

基于磁流变弹性体商用车防护梁绕弯成形

李 义¹, 黄伟鹏¹, 程 敏², 梁继才¹

(1. 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 机械与航空航天学院, 长春 130022)

摘 要: 本文采用绕弯成形工艺将“日”字形截面型材弯曲成商用车防护梁。在实际加工成形过程中, 型材常出现起皱、截面畸变等成形缺陷。为此, 利用 ABAQUS 有限元软件对无芯模支撑型材成形过程进行深入的数值模拟, 旨在分析缺陷形成机理。基于此分析, 本文设计并研究了一种新型芯模——新型磁控芯模, 该芯模不仅对“日”字形结构型材的弯曲成形表现出优异的成形质量, 还能显著提升传统芯模成形工艺的性能。此外, 通过改变弯曲半径、模具间隙等成形参数, 本文探究了型材弯曲的极限工艺参数, 在保证精度的前提下寻求极限工艺参数。

关键词: 商用车防护梁; 磁流变弹性体; 力学测试; 新型磁控芯模

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)11-3564-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240257

Roll bending forming of commercial vehicle bumper beams based on magnetorheological elastomers

LI Yi¹, HUANG Wei-peng¹, CHENG Min², LIANG Ji-cai¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: This paper adopts the roll bending forming process to bend profiles with a "日" shaped cross-section into commercial vehicle bumper beams. During the actual processing and forming process, profiles often exhibit forming defects such as wrinkling and cross-sectional distortion. To address this, an in-depth numerical simulation of the coreless mandrel-supported profile forming process was conducted using ABAQUS finite element software, aimed at analyzing the mechanism of defect formation. Based on this analysis, a new type of mandrel—a novel magnetically controlled mandrel—was designed and studied. This mandrel not only exhibits excellent forming quality in bending "日" shaped structural profiles, but also significantly improves the performance of the traditional mandrel forming processes. Moreover, by altering forming parameters such as the bending radius and die gap, the paper explored the limits of process parameters for profile bending, seeking to find the extreme process parameters while ensuring accuracy.

Key words: commercial vehicle bumper beam; magnetorheological elastomer; mechanical testing; novel magnetically controlled mandrel

收稿日期: 2024-03-13.

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20220201048, 20210201109GX).

作者简介: 李义(1974-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 材料先进成型技术. E-mail: henrylee@jlu.edu.cn

通信作者: 程敏(1989-), 女, 工程师, 博士. 研究方向: 机械设计及材料加工. E-mail: 792493209@qq.com

0 引 言

商用汽车防护梁采用“日”字形截面型材,通过绕弯成形(Roll bending forming, RDB)工艺加工而成。由于“日”字形截面型材所需强度较高,截面较为复杂,因此传统的加工成形方法难以保证成形后型材的质量。RDB 工艺是管材和型材成形领域的常用技术^[1]。它不仅具有成形效果好、装置简单、成本低等优点,而且在汽车、航空航天、机械等领域起着至关重要的作用^[2]。因此,采用 RDB 工艺弯曲型材两端制成商用车防护梁,既能保证防护梁的几何形状,又能提高其抗冲击性能和防撞性能。但是,由于高强度钢的塑性较差,其硬化指数和厚度各向异性指数明显低于普通钢。因此,在 RDB 工艺中型材更容易出现起皱、塌陷等缺陷,从而破坏防护梁的结构稳定性,降低其抗冲击性能^[3]。

国内外大量研究聚焦于 RDB 型材的缺陷。Zhang 等^[4]研究了弯曲半径和弯曲角度对薄壁管壁厚的影响,确定了最优工艺参数范围;Naderi 等^[5]探索了 RDB 过程中管材内侧起皱对材料自身缺陷的敏感程度,发现当缺陷大于壁厚 3% 时,管材内侧起皱概率增大;Xia 等^[6]通过研究不同屈服准则对管材变形预测的差异性,发现采用 Mises 屈服准则和 Hill'48 屈服准则,截面变形量近似相等且均低于试验值;Yang 等^[7]研究了磁流变弹性介质对 T 型薄壁铬镍铁合金 718 管成形性能的影响,证明了外加磁场可以减少导向区和胀形区的材料堆积量;Xiao 等^[8]基于正交回归分析法,研究了 RDB 工艺参数对 H96 黄铜双脊矩形管截面畸变的影响,得到了在 RDB 工艺条件下管材的极限工艺参数;Kajikawa 等^[9]研究了芯模的位置和形状对薄壁铜管在 RDB 工艺中出现压扁、起皱、断裂等缺陷的影响,确定了最佳芯模条件;Ancel-lotti 等^[10]发明了一种新型平行六面体弹性芯棒,它可使带焊缝的矩形管在 RDB 过程中实现良好弯曲;Tronvoll 等^[11]对比了压缩弯曲和旋转拉弯工艺,发现二者弯管成形质量近似,但压缩弯曲回弹更少;Yang 等^[12]基于中性层移动重构理论,利用管材的温度不对称拉伸压缩特性,设计了一种差分加热 RDB 方法,有效抑制了成形缺陷的产生;Sun 等^[13]研究了在 RDB 过程中,薄壁双层间隙管材料特性和几何形状的多样性对成形质量的影响;Zhang 等^[14]探索了 RDB 工艺参数对 H96 矩

形管回弹和变形的影响,发现截面变形对工艺参数更敏感,同时研究了不同芯模对截面变形的影响;Liang 等^[15]提出了一种新型柔性芯轴,该芯轴在传统芯模的基础上进行了一定改进,提高了型材的成形质量;Salem 等^[16]提出了一种用于薄壁管 RDB 工艺的新型芯棒——“链式芯棒”,该芯棒价格低廉,并且对减少薄壁管内侧起皱具有良好的效果。

虽然上述研究具有广泛的研究意义,但研究人员设计的芯模在使用条件上都存在一定局限性。因此,本文利用 ABAQUS 有限元分析软件对型材 RDB 工艺装置进行建模,并基于新型智能材料——磁流变弹性体,设计了一种新型磁控芯模。该芯模可通过控制磁场强度变化,调节自身的弹性模量、压缩模量等力学性能。本文目的是验证新型智能材料作为填充芯模,能否提高芯模对型材的柔性约束效果,以及能否广泛应用于多种复杂截面型材和管材的成形工艺中。通过对 RDB 过程的仿真研究,验证了新型磁控芯轴的可靠性和准确性。

1 材料性能测试和 RDB 的模型建立

1.1 高强度钢材料性能

本文选用的型材为高强度钢 B700L。利用 MTS810 电子万能试验机进行单轴拉伸试验,得到材料相关力学性能。根据式(1)和式(2)计算对应的杨氏模量 E 和泊松比 γ ,并对 3 个样本取平均值,得到最终的杨氏模量 E 和泊松比 γ 。高强度钢 B700L 的材料力学性能如表 1 所示。为保证 ABAQUS 仿真模拟结果的准确性和真实性,需应用式(3)和式(4)^[17]将其转变为真应力和真应变。

