

新型金属材料在精密加工中的应用

王鹏真

河南省建设集团有限公司，河南郑州，中国

【摘要】为应对增材制造金属、高熵合金、金属玻璃等新型金属材料在精密加工中面临的共性挑战，本文系统研究了其加工特性与适配工艺，并构建了面向未来的智能化加工系统框架。通过分析多类材料的微观组织与力学行为，明确了其导致加工困难的内在机理；进而阐述了超声振动辅助、低温冷却等特种加工技术的原理与适应性；在此基础上，提出了融合多源感知、数据建模、知识库与自适应控制的智能系统架构，阐述了其信息流与决策逻辑。本文工作为新型金属材料的工程化应用提供了从理论方法到技术路径的系统性参考。

【关键词】新型金属材料；精密加工；加工机理；智能系统架构

1. 引言

新型金属材料的类型有很多，比如，金属基复合材料 MMCs、连续晶须复合材料、增强颗粒的金属基复合材料 TiC、SiC、B4C 等，一经开发就被广泛的应用到社会的各个领域[1]。伴随着精密加工要求的不断提高，金属加工机械设备在实际加工生产中的应用价值不断提升，与之协同发展的还有设备的设计工艺以及相应的加工技术。在这一背景下，以增材制造金属构件、高熵合金、金属玻璃、金属基复合材料等为代表的新型金属材料应运而生。它们凭借其卓越的比强度、优异的耐腐蚀性、独特的功能特性（如超弹性、高阻尼）或可定制的复杂几何结构，为突破传统设计极限提供了可能[2,3]。精密加工技术，作为赋予零件最终尺寸精度、几何形状与表面完整性的关键环节，其能力直接决定了这些先进材料的性能潜力能否在终端构件上得以完美实现[4]。然而，一个突出的矛盾正在显现：这些为获得极致服役性能而设计的新型金属材料，其微观组织结构、力学与物理化学行为往往迥异于传统均质材料，导致它们在常规精密加工过程中表现出极差的“可加工性”，如严重的刀具磨损、难以控制的加工变形、亚表面损伤以及不理想的表面质量[5,6]。这一矛盾已成为制约高性能构件从实验室走向工程应用的共性瓶颈。

当前，学术界与工业界针对这一挑战已展开广泛探索。大量研究集中于揭示典型新型金属材料在加工过程中的独特响应机理。例如，针对激光选区熔化（SLM）成形的钛合金或高温合金，其快速凝固形成的非平衡

组织、各向异性及显著的残余应力被普遍认为是导致铣削/车削过程中发生变形与颤振的核心原因[7,8]。对于高熵合金，其严重的晶格畸变带来的高强度和高加工硬化率，被证实会引发异常高的切削力和快速的加工工具退化[9]。而在块体金属玻璃的加工中，如何抑制其室温下的脆性断裂并避免由热积聚引发的玻璃转变，是获得光学级光滑表面的关键[10]。然而，现有研究大多聚焦于单一材料或特定工艺的个案分析，缺乏从“材料特性—加工挑战—工艺创新”相互作用这一系统视角出发的全局性梳理与范式总结。鉴于此，本文旨在系统性地审视新型金属材料作为被加工对象时，为精密加工领域带来的挑战与机遇。

2. 新型金属材料的加工特性

2.1 增材制造金属构件的加工特性

增材制造金属构件通过逐层熔覆堆积成形。材料的微观组织呈现方向性，熔池快速凝固形成的柱状晶或外延生长组织导致力学与热物理性能各向异性。加工时切削力呈现周期性波动，易引发系统颤振，影响稳定性与表面质量。构件内部存在复杂的残余应力场，材料去除破坏原有应力平衡，导致工件扭曲、翘曲等宏观变形，损害尺寸精度。由熔池边界、气孔构成的初始表面粗糙度大且硬度不均，刀具切入时承受间歇冲击，加剧磨损并使加工余量分配复杂化。部分材料存在合金元素偏析和脆性相，加工硬化倾向显著，进一步增加切削难度。

2.2 高熵合金的加工特性

高熵合金的多主元设计引发严重晶格畸变，带来高强度、高硬度和高耐磨性。在切

削过程中,材料的高强度导致所需切削力显著高于常规合金。高熵合金在动态载荷下表现出独特的绝热剪切和剧烈加工硬化行为,在刀具前刀面与切屑底部的剧烈变形区易形成绝热剪切带,促使切屑呈锯齿状断裂。不连续切屑引发周期性冲击,恶化表面质量。同时,表层塑性变形诱发深度加工硬化层,硬度远高于基体,使后续切削如同加工不断硬化的表面,刀具磨损急剧加速。多主元设计可能导致材料导热系数较低,加工热量不易导出,积聚在切削区,加剧刀具热磨损和工件热影响。

