

采用弹性垫抑制多点数字化拉形工艺中的压痕

张传敏^{1,2}, 付文智¹, 李明哲¹

(1. 吉林大学 锻锻工艺研究所, 长春 130022; 2. 吉林大学珠海学院 机电工程系, 广东 珠海 519041)

摘要: 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对马鞍形件的传统拉形及多点拉形过程进行了数值模拟, 并对多点拉形中压痕的产生原因及抑制方法进行了研究。研究表明: 多点拉形工艺中的压痕主要分为包络式和凹凸式两种; 采用弹性垫技术能够有效抑制压痕的产生; 弹性垫越厚对压痕的抑制作用越好, 但是成形件与目标形状的误差也相应加大; 选择适当厚度的弹性垫, 可以得到表面光滑、成形误差较小的工件。

关键词: 材料合成与加工工艺; 多点拉形; 数值模拟; 压痕; 弹性垫

中图分类号: TG385 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)01-0083-05

Suppression of dimples in digital multi-point stretching process

ZHANG Chuan-min^{1,2}, FU Wen-zhi¹, LI Ming-zhe¹

(1. Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Mechatronics Engineering Department, Zhuhai College, Jilin University, Zhuhai 519041, China)

Abstract: The fundamentals of the digital multi-point stretching process were introduced. The numerical simulations for the traditional stretching and the digital multi-point stretching process of the saddle part were performed by ANSYS/LS-DYNA software. The generation and suppression of dimples in the multi-point stretching process were studied. The results showed that the enveloping dimple and the concave-convex dimple are the main styles produced in the multi-point stretching process. The dimples can be suppressed effectively by application of the elastic cushion and the thicker the elastic cushion the better its dimple suppression effect, but thick cushion leads to large error between the shape of the obtained part and its target shape. The work piece with smooth surface and small error can be achieved by the elastic cushion with appropriate thickness.

Key words: materials synthesis and processing technology; multi-point stretching; numerical simulation; dimple; elastic cushion

利用多点成形设备的“柔性”特点, 无须换模就可完成各种三维曲面板类件的成形, 从而实现无模成形^[1-2]。多点成形技术已发展到广泛应用于造船、轨道客车、医学工程、大型体育场馆建设等领域^[3]。在飞机制造工业, 拉形工艺是蒙皮类

零件的主要成形方式^[4-5], 采用多点拉形工艺, 用多点数字化模具取代传统的拉形模具, 实现一台设备成形多种不同形状的蒙皮类零件, 可以节省大量的模具设计和制造费用, 缩短新机型的开发周期, 提高生产效率^[6-7]。作者首先简要介绍了多

收稿日期: 2007-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50275063).

作者简介: 张传敏(1967-), 男, 博士研究生. 研究方向: 材料加工. E-mail: chuanminzhang@163.com

通信作者: 付文智(1960-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 锻压设备现代设计法及应用. E-mail: fwz@jlu.edu.cn

点数字化拉形工艺的基本原理,然后利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对马鞍形件的传统拉形及多点拉形过程进行了数值模拟,并对多点拉形产生的压痕缺陷及其抑制方法进行了研究。

1 多点数字化拉形工艺的基本原理

传统的拉形模采用整体模具,图 1 是传统拉形与多点数字化拉形的示意图。在传统模具成形中,板类零件由整体模具型面来完成(见图 1(a)),而在多点拉形中则由基本体球头(见图 1(b))的包络面(或称基本体群成形曲面)来完成。多点拉形中各基本体的行程可以独立地进行调节,改变各基本体的位置就相当于重新构造了成形曲面。目前,多点成形技术主要用于对压方式的柔性加工,其特点是基本体群对板材施加垂直方向的力,完成成形。多点拉形时,首先对板材施加水平拉力,使板材在水平方向屈服,然后随着基本体群的上升,由于板材受到向上顶的力,使板材与基本体群贴合。因此,与对压多点成形方式相比,多点拉形具有板材受力复杂,成形时间长的特点。

