

柔性夹持多点拉形过程的数值模拟

谭富星¹, 许旭东², 李光俊², 李明哲¹, 张国忠³

(1. 吉林大学无模成形技术开发中心, 130025, 长春; 2. 成都飞机工业集团有限责任公司制造工业部, 610092, 成都; 3. 长春瑞光科技有限公司, 130012, 长春)

摘要: 采用动态显式有限元软件, 对 2024-O 铝合金板材在传统夹持方式和柔性夹持方式下成形球面件的过程进行了数值模拟, 对比分析了拉形过程中板材的应力和应变变化。结果表明, 与传统夹持方式相比, 在柔性夹持方式下得到的多点拉形件应力应变分布均匀, 成形效果较好, 而且可以提高材料的利用率。完成了相关的实验验证, 结果表明: 柔性夹持方式适用于多点拉形过程, 验证了柔性夹持装置的可行性与实用性; 模拟结果与实验结果的误差基本在 0.3~0.5 mm 之间, 验证了数值方法的准确性。

关键词: 多点拉形; 铝合金; 柔性夹持; 数值模拟

中图分类号: TG385.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1160-05

Numerical Simulation for Process of Multi-Point Stretch Forming with Flexible Clamp Mode

TAN Fuxing¹, XU Xudong², LI Guangjun², LI Mingzhe¹, ZHANG Guozhong³

(1. Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. Department of Manufacturing, Chengdu Aircraft Industrial Group Co., Ltd., Chengdu 610092, China; 3. Changchun Ruiguang Science & Technology Co., Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: The multi-point stretch forming process of spherical surface parts of aluminum alloy sheet metal with conventional clamp mode and the flexible clamp mode with different transition region were simulated by an explicit finite element software. The stress and strain of forming parts with different clamp modes were comparatively analyzed. The numerical simulation results show that the stress and strain distribution of forming part with the flexible clamp mode is well-proportioned, its forming quality gets better than that with conventional clamp equipment, and the material utilization is improved. A corresponding stretch forming test was conducted to verify the flexibility and feasibility of the flexible clamp mode for multi-point stretch forming process.

Keywords: multi-point stretch forming; aluminum alloy; flexible clamp; numerical simulation

随着国内外航空技术的不断发展, 各种军用和民用飞机更新速度加快, 为了提高飞机的气动性能, 对蒙皮件的成形质量提出了很高的要求。特别是飞机蒙皮件普遍具有多品种、小批量甚至是单件生产的特点, 模具制造、配套的工装生产和产品的快速响应与降低零件制造成本等因素构成了巨大的矛盾,

因此迫切需要建立一种新的蒙皮生产方式来满足飞机制造的要求。多点拉形技术恰好符合这种小批量、低成本、高精度要求的飞机蒙皮件生产的需要^[1-2]。对于多点拉形技术应用于飞机蒙皮的生产, 近年来国内外的相关机构都做了很多探索性的研究。美国麻省理工学院、CyrilBath机床公司以及海军研究

署协同进行了将多点模具用于飞机蒙皮拉形的研究工作,研制出了可重构模具柔性拉形装置^[3];在实施欧盟第六框架协议计划国际合作项目的过程中,吉林大学完成了多点拉形系统的开发和研究,研制出了飞机蒙皮数字化多点拉形装置。多点拉形技术的研究及相关技术将显著缩短飞机蒙皮的生产周期,由此带来的辅助工艺的简化、人员劳动强度的降低以及库房面积的减少,更具有明显的经济效益。

板材的夹持方式对蒙皮多点拉形过程具有非常重要的影响,国内外学者已进行了一些相关的研究。本文针对蒙皮多点拉形的传统夹持方式和柔性夹持方式进行了相关的数值模拟及比较分析,并且完成了实验验证。

1 多点拉形板材的夹持方式

1.1 传统夹持方式

蒙皮拉形前,先将板材边缘放入拉形模两侧的钳口,然后通过液压装置控制钳口夹紧,夹紧后方可完成拉形过程。传统的夹持装置是一个整体,与钳口接触的板材被夹紧,夹紧部分和钳口之间没有相对位移。拉形过程中与钳口接触的板材边缘始终呈直线状,无论拉形模在顺着钳口的方向上有多大的弧度,得到的蒙皮拉形件与钳口接触的部分始终呈直线状。这种板材夹持方式在国内的飞机制造过程中应用非常广泛。

