

轧制

## 基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制技术及实验研究

李 锐<sup>1</sup>, 王欣桐<sup>2,3</sup>, 李文洲<sup>1</sup>, 李明哲<sup>2,3</sup>

(1. 长春瑞光科技有限公司, 吉林 长春 130000; 2. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022;  
3. 吉林大学 辊锻工艺研究所, 吉林 长春 130025)

**摘要:** 为了实现三维曲面零部件的连续、高效加工, 提出了一种新型柔性成形方法——基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制, 该技术采用母线为弧线的刚性辊作为成形工具, 通过调整上、下轧辊之间的间距形成具有一定分布规律的压下量, 板料通过旋转的轧辊时沿轧制方向和宽度方向同时产生塑性变形, 从而实现连续的曲面成形。阐述了该成形方法的研究意义和基本原理, 开发了柔性轧制实验装置, 并进行了球形和马鞍形等不同形状的曲面件的成形实验, 得到了良好的成形件。通过实验验证了基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制成形过程的稳定性, 证明了仅使用一对轧辊即可获得多种不同曲率半径和不同形状的曲面件, 为进一步开展实用化研究奠定了基础。

**关键词:** 柔性轧制; 三维曲面; 连续成形; 减薄量; 纵向曲率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.025

**中图分类号:** TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0186-05

## Three-dimensional curved surface flexible rolling technology based on rigid arc-shaped rollers and its experimental study

Li Rui<sup>1</sup>, Wang Xintong<sup>2,3</sup>, Li Wenzhou<sup>1</sup>, Li Mingzhe<sup>2,3</sup>

(1. Changchun Ruiguang Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China;  
2. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;  
3. Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** In order to achieve continuous and efficient processing of three-dimensional (3D) curved surface parts, a new type of flexible forming method, namely 3D curved surface flexible rolling based on rigid arc-shaped rollers, was proposed, which adopted rigid rollers with arc busbars as the forming tools, and by adjusting the distance between upper and lower rollers to form the reduction with a certain distribution law, the sheet metal was plastically deformed simultaneously along the rolling and transverse directions when passing through the rotating rollers so as to realize the continuous curved surface forming. Then, the research significance and basic principles of this forming method were described, and a flexible rolling experimental device was developed. Besides, the forming tests of curved surface parts with different shapes such as spherical and saddle shapes were carried out, and the forming parts with good surface quality were obtained. The experimental results verify the stability of 3D curved surface flexible rolling process based on rigid arc-shaped rollers and prove that many curved surface parts with different curvature radii and shapes can be obtained only using a pair of rollers, which lays a foundation for further practical research.

**Key words:** flexible rolling; 3D curved surface; continuous forming; reduction amount; longitudinal curvature

三维曲面板类件的特点是流线造型好、承载能力强、质量轻, 被广泛应用于航空、造船、建筑等领域。三维曲面金属板料加工普遍采用模具成形, 传统的成形工艺有冲压和拉伸成形等, 具有加工精度高、生产效率高的优点。但是, 受固定形状模具的限制,

传统成形工艺仅适用于大批量加工, 无法适应现代制造业的小批量、多品种的生产需求。近年来, 针对个性化生产的需求<sup>[1]</sup>, 国内外学者与工程技术人员研究并开发了多种新型的曲面加工方法<sup>[2-4]</sup>。

本文提出了采用基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制技术来加工曲面件, 该技术采用母线为弧线的刚性辊作为加工工具, 能够实现被加工件的连续、高效成形。该技术因控制参数与变量少且易于控制, 在三维曲面产品的个性化需求背景下具备显著的优

收稿日期: 2021-09-24; 修订日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51275202, 50575090)

作者简介: 李 锐 (1987-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 1215939203@qq.com

势。本文介绍了该技术的研究意义和基本原理，并采用该技术进行了球形和马鞍形曲面件的成形实验，为基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制技术的实用化研究提供参考。

