面向材料的超精密金刚石切削加工机理

张俊杰^{1*}, 张建国², 闫永达¹, 孙涛¹

1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074

* E-mail: zhjj505@gmail.com

收稿日期: 2021-08-29; 接受日期: 2021-11-01; 网络版发表日期: 2021-12-16

国家自然科学基金(批准号: 51405106, 51761135106)和国防基础科研核科学挑战专题(编号: TZ2018006-0201-02, TZ2018006-0205-02)资助项目

摘要 采用超精密单点金刚石切削加工技术制备超光滑表面在国防尖端和航空航天等领域具有重要应用. 当前缺乏对超精密加工机理的理解, 极大地制约着超精密加工技术的提高. 金刚石切削加工是一个刀具与材料高度耦合的过程, 工件材料的性能对加工结果具有重要影响. 本文研究了具有不同属性和微结构的典型材料超光滑表面的金刚石切削加工机理: (1) 研究了多晶金属铜金刚石切削加工中的非均质特性, 重点关注了晶界对表面创成的影响机制及其抑制策略; (2) 研究了单晶硅和单晶碳化硅金刚石切削加工中的脆塑转变机理, 重点关注了超声椭圆振动辅助切削加工技术对硬脆材料延性加工性能的提升; (3) 研究了反应烧结碳化硅和铝基碳化硅金刚石切削加工中的各相材料协同加工变形机制, 重点关注了振动辅助和切削路径对复合材料表面创成的影响规律. 本文的研究成果为不同材料超光滑表面的超精密金刚石切削加工创成提供了理论依据.

关键词 超精密加工, 金刚石切削, 加工机理, 超光滑表面, 脆塑转变

1 引言

超精密加工是一项重要的先进制造技术, 在国防、航空航天与民用等领域具有广泛应用, 已成为衡量国家制造技术水平的一项重要标志^[1,2]. 特别是在基于多学科综合交叉集成的原子或近原子尺度的制造“ACSM制造”中^[2,3], 超精密加工是其主要的发展技术之一. 其中, 超精密单点金刚石车削加工是一项重要的超精密加工技术, 具有高几何精度、高表面质量、高加工效率、低亚表面损伤、高自由度等优点^[4,5]. 例如, 通过金刚石切削加工制备的超光滑表面可以有效

地提高惯性约束核聚变精密物理实验精度, 提高特种材料在存储、运输与操作中的耐腐蚀性能, 提高碳化硅光学反射镜的反射率等. 超精密金刚石车削加工技术的发展目前受到加工理论、加工工艺及加工质量的测量与评定等诸多因素的制约. 其中, 缺乏对金刚石切削加工机理特别是表层形成机理的理解是制约超精密金刚石车削加工质量提高的一个重要因素, 迫切需要对金刚石切削加工基础理论开展系统而深入的研究, 据此开展工艺和加工装备创新, 提升超精密加工技术水平.

在金刚石切削加工过程中, 工件材料与具有纳米

引用格式: 张俊杰, 张建国, 闫永达, 等. 面向材料的超精密金刚石切削加工机理. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 854–870
Zhang J J, Zhang J G, Yan Y D, et al. Mechanisms of material-oriented ultraprecision diamond cutting (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 854–870, doi: 10.1360/SST-2021-0411

量级刃口锋利度的天然金刚石刀具在超精密加工机床上产生极高精度的相对运动来实现微纳米量级的微量材料去除, 从而获得具有极高形状精度、尺寸精度、表面完整性和极小表面粗糙度的加工表面. 在金刚石切削加工中, 金刚石刀具的刃口半径、工件材料的去除深度及工件材料微观结构特征尺寸均在相似数量级. 同时, 由于材料去除深度在数微米甚至亚微米量级, 弹性变形成为工件材料加工变形的一个重要形式, 受到工件材料的物理、化学和机械性能的影响. 因此, 金刚石切削加工是一个刀具与材料高度耦合的过程, 即刀具切削行为施加的应力主导工件材料变形行为, 而材料变形行为也影响切削刀具的受力和磨损等. 特别地, 工件材料性能对其金刚石切削加工变形过程具有极其重要的影响^[6]. 首先, 由于材料去除深度在数微米甚至亚微米量级, 在金刚石切削加工中工件材料是各向异性的, 其性能不仅与化学键(金属键、共价键、离子键和分子键)紧密相关, 还受到材料内部微观组织结构(点缺陷、位错、晶界和相界等)的影响. 其次, 在切削加工施加的热应力作用下, 金刚石切削加工过程中工件材料微观结构发生演变, 例如多晶金属材料内部微结构演变(如晶界迁移、部分金属材料)同时存在塑性与相变、硬脆材料具有延性和脆性去除两种加工方式等, 直接影响表/界面物性参数演化、刀具与工件之间的微观表/界面摩擦黏滑状态、热的产生及传递、制造缺陷产生和形态等. 最后, 在微观尺度下材料具有更高的表面体积比, 呈现出的尺寸效应、量子效应等直接影响金刚石切削加工中工件材料的微观变形及宏观加工结果(如加工力变化和表层形成等)与常规宏观加工过程存在显著不同. 因此, 深入理解工件材料性能及其在加工过程中产生的微观结构演变对金刚石切削加工的影响机制, 对于提高超精密加工技术水平、促进原子或近原子尺度的制造技术发展具有重要的理论意义与实用价值.

当前, 有限元仿真与分子动力学仿真因其可以低成本地提供正在进行的加工过程的材料变形、切屑形成、切削力变化、表面形成等微观细节, 被广泛应用于研究不同材料的超精密金刚石切削加工过程. 一方面, 在纳米机械加工的有限元仿真研究中, 工件材料被划分为有限个单元, 每一个单元内的工件材料被认为是连续的, 这些单元的化学物理性质、晶体结构、晶粒尺寸等可以根据真实情况进行设定, 工件材料的

长度尺度与加工过程的时间尺度均可以达到实验相同的量级, 但其描述材料加工变形行为受到网格大小的限制, 比较适合于定量分析微尺度下具有连续特性的机械加工过程. 另一方面, 在纳米机械加工的分子动力学仿真研究中, 工件材料由原子尺度晶胞组成, 其最小长度尺度为埃(10^{-10} m)量级, 原子运动遵循牛顿第二定律, 其积分步长由原子振动频率决定, 其最小时间尺度为飞秒(10^{-15} s)量级, 因此具有极高的时间精度和空间精度, 但其长度尺度与时间尺度均远小于实验量级, 比较适合于定性分析纳米尺度下的具有离散特性的机械加工过程. 此外, 分子动力学可以定量获得材料的本征属性(如杨氏模量、晶界能等)并将其作为输入参数嵌入到有限元仿真之中, 从而实现分子动力学仿真与有限元仿真这两种仿真方法的桥接. 因此, 采用多尺度仿真手段来深入理解工件材料的微观加工变形行为及其与宏观加工结果的关联, 对于加深对超精密金刚石切削加工机理的理解具有重要价值.

