

飞秒激光加工单晶金刚石制备正前角磨削工具

殷赳^{1,2}, 陈根余^{1,3}, 熊彪¹, 朱智超¹, 王彦懿¹, 金梦奇¹, 胡榜¹

(1.湖南大学 激光研究所, 长沙 410082; 2.湖南城市学院 机械与电气工程学院, 湖南 益阳 413000; 3.汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 制造一种磨粒有序排布、具有正前角的无结合剂端面金刚石磨削工具。**方法** 采用波长为 1030 nm、脉宽为 250 fs 的钛蓝宝石飞秒激光对单晶金刚石 (SCD) 进行烧蚀加工, 首先研究加工工艺参数 (特别是烧蚀轨迹间距) 对金刚石加工效率及表面质量的影响。采用预先设计的激光扫描路径, 基于优化后的工艺参数在 SCD 表面加工出微磨粒阵列结构, 各磨粒呈方锥台形结构, 其顶部倾斜角约为 100°。在此基础上, 对微磨粒阵列进行烧蚀加工, 将所有微磨粒顶部的倾斜角减小至小于 90°。**结果** 当激光烧蚀轨迹间距为 10.0 μm 时, 烧蚀加工表面 RMS 粗糙度最小。确定了一种微磨粒边缘倾斜角小于 90°且磨粒有序排布的新型无结合剂金刚石端面磨削工具的激光制备方法和工艺, 采用该工艺加工的磨削工具表面质量好, 轮廓精度高, 磨粒平均正前角约为 9.80°。**结论** 采用飞秒激光可以高质量、高效率地制备出磨粒有序排布的新型正前角无结合剂金刚石端面磨削工具, 该工具有望在硬脆材料磨削中减小磨削力, 提高材料表面完整性。**关键词:** 飞秒激光; 单晶金刚石; 微磨粒阵列; 磨削工具; 正前角

中图分类号: V261.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)02-0033-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.005

Grinding Tools with Positive Rake Angle Prepared by Femtosecond Pulsed Laser Machining of Single Crystal Diamond

YIN Jiu^{1,2}, CHEN Gen-yu^{1,3}, XIONG Biao¹, ZHU Zhi-chao¹,
WANG Yan-yi¹, JIN Meng-qi¹, HU Bang¹

(1.Laser Research Institute, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China;

3.State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The work aims to fabricate a binder-less diamond face grinding tool with abrasive particles arranged in order and positive rake angle. A Ti: Sapphire femtosecond laser with a wavelength of 1030 nm and a pulse width of 250 fs was used to ablate and process the SCD. The effects of processing parameters, especially the ablation track pitch on the processing efficiency and surface quality of the diamond, were investigated in advance. Based on the optimal processing parameters, an array of square frustum microabrasive with grain inclination angle of approximately 100° was fabricated on the surface of SCD according to the predesigned laser scanning path. The microabrasive array was subsequently ablated to reduce the inclination angle at

收稿日期: 2018-11-13; 修订日期: 2019-01-04

Received: 2018-11-13; Revised: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51675172)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675172)

作者简介: 殷赳 (1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光微细加工。

Biography: YIN Jiu (1988—), Male, Doctor, Research focus: laser micro processing.

通讯作者: 陈根余 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光制造及激光微细加工。邮箱: hdgychen@163.com

Corresponding author: CHEN Gen-yu (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: laser manufacturing and laser micro processing. E-mail: hdgychen@163.com

the edge of the micro grains below 90° . When the optimal ablation track pitch was determined to be $10.0\ \mu\text{m}$, the minimum RMS roughness could be achieved on the ablation surface. The laser fabrication process and method of a novel abrasive regularly arranged binder-less diamond face grinding tool with acute inclination angle less than 90° at the edge of the micro grains were elaborated. The fabricated tool showed good surface quality and high profile accuracy and had an average positive rake angle of 9.80° . Femtosecond laser can prepare a new binder-less diamond face grinding tool with abrasive particles arranged in order and positive rake angle efficiently and this kind of tool is expected to reduce the grinding force and enhance the surface integrity of the machined hard and brittle materials.

KEY WORDS: femtosecond laser; single crystal diamond; microabrasive array; grinding tools; positive rake angle

目前,工程陶瓷、硬质合金等硬脆材料的精密加工主要通过超硬磨料磨具磨削来实现。由于金刚石等超硬材料磨粒一般是八面体或菱形十二面体结构,磨粒顶部倾斜角大于 90° ,因此金刚石磨具磨削时的前角为负前角。在传统的负前角磨削加工过程中,磨削力(特别是法向磨削力)大,容易导致磨削表面完整性差,严重影响硬脆材料的应用^[1]。鉴于此,本文提出将金刚石磨粒顶部的倾斜角减小至小于 90° ,从而使传统的负前角磨削变成正前角磨削。这种加工方式有望降低磨削力,减轻硬脆材料的表面/亚表面损伤^[2-3]。

