



单晶锆微纳米尺度切削特性实验研究

杨晓京, 刘 浩, 罗 良, 刘 宁

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500)

摘 要: 采用纳米压痕仪对单晶锆进行变载荷纳米划痕实验和恒定载荷纳米划痕实验, 分析不同划痕速度和不同载荷对单晶锆切削特性的影响规律; 采用原子力显微镜对样品表面进行扫描观测, 分析单晶锆微纳米尺度切削加工的材料去除机理。研究表明: 划痕速度分别为 10、20 和 50 $\mu\text{m/s}$ 时, 单晶锆(100)晶面脆塑转变临界切削力分别为 10.2、12.1 和 9.8 mN, 呈现先增大后减少的规律; 单晶锆(110)晶面脆塑转变临界切削力分别为 9.5、7.7 和 6.9 mN, 呈现随着划痕速度的增大而减少的规律; 单晶锆(111)晶面脆塑转变临界切削力分别为 8.3、8.5 和 8.9 mN, 划痕速度的改变对于切削力的变化基本没有影响; 当载荷分别为 10、30 和 50 mN 时, 单晶锆(110)晶面切削力分别为 0.3、4.5 和 12.5 mN。随着划痕速度的增大, 单晶锆不同晶面切削特性表现出明显的各向异性; 随着载荷的增大, 单晶锆切削力也相应增大, 切削力的波动范围也越来越大。本研究为分析单晶锆微纳米尺度塑性域切削提供理论基础和数据支持。

关键词: 单晶锆; 微纳米尺度; 变载荷纳米划痕实验; 恒定载荷纳米划痕实验; 切削特性; 切削力

文章编号: 1004-0609(2019)-07-1457-09

中图分类号: TG113.26; TH142.3

文献标志码: A

随着精密与超精密加工技术的迅速发展, 国防、军事、生物医学、航空航天等领域正发生着重大的变革^[1]。目前, 精密和超精密加工技术的加工精度已达到微米、纳米量级, 而且不断向原子级精度发展^[2]。单晶锆属于典型的硬脆性材料, 具有优越的物理和化学性能, 广泛应用于军事、医学、民用等行业^[3]。在加工单晶锆等硬脆性材料时, 为了得到超光滑的光学表面, 必须使切削加工中的材料去除量控制在微纳米尺度^[4-5]。而微米、纳米尺度的切削加工原理与规律和宏观切削加工差异很大, 由于尺度效应的影响, 宏观切削加工的切削机理不适用于微纳米量级的切削加工^[6]。因此, 有必要对单晶锆材料在微纳米尺度下的切削特性进行试验研究, 为其切削加工提供理论基础和数据支持。

目前, 国内外学者针对单晶锆等硬脆性材料的切削加工特性进行了大量的研究。LAI 等^[7]利用分子动力学模拟了单晶锆微纳米尺度切削, 对单晶锆切削特性进行了模拟研究, 得出了单晶锆在微纳米尺度切削过程中塑性流动具有挤压和犁沟现象的结论。赖敏^[8]

利用分子动力学模拟单晶锆的单点金刚石切削过程, 研究了单晶锆微纳米尺度切削特性, 得出了随着切削厚度的增加, 工件受到的法向力和切削力值均增加的结论。CHEN 等^[9]利用分子动力学模拟了单晶硅在微纳米尺度切削过程, 研究切削力的变化规律, 发现在相同的切削厚度下, 切削力随着刀具前角的增大而减小。毛杰伟^[10]利用分子动力学仿真模拟单晶锆纳米压痕试验, 发现在单晶锆所有晶面中(111)晶面的原子共价键结合力相对较强, 因此, 在受到载荷时该晶面的变形速度相对其他较慢。很多学者^[11-15]对单晶硅等硬脆材料切削特性做了大量的仿真研究和实验研究, 但对单晶锆切削特性实验研究相对较少, 因此, 有必要对单晶锆微纳米尺度切削特性进行实验研究。

本文利用纳米压痕仪和原子力显微镜对单晶锆(100)、(110)、(111)晶面进行了不同划痕速度的变载荷纳米划痕实验, 然后对单晶锆(110)晶面进行了不同恒定载荷的定速度纳米划痕实验, 研究单晶锆在不同划痕速度和不同载荷下的微纳米切削特性, 为单晶锆实际切削加工提供数据支持。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51765027); 昆明理工大学分析测试基金资助项目(2018M20162203001)

收稿日期: 2018-05-30; **修订日期:** 2018-12-20

通信作者: 杨晓京, 教授, 博士; 电话: 13668718025; E-mail: xjyang@vip.sina.com

1 纳米划痕实验切削模型

1.1 变载荷纳米划痕实验模型

微纳米尺度切削中, 切削力能很直观地反映材料的切削特性, 切削力主要指工件原子和刀具原子之间的相互作用力, 相互作用力的矢量叠加和就为切削力值。纳米划痕实验过程中, 切削深度和载荷是非常重要的参数。变载荷纳米划痕实验在一次实验中就能够研究硬脆性材料在不同切削厚度的材料去除变化情况, 以及切削力的变化情况。变载荷纳米划痕实验模型^[16]如图1所示。

