难加工材料场辅助超精密加工研究

许剑锋*, 黄凯, 郑正鼎, 林创挺, 张建国, 肖峻峰, 陈肖

华中科技大学机械科学与工程学院, 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074

* E-mail: jfxu@hust.edu.cn

收稿日期: 2021-08-21; 接受日期: 2021-10-27; 网络版发表日期: 2022-03-03

国家自然科学基金(批准号: 51905195, 51705172, 51905194, 51627807)、中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 2020kfyXJJS085)和华中科技大学学术前沿青年团队(编号: 2019QYTD12)资助项目

摘要 场辅助超精密加工(field-assisted ultra-precision machining, FAUM)是一种先进的制造技术. 基于传统的超精密加工技术, 通过引入激光、超声振动和磁场等能场进行创新, 实现了难加工材料纳米级甚至亚纳米级高精度制造. 本文具体阐述了场辅助技术在切削、磨削和铣削等超精密制造领域应用的研究. 通过分析加工表面质量、加工效率、切削力和刀具磨损等实验结果, 与传统超精密加工技术对比, 场辅助超精密制造技术具有明显优势. 总结FAUM目前存在的不足及未来面临的挑战, 为进一步发展多能场复合辅助超精密制造技术奠定基础.

关键词 场辅助超精密加工, 难加工材料, 激光辅助, 超声振动辅助, 磁场辅助

1 前言

超精密制造技术集成了现代最新的科技成果, 零件的加工尺寸、形状精度可达亚微米级, 表面粗糙度Ra可达纳米级, 甚至亚纳米级(10^{-1} nm)(如图1所示), 是现代高新产业和科学技术的发展基石, 也是现代制造科学的重要发展方向^[1]. 难加工材料具有良好的综合机械性能, 在国防军事、航空航天和生物医疗等领域获得了广泛的应用. 然而, 传统超精密制造技术加工难加工材料时, 加工表面容易出现烧蚀、裂纹、亚表层损伤等缺陷, 降低工件的使用性能, 同时还伴随着严重的刀具磨损, 降低刀具使用寿命. 因此急需突破传统超精密制造技术瓶颈.

场辅助超精密加工(field-assisted ultra-precision

machining, FAUM)技术通过传统超精密切削、铣削、磨削、抛光等加工方式的基础上引入激光、超声振动和磁场等能场, 弥补传统超精密制造技术在难加工材料高品质制造方面能力的不足, 改善难加工材料的加工性能, 实现其高质量低损伤的超精密制造. 本文系统地总结了场辅助超精密制造技术的最新研究进展, 对场辅助超精密制造技术的基本原理和加工性能进行了论述, 涵盖了不同的场辅助加工方式、创成机理和设备装置, 并对场辅助超精密制造技术的发展方向进行了展望.

2 难加工材料及其加工技术挑战

常见的难加工材料可分为五大类: 高温合金(铁

引用格式: 许剑锋, 黄凯, 郑正鼎, 等. 难加工材料场辅助超精密加工研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 829–853

Xu J F, Huang K, Zheng Z D, et al. Review of field-assisted ultraprecision machining difficult-to-machine materials (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 829–853, doi: 10.1360/SST-2021-0393

图 1 (网络版彩图)超精密加工的精度范围^[2]

Figure 1 (Color online) Precision range of ultra-precision machining [2].

基、镍基和钴基高温合金)、钛合金、不锈钢(奥氏体不锈钢、马氏体不锈钢和沉淀硬化型不锈钢)、高强度钢和硬脆材料^[3]。由于共价离子键的结构特点,硬脆材料具有许多理想的特性,例如高强质比、耐腐蚀性、高韧性、电绝缘性、优异的耐热性和耐磨性,使硬脆材料比传统材料更具竞争力^[4]。常见的硬脆材料如碳化硅、单晶硅,广泛地应用于量子计算、激光面镜和红外探测系统等军事国防领域。单晶硅是目前应

用最广泛的红外光学材料之一,在可见光波段不透光,但在红外波段(3~5 μm)具有良好的透过率,可应用于军用红外设备,如单兵作战红外系统、EOST系统光学窗口,如图2(a)所示。高温合金在高温环境下,具有较好的强度、抗氧化、抗热腐蚀、抗疲劳和断裂韧性等机械性能,可作为航空发动机叶轮材料。高强度钢具备高比强度和屈强比等特点,可应用于航天飞机起落架。陶瓷类石英玻璃具有良好的高温稳定性和力学性能,可应用于航空飞机机头雷达罩^[5],如图2(b)所示。钛合金具有密度小、弹性模量低、抗腐蚀性强、无磁性、生物相容性好等特点,常用于人工骨关节、口腔种植体等人工植入物。不锈钢具有抗腐蚀、抗氧化、无毒无污染等特点,可制成手术刀等医疗器械,如图2(c)所示。

然而上述难加工材料使用传统的加工方式较难直接获得满足使用需求的零部件。例如,高温合金和钛合金的加工变形系数小、导热系数低,传统切削加工时会出现冷硬现象,刀具粘黏、切削力大、切削过程的

图 2 (网络版彩图)典型难加工材料及其应用. (a) 军事国防; (b) 航空航天; (c) 生物医疗

Figure 2 (Color online) Typical difficult-to-machine materials and their applications. (a) Military defense; (b) aerospace; (c) biomedical.

图 3 (网络版彩图)难加工材料加工过程中存的问题. (a) 镍基合金切削力、热载荷大, 加工硬化严重^[16]; (b) 加工硬脆材料刀具磨损严重^[17]; (c) 单晶硅亚表面层损伤^[18]

Figure 3 (Color online) Problems in machining of difficult-to-machine materials. (a) Large cutting force, thermal load and hardening of Ni-based alloys [16]; (b) severe tool wear in machining hard and brittle materials [17]; (c) subsurface damage of single crystal silicon [18].

高温会加剧刀具磨损, 如图3(a)所示. 硬脆材料硬度高、断裂韧性低, 在传统切削加工过程中, 材料是以脆性断裂的形式去除, 容易在已加工表面产生裂纹和凹坑, 严重影响产品的表面质量和性能, 刀具发生严重磨损甚至崩碎, 降低刀具的使用寿命^[6,7], 如图3(b)所示. 研磨或抛光可以去除超精密切削产生的表面缺陷, 进一步提高工件的表面质量^[8,9], 然而研磨和抛光加工效率低、费用高, 经济效益低^[10], 研磨抛光工具头会受到零件的待加工表面形状的限制, 较难加工复杂的自由曲面, 并且还会产生亚表面损伤^[11].

随着高性能难加工材料的开发和应用, 传统的机械加工方式由于自身的技术限制, 难以达到所需的面形精度和表面质量. 在难加工材料的超精密制造过程中, 激光辅助、振动辅助、电磁辅助等场辅助制造方式可有效弥补传统切削、磨削和抛光制造能力的不足, 场辅助加工技术已成为难加工材料超精密制造领域的研究热点^[12-15].

3 场辅助超精密加工技术

FAUM技术通过融合流场、磁场、电场、超声和热场等能场, 弥补了传统超精密制造技术在难加工材料方面的不足. 目前, 国内外从加工原理、装置设备、创成机理等多个方面对FAUM方式展开了系列研究工作. 本文将对激光辅助、超声振动辅助、磁场辅助等FAUM技术进行深入研究论述.

3.1 激光辅助加工

激光辅助加工(laser assisted machining, LAM)是将激光能量引入加工区域, 提前预热并软化难加工材

料, 以改善其变形行为, 使得材料以塑性方式去除, 从而提高温度诱导下材料的加工性能^[19]. 材料通过外部热源加热后, 在加工过程中可以减少切削力和刀具磨损、改善表面光洁度、提高材料去除率和减少工件表面损伤. 20世纪70年代末, Bass等人^[20]首次尝试了LAM实验, 研究了激光加热对Inconel 718、不锈钢和Udimet 700的影响, 发现激光的热效应可以提高难加工合金的可加工性. 美国乔治亚理工学院与德国弗劳恩霍夫制造技术研究所率先开展了硬脆陶瓷光学材料的激光辅助加工, 实现了陶瓷材料的塑性域去除. 然而, 引入激光极易造成光学脆性材料成形表面的热损伤, 产生热裂纹扩展, 较难实现光学脆性材料的高质量超精密制造. 美国密歇根大学提出原位激光辅助加工技术, 通过调整激光束从金刚石刀具刃口射出, 使材料在加热的同时被去除, 有效提高硬脆材料的加工质量和效率, 应用于陶瓷、半导体和玻璃等难加工材料的精密加工^[21]. 国内哈尔滨工业大学针对 Si_3N_4 陶瓷等难加工材料的激光辅助切削和铣削加工的切削机理和工艺参数进行了深入的研究^[22,23]. 湖南大学针对 Al_2O_3 陶瓷激光辅助加工的温度场进行了数值模拟研究^[22,24]. 华中科技大学开展了激光辅助超精密制造装备研制与前沿理论等方面的研究工作, 并研制了国内首台激光原位辅助金刚石切削系统及成套加工工艺, 实现了单晶硅、碳化钨和熔石英玻璃等难加工材料纳米级超精密加工. 天津大学通过分子动力学和切削实验证实了原位激光辅助加工可以明显提高WC表面质量和刀具使用寿命^[25]. 近几十年来, LAM技术因其在难加工材料具有高效性和经济性优势而得到快速发展, 现已实现了与切削、磨削、铣削等传统加工方式相结合, 衍生出多种LAM方式.

3.1.1 激光辅助切削

激光辅助切削(laser assisted cutting, LAC)实现形式简单, 在提高工件表面质量, 减少刀具磨损上表现出极大的优势, 因此LAC为LAM领域最常用的加工方式, 根据激光辐射位置的不同, LAC可分为传统LAC和原位LAC两种方式.

传统LAC的激光源直接辐射于工件表面, 通过激光的预热作用降低材料表面硬度, 实现难加工材料的超精密加工. LAC装置由机床和激光模块组成, 如图4(a)所示, 激光作用于待切削区域, 通过加热至一定温度实现工件的软化效果, 并由机床完成切削加工^[26]. 国内外学者将LAC技术应用于氮化硅、 ZrO_2 陶瓷、熔石英玻璃等难加工材料的加工, 通过激光的软化作用降低材料的屈服强度, 提高延展性, 改善难加工材料的加工表面质量. Song等人^[27]研究了普通切削和传统LAC对熔石英加工表面质量的影响, 实验结果表明, 相对于普通切削, 传统LAC工件表面裂纹、凹槽等缺陷减少, 表面质量更高, 有效地提高了熔石英玻璃的切削性能.

