

Research Progress of Precision Machining Technology for High Temperature Alloys: From Traditional Cutting to Special Machining Challenges and Prospects

Shuhao Zhao¹ Chang Li¹ Yinan Zhao² Xing Han^{1*}

1. Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning, 114051, China

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract

High-temperature alloys are extensively utilized in aerospace and gas engines, yet their exceptional machinability challenges impose stringent requirements on processing efficiency and surface integrity. This review synthesizes the latest advancements in conventional and specialized machining technologies—including mechanical, grinding, electrolytic, EDM, and arc machining—conducting comparative analyses of material removal, processing quality, and application scenarios. The findings demonstrate that grinding excels in precision forming but is heat-sensitive; electrolytic machining eliminates mechanical stress but is constrained by flow field limitations; EDM demonstrates strong structural adaptability but generates recast layers; while arc machining achieves high efficiency but suffers from insufficient surface stability. Current challenges primarily involve multi-physical field coupling mechanisms and surface integrity preservation. Future research will focus on elucidating machining mechanisms to establish unified quality standards.

Keywords

superalloy; precision machining; special machining; surface integrity; intelligent manufacturing

高温合金精密加工技术研究进展：从传统切削到特种加工的挑战与展望

赵书豪¹ 李昌¹ 赵一楠² 韩兴^{1*}

1. 辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

2. 华中科技大学, 中国·湖北武汉 430074

摘要

高温合金在航天与燃气中有广泛应用,但其显著的难加工性,对加工效率、表面完整性提出更高要求。本文综述了机械加工、磨削加工、电解加工、电火花加工和电弧加工典型传统与特种加工技术的最新研究进展,从材料去除、加工质量及适用场景等方面进行了比较。结果表明,磨削加工精密成形但易受热影响;电解加工无机应力但受流场制约;电火花加工结构适应性强但存在重铸层;电弧加工效率高但表面稳定性不足。当前挑战主要集中在多物理场耦合机理及保持表面完整性。未来将探寻加工机理以构建统一的质量标准。

关键词

高温合金; 精密加工; 特种加工; 表面完整性; 智能制造

1 引言

进入 21 世纪以来,中国工业体系正由“大规模制造”向“高质量制造”与“自主可控”加速迈进。航空发动机、燃气轮机、航天动力装置以及核能涡轮系统普遍在高温、高速、强腐蚀环境下工作,其核心部件需要优异的性能。以镍

基高温合金为代表的材料,因其高工作温度、出色的抗氧化和抗腐蚀特性,成为此类关键热端部件的主导材料^[1]。

然而,高温合金的复杂组织结构和强化机制,如 γ' 强化相、碳化物分布等,虽然提升了其服役性能,但也直接导致了难加工性,如工具磨损率高、表面质量差、残余应力大等问题。

因此,在中国推进“先进制造+智能制造”背景下,解决高温合金高质量高效率加工问题,具有重要战略意义。有必要系统梳理国内外在高温合金加工方面的研究现状与技术进展。

【作者简介】赵书豪(2005-),男,中国山西大同人,本科,从事机械、特种加工研究。

【通讯作者】韩兴(1982-),女,中国辽宁人,硕士,副教授,从事机械工程研究。

2 传统加工技术研究现状

2.1 机械加工

机械加工作为最传统的材料去除方式，是现代制造体系的基础工艺之一。早期的机械加工主要依靠车、铣、镗等基本切削方式，通过刀具与工件的相对运动去除材料。随着机床结构与刀具材料的不断发展，机械加工逐渐从手工操作走向数控化、自动化，实现了稳定的尺寸加工能力和较高的表面质量，为复杂零件的大规模制造奠定了基础。

进入数控与高速加工时代后，机械加工具备了多轴联动、高转速主轴与更强的热稳定性，能够加工整体叶片、薄壁件和高曲率面等复杂结构。刀具材料和涂层体系不断升级，使机械加工在应对高温合金等难加工材料时有更高的加工效率和更好的切削稳定性。同时，切削参数优化、振动抑制和误差补偿技术的应用，使机械加工的精度与一致性不断提升。

2.2 磨削加工

磨削加工是一种利用高速旋转磨料对工件表面进行微切削、实现材料去除的加工方法。自第一台磨削机床问世以来，该技术迅速发展，目前在机械制造业中约占40%的应用比例，成为现代制造体系中不可或缺的重要环节。随着新材料发展、结构设计革新、计算机技术与现代控制理论相结合，磨削技术不断向高效、低损伤和超精密方向演进，并衍生出多种适应不同工件特性的磨削方式，广泛用于金属、陶瓷、复合材料及非金属材料的粗加工与精加工。与此同时，磨削装备也由传统单功能机床发展为多轴联动的智能化复合装备，展现出更广的工业应用潜力^[2]。

