

钛合金型材多点三维热拉弯成形工艺研究

李 岚, 张 鑫, 代旭东

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘 要 钛合金型材质量轻、强度高, 在航空航天、高速列车等领域应用十分广泛。但常温下钛合金因自身特性成形困难, 其中, 热拉弯工艺可有效解决这类问题。基于此, 本文对多点三维热拉弯成形工艺加以概述, 并详细介绍材料本构模型与数值仿真, 还介绍了钛合金型材多点三维热拉弯成形关键技术以及工艺处理过程的注意事项, 以期钛合金型材成形提供技术参考。

关键词 钛合金型材; 多点三维热拉弯; 成形工艺

中图分类号: TG13

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.002

0 引言

钛合金型材的三维拉弯结构件由于几何适应性强、综合性能优异, 在复杂曲面结构制造中, 具有极高的应用价值。但常温成形时材料回弹量大、易开裂, 需依赖热成形技术。其中, 多点三维热拉弯技术能够自阻加热与多方向弯曲叠加, 全面实现型材的高效成形, 此过程中的热力耦合作用复杂, 工艺参数优化需要深入研究。

1 钛合金型材多点三维热拉弯成形工艺概述

1.1 原理

该成形方式主要在高温环境下进行。具体实施要先对型材施加预拉伸力, 使其产生一定变形。随后利用多点模具对型材进行弯曲成形。在成形期间应对拉伸力、模具形状和运动轨迹等参数进行精确控制, 最终实现型材在三维方向上的精确弯曲, 保证成形的准确性和高质量。

1.2 特点

这种技术具备诸多显著特点。首先, 材料利用率颇高。在精确控制成形过程的情况下, 可减少材料浪费, 全面提升钛合金材料的利用率。其次, 该工艺适应性强, 可满足不同形状和尺寸的钛合金型材成形需求。具体而言, 通过灵活调整工艺参数以及合理配置模具, 便可实现多种复杂形状构件的制造。再者, 可实现高精度成形。依据型材要求灵活调整, 有效控制型材的变形情况, 减少回弹现象, 全面提高成形件的尺寸精度。最后, 改善材料性能。在热成形过程中, 钛合金的微观组织会发生变化, 有助于提高材料的塑性和韧性, 同时能够降低成形后的残余应力^[1]。

1.3 优势

与传统的钛合金成形工艺相比, 此成形工艺具有以下优势。(1) 提升产品质量。该工艺通过精确控制成形参数, 能够有效避免成形缺陷, 最大程度地提高产品的质量。当采用传统成形工艺时, 由于各种因素的限制, 难以精准把控成形过程, 导致缺陷出现的概率相对较高, 进而影响产品的整体质量。而这种新型成形工艺, 凭借先进的技术手段和精确的控制能力, 为产品质量提供了有力保障。(2) 提高生产效率。传统工艺通常需要经过多道工序, 涉及多次加工和装配环节, 导致生产流程冗长, 还会增加出错可能性。而多点三维热拉弯成形工艺简化了生产流程, 大幅缩短生产周期, 从而显著提高了生产效率。(3) 降低成形载荷。传统工艺为实现钛合金型材的成形, 往往需要施加较大的成形载荷, 这种情况对设备的性能和承载能力提出较高要求, 导致设备投资成本增加, 同时也伴随着较高的能源消耗。而多点三维热拉弯成形工艺科学运用预拉伸力, 有助于大幅度降低成形载荷, 减少设备的投资和能源消耗。

2 材料本构模型与数值仿真

基于单向热拉伸试验数据, 建立 Arrhenius 型本构模型, 主要借助稳态蠕变率方程。其中, 将流动应力 (σ) 与温度 (T)、应变速率 ($\dot{\epsilon}$) 关联如下:

$$\dot{\epsilon} = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

其中, A 、 α 、 n 为材料常数; Q 为热变形激活能 (kJ/mol); R 为气体常数 ($8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)。此形式适用于高应力 (双曲正弦近似为指数函数) 和低应力 (近似为幂函数) 两种状态。

借助 ABAQUS 软件构建仿真模型, 其中对于边界条件, 应通过约束模具的运动, 使其在模拟过程中保持在既定的位置状态, 模拟实际生产情况。在此期间, 施加预拉伸载荷, 模拟型材加工时的拉伸作用, 构建与真实场景相同的初始条件, 让后续模拟分析以此展开, 保证获得可靠的仿真结果。在网格划分环节, 要遵循特定规则。型材选用 C3D8R 单元进行网格划分, 使其适配型材特点, 保证模拟准确性。而模具应采用刚性壳单元, 由于模具需要具备较大的刚度, 而刚性壳单元可以高效且合理地模拟其行为, 避免过多不必要的计算量, 同时又能准确体现模具在成型过程中的作用。在数值仿真模型构建中, 对于热交换方面有着明确设定。具体而言, 需要精准定义型材与模具间的接触热导率, 此参数关乎着整个仿真过程与实际工况的贴合度^[2]。