传统LAC通过激光直射工件表面改变材料的切削性能, 在一定程度上提高了工件的表面质量和加工精度. 但却存在着不足: ① 激光光斑与刀具距离较大, 达到厘米级, 要对工件进行加热达到软化效果, 需要

较大的激光功率, 能耗较高; ② 切削液难以作用于切削过程, 切削液会影响激光光路, 增加激光焦点位置的不确定性; ③ 激光光斑与刀具间隔一定的距离, 工件的中心位置无法被加工. 对此学者们提出原位LAC技术, 其加工原理和加工装置如图4(b)所示^[28], 激光束穿过刀具本体并聚焦于切削位置处, 通过激光与刀具的耦合, 实现对工件材料的原位加热, 使得加工区域温度精确可控, 巧妙地解决了传统LAC所面临的技术瓶颈^[6]. Chen等人^[18]采用分子动力学仿真与切削实验的方法研究了单晶硅激光原位辅助切削过程中亚表面损伤和相变过程. 发现非晶Si是由Si-I相直接产生, 而不是由中间高压相Si-II产生. 新形成的非晶Si在激光原位辅助切削过程中部分结晶, 并在激光退火作用下转变为亚稳Si-III和Si-XII相, 可促进单晶硅的位错运动, 提高塑性变形能力, 实现单晶硅的临界切削脆塑转变深度由150 nm增加到395 nm, 有效地降低亚表面损伤. Liu等人^[29]通过分子动力学模拟研究了高温条件下单晶硅的切削机理和亚表面损伤演化规律. 通过激光原位辅助切削实验, 发现提高切削温度, 非晶层的剪切抗力降低, 非晶层的自润滑作用更加明显, 有利于抑制亚表面损伤. He等人^[30]通过有限元模拟(FEM)与实验测试的方法研究了激光原位辅助超精密切削温度场分布, 采用光滑粒子动力学(SPH)对不同温度的单晶硅激光原位辅助切削过程进行仿真分析, 并通过实验

图4 (网络版彩图)LAC加工原理与装置设计. (a) 传统LAC^[26]; (b) 原位LAC^[28]
Figure 4 (Color online) Machining principle and device design of LAC. (a) Traditional LAC^[26]; (b) *in-situ* LAC^[28].

证了原位激光可有效提高单晶硅的脆塑转变深度至 378.11 nm, 实现单晶硅的塑性域加工. You 等人^[25]通过数值分析和加工实验系统地研究了原位激光辅助切削碳化钨的材料去除机理, 通过高温纳米压痕实验, 发现高温条件下碳化钨的加工性能得到改善, 在原位激光辅助切削条件下, 碳化钨发生了较大的弹性恢复, 无损伤表面的临界切深从 26.3 nm 提升至 106.3 nm, 并基于仿真模拟结果和切屑分析, 加工碳化钨的最佳激光功率范围是 10~15 W, 面粗糙度 Sa 可达到 4.66 nm, 刀具寿命能得到明显提高. Geng 等人^[31]基于有限元理论建立了三维瞬态传热模型, 研究不同加工条件下的温度响应关系, 探究原位激光辅助加工的材料去除机制和高效加工的可行性. 通过对加工表面进行系统地表征分析, 发现在原位激光辅助加工下的单晶硅位错移动速率明显提升, 有效促进了单晶硅发生塑性变形. 通过 X 射线衍射图谱分析, 原位激光作用下工件表面的残余应力明显降低. 根据加工实验结果, 发现提高转速可促进单晶硅工件的塑性加工, 抑制表面微凹坑的出现, 表面粗糙度和非晶层厚度也随着转速增加而减小. Mohammadi 等人^[32]在单点金刚石车床上加入激光模块, 搭建原位激光辅助切削系统, 其中激光模块采用波长为 1070 nm、最大功率为 100 W、光斑直径为 10 μm 的红外连续光纤激光器. 通过对单晶硅(111)进行加工实验, 发现原位激光辅助切削工艺可以修复和消除由于晶体取向效应而产生的径向辐条, 能够显著降低单晶硅(111)工件的表面粗糙度.

不同材料 LAC 研究现状如表 1 所示. 传统 LAC 较多的应用于熔石英、氮化硅等硬脆材料, 对于硬度更

高、加工难度更大的光学材料, 如单晶硅、碳化硅等, 原位 LAC 显现出更大的优势. 与传统切削相比, LAC 可实现高效率、低成本、高质量硬脆光学元件的超精密成形制造.

3.1.2 激光辅助磨削

激光辅助磨削(laser assisted grinding, LAG)通过在传统磨削系统中加入激光模块, 可实现难加工材料的塑性加工, 减小磨削力和脆性断裂损伤, 从而提高加工表面质量, 其加工原理如图 5(a)所示. LAG 最早由 Tian 和 Shin^[40]提出, 在磨削陶瓷前使用激光预热, 将待磨削区局部温度提高到 1600℃ 以上, 使工件在磨削过程由脆性转化为塑性, 从而提高材料加工表面质量, 减少磨具磨损, 进而降低难加工材料精密加工的成本. 马哲伦等人^[41]搭建了如图 5(b)所示的 LAG 系统用于改善氧化铝陶瓷难加工、加工表面质量差的问题, 结果表明, 与传统磨削相比, LAG 加工表面形貌脆性断裂减少, 表面粗糙度 Ra 值更低, 表面质量更好, 砂轮使用寿命延长. 李志鹏等人^[42]研究 LAG 与传统磨削 RB-SiC 陶瓷的表面质量, 如图 5(c)和(d)所示. 结果表明, 传统磨削 RB-SiC 陶瓷的表面多为脆性断裂, 凹坑边缘尖锐, 断面成撕裂解离状态; 在 LAG 方式下, 表面呈现熔融状态, 相比传统磨削表面脆性断裂较小, 表面粗糙度 Ra 和亚表层损伤深度显著降低. Xu 等人^[43]为实现氧化锆陶瓷高效低成本的精密加工, 在磨削加工前使用激光预热, 结果表明, 采用激光预热材料后进行磨削的工艺可减少磨削力和磨削能量, 该工艺可有效克服陶瓷等难加工材料磨削加工过程中高比磨削能的局限性.

表 1 激光辅助切削研究

Table 1 Research of laser assisted cutting

加工工艺	作者	材料	加工效果
传统激光辅助切削	Konig 和 Zaboklicki ^[33]	氮化硅	获得了表面粗糙度 Ra 低于 0.5 μm 的加工表面
传统激光辅助切削	Dandekar 等人 ^[34]	氮化硅颗粒增强铝基复合材料 A359/20SiCP	刀具寿命提高约 2 倍, 表面粗糙度 Ra 降低 37%
传统激光辅助切削	李国发等人 ^[35]	ZrO ₂ 陶瓷	有效减小切削力, 减缓刀具磨损和改善加工表面质量
传统激光辅助切削	宋华伟等人 ^[36,37]	熔石英玻璃	刀具寿命提高了 38.79%, 切削力减小了 53.61%
原位激光辅助切削	Mohammadi 等人 ^[38]	单晶硅	表面粗糙度从原本的 850 nm 降低至 178 nm
微激光辅助划痕	Ravindra 等人 ^[28]	单晶硅	相同的载荷作用下, 激光作用会产生更大的切削深度
原位激光辅助切削	Virkar 和 Patten ^[39]	碳化硅	切削力和推力降低了约 25%

图 5 (网络版彩图)LAG加工原理与装置设计. (a) LAG原理图^[40]; (b) LAG实验装置^[41]; (c) 表面形貌^[42]; (d) 表面粗糙度和亚表面损伤^[42]

Figure 5 (Color online) Machining principle and device design of LAG. (a) Schematic diagram of LAG ^[40]; (b) experimental facility of LAG ^[41]; (c) surface morphology ^[42]; (d) surface roughness and subsurface damage ^[42].

3.1.3 激光辅助铣削

激光辅助铣削(laser assisted milling, LAMM)通过传统铣床上加入激光模块,以改善传统铣削加工过程中铣刀振颤等问题,其加工原理如图6(a)所示^[44],加工系统如图6(b)所示^[45].根据所选铣刀的不同,LAMM有如图6(c)所示的几种方式^[46],使用面铣刀或微端铣刀的平面单向铣削,其主要应用于加工形状简单的工件;使用球头铣刀的三维激光辅助铣削,其主要应用于加工具有形状复杂的工件.为满足铣削过程中对工件不同位置的激光辐射,Bermingham等人^[47]提出了如图6(d)所示的两种LAMM装置,第一种是围绕主轴旋转的激光器,以适应加工方向的变化.第二种是固定在机床工作台的激光器,通过旋转工作台的移动,始终保持激光的焦点在刀具前方.Kumar和Melkote^[48]对A2工具钢进行了LAMM研究,结果表明切削力平均降低69%,材料去除率提高了6倍,如图6(e)所示,与传统铣削相比,LAMM刀具的磨损显著降低.Woo和Lee^[49]设计了激光热源可控的LAMM装置用于Inconel 718的加工,与传统铣削相比,LAMM过程中铣削位置角度为75°、45°、15°时表面质量分别提高了7%、40%、

24%. Cha等人^[50]提出了一种新的基于激光功率的预热方法,利用这种预热方法,可以有效地将热量传递到工件上.通过对 Si_3N_4 工件的加工,验证了该方法的有效性.此外研究了不同工艺参数对表面粗糙度和切削力的影响,通过田口实验及正交分析获取了AISI 1045钢最佳LAMM工艺参数.Bermingham等人^[51]进行激光辅助铣削马氏体沉淀硬化不锈钢实验,研究激光预热作用下刀具的磨损机制,与正常室温环境下的铣削实验对比,发现激光辅助铣削可以使切削力减少33%,同时抑制了室温切削过程中产生的高频颤振现象,刀具的寿命得到明显改善.

3.1.4 其他激光辅助加工方式

激光辅助加工技术还应用于其他加工方式,如抛光、钻削等.激光辅助抛光(laser assisted polishing, LAP)可使工件材料表层塑性变形增加,与传统抛光相比,刀具磨损明显减小,加工表面完整性更好,有效降低了工件表面粗糙度^[52].Tian和Shin^[52]进行了AISI 4140传统抛光和LAP的实验对比,如图7(a)所示,随着激光功率的升高,工件粗糙度逐渐降低,激光功率为500 W时,与传统抛光(0 W)相比,表面粗糙度 R_a 降低

图 6 (网络版彩图)LAMM加工原理与装置设计. (a) LAMM原理图^[44]; (b) LAMM实验装置^[45]; (c) 不同形式LAMM^[46]; (d) 激光作用形式^[47]; (e) LAMM与CM磨削效果对比^[48]
Figure 6 (Color online) Machining principle and device design. (a) Schematic diagram of LAMM ^[44]; (b) experimental facility of LAMM ^[45]; (c) different forms of LAMM ^[46]; (d) laser working mode ^[47]; (e) milling effect comparison of LAMM and CM ^[48].

了约35%。Barnes等人^[53]在抛光铝/碳化硅复合材料中,对待加工层进行激光预处理,有效降低了工件表面硬度,在选定的预热处理条件下,随着进给力的降低,后刀面磨损降低了近50%。

激光辅助钻削(laser assisted drilling, LAD)技术结合了传统钻削工艺和激光加热工艺的优点,使钻削过程发生在准塑性阶段,刀具磨损小,材料表面光洁度好,生产效率高,其加工原理如图7(b)所示^[54]。由于激光难以传输到钻孔区内要去除的材料上,因此,目前LAD的研究并不多。Jen等人^[55]应用环形激光光斑提高钻孔性能,获得了激光功率、激光光斑尺寸对加热温度的影响规律,提高了钻孔质量和效率。Zhang等人^[54]对41Cr4、C45E4、不锈钢作为工件材料的LAD

技术进行了实验研究,与常规钻削相比,41Cr4、C45E4、不锈钢的钻削时间分别减少了18.6%、16.3%、39.9%,由此说明,激光可以显著提高难加工材料钻削的效率。

由于LAD中,激光只能对工件材料表层起到加热软化的作用,而随着钻削的不断深入,激光无法对孔内材料进行加热,这限制了LAD加工效率的进一步提高。对此,西密歇根大学的Mohammadi和Patten^[56]提出了一种原位激光辅助钻削技术,其加工原理和实验装置如图7(c)所示。该技术使用聚焦激光束,将其引导通过光学透明的金刚石刀具软化工件材料,并在非消融的状态下加工工件。刀尖产生极高的压缩应力和剪切应力有利于提高工件的可加工性和激光吸收率,从而

图 7 (网络版彩图)其他激光辅助加工方式. (a) LAP^[52]; (b) LAD^[54]; (c) 原位LAD^[56]
Figure 7 (Color online) Other laser assisted machining methods. (a) LAP^[52]; (b) LAD^[54]; (c) in-situ LAD^[56].

