数值模拟

双曲度蒙皮纵向拉形过程模拟技术研究

顾伟¹,伍惠¹,金海霞²,彭静文²,李卫东²,万敏²

(1. 成都飞机工业公司 制造工程部, 成都 610092;

2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要:目的 双曲度蒙皮主要通过可实现曲夹钳的纵向拉形方法成形,通过研究双曲率蒙皮纵拉 过程模拟技术,对拉形机夹钳加载轨迹进行优化。方法 主要针对蒙皮纵向拉形模拟中,板料在 拉形机夹钳中的装夹和夹钳加载轨迹的设计等关键技术问题进行研究,给出了合理的处理方法, 建立了相应的模型。结果 应用有限元仿真软件进行仿真验证,并通过改变拉伸量和补拉量,对 成形模拟结果进行了对比,优化了夹钳轨迹。结论 通过拉形加载优化,提高了蒙皮零件贴模度, 保证了蒙皮外形精度的要求。

关键词:飞机蒙皮;纵向拉形;夹钳轨迹;有限元分析

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.04.012

中图分类号: TG386 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2015)04-0057-05

Numerical Simulation Technique of Longitude Stretch Process on Double-curved Skin

GU Wei¹, WU Hui¹, JIN Hai-xia², PENG Jing-wen², LI Wei-dong², WAN Min² (1. Chengdu Aircraft Industrial Corporation, Chengdu 610092, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Design of jaw path and clamping of sheet on stretch forming machine are the two key technical problems in longitude stretch forming process simulation of skin. The aim of this study was to optimize the jaw loading path through studying simulation technique on double-curvature skin in aircraft. The treatment of key technical problems were proposed and tested in FEM simulation software ABAQUS. By varying the amount of stretching and post-stretching and comparing forming simulation result, the jaw path is optimized. The springback of final part is reduced and the shape accuracy is improved through lading path optimization of longitude stretch forming.

KEY WORDS: aircraft skin; longitude stretch forming; jaw path; finite element analysis

飞机气动外形主要由蒙皮零件构成,拉形工艺是制造蒙皮零件的主要方法。近年来,国内各航空制造 企业为了提高蒙皮质量与水平,引进了法国 Alsthom-ACB 公司的数控拉形设备,但由于缺少相应的工艺优 化方法和工艺参数数据库,生产中仍然以试拉为主, 蒙皮零件质量不易很好保证,生产效率没有显著的提 高。针对引进的先进数控设备,利用有限元技术进行 蒙皮拉形工艺模拟与优化,预测成形中可能出现的成

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(2007AA04Z1A3)

收稿日期: 2015-05-12

作者简介:顾伟(1963—),男,上海人,学士,高级工程师,主要研究方向为材料成形组织与性能控制。

形缺陷,确定合理的拉形轨迹,对于提高产品质量和 生产效率具有十分重要的意义^[1]。

蒙皮拉形分为横向拉形和纵向拉形^[2]。横向拉 形中夹钳为直钳口,板料两端被夹钳夹持并通过夹钳 空间运动完成拉伸与包覆的复合动作,并贴合模具成 形;纵向拉形时,板料两端被夹钳夹持后首先通过夹 钳之间的相对转动发生横向弯曲,继而在夹钳作用下 完成拉伸与包覆的复合动作,并贴合模具成形,它是 制造双曲度蒙皮的主要方法。以往的研究主要是针 对蒙皮横向拉形的研究^[3-5]。

文中主要针对双曲度蒙皮纵向拉形进行研究,通 过研究纵向拉形模拟中板料在拉形机夹钳中的装夹、 夹钳轨迹的设计等关键技术,给出合理的处理方法, 并应用有限元分析软件进行仿真验证,通过改变拉伸 量和补拉量,对成形模拟结果进行对比,优化纵向拉 形轨迹。

1 板料在拉形机夹钳中的装夹

针对 FEL2×350T 纵向拉形机(如图 1 所示)拉形 双曲度蒙皮进行研究。该设备是在保持模具不动的 情况下,通过夹钳运动对板料施加拉力和弯矩,使板 料与拉形模完全贴合。纵拉机的运动机构属于空间 串联、左右对称机构,单边钳口由 7 块独立的夹钳组 成,通过作动筒的伸缩,可以控制中间夹钳的空间运 动,同时控制主轴的伸长,以及主轴在主轴局部坐标 系下的转动。其他夹钳相对中间夹钳的转动可以形 成曲钳口。



