

纳米尺度单晶氧化镓摩擦磨损性能试验研究

徐亚萌, 周海, 张杰群, 李永康, 沈军州

(盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要: **目的** 分析单晶氧化镓在纳米尺度下的摩擦磨损性能, 为金刚石磨料对氧化镓晶体的精密研磨加工提供理论依据。**方法** 在 G200 纳米压痕仪上, 使用 Cube Corner 金刚石压头, 对单晶氧化镓的(010)和(100)晶面进行了摩擦磨损试验, 利用原子力显微镜观测试验后的形貌并测量尺寸。**结果** 在金刚石以不同速度摩擦单晶氧化镓时, (010)和(100)晶面的划痕宽度与摩擦速度的拟合直线的斜率分别 4.057 69 和 7.634 62, 深度与摩擦速度拟合直线的斜率分别为 0.820 73 和 0.798 62。以不同载荷摩擦氧化镓时, (010)和(100)晶面的划痕宽度与载荷的拟合直线的斜率分别为 47.625 和 46.750, 深度与载荷拟合直线的斜率分别为 23.764 和 31.9546。在多次重复摩擦磨损试验中, 摩擦次数从 1 次增加到 10 次, 划痕的深度从 571.22 nm 增加到 2964.81 nm, 划痕宽度从 889.34 nm 增加到 7360 nm。**结论** 在干摩擦状态下, 金刚石压头的摩擦速度对氧化镓的摩擦系数、磨损影响不大。在低载荷下, 氧化镓的磨损以塑性变形引起的材料去除为主, 在载荷增大到一定值时, 磨损转变为脆性材料去除的形式, 出现裂纹、剥落和碎屑等, 磨损增大。氧化镓(100)晶面由于硬度低、易解理, 比(010)晶面更容易磨损。

关键词: 纳米划痕; 摩擦磨损; 单晶氧化镓; 摩擦速度; 垂直载荷; 摩擦次数

中图分类号: TH117.1; TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)04-0244-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.04.024

Experimental Study on Friction and Wear Properties of Nanoscale Single Crystal Gallium Oxide

XU Ya-meng, ZHOU Hai, ZHANG Jie-qun, LI Yong-kang, SHEN Jun-zhou

(School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

ABSTRACT: The micro friction and wear performance of single crystal gallium oxide at the nanometer scale is analyzed to provide a theoretical basis for the precision grinding of gallium oxide crystals by diamond abrasives. On the G200 Nano Indenter, using the Cube Corner diamond indenter, at the nanometer scale, the friction and wear tests of the (010) and (100) crystal planes of single-crystal gallium oxide are performed, and the morphology after the test is observed using an atomic force microscope and then the size is measured. When the diamond is rubbed against single-crystal gallium oxide at different speeds,

收稿日期: 2020-03-22; 修订日期: 2020-05-26

Received: 2020-03-22; Revised: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51675457); 江苏省研究生实践创新项目 (SJCX20_1351)

Fund: Supported by General Program of National Natural Science Foundation of China (51675457), Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX20_1351)

作者简介: 徐亚萌 (1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为光电子材料超精密加工。

Biography: XU Ya-meng (1996—), Male, Master, Research focus: ultra-precision machining technology.

通讯作者: 周海 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光电子材料超精密加工。邮箱: zhouhai@ycit.cn

Corresponding author: ZHOU Hai (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: ultra-precision machining technology. E-mail: zhouhai@ycit.cn

引文格式: 徐亚萌, 周海, 张杰群, 等. 纳米尺度单晶氧化镓摩擦磨损性能试验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 244-252.

XU Ya-meng, ZHOU Hai, ZHANG Jie-qun, et al. Experimental study on friction and wear properties of nanoscale single crystal gallium oxide[J]. Surface technology, 2021, 50(4): 244-252.

the slopes of the straight-line fitting between scratch widths and depths of the (010) and (100) crystal planes and the friction speed are 4.057 69 and 7.634 62, 0.820 73 and 0.798 62, respectively. When rubbing gallium oxide with different loads, the slopes of straight-line fitting between scratch widths and depths of the (010) and (100) crystal planes and the load are 47.625 and 46.750, 23.764 and 31.9546, respectively. The depth of scratches increase from 571.22 nm to 2964.81 nm as the friction number of times increase from 889.34 nm to 7360 nm in repeated friction wear tests. In the dry friction state, the friction velocity of the diamond indenter has little effect on the friction coefficient and wear of gallium oxide. When the load is small, the gallium oxide wear is removed by plastic deformation. When the load increases to a certain value, the wear changes to brittle material removal, and cracks, flaking, and debris appear, which increases the wear. Gallium oxide (100) crystal plane is easier to wear than (010) crystal plane because of its low hardness and easy cleavage.

KEY WORDS: nano scratch; friction and wear; single crystal gallium oxide; friction velocity; vertical load; friction number of times

氧化镓（ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ）是一种新型的超宽禁带（约 4.9 eV）氧化物半导体材料^[1-2]。它具有化学和热稳定性良好、高紫外可见光透过率、低损耗和高耐压等特点，这些优异的物理性质使其在器件方面有着广阔的应用前景，可作为深紫外透明导电氧化物薄膜电极、日盲紫外探测器、场效应晶体管、LED 芯片和还原性气体探测器等^[3-10]。

氧化镓在器件方面的应用，要求在加工过程中无损伤、有较好的形状精度^[11]。氧化镓属于易解理的难加工硬脆材料，在进行精密加工时，存在表面磨粒嵌入的问题，还伴随着解理、划痕和凹坑等缺陷产生，严重影响了加工质量，限制了氧化镓在多个领域的应用^[12-15]。氧化镓晶体在不同晶面上的力学性能存在差异，不同晶面的延性域加工深度也不同^[16]。因此，只有充分了解氧化镓晶体表面的摩擦磨损特性，才能进一步提高表面质量和加工效率。

目前，国内外许多学者研究了各类材料表面的摩擦磨损行为，但使用的方法和研究侧重点各有不同。杨晓京等^[17]对单晶锗(100)、(110)和(111)晶向的表面进行了摩擦磨损试验，结果表明，单晶锗的磨损性能受晶面取向影响较小，摩擦力随着滑动速度的增加而增加，载荷增大到一定值时，晶体表面会发生明显的脆塑转变过渡过程（由塑性变形向脆性破坏转变）。鲁春朋等^[18]使用单颗粒划痕试验来研究磷酸二氢钾晶体的摩擦磨损特性，得到不同划痕方向的摩擦因数，及划痕位移的变化对去除方式的影响。Zhang 等^[19]利用 Berkovich 和锥形压痕尖端进行纳米刻划，研究磷酸二氢钾的摩擦磨损机理，研究发现，磷酸二氢钾塑性变形的机制是晶体的滑移，应变率对微塑性变形的影响不大。

