

DOI: 10.7652/xjtuxb201401014

柔性压辊拉形中压辊下压位移量的数值解析

李永丰, 付文智, 李明哲

(吉林大学无模成形技术开发中心, 130025, 长春)

摘要: 利用柔性压辊拉形的几何关系, 得出了使板料完全贴模时压辊的最小下压量及其所对应的板料最小延伸率, 并根据不同截面上板料在拉伸方向延伸率相等的原则, 建立了压辊最大下压量与延伸率的关系。采用位移加载对 08AL 马鞍形件和球面件的成形过程进行了数值模拟, 并与力加载的成形结果进行了对比, 结果表明: 位移加载成形曲面件的等效应力和等效塑性应变分布更均匀, 成形质量更稳定。利用柔性压辊拉形装置拉伸成形了马鞍形件和球面件, 结果表明, 采用数值计算所得的压辊下压位移量进行加载是可行的。与力加载相比, 压辊下压位移量的数值求解方法可快速计算出对应于不同延伸率时各个压辊加载所需的下压位移量, 节省了加载力的调试时间, 可应用于柔性压辊拉形工艺参数的调试。

关键词: 板料; 拉形; 位移加载; 数值模拟

中图分类号: TG386.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0084-06

Numerical Solution of Press Amount of Roller in Flexible Roller Stretch Forming

LI Yongfeng, FU Wenzhi, LI Mingzhe

(Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Utilizing the geometrical relationship of flexible roller stretch forming, the minimum press amount of roller and the corresponding minimum sheet elongation were calculated in the case of completer sheet-die joint. Noting that the elongations of a sheet in stretching direction are equal in different cross sections, the relationship of the maximum press amount and elongation was established. The forming processes of 08AL saddle-shaped and spherical parts were simulated by displacement loading method, and the result was compared with the analytical result of the force loading. It reveals that the distributions of both the equivalent stress and equivalent plastic strain of the curvature parts obtained by the displacement loading method are more uniform, and the forming quality more stable. The saddle-shaped and spherical parts were formed by a flexible roller stretch forming device, and the experiment shows that the numerical solution to displacement loading is feasible. The required displacement of each roller corresponding to different elongations can be quickly calculated with shorter force load debugging period. The proposed method could be applied to debugging the parameters of flexible roller stretch forming process.

Keywords: sheet metal; stretch forming; displacement loading; numerical simulation

收稿日期: 2013-04-16。 作者简介: 李永丰(1987—), 男, 硕士生; 付文智(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 欧盟第六框架协议计划国际合作项目(ASTS-CT-2006-030877)。

网络出版时间: 2013-10-22

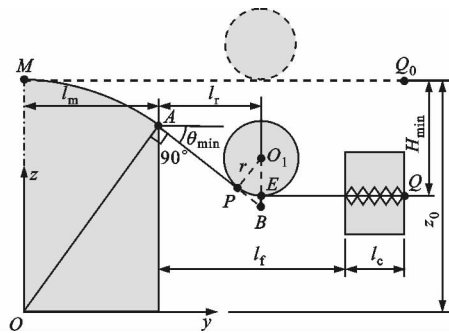
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131022.1113.004.html>

拉伸成形工艺是飞机气动外形关键零件的主要成形方式。传统拉形工艺是依靠拉形机工作台顶升和夹钳的拉伸包覆运动使坯料贴合到模具表面,得到最终的零件形状^[1-3]。传统拉形机采用整体式夹钳,在成形双向曲率均较大的双曲面曲面件时,板料极易产生应力集中而影响零件的加工质量^[4-5]。此外,传统拉形的加载控制方法相对较复杂,需要经过多次反复试拉来确定最优加载轨迹,较多地依赖实际生产经验,成形质量不稳定^[6-7]。吉林大学设计开发了柔性压辊拉形实验装置,该装置采用控制力的加载方式,具有结构简单、成本低廉、操作方便等特点^[8-9]。柔性压辊拉形装置主要由柔性夹持机构、柔性压辊机构、控制系统和机架等几部分组成,成形开始时由柔性夹持机构将板料固定,随后离散的压辊沿垂直于板料平面的方向向下压板料,使板料逐渐贴模而得到成形件。成形过程中对每个压辊施加合适的下压力,可使得板料在各个压辊停止位置的拉伸量基本相等,变形均匀。