## 1 曲面柔性轧制方法的提出及研究意义

铝合金薄板的三维曲面件在建筑幕墙、飞机蒙皮等制造中应用广泛，而加工金属薄板曲面件时，采用最多的方法是使用实体模具进行冲压然后手工修形，在成形过程中容易产生皱纹，而且较难保证型面的精度，尤其是在新产品开发时，模具的调试周期长，不同型号产品的多种成形件需要制造很多套模具，显著增加了制造周期及费用。多点数字化成形方法的提出<sup>[5]</sup>与产业化，使得型面可调的一套模具便可代替大量实体模具，从而降低了模具的制造费用，但是多点模具的数控单元数量多、制造费用很高，严重影响了该技术的推广与应用进程。

另一个重要问题是加工效率。在限定时间内更高效地完成目标件的加工是当今先进制造业面临的一个普遍问题<sup>[6-7]</sup>。为顺应时代的发展，已出现了多种柔性滚压成形方法，均属于采用线成形技术加工三维曲面件的新方法，其中有使用 3 个工作辊的曲面柔性卷板<sup>[8]</sup>和使用两个工作辊的曲面柔性轧制<sup>[9]</sup>。

通过对柔性滚压成形的研究发现：（1）基于非均匀变形原理来成形三维曲面件是可行的；（2）使用直径更大或者弯曲半径更小的工作辊均可以有效抑制起皱缺陷；（3）若将被加工件沿横向的厚度减薄并设置为弧线分布，则可以用很少的工艺参数获得高质量的成形件。基于该思路，提出了一种新颖的柔性成形方法——基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制，其采用非均匀变形原理和刚性弧形辊的成形特点，可以使板料在轧制方向和垂直于轧制方向同时实现连续的塑性变形，获得曲面件<sup>[10]</sup>。

## 2 曲面柔性轧制装置

为了实现三维曲面板类件的连续成形，研制了基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制实验装置（图 1），设备结构主要由两个轧辊（1 个凸辊、1 个凹辊）、辊缝调整机构、导向机构、驱动机构和机架组成。上轧辊通过辊缝调整机构实现升降运动，该调整机构中的手轮每转动一圈，上轧辊沿竖直方向上移动 0.01 mm；轧辊的旋转通过驱动机构来实现，



图 1 基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制装置

Fig. 1 Device of 3D curved surface flexible rolling based on rigid arc-shaped rollers

驱动机构中包括齿轮变速机构，既能传递动力又可调整转速以达到所需的速度；导向机构可以保证板料在成形过程中的稳定咬入，防止摆动带来的成形误差<sup>[11]</sup>；机架主要起支撑和固定各种部件的作用。

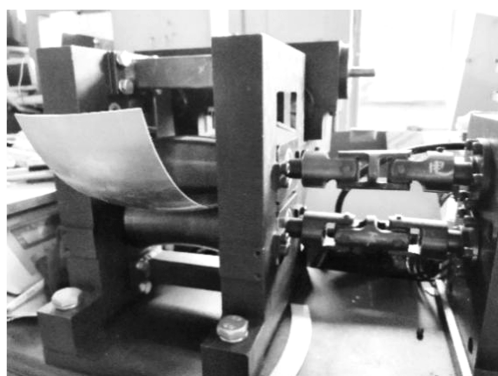
## 3 曲面柔性轧制的基本原理

基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制的原理为：使用母线为弧线的刚性辊代替传统轧机的圆柱形工作辊，通过调整上、下轧辊之间的间隙量来实现板料沿轧制方向的塑性变形，并在轧辊的弯曲作用下在垂直于轧制方向也发生了塑性变形。图 2 为采用基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制方法进行实际成形的照片和轧辊的照片。

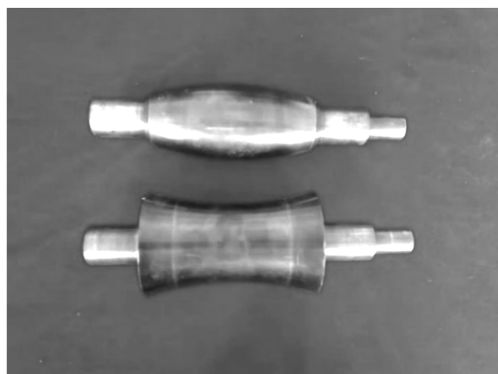
基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制装置的工作过程为：首先，根据板料尺寸转动手轮形成特定的压下量分布；然后，在电机的驱动下，通过齿轮机构使上、下两个轧辊同时转动，在入料端沿轧制方向施加水平力，使板料在摩擦力的作用下被卷入轧辊之间的辊缝，迫使板料产生沿轧制方向和垂直于轧制方向的连续变形。

