

文章编号 1004-924X(2018)03-0632-08

反应烧结 SiC 陶瓷脆性去除特征 及刻划力波动行为

李志鹏, 张飞虎*, 孟彬彬

(哈尔滨工业大学 机电工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 主要研究不同加工深度及压头形状刻划条件下反应烧结碳化硅(RB-SiC)陶瓷脆性去除特征和刻划力波动行为之间的关系。采用半径分别为 400 nm 的金刚石玻氏压头以及 8.7 μm 的圆锥压头进行恒切深刻划, 并利用扫描电子显微镜对刻划后的 SiC 陶瓷表面进行测量。最后, 通过 Daubechies 小波进行横向力和切向力信号分解, 并结合划痕表面损伤形式, 给出不同细节信号及近似信号与加工损伤的联系。实验结果表明: 对于圆锥压头, 随着加工深度的增大, 表面形貌为塑性挤出、微破碎和大量表面破碎共存的形式。此外, 在脆性断裂去除情况下, 随着压头尖端半径的减小, 破碎程度增加且刻划力信号能量由低频段逐渐扩散到整个频段。同时低频段的能量逐渐占据主要地位。不同程度的表面微破碎及边缘微破碎对刻划力细节信号分量贡献较大。反应烧结碳化硅结构本身差异以及缺陷引起的大量断裂是刻划力波动能量的主要来源, 而且随着加工深度的增大而增大。

关键词: RB-SiC; 脆性断裂; 小波分析; 刻划力; 玻氏压头; 圆锥压头

中图分类号: P228.5.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0632

Removal characteristics and fluctuation behavior of cutting force during scratch process of RB-SiC ceramics

LI Zhi-Peng, ZHANG Fei-Hu*, Meng Bin-Bin

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangfhhit.edu.cn

Abstract: This paper aims to explore the brittle fracture characteristics and fluctuation behavior of cutting force during scratch process of RB-SiC with different scratch depth and indenter shapes. The diamond Berkovich indenter with 400 nm and conical indenter with 8.7 μm were used to conduct experiments under constant scratch depth mode. Then, the surface morphologies and brittle fracture behavior were observed with a scan electron microscopy (SEM). Finally, Daubechies wavelet was adopted to decompose the lateral and tangential forces, and the relationship between different detail signal/decompose signal and damage types were given. The results show that with the increasing of scratch depth, plastic extrusion, micro fracture and large area fracture are coexist when conical indenter is used. Besides, the degree of fracture is more serious and cutting force signal energy spread

收稿日期: 2017-07-05; 修订日期: 2017-08-31.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB013202); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB1102204)

from low-frequency to the whole frequency with the decrease of indenter radius and the energy of low-frequency band energy gradually occupied the dominates position. Surface and margin microfracture make the dominate contribution to the detail signal of cutting force. Scratching force fluctuation energy is mainly come from the structure difference and defects of RB-SiC which caused mass crushing, and increased with scratch depth.

Key words: RB-SiC; brittle fracture; wavelet analysis; scratch force; Berkvoich indenter; conical indenter

1 引言

随着空间探测技术的发展,对光学成像元件稳定性和轻量化的要求越来越高,要求材料的性能能够应对恶劣的环境。由于 SiC 陶瓷在耐化学腐蚀、导热系数大、热膨胀系数小(α)、高比刚度(E/ρ)、低密度等特性上的表现优于钼、硅、石英、铍等材料,因此成为大口径光学反射镜的首选材料^[1-4]。目前,基于 SiC 陶瓷、石英等硬脆材料组成的大口径光学元件从胚料到面形成型的加工方法主要采用金刚石砂轮磨削^[5-6]。然而 SiC 陶瓷的高硬度造成磨削去除率低(低于推荐硬度比 5:1=刀具:材料),同时低断裂韧性又对裂纹敏感易于导致表面和亚表面损伤,降低成像质量及使用寿命。因此,如何能够控制材料损伤减少脆性断裂的发生成为研究的热点。

在脆性断裂去除阶段磨削力信号中存在大量随机断裂信号以及环境信息(如噪声振动),不满足绝对可积的条件,磨削力信号的傅里叶变换不存在。小波变换是一种时间-尺度分析方法,在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,适合于探测信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成份。但现阶段小波变换主要用于监测实际加工过程中刀具状态,对硬脆材料脆性去除方式下表面特征与磨削力信号的相关性缺乏相应的研究。

