

· 专题二:双清论坛“原子级制造的基础科学问题” ·

原子精度制造新原理和新方法^{*}

张振宇^{1**} 李琳² 巨阳³ 陈云飞⁴ 许剑锋⁵
闫永达⁶ 徐飞飞⁷ 周天丰⁸ 段辉高⁹ 黄志权^{10, 11}
徐凯臣³ 朱吴乐³ 彭小强¹² 邓辉¹³ 司伟⁴
王吉² 王金石¹⁴ 吕鹏¹⁴ 冯俊元¹⁵

1. 大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室,大连 116024
2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所激光极端制造研究中心,宁波 315201
3. 浙江大学 机械工程学院,杭州 310027
4. 东南大学 机械工程学院,南京 211189
5. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室,武汉 430074
6. 哈尔滨工业大学 精密工程研究所,哈尔滨 150006
7. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所,绵阳 621999
8. 北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081
9. 湖南大学 机械与运载工程学院,长沙 410082
10. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部,北京 100085
11. 太原科技大学 机械工程学院,太原 030024
12. 国防科技大学 智能科学学院,长沙 410003
13. 南方科技大学 机械工学院,深圳 518055
14. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院,天津 300072
15. 杭州电子科技大学 机械工程学院,杭州 310018

[摘要] 目前航空航天、核物理、微电子、光电子和半导体等国家战略领域高性能装备的性能需求日渐严苛,核心零部件的制造精度必须迈进原子级水平,亟需研究原子精度的高性能制造新原理和新方法。本文归纳并提出了目前迫切需求的原子级表面精度、原子级结构精度、原子级损伤控制以及原子级特征尺寸结构创成四大原子精度制造核心能力,从能场辅助原子级切削、多能场辅助原子有序排布、表面能弱化原子精度材料去除以及超光学衍射极限的原子精度制造四大方向进行系统梳理,介绍了面向不同应用场景的原子精度制造新原理和新方法的研究现状,并概述了各类方法的优势和缺点,从中提炼出多能场耦合条件下的能量和原子间相互作用机理这一关键科学问题,并从四大方向上对未来我国原子级制造的基础研究提出了建议。

[关键词] 原子精度制造;原子级切削;原子有序排布;表面能弱化加工;超光学衍射极限加工

1 原子精度制造的研究意义

在航空航天、核物理、微电子、光电子和半导体等国家战略领域,关键装备的性能是由核心零部件的制造精度所决定的。例如,在激光核聚变点火装置中,强激光透镜等光学元件的表面面形精度、表面损伤层厚度等因素决定了光学系统的抗辐照能力,从而决定了点火的激光通量以及聚焦效率;而靶丸



张振宇 大连理工大学教授,教育部首届青年长江学者,大连市杰出青年科技人才,辽宁省百千万人才工程百人层次人才。主要研究方向为精密超精密加工技术,磨削、抛光、增材制造、激光加工工艺与装备等。获国家自然科学基金优秀青年科学基金项目资助,获得国家科技进步奖一等奖等奖项。以第一成果人获国家发明专利 59 项、美国专利 6 项,以第一/通

讯作者发表 SCI 论文 100 余篇。

收稿日期:2023-10-12;修回日期:2024-02-02

* 本文根据第 330 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: zzy@dlut.edu.cn

的球度、壁厚均匀度以及表面缺陷的数量和尺寸决定了点火过程中的内爆流体稳定性,从而影响点火内爆效率和能量净增益,决定了点火的成败。通过磨抛工艺改进,美国国家点火装置(National Ignition Facility, U. S., NIF)在 2021 年攻克了靶丸表面的低缺陷抛光难题($>0.5 \mu\text{m}^3$ 的凹坑数量为零),助力 NIF 在 2022 年实现 3.12 MJ 的点火能量输出,是人类首次实现聚变点火净增益的里程碑式节点。随着制造能力的日益提高,目前加工精度已经从纳米级逐渐逼近原子级。德国蔡司加工的 EUV(Extreme Ultra-violet)光刻物镜表面精度在 2019 年达到了低频 RMS $<100 \text{ pm}$ 、高频 RMS $<50 \text{ pm}$ 的水平^[1],满足目前 3 nm 芯片量产需求。美国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)2015 年部署“从原子到产品”(Atom to Product, A2P)研究计划^[2],美国能源部先进制造办公室于 2018 年部署原子精度制造计划^[3],中国科学院于 2017 年启动“功能导向原子制造的科学问题”先导项目^[4],日本文部科学省和科学技术振兴机构在 2022 年分别启动了原子级制造相关的计划^[5],欧盟则通过科技框架计划支持原子级制造相关项目发展^[6]。世界各国纷纷针对原子级制造开展战略布局,试图抢占原子级精度制造的新制高点。

随着重大领域关键零部件核心性能要求的日渐严苛,表面精度、结构特征尺寸以及缺陷控制要求接近原子尺度,驱动制造精度从“纳米时代”向“原子时

代”迈进。本文提出的原子精度制造是指表面的精度、结构的特征尺寸以及加工形成的损伤缺陷的尺寸/深度在数个原子直径范围内的新制造范式(图 1)。当加工精度到达原子尺度时,材料不再能被继续无限细分,而是以原子作为单位来衡量,因此,不同材料原子间以及能量场和原子间的复杂作用关系是原子精度制造的核心科学问题。目前我国在超精密制造领域已经形成了一批具有原子精度制造潜力的原子级切削、原子有序排布、表面能弱化加工以及超衍射极限加工方法及技术,在实验室中初步验证了原子级精度加工的可行性。然而,由于原子尺度多种物理场和原子之间的核心作用机制仍不明确,原子级制造的探索缺少系统性的引导和规划,原子尺度的诸多新现象新机制亟待研究。因此,必须探索原子精度的制造新原理和新方法,突破原子逐个/层去除和构筑、原子精准排布调控以及原子级缺陷的弥补修复等颠覆性新技术,为我国先进制造的高质量发展提供新动能。

面向不同的高性能零件及应用场合,原子级精度加工具有截然不同的需求:(1) 通过切削方法加工的复杂构件,其形位精度及损伤达到原子级是实现超高性能乃至逼近理论极限性能的关键,亟需对多元能场下的原子级切削机理进行深入研究;(2) 在光刻物镜、X 射线反射镜、激光无氧铜反射镜以及高强高韧结构件等高性能零件加工方向,其核心性能由零件内部或最表面的原子排布的有序性决定,因此,亟需研究材料原子有序排布调控新原理新