因此, 本文针对当前超精密金刚石切削加工基础理论的前沿与热点, 同时面向国家重大项目需求, 结合摩擦磨损、晶体塑性和微观力学等多学科知识, 采用仿真与实验手段研究了面向材料的超精密金刚石切削加工基础理论, 揭示了典型金属材料、单晶硬脆材料和复合硬脆材料的加工变形机理及其与表面创成的耦合机制, 并通过创新性的基础研究实现相关工艺创新、解决关键技术难题, 实现了金属、半导体和陶瓷材料超光滑表面的超精密金刚石切削加工成形.

2 多晶金属材料金刚石切削加工机理

2.1 多晶铜

多晶金属由多个单晶晶粒和连接晶粒的晶界组成, 其中单晶晶粒的尺寸大多服从对数正态分布^[7,8], 而晶体取向具有随机特性, 在特定情况下具有织构特性. 不同晶粒内部激活的位错滑移系与加工表面的角度不同, 并且位错滑移的空间也不同, 导致晶粒之间的加工变形行为存在短程各向异性特性, 影响加工表面质量的长程有序性^[9,10]. 多晶无氧铜是用于惯性约束核聚变精密物理实验的一种重要材料, 要求其加工表面具有极高的精度. 对单晶铜和多晶铜进行了金刚石切削加工实验. 图1所示的实验结果显示相对于多

晶铜, 单晶铜的切屑更连续、加工表面完整性更高. 特别是对于多晶铜, 加工表面的光学显微镜观测结果显示其切削加工表面存在明显的晶粒分布特性. 采用原子力显微镜对晶粒之间进行了局部观测, 结果显示相邻晶粒之间存在明显的晶界台阶. 这些晶界台阶的高度在数个纳米左右, 取决于相邻晶粒的晶体取向差和晶界特性, 极大地降低了加工表面的完整性^[11,12]. 因此, 研究晶界高度差的起源机制及其抑制策略, 对于采用金刚石切削加工制备多晶金属超光滑表面具有重要意义.

首先, 建立了基于晶体塑性的多晶铜金刚石切削加工的有限元仿真模型. 为了表征多晶铜的各向异性材料特性, 采用晶体塑性本构方程来描述多晶铜各晶粒的各向异性特性, 并通过编写Fortran隐式子程序将其嵌入到Abaqus/Implicit中. 晶体塑性是从微观晶体角度预测材料的弹塑性变形, 将多晶铜的塑性变形归结为位错滑移, 从而能够模拟晶粒变形中的各向异性行为. 本文中的多晶铜晶体塑性本构关系及其相关参数在文献[13]中进行了详细的描述. 开展了不同晶体取向的单晶铜玻式压头纳米压痕实验, 对获得的载荷-位移曲线、表面堆积形貌同时进行定量校核, 据此获

得了多晶铜晶体塑性本构方程的参数. 并采用Johnson-Cook损伤模型和单元删除功能来实现材料去除和切屑形成^[13,14]. 为了验证所创建的有限元模型的有效性, 一方面开展了扫描电子显微镜在线正交切削实验来观测切屑形貌^[15], 实验与仿真得到的切屑弯曲特性、切屑锯齿特性均吻合得较好, 如图2(a)和(b)所示. 另一方面采用横截面透射电子显微镜观察了切削引起的微观结构演变^[11,16], 实验与仿真均发现了沿着切削方向的靠近表层处产生了晶界迁移现象, 如图2(d)和(e)所示. 上述结果表明创建的多晶铜金刚石切削加工的晶体塑性有限元模型具有较高的精度.

其次, 揭示了多晶铜加工表面晶界台阶的形成机理. 开展了多晶铜金刚石切削加工的有限元仿真. 图3给出了相邻两个晶粒的切削结果, 表明切屑形貌特性(如厚度和弯曲程度)、切削力变化特性(如平均值和震荡幅度)均存在明显不同. 特别地, 图3显示最右侧晶粒的加工表面形貌(如表面高度和偏差幅值等)明显低于中间晶粒, 对应着图1实验中观察到的晶界台阶, 其高度差最大为4 nm, 与图1(e)中实验观察到的晶界高度差在相同数量级. 对切削过程进行了动态分析, 重点关注了不同晶粒内应力分布与位错密度的演变过程,

图1 (网络版彩图)单晶铜和多晶铜的金刚石切削加工表面对比^[11]. 单晶铜: (a) 加工表面光学照片, (b) 加工表面AFM照片, (c) 切屑形貌; 多晶铜: (d) 加工表面光学照片, (e) 加工表面AFM照片, (f) 切屑形貌

Figure 1 (Color online) Morphologies of single crystalline and polycrystalline copper after diamond cutting [11]. Single crystalline copper: (a) optical image; (b) AFM image; (c) chip profile; polycrystalline copper: (d) optical image; (e) AFM image; (f) chip profile.

图 2 (网络版彩图) (a) 多晶铜正交切削的晶体塑性有限元切削结果; (b) SEM原位切削; (c) 跨越晶界正交切削的SEM图片; (d) 切削区域晶界迁移的横截面TEM图片; (e) 切削区域晶界迁移的仿真图片^[11,13]

Figure 2 (Color online) (a) Crystal plasticity finite element simulation results of diamond cutting of polycrystalline copper; (b) image of *in-situ* SEM cutting; (c) SEM image of orthogonal cutting across grain boundary; (d) cross-sectional TEM image of grain boundary migration in cutting region; (e) simulation results of grain boundary migration in cutting region^[11,13].

发现晶界台阶的形成是由位错滑移和晶界变形为主的两向异性塑性变形行为引起的^[11,13]。

最后, 获得了多晶铜加工表面晶界台阶的抑制策略. (1) 有限元仿真研究了材料参数(如相邻晶粒的晶体取向差)和刀具参数(如刃口半径)对晶界台阶高度的影响规律^[11]. 结果表明, 晶体取向差越大, 形成的切屑越薄, 相邻晶粒间的晶界台阶高度明显减小, 表面粗糙度也减小. 刃口半径对切屑形貌的影响较小, 但对晶界高度差的影响尤为显著. 结果表明, 随着刃口半径的减小, 相邻晶粒间的晶界台阶高度明显减小, 表面粗糙度也减小. (2) 多晶铜的圆弧刃金刚石切削加工实验研究了切削工艺参数(如进给量、切削深度、切削速度)对晶界台阶高度的影响机制. 结果表明, 减小进给量和切削深度有利于减小未变形切屑厚度, 从而降低已加工表面粗糙度, 减小相邻晶粒间的晶界台阶高度. 根据上述有限元仿真揭示的加工参数影响规律, 得到了优化的材料因素、刀具参数以及切削工艺参数: 主轴转速2000 r/min, 进给量0.5 μm/r, 切削深度0.5 μm, 刀具圆弧半径1 μm, 刃口半径60 nm, 前角0°, 后角10°. 在

Precitech Nanoform 700超精密机床上使用上述参数进行了多晶铜端面车削, 对加工后的多晶铜超光滑表面采用Zygo白光干涉仪进行了表征, 其表面粗糙度为1 nm, 表明实现了多晶铜加工表面晶界台阶的抑制.