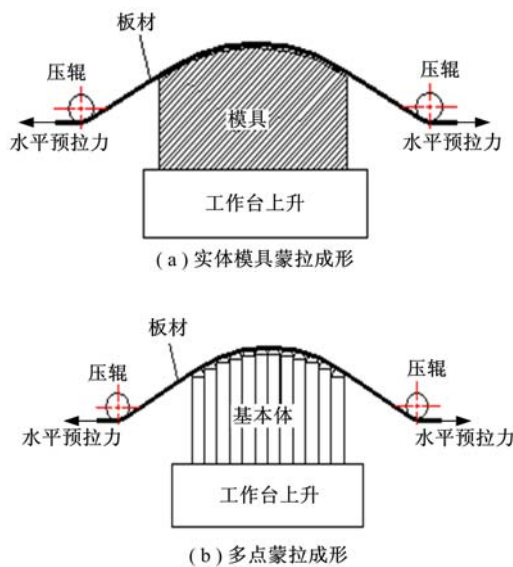


图 1 传统蒙皮拉形工艺与多点蒙皮拉形工艺的比较

Fig. 1 Comparison of traditional and multi-point stretching

2 模型的建立

2.1 基本体群成形曲面的构造

多点模具调形后所形成的包络面与形成这个包络面的各个基本体球头面是相切的,由此可求得每个球头球心的 z 坐标,进而就可得到基本体的调形位移,而在 x 及 y 方向的相对位置是不变

的,即每个基本体的 x 、 y 坐标是确定的。由数控系统控制调形使基本体包络面成为目标曲面。

以马鞍形曲面为例,其曲面方程为 $f(x, y) = \sqrt{(R - \sqrt{(r^2 - y^2)^2 - x^2})}$ 。设球头的球心坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,球头半径为 r_1 ,则球头的曲面方程为 $g(x, y, z_p) = \pm \sqrt{r_1^2 - (x - x_p)^2 - (y - y_p)^2} - z_p$, $g(x, y, z_p) = \pm \sqrt{r_1^2 - (x - x_p)^2 - (y - y_p)^2} + z_p$ 。在切点处球头的 z 坐标与目标曲面的 z 坐标相同,并且球头与目标曲面对 x 、 y 的偏导相等,故每个球头与目标曲面的切点 x 、 y 坐标及球头位置坐标 z_p 可从如下方程组中解得:

$$\begin{cases} f_1(x, y, z_p) = f(x, y) - g(x, y, z_p) \\ f_2(x, y) = \partial f / \partial x - \partial g / \partial x \\ f_3(x, y) = \partial f / \partial y - \partial g / \partial y \end{cases}$$

将上述方程组进行编程,经过迭代,可求得球头的球心坐标,从而可确定各个基本体的调形位移,在程序中将计算误差控制在所需的精度范围内。按照同样的方法可以构造出各种目标曲面。

2.2 有限元模型

多点模具采用 20×20 排列的基本体群,基本体球头半径为 10 mm,成形区尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。板材采用 Belyschko-Wong-Chiang 壳单元(简称 BWC 壳单元),基本体群和压辊使用刚性的四节点四边形壳单元划分网格。由于模型是对称的(见图 2(a)),为了节省计算时间,模拟时采用 $1/4$ 模型。

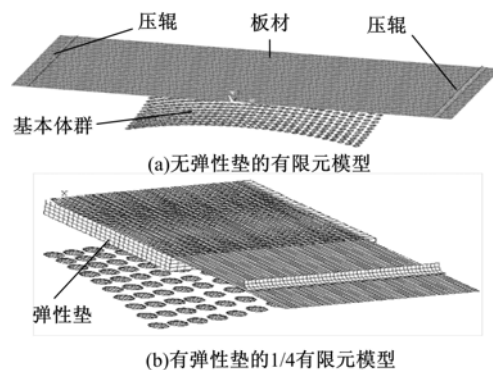


图 2 成形鞍形面的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of saddle

2.3 边界条件

位移边界条件控制基本体群的运动,基本体群在 X 、 Z 方向的平动及 X 、 Y 和 Z 方向的旋转自由度都被施加了约束,只允许 Y 方向的平动。压辊在 X 、 Y 和 Z 方向的平动及 X 、 Y 和 Z 方向的旋转自由度都被施加了约束。对板材和弹性垫施加对称