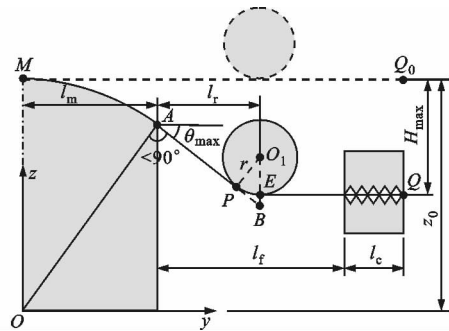
数值模拟中一般采用位移加载方式来代替实际工程中的力加载方式,因为采用位移加载时不必通过反复迭代来找到每个时间步上的位移解,因此位移加载容易收敛^[10],可以得到比较精确的计算结果,但确定合适的位移加载路径是比较复杂的。本文利用拉形过程的几何关系,解析出了拉形过程中板料完全贴模时压辊的临界位置和板料的最小延伸率,并建立了成形零件时各个压辊的最大下压力与板料延伸率的关系,通过此关系可以求解柔性压辊拉形装置各个液压缸的位移,即数值模拟时各个压辊的位移加载路径,并应用这种关系成形了马鞍形件和球面件。通过数值模拟和实验验证,表明位移加载成形零件的质量比力加载成形零件的质量好,从而证明了位移加载的合理性,对柔性压辊拉形工艺有一定的指导意义。

1 柔性压辊拉形的几何关系模型

为了从理论上解析出压辊下压力与延伸率的关系,做如下合理假设:①由于板料很薄,计算各参数时可忽略板料厚度;②由于采用浮动夹钳,可忽略油缸的摩擦和惯性力的作用,认为图 1 中的 EQ 线为水平直线。图 1 是在任意截面 $\gamma(x=x_i)$ 上截得的柔性压辊拉形的几何示意图,初始时刻板料长度为 $MQ_0=L_0$ 。图中 l_m 为 $1/2$ 模具长度, l_r 为压辊与模具之间的距离, r 为压辊半径, l_f 为悬空段长度, l_c 为夹持区长度,这些均为设备的工艺参数。



(a) 压辊最小下压力(完全贴模)



(b) 压辊最大下压力

图 1 柔性压辊拉形几何示意图

1.1 压辊最小下压力

为不失一般性,对于任意模具,设模具表面为 S ,其方程为 $F(x,y,z)=0$,垂直于 x 轴的平面 $\gamma(x=x_i)$ 截模面 S ,得曲线 AM 的方程 $z=\phi(x_i,y)$,点 A 的纵坐标 $z=\phi(x_i,l_m)$ 。如图 1a 所示,与曲线 AM 相切于 A 点的直线 AB 的斜率为

$$k_{AB} = k_A = \left. \frac{d\phi(x_i,y)}{dy} \right|_{y=l_m} = K(x_i,l_m) = -\tan\theta_{\min} \quad (1)$$

又 $-\tan\theta_{\min} = \frac{\phi(x_i,l_m) - z_B}{-l_r} = K(x_i,l_m)$,所以

$$z_B = \phi(x_i,l_m) + l_r K(x_i,l_m) \quad (2)$$

由几何关系可得

$$z_E = z_B + r((1 + K^2(x_i,l_m))^{1/2} - 1) \quad (3)$$

把式(2)带入式(3)中可得

$$z_E = \phi(x_i,l_m) + l_r K(x_i,l_m) + r((1 + K^2(x_i,l_m))^{1/2} - 1) \quad (4)$$