2.2 金属铈

金属铈是原子序数为58的一种镧系元素, 具有成本低、无放射性、无毒以及多种相态共存等特性, 是核能领域重要的模拟研究材料之一. 金属铈在周期表中处于f电子向定域态转变的位置, 可以以不同的价态稳定存在, 在高压高温环境下极易发生相变. 此外, 金属铈还具有良好的塑性^[17,18]. 因此, 金属铈材料在大应变变形过程中存在相变与塑性流动耦合, 导致金属铈在单点金刚石切削加工过程中的加工变形行为极为复杂, 呈现出强烈的非均向特性, 难以获得具有高完整性、低表面粗糙度、低亚表面损伤等超光滑加工表面. 因此, 研究金属铈的单点金刚石切削加工变形机理, 特别是相变和塑性流动耦合对其加工表面质量的影响规律, 对于获得特种金属材料超光滑加工表面具

图3 (网络版彩图)正交切削实验中多晶铜的各向异性加工变形^[13]. (a) 切屑形貌; (b) 切削力; (c) 表面形貌

Figure 3 (Color online) Anisotropic machining behavior of orthogonal cutting of polycrystalline copper ^[13]. (a) Chip profile; (b) cutting force; (c) profile of machined surface.

有重要的研究意义.

首先, 研究了金属钼金刚石切削加工机理. 基于嵌入原子势能函数和径向分布函数分析方法, 采用分子动力学仿真研究了金属钼各相的结构与机械性能, 发现金属钼的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变伴随着20%左右的体积变化. 采用分子动力学仿真研究了单晶钼、双晶钼、多晶钼的切削加工机理^[19,20]. 研究发现, 单晶钼的塑性变形由位错从工件表面形核并沿着 $\{111\}$ 滑移面运动而主导, 而切削区域热量的产生导致工件材料和切屑中均发生了 $\gamma \rightarrow \delta$ 相变. 不同相态之间的机械属性有很大差异, 导致切削加工结果的非均质性. 对于双晶钼切削加工, 位错与晶界的交互作用导致位错塞积的发生, 工件产生严重的加工硬化, 材料内部无相变发生. 多晶钼的切削加工变形由位错运动、晶界-位错相互作用主导, 并且这两种变形模式的相互作用受到晶粒尺寸的显著影响. 然而, 多晶钼工件内部也没有发生相变.

其次, 研究了加工参数对金属钼金刚石切削加工的影响规律. 上述分子动力学仿真结果显示位错滑移是金属钼金刚石切削加工的主要加工变形形式, 相变

极少, 因此可以采用有限元仿真去定量地研究加工参数的影响. 基于单轴拉伸试验获得了金属钼的Johnson-Cook本构模型参数, 建立了金属钼金刚石切削加工的三维有限元仿真模型. 通过有限元仿真系统地研究了不同类型加工工艺参数对其加工表面完整性(如表面残余应力和表面粗糙度)的影响规律, 如图4所示. 研究结果显示, 表面残余应力随切削深度、切削速度、刃口半径的增加而轻微增大, 随进给量的增加而明显增大, 但是随着刀具前角的增大而明显减小. 有限元仿真与实验结果均表明表面粗糙度 R_a 与切削速度成反比, 与切削深度成正比. 刀具刃口半径和前角对表面粗糙度的影响较小.

最后, 制备了金属钼超光滑加工表面. 使用超精密车床对金属钼进行不同加工参数下的超精密切削实验, 利用白光干涉仪对加工表面形貌进行表征, 并将实验结果与分子动力学仿真结果进行对比. 实验结果表明, 当切削深度小于 $2 \mu\text{m}$ 和大于 $15 \mu\text{m}$ 时, 所获得的加工表面质量较差; 而当切削深度位于 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 之间时, 所获得的加工表面质量较好. 分子动力学仿真结果表

图4 (网络版彩图)多晶铈金刚石切削加工的有限元仿真结果. (a)和(b) 不同进给量的切削状态; (c) 加工表面形貌; (d) 加工表面残余应力分布

Figure 4 (Color online) Finite element simulation results of diamond cutting of polycrystalline cerium. (a) and (b) Cutting configuration at different feeds; (c) morphology of machined surface; (d) residual stress of machined surface.

明, 当切深较小时, 工件受到负前角金刚石刀具的挤压, 材料以耕犁的方式被去除, 加工表面粗糙度大; 随着切深增加, 位错活动增加, 材料以塑性变形模式被去除, 加工表面粗糙度小; 随着切深的进一步增加, 位错活动剧烈导致材料加工硬化, 所获得的加工表面质量较差. 据此获得了优化的加工参数, 制备了表面粗糙度Ra为8 nm的金属铈超光滑加工表面, 如图5所示^[21].

3 单晶硬脆材料金刚石切削加工机理

3.1 单晶硅

单晶硅具有独特的化学、物理和机械性能, 已成为光电器件中被广泛使用的一种重要半导体材料^[22,23]. 单晶硅表面完整性(如表面几何形貌和亚表层损伤等)对硅基元件的性能具有重要影响. 然而, 单晶硅的硬脆特性导致其在机械加工中极易发生表面崩碎, 制约着加工表面质量的提高. 研究表明, 单晶硅在静水压力

作用下会产生相变, 其中金属Beta-Sn相和无定形相均可以促进材料的延性去除^[24]. 同时, 在极小载荷作用下单晶硅表现出相当的位错滑移主导的塑性. 特别是当切削厚度降低到纳米量级时, 单晶硅的材料去除由剪切转变为推挤去除机理主导^[25~29]. 因此, 探明单晶硅的脆塑转变机理并获得其临界切削深度, 是采用金刚石延性切削模式加工制备单晶硅超光滑表面的一个重要方面.

首先, 揭示了单晶硅金刚石切削加工中的脆塑转变特性. 建立了单晶硅金刚石切削加工的二维有限元仿真模型, 其中采用Drucker-Prager本构方程来描述单晶硅的弹塑性变形, 采用剪切损伤模型和单元删除功能来实现材料去除和切屑形成. 开展了单晶硅变切深金刚石沟槽切削加工的有限元仿真和实验, 其中仿真与实验中采用的变切深倾斜角度均为7°^[30]. 图6(a)给出了变切深沟槽切削加工的有限元仿真结果. 结果显示随着切削深度的逐渐增加, 单晶硅发生了弹性变

图5 (网络版彩图)金属铈金刚石切削加工实验^[21]. (a) 切削实验配置; (b) 切削样件质量

Figure 5 (Color online) Diamond cutting experiment of cerium [21]. (a) Configuration of cutting experiment; (b) quality of machined surface.