磨削力是磨削加工过程中较为重要的物理量,与材料去除方式密切相关。同时,力信号相对易于实施监测,因此磨削力信号常用来判断材料去除机制^[7-8]。但是磨削过程中的不可控因素较多受磨削热、磨粒分布不一致及机床振动等影响,故单颗粒刻划成为研究材料去除机制及行为方法之一^[9-11]。刻划去除机制随着金刚石颗粒与材料接触程度的不同分为弹性变形,弹塑性变形,塑性去除,脆性断裂等阶段,同

实际磨削过程类似^[12]。此外,金刚石颗粒形状及尖端半径是影响材料变形机制的又一因素,使得颗粒和材料接触应力状态不一致导致去除行为存在差异^[13]。所以通过恒切深的刻划实验,简化模拟砂轮磨削过程中磨粒与工件的相互作用,深入研究反应烧结 SiC 陶瓷在不同加工深度下以及不同压头形状下的脆性去除行为和刻划力波动行为之间的关系。

2 实验方案及参数选择

图 1 为刻划实验示意图,Z 方向运动由三轴直线运动的压电传感器实现,闭环精度达到 2 nm。德国 PI 公司生产的纳米精度的线性实验台 M-714. HD(7 mm range / 2 nm resolution) 以及 M-511. HD(100 mm range / 2 nm resolution) 分别实现 X 方向及 Y 方向的进给运动。刻划压头采用 AFM 进行精确测量。从图 2 中可以看出,金刚石玻氏压头以及圆锥压头尖端半径分别为 400 nm 以及 8.7 μm 。刻划过程采用恒切深加载,刻划深度为 1 μm , 2 μm , 3 μm ;划痕长度为 200 μm 。此外,采用变切深进行一组刻划实验,

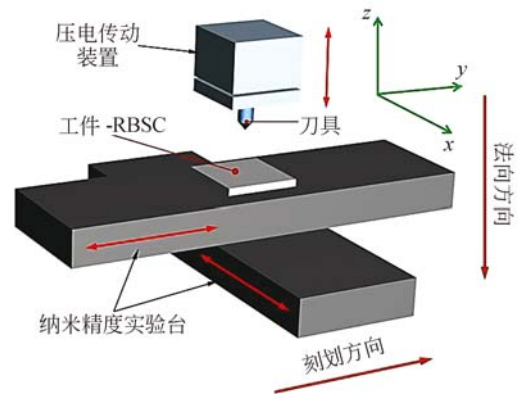


图 1 刻划实验示意图

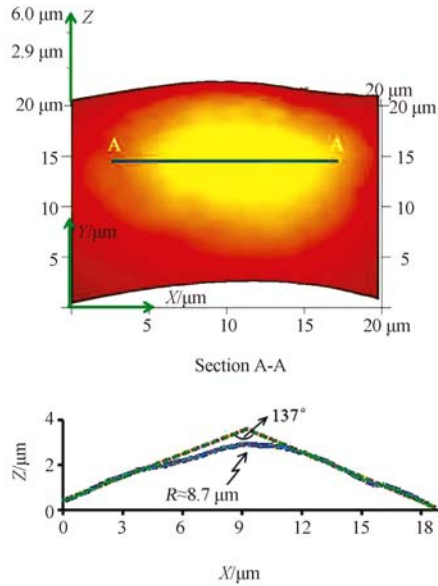
Fig. 1 Schematic diagram of scratch experimental