实现在碳纤维复合材料上加工出质量优良的精密孔和无分层的盲孔. 研究不同激光功率下孔加工质量, 发现无激光作用时, 钻削得到的孔圆度较差, 在使用激光之后, 钻削得到的孔圆度较好, 尽管边缘仍有崩裂的现象, 但随着功率的提高, 边缘质量逐步得到改善.

综上所述, LAM技术因其能够减少刀具磨损, 提高工件表面质量而在难加工材料的精密加工中引起了广泛的关注. 在传统切削、磨削、铣削等加工设备中引入激光模块, 实现形式相对简单, 安装方便, 可有效解决部分难加工材料超精密加工难题. 然而, 目前对于LAM技术的研究主要通过实验验证其优越性, 而对其加工工艺、刀具磨损机理等的研究尚有不足, LAM的理论研究仍有较大的发展空间, 通过数值模拟和分子动力学仿真方法, 实现对LAM加工过程的纳米尺度研究, 揭示激光热场作用下材料的去除机理. 关于LAM加工过程的热场仿真, 需要综合考虑温度和加工过程

的相变对难加工材料激光吸收率的影响规律, 建立高精度的在线激光吸收率测量的闭环温度控制模型, 提高热场仿真的准确性. 刀具的磨损失效也值得关注, 大多数难加工材料的软化温度较高, 而高温会加剧刀具的磨损, 特别是金刚石刀具, 因此需要提出创新性的刀具磨损抑制方案. 此外, 针对LAM技术的表面完整性、切削力和材料去除率等关键问题, 还需要进一步研究. 同时迫切需要开发出易于操作、集成度更高的激光辅助加工系统, 推动其工业化应用, 助力更多难加工材料的超精密加工.

3.2 超声辅助加工

超声振动辅助加工(ultrasonic vibration-assisted machining, UVAM)是一种非传统的加工方法, 它利用换能器(压电陶瓷/磁致伸缩)将高频电能转换为高频机械振动能, 并将其应用于加工过程, 从而实现材料超精

密加工^[57-59]. 与传统加工方式相比, 由于加工特性的变化, 材料的去除机理也发生了根本性变化^[60,61]. 在难加工材料超精密加工中, 传统的加工过程存在各种弊端, 例如, 过大的切削力, 较高的切削温度, 严重的刀具磨损以及较差的表面质量等^[62,63]. 考虑到难加工材料的加工难点和工件表面高精度高质量的要求, UVAM作为一种新型制造技术引起国内外学者和企业的广泛关注, 国外的日本名古屋大学、大阪大学、新加坡国立大学和国内的哈尔滨工业大学、大连理工大学、天津大学及华中科技大学等高校已经展开了大量基础性研究. 日本的Taga以及德国的Innolite等企业已经推出了超声振动辅助加工应用化产品. 由于超声振动辅助加工突出的优点, 现已逐渐应用于难加工材料的切削、磨削、铣削和抛光等加工形式中^[64-66]. 依据振动模式的不同, 可以将UVAM分为四类: 一维UVAM^[67,68]、二维UVAM、三维UVAM^[69]和旋转UVAM. 目前, 许多学者利用UVAM研究了不同类型难加工材料(光学玻璃、高性能陶瓷、金属合金等)的加工性能, 根据不同的振动模式和加工形式, 对现有研究成果进行综合分类和总结, 如表2所示.

3.2.1 超声振动辅助切削

超声振动辅助切削(ultrasonic vibration-assisted cutting, UVC)是一种间歇式切削方法, 每一个振动周期内可实现材料的纳米级去除. 近年来, 光学领域对具有微米/纳米结构的光学元件的需求日益增长, 硬化钢和碳化钨凭借其高硬度、耐磨损等优点, 成为批量生

产此类光学元件成形模具的理想材料, 但上述材料在使用传统的金刚石切削技术加工时会发生剧烈的刀具磨损, 属于典型的难加工材料^[102]. 超声振动辅助切削的加工原理如图8所示, 在UVC振动分离期间, 切削液能够顺利进入切削区域, 降低工件材料和刀具间的摩擦, 从而增加材料去除剪切角、降低主切削区域的切削力和切削温度, 可实现难加工材料高精高效塑性域切削, 并抑制工件表面亚表层损伤^[73,74]. UVC依据振动维数可分为一维UVC、二维UVC和三维UVC. 一维UVC是指在切削加工过程中, 在某单一方向上施加振动, 使刀具做周期性往复运动的振动切削. UVC最早由日本学者隈部淳一郎在1950年提出, 他通过研究不同振动方向上的UVC机理, 发现在切削方向上施加一定频率的超声波振动能够有效降低切削过程中的切削力和切削热, 提高工件表面质量, 延长刀具使用寿命. Zhou等人^[70]设计了一种典型的一维UVC装置, 利用压电陶瓷将高频电压信号转换为高频小振幅往复运动, 装置及加工原理如图8(a)所示, 同时用该装置进行了玻璃沟槽实验, 研究切削速度对临界切深的影响, 发现临界切深与工件的切削速度和刀具最大的振动速度比值相关, 当切削速度为1.98 m/min, 最大振动速度为45 m/min时, 临界切深大约为1.5 μm . 考虑到一维UVC刀具和工件在分离过程中, 刀具边缘容易划擦加工表面, 影响已加工表面质量, 同时刀具会受到剧烈的交变应力, 降低工具寿命, 因此, 开发了二维UVC技术. Shamoto和Moriwaki^[103]首先提出了二维椭圆振动理论, 其振动方向包含平行于切削速度和切深方向的两

表 2 UVAM加工难加工材料研究总结

Table 2 Research conclusions of UVAM machining difficult-to-machine materials

UVAM分类	加工材料	相对传统加工的优势
切削	一维UVAM 熔石英玻璃 ^[70] 、不锈钢 ^[71] 、钛合金 ^[72]	在切削力、表面光洁度和刀具寿命等方面得到了改善 ^[73,74]
	二维UVAM 模具钢 ^[75] 、钛合金 ^[76] 、单晶硅 ^[77-79]	
	三维UVAM 钛合金 ^[80] 、淬硬钢 ^[81]	
磨削	旋转UVAM 陶瓷 ^[82] 、模具钢 ^[83] 、镍基合金 ^[84]	具有降低磨削力、改善表面质量、减小砂轮磨损量、易于实现延性域磨削等优势 ^[85]
	二维UVAM 单晶硅 ^[86] 、陶瓷 ^[87] 、蓝宝石 ^[88]	
	三维UVAM 氧化锆陶瓷 ^[89]	
铣削	旋转UVAM 镍基合金 ^[90] 、C/SiC复合材料 ^[91] 、钛合金 ^[92]	具有降低切削力和切削温度、减少刀具磨损、利于断屑、改善表面特性等优势 ^[93]
	二维UVAM 模具钢 ^[94] 、钛合金 ^[95]	
抛光	一维UVAM 碳化钨 ^[96] 、模具钢 ^[97] 、碳化硅 ^[98]	加工效率较高, 可有效地减少抛光后工件表面划伤、磨损等现象 ^[99]
	二维UVAM 单晶硅 ^[100] 、镍基合金 ^[101]

图 8 (网络版彩图)UVC加工原理与装置设计. (a) 一维UVC(径向)装置^[70]; (b) 非谐振和谐振二维UVC装置^[105,103]; (c) 三维UVC加工装置^[69]

Figure 8 (Color online) Machining principle and device design of UVC. (a) One dimension UVC (radial) device ^[70]; (b) non-resonant and resonant two dimension UVC devices ^[105,103]; (c) three dimension UVC machining device ^[69].

个分量, 并进行了高碳钢的切削实验, 研究发现二维UVC的切屑厚度减小显著, 切削力和工件表面粗糙度显著降低, 刀具寿命明显延长. 与一维UVC相比, 二维UVC不仅避免了一维UVC存在的问题, 而且还提高了加工效率, 延长了刀具寿命, 因此二维UVC得以快速发展. 目前, 二维UVC主要分谐振型和非谐振型, 如图8(b)所示. 谐振型一般工作在离散的固有频率下, 可以实现较高的工作频率(20~50 kHz), 但振幅一般较低(3~20 μm), 而非谐振型工作在连续的固有频率下, 执行频率通常低于系统的第一固有频率, 振幅大于谐振型^[104]. 二维谐振UVC系统通过支撑结构在其共振频率下的二维振动产生椭圆刀具运动, 谐振型切削装置对刀具的固定位置有严格的要求. 非谐振型UVC系统利用压电陶瓷的低频振动(5 kHz以下)设计了一种非谐振椭圆振动装置, 如图8(b)所示. Brehl和Dow^[105]对非谐振椭圆振动装置进行了初步研究, 并设计了相关装置, 发现非谐振型切削装置的工作频率较低, 但椭圆振动参数可以根据工件的特性动态调整, 以获得最

优参数. 近年来, 在二维UVC装置研究的基础上, 发展出了三维UVC系统, 如图8(c)所示. Zhang和Song^[69]利用压电陶瓷直接驱动多自由度柔性机构设计了一种非谐振的三维椭圆振动系统, 并利用有限元法对结构进行了优化. Kurniawan等人^[106]基于谐振耦合模型提出了一种创新的3D超声椭圆振动刀架, 并对AISI 1045碳素钢进行了表面微结构加工实验. 与传统切削方式相比, 使用新型3D超声椭圆振动刀架加工的表面微结构, 其表面粗糙度和切削力更低, 表面质量更好. 目前, 二维UVC已实现了难加工材料的微米/纳米级表面微结构加工, 而三维UVC的研究主要集中在器件的结构设计和输出稳定性等方面, 在表面微结构的加工应用也逐渐展开研究.

