

SiC硬脆材料纳米切削的亚表层损伤与塑性去除机理探析

陈晶晶* 陈莎 朱海燕 袁军军 罗泽宇

南昌理工学院机械表/界面摩擦磨损与防护润滑研究中心,南昌,330044

摘要:采用分子动力学法与微观切削实验法对SiC塑性去除机理展开研究。研究发现,切削弹性期的SiC受挤压诱导产生的晶格高畸变效应导致原子矢量位移出现与切削运动方向相反的回流运动趋势,而切削中期弹塑性变形区的原子矢量位移出现涡流运动趋势。研究结果表明,分子动力学模拟的SiC纳米切削已加工表面的塑性变形介导的非晶层覆盖、立方结构向闪锌矿结构的相变转化、剪切带与裂纹形成同实验结果保持一致,已加工表面区的台阶式随机表面粗糙度随着切削温度和速度的增加而增大。切削塑性去除机理为:刀具和工件紧密接触区的高温高应力会诱使剪切带从前刀面流出,形成切削形貌构型。随着切削距离和切削速度的增加,亚表层损伤度逐渐减小,而随着切削温度和深度的增加,亚表层损伤度逐渐增大;随着切削速度的增加,切屑形貌由卷积形态逐渐变成条状形态;随着体系温度的上升,切屑形貌以卷积形态为主。

关键词:微结构演化;分子动力学模拟;塑性去除;相变转化;硬脆材料

中图分类号:TH114.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mechanism Analysis of Material Remove and Subsurface Layer Damages for SiC during Nanocutting Processes

CHEN Jingjing* CHEN Sha ZHU Haiyan YUAN Junjun LUO Zeyu

Mechanical Friction Wear and Protective Lubrication Research Center on Surface/Interface, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, 330044

Abstract: The plastic removal mechanism of SiC was investigated by molecular dynamics method and micro-cutting experiments. It is found that the high lattice distortion effectiveness of SiC materials induced by extrusion force may lead to the reverse flow trend of the atomic vector displacement in elastic stages during nanoscale cutting, and the eddy current trend of the atomic vector displacement occurs in elastoplasticity deformation stages. The plastic deformation-mediated amorphous layer coverages, the phase transformation from cubic structure to wurtzite structure, and the formation of shear bands and cracks on the machined surfaces of SiC nanocutting obtained from molecular dynamics simulations are consistent with the experimental results. The random surface roughness in machined surface areas is easy to form a stepped type, which increases as cutting temperature and speed increases. The plastic removal mechanism in nanocutting processes is that the high pressure and high temperature induced by loads in closely contact areas between cutting tool and SiC workpiece result in the shear band flow outflow from the rank face and the cutting morphology and configuration are formed finally. The subsurface damage degree gradually decreases with cutting distance and cutting speed increases. Nevertheless, the subsurface damage degree gradually increases with the increase of cutting temperature and depth. Furthermore, with cutting speed increase, chip morphology of SiC materials gradually changed from convolution state to bar state, and the chip morphology is of mainly convolution as the temperature of system increases.

Key words: micro-structural evolution; molecular dynamics simulation; plastic remove; phase transition; hard brittle material

收稿日期:2025-02-07

基金项目:国家自然科学基金(62563030);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2402622、GJJ2402616);南昌理工学院科研课题(NLZK2418、NLZK2446);基于“竞赛+项目”的机械类学生双创能力培养体系构建项目(NLJG-24-21)

0 引言

SiC具有大禁带宽度^[1]、高热导率^[2-4]、高击穿电场强度^[5-7]、高力学性能^[8]、低介电常数^[9]等优异性能,被广泛应用于航空航天、生物医药、集成电

路、类脑芯片等领域。目前,超精密切削加工半导体 SiC 器件的超光滑表面完整性方法主要包括超精密磨削、抛光以及单点金刚石车削等^[10-14]。与超精密磨削和抛光相比,单点金刚石车削所需要的工序更少、加工效率更高,被证实为超精密加工具有超光滑表面特性 SiC 器件的一种有效策略^[12-13]。然而,实践表明:采用单点金刚石超精密切削加工 SiC 硬脆材料时极易造成裂纹萌生、拓展、繁殖、晶粒脱落等加工缺陷,极大降低 SiC 光电器件的长寿命耐久性服役性能。由于 SiC 具有超高硬度特性,在纳米切削加工制造中极易造成金刚石刀具刃口与工件接触间的应力高集中和应变显著增大,最终导致刀具出现急剧磨损,这对 SiC 器件超光滑表面完整性及亚表面损伤程度造成极大影响,显著降低了其切削加工性能。相关文献对 SiC 材料微观去除机理的研究主要集中于有限元法、分子动力学法(MD)、纳米划痕实验法。有限元法和纳米划痕实验法难以捕捉 SiC 材料切削的原子迁移轨迹及详细微结构演化特征,而 MD 法不仅可降低实验法对测试样品和工况内外环境的极高要求及所耗人财物高昂代价,而且还可从原子层面知悉纳米切削加工半导体材料的去除微观机制,及从切削加工工艺角度来降低纳米加工 SiC 器件亚表层的损伤。

文献表明,国内外学者对 SiC 硬脆材料的研 究聚焦于脆塑转变与材料去除机理^[14-16]、亚表面损伤行为^[17-18]等。GOEL 等^[19]在超精密加工车床上对单晶 6H-SiC 进行加工,获得了表面粗糙度为 9.2 nm 的超光滑表面,并通过拉曼显微镜观察到切削中的脆塑转变微观迹象,结果表明,金刚石单点切削加工脆性材料的塑性变形是延性加工的先决条件。WANG 等^[20]对单晶 6H-SiC 进行超精密切削加工时发现,加工表面的亚表层产生了纳米级裂缝,并观察到裂缝的扩展方向会发生突变,且裂缝尖端附近没有明显的晶格原子紊乱。田东禹^[21]研究了单晶 3C-SiC 在单点金刚石刀具切削作用下的切削机制,指出在延性域切削下,非晶层厚度随着切削深度的增加而增大;当脆塑转变发生后,随着切削深度的增加,非晶层厚度逐渐减小并消失。PIAO 等^[22]采用 MD 模拟研究了含空位缺陷的单晶 SiC 衬底的去除机理,探讨了金刚石磨料的磨损机理。AI 等^[23]用 MD 模拟单颗金刚石磨削含缺陷 SiC 单晶的过程,指出在 4H-SiC 磨削过程中存在一个弹性变形区间,区间内的缺陷会被填充,区间外的缺陷不会被填充。TIAN