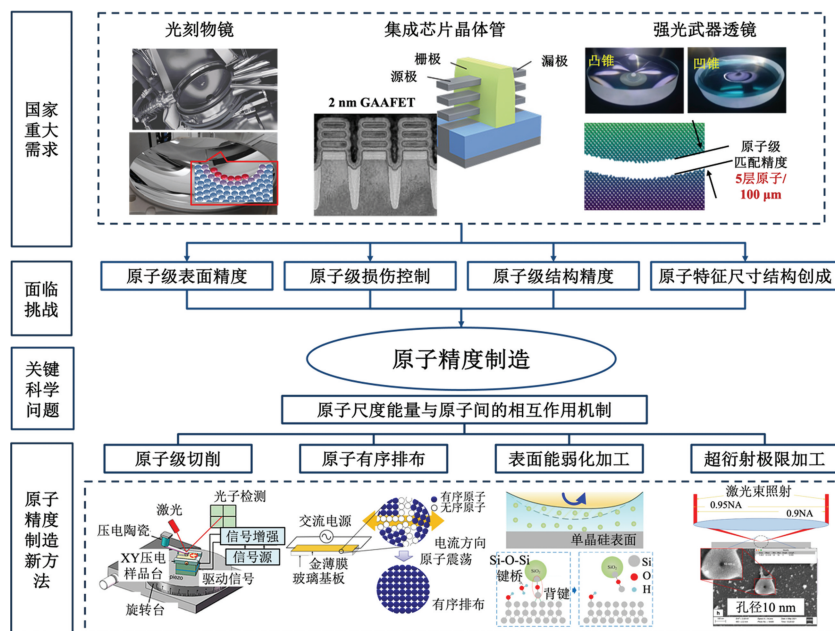


图 1 原子精度制造面向的国家重大需求、面临挑战、关键科学问题及具有原子精度制造潜力的四类方法

方法,实现晶体缺陷、表面损伤的愈合修复;(3)在复杂表面功能结构的原子级精度加工方面,需要对表层原子的表面能进行弱化,才能实现极高的结构形状精度和亚表面损伤控制,实现表层原子的可控去除;(4)在超光学衍射极限的微孔制造方面,同样面临传统工具形状尺寸和定位精度的限制,难以实现功能性纳米孔的高效制备。经过国家自然科学基金委员会于2023年3月召开的第330期双清论坛“原子级制造的基础科学问题”的讨论,本文梳理了面向以上应用场景需求的加工研究现状及发展趋势,建议针对能场辅助原子级切削、多能场辅助原子有序排布、表面能弱化原子精度材料去除、超衍射极限的原子精度制造等新原理与新方法开展研究。

2 原子精度制造新原理和新方法研究现状

2.1 面向高性能复杂构件的能场辅助原子级切削机理与方法

原子尺度结构是指特征尺寸在原子尺度且具有独特的量子、电磁和热效应的结构,在未来一代的量子、DNA芯片、储能和光电探测等领域具有巨大的应用潜力^[7]。因此,原子尺度结构的可控、高质量加工制造尤为重要。超精密机械加工技术具有加工稳定性好、一致性高、效率高等优点,但由于刀具尺寸和机床运动精度的限制,其加工精度难以达到原子级。因此,在进一步减小切削刀具尺寸和提高机床运动精度的基础上,开展原子级切削的机理与应用研究是原子尺度结构制造的重要方向。

2.1.1 原子级精度对刀

对刀是切削加工的第一步,实现原子级高精度对刀,对材料去除深度进行原子级精准定位调整是开展原子级切削加工研究的基础^[8]。然而,目前对刀的精度一般依赖接触式试切等方法,容易导致刀尖磨损失效,而现有的在位对刀测量方法难以达到原子级精度^[9]。针对这一问题,北京理工大学周天丰教授^[10]于2018年提出了基于在位膜厚测量的原

子级精度刀具定位新方法,搭建了在位测量系统(图2),对工件表面薄膜光谱进行在位测量,借助薄膜光谱干涉原理分析入射光/反射光的干涉光谱,通过傅立叶变换计算出薄膜厚度,从而得到工件和刀具的绝对位置,测量分辨率可达0.1 nm,对刀精度在纳米级并可持续提高。经试验验证,该系统能够实现微透镜阵列、微柱面镜阵列等多种复杂面形的高精度切削加工^[11, 12]。未来,更高精度的在位测量技术如基于原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)探针原理的定位测量装置是解决原子精度加工中精准定位对刀的关键,其与单点金刚石车和超精密磨床等超精密机床的整合以及测量定位工艺研发,是未来原子精度切削技术实现的前提。

2.1.2 基于AFM的原子级切削机理

基于目前的微纳切削理论,最小成屑厚度和刀尖的钝圆半径密切相关。然而,原子级切削受限于刀具钝圆加工的极限能力以及刀具磨损规律,材料去除过程难以形成切屑。因此,原子级切削材料去除机理以及表面创成机理研究是未来实现原子精度加工的关键。基于AFM工作原理的探针铣削实验平台是研究纳米至原子尺度切削机理的有效手段^[13]。探针铣削^[14]由探针与样品间的相对平转运动实现,通过调控加工参数其未变形切屑厚度到达原子尺度,原子级切削加工如图3a所示^[15],原子级探针铣削装置如图3b、3c所示^[16, 17]。

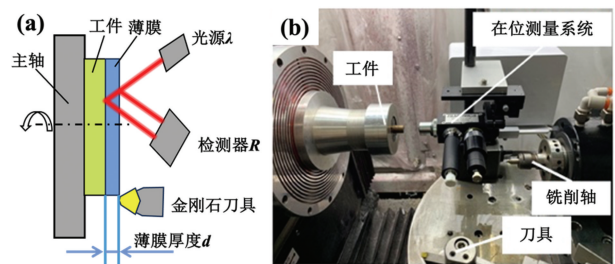


图2 基于在位膜厚测量的原子级精度对刀:
a. 薄膜光谱干涉原理, b. 原子级精度刀具定位装置^[10]

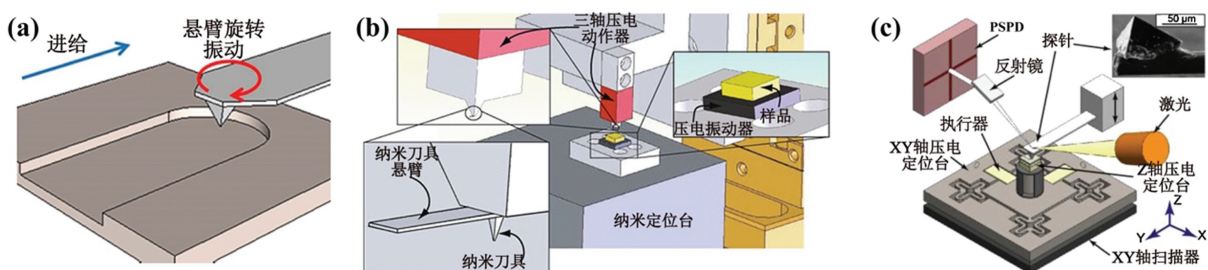


图3 微铣削和原子级切削加工原理及装置: a. 原子级切削示意图, b. 无反馈原子级切削装置, c. AFM力反馈原子级切削加工装置

通过原子级探针铣削装置,研究人员发现随着最大未变形切屑厚度从百纳米向原子尺度逐渐减小的过程中,发生了从图 4a 所示的犁耕—挤压—剪切去除作用^[18]向图 4b 所示的犁耕—挤压去除作用的转变^[19],证实了原子级切削加工中材料去除形式和纳米切削的本质差异。

2.1.3 原子级切削的分子动力学研究

当切削深度从纳米级降低到原子尺度时,其主导理论从连续介质力学向离散的量子力学发生转变,而以探针铣削或透射电镜 (Transmission Electron Microscopy, TEM) 原位力学实验为主导的切削机理研究昂贵且费时,因此分子动力学等原子尺度的模拟是探索原子精度切削基础原理的重要手段。在前期原子尺度模拟研究中发现,采用金刚石刀具能够在 Cu(111) 表面上实现单层原子去除^[20]。结合加工表面的弹性变形与刃口处原子包络形状带来的影响,原子尺度切削机理正在不断丰富^[20],并揭示了刃口半径的增大对位错滑移与成屑的抑制、对弹性变形效应的促进以及由此引发亚表面损伤的机理^[21]。针对铝的原子层切削分子动力学仿真研究结果表明,切削厚度小于分流高度时,如图 5 所示,工件材料表面先被以弹性形式压入工件表面,工件材料表层第一层原子以被推挤的形式去除^[22]。当切削厚度 (~0.75 nm) 略大于分流高度时,更多的材料被去除形成堆积但仍以挤压的形式去除,和探针铣削实验结果一致。