3.2.2 超声振动辅助磨削

超声振动辅助磨削(ultrasonic vibration-assisted grinding, UVG)是一种结合普通磨削(conventional grinding, CG)与超声振动辅助加工的高性能复合加工

技术^[107,108]。在普通磨削加工的基础上,对刀具或者工件施加超声振动,改变刀具与工件之间的接触状态和作用机理,增大材料的塑性去除比例及材料去除率,降低磨削力和砂轮磨损量,改善难加工材料的磨削质量^[85]。目前,国内外学者已对不同振动类型下的难加工材料开展了UVG研究,如图9所示。UVG按照振动模式可分为旋转UVG、二维UVG和三维UVG。旋转UVG系统分为工件振动和砂轮振动两种形式,主要部件包括旋转运动单元和超声振动单元,用于实现振动和旋转同时作用于刀具。日本学者Hara等人^[83]最早在砂轮的轴向施加UVG加工模具钢材料,利用电刷供电,并采用多级法兰结构消除施加在超声换能器上的振动,设定超声振动频率60 kHz,振幅2 μm ,可实现模具钢表面粗糙度Ra达到0.40 μm 的超精密磨削。在此研究基础上,Li等人^[109]设计了一种纵扭超声振动辅助系统,如图9(a)所示,并进行了UVG加工RB-SiC陶瓷实验,设定工作频率为16.5~30.5 kHz,振幅为4~16 μm ,结果表

明,相对于CG而言,UVG的亚表面损伤降低了30%,因此UVG有利于改善表面质量并减少亚表面损伤深度。一维UVG虽然能够显著减小磨削力以及提高加工效率,但是由于砂轮始终与工件接触,会导致砂轮磨损的加剧,进而影响加工质量。为充分利用超声振动的加工优势,Liang等人^[86]设计了一种具有伸缩和弯曲两种模态的压电陶瓷椭圆振动子,如图9(b)所示,在砂轮轴向和砂轮径向同时施加超声振动,对单晶硅进行精密磨削,在磨削深度0.5 μm 条件下,加工出的单晶硅材料表面粗糙度Ra达到0.15 μm 。近年来,在二维UVG的研究基础上,开发了三维UVG系统。Chen等人^[89]设计并搭建了一种三维UVG加工系统,如图9(c)所示,并建立了三维UVG的磨削力模型,进行了氧化锆陶瓷磨削实验。研究表明,相对于二维UVG,三维UVG的磨削力降低了20%~30%,三维UVG磨削的表面粗糙度Ra降低了40%~50%,因此,相对于二维UVG,三维UVG可以获得更好的表面质量。以上研究表明,在CG的基础上附

图9 (网络版彩图)UVG加工原理与装置设计。(a) 旋转UVG装置(砂轮和工件振动)^[109], (b) 二维UVG装置(水平振动和纵向振动)^[86], (c) 三维UVG加工装置^[89]

Figure 9 (Color online) Machining principle and device design of UVG. (a) Rotating UVG device (vibration of grind wheel and workpiece) [109]; (b) two dimension UVG device (horizontal vibration and longitudinal vibration) [86]; (c) three dimension UVG machining device [89].

加超声振动可明显改善磨削效果, 具有降低磨削力、改善表面质量、减小砂轮磨损量、易于实现延性域磨削等优势, 因此UVG在难加工材料超精密制造领域具有广阔的应用前景。

3.2.3 超声振动辅助铣削

超声振动辅助铣削(ultrasonic vibration-assisted milling, UVM)是一种集普通铣削和超声加工于一体的复合加工技术^[110]。UVM是在刀具或工件上施加超声振动, 并控制其振动频率、振动幅度和振动方向, 使铣刀和工件产生周期性的高频分离的加工方式, 可有效减少切削时铣刀的振颤, 进而改善材料的加工性能。与普通铣削(conventional milling, CM)相比, UVM具有降低切削力和切削温度、减少刀具磨损和提高表面质量等优势, 已逐渐应用于微铣削加工领域中^[93]。目前, UVM按照振动形式可分为旋转UVM和二维UVM, 如图10所示。UVM的工作原理与UVG类似, 主要包括旋转运动和超声振动两个单元, 用于实现振动和旋转同时作用于刀具。Xue等人^[91]建立了如图10(a)所示的旋转UVM系统, 该系统中的振动频率和振幅分别为20 KHz和10 μm , 对C/SiC复合材料进行铣削加工, 通过分析铣削碳/碳化硅复合材料的纤维去除过程, 相对于CM, UVM表面加工质量好, 沿纤维正向铣削和反向铣削的表面粗糙度Ra分别降低了26.8%和40.6%, UVM是提高C/SiC复合材料表面精度合理且有效的方

法。近年来, 许多学者基于旋转UVM的工作原理, 在工件上施加振动, 开发了二维UVM系统。Chen等人^[111]通过在工件上安装两组不同方向的振动发生器, 搭建了二维UVM装置, 如图10(b)所示, 设定工作频率为8~10 kHz, 振幅为2~8 μm 。进给量、铣削速率、铣削深度等切削参数对加工质量、加工效率和加工成本有着非常重要的影响。马亚健等人^[112]建立了UVM动力学模型, 采用单因素法检测分析了SiCp/Al复合材料在不同主轴转速、铣削速度和铣削深度下的表面粗糙度与表面形貌, 得到了影响加工表面质量的规律及机制。王明海等人^[92]利用UVM对钛合金TC1进行了扭振铣削试验, 得到了单变量加工参数对铣削表面质量的影响, 并应用方差分析和响应曲面分析研究了加工参数各因素及交互因素对表面粗糙度影响的显著性, 优化加工参数, 建立了粗糙度预测模型。与CM相比, 施加超声扭振后的加工表面纹理更为均匀, 表面粗糙度Ra可降低60%。

3.2.4 超声振动辅助抛光

超声振动辅助抛光(ultrasonic vibration-assisted polishing, UVP)是一种将传统抛光和超声振动加工相结合的新型抛光技术, 利用超声换能器将振动传递至变幅杆放大振幅, 驱动抛光头或者工件, 可以有效改善工件的表面质量和精度^[113]。UVP和普通抛光技术相比, 在工件表面加工质量和加工效率上具有较强的优

图10 (网络版彩图)UVM加工原理与装置设计。(a) 旋转UVM装置^[91]; (b) 二维UVM装置^[111]

Figure 10 (Color online) Machining principle and device design of UVM. (a) Rotating UVM device ^[91]; (b) two dimension UVM device ^[111].

势, 可以有效地减少抛光后工件表面划伤、磨损等现象, 非常适用于难加工材料抛光和表面质量改善^[99]. 依据施加振动的维数, UVP可以分为一维UVP和二维UVP. Suzuki等人^[96]通过把超声波振动抛光头连接到抛光机架上, 搭建了一维UVP系统, 如图11(a)所示, 该装置的工作频率和振幅分别为25 kHz和10 μm , 并利用该装置对无黏结剂碳化钨制成的非球面成型模具进行了超精密抛光, 获得了低于70 nm P-V的形状精度和7 nm Ry的表面粗糙度. 在一维UVP的基础上, 将径向和轴向振动组合在一起, 形成二维UVP系统, 如图11(b)所示. Yu等人^[100]利用二维UVP对Inconel718镍基合金进行了抛光研究, 材料去除率为415 nm/min, 是传统抛光技术材料去除率的两倍, 二维UVP抛光后工件表面粗糙度Ra为1 nm, 远优于传统抛光技术的15 nm. 现有的UVP还包括超声振动辅助化学机械抛光、超声振动辅助磁性磨粒抛光以及其他组合或复合超声振动辅助抛光等. Li等人^[114]将两个直径为4 mm的圆形结合磨料抛光颗粒粘附在压电振动器的一端, 利用超声振动结合固定磨粒化学机械抛光法抛光熔融石英, 加工后熔融石英表面粗糙度Ra优于5 nm.

综上所述, 随着加工模式的改变, 在间歇加工期间刀具和工件之间的接触模式也随之改变, 与传统加工方式相比, UVAM技术能够实现难加工材料的塑性域去除, 可以有效地降低切削力、减少刀具磨损, 同时提高工件的表面加工精度和加工效率^[115]. 但是目前还缺少UVAM对高精度表面创成机理的理论研究, 特别

是工件材料变形和刀具冲击对面形加工精度和亚表层损伤的关联机制的研究, 同时也缺少高功率、大振幅和高效率超声振动系统装置. 面对当前设备的局限性和加工挑战, 可以结合传统加工技术和超声振动技术, 开展跨学科多领域融合的复合加工应用技术, 比如: 医疗领域, 通过复合加工技术可实现对骨手术微裂纹抑制, 有利于软组织愈合修复, 减少术后感染风险; 增材制造领域: 超声振动结合传统增材制造技术, 不仅可以减少金属结构缺陷(气孔、分层), 还能细化晶粒结构, 增强成型工件的整体机械性能. 因此, 基于传统加工制造技术, 实现表面创成理论突破、先进振动系统改进和跨学科多领域应用融合是未来UVAM的研究热点.

3.3 磁场辅助加工

磁场辅助加工(magnetic filed assisted machining, MFAM)是开展最早的一种能场辅助加工方法, 与激光能场和超声振动能场相比, 具有加工成本低、操作简单、磁场装置易搭建、加工范围广等一系列特点^[116]. 磁场辅助加工通过将高密度的磁场能量作用于加工区域, 结合传统的加工方法, 实现对难加工可磁化材料高效去除、高面形精度、低亚表面损伤的加工^[116]. 磁场辅助加工的作用机理可分为以下两个部分: (1) 磁场通过增加材料位错的迁移率, 延迟裂纹的萌生, 并且使裂纹萌生向表面移动, 从而提高材料的疲劳寿命; (2) 磁场可以使磁化材料内部无序的磁畴趋于统一, 达到磁

图 11 (网络版彩图)UVP加工原理与装置设计. (a) 一维UVP装置^[96]; (b) 二维UVP装置^[96]

Figure 11 (Color online) Machining principle and device design of UVP. (a) One dimension UVP device^[96]; (b) two dimension UVP device^[96].

饱和状态, 软化材料, 提高材料塑性, 降低残余应力^[117]。随着磁场辅助制造技术的不断发展, 磁场辅助加工已从抛光逐步应用到切削、铣削等加工方式, 目前的磁场辅助加工现状总结如表3所示。

3.3.1 磁场辅助切削

磁场辅助切削(magnetic field assisted cutting, MFAC)是一种通过电磁线圈或者永磁铁, 对刀具、待加工材料或者切削区域进行磁化的场辅助超精密切削加工技术。磁场对切削的影响作用可归为四类: 磁致冷却效应、磁致相变效应、磁致伸缩效应、磁致扩散效应^[116]。国内外学者对磁场辅助切削技术开展相关研究较早, 按磁化对象分类, 磁场辅助切削主要分为磁化刀具和磁化工件两类。Ghosh等人^[118]最先进行了MFAT切削低碳钢研究, 通过计算磁场作用情形下的刀具磨损增益系数, 发现在研究的切削速度范围内, 磨损增益系数正相关, 磁场有利于降低高速钢刀具的磨损。为了深入研究磁场对刀具延长寿命的原因, Mansori等人^[119]在刀具外缠绕直径为6 mm, 长度与刀具相当的直流线圈, 磁场的强度通过电流强度进行控制, 实验装置如图12(a)所示。研究发现磁场在切削过程中能改善刀具的磨损, 在高水平磁场激励作用下, 刀具表面凹坑的平均宽度KB下降约50%, 最大深度KT下降约75%。Dehghani等人^[120]设计了一种L支臂型装置用于磁场辅助切削高温合金, 在切削过程中, L型支臂装置连接刀具与工件, 构成闭环电路, 为磁化工件提供稳定的磁场, 同时该L支臂型装置灵活可调节, 适用于各类尺寸的刀具与工件, 实验装置如图12(b)所示。磁场的磁致伸缩效应可以解除钉扎效应, 增强其位错运动能力, 而位错可诱导磁化材料结构重新排列, 软化工件材料, 增强其塑性变形能力, 释放加工过程中的残余