1.2 柔性夹持方式

当拉形模端面曲率与钳口曲率相一致时,采用上述的传统夹持方式可以很好地完成蒙皮拉形过程。但是,当模端面曲率与钳口曲率有较大偏差,也就是说拉形模顺着钳口的方向也有一定弧度时,采用传统夹持方式会使板材贴模比较困难,而且整张板材的受力状况不是很均匀,尤其在拉形模双向曲率比较大的情况下,板材受力不均匀的部位容易产生应力集中,发生拉裂缺陷。柔性夹持方式是一种灵活的板材夹持方式,在板材拉形过程中被夹持的板材边缘可以顺着拉形模模面的曲率而变化,改变传统夹持方式中与钳口接触的板材边缘始终呈直线状的状况,使夹持装置在夹紧板材的同时,实现夹持边缘与拉形模端面曲率的变化更加接近,这样必将使板材在拉形过程中更容易贴模,同时可改善板材受力不均匀的状态。

2 材料模型

2.1 2024-O 铝合金

2024-O 铝合金是常用的飞机蒙皮材料,其最大

的优点在于塑性好,同时可热处理强化。这种材料的一般物理性能参数如表 1 所示,可以看出该合金屈服强度较低,同时弹性模量也很低,说明它塑性好,易于成形,而且成形后回弹很小。2024-O 铝合金板材的应力应变曲线见图 1。

表 1 2024-O 合金的一般物理性能

合金	E/GPa	μ	σ_y/MPa	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
2024-O	40.54	0.34	75.5	2 720

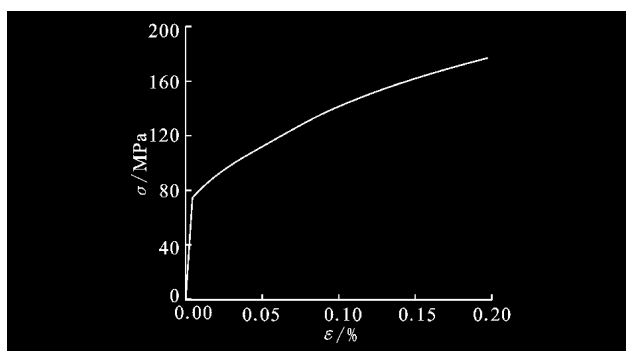
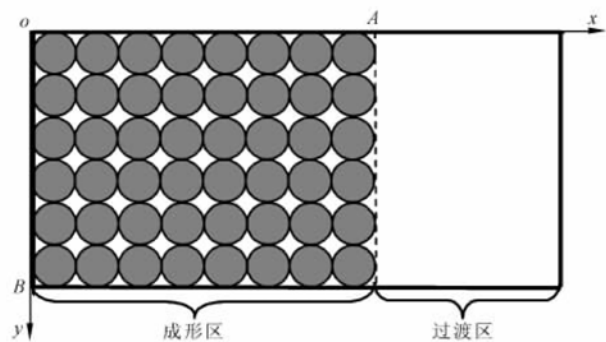


图 1 2024-O 合金的应力-应变关系

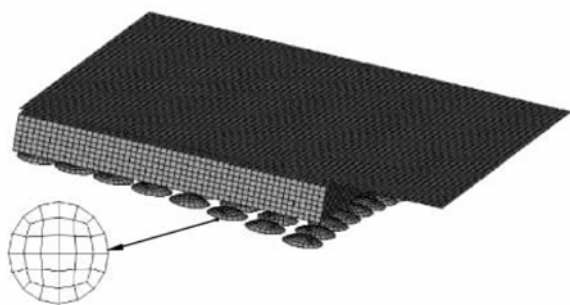
2.2 有限元模型

蒙皮拉形涉及几何非线性、材料非线性及边界条件非线性的三重非线性过程,通过采用大变形弹塑性有限元法进行分析,其有限元数学模型包括大变形弹塑性本构方程、板壳理论模型以及有限元单元模型^[4]。由于蒙皮零件的外形一般为曲面,为保证有限元计算的精度并提高计算效率,本文在研究过程中选择八节点曲边四边形等参数单元作为有限元单元模型。