图 1 FEL2×350T 数控纵拉机 Fig. 1 Longitude stretch forming machine FEL2×350T

模拟中引入了夹钳数模,来定义板料在拉形机夹 钳中的装夹,建立板料夹持边与夹钳的对应关系。通 过确定板料上的夹持边与夹钳的对应关系,将夹持边 与对应的夹钳约束在一起;在继而发生的拉形过程 中,板料夹持边跟随对应的夹钳发生相同的运动,通 过夹钳的运动实现板料的拉伸与包覆,如图2所示。 模拟中,板料的受力情况即可以转化为夹钳的运动边 界条件,由夹钳的运动唯一地确定。



图 2 夹持模拟 Fig. 2 Simulation of clamping

2 夹钳轨迹设计

2.1 夹钳轨迹定义

如图 3 所示, 机构的运动自由度包括主轴向量 OA 的伸缩量 Δa , 夹钳整体绕 y 轴的旋转角 θ_y , 绕主 轴向量 OA 的旋转角 θ_a , 绕 z 轴向量 AB 的旋转角 θ_z 以及各个夹钳钳口绕过各自参考点且平行于向量 BX 的轴的旋转 θ_a , θ_e , θ_f , θ_g , 图中 C, D, E, F, G 分别是各 夹钳参考点的初始位置。夹钳用刚性体来描述, 确定 夹钳的轨迹即是确定在成形过程中夹钳参考节点的 运动轨迹。



图 3 夹钳运动示意图 Fig. 3 Jaw movement

在确定模具和板料的初始位置的情况下,整个拉 形过程中夹钳的运动均通过控制各成形阶段中夹钳 的转角以及拉伸量来实现。根据拉形工艺原理和拉形 设备特点,将拉形动作分解为以下4个阶段来完成。

第1阶段:预拉伸与包覆。设定在板料不发生塑 性变形的情况下,夹钳参考节点在此阶段的终点位置 定义在沿模具圆角处的切向位置,拉形动作通过夹钳

58

绕 *y* 轴转动和主轴 *OA* 伸长来实现。如图 3 所示,第一步各夹钳参考节点的终止位置为 *C*₁,*D*₁,*E*₁,*F*₁,*G*₁。

第2阶段:板料发生倾斜。如图3、图4所示,夹 钳绕主轴 OA₁转动 θ角,调整中间夹钳与对应模具外 形区域段相一致。



图 4 板料的倾斜 Fig. 4 Lean of sheet

第3阶段:曲夹钳的形成。该阶段调整各夹钳绕 中间夹钳相对转动形成曲钳口,使曲钳口与模具端面 轮廓吻合,便于贴模。

第4阶段:轴向拉伸贴模。夹钳沿主轴 OA₁ 方向 轴向拉伸,板料面内产生均匀塑性变形,拉伸板料直 至贴模为止。

2.2 夹钳轨迹的控制变量

引入伸长率来改变成形阶段零件变形量的分配 情况,从而得到不同的成形效果。取板料沿拉形方向 (*x* 轴)的截面中心线的伸长率来进行计算,如图 5 所 示。悬空段与模具型面近似相切,在 CAD 软件中可 以测量得到某阶段板料的长度。假设板料原始长度 为*L*₀,某阶段板料与模具贴合段弧长 *L*₁₁、两端悬空段 弧长为*L*₁₁和*L*_{N1},则该阶段板料截面中心线弧长为:

$$L_1 = L_{V1} + L_{M1} + L_{N1}$$
(1)