砂带磨削因其散热充分，能有效降低工件表面温度，减少热损伤。相关研究提出了描述涂层磨料砂带特性的参数体系，揭示了不同粒度砂带加工不同材料时的表面质量差异。有学者提出基于离散元素的自由曲面表示方法，实现了磨削过程的实时仿真与可视化，可有效预测复杂曲面的磨削误差^[3]。机器人砂带磨削技术也逐渐成熟，通过高精度力控及姿态校准，可提升复杂曲面的磨削质量。

在超精密磨削方面，研究者利用多轴超精密磨削设备，通过球形砂轮平行磨削技术成功加工出长径比较大的保形光学内表面；提出了斜轴磨削方法，通过倾斜磨削主轴实现小直径砂轮对深腔凹面的有效加工；同时构建了球形砂轮平行磨削系统，实现了大尺寸蓝宝石光学整流罩内外表面的超精密加工，并对高陡度磨削过程中的砂轮磨损行为进行了系统分析，成功加工出高精度光学内表面及微型非球形结构，展示了磨削在复杂、微结构制造领域的潜力。

3 特种加工技术研究现状

3.1 电解加工

电解加工（ECM）是一种基于电化学阳极溶解原理的无接触加工方法，利用工件作为阳极在电解液中进行溶解，实现材料去除。该方法的重大优势在于加工过程中无机械应力

和热影响区，工具电极磨损极小，特别适用于高温合金复杂曲面和精密结构的加工，如航空发动机叶片和整体叶盘^[4-5]。因电解加工的材料去除率较低，且易受电解液流场和间隙控制的影响，导致非目标腐蚀问题较为突出。近年来，研究者们通过优化电极设计、脉冲控制和辅助介质等方式显著提升了其加工精度和效率。

在深小孔加工领域，研究分析了电压、脉宽等参数对材料去除效率的影响，通过参数优化实现了孔壁均匀性和圆度的改善。工业上已构建了用于整体叶片的生产线。国内团队创新性地提出“旋印电解加工”工艺，成功应用于高凸台回转体零件加工。

群孔结构电解加工是另一重要分支，包括掩膜电解和管电极电解两种形式，已广泛用于多孔结构件的制造^[6]。射流电解加工则通过高速电解液射流形成局域反应区，实现局部材料去除，避免了传统浸没式加工的非目标腐蚀。通过引入气膜屏蔽、同轴喷吸等技术，进一步提升了射流电解的可控性与加工质量。

总体而言，电解加工在高温合金精密成形方面取得了显著进展，尤其在微结构和曲面加工的自由度上，但仍需进一步解决电解液腐蚀控制和多场耦合模拟的挑战，以实现更高效的工业化应用。

3.2 电火花加工

电火花加工（EDM）通过阴阳极间介质击穿形成的瞬态放电通道，将电能转化为热能熔化并抛除材料，实现无接触去除。该方法适用于高温合金的复杂腔体和微孔加工，具有高精度和低工具损耗的特点，但加工速度较慢，且易产生重铸层和热影响区^[7]。近年来，研究焦点转向介质优化、电极设计和辅助冷却，以平衡效率与表面完整性。2023-2025年间，EDM的建模、优化和可持续性方面取得了关键进展，特别是在AI驱动模拟和绿色介质的应用上。

有研究发现提高峰值电流和脉宽可提升材料去除率，但会影响表面粗糙度。

3.3 电弧加工

电弧加工利用电极与工件间电离形成的等离子体通道产生高温热源，实现材料瞬态熔融与高效去除。该方法以高材料去除率著称，适用于高温合金的粗加工，但易导致重铸层厚和表面不均。研究在冲液环境中实现了高去除率，验证了电弧放电的高效性。国内提出了电熔爆加工技术，通过强电流快速熔化材料并在高速工作液冲击下爆离，与传统方法相比优势明显。电弧车削可获得较大的单边切深和极高的去除率。国内多所大学团队在短电弧铣削、不同介质与极性影响、高效放电机理等方面开展了系统性研究，构建了相应机床平台与仿真模型^[9-10]。通过结合超声振动、磁场辅助、机械-流体耦合断弧等技术，逐步提升了加工稳定性和表面质量。电弧加工在效率提升和稳定性控制上取得了突破，但多场耦合机理的深入研究仍将决定其向精密复合加工的演进潜力。

4 当前挑战与问题分析

尽管磨削加工、电火花加工和电弧加工在高温合金制造领域取得了十分显著的进展,但整体加工体系仍面临多方面挑战。首先,高温合金在高强度、高硬度及复杂组织结构共同作用下,呈现出强烈的难加工性。在磨削加工中,局部高温导致砂轮磨粒发生磨钝、脱落或结合剂热损伤,使加工过程出现热裂纹、烧伤和表层组织异常;在深切削或高效磨削下,工件表面残余拉应力和微裂纹对零件疲劳寿命构成威胁。

电火花加工方面,其放电本质决定了重铸层、微裂纹及热影响区不可避免。尽管近年来通过优化介质、电极结构及脉冲参数可在一定程度上改善表面质量,但重铸层去除、放电稳定性和材料去除效率之间仍存在难以兼顾的矛盾。特别是在复杂腔体加工中,碎屑排出困难、放电间隙波动及电极损耗均会引起轮廓畸变甚至加工中断。