目的是验证 RB-SiC 对应不同深度的损伤分布形式。使用的反应烧结 SiC 陶瓷由 Goodfellow 公司提供。

3 结果分析与讨论

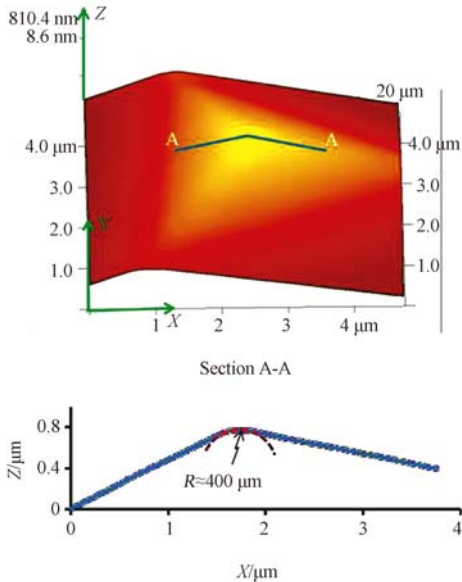
3.1 不同形状压头产生的划痕形貌分析

划痕形貌如图 3 所示,由于加工深度较大,所有划痕均出现不同程度的断裂和破碎现象。已加



(a) 圆锥压头形貌及界面轮廓图

(a) 3D image of conical indenter and cross section profile of indenter tip

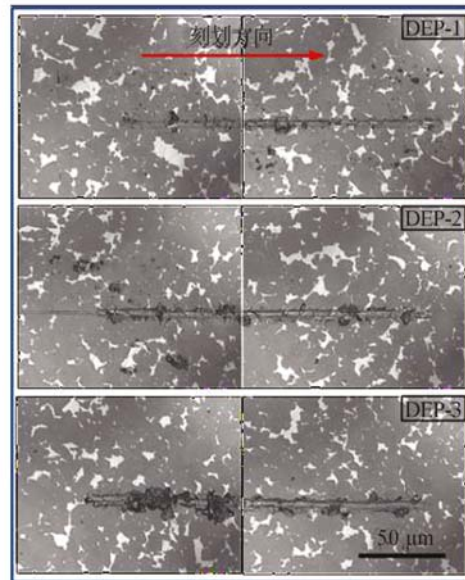


(b) 玻氏压头形貌及界面轮廓图

(b) 3D image of Berkovich indenter and cross section profile of indenter tip

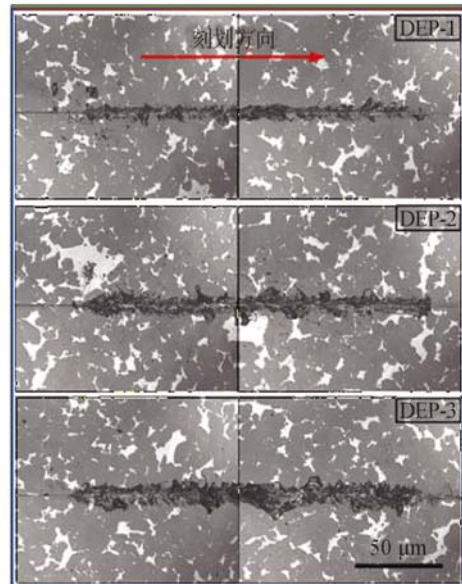
图 2 压头三维形貌图及截面轮廓曲线

Fig. 2 3D image of indenters and cross section profile of indenter tip



(a) 圆锥压头划痕形貌图

(a) Topography of scratched groove by conical indenter



(b) 玻氏压头划痕形貌图

(b) Topography of scratched groove by Berkovich indenter

图 3 不同形状压头在不同深度下的划痕形貌图

Fig. 3 Topography of grooves by indenters with different shapes at various depths

工表面特征为脆塑共存,其中尖锐玻氏压头刻划产生的沟槽表面微破碎特征更为严重。对于较钝的圆锥压头,刻划深度为 $1\ \mu\text{m}$ 时去除方式主要是塑性变形及塑性挤出,同时伴有裂纹的产生。且随加工深度增大,划痕表面开始出现大面积表面破碎。