变形后截面中心线的伸长率为:

$$\delta = \frac{L_{V1} + L_{M1} + L_{N1} - L_0}{L_0} \tag{2}$$

通过设定伸长率,反求悬空段弧长,可以得到该 成形阶段结束时夹钳的空间位置,再与原始位置相比



图 5 伸长率定义示意图 Fig. 5 Definition of percentage elongation

较,便可得到此阶段中夹钳的位移。

3 双曲度零件模拟及分析

3.1 有限元模型的建立

针对某飞机双曲度蒙皮零件进行有限元模拟,该 零件的拉形模具与板料的有限元模型如图 6 所示。 根据初始板料的宽度,确定左右两侧子夹钳数量为 5。板料材料为 2024-T3 铝合金,材料厚度 t = 1.2 mm。模具与板料之间的接触摩擦因数为0.08。拉伸 成形模拟采用 ABAQUS/Explicit 软件,回弹模拟采用 ABAQUS/Standard。



Fig. 6 Finite element model

铝合金 2024-T3 材料性能参数由单拉试验得到, 表1 是经计算处理所得的基本力学性能参数。

表 1 铝合金 2024-T3 材料性能参数 Table 1 Material parameters of aluminum 2024-T3

屈服强度	抗拉强度	伸长率	弹性模量	泊松比
$\sigma_{\rm s}/{ m MPa}$	$\sigma_{ m b}/{ m MPa}$	$\delta / \%$	<i>E/</i> MPa	υ
311.878	432.15	20.4	61644	0.3
应变强化	各项异	应变引	医 容	s度 ρ
系数/MPa	性指数	化指标	际 /(t	• m ⁻³)
633.617	0.7704	0.143	31 2	2.78

根据前述方法设计夹钳轨迹,由于铝合金 2024-T3 材料在拉形过程中表面容易出现滑移线,所以设 计时将延伸率控制在 4% 以内,使得零件以最小的延 伸率成形。模拟拉形过程采用位移控制方式,同时运 用 ABAQUS 软件中提供的光滑加载位移幅值曲线,保 证了加载模拟的平稳性。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 变形分析

图 7 为 ABAQUS/Explicit 模拟成形后零件有效变

形区域的应变应力场分布。由图 7 可见,成形后零件 面内应力应变分布均匀,总体变形情况良好,角部区 域主应变值最大。

60



图 7 成形后零件应力应变分布 Fig. 7 Stress and strain distribution on skin

通过实验获取滑移线出现时的临界应变数据点, 拟合成曲线,构成滑移线极限曲线 SLC,作为滑移线的 判据,如图 8 所示。图 8 中的点-线方式显示了角部区 域中变形最大的单元的应变历史,可以看出,角部单元 应变加载沿近似直线路径,应变状态介于单向拉伸和 平面应变状态之间,最大应变值低于滑移线极限曲 线,说明零件表面不会出现滑移线。另外,图 8 中采 集的大量数据点反映了拉形结束时零件主应变在滑移 线极限图(SLD)上的分布,应变值都介于2.2%~3.5% 之间,以较小的延伸率达到了成形精度的要求,较好 地防止了硬铝合金成形过程中滑移线问题的出现。



图 8 主应变在滑移线极限图(SLD)上的分布 Fig. 8 Max Principle strain distribution on SLD

3.2.2 加载轨迹优化

为了优化夹钳轨迹,在控制伸长率时,分析各阶 段不同变形量的分配对成形结果的影响,从而选择最 佳的夹钳轨迹。夹钳轨迹参数设计如表2所示。

3 组参数设置中,板料的延伸率均控制在 4% 以 内,成形结束后零件表面均不会产生滑移线,更不会 发生破裂,所以主要考察零件的贴模情况。沿零件纵 向(即拉伸方向)选取截面 y=100 mm,y=400 mm,y= -400 mm 作为零件贴模度的检测部位,贴模度定义为 蒙皮零件下表面与模具型面之间的距离。各截面零 件贴模情况如图 9 和表 3 所示。

表 2 3 组夹钳轨迹参数



Fig. 9 Comparison of part accuracy in different sections

	-	
•	-	

	第1组贴模度		第2组贴模度		第3组贴模度	
截回 -	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
y = 400	0.31	0.57	0. 23	0.45	0.26	0.45
y = 100	0.30	0.52	0.21	0.36	0.16	0.31
y = -400	0.32	0.55	0.26	0.45	0.23	0.39