由图 1a 中的几何关系可知,压辊的最小下压力 $H_{\min} = z_0 - z_E$,其中 z_0 为模具顶点到模具底面的距离。即使板料完全贴模,压辊的下压力 H 也始终不小于 $H_{\min}$ 。

1.2 压辊最大下压力与板料延伸率的关系

板料完全贴模后压辊继续下压,则 A 点不是直线 AB 与曲线 AM 的切点,如图 1b 所示,此时切线

公式(1)不可用,可设 B 点的纵坐标为 z_B 。 A 点的纵坐标

$$z_A = \phi(x_i, l_m) \quad (5)$$

直线 AB 的斜率

$$k_{AB} = \frac{z_A - z_B}{-l_r} = -\tan\theta_{\max} \quad (6)$$

把式(5)带入式(6)得

$$z_B = \phi(x_i, l_m) - l_r \tan\theta_{\max} \quad (7)$$

把式(7)带入式(3)得

$$z_E = \phi(x_i, l_m) - l_r \tan\theta_{\max} + r((1 + \tan^2\theta_{\max})^{1/2} - 1) \quad (8)$$

AM 的长度

$$l_{AM} = \int_0^{l_m} [1 + \phi'^2(x_i, y)] dy \quad (9)$$

AP 的长度

$$l_{AP} = l_r(1 + \tan^2\theta_{\max})^{1/2} - r \tan\theta_{\max} \quad (10)$$

圆弧 PE 的长度

$$l_{\widehat{PE}} = r\theta_{\max} = r \arctan\left(\frac{z_A - z_B}{l_r}\right) \quad (11)$$

板料拉伸后截面截得的总长

$$L_i = l_{AM} + l_{AP} + l_{\widehat{PE}} + l_f - l_r + l_c \quad (12)$$

延伸率 $\delta = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100\%$, 即 $L_i = L_0 + \delta L_0$, 拉

伸方向的变形均匀一致, 即 δ 为定常数。 $l_{EQ} = l_f - l_r + l_c$ 为压辊与板料切点 E 到板料末端的长度, 变化很小, 可认为是常数。把 $L_i = L_0 + \delta L_0$ 带入式(12), 可得

$$l_{AE} = L_0 + \delta L_0 - l_{AM} - l_{EQ} = L_0 + \delta L_0 - l_{AM} + l_r - l_f - l_c \quad (13)$$

联合式(10)和(11)可得

$$l_{AE} = l_r(1 + \tan^2\theta_{\max})^{1/2} - r \tan\theta_{\max} + r\theta_{\max} \quad (14)$$

令 $\tan\theta_{\max} = \eta$, 则有

$$f(\eta) = l_r(1 + \eta^2)^{1/2} - r\eta + r \arctan\eta - l_{AE} = 0 \quad (15)$$

对于确定的延伸率 δ 和压辊中心的 x 轴坐标值, 可以通过数值积分计算出 l_{AM} , 再由式(14)计算出 l_{AE} 。

采用图2所示的牛顿迭代法, 给定初值 $\eta^{(0)} = 1$, 经过3次迭代可计算出满足精度的 η , 再把 $\tan\theta_{\max} = \eta$ 带入式(8)可计算出 z_E 。

由图1b中的几何关系可知, 对于成形延伸率为 δ 的成形件, 压辊的最大下压量 $H_{\max} = z_0 - z_E$, 其中 z_0 为模具顶点到模具底面的距离。

2 计算实例

使用有限元数值模拟软件对柔性压辊拉形工艺进行数值模拟, 以08AL作为拉伸板料, 板料尺寸为 $600 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 其真实应力-应变曲线可参考文献[8]。模具分别选择马鞍形模具和球形模具, 模拟实验中取 $l_m = 150 \text{ mm}$, $l_r = 50 \text{ mm}$, $r = 20 \text{ mm}$, $l_f = 110 \text{ mm}$, $l_c = 40 \text{ mm}$ 。

