

文章编号 1004-924X(2016)增-0407-08

## 柔性轧制成形中曲面件起皱的数值分析与控制方法

付文智<sup>1</sup>, 王 好<sup>2</sup>, 李明哲<sup>1</sup>, 陈 俊<sup>2</sup>, 邓玉山<sup>1\*</sup>

(1. 吉林大学 辊锻工艺研究所, 吉林 长春 130022;  
2. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**阐述了柔性轧制成形机理, 曲面柔性轧制成形依靠柔性辊间特殊形态的辊缝, 使得板材在成形过程中发生双向弯曲。为了探究柔性轧制成形起皱规律, 有效控制柔性轧制成形中曲面件的起皱缺陷, 以球形件为例, 对不同曲率半径的球形件轧制过程进行数值模拟分析, 分析结果表明, 成形半径从 1 000 mm 减小到 300 mm 时, 最大皱纹高度从 0.24 mm 增大到 2.85 mm。随着成形件曲率半径减小, 板料宽度方向金属变化越大, 塑性变形越不均匀, 越容易发生起皱。并探讨多道次轧制成形规律, 采用多道次柔性轧制成形工艺能有效预测与控制皱纹。在试验机上进行了试验验证, 使用光学测量仪对试验件进行三维型面测量, 得到点云数据, 结合逆向曲面造型技术完成对实验件的型面分析, 试验结果与模拟结果基本吻合。

**关键词:**柔性轧制; 三维曲面; 数值模拟; 起皱; 多道成形; 光学测量

**中图分类号:** TG306 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0407

## Numerical analysis and control method for wrinkling of curved surface parts in flexible rolling forming

FU Wen-zhi<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, LI Ming-zhe<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>2</sup>, DENG Yu-shan<sup>1</sup>

(1. Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130022, China;  
2. College Material Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)  
\* Corresponding author, E-mail: dengys@jlu.edu.cn

**Abstract:** Set forth the flexible rolling forming mechanism; the flexible rolling forming surface relies on the roll gap of special shape between the flexible rollers to achieve bi-directional bending of the plates during formation. Purpose: to study the wrinkling law during the flexible rolling forming process, and effectively control the wrinkling of surfaces. Take spherical parts for an example, and carry out numerical analysis on the rolling process of spherical parts with different curvature radius. The analysis results indicate that the maximum wrinkle height increases from 0.24 mm to 2.85 mm when the radius of the formed parts decreases from 1 000 mm to 300 mm. As radius of the formed parts decreases, changes to metal in the width direction of the plates will be larger; and as the plastic deformation becomes more uneven, the surface is more likely to wrinkle. The paper has also discussed the multi-step rolling forming laws, which can help effectively predict and control the wrinkles. Meth-

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51275202), 吉林省科技厅“双十工程”重大科技公关资助项目 (No. 20150201005GX)

od; carry out the experimental verification in the tester, conduct a 3D molded surface measurement in the test pieces with optical instrument to obtain the point cloud data, and then complete the molded surface analysis in the test piece by combining the reverse surface modeling technology. The test results are basically consistent with the simulation results.

**Key words:** flexible rolling; 3D surface; numerical simulation; wrinkling; multi-step forming; optical measurement

## 1 引言

随着我国近代光学和光电子技术的高速发展,光电设备以及构成这些设备的零件也随之发生变化。三维曲面件在制造各种复杂形状的光电设备零件上具有广泛的应用前景。传统的模具加工是如今板材的主要加工方法,具有高精度、一致性等优点。但因其制造成本高昂,试模周期长等特点使其难以适应新兴产品多样化的需求。为满足实际生产中对板材个性化的需求,一些适应能力强、生产周期短的柔性成形技术应运而生。目前,用于曲面零件生产的柔性加工技术包括水火弯板成形<sup>[1]</sup>、单点渐进成形<sup>[2]</sup>、喷丸成形<sup>[3]</sup>、多点成形等<sup>[4,5]</sup>。然而这些技术存在设备成本高且控制过程复杂等问题,仍需探索新的成形方法。

