

皮秒激光织构化PCD复合片表面组织结构的研究

李伟秋¹, 张国立¹, 肖 扬², 廖嘉诚², 彭继华^{2*}, 鲁艳军³

¹科益展智能装备有限公司广州分公司, 广东 广州

²华南理工大学, 广东 广州

³深圳大学, 广东 深圳

Email: *jhpeng@scut.edu.cn

收稿日期: 2021年4月16日; 录用日期: 2021年5月20日; 发布日期: 2021年5月27日

摘 要

采用皮秒激光多次扫描PCD表面获得两种不同深度的槽型表面织构, 即CG50和CG150。采用立体光学显微镜、轮廓仪、场发射扫描电镜、拉曼光谱仪等表征样品的表面形貌、组织结构、化学键合结构和表面金刚石相质量R。结果表明皮秒激光加工PCD表面沟槽织构导致表面疏松, 粗糙度增加。虽然CG50织构的表面化学成分与未经织构加工的PCD一致, 但CG150的表面碳含量急剧下降, Co大幅度上升。皮秒激光织构化过程导致PCD表面石墨化, 且织构不同位置处石墨化程度有差异: 槽底和槽壁发生相对严重的石墨化。CG150织构的顶部R值达到13.91, 甚至超过未经织构加工的PCD样片的R值11.27。

关键词

PCD复合片, 表面织构, 皮秒激光加工, 组织结构, 键合结构

Study on the Microstructure and Bonding Structure of the Picosecond-Laser-Textured PCD Surface

Wei Qiu Li¹, Guoli Zhang¹, Yang Xiao², Jiacheng Liao², Jihua Peng^{2*}, YanJun Lu³

¹Smartguy Intelligent Equipment Co. Ltd., Guangzhou Guangdong

²South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

³Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

Email: *jhpeng@scut.edu.cn

*通讯作者。

文章引用: 李伟秋, 张国立, 肖扬, 廖嘉诚, 彭继华, 鲁艳军. 皮秒激光织构化 PCD 复合片表面组织结构的研究[J]. 材料科学, 2021, 11(5): 675-683. DOI: 10.12677/ms.2021.115078

Abstract

The surface microstructure evolution during laser texturing is important for practical application. In this study, two kinds of textures of groove with depth 50 μm and 150 μm , namely CG50 and CG150 were fabricated on the polycrystalline diamond compacts (PCD) specimens using picosecond laser machining tool. The surface morphology, microstructure, bonding structure of carbon, and the surface diamond phase quality R were characterized using stereo-optical microscope, light interference profile instrument, field emission scanning electron microscope and Raman spectroscopy before and after texturing. R value is defined to be the ratio of intensity of the diamond phase and that of the graphite phase, which relates to the fraction and grain quality of the diamond phase in the surface zone. It is found that, there is a looser layer on the textured surface after picosecond laser texturing, whether it is CG50 or CG150. Laser texturing results in transformation of the surface diamond to graphite phase, which varies with the location of the texture. Usually, the surface graphitization at the bottom and the wall-side of the texture is much severely than that at the top. The R value of the groove shoulder of CG150 is 13.91, which is higher than that (11.27) of the pristine specimen. This is probably responsible for the geometry of the texture, as well as the thermal conductivity difference between the diamond and graphite.

Keywords

Polycrystalline Diamond Compact, Surface Texture, Picosecond Laser, Microstructure, Bonding Structure

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

表面织构化可以改善表面的浸润特性、摩擦特性,甚至光声电特性等,达到改善耐磨[1] [2] [3]、密封[4]、降噪[5]、吸光[6]等效果,从而在机械零部件、生物植入器件、光电元器件等领域获得了广泛应用[7] [8] [9]。表面织构化同其它表面技术复合应用还可以取得 $1 + 1 > 2$ 的协同效果[10]-[15]。表面织构可以大幅度地改善材料耐磨性能。目前认为表面织构改善耐磨的主要原因是[16] [17] [18]: 干摩擦条件下,表面织构可以存储磨屑,避免二次磨损;在润滑条件下,表面织构产生流体动压效应,减少摩擦副接触面的摩擦,提高材料的耐磨性能。

表面织构化成为当前刀具制造业的研究热点。织构刀具有以下优势[19] [20] [21]: 一方面,微纳织构扩大了刀具的散热面积,具有容纳切屑的能力;另一方面,织构减小了刀-屑接触长度,甚至在织构区域形成残余压应力层。总体而言,织构选择合理时,织构刀具可降低切削功耗,延长刀具寿命,提高工件的表面质量[22] [23]。主要的织构加工方法包括[24]: 激光加工、微电极放电加工、微细磨削加工、高能离子刻蚀等。激光加工具有环保、高效、易于精密控制等突出优势。加工激光的重要参数包括[25]-[30]: 波长、光斑直径、脉冲宽度、重复频率、扫描速度、功率等。