约束,力边界条件是对板材边缘施加一沿 Z 向的均布拉力。整个模拟过程包括:对板材施加水平拉力,拉力从“零”线性增加到预定值并保持恒定不变。对板材施加的预定水平拉力值由下式确定:

$$F=0.9\sigma_0 A$$

式中: F 为水平拉力; σ_0 为板材的极限强度; A 为加载板材的横截面积。

基本体群按位移加载曲线移动,用 90° 正弦曲线描述基本体群随时间变化的位移曲线。模拟成形时间为 15 s,基本体群平均上升速度为 9.0 mm/s。为了加快运算速度,利用质量缩放增大板材的密度,缩短求解时间。

3 成形过程的数值模拟

模拟拉形过程中的板材选用 LY12 薄板,尺寸为 $400\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,马鞍面件的成形曲率半径为 $\pm 300\text{ mm}$ 。材料性能参数为^[8]:弹性模量 73 GPa,泊松比 0.3,屈服强度 270 MPa,密度 2.85 g/cm^3 。

3.1 传统拉形与多点数字化拉形结果的对比

图 3 是用整体模拉形和多点数字化拉形成形 0.5 mm 厚马鞍形曲面件的数值模拟结果。从厚向应变图可以看出,整体模具拉形的成形件厚向应变变化平缓,表面光滑(见图 3(a));多点数字化拉形的成形件在冲头对应的位置出现了明显的压痕(见图 3(b))。这种压痕是多点成形方式特有的表面缺陷,研究压痕的产生机理和有效抑制

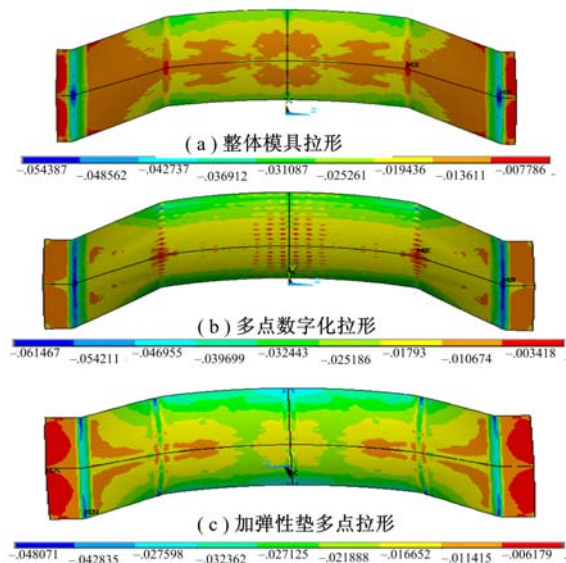


图 3 整体模拉形与多点数字化拉形结果

Fig. 3 Die stretching and multi-point stretching

压痕是多点数字化技术能否应用于蒙皮拉形工艺的前提。

3.2 压痕的产生

压痕缺陷通常主要表现为包络式压痕和表面压痕两种情况^[9](见图 4)。包络式压痕是一种类似于局部拉深的变形,板材包裹于球头上,在板厚范围内同时发生的整体面外变形,在板材上形成球头形状的凹陷或凸起(见图 4(a));表面压痕是一种局部的变形,球头压入板材,在板材表面留下凹坑(见图 4(b))。数值模拟结果显示,两种压痕同时存在于成形区内。最严重的表面压痕即板料最大减薄处发生在成形区的角部基本体球头与板料接触的位置,最大凹陷量为 0.048 mm,约为板厚的 4.8%。显然这样的凹陷量对零件的成形精度没有影响,但是对零件的表面质量有一定影响。与表面压痕相比,包络式压痕更为明显。这是由于多点拉形工艺中基本体群上升速度比较慢,对板材垂直方向的冲压作用很小,产生的压痕缺陷主要是包络式凹凸压痕。