然而,由于金刚石具有极高的硬度和脆性,导致其加工存在质量难以保证、加工效率低、工具损耗大等一系列难题,要在金刚石上加工出诸如正前角磨削刃等复杂微结构更是难上加难。脉冲激光烧蚀作为一种非接触式加工方法,能够有效避开力的直接作用,且不受加工几何形状和被加工材料的限制,无疑是一种非常有效的金刚石加工方法^[4-5]。Everson等^[6]使用 $1064\ \text{nm}$ 、 $100\ \text{ns}$ 的 Nd:YAG 激光切割聚晶金刚石微刀具,研究和优化了材料去除率、加工表面形貌和表面粗糙度,但该微刀具需要进行后处理才能达到工业级的质量。Guo等^[7]采用 $355\ \text{nm}$ 、 $130\ \text{ns}$ 的紫外激光进行了粗粒度金刚石砂轮表面结构化试验,系统地研究了激光加工参数的影响,指出纳秒紫外激光加工金刚石材料的主要缺点是效率相对较低。Dumitru^[8]和 Takayama^[9]等指出飞秒脉冲激光更适合于微细结构和表面的精密制造。相比于传统的短脉冲激光,超短脉冲激光,特别是飞秒激光,因其脉宽极短、单脉冲能量极高的特点,可以极大地降低热影响,获得更好的加工质量和加工精度。因此,越来越多的研究者将飞秒激光加工技术应用于金刚石材料的加工。Shirk等^[10]通过试验对比了飞秒激光与纳秒激光对金刚石烧蚀加工的区别,与纳秒脉冲激光相比,飞秒激光烧蚀加工的金刚石加工区域热影响小,烧蚀表面质量好。G. Eberle等^[11]将 $532\ \text{nm}$ 、 $10\ \text{ps}$ 的皮秒激光聚焦至 $3\ \mu\text{m}$,在聚晶金刚石上加工出周期性结构,在单晶金刚石上加工出刀具几何角度。Andreas Joswig^[12]采用 $800\ \text{nm}$ 、 $150\sim 250\ \text{fs}$ 的飞秒激光在天然单晶金刚石和聚晶 CVD 金刚石上加工出刀具结构,

其中天然单晶金刚石表面粗糙度可达 $30\ \text{nm}$ 。黄建衡等^[13]采用波长 $800\ \text{nm}$ 、脉宽 $100\ \text{fs}$ 的飞秒激光加工 CVD 金刚石,制备出可作为阳极 X 射线源的 CVD 微结构阵列,其中阵列结构槽宽为 $20\ \mu\text{m}$,槽深达 $45\ \mu\text{m}$ 。

尽管飞秒激光加工金刚石领域取得了一些成果^[14-17],但采用飞秒激光直接制造具有复杂微细结构的加工工具,尤其是具有正前角的金刚石磨削工具,在国内外鲜有报道。本文采用飞秒激光对 SCD 进行烧蚀加工,确定飞秒激光加工 SCD 材料的较优工艺参数组合,提出了一种新型无结合剂正前角金刚石端面磨削工具的激光制备方法和工艺,加工出磨粒顶部倾斜角小于 90° 、磨粒规则排布的新型金刚石端面磨削工具。

1 试验

1.1 试验设备和材料

试样为 Element Six 公司的 $4\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ 人造单晶金刚石片。试验所用的激光器为 Amplitude Systems 公司的 S-Pulse HP 型飞秒激光器,其中心波长为 $1030\ \text{nm}$,脉宽为 $250\ \text{fs}$,脉冲重复频率为 $175\ \text{kHz}$,激光平均功率为 $0\sim 35\ \text{W}$ 可调。所用的飞秒激光加工试验平台系统主要由飞秒激光器、2D 扫描振镜、反射镜、精密位移平台等设备组成,经过 2D 扫描振镜的场镜聚焦后的光斑直径约为 $28\ \mu\text{m}$ 。预先将金刚石片在真空炉中钎焊在圆柱形刀柄上,以便于后续的磨削试验。激光烧蚀加工前,先将试件在丙酮中超声波清洗 $10\ \text{min}$,将金刚石试样表面的污物去除干净,加工完成后,进行同样的清洗操作。

1.2 试验方法

首先将试样固定在 XYZ 轴重复定位精度为 $1\ \mu\text{m}$ 的五自由度位移平台上,调整位移加工平台 Z 轴高度,使 SCD 试样的上表面处于飞秒激光焦平面上,即保持离焦量为 0。采用熊彪等^[18]确定的激光平均功率、扫描速度和循环扫描次数,开展烧蚀加工试验。激光束经 2D 扫描振镜辐照到 SCD 表面,通过振镜控制软件设置激光扫描速度和重复扫描次数,改变激光烧蚀轨迹间距,在 SCD 表面烧蚀加工如图 1a 所示的

多道沟槽。采用 KEYENCE VHX-1000 型超景深三维显微镜，观测激光烧蚀加工后的沟槽尺寸和表面微观形貌，采用 Bruker ICON 原子力显微镜 (AFM) 测量沟槽表面粗糙度，确定激光烧蚀轨迹间距参数。随后，根据预先设计的激光扫描路径，采用较优的工艺参数在 SCD 表面加工出方锥台形微磨粒阵列，试验方法如图 1b 所示。通过超景深三维显微镜和 TESCAN