形、塑性变形、脆塑过渡和脆性变形。在塑性区域得到的加工表面质量较好, 加工表面平滑。随着切削深度增加, 在脆塑转变过渡区域加工表面质量开始恶化, 脆性断裂事件发生在加工表面。在脆性切削区域, 加工表面质量恶化更加严重, 更多裂纹萌生与扩展事件发生在加工表面。图6(b)给出了对应沟槽切削实验结果, 得到的表面形貌特性变化与图6(a)中有限元仿真结果一致。此外, 有限元仿真得到的脆塑转变临界深度为118 nm, 而实验得到的脆塑转变临界深度为121 nm, 两者吻合得较好。上述结果也表明所建立的有限元仿真模型具有较高的精度。

其次, 研究了椭圆振动辅助对单晶硅脆塑转变的影响。在普通切削时, 由于单晶硅脆塑转变的临界切深在120 nm左右, 对机床刚度和工件装夹提出了极高要求, 因此需要提高单晶硅的脆塑转变临界切深。开展了单晶硅金刚石普通切削加工和椭圆振动辅助切削加工实验, 并利用扫描电子显微镜SEM检测了加工表面质量^[31]。其中, 振动辅助切削加工采用切削方向的振幅为2 μm , 切深方向振幅为1 μm , 频率为41.6 kHz。对比了单晶硅在不同切削深度下普通切削和椭圆振动辅助切削得到的加工表面形貌, 如图7所示。实验结果显示, 对于不同切削深度, 普通切削得到的表面分布着大量凹坑和毛刺, 而椭圆振动辅助切削得到的表面凹坑数量显著减少。特别是在大切削深度下, 两种切削过程中单晶硅均发生了脆性去除, 然而椭圆振动辅助切

削得到的表面质量依然远远高于普通切削。实验结果显示, 由于刀具的椭圆振动可以有效地抑制工件材料内部横向裂纹扩展, 材料断裂由脆性解理转变为塑性撕裂, 单晶硅在椭圆振动辅助切削加工过程中的脆塑转变临界切深相比于普通切削提高了近12倍。上述研究结果为提升脆性材料的塑性加工性能提供了理论依据和方法指导, 特别是可以有效降低脆性材料加工对机床刚度的要求。

3.2 单晶立方碳化硅

立方碳化硅(3C-SiC)由于其高电子迁移率和饱和漂移速度, 优异抗氧化性、耐磨性和耐蚀性, 已成为纳米机电系统(NEMS)器件的一种重要工程材料^[32]。表面完整性(例如表面层特性和形貌)是影响NEMS器件的电气、光学和机械性能的一个重要因素, 纳米级表面粗糙度直接影响亚表层的原子间键合状态, 它与超高频下谐振梁的质量因子密切相关^[33]。因此, 为了促进3C-SiC在NEMS器件中的应用, 迫切要实现3C-SiC的超光滑表面加工。

首先, 研究了单晶3C-SiC塑性变形与相变机理。基于Vashishta多体势能函数, 采用分子动力学仿真研究了纳米压痕过程中单晶3C-SiC的弹塑性变形机理, 并综合径向分布函数和键角分布函数来辨别单晶3C-SiC内部缺陷种类, 重点分析了压痕诱导的无定型化相变及其与其他变形模式的相互作用。仿真结果显示在机

图 6 (网络版彩图)单晶硅变切深加工结果^[30]. (a) 加工表面形貌应力分布的仿真结果; (b) 加工表面形貌的实验结果

Figure 6 (Color online) Results of cutting with varying cutting depth of single crystalline silicon [30]. (a) Simulation results of stress distribution of machined surface; (b) experimental results of machined surface morphology.

图 7 (网络版彩图)不同切削深度下单晶硅普通切削和椭圆振动辅助切削得到的加工表面形貌^[31]

Figure 7 (Color online) Machined surface morphologies of single crystalline silicon under ordinary cutting and elliptical vibration-assisted cutting [31].

机械载荷作用下, 3C-SiC依次发生纯弹性变形、无定形相变主导的准弹性变形、位错雪崩引起的弹性-塑性变形转变. 3C-SiC的初始塑性由进一步的无定形相变和位错滑移共同主导. 并且, 由立方金刚石相到无定形相的结构转变远比由立方金刚石相到六方金刚石相的结构变更为明显. 此外, 单晶3C-SiC的晶体取向对其塑性变形和机械响应均有显著影响^[34].

其次, 研究了单晶3C-SiC的脆性断裂机理. 建立了单晶3C-SiC玻式压头纳米压痕的三维有限元仿真模

型, 其中3C-SiC的基础材料属性(如杨氏模量、硬度等)由上述分子动力学仿真结果获得. 特别地, 采用晶体塑性理论来描述由位错滑移主导的塑性变形, 采用内聚区域模型来描述裂纹萌生与扩展. 开展了不同压痕深度下3C-SiC玻式压头纳米压痕的有限元仿真与实验. 3C-SiC的晶体塑性模型参数根据105 nm压痕深度下的纳米压痕实验的载荷-位移曲线进行校准. 仿真与实验结果显示, 3C-SiC在105, 208 nm压痕深度时均发生了由位错滑移所主导的塑性变形, 而在500 nm压痕深度时发生了由裂纹萌生和扩展而引起的脆性断裂. 图8给出了500 nm压痕深度下的3C-SiC表面形貌, 有限元仿真与实验结果均显示压痕材料表面均观察到了四个半分形裂纹. 其中, 有限元仿真得到的裂纹4长度为 $2.66 \mu\text{m}$, 对应的实验值为 $2.32 \mu\text{m}$, 两者吻合得较好. 有限元仿真结果进一步揭示该半分形裂纹是由材料表面的径向裂纹与材料内部的中线裂纹合并而成的^[35].

最后, 研究了单晶3C-SiC金刚石切削加工机理. 开展了3C-SiC金刚石普通切削与椭圆振动辅助切削的分子动力学仿真, 结果如图9所示^[36]. 仿真结果显示在切削加工中, 3C-SiC的微观变形模式包括位错运动、相变和裂纹传播等, 并且其交互作用对加工表面完整性和加工力具有显著影响. 特别地, 椭圆振动辅助切削由于瞬态切削深度的变化以及金刚石刀具与工件之间的间歇性接触, 可以显著地抑制单晶3C-SiC的无定形

图 8 (网络版彩图)3C-SiC纳米压痕卸载阶段后的表面裂纹形态^[35]. (a) 晶体塑性有限元仿真; (b) 实验

Figure 8 (Color online) Morphology of surface cracks after unloading of nanoindentation of 3C-SiC [35]. (a) Crystal plasticity finite element simulation; (b) experiments.

图 9 (网络版彩图)单晶3C-SiC金刚石切削加工的分子动力学仿真结果^[36]. (a) 椭圆振动切削; (b) 普通切削

Figure 9 (Color online) Molecular dynamics simulation results of diamond cutting of 3C-SiC [36]. (a) Elliptical vibration-assisted cutting; (b) ordinary cutting.