原子层切削机理研究的进一步深入面临两方面难题。首先,目前的理论计算主要采用经典分子动力学方法^[23],虽然能够高效地进行建模和运算,但无法直接描述化学键的断裂,且势函数难以准确描述刀具与工件界面之间的相互作用;同时,第一性原理动力学计算^[24]尚难以处理原子层切削模型中的原子体量,因此多尺度仿真与并行计算是平衡模拟精度与计算效率的一条途径。其次,原子层切削实验面临一系列挑战,包括如何制备极端锋利的金刚石刀具并保持其刃口不发生快速钝化、如何实现原子级的定位与运动控制、如何使原子层切削具有制造技术所要求的可控与高效性等,解决这些问题的解决有赖于材料制备、超高精度机构、真空与隔振等技术的发展与协同配合。虽然目前单点金刚石车床、纳米精度磨床等超精密加工设备具备加工高性能复杂构件的能力,但是其表面质量、表面精度以及亚表面损伤控制仍无法满足原子精度制造的需求。激光、超声、等离子体等复合能场辅助加工手段已经被证明具有降低表面粗糙度、减少亚表面损伤、提高切削效率的优异效果,但能场辅助在原子精度切削方面的研究仍然较少。在原子尺度下多种能场能量和原子之间的作用原理,及其对切削过程产生的影响,是未来实现多能场辅助原子精度切削亟需解决的关键科学问题,也是制约着复杂构件的性能进一步逼近理论极限的瓶颈。

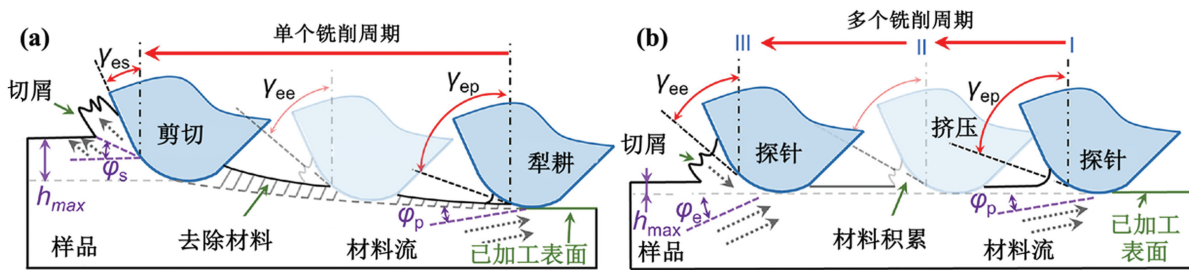


图 4 原子级切削加工金属膜材料去除机理示意图:

a. 纳米铣削中的犁耕—挤压—剪切去除机制, b. 原子级铣削中的犁耕—挤压去除机制^[19]

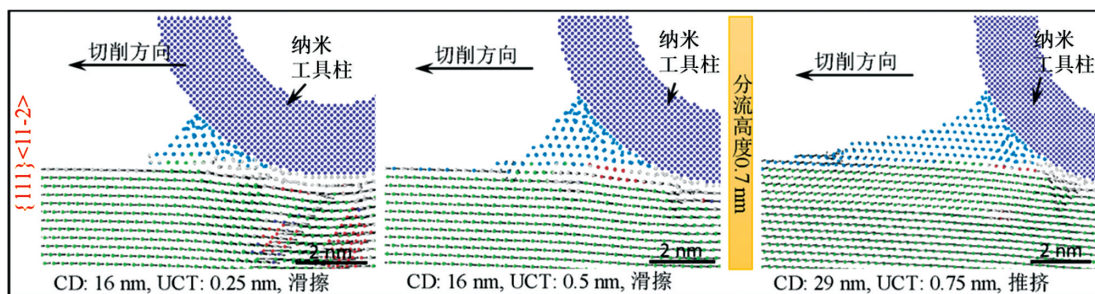


图 5 原子层切削厚度下的原子位移矢量图^[22]

2.2 面向原子级损伤控制的多元能场原子有序排布机理与调控方法

光刻物镜、X射线反射镜以及激光无氧铜反射镜的近零缺陷要求是光学系统损伤阈值提高和性能进一步提升的核心,表层材料的晶体缺陷以及微观裂纹都会在强电磁波诱导下引起严重损伤甚至报废。另一方面,金属、陶瓷材料制成的高端核心零部件在极端力热服役环境中容易产生微观裂纹缺陷,导致工件失效报废甚至引起灾难性后果,而裂纹萌生总是从微小气孔、微裂纹等微观材料缺陷逐步演变而成的。因此,为了满足战略装备核心零件以及极端光学元件日渐严苛的性能需求,工件内部的微观缺陷控制能力必须达到原子级。因此,亟需研究原子级制造新方法对表层原子排列进行精准调控和缺陷修复,目前较受关注的是电场/电流、磁场以及等离子体等物理场作用下的原子有序排布机理研究。

2.2.1 基于电场的原子级缺陷重构

在基于电场/电流的材料缺陷重构方面,早期研究已证实高密度电流可通过降低位错密度达到愈合疲劳缺陷、延迟裂纹产生的效果^[25],但其微观层面上的机理尚不明确。2021年,加利福尼亚大学 Andrew 团队^[26]借助高分辨率透射电镜(Scanning Transmission Electron Microscopy, STEM)观察了钛铝合金的电塑性行为,通过排除焦耳热的影响证实机械载荷的作用下电场可促进晶格的滑移。然

而,上述情况下的晶格滑移受机械载荷和电场共同驱动,未能厘清单一电场对晶格重构的影响。2023年,浙江大学巨阳团队^[27]在仅施加高频交流电的情况下,实现了原子沿特定方向的有序排列(图6),达到晶粒增大、密堆积平面增加的效果。另外,爱荷华州立大学 An 团队^[28]仅使用外部电场控制硫化锌的位错运动,成功观察到位错随电场方向的来回移动。以上研究证实了电场对于金属材料原子排布的调控作用,但是目前仅限于位错运动和晶体结构的优化,还无法实现完美晶格的宏观排列。

2.2.2 基于磁场的原子排布调控

磁场作为一种无接触的物理场,在实际工业生产中已部分应用于材料宏观层面的优化,如控制晶粒生长和分离杂质等^[29]。随着设备升级和技术进步,磁场对材料微观结构的影响也越来越受到关注。在晶界尺度上,德国亚琛工业大学 Molodov 等^[30]研究了非铁磁性材料在强磁场中的晶界动力学,证明了任何具有各向异性磁化率的结晶固体都可发生晶界的磁强迫运动和晶粒的选择性生长,以控制结晶组织和晶粒结构演变。在位错尺度上,北京航空航天大学骆红云团队^[31]探究了磁场对7075超细晶粒铝合金位错形态和析出行为的影响,观察到磁场对样品不同方向上的位错活性产生了相反的影响,为该材料的优化提供了新的见解。从微观尺度看,磁场具有良好的晶界运动的驱动作用,但是磁场的强度随距离衰减快,强磁场对晶体的影响有限,限制