以上摩擦磨损研究工作并未涉及到氧化镓晶体，目前对氧化镓晶体的研究主要集中在晶体的生长方面。虽然对氧化镓(010)和(100)晶面的纳米力学性能的研究已经取得了一些成果，但是还未得出这两个晶面上的摩擦磨损特性^[20]。为了探究单晶氧化镓在纳米尺度下的摩擦磨损特性，本工作通过纳米刻划试验技术，使用纳米压痕仪对晶体的两个典型晶面（(010)和(100)晶面）进行了刻划试验^[21-24]，对各个试验条件下的划痕宽度以及深度进行了测量并拟合，得出了可进行比较的量化数据，考察了(010)和(100)晶面在各个试验条件下的摩擦磨损特性以及差距对比，拟为氧化镓晶体的超精密加工提供理论基础。

1 试验

1.1 试验样品

本试验使用中国电子科技集团公司第四十六研究所生产的单晶氧化镓切片，通过单面化学机械抛光法处理，样品表面粗糙度为 0.5 nm，尺寸为 10 mm×10 mm，厚度为(1500±50) μm，选择抛光后的正面进行试验。样品进行抛光后，使用丙酮超声清洗，去除表面的污渍，然后吹干表面，存放于干燥盒中，试验时取用。

1.2 试验方法

试验中使用的刻划设备为美国 Aglient 公司生产的 Nano indenter G200 纳米压痕仪，压头为 Cube Corner 金刚石。单晶氧化镓的摩擦磨损试验参数见表 1。

在刻划试验完成后，采用 Bruker 公司生产的 Dimension Icon 原子力显微镜表征划痕形貌。

表 1 刻划试验参数
Tab.1 Scratch test parameters

	Crystal plane	Vertical load/mN	Scratching speed/(μm·s ⁻¹)	Scratch times	Scratch length/μm
1	(010), (100)	20	10, 30, 90	1	200
2	(010), (100)	5, 10, 20, 50, 80	50	1	200
3	(100)	20	50	2, 6, 10	200

2 结果与讨论

2.1 速度对单晶氧化镓摩擦磨损性能的影响

图 1 为纳米压痕仪上原位相机观察到的不同刻划速度下两个晶面的划痕形貌,在同一晶面下,分别使用 10、30、90 $\mu\text{m/s}$ 的刻划速度进行摩擦,可以看

到三条划痕无明显的区别。而对比(100)晶面与(010)晶面,发现(100)晶面划痕两侧的碎屑堆积更多。图 2 为使用原子力显微镜观测到的不同速度下两个晶面的划痕形貌。由图 2 可以看出,同一晶面上,划痕两侧的碎屑堆积量并无明显差距,划痕的深度与宽度区分也不大。(100)晶面较(010)晶面的磨损更为严重,划痕的宽度也更大,划痕的底部和边缘更加粗糙。

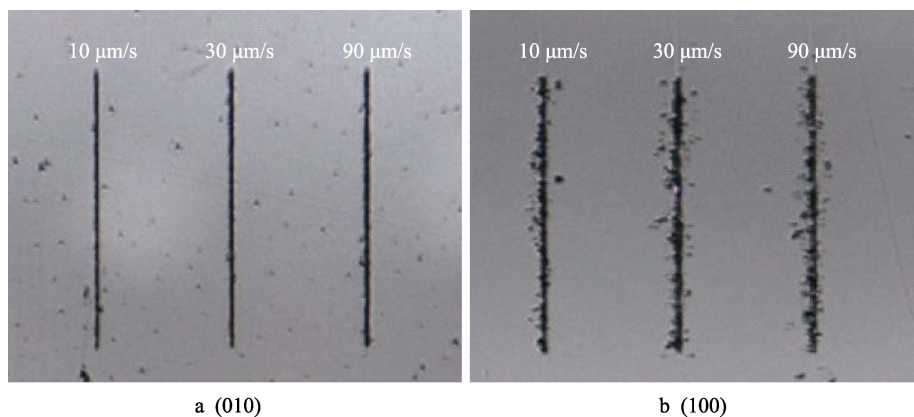


图 1 不同刻划速度下两个晶面的划痕形貌

Fig.1 Scratch morphology of two crystal planes at different scratching speeds

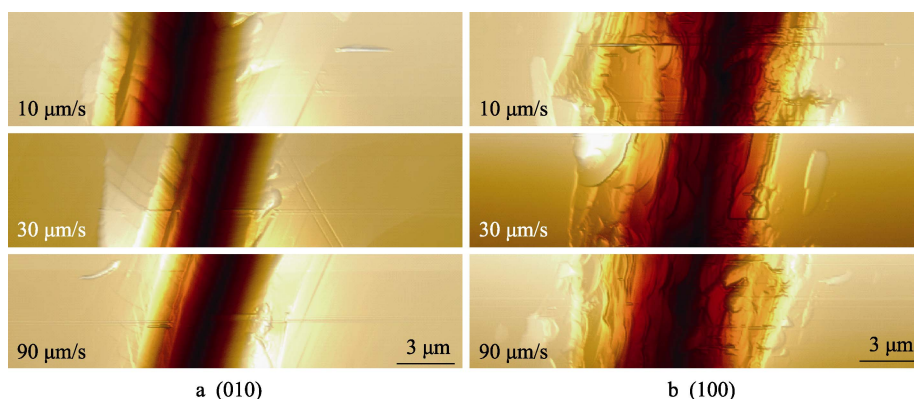


图 2 不同刻划速度下两个晶面的划痕 AFM 形貌

Fig.2 AFM morphology of wear scars on two crystal planes at different speeds

图 3 为不同速度下两个晶面的划痕深度与位移的关系。发现在(010)晶面上,速度越大,划痕深度越大,但整体的变化不明显。在(010)晶面上,速度从 10 $\mu\text{m/s}$ 增大到 90 $\mu\text{m/s}$,划痕深度从 508.26 nm 增大到 555.98 nm。而在(100)晶面上,速度从 10 $\mu\text{m/s}$ 增大到 90 $\mu\text{m/s}$ 时,划痕深度都在 800 nm 左右。图 4 为两个晶面在不同速度下的摩擦力-位移关系,单晶氧化镓(010)晶面的摩擦力随着速度的增加而略微增大,(100)晶面的摩擦力随着速度的增加,变化不明显,稳定在 13 mN。

