

铝合金压力加工的数字化模拟技术与工艺优化策略

任丽媛¹ 迟铭博²

1. 东北轻合金有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150060

2. 哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150060

摘要：本文深入探讨了铝合金压力加工中的数字化模拟与工艺优化。概述了铝合金性质及加工类型后，分析数字化模拟对提高加工质量和效率的关键作用，并阐述了质量问题的成因与影响。并探讨了模拟模型的建立，包括材料模型选择、边界与初始条件设定及模拟参数优化。基于此，提出工艺参数优化、模具设计与优化及质量控制策略。这些策略为铝合金压力加工的高效、优质运行提供科学依据和技术支撑。

关键词：铝合金；压力加工；数字化模拟技术；工艺优化

1 铝合金压力加工基础

1.1 铝合金的物理与化学性质

铝合金，作为一类以铝为主要成分的金属材料，具有一系列独特的物理与化学性质，这些性质使得铝合金在压力加工领域具有广泛的应用前景。首先，从物理性质来看，铝合金的密度相对较低，约为 2.7g/cm^3 ，这一特点使得铝合金制品具有优异的轻量化优势，广泛应用于航空航天、交通运输等领域，可以有效降低能耗和提高运行效率。此外，铝合金的热导率和电导率均较高，良好的热导率使得铝合金在散热、制冷等方面表现优异，而优异的电导率则使其在电气、电子工业中具有广泛的应用。在化学性质方面，铝合金的表面容易形成一层致密的氧化铝保护膜，这层膜能够有效地阻止铝合金进一步氧化，从而表现出良好的耐腐蚀性。同时，铝合金还具有一定的可塑性，易于通过压力加工等工艺手段进行塑性变形，满足各种形状和尺寸的产品需求。

1.2 铝合金压力加工类型

铝合金的压力加工是指通过施加外力，使铝合金在塑性状态下发生变形，以获得所需形状、尺寸和性能的一种加工方法。根据加工方式的不同，铝合金的压力加工主要分为挤压、锻造、轧制、拉伸和冲压等几种类型。挤压加工是将铝合金坯料置于挤压筒中，通过挤压杆的推力作用，使其从模具中挤出，形成所需形状和尺寸的型材。锻造加工则是利用冲击力或静压力使铝合金坯料在模具中发生塑性变形，得到形状复杂的锻件。轧制加工则是通过一对旋转的轧辊对铝合金坯料进行连续压延，形成所需厚度的板材或带材。拉伸加工则是将铝合金材料在轴向施加拉力，使其发生塑性变形，以达到减小厚度或改变形状的目的。冲压加工则是利用冲模和冲床等设备对铝合金板材施加压力，使其发生塑性变

形，形成所需形状的零件或组件。这些加工类型各具特点，适用于不同形状、尺寸和性能要求的铝合金产品的生产^[1]。

2 数字化模拟技术在铝合金压力加工中的作用

数字化模拟技术在铝合金压力加工中发挥着至关重要的作用。这一技术通过高度精确的计算机模型，能够模拟铝合金在不同压力加工过程中的物理和化学变化，从而为工艺优化和产品设计提供强有力的支持。在铝合金的挤压、锻造、轧制等压力加工过程中，数字化模拟技术可以直观地展示材料的流动状态、应力分布、温度变化等关键参数。通过这些模拟结果，工程师们可以预测可能出现的缺陷，如裂纹、变形不均等，从而在实际生产前进行调整和优化。这不仅大大提高了产品的质量和可靠性，还显著降低了生产成本和废品率。另外，数字化模拟技术还可以用于铝合金压力加工过程中的工艺参数优化。通过模拟不同工艺参数下的加工过程，工程师们可以找到最佳的工艺参数组合，以实现更高的生产效率、更低的能耗和更好的产品性能。例如，在挤压过程中，通过模拟可以确定最佳的挤压速度、温度和模具结构，以获得最佳的型材质量和生产效率。数字化模拟技术还具有强大的数据处理和分析能力。通过模拟结果的对比和分析，工程师们可以深入了解铝合金压力加工过程中的材料行为和加工机理，为进一步的工艺改进和新产品的开发提供理论依据和技术支持。总之，数字化模拟技术在铝合金压力加工中的应用，不仅提高了产品的质量和生产效率，还为铝合金材料的开发和应用开辟了新的途径。随着技术的不断发展和完善，数字化模拟技术将在铝合金压力加工领域发挥越来越重要的作用。

