

文章编号 1004-924X(2012)01-0117-07

基于多点调形原理的旋转曲面连续成形

龚学鹏^{1*}, 李明哲², 卢启鹏¹, 彭忠琦¹

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2 吉林大学 无模成形技术中心, 吉林 长春 130022)

摘要:提出采用连续多点成形方法来实现旋转曲面件的高效、柔性成形。阐述了连续多点成形原理,并与传统的旋转曲面加工方法相对比,分析其所具备的特点。以盘形件为研究对象,建立有限元模型,分析成形过程中的等效应力和塑性应变场分布,通过模拟结果和主应变状态来分析皱曲现象。最后,研制相应的成形装置并进行了实验。结果表明:定心装置和柔性辊作用区的等效应力超过了材料的屈服极限,最大值达到 213 MPa;成形件中心区域塑性应变值最大,达到 0.07;柔性辊作用区塑性应变值次之,为 0.03;皱曲区域的壳单元产生的是切向压缩变形,实验结果和模拟结果基本相同,都介于 605~615 mm。应力应变场和皱曲的模拟结果与实际情况吻合,表明成形装置能加工出效果良好的旋转曲面件。

关键词:柔性加工;连续成形;多点成形;数值分析;旋转曲面

中图分类号: TG306 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0117

Continuous forming for rotary surface based on multi-point adjusting principle

GONG Xue-peng^{1*}, LI Ming-zhe², LU Qi-peng¹, PENG Zhong-qi¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: gongxuepeng 120@yahoo.com.cn

Abstract: A Continuous Multi-point Forming (CMPF) method was researched to realize high efficiency and flexible manufacturing for rotary surfaces. The principle of CMPF was described and its characteristics were analyzed by comparing with the traditional rotary surface manufacturing method. By taking a disc-shape surface for an example, the Finite Element Model (FEA) was established, and equivalent stress and plastic strain distributions were analyzed. By simulation results and principal strain vectors, the wrinkling was discussed. Finally, the CMPF equipment was developed, and experiments were performed. Results indicate that the equivalent stresses in the region of center fixing and a flexible roller exceed the yield stress, and their maximum value is 213 MPa; the maximum plastic strain is generated in the center region, and its value is 0.07; the plastic strain in the region of flexible

收稿日期: 2010-10-27; 修订日期: 2011-01-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA04Z117); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50575090)

roller takes the second place, and its value is 0.03. Furthermore, shell elements in the wrinkling region generate the compress deformation in a tangent direction in 605—615 mm which accord with the simulation results. It concludes that the simulation results of stress field, strain field and wrinkling are in good agreement with practical situations and the CMPF equipment can manufacture good rotary surfaces.

Key words: flexible manufacturing; continuous forming; multi-point forming; numerical analysis; rotary surface

1 引言

多点成形是一种三维曲面成形的柔性加工方法,其基本思想是将传统的整体模具离散化,形成由一系列精密排列、高度可调的基本体组成的“可重构多点模具”,通过“可重构多点模具”来实现三维曲面的成形^[1]。实现精密排列的基本体上下调整技术就是多点调形技术,其作用是调整每一个基本体的高度,从而使基本体群形成所需要的包络面,进而实现板类件的柔性加工。多点成形技术最早出现在日本,1959年,日本东京大学的中岛尚正完成了利用金属丝制造曲面模具简易装置的制作^[2];1973年,西冈富仁雄等人试制了多点式压力机,并对其自动化做了大量的研究工作^[3-4];1990年以后,东京工业大学的井关日出男和东京大学的野本也对多点成形技术做出了比较深入的研究^[5]。除日本外,美国麻省理工学院 David. E. Hardt 等人以及韩国生产技术研究所也对多点成形做了长期的研究^[6-7]。目前,多点成形技术在国内已经实现商品化,应用在飞行器的蒙皮成形、人脑颅骨修复体的精密成形、高速列车流线型车头覆盖件成形以及潜艇外壳的成形等领域^[8-10],并向着精密化、大型化和连续化的趋势发展,该技术最新的研究进展是与连续成形相结合,形成连续多点成形技术^[11-12]。

旋转曲面工件广泛应用于航空航天、化工、机械、汽车等行业,在科研和工业生产中占有重要的地位。传统的旋转曲面加工方法一般采用旋轮来实现工件的成形,在加工过程中,旋轮与工件的接触面积较小,一般可以认为是点接触形式^[12];通过这种点接触的加工方式逐渐实现坯料变形的积累,从而加工出所需要的形状。通过点接触的方法加工旋转曲面件时,其效率较低,尤其是当工件的几何尺寸很大时,效率低的缺点更为突出;而如