相变以及裂纹萌生和扩展, 从而降低切削力和亚表面损伤层厚度. 因此, 上述研究结果表明采用椭圆振动辅助切削加工策略可以有效地抑制裂纹萌生和扩展, 从而提升单晶3C-SiC的延性模式加工性能.

4 复合硬脆材料金刚石切削加工机理

4.1 反应烧结碳化硅

反应烧结碳化硅由于其优异的化学、物理以及热机械性能, 已成为太空光学反射镜的首选材料^[37,38]. 加

工表面质量强烈地影响碳化硅基光学反射镜的反射性能. 然而, 由于碳化硅的本征硬脆特性, 采用常规加工方法所获得的加工表面质量较差. 除了离子注入表面改性外^[39,40], 振动辅助金刚石切削加工技术已被证实为获得脆性材料超光滑表面的一种有力手段^[31,41~43]. 然而反应烧结碳化硅包含碳化硅和硅两相材料, 其显著的性能差异导致两相材料的协同加工变形行为较差. 因此, 需要深入研究刀具椭圆振动对切削加工中碳化硅和硅的协同加工变形行为的影响机制.

首先, 建立了反应烧结碳化硅椭圆振动辅助切削

加工的有限元仿真模型. 对反应烧结碳化硅进行了环形抛光, 碳化硅和硅的体积分数分别为80%和20%, 图10(a)所示为抛光后表面的SEM图片, 可以看到硅颗粒具有多边形特性, 且其分布和大小均具有随机分布特性. 根据实验观察到的微观结构特性, 建立了如图10(b)所示的反应烧结碳化硅有限元仿真模型. 采用Drucker-Prager本构方程来描述碳化硅和硅的弹塑性变形, 采用剪切损伤模型和单元删除功能来实现材料去除和切屑形成.

其次, 研究了反应烧结碳化硅椭圆振动辅助切削加工机理. 开展了反应烧结碳化硅金刚石椭圆振动辅助切削加工的有限元仿真和实验. 图11给出了第一次振动循环过程的切削仿真结果, 显示了切削力的强烈变化源于刀具和两种材料的相互作用, 材料的去除模式包括颗粒破裂、基体撕裂和颗粒-基体剥离等. 在切削过程中刀具与硅颗粒的相对位置直接影响材料的去除行为和切削力的波动特性. 基于比切削能建立了反应烧结碳化硅椭圆振动辅助切削加工的脆塑转变判据, 该判据同时考虑了两相材料的机械性能和二维振动特性. 图12(a)显示通过比切削能计算得到反应烧结碳化硅椭圆振动辅助切削加工的脆塑转变深度在350~400 nm之间. 图12(b)为反应烧结碳化硅沟槽切削加工的实验结果, 可以看到随着切削深度的增加, 材料去除模式从塑性模式转变到脆性模式. 在塑性切削去除模式中碳化硅基体没有出现裂纹传播的现象, 并且表面质量较好. 在脆性切削模式中, 碳化硅基体发生了明显的脆性断裂和裂纹传播. 由实验得到的反应烧结碳化硅的脆塑转变临界深度值约为360 nm, 而对应有限元仿真值为350~400 nm, 实验和仿真吻合得较

好^[44]. 上述研究结果表明椭圆振动辅助手段可以有效提升RB-SiC脆塑转变临界深度至普通切削深度的8倍, 为获得RB-SiC超硬陶瓷材料的高质量加工表面提供了一种有效手段.

4.2 铝基碳化硅

碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiCp/Al)具有低密度、高比刚度、高抗疲劳性、高抗磨损性和高抗腐蚀性等优异的物理、化学和机械性能, 广泛应用于航空航天、电子封装和生物技术中. 加工表面完整性对SiCp/Al零件性能具有重要影响. 近年来, 切削加工也被用于制备SiCp/Al高质量加工表面^[45,46]. 然而, 脆性SiC颗粒大大降低了延性Al基体的变形行为, 导致SiCp/Al切削性能极低. 在单步切深为微米量级的超精密金刚石切削加工中, 通常采用多步切削工艺实现几十微米厚度的材料去除^[47,48]. 在SiCp/Al的多步切削加工过程中, 前一步切削过程中产生的残余应力对后续的材料去除产生强烈的影响, 例如显著的应力松弛对颗粒-基体界面强度产生影响, 进而影响刀具-颗粒之间的相互作用. 因此, 有必要探明多步金刚石切削加工中刀具-颗粒相互作用机理及其与加工表面创成的关联机制, 对于提升SiCp/Al的金刚石切削加工性能具有重要的指导作用.

首先, 建立了SiCp/Al金刚石正交切削加工的二维有限元仿真模型. 对体积分数为25%的SiCp/Al进行环形抛光, 得到表面粗糙度为63 nm. 图13(a)所示为抛光表面的SEM图片, 可以看到SiC颗粒的大小和分布均具有随机特性, 且颗粒形状为多边形. 根据SEM观测得到的微观几何结构特性, 利用随机吸附算法建立了

图 10 (网络版彩图)反应烧结碳化硅金刚石切削加工的有限元建模^[44]. (a) 抛光表面的SEM图片; (b)切削加工的有限元模型
Figure 10 (Color online) Finite element modeling of diamond cutting of reaction-bonded silicon carbide [44]. (a) SEM image of polished surface; (b) finite element model of cutting process.

图 11 (网络版彩图)反应烧结碳化硅振动辅助切削加工的有限元仿真结果^[44]. (a) 刀具轨迹和颗粒的相对位置; (b) 切削力与切削长度的变化关系; (c) 切削长度为0.14 μm 的工件应力分布; (d) 切削长度为0.23 μm 的工件应力分布

Figure 11 (Color online) Finite element simulation results of vibration-assisted cutting of reaction-bonded silicon carbide [44]. (a) Relative position between tool path and particle; (b) variation of cutting force with cutting length; (c) stress distribution of workpiece for a cutting length of 0.14 μm ; (d) stress distribution of workpiece for a cutting length of 0.23 μm .

图 12 (网络版彩图)反应烧结碳化硅椭圆振动辅助切削仿真和实验得到的脆塑转变深度^[44]. (a) 仿真值350~400 nm; (b) 实验值360 nm

Figure 12 (Color online) Simulation and experiment results of ductile-to-brittle transition depth of reaction-bonded silicon carbide under elliptical vibration cutting [44]. (a) Simulation value of 350~400 nm; (b) experimental value of 360 nm.

与实验一致的SiCp/Al工件模型, 其中SiC颗粒按大小所占百分比呈正态分布, 如图13(b)所示. 分别采用线弹性和Brittle Cracking模型来描述SiC颗粒的弹性变形和脆性断裂过程, 采用Johnson-Cook本构来描述Al基体的弹塑性变形过程.