表面微织构提高了 PCBN 超硬刀具加工的工件表面质量,且改善了刀具的切削工况[31]。超硬金刚

石刀具是高速/精密切削的重要组成,但迄今鲜有其表面织构化的报道。据本文作者所知,仅有以下非常零星的一些报道涉及金刚石表面织构。高温湿气刻蚀可使金刚石单晶颗粒表面织构化[32],飞秒激光织构化的金刚石薄膜适合应用到高温太阳能电池领域[33]。采用低重复频率(20 kHz)、低扫描速度(1~5 mm/s)、高单点脉冲能量(5×10^{-4} J)的纳秒激光织构化PCD时织构切口的表面粗糙[34]。为获得光滑的织构表面,本文采用高扫描速率、高频、低单点脉冲能量的皮秒激光制备PCD表面槽型织构;重点研究皮秒激光加工过程对织构区域的形貌组织、碳杂化结构的影响。研究结果将为控制PCD织构质量、为实践应用提供积极的参考意义。

2. 试验材料与方法

采用购自河南领科材料有限公司的1.2 mm厚PCD复合片作为基本表面织构加工素材。复合片的基体为1 mm厚硬质合金(YG6);表面为粘结PCD正方形片,厚度为0.2 mm。复合片的尺寸为 $20 \times 20 \times 1.2$ mm。PCD由 $10 \mu\text{m}$ 粒径的金刚石颗粒同9 wt%的钴复合烧结而成。设计了两种几何参数的等边槽型织构,如图1(a)及图1(b)。设计深度为 $50 \mu\text{m}$ 的织构试片命名为CG50,设计深度为 $150 \mu\text{m}$ 的织构试片命名为CG150。综合目前陶瓷及金刚石表面的激光织构制备报道[25] [26],本研究加工PCD复合片织构制备的基本激光参数为:使用Smartguy Laser Machining Center(汇专,中国)激光加工平台,激光平均最大功率为100 W,激光脉冲宽度10 ps,重复频率为50 MHz,束斑尺寸为0.03 mm,扫描速度为1000 mm/s,单点激光脉冲能量为 2×10^{-6} J;采用多道次扫描,每一道次的去除深度为0.006 mm。织构加工完成后实测的CG50深度为 $57.37 \mu\text{m}$,CG150的实际深度为 $172.93 \mu\text{m}$ 。

织构加工前后,样品的表面形貌、组织结构和化学键合结构等分别采用立体显微镜(GYENS,德国)、轮廓仪(BMT,德国)、带有EDS的场发射扫描电镜(Zeiss,德国)、拉曼光谱仪(激光波长为523 nm)(LabRAM ARAMIS,日本)等进行表征。每种织构至少表征3个试样以验证测试结果的重复性。Raman谱的拟合采用双高斯模式,并定义金刚石质量因子 $R = \text{金刚石相峰高} / \text{石墨相峰高}$ 。R值越大表明金刚石相的含量越高,金刚石晶粒尺寸越大。

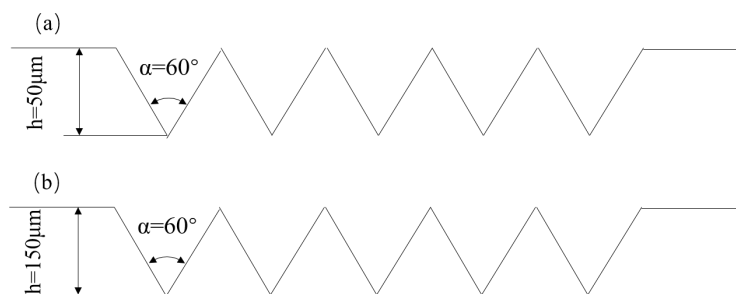


Figure 1. The geometry scheme of two kinds of texture
图1. 沟槽织构参数示意图(a) CG50; (b) CG150

3. 结果及分析

3.1. 织构的表面形貌与成分

图2(a)是未经织构加工的PCD试片的SEM表面形貌图,其中的白色衬度为粘结剂Co。图2(b)是CG50样品的沟槽放大图,表明激光加工金刚石织构后,表面存在一疏松层,也被称为“黑色金刚石层”[33];如图所示,本文的对织构的不同区域标识为:区域1是槽底,区域2是槽壁,区域3是槽顶。图3是CG50及CG150织构的表面低倍SEM图像,两种织构槽顶区域的光滑程度基本相当。表1给出了PCD试片织