表 1 高强度钢 B700L 的力学性能

Table 1 Mechanical properties of high-strength steel B700L

杨氏模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
216	7 850	0.22

图 1(a)为型材的截面形状和尺寸。RDB 弯曲模的半径为 470 mm。根据商用车防护梁的设计要求,“日”字形型材两端的弯曲角度为 30°。考虑到结构和荷载的对称性,本文采用 1/2 模型进行仿真,以缩短仿真时间,图 1(c)为型材的三建立体图。

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon_{xx} A_0} = \frac{P_1 - P_0}{(\epsilon_{xx}^1 - \epsilon_{xx}^0) A_0} \quad (1)$$

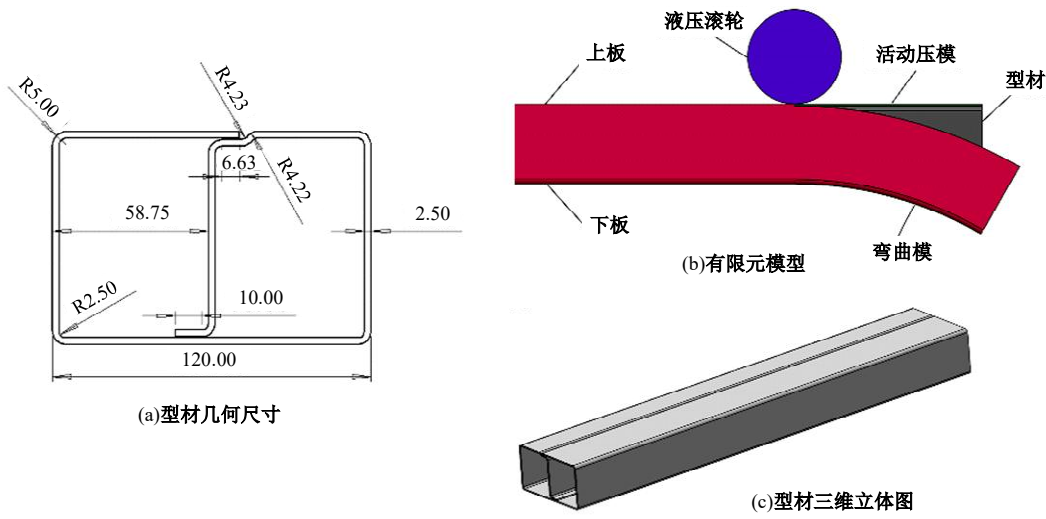


图 1 型材有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of finite element model of the profile

$$\gamma = \Delta\epsilon_{yy} / \Delta\epsilon_{xx} = -(\epsilon_{yy}^1 - \epsilon_{yy}^0) / (\epsilon_{xx}^1 - \epsilon_{xx}^0) \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \sigma_{\text{nom}}) \quad (3)$$

$$\epsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (4)$$

式中： P_0 和 P_1 分别为抗拉强度极限达15%和50%时的载荷； A_0 为标距内的原始横截面积； ϵ_{yy}^0 和 ϵ_{yy}^1 分别为拉伸强度极限达15%和50%时的纵向应变； ϵ_{xx}^0 和 ϵ_{xx}^1 分别为拉伸强度极限达15%和50%时的横向应变； σ_{true} 和 ϵ_{true} 分别为真应力和真应变； σ_{nom} 和 ϵ_{nom} 分别为名义应力和名义应变。

1.2 磁流变弹性体材料性能

磁流变弹性体(Magneto rheological elastomers, MREs)的组成部分主要包括弹性基体、可渗透磁性颗粒、部分填料等。本文中,弹性基体选用天然橡胶和顺丁橡胶的混合体,磁性颗粒选用羰基铁粒子(Carbonyl Iron particles, CIPs)。由于CIPs的饱和磁化强度很高,在橡胶中加入磁性颗粒后,可通过磁颗粒间的相互作用和界面阻尼产生额外阻尼。此外,阻尼和刚度可在制造或使用期间通过磁场控制,其机械性能也可通过外加磁场进行智能控制^[18-20]。本文按照表2所示配比制备MREs复合材料。

本文采用自主设计的磁场发生装置,为实验材料的测试过程提供磁场,装置结构如图2所示。将磁场发生装置与电子万能实验机连接,根据ISO 815-1:2008标准对MREs复合材料进行压缩力学性能测试,测试时磁场强度为400 mT,以研究MREs复合材料的磁致压缩力学性能。磁致压缩力学性能测试所用试样为圆柱形,其半径为29 mm、高度为12.5 mm。

表 2 MREs复合材料的配方

Table 2 Formulations of MREs composites phr

样 品	MRE-60CIP
NR	70
BR	30
羰基铁粉	230
硅炭黑	30
少层石墨烯	3
氧化锌	5
硬脂酸	1
抗氧化剂 4020	2
抗氧化剂 RD	2
促进剂 CZ	2
增塑剂 古马龙	7.5
硫磺	2
总共	381.5

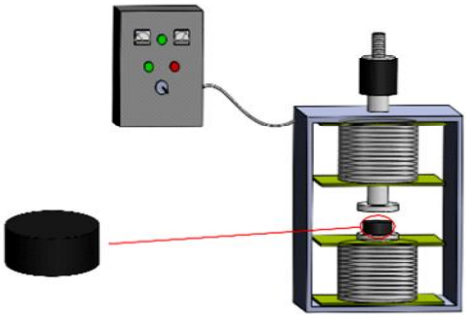


图 2 自主研发的磁场发生装置

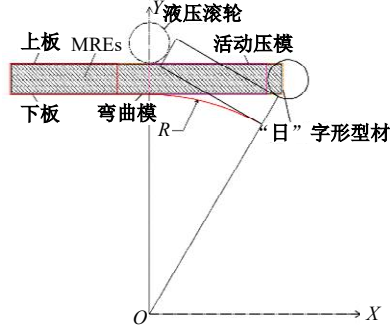
Fig. 2 Self-developed magnetic field generation device

1.3 RDB 的成形工艺及模型建立

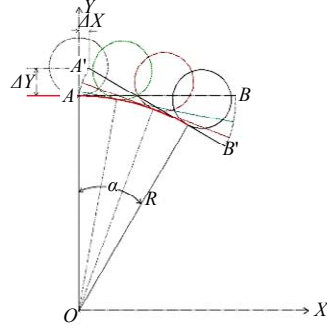
RDB 中型材成形位置和旋转角度示意图如图3(a)所示。型材左端未弯曲部分被弯曲模的上板和下板压紧,使型材固定在弯曲模上。当进行RDB操作时,在液压驱动下滚轮绕圆周中心旋

