纳米切削机理及其研究进展

房丰洲^{①②③*}, 赖敏^{①③}

① 精密测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学), 天津 300072;

② 天津市微纳制造技术工程中心, 天津 300072;

③ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

* E-mail: fzfang@tju.edu.cn

收稿日期: 2014-06-16; 接受日期: 2014-08-19

国家自然科学基金(批准号: 90923038)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号: 2011CB706700)和国家外专局引智计划(111 计划)(编号: B07014)资助项目

摘要 纳米切削技术具有广阔的应用前景, 是纳米精度加工, 尤其是纳米精度复杂面型加工的重要手段, 对整个先进制造业的发展起着重要的支撑作用. 建立完整成熟的纳米切削基础理论进而发展高效率、低损伤的可控纳米切削技术是未来先进制造业发展的迫切需求. 本文从纳米切削机理研究的常用手段、纳米切削模型、切削极限以及典型材料纳米切削理论及其关键技术等方面, 综述了该领域的国内外研究现状及主要成果, 并简要介绍了本项目组所开展的相关研究工作. 最后对纳米切削机理研究存在的挑战进行了总结和展望.

关键词

纳米切削
切削机理
纳米精度制造
纳米制造

1 概述

纳米技术涵盖纳米材料、纳米加工和机械、纳米生物与医药、纳米电子与器件等方向, 已成为各国家高技术竞争的制高点之一. 而纳米制造是支撑纳米科技成果走向应用的重要的基础^[1,2]. 纳米制造包括纳米尺度制造、纳米精度制造和跨尺度制造^[3], 其中, 纳米切削技术是纳米精度复杂面型加工的重要手段, 对整个纳米精度制造的发展起着重要的支撑作用^[2].

纳米切削技术应用于复杂形面加工前景广阔. 例如, 光学自由曲面器件可有效减少系统体积和元件数量, 提高光学成像质量和满足特殊照明需求, 因而成为了光学元件的重要发展趋势. 相比于传统加工方式以及其他微纳加工技术, 纳米切削的最大优势在于: 可直接加工出具有纳米级表面粗糙度的复杂面型, 因此是实现光学自由曲面加工的最有效的

方式. 然而, 传统的切削加工理论主要建立在连续介质力学基础上, 当切削加工量控制在纳米级甚至更小, 由于进入了纳观领域, 去除的材料对象已变为具有分立、离散性质的数层或数百层分子原子, 进而会出现许多新的物理现象. 纳米切削所涉及的理论已远远超出了常规切削理论和技术范畴, 需要更多地依赖于新的学科领域的发展和基础理论的建立. 由于其研究对象的特殊性, 纳米切削的理论发展需要和其他基础学科(如物理、力学、材料科学等)的前沿发展成果紧密地结合在一起, 形成一门多学科交叉的理论体系, 进而指导实际纳米级切削加工技术的发展.

由于纳米切削过程的高速瞬态过程不易表征和材料原子级去除的物理机制还不明确, 在世界范围内还没有形成成熟的纳米切削理论, 严重制约了高效率、低损伤的可控纳米切削技术的发展. 作者认为,

引用格式: 房丰洲, 赖敏. 纳米切削机理及其研究进展. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1052–1070

Fang F Z, Lai M. Development of nanometric cutting mechanism (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1052–1070, doi: 10.1360/N092014-00217

目前纳米切削机理研究的内容主要包括以下三个方面: (1) 1881 年 Mallock 提出材料剪切去除模型之后, 切削加工领域一直在使用该理论对材料去除方式进行分析 and 指导. 但大量研究表明, 在纳米切削过程中, 由于尺寸效应和刃口效应的存在, 剪切理论已不能完整解释纳米级表面的形成过程. 建立纳米尺度下材料切削去除模型和理论是相关研究人员的重要研究方向; (2) 每一项技术的发展都需要探索其适用的范围. 纳米切削技术的核心是要实现可控的稳定去除加工, 因此, 有必要探索切削极限; (3) 根据应用领域的不同, 纳米切削的材料对象非常广泛, 这些材料的宏观和微观性质均存在着很大的差异, 因而, 其变形去除机制以及刀具与材料之间的相互作用机制也存在着较大的差异. 因此, 需要针对不同种类材料研究其纳米切削材料变形去除机制. 在下部分内容中, 作者将对以上几个方面的研究进展进行详细阐述.

2 纳米切削机理研究的常用方法

目前, 国内外研究纳米切削机理的方法主要有基于分子动力学的仿真方法、材料加工表面测试表征、基于扫描探针显微镜的纳米加工实验以及超精密切削加工等. 在研究过程中, 可能会根据实际情况采用多种方式结合相互统一和验证进行理论研究.

2.1 基于分子动力学的仿真方法

当切削量控制在几个或者几十个纳米量级时, 对加工设备的精度、运动控制的稳定性、环境条件以及刀具状态等各方面的要求极其苛刻. 同时, 对测试观察仪器的功能也提出了很高的要求. 在现有的技术设备条件下, 要进行满足研究要求的纳米加工实验并能有效地测试分析加工过程是耗时耗力且难以实现的. 基于分子动力学的仿真研究方式则为纳米切削机理的研究者们提供了一种便利. 所谓分子动力学仿真, 即用计算机模拟原子的运动过程, 从而可以计算系统的结构和性质, 其中每一个原子被视为在全部其它原子核和电子所提供的势场作用下按牛顿定律运动^[4,5]. 该方法在 20 世纪 80 年代末首先被美国的劳伦斯国家实验室应用于单晶铜微摩擦和纳米切削的机理研究^[6,7]. 在随后的 90 年代, 日本的 Shimada 等人^[8-11]、Inamura 等人^[12]连续发表了多篇采

用分子动力学模拟研究纳米切削机理的文章, 有效推动和扩展了分子动力学在纳米切削加工领域的应用.

图 1 是利用分子动力学仿真软件建立的典型的单晶材料三维纳米切削模型^[13]. 工件原子分为牛顿层(刀具切削作用区)、恒温层(保持工件整体温度恒定, 模拟温度耗散过程)以及边界层(固定原子). 其中, 牛顿层表面的数层原子设定为不同颜色是为了便于直观地观察纳米切削过程中切削区域每层原子的运动状态, 从而获得纳米切削过程中材料流动变形方式. 在预先所提供的经验半经验的势场环境中, 使刀具在设计切削深度上按照一定的速度切削工件, 在每一个时间间隔计算此时刀具原子和工件原子的位置、速度等信息, 并实时输出, 便可以得到每一时刻的材料变形以及刀具工件间相互作用的状态. 同时, 根据过程中实时计算得到参数, 通过后期数据处理, 也可以分析监测工件材料及刀具在切削过程中的性质参数的变化, 例如切削热^[14]、切削力^[15]、应力分布^[15,16]、位错运动^[17]、结构相变^[18]、参数与材料切削状态的关系^[19]等等.

由于分子动力学模拟的时间尺度和空间尺度的限制, 近年来发展出了多尺度的模拟方法, 可以有效地扩大系统的尺寸规模, 以期使仿真状态及结果与实际加工更接近. 同时, 纳米切削过程本身就是跨多个尺度的研究领域, 迫切需要从宏观、微观以及纳观多角度揭示其内在机制, 而多尺度的模拟方式为该问题的研究提供了一种可行方案.

多尺度模拟的基本思想就是将原子区域和连续介质区域通过一定的方式耦合起来, 在纳米切削仿真过程中既能得到材料原子级别的精确变形细节, 又能高效地获得更大区域变形信息, 如图 2 所示. 一般地, 耦合区域又可分为“握手区” B^H 和“填充区” B^P , 该区域的尺寸和性质取决于不同的耦合策略^[20]. 根

图 1 (网络版彩图)单晶锆三维分子动力学纳米切削模型^[13]

图2 一般多尺度模型的耦合界面示意^[20]

据重叠区域的耦合策略的不同,发展出了多种多尺度模拟方法.例如,Zhu等人^[21,22]基于HSM(hybrid simulation method)建立了耦合分子动力学和有限元的纳米切削三维多尺度模型,研究了单晶铜和单晶硅纳米切削中的材料变形机理;Pen等人^[23]、Sun等人^[24]、赵晟和江五贵^[25]采用准连续介质方法实现了纳米切削过程的多尺度模拟;梁迎春等人^[26]采用桥域多尺度的方法研究纳米切削过程.目前采用多尺度模拟方法研究纳米切削过程仍处于初级阶段,还需要进一步的探索和发展.

2.2 材料加工表面的测试表征

在纳米切削中,被加工材料的去除及损伤层特性是影响纳米切削表面完整性的重要因素,是验证纳米切削分析与研究的有效方法.因此,需要对被加工材料的表面亚表面变形机制以及损伤状况进行测试与表征.

对于加工表面微观三维形貌,一般采用光学显微镜诸如超景深光学显微镜、激光共聚焦扫描显微镜、白光干涉仪等^[27].当需要清晰的纳米级甚至原子级的形貌观察,例如表面微裂纹以及纳米切削的切屑形态等,则需要求助于扫描电子显微镜(SEM)或原子力显微镜(AFM)^[28,29].为获得纳米切削表面亚表面的材料晶体损伤、结构相变等原子级别的信息,常采用透射电子显微镜(TEM)表征^[27,30,31].透射电子显微镜观察需要提前进行特殊而严格的制样:将纳米切削表面的横断面制成厚度为约100~200 nm的薄片,才有可能观察到表面亚表面的材料结构变化,如果

进行高分辨率的原子级别的观察,还需将横断面减薄到数十个纳米,这一过程对仪器和操作人员提出了很高的要求.此外,在研究过程中,需要测试某些材料的纳米机械性能,纳米压痕测试成为了一种有效的方式.我们不仅可以从中获得材料的纳米力学性能参数^[31],还能根据载荷-位移曲线获得某些材料在机械应力作用下的相变证据^[31,32].

