

Dynaform-based Simulation and Rebound Prediction for Titanium Alloy Sheet Stamping Forming Process

Wei Wang

AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710089, China

Abstract

Titanium alloys, renowned for their exceptional specific strength, corrosion resistance, and high-temperature performance, are extensively utilized in advanced manufacturing sectors including aerospace, automotive, and biomedical applications. However, titanium alloy sheets often exhibit significant springback and wrinkling during stamping processes due to their limited plasticity and pronounced elastic recovery, posing substantial challenges for mold design and dimensional accuracy control. This study employs the Dynaform finite element simulation platform to conduct numerical modeling and springback prediction for TC4 titanium alloy sheet stamping. Through constructing a 3D finite element model, we investigate the influence of forming parameters (including blank holder force, friction coefficient, die clearance, and forming speed) on material quality. The deformation mechanisms are analyzed using a combined elastoplastic constitutive model and springback correction algorithm. Results demonstrate that optimizing blank holder force, improving friction conditions, and adjusting die clearance can significantly reduce springback while enhancing part formation accuracy. This research provides theoretical foundations and practical guidance for optimizing titanium alloy stamping dies and achieving high-precision forming processes.

Keywords

Dynaform; Titanium alloy sheet; Stamping forming; Finite element simulation; Rebound prediction

基于 Dynaform 的钛合金板材冲压成形过程仿真与回弹预测研究

王威

中航西安飞机工业集团股份有限公司, 中国·陕西 西安 710089

摘要

钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性与高温性能, 被广泛应用于航空航天、汽车及生物医疗等高端制造领域。然而, 钛合金板材在冲压成形过程中因塑性差、弹性恢复大, 极易产生回弹与起皱等缺陷, 给模具设计与尺寸精度控制带来较大挑战。本文基于有限元仿真平台 Dynaform, 对 TC4 钛合金板材的冲压成形过程进行数值模拟与回弹预测研究。通过建立三维有限元模型, 研究成形工艺参数(如压边力、摩擦系数、模具间隙及成形速度)对成形质量的影响规律, 并采用弹塑性本构模型与回弹修正算法分析其变形机理。研究结果表明, 适当提高压边力、优化摩擦条件与模具间隙可显著降低回弹量, 提高制件成形精度。本文的研究为钛合金冲压模具优化设计及高精度成形提供了理论依据与工艺参考。

关键词

Dynaform; 钛合金板材; 冲压成形; 有限元仿真; 回弹预测

1 引言

钛合金因其轻质高强和良好的耐腐蚀性, 被视为新一代高性能结构材料。然而, 其高弹性模量与低塑性特性使传统冲压成形工艺面临显著困难。相比钢材与铝合金, 钛合金在塑性变形过程中更易发生回弹与裂纹, 导致成形精度下降与后续装配困难。传统经验法调整工艺参数效率低、周期长, 难以满足现代制造对精度与效率的双重要求。近年

来, 有限元仿真技术在金属成形领域得到广泛应用, 尤其是 Dynaform 平台在钣金冲压模拟方面具备较高精度与可视化优势。其内置的 LS-DYNA 求解器可实现对复杂接触、材料硬化及回弹行为的全过程分析。本文以 TC4 钛合金板材为研究对象, 通过 Dynaform 建立冲压成形仿真模型, 对工艺参数、材料属性及边界条件进行系统分析, 揭示回弹机理并提出优化控制策略。研究目标在于建立仿真预测—参数优化—实验验证一体化的成形精度控制方法, 为钛合金板材高效、高精度冲压提供理论与技术支撑。

【作者简介】王威(2000—), 男, 本科, 助理工程师, 从事钣金成形, 塑性成形研究。

2 钛合金板材冲压成形特性分析

2.1 材料性能与成形难点

TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金属于典型 $\alpha + \beta$ 型双相合金, 兼具高比强度与优良耐腐蚀性, 是航空航天与高端装备制造的关键材料。但其室温塑性差、应变硬化率高及摩擦系数大, 导致在冲压成形中极易出现局部应力集中与变形不均。钛合金的高回弹特性使制件在卸载后尺寸偏差显著, 难以保持设计形状, 模具几何补偿与回弹控制成为成形过程中的核心难题。此外, 其热导率低、加工硬化明显, 使模具磨损加剧, 进一步降低成形稳定性, 对工艺参数匹配与模具设计精度提出更高要求。