其次, 研究了SiCp/Al金刚石切削加工机理. 开展了SiCp/Al金刚石切削加工的有限元仿真. 图13(b)显示在切削过程中, 有6个颗粒先后与刀具发生相互作用,

它们分布在切削路径的不同位置. 图14(a)绘出了切削力的变化曲线, 显示了刀具与SiC颗粒接触会导致切削力急剧上升, 穿过颗粒之后切削力则急剧下降. 图14(b)列出了切削后的加工表面形貌, 显示颗粒相对于切削路径的位置对刀具-颗粒相互作用具有重要影响. 刀具-颗粒接触位置位于颗粒下方时颗粒为整体去除并在表面发生耕犁作用, 此时加工表面形成较大尺寸的孔洞, 降低加工表面完整性; 位于颗粒中部时颗

图 13 (网络版彩图)SiCp/Al切削加工的有限元建模^[49]. (a) 抛光表面的SEM图片; (b) 金刚石正交切削加工的有限元模型

Figure 13 (Color online) Finite element modeling of SiCp/Al cutting^[49]. (a) SEM image of polished surface; (b) finite element model of orthogonal diamond cutting.

图 14 (网络版彩图)SiCp/Al正交切削的有限元仿真结果^[49]. (a) 切削力变化; (b) 加工表面形貌

Figure 14 (Color online) Finite element simulation result of orthogonal cutting of SiCp/Al^[49]. (a) Variation of cutting force; (b) morphology of machined surface.

粒产生断裂, 表面较为平整; 位于颗粒上方时颗粒随同Al基体完全去除, 可以得到光滑的表面。

最后, 研究了切削参数和材料参数对SiCp/Al切削加工表面质量的影响规律。在保证最终切削深度的前提下, 采用不同的切削深度进行了多步切削仿真与实验。图15^[49]所示的结果显示表面粗糙度随着切削步数的减少而增大, 表明采用多步切削工艺和小切削深度有利于提高SiCp/Al的加工表面质量, 这与有限元仿真得到的结果一致^[49]。进一步开展了有限元仿真, 研究了SiC整颗粒正态分布特性对SiCp/Al切削加工的影响。仿真结果表明, 在较大尺寸分布范围的切削加工过程中, SiCp/Al更容易获得较好的加工表面质量^[50]。上述研究结果表明应该尽量采用较小的切削深度、较大的颗粒尺寸分布, 为通过优化加工路径、优选材料参数提升SiCp/Al切削加工表面质量提供了技术依据。

4.3 PBX含能材料

高聚物黏结炸药(PBX)在外部刺激下发生氧化还原反应来释放大量化学能, 是一类重要的含能材料^[51]。

机械切削加工是PBX应用于工程领域的一种重要加工成形方法。一方面, 加工表面质量(如表面完整性、亚表面损伤和表面粗糙度等)对含能材料器件的可靠性和性能有很大的影响, 另一方面切削过程中的热应力是影响含能材料切削安全性的关键因素之一^[52]。因此, 通过机械切削加工实现含能材料的高表面质量极具挑战性。由于硬晶体颗粒与软聚合物黏结剂的物理和机械性能差异较大, 颗粒与黏结剂之间极低的协同变形行为导致含能材料的切削加工性能也较低。此外, PBX复杂的内部微观结构及其演变也会在加工过程中引起复杂的应力应变现象^[53,54]。因此, 深入理解含能材料的切削加工机理对于获得含能材料高质量加工表面具有重要意义, 也可以为设计和合成具有高切削性能的含能材料提供理论依据。

首先, 建立了基于HMX颗粒的PBX含能材料正交切削的有限元仿真模型, 如图16(a)所示。PBX工件由晶体颗粒、黏结剂和颗粒-黏结剂界面组成。工件尺寸为长度3 mm、高度1.5 mm。HMX晶体颗粒体积分数为90%、平均粒径为200 μm 。HMX晶体颗粒通过

图15 SiCp/Al复合材料多步切削结果^[49]。切削步数: (a) 5, (b) 2, (c) 1

Figure 15 Multi-step cutting results of SiCp/Al ^[49]. Cutting steps: (a) 5, (b) 2, (c) 1.

图16 (网络版彩图)含能材料PBX的正交切削有限元建模^[56]。(a) 有限元模型; (b) 内聚力单元; (c) 双线性traction-separation模型

Figure 16 (Color online) Finite element modeling of orthogonal cutting of energetic material PBX ^[56]. (a) Finite element model; (b) cohesive zone model; (c) bilinear traction-separation law.

图 17 (网络版彩图)含能材料PBX切削过程的有限元仿真结果^[56]. (a) 切削力变化; (b) 切削示意图; (c) 切削状态

Figure 17 (Color online) Finite element simulation results of cutting of energetic material PBX [56]. (a) Variation of cutting force; (b) illustration of cutting operation; (c) cutting configuration.

Voronoi算法创建,其形状和大小均具有随机分布特性. HMX晶体颗粒和HTPB黏结剂分别被设定为线弹性体和超弹性体. 利用图16(b)和(c)所示的内聚区模型(cohesive zone method)描述HMX晶体颗粒和HTPB黏结剂,以及颗粒-黏结剂界面的断裂行为^[55].

其次,研究了含能材料PBX的切削加工机理. 开展了PBX含能材料切削加工的有限元仿真,图17(a)绘制了切削过程中切削力随切削距离的变化曲线. 仿真结果显示,刀具与工件接触时,切削力先是急剧增大,然后由于颗粒-黏结剂界面的脱黏和晶体颗粒的断裂,切削力发生轻微波动. 在刀具施加的应力作用下,工件内部的HMX颗粒发生裂纹萌生和扩展,导致邻近晶体颗粒发生连续断裂变形. 特别是当颗粒位于切削路径上时,连接晶体颗粒的黏结剂也发生了破碎. 在切削过程中晶体的破坏形式有断裂、拉出、挤出和推出. 在切屑形成过程中,连续的裂纹萌生及扩展导致切削力急剧下降,当HMX颗粒完全破碎时切削力为零. 伴随着晶体颗粒和黏结剂的去除,形成的单个切屑块可以

包含一个或多个晶体颗粒. 同时,研究了切削深度对含能材料切削过程的影响规律. 仿真结果显示,随着切削深度的增加,晶体颗粒-黏结剂界面脱黏现象随之增加,导致切削力增加、加工表面的完整性降低、亚表面损伤增加. 此外,在不同的切削深度下颗粒呈现出不同的破坏模式,如大切深下观察到的晶体颗粒挤压变形和颗粒相对滑移等^[56]. 上述研究结果表明获得最佳加工表面质量的临界切削深度为0.4 mm,对于理解PBX含能材料的加工机理和提升其加工质量具有重要意义.

5 结论

(1) 超精密金刚石切削加工是一个刀具与材料高度耦合的过程,工件材料性能和微观组织结构特性对加工过程具有显著的影响;

(2) 多晶金属材料的晶粒非均质变形和晶界变形特性使其金刚石切削加工具有各向异性特性,形成的

晶界台阶降低了表面完整性. 可以通过调整工件材料微结构参数和刀具几何参数抑制晶界台阶现象;

(3) 探明脆塑转变机制并据此开展延性域金刚石切削加工, 可以实现硬脆材料超光滑表面制备. 通过

施加椭圆振动辅助可以显著提高硬脆材料的延性切削性能.