图 5 为不同速度下两个晶面的摩擦系数与位移的关系。对于(010)晶面,当速度从 10 $\mu\text{m/s}$ 增大到 90 $\mu\text{m/s}$ 时,摩擦系数从 0.38 上升到 0.41,影响很小。对于(100)晶面,速度从 10 $\mu\text{m/s}$ 增大到 90 $\mu\text{m/s}$ 时,摩擦系数都在 0.67 上下浮动。这说明速度对(100)晶面摩擦系

数的影响比对(010)晶面的影响小。

对划痕形貌尺寸的数据进行线性拟合,绘制了速度与划痕深度、宽度的关系曲线,见图 6。可以发现,在(010)晶面上,当速度从 10 $\mu\text{m/s}$ 增大到 90 $\mu\text{m/s}$ 时,划痕宽度的变化范围为 4060~4620 nm,深度变化范围为 508.26~555.98 nm,深度、宽度决定系数 R^2 分别为 0.996 71 和 0.933 43; (100)晶面上,划痕的宽度变化范围为 6310~6880 nm,深度变化范围为 785.91~849.21 nm,深度、宽度决定系数 R^2 分别为 0.949 25 和 0.984 56。分别比较两晶面宽度和深度的拟合曲线斜率,(010)和(100)晶面宽度拟合曲线的斜率分别为 4.057 69 和 7.634 62,由斜率的大小可知,速度对单晶氧化镓划痕宽度影响较小,而两晶面宽度拟合曲线的斜率差异与(100)晶面易解理的特性相关。(010)和(100)晶面深度拟合曲线的斜率分别为 0.820 73 和

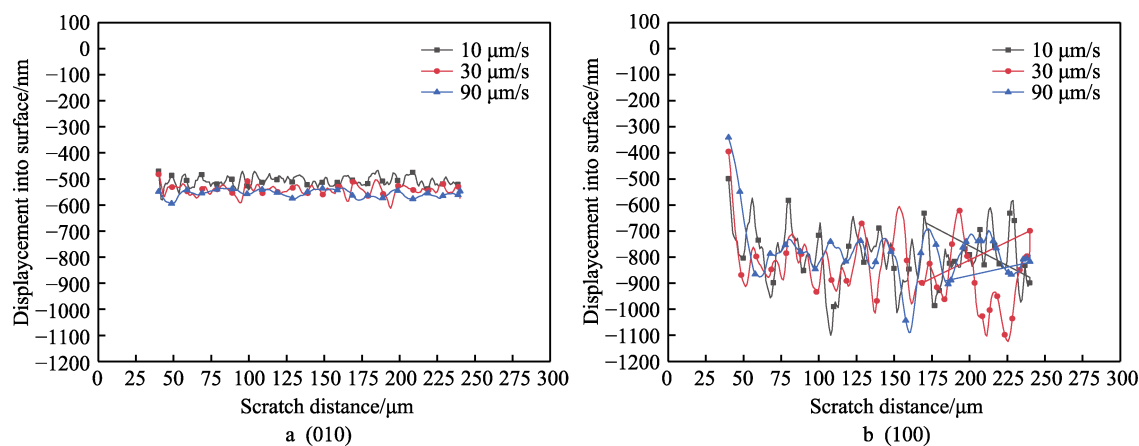


图 3 不同速度下两个晶面的划痕深度与位移的关系

Fig.3 Relation between scribe depth and scratches distance of two crystal planes at different scoring speeds

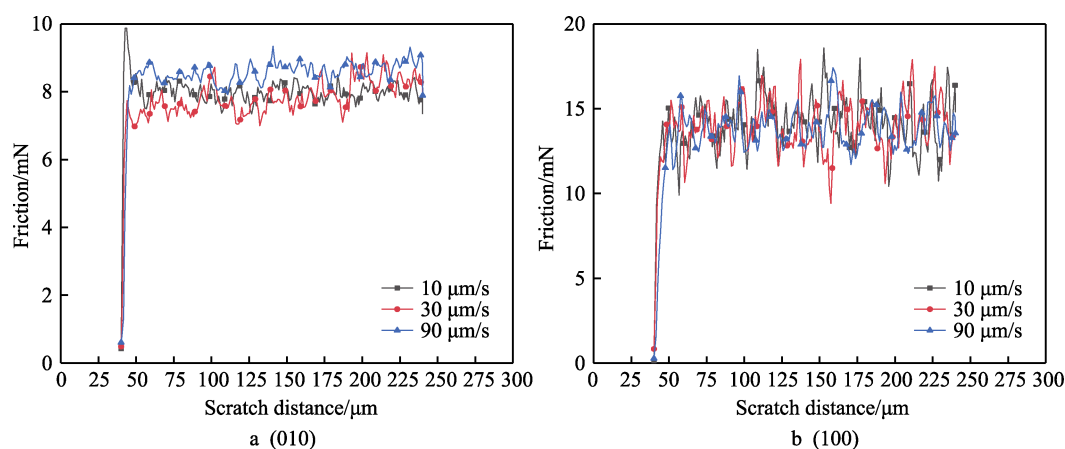


图 4 不同速度下两个晶面的摩擦力与位移的关系

Fig.4 Relation between scratch depth and displacement at different speeds of two crystal planes

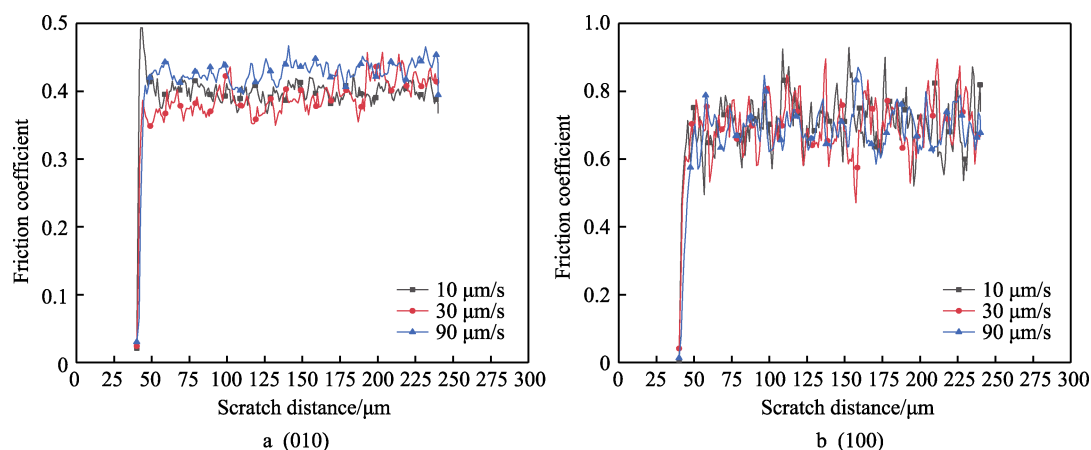


图 5 不同速度下两个晶面的摩擦系数与位移的关系

Fig.5 Relationship between friction coefficient and scratch distance at different speeds of two crystal planes