图 4 为较钝圆锥压头刻划产生划痕形貌的局部放大。由划痕表面特征可以看出,划痕表面均存在不同程度的破碎现象,划痕内部存在一定的

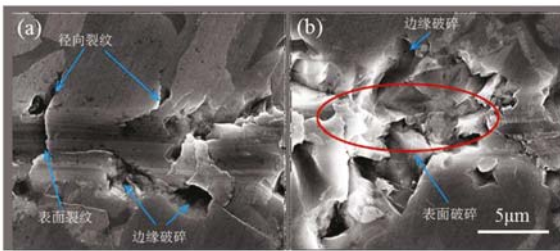


图 4 圆锥压头划痕局部细节形貌图

Fig. 4 Details with enlarged scale of the groove by conical indenter

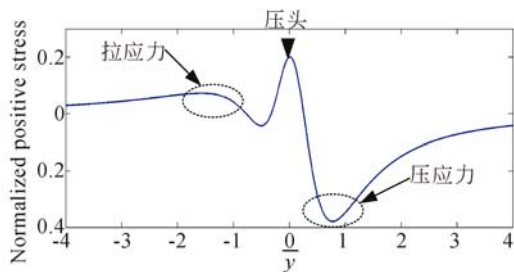
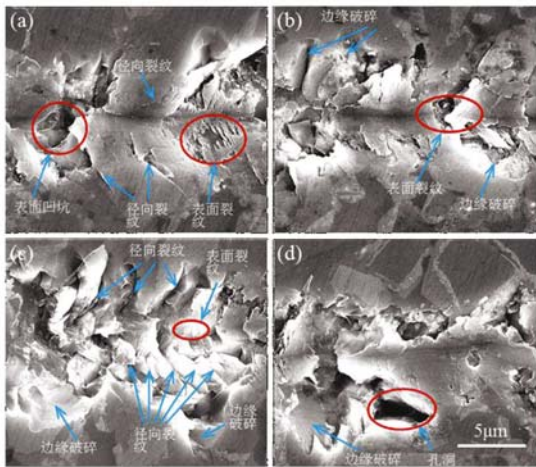


图 5 玻氏压头划痕局部细节形貌及 y 方向正应力分布示意图

Fig. 5 Details with enlarged scale of the groove by Berkovich indenter and the normal stress distributed in y direction

塑性去除同时伴随挤压破碎。在材料缺陷较多的区域,划痕表面出现严重破碎。

如图 5 所示为玻氏压头划痕区域局部放大图,可知径向裂纹间断性的出现在划痕两侧。根据压头下方 Boussinesq 和 Cerruti 弹性应力场以及 Bilister 非弹性应力场的叠加,可知压头后方拉应力是该裂纹产生的原因(图 5(e))显示了 y 方向正应力的分布特性^[14]。同时可以发现材料缺陷加工表面出现表面坍塌,划痕两侧均存在不同程度的边缘破碎,不平整断裂面和断裂边缘。当压头移动到硬度高的 SiC 相材料上时,表面裂纹密集出现。而在硬度低的 Si 相上裂纹相对较少。图 5(d)中的断裂表面存在河流状的解理纹,这种裂纹形式出现在具有明显解理倾向的晶体材料中,当裂纹穿过旋转失配的晶界时会继续沿着择优的解理面继续扩展,裂纹分裂成由解理台阶连接起来的分段表面。

3.2 RB-SiC 材料划痕损伤分布分析

根据加工表面特征将整个刻划过程简化为 3 个阶段:塑性去除区(表面无明显裂纹)、裂纹区(表面出现裂纹)以及破碎区(已加工表面出现块状分离)。如图 6 所示,V. Le Hou é rou 等人^[15]提出 SLS glass 可在维氏压头作用下去除形式的改进。在尖锐压头作用下,加工进入裂纹区时,划痕表面不仅存在分布于两侧的径向裂纹,同时还存在由于摩擦作用产生的表面径向裂纹。图6所示为玻

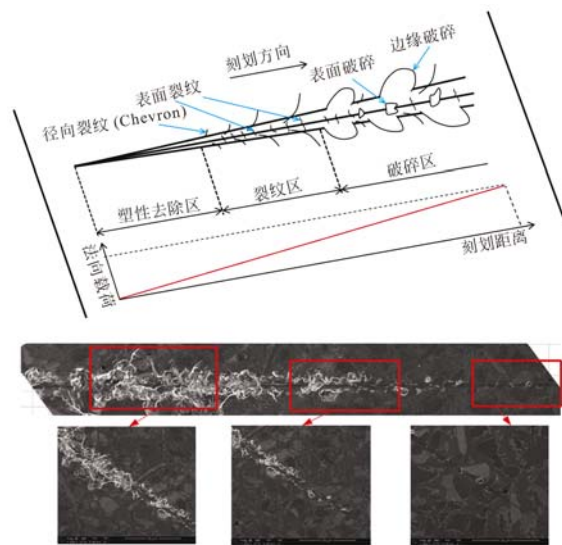


图 6 刻划过程中损伤形式分布图

Fig. 6 Damage form distribution during scratch test under progressing load

氏压头变切深刻划不同阶段的划痕形貌,随着切深的不断增大,去除方式进入破碎区,划痕两侧出现不同形式的边缘破碎。同时出现由表面裂纹扩展至已加工表面导致的破碎。但在该区域仍然存在大量不同形式的微裂纹。如图 5 所示,密集分布的表面裂纹与接近表面区域的由残余应力导致的横向裂纹交叉,导致加工表面区域成无规则的崩碎状。使用钝压头刻划 SiC 陶瓷时产生的表面径向裂纹分布与使用尖锐压头时类似,但破碎区面积前者大于后者。