图 2 为建立的板材多点拉形过程有限元模型。因本例中拉形件为球面件,而球形面具有对称性,故只对其 1/4 进行建模。图 2a 为板材 1/4 模型平面示意图,从图中可以看出板材分为成形区和过渡区。过渡区是板材拉形过程中比较特殊的部分,每当拉形模端面曲率过大时,有过渡区则板材不易贴模,变形不均匀。设置合适的过渡区,可以使板材成形区变形更加均匀,获得合格的蒙皮件。图 2b 为板材拉形有限元模型,图中基本体设为刚体,计算时为了节省 CPU 时间,仅对与工件接触的基本体球冠部分建模。基本体定义为壳单元,弹性垫选用线弹性材料模型,划分完网格之后再对其引入适当的边界条件,定义不同的属性等。对于板材两侧的夹持状态,可以通过限制板材边缘上节点的位移来实现。



(a) 板材 1/4 模型平面



(b) 有限元模型

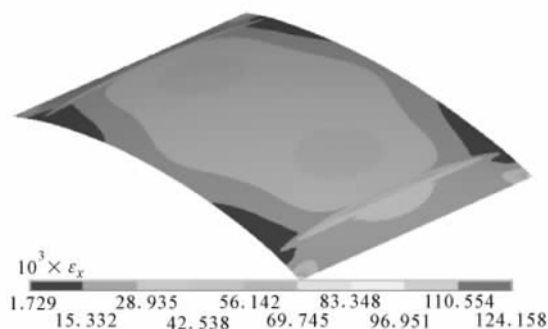
图2 板材多点拉形过程的有限元模型

3 板材多点拉形过程

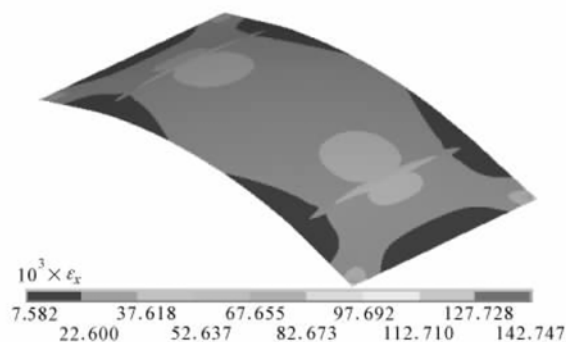
3.1 拉形过程模拟

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 铝合金板材在传统夹持方式和柔性夹持方式下成形球面件的过程进行了仿真, 以预测成形过程中可能产生的缺陷, 对比分析拉形过程中板材的应力-应变变化, 分析柔性夹持方式是否适合板材的多点拉形过程。文中使用的 2024-O 铝合金板材有效成形区域为 400 mm × 300 mm, 使用传统夹持方式时设置 40 mm 和 100 mm 2 种过渡区, 以考察过渡区的设置对板材拉形件成形质量的影响, 使用柔性夹持方式时设置 40 mm 的过渡区。另外, 板材被夹持的宽度为 20 mm。为了防止压痕缺陷^[5-6]的发生, 在板材和多点拉形模之间放置弹性介质, 介质厚度为 10 mm, 基本体群速度定义为 0.1 m/s。在模拟过程中, 通过限制板材边缘的节点位移来定义 2 种夹持方式的边界条件。

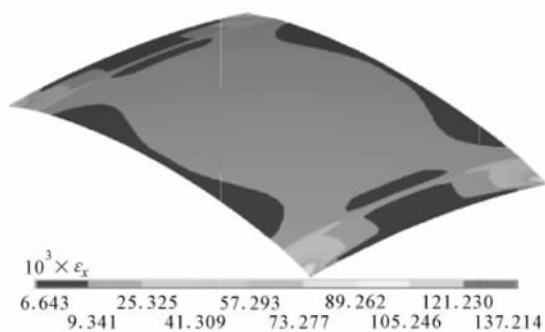
图 3 是模拟得到的 1 mm 厚 2024-O 铝合金板材在传统夹持方式和柔性夹持方式下, 设置不同过渡区宽成形球面件时的模拟结果。从图中可以看出, 在传统夹持方式下, 板材被夹持的边缘呈直线状, 过渡区为 120 mm 时的拉形件应变分布较过渡区为