转,型材在滚子、弯曲模和活动压模的三重约束下逐渐靠近弯曲模,从而获得所需的弯曲角度。在型材弯曲过程中,活动压模随着滚轮的运动逐渐

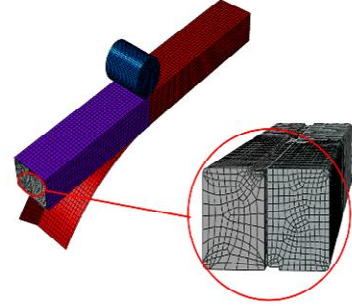
上升,位置如图 3(a)中虚线所示。活动压模的运动轨迹示意图及几何关系见图 3(b),其位移函数通过式(5)和式(6)计算得出,具体公式为^[21]:



(a) RDB工艺二维示意图



(b) 液压滚轮和活动压模运动轨迹图



(c) 新型磁控芯模有限元模型

图 3 绕弯成形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bending forming

$$Y = R/\cos\alpha - R\sin\alpha(\tan\alpha - \text{Radians}(\alpha)) \quad (5)$$

$$X = R\cos\alpha(\tan\alpha - \text{Radians}(\alpha)) \quad (6)$$

式中: X 为 x 方向位移; Y 为 y 方向位移; L 为活动压模长度; α 为弯曲角,rad; R 为弯曲模半径。

1.4 新型磁控芯模成形极限的研究

为了研究“日”字形截面型材绕弯过程中的截面变形,本文对型材的截面畸变量进行定义。型材绕弯前后的截面变形情况如图 4 所示。

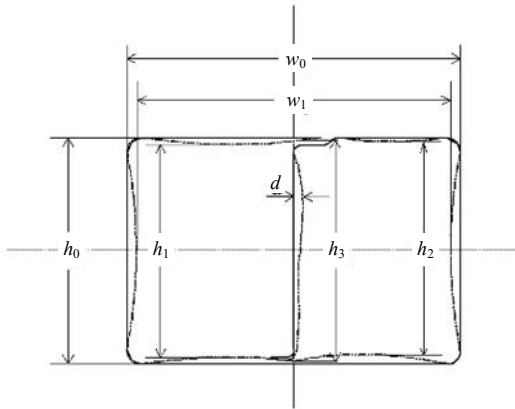


图 4 型材绕弯前后的截面变形图

Fig. 4 Sectional deformation diagram of the profile before and after bending

型材宽度变形量 Δw 、左腔高度变形量 Δh_L 、右腔高度变形量 Δh_R 和支撑梁偏移量 ΔD 的计算公式如下所示:

$$\begin{cases} \Delta w = (w_0 - w_1)/w_0 \\ \Delta h_L = (h_0 - h_1)/h_0 \\ \Delta h_R = (h_0 - h_2)/h_0 \\ \Delta H = (h_0 - h_3)/h_0 \\ \Delta D = d \end{cases} \quad (7)$$

为了探究成形工艺不同参数对型材内侧增厚的影响,本文采用式(8)定义型材内侧的壁厚增厚率 S 。

$$S = \frac{t_i - t_0}{t_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中: t_i 为绕弯后型材外侧或内侧的厚度值; t_0 为型材的初始厚度值; S 为型材壁厚增厚率。

本文根据商用车防护梁的成形标准,确定了弯曲模半径的工艺合理范围为 300~700 mm。根据型材的成形工艺特点,定义弯曲半径为型材中性层与弯曲模中心的距离,即弯曲模半径+型材截面高度的一半。型材截面高度为 80 mm,结合型材截面高度和弯曲半径的合理范围,本文设置了 4 组不同弯曲半径的模型参数,分别为 340、440、540、640 mm,用于探究不同弯曲半径对型材截面变形量和型材壁厚增厚率的影响。

芯模与型材内侧间隙也是影响型材成形质量的关键因素。根据实际使用情况,型材的壁厚为 2.5 mm,本文设置间隙参数 e 为 10%、20%、30%、40%、50%的型材壁厚,对应间隙值分别为 0.25、0.50、0.75、1.00、1.25 mm。通过分析弯曲半径对成形质量的影响,选择合适的弯曲半径,并依照上述参数构建有限元模型,研究模具间隙对 RDB 工艺成形质量的影响。

2 RDB 过程的数值模拟

2.1 无芯模情况下的仿真结果

通过 ABAQUS 有限元软件仿真,利用 RDB

工艺装置在无芯模条件下对型材进行 RDB, 观察型材在 RDB 工艺中的缺陷, 并探讨其形成机理, 从而为开发新型磁控芯模提供理论指导, 仿真结果如图 5 所示。

本文采用 Mises 屈服准则分析各向同性材料的塑性变形过程^[22]。Mises 屈服准则基于形状改变比能理论(第四强度理论), 其屈服函数表达式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (9)$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 轴的正应力分量; $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别为应力最大值和最小值; τ_{xy} 为 y 平面 y 方向的切应力; $\tau_{\max}$ 为最大切应力值。

在 RDB 过程中, 型材外侧受切向摩擦力产生的拉应力作用而拉伸, 型材内侧受切向压应力和

径向压力的作用而收缩。图 5(a) 中, “日” 字形截面型材在无芯模填充的情况下进行 RDB 工艺时, 出现了支撑梁破坏性弯曲、型材截面畸变、型材弯曲段增厚起皱和减薄拉裂等缺陷。在图 5(b) 所示的型材弯曲部分侧视图中, 存在一个严重的凹陷, 且型材外侧起皱处的拉力值、内侧起皱处的压应力值及边角区域的应力值均较高。

型材弯曲变形主要源自型材上侧表面受到的拉应力和下侧表面受到的压应力的作用, 同时型材侧面会出现明显的应力过渡层——中性层。该层既不受拉, 又不受压, 应力几乎为 0, 如图 5(c) 所示。

绕弯后型材的厚度如图 5(d) 所示, 可以看出型材弯曲段内侧的厚度值在 2.533~2.801 之间, 型材弯曲段外侧的厚度值在 2.443~2.503 之间, 即型材弯曲段出现了内壁增厚、外壁减薄的现象。这种结构上的不合理性降低了防护梁的成形质量, 主要与 RDB 工艺有关。