压辊中心到板料对称线 Oy 在 x 方向上的距离分别为: $x_1 = 0 \text{ mm}$, $x_2 = 48 \text{ mm}$, $x_3 = 96 \text{ mm}$ 。

2.1 成形马鞍形件时的压辊下压量计算

马鞍形件的目标曲面方程为

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & ((600 - (300^2 - x^2)^{1/2})^2 - y^2)^{1/2} \\ & (-120 \text{ mm} \leq x \leq 120 \text{ mm}, \\ & -150 \text{ mm} \leq y \leq 150 \text{ mm}) \end{aligned} \quad (16)$$

成形马鞍形件时, 板料两侧容易贴模而中间不容易贴模, 要保证板料完全贴模, 则中间压辊必须下压到刚好完全贴模的临界位置。将式(16)带入式(1), 可计算出刚好完全贴模时板料与中心压辊1的切线 AB 的斜率

$$k_{AB} = -\tan\theta_{\min} = -0.5774 \quad (\theta_{\min} = \pi/3)$$

把式(14)中的 $\tan\theta_{\max}$ 替换为 $\tan\theta_{\min} (=0.5774)$, 联合式(13)可以计算出 $\delta_{\min} \approx 4.6\%$, 压辊1的下压量 $H_1 = 91.0 \text{ mm}$ 。利用 $\delta_{\min} \approx 4.6\%$, 可计算出压辊2和压辊3的下压量: $H_2 = 86.9 \text{ mm}$, $H_3 = 74.4 \text{ mm}$ 。

可取延伸率 $\delta \geq \delta_{\min} = 4.6\%$, 利用图2的运算流

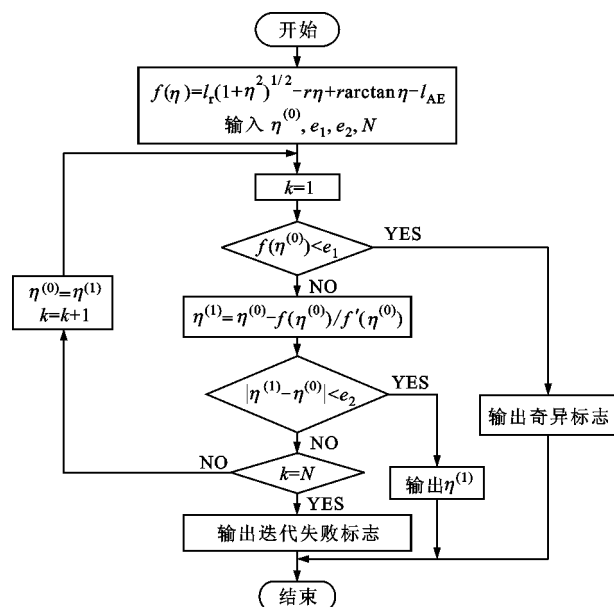


图2 用牛顿迭代法计算 $\eta(\tan\theta_{\max})$ 的流程图

程得 $\delta=5\%$ 时各个压辊的下压量分别为 $H_1=93.4\text{ mm}$, $H_2=89.3\text{ mm}$, $H_3=76.7\text{ mm}$ 。同理,可以计算出其他 δ 所对应的各个压辊的最大下压量 $H_{\max}$,如图 3 所示。