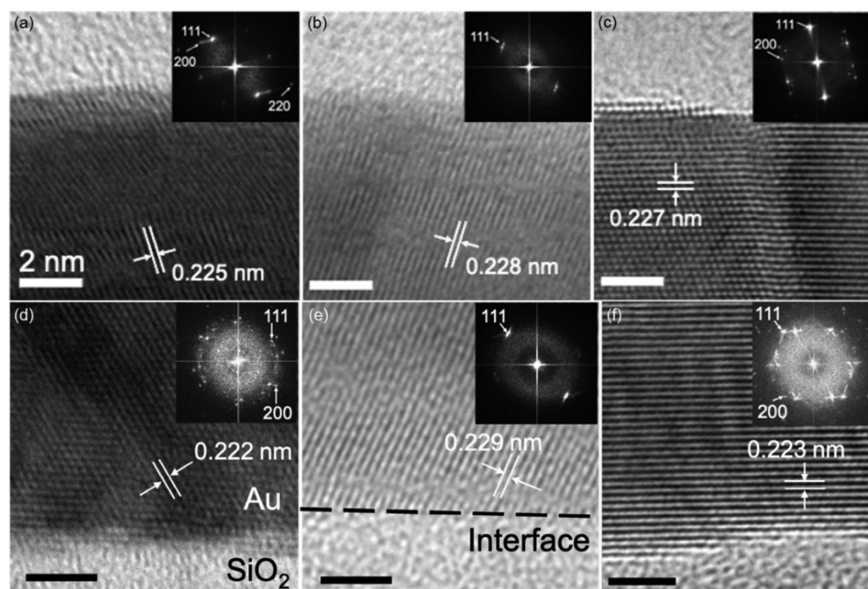


图6 Au(111)面的TEM图像:a—c. 分别在制备、电流处理和热处理后样品表面附近的横截面图; d—f. 界面附近的横截面图,插图显示了快速傅立叶变换分析结果^[27]

了这一方法对更大范围的原子排布优化的应用。

2.2.3 等离子体/电子束原子层退火

化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 和原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 等技术常用于微米甚至原子层级薄膜的沉积制备,然而由于沉积过程的随机性,沉积薄膜的结构尤其是晶体结构难以控制,导致薄膜性能不均一,严重影响了沉积材料的物理化学性能。随着 ALD 技术的发展,可控的原子逐层沉积成为可能,研究人员提出了边沉积、边调控原子排列的新思路。台湾大学 Shih 等^[32]提出了原子层沉积过程中在位逐层原子退火新方法,通过施加 Ar 等离子体对每一层沉积 AlN 进行退火处理,实现了 AlN 沉积薄膜从非晶态向晶体相的完全转变,获得了具有良好晶体组织的 AlN 薄膜。然而逐层退火过程繁琐耗时,该研究团队又进一步提出了通过电子束对原子层沉积 AlN 薄膜的大范围快速退火新方法^[33],如图 7 所示,实现了 18 nm 晶体 AlN 外延层的制备,表面粗糙度相比未退火样品有所降低,且通过带宽测量发现其与外延 AlN 一样拥有完美的晶体质量。

综上,目前国内外利用电场/电流、磁场等物理场对材料原子有序排布机理的研究主要集中在不同材料的微观组织上,且以定性分析为主,其实现效果和完美晶体的原子有序排布相距甚远。另一方面,以上方法仅适用于特定的导电/导磁的金属材料,而如玻璃、单晶硅和碳化硅等非金属晶体材料以及非晶材料的内部缺陷演变机制和调控方法仍有待挖掘。在传统加工工艺中,损伤是在切削加工等环节引入的,因此通过优化工艺参数或加入能场辅助降低损伤层深度是目前处理表面损伤问题的常用方法。然而,降低损伤常常也意味着加工效率的降低。

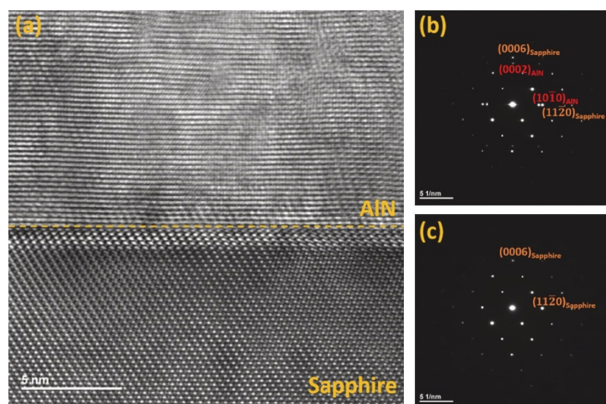


图 7 通过原子层沉积以及电子束退火得到的 AlN 晶体结构薄膜^[33]

原子有序排布的新原理新方法为这一问题提供了全新思路和解决方案,不仅能够对加工过程中引入的损伤形成有效修复,也能对材料中的固有晶体缺陷进行调控。原子尺度的损伤和缺陷在加工中的形成机制,损伤缺陷数量和尺寸和零件核心性能的映射关系,其核心机制在原子尺度所涉及到的能量—材料作用原理,尤其是各类能场对于原子排布的影响机制,是目前需要深入研究的关键科学问题。

2.3 面向原子级形状精度控制的表面能弱化加工机理与方法

聚变靶丸、强光凹凸锥镜、极紫外光刻物镜等高性能零件的表面形状精度是决定其核心性能的关键。目前,国外极紫外光刻物镜的表面形状精度已经逼近原子级精度,以支撑 3 nm 制程芯片的批量制造。强光系统凹凸锥镜若能实现锥尖 5 原子层/100 μm 的原子匹配精度,系统聚焦能力和光通量就可以实现数量级提升。然而,目前表面形状精度控制要到达原子级仍面临诸多挑战,在此方向上,目前主要有弹性发射加工、等离子体改性辅助切削、气体团簇离子束加工和等离子体原子选择刻蚀等方法,这些方法大多采用能场调控或化学应对最表层原子和内部原子之间的键能进行调控,即表面能弱化加工,以实现表层原子自限制性去除,将对亚表面原子的影响降到最低,获得原子级精度结构并实现原子级的损伤控制。

2.3.1 弹性发射加工

弹性发射加工 (Elastic Emission Machining, EEM) 通过流体作为载体带动抛光颗粒与光学元件表面发生微弱碰撞,依靠两者间的界面化学反应实现原子量级材料去除^[34, 35]。基于计算流体力学计算出 EEM 中与工件碰撞的磨粒动能,结果表明磨粒动能远小于材料去除所需的能量^[36],而通过第一性原理分子动力学仿真确定了磨粒与工件表面之间的化学吸附会弱化工件表面表层原子与次表层原子之间的化学键能,降低材料去除所需的能量,证实了通过界面化学反应实现材料弹性域去除的可行性^[37]。尼康公司利用 EEM 对超低膨胀玻璃、单晶硅等光学材料进行加工,最佳粗糙度达到 50 pm RMS,如图 8 所示^[38]。而采用扫描隧道显微镜观测 EEM 加工表面,结果表明 95% 的区域仅由 3 个原子层构成,如图 9 所示^[39]。通过光致发光分光仪对 EEM 加工表面观测,发现 EEM 加工不会对光学元件表层的物理和化学性质造成改变。综上所述,EEM 作为一种原子尺度加工方法,可以通过化学拔

除原子的方式对表面进行逐层原子去除加工,因其流体剪切加载形式也能对高点具有较好的选择去除效应,是实现原子级精度表面加工切实可行的抛光方法,但其加工效率相比其他抛光方法较低。