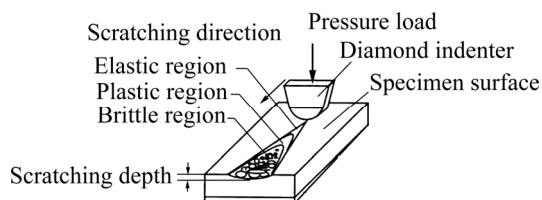


图1 变载荷纳米划痕实验模型

Fig. 1 Experimental model of nano scratch with variable load

从图1可以看出: 随着金刚石压头受到的压力载荷的增大, 划入深度也逐渐增加, 并且不同的切削距离对应不同的划入深度, 能够直观地确定材料是处于弹塑去除、塑性去除还是脆性去除阶段^[17-18]。随着划痕过程的开始, 金刚石压头受到的法向压力载荷由零慢慢增大, 此时材料处于弹塑去除阶段, 表面去除碎屑不明显或呈粉末状; 随着划痕过程的持续进行, 金刚石压头受到的载荷继续增大, 划入深度也继续增加, 此时材料处于塑性去除阶段, 表面滑, 去除碎屑呈细小颗粒状; 随着划痕过程的继续进行, 金刚石压头受到的载荷超过临界压力载荷, 划入深度超过临界深度, 此时材料去除方式为塑性去除转变为脆性去除, 表面出现裂纹, 碎屑呈大块状颗粒, 表面质量破坏严重。

1.2 恒定载荷纳米划痕实验模型

恒定载荷纳米划痕实验中, 施加载荷的大小对应着划痕深度的大小, 施加的载荷越大, 划痕深度越深。恒定载荷纳米划痕实验模型^[19]如图2所示。其中, F_t 为切向载荷; v 为前进速度。

从图2可以看出: 当金刚石压头受到的法向压力载荷 F_n 大于材料变形前所能承受的载荷时, 材料表面会出现一定的塑性变形^[20]。如果金刚石压头受到的法向压力载荷 F_n 小于临界载荷, 划痕深度 h_s 低于临界深

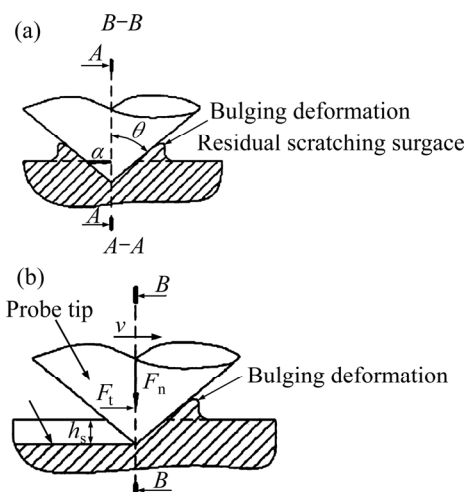


图2 恒定载荷纳米划痕实验模型

Fig. 2 Experimental model of nano scratch with constant load

度, 压头会在材料表面产生沟槽状划痕, 沟槽内表面质量光滑。如果金刚石压头受到的法向压力载荷 F_n 大于临界载荷, 那么划痕深度 h_s 大于临界深度, 压头会在材料表面产生沟槽状划痕, 沟槽内表面质量破坏严重。

2 纳米划痕实验过程

2.1 单晶锆试件准备

所有的单晶锆试件均在合肥科晶材料技术有限公司进行制备。对单晶锆试件进行单面化学抛光, 抛光后分别用酒精、醇溶液和清水对抛光面清洗去污, 用抛光面进行试验。

2.2 实验设备

实验采用的纳米压痕仪为美国 Agilent 公司生产的 Nano indenter G200 纳米压痕仪, 如图3所示, 其压头最大压深为 500 μm , 位移分辨率为 0.01 nm, 最大载荷为 500 mN, 载荷分辨率为 50 nN, 压头选用曲率半径为 50 nm 的三棱锥金刚石针尖(Berkovich)。实



图3 纳米压痕仪

Fig. 3 Nano indenter G200

验采用的原子力显微镜为 Veeco 公司生产的 Veeco Dimension 3100 原子力显微镜如图 4 所示, 其 Z 方向的分辨率小于 0.05 nm。



图 4 原子力显微镜
Fig. 4 Atomic force microscope

2.3 实验过程

实验首先将标记好号码的样品圆台放到加热台加热到指定温度, 涂上固体胶完成单晶锗样品的固定, 然后轻轻挤压样品, 去除固体胶和样品之间的气泡。然后将圆台从加热台上取下, 使其冷却, 如图 5 所示。