0.798 62, 两者大小接近, 由斜率的大小可知, 速度对单晶氧化镓划痕深度影响较小。综上, 速度对单晶氧化镓磨损的影响较小。

2.2 载荷对单晶氧化镓摩擦磨损性能的影响

图 7 为不同载荷下两个晶面的划痕形貌。在较低载荷下摩擦时, 单晶氧化镓表面的划痕形貌细小平整

且磨损不明显。随着载荷的不断增大, 划痕逐渐变宽变深, 划痕两侧的碎屑堆积也变多, 磨损更为严重。造成这一现象的原因是, 随着压头施加的载荷逐渐增大, 单晶氧化镓晶体表面由塑性变形转变为脆性断裂, 表面产生裂纹、剥落和碎屑堆积。(100)晶面与(010)晶面相比, (100)晶面划痕两侧的碎屑堆积更多、表面更不平整、损伤更严重。在压头施加的载荷为

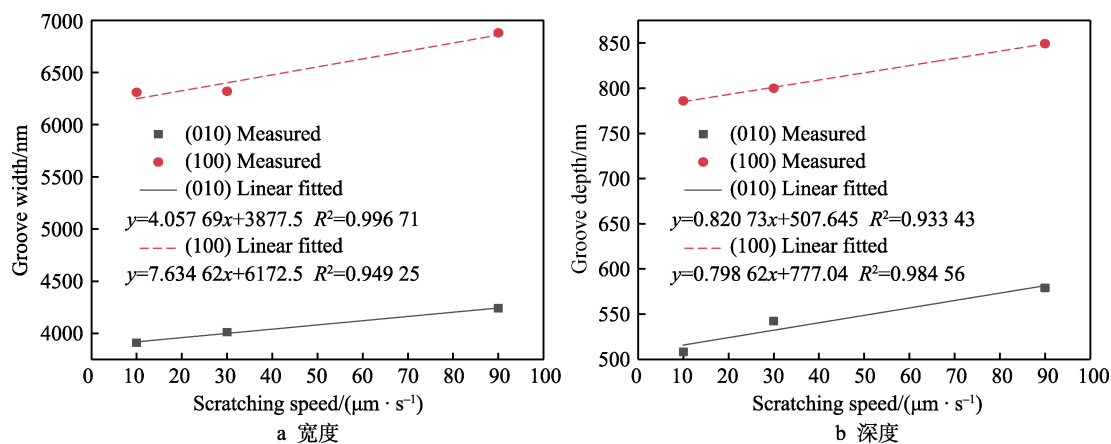


图6 不同速度下两个晶面的划痕宽度和深度拟合直线

Fig.6 Straight-line fitting of scratch width and depth at different speeds of two crystal planes: a) width; b) depth

80 mN 时, (100)晶面相对于(010)晶面的损伤更为严重。这与两晶面的硬度相关, (100)晶面和(010)晶面的硬度分别为 10.1 GPa 和 11.4 GPa, (010)晶面的硬度更高^[25]。

图 8 为不同载荷下两个晶面的划痕 AFM 形貌。发现随着载荷的增大, (010)和(100)晶面的划痕逐渐

变宽变深, 两侧的碎屑堆积变多。在载荷增大到一定程度时, 单晶氧化镓表面由塑性变形转变为脆性断裂, 划痕两侧有明显的裂纹、断裂和碎屑。(100)晶面与(010)晶面相比较, (100)晶面划痕两侧的碎屑堆积较多, 在载荷增大到一定程度时, 进入脆性去除区域后, (100)晶面的划痕更深、更宽, 摩擦损伤更严重。