为了实现柔性成形技术的连续性,高效性,李明哲等<sup>[6]</sup>提出一种曲面连续成形新工艺——柔性轧制曲面成形技术。三维曲面柔性轧制成形是一种将多点调形方法与轧制技术有机结合的三维曲面连续成形新方法<sup>[7]</sup>。采用多个控制点来调节柔性辊曲率,以满足不同曲面件成形的需要,通过上、下柔性辊辊缝不均匀分布和柔性工作辊自身的旋转来实现板材的三维塑性变形和连续进给,实现三维曲面件的快速成形<sup>[8-10]</sup>。柔性轧制成形是一种无模、连续、高效的三维曲面成形技术。

对于柔性轧制成形,板材在柔性辊作用下产生双向弯曲,连续局部变形使得板料在塑性应变过程中受到复杂的外力作用,由于板料只是局部受到柔性辊约束,因此起皱较容易发生<sup>[11-12]</sup>。利用柔性辊弯曲可调性,将目标工件的大变形量分为多道次小变形量,逐次成形到目标形状。以球形件为例,针对起皱明显的工件再次进行多道次数值模拟,结合试验数据,得到不同曲率半径工件及多道次成形次数对起皱的影响规律,可以有效

预测和减小起皱。

PRO CMM 系统是一款进行测量和追踪标识点位置的高精度光学测量仪,通过设置及软件控制,系统可以报告离散标识点的位置,具有高速数据处理功能,能够实现动态运动的精确追踪。使用 PRO CMM 光学追踪器对试验件进行三维面测量,得到点云数据,结合逆向曲面造型工程完成对实验件的型面分析,从而对模拟结果进行试验验证。

## 2 原理

曲面柔性轧制成形选取具有足够柔性的可挠曲工作辊,基于不均匀减薄轧制原理及横向弯曲变形原理,上、下柔性辊在数控调整单元作用下,产生两辊辊缝间隙,其函数<sup>[13]</sup>见式(1)。上柔性辊整体向下移动使板料在局部区域不均匀压缩并产生横向弯曲变形,然后由柔性辊绕自身轴线旋转,在摩擦力与轧制力共同作用下,带动板料运动过程中板料产生纵向弯曲变形,最终实现板材的三维曲面连续成形,图 1 所示为柔性轧制成形原理示意图。

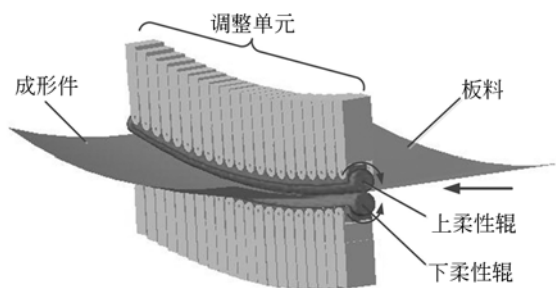


图 1 柔性轧制成形原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of flexible roll forming

成形曲面如图 2 所示,当成形半径为  $R_T = R_L = R$  的球面件时,任一点  $x$  处的辊缝函数为:

$$h(x) = \frac{R_L - R_T(1 - \cos \alpha_0)}{R_L - R_T \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \right]} t_0 = \frac{\cos \alpha_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}} t_0, \quad (1)$$

上下辊轮廓曲线分别为:

$$\begin{cases} g_1(x) = R - \sqrt{R^2 - x^2} + \frac{R \cos \alpha_0}{2 \sqrt{R^2 - x^2}} t_0 \\ g_2(x) = R - \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{R \cos \alpha_0}{2 \sqrt{R^2 - x^2}} t_0 \end{cases}, \quad (2)$$

此时最大厚度压缩量出现在板料横向中部 ( $x=0$ ) 处:

$$\Delta h_{\max} = t_0 \cos(\alpha_0/R), \quad (3)$$

式中:  $\alpha_0$  为板料边缘弧线对应圆心角, 有  $\alpha_0 = \arcsin(\omega_0/R)$ ,  $R_T$ 、 $R_L$  分别为成形件横纵向目标半径,  $R$  为辊缝中线曲率半径,  $\omega_0$  为板料宽度的一半,  $t_0$  为板厚。