果没有模具的支撑,点接触成形方法的加工精度也较低。为了提高旋转曲面件成形的效率,最好的方法是提高成形区域的面积,将旋轮与工件之间的点接触形式变为线接触形式。为了实现这一想法,本文将旋辊用轴向具有一定长度的可弯曲的柔性辊代替,并结合多点成形技术,从而形成了一种新型的旋转曲面加工方法。

2 旋转曲面连续多点成形方法及特点

采用可弯曲的柔性辊作为成形工具,并结合多点成形技术来实现板材连续成形的方法就是连续多点成形;运用此技术来实现工件的回转运动,就可以实现旋转曲面的成形,如图 1 所示。具体的加工过程如下:首先,柔性辊通过调形单元调节出所需要的曲率;其次,通过定心装置夹紧固定成形件并调整成形件与柔性辊的相对位置;再次,给予上柔性辊一定的压下量;最后,驱动柔性辊转动,从而带动成形件和定心装置一起旋转,实现成形。

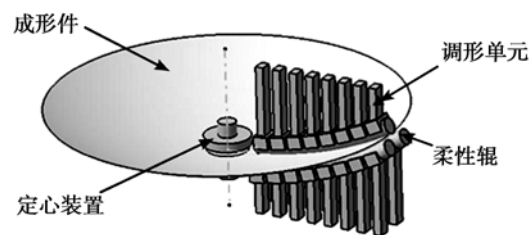
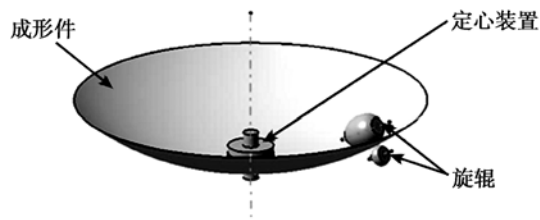


图 1 旋转曲面连续多点成形原理

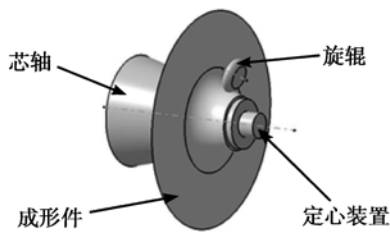
Fig. 1 Principle of rotary surface formed by continuous multi-point forming

传统的旋转曲面加工方法如图 2 所示,图 2(a)是没有芯轴的形式,图 2(b)是有芯轴的形式。这两种形式都是通过旋辊与成形件之间的作用力来实现成形件的加工的,旋辊与成形件的接触面积很小,可以认为是点接触。传统旋转曲面加工

方法的成形轨迹如图 3 所示,采用连续多点成形加工旋转曲面的成形轨迹如图 4 所示。可以看出,传统方法的成形区是旋辊的作用区,连续多点成形的成形区是柔性辊的作用区,后者是前者的数倍甚至数十倍。采用传统方法时,成形区是一个点区域,这一点区域沿着一定的轨迹逐渐积累,最后形成所要的零件;采用连续多点成形时,成形区是一条线区域,这一线区域沿着一定的轨迹逐渐积累,最后形成所要的零件。由于成形区域面积的增加,成形件的变形会更加均匀,成形效果和效率也会提高。调整柔性辊的曲率就可以加工不同形状的零件,因此,连续多点成形在增加成形区域的同时并没有改变其柔性加工的特点。



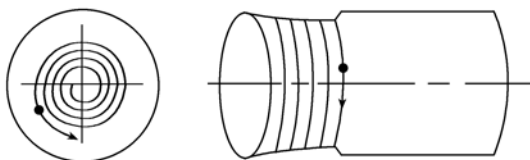
(a) 无芯轴形式
(a) Without center die



(b) 有芯轴形式
(b) With center die

图 2 传统的旋转曲面加工方法示意图

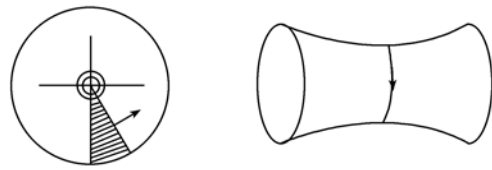
Fig. 2 Schematic diagram of conventional forming method for rotary surface