3 铝合金压力加工中常见的质量问题

3.1 裂纹、变形、表面缺陷

在铝合金压力加工过程中, 裂纹、变形和表面缺陷是三种最为常见的质量问题。裂纹是指材料在加工过程中, 由于应力集中、温度过高或模具设计不合理等原因, 导致材料内部或表面产生断裂的现象。裂纹的出现不仅影响产品的美观性, 更重要的是会降低产品的力学性能和使用寿命, 甚至导致产品在使用过程中突然断裂, 造成安全事故。变形则是指铝合金在加工过程中, 由于受力不均匀或模具形状不准确等原因, 导致产品形状与预期不符的现象。变形不仅影响产品的尺寸精度和装配性能, 还会降低产品的整体美观度和市场竞争力。表面缺陷则包括划痕、麻点、氧化皮等, 这些缺陷不仅影响产品的外观质量, 还可能降低产品的耐腐蚀性和使用寿命^[2]。

3.2 质量问题的成因及影响

铝合金压力加工中质量问题的成因多种多样, 但主要包括材料因素、工艺因素和设备因素三个方面。材料因素方面, 铝合金的成分、组织结构和性能差异可能导致加工过程中出现裂纹、变形和表面缺陷等问题。例如, 铝合金中合金元素的含量和分布不均, 会导致材料在加工过程中的应力分布不均, 从而增加裂纹产生的风险。工艺因素方面, 加工温度、压力、速度和模具设计等参数的选择不当, 都会直接影响产品的加工质量和性能。例如, 加工温度过高会导致材料软化, 降低其抗变形能力, 而模具设计不合理则会导致材料在加工过程中受力不均匀, 从而增加变形的风险。设备因素方面, 设备的精度、稳定性和可靠性等都会影响加工质量。例如, 设备精度不足会导致加工尺寸不准确, 而设备稳定性差则会导致加工过程中产生振动, 从而增加表面缺陷的风险。这些质量问题的出现不仅会影响产品的使用性能和安全性, 还会增加生产成本和废品率, 降低企业的经济效益和竞争力。

4 铝合金压力加工的数字化模拟模型建立

4.1 材料模型的建立与选择

在铝合金压力加工数字化模拟模型构建中, 材料模型的建立与选择至关重要。铝合金材料特性复杂, 其力学行为受合金成分、加工工艺历史等多种因素影响。建立材料模型时, 需精准考量铝合金的本构关系, 即应力与应变、应变率及温度之间的数学关联。常用的本构模型如Johnson-Cook模型, 能有效描述铝合金在高应变率、高温等复杂变形条件下的力学响应。该模型通过实验测定材料的屈服应力、硬化参数、应变率敏感系数及热软化系数等关键参数, 构建起反映铝合金材料特性的数学表达式。对于不同系列铝合金, 因其成分差异, 力学性

能各不相同, 需针对性地选择或修正材料模型。例如, 对于6061铝合金, 因其含有镁、硅等合金元素, 在压力加工过程中易发生动态再结晶, 此时可选用考虑动态再结晶影响的本构模型, 如Zener-Hollomon参数相关模型, 以更准确模拟其加工行为, 为后续模拟提供坚实的材料特性基础。

4.2 边界条件与初始条件的设定

边界条件与初始条件的精确设定是确保铝合金压力加工数字化模拟准确性的关键环节。在边界条件方面, 需根据实际加工工艺确定模型边界的约束状态与载荷施加方式。以铝合金挤压加工为例, 模具与铝合金坯料接触区域的边界条件设定极为重要。模具内壁与坯料之间存在摩擦力, 可通过库仑摩擦定律来描述, 设定合适的摩擦系数, 该系数取值会影响坯料在模具内的流动状态及挤压力大小。坯料入口与出口边界条件同样关键, 入口处需考虑坯料的送进速度与温度, 出口处则要设定产品流出的自由边界条件。初始条件主要涉及坯料的初始状态, 包括初始温度、初始组织状态等^[3]。铝合金在不同初始温度下, 其塑性变形能力差异显著, 需依据实际加工工艺设定准确的初始温度场。初始组织状态如晶粒尺寸、位错密度等, 对压力加工过程中材料的变形机制有重要影响, 可通过金相分析等手段获取初始组织参数, 并将其输入模拟模型, 使模拟结果更贴合实际加工情况。

4.3 模拟参数的选择与优化

模拟参数的合理选择与优化是提升铝合金压力加工数字化模拟精度与效率的核心。模拟参数涵盖众多方面, 如网格划分参数、时间步长、求解器参数等。网格划分直接影响模拟计算精度与计算时间, 对于复杂形状的铝合金坯料与模具, 需采用自适应网格划分技术, 在坯料变形剧烈区域加密网格, 保证计算精度, 同时在变形较小区域适当降低网格密度, 减少计算量。时间步长的选择要兼顾计算精度与效率, 时间步长过大, 可能导致模拟结果失真, 过小则会大幅增加计算时间。一般通过试算与理论分析相结合的方式, 确定合适的时间步长, 确保在每个时间步内材料变形状态能被准确捕捉。求解器参数方面, 不同求解器适用于不同类型的模拟问题, 如显式求解器适用于求解高速、大变形的动力学问题, 隐式求解器则在处理静态、准静态问题时具有优势。需根据铝合金压力加工工艺特点, 如锻造过程中涉及高速冲击, 可选用显式求解器, 并对其相关参数如阻尼系数、接触算法等进行优化, 使模拟结果更接近实际加工过程, 为铝合金压力加工工艺优化提供可靠依据。