实验结束后, 把样品圆台再次放入到加热台加热, 将单晶锗样品取下, 并且使其冷却。冷却后用原子力显微镜对实验表面进行扫描表征。

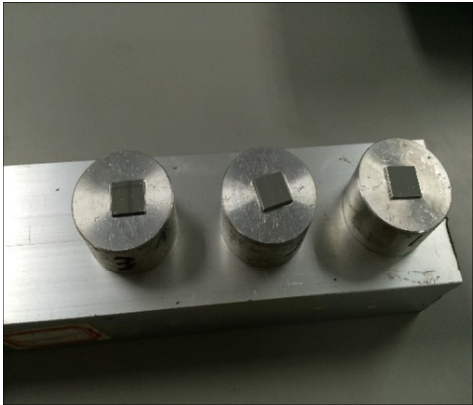


图 5 样品冷却
Fig. 5 Sample cooling

表 1 变载荷划痕实验参数

Scratching parameter	Parameter value
Scratched crystal surface	(100), (110), (111)
Scratching distance/ μm	420
Scratching speed/ $(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10, 20, 50
Load change rate/ $(\text{mN}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	0.33
Range of load variation/mN	0–100

表 2 恒定载荷划痕实验参数

Scratching parameter	Parameter value
Scratched crystal surface	(110)
Scratching distance/ μm	280
Scratching speed/ $(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10
Permanent load/mN	10, 30, 50

3 变载荷纳米划痕实验结果及分析

3.1 不同划痕速度下单晶锗(100)晶面切削特性分析

图 6 所示为单晶锗(100)晶面在不同划痕速度下的切削力-划痕长度曲线图, 图 7 所示为单晶锗(100)在不同划痕速度实验后的表面形貌图。

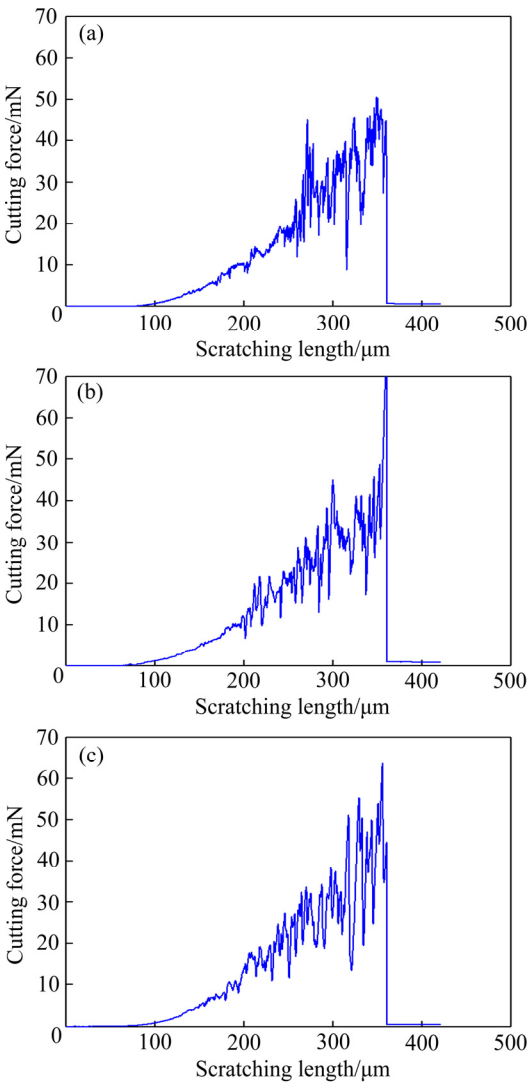


图 6 单晶锗(100)晶面不同划痕速度下的切削力-划痕长度曲线图
Fig. 6 Cutting force and scratching length curve of Ge(100) crystal plane at different scratching speeds: (a) 10 $\mu\text{m/s}$; (b) 20 $\mu\text{m/s}$; (c) 50 $\mu\text{m/s}$

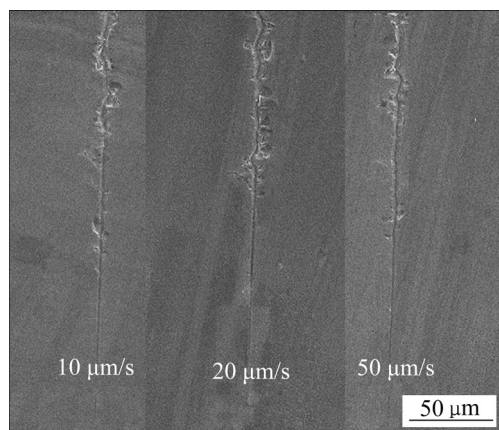


图7 不同划痕速度时单晶锗(100)晶面表面形貌图

Fig. 7 Surface topography of Ge(100) crystal plane at different scratching speeds

单晶锗变速度切削的切削力变化曲线图和表面形貌图能够很直观地反映出单晶锗在切削过程中切屑的去除阶段变化(弹塑去除、塑性去除、脆性去除)。从图6、图7可以看出,在实验初始阶段,切削力曲线为一条接近于零的平行线,表明材料表面发生弹性变形,此时施加的载荷较小;随着实验的继续进行,载荷逐渐增大,划痕深度也逐渐变深,此时材料表面去除方式为塑性去除,表面光滑,切削力曲线为一条线性变化的直线;随着实验继续,施加的载荷继续增加,划痕深度也继续加深,此时材料表面去除方式为脆性去除,压头和样品表面产生的振动变大,表面出现裂纹,材料表面被严重破坏,切削力曲线为一条上、下波动且波动越来越大的无规律的曲线。切削力曲线由线性变化规律变化为无规律时的切削力临界值就是材料去除方式由塑性去除转变为脆性去除时的切削力。

