飞机复杂曲面蒙皮零件充液拉深技术研究

曾一畔¹, 董锦亮¹, 宋炳毅², 王储², 孟宝², 万敏²

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092; 2. 北京航空航天大学,北京 100191)

摘要:目的 研究充液拉深工艺参数对飞机复杂曲面蒙皮零件成形质量的影响规律。方法 以飞机灯罩蒙皮 零件为研究对象,结合材料力学特性分析了零件的工艺性。基于破裂和起皱失稳条件理论研究了零件的加 载工艺窗口,利用有限元方法分析了零起皱和破裂等缺陷,通过优化工艺参数和拉延筋参数获得了合格的 构件。结果 基于仿真优化结果,进行了模具设计和工艺验证实验,分析了实际充液拉深过程中缺陷产生的 原因,为落差较大蒙皮零件的精密制造提供参考。结论 对于具有多特征的复杂零部件,过渡曲面易产生起 皱缺陷,仅通过调整液室压力或毛料尺寸的方法无法在保证不发生拉裂和贴模问题的前提下消除起皱缺陷。 通过设置拉延筋来增加材料流动阻力、控制材料流动,可以消除过渡区域的起皱缺陷。

关键词:复杂曲面构件;液压成形;加载路径;缺陷分析

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.03.006

中图分类号:TG394 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2019)03-0059-07

Hydrodynamic Deep Drawing for Complex Curved Skin Part of Aircraft

ZENG Yi-pan¹, DONG Jin-liang¹, SONG Bing-yi², WANG Chu², MENG Bao², WAN Min²

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The paper aims to research the influencing rules of hydrodynamic deep drawing parameters on the forming quality of complex curved skin parts of aircraft. The aircraft lampshade skin parts were taken as the research objects to analyze the manufacturability of parts in combination with the mechanical characteristics of materials. The loading process window of parts was researched based on the fracture and wrinkling instability condition theory. The finite element analysis was utilized to explore defects such as wrinkle and crack, and the qualified components were obtained by optimizing process parameters and drawbead parameters. Based on the simulation and optimization results, the die design and process test were conducted, and the cause of the defect formation in the hydrodynamic deep drawing was investigated. This research can be thus used as a reference for the precise manufacturing of complex curved parts. For complex parts of multi-characteristics, excessive curve might generate wrinkle. Adjustment of cavity pressure or blank size cannot remove the wrinkle without fracture or die bonding. Increasing the flow resistance of material and controlling the material flow through setting drawbead can remove the wrinkle in the transition area.

KEY WORDS: complex curved part; hydraulic forming; loading path; defect analysis

充液拉深成形是指使用油或乳化液代替传统刚 性凹模,使坯料在高压液体传力介质作用下贴合凸模 的成形工艺,属于柔性介质辅助成形技术^[1-3]。与传 统刚模拉深方法相比,具有提高板材成形极限、抑制

收稿日期: 2019-04-22

- 基金项目:四川省重点研发项目(2018G20063)
- 作者简介:曾一畔(1989—),男,硕士,工程师,主要研究方向为航空材料先进加工技术、数字化技术。

通讯作者:孟宝(1985-),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为精密成形与微结构制造技术。

板材内皱等优点,可以显著提高零件的形状和尺寸精 度、表面质量,同时降低模具成本[4-7],尤其适合于 航空航天领域中精度高、批量小、品种多的复杂曲面 蒙皮类构件的成形制造。

飞机零件呈现出结构复杂、落差深、特征变化幅 度大、局部拉深系数较小等特点,使用传统工艺成形 时,零件的复杂型面或小特征尺寸难以保证,成形精 度和疲劳寿命不高,表面质量差,且中间需要多次退 火工艺,工序复杂,模具成本高。为此文中以灯罩蒙 皮零件为研究对象,对复合特征曲面构件充液成形的 工艺过程进行了有限元模拟仿真,分析了关键工艺参 数对成形结果的影响,研究了复杂曲面零件充液成形 的失效形式,优化了坯料、模具和关键工艺参数,在 此基础上进行了模具设计和工艺验证实验。

零件成形工艺分析 1

图 1a 为某型号飞机灯罩蒙皮零件, 该零件沿长 度方向高度变化明显, 落差很深, 若充液拉深成形初 期液室压力过小,预胀储料不足,将导致零件顶部剧 烈减薄甚至发生破裂失稳。相反地,若成形初期液室 压力过大,预胀储料过多且随着成形深度的增加无法 转移,将导致零件中部产生内皱。为使该复杂零件能 采用充液成形工艺制造,需要添加必要的工艺补充面, 将零件两端开口应用光滑曲面补充,并调整零件冲压 角度,工艺补充后的零件如图 1b 所示。为保证零件 成形高度,工艺补充后零件的成形高度最小应为112 mm, 如图 1c 所示。工艺补充后的零件根据截面外轮 廓特征分为锥壁区、圆角区和直壁区3个区域。



