

多辊下压式柔性拉形工艺及其数值模拟

张昊晗, 李明哲, 付文智, 冯朋晓

(吉林大学 无模成形技术开发中心, 长春 130022)

摘要: 研究了一种新型的柔性拉形工艺——多辊下压式柔性拉形(MRPFSF)。采用动态显式有限元软件, 对2024-O铝合金板材使用传统拉形工艺和MRPFSF工艺时成形球面件的过程进行了仿真, 对比分析拉形过程中板材的应力、应变和板材厚度变化。仿真结果表明, 与传统拉形工艺相比, 使用MRPFSF工艺时得到的拉形件应力应变分布均匀, 成形效果更好。最后用实验机进行了实验验证, 结果证明了MRPFSF工艺的可行性与实用性。

关键词: 材料合成与加工工艺; 板料成形; 数值模拟; 拉形; 铝合金

中图分类号: TG385.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2011)01-0089-06

Technology and numerical simulation of multi-roll-pressing stretch forming process

ZHANG Hao-han, LI Ming-zhe, FU Wen-zhi, FENG Peng-xiao

(Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: A new kind of stretch forming process, called multi-roll-pressing flexible stretch forming (MRPFSF) process, was studied. The MRPFSF process of spherical surface parts of aluminum alloy sheet was simulated in comparison with the conventional process by means of an explicit finite element software and the variations of stress, strain, and thickness of forming parts were analyzed comparatively for both forming modes. The results show that the stress and strain distributions in the forming part by MRPFSF are more uniform and the forming quality is better than those by the conventional process. The practical MRPFSF test was done on an experimental machine, proving the feasibility and practicability of the proposed MRPFSF process.

Key words: materials synthesis and processing technology; sheet metal forming; numerical simulation; stretch forming; aluminum alloy

传统拉形工艺主要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]。由于拉形参数及运动方式复杂, 加之零件成形缺陷繁多, 长期以来, 蒙皮零件的加工较多地依赖生产经验, 成形质量不稳

定^[2]。使用多自由度精密数控技术的拉形设备可精确控制工作台和夹钳的运动轨迹^[3], 通过对成形轨迹进行优化计算和精确控制提高了拉伸成形件的质量, 但设备昂贵, 并且由于拉形过程比较复杂, 依靠数学计算很难得到最优的拉形成形轨迹。

收稿日期: 2010-01-04.

基金项目: 欧盟第六框架协议计划航空航天领域国际合作项目(ASTS-CT-2006-030877).

作者简介: 张昊晗(1982-), 男, 博士研究生. 研究方向: 材料加工. E-mail: laohan_319@163.com

通信作者: 李明哲(1951-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 无模成形工艺及设备, 塑性加工过程数值模拟.

E-mail: limz@jlu.edu.cn

吉林大学无模成形技术开发中心设计并开发了多辊下压式柔性拉形实验机,该实验机结构简单、操作容易、成本低廉,且加工得到的成形件质量良好,板厚均匀,很大程度上克服了应力集中对拉形件质量的影响。本文使用动态显式有限元软件对多辊下压式柔性拉形过程进行了数值模拟,将该拉形工艺和传统拉形工艺进行了对比分析,并且对多辊下压式柔性拉形工艺进行了实验验证。

1 两种拉形工艺的基本原理

1.1 传统拉形工艺

传统拉形机主要由模具和夹持系统组成,依靠控制夹钳的位移和上顶模具来进行拉形加载^[4-6]。分为纵拉和横拉两类。横向拉形一般用于制造横向曲率大的零件;对于狭长蒙皮,其纵向曲率比横向曲率小时,为节省材料,以采用纵向拉形较合理。通常纵向拉形适用于纵向曲率大横向曲率较小的狭长蒙皮零件^[5];对于横向曲率和纵向曲率相差不大的狭长蒙皮零件,传统纵拉机加工起来比较困难,只能通过增加悬空区长度或手动调整夹钳弧度来进行加工。尤其在拉形模双向曲率比较大的情况下,板材贴膜困难,板材受力不均匀的部位容易产生应力集中,发生拉裂,加工质量难以保证。