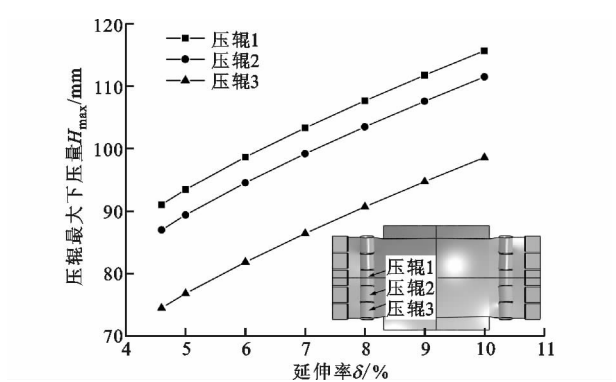


图 3 成形马鞍形件时各个压辊的最大下压量

2.2 成形球面件时的压辊下压量计算

半径 $R=300\text{ mm}$ 的球面件的目标曲面方程为 $\phi(x,y)=(300^2-(x^2+y^2))^{1/2}$
 $(-120\text{ mm}\leq x\leq 120\text{ mm},$
 $-150\text{ mm}\leq y\leq 150\text{ mm})$ (17)

成形球面件时,板料两侧不容易贴模,要保证板料完全贴模,则两侧压辊必须下压到刚好完全贴模的临界位置。将式(17)带入式(1),可得出刚好完全贴模时,板料与最外侧压辊 3 的切线 AB 的斜率

$$k_{AB}=K(x_3=96\text{ mm}, l_m=150\text{ mm})=-\tan\theta_{\min}=-0.6213$$

把式(15)中的 $\tan\theta_{\max}$ 替换为 $\tan\theta_{\min}=0.6213$, 可以计算出 $\delta_{\min}=15.573/300\approx 5.2\%$, 压辊 3 的下压量 $H_3=86.1\text{ mm}$ 。

利用 $\delta_{\min}\approx 5.2\%$, 可计算出压辊 1 和压辊 2 的下压量 $H_1=69.44\text{ mm}$, $H_2=73.53\text{ mm}$ 。

可取延伸率 $\delta\geq\delta_{\min}=5.2\%$, 利用图 2 所示的运算流程计算出 $\delta=7\%$ 时各个压辊的下压量: $H_1=78.3\text{ mm}$, $H_2=82.4\text{ mm}$, $H_3=95.3\text{ mm}$ 。同理,可以计算出其他 δ 所对应的各个压辊的最大下压量 $H_{\max}$,如图 4 所示。

3 数值模拟与实验验证

为了保证不同加载路径时板料均完全贴模,且不出现拉裂现象,根据数值计算的结果并考虑零件的变形曲率较小,取延伸率 $\delta=6\%$ 。根据数值计算,成形马鞍形件和球面件时各个压辊的最大下压量如表 1 所示。为方便与力加载方法进行对比,表 1 还给出了采用力加载方法时各个压辊的最大加载

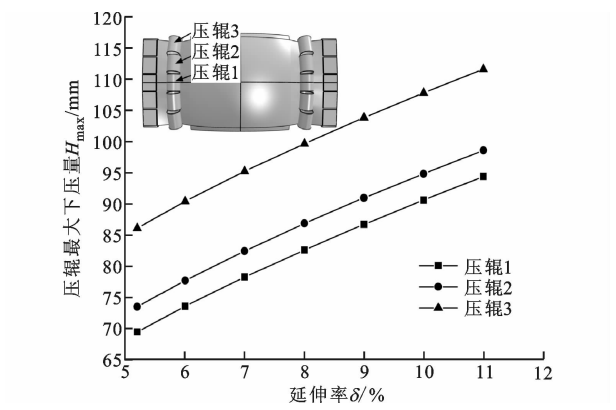


图 4 成形球面件时各个压辊的最大下压量

力。力加载和位移加载均采用 smooth step 光滑幅值曲线进行。

表 1 压辊的加载量

压辊	马鞍形件		球面件	
	加载力 /kN	加载位移 /mm	加载力 /kN	加载位移 /mm
压辊 1	4.0	98.6	4.0	73.6
压辊 2	8.0	94.5	8.0	77.7
压辊 3	8.0	81.8	8.0	90.4