MIRA3 型场发射扫描电子显微镜 (SEM)，观察具有方锥台形微磨粒阵列的无粘结剂金刚石端面磨削工具的表面形貌。最后，通过调整位移台的 A 轴，将试样的倾斜角设定为 10° ，按照图 2 所示的方法，对微磨粒阵列进行进一步烧蚀，减小微磨粒顶部边缘处的倾斜角，从而制造出具有正前角的新型端面磨削工具。

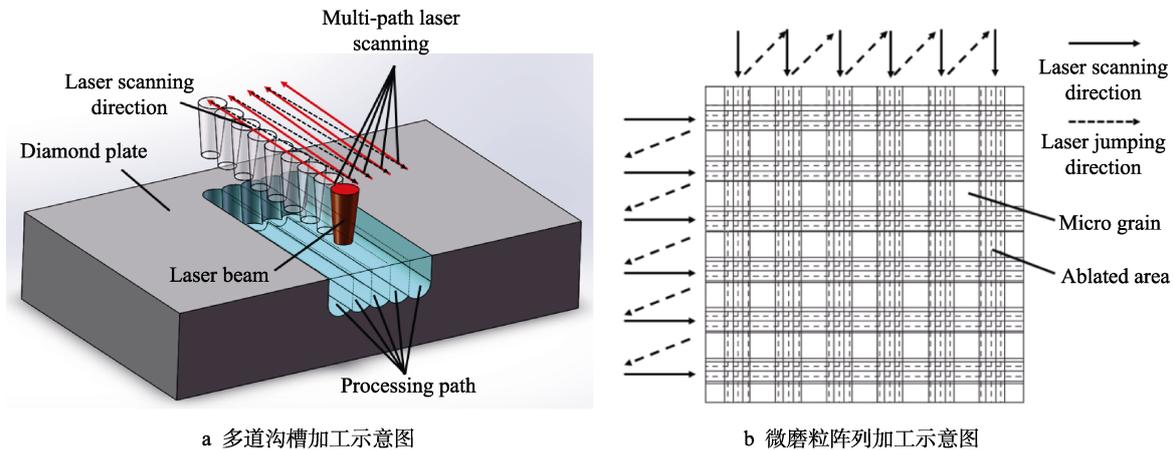


图 1 飞秒激光加工示意图

Fig.1 Schematic diagram of femtosecond laser processing: a) multi-pass groove, b) microabrasive array

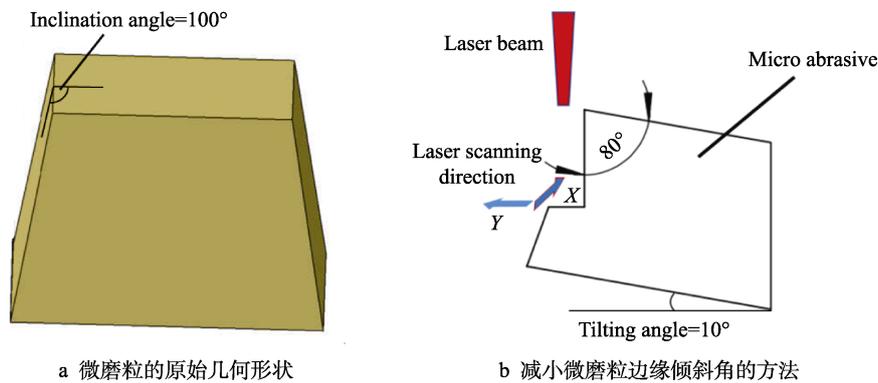


图 2 正前角金刚石磨削工具的激光制造原理

Fig.2 Schematic diagram of laser fabrication of diamond grinding tool with positive rake angle: a) the original geometry of square frustum micro grain, b) the method to reduce the inclination angle at the edge of the micro grain

2 结果及分析

本研究团队前期已经系统研究了激光平均功率、扫描速度和激光扫描次数对 SCD 烧蚀深度、烧蚀宽度以及表面质量的影响，确定了激光平均功率 11.1 W、扫描速度 2 m/s，激光扫描次数 100 次作为理想的激光加工工艺参数^[18]。采用该组工艺参数可加工出宽度约 $42\ \mu\text{m}$ 、深度约 $24\ \mu\text{m}$ 的单道沟槽，本文试验中均采用上述工艺参数。

2.1 激光烧蚀轨迹间距对 SCD 烧蚀的影响

激光烧蚀轨迹间距主要影响沟槽底部的表面质量。固定激光平均功率 11.1 W、扫描速度 2 m/s、扫

描次数 100 次，改变激光烧蚀轨迹间距 Δy ，在金刚石表面采用多道激光扫描的方式加工出宽度为 $200\ \mu\text{m}$ 的沟槽，试验结果如图 3 所示。当烧蚀轨迹间距为 $12.5\ \mu\text{m}$ 和 $11.1\ \mu\text{m}$ 时，沟槽底部均存在明显的周期性隆起与沟壑，如图 3a、b 所示。这一现象主要是由于 SCD 表面上相邻的激光烧蚀轨迹过于分散，导致不同位置金刚石材料烧蚀去除量不一致；另一个原因则是激光束的高斯分布，导致光斑中心区域的激光能量密度要高得多，因此光斑边缘区域的材料去除相对较少。沟槽表面高低起伏的程度随着激光烧蚀轨迹间距的减小而减小，当烧蚀轨迹间距为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $8.7\ \mu\text{m}$ 时，沟槽底部没有出现高低起伏的现象，表面平整度高，如图 3c、d 所示。而当采用 $10.0\ \mu\text{m}$ 的烧蚀轨迹间距时，由于达到相同烧蚀深度所需的总扫描