拉曼光谱是一种无损、快速检测分子结构及分子间相互作用的表征方法,因此,常用于材料相变和残余应力的测试中.在一些半导体晶体(如单晶硅、单晶锗)的纳米切削过程中,由于机械压应力而产生了材料的晶体结构相变,采用拉曼光谱表征即可获得相变结构的信息以及加工表面残余应力状态^[27~29,31].通过建立相关计算模型以及与透射电子显微镜(TEM)测试结果对比标定,还可将拉曼光谱表征从定性测试扩展到定量半定量的检测.Yan等人^[33]提出了基于显微拉曼光谱的单晶硅纳米切削表面非晶层厚度测定的模型,获得了单晶硅基于拉曼散射强度比的非晶层厚度计算公式.此外,由于其便携、无需特殊处理、无损、快速的特点,拉曼光谱还有望在线表征材料纳米切削过程中的结构变化以及切屑形成的研究中展现广阔的应用前景.图3为各种检测方法对纳米切削表面进行的表征.

2.3 基于扫描探针显微镜的纳米加工实验

扫描探针显微镜(SPM)的主要用途是测量物质表面三维微观形貌.以原子力显微镜(AFM)为例,其独特的驱动原理和机械设计使得AFM拥有一个能产生原子量级的空间运动机构.如果通过控制探针与材料表面之间的作用,就可以在纳米级甚至原子级范围内改变材料表面的结构,从而将其应用扩展到纳米加工领域^[34,35].图4是基于AFM的纳米加工系统原理图.目前,基于AFM微探针机械去除加工法主要包括两种方式:1)采用弹性常数为10~100 N/m的硅或者氮化硅悬臂梁,探针半径10~30 nm,这种探针可以在较软的金属、聚合物、单分子膜等材料表面加工纳米结构;2)采用端部粘有金刚石针尖的不锈钢悬臂在样品表面进行加工,不锈钢悬臂梁的弹性系数可达100~300 N/m,针尖端部半径30~50 nm,因而这种悬臂式可加工的材料范围很广^[35].

由于分子动力学模拟只是一种基于经验半经验势函数的数值计算,因此其所采用的切削工艺参数

图 3 (网络版彩图) (a) 硅斜切表面的光学显微镜观察^[27]; (b) 碳化硅切屑的 SEM 观察^[28]; (c) 硅车削表面的 AFM 观察^[29]; (d) 硅切削表面的 TEM 截面观察^[27]; (e) Ge 薄膜纳米压痕载荷-位移曲线^[31]; (f) 硅切削前后的拉曼光谱^[29]

图 4 基于 AFM 的纳米加工系统原理图^[35]

以及加工性能数值并不能与实际加工完全对应。而基于 AFM 的微机械加工系统可以真实地再现实际纳米切削加工中的部分工艺参数,例如切削速度、切削进给量、切削载荷,甚至可以通过修饰针尖形状来模拟不同的刀具形状及刃口半径,因此,基于 AFM 的纳米加工实验在研究探索纳米切削过程中工艺参数对材料切削状态及表面质量的影响方面有着重要的作用和广阔的应用前景^[35-39]。同时,该系统本身具

有原子级别的空间测量性能以及微牛级别的力学测量分辨率,可以在切削加工的同时进行在线或在位检测,获取被加工材料的表面微观形貌以及力学参数,为机械纳米加工机制的研究提供重要的手段和方法。此外,由于基于 AFM 的纳米加工系统的材料去除量在纳米级,与分子动力学纳米切削仿真尺度相当,因而可能成为验证分子动力学仿真分析结果的有力证据。这是其他切削实验方法所不能比拟的。

也有研究者自行设计搭建专用的纳米切削设备, 其核心测量及驱动部件主要依赖于压电陶瓷^[40~42], 与基于扫描探针显微镜的纳米加工系统的原理基本一致, 本文便不再赘述。

2.4 单点金刚石超精密车削加工

超精密加工依赖于超精密机床, 并在严格的加工条件和环境下进行。由于机床的精度误差会直接传递给被加工样品, 一般条件下, 加工的精度不会超过机床的精度。目前应用的单点金刚石超精密车削机床的直线运动精度达几十个纳米, 难以实现如分子动力学仿真所要求或 AFM 所获得的空间运动精度。但该机械加具有其独特的优势: 可高效率的加工较大的尺寸以及高精度的复杂面型, 是目前实际应用最广泛的超精密加工方法。在合适的工艺参数和良好的加工条件下, 可以实现被加工工件表面纳米乃至亚纳米级的表面粗糙度^[43], 如单晶硅^[43,44], 铝 7075-T6^[45], ZKN7 玻璃^[46]以及钠钙玻璃^[47]等, 从而实现材料的纳米切削。

在采用机床进行纳米切削机理的研究时, 大部分情况下并不依赖于单点金刚石超精密车削机床的绝对运动精度, 而是采用一种斜切的方式获得纳米级的切削深度, 示意如图 5 所示。这种切削方式的好处在于可同时获得纳米级至微米级的切削深度, 以便于分析不同切削深度下材料的去除机制。Yan 等人^[27,30,33]采用该方式获得了 0~200 nm 的切削深度表面, 并检测分析了单晶硅在该范围内不同切削深度对应的亚表面变形状况。这种加工方式也常用于研究脆性材料在纳米切削中的脆塑性域去除方式转变的临界切削深度^[29,43]。

3 纳米切削模型

早在 1881 年, Mallock^[48]就提出了材料在切削过

图 5 斜切示意图^[43]

图 6 (a) Mallock 的剪切模型^[48]; (b) Lee-Shaffer 的滑移线切削模型^[51]

程中的剪切模型, 如图 6(a)所示, 假设刀具刃口为一条直线, 切削刃与刀具的运动方向垂直。Merchant^[49,50]在此基础上, 假设剪切区为一个极薄平面, 并基于弹塑性理论推导出了各向同性材料在正交切削过程的切削方程, 得到了剪切角的计算公式。Lee 和 Shafer^[51]在分析了剪切变形厚度的基础上, 提出了切削加工过程的滑移线场理论。Oxley 则提出了一种可变流动应力理论, 将加工硬化、剪切区宽度、尺寸效应以及温度-应变速度效应的影响纳入考虑^[52]。以上被广泛应用的传统切削理论的最基本的前提就是刀具刃口锋利, 在切削过程中与材料的接触视为点线接触。当切削技术从传统切削向微切削甚至纳米切削方向发展时, 切削深度也随之减小到微米甚至纳米量级。常用的单点金刚石刀具的刃口半径为 100~300 nm, 当切削深度减小到与刀具刃口半径相当甚至更小时, 在分析切削模型的时候刀具刃口不能被忽略, 相反地, 远大于切削深度的刀具刃口所带来的刃口效应成为了影响纳米切削过程的最重要的因素之一。同时, 材料的力学性质在纳米量级下所表现出的尺寸效应也愈发明显, 进而影响着纳米切削过程。

作者于 1998 年开展纳米切削研究时, 分析了切削过程中的有效前角为负前角可以增大材料中的静水压力, 减小材料断裂的可能, 并实现了粗糙度为 1 nm 的单晶硅表面纳米切削^[44]。随后研究了刀具刃口半径对不同材料的切削加工的影响^[53,54]。Zhang 和 Tanaka^[55]借助于分子动力学仿真方法分析了二维纳米切削单晶铜过程金刚石和单晶铜间的摩擦和磨损特性, 把变形分为无磨损、黏着、耕犁和切削 4 个阶段, 同时验证基于宏观塑性力学的连续介质理论不能直接应用于纳尺度切削过程。

图 7 为材料的纳米切削模型^[43]。可以看到, 在纳米切削中, 由于刀具刃口半径远大于切削深度, 其有效前角为负值。该负前角为刀刃前方塑性变形的发

生提供了必要的压应力. 随着切削深度 a_c 与刃口半径 r 之比(a_c/r)的减小, 会出现 1 个临界值, 使得当 a_c/r 小于该临界值时, 没有切屑产生, 在接触区域只发生了弹性和塑性变形, 如图 7(a)所示. 当刀刃最低点切过加工材料表面, 弹性变形部分 D_e 发生弹性恢复, 塑性变形部分在 P 点下形成恒久的变形, β 是垂直方向与合力方向的夹角. 这个压应力分布取决于切削合力、临界比值, 并与材料性质、刀具几何形状以及加工条件有关. 当 a_c/r 大于临界值时, 在圆弧形前刀面处存在某一个区域 S , 使得该区域之上的材料向上被推挤形成切屑, 而另一部分原子沿着刀面向下流动被碾压而形成已加工表面, 如图 7(b)所示.

假设切屑是由剪切形成的, 根据 Merchant 的弹塑性理论

$$\varphi = (\pi/4 - \eta - \gamma_e),$$

其中 φ 为剪切角, η 与摩擦角有关, γ_e 与刀具前角有关. 以金刚石刀具切削单晶硅为例, 根据此式可计算得到其纳米切削的剪切角为负值, 与实际的切削运动产生了矛盾. 因此, 在纳米切削过程中, 无法用传统的剪切理论解释切屑的形成机制. 对此, 作者提出了纳米切削中材料的去除源于推挤变形的想法, 并建立了纳米切削推挤模型. 这一机理得到了纳米切削的分子动力学分析结果的验证^[43].