3.1 数值模拟结果分析

图 5 为力加载和位移加载时,马鞍形件在 y 方向上的塑性应变云图。从图 5 中 2 幅图的塑性应变分布可以看出,位移加载的塑性应变分布更均匀。这是因为在成形过程中,压辊的加载力按给定的加载路径逐渐增大到最大值,压辊对板料的作用力与板料对压辊的反作用力一直不能达到平衡,此消彼长,在平衡位置附近呈波动增长,直到成形结束加载力达到最大不再增加才达到平衡,此时压辊停止运动,这种不平衡的波动产生的冲击作用使力加载成形零件的应力、应变都没有位移加载时均匀,而位移加载是按连续变化的位移加载路径施加确定的位移,能够保证成形过程中压辊对板料的作用力与反作用力一直保持平衡,无波动冲击作用。

为了更好地比较位移加载与力加载方法,在与 Oy 成 45° 的直线 OC 方向上求得各个节点的等效塑性应变和等效应力分布,如图 6 所示。从图 6 中可以明显看出,位移加载成形的马鞍形件的应力和应变的最大值与最小值之差比力加载的小,且应力、应变的变化趋势光滑,波动很小,而力加载成形的马鞍形件的应力、应变起伏较大,所以位移加载成形的马鞍形件的应力、应变比力加载成形的马鞍形件的应力、应变均匀。