时间更少，因此加工效率更高。当烧蚀轨迹间距继续减小至 8 μm 时，沟槽结构底部出现明显的重凝层，表面质量变得粗糙，如图 3e 所示。这是由于激光扫描轨迹间距进一步减小，使得激光扫描轨迹在金刚石表面分布过于密集，导致过多的激光脉冲能量累积在金刚石沟槽表面。

为具体量化沟槽表面粗糙度，采用 AFM 对其表面进行测量。图 4a 描述了烧蚀轨迹间距和金刚石沟槽底部表面均方根 (RMS) 粗糙度之间的关系。当烧

蚀轨迹间距从 8.0 μm 增大到 10.0 μm 时，RMS 粗糙度减小，而随着烧蚀轨迹间距从 10.0 μm 增大到 12.5 μm，RMS 粗糙度急剧增大。当烧蚀轨迹间距为 10.0 μm 时，烧蚀表面 RMS 粗糙度最小，为(119±5) nm。作为参考，未加工的 SCD 表面 RMS 粗糙度为 17.2 nm。AFM 测量的表面粗糙度变化趋势与超景深三维显微镜观测结果基本一致。图 4b 展示了在 RMS 粗糙度最小的加工表面上扫描 15 μm×15 μm 区域获得的 AFM 图像。

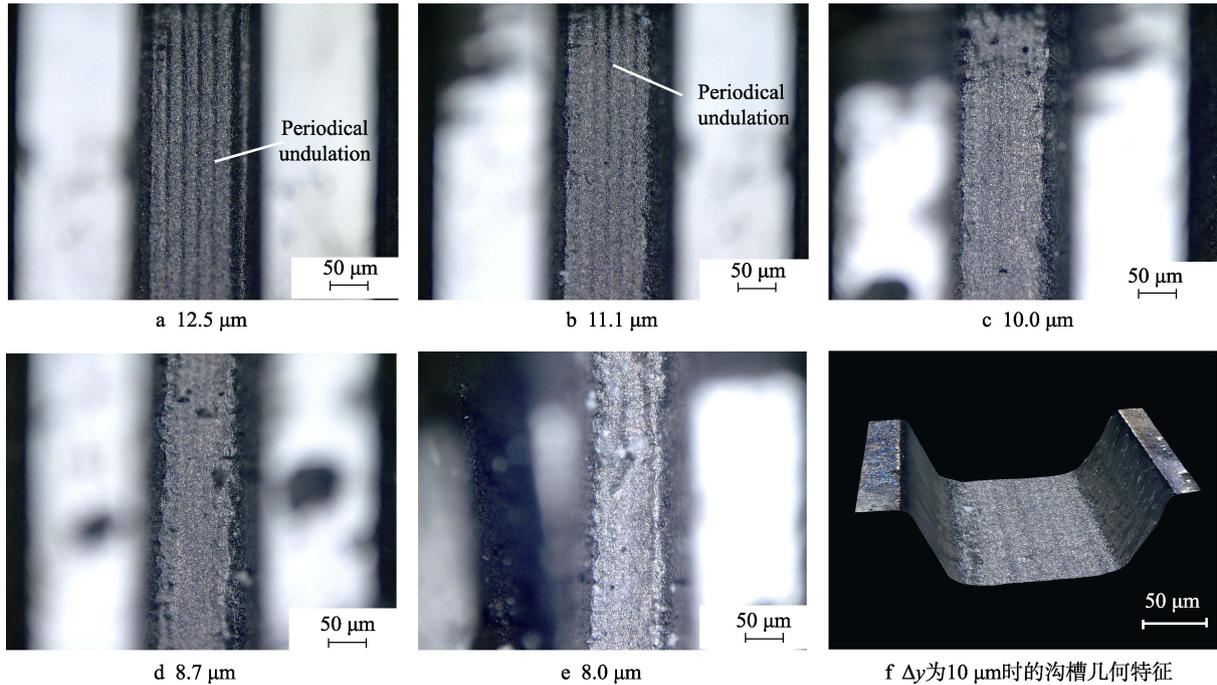


图 3 不同烧蚀轨迹间距下的多道沟槽底部表面形貌

Fig.3 Topography of bottom surface of multi-pass groove with different ablation track pitch: a) 12.5 μm, b) 11.1 μm, c) 10.0 μm, d) 8.7 μm, e) 8.0 μm, f) geometrical feature of the ablated groove(Δy=10.0 μm)