图 3 为基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制方法成形球形曲面件的原理图。可以看出，凸辊和凹辊的母线半径和最大压下量的变化将导致辊缝分布的差异，即形成特定的压下量分布，这种非均匀分布的压下量会导致成形件在宽度方向的伸长量存在差异，从而使平板产生纵向与横向的塑性变形，最终成形为三维曲面件。成形球形曲面件时，在宽度方向中心区域的压下量大于板料左、右两个区域的压下量，而且压下量逐渐变化，即上、下轧辊之间的辊缝分布为中心小、左右两侧大。

图 4 为曲面成形过程的示意图，成形曲面可以



(a)



(b)

图 2 基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制现场  
照片 (a) 及轧辊 (b)

Fig. 2 Photographs of scene (a) and rollers (b) for 3D curved surface flexible rolling based on rigid arc-shaped rollers

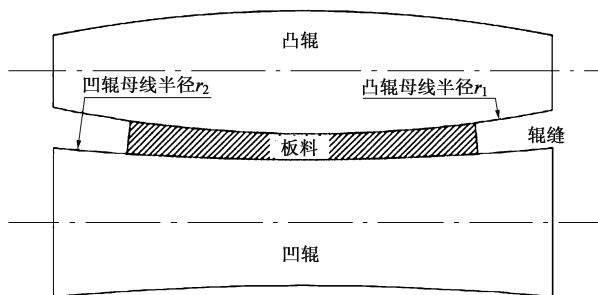


图 3 球形曲面件的变形原理

Fig. 3 Deformation principle of curved surface part with spherical shape

通过两条主要弧线 (弧线 A 和弧线 B) 来观察, 即通过研究工艺参数和这两条弧线的关系来探讨不同条件下的成形结果<sup>[12]</sup>。此外, 由于经常更换轧辊比较繁琐, 从实用化角度出发研究了仅使用一对轧辊时的成形结果, 结果证明仅使用一对轧辊完全可以获得很多不同曲率半径的曲面件。这是因为采用一对轧辊时, 仅改变上轧辊在竖直方向上的位移即可使压下量分布呈不同的变化规律, 从而通过影响板料在宽度方向上的伸长量来使板料发生不同程度的变

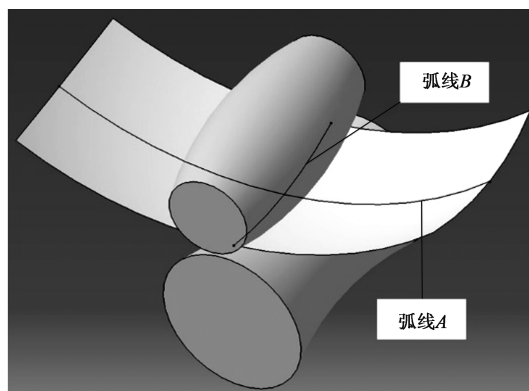


图 4 曲面成形过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of curved surface forming process

形。并且, 仅采用一对轧辊还可以实现包括马鞍形曲面、圆柱形曲面以及球面形曲面的成形结果。

## 4 曲面柔性轧制成形实验

### 4.1 减薄量对板料纵向弯曲的影响

采用自主研发的基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制实验装置, 实验原材料为 1060-O 铝合金板件, 板料的初始尺寸为厚度为 2.7 mm、宽度为 80 mm、长度为 250 mm, 在不同减薄量条件下进行了曲面柔性轧制成形实验。所使用的凸辊母线半径为 206 mm, 凹辊母线半径为 216 mm。