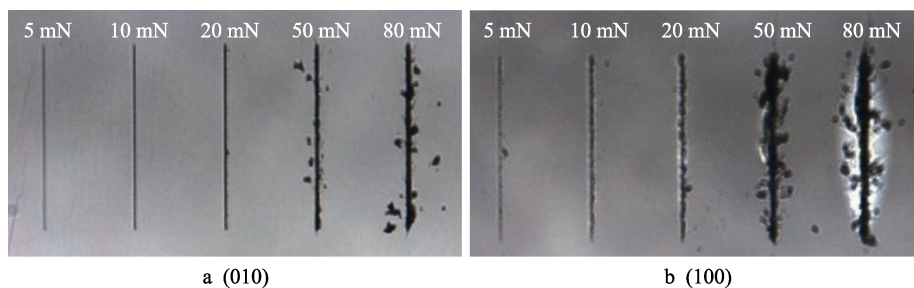


图7 不同载荷下两个晶面的划痕形貌

Fig.7 Scratches morphology of two crystal planes under different loads

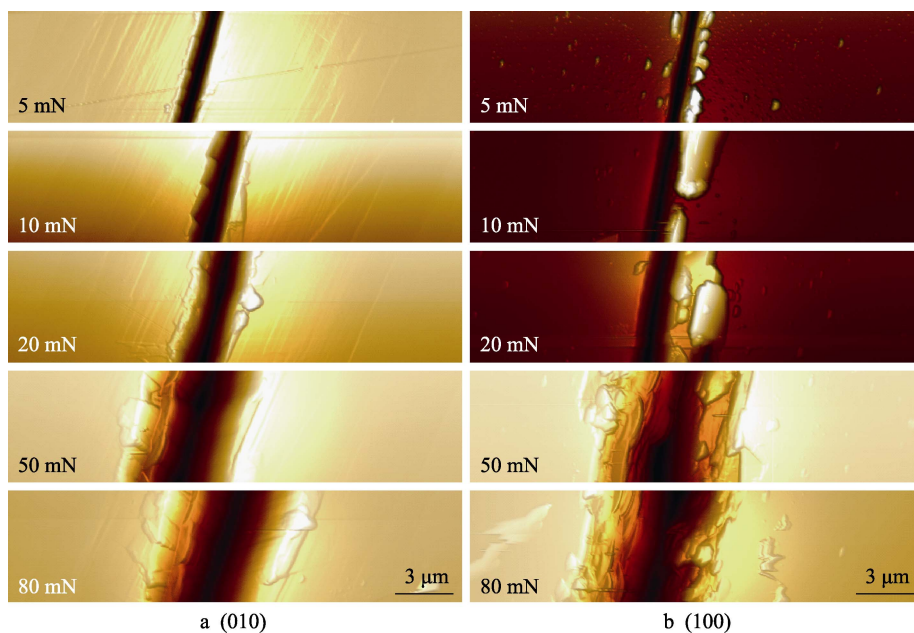


图8 不同载荷下两个晶面的划痕 AFM 形貌

Fig.8 AFM morphology of scratches on two crystal planes under different loads

图 9 为不同载荷下两个晶面的划痕深度与位移的关系。(010)和(100)晶面都表现为载荷越大, 划痕深度越大的现象。在压头施加的载荷较小时, 两个晶面划痕深度变化较为平缓, 随着载荷的增加, 划痕深度波动逐渐增大, 在压头施加的载荷达到 50 mN 时,

划痕深度波动剧烈, (100)晶面更为明显。这一现象同样印证了, 随着压头施加的载荷逐渐增大, 氧化镓晶体的磨损机制由塑性变形转变为脆性断裂和剥落。划痕两侧及底部产生了裂纹、剥落和碎屑等, 划刻沟槽的表面粗糙度增大, 致使划入深度的变化波动较大。

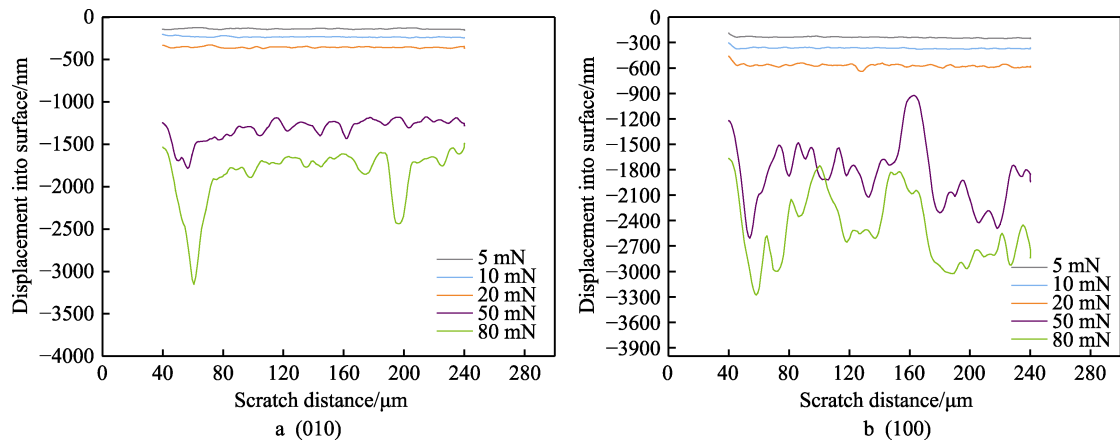


图 9 不同载荷下两个晶面的划痕深度与位移的关系

Fig.9 Relationship between the scratch depth and the displacement on two crystal planes under different loads

图 10 为不同载荷下两个晶面的摩擦力与位移的关系。(010)和(100)晶面都表现出载荷越大, 单晶氧化镓的摩擦力也随之增大的现象。在压头施加的载荷较小时, 两个晶面摩擦力变化较为平缓, 随着载荷的增加, 摩擦力波动逐渐增大, 在压头施加的载荷达到 50 mN 时, 摩擦力波动剧烈, (100)晶面更为明显。这一现象同样与单晶氧化镓晶体的磨损机制由塑性变

形转变为脆性断裂和剥落相关。由不同载荷下两个晶面的摩擦系数与位移的关系 (图 11) 可知, 在(010)晶面上, 当载荷从 5 mN 增大到 80 mN 时, 摩擦系数从 0.38 上升到 0.78, 增幅较大; 在(100)晶面上, 当载荷从 5 mN 增大到 80 mN 时, 摩擦系数从 0.29 上升到 0.73, 结合图 10, 说明载荷对(100)晶面的摩擦力和摩擦系数的影响都很大。

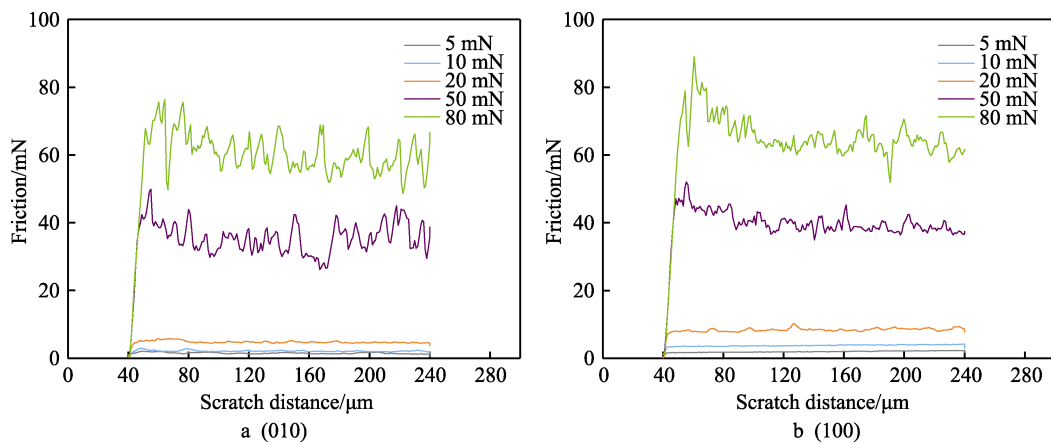


图 10 不同载荷下两个晶面的摩擦力与位移的关系

Fig.10 Relationship between friction and displacement on two crystal planes under different loads

对划痕的 AFM 形貌尺寸进行线性拟合, 绘制了垂直载荷与划痕深度和宽度的关系曲线, 如图 12 所示。对比发现, 在(010)晶面上, 当载荷从 5 mN 增大到 80 mN 时, 划痕的深度和宽度逐渐增大, 宽度变化范围为 444~3870 nm, 深度变化范围为 137.78~1830.78 nm, 决定系数 R^2 分别为 0.978 08 和 0.984 44; 在(100)晶面上, 划痕的宽度变化范围为 575~3890 nm,