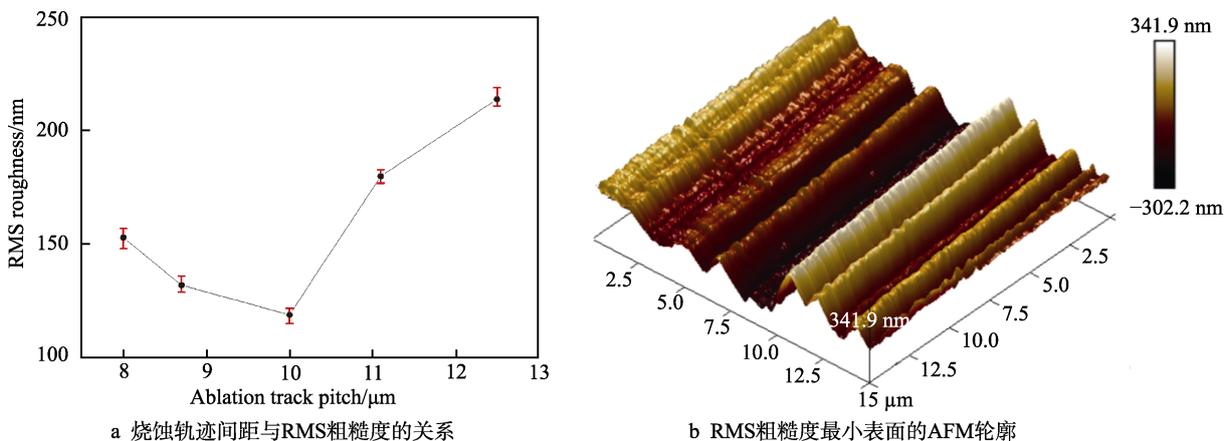


图 4 烧蚀表面 AFM 测量结果

Fig.4 AFM measurement result of ablated surface: a) relationship between ablation track pitch and RMS roughness, b) AFM profile of the surface with minimum RMS roughness

基于上述测量结果，选择 10.0 μm 作为激光烧蚀轨迹间距参数。值得注意的是，采用多道激光扫描的方式加工 200 μm 的沟槽时，加工深度约为 35 μm，

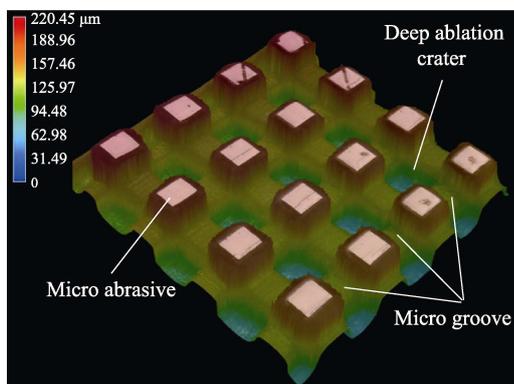
高于单道沟槽加工时的深度 (24 μm)。产生这一现象的主要原因是多道激光扫描加工时，宽度方向出现了激光光斑重叠，辐照在单位烧蚀区域的激光脉冲数量

增多，被烧蚀区域获得的总能量增加，因此烧蚀深度增大。另外，激光烧蚀沟槽的边缘与底面不是垂直而是倾斜的，如图 3f 所示，这是因为沟槽两侧边缘部分烧蚀轨迹没有重叠，同时边缘区域存在等离子体屏蔽效应，导致沟槽边缘材料的烧蚀效果变弱，出现一定的烧蚀倾斜角。采用 10.0 μm 的烧蚀轨迹间距加工时，可测得沟槽侧壁的倾斜角约为 80°。

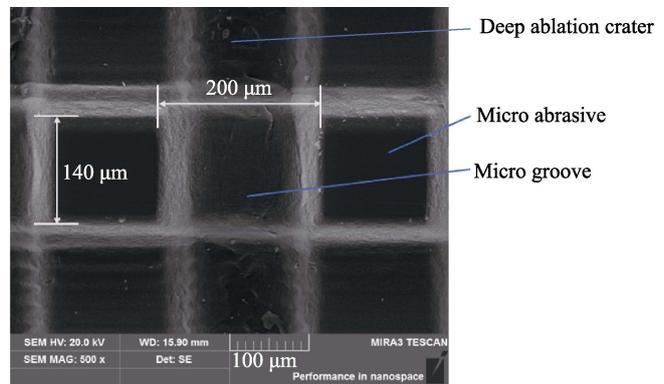
2.2 激光制造无结合剂金刚石磨削工具

将钎焊后的金刚石工具固定于精密位移平台上，根据图 1b 所示的激光扫描路径，采用激光平均功率 11.1 W、扫描速度 2 m/s、扫描次数 100 次、激光烧蚀轨迹间距 10.0 μm 的加工工艺参数，在金刚石表面

分别横向和纵向地烧蚀加工一系列宽度为 200 μm 的沟槽，其中每道沟槽采用图 1a 所示的扫描方式加工。保持焦点位置不变，重复上述加工过程 3 次，在 SCD 表面加工出具有方锥台形微磨粒阵列结构的无结合剂端面砂轮，如图 5a 所示。采用超景深三维显微镜和 SEM 进行观测，测得方锥台形微磨粒突出高度约 100 μm，微磨粒顶部尺寸为 140 μm×140 μm，相邻两微磨粒的间距约为 200 μm，如图 5b 所示。由于所有纵向和横向沟槽侧壁的倾斜角均为 80°左右，因此微磨粒顶部各个方向的倾斜角也均约为 100°。在纵向沟槽与横向沟槽相交的区域，由于激光能量的叠加，产生一个烧蚀深度达到 160 μm 的凹坑，该凹坑的存在可以提高磨削工具的容屑能力。



a 三维超景深显微镜图像(500×)



b FESEM图像(500×)