2.2 冲压变形机理

钛合金板材在冲压过程中依次经历弹性变形、塑性流动与卸载回弹三个阶段, 其应力-应变曲线具有显著的非线性特征。变形初期的应力积累和屈服后不均匀流动导致内应力分布复杂, 卸载阶段的弹性恢复使制件产生较大回弹。回弹量与材料的弹性模量、屈服强度及残余应力分布密切相关, 而模具间隙与摩擦状态亦对应力传递路径产生重要影响。若摩擦系数过大, 会限制材料流动并引发开裂; 若过小, 则导致滑移过度和厚度减薄。由此可见, 钛合金冲压变形的本质是多因素耦合下的非线性弹塑性过程。

2.3 有限元仿真在钛合金成形中的应用价值

传统实验法难以捕捉钛合金冲压过程中应力、应变及厚度变化的瞬态规律, 成本高且周期长。有限元仿真为研究其复杂变形提供了高效手段。基于 Dynaform 平台, 可在虚拟环境中模拟不同工艺参数下的应力场、应变场及厚度分布规律, 预测成形极限图 (FLD) 并开展回弹分析, 实现对工艺窗口的精确控制。仿真技术不仅可用于优化模具间隙、压边力和摩擦条件, 还能在成形前预估潜在缺陷, 从而大幅减少试模次数与材料浪费, 为钛合金高精度冲压提供理论与技术支持。

3 仿真模型建立与参数设定

3.1 模型构建与材料参数

基于 Dynaform 平台建立钛合金板材冲压成形的三维有限元仿真模型, 以确保对复杂变形与回弹行为的高精度描述。板材选用 TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金, 厚度为 1.0 mm, 模型采用四节点壳单元以平衡计算精度与效率。材料行为采用各向同性弹塑性本构模型, 参数取弹性模量 $E=110$ GPa、屈服强度 $\sigma_s=900$ MPa、泊松比 $\nu=0.34$, 硬化规律遵循幂指数形式 $\sigma=K\varepsilon^n$ 以表征其应变强化效应。为反映钛合金在成形过程中的应力路径依赖性, 模型引入混合硬化项 (各向同性+随动硬化), 以提升对反复加载及卸载阶段的描述能力。模具、凹模与压边圈均设定为刚体单元, 以简化求解过程并提高计算稳定性。网格划分方面, 采用区域加密策略, 弯曲半径处最小单元尺寸控制在 0.8 mm, 以便准确捕捉应变梯度

与厚度变化, 为后续回弹预测提供精确基础。

3.2 边界条件与加载方式

模型设置的边界条件严格遵循实际工艺约束, 确保仿真结果与实验的一致性。冲头定义为刚性体, 以恒定下压速度加载, 模拟典型深拉成形过程。板料周边节点施加固定约束以防止滑移和位移畸变。摩擦行为采用库仑摩擦模型描述, 摩擦系数范围设定为 0.08~0.15, 以反映钛合金与模具接触的真实摩擦特性。压边力通过加载模块施加, 控制区间为 20~60 kN, 利用多组仿真对比不同压边力条件下的应力场与回弹响应。为了准确模拟回弹过程, 在成形结束后切换至静力求解阶段, 对卸载过程进行非线性弹塑性分析, 以捕捉弹性恢复行为。计算中引入自适应时间步长控制及接触刚度调整, 以避免卸载阶段出现数值震荡, 从而提高回弹预测的稳定性与可靠性。