等^[24]用 MD 模拟法研究了 4H-SiC 和 6H-SiC 材料的 C 面和 Si 面在一系列刮擦试验中材料的去除和相关的亚表面缺陷。

本文深入研究切削速度、深度、温度、刀具几何参数变化对 SiC 切削性能、径向分布函数、微结构演化、亚表层损伤、应力、配位数、原子矢量位移、表面粗糙度的影响关系。

1 分子动力学计算

图 1 所示为采用 MD 法建立的纳米尺度 SiC 切削三维物理模型,SiC 基底 X、Y、Z 轴晶向分别设置为 $[11\bar{2}]$ 、 $[\bar{1}10]$ 、 $[111]$ 。表 1 所示为分子模拟时所设置的基本参数。模拟前,将 SiC 基底划分为三层,即固定层、恒温层、牛顿层,恒温层和牛顿层统称为运动层,固定层原子位移和力被限制为零。采用 Langevin 方法控制恒温层原子温度为 300 K。所建 SiC 原子尺度模型 X、Y 轴采用周期性边界条件,Z 轴采用非周期边界条件。模型初始条件与参数设置后,采用最小能量法优化体系晶体结构,然后在 NVE 系综下弛豫 400 ps,时间步长为 1 fs,体系的结构、温度、能量达到稳定平衡态。待平衡后,刀具以不同切削速度沿 Y 轴负方向水平运动。势函数的选择对分子计算结果准确性起关键作用。采用 Tersoff 势函数描述 SiC 内部原子间的相互作用力。

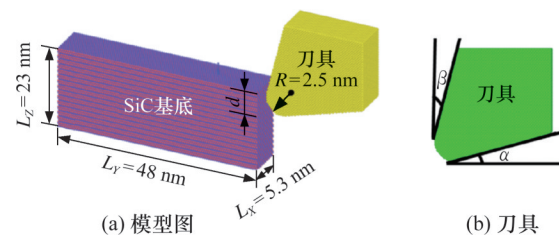


图 1 SiC 纳米切削分子动力学模型

Fig.1 Molecular dynamic model of SiC material on nano cutting process

表 1 SiC 纳米切削仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameter setting of SiC material on nano cutting process

模拟条件	参数设置
模型尺寸 $L_x \times L_y \times L_z$	5.3 nm \times 48 nm \times 23 nm
切削速度 v	50, 100, 200, 250, 400 m/s
切削深度 d	2.0, 2.6, 3.5, 4.4 nm
半径 R	2.5 nm
恒温层 T	1, 150, 300, 500, 800 K
前角 β	0°, 15°, 25°
后角 α	0°, 15°, 25°
时间步长	1 fs

2 结果与分析

2.1 纳米切削力分析

切削速度 v 、切削深度 d 以及刀具几何参数 (α, β) 和温度 T 对 SiC 水平切削力和法向力的影响分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可知, 在

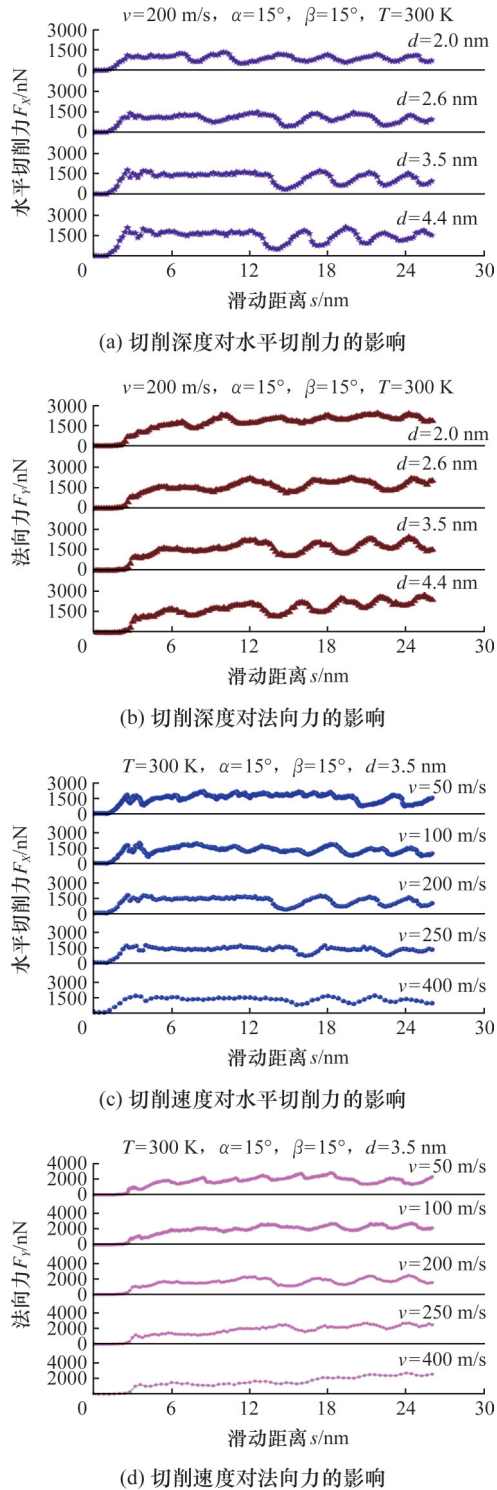


图 2 切削速度和切削深度对 SiC 水平切削力和法向力的影响

Fig.2 Effect of cutting speed and cutting depth on SiC horizontal cutting force and normal force

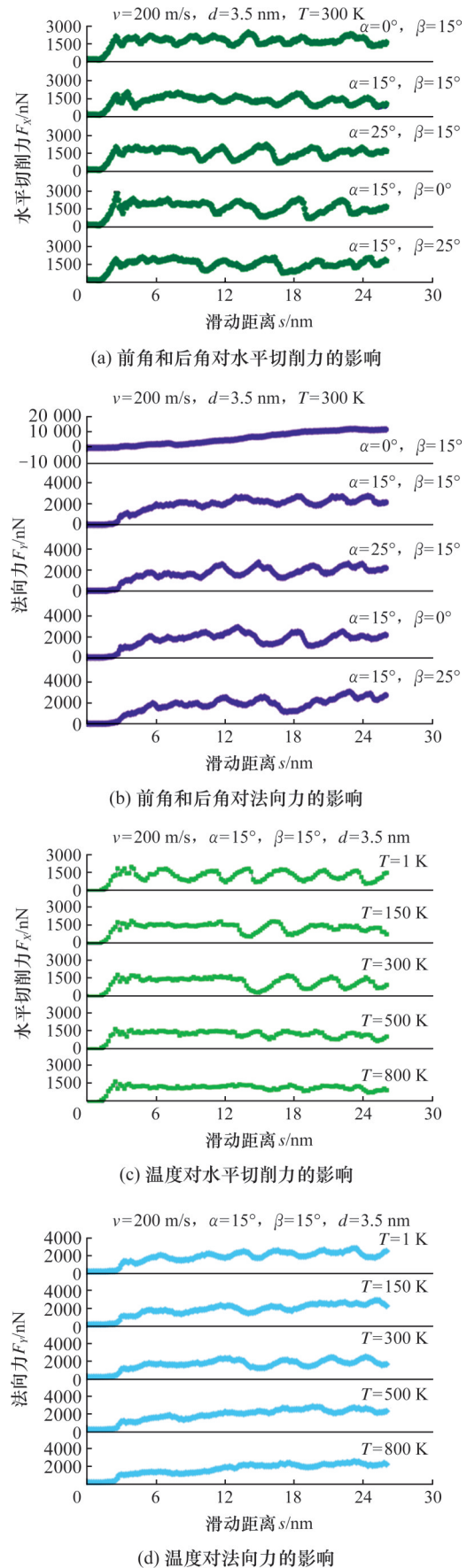


图 3 刀具几何参数和温度对 SiC 水平切削力和法向力的影响

Fig.3 Effects of tool geometry parameters and temperature on SiC horizontal cutting force and normal force