图 5 方锥台形微磨粒阵列结构的金刚石端面磨具形貌

Fig.5 Topography of binder-less diamond face grinding tool with square frustum structured microabrasive array: a) 3D Digital Microscope image (500×), b) FESEM image (500×)

之所以在上述加工过程中不需要改变焦点位置，是因为本试验采用的激光束瑞利长度值较大。瑞利长度可根据公式(1)计算出来：

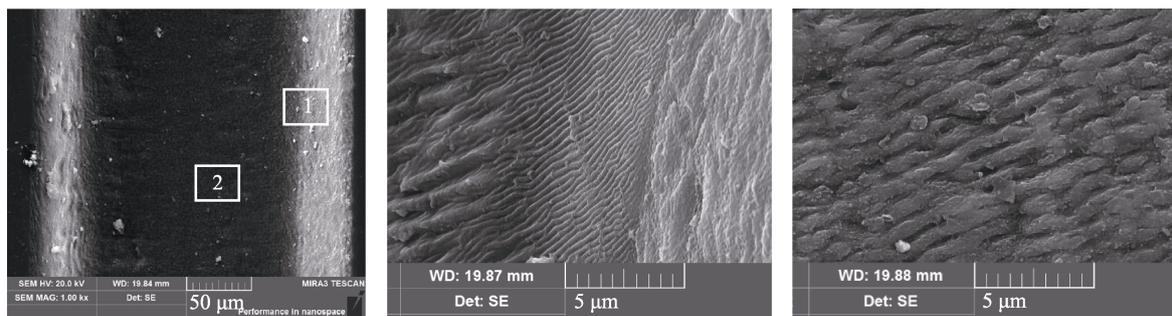
$$z_R = \pi \omega_0^2 / \lambda \quad (1)$$

其中， ω_0 为激光光斑半径， λ 为激光波长，可计算出 $z_R=598 \mu\text{m}$ 。在沟槽底部，即当激光焦点位于焦平面以下 100 μm 时，光斑直径可由公式(2)计算：

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}} \quad (2)$$

根据计算，在焦平面以下 100 μm 处，光斑直径仅由 28 μm 增至 28.4 μm。因此可以认为，在此加工过程中，深度方向的激光能量分布变化很小，几乎不会影响加工结果。

由于金刚石沟槽底面和侧面加工完成后，AFM 探针无法触及，因此仅采用场发射扫描电镜定性地观察这些表面的微观形貌。由图 6a 可看出，飞秒激光烧蚀加工表面平整，没有微裂纹和热影响区。从图 6c 可以看到，在底面产生了表面周期性结构(LIPPS)，



a 1000×

b 1区放大10 000×

c 2区放大10 000×

图 6 SCD 沟槽底面与侧面的 SEM 微观形貌

Fig.6 Microstructure of SCD bottom and side: magnified SEM image with 10 000× of 1 (b) and 2 (c) area

其周期约为 $1\ \mu\text{m}$ ，即大致等于入射激光波长。这类结构的形成可以归因于入射激光与表面散射波的干涉^[19-20]。而在底面和侧面的交界处，由于倾斜的侧壁引起内部反射和干涉，导致 LIPPS 周期显著减小，约为入射激光波长的 $1/4$ 。这些表面周期性结构的存在表明烧蚀加工表面质量良好。

方锥台形金刚石微磨粒阵列为制造具有正前角的新颖金刚石端面磨削工具奠定了基础。Butler-Smith 等^[21-22]通过试验研究发现，与传统磨削工具相比，这种磨粒规则有序排布的无粘结剂磨具，能够有效提高磨削的表面质量和平整度。

2.3 激光制造正前角金刚石磨削工具

在前述激光制造磨粒有序排布的无粘结剂金刚石端面磨削工具的基础上，采用飞秒激光烧蚀加工

SCD 材料的较优工艺参数组合，对方锥台形金刚石微磨粒阵列进行进一步烧蚀加工，使其顶部边缘处的倾斜角减小。将加工好的金刚石无结合剂端面磨削工具固定在位移平台上，采用视频显微镜实时观察试件的位置，按照图 2b 描述的方法，调整位移平台 X、Y 轴，使激光辐照于无结合剂端面磨削工具上一排微磨粒的边缘位置，然后通过调节位移平台 A 轴改变试件的倾斜角度。试验研究发现，试件的倾斜角度对磨粒边缘倾角的影响几乎是线性的，为使磨粒边缘倾角保持在 80° 左右，试件的倾斜角度应增大到 $18^\circ\sim 22^\circ$ 。加工时，激光扫描方向为图 2b 所示的 X 方向，激光束沿 Y 方向向外跳转。重复上述操作，将磨粒有序排布的无结合剂金刚石端面磨削工具上所有微磨粒均加工出图 7 所示的正前角。