2.3 金属玻璃的加工特性

金属玻璃的原子排列呈长程无序状态,缺乏晶界与位错。这种结构赋予其高硬度和高弹性极限,但塑性变形高度局域化,主要通过少数剪切带的快速扩展进行。在加工中表现为脆性断裂特征,材料去除以崩碎为主,易在加工表面和亚表面诱发微裂纹网络,损害零件性能。金属玻璃对温度高度敏感,切削区温度接近其玻璃转变温度时,材料会从脆性向粘塑性转变。热输入控制不当可能导致局部晶化或过度粘性流动,前者形成表面脆性结晶相,后者造成材料粘附刀具形成积屑瘤,破坏已加工表面。加工该材料的核心矛盾在于抑制脆性断裂与避免有害热效应之间需精确平衡。

2.4 金属基复合材料的加工特性

金属基复合材料由金属基体与硬质增强相复合而成,其多相非均质结构带来特定挑战。硬质增强相具有极度磨蚀性,在加工中持续刮擦刀具表面,导致刀具后刀面发生快速磨粒磨损,刃口半径迅速增大。由于基体与增强相力学性能差异大,在切削力作用下二者变形不协调,易导致增强相从基体中拔出或在界面处断裂,在加工表面留下孔洞、凹坑及裸露增强相。对于纤维增强材料,不同纤维取向区域的切削机理不同,造成表面形貌不均和尺寸误差。增强相的存在改变材料断裂行为,切屑形成不规则,断屑困难,可能对已加工表面造成二次划伤。

3.面向新型金属材料的精密加工工艺创新

3.1 特种加工工艺的技术原理

超声振动辅助加工通过将高频机械振动施加于刀具或工件,使刀具与工件周期性分离。这种间歇性接触改变了切削过程的力学状态,有效降低平均切削力。振动作用促进切屑破碎,改善排屑条件。系统工作频率通

常在 20kHz 以上,振幅控制在微米级别。

低温冷却加工采用液氮或低温冷风作为冷却介质,直接作用于切削区域。液氮的沸点为 -196°C ,能迅速吸收切削热量。这种冷却方式将加工区域温度控制在材料特性转变点以下,抑制热变形和热损伤。

激光辅助加工在切削点前方预设位置使用聚焦激光束对材料进行局部预热(图1)。激光能量密度需精确控制,使材料温度升至其软化点但低于熔点。预热降低材料屈服强度,使后续切削过程处于塑性域。

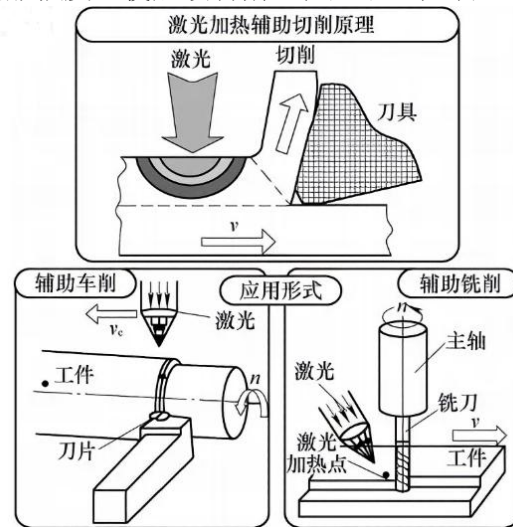


图 1.激光辅助加工

3.2 工艺参数调控方法

超声振动参数调控包括频率匹配和振幅优化。系统频率需避开机床固有频率,避免共振。振幅根据材料去除率设定,粗加工采用较大振幅(5-10 μm),精加工采用较小振幅(1-3 μm)。振动方向根据加工类型选择,车削采用径向振动,铣削采用轴向振动。

低温冷却参数调控关注冷却介质流量和作用位置。液氮流量控制在 5-15L/min 区间,通过多喷嘴系统覆盖整个切削区域。喷射角度与切削方向呈 30-45 度夹角,确保冷却介质进入刀-屑接触区。加工参数需相应调整,切削速度可提高 30%-50%。

激光辅助参数调控涉及功率密度和光斑位置。激光功率密度范围为 10^3 - $10^4\text{W}/\text{cm}^2$,光斑直径 0.5-2mm。光斑中心位于切削刃前方 0.5-1mm 处,预热深度控制在 0.1-0.3mm。激光扫描速度与切削速度保持同步,预热温度监控采用红外测温系统。

3.3 工艺适应性分析

超声振动辅助加工适用于脆性材料和粘性材料。对金属玻璃加工效果显著,表面粗

精度可降低至 $Ra0.1\mu m$ 以下。对高熵合金加工能抑制绝热剪切带形成，切削力降低 20%-35%。系统需配备专门的振动发生装置和电源系统，设备改造成本较高。