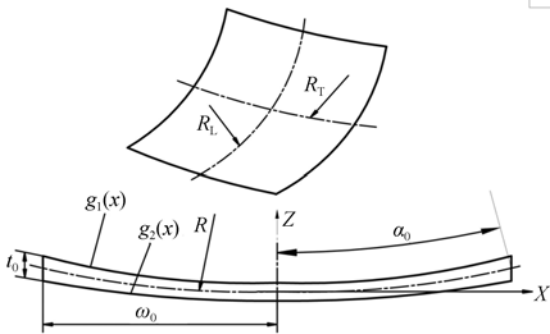


图 2 球形件成形轮廓及辊缝分布

Fig. 2 Profile and roll gap distribution of spherical parts

### 3 有限元模型

采用有限元分析软件 Abaqus/Explicit 对球形柔性轧制成形过程中的起皱现象进行数值模拟。选取材质为 08Al 合金, 其材料参数如表 1 所示。柔性辊具有既可以弯曲又可以绕自身轴线旋转的特点, 因此采用离散化子辊刚体模型。微调各个子辊位置, 可以改变柔性辊弯曲形状, 各子辊绕自身轴线旋转能够实现柔性辊绕自身旋转的特征。选用直径为 10 mm 柔性辊, 板材几何尺寸为 200 mm × 120 mm × 2 mm, 摩擦系数为 0.2。图 3

所示为成形球形件 1/2 有限元模型。

表 1 材料 08Al 参数

Tab. 1 Mechanical properties of 08Al

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\mu$	屈服点 $\sigma_s/\text{MPa}$
7 845	207 000	0.29	135

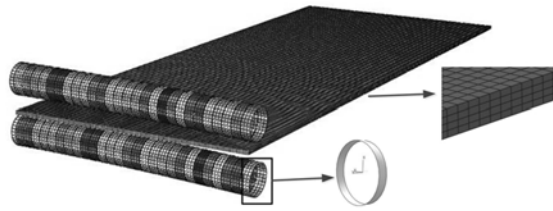


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model of blank sheet and flexible rolls

## 4 成形件的起皱及控制方法

### 4.1 成形件目标曲率半径对起皱影响

根据柔性轧制成形原理, 成形过程最主要的参数为柔性辊辊缝形态, 即两辊之间的相对下压量与柔性辊弯曲形状。由辊缝函数及几何关系可知, 调形过程中, 板料最大厚度减薄量及辊弯曲半径由成形件目标曲率决定, 成形件目标曲率是柔性轧制成形过程中的关键参数。在其它参数不变的情况下, 分别对不同曲率半径的球形件成形过程进行数值模拟, 根据模拟结果分析等效应力分布规律, 结合板材成形失稳起皱力学过程, 对其进行分析。

为了研究成形件曲率半径与起皱的关系, 球形件目标曲率半径分别取 300 mm, 420 mm, 600 mm 和 1 000 mm。分别调整柔性辊辊缝分布状态, 并进行轧制过程数值模拟。图 4 所示为不同目标曲率半径时等效应力云图, 可以看出, 成形件头部的中间区域应力较大, 随着成形件曲率半径减小, 柔性轧制成形所需应力相应增大, 半径为 300 mm 时最大为  $2.856 \times 10^2$  MPa。应力分布随着柔性辊弯曲程度的不同而变化, 柔性辊弯曲程度越大, 板料应力集中情况越明显。

由成形件中间位置纵向截面线上的点绘制曲线图来表征成形件曲面, 通过与拟合曲线进行对

比,可以得出起皱程度的大小,得到不同成形曲率半径下成形件中部纵向截面曲线图与拟合曲线的对比如图 5 所示。

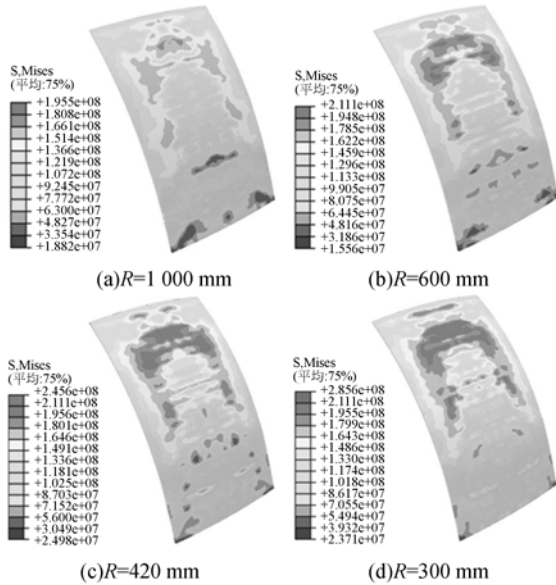


图 4 不同目标曲率半径时球形件的等效应力分布图

Fig. 4 Equivalent stress distributions of spherical parts with different curvature radii