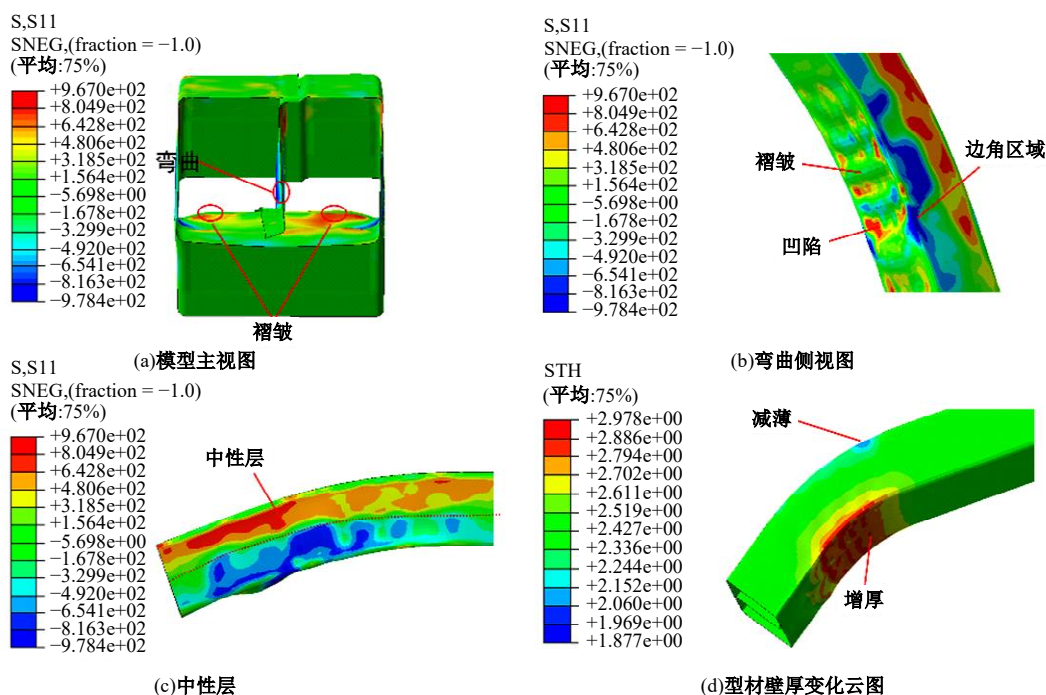


图 5 无芯情况模下的 RDB 工艺有限元模拟

Fig. 5 Finite element simulation of the RDB process without a mandrel

2.2 磁场下的磁流变弹性体力学性能测试结果

不同橡胶复合材料的断口形貌如图 6 所示。图 6(a) 中, 未添加 CIPs 颗粒的 NB 基 MREs 复合材料的断口较为光滑。图 6(b) 中, 存在白色球状的 CIPs 颗粒(含量 60 wt. %), 同时 CIPs 颗粒和 NB 基体结合良好, 这是因为炭黑的加入有效地改善了 CIPs 颗粒和 NB 基体之间的结合效果。

图 7 为 CIPs 含量 60 wt. % 磁流变弹性体样品的磁致压缩力学性能测试结果。图 7(a) 中 MRE-0CIP 的拉伸应力-应变曲线, 在拉伸开始时, 不含铁粉含量的混合橡胶应力随着应变的增大呈现非线性增加, 拉伸应变在 750% 之前拉伸应力上升得较为平缓, 拉伸应变在 750% 之后拉伸应力随着拉伸应变急剧增大。这是因为该混合橡胶是由

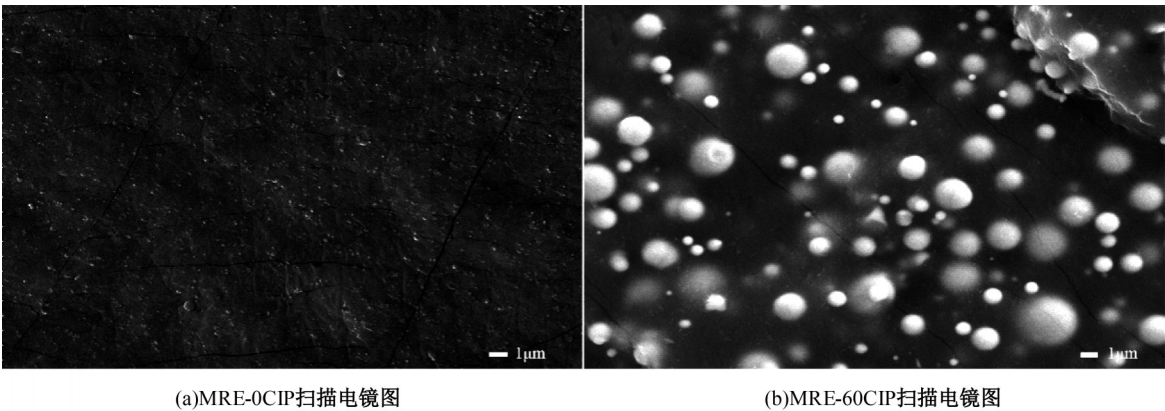


图 6 MRE-0CIP 和 MRE-60CIP 扫描电镜图

Fig. 6 Scanning electron microscope images of MRE-0CIP and MRE-60CIP

天然橡胶和顺丁橡胶以 7:3 的比例混合制备而成的,天然橡胶具有较高的应变诱导结晶能力,随着应变的增加橡胶内部局部区域内橡胶分子链有序排列,使得橡胶拉伸模量提高。随着 CIPs 的加入,MREs 的拉伸强度明显提高。

图 7(b)为不同磁场强度下样品的压缩应力-应变曲线,以明显看出,随着磁场强度从 0 mT 上升到 400 mT,样品的压缩应力-应变曲线斜率逐渐增大。这是因为 CIPs 为“软”磁性颗粒,具有较低的矫顽力(H_c)和较高的磁导率,对 MREs 施加磁场后,磁粉在橡胶基体内发生一定程度的转动,呈现出局部排列的特性^[23]。因此,当磁场强度增大时,CIPs 在橡胶基体内呈现链状排列,当受到压缩荷载时可以更加有效地抵抗变形,从而提高压缩性能。

不同 CIPs 含量的 MREs 力学性能如表 3 所示,可以看出,随着 CIPs 含量的逐渐增大,MREs 拉伸力学性能和压缩力学性能均显著提高。因此,在选用 MREs 作为内支撑材料时,CIPs 含量为 60 wt% 的配方 s 较为合适,可以达到预期的支撑作用。

表 3 不同 CIPs 含量的 MREs 力学性能

Table 3 Mechanical properties of MREs with different CIPs content

样品	MRE-0 CIP	MRE-30 CIP	MRE-60 CIP
拉伸强度	16.18	17.78	19.46
100% 应变下的应力	0.78	1.56	2.32
300% 应变下的应力	1.48	4.49	6.23
压缩模量	4.04	4.97	6.59

图 7(c)为样品在 0~1 000 mT 磁场作用下的储能模量,从图 7(c)中可以看出,随着磁场强度的增大,样品的储能模量逐渐增大。这是由于可磁极化 CIPs 在橡胶基体内部受磁场影响发生偶极相互作用,并且这种影响受磁场强度影响较大。表 4 列出了不同样品在 0~1 000 mT 磁场作用下的性能参数,其中 G_0 为零场模量, $G_{\max}$ 为饱和磁致模量, $(G_{\max} - G_0)/G_0(\%)$ 为相对 MR 效应。MR 效应反映了材料在没有外部磁场时表现为普通软弹性体,但在施加外部磁场后,样品的黏度和模量会迅速增加,与固体类似。通过上述样品在不同磁场作用下的力学性能分析,选用 400 mT 磁场条件下的 MREs 进行新型磁控芯模设计较为