由图6可以得到:当划痕速度为10 μm/s时,脆塑转变临界切削力为10.2 mN;当划痕速度为20 μm/s时,脆塑转变临界切削力为12.1 mN;当划痕速度为50 μm/s时,脆塑转变临界切削力为9.8 mN。从而可以得出,划痕速度由10 μm/s增大到20 μm/s时,单晶锗(100)晶面脆塑转变临界切削力变大;划痕速度由20 μm/s增大到50 μm/s时,单晶锗(100)晶面脆塑转变临界切削力变小。随着划痕速度的增大,单晶锗(100)晶面脆塑转变临界切削力呈现一种先增大后减小的规律。

3.2 不同划痕速度下单晶锗(110)晶面切削特性分析

图8所示为单晶锗(110)晶面在不同划痕速度下的

切削力-划痕长度曲线图,图9所示为单晶锗(110)在不同划痕速度实验后的表面形貌图。

由图8、图9可以得到:当划痕速度为10 μm/s时,脆塑转变临界切削力为9.5 mN;当划痕速度为20 μm/s时,脆塑转变临界切削力为7.7 mN;当划痕速度为50 μm/s时,脆塑转变临界切削力为6.9 mN。从而可以得出,划痕速度由10 μm/s增大到20 μm/s时,单晶锗(110)晶面脆塑转变临界切削力变小,划痕速度由20 μm/s增大到50 μm/s时,单晶锗(110)晶面脆塑转变临界切削力也变小。单晶锗(110)晶面脆塑转变临界切削力呈现一种随着划痕速度的增大而减小的规律。

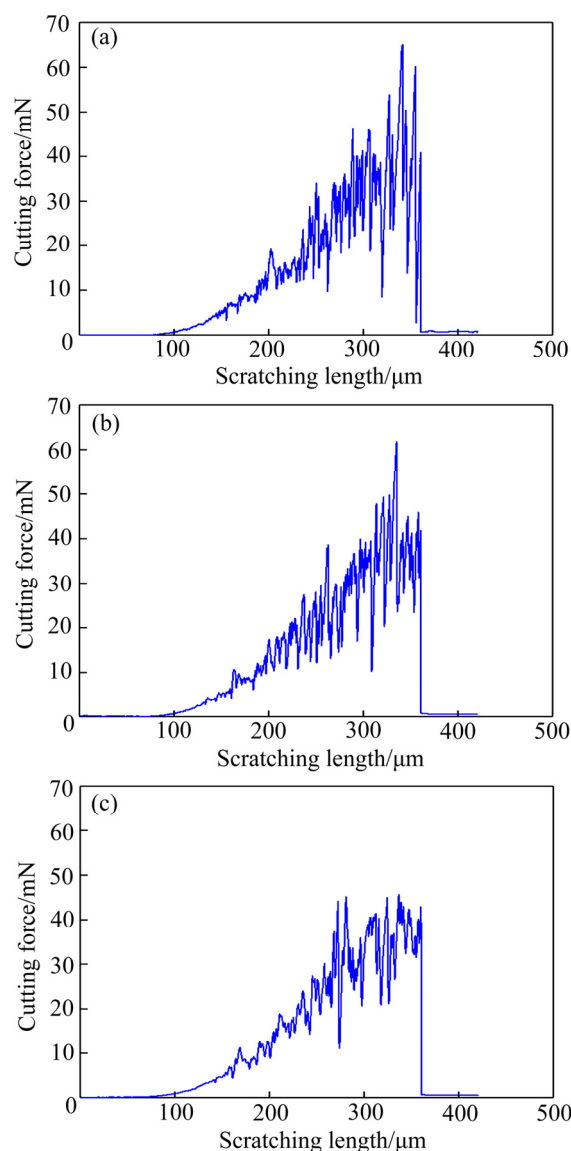


图8 单晶锗(110)晶面不同划痕速度下的切削力-划痕长度曲线图

Fig. 8 Cutting force and scratching length curves of Ge(110) crystal plane at different scratching speeds: (a) 10 μm/s; (b) 20 μm/s; (c) 50 μm/s

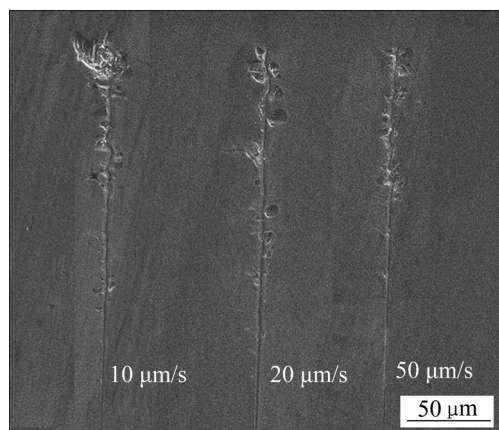


图9 不同划痕速度时单晶锗(110)晶面表面形貌图

Fig. 9 Surface topography of Ge(110) crystal plane at different scratching speeds