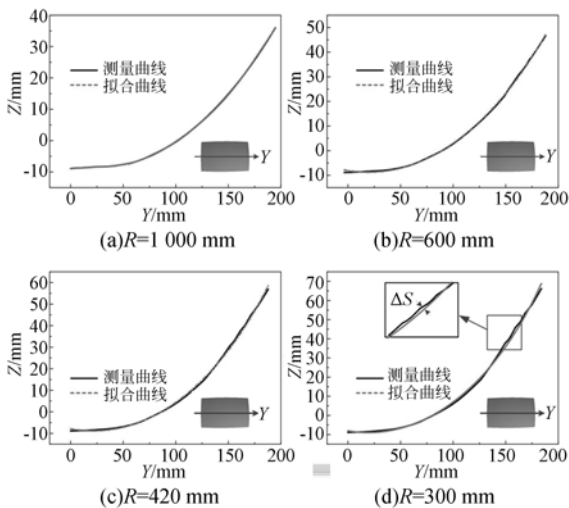


图 5 不同目标半径时球形件中间位置起皱曲线与拟合曲线对比图

Fig. 5 Comparison chart of wrinkling curve and fitting curve of spherical parts

由于皱纹高度  $\Delta S$  是一组波动的数据,取其最大值描述起皱程度,即:

$$\Delta S_{\max} = \text{Max} |\Delta S|. \quad (4)$$

绘制  $\Delta S_{\max}$  随目标曲率变化曲线拟合图,如

图 6 所示。目标曲率半径为 300 mm 时最大皱纹高度为 2.85 mm;半径为 1 000 mm 时,最大皱纹高度为 0.24 mm,可以清晰看出最大皱纹高度随成形件目标曲率半径的减小而增大的变化趋势。

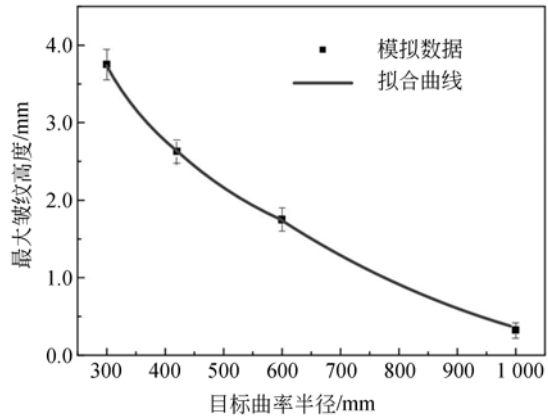


图 6 球形件最大皱纹高度随目标曲率半径的变化

Fig. 6 The maximum height of wrinkling with different curvature radii

球形件成形时,沿宽度方向金属流动较小,忽略宽展,主要研究材料在纵向方向上发生的延展。对于球形件,根据辊缝设计理论,由于辊缝的不均匀分布,引起板料不均匀变形,中心位置的纵向伸长量大于两侧,如图 7(a)所示,使得中间受压力,而两侧受拉力,这样的受力状态是失稳起皱产生的主要原因。图 7(b)中起皱区域的塑性应变分布如图 7(c)所示,板料在中间部位塑性变形达到最大值,随着成形件曲率半径的减小,纵向延伸受到板料横向弯曲作用限制,板料中部受到残余压应力增大,最大压应变随之增大。板料在纵向上不能延展产生一定量的堆积,导致塑性应变曲线出现尖点,不能平滑连续,宏观上出现起皱缺陷。

#### 4.2 多道次成形减小或消除起皱

为了解决大曲率成形件的起皱问题,可以采用多道次成形方法。如图 8 所示,多道次成形是将一个大的变形量分成若干小变形量,每道次都逼近目标形状,逐次实现成形。利用柔性轧制的柔性辊弯曲可调特性,采用多次调形反复轧制板料,使板料经过柔性辊轧制后,轧辊停止转动,再调整辊缝分布,柔性辊反转,使轧半成品再次被轧制,从小目标曲率开始成形,经过多次反复调整辊缝—轧制成形工艺,直至得到目标三维曲面零件。