图 1 灯罩蒙皮零件 Fig.1 Lampshade skin part

2 工艺参数设计

2.1 材料力学性能

该零件使用的材料为铝合金 LY12M, 厚度为 1.5

mm。3个方向的力学性能指标见表1。为了判定成形 过程中的破裂失稳,采用不同宽度的胀形试件测定了 不同应变路径下的破裂应变,获得了成形极限曲线, 如图2所示。

| Tab.1 Mechanical properties of LY12-M aluminum alloy sheet | | | | | | | |
|--|----------------|---------------------------|----------------------------|---------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| 方向/(°) | 屈服强度 σs/MPa | 抗拉强度 _の /MPa | 均匀伸长率 _{Agt} /% | 断裂伸长率 At/% | 厚向异性 系数 <i>r</i> | 应变强化 系数 <i>K</i> /MPa | 应变强化 指数 <i>n</i> |
| 0 | 81.20 | 186.26 | 16.72 | 19.42 | 0.7235 | 295.93 | 0.2244 |
| 45 | 79.787 | 173.477 | 17.15 | 19.76 | 0.7842 | 276.96 | 0.2145 |
| 90 | 80.09 | 174.087 | 15.987 | 18.16 | 0.4982 | 276.22 | 0.2009 |

IV12_M 铝合全板料的力学性能参数

2.2 材料屈服准则

在有限元仿真过程中,屈服准则用于判断材料是 否进入塑性状态,对仿真结果有着重要影响^[8]。目前 在板料成形领域较为常用的屈服准则主要包括 Hill 系列、Barlat 系列等准则。研究表明,三参数 Barlat 屈服准则具有较好的计算精度,因此,文中采用 eta/DYNAFORM 软件内置的三参数 Barlat 屈服准则 (36[#]材料模型)来描述铝合金板材 LY12M 在复杂加 载条件下的宏观力学特性,即:

$$f = a | K_1 + K_2 |^m + a | K_1 - K_2 |^m + (2-a) | 2K_2 |^m - 2\sigma_s^m$$
(1)

$$K_{1} = \frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2}, K_{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - h\sigma_{yy}}{2}\right)^{2} + p^{2}\sigma_{xy}^{2}} \quad (2)$$

式中:m为 Barlat 指数,对于面心立方晶格(FCC) 材料 m=8, 对于体心立方晶格(BCC) 材料 m=6, 当 m=2 时式(1)即为 Hill48 屈服准则; x 和 y 分别为 轧制方向和垂直轧制方向; a, h, p 为表征各向异性的 材料参数,可根据应力计算的方法或各向异性指数r0, r45, r90 计算得出,有:



图 2 LY12M 铝合金板材成形极限 Fig.2 Forming limit of LY12M aluminum alloy sheet

$$a = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \cdot \frac{r_{90}}{1 + r_{90}}}$$
(3)

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \cdot \frac{1 + r_{90}}{r_{90}}} \tag{4}$$

式中的p值没有解析解,需要通过下式迭代求解:

$$\frac{2m\sigma_{\rm s}^m}{\left(\frac{\partial f}{\partial\sigma_{xx}} + \frac{\partial f}{\partial\sigma_{yy}}\right)\sigma_{45}} - 1 - r_{45} = g(p) \tag{5}$$

式中: σ_{45} 是材料在 45°轧制方向的屈服强度。同时,材料的强化模型使用 Hollomon 模型,即 $\sigma_i = K \varepsilon_i^n$ 。

2.3 加载工艺窗口设计

液室压力加载路径是充液成形过程的核心工艺 参数之一,其表示拉深位移与液室压力之间的关系。 对于特定的零件, 液室压力路径存在一个适合零件成 形的区间[9],此区间称为加载工艺窗口,许多学者都 对其进行了研究[10-11]。拉深系数越小,加载工艺窗 口越窄。如果加载工艺窗口的上限与下限相交,则说 明零件拉深系数过小,无法通过液压成形一次成形, 因此加载工艺窗口的确定对零件能否成形至关重要。 计算加载工艺窗口上限的原则是危险截面的最大拉 应力不超过传力区的抗拉强度。工艺窗口下限的确定 原则是, 液室压力刚好能够支撑板料脱离凹模圆角, 从而产生溢流润滑作用。根据上述原则,再结合板料 变形过程中不同区域应力即可求出液室压力上限和 对应的曲率半径。同时,利用能量法求解高度过渡区 的起皱失稳工艺窗口。通过输入材料、模具和板料参 数,设置初值和增量步,利用数值积分求解方程,得 到该灯罩零件的工艺窗口见图。可见该灯罩蒙皮零件 充液成形工艺窗口中起皱曲线与破裂曲线相交叉, 仅 凭调整液室压力加载路径无法成形出无缺陷的零件。 另一方面,该零件的破裂窗口较宽,且起皱窗口相对 较窄,因此,可通过添加拉延筋的方法拓宽该零件的 工艺窗口,以成形出合格零件。