1.2 多辊下压式柔性拉形工艺

如图 1 所示,多辊下压式柔性拉形机采用全新的结构,增加了离散为多个可摆头压辊的柔性压辊机构。由柔性夹持机构和柔性压辊机构两部分组成,柔性夹持装置也被离散为若干个可摆头夹钳。成形过程中先由柔性夹持装置将板料固定,离散压辊向下压工件,工件逐渐贴膜而得到成形件。成形时对压辊施加相同的压力,既各个压辊的压入力相等。这使得板材在各个压辊位置的拉伸量也基本相等,由于板材中间位置先贴膜而两端后贴膜,在中间位置的压辊先达到平衡时,而两边继续下压,等工件完全贴膜时各个位置的拉伸量基本相等,形成与拉形模端面相同的弧形状,如图 1B-B 所示。

同样,上下夹钳被施以相同的压力,当压辊下压的时候,板材自身的受力发生了变化,导致上下夹钳的受力不平衡,这时夹钳会跟随板材向下运动,达到一个新的平衡。夹钳会在板材受力相同时(即拉伸量基本相同时)达到平衡,这时上下夹钳也会呈现与拉形模端面相同的弧形,如图 1A-

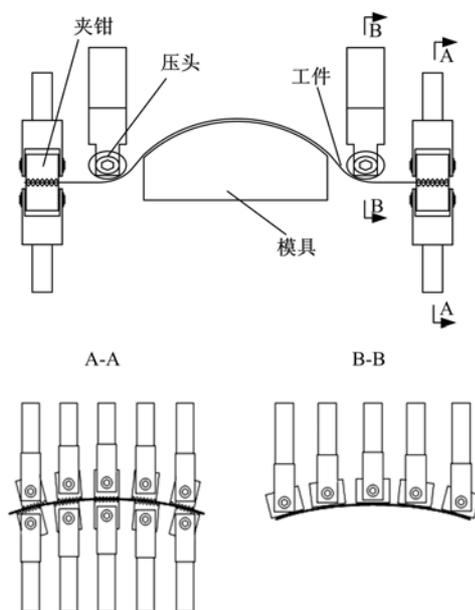


图 1 多辊下压式柔性拉形机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of multi-roll-type stretching A 所示。

如上所述,多辊下压式柔性拉形机的压辊和夹钳都会根据不同拉形模的形状自动调整位置,形成与拉形模端面相同的弧形。这种设计均匀地分配了拉形力,当工件某个位置受力过于集中时,压辊和夹持机构自动摆头,很大程度上避免了应力集中。图 2 为该新型拉形机的拉形过程模拟光照图。可以看出,夹持装置和压辊装置在拉形中呈现出明显的与拉形模相同的弧形,这种形状是柔性拉形机构自身调节的结果,能够较均匀地分布载荷,避免应力集中,从而得到较好的成形件。这在一定程度上降低了滑移线、拉裂等缺陷发生的可能性,使得该工艺在加工横向曲率和纵向曲率都较大的蒙皮件和横向曲率较大的狭长蒙皮件时更具优势。由于该柔性拉形工艺控制参数较少,成形轨迹是由特有机机构自动优化的,所以与操作人员的技术水平、熟练程度关系较小,成形件重复性、一致性好。

2 模型的建立

2024-O 铝合金是常用的飞机蒙皮材料,其物理性能参数为:弹性模量为 40.49 GPa;泊松比为 0.33;屈服强度为 75.3 MPa;密度为 2720 kg/m³。该合金与其他合金相比,屈服强度较低,同时弹性模量也很低,说明板材塑性好,易于成形,而且成形后回弹也很小^[6]。2024-O 铝合金板材的应力应变曲线如图 3 所示。