(a) 盘形件 (b) 筒形件
(a) Disc-shaped surface (b) Tubelike shaped surface

图 3 传统加工方法的成形轨迹示意图

Fig. 3 Forming track of conventional manufacturing



(a) 盘形件 (b) 筒形件
(a) Disc-shaped surface (b) Tubelike shaped surface

图 4 连续多点成形的成形轨迹示意图

Fig. 4 Forming track of continuous multi-point forming

3 成形过程的数值分析

3.1 有限元模型的建立

盘形件是最基本,也是最典型的旋转曲面件。为了深入地研究连续多点成形加工旋转曲面的过程,需要进行数值分析。ANSYS/LS-DYNA 由于其强大的功能,被应用于很多领域^[13-15],因此,采用该软件进行分析。

在模拟中采用一组与实际情况一致的柔性辊。材料采用 08Al 钢板,其材料属性见表 1,工艺参数见表 2。柔性辊的运动由位移和转速来控制,由压力来控制定心装置夹紧成形件。有限元模型如图 5 所示。

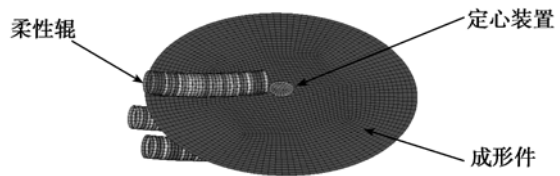


图 5 盘形件有限元模型

Fig. 5 Finite element analysis model of disc-shape surface

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性 模量 E/GPa	泊松 比 μ	屈服 极限 σ_s/MPa	切线 模量 $/\text{MPa}$	各向 硬化 系数 r
08Al	7 845	207	0.29	207	20.2	1.41

表 2 几何参数

Tab. 2 Technical parameters

柔性辊 曲率半 径/mm	柔性辊 直径 /mm	下柔性 辊间距 /mm	工件 直径 /mm	工件 厚度 /mm	上辊压 下量 /mm	压力 /kN
600	17	41	280	0.5, 2	0.5	1.7

3.2 应力应变场的分析

仅仅通过实验不容易获得工件成形过程中内部应力和应变的变化规律,所以,需要通过有限元的手段进行研究。这里以厚度为 2 mm 的工件为研究对象进行分析。

图 6(a)和 6(b)是成形开始时的等效应力场和塑性应变场。定心装置和柔性辊作用区的等效应力都超过了屈服极限,最大值到达了 213 MPa;其他区域等效应力都基本处于屈服极限以下。其原因为,定心装置需要提供较大的压力才能防止工件在旋转过程中发生蹿动;在柔性辊的作用区,成形件产生局部塑性成形;其他区域处于自由状态,没有受到外界的任何载荷,但这些区域的等效应力值要受到定心装置作用区和柔性辊作用区的影响,一般不会超过屈服极限。工件中心区域塑性应变值最大,达到 0.07;柔性辊作用区的塑性应变值次之,达到 0.03;其它大部分区域基本没有产生塑性变形。其原因为:成形件中间区域和柔性辊作用区域的等效应力超过了材料的屈服极限,而其它区域的等效应力在屈服极限以下。中间区域和柔性辊作用区域的塑性变形机理不同,前者是在定心装置压力作用下产生的厚度方向的压缩变形,后者是在柔性辊作用下产生的弯曲变形。柔性辊对成形件的单位作用力小于定心装置对成形件的单位作用力,故中间区域的塑性应变值高于柔性辊作用区域。

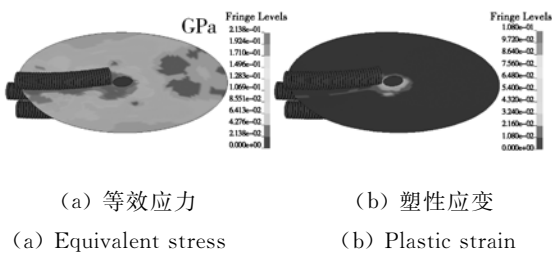


图 6 成形开始时的应力应变场分布

Fig. 6 Stress and strain fields in beginning of forming process

图 7(a)和 7(b)是旋转半周的等效应力场和塑性应变场。从图 7(a)中可以看出,等效应力的分布情况与图 6(a)类似,其原因为:当成形件经过柔性辊作用区域时,等效应力高于屈服极限,当其离开柔性辊作用区后应力得到释放,等效应力变小。从图 7(b)中可以看出,成形件有一半的区