针对刀具刃口半径对纳米切削过程的影响, 其他研究者也展开了相应的探索: Arsecularatne^[56] 分析了切削过程中的耕犁作用力, 并分离出切削力, 计算了刀具与切屑接触界面的应力分布. Fang^[57] 建立了一个新的基于滑移线理论(a new slip-line model)的材料切削模型, 该模型考虑了切削刃口半径, 可以用来预测耕犁力的大小、卷屑的半径等各种参数以及解释加工中出现的尺寸效应. Thiele 和 Melkote^[58] 研究了刀具刃口大小和材料硬度对工件表面粗糙度和切削

力的影响, 发现刃口越大时, 刃口的耕犁作用相对剪切越明显, 加工表面的平均粗糙度也越大, 各方向的切削力也越大. Liu 等人^[59] 研究刀具刃口半径对单晶硅脆塑转变深度的影响时发现, 单晶硅的脆塑转变深度与刀具刃口半径成近似线性关系, 刀具刃口半径越大, 脆塑转变深度也越大. Bissacco 等人^[60] 将刃口效应加入到切削模型的建立过程中, 并用于预测切削过程中的切削力.

4 切削极限探索

在纳米切削中, 由于刀具刃口半径的影响, 必然会在一个最小可切削深度, 使得当切削深度大于该临界值时, 形成连续稳定的切屑, 如果当切削深度小于最小切削深度时, 此时的工作表面只是发生挤压变形, 无材料去除. 在其他加工参数给定的前提下, 最小切削深度决定了一次切削过程的最小加工单位, 而最小切削深度的可控性和可重复性是影响纳米切削加工精度的重要的因素之一^[61].

4.1 最小切削深度

在切削中, 最小切削深度的研究主要是基于切削过程参数、刀具刃口半径以及特定材料建立相关的理论, 研究方法包括理论分析方法、仿真方法和实验方法.

Yuan 等人^[62] 根据力的平衡原理, 提出最小切削深度的解析计算公式, 得到最小切削深度取决于刀具刃口半径、摩擦系数和刀具受力. 通过金刚石刀具切削铝合金实验, 结合理论分析结果, 得到当刀具刃口半径为 0.2~0.6 μm 时, 最小切削深度为 0.05~0.2 μm , 即最小切削深度与刀具刃口半径之比为 0.2~0.4. Liu 等人^[63] 类比划痕过程, 基于摩擦的分子-机械理论建立了归一化最小切削深度(最小切削深度与刀具刃口半径之比)的预测模型. 结合 1040 钢和铝 6082-T6 的切削实验结果, 得到刀具刃口半径、切削速度、热软化效应以及应变硬化均会影响最小切削深度的结论. Son 等人^[64] 将刀具与材料之间的摩擦纳入考虑, 假设分流角近似等于剪切角, 建立了最小切削厚度的预测模型, 并认为减小刀具刃口半径和提高摩擦系数可以降低最小切削厚度. 在铝、黄铜以及无氧高导电性铜的切削实验中, 测量切削力和表面粗糙度, 并获得了和理论分析结果一致的最小切削深

图 7 纳米切削模型

(a) a_c/r 小于临界值; (b) a_c/r 大于临界值^[43]

度. 同时, 他们还研究了振动对最小切削深度的影响, 得到振动的加入可以增大摩擦系数, 从而减小最小切削深度^[65]. Malekian 等人^[66]基于最小能量原则以及无限剪切应变理论, 利用几何方法预测切削加工中, 最小切除深度对应的分流角, 并指出分流角近似于切削中的摩擦角. 通过铝的系列切削实验, 得到最小切削深度与刀具刃口半径之比约为 0.23. 吴继华和史振宇^[67]利用塑性应变梯度理论, 建立了各项同性材料的最小切削深度的预测模型, 该模型反映了刀具刃口半径、材料的内禀长度、应力强度以及位错对最小切削深度的影响, 还表示了最小切削深度受温度、应变率的影响. Kim 等人^[68]通过获取系列微铣削加工过程中的切削力周期性变化规律, 得到最小切削深度与刀具刃口半径的比值约为 30%, 且不随着刀具形状的变化而变化. Lai 等人^[69]基于应变梯度理论改进了材料强化行为公式, 并建立正交切削的有限元仿真模型, 得到刀具刃口半径 2 μm , 刀具前角为 10° 时, 无氧高导电性铜的最小切削深度是刀具刃口半径的 25%. 史振宇^[70]使用 ABAQUS 仿真软件对 OFHC Copper, Al 7075, Ti-6Al-4V 以及 Inconel 718 建立了切削模型, 得到了最小切削深度与刀具刃口半径的比值, 并与理论模型结果进行了比对分析. Vogler 等人^[71]利用 ABAQUS 仿真软件研究钢材料的最小切削深度, 得到珠光体的最小切削深度与刀具刃口半径之比为 14%~25%, 铁素体的最小切削深度与刀具刃口半径之比为 29%~43%, 由于材料延展性的增加, 耕犁作用较切削作用更明显, 使得较软材料的最小切削深度更大.

以上的研究成果主要来自基于连续介质理论的材料变形模型以及切削力模型分析, 相应的切削实验尺度均为微米级别, 因而所对应的适用范围应属于微切削领域. 而对于纳米切削加工中的最小切削深度, 目前大多采用分子动力学的仿真研究方法.

Ikawa 等人^[61]和 Shimada 等人^[8]通过对单晶铜和单晶铝的金刚石切削 MD 仿真研究发现最小切削深度可达 1 nm 或更小, 最小切屑深度为刀具刃口半径的 1/20 到 1/10. Komanduri 等人^[72]研究了刀具负前角对于单晶铜切削过程的影响, 发现当负前角达到 -76° 时, 仍有长的连续的切屑产生. 本研究组(MNMT)^[73]利用分子动力学仿真, 研究了单晶铜的纳米切削过程中的分流区域的位置与切削参数的关系, 得到单晶铜在纳米切削中产生切屑的临界有效负前角为 $-60^\circ \sim -70^\circ$, 并据此提出常见材料在纳米切削中能产生切屑的刀具最小刃口半径应设定为 10 nm, 为纳米刃口刀具的制备精度提供了依据标准.

4.2 极限切削实验

纳米切削所能达到的加工极限一直是加工领域的研究热点, 但该问题的探索仅仅依靠分子动力学的仿真研究是远远不够的, 这是由于分子动力学仿真只是一种基于大量简化和理想化研究工具, 其对于实际纳米切削加工的指导意义大部分限定于趋势的预测. 此外, 由于计算能力和存储能力的限制, 大部分分子动力学纳米切削仿真的尺度仅为数个纳米, 例如, 2.5 维切削模型的刀具刃口半径一般为数个到数十个纳米, 3 维切削模型的刀具刃口半径则基本在 10 nm 之内, 切削深度一般控制在数个纳米. 而在实际的纳米切削加工中, 由于当前制造技术和控制技术的限制, 很难建立并进行与上述尺度完全对应的切削实验, 进而难以对分子动力学纳米切削仿真结果进行直接有效的实验验证. 其中, 目前存在的一个重要问题就是难以获得具有纳米刃口的微刀具.

研究表明, 刀具刃口半径越小, 所能得到的极限切削深度越小, 因此, 尽可能减小刀具刃口半径是获取纳米切削极限的必要途径. 相对于传统的刀具研磨技术, 微刀具的聚焦离子束(FIB)加工具有精度高、

图8 (网络版彩图)单晶铜纳米切削 MD 模拟得到产生切屑的临界负前角为 $-60^\circ \sim -70^\circ$ ^[73]

图 9 利用聚焦离子束加工的纳米刃口刀具
(a) 圆形刀具; (b) 半圆形刀具^[75]

刃形复杂、无残余应力等显著的技术优势,在微刀具的制备中得到广泛应用^[74]。例如,利用聚焦离子束可以制备形状特异的刀具,可以有效避免传统加工方式的光学遮挡效应^[75,76]。本研究组依据锋利刃口形成的规律,解决了刃口半径无损伤高分辨率测量的难题,实现了刃口半径小于 15 nm 的微刀具 FIB 制备^[74,77]。此外,根据金刚石刀具在 FIB 刃口修锐过程中产生非晶层进而影响刀具使用寿命的问题,研究组提出了利用聚焦离子束的低能量加工特点,去除金刚石刀具的损伤层,使刀具在加工过程中始终保持了良好的切削性能。

同时,研究组基于自行制备的纳米刃口刀具进行单晶铜的极限切削实验,获得了小于 9 nm 的最薄切屑。在切削过程中通过增加切削液的方法,减小刀具和工件之间的摩擦,实现了小于 6 nm 的最薄切屑^[77],如图 10 所示。所获得的切屑的表面形貌信息更丰富、分辨率更高,为纳米切削机理及模型的建立提供了重要支撑。

5 典型材料纳米切削理论及其关键技术

不同类型材料在机械外力作用下的变形现象与内在机制存在很大差异,与刀具间的相互作用机理

图 10 厚度为 6 nm 的切屑 SEM 图^[77]

也各不相同。尤其当切削作用尺度减小到纳米量级,材料本身也涉及到了原子种类和排布以及晶体结构变化的相关特性。因此,需要针对特定的材料,建立与之相关的纳米切削理论。根据其不同的纳米切削现象和材料的性质,为分析方便起见,本文将被加工材料大致分为塑性材料、脆性材料、黑色金属以及高分子材料 4 种。以下简要介绍对其中典型材料的纳米切削机理研究现状,并针对部分材料在纳米切削中存在的问题,介绍相关加工方法及技术方案。