滑动距离 3 nm 之前,水平切削力和法向力与滑动距离成线性关系,随着滑动距离的增大而增大,此时,纳米切削初期,SiC 基底晶格以受挤压的弹性变形为主;随后,在滑动距离为 3~11 nm 间,SiC 受切削载荷诱导产生的变形以弹塑性变形和塑性变形混合为主,此时水平切削力曲线呈现波动幅度很小的平稳期,法向力曲线以近似线性关系增大;滑动距离 11 nm 之后,纳米切削 SiC 基底以塑性变形为主,刀具和基底紧密接触区产生的高应力推动剪切带滑动形成切屑,并沿前刀面流出。此外,SiC 基底塑性变形以非晶原子堆积成簇、位错缺陷萌芽与增殖、立方晶体结构向闪锌矿结构的相变转化为主。稳定切削期的 SiC 水平切削力和法向力曲线的波动幅度较弹塑性期的大,展现出简谐振动的规律。

为更好地对比切削中期和稳定期的各切削变量对 SiC 纳米切削过程受力的影响,图 4 定量出了平均水平切削力和平均法向力的差异性。由图 4a 可知,随着切削深度从 2.0 nm 增加到 4.4 nm,SiC 受到的水平切削力增加幅度比法向力的大,增幅分别为 55.9%、3.34%;由图 4b 可知,随着温度从低温 1 K 升到高温 800 K,SiC 受到的水平切削力和法向力逐渐减小,其下降幅度分别为 7.32%、11.96%;由图 4c 可知,随着高速切削速度的增加,SiC 受到的水平切削力和法向力逐渐减小,下降幅度分别为 10.72%、17.38%。可见,纳米切削硬脆材料 SiC 受到切削速度、深度、刀具几何参数的显著影响。

2.2 微结构演化与亚表层损伤分析

切削参数对 SiC 纳米切削微结构和亚表层损伤程度影响如图 5 所示。由图 5 可知,纳米切削 SiC 时,基底存在相变转化,即立方晶体结构向闪锌矿晶体结构转变,且已加工表面覆盖了一定厚度的非晶层,刀具圆弧刃与基底紧密接触区在挤压应力诱导下产生一定厚度的非晶原子数和剪切带。随着切削距离的推进,非晶原子数在剪切带作用下沿着刀具前刀面流出,变成切屑原子。由图 5a 可知,随着滑动距离 s 的增加,SiC 受切削载荷诱导产生卷积形态,在内应力驱动下,会诱导硬脆材料形成剪切带,进而在水平切削力推动下,前刀面卷积形态的切屑会产生崩碎。然而,随着切削速度 v 的增加(图 5b),切屑形貌由卷积态逐渐变成条状态。随着体系温度 T 的上升(图 5c),切屑形貌以卷积形态为主,且已加工表面和切削表面的非晶原子数显著增多。此外,由图 5d

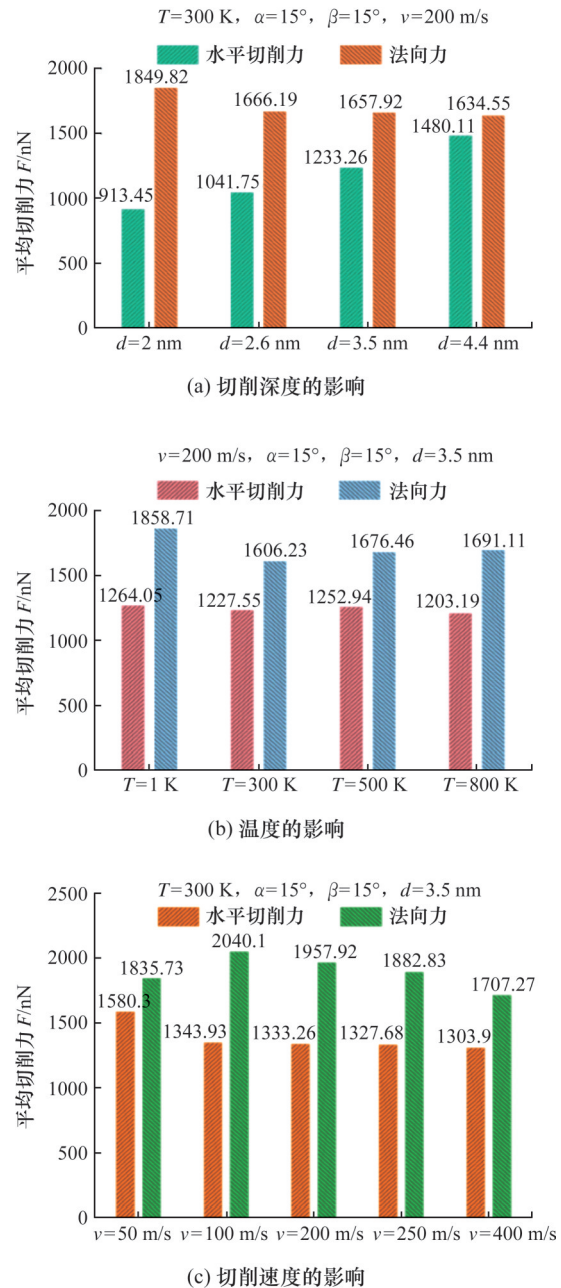


图 4 切削参数对 SiC 平均水平切削力和平均法向力的量化影响

Fig.4 Quantitative influence of cutting parameters on SiC mean cutting force and normal force

和图 5e 可知,随着刀具前角或后角的增加,切屑形貌主要以卷积态向条状态转变,且切屑形态内部的相变转化和剪切带数量也明显增多。

从图 5 中可明显看出,切削参数的变化会显著影响 SiC 已加工表面亚表层损伤程度。随着切削距离和切削速度的增加,亚表层损伤度逐渐减小,而随着切削温度的升高,亚表层损伤度逐渐增大。另外,刀具前角和后角的单调性变化不会使得 SiC 亚表层损伤度呈现相应的单调性增加或减小趋势,反而是当前角和后角为 15° 时,SiC 亚表层损伤度最小。可见,合理设计刀具前角和后角