域产生了塑性变形,另一半区域的塑性应变还基本等于零。其原因为:经过了柔性辊的作用区后,塑性变形保留了下来,没有经过柔性辊的作用区,故没有产生塑性变形。

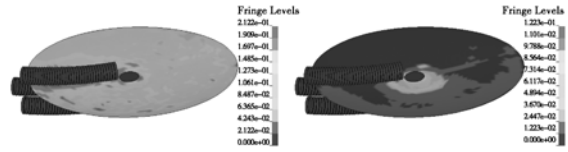


图 7 旋转半周时应力应变场分布

Fig. 7 Stress and strain fields at half circuit of forming process

图 8(a)和 8(b)是旋转一周的等效应力场和塑性应变场。图 8(a)与图 6(a)和图 7(a)的情况类似。从图 8(b)中,可以看出成形件旋转一周后各个部分基本都产生了塑性变形,盘形件的轮廓也基本成形。

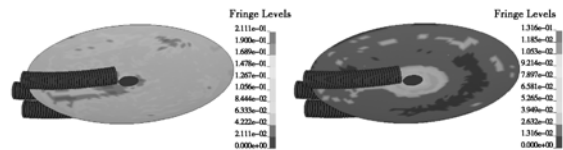


图 8 旋转一周时应力应变场分布

Fig. 8 Stress and strain fields at one circuit of forming process

3.3 成形缺陷的分析

在盘形件的连续多点成形过程中,最主要的成形缺陷是起皱,它严重影响工件的成形质量。从力学的角度来看,是由于切向压应力使板厚方向达到了塑性失稳的极限;从能量的角度来看,起皱的临界状态应该是切向压应力所释放的能量等于起皱所需要的能量;从成形工艺来看,厚向所施加的约束条件越弱,越容易产生皱曲。

图 9 为 0.5 mm 厚的成形件起皱的典型模拟结果。可以看出,皱曲主要产生在成形件的最边缘,其它大部分区域处于未完全变形区域。从模拟结果的主应变状态(如图 10 所示)可以得出不同区域壳单元中面的变形状态。由不同区域提取的壳单元来分析,主应变的大小为 $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$,在

起皱的区域,3 个主应变分布为: $\epsilon_1 > 0$, 沿壳中面的法线方向; $\epsilon_2 < 0$, 沿壳中面的切线方向; $\epsilon_3 < 0$, 沿壳中面的切线方向,并垂直于 ϵ_2 的方向。在这种应变状态下,壳单元主要发生切向压缩变形,当切向压应力达到起皱临界应力就会产生起皱现象。在未完全变形区,3 个主应变分布为: $\epsilon_1 > 0$, 沿壳中面的切线方向; $\epsilon_2 > 0$, 沿壳中面的切线方向,并垂直于 ϵ_1 的方向; $\epsilon_3 < 0$, 沿壳中面的法线方向。在这种应变状态下,壳单元主要沿 ϵ_1 和 ϵ_2 方向产生拉伸变形,故不会发生切向压缩失稳。

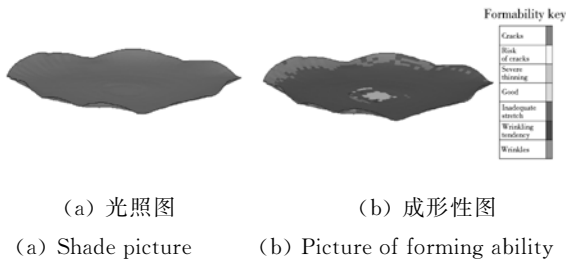


图 9 盘形件起皱的模拟结果

Fig. 9 Wrinkle simulation results of disc-shape surface

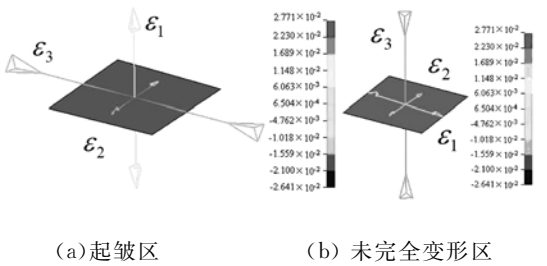


图 10 壳单元中面主应变向量模拟结果

Fig. 10 Simulation results of principal strain vectors of shell element middle

4 成形装置及实验结果

通过原理和数值分析后,研制出了加工旋转曲面件的连续多点成形装置,如图 11 所示,其主要由下压机构、调整机构、定心机构和柔性辊组成。采用此装置加工 $\Phi 280 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的 08Al 盘形件,图 12 为旋转多次的实验结果,经过一周左右的滚压,皱曲基本消失。实验结果的形状特点以及变形趋势基本与模拟结果保持一致。采用 3 点测量平均曲率的方法来测量实验结果的平均曲率,模拟结果的平均曲率通过其后处理器的 3 点