图 3 液室压力加载工艺窗口 Fig.3 Process window for applying cavity pressure

3 成形工艺仿真分析

3.1 分析设置

在完成工艺补充后,设计模具间隙为 1.8 mm, 凹模法兰保证大于毛料尺寸,凹模和压边圈圆角半径 均为 6 mm。将模具模型导入 DYNAFMORM 软件中 进行初始网格划分,凸、凹模及压边圈视为刚体,板 料单元类型选择常用的 Belytschko-Tsay 壳单元,在 求解过程中软件的自适应网格划分技术会根据变形 情况对板料网格进行进一步细化,导入并定位后的结 果见图 4。

利用 DYNAFRORM 软件的 Mstep 模块进行毛料 初始形状与尺寸的估算,如图 5 所示。可见,该零件 的毛料外形不规则,长度方向和宽向尺寸分别为 560 mm 和 330 mm。利用 Mstep 模块反算的毛料形状仅 可作为下料参考,实际毛料尺寸需根据缺陷情况进行 调整与优化。

3.2 不同工艺参数对成形质量的影响

充液拉深主要包括压边、初始反胀、成形中、成 形结束4个阶段,如图6所示。其中初始反胀是指在 凸模未与板料建立接触时,施加液室压力从而使板料 部分贴靠凸模。这样不仅使成形过程中板料与凹模圆 角脱离接触从而减小摩擦力、提高成形极限,而且增 大了板料与凸模的接触面积,从而产生了与凸模间的 有益摩擦,使板料不容易与凸模产生相对移动从而发 生破裂^[13]。

起皱是一种由压应力作用下的失稳引起的屈曲 现象^[14],分为内皱和外皱。其中外皱是指法兰部位环 向压应力导致的起皱,内皱是指凸模与凹模之间由于 缺少支撑导致的起皱^[15]。由于零件曲面高度变化较大, 若成形初期液室压力过大,预胀储料过量,将容易导致 零件中部产生内皱。基于工艺窗口的分析,选择图 7a



d 整体定位





图 5 利用 Mstep 反算毛料模型 Fig.5 Blank model calculated by Mstep

所示的液室压力加载路径,模拟结果见图 7b,可见 零件的落差过渡区产生了明显的内皱。基于工艺窗口 分析,仅靠调整液室压力无法在保证不发生拉裂的条 件下消除起皱缺陷。这是因为一方面液室压力加载路 径需要保证成形初期和后期的液室压力不能过大,另 一方面零件的拉深系数又限制液室压力不能过低,尤 其在成形后期,若液室压力过低,将造成凸模圆角附 近处破裂和不贴模。



图 6 液压成形过程 Fig.6 Process of hydroforming forming

同时,通过调整毛料形状及尺寸,发现增大毛料 中段对应零件高度过渡区域两侧尺寸可减少内皱的 产生,但是零件顶部过渡区域内皱却无法消除,如图 8 所示。



图 7 零件顶部过渡区域起皱 Fig.7 Wrinkling of transition zone at part top



图 8 不同形状尺寸毛料仿真结果 Fig.8 Simulation results under different blank shapes

3.3 设置拉延筋

基于工艺窗口和有限元模拟分析, 紧靠单独调整 工艺参数或毛料形状难以消除内皱, 因此考虑设置拉 延筋。在成形初始反胀阶段, 图 9 中 A、B 区在液室 压力作用下同样聚集材料, 而 B 区成形高度明显低于 A 区。B 区所需材料较少, 这样在 A 区和 B 区的交 界区域 I、II 部分材料随着成形的进行会向 B 区流动, 多余材料就会在液室压力作用下形成长条状内皱。这 种内皱一旦产生,将无法消除,导致零件报废。要防 止内皱产生,就要求成形初期 C 区和 D 区的材料不 能向 B 区流动。为进一步限制材料流动,可以在 C 和 D 区处设置拉延筋来增加材料流动阻力, 抑制内 皱的产生。



图 9 起皱产生原理 Fig.9 Mechanism of wrinkling formation

在分析起皱机理的基础上,增设压延筋后的模具 见 10a 和 10b,有限元仿真结果见图 c。可见,通过 引入拉延筋和合理优化液室压力加载路径,零件内皱 和起皱缺陷可以消除。



图 10 增设压延筋后结果 Fig.10 Results after adding drawbeads

4 充液拉深工艺实验

4.1 实验结果

采用图 7a 所示的液室压力加载路径以及图 10

所示的拉延筋,成形的灯罩蒙皮零件见图 la。截面 厚度测量位置及厚度分布见图 llb。可见,零件没有 发生破裂及起皱缺陷,且厚度分布与数值模拟结果 趋势一致,最大误差不超过 l8%,证明了上述分析 结果的有效性,采用带拉延筋的充液拉深工艺方案 可行。