3.3 RB-SiC 脆性去除条件下刻划力小波分析

刻划实验脆性去除导致的刻划力信号波动处于低频区域,因此选用离散小波而不是更为复杂的小波包分解。其中, Daubechies 小波族是正交分解且具有紧支撑性,因此常用于振动信号和声发射信号的分析。使用 db4 小波分解后的近似信号与实际加工产生的波动信号不符,因此选用 db3 小波对刻划力信号进行分析。经过 5 次分解后,近似信号的波形特征及波动次数与材料颗粒烧结结构对加工的影响规律接近,因此,如图 7 所示,对刻划力信号最多进行 5 次分解。

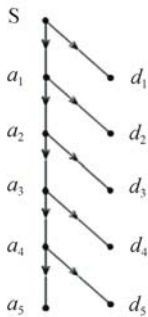


图 7 信号分解示意图

Fig. 7 Schematic diagram of signal decomposition

为研究脆性去除方式的刻划力信号的频域特征,在进行小波分析之前,对原始信号进行预处理以去除原始信号在时域中的宏观特征:

$$S(i) = (x(i) - (\sum_{i=1}^n |x(i)|) / n), \quad (1)$$

其中: $S(i)$ 为预处理后得到的信号, $x(i)$ 为信号帧中各采样点, $i=1, 2, \dots, n$ 。

加工过程中噪声信号是不可避免的影响因素。收集噪声信号并做相应的小波分析。如图 8, 噪声信号的能量主要集中在相对较高的频段 d_1 、 d_2 以及 d_3 , 且 y 方向的噪声信号的能量要

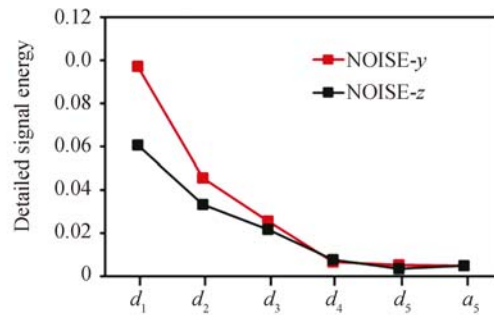


图 8 噪声信号能量分布图

Fig. 8 Distribution map of noise signal energy

高于 z 方向。

对已处理的刻划力信号进行小波分解,分别对 y 和 z 两方向刻划力信号的细节信号和近似信号的能量进行分析。如图 8 和 9 对比可知,较钝圆锥压头细节信号 d_1, d_2, d_3 和 d_4 的能量值与噪声信号相应分量一致,能量主要分布在高频区域,表明该加工条件下刻划力信号的分量 d_1, d_2, d_3 和 d_4 基本为噪声信号。而 d_5 能量明显高于噪声信号相应分量的能量。表明该信号由裂纹形成微破碎导致能量的增加。从图 9(b) 和 (d) 可以看出,尖锐玻氏压头刻划力的所有细节信号能量值均大于圆锥压头的细节信号。随着压头尖端半径的减小,刻划力信号能量由低频段逐渐扩散到整个频段,法向刻划力低频段细节信号能量逐渐占据主要地位。由材料损伤分布状态可知,在相同条件下尖锐玻氏压头产生表面微破碎及边缘微破碎数量和程度远多于圆锥压头。该数据表明脆性断裂破碎对刻划力细节信号分量贡献较大(微裂纹相对破碎引起能量的变化较小)。

近似信号 a_5 主要反应了较低频段的波动,体现了不同 SiC 相之间以及 SiC 相与 Si 相之间的过渡引发的刻划力波动以及随机缺陷造成的材料断裂。噪声信号 5 次分解后近似信号的能量相对于刻划力对应的近似信号来说过低,因此可以忽略噪声信号的影响。图 10 可以看出,近似信号的能量随刻划力增大而增大。 Z 方向近似信号能量大于 Y 方向的近似信号能量。该行为归因于压头在切削过程中都是大负前角, Y 向切削分力小于 Z 向切削分力,因此 Y 方向相应的刻划力波动也会较小。此外,刻划力的近似信号能量远大于细节信号的能量,而且刻划力振动随加工深度的增大而增大,反应烧结 SiC 陶瓷脆性去除方式下,