构前后的表面 EDS 化学成分。与未经织构加工的 PCD 样品的表面化学成分比较, CG50 样品的表面成分几乎没有变化; CG150 样品表面的碳含量大幅度降低到 49.91%, Co 含量则升高到 27.66%, 元素 W 和 O 也大幅增加。激光加工 YG6 表面织构时加工深度与扫描次数呈线性关系[22]。类似地激光加工 CG150 织构的时间远大于加工 CG50 织构。CG50 与 CG150 表面成分的巨大差异表明不同元素的激光刻蚀挥发速率随刻蚀时间而变化, 甚至同种元素的同素异构体的刻蚀挥发速率也在变化。CG150 样品系在大气环境进行长时间激光刻蚀, 因此导致表面 O 含量增加。

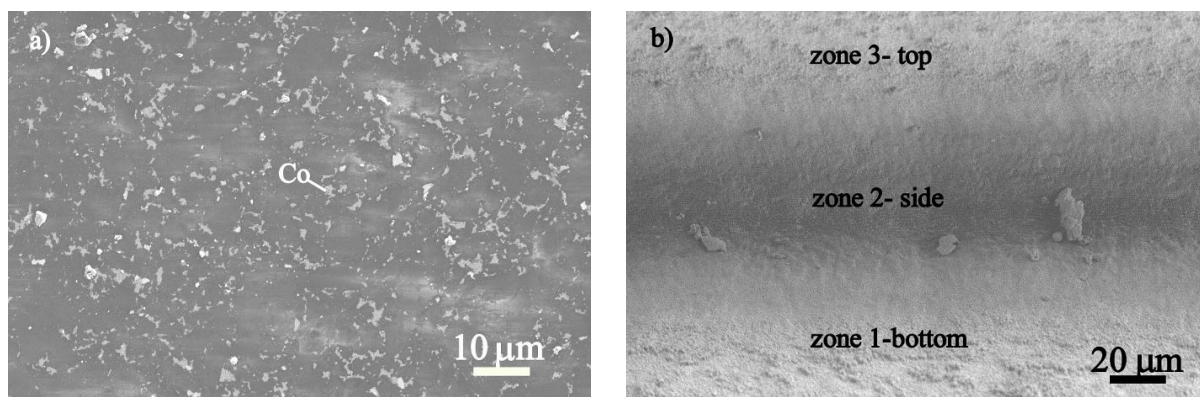


Figure 2. SEM images of the surface before (a) and after texturing (b)

图 2. (a) 未经织构加工的 PCD 片表现形貌; (b) CG50 织构沟槽 Raman 测试位置示意图

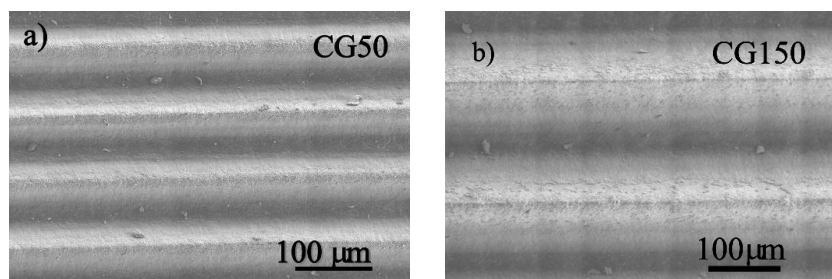


Figure 3. SEM images of the surface texture of (a) CG50 and (b) CG150

图 3. 织构样品的表面形貌: (a) CG50; (b) CG150

Table 1. Surface chemical composition of specimen with different treatments (wt%)

表 1. 不同处理样品表面的化学成分(wt%)

	C	W	Co	O
No texture	87.79	2.35	8.77	1.06
CG50	87.77	2.35	8.77	1.08
CG150	49.91	6.12	27.66	17.03

3.2. 织构的表面粗糙度

两种织构的表面白光干涉轮廓图像如图 4 所示。分析获得 CG50 织构的平均表面粗糙度 R_a 为 $5.39 \mu\text{m}$, CG150 织构的平均表面粗糙度 R_a 为 $36.79 \mu\text{m}$ 。图 3 显示 CG50 及 CG150 织构沟槽顶部的光滑程度相当, 因此两者平均表面粗糙度的巨大差异应来自槽底与槽壁。仔细分析图 3, CG150 槽中的颗粒明显大于 CG50

结构；前者的槽壁更粗糙，甚至有台阶存在。无疑激光结构化表面的粗糙度、表面疏松层的厚度与激光刻蚀加工的时间具有正相关性。另一方面长时间聚焦的激光能量轰击导致金刚石颗粒发生相变，可能使表面疏松。有关表面相变的现象和机理将在 2.3 节详细讨论。