5.1 塑性材料纳米切削机理

本文所谈及的典型塑性材料主要以单晶铜和单晶铝为例。Shimada 等人^[8]对单晶铜和单晶铝的纳米切削过程进行分子动力学仿真研究发现,在切削过程中,刀具与工件接触区域附近产生了大量位错,随着切削的进行,一部分位错向前运动,到达自由表面而消失,一些堆积的原子在位错这种产生、消失的交替过程中沿刀具的前刀面向上运动形成了切屑。另一部分位错穿过刀具下方的材料向下运动,当刀具经过后,加工表面的缺陷结构会出现一定程度的恢复,大部分位错消失,一些位错在已加工表面上形成原子台阶,这些台阶的高度可以被认为是纳米级切削可达到的表面粗糙度。罗熙淳和梁迎春^[78]通过单晶铝纳米切削的分子动力学仿真也得到了类似的结论。梁迎春等人^[16]发现在单晶铜的纳米切削过程中,刀具的前方和下方形成变形区并伴随缺陷的产生,缺陷以堆垛层错和部分位错为主。在纳米尺度下,工件存在很大的表面应力。工件变形区主要受压应力作用,已加工表面主要受拉应力作用。随着位错在晶体中产生、繁殖及相互作用,工件先后经过弹性变形-塑性变形-加工硬化-完全屈服 4 个变形阶段,随后进入新的循环变形。可见,以单晶铜和单晶铝为代表的塑性材料的纳米切削变形机制主要是位错、层错等缺陷的形核、增殖以及运动。这一结论也得到了其他研究结果的证实^[17,79,80]。

对于面心立方结构的单晶铜和单晶铝来说,位错的增殖和运动方向与特定的晶面晶向有紧密地联系,因此,切削方向和晶面晶向的关系必然会影响纳米切削过程。Inamura 等人^[81]提出,单晶材料纳米切削机制与晶面晶向以及工件材料的结构有关。Komanduri 等人^[82,83]系统地研究了单晶铝晶面晶向与切削方向对纳米切削材料变形机理的影响,发现其

塑性变形模式主要分为三种, 如图 12 所示. 其本质在于沿不同晶面晶向的切削方向与单晶铝的位错滑移面呈现的位置关系不同, 因而导致位错运动方向与切削方向的相互方位关系的差异. Pei 等人^[17]对单晶铜的纳米切削过程研究也发现了类似现象.

此外, 研究者们还研究了切削速度、切削深度以及刀具前角等加工参数对塑性材料变形、切削力、应力分布以及切削热等的影响^[15~17,79,80,83~85]; 刘飞等人^[86]建立了多晶铜的纳米切削模型, 研究其材料变形机制及切削力变化.

图 11 (网络版彩图)单晶铜在纳米切削过程中产生位错^[17]

图 12 (网络版彩图)单晶铝纳米切削过程中位错运动的三种模式

(a) 位错运动方向与切削方向呈一定角度, 例如在(001)晶面沿[100]晶向切削; (b) 位错运动方向垂直于切削方向, 例如在(110)晶面上沿[001]晶向切削; (c) 位错运动方向平行于切削方向, 例如在(001)晶面上沿 $[\bar{1}10]$ 晶向切削^[82,83]

5.2 脆性材料纳米切削机理及关键技术

大量应用于尖端科技领域的激光与红外光学晶体等脆性材料, 由于其硬度高、易脆裂, 机械性能尤其是韧性和强度与金属材料相比有很大差异, 难以获得高质量的加工表面. 而单点金刚石超精密车削可直接加工出具有纳米级表面粗糙度和亚微米级形面精度的复杂表面, 是实现光学自由曲面加工的最有效方式. 研究者们发现, 当切削厚度减小到某一临界值时, 脆性材料可以实现塑性的去除而没有裂纹产生. 美国学者 Blake 和 Scattergood^[87]对单晶硅和单晶锗进行超精密车削实验, 成功实现了脆性材料的塑性域超精密车削, 同时, 还建立了脆性材料超精密车削加工脆裂示意模型^[88](图 13). 此后的大量研究表明, 负前角的出现也会增大脆性材料塑性域切削的临界深度, 同时, 临界脆塑转变深度还与实际加工的切削速度、切削环境甚至晶体的晶面晶向有关^[89]. Shimada 等人^[90]提出任何材料, 不管其塑性还是脆性, 在加工尺度小到一定程度时, 均能实现塑性域的加工.

从以上纳米切削模型分析可以看到, 在纳米切削过程中, 由于切削深度控制在纳米量级且刀具的有效前角为负值, 因此, 脆性材料的纳米切削一般为塑性域的加工过程, 对于其纳米切削机理的研究主要集中在脆性材料塑性变形内在机制的探索上. 目前研究的最为广泛的对象是单晶硅材料.

Cheong 和 Zhang^[91]采用纳米压痕分析了单晶硅的塑性变形过程, 发现在加载的过程中单晶硅出现了从金刚石结构到 β -tin 结构的相变, 卸载后, 相变区域的材料变成了非晶态结构. 后续的研究表明, 在避免化学反应的前提下, 单晶硅的初始塑性变形来源于八面体剪应力, 之后塑性变形的发展则受到静水

图 13 脆性材料超精密车削脆裂示意模型^[88]

压力的影响^[92]. Kim 和 Oh^[118], Sanz-Navarro 等人^[93]研究了单晶硅不同晶面在压载过程中的塑性变形差异, 得到相变区域分布与晶面以及晶体滑移系有关. Shimada 等人^[94]通过分子动力学模拟结果, 认为在单晶硅的纳米切削过程中, 刀具前方材料的晶格首先发生弹性变形, 当贮存在变形晶格中的变形能达到一定值的时候, 晶格被打破, 形成非晶态结构, 非晶态区被切削刃分成两个部分, 一部分向前运动形成切屑, 一部分向后运动形成已加工表面. Blake^[95]发现单晶硅纳米切削仿真后的切屑和已加工表面呈现非晶态, 认为这是由于单晶硅晶体非晶化所需能量比晶体结构不被破坏情况下剪切晶体所需能量少的缘故. Komanduri 等人^[96]通过分子动力学仿真发现, 单晶硅在纳米切削过程中出现了从金刚石结构到 β -tin 结构的相变, 并认为材料去除机制包括刀具前方材料的压缩、类似于挤压过程的切屑形成、侧流、已加工表面的亚表面变形缺陷. Cai 等人^[97]提出, 在单晶硅的塑性域加工中, 挤压力大于切削力, 刀具刃口半径与切削深度对材料脆塑性加工的转变有重要的影响. 本研究组使用了分子动力学仿真和实验的方法研究了单晶硅的纳米切削机制, 通过透射电子显微镜观察电子衍射图像发现, 在塑性和脆性模式下的切屑分别是非晶和多晶结构^[98,99]. 此外, 还对单晶硅纳米斜切和车削表面进行拉曼光谱检测, 分析了已加工表面的晶态变化以及残余应力状态^[29]. Yan 等人^[27,30]使用拉曼光谱以及透射电子显微镜表征了单晶硅纳米切削表面, 发现已加工表面出现具有一定厚度的非晶层. 切削深度越大, 非晶层越厚. 同时得到该非晶层的厚度还与加工晶面晶向以及刀具负前角有关.

单晶锗是一种重要的红外光学材料, 本研究组对单晶锗纳米切削变形机制进行了深入研究. 通过对不同晶面的单晶锗进行纳米压痕仿真, 发现单晶

锗在应力状态下出现了从金刚石结构到 β -tin 结构的相变或出现了直接的非晶化, 相变的区域分布和相变的路径受晶面影响很大^[100]. 通过纳米切削的分子动力学仿真, 得到单晶锗在纳米切削下的塑性变形机制主要为相变^[13], 与单晶硅的纳米加工塑性变形机制相似, 如图 15 所示. 通过加工实验及表面测试表征, 得到单晶锗纳米切削表面出现非晶层.

近几年, 由于 SiC 材料硬度高、耐高温、导热导电性优良、高击穿强度等性质, 在机械加工、半导体等领域具有广泛的应用, 其纳米切削性能及切削机理受到了研究人员的广泛关注. Patten 等人^[101]进行了单晶 6H-SiC 的塑性域纳米加工实验, 得到负前角和更小的切削深度有利于 SiC 塑性域加工的产生, 其塑性主要来源于刀具压力作用下 6H-SiC 到金属相的相变. Geol 等人^[102]使用分子动力学仿真研究了 3C-SiC 在纳米切削时的变形, 发现了原子排布从 sp^3 - sp^2 的转变, 之后还研究了其纳米切削应力状态下的剪切不稳定性^[103]. 此外, 还定量评估了不同构型的单晶 SiC 的纳米切削性能^[104].

非晶合金, 又称金属玻璃, 是将高温下熔化了液态金属, 通过急速冷却使得金属原子在混乱无序的状态下便被冷凝成固体. 由于金属玻璃中原子排列无序, 没有金属晶体或传统合金材料中常见的位错、晶界、相界等缺陷, 使得其具有很高的机械强度、韧度、弹性极限以及抗腐蚀和抗磨损等优异性能^[105], 在制造领域具有广阔的应用前景. 使用纳米切削手段获得高精度金属玻璃功能器件表面在未来的发展中举足轻重. 然而, 其无缺陷的无序结构同时也决定了室温下常见金属玻璃具有的塑性非常有限. 研究表明金属玻璃的塑性来源于局部区域原子团簇的重新排位而形成的剪切转化区(STZ), 这些剪切转化区集结形成剪切带, 最终导致材料在室温下的塑性变形甚至脆裂^[106]. 目前研究金属玻璃的纳米切削变形

图 14 (a) 单晶硅纳米切削表面横截面 TEM 图; (b) 单晶硅纳米切削表面拉曼光谱^[27]

图 15 (网络版彩图)单晶硅和单晶锗纳米切削亚表层变形^[13]

机理的文献十分有限. Zhao 等人^[107]通过 $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{50}$ 的分子动力学纳米切削仿真研究发现刀具前方材料中并没有出现明显的剪切区域. 本研究组也对该材料的纳米加工变形机制进行了探讨. 通过对 $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{50}$ 进行纳米压痕仿真研究, 发现剪切转化区在材料纳米压痕的过程中不断地移动和发展(图 16), 温度对该材料的性能具有很大的影响^[108]. 对 $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{50}$ 进行纳米切削仿真, 得到该金属合金在纳米切削中的材料去除主要是推挤而非剪切^[109].