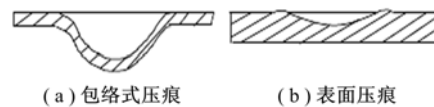


图 4 压痕的表现形式

Fig. 4 Styles of dimples

3.3 板材厚度与压痕的关系

选择板材厚度分别为 0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm,对马鞍形件的多点拉形过程进行模拟。拉形件的厚度和应变在一定程度上只能反映成形件是否有缺陷产生,而不能完全反映拉形件形状的差别。因此模拟结果采用成形后成形件的截面形状来反映压痕状态。图 5 是使用上述厚度的板材进行模拟得到的在特定截面 A-A 上的点沿垂直方向的位移对比情况。从图中可以明显看出,随板材厚度的增加,A-A 截面上点沿垂直方向的位移变化趋于光滑。当板厚为 0.5 mm 时,垂直方向的位移变化较剧烈,基本体对应位置的压痕明显;板材厚度增加到 2.0 mm 时,位移变化基本平稳,板材截面轮廓线趋于光滑。这是因为板材的变形抗力随着板厚的增加而增强,在同样受压力的情况下,厚板更能够抵抗较大的成形力而不发生局部变形产生压痕。为了减缓薄板拉形时基本体对板材产生的垂直方向的应力集中,本文采用弹性垫技术来抑制薄板多点拉形工艺中所出现的压痕缺陷。

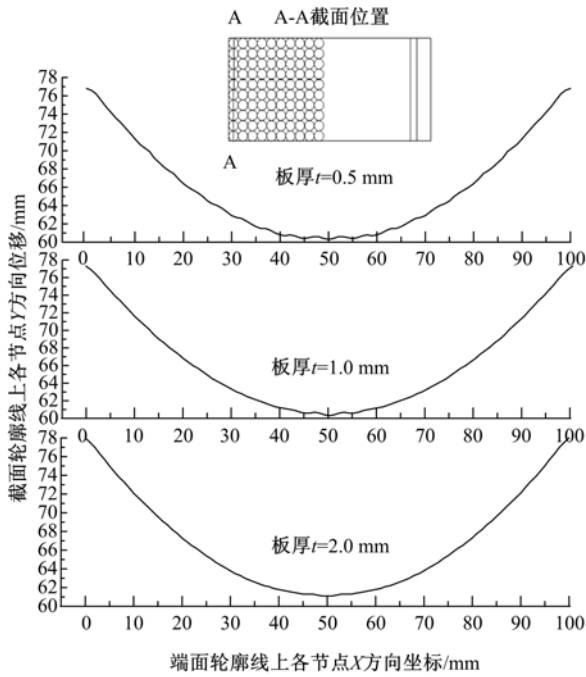


图 5 A-A 截面的位移分布
Fig. 5 Displacement distribution on A-A line

3.4 弹性垫对压痕的抑制

弹性垫技术是指在板材和基本体之间放置一定厚度的弹性垫,使基本体群不直接与板材接触,而是通过弹性垫来使板材成形。模拟采用 LY12 薄板,尺寸为 400 mm×200 mm×0.5 mm;弹性垫的弹性模量 $E=115\text{ MPa}$,考虑到弹性垫的变形补偿,其尺寸选择为 210 mm×210 mm,厚度为 10 mm。图 2(b)是加弹性垫的 1/4 有限元模型。加弹性垫后成形的鞍形件厚向应变分布与实体模具拉形结果非常相似(见图 3(c)),从加弹性垫多点拉形的模拟结果可以看出,板材表面光滑无压痕,且其厚向应变值也大大减小,说明弹性垫对压痕有明显的抑制作用。主要原因是加上弹性垫后,板材和工具的接触面积加大,从而使基本体球头所施加的集中载荷得以分散,从而有效地抑制压痕的产生。图 6 是成形件 A-A 截面变形轮廓