低温冷却加工适用于热敏感材料和低导热材料。对增材制造钛合金加工，工件变形量减少 60%-80%。对高熵合金加工，刀具寿命延长 2-3 倍。需要解决冷凝水雾对加工环境的影响，机床需具备良好的密封性能。

激光辅助加工适用于高硬度和高脆性材料。对碳化硅颗粒增强铝基复合材料加工，增强相破碎率从 45% 降至 15% 以下。对金属玻璃加工可实现连续带状切屑。需要精确控制热影响区，避免材料相变或氧化。

3.4 工艺集成与优化策略

多能场复合加工将两种及以上特种工艺集成。超声-激光复合加工先通过激光软化材料，再利用超声振动改善材料去除过程。低温-超声复合加工在冷却环境下施加振动，同时控制热效应和机械冲击。复合工艺需解决各子系统间的干涉问题，控制系统复杂度显著增加。

自适应加工系统基于传感器反馈实时调整工艺参数。力传感器监测切削力变化，振动传感器检测系统稳定性，红外传感器测量温度分布。控制系统根据监测数据动态调整切削参数、冷却流量或激光功率。系统响应时间需控制在毫秒级，算法需具备自学习功能。

工艺数字孪生通过虚拟仿真预测加工结果。建立包含材料本构模型、刀具几何参数和工艺条件的数字模型，模拟切削过程的热力耦合行为。仿真结果用于优化工艺参数组合，预测表面粗糙度、残余应力和变形情况。模型需通过实验数据持续校准，预测精度需达到 85% 以上。

4. 新型金属材料精密加工的智能化与系统化路径

智能加工系统的实现，依赖于一套结构化的信息处理与控制逻辑。该逻辑明确了从数据感知到决策执行，再到知识积累的完整路径，其核心在于构建一个能够闭环运行的系统架构。本章所提出的系统架构及其内部信息流关系如图 2 所示。

4.1 数据处理与建模方法

监测数据采集系统由多类型传感器构成。力传感器测量三向切削力分量，安装于刀柄或工作台。振动传感器监测加工系统动

态响应，采用加速度计或声发射传感器。热像仪记录切削区域温度场分布。数据采集频率需高于关键物理现象频率的 5 倍以上，力信号采样率不低于 10kHz，振动信号不低于 50kHz。

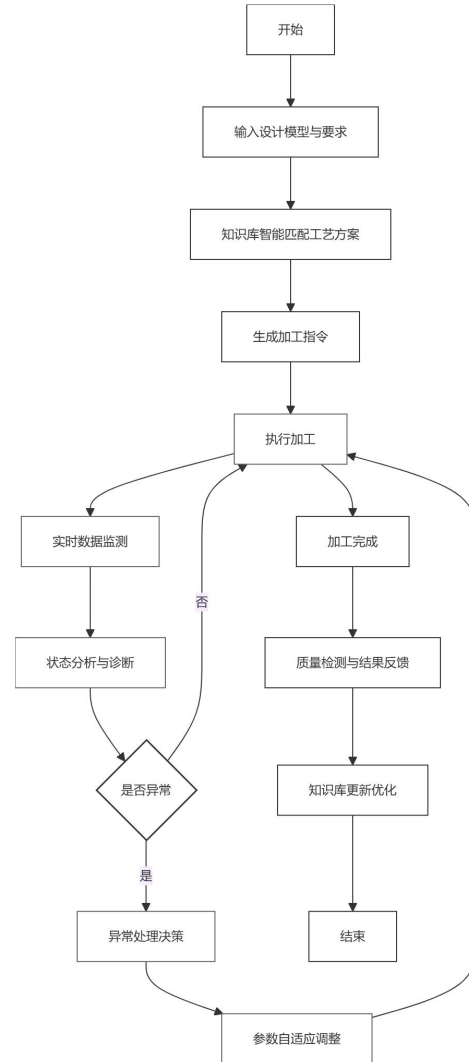


图 2. 智能加工系统核心工作流程

特征提取算法从原始数据中识别加工状态。时域特征包括均值、方差和峰值因子。频域特征通过快速傅里叶变换获得主频分量。时频域特征采用小波变换提取瞬态特征。特征维度需经过相关性分析和主成分分析降维，保留关键特征参数。

加工过程建模采用数据驱动与物理模型结合的方法。机器学习算法建立工艺参数-监测特征-加工结果之间的非线性映射关系。物理模型基于材料本构方程和热传导方程构建。数字孪生模型集成数据驱动模型与物理模型，实现加工过程的虚拟映射。

4.2 自适应控制系统构建

控制系统架构分为三层。感知层负责数

据采集与特征提取。决策层根据特征识别加工状态并生成控制指令。执行层调整工艺参数。系统响应时间需小于 50 毫秒，确保控制的实时性。

状态识别模块判断加工异常类型。刀具磨损状态通过切削力渐增特征和振动能量变化识别。颤振状态通过振动信号频域特征识别。工件变形通过多测点位移数据识别。识别准确率需达到 95% 以上，误报率低于 3%。