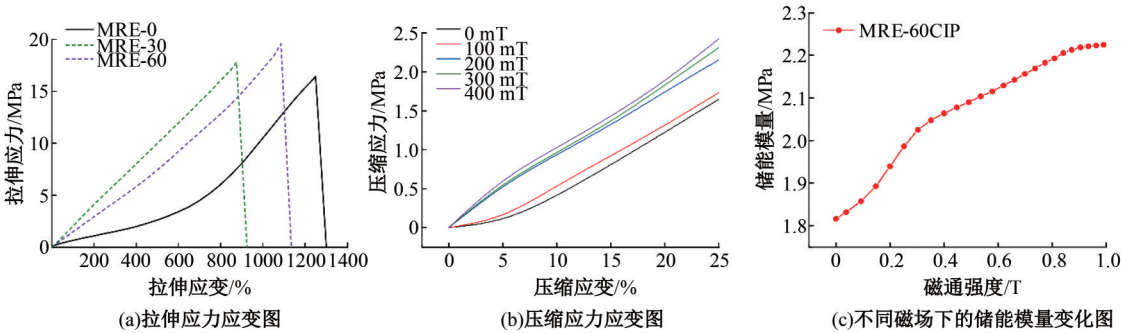


图 7 MRE-60CIP 力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of MRE-60CIP

表 4 不同 CIPs 含量的 MREs 磁流变效应
Table 4 Magneto-rheological effect of MREs
with different CIPs content

样品	G_0/MPa	$G_{\max}/\text{MPa}$	$(G_{\max} - G_0)/G_0/\%$
MRE-0CIP	0.975	0.979	0.410
MRE-30CIP	1.711	1.968	15.001
MRE-60CIP	1.816	2.225	22.501

合理和适用。磁场的方向也会影响 MREs 的性能,当磁场垂直于芯模支撑方向时,磁性粒子会在

芯模内形成局部有序的链状结构,进而提高 MREs 的力学性能。因此,在构建有限元模型时,磁场方向选用垂直于轴向方向。

2.3 新型磁控芯模成形极限的仿真结果

采用新型磁控芯模的 RDB 过程仿真结果如图 8 所示。从仿真云图中可以发现,填充新型磁控芯模后,型材的起皱和截面畸变程度得到明显改善,内部应力分布更为均匀,应力集中现象较少,底部起皱现象得到抑制。

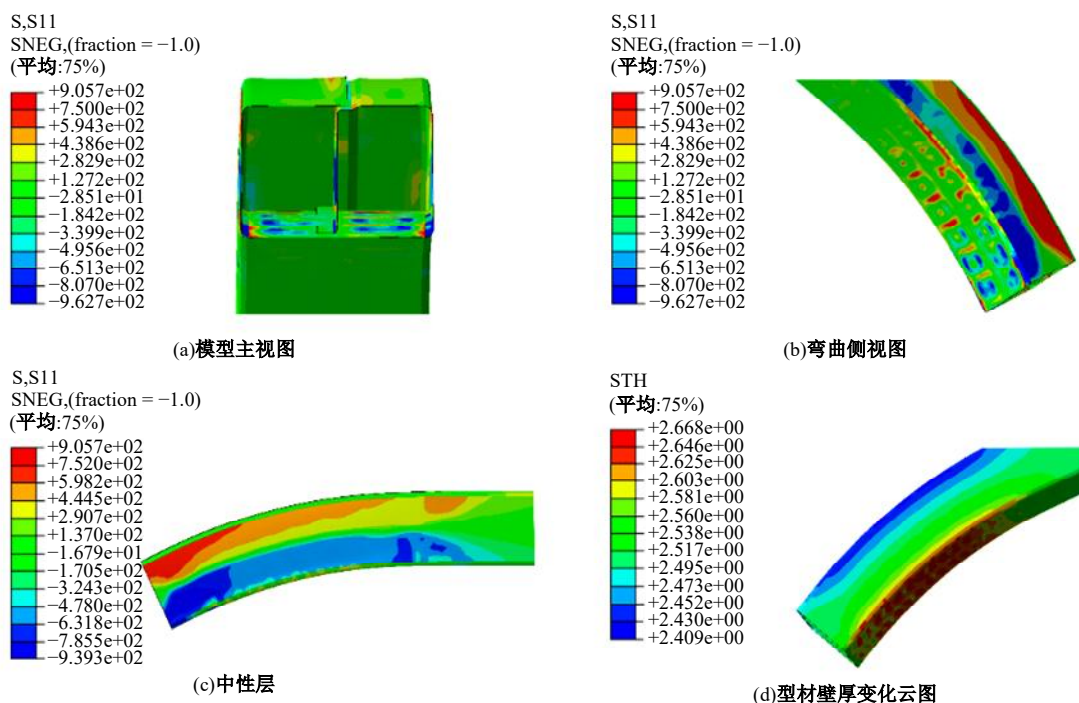


图 8 磁控芯模下的 RDB 工艺有限元模拟

Fig. 8 Finite element simulation of the RDB process under magnetic-controlled mandrel

2.3.1 弯曲半径对截面变形和壁厚的影响

型材弯曲部分的曲率随着弯曲半径的增大而逐渐减小,曲率定义如式(10)所示,可知,随着弯曲半径的增大,曲率逐渐减小,型材弯曲过程较为平缓,型材弯曲段所受弯曲应力相对减小。

$$\kappa = \lim_{\Delta s \rightarrow \infty} \left| \frac{\Delta \theta}{\Delta s} \right| = \lim_{\Delta s \rightarrow \infty} \left| \frac{\Delta s/R}{\Delta s} \right| = \frac{1}{R} \quad (10)$$

式中: κ 为弯曲模的曲率; s 为弯曲模的弧长; θ 为弯曲模的弯曲角度。

图 9 左侧部分为不同弯曲半径下 RDB 工艺过程中型材的 Mises 应力分布云图。分析不同弯曲半径下“日”字形截面型材 RDB 工艺的 Mises 应力分布趋势可以发现,当弯曲半径 <540 mm 时,Mises 应力最大值较为接近,各组的 Mises 应

力差值变化较小;当弯曲半径 >540 mm 时,Mises 应力最大值显著减小,Mises 应力差值也随之减小,呈现 $\Delta \sigma_{340 \text{ mm}} \approx \Delta \sigma_{440 \text{ mm}} \approx \Delta \sigma_{540 \text{ mm}} > \Delta \sigma_{640 \text{ mm}}$ 的趋势。这与前文分析的截面变形机理相符,随着弯曲模弯曲半径的增大,弯曲模的曲率减小,弯曲变形程度减弱,型材所受弯曲应力相对减小。而当弯曲半径 <540 mm 时,Mises 应力差值变化不大的原因是:此时 Mises 应力已经接近材料的抗拉强度,过小的弯曲半径可能导致型材发生破坏性损伤。

