

# 不同材料铆接装配的变形与控制分析

郑蔚

中国航空工业集团哈飞 黑龙江哈尔滨 150060

DOI:10.12238/ems.v7i12.16444

**[摘要]** 随着多材料结构在航空航天、汽车及轨道交通等领域的广泛应用, 铆接装配因其高效、可靠的特点而成为主要连接方式。然而, 不同材料在力学性能、热膨胀系数及塑性变形能力上的差异, 往往导致铆接过程中出现局部变形、整体翘曲及残余应力不均等问题, 严重影响装配精度和服役可靠性。本文结合系统探讨了不同材料铆接装配的变形特征、机理与预测方法, 并提出了工艺参数优化、结构设计改进及智能化辅助控制等策略, 为多材料结构的高质量装配提供参考。

**[关键词]** 铆接装配; 不同材料; 变形机理; 预测方法; 控制策略

在轻量化与高性能需求不断增强的背景下, 不同材料的组合应用逐渐成为结构设计的重要趋势。铆接作为一种传统而高效的装配工艺, 在多材料连接中展现出独特优势。但由于材料性能差异和工艺约束, 装配过程中不可避免地出现变形与残余应力问题, 进而影响整体质量和使用寿命。因此, 深入研究不同材料铆接装配的变形机理, 并探索有效的控制策略, 具有重要的理论意义和工程价值。

## 1、铆接装配原理与工艺流程

### 1.1 铆接装配原理

铆接是一种通过铆钉在连接件上产生塑性变形, 从而实现零部件之间永久性连接的机械加工方法。其基本原理是: 将铆钉插入到预先钻好的连接孔内, 在施加轴向冲压力或冲击力的作用下, 使铆钉杆部发生径向扩张和端部塑性成形, 从而在孔壁与铆钉之间形成紧密接触<sup>[1]</sup>。该过程中, 铆钉的变形不仅依赖于外部载荷, 还受到摩擦、材料硬化以及孔壁约束的共同作用, 最终形成可靠的铆钉头和过盈结合, 达到承载与密封的功能。与焊接相比, 铆接避免了热影响区的性能劣化问题, 尤其适用于异种材料和薄壁结构的连接, 因此在航空航天、汽车、轨道交通等领域得到了广泛应用。

### 1.2 工艺流程

铆接装配的工艺流程通常包括孔加工、铆钉预装、施力成形和质量检测等步骤。首先, 需根据设计要求对连接部位进行钻孔或冲孔, 保证孔径精度与位置一致性; 其次, 将铆钉插入孔中并完成初步定位; 随后采用专用设备施加轴向压力, 使铆钉尾部发生塑性变形并形成铆钉头, 确保铆接件之间紧密贴合; 最后, 通过无损检测、外观检查和力学性能验证, 评估铆接连接的质量与可靠性。在现代制造中, 该流程常辅以自动化设备和智能监测技术, 如力一位移曲线实时监

控和视觉检测系统, 以提升铆接的一致性和可控性。

## 2、不同材料铆接装配中的变形特征

### 2.1 局部塑性变形特征

在不同材料铆接装配过程中, 由于铆钉在施加载荷作用下会发生显著的塑性变形, 其与被连接材料之间的接触区域通常表现出非均匀的应力与应变分布。尤其在铆钉杆部与孔壁之间, 因材料硬度、弹性模量和屈服强度存在差异, 易形成局部的嵌入效应和孔边扩张现象。此类局部变形在一定程度上增强了接触紧密度和摩擦力, 但若控制不当, 则可能导致孔壁压痕、局部剥离或应力集中, 从而削弱连接部位的疲劳寿命和承载能力。

### 2.2 整体装配变形特征

多材料结构在铆接过程中还会引发整体装配变形, 如板件翘曲、搭接错位和装配间隙的产生。这主要源于材料厚度差异、力学性能不匹配以及铆接顺序的不合理, 导致残余应力场在装配结构中不均匀分布。当板件为铝合金与钢板等异种材料组合时, 由于塑性应变分布的不对称性, 结构更易在加载后产生整体形状偏差。这类变形不仅影响装配精度, 还会对结构服役阶段的稳定性与密封性能造成不利影响<sup>[2]</sup>。

### 2.3 残余应力与次生变形特征

在铆接过程中, 铆钉的塑性流动与板材的受约束变形共同作用, 会在界面区域和周边板件中引入残余应力。不同材料间热膨胀系数、弹塑性性能的差异, 进一步导致残余应力分布呈现高度不均性。这种残余应力不仅是连接区疲劳裂纹萌生的重要诱因, 还可能引起次生变形, 如孔边微裂纹扩展、装配件的局部翘曲及服役过程中的变形累积。尤其在经历循环载荷或环境温度变化时, 残余应力往往成为影响铆接连接长期可靠性的关键因素。