应力。通过该装置进行磁场辅助切削, 切削力和刀具的侧面磨损的最大值分别降低66%和94%。Kawai等人^[121]研究了磁场直接在液态金属中产生压应力并作用于高熔点金属的凝固过程, 发现磁场可以细化金属晶粒。Yip和To^[122]在机床上安装两块永磁铁, 在切削过程中, 钛合金工件在两块永磁铁产生的磁场内旋转, 磁场强度设定为0.02 T, 磁场辅助SPDT实验装置如图12(c)所示。在磁场辅助切削钛合金过程中, 磁场在切削区域产生压应力, 细化钛合金表面的晶粒, 钛合金工件整体的显微硬度和延展性因此得到改善。

3.3.2 磁场辅助研磨

磁场辅助研磨(magnetic field assisted finishing, MFAF)的加工原理是通过磁场把磁性磨粒吸引到一起, 形成磁力研磨刷, 磁力研磨刷和工件间发生相对运动, 磁性磨粒在工件表面产生相对滑动、滚动等运动, 从而实现磁性磨粒对工件表面的研磨加工。Ahmed等人^[123]利用低碳钢板材进行单点渐近成形研磨, 随后在其成形表面进行MFAF加工, MFAF刀具是一个直径20 mm的电磁球形工具头, 如图13(a)所示, 工具头作为铁芯, 外面缠绕4500匝的铜线圈, 添加约5 g的磁性磨料, 在线圈电磁场的作用下进行研磨加工。实验结果表明, MFAF可以提高成型表面的显微维氏硬度, 还能将单点成形过程中表面留下的微裂纹全部去除, 提高工件表面质量。Verma等人^[124]制作了一个可以调节磁通密度的MFAF刀具, 刀具安装在立式铣床上, 直径26 mm的不锈钢管通过虎钳固定在铣床床身, 令刀具插入管道内部进行研磨加工, 实验装置如图13(b)所示。当磁场为0.8 T, 转速500 r/min, 磨料粒径1200目时, 管内表面粗糙度Ra达0.056 μm 。Jiao等人^[125]利用磁力研磨技术加工铝7075内孔壁面, 如图13(c)所示, 内孔壁

表3 MFAM加工难加工材料研究总结

Table 3 Research conclusions of UFAM machining difficult-to-machine materials

加工方式		加工材料	加工优势
磁场辅助	切削	低碳钢 ^[118,119] 、高温合金 ^[120] 、钛合金 ^[122]	降低刀具磨损和切削力、提高工件加工性能
	研磨	碳钢 ^[123,124] 、7075铝合金 ^[125] 、蓝宝石 ^[126]	工件表面精度提高、研磨效率提升
	铣削	铝合金 ^[127,129] 、低碳钢 ^[128]	抑制刀具颤振、减小表面粗糙度、刀具机械性能提高
	抛光	石英玻璃 ^[130,132] 、黄铜 ^[131] 、不锈钢 ^[131] 、单晶硅 ^[133]	适用性广、效率高、表面粗糙度达到亚纳米级
磁场超声复合辅助	研磨	蓝宝石 ^[126]	大幅提高加工效率, 降低工件表面粗糙度
	抛光	氧化锆陶瓷 ^[134]	提高表面质量, 缩短加工时间

图 12 (网络版彩图)MFAC加工原理与装置设计. (a) 刀具磁化^[119]; (b) 工件磁化^[120]; (c) SPDT磁化^[121]

Figure 12 (Color online) Machining principle and device design of MFAC. (a) Tool magnetized ^[119]; (b) workpiece magnetized ^[120]; (c) SPDT magnetized ^[121].

图 13 (网络版彩图)MFAF加工原理与装置设计. (a) 单点渐近成形研磨^[123]; (b) 磁场辅助立式铣床^[124]; (c) 磁力研磨^[125]; (d) 超声磁场辅助研磨^[126]

Figure 13 (Color online) Machining principle and device design of MFAF. (a) Single point incremental forming grinding ^[123]; (b) magnet field assisted vertical milling lathe ^[124]; (c) magnetic abrasive finishing ^[125]; (d) ultrasonic magnet field assisted finishing ^[126].

面与磁铁间隙间存在磁性颗粒, 在磁场的作用下形成磁性磨粒刷, 磨粒刷在磁铁旋转过程中不断研磨内孔壁面, 实验结果表明, 经过研磨后的内孔壁面的表面粗糙度 R_a 为 $0.7\sim 1.0\ \mu\text{m}$, 优化工艺参数后甚至可达到 $0.56\ \mu\text{m}$. 随着MFAF不断发展, 在单一磁场辅助的基础上, 结合超声振动, 形成的磁力超声振动复合场为研磨工艺带来了新的加工思路. 耿其东等人^[126]利用超声MFAF对蓝宝石进行加工, 超声磁力研磨是一种柔性的研磨加工方式, 工艺原理和实验装置如图13(d)所示, 超声带动含有金刚石颗粒的研磨垫做高频振动, 磁性磨粒随着旋转磁场与工件做相对运动, 按照磁力线方向排布形成“磁力刷”研磨工件表面. 利用超声振动及磁力研磨, 在旋转磁场为 $1200\ \text{r/min}$ 、磁性磨粒数目为120目、阻抗阈值为 $330\ \Omega$ 时, 得到的蓝宝石表面粗糙度 R_a 为 $0.055\ \mu\text{m}$.

3.3.3 磁场辅助铣削

磁场辅助铣削(magnetic field assisted milling,

MFAM)通过电磁场对铣刀进行磁化处理, 实现对铣刀机械性能强化, 提高刀具使用寿命, 或者利用磁场阻尼效应, 抑制铣刀在铣削加工过程中发生的偏斜和振动, 避免铣刀过度的挠曲, 导致刀具及主轴箱轴承磨损, 同时抑制工件表面产生“颤纹”, 提高工件表面质量. Ahmed等人^[127]研究了磁流变辅助铣削过程中磁场阻尼对工件表面粗糙度的影响, 阻尼器结构与铣削实验如图14(a)所示. 通过输入电流作为控制器, 对磁场进行调节, 提高机床的可变刚度、产生阻尼效应, 控制铣刀振动, 抑制颤振. 实验发现, 在磁场阻尼效应的作用下, 磁流变辅助铣削的工件表面颤振痕迹减少, 铝合金工件表面粗糙度 R_a 由 $0.8\ \mu\text{m}$ 降低到 $0.4\ \mu\text{m}$. Liu等人^[128]采用脉冲电流和脉冲磁场两者相结合的方式, 对WC-6Co硬质合金刀具进行处理, 并用处理后的刀具对SA508低碳合金钢进行铣削实验, 如图14(b)所示. 研究发现, 经过电磁处理的刀具与未处理的刀具相比, 铣刀侧面磨损降低了35%. Liang等人^[129]设计脉冲磁场系统辅助铣削铝合金工件实验, 如图14(c)所示, 磁

图 14 (网络版彩图)MFAM加工原理与装置设计. (a) 磁流变阻尼器辅助铣削^[127]; (b) 电磁辅助铣削^[128]; (c) 脉冲磁场辅助铣削^[129]

Figure 14 (Color online) Machining principle and device design of MFAM. (a) Magnetorheological damper assisted milling ^[127]; (b) electromagnetic assisted milling ^[128]; (c) pulse magnetic field assisted milling ^[129].

场系统由活动铁芯、固定铁芯、线圈和调节手柄组成, 工件安置在活动铁芯和固定铁芯之间, 磁场调节范围为0~800 kA/m. 实验结果表明: 经脉冲磁场处理的铣刀磨损轻微, 铣刀的最大侧面磨损宽度减少了17%, 横刃磨损区域减少了27%, 磁场强化了硬质合金刀具的力学性能, 延长了刀具使用寿命.

3.3.4 磁场辅助抛光

磁场辅助抛光(magnetic field assisted polishing, MFAP)是一种无接触力, 磁场分布易控制, 对各种复杂曲面的加工适应性强的新型表面光整技术. 抛光是工件获得最低表面粗糙度、去除加工表面缺陷最常用的超精密加工工艺. 但是传统的抛光方法效率低、精度差、自动化程度低, 无法满足先进光学系统中光学元件的指标需求. 所以要获得高质量超光滑表面, 就必须对原有的抛光技术进行创新. 随着亚纳米级加工成形机理和检测技术的发展, 现已开发出多种磁场辅助抛光工艺. Singh等人^[130]针对平面和自由曲面工件的加工, 提出一种球头磁流变抛光装置, 在圆柱形的工具头端部形成一个电磁式磁控球型的磁流变抛光区域, 如图15(a)所示, 通过计算机控制的xyz三轴运动系统引导工具头的运动, 可实现对斜面、平面、三维曲

面的自动化加工. 对熔融石英玻璃表面抛光90 min, 可将表面粗糙度Ra由初始值0.74 nm降至0.146 nm. Das等人^[131]提出了旋转-磁流变磨料流抛光技术, R-RMAFF机床工件夹具装置如图15(b)所示. 其中旋转磁场和液压单元分别为抛光介质提供旋转运动和往复运动, 抛光黄铜和不锈钢材料平面工件, 得到的最佳表面粗糙度Ra分别为0.05 μm 和0.11 μm . 徐江^[132]研制出小工具头立式龙门布局结构的四轴联动磁流变抛光机床, 如图15(c)所示. 经过两次迭代加工, 完成对回转对称熔石英玻璃工件的成形抛光, 在工件中心 $\Phi 16\text{ mm}$ 范围内, 加工表面粗糙度Ra达到2.4 nm, 面形精度由0.81 μm 降低至0.14 μm , 可有效提高工件的表面质量. 郭明亮^[133]基于集群原理和旋转磁极动态磁场磁流变效应提出动态磁场集群磁流变平面抛光装置, 如图15(d)所示, 多个圆柱形永磁体以环形的方式集群布置在抛光盘下面, 永磁铁与偏心小轴连接, 当抛光主轴转动时, 偏心小轴会带动永磁铁一起反向旋转, 于是永磁铁相对于抛光盘偏心旋转形成动态磁场. 用该方法可以将原始单晶硅研磨片的表面粗糙度Ra由213 nm降至2.46 nm, 获得超光滑表面. 胡锦飞^[134]研究了磁流变-超声波复合抛光工艺, 磁场抛光时的机械作用导致氧化锆陶瓷的材料去除, 超声振动对工件表面材料的撞击

图 15 (网络版彩图)MFAP加工原理与装置设计. (a) 磁场辅助球头磁流变抛光^[130]; (b) 磁场辅助旋转磁流变抛光^[131]; (c) 磁场辅助小工具头磁流变抛光^[132]; (d) 动态磁场集群磁流变抛光^[133]

Figure 15 (Color online) Machining principle and device design of MFAP. (a) Magnetic field assisted magnetorheological polishing of ball head^[130]; (b) magnetic field assisted rotary magnetorheological polishing^[131]; (c) magnetic field assisted magnetorheological polishing of small tool head^[132]; (d) dynamic magnetic field cluster magnetorheological polishing^[133].

作用共同构成磁场-超声波复合抛光工艺. 对氧化锆陶瓷基片进行抛光, 对比传统单一磁流变加工, 磁场-超声复合抛光可明显提高表面质量, 抛光150 min后, 工件表面粗糙度Ra为0.096 μm . Guo等人^[135]采用超声振动-磁场辅助抛光工艺加工矩形特征的微结构工件, 通过调整磁极和磁体的位置, 确定最优的磁场分布状态, 并对抛光力和磨粒寿命进行定量预测. 实验结果显示该抛光方法可以在不影响微结构形状精度的条件下, 能够去除毛刺和刀痕, 提高矩形微结构的表面质量.