图 5 为在不同减薄量下曲面柔性轧制成形得到的实验件, 其中实验件①~实验件⑤对应的最大减薄量见表 1, 表 1 给出了测量得到的不同实验件凹面的纵向曲率半径。

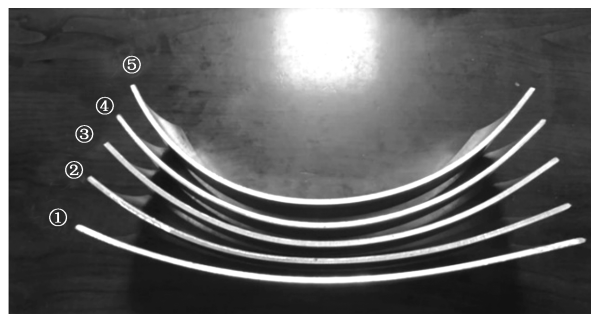


图 5 不同减薄量下曲面柔性轧制成形的实验件

Fig. 5 Test parts by curved surface flexible rolling with different reduction amounts

从表 1 中可以看出, 随着最大减薄量的增加, 实验件的纵向曲率半径变小, 即成形件的纵向曲率半径和最大减薄量呈负相关。实验件②和实验件①相比, 最大减薄量增加了 0.011 mm, 纵向曲率半径减少了 116.66 mm; 实验件③和实验件②相比,

表 1 不同减薄量下实验件的纵向曲率半径 (mm)

Table 1 Longitudinal curvature radii of test parts under different reduction amounts (mm)

实验件编号	最大减薄量	纵向曲率半径
①	0.027	321.96
②	0.038	205.30
③	0.052	168.27
④	0.068	141.68
⑤	0.087	123.93

最大减薄量增加了 0.014 mm，纵向曲率半径减少了 37.03 mm；实验件④和实验件③相比，最大减薄量增加了 0.016 mm，纵向曲率半径减少了 26.59 mm；实验件⑤和实验件④相比，最大减薄量增加了 0.019 mm，纵向曲率半径减少了 17.75 mm。纵向曲率半径的变化量是减薄量的数百倍甚至数千倍，说明实验件的纵向曲率半径对减薄量的变化非常敏感。实验结果证明了仅使用一对轧辊就可以得到多种不同变形量的成形件，而且纵向曲率半径的变化量很大，说明仅通过调整减薄量来获得不同曲率的曲面件是可行的。

图6为不同减薄量下曲面柔性轧制成形得到的

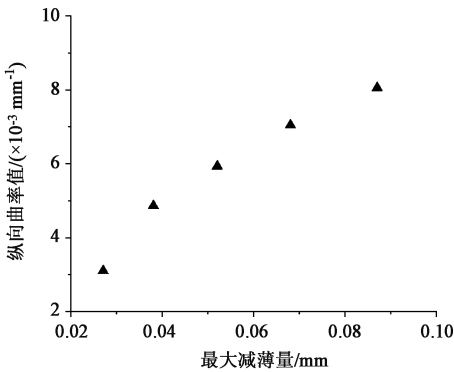


图 6 不同减薄量下实验件的纵向曲率值

Fig. 6 Longitudinal curvature values of test parts under different reduction amounts