深度变化范围为 238.69~2516.06 nm, 决定系数 R^2 分别为 0.979 946 和 0.984 56。分别比较两晶面宽度和深度的拟合曲线的斜率, (010)和(100)晶面宽度拟合曲线的斜率分别为 47.625 和 46.750, 由斜率大小可知, 载荷对单晶氧化镓划痕宽度影响较大, 而两晶面在相同载荷下的划痕宽度差异很小。(010)和(100)晶面划痕深度拟合曲线的斜率分别为 23.764 和 31.9546,

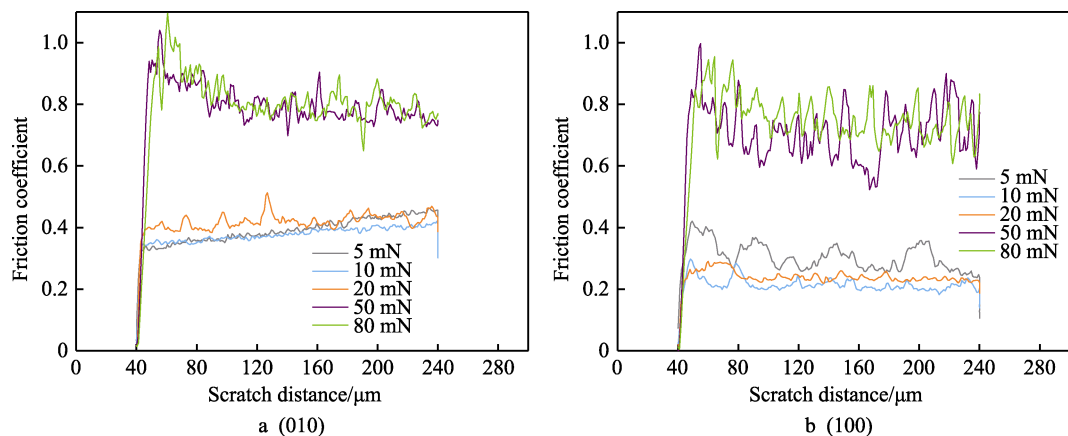


图 11 不同载荷下两个晶面的摩擦系数与位移的关系

Fig.11 Relationship between friction coefficient and displacement on two crystal planes under different loads

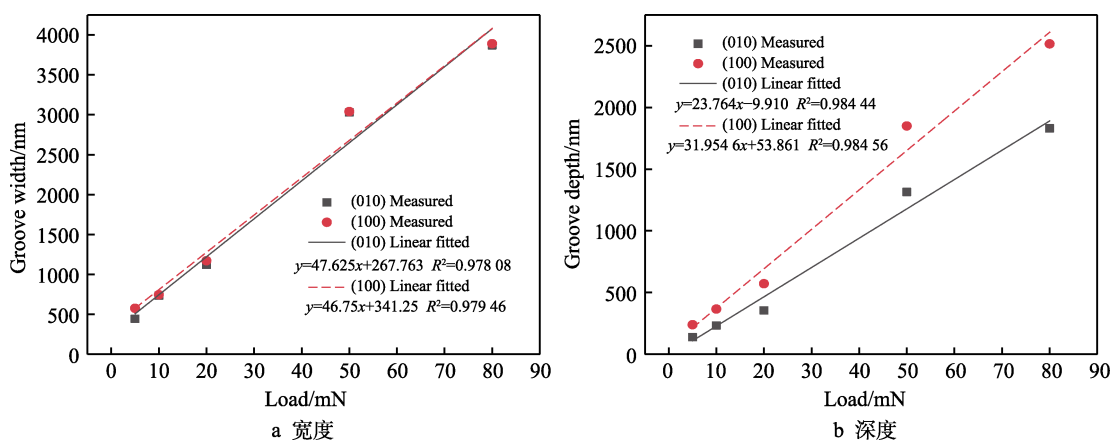


图 12 不同载荷下两晶面的划痕宽度和深度的拟合直线

Fig.12 Straight-line fitting of scratch width and depth on two crystal planes under different loads: a) width; b) depth

(100)晶面划痕深度拟合曲线的斜率较(010)晶面更大,说明在相同载荷条件下,(100)晶面划痕更深,磨损更严重。这与(100)晶面的硬度低、易解理特性有关。

2.3 摩擦次数对单晶氧化镓摩擦磨损性能的影响

在同一位置,以同样的速度、同样的载荷对氧化镓晶体进行多次摩擦试验。图 13 是载荷 20 mN、速度 50 μm/s 条件下,分别进行 2、6、10 次摩擦后的纳米压痕仪原位相机照片。可以看出,随着摩擦次数

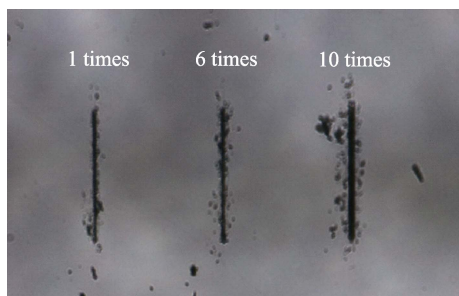


图 13 不同摩擦次数下(100)晶面的划痕形貌

Fig.13 Scratch morphology of (100) crystal plane under different friction number of times

增加,晶体表面划痕的三维形貌尺寸明显逐渐增大,划痕两侧的碎屑增多。

使用原子力显微镜观测不同摩擦次数下(100)晶面的划痕形貌,见图 14。图 15 为不同摩擦次数下(100)

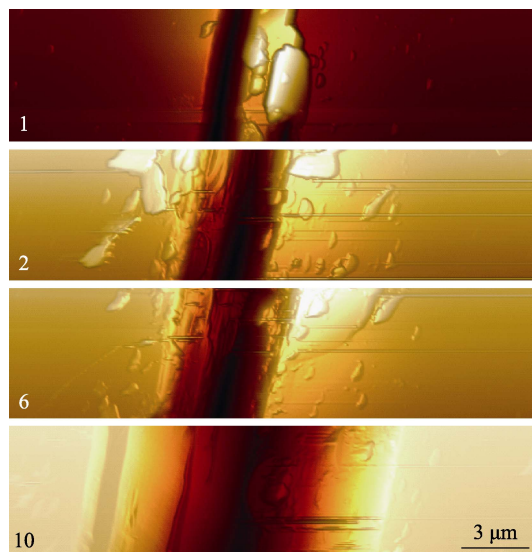


图 14 不同摩擦次数下(100)晶面的划痕 AFM 形貌

Fig.14 AFM morphology of scratches on (100) crystal planes under different friction number of times