综上所述, MFAM是一种融合了材料、电磁、传热、机械等多学科的能场辅助加工方式. 与传统加工方式相比, 磁场可有效提高刀具与工件之间的导热性, 防止加工区域出现局部高温, 延长刀具使用寿命, 同时在加工过程中还能改变导磁材料的材料性质, 提高工件的机械性能. 磁场辅助加工的形式具有多样性, 不仅能对工件外表面进行光整加工, 还能对复杂内腔进行精密修型, 适用性范围广, 加工效率高. 随着MFAF不断发展, 现已结合超声、电化学等技术, 形成了多场辅助加工工艺, 这些组合工艺能够使加工精度、加工效率进一步提升, 让MFAF逐渐向纳米级、亚纳米级精度快速发展. 但是目前MFAF也存在亟待解决的难题, 传统磁场分布是开放式, 能够用于加工区域的有效磁场能量只占总磁场能量的很小部分, 而现有的电源设备很难产生满足加工要求的高强度稳定的磁场或脉冲磁场, 因此急需开发用于产生磁场的直流或脉冲大功率电源技术. 另一方面, 要获得表面高质量加工效果, 还得研发精准可控的高密度磁能磁力线定向聚集技术, 提高加工区域的磁化效果和稳定性. 随着MFAM技术的快速发展, 关键难题逐步解决, MFAM在未来的加工领域中具有广阔的应用前景.

4 总结与展望

我国是制造业大国, 在高端制造业亟需核心的制造加工技术支持, 超精密加工是高端制造实现设计到生产的重要环节. 传统的超精密加工由于切削力大、切削温度高导致刀具磨损严重, 表面加工质量低等问题, 难以满足现代先进光学产品的使用需求. 为了突

破传统超精密加工技术的限制, 研究人员开展了基于激光、超声振动和磁场等场辅助加工技术, 为中国高端制造带来创新的加工方式.

激光辅助加工(LAM)在传统的加工技术基础上, 将激光聚焦在加工区域, 提前预热并软化难加工材料, 以实现难加工材料的塑性去除, 减少刀具磨损和工件的亚表面损伤, 达到提高刀具寿命, 改善加工质量的目的. 然而, 目前LAM在加工工艺、刀具磨损机制等方面仍有待进一步研究. 超声振动辅助加工(UVAM)是一种间歇式加工方法, 与传统加工方式相比能够有效降低切削力、减少刀具磨损、提高工件的表面精度和加工效率. 目前, UVAM对高精度表面创成机理、工件材料变形和刀具冲击对加工面形精度和亚表面层损伤的关联机制的研究不足, 同时高功率、大振幅和高效率超声振动系统装备有待进一步升级改进. 磁场辅助加工(MFAM)是一种将高密度的磁场能量输入到加工区域, 配合传统加工方法, 实现对难加工材料高效去除的场辅助加工方法. 目前, 磁场辅助加工技术在光整精密加工, 磁场辅助研磨和抛光的技术和装备已有较多研究成果, 但对于切削和铣削等辅助加工工艺和机理的研究相对匮乏, 此外, 提高磁场能量利用率, 研制直流或脉冲大功率电源, 发展磁场聚能控制等技术是进一步发展磁场辅助超精密制造的重要举措.

目前, 随着我国国防军事、航空航天和生物医疗等领域的高速发展, 其内部核心元件需要实现纳米级面形精度、亚纳米级表面粗糙度及近无缺陷表面的超精密制造, 以保障核心元件具有高精度、高负载、高稳定的工作性能. 因此, 单一场辅助超精密制造技术还需在制造流程、制造功能、制造精度和制造品质方面进一步创新, 以实现超高精度和极低损伤元件的超精密制造. 多场辅助超精密复合制造技术可有效融合单一物理能场诱导下高性能表面成形优势, 以实现超精密元件的高品质制造. 多场辅助超精密复合制造技术存在着多场融合与调控机制、多场辅助材料去除机理、关键短板装备研制等诸多难题, 多场辅助超精密复合技术的高端制造仍然面临着巨大挑战.

致谢 感谢研究生汪凯、徐少杰、吴佳理、郭枫对本论文的参考文献的整理工作.

参考文献

- 1 Yuan Z J, Wang X K. Precision and Ultra-Precision Processing Technology (in Chinese). 2nd ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007 [袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2007]
- 2 Yuan J L, Zhang F H, Dai Y F. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field (in Chinese). *J Mech Eng*, 2010, 46: 161–177 [袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究. 机械工程学报, 2010, 46: 161–177]
- 3 Zou X Y. Characteristics and application prospect of difficult-to-machine materials (in Chinese). *Heat Treat Met*, 2003, 28: 44 [邹喜洋. 难加工材料的特性及其应用前景. 金属热处理, 2003, 28: 44]
- 4 Bokhan Y I, Bulavin V A, Klubovich V V, et al. Mechanical properties of structural ceramics based on Al_2O_3 . *Glass Ceram*, 1996, 53: 240–242
- 5 Fei Y, Huang C, Liu H, et al. The influence of Ni addition on the microstructures and mechanical properties of Al_2O_3 -TiN-TiC ceramic materials. *Nanomanuf Metrol*, 2018, 1: 105–111
- 6 You K, Yan G, Luo X, et al. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *J Manuf Process*, 2020, 58: 677–692
- 7 Liu L P, Lin B, Fang F Z. Monitoring of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics. *Adv Mater Res*, 2011, 314-316: 1754–1759
- 8 Yang Z H. Research on granular lapping technology for large-size metal mirror (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019 [杨振华. 大尺寸金属镜散粒研磨技术研究. 硕士学位论文. 长春: 长春理工大学, 2019]
- 9 Yan G, Zhang Y, You K, et al. Off-spindle-axis spiral grinding of aspheric microlens array mold inserts. *Opt Express*, 2019, 27: 10873–10889
- 10 Xue B, Geng Y, Wang D, et al. Improvement in surface quality of microchannel structures fabricated by revolving tip-based machining. *Nanomanuf Metrol*, 2019, 2: 26–35
- 11 Zhang B, Zheng X L, Tokura H, et al. Grinding induced damage in ceramics. *J Mater Process Tech*, 2003, 132: 353–364
- 12 Wang C, Cheung C F, Ho L T, et al. A novel magnetic field-assisted mass polishing of freeform surfaces. *J Mater Process Tech*, 2020, 279: 116552
- 13 Nagimova A, Perveen A. A review on laser machining of hard to cut materials. *Mater Today-Proc*, 2019, 18: 2440–2447
- 14 Guo J, Zhang J G, Pan Y N, et al. A critical review on the chemical wear and wear suppression of diamond tools in diamond cutting of ferrous metals. *Int J Extrem Manuf*, 2020, 2: 012001
- 15 Arunachalam R, Mannan M A. Machinability of nickel-based high temperature alloys. *Mach Sci Technol*, 2000, 4: 127–168
- 16 Bai W. Machining mechanism of vibration assisted cutting and machinability investigations of typical difficult-to-machine materials (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018 [柏伟. 典型难加工材料振动辅助切削机理与可加工性实验研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2018]
- 17 Zong W J, Sun T, Li D, et al. XPS analysis of the groove wearing marks on flank face of diamond tool in nanometric cutting of silicon wafer. *Int J Mach Tool Manuf*, 2008, 48: 1678–1687
- 18 Chen X, Liu C, Ke J, et al. Subsurface damage and phase transformation in laser-assisted nanometric cutting of single crystal silicon. *Mater Des*, 2020, 190: 108524
- 19 Ding H, Shin Y C. Improving machinability of high chromium wear-resistant materials via laser-assisted machining. *Mach Sci Technol*, 2013, 17: 246–269
- 20 Bass M, Beck D, Copley S M. Laser assisted machining. In: Proceedings of 4th European Electro-Optics Conference on International Society for Optics and Photonics. 1979, 164: 233–240
- 21 Shayan A R, Poyraz H B, Ravindra D, et al. Pressure and temperature effects in micro-laser assisted machining (μ -LAM) of silicon carbide. *Trans NAMRI/SME*, 2009, 37: 75–80
- 22 Zhang D L. Technical research for laser-assisted machining of zirconia ceramics (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Jilin: Jilin University, 2012 [张栋林. 激光加热辅助切削 ZrO_2 陶瓷加工技术的研究. 硕士学位论文. 吉林: 吉林大学, 2012]
- 23 Wu X F, Wang Y, Zhang H Z. Experimental research on laser assisted machining of silicon nitride ceramics (in Chinese). *J Astronaut*, 2010, 31: 1457–1462 [吴雪峰, 王扬, 张宏志. 激光加热辅助切削氮化硅陶瓷试验研究. 宇航学报, 2010, 31: 1457–1462]
- 24 Yan C. Theory and experimental investigation on laser hot-assisted machining Al_2O_3 engineering ceramics (in Chinese). Dissertation for