#### 2.4 多场耦合作用下的变形特征

在工程实际中,不同材料铆接结构往往同时受到机械载荷、热作用和振动冲击等多场耦合效应的影响,进一步加剧了变形复杂性。例如,摩擦生热会在局部区域产生温度梯度,从而导致材料热膨胀不均,形成额外的变形应力;在振动环境下,局部微动摩擦又可能促使孔壁疲劳损伤和次生变形的积累。这些多场作用叠加的结果,使得异材铆接连接的变形特征更具时变性和不可预测性,对装配精度与结构安全提出了更高要求。

### 3、不同材料铆接装配变形机理分析

#### 3.1 力学性能差异导致的应力不均机理

不同材料的铆接装配中,由于各材料弹性模量、屈服强度及硬化特性的差异,铆钉加载时会在界面处产生应力集中和不均匀变形。硬质材料往往在孔壁处形成较强约束,使得铆钉塑性流动受限,进而导致软质材料一侧出现过度扩张或孔壁压痕。而在卸载后,由于两类材料的弹性恢复能力差异,界面残余应力分布更加复杂,表现为软材料区域残余拉应力集中、硬材料区域残余压应力显著。这一不均性应力场不仅影响装配精度,还为疲劳裂纹的萌生提供了有利条件。

#### 3.2 工艺参数对变形的放大与传递机理

铆接过程中,工艺参数如铆接力、施力速度和孔径配合等对变形机理起决定性作用。较大的铆接力虽然可保证连接紧固,但往往引起孔边材料过度塑性变形,甚至出现裂纹或分层;相反,过小的铆接力则导致接触不足,装配间隙残留,影响结构整体性能。施力速度过快时,铆钉与板材界面摩擦热显著增加,可能引发局部材料性能软化,导致变形失控。工艺参数的不合理组合会加剧不同材料间的变形差异,使应力传递路径复杂化,从而影响结构可靠性。

#### 3.3 结构几何与约束条件引发的变形机理

在多材料叠层结构铆接中,板材厚度、层数及排列顺序直接决定了受力传递路径与变形特征。当厚度差异显著时,软质薄板容易在加载过程中发生翘曲和局部屈曲;而夹具和工装的约束条件则会改变力的传递方式,使局部变形向整体装配误差传递。例如,当夹具对硬质材料的约束较强时,变形往往集中在软质层和铆钉头部区域,形成不对称的塑性流动。这种几何与约束条件的耦合效应是多材料铆接整体变形的重要内在机理<sup>[3]</sup>。

#### 3.4 残余应力演化与服役过程中的次生变形机理

铆接装配完成后,不同材料界面中往往存在复杂的残余

应力场,其形成源于材料弹塑性差异及铆接过程中的不均匀塑性变形。这些残余应力在服役过程中会不断演化,在循环载荷和环境因素(温度、湿度等)的作用下,表现为应力松弛、再分布及次生变形。例如,在铝-钢铆接结构中,热膨胀系数差异显著,温度变化会诱发残余应力反复叠加,导致局部疲劳裂纹提前出现。由此可见,残余应力不仅是变形的结果,也是后续结构失效的重要驱动力。

### 4、不同材料铆接变形的分析与预测方法

#### 4.1 实验测试方法分析

实验测试是获取不同材料铆接装配变形规律的直接途径,能够反映真实的应力应变演化过程。传统的接触式测量方法如应变计、位移传感器,可在关键位置监测局部应变与位移变化,适合对局部变形进行定量评估。但随着多材料铆接结构复杂性增加,非接触式测试手段逐渐成为主流。例如,数字图像相关(DIC)技术能够获取全场位移与应变分布,揭示铆钉成形及界面局部塑性流动特征;三维激光扫描与结构光技术可对整体装配件的翘曲、错位进行高精度重建;同时,X射线衍射与孔钻法残余应力测试方法可用于表征界面应力分布及其演化趋势。这些方法的结合,有助于全面、系统地掌握不同材料铆接装配的多尺度变形特征。

#### 4.2 数值仿真分析方法

有限元数值仿真为异材铆接变形机理研究与预测提供了重要工具。通过建立包含铆钉、孔壁及多层材料的精细化有限元模型,可模拟铆接过程中铆钉塑性流动、孔边应力集中以及残余应力形成的全过程。不同材料的弹塑性参数、摩擦系数、界面结合特性可通过材料本构模型予以考虑,从而实现对多材料连接区真实力学响应的再现。同时,借助显式动力学方法可模拟高速铆接的瞬态过程,而隐式算法更适用于残余应力场与服役阶段变形的预测。此外,近年来逐渐引入的多场耦合分析(热-力耦合、电-热-力耦合)可揭示摩擦生热、温度梯度对变形的影响,提升仿真结果的准确性与适用性。

#### 4.3 模型与试验的对比验证方法

为保证分析与预测的可靠性,仿真结果必须通过实验数据进行对比验证。一般可采用双向验证方法:一方面利用实验中测得的应变分布、位移曲线与残余应力数据,对有限元模型参数进行校准与修正;另一方面将仿真预测结果与装配精度、残余应力分布及疲劳性能测试结果进行对比,评价模型的适用性与偏差来源。通过这种实验-仿真结合的方式,不仅能够提高预测结果的可信度,还能帮助揭示实验难以观测