(4) 颗粒-基体-刀具之间的协同加工变形行为是调控复合硬脆材料金刚石切削加工性能的一项关键因素.

致谢 感谢中国天津大学房丰洲教授、徐宗伟副教授, 德国Ruhr-University Alexander Hartmaier教授, 英国帝国理工学院Esteban Busso教授, 中国工程物理研究院张海军博士、李国博士、帅茂兵博士、肖才伟博士, 中国扬州霞光光电有限公司刘海鹰女士等的合作研究; 感谢研究生王站峰、卢仕进、韩腊、赵梁、郑海冰、金铭同学等的研究工作.

参考文献

- 1 Wang X Y, Wu D, Liu C Y. Overview of precision machining and ultra-precision machining technology (in Chinese). *Chin Mech Eng*, 1999, 10: 570–576 [王先逵, 吴丹, 刘成颖. 精密加工和超精密加工技术综述. *中国机械工程*, 1999, 10: 570–576]
- 2 Fang F Z. Atomic and close-to-atomic scale manufacturing: Perspectives and measures. *Int J Extrem Manuf*, 2020, 2: 030201
- 3 Fang F Z. Atomic and close-to-atomic scale manufacturing—A trend in manufacturing development. *Front Mech Eng*, 2016, 11: 325–327
- 4 Morris J C, Callahan D L, Kulik J, et al. Origins of the ductile regime in single-point diamond turning of semiconductors. *J Am Ceramic Soc*, 1995, 78: 2015–2020
- 5 Brinksmeier E, Gläbe R, Osmer J. Ultra-precision diamond cutting of steel molds. *CIRP Ann*, 2006, 55: 551–554
- 6 Fang F Z, Xu F F. Recent advances in micro/nano-cutting: Effect of tool edge and material properties. *Nanomanuf Metrol*, 2018, 1: 4–31
- 7 Fátima Vaz M, Fortes M A. Grain size distribution: The lognormal and the gamma distribution functions. *Scripta Metall*, 1988, 22: 35–40
- 8 Feltham P. Grain growth in metals. *Acta Metall*, 1957, 5: 97–105
- 9 Brinksmeier E, Preuss W, Riemer O, et al. Cutting forces, tool wear and surface finish in high speed diamond machining. *Precision Eng*, 2017, 49: 293–304
- 10 Wang Z F, Sun T, Zhang H J, et al. The interaction between grain boundary and tool geometry in nanocutting of a bi-crystal copper. *Int J Extrem Manuf*, 2019, 1: 045001
- 11 Wang Z F, Zhang J J, Zhang J G, et al. Towards an understanding of grain boundary step in diamond cutting of polycrystalline copper. *J Mater Process Tech*, 2019, 276: 116400
- 12 Wang Z F, Zhang J J, Li G, et al. Anisotropy-related machining characteristics in ultra-precision diamond cutting of crystalline copper. *Nanomanuf Metrol*, 2020, 3: 123–132
- 13 Wang Z F, Zhang J J, Xu Z W, et al. Crystal plasticity finite element modeling and simulation of diamond cutting of polycrystalline copper. *J Manuf Process*, 2019, 38: 187–195
- 14 Wang Z F, Zhang J J, Hassan H, et al. Coupled effect of crystallographic orientation and indenter geometry on nanoindentation of single crystalline copper. *Int J Mech Sci*, 2018, 148: 531–539
- 15 Fang F Z, Liu B, Xu Z W. Nanometric cutting in a scanning electron microscope. *Precision Eng*, 2015, 41: 145–152
- 16 Wang Z F, Zhang J J, Xu Z W, et al. Crystal anisotropy-dependent shear angle variation in orthogonal cutting of single crystalline copper. *Precision Eng*, 2020, 63: 41–48
- 17 Marra J C, Cozzi A D, Pierce R A, et al. Cerium as a surrogate in the plutonium immobilized form. In: *Environmental Issues and Waste Management Technologies in the Ceramic and Nuclear Industries VII*. Westerville: The American Ceramic Society, 2006, 132: 381–388
- 18 Luo L Z, Wang X L, Fu X G. Stability of surface oxides on cerium metal (in Chinese). *J Nucl Radiochem Sci*, 2007, 29: 75–79 [罗丽珠, 汪小琳, 伏晓国. 金属Ce表面氧化物的真空稳定性. *核化学与放射化学*, 2007, 29: 75–79]
- 19 Zhang J J, Zheng H B, Shuai M B, et al. Molecular dynamics modeling and simulation of diamond cutting of cerium. *Nanoscale Res Lett*, 2017, 12: 464
- 20 Li Y, Shuai M B, Zhang J J, et al. Molecular dynamics investigation of residual stress and surface roughness of cerium under diamond cutting.