- Doctoral Degree. Changsha: Hunan University, 2008 [鄢铨. 激光加热辅助切削 Al_2O_3 工程陶瓷理论与试验研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2008]
- 25 You K, Fang F, Yan G. Surface generation of tungsten carbide in laser-assisted diamond turning. *Int J Mach Tool Manuf*, 2021, 168: 103770
- 26 Lei S, Shin Y C, Incropera F P. Deformation mechanisms and constitutive modeling for silicon nitride undergoing laser-assisted machining. *Int J Mach Tool Manuf*, 2000, 40: 2213–2233
- 27 Song H, Dan J, Chen X, et al. Experimental investigation of machinability in laser-assisted machining of fused silica. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, 97: 267–278
- 28 Ravindra D, Ghantasala M K, Patten J. Ductile mode material removal and high-pressure phase transformation in silicon during micro-laser assisted machining. *Precis Eng*, 2012, 36: 364–367
- 29 Liu C, Chen X, Ke J, et al. Numerical investigation on subsurface damage in nanometric cutting of single-crystal silicon at elevated temperatures. *J Manuf Process*, 2021, 68: 1060–1071
- 30 He W, Liu C, Xu G, et al. Effect of temperature on ductile-to-brittle transition in diamond cutting of silicon. *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, 116: 3447–3462
- 31 Geng R, Yang X, Xie Q, et al. Investigation of surface integrity and material removal mechanism of single-crystal Si subjected to micro-laser-assisted machining. *Infrared Phys Tech*, 2021, 118: 103868
- 32 Mohammadi H, Ravindra D, Kode S K, et al. Experimental work on micro laser-assisted diamond turning of silicon (111). *J Manuf Process*, 2015, 19: 125–128
- 33 Konig W, Zaboklicki A K. Laser-assisted hot machining of ceramics and composite materials. NIST Special Publication, 1993: 455–463
- 34 Dandekar C R, Shin Y C. Experimental evaluation of laser-assisted machining of silicon carbide particle-reinforced aluminum matrix composites. *Int J Adv Manuf Technol*, 2012, 66: 1603–1610
- 35 Li G F, Zhang D L, Gong J L, et al. Laser-assisted machining technique for zirconia ceramics (in Chinese). *J Jilin Univ (Eng)*, 2012, 42: 1409–1414 [李国发, 张栋林, 龚金龙, 等. ZrO_2 陶瓷激光加热辅助切削加工技术. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42: 1409–1414]
- 36 Song H, Dan J, Li J, et al. Experimental study on the cutting force during laser-assisted machining of fused silica based on the Taguchi method and response surface methodology. *J Manuf Process*, 2019, 38: 9–20
- 37 Pan P, Song H, Yang Z, et al. Thermal field modeling and experimental analysis in laser-assisted machining of fused silica. *Silicon*, 2020, 13: 3163–3176
- 38 Mohammadi H, Poyraz H B, Ravindra D, et al. Single point diamond turning of silicon by using micro-laser assisted machining technique. In: Proceedings of 9th ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2014). Univ Michigan, Detroit, 2014. V002T02A057
- 39 Virkar S R, Patten J A. Numerical simulations and analysis of the thermal effects on silicon carbide during ductile mode micro-laser assisted machining. In: Proceedings of ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. West Lafayette, 2009. 409–416
- 40 Tian Y, Shin Y C. Thermal modeling for laser-assisted machining of silicon nitride ceramics with complex features. *J Manuf Sci Eng*, 2006, 128: 425–434
- 41 Ma Z L, Yu K D, Dong J L, et al. Laser-assisted grinding mechanism of Al_2O_3 ceramics (in Chinese). *J Northeastern Univ (Nat Sci)*, 2020, 41: 541–545, 550 [马哲伦, 于奎东, 董金龙, 等. Al_2O_3 陶瓷的激光辅助磨削机理. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41: 541–545, 550]
- 42 Li Z P. Research on grinding damage formation mechanism and suppression technology of reaction bonded silicon carbide ceramics (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 [李志鹏. RB-SiC陶瓷磨削损伤形成机制及抑制技术研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019]
- 43 Xu S, Yao Z, Cai H, et al. An experimental investigation of grinding force and energy in laser thermal shock-assisted grinding of zirconia ceramics. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 91: 3299–3306
- 44 Altintas Y, Ber A A. Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. *Appl Mech Rev*, 2001, 54: B84
- 45 Gao Y F, Xiao J H. Characteristics of cutting tool wear during LAM processes for Ti-6Al-4V alloy (in Chinese). *China Mech Eng*, 2016, 27: 2877–2883 [高延峰, 肖建华. Ti-6Al-4V合金激光辅助铣削的刀具磨损特性. 中国机械工程, 2016, 27: 2877–2883]
- 46 Lee C M, Kim D H, Baek J T, et al. Laser assisted milling device: A review. *Int J Precis Eng Manuf-Green Tech*, 2016, 3: 199–208
- 47 Bermingham M J, Schaffarzyk P, Palanisamy S, et al. Laser-assisted milling strategies with different cutting tool paths. *Int J Adv Manuf*

- [Technol](#), 2014, 74: 1487–1494
- 48 Kumar M, Melkote S N. Process capability study of laser assisted micro milling of a hard-to-machine material. [J Manuf Process](#), 2012, 14: 41–51
 - 49 Woo W S, Lee C M. A study of the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with a cylindrical shape in laser-assisted milling. [Appl Thermal Eng](#), 2015, 91: 33–42
 - 50 Cha N H, Woo W S, Lee C M. A study on the optimum machining conditions for laser-assisted turn-mill. [Int J Precis Eng Manuf](#), 2015, 16: 2327–2332
 - 51 Bermingham M J, Kent D, Dargusch M S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. [Wear](#), 2015, 328-329: 518–530
 - 52 Tian Y, Shin Y C. Laser-assisted burnishing of metals. [Int J Mach Tool Manuf](#), 2007, 47: 14–22
 - 53 Barnes S, Morgan R, Skeen A. Effect of laser pre-treatment on the machining performance of aluminum/SiC MMC. [J Eng Mater Tech](#), 2003, 125: 378–384
 - 54 Zhang G, Jiang C, Zhang S, et al. An experimental investigation of laser assisted drilling process. [Mater Res Innovations](#), 2015, 19: S8-889–S8-894
 - 55 Jen T C, Chen Y M, Tuchowski F. Experimental and numerical studies of laser-assisted drilling processes. In: Proceedings of ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference. Charlotte, 2004, 4692: 1015–1023
 - 56 Mohammadi H, Patten J A. Laser augmented diamond drilling: A new technique to drill hard and brittle materials. [Proced Manuf](#), 2016, 5: 1337–1347
 - 57 Azarhoushang B, Tawakoli T. Development of a novel ultrasonic unit for grinding of ceramic matrix composites. [Int J Adv Manuf Technol](#), 2011, 57: 945–955
 - 58 Gan J, Wang X, Zhou M, et al. Ultraprecision diamond turning of glass with ultrasonic vibration. [Int J Adv Manufacturing Tech](#), 2003, 21: 952–955
 - 59 Shamoto E, Moriwaki T. Study on elliptical vibration cutting. [CIRP Ann](#), 1994, 43: 35–38
 - 60 Moriwaki T, Shamoto E, Inoue K. Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration. [CIRP Ann](#), 1992, 41: 141–144
 - 61 Sun G, Zhao L, Ma Z, et al. Force prediction model considering material removal mechanism for axial ultrasonic vibration-assisted peripheral grinding of Zerodur. [Int J Adv Manuf Technol](#), 2018, 98: 2775–2789
 - 62 Babitsky V I, Kalashnikov A N, Meadows A, et al. Ultrasonically assisted turning of aviation materials. [J Mater Process Tech](#), 2003, 132: 157–167
 - 63 Babitsky V I, Mitrofanov A V, Silberschmidt V V. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: Simulations and experimental study. [Ultrasonics](#), 2004, 42: 81–86
 - 64 Ko J H, Shaw K C, Chua H K, et al. Cusp error reduction under high speed micro/meso-scale milling with ultrasonic vibration assistance. [Int J Precis Eng Manuf](#), 2011, 12: 15–20
 - 65 Liu S, Chen T, Wu C. Rotary ultrasonic face grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP): A study on cutting force model. [Int J Adv Manuf Technol](#), 2017, 89: 847–856
 - 66 Weber H, Herberger J, Pilz R. Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool. [CIRP Ann](#), 1984, 33: 85–87
 - 67 Xu L, Na H, Han G. Machinability improvement with ultrasonic vibration-assisted micro-milling. [Adv Mech Eng](#), 2018, 10: 168781401881253
 - 68 Yang Z, Zhu L, Lin B, et al. The grinding force modeling and experimental study of ZrO₂ ceramic materials in ultrasonic vibration assisted grinding. [Ceram Int](#), 2019, 45: 8873–8889
 - 69 Zhang C, Song Y. Design and kinematic analysis of a novel decoupled 3D ultrasonic elliptical vibration assisted cutting mechanism. [Ultrasonics](#), 2019, 95: 79–94
 - 70 Zhou M, Wang X J, Ngoi B K A, et al. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration. [J Mater Process Tech](#), 2000, 121: 243–251
 - 71 Zhou M, Eow Y T, Ngoi B K A, et al. Vibration-assisted precision machining of steel with PCD tools. [Mater Manuf Process](#), 2003, 18: 825–834
 - 72 Muhammad R, Hussain M S, Maurotto A, et al. Analysis of a free machining $\alpha+\beta$ titanium alloy using conventional and ultrasonically assisted turning. [J Mater Process Tech](#), 2014, 214: 906–915
 - 73 Huang S N, Zhou M. Ultrasonic vibration cutting of stainless steel with polycrystalline diamond tools (in Chinese). [Tool Eng](#), 2008, 5: 6–8 [黄

- 劲楠, 周明. 聚晶金刚石刀具振动切削不锈钢技术研究. 工具技术, 2008, 5: 6–8]
- 74 Peng Y F. Ultrasonic vibration aided grinding processing theory and polycrystalline silicon grinding experimental research (in Chinese). Postdoctoral Research Report. Xiamen: Xiamen University, 2009 [彭云峰. 超声振动辅助磨削加工理论及多晶硅材料的磨削实验研究. 博士后研究报告. 厦门: 厦门大学, 2009]
- 75 Suzuki N, Haritani M, Yang J, et al. Elliptical vibration cutting of tungsten alloy molds for optical glass parts. *CIRP Ann*, 2007, 56: 127–130
- 76 Tan R, Zhao X, Guo S, et al. Sustainable production of dry-ultra-precision machining of Ti-6Al-4V alloy using PCD tool under ultrasonic elliptical vibration-assisted cutting. *J Cleaner Production*, 2020, 248: 119254
- 77 Zhang J, Zhang J, Cui T, et al. Sculpturing of single crystal silicon microstructures by elliptical vibration cutting. *J Manuf Process*, 2017, 29: 389–398
- 78 Zhang J, Zhang J, Rosenkranz A, et al. Frictional properties of surface textures fabricated on hardened steel by elliptical vibration diamond cutting. *Precis Eng*, 2019, 59: 66–72
- 79 Zhang J, Zhang J, Liu C, et al. Machinability of single crystal calcium fluoride by applying elliptical vibration diamond cutting. *Precis Eng*, 2020, 66: 306–314
- 80 Lotfi M, Sajjadi S A, Amini S. Wettability analysis of titanium alloy in 3D elliptical ultrasonic assisted turning. *Int J Lightweight Mater Manuf*, 2019, 2: 235–240
- 81 Shamoto E, Suzuki N, Tsuchiya E, et al. Development of 3 DOF ultrasonic vibration tool for elliptical vibration cutting of sculptured surfaces. *CIRP Ann*, 2005, 54: 321–324
- 82 Baraheni M, Amini S. Predicting subsurface damage in silicon nitride ceramics subjected to rotary ultrasonic assisted face grinding. *Ceram Int*, 2019, 45: 10086–10096
- 83 Hara K, Isobe H, Yoshihara H, et al. Ultrasonically assisted machining for mirror finishing of die (1st report). *J Jpn Soc Precis Eng Contributed Papers*, 2006, 72: 1134–1138
- 84 Bhaduri D, Soo S L, Aspinwall D K, et al. A study on ultrasonic assisted creep feed grinding of nickel based superalloys. *Proced CIRP*, 2012, 1: 359–364
- 85 Feng P F, Wang J J, Zhang J F, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials (in Chinese). *J Mech Eng*, 2017, 53: 3–21 [冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望. 机械工程学报, 2017, 53: 3–21]
- 86 Liang Z Q, Wang X B, Wu Y B, et al. Development of a two-dimensional ultrasonic vibration assisted grinding technique of monocrystal silicon (in Chinese). *J Mech Eng*, 2010, 46: 192–198 [梁志强, 王西彬, 吴勇波, 等. 单晶硅二维超声振动辅助磨削技术的实现. 机械工程学报, 2010, 46: 192–198]
- 87 Yan Y Y. Study on two dimensional ultrasonic vibration assisted grinding mechanism of nanocomposite ceramics and its surface quality (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008 [闫艳燕. 纳米复相陶瓷二维超声振动辅助磨削机理及其表面质量研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2008]
- 88 Wang Q, Liang Z, Wang X, et al. Investigation on surface formation mechanism in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire based on fractal analysis method. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 87: 2933–2942
- 89 Chen F, Mei G, Zhao B, et al. Study on the characteristics of Zirconia ceramic in three-dimensional ultrasonic vibration-assisted ELID internal grinding. *J Mech Sci Technol*, 2020, 34: 333–344
- 90 Suárez A, Veiga F, de Lacalle L N L, et al. Effects of ultrasonics-assisted face milling on surface integrity and fatigue life of Ni-alloy 718. *J Mater Eng Perform*, 2016, 25: 5076–5086
- 91 Xue F, Zheng K, Liao W, et al. Investigation on fiber fracture mechanism of C/SiC composites by rotary ultrasonic milling. *Int J Mech Sci*, 2021, 191: 106054
- 92 Wang M H, Li S Y, Zheng Y H. Surface roughness of titanium alloy under ultrasonic vibration milling (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2014, 45: 341–346 [王明海, 李世永, 郑耀辉. 超声铣削钛合金材料表面粗糙度研究. 农业机械学报, 2014, 45: 341–346]
- 93 Shen X H. Study on the technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted milling (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Jinan: Shandong University, 2011 [沈学会. 超声振动辅助铣削加工技术及机理研究. 博士学位论文. 济南: 山东大学, 2011]
- 94 Shamamoto E, Suzuki N, Hino R, et al. A new method to machine sculptured surfaces by applying ultrasonic elliptical vibration cutting. In: IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science. Nagoya, 2005. 91–96