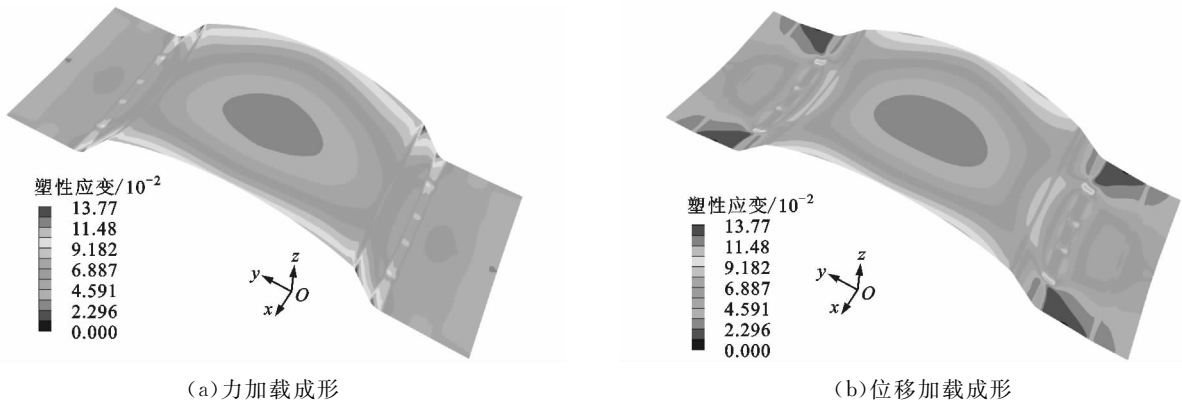


图 5 马鞍形件在 y 方向上的塑性应变分布图

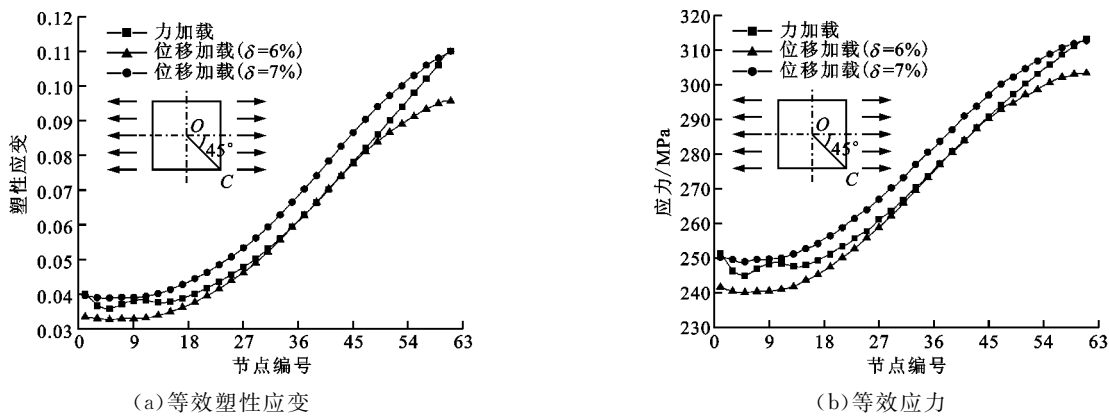


图 6 马鞍形件在路径 OC 上的等效应力和应变

图 7 是力加载和位移加载成形球面件的等效应力分布云图,可以看出位移加载成形的球面件的应力分布比力加载的均匀,且有效成形区的应力比力加载的小。这是因为,位移加载可以更好地发挥柔性压辊拉形的柔性,减小应力集中,使应力、应变分布更均匀。

图 8 为球面件在与板料的 Ox 与 Oy 方向成 45° 的 OD 方向上各个节点的应力、应变分布。从图 8 中可以明显看出,与马鞍形件一样,位移加载成形的球面件的应力、应变最大值与最小值之差比力加载

的小,即位移加载成形的球面件中部与边缘的应力、应变差值比力加载的小,所以位移加载成形的球面件的应力、应变比力加载成形的球面件的应力、应变均匀。

3.2 实验验证

通过以上数值分析,采用表 1 所示的加载量进行加载,对尺寸为 $600\text{ mm}\times 240\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的 08AL 板料进行了拉形实验。图 9 为柔性压辊拉形装置成形的马鞍形件和球面件,可以看出成形的零件均为宽度方向上曲率较大的零件,所以柔性压辊

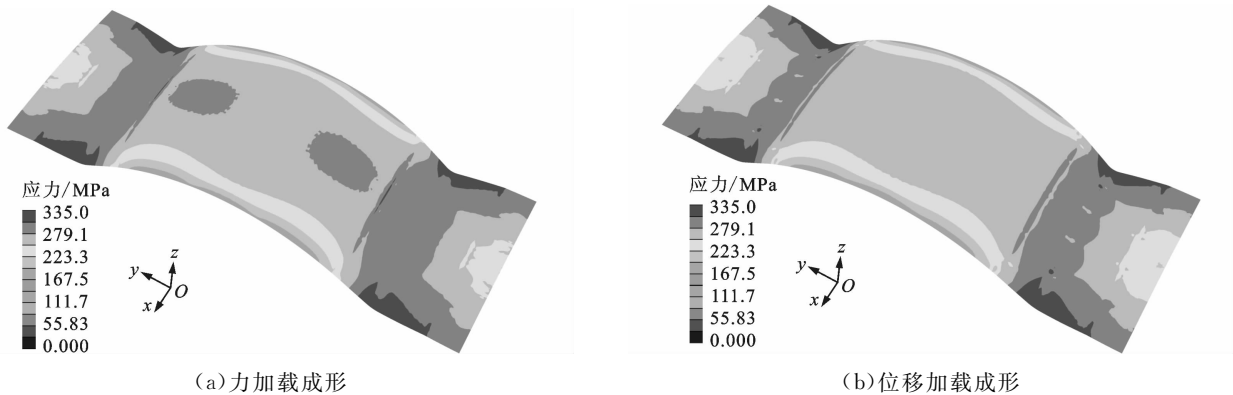
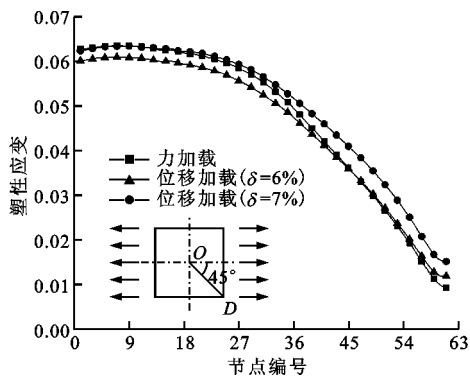
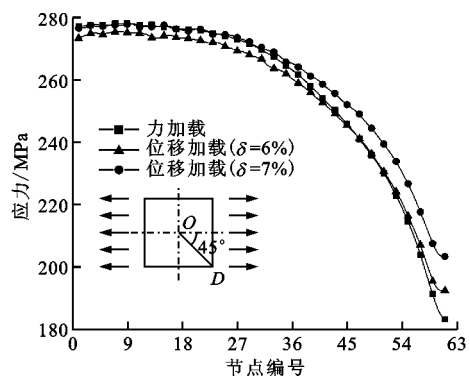