3.3 不同划痕速度下单晶锗(111)晶面切削特性分析

图10所示为单晶锗(111)晶面在不同划痕速度下的切削力-划痕长度曲线图, 图11所示为单晶锗(111)在不同划痕速度实验后的表面形貌图。

由图10、图11可以得到: 当划痕速度为 $10 \mu\text{m/s}$ 时, 脆塑转变临界切削力为 8.3 mN ; 当划痕速度为 $20 \mu\text{m/s}$ 时, 脆塑转变临界切削力为 8.5 mN ; 当划痕速度为 $50 \mu\text{m/s}$ 时, 脆塑转变临界切削力为 8.9 mN 。从而可以得出, 划痕速度由 $10 \mu\text{m/s}$ 增大到 $20 \mu\text{m/s}$ 时, 单晶锗(111)晶面脆塑转变临界切削力变大, 划痕速度由 $20 \mu\text{m/s}$ 增大到 $50 \mu\text{m/s}$ 时, 单晶锗(111)晶面脆塑转变临界切削力也变大。单晶锗(111)晶面脆塑转变临界切削力呈现一种随着划痕速度的增大而变大的规律, 但总体增大量很小, 基本可以忽略不计, 因此也可以说划痕速度的改变对单晶锗(111)晶面脆塑转变临界切削力的变化基本没有影响。

3.4 分析与讨论

在变载荷纳米划痕实验中, 随着划痕速度提高, 不同晶面在相同条件下表现出来的规律也各不相同, 速度对每个晶面的影响也各不相同。随着划痕速度的增大, 单晶锗(100)晶面脆塑转变临界切削力呈现一种先增大后减小的规律, 这是因为划痕速度增大, 单晶锗材料发生脆塑转变时的临界深度变深, 去除的材料厚度变大, 从而切削力也随之增大, 但划痕速度增大到超过一定值后, 单晶锗材料发生脆塑转变时的临界深度反而变小, 去除的材料厚度也变少, 从而切削力也随之减小^[21]。

单晶锗(110)晶面脆塑转变临界切削力随着划痕

速度的增大而减小, 这是因为随着划痕速度增大, 压头移动的速度变快, 减少了作用在样品表面的时间, 材料内部原子、分子的运动也就加快, 材料的去除更加容易, 从而切削力会随着速度的增大而减小。

划痕速度的改变基本上不影响单晶锗(111)晶面脆塑转变临界切削力的变化。单晶锗3个晶面在不同划痕速度下的切削力曲线无法形成统一的规律, 最重要的原因单晶锗材料本身具有的明显的各向异性, 每个晶面对载荷变化、速度变化的敏感度也不相同。其他的原因还有误差、环境变化、人员操作不完全一致等问题。

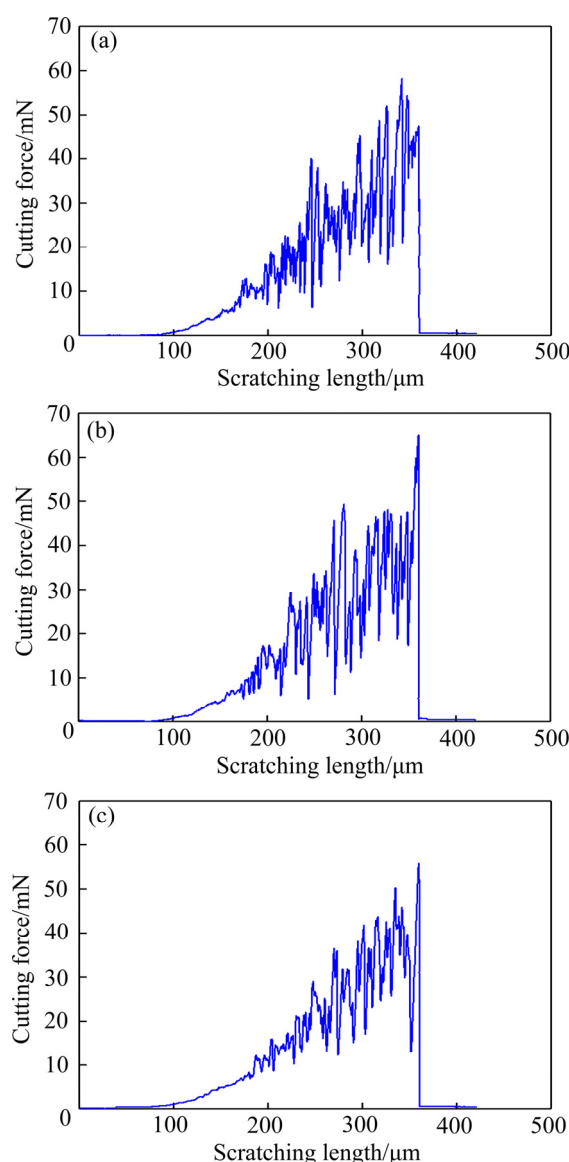


图10 单晶锗(111)晶面不同划痕速度下的切削力-划痕长度曲线图

Fig. 10 Cutting force and scratching length curves of Ge(111) crystal plane at different scratching speeds: (a) $10 \mu\text{m/s}$; (b) $20 \mu\text{m/s}$; (c) $50 \mu\text{m/s}$