通过精确定义接触热导率, 准确捕捉型材与模具间的热量交互情况; 合理划分网格, 保障计算精度与效率; 妥善设置边界条件, 保证模拟场景符合实际工艺要求。只有全方位的考量与精心构建, 才能利用该仿真模型深入探究型材成型过程中的规律, 为优化生产工艺、提高产品质量等提供数据支撑。

3 钛合金型材多点三维热拉弯成形关键技术

3.1 加热方式与温度控制

钛合金型材成形采取的是: 零件工装共同加热, 具体加热方式主要有电阻加热、感应加热和辐射加热等。其中, 电阻加热方式均匀、温度控制精度高, 但加热速度较慢; 感应加热速度快, 但容易出现局部过热现象; 辐射加热则适用于大型构件的加热, 不过能量利用率较低。在实际生产中, 需根据型材的尺寸、形状和生产要求选择合适的加热方式。在此期间, 温度直接影响钛合金型材成形性能。在多点三维热拉弯成形过程中, 需要精确控制型材的加热温度和模具温度。通常钛合金的成形温度应控制在结晶温度以上, 保证材料具有良好的塑性。模具温度应尽量接近型材温度, 减少两者之间的温差, 降低热应力。

3.2 模具设计与制造

柔性多点拉弯成形工艺充分融合传统拉弯工艺和多点成形工艺优势, 具体来说, 此工艺会根据目标成形形状, 计算机会精确计算出每个多点模具的空间位置和旋转角度。再通过控制系统, 将各个多点模具调整到指定位置, 形成与目标形状完美契合的包络面。随后, 待成形的型坯缓缓靠近模具, 逐渐发生塑性变形, 最终与模具紧密贴合。这种变形均匀可控, 有效

保证成形制件的质量。与传统的拉弯工艺相比, 此工艺省去了繁琐的模具修正过程, 实现一次性拉弯成形。此外, 这种工艺灵活性极高。由于模具型面可通过计算机实时调整, 轻松应对不同形状和尺寸的生产需求, 保证各种曲面都可以通过调整模具的位置和角度实现精确成形。

3.3 拉伸与弯曲控制

预拉伸力的大小与钛合金型材的成形性能以及成形质量操作相关联。若预拉伸力过小, 无法有效降低成形载荷和减少回弹, 而预拉伸力过大, 可能导致型材在拉伸过程中出现断裂或减薄现象。因此, 需要根据型材不同因素, 精确计算和控制预拉伸力的大小。并且在弯曲过程中, 应精确控制模具的运动轨迹和加载速度。模具的运动轨迹应根据型材的弯曲要求进行规划, 保证实现准确的三维弯曲。加载速度则会影响到型材应力分布, 通常适当的加载速度有助于减少变形缺陷。

4 工艺参数影响规律

4.1 温度参数

在工艺过程中, 成形温度升高会显著降低流动应力, 有利于型材成形。不过, 一旦温度超过 β 转变温度 (约 780 °C), 会引发晶粒粗化问题, 所以对于成形温度的控制需要精准把握, 避免出现上述情况。对于模具温度, 当把模具预热至 600 ~ 800 °C 区间时, 可减少温度梯度, 让应力分布更为均匀, 回弹量能够降低 15% ~ 20%, 大幅度增强成形效果。

4.2 拉伸参数

在成形过程的拉伸参数中, 补拉伸量与预拉伸量会影响成形效果。其中预拉伸量数值范围在 1.5% ~ 2.0% 时, 进行预拉伸操作可显著降低回弹现象。回弹会导致型材的形状与设计产生偏差, 而合适的预拉伸量能够引导材料在拉伸过程中进行调整, 减少因材料内部应力释放而引起的回弹。此过程预拉伸量并非越高越好, 如果超过 2.0%, 过高的预拉伸量会让材料出现过度减薄, 厚度无法满足设计和使用要求, 影响型材的整体性能。更为严重的是, 过高的预拉伸量还可能导致材料断裂, 使整个成形过程失败, 还会造成材料的浪费和生产成本的增加。在热拉弯成形的补拉伸阶段, 经过实验数据验证, 若增加 1% ~ 2% 的载荷, 可使回弹角减小 30% 以上。表明在成形后, 型材的形状稳定性得到极大提升, 更接近设计要求。补拉伸量的合理调整可保证在冷却等后续环节中保持较小的形状变化, 提高产品的质量^[3]。

