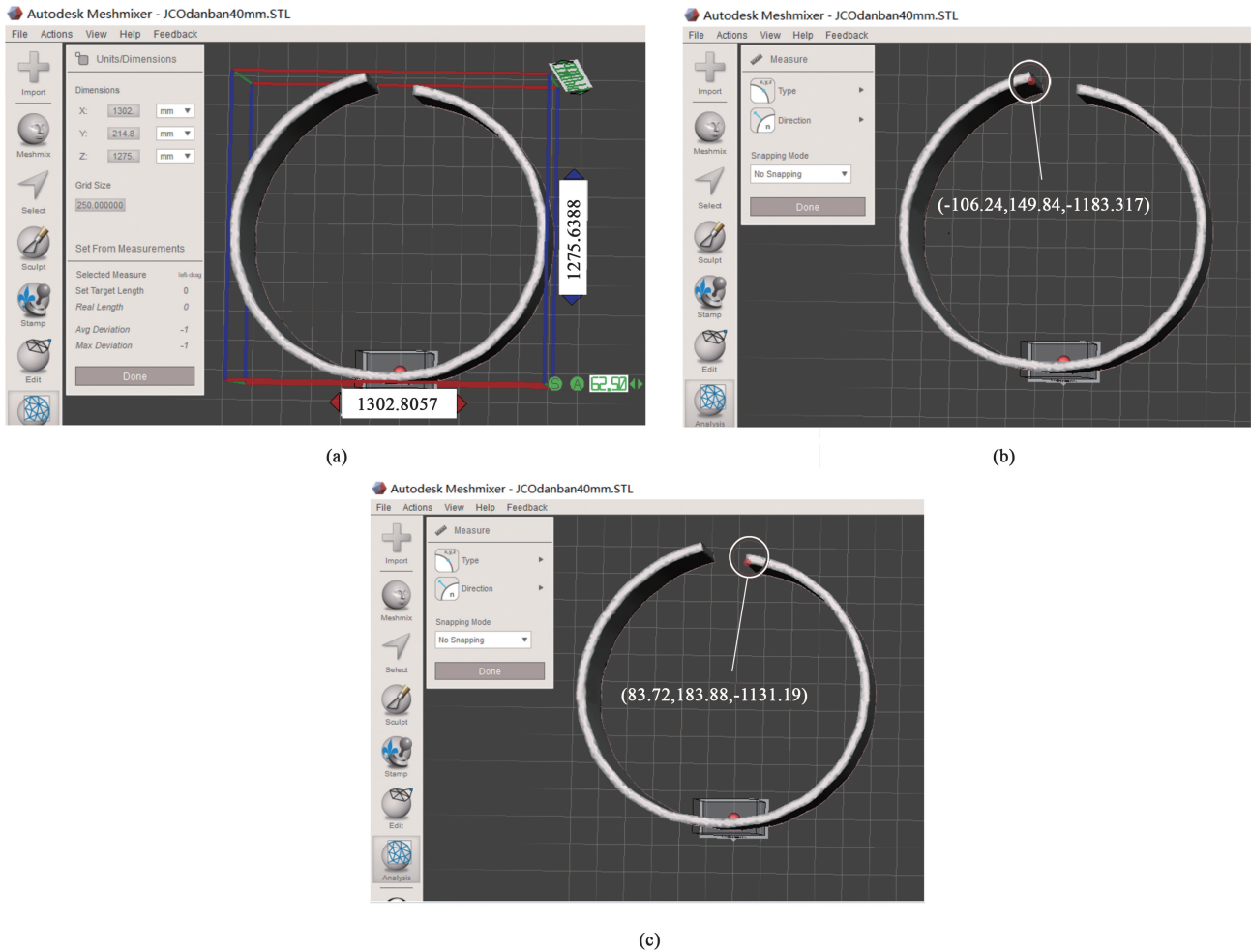


图 9 Meshmixer 尺寸测量结果

(a) 最大直径与最小直径的测量 (b) 开口处左侧点坐标的测量 (c) 开口处右侧点坐标的测量

Fig. 9 Meshmixer size measurement results

(a) Measurement of maximum and minimum diameters (b) Measurement of point coordinates at left of opening (c) Measurement of point coordinates at right of opening

107628.