图 7 球面件的等效应力云图



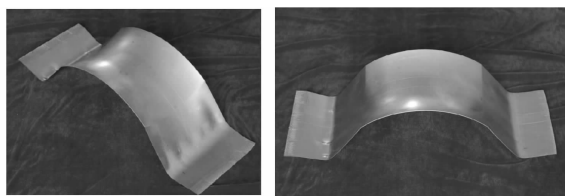
(a) 等效塑性应变



(b) 等效应力

图8 球面件在路径OD上的等效应力和应变

拉形适合于曲率相对较大的双曲面曲面件的成形,且成形件的有效成形区表面光滑,成形质量较好,验证了利用压辊下压量与延伸率的关系求解压辊下压位移量的合理性。



(a) 马鞍形件

(b) 球面件

图9 成形的实验件

4 结论

(1) 利用柔性压辊拉形的几何关系,得出了使板料完全贴模时压辊的最小下压量及其所对应的板料最小延伸率。基于板料在拉伸方向延伸率一致的原则,建立了压辊最大下压量与延伸率的关系,并通过数值模拟和实验验证了利用此关系求解压辊下压量的合理性。

(2) 通过实例计算出各个压辊的下压量,采用位移加载对马鞍形件和球面件的成形过程进行了数值

模拟,并与力加载进行了对比,结果表明:位移加载成形的零件的等效应力和等效塑性应变分布更均匀,成形质量更稳定。

(3) 利用压辊最大下压量与延伸率的关系可快速计算出对应不同延伸率时每个压辊的最大下压量,节省调试合适加载力的时间,可应用于柔性压辊拉形工艺的数值模拟和拉形工艺参数的调试。

参考文献:

- [1] 张彦敏,周贤宾. 蒙皮拉形加载轨迹优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 201-205.
ZHANG Yanmin, ZHOU Xianbin. Optimization of loading trajectory in skin stretch forming process [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 201-205.
- [2] CAI Zhongyi, WANG Shaohui, XU Xudong, et al. Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 396-407.
- [3] 申丽娟,杨军,赵宇. 基于方差传递模型的飞机蒙皮拉形工艺稳健设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 145-151.
SHEN Lijuan, YANG Jun, ZHAO Yu. Robust design of aircraft skin stretch forming process based on transmitted variance model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 145-151.
- [4] 付文智,朱必章,张昊晗,等. 柔性压辊拉伸成形球面件的解析法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(4): 930-935.
FU Wenzhi, ZHU Bizhang, ZHANG Haohan, et al. Analytic method for stretch forming spherical part with flexible roller [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(4): 930-935.
- [5] WANG Shaohui, CAI Zhongyi, LI Mingzhe. Numerical simulation on the local stress and local deformation in multi-point stretch forming process [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2012, 60: 901-911.
- [6] 白笛,周贤宾,李东生,等. 飞机复杂蒙皮拉形数值模拟系统开发及关键技术研究[J]. 航空学报, 2004, 25(6): 606-610.
BAI Di, ZHOU Xianbin, LI Dongsheng, et al. Key technology research and system development of complex aircraft skin stretch forming simulation [J]. Acta Aeronautical et Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 606-610.

(下转第122页)