为了实现脆性材料高表面质量的切削加工, 必须使得切削尺度足够小并且使加工在塑性域内进行. 而目前的研究结果表明大部分脆性材料的塑性的出现源于材料的相变, 例如非晶化. 基于此, 本研究组提出粒子注入辅助纳米加工(nanometric machining of ion implanted materials, NiIM)新方法: 通过粒子注入辅助方式使得硬脆材料的表面产生非晶化, 提高表面的塑性, 进而改善要加工的工件材料表层机械性能, 之后再行单点金刚石车削, 便可以实现高效的纳米切削. 通过相关实验发现粒子注入有利于改善硬脆材料的机械性能, 经过粒子注入后单晶硅的脆塑转变深度增加约 4 倍(脆塑转变深度由 236 增加到 923 nm), 见图 17, 成功实现了单晶硅平面和自由曲

图 16 (网络版彩图)非晶合金在纳米压痕中出现剪切转化带^[108]

图 17 单晶硅离子注入前后的纳米压痕对比^[110]

面的纳米切削^[110,111]. 此外, 还进行了大量光学晶体材料粒子注入辅助纳米切削实验, 光学晶体材料的脆塑转变深度均有不同程度的提高, 部分材料甚至提高了十几倍, 同时减小了金刚石刀具的磨损, 从而验证了新方法的普适性. 并将此项技术成功应用于 GaP 晶体微棱锥抗反射层的加工, 所产生的 THz 波输出效率提高了 16%^[112].

5.3 黑色金属纳米切削机理及关键技术

以钢铁材料为代表的黑色金属由于其生产技术成熟、成本低廉、功能多样化而成为应用最广泛的工程材料之一. 单点金刚石超精密车削可在一次加工后即获得纳米级的表面粗糙度和微米级的面型精度, 具有广阔的发展前景. 然而, 当切削 Fe, Ni, Cr, Ti 等门捷列夫元素周期表第 IV~VIII 族过渡金属材料时, 金刚石刀具会发生严重的化学磨损^[113], 有文献表明, 金刚石刀具切削钢材时比切削铜的磨损速度快 10^4 倍^[114]. 因此, 一般认为黑色金属材料不适用于金刚石切削. 但是, 广阔的应用需求和加工能力的矛盾使得研究者们深入探索黑色金属在金刚石刀具纳米切削中的磨损内在机制, 以求扩展黑色金属的超精密加工手段, 进而带来巨大的社会和经济效益.

分子动力学仿真可以有效获取加工过程原子级别的瞬时细节信息, 是研究金刚石刀具纳米切削磨损机制的有效工具^[115]. Narulkar 等人^[116]利用分子动力学仿真研究不同温度 and 不同接触时间下碳原子和铁原子之间的相互扩散作用. 发现只有当金刚石结构表面出现了石墨层时碳原子才向单晶铁里扩散, 该结果表明金刚石刀具加工铁材料时的磨损过程包括初始的石墨化以及之后的碳原子扩散. 之后的仿真研究^[117,118]进一步阐明了该过程: 刀具刃口处金刚石结构首先从立体的正四面体向平面的六边形石墨结

构的转变, 随后石墨化的碳原子扩散进了铁里, 而且石墨化过程是通过中间激活态同时以成团方式发生而非逐个原子的方式. 此外, 金刚石刀具磨损状况与切削的晶面晶向有关, 金刚石不同晶面抗石墨化能力排序为: (100)晶面优于(110)晶面, (111)晶面最差. 图 18 为金刚石刀具切削纯铁时出现石墨化的分子动力学仿真.

Ikawa 和 Tanaka^[119]通过低碳钢的加工实验发现随着碳含量的降低, 金刚石刀具的磨损率变高. 他们将磨损机制分为机械磨损和热化学磨损, 石墨化是金刚石加工钢材时的主导磨损机制. Komanduri 和 Shaw^[120,121]指出, 在适当的压力和温度下金刚石将会转变成石墨, 他们在用金刚石颗粒刻划纯铁表面所形成的沟槽底部检测到了扩散的碳. Evans 和 Bryan^[122]指出机械脆裂和化学反应在金刚石刀具加工含铁材料时的磨损机制中均起着重要的作用, 并将其化学磨损归因于被加工材料原子中未配对的 d 轨道电子, 而过渡金属倾向于通过 d 轨道与碳的 p 轨道的重叠发生化学反应^[113,122]. Tanaka 等人^[123]和 Shimada 等人^[124]通过实验和理论计算研究金刚石的化学磨损机制, 得到当温度高于 1000 K 时, 由于铁元素是金刚石石墨化良好的催化剂, 使得刀具石墨化并从基体解离下来与铁原子相互作用而发生严重磨损, 当温度低于 900 K 时, 氧化铁脱氧导致的金刚石氧化使得碳原子被移除而产生刀具磨损. 本研究组^[125,126]通过大量文献的

分析, 认为金刚石刀具在加工黑色金属时的磨损机理大致分为: 黏着和附着物的形成; 磨粒磨损、微崩刃、断裂和疲劳; 摩擦热磨损; 摩擦化学磨损(包括石墨化、扩散、碳化物和氧化物的形成). 其中, 化学磨损被认为是金刚石刀具切削黑色金属时磨损的主要机理, 且石墨化主要由 4 种因素引起: (1) 界面的高温; (2) 低于金刚石稳定范围的压力; (3) 铁和活性气氛的催化作用; (4) 加工过程中新形成的洁净表面的增强活性作用.

围绕这一制造难题, 各国研究者从加工工艺、刀具、材料等多方面探索改善金刚石刀具加工黑色金属时的磨损. 主要方法包括保护气氛切削、低温切削、超声振动辅助切削、刀具改善以及工件表面改性等. 本研究组主要在超声振动辅助切削和工件材料表面改性方面开展了相关研究^[125~128].

使用超声振动辅助的切削方法可以减少金刚石刀具和工件的接触时间进而减小刀具磨损^[129,130]. 相关的大量研究表明, 此方法对金刚石刀具磨损的抑制相比其它方法而言效果较好, 是最有希望的提高刀具寿命的解决方法之一. 但目前大部分的超声辅助直接切削黑色金属技术的研究还处于实验室水平. 本研究组开展了超声辅助金刚石切削碳钢材料的相关实验及研究, 成功实现了碳钢材料的超精密切削. 采用开发的装置可直接切削 Nak80 及 Stavax 模具钢, 并使表面粗糙度 $Ra < 8 \text{ nm}$, 其成果已应用于实际生产. 图 19 为研究组开发的超声辅助切削实验装置^[126]. 同时, 还深入研究了表面改性方法抑制金刚石刀具磨损^[128], 提出了整体单相可控氮化铁粉末冶金钢这一新型模具材料, 初步切削实验已经证明了其具有较好的金刚石可切削性, 此新材料的研制有望为模具钢材料超精密加工开辟新的途径¹⁾.

图 18 (网络版彩图)金刚石刀具切削纯铁时出现石墨化^[117]

图 19 超声振动辅助切削系统^[126]

1) 李占杰, 宫虎, 佟伟平, 等. 氮化铁材料的金刚石可切削性实验研究. 天津大学学报(已接收)

5.4 高分子聚合物纳米切削机理

非晶态高分子聚合物材料由于其优异的性能, 在各个领域具有广泛的应用. 常见的高分子聚合物材料 PMMA, 俗称有机玻璃, 具有透光率高、质量轻、化学稳定性好、抗拉伸和抗冲击能力强等传统光学材料难以比拟的优异性能, 近年来已越来越多地被作为高精密光学元件的加工材料^[131]. 作为光学器件, 其机械加工表面质量和形貌精度对其使用性能有着重要的影响. 因此, 掌握纳米切削过程中的高分子聚合物材料变形和去除机制, 进而有效控制其纳米加工过程, 成为获取高质量光学器件的保证.

高分子聚合物材料的一个重要性质就是随着温度的变化, 该材料就会表现出玻璃态、高弹态以及黏流态三种不同的力学状态, 如图 20 所示. 随着温度的升高, 高分子材料会发生由玻璃态向高弹态的转变, 该转变温度称为玻璃化温度 T_g . 玻璃态的高分子材料表现为脆而硬的固体; 高弹态则是由于一部分分子链获得足够能量而能自由运动, 表现为柔软的弹性体, 当温度继续升高时, 材料内部的分子链能够自由的运动, 在外力的作用会发生黏性的流动, 这种状态称为黏流态. 对于 PMMA 这种光学材料来说, 其使用的状态为硬而脆的玻璃态, 但在纳米切削过程中, 希望材料能表现出一定的塑性, 避免裂纹的产生, 以获得高质量的表面. 因此, 玻璃态和高弹态及其转变是研究高分子聚合物纳米切削机理时的关注重点.