晶面的摩擦力与位移的关系,随着摩擦次数增加,单晶氧化镓的摩擦力逐渐增大。图 16 为不同摩擦次数下(100)晶面的摩擦系数与位移的关系,与图 15 的变化规律相似,随着摩擦次数增加,单晶氧化镓的摩擦系数逐渐增大。图 17 为不同摩擦次数下(100)晶面的划痕深度与位移的关系,在摩擦次数增加时,划痕深度逐渐增大。

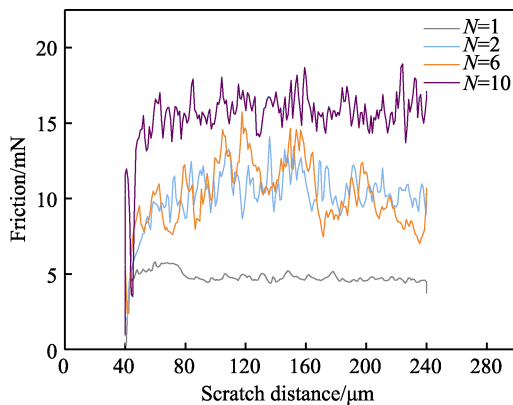


图 15 不同摩擦次数下(100)晶面的摩擦力与位移的关系
Fig.15 Relationship of friction force and displacement on crystal planes under different friction number of times

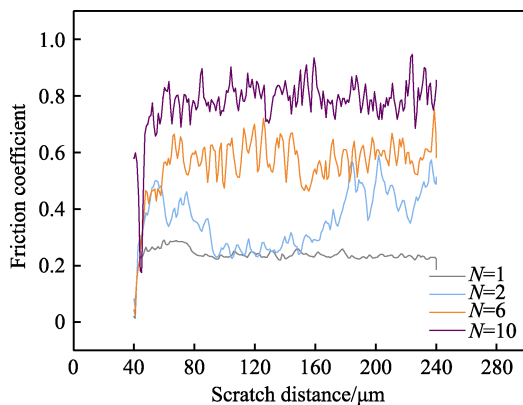


图 16 不同摩擦次数下(100)晶面的摩擦系数与位移的关系
Fig.16 Relationship between friction coefficient and displacement on crystal planes under different friction number of times

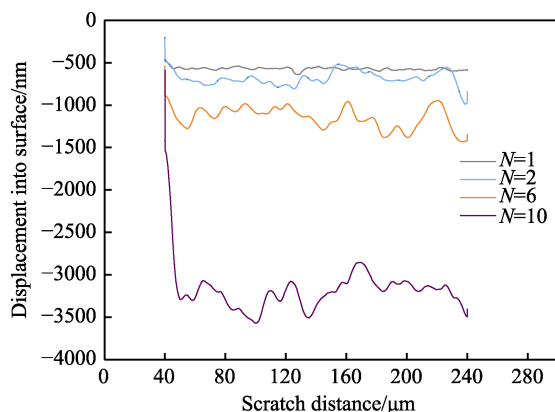


图 17 不同摩擦次数下(100)晶面的划入深度与位移的关系
Fig.17 (100) Relationship between depth and displacement on crystal planes under different friction number of times

Tseng 等^[26-27]发现,划痕的深度和宽度与摩擦次数存在如下幂函数关系:

$$d(N) = A_1(N)^{n_1}$$

$$w(N) = A_2(N)^{n_2}$$

式中: A_1 、 A_2 及 n_1 、 n_2 分别为摩擦次数系数和指数, d 和 w 分别为划痕的深度与宽度。

对划痕的形貌尺寸进行线性拟合,绘制了摩擦次数与划痕深度和宽度的关系曲线,见图 18。可以发现,当摩擦次数从 1 增加到 10 时,划痕的深度变化范围为 571.22~2964.81 nm,宽度变化范围为 889.34~7360 nm,决定系数 R^2 分别为 0.974 和 0.976。

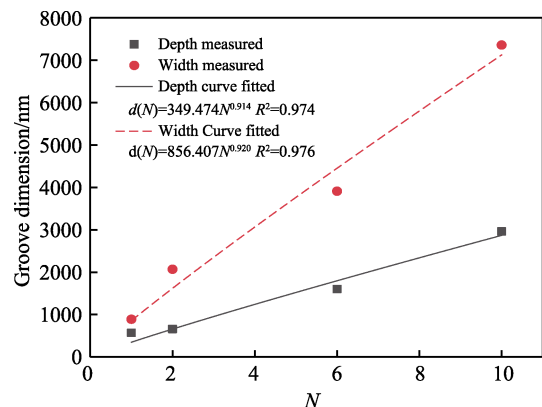


图 18 (100)晶面的划痕宽度和深度与摩擦次数的幂函数曲线

Fig.18 (100) Power function curve of scratch width and depth of crystal planes and friction number of times

3 结论

1) 金刚石以不同速度摩擦单晶氧化镓时,在(010)晶面上,当摩擦速度从 10 $\mu\text{m/s}$ 增大到 90 $\mu\text{m/s}$ 时,摩擦力从 7.73 mN 上升到 8.37 mN,摩擦系数从 0.38 上升到 0.41,增幅较小;在(100)晶面上,速度从 10 $\mu\text{m/s}$ 增大到 90 $\mu\text{m/s}$ 时,摩擦力在(13.7 \pm 0.3) mN 浮动,摩擦系数在 0.67 \pm 0.01 附近浮动,速度对(100)晶面的摩擦力和摩擦系数的影响很小。(010)和(100)晶面的划痕宽度与速度的拟合直线的斜率分别为 4.057 69 和 7.634 62,划痕深度与速度的拟合直线的斜率分别为 0.820 73 和 0.798 62。这表明两个晶面的磨损量与速度的相关性都很小。

2) 以不同载荷摩擦氧化镓时,在(010)晶面上,载荷从 5 mN 增大到 80 mN 时,摩擦力从 1.4 mN 上升到 59 mN,摩擦系数从 0.38 上升到 0.78,增幅较大;在(100)晶面上,载荷从 5 mN 增大到 80 mN 时,摩擦力从 1.9 mN 上升到 63.0 mN,摩擦系数从 0.29 上升到 0.73,摩擦载荷对(100)晶面的摩擦力和摩擦系数的影响很大。当载荷小于 50 mN 时,两个晶面的摩擦力变化较为平缓,晶体表面的磨损以塑性去除为主;当载荷大于 50 mN 时,摩擦力波动很大,磨损加剧,