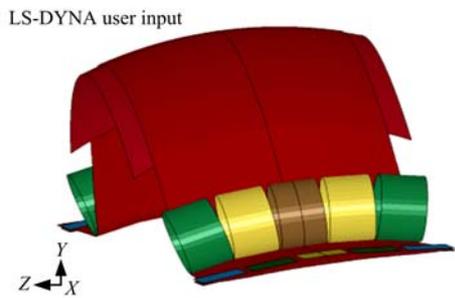


图 2 多辊下压式柔性拉形机拉形过程模拟光照图
Fig. 2 Light map of multi-roll-type stretching forming

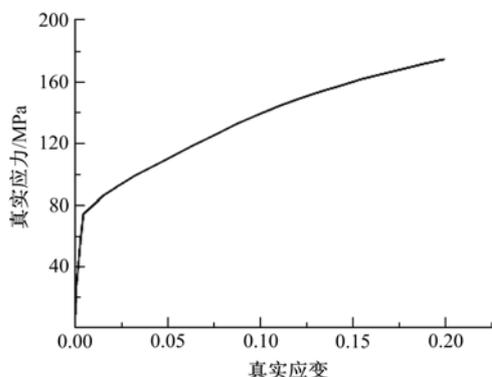


图 3 2024-O 铝合金的应力应变关系

Fig. 3 Stress-strain of 2024-O aluminum alloy

由于蒙皮零件的外形为曲面,为保证有限元计算的精度并提高计算效率,本文研究过程中板材采用 Belyschko-Wong-Chiang 壳单元(简称 BWC 壳单元),夹持机构和离散压辊使用刚性四节点四边形单元进行划分。一共划分为 15 389 个单元。

因本例中拉形件为球面件,考虑球面具有对称性,故只对其 1/4 进行建模。图 4 为建立的多辊下压式柔性拉形 1/4 有限元模型。根据实际加载情况,采用控制时间-力曲线来实现板材模拟整个拉形过程。如图 5 所示。从图 5 中可以看出,



图 4 柔性拉形工艺 1/4 有限元模型

Fig. 4 1/4 Finite element model of flexible stretching forming

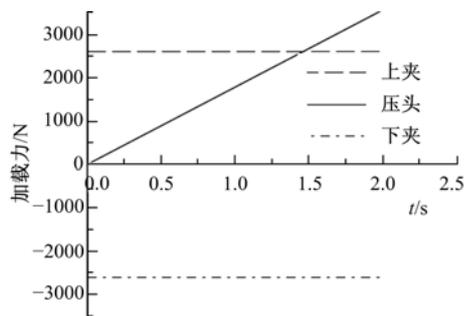


图 5 控制拉形过程的时间-力曲线

Fig. 5 Time-force curve which control stretch forming processes

整个拉形过程中的力加载过程很简单,这说明该柔性拉形机的操作较简单。

3 数值模拟结果

本文采用动态显式非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,对 1 mm 厚的 2024-O 铝合金板材在传统拉形工艺和多辊下压式柔性拉形工艺时成形大曲率球面件的过程进行了数值模拟,以预测成形过程中可能产生的缺陷。文中使用的铝合金板材尺寸为 960 mm×200 mm,有效成形区域为 400 mm×200 mm,模具采用曲率为 300 mm、尺寸为 400 mm×220 mm 球形面整体模具。

图 6 分别为板材在传统拉形工艺和多辊下压式柔性拉形工艺下成形球面件时 X 方向的应力图。从图 6 中可以看出,在使用传统拉形工艺下成形大曲率球面件时应力分布相对集中,且局部应力值很大,板材边缘和板材中部应力相差较大,应力集中明显,应力分布不均匀,成形件成形过程中受力不均匀,成形质量较差;而使用柔性拉形工艺下成形的拉形件应力分布较均匀,应力集中相对较小,成形件质量较高。

表 1 为采用传统拉形和多辊下压式柔性拉形工艺时成形件 X 向(拉伸方向)应力对比,可以看出:使用柔性拉形工艺时成形区应力范围较小,其应力范围为 92.1~119.2 MPa,而使用传统拉形工艺时应力范围扩展到 89.3~132 MPa。