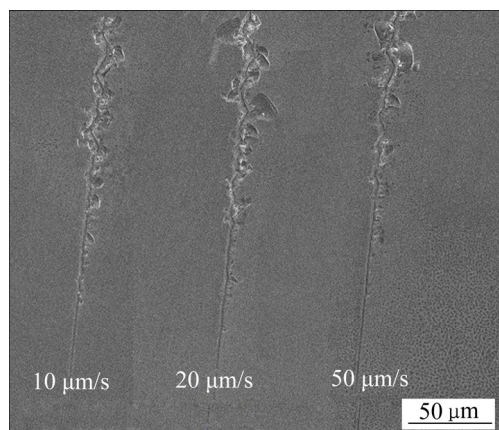


图 11 不同划痕速度时单晶锗(111)晶面表面形貌图

Fig. 11 Surface topography of Ge(111) crystal plane at different scratching speeds

从 3 个晶面的对比情况可以看出, 单晶锗(111)晶面发生脆塑转变临界切削力最小, 说明单晶锗(111)晶面在相同条件下更易于切削, 这是因为单晶锗(111)晶面就其他晶面而言硬度最低, 晶面间距比其他晶面的间距大, 在压应力的作用下, (111)晶面更容易发生滑移, 因此单晶锗(111)晶面在微纳米切削过程中产生的切削力最小, 最容易切削。

4 恒定载荷纳米划痕实验结果及分析

图 12 所示为单晶锗(110)晶面在划痕速度为 $10\ \mu\text{m/s}$ 下不同载荷的切削力-划痕长度曲线图, 图 13 所示为单晶锗(110)晶面在不同载荷时的表面形貌图。

载荷在纳米划痕实验中对切深, 是研究单晶锗材料切削特性的一个重要因素。从图 12 可以看出, $0\sim40\ \mu\text{m}$ 为压头加载到指定载荷后准备划入的过程, $240\sim280\ \mu\text{m}$ 为压头卸载实验划完的过程。当压头开始滑动时, 切削力突然增大并且在一个范围内上、下波动。随着划痕实验的进行, 切削力的波动相对平稳, 因此后半段的切削力数据最为真实可靠。从图 13 可以看出, 单晶锗材料进行纳米划痕实验后表面出现沟槽。当载荷为 $10\ \text{mN}$ 时, 表面划痕深度很浅, 没有明显的沟槽, 此阶段材料发生弹性变形; 当载荷为 $30\ \text{mN}$ 时, 材料表面出现明显的沟槽, 划痕深度和宽度有所增加, 沟槽两侧和刻划方向正前方都有一定的材料堆积, 沟槽内部表面较为光滑, 此阶段材料的去除方式为塑性去除; 当载荷为 $50\ \text{mN}$ 时, 材料表面沟槽的深度和厚度较之前有明显的增大, 沟槽两侧和刻划方向正前

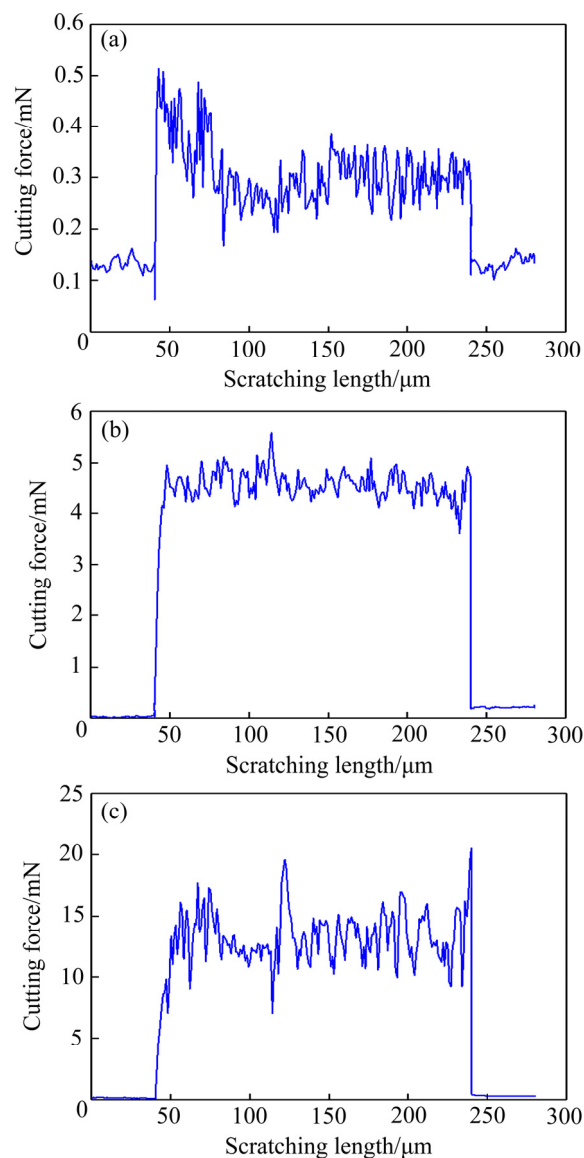


图 12 单晶锗(110)晶面在不同载荷时的切削力-划痕长度曲线图

Fig. 12 Cutting force and scratching length curves of Ge(110) crystal plane under different loads: (a) $10\ \mu\text{m/s}$; (b) $20\ \mu\text{m/s}$; (c) $50\ \mu\text{m/s}$