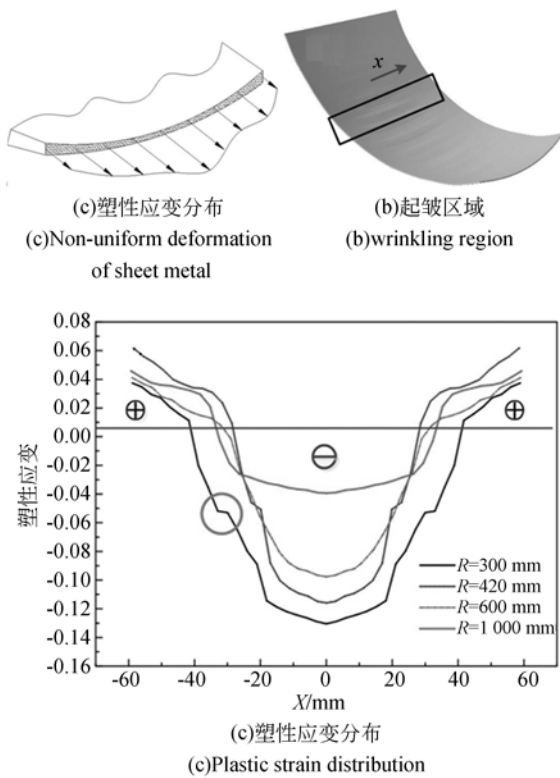


图 7 起皱部位的应变分析

Fig. 7 Strain distribution in the wrinkling region

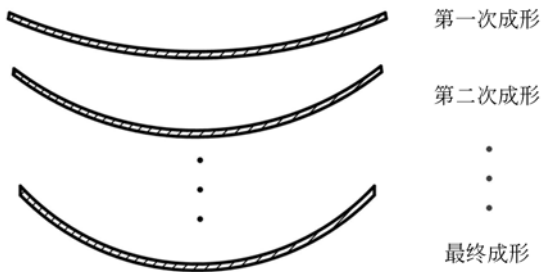


图 8 多道次板料变形过程

Fig. 8 Multi-steps forming schematic

针对起皱明显的目标曲率半径  $R=300\text{ mm}$  的球形件进行多道次成形数值模拟。分别设置一道次,二道次和四道次 3 种成形方式,研究成形道次对起皱抑制的影响。由于在目标曲率半径  $R=1\ 000\text{ mm}$  时,板料无起皱现象,因此二道次成形时,设置成形曲率半径为  $R_1=1\ 000\text{ mm}$ ,  $R_2=300\text{ mm}$ ;四道次成形时,各道次成形曲率半径  $R_1=1\ 000\text{ mm}$ ,  $R_2=750\text{ mm}$ ,  $R_3=500\text{ mm}$ ,  $R_4=300\text{ mm}$ 。图 9 所示为各道次成形等效塑形应力云图。由图可知,球形件一次轧制成形板料中间区域应变较大且分布不均匀,等效塑形应变最大值为 0.152 4,表面有明显起皱,而二道次成形后