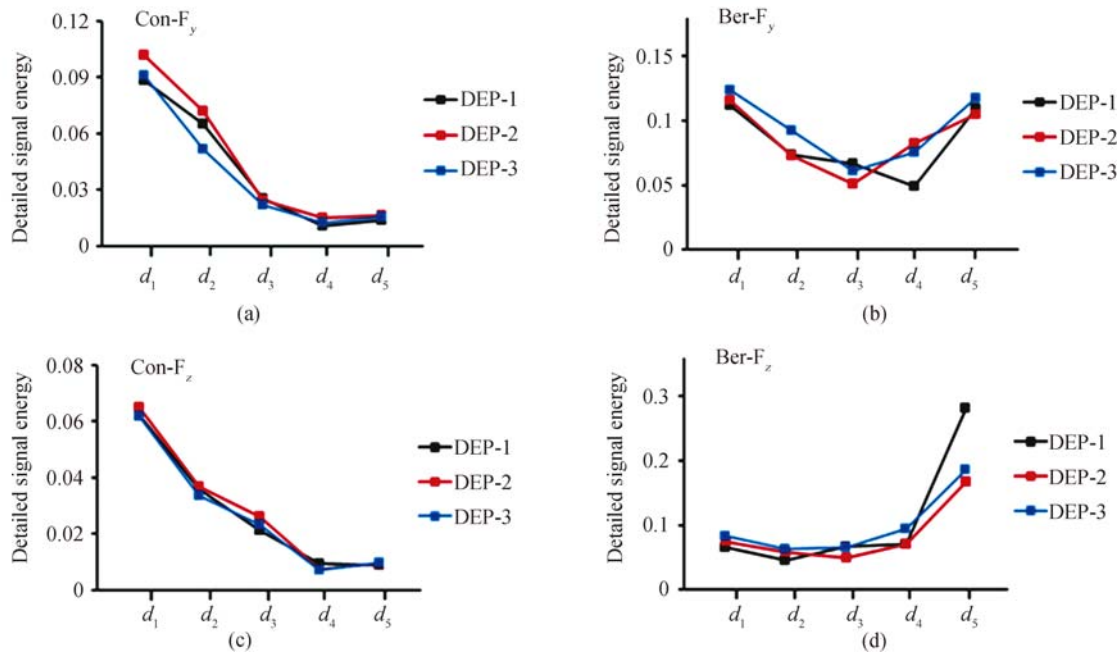


图 9 不同形状压头在不同深度下的刻划力细节信号能量分布图

Fig. 9 Detail signal energy distribution of cutting forces by indenters with different shapes at various depths

刻划力振动能量主要来自材料结构本身以及缺陷引起的晶粒尺度的材料大面积断裂。

4 结 论

本文研究了反应烧结 SiC 陶瓷这种硬脆材料在脆性去除方式下表面损伤形式及分布规律,分别使用不同尖端半径的玻氏压头和圆锥压头进行刻划实验。分析刻划过程中的加工损伤形成及扩展行为,给出了适用于该材料的损伤形式分布规律。对横向与切向的刻划力信号进行小波分解,结合划痕表面损伤形式和分解信号,给出了不同细节信号及近似信号与加工损伤的联系。对于加工表面质量实时检测与分析提供了新的方式。通过研究得出以下结论:

(1)对于钝的圆锥压头,去除方式处于破碎区时,随着加工深度的增大,表面形貌主要为塑性挤出、微破碎和大面积表面破碎共存的形式。对于尖锐的玻氏压头,在该阶段,微破碎以及大面积破碎程度远大于较钝的压头。

(2)利用 Daubechies 小波对横向力和刻划力分解,通过对比分析细节信号能量分布规律和划痕形貌发现,在脆性去除方式下,随着压头尖端半径的减小,刻划力信号能量由低频段逐渐扩散到整个频段。其中低频段的能量逐渐占据主要地

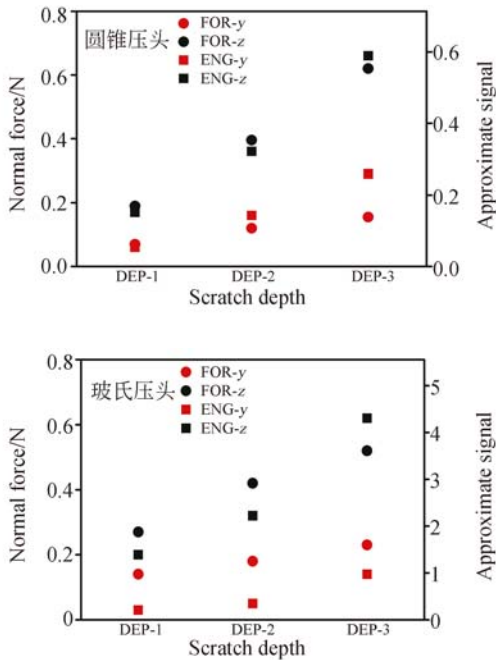


图 10 不同形状的压头在不同深度下的刻划力及近似信号能量分布图

Fig. 10 Distribution of approximate signal energy and cutting forces by indenters with different shapes at various depths