2.3.2 等离子体改性辅助湿法刻蚀

表面电化学腐蚀是表面处理的重要手段,然而由于反应不仅限于表层原子,且反应过程一般不具有自限性,因此化学/电化学处理方法难以实现原子级精度加工。研究人员借助等离子体对表层原子实现改性,然后再进行刻蚀,以实现表层原子的精准去除^[40-45]。2023年,天津大学Lyu等学者^[44]针对硬脆材料提出了大气等离子体改性辅助湿法刻蚀加工方法,通过等离子体改性提升倍半氧化物激光晶体表面的化学活性,获得了氧化镱晶体表面粗糙度Sa 0.14 nm的表面质量,球差电镜显示晶体晶格排列

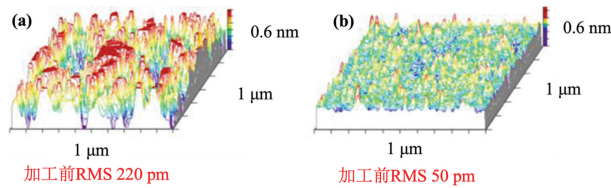


图8 尼康公司采用EEM获得的超光滑表面加工前后对比^[38]

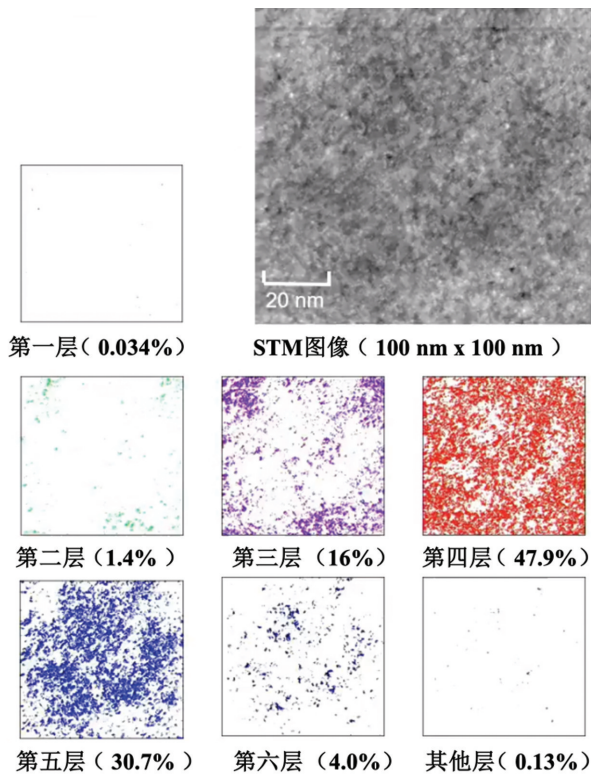


图9 EEM处理后表面STM观测结果: 95%的区域仅由3个原子层构成^[39]

延伸至样品表面,激光损伤阈值提升2倍以上。此外,激光改性辅助湿法刻蚀工艺加工熔融石英表面也可实现残余应力远小于激光加工^[47]。以等离子体、激光等辅助能场对材料表层原子进行改性后再开展加工,其思路和原子层沉积(Atomic Layer Etching, ALE)、ALD等方法类似,但就目前而言,前驱体反应仍是保证表面单层原子反应的最佳手段,而能场表面改性如何能够实现单层/可控若干层原子的精准改性,是目前能场辅助切削/刻蚀面临的主要难题。

2.3.3 气体团簇离子束

气体团簇离子束(Gas Cluster Ion Beam, GCIB)技术创成原子级表面的核心是气体团簇辐照工件表面过程中的“横向溅射效应”^[48]。在合适的团簇大小与能量条件下,团簇束流入射表面后以近似平行于表面的方向逸出。在该过程中,表面高点位置原子被选择性溅射去除,溅射产率之差和回落的被溅射原子加速缩减了突起处与凹陷处的高度差,达到了平坦化的目的,最终可获得原子级表面^[49]。相关实验验证了气体团簇离子束技术可用于金刚石抛光,通过先用Ar-GCIB进行粗抛光,再用SF₆-GCIB进行精细抛光的工艺,获得了Ra为0.5 nm的金刚石样品^[50]。

综上,在表面能弱化加工方向上,多种方法所涉及的理论已经从传统连续介质力学逐渐向量子力学扩展,开始探索表层原子之间键能在机械、化学及其他能场作用下的演变规律。通过调整能场及化学反应的作用深度以及能量大小,实现仅表层原子剥离而不影响后续原子层加工,这就需要调控的深度精准控制在表面首层或几层原子之内。然而,无论是热的传递、化学反应抑或是激光束、离子束等能束的作用在原理上不具备深度方向的自限制或自停止,其作用深度也远在原子尺度之上,因此亟需探索能场约束/加载新方法。目前,在能场调控深度、操控能量精准度以及能场作用效果方面仍有诸多未探明之处。由于真空环境需求以及气相反应的限制,来自于原子层沉积/刻蚀的前驱体反应难以与诸多现有的表面去除方法手段相结合。作为一种新的原子级加工理念,未来针对表面能弱化新原理的研究必将催生出更多原子精度制造新方法。

2.4 面向原子特征尺寸结构创成的超衍射极限制造机理与方法

未来战略领域核心性能要求逐渐从宏观形性调

控过渡到对离子、光子、声子以及有机物的精准调控,而这些调控能力的发展受制于原子精度纳米孔等原子特征尺寸结构的加工能力。长期以来,衍射极限一直制约着我们在微观尺度下获得超高分辨率成像以及加工的能力,在纳米技术、量子光学、高级成像算法等领域的迅速发展下,超衍射极限的可能性正在逐渐显现^[51, 52],目前具有接近原子级精度加工能力的技术包括基于矢量偏振光场调制的激光纵波直写技术、电子束加工以及介电击穿加工等。

2.4.1 基于矢量光场调制—纵波光场加工

表面等离子体光刻^[53, 54]、飞秒激光多光子聚合^[55]和受激发射损耗^[29, 31]等加工方法,通过对激光在频域、时域和空域的调制实现更短波长或更小光束作用尺寸,可实现超光学衍射极限加工。然而,由于利用的光波长均在百纳米级别,难以加工出具有原子级精度的结构。除了激光时域、空域和频域调制,通过矢量场的调制也可突破衍射极限,已受到国内外学者的关注^[56]。其原理是调制激光的矢量偏振态,使径向偏振光在紧聚焦下产生局部增强的纵向电磁波,其强度为横向电磁波的几个数量级,利用高强度的纵向电磁波突破衍射极限^[57]。2021年,英国曼彻斯特大学李琳院士团队实现了纯度为94.7%的纵波光源,如图12所示,并实现红外远场单脉冲大深度纳米孔加工,采用波长为800 nm,完成在蓝宝石基材直径10 nm孔制备,达到衍射极限的 $\lambda/80$,深径比70:1^[58]。

2.4.2 聚焦电子束

通过电子束与材料之间的相互作用进行原子量级的去除、增加或迁移,可突破现有加工技术的限

制,实现原子及近原子精度制造。通过电子束辐照收束技术,研究人员成功在 Si_3N_4 、 SiO_2 以及石墨烯表面制备了5 nm以下的纳米孔道,并且展现出良好的分子检测能力^[59]。进一步,荷兰代尔夫特理工大学Zandbergen等人^[60]也使用透射电子束雕刻技术制备了0.6 nm的纳米电极间隙。麻省理工学院李巨团队^[61]进一步利用聚焦电子束实现了单原子操纵,用磷原子取代石墨烯中的部分碳原子,改变了材料的光学及电学性质。电子束是目前加工精度最高的能束工具,然而其效率极低,难以实现大规模表面制造。