测量功能来测量。测量点和测量线如图 13 所示,每条测量线有 14 个测量点,首先测量每个测量点处的曲率,然后取平均值从而获得每条测量线的平均曲率,实验值与模拟值的对比结果如图 14 所示。无论是实验值还是模拟值,各个测量线平均曲率半径的波动是比较大的,介于 $590 \sim 630 \text{ mm}$ 。将实验数据和模拟数据分别进行拟合,可以看出它们的拟合结果基本相同,都介于 $605 \sim 615 \text{ mm}$,这与柔性辊曲率半径为 600 mm 的工艺参数基本吻合。

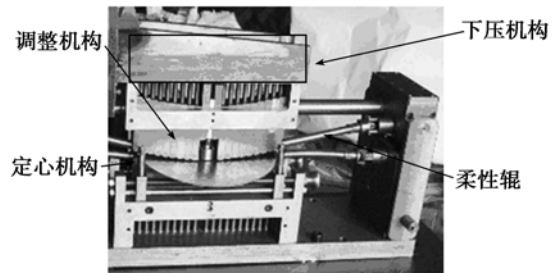


图 11 连续多点成形装置

Fig. 11 Continuous multi-point forming device

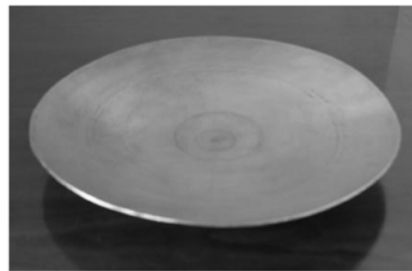


图 12 盘形件的实验结果

Fig. 12 Experimental result of disc-shape surface

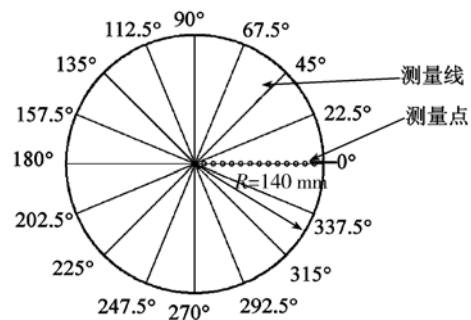


图 13 实验件和模拟件的测量线和测量点

Fig. 13 Measuring lines and measuring points of experimental and simulation workpieces

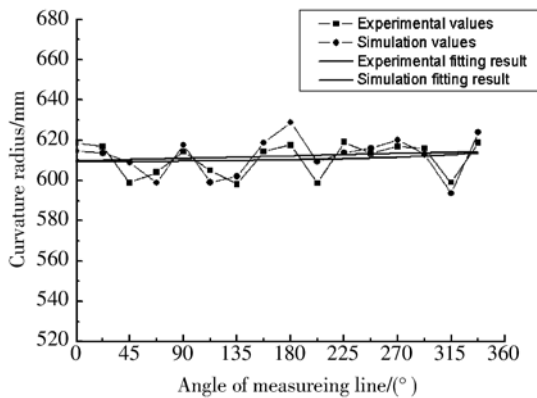


图 14 实验结果与模拟结果的平均曲率半径对比

Fig. 14 Comparison of average curvature radii between experimental and simulation results

5 结 论

本文阐述了连续多点成形的方法及特点,指

出了线成形方式代替点成形方式的优越性,即成形面积增大、成形效率高以及成形效果好。分析了盘形件成形过程中的应力应变场分布,指出定心装置和柔性辊作用区的等效应力超过了材料的屈服极限,最大值达到 213 MPa;成形件中心区域塑性应变值最大,达到 0.07,柔性辊作用区塑性应变值次之,达到 0.03;成形件中心区和柔性辊作用区的变形机理不同,前者为厚向压缩变形,后者为双向弯曲变形。分析了盘形件成形过程中的起皱缺陷,指出起皱区域的壳单元产生的是切向压缩变形,当切向压应力达到起皱临界应力时,便会产生皱曲。最后,研制出相应的成形装置并进行了实验,实验结果和模拟结果的拟合值基本相同,曲率半径介于 605~615 mm,这与相应的工艺参数基本吻合。通过模拟和实验结果可知,连续多点成形是一种连续、高效的成形方法。