板材应变更均匀,四道次成形时应变最大值减为 0.107 4。

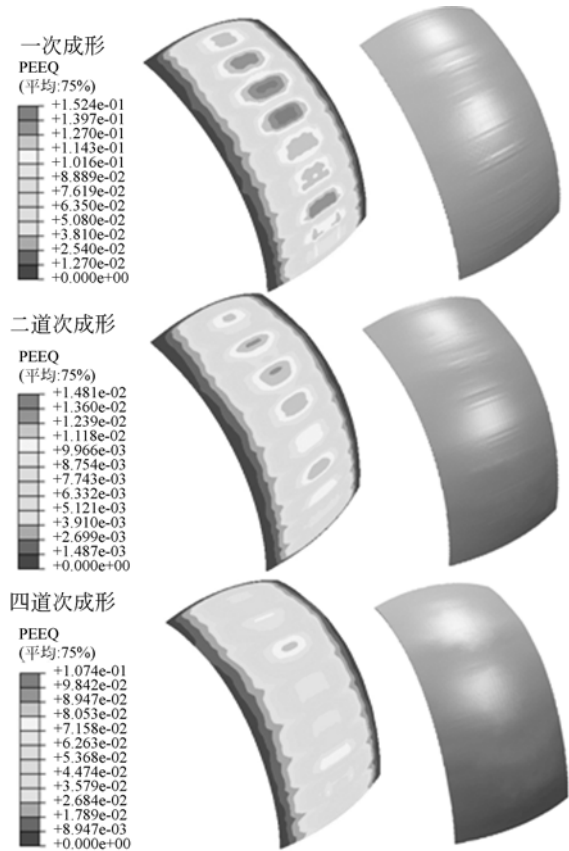


图 9 各道次成形的等效塑形应变云图及光照图

Fig. 9 Equivalent strain distributions and simulated results of sphere parts with different steps

图 10 为球形件纵向中心线上的  $z$  向误差分布曲线,可以看出,一次成形时,成形件的纵向形状误差为  $-3.02\sim 3.48\text{ mm}$ ;二道次成形时纵向

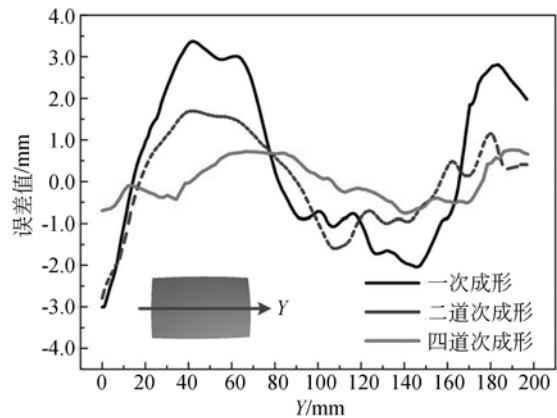


图 10 球形件纵向上形状误差

Fig. 10 Longitudinal shape error of spherical parts

形状误差为-2.85~1.72 mm;四道次成形时,纵向形状误差为-0.82~0.65 mm,成形件表面质量良好,更接近目标值。多道次成形可通过设计每一道次的辊缝分布,可以改变板材的变形道次和路径,使各部分变形更均匀,从而有效地抑制了曲面件的皱纹,提高板材的成形能力。

### 5 实验验证

为了验证以上数值模拟结果的准确性,根据现有试验条件,采用吉林大学研制的柔性轧制成形装置进行成形试验,如图 11 所示。根据辊缝函数式(1)及上、下辊轮廓曲线式(2),对柔性轧制设备工作辊的调形,上工作辊整体下压以及上、下工作辊转动,实现三维曲面的一次成形。

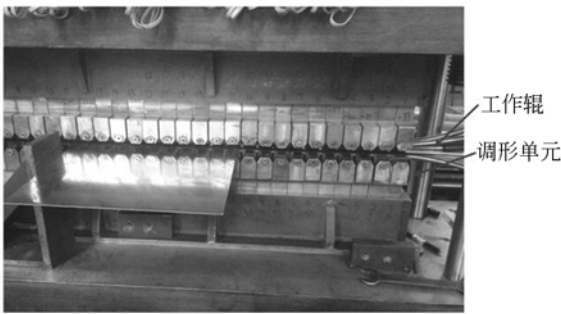


图 11 柔性轧制成形装置

Fig. 11 Experimental setup of flexible rolling forming

试验中选择 08Al 板料,尺寸为 400 mm × 330 mm × 2 mm。分别对曲率半径为 300 mm, 600 mm 及 900 mm 三种成形件进行试验。图 12 为目标曲率半径为 300 mm 及 900 mm 时成形球形件照片,并对目标曲率半径为 300 mm 的球形件进行二道次,四道次成形。运用 PRO CMM 系

统的激光扫描仪对成形曲面件进行三维型面测量。得到成形件表面的点云数据。再把点云数据导入误差分析软件进行分析,如图 13 所示。

不同参数条件下成形件形状误差分布如图 14 所示,目标曲率半径为 300 mm 时形状误差为-3.85~4.48 mm;半径为 900 mm 时,形状误差为-0.36~0.53 mm,随着成形曲率半径增大,最大皱纹高度减小,说明成形件曲率半径过小是影响板料失稳起皱的关键因素。多道次成形时,四道次成形目标曲率半径为 300 mm 的试验件,形状误差为-0.26~0.45 mm,板料起皱随成形道次的增加而减小,成形件质量提高。多道次成形只需对成形路径进行优化即可实现,节约成本和资源,对抑制起皱有着积极作用。