参数调整策略根据识别结果动态优化。刀具磨损时自动调整进给量补偿尺寸误差。颤振发生时调整主轴转速避开共振频率。热变形时调整冷却参数控制温升。调整幅度基于历史数据学习得到，避免过度调整造成系统不稳定。

4.3 工艺知识库构建与应用

知识库结构包含多个数据层。基础数据层存储材料特性、刀具参数和设备规格。过程数据层存储工艺参数、监测数据和加工结果。知识规则层存储工艺优化规则和故障诊断规则。数据采用统一格式和标准化命名规则。

知识获取通过多源数据融合实现。实验数据提供基础工艺窗口。仿真数据扩展工艺参数范围。生产数据积累实际工况下的优化参数。数据融合算法消除不同来源数据的偏差，建立完整工艺知识图谱。

知识应用支持工艺规划与优化。新工件加工时，系统根据材料类型和加工特征推荐初始工艺参数。加工过程中，系统实时调用相似案例的优化策略。知识库具备自更新功能，成功案例自动纳入知识体系，失败案例标记避免重复。

4.4 全流程集成系统实现

系统集成框架将设计、工艺规划、加工执行和质量检测环节连接。CAD 模型包含几何信息与材料属性。CAPP 系统基于知识库生成工艺路线。CAM 系统生成加工代码并预测加工结果。检测系统验证加工质量并反馈至知识库。各模块数据接口统一，信息流双向畅通。

信息流管理确保数据一致性。工艺变更时相关环节同步更新。加工异常时预警信息推送至前后环节。质量数据追溯至具体工艺参数和设备状态。数据版本管理记录变更历史，支持问题溯源分析。

系统验证在典型场景下进行。航空航天领域验证复杂结构件加工过程一致性。医疗

器械领域验证小批量多品种的快速工艺规划能力。验证指标包括工艺规划时间缩短比例、一次加工合格率提升幅度、质量稳定性改进程度。系统需在三个以上应用场景验证通过方可投入实际使用。

5. 结论

本文系统论述了新型金属材料为精密加工领域带来的根本性挑战与系统性变革。研究表明，增材制造构件、高熵合金、金属玻璃及复合材料等先进材料，因其独特的微观结构和性能表现，已超出传统加工工艺的能力边界。通过发展超声振动辅助、低温冷却、激光辅助等特种工艺，能够针对性地改善材料去除机理、控制加工损伤。更重要的是，本文提出的智能化加工系统框架，将多源感知、数据建模、知识库与自适应控制等技术模块有机整合，形成从“工艺突破”到“系统赋能”的完整技术路径。这标志着精密加工正从依赖经验的传统技艺，转变为基于数据和模型的精准工程科学。未来研究的核心在于推动材料—工艺—性能的一体化设计与数字孪生技术的深度融合，为高端制造装备的性能突破奠定基础。

参考文献

- [1]蔡志勇, 文璟, 王日初等 (2024). 增强体表面改性在高导热金属基复合材料中的应用. 有色金属科学与工程, 15 (2), 237-255.
- [2]刘嘉鸣, 全东, 赵国群 (2023). 航空复合材料连接成形技术研究进展. 机械工程学报, 59 (20), 119-142.
- [3]易梦丽, 王驰, 赖建平等 (2024). 退火处理对 Pt 基块体金属玻璃塑性动力学行为的影响. 力学学报, 56 (1), 173-182.
- [4]王辉, 郑洋, 吴动波 (2023). 航空发动机叶片精密加工工艺及装备. 金属加工 (冷加工), (10), 1-9.
- [5]李宗祐, 高春艳, 吕晓玲等 (2023). 基于深度学习的金属材料表面缺陷检测综述. 制造技术与机床, (6), 61-67.
- [6]张智超, 沈常宇, 朱周洪等 (2023). 漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究. 仪器仪表学报, (4), 150-159.
- [7]王伟, 金成哲, 王俊杰等 (2024). 铣削激光增材制造 TC4 钛合金铣削力的研究. 制造技术与机床, (8), 49-54.
- [8]何东星, 赵金月, 张振杰等 (2024). 转速

时变性对铝合金铣削加工影响分析.机械研究与应用, 37 (3), 8-11.
[9]毛鹏燕, 赵晖, 李宏达 (2024). Al 含量对 Al x CoCrFeNi 高熵合金组织和力学性能的影响.有色金属科学与工程, 15 (6),

867-876.
[10]张而耕, 王亚琨, 梁丹丹等 (2024). 非晶合金薄膜的制备和韧性优化措施.应用技术学报, 24 (1), 63-71.