3.3 仿真验证与实验对比

为验证 Dynaform 仿真模型的精度与适用性, 本文选取典型 U 形件作为研究对象, 在相同的材料 (TC4 钛合金)、几何参数及工艺条件下开展冲压成形实验。实验采用高精度模具与伺服液压冲压机, 加载路径及速度与仿真设定保持一致。为确保实验数据的准确性, 利用数字图像相关 (DIC) 技术实时测量应变分布, 并通过激光扫描仪获取成形件的三维形貌与厚度分布数据, 对仿真预测结果进行对比分析。结果表明, 仿真计算得到的应力集中区域与实验中观测到的实际变形区域高度吻合, 厚度变化趋势一致, 误差控制在 8% 以内。仿真预测的最大应变位置与实验测得值偏差小于 1 mm, 说明模型对应变路径的捕捉精度较高。同时, 仿真得到的回弹角度与实测值偏差仅为 0.3° , 表明 Dynaform 在描述钛合金板料的弹塑性变形与卸载行为方面具有较高可靠性。综上所述, 该仿真模型在应力场、应变场及回弹预测方面均表现出良好的一致性与稳定性, 为后续工艺参数优化及回弹控制研究提供了坚实的理论与技术基础, 证明了 Dynaform 在钛合金冲压仿真中的工程可行性与应用价值。

4 工艺参数对成形质量与回弹的影响

4.1 压边力的影响

压边力在钛合金板材冲压成形中起到稳定材料流动与防止起皱的关键作用。过低的压边力使板料边缘约束不足, 导致材料在凹模圆角处发生径向回流, 引起起皱或局部褶皱; 过高的压边力又会增加拉应力水平, 使变形区的应力集中加剧, 容易诱发裂纹或局部破裂。仿真结果表明, 压边力对成形稳定性和回弹控制具有显著影响。当压边力控制在约 40 kN 时, U 形件的厚度分布较为均匀, 材料流动平衡, 残余应力梯度较小, 回弹角度明显降低。进一步分析发现, 压边力增加可使中性层位置向板料内侧移动, 减少弹性恢复区间, 进而改善形状精度。因此, 在钛合金冲压中应建立压边力自适应控制机制, 实现局部加载与动态调节, 以兼顾防皱

与防裂的成形要求。

4.2 摩擦系数与模具间隙的影响

摩擦系数与模具间隙直接决定板料的流动行为与应力分布,对成形精度与回弹特性具有协同影响。摩擦系数过大时,材料与模具间的接触阻力增加,导致局部应力集中和流动不均;摩擦系数过小时,材料滑移加剧,厚度减薄明显,增加了开裂风险。仿真与实验结果表明,当摩擦系数控制在0.1左右时,板料的应力传递最为稳定,成形质量最佳。模具间隙的合理设计亦是关键参数,间隙过大会导致材料支撑不足,造成回弹角度增大;间隙过小则增加摩擦热与应变集中,引起裂纹及表面损伤。研究发现,模具间隙取板厚的1.05~1.1倍时,可有效兼顾成形充填性与摩擦稳定性,显著改善厚度均匀性与回弹一致性,为模具优化设计提供参考依据。

4.3 成形速度与温度效应

成形速度和温度条件对钛合金的变形机制和应力释放特征具有显著影响。较高的冲压速度使应变速率上升,材料流动时间缩短,导致应力集中和裂纹风险增大;适度降低成形速度可改善应变分布,使塑性变形更充分,从而减轻回弹。仿真分析表明,在中低速区间,钛合金的变形均匀性显著提升,卸载后的残余应力更易均衡分布。此外,温度是改善钛合金塑性的关键因素,升温可显著降低屈服强度与弹性模量,促进应变协调,减轻弹性恢复效应。实际生产中,采用温成形或热—冷复合成形工艺,在400~600℃范围内可有效改善材料流动性并降低回弹量30%以上。研究结果表明,通过成形速度控制与温度辅助相结合,可实现应力释放的过程调控,从根本上提高钛合金板材成形精度与表面质量。