2.4.3 介电击穿

当施加临界的大电场时,薄电介质的绝缘性能会受到损害,这种现象被称为介电击穿,已经被证明是在固体薄膜上制备纳米孔的一种简单方法^[62]。不同于电子束和离子束,介电击穿制造成本相对较低,制造工艺较简单,因此有潜力进行大规模纳米孔传感器生产。电压通过两个电极,并经导电离子溶液施加在超薄的 SiN_x 膜(<10 nm)上,通过电压可控制击穿薄膜后形成的小孔孔径,最小可达到亚纳米尺度^[63]。东南大学陈云飞团队^[64]在脉冲电压或恒定电压下通过控制介质击穿在 SiN_x 薄膜上制备了5 nm甚至更小的纳米孔,发现使用恒定电压比脉冲电压更容易制造小规模纳米孔。最近,这项技术已经扩展到通过使用原子力显微镜尖端作为可移动电极来精确定位施加电压的位置,从而能够形成多个纳米孔阵列^[62],然而其加工效率以及纳米孔圆度等加工结构精度仍然有待提升。

综上,目前原子特征尺寸的纳米孔等结构制备方法多样,且均逐渐朝低成本、低时耗、小孔径等方

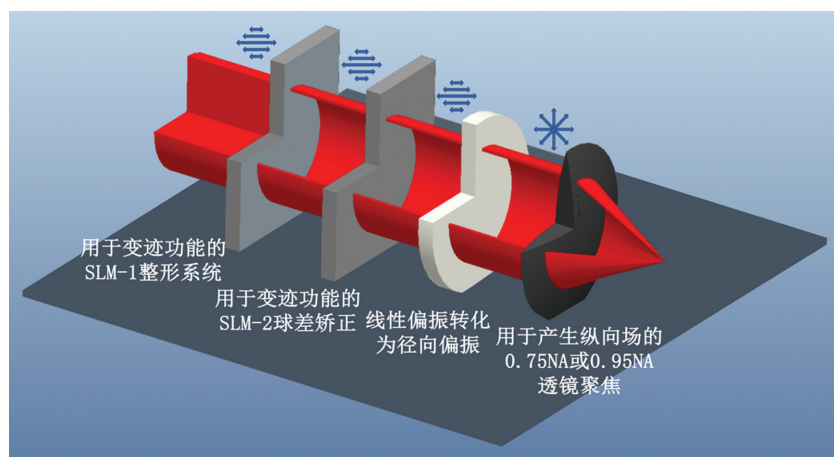


图 10 高纯度纵波光源调制示意图^[58]

向发展。和其他方法相比,超衍射极限加工的加工精度接近原子精度,然而目前此类方法均面临着制备效率低、制备工艺不成熟等重大难题,极大地限制了此类方法的推广应用。同时,目前的加工方法虽然能够实现原子特征尺寸结构的加工,但其加工精度仍然无法达到原子精度的需求,这极大地制约了纳米孔等原子精度结构的核心性能。由于原子特征尺寸结构的加工方法主要以能束或能场加工方法为主,因此,原子尺度下能束和能场与原子之间的作用原理是实现原子级特征尺寸结构创成必须探索的关键科学问题。

2.5 对比与展望

以上四个方向的现有方法归纳和对比结果如表1所示,各类方法在加工表面精度、结构特征尺寸、损伤控制能力、加工效率和加工成本多个维度上均各有优劣。总体而言,目前具有原子精度加工潜力或基于原子精度加工新原理的加工技术主要存在如下问题:原子级切削、弹性发射加工等方法较为成熟,但是其加工精度还未能达到原子精度,未来仍需对原子尺度的材料去除原理持续研究,突破原子级精度加工难题;原子有序排布的各类方法目前仍处于实验室阶段,仅完成了原理验证,距离成熟技术及装备产品的推广应用仍有很大距离;纵波光场加工、介电击穿等方法具有一定的应用基础,但存在着制造效率极低,无法实现大规模批量化制造,因此也无法短时间内实现推广应用。除此以外,各类方法还均存在加工成本高、可加工材料种类有待扩展等关键问题,如本文列出的多类原子有序排布方法,大多只适用于金属材料。因此,现有方法的加工效

率、加工精度仍待突破,原子精度制造新方法仍有待挖掘。

3 研究挑战及建议

通过对原子精度制造新原理新方法的逐一梳理,原子精度制造方向面临的主要挑战有以下几点:首先,在机理层面,和传统的加工制造原理不同,原子精度制造涉及量子力学,在原子尺度中不同种类原子之间以及与不同能场之间的相互作用目前尚不明确,仅仅通过机床精度提高和制造过程控制能力的提高难以满足更高精度的制造需求,这极大地限制了原子精度制造的发展。为达到原子级精度,在加工过程中的去除量也必须限制在原子级别,必须通过能场辅助精准调控表面原子,降低断键所需能量,实现表面的定域可控去除。然而,能场的扩展性和原子精度限域调控存在着天然矛盾,亟需深入探索限域调控和去除的新原理。在方法层面,目前多种具备原子精度制造潜力的方法仍然需要持续攻关,突破其加工精度和加工效率的限制,才能实现应用。比如本文所提到的原子特征尺寸结构加工和原子有序排布加工两类方法,目前已经通过原理验证,但是如何实现大面积数十万乃至上亿个纳米孔的精准快速加工、如何实现大型构件内部原子排列的调控和缺陷修复,需要对能场施加方式、工具制造以及过程控制持续探索,才能研发出具有实际应用价值的原子精度制造新方法。在工艺与装备层面,原子精度制造和传统制造一样追求大规模、一致性和批量化,而高效一致的制造需求和原子精度是效率和精度维度上的两个极限。目前的加工方法在精度和

表1 原子精度制造各类方法对比

方法	加工材料	表面精度	结构尺寸	损伤控制	加工效率	加工成本	技术成熟度
原子级切削	多种	中	大	中	高	中	高,但未到达原子精度
基于电场的原子级缺陷重构	金属	—	—	强	低	中	低,原理验证
基于磁场的原子排布调控	金属	—	—	强	低	低	低,原理验证
原子层退火	金属/化合物晶体	—	—	强	低	高	低,原理验证
弹性发射加工	多种	中	大	强	低	低	高,但未到达原子精度
等离子体改性辅助湿法刻蚀	多种	高	大	强	高	中	中,技术可用
气体团簇离子束	多种	高	大	强	高	中	中,技术可用
纵波光场加工	多种	高	小	—	低	高	中,技术可用但效率低
聚焦电子束	多种	高	小	—	低	高	中,技术可用但效率低
介电击穿	介电薄膜	高	小	—	低	低	中,技术可用但效率低