(100)晶面尤为明显,晶体表面的磨损以脆性断裂为主,(100)晶面还伴随微解理。(010)和(100)晶面的划痕宽度与摩擦载荷的拟合直线的斜率分别为 47.625 和 46.750;划痕深度与速度的拟合直线的斜率分别为 23.764 和 31.9546。表明两个晶面的磨损量与载荷的相关性都很大。

3)在多次重复摩擦磨损试验中,当摩擦次数从 1 次增加到 10 次时,摩擦力从 4.68 mN 上升到 14.63 mN,摩擦系数从 0.23 上升到 0.77,增幅较大,划痕的深度从 571.22 nm 增加到 2964.81 nm,划痕宽度从 889.34 nm 增加到 7360 nm,划痕的深度和宽度与摩擦次数存在幂函数关系。重复摩擦次数对划痕宽度的影响比对深度大。

参考文献:

- [1] 郭道友,李培刚,陈政委,等.超宽禁带半导体 β -Ga₂O₃ 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展[J].物理学报,2019,68(7): 7-42.
GUO Dao-you, LI Pei-gang, CHEN Zheng-wei, et al. Ultra-wide bandgap semiconductor of β -Ga₂O₃ and its research progress of deep ultraviolet transparent electrode and solar-blind photodetector[J]. Acta physica sinica, 2019, 68(7): 7-42.
- [2] 陶绪堂,穆文祥,贾志泰.宽禁带半导体氧化镓晶体和器件研究进展[J].中国材料进展,2020,39(2): 113-123.
TAO Xu-tang, MU Wen-xiang, JIA Zhi-tai. Research progress in the crystal growth and devices of wide-bandgap β -Ga₂O₃[J]. Materials China, 2020, 39(2): 113-123.
- [3] FU Bo, JIA Zhi-tai, MU Wen-xiang, et al. A review of β -Ga₂O₃ single crystal defects, their effects on device performance and their formation mechanism[J]. Journal of semiconductors, 2019, 40(1): 51-61.
- [4] GREEN A J, CHABAK K D, HELLER E R, et al. 3.8-MV/cm breakdown strength of movepe-grown Sn-doped, β -Ga₂O₃ mosfets[J]. IEEE electron device letters, 2016, 37(7): 902-905.
- [5] VÍLLORA E G, ARJOCA S, SHIMAMURA K, et al. β -Ga₂O₃ and single-crystal phosphors for high-brightness white LEDs and LDs, and β -Ga₂O₃ potential for next generation of power devices[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2014, 8987: 1-12.
- [6] MU Wen-xiang, JIA Zhi-tai, YIN Y R, et al. One-step exfoliation of ultra-smooth β -Ga₂O₃ wafers from bulk crystal for photodetectors[J]. Crystengcomm, 2017, 19(34): 5122-5127.
- [7] GAO Shang, WU Yue-qin, KANG Ren-ke, et al. Nano grinding induced surface and deformation mechanism of single crystal β -Ga₂O₃[J]. Materials science in semiconductor processing, 2018, 79: 165-170.
- [8] WU Yue-qin, GAO Shang, HUANG H, et al. The deformation pattern of single crystal β -Ga₂O₃ under nanoindentation[J]. Materials science in semiconductor processing, 2017, 71: 321-325.
- [9] 王占国.半导体材料研究进展[M].北京:高等教育出版社,2012.
WANG Zhan-guo. Research progress of semiconductor materials[M]. Beijing: Higher education press, 2012.
- [10] XU Jing-jing, ZHENG Wei, HUANG Feng. Gallium oxide solar-blind ultraviolet photodetectors: A review[J]. Journal of materials chemistry C, 2019, 7(29): 8753-8770.
- [11] ASGHAR K, QASIM M, NELABHOTLA D M, et al. Effect of surfactant and electrolyte on surface modification of c-plane GaN substrate using chemical mechanical planarization (CMP) process[J]. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 2016, 497: 133-145.
- [12] 王国彪.纳米制造前沿综述[M].北京:科学出版社,2009.
WANG Guo-biao. Reviews on frontier of nanofabrication[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [13] 李军,张羽驰,明舜,等.固结磨料球对氟化钙晶体摩擦磨损性能的影响[J].表面技术,2019,48(12): 196-203.
LI Jun, ZHANG Yu-chi, MING Shun, et al. Effect of fixed abrasive ball on friction and wear properties of CaF₂ crystal[J]. Surface technology, 2019, 48(12): 196-203.
- [14] ZHANG Chun-yu, GUO Bing, ZHAO Qing-liang, et al. Ultra-precision grinding of AlON ceramics: Surface finish and mechanisms[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39: 3668-3676.
- [15] JIANG Chen, CHENG Jin-yi, WU Tao. Theoretical model of brittle material removal fraction related to surface roughness and subsurface damage depth of optical glass during precision grinding[J]. Precision engineering, 2017, 49: 421-427.
- [16] 李琛,张飞虎,张宣,等.硬脆单晶材料塑性域去除机理研究进展[J].机械工程学报,2019,55(3): 181-190.
LI Chen, ZHANG Fei-hu, ZHANG Xuan, et al. Research progress of ductile removal mechanism for hard-brittle single crystal materials[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(3): 181-190.
- [17] 杨晓京,刘艳荣,杨小江,等.纳米尺度单晶锗各向异性摩擦磨损性能试验研究[J].稀有金属材料与工程,2015,44(8): 1904-1908.
YANG Xiao-jing, LIU Yan-rong, YANG Xiao-jiang, et al. Friction and wear experiments on anisotropic properties of single crystal germanium in nanoscale[J]. Rare metal materials and engineering, 2015, 44(8): 1904-1908.
- [18] 鲁春朋,高航,王奔,等.磷酸二氢钾晶体单点划痕试验研究[J].机械工程学报,2010,46(13): 179-185.
LU Chun-peng, GAO Hang, WANG Ben, et al. Experimental study of single-tip scratching on potassium dihydrogen phosphate single crystal[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(13): 179-185.
- [19] ZHANG Yong, ZHANG Liang-chi, LIU Mei, et al. Understanding the friction and wear of KDP crystals by nano scratching[J]. Wear, 2015, 332: 900-906.

(下转第 284 页)