Carr 和 Feger^[133]通过对不同的高分子聚合物材料进行单点金刚石车削实验, 发现玻璃化转变温度、弛豫时间、交联度以及黏弹度等材料的特性决定了高分子聚合物是以脆性、塑性还是过渡态的方式去除. 加工参数和刀具状态均会影响脆性去除和塑性去除之

图 20 非晶态高分子聚合物弹性模量随温度变化曲线^[132]

间的转换. 苑伟政和王西彬^[134]通过实验分析认为随着切削厚度的减小, 刀具刃口圆弧造成刃前区压应力作用增加. 在压应力状态下, 非晶态聚合物呈韧性, 塑性变形增加. 而非晶态聚合物抗压强度高于抗拉强度, 因而单位体积切削能量增加, 导致单位切削力增加. Briscoe 等人^[135]发现 PMMA 在刻划过程中出现了脆性到韧性的转变以及弹性到塑性的转变. Gauthier 等人^[136]通过刻划实验分析, 认为温度、应变和应变率对控制高分子聚合物刻划机制有重要的影响. Jardret 和 Morel^[137]研究了不同温度下刻划条件与材料响应性质之间的关系, 并认为来自于压头划擦的应变率是除了温度之外对聚合物材料抗断裂能力影响最大的因素之一. Xiao 和 Zhang^[138]通过高分子聚合物的机械加工实验发现黏滞性变形是决定该材料加工表面质量的重要因素. 并认为, 为尽可能减小加工表面粗糙度, 应选择合适的加工参数使得聚合物材料的去除机制避免黏滞塑性剥离或者脆性崩裂.

也有研究者采用分子动力学仿真探索高分子聚合物材料的机械性能. Solar 等人^[139]建立了非晶态聚合物的粗化的珠簧模型, 研究了不同温度、不同刻划速度、不同针尖表面粗糙度等条件下材料局部的摩擦系数. Brostow 等人^[140]通过仿真发现化学键取向是影响高分子聚合物的刻划阻抗以及材料恢复的重要因素. Lyulin 等人^[141]研究了玻璃化转变温度对高分子聚合物的分子链段运动的影响. Du 等人^[142,143]建立非晶态聚苯乙烯的全原子分子动力学纳米刻划模型, 得到刻划表面质量会受到分子链排布的严重影响. 并研究分析了分子链滑移和分子链内部变化两种材料变形机制, 得到刻划速度对聚苯乙烯材料的纳米刻划变形有重要的影响.

本研究组采用分子动力学模拟方法建立了 PMMA 的珠簧结构和全原子结构两种纳米加工模型 (图 21). 并从不同角度对其纳米加工材料去除机理进行了分析. 得到加工过程中 PMMA 区域的局部温度可达到玻璃化转变温度, 表明该区域的材料可以以塑性方式去除. 此外, 得到不同的纳米加工参数, 包括切削深度、切削速度以及压头与工件相互作用, 对 PMMA 的变形行为有显著影响^[131,144].

6 结束语

纳米切削技术在未来制造业的发展中具有广阔

图 21 (网络版彩图)PMMA 纳米加工分析动力学全原子模型^[131]

的应用前景. 对纳米切削机理进行深入探索, 建立成熟完整的纳米切削理论体系, 可为改善纳米切削表面质量、保证纳米切削表面完整性的制造技术的研究发展提供必要的理论基础, 对提高切削加工的水平具有重要意义. 目前, 纳米切削机理研究的挑战主要在于以下几个方面.

1) 理论的发展. 纳米切削机理研究的对象大多处于微纳观领域, 该尺度所特有的原子量子效应在切削现象及机理探索中占据重要的地位, 其所涉及的研究领域远远超出了常规机械加工理论的范畴, 而需要更多地依赖其他新的基础学科(例如晶体学、

纳米力学、原子物理甚至量子力学等)的发展成果. 完整成熟的纳米切削理论必然是一门具有多学科深入交叉背景的理论体系, 需要相关的人员具有宽广的视野和相关多领域的知识背景. 现有的纳米切削理论的研究只是处于初级阶段, 相应的研究成果也比较分散, 距离建立完整成熟的纳米切削理论体系还有很长的路要走.

2) 技术及设备的发展. 理论的建立需要与实际加工相结合. 由于相关加工技术和检测技术的限制, 目前在纳米切削过程中的纳观瞬态信息以及一些物理现象难以表征, 阻碍了相关理论的验证与深入发展. 虽然采取了一些相关的研究办法, 例如分子动力学仿真、原子力显微镜机械加工等, 但仍与实际纳米切削有一定的差别. 因此, 提高纳米切削技术水平迫切需要更精密稳定的切削加工设备以及建立成熟完善的纳米切削加工工艺. 同时, 还应建立与实际纳米切削加工相配套的测试表征手段, 有效地检测与表征纳米切削加工现象与行为, 为纳米切削理论体系的建立提供必要的实验支持.

参考文献

- 1 王国彪, 黎明, 丁玉成, 等. 重大研究计划“纳米制造的基础研究”综述. 中国科学基金, 2010, 24: 70-77
- 2 刘宇宏, 雒建斌. 纳米制造科学与技术中的基础问题研究进展. 中国基础科学, 2013, 15: 3-13
- 3 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告. 北京: 科学出版社, 2010
- 4 文玉华, 朱如曾, 周富信, 等. 分子动力学模拟的主要技术. 力学进展, 2003, 1: 65-73
- 5 白清顺, 梁迎春, 李德刚, 等. 纳米加工过程的分子动力学模拟技术研究. 微细加工技术, 2006, 4: 57-62
- 6 Hoover W G, Hoover C G, Stowers I F, et al. Interface tribology via nonequilibrium molecular dynamics. In: MRS Proceedings. Oxford: Cambridge University Press, 1988. 140
- 7 Belak J F, Stowers I F. A molecular dynamics model of the orthogonal cutting process. In: 1990 ASPE (American Society of Photoptical Engineers) annual conference. Rochester, NY (USA), 1990
- 8 Shimada S, Ikawa N, Tanaka H, et al. Feasibility study on ultimate accuracy in microcutting using molecular dynamics simulation. CIRP Ann-Manuf Techn, 1993, 42: 91-94
- 9 Shimada S, Ikawa N, Ohmori G, et al. Molecular dynamics analysis as compared with experimental result of micromachining. CIRP Ann-Manuf Techn, 1992, 41: 117-120
- 10 Shimada S, Ikawa N, Tanaka H, et al. Structure of micromachined surface simulated by molecular dynamics analysis. CIRP Ann-Manuf Techn, 1994, 43: 51-54
- 11 Shimada S, Ikawa N, Inamura T, et al. Brittle-ductile transition phenomena in microindentation and micromachining. CIRP Ann-Manuf Techn, 1995, 44: 523-526
- 12 Inamura T, Shimada S, Takezawa N, et al. Brittle/ductile transition phenomena observed in computer simulations of machining defect-free monocrystalline silicon. CIRP Ann-Manuf Techn, 1997, 46: 31-34
- 13 Lai M, Zhang X D, Fang F Z, et al. Study on nanometric cutting of germanium by molecular dynamics simulation. Nanoscale Res Lett, 2013, 8: 13
- 14 Liang Y C, Guo Y B, Chen M J, et al. Molecular dynamics simulation of heat distribution during nanometric cutting process. In:

- Nanoelectronics Conference. Shanghai, 2008. 711–715
- 15 Lin Z C, Chen Z D, Huang J C. Establishment of a cutting force model and study of the stress-strain distribution in nano-scale copper material orthogonal cutting. *Int J Adv Manuf Tech*, 2007, 33: 425–435
- 16 梁迎春, 盆洪民, 白清顺. 单晶 Cu 材料纳米切削特性的分子动力学模拟. *金属学报*, 2009, 45: 1205–1210
- 17 Pei Q X, Lu C, Lee H P. Large scale molecular dynamics study of nanometric machining of copper. *Comp Mater Sci*, 2007, 41: 177–185
- 18 Kim D E, Oh S I. Atomistic simulation of structural phase transformations in monocrystalline silicon induced by nanoindentation. *Nanotechnology*, 2006, 17: 2259–2265
- 19 Komanduri R, Chandrasekaran N, Raff L M. Effect of tool geometry in nanometric cutting: A molecular dynamics simulation approach. *Wear*, 1998, 219: 84–97
- 20 Miller R E, Tadmor E B. A unified framework and performance benchmark of fourteen multiscale atomistic/continuum coupling methods. *Model Simul Mater Sc*, 2009, 17: 053001
- 21 Zhu P Z, Hu Y Z, Fang F Z, et al. Multiscale simulations of nanoindentation and nanoscratch of single crystal copper. *Appl Surf Sci*, 2012, 258: 4624–4631
- 22 Zhu P Z, Fang F Z. Study on nanometric cutting process of single crystal silicon based on multiscale method. *J Heilongjiang Inst Sci Tech*, 2012, 22: 348–353
- 23 Pen H M, Bai Q S, LIANG Y C, et al. Multiscale simulation of nanometric cutting of single crystal copper-effect of different cutting speeds. *Acta Metal Sin (Engl Lett)*, 2009, 22: 440–446
- 24 Sun X Z, Chen S J, Cheng K, et al. Multiscale simulation on nanometric cutting of single crystal copper. *P I Mech Eng B-J Eng*, 2006, 220: 1217–1222
- 25 赵晟, 江五贵. 纳米尺度下切削过程的准连续介质力学模拟. *摩擦学学报*, 2009, 006: 505–511
- 26 梁迎春, 盆洪民, 白清顺, 等. 基于桥域理论的 Cu 单晶纳米切削跨尺度仿真研究. *物理学报*, 2011, 60: 100205
- 27 Yan J, Asami T, Harada H, et al. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining. *Precis Eng*, 2009, 33: 378–386
- 28 Yan J, Zhang Z, Kuriyagawa T. Mechanism for material removal in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide. *Int J Mach Tool Manu*, 2009, 49: 366–374
- 29 徐飞飞, 张效栋, 房丰洲. 金刚石刀具单点切削单晶硅加工表面特性. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11: 485–491
- 30 Yan J, Asami T, Harada H, et al. Crystallographic effect on subsurface damage formation in silicon microcutting. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2012, 61: 131–134
- 31 Oliver D J, Bradby J E, Williams J S, et al. Thickness-dependent phase transformation in nanoindented germanium thin films. *Nanotechnology*, 2008, 19: 475709
- 32 Oliver D J, Bradby J E, Williams J S, et al. Giant pop-ins and amorphization in germanium during indentation. *J Appl Phys*, 2007, 101: 043524
- 33 Yan J, Asami T, Kuriyagawa T. Nondestructive measurement of machining-induced amorphous layers in single-crystal silicon by laser micro-Raman spectroscopy. *Precis Eng*, 2008, 32: 186–195
- 34 傅惠南. 应用 SPM 技术开展纳米切削加工. *电子显微学报*, 2001, 20: 615–619
- 35 闫永达. 基于 AFM 的纳米加工机理及相关工艺技术研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. 7–85
- 36 Headrick J E, Armstrong M, Cratty J, et al. Nanoscale patterning of alkyl monolayers on silicon using the atomic force microscope. *Langmuir*, 2005, 21: 4117–4122
- 37 Yan Y D, Sun T, Dong S. Study on effects of tip geometry on AFM nanoscratching tests. *Wear*, 2007, 262: 477–483
- 38 Sun T, Yan Y D, Xia J F, et al. Research on micro machining using AFM diamond tip. *Key Eng Mater*, 2003, 259: 577–581
- 39 Zhao Q L, Sun T, Dong S, et al. Micro/nano-machining on silicon surface with a modified atomic force microscope. *Chin J Mech Eng-En*, 2001, 14: 207–211
- 40 Gao W, Hocken R J, Patten J A, et al. Construction and testing of a nanomachining instrument. *Precis Eng*, 2000, 24: 320–328
- 41 Gao W, Hocken R J, Patten J A, et al. Experiments using a nano-machining instrument for nano-cutting brittle materials. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2000, 49: 439–442
- 42 Lucca D A, Chou P, Hocken R J. Effect of tool edge geometry on the nanometric cutting of Ge. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1998, 47: 475–478
- 43 Fang F Z, Wu H, Liu Y C. Modelling and experimental investigation on nanometric cutting of monocrystalline silicon. *Int J Mach Tool Manu*, 2005, 45: 1681–1686