实验件的纵向曲率值的变化情况。可以看出，实验件的纵向变形程度随着减薄量的增加而变大，并且仅需要很小的减薄量就可以实现从平板到较大变形量的三维曲面的成形。

4.2 实验结果

对不同厚度的 1060-O 铝合金板料进行了曲面柔性轧制成形实验，得到了多种不同曲率半径的曲面件。

图7a为板料厚度为 0.6 mm 的铝合金薄板在其

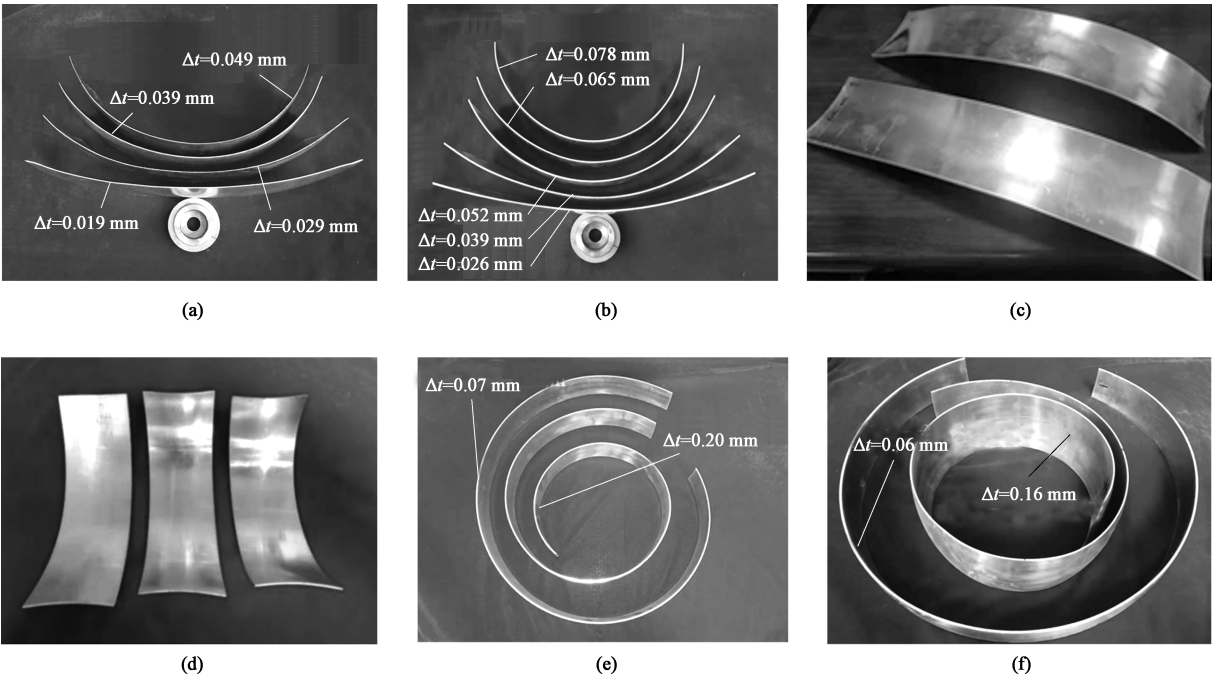


图 7 不同形状及尺寸的实验件

(a) 板料厚度为 0.6 mm 时的球形曲面件    (b) 板料厚度为 1.3 mm 时的球形曲面件    (c) 板料厚度为 2.4 mm 时的马鞍形曲面件  
(d) 板料厚度为 1.2 mm 时的马鞍形曲面件    (e) 板料厚度为 2.7 mm 时的球形曲面件    (f) 板料厚度为 1.7 和 2.7 mm 时的球形曲面件

Fig. 7 Test parts with different shapes and sizes

(a) Curved-surface parts with spherical shape under sheet thickness of 0.6 mm    (b) Curved-surface parts with spherical shape under sheet thickness of 1.3 mm  
(c) Curved-surface parts with saddle shape under sheet thickness of 2.4 mm    (d) Curved-surface parts with saddle shape under sheet thickness of 1.2 mm  
(e) Curved-surface parts with spherical shape under sheet thickness of 2.7 mm    (f) curved-surface parts with spherical shape under sheet thickness of 1.7 and 2.7 mm

他条件相同、最大减薄量  $\Delta t$  每增加 0.01 mm 时成形得到的球面形曲面件, 图 7b 为板料厚度为 1.3 mm 的铝合金薄板在其他条件相同、最大减薄量  $\Delta t$  每增加 0.013 mm 时成形得到的球面形曲面件。可以看出, 很小的减薄量的改变便可以产生明显的弯曲效果, 证明了此方法更加适用于薄板的弯曲成形。

图 7c 和图 7d 为马鞍形曲面件的成形结果。其中, 图 7c 中的两个马鞍形曲面件的板料尺寸为 330 mm×80 mm×2.4 mm, 最小压下量差仅为 0.02 mm; 图 7d 中马鞍形曲面件的板料尺寸为 210 mm×60 mm×1.2 mm。可以看出, 成形过程均未产生皱纹缺陷, 成形件表面质量良好。