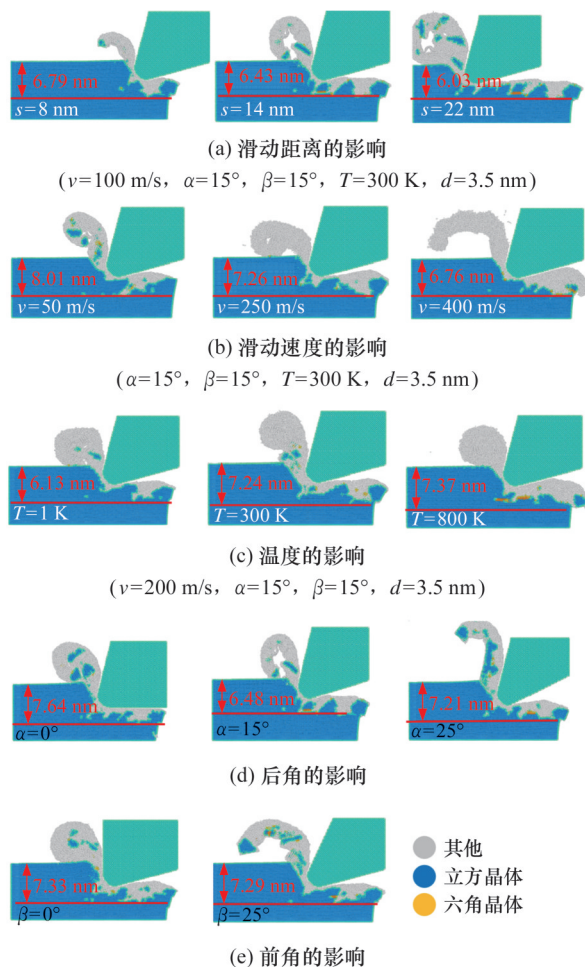


图5 切削参数对SiC硬脆材料微结构演化和亚表层损伤影响

Fig.5 Effect of cutting parameters on micro-structure evolution and subsurface damage of SiC

会显著影响纳米切削硬脆材料的切削性能、切削形貌、亚表层损伤情形。由图5还可知,在已加工表面,由于体系表面原子层的自由能和受挤压产生的应变能的耦合影响,切削产生的非晶原子会因内应力产生的高温效应而发生团簇,产生烧结现象,形成块状非晶层,此非晶层阻碍了亚表层位错缺陷的滑移与增殖,有利于位错发生湮灭,限制其延展性上升。

切削参数对SiC硬脆材料径向分布函数的影响如图6所示,可知,切削参数变化对径向分布函数峰值影响显著。随着切削距离的增加,径向分布函数峰值逐渐下降,且下降程度逐渐减小。当温度从低温1 K升到800 K时,其径向分布函数峰值陡然下降,表明SiC基底产生无序化非晶原子数越多,晶格受损程度越加严重,随着温度逐渐升高,径向分布函数下降幅度变缓。然而,在切削速度从50 m/s到400 m/s或切削深度从2 nm到4.4 nm时,径向分布函数下降幅度较小,有着均匀性

下降趋势,表明高速400 m/s产生的非晶无序化程度更大,这与图5展示的微结构演化程度一致。径向分布函数随着前角或后角的增加而呈现下降趋势,但下降幅度非常小,表明刀具几何形状变化影响SiC非晶无序化的程度十分有限,主要影响切削屑形貌和亚表层损伤程度。

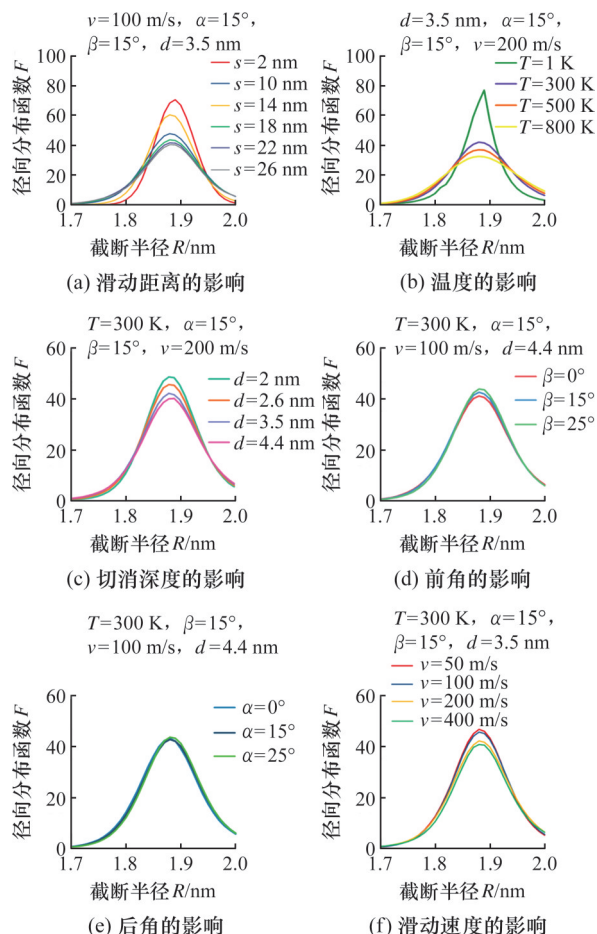
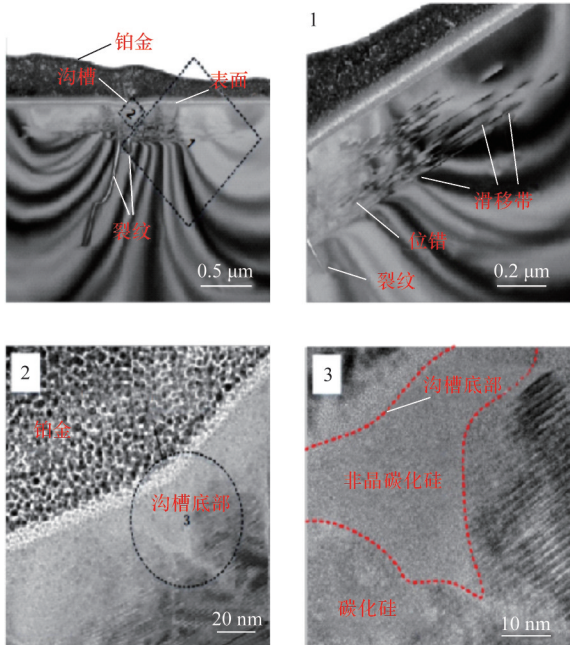


图6 切削参数对SiC硬脆材料径向分布函数影响

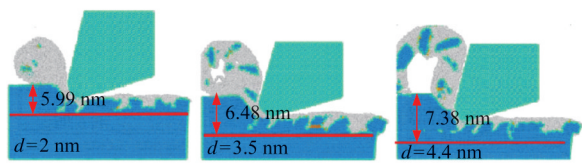
Fig.6 Effect of cutting parameters on radial distribution function of SiC with hard and brittle features