5 回弹预测与控制机制分析

5.1 回弹预测模型建立

在Dynaform平台中,采用成形-卸载两步法建立回弹预测流程:先以显式求解获得成形阶段的应力-应变与厚度分布,再在回弹模块中切换至隐式或准静态卸载,计算弹塑性恢复量。材料模型方面,以各向同性/混合硬化(结合各向同性与随动硬化)表征钛合金的Bauschinger效应与应力路径变化,配合应变率敏感项提高对成形历史的记忆能力。为减小由网格畸变与接触刚度引起的数值偏差,采用壳单元减积分并进行网格敏感性分析,确定关键弯曲区加密网格与合理的接触惩罚系数。结果显示,弯曲区的拉压残余应力不均衡是回弹的主导因素;在此基础上引入非线性弹性恢复修正(考虑卸载曲线非线性与路径相关性),可将角度回弹预测误差由~15%降至~7%以内,有效提升精度与稳定性。

5.2 回弹分布规律与敏感性分析

仿真揭示回弹呈空间非均匀分布:件壁中部与转角R处最显著,源于这两类区域的应力梯度与弯曲/反弯组合变

形最为剧烈。通过单因素与多因素正交试验对压边力、摩擦系数、模具间隙、成形速度进行敏感性排序,得到压边力的影响程度最高,其次为摩擦系数与间隙,速度影响相对较弱。在压边力过低时,法向约束不足导致材料回流与起皱倾向增强,卸载后产生较大的角度回弹;压边力提升至临界区间可抑制中性层迁移与厚度不均,从而降低回弹。摩擦系数在0.08—0.12区间内有利于稳定材料流动、减小切向滑移差;间隙取 $t\sim 1.1t$ 可兼顾充填与摩擦热控制。敏感性结果为参数优选与补偿量分配提供了量化依据。

5.3 回弹控制策略

综合采取“参数优化+几何补偿+工艺辅助”的多层控制路径。参数侧,基于敏感性结果确定压边力闭环控制区间与分区加载策略,配合润滑管理使摩擦系数稳定在目标窗口;几何侧,采用迭代补偿法对型面进行反向偏置,在Dynaform中构建“补偿—仿真—评估”内环,直至关键截面回弹误差 $< 1\text{ mm}$ 、角度误差 $< 0.5^\circ$ 。为避免过度补偿导致的二次偏差,引入区域化权重与曲率约束,保证型面连续性。工艺侧,针对钛合金室温塑性受限与回弹大的特性,引入温成形/热—冷复合压边、保压卸载与定压整形(restrike)等手段,必要时叠加弹性垫或局部压料筋以稳定材料流动。进一步地,结合数据驱动的代理模型与贝叶斯优化,实现多参数联动寻优与快速补偿量预测,为高精度、可复制的回弹控制提供工程化方案。

6 结语

本研究基于Dynaform仿真平台,对TC4钛合金板材的冲压成形过程进行了系统分析与回弹预测。结果表明,合理的压边力、摩擦系数及模具间隙参数可有效控制回弹,提高制件成形质量。通过有限元仿真技术,不仅可在设计阶段预测缺陷、优化工艺,还能减少试模次数与生产成本。未来研究应进一步结合温热复合成形与机器学习算法,构建多变量预测模型,实现从经验调参到智能决策的转变。该研究为钛合金复杂构件的高精度成形提供了可行路径,对提升我国高端制造业的数字化设计与工艺优化水平具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 翟林,韩国泰.基于Dynaform与Abaqus铝合金冲压成型及模具结构联合仿真分析[J].机床与液压,2024,52(13):129-134.
- [2] 尤晋,龚红英,刘尚保,等.基于Dynaform及响应面法的6016铝合金散热壳体冲压成形及优化[J].锻压技术,2022,47(03):54-58.
- [3] 刘强,俞国燕,梅端.基于Dynaform与RBF-NSGA-II算法的冲压成形工艺参数多目标优化[J].塑性工程学报,2020,27(03):16-25.
- [4] 喻忠.基于DynaForm冲压件成形性分析[J].汽车实用技术,2018,(21):91-92+100.
- [5] 何斌,邢昌.基于Dynaform的回弹控制及优化设计[J].汽车实用技术,2018,(21):79-81.