图 10 为不同弯曲半径下 RDB 工艺中,弯曲半径对型材截面变形率的影响。由曲线图趋势可以看出,型材截面的宽度变形率、左腔高度变化率、右腔高度变形率、支撑梁偏移量都随着弯曲半径的增大而减小。呈现这种趋势的主要原因同样

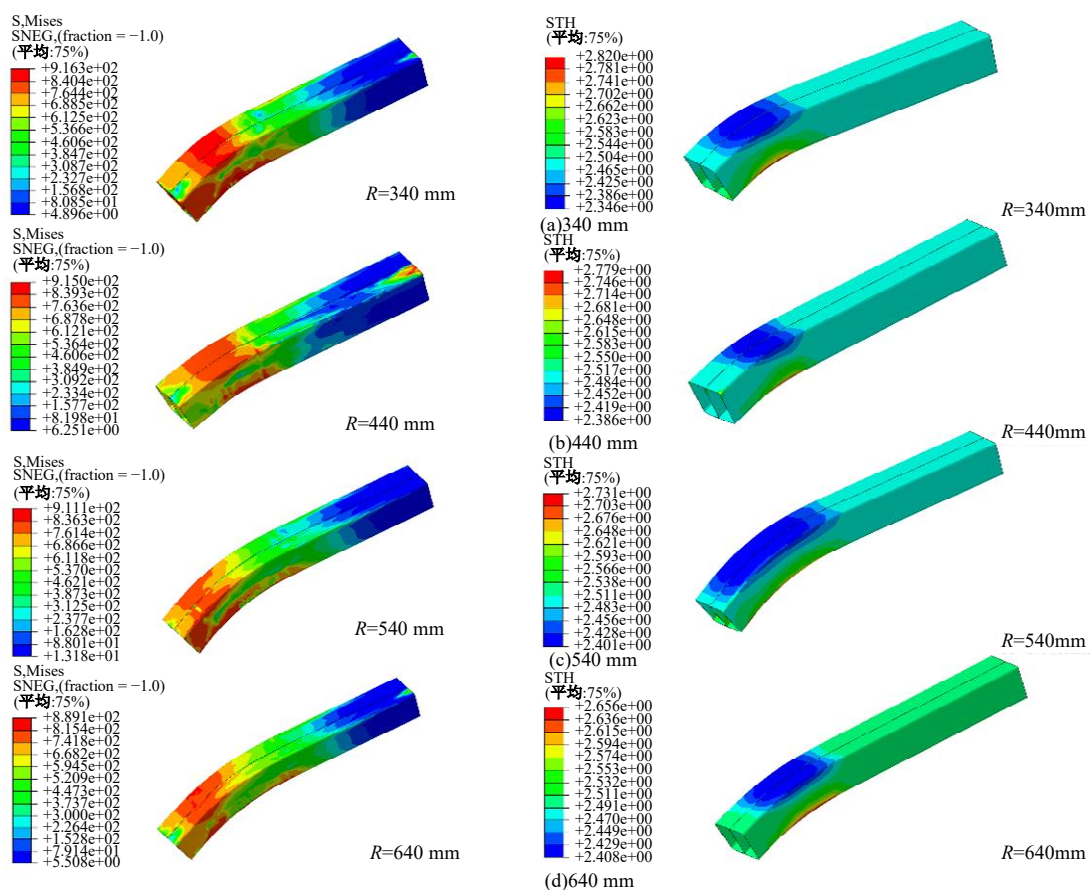


图 9 不同弯曲半径下的 Mises 应力云图和壁厚云图

Fig. 9 Mises stress cloud image and wall thickness cloud image under different bending radius

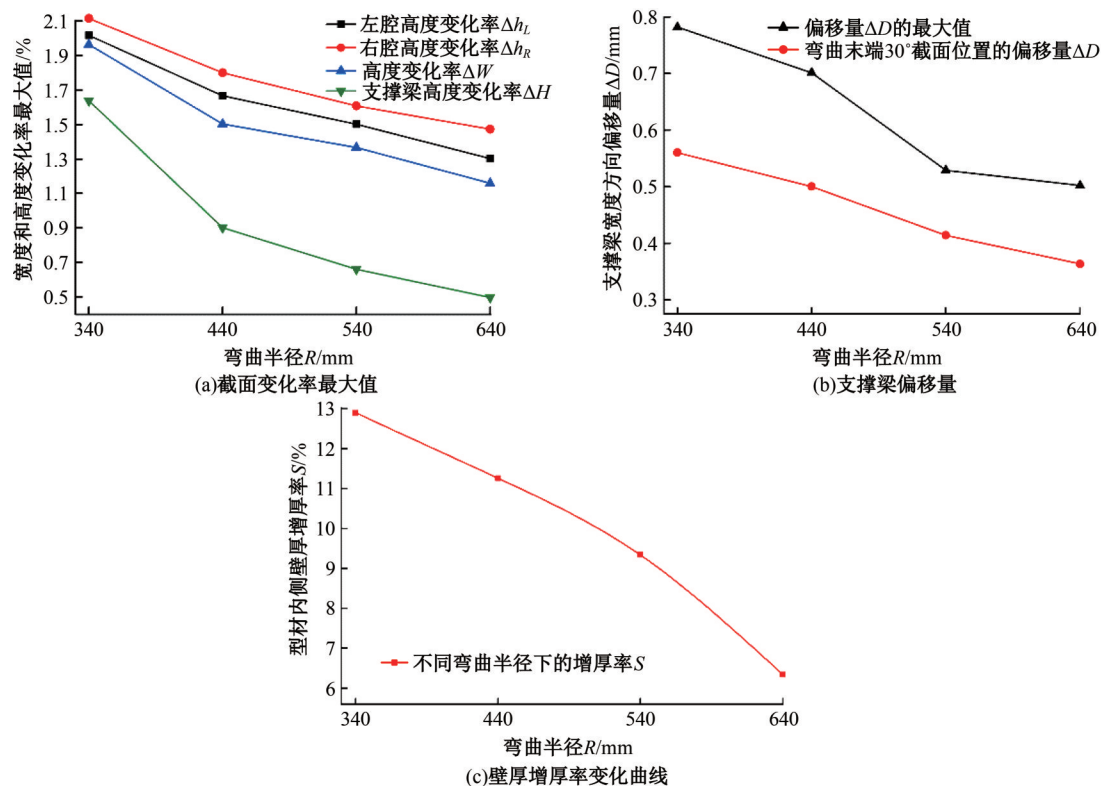


图 10 不同弯曲半径

Fig. 10 Different bending radius

源于型材弯曲部分的变形程度随着弯曲模曲率的增大而增大,变形程度越大,截面畸变越严重。因此,型材的截面变化指标与弯曲半径成反比关系,综合分析确定极限半径为 640 mm。