图7为纳米压头刀具在SiC表面滑动一定距离后的透射电子显微镜图^[24],及其与纳米切削SiC基底的表层微观规律的对比。由图7b可知,随着切削深度的增加,SiC纳米切削的亚表层损伤程度逐渐增加,且切削形貌形态由卷积形态向条状形态转变。此外,切削形貌的剪切带也逐渐增加,形成更多的崩碎切削。从图7c中可知,随着滑动距离的增加,已加工表面塑性区形成明显的非晶层和立体晶体结构向闪锌矿晶体结构发生的相变转化,并产生一定数量的裂纹,此模拟结果同文献^[24]实验结果一致。另外,在刀具前刀面和SiC工件紧密接触区产生裂纹拓展,且形成较显著的立体晶体结构向非晶层切削形态转变的剪切带。随着切削距离的增加,切削形貌主要由

非晶层原子构成,且切削卷积形态不断累积,形成滚雪球式的切削形态。在切削中,切削碳化硅产生的类表面台阶结构与文献[25](图 7e)一致。

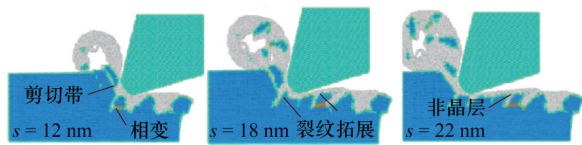


(a) 实验结果^[24]



(b) 切削深度对亚表层的影响

($v=100\text{ m/s}$, $\alpha=15^\circ$, $\beta=15^\circ$, $T=300\text{ K}$)



(c) 滑动距离对亚表层的影响

($v=100\text{ m/s}$, $\alpha=15^\circ$, $\beta=15^\circ$, $T=300\text{ K}$, $d=3.5\text{ nm}$)



(d) 表面台阶($s=26\text{ nm}$)

(e) 文献[25]硅切削表面

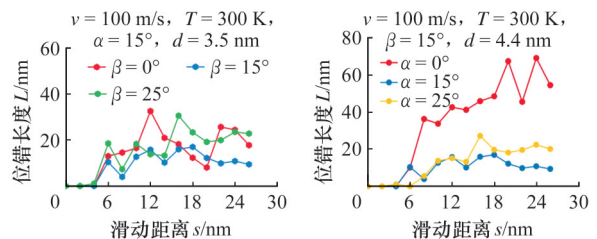
图 7 SiC 硬脆材料实验与模拟结果对比

Fig.7 Comparison of experimental and simulated results of SiC hard and brittle materials

2.3 塑性去除分析

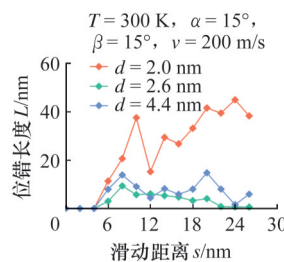
切削参数对 SiC 硬脆材料位错总长和温度的影响如图 8 所示,可知,刀具切削速度、深度、几何参数对切削 SiC 位错总长和温度的影响有着显著

差异。在已加工表面塑性区,随着滑动距离的增加, SiC 切削产生的位错总长与刀具前角、后角未呈现单调性关系,而在刀具后角 $\alpha=0^\circ$ 时, SiC 切削位错总长最大,其次是 $\alpha=15^\circ$,最后才是 $\alpha=25^\circ$ 。由于位错间的耦合反应和位错与非晶原子团簇的相互作用,导致 SiC 纳米切削位错总长随着压深的增加呈现减小趋势。由图 8d~图 8f 可知,随着切削深度和速度的增加, SiC 切削温度升高,表明高温导致材料软化会诱导材料内原子间相互作用加强,使温度上升更快。相变结构内在的微观结构决定了其在切削中的塑性变形方式。这种相变结构中的微观结构可以通过配位数来具体分析。切削参数对 SiC 硬脆材料相变类型和位移幅度的影响如图 9 所示。观察图 9a 和图 9b 可知,在 SiC 已加工表面,配位数小于 4 的区域主要分布在表层和非晶层处,少部分非晶层和相变转化区域的配位数大于 4。随着切削速度和温度的增加,切削形貌的配位数主要以小于 4 为主。随着刀具几何参数后角的增加,前刀面和切削形貌紧密接触区及刀具圆弧半径和 SiC 基底紧密接触区的配位数以小于 3 为主,而切削形貌内部中

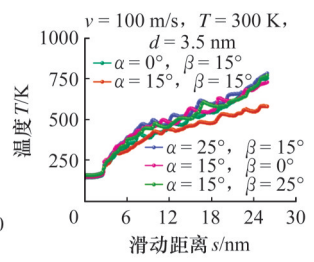


(a) 前角对位错总长的影响

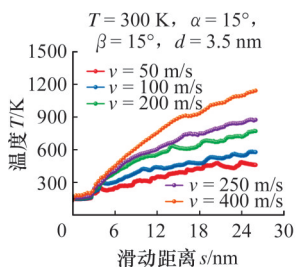
(b) 后角对位错总长的影响



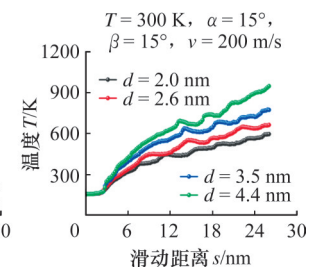
(c) 切削深度对位错总长的影响



(d) 前角和后角对温度的影响



(e) 切削速度对温度的影响



(f) 切削深度对温度的影响

图 8 切削参数对 SiC 硬脆材料位错总长和温度影响

Fig.8 Effect of cutting parameters on dislocation length and temperature of SiC hard and brittle materials