- 95 Zhang M, Zhang D, Geng D, et al. Effects of tool vibration on surface integrity in rotary ultrasonic elliptical end milling of Ti-6Al-4V. *J Alloys Compd*, 2020, 821: 153266
- 96 Suzuki H, Moriwaki T, Okino T, et al. Development of ultrasonic vibration assisted polishing machine for micro aspheric die and mold. *CIRP Ann*, 2006, 55: 385–388
- 97 Jin D H, Kwak J S. Experimental verification of characteristics of magnetic abrasive polishing combined with ultrasonic vibration. *Trans Korean Soc Mech Eng A*, 2015, 39: 923–928
- 98 Zhao Q, Sun Z, Guo B. Material removal mechanism in ultrasonic vibration assisted polishing of micro cylindrical surface on SiC. *Int J Mach Tool Manuf*, 2016, 103: 28–39
- 99 Wan H Q, Han P Y, Ge S, et al. Development of ultrasonic vibration polishing method on workpiece surface (in Chinese). *Diamond Abrasives Eng*, 2018, 38: 94–100 [万宏强, 韩佩瑛, 葛帅, 等. 工件表面超声振动抛光方法发展概况. *金刚石与磨料磨具工程*, 2018, 38: 94–100]
- 100 Liu D, Yan R, Chen T. Material removal model of ultrasonic elliptical vibration-assisted chemical mechanical polishing for hard and brittle materials. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 92: 81–99
- 101 Yu T, Yang X, An J, et al. Material removal mechanism of two-dimensional ultrasonic vibration assisted polishing Inconel 718 nickel-based alloy. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, 96: 657–667
- 102 Zhang J, Cui T, Ge C, et al. Review of micro/nano machining by utilizing elliptical vibration cutting. *Int J Mach Tool Manuf*, 2016, 106: 109–126
- 103 Shamoto E, Moriwaki T. Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting. *CIRP Ann*, 1999, 48: 441–444
- 104 Jin M, Murakawa M. Development of a practical ultrasonic vibration cutting tool system. *J Mater Process Tech*, 2001, 113: 342–347
- 105 Brehl D E, Dow T A. Review of vibration-assisted machining. *Precis Eng*, 2008, 32: 153–172
- 106 Kurniawan R, Ko T J, Kumaran S T, et al. 3-DOF ultrasonic elliptical vibration tool holder based on coupled resonance modes for manufacturing micro-groove. *Precis Eng*, 2021, 67: 212–231
- 107 Oliveira J F G, Silva E J, Guo C, et al. Industrial challenges in grinding. *CIRP Ann*, 2009, 58: 663–680
- 108 Wu Y, Yokoyama S, Sato T, et al. Development of a new rotary ultrasonic spindle for precision ultrasonically assisted grinding. *Int J Mach Tool Manuf*, 2009, 49: 933–938
- 109 Li C, Zhang F, Meng B, et al. Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics. *Ceram Int*, 2017, 43: 2981–2993
- 110 Yuan Z H, Fang B, Li D F. Development of ultrasonic vibration assisted milling (in Chinese). *Electromach Mould*, 2020, 2: 1–9, 18 [袁中行, 方斌, 李德芃. 超声振动辅助铣削研究进展. *电加工与模具*, 2020, 2: 1–9, 18]
- 111 Chen W, Zheng L, Xie W, et al. Modelling and experimental investigation on textured surface generation in vibration-assisted micro-milling. *J Mater Process Tech*, 2019, 266: 339–350
- 112 Ma Y J, Nie W Z, Lu J M, et al. Study on surface quality of SiCp/Al by longitudinal and torsional composite ultrasonic vibration milling (in Chinese). *Mach Hydraul*, 2020, 48: 45–48 [马亚健, 聂文忠, 陆建民, 等. 纵扭复合超声振动铣削SiCpAl表面质量研究. *机床与液压*, 2020, 48: 45–48]
- 113 Wang Z W, Li H, Xie O, et al. Review of ultrasonic vibration assisted polishing technology (in Chinese). In: *Proceedings of 18th National Conference on Special Processing (Abstract)*. Urumqi, 2019 [王中旺, 李华, 谢鸥, 等. 超声振动辅助抛光技术的研究综述. 见: 第18届全国特种加工学术会议论文集(摘要). 乌鲁木齐, 2019]
- 114 Li Y, Wu Y, Zhou L, et al. Chemo-mechanical manufacturing of fused silica by combining ultrasonic vibration with fixed-abrasive pellets. *Int J Precis Eng Manuf*, 2012, 13: 2163–2172
- 115 Yang Z, Zhu L, Zhang G, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials. *Int J Mach Tool Manuf*, 2020, 156: 103594
- 116 Jiang F, Yan L, Huang Y, et al. Review on magnetic field assisted machining (in Chinese). *J Mech Eng*, 2016, 52: 1–9 [姜峰, 言兰, 黄阳, 等. 磁场辅助加工的研究现状及其发展趋势. *机械工程学报*, 2016, 52: 1–9]
- 117 Peruri S R, Chaganti P K. A review of magnetic-assisted machining processes. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2019, 41: 450
- 118 Ghosh A, Bagchi P K. Effect of magnetization on the wear characteristics of cutting tools. *J Aerospace Eng*, 1970, 5: 264–266
- 119 Mansori M E, Pierron F, Paulmier D. Reduction of tool wear in metal cutting using external electromotive sources. *Surf Coatings Tech*, 2003, 163-164: 472–477

- 120 Dehghani A, Amnieh S K, Tehrani A F, et al. Effects of magnetic assistance on improving tool wear resistance and cutting mechanisms during steel turning. [Wear](#), 2017, 384-385: 1-7
- 121 Kawai S, Wang Q, Iwai K, et al. Generation of compression waves by simultaneously imposing a static magnetic field and an alternating current and its use for refinement of solidified structure. [Mater Trans](#), 2001, 42: 275-280
- 122 Yip W S, To S. Effects of magnetic field on microstructures and mechanical properties of titanium alloys in ultra-precision diamond turning. [Mater Res Express](#), 2019, 6: 056553
- 123 Ahmed B, Shather S, Hamdan W. Improve the micro-hardness of single point incremental forming product using magnetic abrasive finishing. [Eng Technol J](#), 2020, 38: 1137-1142
- 124 Verma G C, Kala P, Pandey P M. Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes. [Int J Adv Manuf Technol](#), 2017, 88: 1657-1668
- 125 Jiao A, Zhang G, Liu B, et al. Study on improving hole quality of 7075 aluminum alloy based on magnetic abrasive finishing. [Adv Mech Eng](#), 2020, 12: 168781402093200
- 126 Geng Q D, Li C Y. Influence of ultrasonic polishing and magnetic abrasive finishing processing parameters on surface roughness of sapphire (in Chinese). *Surf Technol*, 2018, 47: 104-111 [耿其东, 李春燕. 超声磁力研磨加工参数对蓝宝石表面粗糙度的影响. *表面技术*, 2018, 47: 104-111]
- 127 Ahmed G M S, Reddy P R, Seetharamaiah N. Experimental investigation of magneto rheological damping effect on surface roughness of work piece during end milling process. [Int J Precis Eng Manuf](#), 2012, 13: 835-844
- 128 Liu J, Wei C, Yang G, et al. A novel combined electromagnetic treatment on cemented carbides for improved milling and mechanical performances. [Metall Mat Trans A](#), 2018, 49: 4798-4808
- 129 Liang Z Q, Ma L P, Wang X B, et al. Influence of pulsed magnetic treatment on wear of carbide micro-end-mill. [Adv Mater Res](#), 2016, 1136: 143-148
- 130 Singh A K, Jha S, Pandey P M. Nanofinishing of fused silica glass using ball-end magnetorheological finishing tool. [Mater Manuf Process](#), 2012, 27: 1139-1144
- 131 Das M, Jain V K, Ghoshdastidar P S. Nanofinishing of flat workpieces using rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF) process. [Int J Adv Manuf Technol](#), 2011, 62: 405-420
- 132 Xu J. Research on process and polishing trace of magnetorheological polishing with a small tool (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 [徐江. 小工具头磁流变抛光工艺及抛光轨迹研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015]
- 133 Guo M L. Mechanism research of the cluster magnetorheological finishing with dynamic magnetic fields (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Guangzhou: Guangdong Institute of technology, 2019 [郭明亮. 动态磁场集群磁流变抛光机理研究. 硕士学位论文. 广州: 广东工业大学, 2018]
- 134 Hu J F. Research on polishing zirconia ceramic with magnetorheological finishing-ultrasonic composite technology (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changchun: Changchun University of Technology, 2018 [胡锦飞. 磁流变-超声波综合技术抛光氧化锆陶瓷的研究. 硕士学位论文. 长春: 长春工业大学, 2018]
- 135 Guo J, Feng W, Jong H J H, et al. Finishing of rectangular microfeatures by localized vibration-assisted magnetic abrasive polishing method. [J Manuf Process](#), 2020, 49: 204-213

Review of field-assisted ultraprecision machining difficult-to-machine materials

XU JianFeng, HUANG Kai, ZHENG ZhengDing, LIN ChuangTing, ZHANG JianGuo, XIAO JunFeng & CHEN Xiao

State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment & Technology, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Field-assisted ultraprecision machining is an advanced manufacturing technology innovated from the traditional ultraprecision machining technologies by combining laser, ultrasonic vibration, and magnetism, among others. It achieves a nano- or subnanometer machining accuracy when manufacturing difficult-to-machine materials. This paper reviews the development of field-assisted techniques in ultraprecision machining, including turning, grinding, and milling. Considering the surface quality, machining efficiency, forces, tool wear, and other experimental results, field-assisted ultraprecision machining has obvious advantages compared to traditional ultraprecision machining. This review summarizes the present shortcomings and prospective challenges in field-assisted ultraprecision machining, which is beneficial to the development of the advanced hybrid multienergy field-assisted machining technology.

field-assisted ultraprecision machining, difficult-to-machine materials, laser assisted, ultrasonic vibration assisted, magnetic field assisted

doi: [10.1360/SST-2021-0393](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0393)