此外,多数加工方法的工艺窗口较窄,加工参数优化依赖经验与反复试验,而多物理场模型尚不完善,使得加工过程难以实现预测性与可控性。更为重要的是,在中国航空发动机和高端装备制造加快自主化突破的背景下,高温合金产量与需求量之间长期存在较大缺口,使得加工过程中的材料利用率、表面完整性与最终服役寿命成为影响产业竞争力的关键因素。现阶段难以在工程应用中实现高效率、高一致性与可复制的稳定加工能力,使复合加工技术的发展不仅是学术问题,更是制约产业链高端制造能力提升的核心瓶颈。高温合金材料昂贵,加工中产生的边界损伤、过切、报废风险直接推高制造成本。在当前高端装备快速发展的背景下,如何提升加工效率、表面完整性与尺寸一致性,仍是制约产业化应用的核心问题。

5 发展趋势与未来展望

面向航空发动机、燃气轮机及先进能源装备的高温合金加工需求,未来加工技术的发展趋势主要体现在以下三个方向。

首先,在机理研究层面,需要进一步深化多物理场耦合模型,通过建立包含温度场、应力场、流场与放电行为的综合模型,阐明磨削热损伤、电火花放电成坑、电弧等离子体作用下材料熔融与再凝固过程的本质机制。通过提高机理模型的可预测性,可为工艺窗口设定、参数优化及表面完整性控制提供理论支撑。

其次,在工艺装备与控制方面,加工过程将逐步从“经验调节”向“智能控制”转变。高速磨削设备、电火花智能电源、电弧功率模块与温度监测、力信号、放电电压电流等实时数据结合,形成闭环调控系统。借助数字孪生技术,可实现加工状态预测、参数自动优化和表面质量预判,提高加工稳定性并减少试切成本。

再次,在工艺体系建设方面,高温合金表面完整性要求将促使研究从传统“去除材料”转向对“组织演化与性能保持”的关注。针对磨削过程的热效应、电火花的重铸层产

生、电弧加工的放电形貌演变,应建立表面完整性评价指标体系,包括表层晶粒细化、残余应力分布、微裂纹抑制及成分再分布规律,为加工质量量化与标准化提供依据。

6 结语

高温合金作为航空发动机、燃气轮机及耐高温构件的关键材料,其优异的力学与化学稳定性也使其成为典型的难加工材料。当前,磨削加工、电火花加工和电弧加工分别在精密加工、高深径比结构成形和高效粗加工方面发挥着不可替代的作用,但各项技术在加工效率、表面完整性和参数可控性方面仍存在明显限制。

磨削加工虽能获得较高的尺寸精度和低粗糙度,但易产生热损伤与工具磨损;电火花加工适用于微结构与复杂腔体,但表面重铸层及加工速度难以完全满足工程化需求;电弧加工具备极高的去除率,却受到表面质量波动和放电不稳定的制约。现阶段,对多物理场耦合规律、界面材料行为及加工过程反馈控制的研究仍不足,使得工艺设计依赖经验、加工窗口狭窄。

未来,通过深化机理模型、完善智能调控及构建标准化的表面完整性评价体系,可推动高温合金加工从经验驱动走向模型驱动与智能制造,提高工效率与一致性。随着理论认知和装备能力不断提升,高温合金加工技术将为中国高端装备的自主制造与可靠服役提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] Zhang L X, Shi J M, Li H W, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of ZrB₂SiCC ceramic and GH99 superalloy joints brazed with a Ti-modified FeCoNiCrCu high-entropy alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 97: 230-238.
- [2] 张兵,何泽,刘淑秀,等.浅谈砂带磨削技术在工程机械行业的应用[J].*物流工程与管理*,2010,32(06):168-169.
- [3] Weinert K ,Blum H ,Kuhlenkötter B , et al.New methods for calculating the force distribution w-ithin belt grinding processes.[J]. *Production Engineering*,2007,1(3):285-289.
- [4] 袁奎.轧辊用M42高速钢电解加工阴极优化设计及极间间隙检测方法研究[D].贵州大学,2022.
- [5] 李晶.二维旋转超声辅助磨削-电解除电展成加工机理及试验研究[D].扬州大学,2022.
- [6] 李红英,张明岐,冯健,等.照相电解加工技术的发展与应用[J].*航空制造技术*,2015,(Z2):57-60.
- [7] 单题元.钛合金电火花加工工艺及加工机理研究[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [8] Wang X ,Liu Z ,Qiu M , et al.Mechanism of Electrical Discharge Machining Ablation[J].*Materials and Manufacturing Processes*,2014,29(11-12):1367-1373.
- [9] 梁楚华,朱志坚,杨明洁.电熔爆技术发展现状及展望[J].*现代制造工程*,2004,(01):98-100.
- [10] 吴国庆,廖萍,汪希平.电熔爆机床的噪声和电磁辐射测控研究[J].*电加工与模具*,2003,(06):29-31+70.