表 3 各组贴模度对比 Table 3 Comparison of part accuracy in different sections

mm

从图 9 和表 3 中可以看出, 在截面 y = 400 mm
处,第2组零件的总体贴模度最好,在截面 y=100 mm
和 y=-400 mm 处,第3 组零件的贴模度最好,第一组
零件的贴模度最差。拉伸量越大,零件贴模情况越
好;补拉量越大,零件贴模度也越好。

从贴模度分析角度来看,当拉伸量为1%,补拉 量为2.7%时,蒙皮拉形结果为最佳。

4 结论

通过对双曲度蒙皮零件的纵向拉形模拟技术的 研究,建立了蒙皮纵拉成形的有限元模型,实现了拉 形加载轨迹的优化,主要得到以下结论。

1)针对蒙皮纵向拉形工艺和拉形设备特点,提出了纵向拉形动作方案和夹钳轨迹计算方法。

 利用有限元软件 ABAQUS 对硬质 2024-T3 铝 合金零件进行纵向拉形模拟,引入滑移线极限曲线作 为滑移线的判据。

 3)通过改变拉伸量和补拉量,引起各阶段板料 变形量的不同,优化了拉形轨迹。

 4) 拉伸量和补拉量的增大,都有利于蒙皮零件 贴模度的提高,保证了蒙皮外形精度的要求。

参考文献:

[1] 李卫东,万敏,金海霞.飞机蒙皮拉形计算机辅助工程系统 ASSFCAE [J]. 塑性工程学报,2005,12(增刊7): 200-203.

LI Wei-dong, WAN Min, JIN Hai-xia. Computer Aided Engineering System for Aircraft Stretch Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering(Suppl 7), 2005, 12(s7):200-203.

[2] 韩金全.飞机蒙皮拉形模具型面与工艺参数优化研究 [D].北京:北京航空航天大学,2009.

HAN Jing-quan. Design and Optimization of Tool Surface and Processing Parameters in Aircraft Stretching[D]. Beijing: Beihang University, 2009.

- [3] LI Wei-dong, WAN Min, et al. Research on Digital Stretch Forming System for Aircraft Skin [C]//Proceedings of the 1st International Conference on New Forming Technology, ICNFT, 2004;429—434.
- [4] CHANCERELLE. The Sheet Stretch Forming [C]//In:Klaus Siegert. New Developments in Sheet Metal Forming. Fellbach:MAT INFO Werkstoff-Information Sgesellschaftmb H, 2002:71-91.
- [5] KONG Y M, ZHANG P, WAN Min, et al. Determination of Skin Stretch Forming Loading Path by Using Simulation [C]. //Proceedings of the 5th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processe. Jeju Island, Korea:2002:127-130.
- [6] 彭静文,李卫东,万敏. 机翼前缘蒙皮拉形工艺参数优化 与试验[J]. 塑性工程学报,2011,18(4):74—78.
 PENG Jing-wen,LI Wei-dong, WAN Min. Optimization and Experimental Research of Processing Parameters in Stretch Forming of Wing Leading Edge Skin[J]. Journal of Plasticity Engineering,2011,18(4):74—78.
- BAHLOUL R, MKADDEM A, Dal SANTO P, et al. Sheet Metal Bending Optimization Using Response Surface Method, Numerical Simulation and Design of Experiments [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48: 991-1003.
- [8] JANSSON T, ANDERSSON A, NILSSON L. Optimization of Draw-in for an Automotive Sheet Metal Part an Evaluation Using Surrogate Models and Response Surfaces [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159;426-434.
- [9] MKADDEMA A, BAHLOUL R. Experimental and Numerical Optimization of the Sheet Products Geometry Using Response Surface Methodology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189:441-449.
- [10] HE De-hua, LI Dong-sheng, LI Xiao-qiang. Optimization on Springback Reduction in Cold Stretch Forming of Titanumalloy Aircraft Skin[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20:2350-2357.