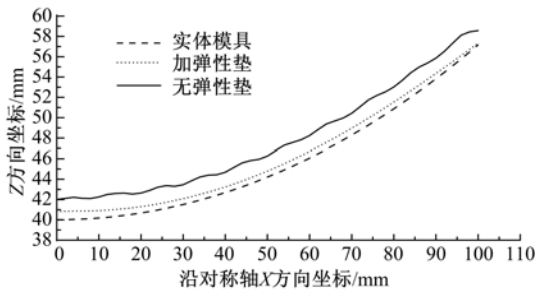


图 6 成形件 A-A 截面变形曲线
Fig. 6 Deforming curve of section A-A

线。从图 6 易知,无弹性垫的多点拉形件截面呈波状,有明显压痕;实体模具拉形件和加弹性垫后的拉形件截面轮廓线圆滑无压痕,说明加弹性垫后多点拉形产生的压痕缺陷得到了有效抑制;加弹性垫后多点拉形件与实体模具拉形件相比出现了 0.92 mm 的成形误差。

3.5 弹性垫厚度的选择

研究对于不同厚度的蒙皮件,选择多大厚度的弹性垫可以达到既能抑制压痕又能减小误差的目的。模拟时选用 0.5、1.0、1.5、2.0 mm 四种不同厚度的 LY12 薄板,尺寸为 400 mm×200 mm;弹性垫其他参数不变,厚度取 2、5、7、9 mm。图 7 是板材厚度为 0.5 mm 的成形算例,从厚向应变图可以看出:当弹性垫为 2 mm 厚时,成形件有明显压痕现象;当弹性垫的厚度为 5 mm 时,成形件局部有压痕,厚向应变值变化幅度较大;当弹性垫的厚度达到 7 mm 时,成形件表面趋于光滑有微起伏,当弹性垫的厚度达到 9 mm 时,成形件表面光滑无压痕。根据图 7 计算结果,0.5 mm 的 LY12 薄板选择 9 mm 厚的弹性垫比较合适。

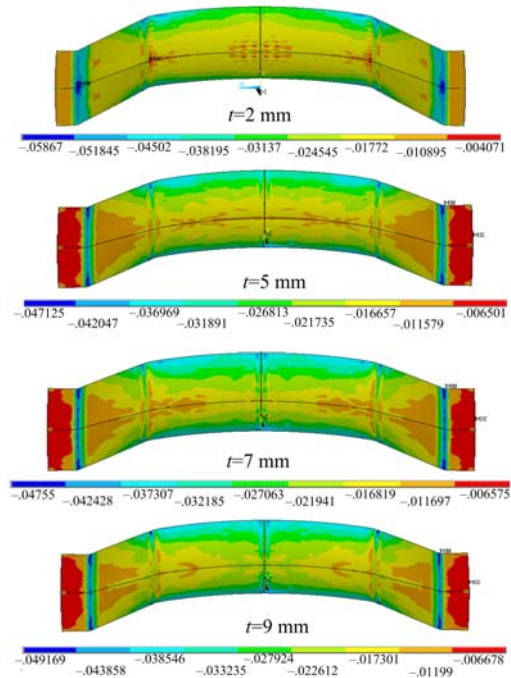


图 7 模拟的厚向应变图

Fig. 7 Thickness strain by simulation

表 1 是对不同厚度板材使用不同厚度弹性垫时的成形结果对比。从表中可以看出,弹性垫越厚对压痕的抑制作用越好,但是成形件与目标形状的误差也相应加大。对于飞机蒙皮这样的高精度成形件,采用弹性垫多点数字化拉形时,要充分