效率的平衡本就困难,在原子精度制造中这一问题将更为显著,对于工艺以及装备的核心参数要求将更为严苛。

基于以上分析,我们建议对原子精度制造基础研究开展系统布局,从物理、化学、机械、材料等多学科交叉攻关,探索原子尺度能量与原子相互作用机制,为原子精度制造提供理论支撑,挖掘原子级制造的新原理新机制。针对四大方向,建议探索原子级切削新原理及新方法,从原子尺度切削机理及原子精度定位、对刀和能场辅助原子级切削机理三个方向开展探索,深入挖掘能场限域调控作用下的原子级材料去除机制和原子精度切削加工新方法,研发各类复杂构件表面原子精度加工的工艺和装备,实现航天、芯片等领域核心零件的原子级精度加工,赋能我国先进制程芯片制造跨代升级。建议开展基于分子动力学的物理场驱动原子重排机理研究,探索多元能场作用下原子微观排布的调控规律以及可控排布新方法,实现航空航天的关键零部件的内部损伤和晶体结构修复,通过调控原子排布逼近材料实现其核心性能的数量级提升,逼近理论极限性能。为强光锥镜表面原子级缺陷和损伤的修复提供切实可行的解决方案,数量级提升核心光学元件的抗辐照阈值,助力我国聚变点火和 MW 级强光武器研发。建议对原子层级表面能调控和弱化机制进行深入研究,形成能场/能束表面改性原子级切削加工新方法、能场辅助原子层磨削抛光新技术等多能量场对表面原子间键能弱化的新方法,将形状精度控制能力推至原子级,有望形成光刻物镜等芯片领域核心零部件原子精度加工的技术突破,赋能先进支撑芯片制造。在超光学衍射极限加工方面,建议针对时空调制的超衍射极限激光加工技术、电子束、离子束等高能束加工技术以及介电击穿纳米孔加工技术等作进一步研究,并积极探索多元能场耦合作用下的大规模一致性纳米孔制备新方法,突破超光学衍射极限的原子精度加工,赋能海水净化、DNA 和蛋白质测序等未来需求。此外,亟需探索大规模、批量化、一致性的原子精度制造新工艺,优先发展如原子层沉积/刻蚀这一类具备原子级制造能力且能快速实现产业应用推广的先进技术,通过原子精度制造核心产品快速展现原子级制造的优势,为我国的先进制造技术高质量发展提供源源不断的创新动力。

参 考 文 献

- [1] Levinson HJ. High-NA EUV lithography: current status and outlook for the future. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61: SD0803.
- [2] DARPA. Program seeks ability to assemble atom-sized pieces into practical products. (2015-12-29)/[2023-10-12]. <https://www.darpa.mil/news-events/2015-12-29>.
- [3] National Nanotechnology Initiative. DOE: Atomically Precise Manufacturing 2018, Phase I Release II. (2018-02-26)/[2023-10-12]. <https://www.nano.gov/node/1957>.
- [4] 宋凤麒,戴庆,张敏昊. 原子制造 未来在途. (2023-07-20)/[2023-10-12]. http://www.cas.ac.cn/kx/kpwz/202307/t20230720_4940195.shtml.
- [5] 日本科学技术振兴机构. 竞争性资助计划 A-Step. [2023-10-12]. <https://www.jst.go.jp/tt/EN/univ-ip/a-step.html>.
- [6] New Photonics21. Strategic Research and Innovation Agenda Released. [2023-10-12]. https://www.photonics21.org/news/2023/04/2023-04-26_photonics21-strategic-research-and-innovation-agenda-2023-2030.php.
- [7] Zhao HF, Zhu YC, Ye HY, et al. Atomic-scale structure dynamics of nanocrystals revealed by *in situ* and environmental transmission electron microscopy. *Advanced Materials*, 2023, 35(50): e2206911.
- [8] Schönemann L, Riemer O. Thermo-mechanical tool setting mechanism for ultra-precision milling with multiple cutting edges. *Precision Engineering*, 2019, 55: 171—178.
- [9] Bono MJ, Kroll JJ. Tool setting on a B-axis rotary table of a precision lathe. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(11): 1261—1267.
- [10] 周天丰,周佳,阮本帅等. 一种精确控制非透明工件厚度的加工方法. 中国, CN108788929B[P]. 2019-08-02.
- [11] Zhou TF, Zhang ZQ, Zhou J, et al. Study of quadrifoliate tool-setting method for diamond milling of microlens array. *Precision Engineering*, 2023, 83: 170—180.
- [12] Zhou J, Zhou TF, Wang TX, et al. Study on the tool setting for microlens array machining via swing cutting. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 636—644.
- [13] Damircheli M, Jung U, Wagner R. The effect of sample viscoelastic properties and cantilever amplitudes on maximum repulsive force, indentation, and energy dissipation in bimodal AFM. *Physica Scripta*, 2023, 98(3): 035708.
- [14] Wang JQ, Yan YD, Li C, et al. Material removal mechanism and subsurface characteristics of silicon 3D nanomilling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 242: 108020.

- [15] Kong XC, Cohen PH, Dong JY. Predictive modeling of feature dimension for tip-based nano machining process. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24: 338—345.
- [16] Gozen BA, Ozdoganlar OB. A rotating-tip-based mechanical nano-manufacturing process: nanomilling. *Nanoscale Research Letters*, 2010, 5(9): 1403—1407.
- [17] Park SS, Mostofa MG, Park CI, et al. Vibration assisted nano mechanical machining using AFM probe. *CIRP Annals*, 2014, 63(1): 537—540.
- [18] Wang JQ, Yan YD, Li ZH, et al. Towards understanding the machining mechanism of the atomic force microscopy tip-based nanomilling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 162: 103701.
- [19] Yan YD, Wang JQ, Geng YQ, et al. Material removal mechanism of multi-layer metal-film nanomilling. *CIRP Annals*, 2022, 71(1): 61—64.
- [20] Xie WK, Fang FZ. Cutting-based single atomic layer removal mechanism of monocrystalline copper: atomic sizing effect. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2019, 2(4): 241—252.
- [21] Xie WK, Fang FZ. Effect of tool edge radius on material removal mechanism in atomic and close-to-atomic scale cutting. *Applied Surface Science*, 2020, 504: 144451.
- [22] Zhao Y, Wei XL, Zhang Y, et al. Potential energy/volume evolution and atomic trajectories analysis of amorphous alloys in nanometric cutting process: a molecular dynamic simulation approach. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2016, 13(1): 752—760.
- [23] Utkin AV, Fomin VN. Determining the modulus of dilatation of various materials using the molecular-dynamics method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, 95(7): 1647—1651.
- [24] Pizzagalli L. First principles molecular dynamics calculations of the mechanical properties of endofullerenes containing noble gas atoms or small molecules. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2022, 24(16): 9449—9458.
- [25] Tang YP, Hosoi A, Morita Y, et al. Restoration of fatigue damage in stainless steel by high-density electric current. *International Journal of Fatigue*, 2013, 56: 69—74.
- [26] Zhao ST, Zhang RP, Chong Y, et al. Defect reconfiguration in a Ti-Al alloy via electroplasticity. *Nature Materials*, 2021, 20(4): 468—472.
- [27] Toku Y, Kizawa K, Kimura Y, et al. Atom rearrangement by cyclic electron “shaking”. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(12): 2300115.
- [28] Li MQ, Shen YD, Luo K, et al. Harnessing dislocation motion using an electric field. *Nature Materials*, 2023, 22(8): 958—963.
- [29] Eckert S, Nikrityuk PA, Willers B, et al. Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, 220(1): 123—137.
- [30] Molodov DA, Konijnenberg PJ. Grain boundary dynamics and selective grain growth in non-ferromagnetic metals in high magnetic fields. *International Journal of Materials Research*, 2022, 96(10): 1158—1165.
- [31] Luo J, Luo HY, Zhao TS, et al. Effect of magnetic field on dislocation morphology and precipitation behaviour in ultrafine-grained 7075 aluminium alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 93: 128—146.
- [32] Shih HY, Lee WH, Kao WC, et al. Low-temperature atomic layer epitaxy of AlN ultrathin films by layer-by-layer, *in situ* atomic layer annealing. *Scientific Reports*, 2017, 7: 39717.
- [33] Kao WC, Jhong FJ, Yin YT, et al. High-quality AlN epilayers prepared by atomic layer deposition and large-area rapid electron beam annealing. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 304: 127895.
- [34] Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Elastic emission machining. *Precision Engineering*, 1987, 9(3): 123—128.
- [35] Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Mechanism of atomic removal in elastic emission machining. *Precision Engineering*, 1988, 10(1): 24—28.
- [36] Kubota A, Mimura H, Inagaki K, et al. Effect of particle morphology on removal rate and surface topography in elastic emission machining. *Journal of the Electrochemical Society*, 2006, 153(9): G874.
- [37] Yamauchi K, Hirose K, Goto H, et al. First-principles simulations of removal process in EEM (Elastic Emission Machining). *Computational Materials Science*, 1999, 14(1/2/3/4): 232—235.
- [38] Kanaoka M, Nomura K, Yamauchi K, et al. Efficiency-enhanced elastic emission machining on the basis of processing mechanism//Proceedings of the 12th Euspen International Conference. 2012, 193196.
- [39] Mori Y, Yamamura K, Endo K, et al. Creation of perfect surfaces. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 275(1/2): 39—50.
- [40] Guo ML, Xu ZT, Yang L, et al. A comparison between ion irradiation assisted- and electron irradiation assisted-oxygen plasma treatment on modification of nanostructured carbon films. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 466: 129656.