4.2 成形缺陷分析

成形过程中可能出现的主要缺陷包括零件顶部 区域过度减薄甚至破裂,以及零件过渡区产生的内 皱,如图 12 所示。灯罩蒙皮零件由于法兰,当压边 力过大时材料将流动困难,无法及时补充到液室型 腔中,造成材料过度减薄以致破裂。另一方面,零 件高度落差大,随着成形过程的进行,悬空区域不 断变化,材料流动不均,抗起皱能力下降,若不采 用拉延筋控制材料流动,就会在过渡区域产生内皱, 如图 12b 所示。



图 11 灯罩蒙皮成形件 Fig.11 Formed parts of lampshade skin



a 破裂失效



b 起皱失效

图 12 破裂及起皱缺陷 Fig.12 Crack and wrinkling defects

5 结论

分析了铝合金灯罩蒙皮零件充液拉深成形的工 艺性,通过工艺窗口分析和数值模拟方法研究了成形 过程中压延筋、液室压力加载路径和不同毛料形状尺 寸对成形质量的影响规律,确定了工艺方案,得出以 下几点结论。

 为防止毛料过度减薄而破裂,需要适当调整 凸模圆角尺寸,增大受力面积,减小毛料抗力,转移 危险截面。液压成形后期,液室压力不宜过大,防止 零件在凹模圆角处破裂。

2)增大毛料中段两侧尺寸可减少内皱的产生, 但是零件顶部过渡区域内皱无法消除。调整液室压力 的方法无法在保证不发生拉裂和贴模问题的前提下 消除起皱缺陷。

3) 通过设置拉延筋来增加材料流动阻力、控制

材料流动,可以消除灯罩零件的起皱缺陷。经实验验证,在合适的液室压力加载路径和拉延筋参数下零件没有发生破裂或起皱缺陷,厚度分布与有限元分析趋势一致,最大误差不超过18%,证明了在充液拉深工艺中使用拉延筋消除复杂零件内皱的可行性。

参考文献:

- ZHANG S H. Developments in Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 91(1/2/3): 236-244.
- [2] ZHANG S H, DANCKERT J. Development of Hydro-mechanical Deep Drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1/2/3): 14-25.
- [3] ZHANG S, WANG Z, XU Y, et al. Recent Developments in Sheet Hydroforming Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1/2/3): 237–241.
- [4] WANG J, YANG C K. Failure Analysis of Hydroform-

ing of Sandwich Panels[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(2): 256-262.

- [5] MENG B, WAN M, WU X, et al. Inner Wrinkling Control in Hydrodynamic Deep Drawing of an Irregular Surface Part Using Drawbeads[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(3): 697-707.
- [6] YUAN S, ZHANG W. Analysis of Shape Variation during Hydro-forming of Ellipsoidal Shells with Double Generating Lines[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 107: 180–187.
- [7] ASSEMPOUR A, TAGHIPOUR E. The Effect of Normal Stress on Hydro-mechanical Deep Drawing Process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53(6): 407-416.
- [8] PALUMBO G, PIGLIONICO V, PICCININNI A, et al. Evaluation of the Optimal Working Conditions for the Warm Sheet HydroForming Taking into Account The Yielding Condition[J]. Materials & Design, 2016, 91: 411-423.
- [9] JALIL A, GOLLO M H, SHEIKHI M M, et al. Hydrodynamic Deep Drawing of Double Layered Conical Cups[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(1): 237-247.
- [10] YAGHOOBI A, BASERI H, BAKHSHI-JOOYBARI M, et al. Pressure Path Optimization of Hydrodynamic

Deep Drawing of Cylindrical-conical Parts[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(12): 2095—2100.

- [11] HASHEMI A, GOLLO M H, SEYEDKASHI S H. Process Window Diagram of Conical Cups in Hydrodynamic DeepDrawing Assisted by Radial Pressure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(9): 3064—3071.
- [12] BELYTSCHKO T, LIN J I, CHEN-SHYH T. Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1984, 42(2): 225-251.
- [13] MENG B, WAN M, YUAN S, et al. Influence of Cavity Pressure on Hydrodynamic Deep Drawing of Aluminum Alloy Rectangular Box with Wide Flange[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 77: 217– 226.
- [14] SHAFAAT M A, ABBASI M, KETABCHI M. Investigation into Wall Wrinkling in Deep Drawing Process of Conical Cups[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1783—1795.
- [15] WANG C T, KINZEL G, ALTAN T. Wrinkling Criterion for an Anisotropic Shell with Compound Curvatures in Sheet Forming[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1994, 36(10): 945–960.