位。不同程度的表面微破碎及边缘微破碎对刻划力细节信号分量贡献较大。

(3) 反应烧结材料材料结构本身差异

以及缺陷引起的材料大面积断裂是刻划力波动能量的主要来源,而且随着加工深度的增大而增大。

参考文献:

- [1] 张剑寒, 张宇民, 韩杰才, 等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(2): 179-184.
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, *et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)
- [2] Sarro P M. Silicon carbide as a new MEMS technology[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 82(1-3): 210-218.
- [3] Wijesundara M, Azevedo R. *Silicon Carbide Microsystems for Harsh Environments*[M]. New York: Springer, 2011.
- [4] Sein E, Toulemont Y, Safa F, *et al.*. A Φ 3.5 m diameter Sic telescope for Herschel mission[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, SPIE, 2003: 606-618.
- [5] 刘立飞, 张飞虎, 刘民慧. 碳化硅陶瓷的超声振动辅助磨削[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(8): 2229-2235.
LIU L F, ZHANG F H, LIU M H. Ultrasonic assisted grinding for silicon carbide[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2229-2235. (in Chinese)
- [6] DOI T, UHLMANN E, MARINESCU I D. *Handbook of Ceramics Grinding and Polishing*[M]. 2nd ed. Waltham, MA: William Andrew, 2014.
- [7] WU C J, LI B Z, YANG J G, *et al.*. Prediction of grinding force for brittle materials considering co-existing of ductility and brittleness[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5-8): 1967-1975.
- [8] CHENG J, WU J, GONG Y D, *et al.*. Grinding forces in micro slot-grinding (MSG) of single crystal sapphire[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 112: 7-20.
- [9] XU S, YAO Z Q, ZHANG M C. Material removal behavior in scratching of zirconia ceramic surface treated with laser thermal shock[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(9-12): 2693-2701.
- [10] DAI C W, DING W F, XU J H, *et al.*. Investigation on size effect of grain wear behavior during grinding nickel-based superalloy Inconel 718[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5-8): 2907-2917.
- [11] QIU ZH J, LIU C C, WANG H R, *et al.*. Crack propagation and the material removal mechanism of glass-ceramics by the scratch test[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 64: 75-85.
- [12] SUBHASH G, KLECKA M. Ductile to brittle transition depth during single-grit scratching on alumina ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(11): 3704-3707.
- [13] ZHANG F H, MENG B B, GENG Y Q, *et al.*. Friction behavior in nanoscratching of reaction bonded silicon carbide ceramic with Berkovich and sphere indenters [J]. *Tribology International*, 2016, 97: 21-30.
- [14] AHN Y, FARRIS T N, CHANDRASEKAR S. Sliding microindentation fracture of brittle materials: Role of elastic stress fields[J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 29(3-4): 143-152.
- [15] Le Houérou V, Sangleboeuf J C, Dériano S, *et al.*. Surface damage of soda-lime-silica glasses: indentation scratch behavior[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 316(1): 54-63.

导师简介:



张飞虎 (1964—) 男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1984年、1987年于西北工业大学获分别获得学士学位、硕士学位,1993年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事精密超精密加工与纳米技术的研究,包括超精密加工新工艺及设备(ELID磨削等)、纳米级超光滑表面加工技术及表面质量、新型功能材料的精密和超精密加工、光学非球面加工、硬脆材料精密和高效磨削技术的研究。E-mail: zhangfhhit.edu.cn



李志鹏 (1989—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2013年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料超精密磨削加工机理及相关技术研究。E-mail: zplihit@163.com



孟彬彬 (1987—),男,山东枣庄人,博士,分别于2011年、2016年于哈尔滨工业大学获得硕士学位、博士学位,主要从事硬脆材料的磨削仿真与机理研究。E-mail: jidian050604@163.com