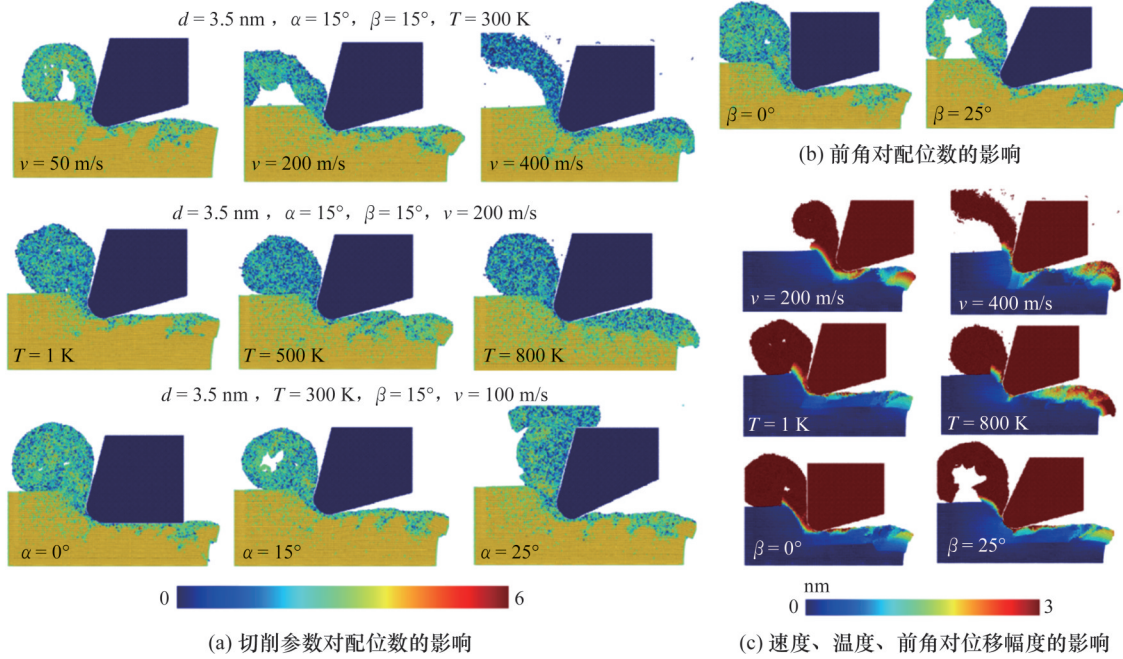


图9 切削参数对SiC硬脆材料相变类型和位移幅度的影响

Fig.9 Effect of cutting parameters on phase transition and displacement amplitude of SiC hard and brittle materials

间和相变区域的配位数以小于4为主。由图9c可知,切削形貌区的位移幅度最大,与切削速度、切削深度、几何参数的增加无单调性变化趋势。然而,在已加工表面区, SiC 切削表面的位移幅度随着切削速度和温度的增加而逐渐增大,其中,塑性回流区的位移幅度最大。此外,随着刀具前角的增加,已加工表面区的位移幅度也相应增加,但增加幅度较小。

为更好地了解纳米切削 SiC 的原子位移矢量迁移分布状态,图 10 给出原子位移矢量随切削速度、深度、刀具几何参数的变化分布情形。观察图 10 可知,在 SiC 纳米切削的弹性期,即 SiC 晶格受挤压产生晶格畸变时,原子矢量位移出现向右水平运动的回流趋势;在切削 SiC 中期的弹塑性变形区,原子矢量位移出现涡流式的运动趋势;在切削 SiC 稳定期的塑性变形区,原子矢量位移运动轨迹向切削正前方运动; SiC 基底与刀具紧密接触区的原子矢量位移运动方向与水平方向保持 45° 的倾斜角。此外,随着切削速度和温度的增加, SiC 纳米切削弹性期的原子矢量位移的回流运动趋势更加显著;随着刀具几何参数前角和后角的增加,切削中期的弹塑性区原子矢量位移的涡流式运动趋势也更加显著。

切削参数对 SiC 硬脆材料切削方向的应力量化影响如图 11 所示。由图 11a~图 11c 可知,在滑动距离 3 nm 前, SiC 硬脆材料应力呈线性递增关系;在滑动距离超过 3 nm 后, SiC 硬脆材料应力呈

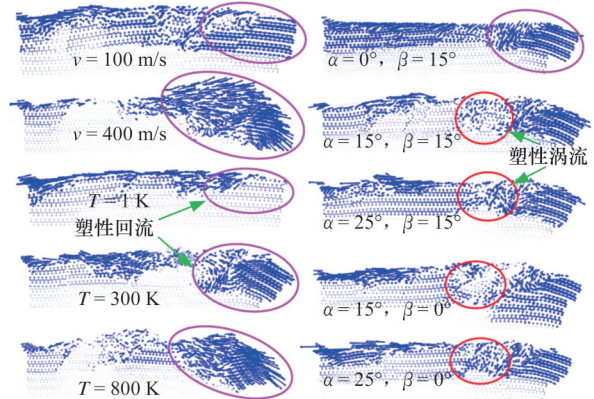


图10 切削参数对SiC硬脆材料原子迁移轨迹影响

Fig.10 Effect of cutting parameters on atomic migration trajectories of SiC hard and brittle materials

波动式的增加与下降趋势;随着切削深度的增加,由于切削载荷增大,导致 SiC 基底应力波动幅度越来越大;随着温度的升高, SiC 基底应力波动幅度逐渐减弱。此外,随着刀具几何参数前角和后角的增大, SiC 基底应力波动幅度不呈单调性变化。相反,在刀具前角和后角等于 15° 时, SiC 基底应力随着滑动距离的增加下降幅度最大。由图 11e~图 11f 可知,随着切削温度和速度的增加, SiC 基底平均应力逐渐增大,增幅分别为 21.75%、8.79%;随着切削深度的增大, SiC 基底平均应力也逐渐增大,增幅为 56.69%。

图 12 为不同切削参数下 SiC 硬脆材料应力分布云图,可知, SiC 基底与刀具间紧密接触区集中了高应力,高应力集中产生的高温会诱导剪切带沿着前刀面流出,形成切屑。此外,随着切削速

度的增加,紧密接触区的高应力集中逐渐减弱。在低温和高温下,紧密接触区也更容易产生应力集中,会促进 SiC 待加工表面材料被更好去除。另外,随着刀具后角和前角的增大,紧密接触区的