弯曲模不同弯曲半径对型材内侧壁厚增厚率 (Section thickness homogeneity, STH) 的影响如图 10(c) 所示,可以看出,随着弯曲模弯曲半径的增大,型材内侧壁厚增厚率逐渐减小。这是因为弯曲半径越大,型材受到的反向挠曲越小,导致内侧切向压应力减小,型材内侧材料的堆积较少,壁厚增厚现象减弱。

2.3.2 芯模与型材间隙对截面变形和壁厚的影响

图 11 为芯模与型材腔体内部不同间隙参数的 Mises 应力分布云图,可见,间隙参数为 0.25 mm 时的 Mises 应力值比间隙参数为 0.5~1.25 mm 时的 Mises 应力值小得多,并且间隙参数为 0.25 mm 的型材弯曲区域 Mises 应力分布更均匀、应力差值更小。随着间隙参数的逐渐增大,型材弯曲区域的应力分布均匀程度逐渐下降,且出现明显的褶皱现象。而应力差值越小,应力分布越均匀,型材 RDB 过程过渡得越平缓,型材截面的失稳坍塌风险越低,中间支撑梁的偏移量也越小,因此型材中间支撑梁的偏移量变化率受型材 Mises 应力分布影响。

图 12 为芯模与型材不同间隙参数的侧面剖视横向位移分布云图。随着模具间隙的逐渐增

大,支撑梁发生了明显的变形。这种情况的发生除与上述图 11 Mises 应力分布云图所阐述的原因有关外,还与芯模对腔体的支撑效果有关。由截面变形机理可知,型材的高度变形是由绕弯时型材外侧拉伸凹陷、型材内侧压缩增厚上凸共同作用导致的。随着芯模与型腔内部间隙的逐渐增大,芯模对型腔内侧增厚上凸和型腔外侧拉伸凹陷的抑制效果减弱,RDB 过程中对型材腔体内部的支撑效果降低,导致支撑梁发生较大偏移变形。

图 13 为模具间隙变化对增厚率的影响曲线,可观察到,型材内侧增厚率随着芯模与型材内腔间隙的增大而增大。当间隙 < 0.25 mm 时,曲线斜率变化很小,增厚率增长平缓;当间隙为 0.25~0.75 mm 时,曲线斜率变化增大,增厚率加速增长;当间隙为 0.75~1.25 mm 时,增厚率急剧增长。产生此种现象的原因是芯模在腔体内部发挥着重要的内支撑作用,而当芯模与型材腔体内部间隙较大时,内支撑作用减弱,芯模对型材腔体内部的刚性约束减弱,从而导致型材弯曲区域因底部受压缩引发的材料堆积现象不能被很好地抑制,因此增厚率随着芯模与腔体内部间隙的增大而增大。而当间隙 < 0.25 mm 时曲线斜率变化较小的原因是,虽然支撑效果减弱,但芯模对型材的柔性约束仍然较大,因此增厚率变化缓慢。然而,随着间隙的逐渐增大,型材内侧几乎不受芯模的柔性约束,因此加剧了失稳增厚的趋势。

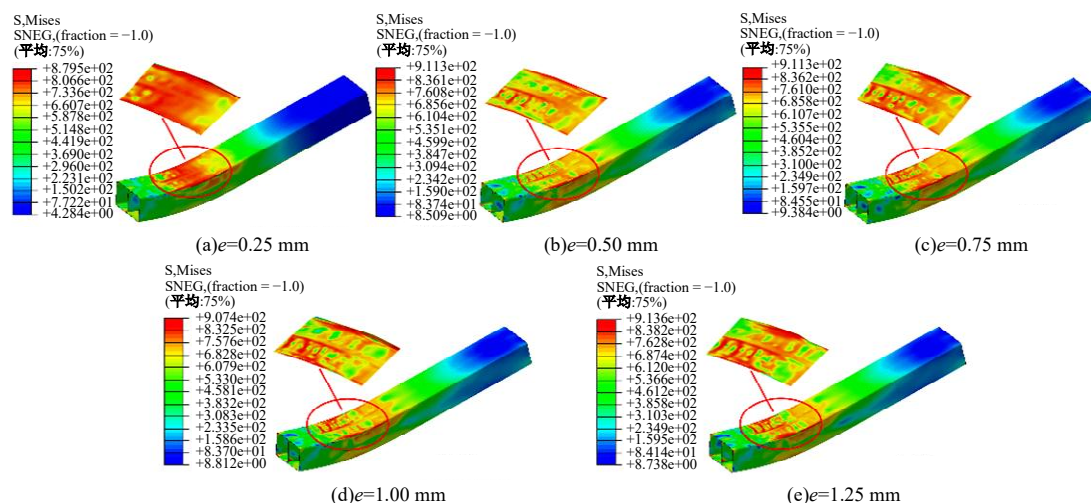


图 11 不同间隙参数下的 Mises 应力分布云图

Fig. 11 Cloud image of mises stress distribution under different clearance parameters

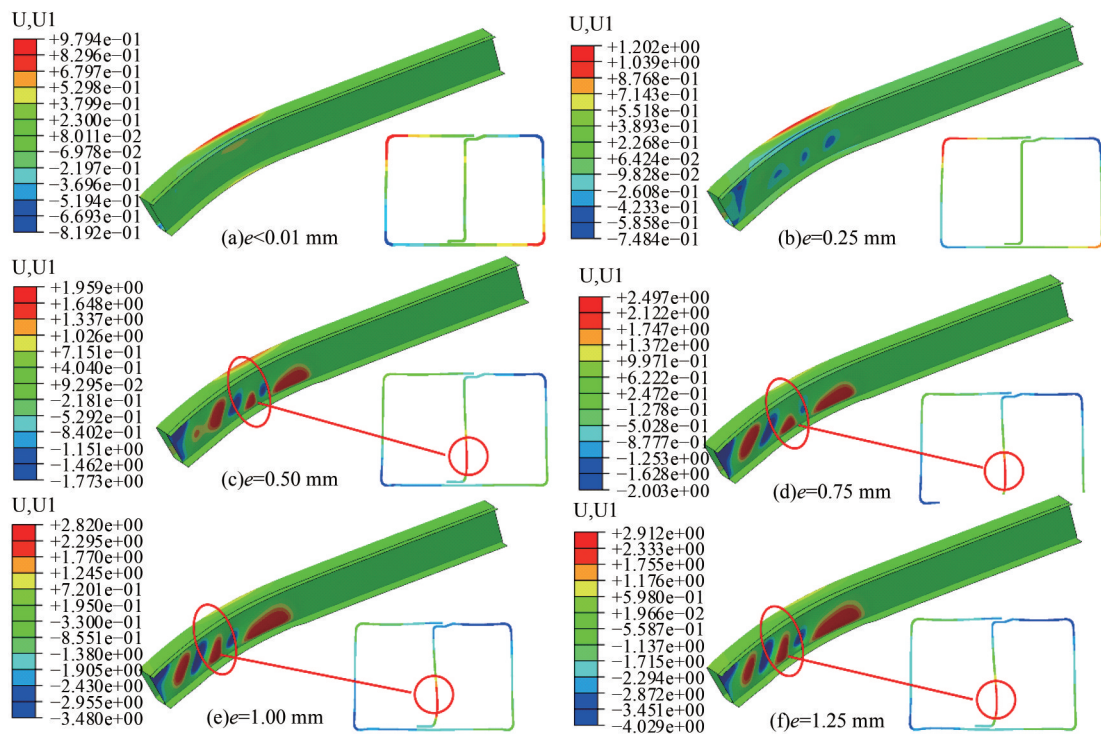


图 12 不同间隙参数下的横向位移分布云图

Fig. 12 Cloud image of transverse displacement distribution under different clearance parameters