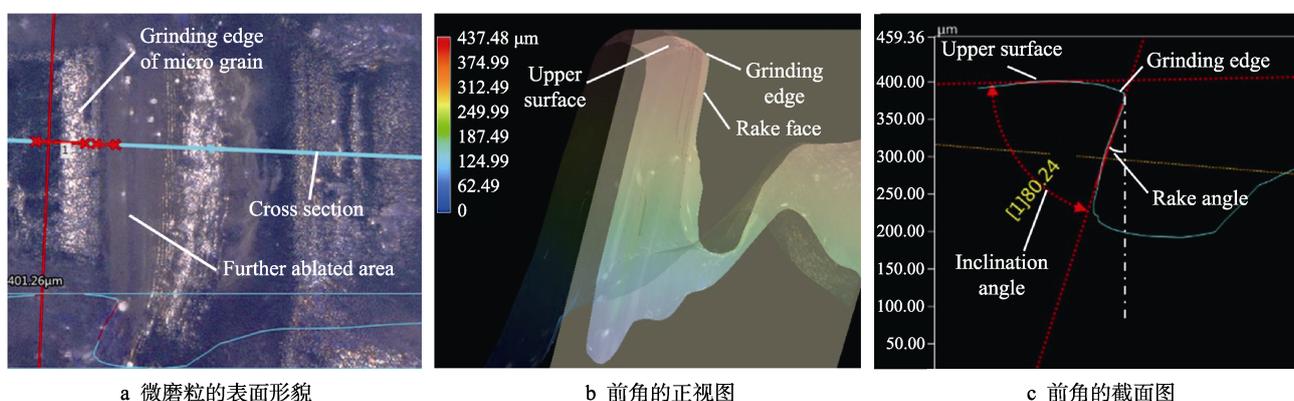


图 7 正前角金刚石微磨粒的表面形貌和几何特性

Fig.7 Surface topography and geometric characteristic of the ablated micro grain with positive rake angle: a) surface topography of the ablated micro grain, b) front view of the rake angle, c) section view of the rake angle

采用三维超景深显微镜观测飞秒烧蚀加工出的正前角微磨粒的微观形貌和几何特征。如图 7a 所示，正前角磨粒刃口边缘平整，没有明显裂纹和不规则崩碎等烧蚀加工缺陷，但由于刃口边缘区域受到激光束辐照，刃口半径达到 $20\ \mu\text{m}$ 左右，使得磨削刃的锋利度减小。金刚石微磨粒底面和侧面平整光滑，几乎没有热损伤和变质层。由图 7b 可以看到，金刚石微磨粒轮廓形状清晰，具有明显的正前角结构，表明采用飞秒激光烧蚀加工出的正前角金刚石微磨粒，具有良好的表面质量和形状精度。

采用超景深显微镜在图 7a 所示的横截面中测量金刚石微磨粒顶部的倾斜角。随机取 4 个微磨粒，在不同的方向进行测量，测得微磨粒的顶部倾角分别为 80.24° 、 79.83° 、 81.62° 和 79.10° 。值得一提的是，该正前角金刚石端面磨削工具的整个制造过程可以在 $1.5\ \text{h}$ 内完成，作为对比，Joswig 等^[10]加工尺寸为 $200\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 、结构深度约为 $25\ \mu\text{m}$ 的刀尖（材料去除量约为本试验的 $1/20$ ）所用的时间超过 $2\ \text{h}$ 。因此，采用飞秒激光可以实现无粘结剂正前角金刚石端面的高效加工。由此可见，采用本文提出的飞秒激光

加工方法与工艺，可以高效地制备出具有正前角的无粘结剂 SCD 端面磨削工具，该磨削工具的平均正前角约为 9.80° 。

根据前期对正前角金刚石磨粒纳米磨削硬脆材料过程的分子动力学模拟研究，正前角金刚石磨削产生的磨削力，尤其是法向磨削力，比传统的负前角磨削小。当前角从 -30° 增大到 30° 时，法向磨削力从 $240\ \text{nN}$ 迅速下降到 $150\ \text{nN}$ 。同时，硬脆材料表面/亚表面损伤得到有效减少，材料的表面完整性显著提高^[3]。有理由推断在宏观磨削加工中，采用具有正前角的金刚石磨削工具，也可以达到同样的效果。因此，在硬脆材料磨削中采用具有正前角的新颖金刚石端面磨削刀具，有望减小磨削力，提高材料表面完整性，但这一结论仍有待通过后续的磨削试验来验证。

3 结语

1) 当激光光斑重叠率较小时，金刚石沟槽底部会产生周期性的隆起与沟壑，而如果激光扫描轨迹分布过于密集，沟槽底部也会变得粗糙。因此选择

10.0 μm 作为烧蚀轨迹间距的理想参数, 此时可获得较小的表面 RMS 粗糙度, 其数值为(119 \pm 5) nm。

2) 在单晶金刚石片表面制备出表面质量高、磨粒顶部倾角约为 100°的 140 μm ×140 μm 方锥台形微磨粒阵列, 该微结构为制备新型正前角金刚石磨削工具奠定了基础。

3) 成功地制备出磨粒顶部倾斜角小于 90°、磨粒有序排布的新型无结合剂金刚石端面磨削工具, 该磨削工具表面质量好、轮廓精度高, 磨粒平均正前角约为 9.80°, 有望在硬脆材料磨削中减小磨削力, 提高材料表面完整性。