参考文献:

- [1] LI M Z, LIU Y H. Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3D surface sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87: 277-280.
- [2] 中島尚正. 针金束を用いた金型・电极の研究 [J]. *日本機械学会志*, 1969, 603 (72): 32-40.
N NAKAJIMA. Research on die and electrode by steel wire bind [J]. *Japanese Journal of Mechanical Academy*, 1969, 603(72): 32-40. (in Japanese)
- [3] 西岡富仁雄等. ユニバサル多点プレス法による船体外板曲げ作業の自動化に関する研究(第一報 基礎的研究) [J]. *日本造船学会论文集*, 1972, 132: 481-501.
NISHIOKA F. An automatic bending of plates by the universal press with multiple piston heads (first report: basic research) [J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1972, 132: 481-501. (in Japanese)
- [4] 西岡富仁雄. ユニバサル多点プレス法による船体外板曲げ作業の自動化に関する研究(第二報 実用化研究) [J]. *日本造船学会论文集*, 1973, 133: 291-305.
NISHIOKA F. An automatic bending of plates by the universal press with multiple piston heads (second report: practicality research) [J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1973, 133: 291-305. (in Japanese)
- [5] 井关日出男. 由柔性工具进行局部成形的方法 [C]. *日本第 42 回塑性加工联合讲演会论文集*, 1991: 265-266.
HIDEO I. Local forming method by using flexible tools [C]. *Proceedings of 42nd Plastic Manufacturing Lectures*, 1991: 265-266. (in Japanese)
- [6] WEBB R D, HARDT D E. A transfer function description of sheet metal forming for process control [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1991, 113: 44-52.
- [7] WALCZYK D F, HARDT D E. Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming [J]. *Journal of Manufacturing System*, 1998, 17(6): 436-454.
- [8] LI M ZH, LIU Y H. Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3D surface sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87: 277-280.
- [9] LI M ZH, LIU CH G, CHEN Q M. Research on multi-point forming of three-dimensional sheet metal parts [C]. *Sixth International Conference on Technology of Plasticity, Nuremberg, Germany*, 1999, 1: 189-194.

- [10] CAI ZH Y, LI M ZH. Optimum path forming technique for sheet metal and its realization in multi-point forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 110: 136-141.
- [11] HU ZH Q, LI M ZH, CAI ZH Y, *et al.*. Continuous flexible forming of three-dimensional surface parts using bendable rollers[J]. *Int. J. Materials Science and Engineering A*, 2009, 499: 234-237.
- [12] 李明哲, 胡志清, 蔡中义, *et al.*. 自由曲面工件多点连续成形方法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(12): 155-159.
- LI M ZH, HU ZH Q, CAI ZH Y, *et al.*. Method of multipoint continuous forming for the freeform surface parts[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(12): 155-159. (in Chinese)
- [13] 吴坤, 薛松, 卢启鹏, 等. SX-700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 45-50. (in Chinese)
- WU K, XUE S, LU Q P, *et al.*. Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 45-50. (in Chinese)
- [14] 王续跃, 胡亚峰, 许卫星, 等. 基于吸收系数修正的硅片激光弯曲模拟与实验[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1928-1935.
- WANG X Y, HU Y F, XU W X, *et al.*. Modification of silicon absorbing coefficient in laser bending experiment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1928-1935. (in Chinese)
- [15] 谢娜, 周海, 张军伟, 等. 大型激光装置光学元件的稳定性设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2411-2417.
- XIE N, ZHOU H, ZHANG J W, *et al.*. Stability of optical elements in large laser facilities[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2411-2417.

作者简介:



龚学鹏(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士,助理研究员,2009年于吉林大学获得博士学位,研究方向为连续多点成形设备设计、精密机械设计与工程 CAE 分析。E-mail: gongxuepeng120@yahoo.com.cn



卢启鹏(1964—),男,黑龙江齐齐哈尔人,研究员,博士生导师,主要从事同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: luqp@ciomp.ac.cn



李明哲(1951—),男,吉林图们人,教授,博士生导师,研究方向为多点成形装备设计、无模成形及数字化制造。E-mail: limz@jlu.edu.cn



彭忠琦(1957—),男,吉林榆树人,高级工程师,主要从事精密机械设计方面的研究。E-mail: pengzhongqi@126.com