表 1 不同拉形工艺时 X 向应力对比

Table 1 X-direction stress comparison of under different stretching forming processes

| 拉形工艺 | 最大应力值/MPa | 最小应力值/MPa |
|------|-----------|-----------|
| 传统拉形 | 132 | 89.3 |
| 柔性拉形 | 119.2 | 92.1 |

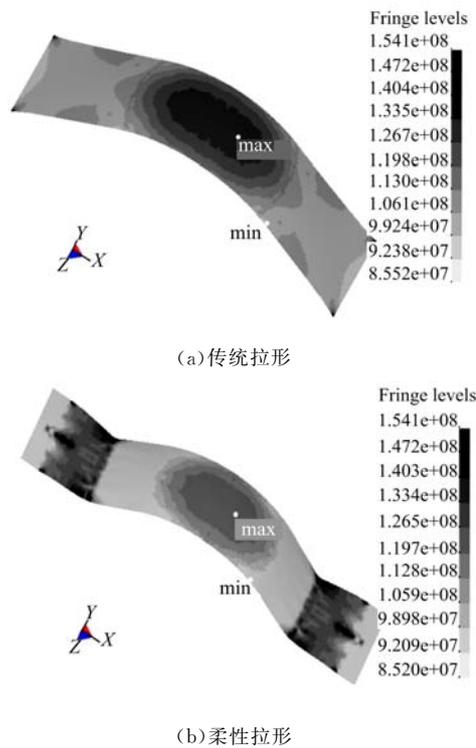


图 6 不同工艺时 X 向应力分布

Fig. 6 X-direction stress distribution under different stretching forming processes

图 7 为板材在传统拉形工艺和多辊下压式柔性拉形工艺下成形球面件时 X 方向应变图。从

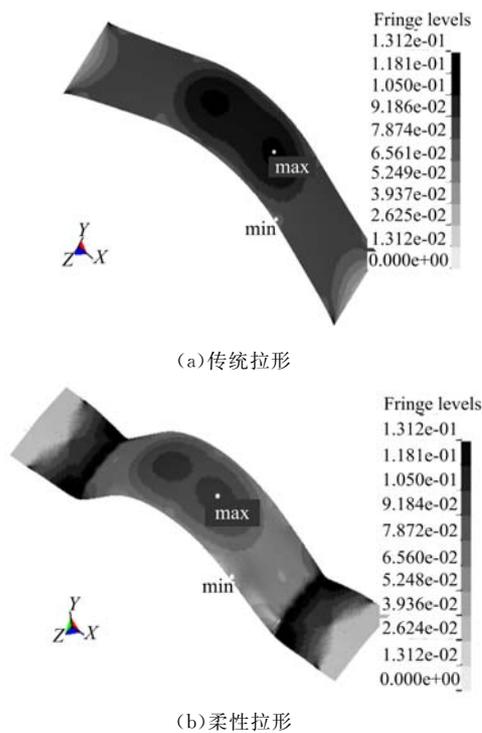


图 7 不同工艺时 X 向应变分布

Fig. 7 X-direction strain distribution under different stretching forming processes

图 7 可以看出,在传统拉形工艺下成形大曲率球面件时,应变分布相对集中且局部应变值很大,板材边缘应变值和板材中部相差较大,应变集中明显,应变分布不均匀,成形质量较差;而在柔性拉形工艺下,板材应变分布较均匀,应变值相对较小,成形件质量较高。

表 2 为传统拉形和多辊下压式柔性拉形工艺下成形件 X 方向应变对比,从表 2 中可以看出,使用柔性拉形工艺时得到的成形件最大应变较小,为 0.0873,且最小应变较大,为 0.0365,这说明使用柔性拉形得到的成形件应变较均匀。