应力集中也逐渐减弱。对比图 12 的 von Mises 应力和静水应力云图可知, SiC 基底的应力集中主要分布在刀具与工件的挤压区,有利于剪切带的形成。

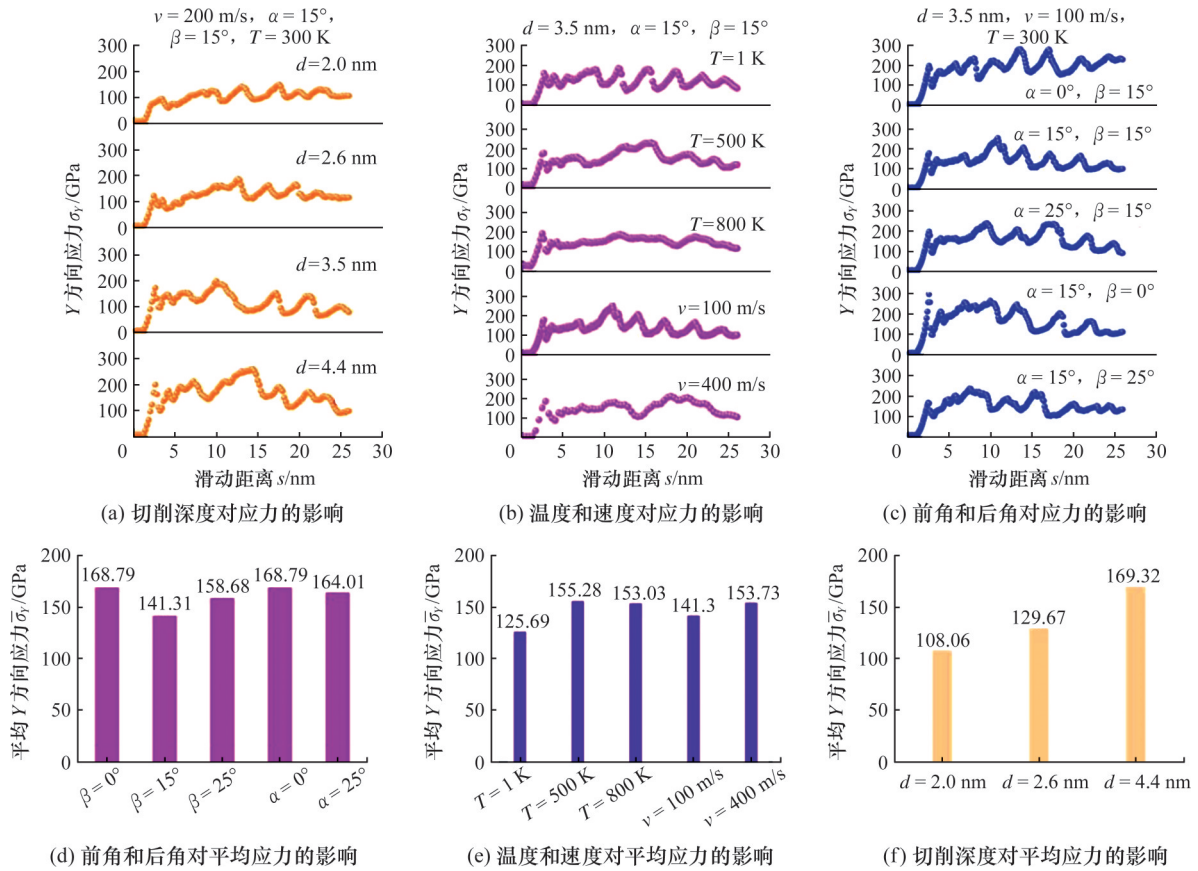


图 11 切削参数对 SiC 硬脆材料切削方向的应力量化影响

Fig.11 Stress quantization effect of cutting parameters on cutting direction of SiC hard and brittle materials

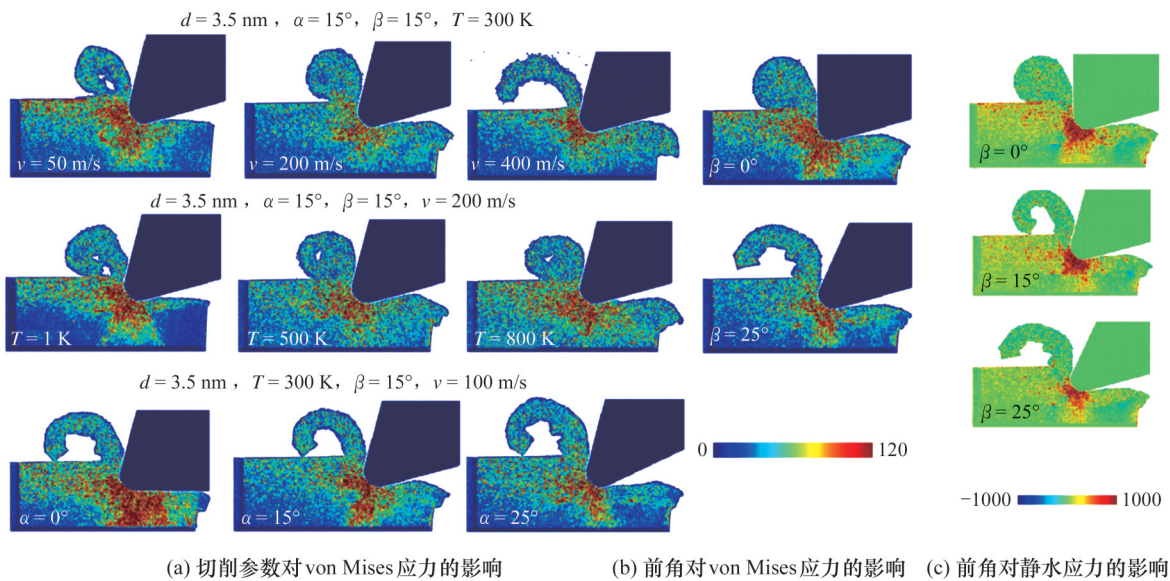


图 12 切削参数对 SiC 硬脆材料应力分布影响

Fig.12 Effect of cutting parameters on stress distribution of SiC hard and brittle materials

3 结论

1) 纳米切削初期, SiC 以受挤压弹性变形为

主; 纳米切削中期, SiC 基底变形以弹塑性变形和塑性变形混合为主; 纳米切削稳定期, SiC 基底以塑性变形为介导, SiC 基底塑性变形介导的非晶

层覆盖、立方结构向闪锌矿结构的相变转化、剪切带、裂纹的产生同实验结果一致。

2) 切削深度从2.0 nm增加到4.4 nm, SiC水平切削力增加幅度比法向力更大, 增幅分别为55.9%、3.34%; 随着温度从1 K升到800 K, SiC水平切削力和法向力逐渐衰减, 下降幅度分别为7.32%、11.96%; 随着高速切削速度的增加, SiC受到的水平切削力和法向力也逐渐呈现下降趋势, 下降幅度分别为10.72%、17.38%。

3) 随着切削距离的增加, 径向分布函数峰值逐渐下降, 且下降程度逐渐减慢。当温度从1 K升到800 K时, SiC基底无序化非晶原子数越来越多, 晶格受损更加严重, 导致径向分布函数峰值陡然下降。当切削速度从50 m/s到400 m/s或切削深度从2 nm到4.4 nm时, 径向分布函数下降幅度较小, 有着均匀性下降趋势。

4) 切削深度、速度、温度、前角、后角变化显著影响SiC已加工表面亚表层损伤程度。随着切削距离和切削速度的增加, 亚表层损伤度逐渐减小; 而随着切削温度和深度的升高, 亚表层损伤度逐渐增大。另外, 切削参数变化也显著影响切削形貌构型, 随着切削速度和切削深度增加, 切屑形貌由卷积态逐渐变成条状态; 随着体系温度上升, 切屑形貌以卷积形态为主。

参考文献:

- [1] GIORGIS F, GIULIANI F, PIRRI C F, et al. Wide Band Gap a-Si C:H Films for Optoelectronic Applications[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1998, 227(4):465-469.
- [2] ZHANG Z, GUO B, WANG F. Evaluation of Switching Loss Contributed by Parasitic Ringing for Fast Switching Wide Band-gap Devices[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(9): 9082-9094.
- [3] YUN N, LYNCH J, SUNG W. Demonstration and Analysis of a 600 V, 10 A, 4H-SiC Lateral Single RESURF MOSFET for Power ICs Applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(19): 192104.
- [4] DEMENET J L, AMER M, TROMAS C. Dislocations in 4H-and 3C-SiC Single Crystals in the Brittle Regime[J]. *Physics Status Solidi C*, 2013, 10(6):64-67.
- [5] BAI S, DEVATY R P, CHOYKE W J, et al. Determination of the Electric Field in 4H/3C/4H-SiC Quantum Wells due to Spontaneous Polarization in the 4H SiC Matrix [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(15):3171-3173.
- [6] NEUDECK, PHILIP G. Electrical Impact of SiC Structural Crystal Defects on High Electric Field Devices[J]. *Materials Science Forum*, 2000, 338(10): 1161-1166.
- [7] FENG A, MUNIR Z A. The Effect of an Electric Field on Self-sustaining Combustion Synthesis: Part II. Field-assisted Synthesis of μ -SiC[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1995, 26(3):587-593.
- [8] PATRICK L, CHOYKE W J. Static Dielectric Constant of SiC[J]. *Physical Review. B, Condensed Matter*, 1970, 2(6):2255-2256.
- [9] FANG K L, TSUI B Y, YANG C C, et al. Electrical Instability of Low-dielectric Constant Diffusion Barrier Film (a-Si C:H) for Copper Interconnect [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(10):2375-2383.
- [10] CHEN M H, DAI H F. Molecular Dynamics Study on Grinding Mechanism of Polycrystalline Silicon Carbide[J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 130:109541.
- [11] QU Z Z, WU W L, DAI H F. Quantitative Analysis of Grinding Performance of Cubic Silicon Carbide Surface Texture Lubricated with Water Film[J]. *Tribology International*, 2023, 180:108267.
- [12] AI T C, LIU J, QIU H J, et al. Removal Behavior and Performance Analysis of Defective Silicon Carbide in Nano-grinding [J]. *Precision Engineering*, 2021, 72:858-869.
- [13] MENG X S, WU W L, LIAO B K, et al. Atomic Simulation of Textured Silicon Carbide Surface Ultra-precision Polishing[J]. *Ceramics International*, 2022, 48:17034-17045.
- [14] TIAN Z, LU J, LUO Q, et al. Chemical Reaction on Silicon Carbide Wafer (0 0 0 1) and (0 0 0 -1) with Water Molecules in Nanoscale Polishing [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 607:155090.
- [15] LIU Y, LI B Z, KONG L F. Molecular Dynamics Simulation of Silicon Carbide Nanoscale Material Removal Behaviour [J]. *Ceramic International*, 2018, 44:11910.
- [16] WU Z H, LIU W D, ZHANG L C. Revealing the Deformation Mechanisms of 6H-silicon Carbide under Nano-cutting [J]. *Computer Material Science*, 2017, 137:282.
- [17] XIAO G B, TO S, ZHANG G Q. Molecular Dynamics Modelling of Brittle-ductile Cutting Mode Transition: Case Study on Silicon Carbide [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,

- 2015, 88:214-222.
- [18] TIAN Z G, XU X P, JIANG F, et al. Study on Nanomechanical Properties of 4H-SiC and 6H-SiC by Molecular Dynamics Simulations[J]. *Ceramic International*, 2019, 45:21998-2006.
- [19] GOEL S, LUO X C, COMLEY P, et al. Brittle-ductile Transition during Diamond Turning of Single Crystal Silicon Carbide[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013, 65:15-21.
- [20] WANG J S, FANG F Z. Nanometric Cutting Mechanism of Silicon Carbide[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2021, 70:29-32.
- [21] 田东禹. 3C-SiC 的 SEM 在线纳米切削机理研究[D]. 天津:天津大学, 2020.
TIAN Dongyu. Study on the SEM-based Online Nano-cutting Mechanism of 3C-SiC[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [22] PIAO Z, TAO S, XUN S. Atomic-scale Study of Vacancy Defects in SiC Affecting on Removal Mechanisms during Nano-abrasion Process[J]. *Tribology International*, 2020, 145:106136.
- [23] AI T C, LIU J, QIU H J, et al. Removal Behavior and Performance Analysis of Defective Silicon Carbide in Nano-grinding[J]. *Precision Engineering*, 2021, 72:858-869.
- [24] TIAN Z, CHEN X, XU X P, et al. Molecular Dynamics Simulation of the Material Removal in the Scratching of 4H-SiC and 6H-SiC Substrates[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, 2:045104.
- [25] MENG B B, YUAN D D, ZHENG J, et al. Molecular Dynamics Study on Femtosecond Laser Aided Machining of Monocrystalline Silicon Carbide[J]. *Material Science Semiconductor Processing*, 2019, 101:1-9.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介:**陈晶晶(通信作者),男,1989年生,校聘副教授。研究方向为机械表/界面摩擦磨损与防护润滑。发表论文30余篇。E-mail:chenjingjingfzu@126.com。
- 本文引用格式:**
陈晶晶,陈莎,朱海燕,等. SiC 硬脆材料纳米切削的亚表层损伤与塑性去除机理探析[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(10):2312-2321.
CHEN Jingjing, CHEN Sha, ZHU Haiyan, et al. Mechanism Analysis of Material Remove and Subsurface Layer Damages for SiC during Nanocutting Processes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(10):2312-2321.
-
- (上接第 2311 页)
- [10] 董光辉. 面向电动汽车空调的通用型线涡旋压缩机设计与加工研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2017.
DONG Guanghui. Research on Electric Car Air Conditioner General Scroll Profiles Compressor Design and Process[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017.
- [11] 韩红彪,高善群,李济顺,等. 基于边界层理论的盘形转子流体阻力研究[J]. *机械科学与技术*, 2015, 34(10):1621-1625.
HAN Hongbiao, GAO Shanqun, LI Jishun, et al. Exploring Fluid Resistance of Disk Rotor Based on Boundary Layer Theory[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2015, 34(10):1621-1625.
- [12] 胡家顺,余猛,舒安庆. 高速电解液循环泵流体冲击计算及试验研究[J]. *流体机械*, 2004(12):1-3.
HU Jiashun, YU Meng, SHU Anqing. Calculation and Trial Study on Liquid Impact Force for High Speed Centrifugal Pump[J]. *Fluid Machinery*, 2004(12):1-3.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介:**刘兴旺(通信作者),男,1970年生,副教授。研究方向为制冷系统及涡旋压缩机的优化。发表论文40余篇。E-mail:liuxw@lut.edu.cn。
- 本文引用格式:**
刘兴旺,田嵩,刘晓明,等. 电动涡旋压缩机柱销防自转机构载荷优化[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(10):2306-2311.
LIU Xingwang, TIAN Song, LIU Xiaoming, et al. Load Optimization of Pin Anti-rotation Mechanisms for Electric Scroll Compressors[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(10):2306-2311.