图 7e 和图 7f 为板料长宽比很大的球面形曲面件。其中, 图 7e 中板料的厚度为 2.7 mm、宽度为 60 mm、长度为 1260 mm, 最大减薄量分别为 0.20 和 0.07 mm; 图 7f 中板料的宽度分别为 100 和 60 mm, 板料厚度分别为 1.7 和 2.7 mm, 最大减薄量分别为 0.16 和 0.06 mm。可以看出, 成形件表面未起皱, 说明长板的成形过程是稳定的。

## 5 结语

基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制方法是一种新型的曲面板类件成形方法, 这种方法适用于成形多种形状的三维曲面零件。由于属于连续成形方法, 其加工效率非常高。本文叙述了此方法的提出及研究意义, 描述了自主研制设备的结构, 并通过成形实验验证了基于刚性弧形辊的三维曲面柔性轧制方法成形过程的稳定性, 所得到的成形件没有起皱缺陷、表面质量良好。验证了采用此方法仅使用一对轧辊完全可以获得很多不同曲率半径的曲面件, 同样可以获得球面形、马鞍形等不同形状的曲面件。

### 参考文献:

- [1] 岳太文, 陈晓辉, 门正兴, 等. 6061 铝合金板数控单点渐进温成形工艺多目标优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 59-64.  
Yue T W, Chen X H, Men Z X, et al. Mult-objective optimization on NC single point incremental warm forming process for 6061 aluminum alloy sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 59-64.
- [2] 程艳艳, 王鑫, 刘祥玲, 等. 梯形轮廓曲面件多夹钳拉形的成形力研究 [J]. 锻压技术, 2021, 47 (7): 95-99.  
Cheng Y Y, Wang X, Liu X L, et al. Research on forming force

- of multi-gripper stretch forming for trapezoidal profile curved part [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 47 (7): 95-99.
- [3] Yoon S J, Yang D Y. An incremental roll forming process for manufacturing doubly curved sheets from general quadrilateral sheet blanks with enhanced process features [J]. CIRP Annals, 2005, 54 (1): 221-224.
- [4] Shim D S, Yang D Y, Kim K H, et al. Numerical and experimental investigation into cold incremental rolling of doubly curved plates for process design of a new LARS (Line array roll set) rolling process [J]. CIRP Annals, 2009, 58 (1): 239-242.
- [5] Li M Z, Nakamura K, Watanabe S, et al. Study of the basic principles (1st report: Research on multi-point forming for sheet metal) [A]. Proceedings of the Japanese Spring Conference for Technology of Plasticity [C]. Japan, 1992.
- [6] 于华民, 董方, 吴运新, 等. 大型铝合金 C 形截面环轧制过程数值模拟和轧制区成形规律分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 197-206.  
Yu H M, Dong F, Wu Y X, et al. Numerical simulation on rolling process and analysis on rolling zone forming law for large aluminum alloy C-shaped cross-section ring [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 197-206.
- [7] 杜忠民, 肖凡, 刘维, 等. 船用双曲率板件冷压成形回弹模拟与试验 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 34-38.  
Du Z M, Xiao F, Liu W, et al. Simulation and experiment on springback for cold stamping of marine double-curvature plate part [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 34-38.
- [8] 李明哲, 胡志清, 蔡中义, 等. 自由曲面工件的连续高效塑性成形方法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37 (3): 489-494.  
Li M Z, Hu Z Q, Cai Z Y, et al. Method of efficient continuous plastic forming for freeform surface part [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37 (3): 489-494.
- [9] 李明哲, 蔡中义, 李任君, 等. 基于弯曲辊轧制的曲面零件连续成形方法 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (14): 44-49.  
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.
- [10] Wang X T, Li M Z. Research on three-dimensional curved surface rolling based on rigid arc-shaped rollers [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107 (1): 805-814.
- [11] Chang X, Fu W Z, Li M Z, et al. The flexible rolling process of three-dimensional curved parts using an auxiliary plate based on rigid arc-shaped rollers [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116: 1103-1113.
- [12] Wang X T, Li M Z, Chang X. Influence of thickness reduction on the forming results in the three-dimensional surface rolling process with rigid arc-shaped rollers [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114 (7): 2397-2405.