- [3] FENG Gao, QIAN Yi-yu. Micromechanical Properties of Heterogeneous Aluminum-silicon Brazed Joint [J]. Materials Letters, 2004(58):2861—2866.
- [4] KELVII Wei Guo. Influence of In Situ Reaction on the Microstructure of SiCp/AlSi7Mg Welded by Nd: YAG Laser with Ti Filler[J]. JMEPEG, 2010(19):52-58.
- [5] 崔旭明,李刘合,张彦华. 激光-电弧复合热源焊接[J]. 焊接技术,2003,32(2):19—21.
 CUI Xu-min,LI Liu-he,ZHANG Yan-hua. Laser-arc Hybrid Welding[J]. Welding Technology,2003,32(2):19—21.
- [6] 武传松.焊接热过程与熔池形状[M].北京:机械工业出版社,2007.

WU Chuan-song. Welding Thermal Process and Pool Shape
[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.

- [7] LEE W B, YEON Y M, JUNG S B. The Improvement of Mechanical Properties of Friction Stir Welded A356 Al Alloy
 [J]. Materials Science and Engineering, 2003(355):154-159.
- [8] 李冬林. 基于 ANSYS 软件焊接温度场应力场模拟研究
 [J]. 湖北工业大学学报,2005,20(5):81—83.
 LI Dong-lin. Simulation Research for Welding Temperature and Stress Field Based on ANSYS[J]. Journal of Hubei U-niversity of Technology,2005,20(5):81—83.
- [9] 张旭东. CO₂ 激光-MIG 同轴复合焊方法及铝合金焊接的研究[J].应用激光,2005,25(1):1—3. ZHANG Xu-dong. Coaxial Hybrid CO₂ Laser-MIG Welding System and Its Application in Welding of Aluminum[J]. Applied Laser,2005,25(1):1—3.
- [10] AMIRIZAD M, KOKABI A H, GHARACHEH M A, et al. E-

(上接第61页)

- [11] HE De-hua, LI Xiao-qiang, LI Dong-sheng. Process Design for Multi-stage Stretch Forming of Aluminum Alloy Aircraft Skin[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20:1053-1058.
- [12] O'DONNELL M. Finite Element Modeling of a Multi-stage Stretch-forming Operation Using Aerospace Alloys [D]. Belfast:University of Ulster, 2003.
- [13] HEUNG K, SEOK H. FEM-based Optimum Design of Multistage Deep Drawing Process of Molybdenum Sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184 (1/

valuation of Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welded A356+15% SiCp Cast Composite[J]. Materials Letters,2006(60):565-568.

- [11] XU C L, JIANG Q C. Morphologies of Primary Silicon in Hypereutectic Al—Sialloys with Melt Overheating Temperature and Cooling Rate[J]. Materials Science and Engineering A,2006(437):451-455.
- [12] 张春平,李萌盛,秦琳. 基于 ANSYS 的异种钢焊接残余 应力的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学 版),2003,26(3):460—463.
 ZHANG Chun-ping, LI Meng-sheng, QIN Lin. Numerical Simulation of Residual Stress in Dissimilar Steel Based on ANSYS[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2003,26(3):460—463.
- [13] CHEN Ming-hua, LI Chen-bin, LIU Li-ming. Research of Discharge Status of Arc Plasma Enhanced by Laser Enhanced Research [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39 (7).
- [14] 吴圣川,刘建华. 铝合金激光-电弧复合焊的有限元数值
 [J]. 模拟航空制造技术,2005(12):74—76.
 WU Shen-chuang, LIU Jian-hua. Finite Element Simulation on Laser-arc Hybrid Welding of Aluminum Alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2005(12):74—76.
- [15] GHOSH M, KUMAR K, KAILAS S V, et al. Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Dissimilar Aluminum Alloys[J]. Materials and Design, 2010(31):3033-3037.
- MA Zhi-hua, CHEN Dong-gao, TAN Bin. Effect of Laser-MIG Hybrid Welding of 5052 Alloy on Weld Forming[J].
 Material Science and Engineering, 2012, 2(35):76-80.

3):354-362.

- [14] CAI Zhong-yi, WANG Shao-hui, XU Xu-dong. Numerical Simulation for the Multi-point Stretch Forming Process of Sheet Metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209:396—407.
- [15] ESMAEILIZADEH R, KHALILI K, MOHAMMADSADEGHI B, et al. Simulated and Experimental Investigation of Stretch Sheet Forming of Commercial AA1200 Aluminum Alloy
 [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014,24(2):484-490.