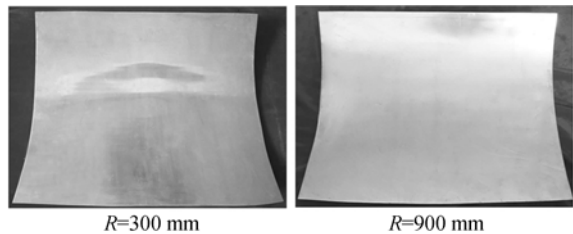


图 12 不同目标曲率半径的球形件试验件

Fig. 12 Experiment diagram of spherical parts with different forming curvature radii

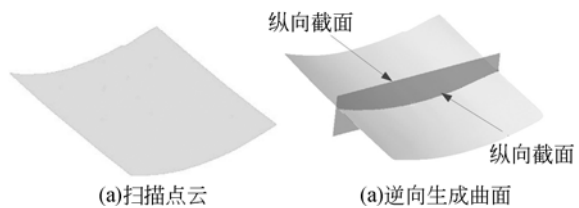
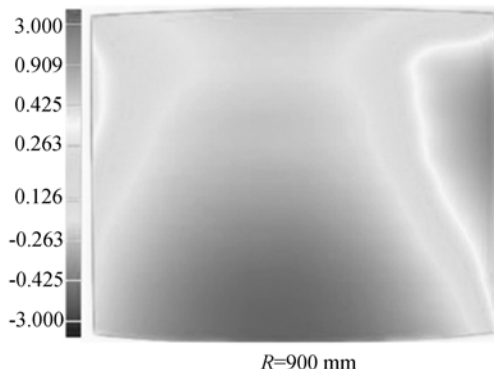
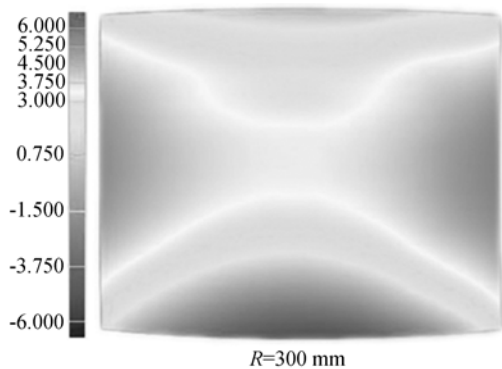


图 13 扫描点云与生成的曲面

Fig. 13 Scanning point cloud and the generation surface



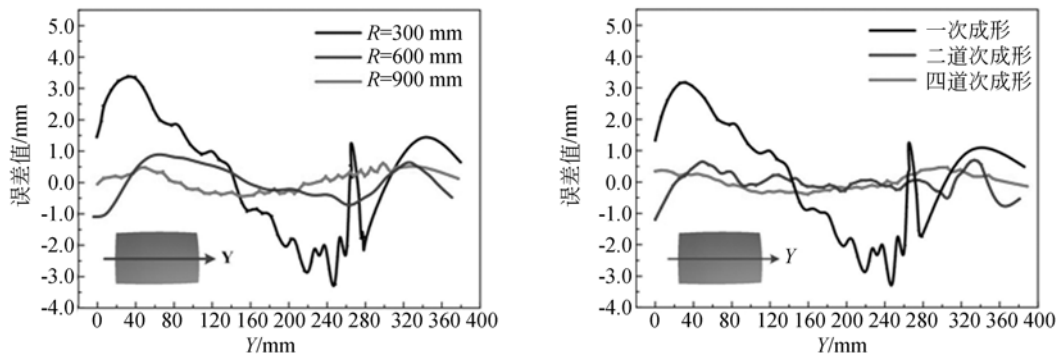


图 14 不同参数时球形件形状误差分布

Fig. 14 Shape error distribution of spherical parts with different parameters

## 6 结 论

薄板类材料在柔性轧制成形工艺中发生不均匀减薄,容易发生压缩失稳,出现起皱缺陷。通过解析法和有限元法相结合,讨论了板料成形过程中起皱缺陷的特点和规律,在此基础上得出了控制起皱的具体措施。对球形件的柔性轧制成形过程进行了数值模拟,结合有关力学,基于应力应变分析,结果表明:板类件弯曲程度过大会引起板料内部压缩失稳而出现起皱缺陷。成形曲率半径越