- [2] Zhao X L, Ren K M, Lu H X. Influence of ultrasonic impact treatment on microstructure and mechanical properties of nickel-based alloy overlayer on austenitic stainless steel pipe butt girth joint [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022, 54: 4072–4083.
- [3] Qu F Y, Liu H, Jiang C, et al. Nickel-ammonia loop heat pipe based on the molten salt pore forming startup and heat transfer failure characteristics of experimental study [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 3938–3945.
- [4] Gavrilidis I, Stamou A G, Palagas C, et al. Heat treatment effects on collapse of JCO-E steel pipes under external pressure: Experiments and numerical predictions [J]. Marine Structures, 2024, 93: 0951–8339.
- [5] Meng Q D, Zhai R X, Fu P C, et al. Springback analysis of rotary bending considering strain paths [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 315: 0924–0136.
- [6] Crandall S H. Discussion of Gardiner's paper [J]. Trans ASME, 1957, 79: 7–8.
- [7] Queener C A, DeAngelis R J. Elastic springback and residual stresses in sheet metal formed by bending [J]. ASM Transactions, 1968, 61 (4): 757–768.
- [8] Kuwabara T, Takahashi S. 2-D springback analysis is for stretch-bending processes based on total strain theory [J]. Transferred to the Society of Automotive Engineer, 1995, 5: 504–513.
- [9] Zhang Z T, Hu S J. Stress and residual stress distribution sin plane strain bending [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1998, 40 (6): 54–68.
- [10] Gui H L, Xiang J M, Xing T, et al. Boundary element method with particle swarm optimization for solving potential problems [J]. Advances in Engineering Software, 2022, 172: 103191.
- [11] Ye Z, Ge L, Lai T. Optimization design of cylindrical helical

- spring based on VB [J]. Journal of Research in Science and Engineering, 2021, 3 (9): 24-27.
- [12] Xing T, Huang Q X, Xiang J M, et al. The neutral layer offset of medium and thick plate by sub domain boundary element method during plate flattening [J]. Advances in Engineering Software, 2022, 172: 103215.
- [13] Gui H L, Xing T, Li Y G, et al. The influence of neutral layer offset on the straightening force in the process of bimetal composite plate straightening [J]. Material Research Express, 2019, 6 (8): 086569.
- [14] 宋涛, 桂海莲, 周存龙. 中厚板弯曲时应力中性层位置的求解 [J]. 中国重型装备, 2011, 24 (2): 13-20.
- Song T, Gui H L, Zhou C L, et al. Solution of position of stress neutral layer in bending medium thick plate [J]. China Heavy Equipment, 2011, 24 (2): 13-20.
- [15] Thome M, Vochsen J, Gotsis V. Calculation tool and closed loop control for the JCO pipe forming process [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 1605-1610.
- [16] Konstantinos A, Stamou A G, Karamanos S A, et al. Finite element modeling of the JCO-E line pipe fabrication process material properties and collapse pressure prediction [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 192: 111120.

关于“2025 年中国大学生机械工程创新创业大赛“太平洋精锻杯” 第二届塑性工程实践与创新赛”通知

中国大学生机械工程创新创业大赛是由中国机械工程学会主办的公益性竞赛。2019 年至 2024 年, 大赛连续列入《全国普通高校大学生竞赛分析报告》竞赛目录。“塑性工程实践与创新赛”(以下简称“赛项”) 于 2025 年正式纳入大赛“创新赛道”, 旨在激发我国塑性工程领域学生的创新思维, 释放创新动能、增强专业知识储备、提升工程实践能力, 鼓励他们探索塑性工程科学问题、工程技术难题和产业技术问题; 通过链接社会资源, 为塑性工程行业培养科创人才, 推动人才链与创新链及产业链的深度融合, 促进行业的可持续、高质量发展。

“太平洋精锻杯”第二届塑性工程实践与创新赛已正式启动, 赛项主题为“思塑行远、创变未来”。相关通知如下:

一、参赛对象及要求

- ★ 全国高等院校全日制在读专科生、本科生和研究生。
- ★ 赛项分为本科组和研究生组两个组别。凡有研究生参与的参赛队伍均划分为研究生组, 其他为本科生组。
- ★ 每支参赛队伍由 2 至 4 名学生组成 (指定队长 1 名), 指导教师 1 至 2 名。允许跨校组队, 每位选手只能参加 1 支队伍, 每支队伍只能提交 1 项作品。

★ 赛项实行限额参赛, 每个高校进入区域赛的作品数不超过 20 个、晋级全国总决赛作品数不超过 15 个。鼓励外籍学生组队参赛, 中国籍学生成员不超过 40% 的外籍队不占用参赛单位参加全国总决赛的名额, 但各单位推荐的外籍学生组队应不多于 3 支。

★ 所有报名队伍均应按时提交作品。报名数超过 20 个的高校, 需进行校赛, 其他高校可择情组织校赛。组织校赛的高校需指定 1 名负责老师, 在作品提交截止日期前将校赛结果反馈给赛项办公室。

二、赛程安排

- ★ 报名: 2025 年 4 月 30 日截止。
- ★ 作品准备 (校赛): 2025 年 5 月 1 日-6 月 10 日
- ★ 资格审查: 2025 年 6 月 11 日-15 日
- ★ 区域赛: 2025 年 6 月 16 日-30 日。
- ★ 总决赛: 2025 年 8 月 (太原科技大学)



扫码报名

各阶段提交材料要求及其他相关信息详见赛项官方网址 www.cstp-cmes.org.cn/site/content/791.html

赛项联系人: 秦思晓 (15201461873)、李世龙 (15210857179)、周林 (13811919643)、金红

中国机械工程学会塑性工程分会