5 基于数字化模拟的铝合金压力加工工艺优化策略

5.1 工艺参数优化

借助数字化模拟,能够对铝合金压力加工的工艺参数进行全面且精准的优化。通过模拟不同的加工温度、应变速率以及压力等参数组合,深入分析其对铝合金微观组织演变与宏观力学性能的影响。在模拟铝合金锻造工艺时,调节锻造温度,观察模拟结果中晶粒的生长与细化情况,找到既能保证材料良好塑性,又能促使晶粒均匀细化,从而提升产品力学性能的最佳温度区间。对应变速率的模拟分析,可以揭示其对材料变形均匀性的影响,避免因应变速率不当导致材料内部产生过大的应力集中,引发裂纹等缺陷。压力参数的优化同样关键,依据模拟得到的挤压力、锻压力等数据,合理调整压力大小与加载方式,在确保产品成型质量的同时,降低设备能耗,提高生产效率。通过反复模拟与分析,构建工艺参数与产品质量之间的量化关系模型,为实际生产提供科学、精准的工艺参数指导,实现铝合金压力加工工艺的高效、优质运行。

5.2 模具设计与优化

数字化模拟为铝合金压力加工的模具设计与优化提供了强大的技术支持。在模具设计阶段,利用模拟软件对模具的结构、尺寸以及表面粗糙度等因素进行模拟分析。模拟模具型腔的形状与尺寸对铝合金坯料流动行为的影响,通过优化型腔设计,使坯料在压力作用下能够均匀、顺畅地填充模具,减少充型缺陷,如欠铸、冷隔等问题。分析模具表面粗糙度对摩擦力的影响,通过调整表面粗糙度参数,优化坯料与模具间的摩擦条件,降低挤压力,提高模具使用寿命^[4]。模拟不同模具材料在铝合金压力加工过程中的热疲劳性能,选择热疲劳抗力高、热导率适宜的模具材料,减少模具在反复热冲击下的裂纹萌生与扩展,延长模具服役周期。通过模拟结果对模具进行针对性优化,不仅能够提高产品质量,还能显著降低模具开发成本与周期,增强铝合金压力加工工艺的市场竞争力。

5.3 质量控制与缺陷预防

基于数字化模拟的结果,能够制定有效的铝合金压

力加工质量控制与缺陷预防策略。通过模拟预测产品在加工过程中可能出现的缺陷,如内部裂纹、变形不均匀、表面划伤等问题。对于内部裂纹,模拟分析材料在不同加工条件下的应力应变分布,找出易产生裂纹的部位与工况,提前调整工艺参数或改进模具结构,消除应力集中源,预防裂纹产生。针对变形不均匀问题,利用模拟结果优化坯料的初始形状与尺寸,调整加工路径与加载方式,确保材料在压力作用下均匀变形。在预防表面划伤方面,模拟坯料与模具表面的接触行为,优化模具表面处理工艺,降低表面粗糙度,或在坯料表面施加合适的润滑剂,改善接触条件,避免表面划伤缺陷。在生产过程中,依据模拟建立质量监控指标体系,实时监测关键工艺参数,一旦参数偏离模拟确定的最佳范围,及时进行调整,实现对铝合金压力加工质量的全过程、精准化控制,保障产品质量稳定可靠。

结束语

综上所述,数字化模拟技术在铝合金压力加工中展现出了巨大的潜力和应用价值。通过精准模拟和优化工艺参数、模具设计以及质量控制策略,不仅能够显著提高产品的质量和生产效率,还能有效预防和控制加工过程中可能出现的缺陷。随着技术的不断进步和完善,数字化模拟将在铝合金压力加工领域发挥越来越重要的作用,为铝合金材料的开发和应用开辟更广阔的前景。未来,我们应继续深化数字化模拟技术的研究与应用,推动铝合金压力加工技术的持续创新与发展。

参考文献

- [1]杨志闪.基于数字化工厂的铝合金门窗型材下料方法的研究[J].自动化应用,2023,64(14):13-16.
- [2]顾燕斌,李维锋,刘巍,等.关于窗框比对门窗传热系数影响的研究[J].沙洲职业工学院学报,2023(3):1-5.
- [3]陈小军,周含宣,杨春鹏.一种铝合金材料雷达天线舱框架焊接加工工艺设计[J].雷达与对抗,2020,40(04):55-58.
- [4]王顺锋.铝合金焊接加工工艺及焊接裂纹的防治措施[J].南方农机,2020,51(14):161-162.