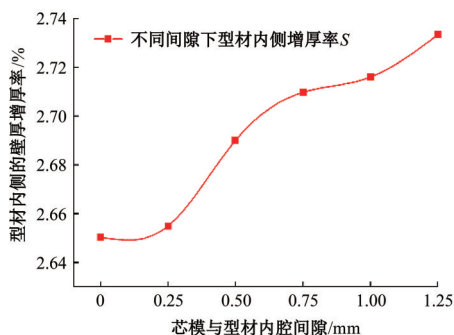


图 13 模具间隙变化对增厚率的影响曲线

Fig. 13 Influence curve of die gap variation on thickness increase rate

3 结 论

(1) RDB 过程中, 型材外侧受切向拉应力作用产生横向挠曲而发生内凹现象, 两侧边板为平衡横向挠曲而相向运动, 内侧受切向和径向压应力产生反向挠曲而发生内凸现象, 最终导致截面变形。同时, 内侧压缩造成材料聚集, 导致内侧起皱。

(2) 通过对比无芯模和采用新型磁控芯模的 Mises 应力分布云图, 验证了新型磁控芯模的合理性及可靠性。随着新型磁控芯模的加入, 有效地降低了最大应力值, 减少了应力差值。从有限元模拟后的模型中可以看出, 新型磁控芯模可有

效抑制型材截面畸变和内侧起皱缺陷的发生。

(3) 弯曲半径增大使弯曲模的曲率减小, 型材弯曲部分的变形程度减小。当弯曲半径 < 540 mm 时, 最大 Mises 应力值接近型材的抗拉强度, 易出现截面变形、内侧起皱等缺陷。当弯曲半径 > 540 mm 时, 最大 Mises 应力值、弯曲应力差值、截面变化率及增厚率均显著下降, 型材的成形质量得到提升, 据此确定极限弯曲半径为 540 mm。

(4) 当芯模间隙 > 0.25 mm 时, 最大 Mises 应力值显著增大, 弯曲应力差值也随之增大。同时在横向位移云图中发现, 当间隙参数 > 0.25 mm 时, 型材内部的支撑梁出现了明显的弯曲变形。随着芯模间隙的增大, 型材内侧的增厚率在间隙 > 0.25 mm 处呈现急剧增大趋势, 在 0.75 mm 处呈现减弱缓慢趋势。

参考文献:

- [1] Yang J B, Jeon B H, Oh S I. The tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1-3): 175-181.
- [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] Zhang S Y, Fu M Y, Wang Z L, et al. Springback prediction model and its compensation method for the variable curvature metal tube bending forming[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(11/12): 3151-3165.
- [4] Zhang Z K, Li D R, Wu J J, et al. Investigation on the wall thickness variation of an eccentric tube in the rotary draw bending process[J]. Engineering Computations, 2023, 40(4): 957-972.
- [5] Naderi G, Moussavi T S E, Dibajian S H. Experimental-numerical study of wrinkling in rotary-draw bending of tight fit pipes[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183: 110428.
- [6] Yang Y X, Yu L L, Meng M L. Cross-sectional deformation of H96 brass double-ridged rectangular tube in rotary draw bending process with different yield criteria[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(6): 1788-1798.
- [7] Yang Q C, Cheng C, El-Aty A A, et al. Effects of punch size, magnetic field, and magnetorheological elastomers medium on forming T-shaped thin-walled inconel 718 tubes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 226-237.
- [8] Xiao Y H, Liu Y L, Yang H. Prediction of forming limit based on cross-sectional distortion for rotary draw bending of H96 brass double-ridged rectangular tube[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5-8): 1445-1454.
- [9] Kajikawa S, Wang G H, Kuboki T, et al. Prevention of defects by optimizing mandrel position and shape in rotary draw bending of copper tube with thin wall[J]. Proceedings of the 17th International Conference on Metal Forming Metal Forming, 2018, 15: 828-835.
- [10] Ancellotti S, Benedetti M, Fontanari V, et al. Rotary draw bending of rectangular tubes using a novel parallelepiped elastic mandrel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5-8): 1089-1103.
- [11] Tronvoll S A, Ma J, Welo T. Deformation behavior in tube bending: a comparative study of compression bending and rotary draw bending[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 124(3/4): 1-16.
- [12] Yang H, Li H, Ma J, et al. Breaking bending limit of difficult-to-form titanium tubes by differential heating-based reconstruction of neutral layer shifting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2021, 166: 103742.
- [13] Sun H, Li H, Yi L H, et al. Prediction and control of bending quality of double-layered gap tube[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 228: 107474.
- [14] Zhang H L, Liu Y L, Yang H. Deformation behaviors of double-ridged rectangular H96 tube in rotary draw bending under different mandrel types[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9-12): 1569-1580.
- [15] Liang J C, Liang T, Li Y, et al. Novel flexible cores in rotary draw bending forming: Applied for the commercial vehicle anti-collision beam with rectangular ribbed (H-shaped) section[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(5/6): 1545-1556.
- [16] Salem M, Farzin M, Kadkhodaei M. A chain link mandrel for rotary draw bending: Experimental and finite element study of operation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 1071-1080.
- [17] Zhang Z L, Hauge M, Odegard J, et al. Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section[J]. SINTEF Materials Technology, 1999, 36(23): 3497-3516.
- [18] Boczkowska A, Awietjan S F, Pietrzko S. Mechanical properties of magnetorheological elastomers under shear deformation[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 432: 636-640.
- [19] Agirre O I, Elejabarrieta M J. A new magneto-dynamic compression technique for magnetorheological elastomers at high frequencies[J]. Polymer Testing, 2018, 66: 114-121.
- [20] Chen L, Gong X L, Li W H. Damping of magnetorheological elastomers[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2008, 21(6): 581-585.
- [21] Li Y, Li R, Liang C, et al. Influence of the curvature of the multipoint die for flexible multipoint stretch bending on the quality of aluminum profile[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(1): 1-9.
- [22] Herfelt M A, Poulsen P N, Hoang L C. Strength-based topology optimisation of plastic isotropic von mises materials[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59(3): 893-906.
- [23] Jaafar M F, Mustapha F, Mustapha M. Review of current research progress related to magnetorheological elastomer material[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 5010-5045.