表 2 不同拉形工艺时 X 向应变对比

Table 2 X-direction strain comparison of under different stretching forming processes

| 拉形工艺 | 最大应变 | 最小应变 |
|------|--------|--------|
| 传统拉形 | 0.107 | 0.0313 |
| 柔性拉形 | 0.0873 | 0.0365 |

图 8 为板材在传统拉形工艺和多辊下压式柔性拉形工艺时成形球面件的板厚图,表 3 为采用板材在传统拉形工艺和多辊下压式柔性拉形工艺时板厚对比,从图 8 和表 3 中可看出,使用传统拉形工艺加工的球面件板厚分布不均匀,过渡区和成形区交界处减薄明显,最小厚度值达到 0.918

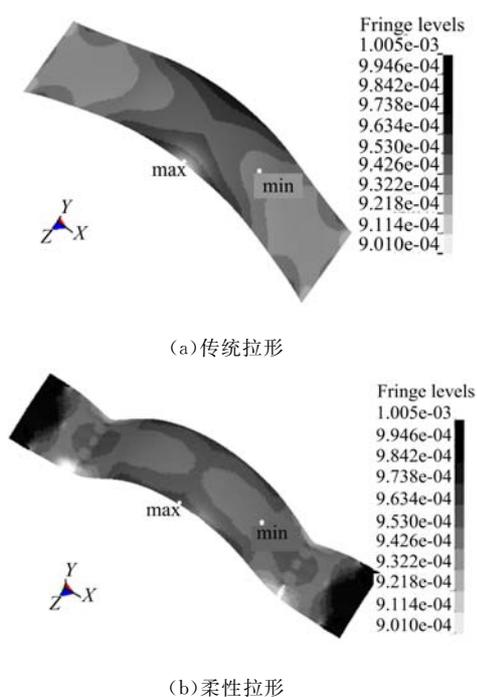


图 8 不同拉形工艺时板厚分布

Fig. 8 Thickness distribution under different stretching forming processes

mm,出现拉裂趋势,成形件质量较差;而使用柔性拉形工艺得到的拉形件板厚比较均匀,减薄量较小,最小厚度值为 0.936 mm,成形质量较好。

表 3 不同拉形工艺时板厚对比

Table 3 Thickness comparison of different stretching forming processes

| 拉形工艺 | 最大厚度/mm | 最小厚度/mm |
|------|---------|---------|
| 传统拉形 | 0.963 | 0.918 |
| 柔性拉形 | 0.961 | 0.936 |

变形是否均匀和回弹大小是衡量拉形件质量的重要指标。作者对上述两种工艺下的拉形件进行了回弹计算。然后提取对称轴上的节点坐标,绘制出不同情况下板材回弹后对称轴轮廓线对比图如图 9 所示。使用多辊下压式柔性拉形的成形件回弹后与目标形状最大误差为 0.373 mm,明显小于传统拉形工艺的 0.76 mm,由于两种工艺成形件回弹后与目标形状的最大误差均小于 1 mm,说明回弹较小,符合实际生产要求。

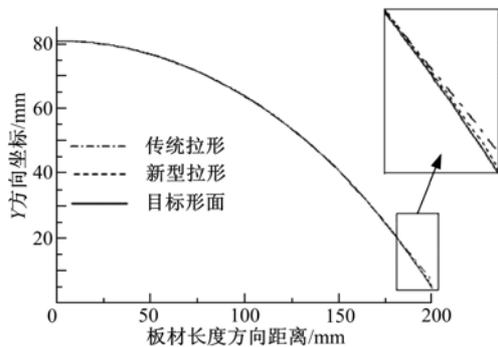


图 9 不同拉形工艺下对称轴回弹后轮廓线对比图

Fig. 9 Symmetry axis contour comparison chart of formed plate under different stretch forming process when plate is springback

飞机蒙皮的生产使用拉形技术,主要是拉形工艺具有板材变形均匀、成形精度高和回弹量小等优点^[7]。通过上述的数值模拟分析可知,与传统拉形工艺相比,多辊下压式柔性拉形工艺下得到的成形件不仅应力、应变分布均匀,减薄较小,板厚分布均匀,而且回弹量也不大,成形效果较好。同时在该柔性拉形工艺下可成形横向曲率较大的狭长板类件,提高了拉形工艺的加工范围。