(a) 传统夹持方式(过渡区为 40 mm)



(b) 传统夹持方式(过渡区为 120 mm)



(c) 柔性夹持方式(过渡区为 40 mm)

图3 不同夹持方式下的 x 方向应变图

40 mm 时的拉形件应变分布均匀。在柔性夹持方式下, 过渡区为 40 mm 时板材被夹持的边缘呈曲线状, 而且拉形件的应变分布比传统夹持方式的均匀得多。

变形是否均匀是衡量拉形件质量的重要指标, 同时回弹大小也是考察拉形件是否合格的重要内容。作者对上述 3 种情况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的对称轴轮廓线对比图, 见图 4, 图中 3 种情况下拉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 5 是模拟得到的不同夹持方式下的拉形力对比图, 可以看出柔性夹持方式下的拉形力略小于传

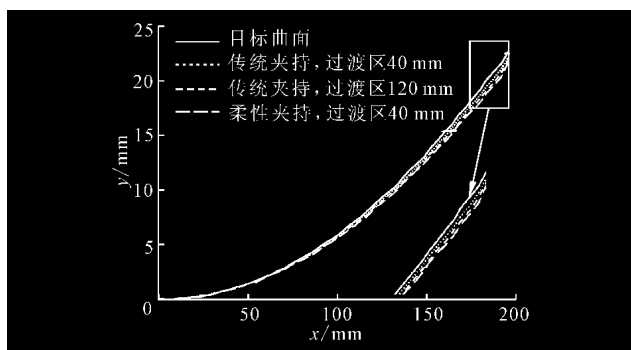
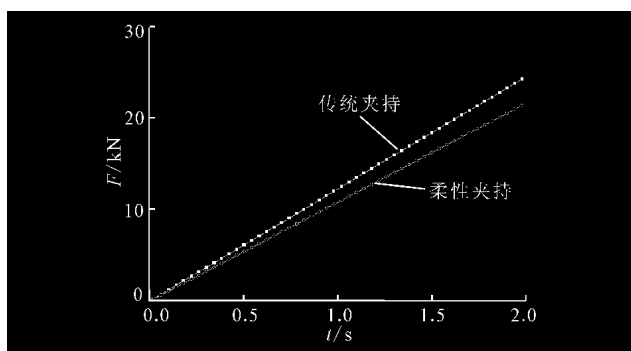
图4 不同夹持方式下对称轴 oA 回弹后的轮廓线对比

图5 不同夹持方式下的拉形力对比

统夹持方式下的拉形力。

飞机蒙皮的生产使用拉形技术,主要是因为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]。通过上述数值模拟分析可知,与传统夹持方式相比,柔性夹持方式下得到的成形件不仅应力、应变分布均匀,而且回弹量也不大,成形效果较好。同时在柔性夹持方式下,过渡区不必像传统夹持方式那样设置得那么宽,这样可以节省大量的原材料,提高材料的利用率,大大降低生产成本。

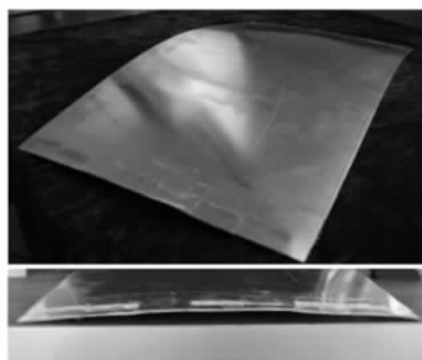
3.2 拉形实验

为了验证柔性夹持方式的可行性,作者将传统的板材夹持装置离散为若干个夹头,每个夹头都是一个独立的夹持装置,在夹紧板材的同时,夹头可以实现上下摆动和左右转动。根据现有的实验条件,将简易柔性夹持装置工装安装到 20 t 快速调形多点成形压力机的上模座上,每个夹头可以绕装置工装上下摆动。图 6 是实验工装的照片,图 7 是使用柔性夹持装置进行实验所得到的球形件和马鞍形件照片。从图 7 可以看出,工件被夹持的边缘呈曲线状,也就是说工件边缘与拉形模模面相一致,实现了灵活、柔性夹持的目标,且工件成形质量较好。