参考文献:

- [1] KITAJIMA K, CAI G Q, KURNAGAI N, et al. Study on mechanism of ceramics grinding[J]. CIRP annals manufacturing technology, 1992, 41(1): 367-371.
- [2] HAN X S, LIN B, YU S Y, et al. Investigation of tool geometry in nanometric cutting by molecular dynamics simulation[J]. Journal of materials processing technology, 2002, 129(1): 105-108.
- [3] DAI H, CHEN G, FANG Q, et al. The effect of tool geometry on subsurface damage and material removal in nanometric cutting single-crystal silicon by a molecular dynamics simulation[J]. Applied physics A, 2016, 122(9): 1-16.
- [4] 袁禾蔚, 李佳君, 刘浩, 等. 紫外脉冲激光辐刻单晶金刚石的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 24-28.
YUAN He-wei, LI Jia-jun, LIU Hao, et al. Single crystal diamond trenched by UV pulsed laser[J]. Surface technology, 2018, 47(4): 24-28.
- [5] MAZUR E, GANDHI H H, PHILLIPS K C, et al. Ultrafast laser processing of materials: A review[J]. Advances in optics & photonics, 2015, 7(4): 684.
- [6] EVERSON C, MOLIAN P. Fabrication of polycrystalline diamond microtool using a Q-switched Nd: YAG laser[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2009, 45(5-6): 521-530.
- [7] GUO B, ZHAO Q, YU X. Surface micro-structuring of coarse-grained diamond wheels by nanosecond pulsed laser for improving grinding performance[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2014, 15(10): 2025-2030.
- [8] DUMITRU G, ROMANO V, WEBER H P, et al. Femtosecond ablation of ultra hard materials[J]. Applied physics A, 2002, 74(6): 729-739.
- [9] TAKAYAMA N, YAN J. Mechanisms of micro-groove formation on single-crystal diamond by a nanosecond pulsed laser[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 243: 299-311.
- [10] SHIRK M D, MOLIAN P A, MALSHE A P. Ultrashort pulsed laser ablation of diamond[J]. Journal of laser applications, 1998, 10(10): 64-70.
- [11] EBERLE G, DOLD C, WEGENER K. Laser fabrication of diamond micro-cutting tool-related geometries using a high-numerical aperture micro-scanning system[J]. International Journal of Advanced manufacturing technology, 2015, 81(5-8): 1117-1125.
- [12] JUSWIG A, RISSE S, EBERHARDT R, et al. Laser generated and structured prototypes of diamond tool tips for microoptics fabrication[C]//Proceedings of 25th annual meeting of the american society for precision engineering. Atlanta: Amer Society of Indexers, 2010: 53-56.
- [13] 黄建衡, 梁国文, 李冀, 等. 飞秒激光制备多晶金刚石微结构阵列[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 105-111.
HUANG Jian-heng, LIANG Guo-wen, LI Ji, et al. Femtosecond laser processing of polycrystalline diamond micro-structure array[J]. Chinese journal of laser, 2017, 44(3): 105-111.
- [14] SU S, LI J, LEE G C B, et al. Femtosecond laser-induced microstructures on diamond for microfluidic sensing device applications[J]. Applied physics letters, 2013, 102(23): 374017.
- [15] OGAWA Y, OTA M, NAKAMOTO K, et al. A study on machining of binder-less polycrystalline diamond by femtosecond pulsed laser for fabrication of micro milling tools[J]. CIRP annals manufacturing technology, 2016, 65(1): 245-248.
- [16] ZALLOUM O H, PARRISH M, TEREKHOV A, et al. On femtosecond micromachining of HPHT single-crystal diamond with direct laser writing using tight focusing[J]. Optics express, 2010, 18(12): 13122-13135.
- [17] SHINODA M, GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser-induced formation of nanometer-width grooves on synthetic single-crystal diamond surfaces[J]. Journal of applied physics, 2009, 105(5): 053102.
- [18] 熊彪, 陈根余, 殷超, 等. 飞秒激光加工单晶金刚石锥形阵列的试验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(2): 270-277.
XIONG Biao, CHEN Gen-yu, YIN Jiu, et al. Experimental research on conical array of single crystal diamond based on femtosecond laser[J]. Applied laser, 2018, 38(2): 270-277.
- [19] OZKAN A M, MALSHE A P, RAILKAR T A, et al. Femtosecond laser-induced periodic structure writing on diamond crystals and microclusters[J]. Applied physics letters, 1999, 75(23): 3716-3718.
- [20] HUANG M, ZHAO F, CHENG Y, et al. Mechanisms of ultrafast laser-induced deep-subwavelength gratings on graphite and diamond[J]. Physical review B, 2009, 79(79): 125436.
- [21] BUTLER-SMITH P, AXINTE D, DAINE M. Ordered diamond micro-arrays for ultra-precision grinding—An evaluation in Ti-6Al-4V[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2011, 51(1): 54-66.
- [22] BUTLER-SMITH P, AXINTE D, DAINE M, et al. Mechanisms of surface response to overlapped abrasive grits of controlled shapes and positions: An analysis of ductile and brittle materials[J]. CIRP annals manufacturing technology, 2014, 63(1): 321-324.