- 44 Fang F Z, Venkatesh V C. Diamond cutting of silicon with nanometric finish. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1998, 47: 45–49
- 45 Ng C K, Melkote S N, Rahman M, et al. Experimental study of micro-and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6. *Int J Mach Tool Manu*, 2006, 46: 929–936
- 46 Fang F Z, Chen L J. Ultra-precision cutting for ZKN7 glass. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2000, 49: 17–20
- 47 Liu K, Li X, Liang S Y, et al. Nanometer-scale, ductile-mode cutting of soda-lime glass. *J Manuf Proce*, 2005, 7: 95–101
- 48 Mallock A. The action of cutting tools. *P Roy Soc A-Math Phy*, 1881, 33: 127–139
- 49 Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *J Appl Phys*, 1945, 16: 267–275
- 50 Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in orthogonal cutting. *J Appl Phys*, 1945, 16: 318–324
- 51 Lee E H, Shaffer B W. The theory of plasticity applied to a problem of machining. *J Appl Mech-T ASME*, 1951, 18: 405–413
- 52 张幼桢. 金属切削理论. 北京: 航空工业出版社, 1988. 92–102
- 53 Fang F Z, Zhang G X. An experimental study of optical glass machining. *Int J Adv Manuf Tech*, 2004, 23: 155–160
- 54 Fang F Z, Zhang G X. An experimental study of edge radius effect on cutting single crystal silicon. *Int J Adv Manuf Tech*, 2003, 22: 703–707
- 55 Zhang L C, Tanaka H. Towards a deeper understanding of wear and friction on the atomic scale—a molecular dynamics analysis. *Wear*, 1997, 211: 44–53
- 56 Arsecularatne J. On tool-chip interface stress distributions, ploughing force and size effect in machining. *Int J Mach Tool Manu*, 1997, 37: 885–899
- 57 Fang N. Slip-line modeling of machining with a rounded-edge tool-Part I: New model and theory. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51: 715–742
- 58 Thiele J D, N Melkote S. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *J Mater Process Tech*, 1999, 94: 216–226
- 59 Liu K, Li X, Rahman M, et al. A study of the effect of tool cutting edge radius on ductile cutting of silicon wafers. *Int J Mach Tool Manu*, 2007, 32: 631–637
- 60 Bissacco G, Hansen H N, Slunsky J. Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2008, 57: 113–116
- 61 Ikawa N, Shimada S, Tanaka H, et al. An atomistic analysis of nanometric chip removal as affected by tool-work interaction in diamond turning. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1991, 40: 551–554
- 62 Yuan Z J, Zhou M, Dong S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. *J Mater Process Tech*, 1996, 62: 327–330
- 63 Liu X, DeVor R E, Kapoor S G. An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2006, 128: 474–481
- 64 Son S M, Lim H S, Ahn J H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *Int J Mach Tool Manu*, 2005, 45: 529–535
- 65 Son S M, Lim H S, Ahn J H. The effect of vibration cutting on minimum cutting thickness. *Int J Mach Tool Manu*, 2006, 46: 2066–2072
- 66 Malekian M, Mostofa M G, Park S S, et al. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. *J Mater Process Tech*, 2012, 212: 553–559
- 67 吴继华, 史振宇. 基于应变梯度理论的正交微车削中最小切除厚度预测. *中国机械工程*, 2009, 18: 2227–2230
- 68 Kim C J, Mayor J R, Ni J. A static model of chip formation in microscale milling. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2004, 126: 710–718
- 69 Lai X, Li H, Li C, et al. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. *Int J Mach Tool Manu*, 2008, 48: 1–14
- 70 史振宇. 基于最小切除厚度的微切削加工机理研究. 博士学位论文. 济南: 山东大学, 2011. 39–61
- 71 Vogler M P, DeVor R E, Kapoor S G. On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: Surface generation. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2004, 126: 685–694
- 72 Komanduri R, Chandrasekaran N, Raff L M. Some aspects of machining with negative-rake tools simulating grinding: a molecular dynamics simulation approach. *Philos Mag B*, 1999, 79: 955–968
- 73 Lai M, Zhang X D, Fang F Z. Study on critical rake angle in nanometric cutting. *Appl Phys A-Mater*, 2012, 108: 809–818
- 74 房丰洲, 徐宗伟. 基于聚焦离子束的纳米加工技术及进展. *黑龙江科技学院学报*, 2013, 3: 211–221
- 75 Xu Z W, Fang F Z, Zhang S J, et al. Fabrication of micro DOE using micro tools shaped with focused ion beam. *Opt Express*, 2010, 18: 8025–8032
- 76 Li G H, Xu Z W, Fang F Z, et al. Micro cutting of V-shaped cylindrical grating template for roller nano-imprint. *J Mater Process Tech*, 2013,

- 213: 895–904
- 77 Wu W, Xu Z W, Fang F Z, et al. Decrease of FIB-induced lateral damage for diamond tool used in nano cutting. *Nucl Instrum Meth B*, 2014, 330: 91–98
- 78 罗熙淳, 梁迎春. 单晶铝纳米切削过程分子动力学模拟技术研究. *中国机械工程*, 2000, 11: 860–862
- 79 Zhu P Z, Hu Y Z, Wang H, et al. Study of effect of indenter shape in nanometric scratching process using molecular dynamics. *Mat Sci Eng A-Struct*, 2011, 528: 4522–4527
- 80 Pei Q X, Lu C, Lee H P, et al. Study of materials deformation in nanometric cutting by large-scale molecular dynamics simulations. *Nanoscale Res Lett*, 2009, 4: 444–451
- 81 Inamura T, Takezawa N, Taniguchi N. Atomic-scale cutting in a computer using crystal models of copper and diamond. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1992, 41: 121–124
- 82 Komanduri R, Chandrasekaran N, Raff L M. Orientation effects in nanometric cutting of single crystal materials: An MD simulation approach. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1999, 48: 67–72
- 83 Komanduri R, Chandrasekaran N, Raff L M. MD simulation of nanometric cutting of single crystal aluminum-effect of crystal orientation and direction of cutting. *Wear*, 2000, 242: 60–88
- 84 郭永博, 梁迎春, 陈明君, 等. 单晶 Cu 纳米加工机理及其热效应的分子动力学模拟. *金属学报*, 2009, 45: 1199–1204
- 85 Zhang J J, Sun T, Yan Y D, et al. Molecular dynamics simulation of subsurface deformed layers in AFM-based nanometric cutting process. *Appl Surf Sci*, 2008, 254: 4774–4779
- 86 刘飞, 梁迎春, 白清顺, 等. 纳米切削多晶铜的分子动力学仿真研究. *工具技术*, 2010, 44: 31–34
- 87 Blake P N, Scattergood R O. Ductile-regime machining of germanium and silicon. *J Am Ceram Soc*, 1990, 73: 949–957
- 88 Blackley W S, Scattergood R O. Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. *Precis Eng*, 1991, 13: 95–103
- 89 Neo W K, Kumar A S, Rahman M. A review on the current research trends in ductile regime machining. *Int J Mach Tool Manu*, 2012, 63: 465–480
- 90 Shimada S, Ikawa N, Inamura T, et al. Brittle-ductile transition phenomena in microindentation and micromachining. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1995, 44: 523–526
- 91 Cheong W C D, Zhang L C. Molecular dynamics simulation of phase transformations in silicon monocrystals due to nano-indentation. *Nanotechnology*, 2000, 11: 173–180
- 92 Zhang L C, Zarudi I. Towards a deeper understanding of plastic deformation in monocrystalline silicon. *Int J Mech Sci*, 2001, 43: 1985–1996
- 93 Sanz-Navarro C F, Kenny S D, Smith R. Atomistic simulations of structural transformations of silicon surfaces under nanoindentation. *Nanotechnology*, 2004, 15: 692–697
- 94 Shimada S, Tanaka H, Ikawa N. Atomistic mechanism of surface generation in micromachining of monocrystalline silicon. In: *Proceedings of 1st International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen)*. Bremen, 1999. 230–233
- 95 Belak J. Nanotribology: Modelling atoms when surfaces collide. *Energy Technol Rev*, 1994, 8–9: 13–24
- 96 Komanduri R, Chandrasekaran N, Raff L M. Molecular dynamics simulation of the nanometric cutting of silicon. *Philos Mag B*, 2001, 81: 1989–2019
- 97 Cai M B, Li X P, Rahman M. Study of the mechanism of nanoscale ductile mode cutting of silicon using molecular dynamics simulation. *Int J Mach Tool Manu*, 2007, 47: 75–80
- 98 Fang F Z, Wu H, Zhou W, et al. A study on mechanism of nano-cutting single crystal silicon. *J Mater Process Tech*, 2007, 184: 407–410
- 99 张治国. 单晶材料纳米级切削机理的研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2009. 91–93
- 100 Lai M, Zhang X D, Fang F Z. Nanoindentation-induced phase transformation and structural deformation of monocrystalline germanium: A molecular dynamics simulation investigation. *Nanoscale Res Lett*, 2013, 8: 353
- 101 Patten J, Gao W, Yasuto K. Ductile regime nanomachining of single-crystal silicon carbide. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2005, 127: 522–532
- 102 Goel S, Luo X, Reuben R L, et al. Atomistic aspects of ductile responses of cubic silicon carbide during nanometric cutting. *Nanoscale Res Lett*, 2011, 6: 1–9
- 103 Goel S, Luo X, Reuben R L. Shear instability of nanocrystalline silicon carbide during nanometric cutting. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 231902
- 104 Luo X, Goel S, Reuben R L. A quantitative assessment of nanometric machinability of major polytypes of single crystal silicon carbide. *J Eur Ceram Soc*, 2012, 32: 3423–3434
- 105 Yavari A R, Lewandowski J J, Eckert J. Mechanical properties of bulk metallic glasses. *Mrs Bull*, 2007, 32: 635–638