- [41] Takeshi H, Minoru H, Masanori H, et al. A mechanical vibration assisted plasma etcher for etch rate improvement. *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*. Boston, MA; Springer US, 2002; 137—141.
- [42] Hao LF, Peng P, Yang F, et al. Study of structure-mechanical heterogeneity of polyacrylonitrile-based carbon fiber monofilament by plasma etching-assisted radius profiling. *Carbon*, 2017, 114: 317—323.
- [43] Dranczewski J, Fischer A, Tiwari P, et al. Plasma etching for fabrication of complex nanophotonic lasers from bonded InP semiconductor layers. *Micro and Nano Engineering*, 2023, 19: 100196.
- [44] Ou Y, Li CY, Qian JW, et al. Fabrication of hexagonal microstructure on gallium nitride films by wet etching assisted femtosecond laser ablation. *Optics Communications*, 2023, 528: 128952.
- [45] Silva F, Sussmann RS, Bénédic F, et al. Reactive ion etching of diamond using microwave assisted plasmas. *Diamond and Related Materials*, 2003, 12 (3/4/5/6/7): 369—373.
- [46] Lyu P, Lai M, Liu Z, et al. Atomic and close-to-atomic scale polishing of Lu_2O_3 by plasma-assisted etching. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 252: 108374.
- [47] Ren YP, Cheng L, Tu XC, et al. Precise preparation of quartz pendulous reed by using picosecond laser modification assisted wet etching. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109341.
- [48] Yamada I, Matsuo J, Toyoda N, et al. Materials processing by gas cluster ion beams. *Materials Science and Engineering; R: Reports*, 2001, 34(6): 231—295.
- [49] Toyoda N, Ogawa A. Atomic layer etching of Cu film using gas cluster ion beam. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(18): 184003.
- [50] Wang JS, Takeuchi K, Kataoka I, et al. Polishing diamond substrates using gas cluster ion beam (gcib) irradiation for the direct bonding to power devices. 2022 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). Sapporo, Japan. IEEE, 2022: 57—58.
- [51] Huang FM, Zheludev N, Chen YF, et al. Focusing of light by a nanohole array. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(9): 091119.
- [52] Huang FM, Zheludev NI. Super-resolution without evanescent waves. *Nano Letters*, 2009, 9(3): 1249—1254.
- [53] Zhang ZJ, Wang JY, Pu MB, et al. Broadband achromatic transmission-reflection-integrated metasurface based on frequency multiplexing and dispersion engineering. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(7): 2001736.
- [54] Lu XJ, Guo YH, Pu MB, et al. Broadband achromatic metasurfaces for sub-diffraction focusing in the visible. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5947—5958.
- [55] Fishman DA, Cirloganu CM, Webster S, et al. Sensitive mid-infrared detection in wide-bandgap semiconductors using extreme non-degenerate two-photon absorption. *Nature Photonics*, 2011, 5(9): 561—565.
- [56] 高源, 丁剑平, 王慧田. 多模态矢量光场的三维空域调控 (特邀). *光子学报*, 2022, 51(1): 11—44.
- [57] Wang HF, Shi LP, Lukyanchuk B, et al. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics. *Nature Photonics*, 2008, 2: 501—505.
- [58] Li ZQ, Allegre O, Li L. Realising high aspect ratio 10 nm feature size in laser materials processing in air at 800 nm wavelength in the far-field by creating a high purity longitudinal light field at focus. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 339.
- [59] Yuan ZS, Lei X, Wang CY. Controllable fabrication of solid state nanopores array by electron beam shrinking. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 159: 103623.
- [60] Zandbergen HW, van Duuren RJHA, Alkemade PFA, et al. Sculpting nanoelectrodes with a transmission electron beam for electrical and geometrical characterization of nanoparticles. *Nano Letters*, 2005, 5(3): 549—553.
- [61] Su C, Tripathi M, Yan QB, et al. Engineering single-atom dynamics with electron irradiation. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaav2252.
- [62] Kwok H, Briggs K, Tabard-Cossa V. Nanopore fabrication by controlled dielectric breakdown. *PLoS One*, 2014, 9(3): e92880.
- [63] He YH, Tsutsui M, Zhou Y, et al. Solid-state nanopore systems: from materials to applications. *NPG Asia Materials*, 2021, 13: 48.
- [64] Deng T, Li MW, Wang YF, et al. Development of solid-state nanopore fabrication technologies. *Science Bulletin*, 2015, 60(3): 304—319.

New Mechanisms and Methods for Atomic Precision Manufacturing

Zhenyu Zhang^{1* *} Lin Li² Yang Ju³ Yunfei Chen⁴ Jianfeng Xu⁵
Yongda Yan⁶ Feifei Xu⁷ Tianfeng Zhou⁸ Huigao Duan⁹ Zhiquan Huang^{10,11}
Kaichen Xu³ Wule Zhu³ Xiaoqiang Peng¹² Hui Deng¹³ Wei Si⁴
Ji Wang² Jinshi Wang¹⁴ Peng Lyu¹⁴ Junyuan Feng¹⁵

1. State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024
2. Research Centre for Laser Extreme Manufacturing, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201
3. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027
4. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189
5. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074
6. Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006
7. Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999
8. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081
9. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082
10. Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085
11. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024
12. School of Intelligent Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410003
13. Department of Mechanical and Energy Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055
14. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072
15. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018

Abstract At present, the performance requirements of high-performance equipment in national strategic areas such as aerospace, nuclear physics, microelectronics, optoelectronics, and semiconductors are becoming increasingly stringent. The manufacturing accuracy of core components must reach the atomic level. However, there is still a large gap between our country and developed countries' manufacturing accuracy of high-performance parts such as nuclear fusion ignition targets, high power laser optics, optical waveguide structures, and thin-walled brittle micro-resonators. It is urgent to study new mechanisms and methods for high-performance manufacturing with atomic precision. This article systematically sorts out the four major directions of atomic precision manufacturing assisted by energy fields, multi-energy field-assisted atom rearrangement, surface energy weakening atomic precision material removal, and atomic structure processing beyond optical diffraction limit, and introduces the research status of new principles and methods for atomic precision manufacturing in different application scenarios. For the key scientific problem of the mechanism of interatomic interaction and shape-performance tuning under multi-energy field coupling conditions, research suggestions are proposed in the four directions.

Keywords atomic precision manufacturing; atomic scale cutting; atom rearrangement; surface energy weakening processing; beyond optical diffraction limit processing technique

(责任编辑 刘敏 张强)

* Corresponding Author, Email: zzy@dlut.edu.cn