- [Micromachines](#), 2018, 9: 386
- 21 Zhang J J, Shuai M B, Zheng H B, et al. Atomistic and experimental investigation of the effect of depth of cut on diamond cutting of cerium. [Micromachines](#), 2018, 9: 26
 - 22 Chavoshi S Z, Goel S, Luo X C. Influence of temperature on the anisotropic cutting behaviour of single crystal silicon: A molecular dynamics simulation investigation. [J Manuf Process](#), 2016, 23: 201–210
 - 23 Chen Y L, Cai Y D, Shimizu Y, et al. Ductile cutting of silicon microstructures with surface inclination measurement and compensation by using a force sensor integrated single point diamond tool. [J Micromech Microeng](#), 2016, 26: 025002
 - 24 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
 - 25 Wang J S, Zhang X D, Fang F Z, et al. Study on nano-cutting of brittle material by molecular dynamics using dynamic modeling. [Comput Mater Sci](#), 2020, 183: 109851
 - 26 Wang J S, Zhang X D, Fang F Z, et al. A numerical study on the material removal and phase transformation in the nanometric cutting of silicon. [Appl Surf Sci](#), 2018, 455: 608–615
 - 27 Fang F Z, Chen Y H, Zhang X D, et al. Nanometric cutting of single crystal silicon surfaces modified by ion implantation. [CIRP Ann](#), 2011, 60: 527–530
 - 28 Fang F Z, Wu H, Zhou W, et al. A study on mechanism of nano-cutting single crystal silicon. [J Mater Processing Tech](#), 2007, 184: 407–410
 - 29 Fang F Z, Venkatesh V C. Diamond cutting of silicon with nanometric finish. [CIRP Ann](#), 1998, 47: 45–49
 - 30 Zhang J J, Han L, Zhang J G, et al. Finite element analysis of the effect of tool rake angle on brittle-to-ductile transition in diamond cutting of silicon. [Int J Adv Manuf Technol](#), 2019, 104: 881–891
 - 31 Zhang J G, Zhang J J, Cui T, et al. Sculpturing of single crystal silicon microstructures by elliptical vibration cutting. [J Manuf Process](#), 2017, 29: 389–398
 - 32 Moon H S, Choi D, Spearing S M. Development of Si-SiC hybrid structures for elevated temperature micro-turbomachinery. [J Microelectromech Syst](#), 2004, 13: 676–687
 - 33 Yoon H S, Park B, Jun S C. Surface roughness effects on the frequency tuning performance of a nanoelectromechanical resonator. [Nanoscale Res Lett](#), 2013, 8: 270
 - 34 Zhao L, Alam M, Zhang J J, et al. Amorphization-governed elasto-plastic deformation under nanoindentation in cubic (3C) silicon carbide. [Ceramics Int](#), 2020, 46: 12470–12479
 - 35 Zhao L, Zhang J J, Pfetzinger J, et al. Depth-sensing ductile and brittle deformation in 3C-SiC under Berkovich nanoindentation. [Mater Des](#), 2021, 197: 109223
 - 36 Zhao L, Zhang J J, Zhang J G, et al. Atomistic investigation of machinability of monocrystalline 3C-SiC in elliptical vibration-assisted diamond cutting. [Ceramics Int](#), 2021, 47: 2358–2366
 - 37 Sein E, Toulemon Y, Safa F, et al. A Phi 3.5 m diameter SiC telescope for HERSHEL mission. In: *Proceedings of SPIE*. Waikoloa, 2003, 4850: 606–618
 - 38 Bougoin M, Lavenac J. From Herschel to Gaia: 3-meter class SiC space optics. In: *Proceedings of SPIE*. San Diego, 2011, 8126: 81260V
 - 39 Wang J S, Zhang X D, Fang F Z, et al. Diamond cutting of micro-structure array on brittle material assisted by multi-ion implantation. [Int J Machine Tools Manufacture](#), 2019, 137: 58–66
 - 40 Wang J S, Chen R T, Zhang X D, et al. Study on machinability of silicon irradiated by swift ions. [Precision Eng](#), 2018, 51: 577–581
 - 41 Zhang J G, Suzuki N, Shamoto E. Advanced applications of elliptical vibration cutting in micro/nanomachining of difficult-to-cut materials. In: *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining*. Singapore: Springer, 2019, 77: 167–200
 - 42 Shamoto E, Suzuki N. Development of elliptical vibration cutting technology and its application to ultraprecision/micro machining of hard/brittle materials. [Adv Mater Res](#), 2009, 69-70: 133–137
 - 43 Wang J S, Fang F Z, Yan G P, et al. Study on diamond cutting of ion implanted tungsten carbide with and without ultrasonic vibration. [Nanomanuf Metrol](#), 2019, 2: 177–185
 - 44 Zhang J J, Han L, Zhang J G, et al. Brittle-to-ductile transition in elliptical vibration-assisted diamond cutting of reaction-bonded silicon carbide. [J Manuf Process](#), 2019, 45: 670–681
 - 45 Su X F, Chen H R, Kennedy D, et al. Effects of interphase strength on the damage modes and mechanical behaviour of metal-matrix composites.

- Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 1999, 30: 257–266
- 46 Ge Y F, Xu J H, Yang H, et al. Workpiece surface quality when ultra-precision turning of SiCp/Al composites. *J Mater Process Tech*, 2008, 203: 166–175
 - 47 Zheng W, Wang Y J, Zhou M, et al. Material deformation and removal mechanism of SiCp/Al composites in ultrasonic vibration assisted scratch test. *Ceramics Int*, 2018, 44: 15133–15144
 - 48 Hou G M, Li A H, Song X H, et al. Effect of cutting parameters on surface quality in multi-step turning of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, 98: 1355–1365
 - 49 Lu S J, Zhang J J, Li Z Q, et al. Cutting path-dependent machinability of SiCp/Al composite under multi-step ultra-precision diamond cutting. *Chin J Aeronautics*, 2021, 34: 241–252
 - 50 Lu S J, Li Z Q, Zhang J J, et al. Finite element investigation of the influence of SiC particle distribution on diamond cutting of SiCp/Al composites. *Nanomanuf Metrol*, 2020, 3: 251–259
 - 51 Zheng Z Y, Zhao J J. Unreacted equation of states of typical energetic materials under static compression: A review. *Chin Phys B*, 2016, 25: 076202
 - 52 Wen M, Liu G, Gu J F, et al. Dislocation evolution in titanium during surface severe plastic deformation. *Appl Surf Sci*, 2009, 255: 6097–6102
 - 53 Ye S J, Tonokura K, Koshi M. Energy transfer rates and impact sensitivities of crystalline explosives. *Combust Flame*, 2003, 132: 240–246
 - 54 Mas E M, Clements B E, George D C. Direct numerical simulations of PBX 9501. In: AIP Conference Proceedings. Golden, 2004, 706: 389–392
 - 55 Zhai J, Zhou M. Finite element analysis of micromechanical failure modes in a heterogeneous ceramic material system. *Int J Fract*, 2000, 101: 161–180
 - 56 Huang J H, Lu S J, Xie F Y, et al. Finite element analysis of synergetic deformation in precision cutting of polymer bonded explosive. *Mater Des*, 2020, 188: 108471

Mechanisms of material-oriented ultraprecision diamond cutting

ZHANG JunJie¹, ZHANG JianGuo², YAN YongDa¹ & SUN Tao¹

¹ School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

² School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

The fabrication of ultrasmooth surfaces by ultraprecision single-point diamond cutting has important applications in the cutting-edge fields of defense and aerospace. The promotion of the machining capability of diamond cutting has been severely impeded by the lack of a fundamental understanding of the underlying machining mechanisms. While diamond cutting is a highly coupled process between the cutting tool and the workpiece material, the workpiece material properties have a substantial impact on the machining process. This paper presents the mechanisms of diamond cutting of typical materials with different properties and microstructures. First, the heterogeneous machining mechanisms in the diamond cutting of polycrystalline copper are studied, with an emphasis on the effect of grain boundaries on the surface formation and the suppression strategy of the grain boundary surface step. Second, the brittle-to-ductile transition mechanisms in the diamond cutting of single-crystal silicon and single-crystal silicon carbide are investigated, with an emphasis on the improvement of the machinability of hard, brittle materials by employing the ultrasonic elliptical vibration-assisted cutting technology. Third, the cooperative deformation mechanisms of individual phases in the diamond cutting of reaction-bonded silicon carbide and silicon carbide reinforced-aluminum metal matrix composite are studied, with an emphasis on the influence of vibration assistance and cutting path on the surface formation. The findings reported herein provide a theoretical basis for the fabrication of the ultrasmooth surfaces of different materials using the ultraprecision diamond cutting technique.

ultraprecision machining, diamond cutting, machining mechanisms, ultrasmooth surface, brittle-to-ductile transition

doi: [10.1360/SST-2021-0411](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0411)