- 106 Greer A L, Cheng Y Q, Ma E. Shear bands in metallic glasses. *Mat Sci Eng R*, 2013, 74: 71–132
- 107 Zhao Y, Zhang Y, Liu R P. MD simulation of chip formation in nanometric cutting of metallic glass. *Adv Mater Res*, 2012, 476: 434–437
- 108 Qiu C, Zhu P Z, Fang F Z, et al. Study of nanoindentation behavior of amorphous alloy using molecular dynamics. *Appl Surf Sci*, 2014, 305: 101–110
- 109 Zhu P Z, Fang F Z. On the mechanism of material removal in nanometric cutting of metallic glass. *Appl Phys A-Mater*, 2014, 116: 605–610
- 110 Fang F Z, Chen Y H, Zhang X D, et al. Nanometric cutting of single crystal silicon surfaces modified by ion implantation. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2011, 60: 527–530
- 111 Chen Y H, Fang F Z, Xu Z W, et al. Surface modification for brittle monocrystalline materials by MeV ions. *Nucl Instrum Meth B*, 2012, 272: 433–436
- 112 Hu X, Li Y, Fang F, et al. Enhancement of terahertz radiation from GaP emitters by subwavelength antireflective microp pyramid structures. *Opt Lett*, 2013, 38: 2053–2055
- 113 Paul E, Evans C J, Mangamelli A, et al. Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning. *Precis Eng*, 1996, 18: 4–19
- 114 Lucca D A, Rhorer R L, Komanduri R. Energy dissipation in the ultraprecision machining of copper. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1991, 40: 69–72
- 115 梁迎春, 郭永博, 陈明君. 纳米加工过程中金刚石刀具磨损研究的新进展. *摩擦学学报*, 2008, 28: 282–288
- 116 Narulkar R, Bukkapatnam S, Raff L M, et al. Molecular dynamics simulations of diffusion of carbon into iron. *Philos Mag*, 2008, 88: 1259–1275
- 117 Narulkar R, Bukkapatnam S, Raff L M, et al. Graphitization as a precursor to wear of diamond in machining pure iron: a molecular dynamics investigation. *Comp Mater Sci*, 2009, 45: 358–366
- 118 Narulkar R. Investigation on the mechanism of wear of single crystal diamond tool in nanometric cutting of iron using molecular dynamics (MD) and the development of generalized potential energy surfaces (GPES) based on ab initio calculations. Dissertation for the Doctoral Degree. Oklahoma: Oklahoma State University, 2009
- 119 Ikawa N, Tanaka T. Thermal aspects of wear of diamond grain in grinding. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1971, 19: 153–157
- 120 Komanduri R, Shaw MC. Wear of synthetic diamond when grinding ferrous materials. *Nature*, 1975, 255: 211–213
- 121 Komanduri R, Shaw M C. On the diffusion wear of diamond in grinding pure iron. *Philos Mag*, 1976, 34: 195–204
- 122 Evans C, Bryan J B. Cryogenic diamond turning of stainless steel. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1991, 40: 571–575
- 123 Tanaka H, Shimada S, Ikawa N, et al. Wear mechanism of diamond cutting tool in machining of steel. *Key Eng Mater*, 2001, 196: 69–78
- 124 Shimada S, Tanaka H, Higuchi M, et al. Thermo-chemical wear mechanism of diamond tool in machining of ferrous metals. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2004, 53: 57–60
- 125 代腾飞. 金刚石刀具车削钢铁材料的研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2009. 32–57
- 126 李占杰. 超精密切削黑色金属的工艺及机理研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2013. 5–6, 30–84
- 127 Li Z J, Fang F Z, Gong H, et al. Review of diamond-cutting ferrous metals. *Int J Adv Manuf Tech*, 2013, 68: 1717–1731
- 128 Li Z J, Fang F Z, Gong H, et al. Effects of surface modifications on steel's machinability in single-point diamond turning, *Int J Precis Tech*, 2013, 3: 105–116
- 129 Moriwaki T, Shamoto E. Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1991, 40: 559–562
- 130 Shamoto E, Moriwaki T. Study on elliptical vibration cutting. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 1994, 43: 35–38
- 131 袁丹丹. 有机玻璃纳米机械加工材料去除机理研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2009. 2, 18–47
- 132 Gubbels G P H. Diamond turning of glassy polymers. Dissertation for the Doctoral Degree. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006. 16
- 133 Carr J W, Feger C. Ultraprecision machining of polymers. *Precis Eng*, 1993, 15: 221–237
- 134 苑伟政, 王西彬. 非晶态聚合物材料的切削. *机械科学与技术*, 1995, 1: 109–111
- 135 Briscoe B J, Evans P D, Biswas S K, et al. The hardnesses of poly (methylmethacrylate). *Tribol Int*, 1996, 29: 93–104
- 136 Gauthier C, Lafaye S, Schirrer R. Elastic recovery of a scratch in a polymeric surface: Experiments and analysis. *Tribol Int*, 2001, 34: 469–479
- 137 Jardret V, Morel P. Viscoelastic effects on the scratch resistance of polymers: Relationship between mechanical properties and scratch properties at various temperatures. *Prog Org Coat*, 2003, 48: 322–331
- 138 Xiao K Q, Zhang L C. The role of viscous deformation in the machining of polymers. *Int J Mech Sci*, 2002, 44: 2317–2336

- 139 Brostow W, Hinze J A, Simões R. Tribological behavior of polymers simulated by molecular dynamics. *J Mater Res*, 2004, 19: 851–856
- 140 Solar M, Meyer H, Gauthier C, et al. Molecular dynamics simulations of the scratch test on linear amorphous polymer surfaces: A study of the local friction coefficient. *Wear*, 2011, 271: 2751–2758
- 141 Lyulin A V, Li J, Mulder T, et al. Atomistic simulation of bulk mechanics and local dynamics of amorphous polymers. In: *Macromolecular symposia*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2006. 108–118
- 142 Du K, Tang Y, Zhang J, et al. Molecular dynamics modelling and simulation of mechanical nanoscratching of polystyrene. *Int J Nanomanuf*, 2013, 9: 98–107
- 143 Du K, Tang Y, Zhang J, et al. Velocity-dependent nanoscratching of amorphous polystyrene. *Curr Nanosci*, 2013, 9: 153–158
- 144 Yuan D D, Zhu P Z, Fang F Z, et al. Study of nanoscratching of polymers using molecular dynamics simulations. *Sci China Phys Mech Astron*, 2013, 56: 1760–1769

Development of nanometric cutting mechanism

FANG FengZhou^{1,2,3} & LAI Min^{1,3}

¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Centre of MicroNano Manufacturing Technology (MNMT), Tianjin University, Tianjin 300072, China;

³ College of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Nanometric cutting is one of the most important processes for nano-precision manufacturing, which is especially for machining intricate surfaces with nanometer-scale roughness and sub-micrometer or even nanometer form accuracy. It has potentially found wide applications and has an excellent perspective in future. Establishing the fundamental theory of nanometric cutting and developing the high-efficiency, low-damage and controllable nanometric cutting technologies are of great significance in the development of advanced manufacturing industry. In this review article, the progress of studying the mechanism of nanometric cutting is presented from the following aspects: the main methods for studying the nanometric cutting mechanism, nanometric cutting model, minimum achievable chip thickness, basic theory and key technologies of nanometric cutting on typical materials. The challenges and future development of the nanometric cutting mechanism study are also discussed.

nanometric cutting, cutting mechanism, nano-precision manufacturing, nano manufacturing

doi: 10.1360/N092014-00217