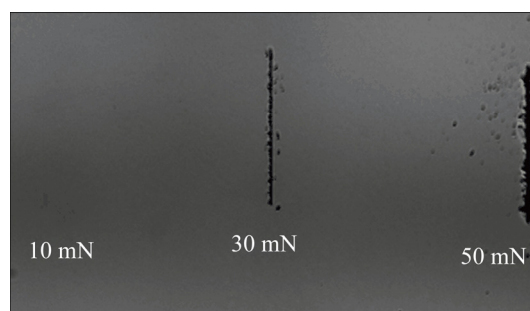


图 13 单晶锗(110)晶面在不同载荷时的表面形貌图

Fig. 13 Surface topography of Ge(110) crystal plane under different loads

方的材料堆积也增多,并且出现了小块状颗粒和裂纹,沟槽表面质量受到破坏,此阶段材料的去除方式为脆性去除。从上述可以得出,单晶锗(110)晶面发生脆塑转变时的临界载荷值的范围为30~50 mN。

从图12、图13可以得出,当载荷为10 mN时,切削力为0.3 mN,波动范围为0.05 mN;当载荷为30 mN时,切削力为4.5 mN,波动范围为0.5 mN;当载荷为50 mN时,切削力为12.5 mN,波动范围为2.5 mN。随着速度的增大,切削力也相应增大,切削力的波动范围也越来越大。这是因为在划痕过程中,压头会与样品表面产生振动,施加的载荷增大,切深也越来越深,去除材料厚度也随着增加,针尖产生的振动变大,因此切削力会随着载荷的增大而增大,波动范围也增大。

5 结论

1) 当划痕速度分别为10、20和50 $\mu\text{m/s}$ 时,单晶锗(100)晶面脆塑转变临界切削力分别为10.2、12.1和9.8 mN。随着划痕速度的增大,单晶锗(100)晶面脆塑转变临界切削力呈现一种先增大后减小的规律。

2) 当划痕速度分别为10、20和50 $\mu\text{m/s}$ 时,单晶锗(110)晶面脆塑转变临界切削力为9.5、7.7和6.9 mN。单晶锗(110)晶面脆塑转变临界切削力呈现一种随着划痕速度的增大而减小的规律。

3) 当划痕速度分别为10、20和50 $\mu\text{m/s}$ 时,单晶锗(111)晶面脆塑转变临界切削力为8.3、8.5和8.9 mN。划痕速度的改变对单晶锗(111)晶面脆塑转变临界切削力的变化基本没有影响。

4) 当划痕速度对单晶锗切削特性的影响也具有明显的各向异性。单晶锗(111)晶面在相同条件下更易于切削。

5) 当载荷分别为10、30和50 mN时,单晶锗(110)晶面切削力分别为0.3、4.5和12.5 mN。随着划痕速度的增大,切削力也相应增大,切削力的波动范围也越来越大。

REFERENCES

[1] BRINKSMEIER E, PREUSS W. Micro-machining[J]. Philosophical Transactions, 2012, 370(1973): 3973.

[2] TANIGUCHI N. Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,

1983, 32(2): 573-582.

- [3] 张亚萍, 席珍强, 张瑞丽, 张秀芳, 孙 法. 锗单晶材料的生长与应用[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2009, 23(1): 14-16.
- ZHANG Ya-ping, XI Zhen-qiang, ZHANG Rui-li, ZHANG Xiu-fang, SUN Fa. Growth and application of germanium single crystal materials[J]. Materials Report: Album of Nanometer and New Materials, 2009, 23(1): 14-16.
- [4] MIN L. Nanoindentation-induced phase transformation and structural deformation of monocrystalline germanium: A molecular dynamics simulation investigation[J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8(1): 1-9.
- [5] ARIF M, RAHMAN M, SAN W Y. Ultraprecision ductile mode machining of glass by micromilling process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2011, 13(1): 50-59.
- [6] 刘倩倩. 微纳米尺度表面残余应力的分子动力学研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2011.
- LIU Qian-qian. Molecular dynamics study on surface residual stress at micro and nano scales[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [7] LAI M, ZHANG X D, FANG F Z, WANG Y F, FENG M, TIAN W H. Study on nanometric cutting of germanium by molecular dynamics simulation[J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8(1): 13-13.
- [8] 赖 敏. 单晶锗纳米切削机理和切削极限的研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- LAI Min. Study on nano cutting mechanism and cutting limit of single crystal germanium[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [9] CHEN Y H, FANG F Z. Molecular dynamics investigation of cutting force in nanometric cutting of monocrystalline silicon[J]. American Journal of Nanotechnology, 2010, 1(2): 62-67.
- [10] 毛杰伟. 基于分子动力学单晶锗的切削加工工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- MAO Jie-wei. Molecular dynamics based monocrystalline germanium cutting technology research[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [11] 赵宏伟, 杨柏豪, 赵宏健, 黄 虎. 单晶硅纳米力学性能的测试[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1602-1608.
- ZHAO Hong-wei, YANG Bai-hao, ZHAO Hong-jian, HUANG Hu. Measurement of mechanical properties of monocrystalline silicon nanocrystalline[J]. Optical Precision Engineering, 2009, 17(7): 1602-1608.
- [12] ZHU P Z, FANG F Z. Molecular dynamics simulations of