到的内部变形细节, 形成对不同材料铆接装配变形的全面理解。这种多源信息融合验证模式, 已经成为多材料连接研究中的主流方法论。

## 5、不同材料铆接装配的变形控制策略

### 5.1 工艺参数优化与过程控制

在不同材料的铆接装配过程中, 工艺参数是决定变形程度的核心因素。铆接力、施力速度、铆钉直径与孔径配合等变量, 对局部塑性变形和残余应力分布起着直接作用。例如, 当铆接力设置过大时, 软质材料容易在孔壁处产生塌陷和开裂, 而硬质材料则可能因应力集中出现微裂纹; 反之, 若铆接力过小, 则容易造成接触不良和松动, 导致连接区域存在间隙, 削弱整体结构强度。施力速度也会影响变形特征, 过快的加载可能引发瞬时温升, 从而使界面区域的软质材料性能下降, 导致不可控的塑性流动。因而, 在设计工艺参数时, 需要综合考虑材料组合的力学性能差异, 确定最优参数范围。

在实际应用中, 单纯依赖经验设定参数往往难以满足多材料结构的复杂需求, 因此引入了多目标优化方法与实时过程监控技术。例如, 通过正交实验设计或响应面法, 能够确定兼顾连接强度与变形可控性的最优工艺参数组合。同时, 借助力一位移曲线监控系统, 可以实时捕捉铆接过程中的异常波动, 若发现异常变形趋势, 便可即时调整加载策略, 实现闭环控制。这种结合了实验优化与智能监测的工艺调控方式, 不仅提高了装配的一致性和可重复性, 还显著降低了由工艺不匹配带来的局部及整体变形风险。

### 5.2 结构设计与装配顺序改进

不同材料的几何尺寸、层次组合和排列顺序, 是影响铆接变形的重要结构性因素。若多层板件厚度差异较大, 往往会导致应力分布不均, 使软质材料一侧产生过度塑性流动, 造成局部翘曲或孔边损伤。因此, 在结构设计阶段, 应通过合理匹配厚度比例与孔距布置, 减小应力集中效应。例如, 将硬质材料布置在靠近夹具的一侧以增加整体稳定性, 同时在软质材料上增加预应力或局部加固, 以分散局部变形。在此基础上, 适当的预紧设计能够有效减弱界面微动和松动, 从而降低变形的累积效应。

此外, 铆接顺序的优化同样具有关键作用。若在装配过程中采用单侧逐点铆接, 残余应力往往向某一方向集中, 导致整体结构产生不对称翘曲。通过采用对称化、交错式或分区分步铆接策略, 可以实现残余应力的均衡分布, 从而减少整体形状误差。配合柔性夹具与智能定位系统, 可进一步

提高板件的稳定性与装配精度, 避免因约束不足或过度约束而引发的传递性变形。实践表明, 结构设计优化与装配顺序调整的协同应用, 能在源头上有效抑制多材料铆接装配中的大尺度变形问题。

### 5.3 新型辅助技术与智能化控制

随着制造工艺的发展, 新型辅助方法为不同材料铆接装配的变形控制提供了新的解决思路。激光辅助铆接、电阻加热铆接等方法, 可在局部区域施加适量热能, 从而降低软质材料的屈服强度, 使其在铆钉加载时更易于发生可控的塑性流动。这样不仅能够减少孔壁损伤, 还能降低整体装配过程中的应力集中。对于硬质材料而言, 局部热处理还能改善铆钉与板件界面的应力分布, 使变形更加均匀。与此同时, 真空辅助、振动辅助等新工艺, 也在一定程度上改善了铆接过程中材料的成形流动性, 为降低变形提供了工艺保障。

更为前沿的趋势是智能化监测与自适应控制技术的应用。通过在铆接设备中集成传感器与智能算法, 可以实时采集施加力、位移、温度及声发射信号等多源数据, 并利用人工智能模型进行趋势预测与动态调整。例如, 当系统检测到软质材料发生过度变形趋势时, 可立即降低加载速率或调整铆接路径, 从而避免不可逆损伤。与此同时, 基于大数据的工艺数据库与优化算法, 能够提前预测不同材料组合下的变形模式, 给出最优的工艺路径。这些智能化技术的应用, 使得多材料铆接不仅在变形控制上更加精准, 而且在生产效率和质量一致性方面也显著提升。

## 结语

本文针对不同材料铆接装配中的变形问题进行了系统分析, 阐明了其变形特征与机理, 并探讨了实验与仿真相结合的预测方法以及多层次的控制策略。研究表明, 通过工艺参数优化、结构顺序改进及智能化辅助技术的应用, 可以显著降低异材铆接的变形风险。

## [参考文献]

- [1] 叶结和, 张子博, 徐野, 等. 装配间隙及垫片材料对碳纤维增强复合材料胶铆接头力学性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2024, 48 (6): 88-92.
- [2] 郭丰. 飞机薄壁件铆接变形预测及优化研究 [D]. 南昌航空大学, 2024.
- [3] 叶结和, 张子博, 徐野, 等. 装配间隙及垫片材料对碳纤维增强复合材料胶铆接头力学性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2024, 48 (6): 88-92.