4 拉形实验

为了验证多辊下压式柔性拉形方式的可行性,吉林大学无模成形技术开发中心设计开发了多辊下压式柔性拉形实验机,并在该实验机上作

了相关拉形实验。实验得到了比较好的效果,所得工件成形较好,板厚均匀,回弹较小。图 10 是该实验机的工装照片,图 11 是该柔性拉形实验机加工得到的双向大曲率球面件。



图 10 多辊下压式柔性拉形实验机照片

Fig. 10 Photo of multi-roll-type stretching test machine



图 11 实验所得球面件

Fig. 11 Spherical parts formed by experiments

5 结论

(1)研究了一种新型的柔性拉形工艺——多辊下压式柔性拉形工艺,该拉形工艺能够优化拉形轨迹,减小应力集中,均衡板材受力,能够成形传统拉形机难以成形的横向曲率和纵向曲率相差不大的狭长拉形件。

(2)对 1 mm 厚 2024-O 铝合金板材在两种拉形工艺下成形球面件进行了数值模拟,并进行了实验验证。从模拟和实验结果可以看出,与传统拉形工艺相比,使用多辊下压式柔性拉形工艺不但能够成形横向曲率较大的狭长拉形件,且成形件应力、应变分布均匀,减薄较小,成形效果较好。

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): 202-205.
Zhang Yan-min, Zhou Xian-bin. Optimization of loading trajectory in skin stretch forming process

- [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 202-205.
- [2] 白笛, 周贤宾, 李东升, 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 Xian-bin, Li Dong-sheng, et al. Key technology research and system development of complex aircraft skin stretch-forming simulation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 606-610.
- [3] 罗红宇, 李东升, 张彦敏, 等. 数控蒙皮拉形试验机系统开发与应用研究[J]. 试验技术与试验机, 2006(4): 31-33.
Luo Hong-yu, Li Dong-sheng, Zhang Yan-min, et al. Research & development on numerical control skin stretch forming testing system[J]. Testing Technology and Testing Machine, 2006(4): 31-33.
- [4] 王少辉, 蔡中义, 李明哲, 等. 冲头尺寸对多点拉形效果影响的数值模拟[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(3): 619-623.
Wang Shao-hui, Cai Zhong-yi, Li Ming-zhe, et al. Numerical simulation on the effect of punch element size on multi-point stretch forming results[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39(3): 619-623.
- [5] 蔡中义, 张海明, 李光俊, 等. 多点拉形数值模拟及模具型面补偿方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(2): 329-333.
Cai Zhong-yi, Zhang Hai-ming, Li Guang-jun, et al. Numerical simulation of sheet metal multi-point stretch forming and compensation of die surface[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2008, 38(2): 329-333.
- [6] 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.
- [7] 周磊, 金建新, 周瑞武. 飞机蒙皮拉形机数字化控制的研究[J]. 机械工程师, 2003, 23(10): 28-29.
Zhou Lei, Jin Jian-xin, Zhou Rui-wu. Research on digital control for air skin stretch forming machine[J]. Mechanical Engineer, 2003, 23(10): 28-29.
- [8] 周朝晖, 蔡中义, 李明哲. 多点模具的拉形工艺及其数值模拟[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2005, 35(3): 287-291.
Zhou Zhao-hui, Cai Zhong-yi, Li Ming-zhe. Stretching process based on multi-point die and its numerical simulation[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2005, 35(3): 287-291.
- [9] 谭富星, 李明哲, 崔相吉, 等. 柔性夹持多点拉形过程的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1160-1164.
Tan Fu-xing, Li Ming-zhe, Cui Xiang-ji, et al. Numerical simulation in the process of multi-point stretch forming with flexible clamp mode[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9): 1160-1164.