发挥多点拉形装置的基本体可调的特点进行调形补偿。图 8 给出了不同厚度板材与相应的弹性垫厚度的关系曲线,它反映了不同弹性垫厚度对压痕缺陷抑制作用的成形极限。采用多点拉形工艺成形不同厚度板材时,可由成形极限图选择合格件区域对应的弹性垫厚度,即可拉形得到表面光滑无压痕的蒙皮件。

表 1 使用不同弹性垫时的成形结果对比

Table 1 Comparison of forming results under different elastic buffers

弹性垫厚度/ mm	板材厚度/mm			
	0.5	1.0	1.5	2.0
2.0	有压痕	有压痕	轻微	轻微
5.0	有压痕	轻微	无压痕	无压痕
7.0	轻微	无压痕	无压痕	无压痕
9.0	无压痕	无压痕	无压痕	无压痕

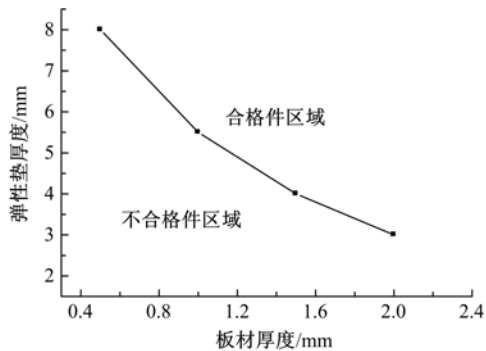


图 8 不同弹性垫厚度的成形极限图

Fig. 8 Forming limit with different thickness of elastic cushion

4 结 论

(1)在同样受压力的情况下,厚板更能够抵抗较大的成形力而不易发生局部变形产生压痕。

(2)使用弹性垫能够有效抑制多点拉形工艺中所产生的压痕,弹性垫越厚对压痕的抑制效果越好,但是成形件与目标形状的误差也相应加大,选择适当厚度的弹性垫,可以得到表面光滑、误差较小的成形件。

(3)对于飞机蒙皮这样的高精度成形件,采用弹性垫数字化多点拉形时,如何充分发挥多点拉形装置的基本体可调的特点进行调形补偿,将是数字化多点拉形工艺实用化进一步要研究的课题。

参考文献:

- [1] Cai Zhong-yi, Li Ming-zhe. Multi-point forming of three-dimensional sheet metal and the control of the forming process[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79(4): 289-296.
- [2] Papazian J M, Anagnostou E L, Christ R J, et al. Tooling for rapid sheet metal parts production[C]// The 6th Joint FAA/DoD/NASA Conference on Aging Aircraft, San Francisco, 2002.
- [3] Li M Z, Cai Z Y, Sui Z, et al. Multi point forming technology for sheet metal parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1-3): 333-338.
- [4] 万敏,周贤宾,李晓星,等. 镜面蒙皮拉形工艺参数研究[J]. 航空学报, 1999, 20(4): 326-330.
Wan Min, Zhou Xian-bin, Li Xiao-xing, et al. Process parameters in stretch forming of mirror skins[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(4): 326-330.
- [5] 白笛,周贤宾,李东升. 数控蒙皮拉形试验系统及精度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 334-338.
Bai Di, Zhou Xian-bin, Li Dong-sheng. Development on numerical control testing system for skin stretch forming and a analysis of accuracy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4): 334-338.
- [6] Li Ming-zhe, Liu Yu-hong, Su Shi-zong, et al. Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 87: 277-280.
- [7] Cai Zhong-yi, Li Ming-zhe. Optimum path forming technique for sheet metal and its realization in multi-point forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(2): 136-141.
- [8] 武恭. 铝及铝合金材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [9] 刘纯国,蔡中义,李明哲. 多点成形中压痕的形成与控制方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2004, 34(1): 91-96.
Liu Chun-guo, Cai Zhong-yi, Li Ming-zhe. Dimple formation and its elimination in multi-point forming for sheet metal[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2004, 34(1): 91-96.