- nanindentation of monocrystalline germanium[J]. *Applied Physics A*, 2012, 108(2): 415–421.
- [13] 唐玉兰, 梁迎春, 霍德鸿, 程 凯. 单晶硅和单晶铝纳米切削过程比较[J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(6): 39–42.
- TANG Yu-lan, LIANG Ying-chun, HO De-hong, CHENG Kai. Comparison of nano-cutting processes of single crystal silicon and single crystal aluminum[J]. *Journal of Harbin University of Technology*, 2004, 36(6): 39–42.
- [14] ARIF, MUHAMMAD, ZHANG X, MUSTAFIZUR RAHMAN, SENTHIL KUMAR. A predictive model of the critical undeformed chip thickness for ductile-brittle transition in nano-machining of brittle materials[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013, 64(4): 114–122.
- [15] 毛杰伟, 刘文浩, 王增鹏. 基于分子动力学单晶锗的纳米压痕特性分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2015(6): 454–457.
- MAO Jie-wei, LIU Wen-hao, WANG Zeng-peng. Nanoindentation analysis based on molecular dynamics single crystal germanium[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015(6): 454–457.
- [16] 王 栋, 冯平法, 张承龙, 张建富. KDP 晶体各向异性对划痕特性影响的实验研究[J]. 人工晶体学报, 2012, 41(3): 28–32.
- WANG Dong, FENG Ping-fa, ZHANG Cheng-long, ZHANG Jian-fu. Experimental study on the effect of anisotropy of KDP crystal on scratch characteristics[J]. *Acta Lens Artificialis*, 2012, 41(3): 28–32.
- [17] LEE S H. Analysis of ductile mode and brittle transition of AFM nanomachining of silicon[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 61: 71–79.
- [18] HAN X S, HU Y Z. Analysis micro-mechanism of burrs formation in the case of nanometric cutting process using numerical simulation method[J]. *Science in China*, 2007, 50(2): 129–137.
- [19] 王小月. 单晶硅纳米压痕/划痕过程的有限元仿真分析与实验研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- WANG Xiao-yue. Finite element simulation and experimental study on nanoindentation/scratch process of monocrystalline silicon[D]. Jilin: Jilin University, 2012.
- [20] LIU Y R, YANG X J, YANG C M. Experimental research on mechanical characteristics in the process of nanoscale sliding contact[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 275/277: 1769–1774.
- [21] 杨晓京, 刘 浩, 赵 彪, 刘 宁. 切削速度对单晶锗脆塑转变的影响[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(4): 80–84.
- YANG Xiao-jing, LIU Hao, ZHAO Biao, LIU Ning. Effect of cutting speed on brittle-plastic transition of single crystal germanium[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2018, 48(4): 80–84.

Experimental study on micro-nano scale cutting characteristics of single crystal germanium

YANG Xiao-jing, LIU Hao, LUO Liang, LIU Ning

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China)

Abstract: The variable load and constant load nano-scratch experiments of single crystal germanium were carried out by using nano-indentation apparatus. The effects of different scratch speeds and different loads on the cutting characteristics of single crystal germanium were analyzed. The surface of the sample was scanned by atomic force microscopy and the material removal mechanism of micro-nano-scale cutting of single crystal germanium was investigated. The results show that when the scratch speeds are 10, 20 and 50 $\mu\text{m/s}$, the critical cutting forces of the brittle-ductility transition of Ge(100) surface are 10.2, 12.1 and 9.8 mN respectively, showing a pattern of increasing first and then decreasing. The critical cutting forces of Ge(110) crystal surface are 9.5, 7.7 and 6.9 mN, presenting a regularity that the critical cutting force decreases as the scratch speed increases. The critical cutting forces of Ge(111) are 8.3, 8.5 and 8.9 mN, showing that the alteration of the scratch speed has no effect on the change of the cutting force. Moreover, when the loads are 10, 30 and 50 mN, the cutting forces of Ge(110) are 0.3, 4.5 and 12.5 mN, respectively. Therefore, with the increase of scratching speed, the cutting behavior of single crystal germanium shows obvious anisotropy. As the load increases, the cutting force of the single crystal germanium augments accordingly, and the fluctuation range of the cutting force becomes larger and larger, which provides data support for the analysis of the micro-nano-scale plastic domain cutting of single crystal germanium.

Key words: single crystal germanium; micro-nano-scale; variable load nano-scratch test; constant load nano-scratch test; cutting characteristics; cutting force

Foundation item: Project(51765027) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2018M20162203001) supported by Analysis and Testing Fund of Kunming University of Technology, China

Received date: 2018-05-30; **Accepted date:** 2018-12-20

Corresponding author: YANG Xiao-jing; Tel: +86-13668718025; E-mail: xjyang@vip.sina.com

(编辑 龙怀中)