4.3 加载路径优化

采用多步渐进加载方式,先进行预拉伸,而后实施补拉伸。在仿真过程中,经过对比分析,相较于单次拉伸,采用多步渐进加载策略时,回弹量降幅25%。说明多步渐进加载方式更加高效。具体是在预拉伸阶段,型材开始受到拉伸力的作用,此时应力会逐渐在型材内部传递和分布。由于是逐步施加力量,型材有足够的时间去适应这种外力的变化,使得应力能够相对均匀地分布在各个部位。而后续的补拉伸操作,则进一步对型材进行调整,使得应力分布更加合理,避免局部应变集中的情况发生。在此期间,在单次拉伸的情况下,由于应力分布可能不够均匀,局部地区可能会出现较大的应力集中。当外力去除后,这些应力集中的区域就会产生较大的回弹力,导致回弹量较大。而多步渐进加载通过先预拉伸后补拉伸的方式,使整个型材在拉伸过程中应力分布更加平衡,各个部位的变形更加均匀。当外力去除后,型材内部的应力释放也更加均匀,因此回弹量相对较小。

5 工艺处理过程的注意事项

5.1 建立工艺参数优化模型

为构建工艺参数优化模型,首先要理解钛合金型材拉弯时的特性,包括材料在不同温度、压力及加载条件下的变形规律。通过数值模拟构建虚拟的成形环境,模拟不同工艺参数下的成形过程,以此获取相关的数据支持。接下来,开展一系列实验研究。实验中将不同的工艺参数进行组合,全面评估对成形质量的影响。通过对比实验结果进一步验证关系模型,保证模型准确反映工艺参数与成形质量之间的联系。建立关系模型后,引入优化算法,主要是基于模型预测的结果,智能搜索最优的工艺参数组合,实现成形质量的最大化。优化算法还将考虑工艺参数的可行性,确保优化后的参数组合可靠。最后,持续关注工艺参数优化模型的最新发展动态,不断引入新的技术,进一步提升模型的性能。并加强与行业内外的合作,共同推动钛合金型材成形技术的创新发展^[4]。

5.2 研发低成本模具制造技术

为降低模具制造成本,提升制造效率,需探索全新的模具制造技术,这些新兴技术中,快速原型制造技术可快速、准确地构建出模具原型特点,为模具的设计优化提供便利。借助此技术,可在较短时间内获得多个设计方案的实物模型,从而进行直观的比较,大大缩短产品研发周期。同时,3D打印技术能够直接打印出复杂结构的模具,极大地降低传统加工方法中的成

本。借助技术的高精度,可根据设计需求,轻松调整模具的结构尺寸,实现定制化生产。在探索这些新技术的过程中,还需要不断试验优化,保证能稳定地应用于钛合金型材多点三维热拉弯成形工艺的模具制造中。

5.3 加强成形过程的监测与控制

借助先进的传感器技术和控制系统,保证成形过程的温度、应力、应变等参数处于动态变化监控下。其中,借助先进的传感器技术,精准捕捉参数实时变化。当传感器将采集到的数据传递给控制系统后,可依据预设的参数范围和算法模型,对实时监测参数进行快速分析处理。一旦发现某个参数偏离正常范围,控制系统会立即采取相应的调控措施。

在整个成形过程中,这种实时监测和控制的机制不断运行,时刻关注型材不同时期的变化,确保成形过程按照预定的轨迹顺利进行。只有做到全过程监控,才能有效避免因参数异常而导致的成形缺陷,如型材的变形不均匀、内部产生裂纹等问题。在此过程中,通过对大量监测数据的积累和分析,还可以进一步优化成形工艺参数。技术人员可以根据这些数据,深入了解钛合金型材在不同条件下的成形规律,更加精准地调整温度、应力、应变等参数的控制策略,进一步提高成形工艺的水平 and 效率^[5]。

6 结束语

对于钛合金型材,采用多点三维热拉弯成形工艺能够高精度成形,且适应性强。该工艺在航空航天、汽车制造等领域应用前景广泛,但也面临着工艺参数优化难度大、模具设计与制造成本高、成形过程稳定性控制困难等挑战。对此,应通过建立工艺参数优化模型、研发低成本模具制造技术和加强成形过程的监测与控制等对策,推动该工艺的进一步发展和应用。

参考文献:

- [1] 祝鹤,杨立新,卢影峰,等.钛合金挤压薄壁型材变曲率拉弯成形工艺[J].锻压技术,2024,49(09):68-74.
- [2] 高嵩,孙熒力,李奇涵,等.钛合金型材多点三维热拉弯成形工艺及其微观组织演化[J].中国机械工程,2023,34(24):2986-2995,3014.
- [3] 马凯.不同材料型材拉弯成形性的比较[J].中国科技投资,2021(07):135-136.
- [4] 王梓.铝合金型材三维多点柔性拉弯工艺研究[J].中国新技术新产品,2021(01):70-72.
- [5] 张晨,李东升,李小强.等温条件下非等截面钛合金型材热拉弯材料流动仿真研究[J].塑性工程学报,2020,27(12):158-163.