小,板料宽度方向金属变化越大,塑形变形越不均匀,越容易发生起皱。通过分析可得试验结果与数值模拟结果基本吻合。球形件多道次柔性轧制成形可改善板材变形路径,使板材内部应力分布更加均匀。模拟结果显示成形目标曲率半径为 300 mm 的球形件,一次成形时形状误差为  $-3.02 \sim 3.48$  mm;四道次成形时,形状误差减小为  $-0.82 \sim 0.65$  mm。试验结果得到一次成形时球形件形状误差为  $-3.85 \sim 4.48$  mm;四道次成形时,形状误差为  $-0.26 \sim 0.45$  mm。多道次成形技术能够明显地抑制起皱,提高成形质量。

## 参考文献:

- [1] TANGO Y, ISHIYAMA M, NAGAHARA S, *et al.*. Automated line heating for plate forming by IHI-ALPHA system and its application to construction of actual vessels-System outline and application record to date [J]. *Nihon Zosen Gakkai Ronbunshu/Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 2003, 193:85-95.
- [2] TEKKAYA A E, SHANKAR R, SEBASTIANI G, *et al.*. Surface reconstruction for incremental forming [J]. *Production Engineering*, 2007, 1(1): 71-78.
- [3] RAMATI S, LEVASSEUR G, KENNERKNECHT S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology [C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Shot Peening (ICSP-7)*, Warsaw, 1999.
- [4] LI M Z, CAI Z Y, Liu C G. Flexible manufacturing of sheet metal parts based on digitized-die [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(1): 107-115.
- [5] 龚学鹏, 李明哲, 等. 基于多点调形原理的旋转曲面连续成形[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 117-123.
- GONG X P, LI M Z, *et al.*. Continuous forming for rotary surface based on multi-point adjusting principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 117-123. (in Chinese)
- [6] CAI Z Y, LI M Z, LAN Y W. Three-dimensional sheet metal continuous forming process based on flexible roll bending: Principle and experiments [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(1): 120-127.
- [7] LI M Z, CAI Z Y, LI R J, *et al.*. Continuous forming method for three-dimensional surface parts based on the rolling process using bended roll [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14): 44-49.

- [8] CAI Z Y, WANG M, LI M Z. Study on the continuous roll forming process of swept surface sheet metal part [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(9):1820-1827.
- [9] CAI Z Y, SUI Z, CAI F X, *et al.*. Continuous flexible roll forming for three-dimensional surface part and the forming process control [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(1-4): 393-400.
- [10] LI R J, LI M Z, QIU N J, *et al.*. Surface flexible rolling for three-dimensional sheet metal parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2):380-389.
- [11] 龚学鹏, 李明哲, 胡志清. 连续多点成形过程中起皱缺陷的有限元分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(22):31-35.
- GONG X P, LI M ZH, HU ZH Q. Finite element analysis on wrinkle during process of continuous multi-point forming [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(22):31-35. (in Chinese)
- [12] AMEZIANE-HASSANI H, NEALE K W. On the analysis of sheet metal wrinkling [J]. *International Journal of Mechanical Science*, 1991, 33(1):13-30.
- [13] CAI Z Y, LI M Z. Principle and theoretical analysis of continuous roll forming for three-dimensional surface parts [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(2): 351-358.

#### 作者简介:



付文智(1960—),男,吉林长春人,博士,教授,1984年于吉林工业大学获得学士学位,1990年于吉林工业大学获得硕士学位,2004年于吉林工业大学获得博士学位,主要从事锻压设备,液压控制系统的研究。E-mail: fwz@jlu.edu.cn



邓玉山(1963—),男,河南商丘人,学士,高级工程师,研究方向:多点成形设备研制及模具 CAD/CAM 开发。E-mail:dengys@jlu.edu.cn