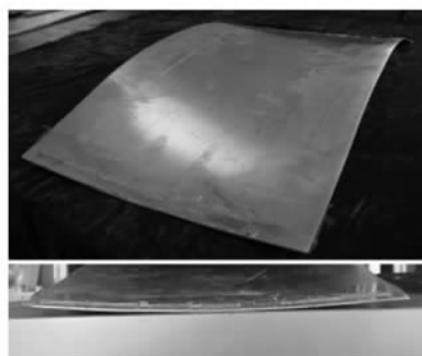
为了比较实验拉形件的精确性,利用非接触测量设备对回弹后的球形件进行了测量,并提取工件形面的数据信息,与数值模拟结果的节点数据进行



图6 实验工装照片



(a)球形拉形件



(b)马鞍形拉形件

图7 实验结果照片

比较,得到了误差对比图,见图 8。图 8 显示,实验拉形件与模拟结果之间的误差大部分都在 0.3~0.5

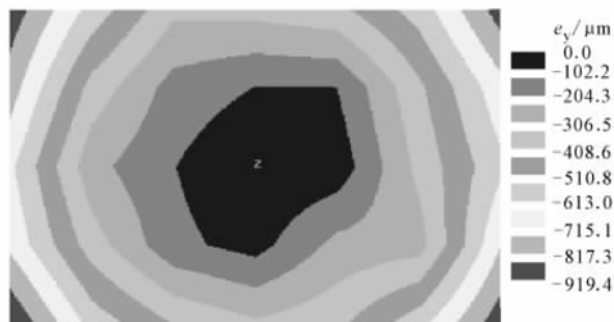


图8 实验结果与模拟结果的误差对比图

mm 之间,自由边缘的部分接近 1 mm,误差较小.

4 结束语

(1)对比分析 1 mm 厚 2024-O 铝合金板材在 3 种不同拉形条件下成形球面件时的模拟结果可以看出,与传统夹持方式相比,在柔性夹持方式下得到的多点拉形件应力、应变分布均匀,成形效果较好,同时需要的过渡区小,可提高材料的利用率.

(2)实验验证与误差分析结果表明,柔性夹持方式适用于多点拉形过程,拉形件精度较高且成形效果较好.

参考文献:

- [1] 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 Zhaohui, CAI Zhongyi, LI Mingzhe. 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.
- [2] 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.
- [3] SOCRATE S, BOYCE M C. A finite element based die design algorithm for sheet-metal forming on reconfigurable tools [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2000, 11(3): 481-485.
- [4] 王晓林,周贤宾,李晓星. 飞机蒙皮拉形过程的有限元数值模拟[J]. 航空制造技术,2002, 35(2): 39-42.
WANG Xiaolin, ZHOU Xianbin, LI Xiaoxing. Finite element numerical simulation of stretch forming process of air skin [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 35(2): 39-42.
- [5] 汪华,周贤宾. 多点成形条件下蒙皮拉形的表面缺陷[J]. 新工艺·新技术·新设备,2006,97(6):89-92.
WANG Hua, ZHOU Xianbin. Surface defects of skin stretch-forming by means of multi-point forming [J]. New Technology · New Process · New Equipment, 2006, 97(6): 89-92.
- [6] CAI Zhongyi, LI Mingzhe, FU Wenzhi. Analysis and control of dimpling in multi-point forming for sheet metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2003, 28(1): 16-19.
- [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 Jianxin, ZHOU Ruiwu. Research on digital control for air skin stretch forming machine [J]. Mechanical Engineer, 2003, 23(10): 28-29.

(编辑 葛赵青)