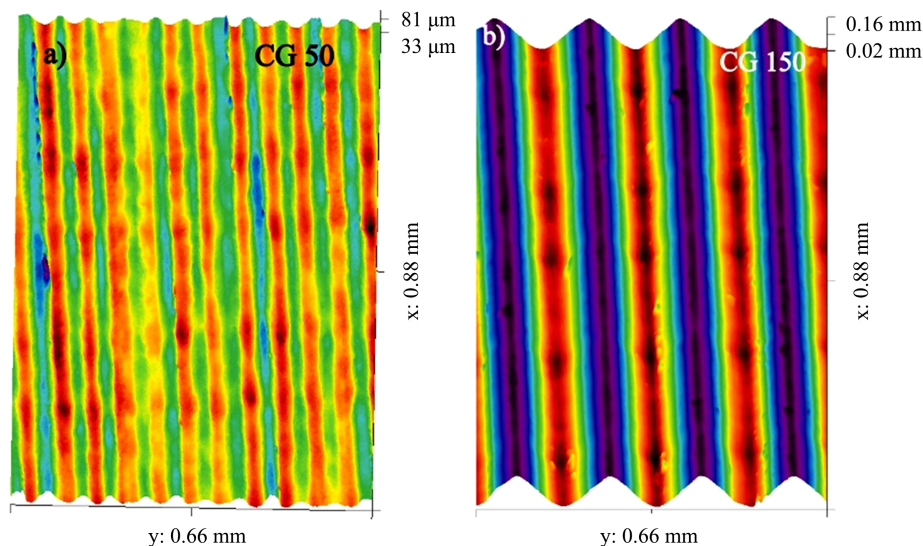


Figure 4. Light interference profile of the surface texture of (a) CG50 and (b) CG150

图 4. CG50 (a) 及 CG150 样品的表面结构轮廓图

3.3. 结构表面石墨化分析

未经结构加工的 PCD 复合片的 Raman 光谱示于图 5。Raman 光谱是研究碳基材料中 C 的化学结构非常有效的手段之一。以 sp^3 C-C 杂化为主的金刚石相的 Raman 特征振动峰 T_{2g} 位于 1332 cm^{-1} ，以 sp^2 C=C 杂化为主的石墨相振动特征峰 E_g 在 1580 cm^{-1} 附近[33]。受到内应力及材料内缺陷的影响，这些特征峰的位置会发生偏移，峰的半高宽也会随之变化。金刚石晶粒的晶界出现原子排列紊乱，通常会出现所谓的特征 TAP 峰，位于 $1140/1440\text{ cm}^{-1}$ 附近。未经结构加工的 PCD 复合片呈现典型的聚晶金刚石特征，其 T_{2g} 峰位偏离标准特征峰的原因可能来自于烧结与焊接产生的内应力； E_g 峰的存在表明该 PCD 片内存在少量的石墨相，TAP 峰则表明存在大量金刚石晶粒晶界[35]。

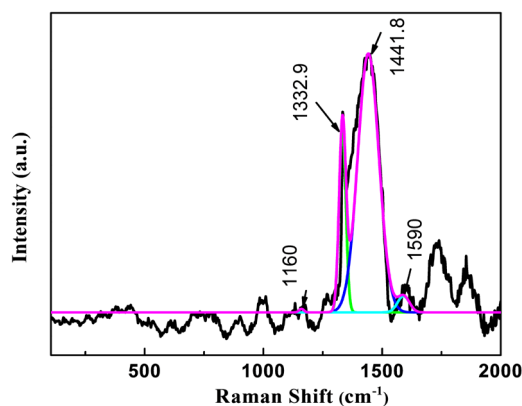


Figure 5. Raman spectra of the PCD specimen without texture

图 5. PCD 白片的拉曼光谱

PCD 复合片表面沟槽结构化以后,CG50 及 CG150 结构不同位置处的 Raman 谱分别示于图 6(a)-(c)、图 6(d)-(e)。采用高斯拟合,获得 T_{2g} 及 E_g 峰,其峰强度的比值定义为结构表面金刚石相的相对含量,即 $R = I_{T_{2g}}/I_{E_g}$ [35]。各位置处的拟合计算 R 值列于表 2,其中未处理 PCD 复合片的表面 R 值为 11.27。可以看出,表面结构化后结构槽底和槽壁的金金刚石含量急剧减少,代表石墨相的 1580 cm^{-1} 附近的峰急剧加强,这表明激光加工结构化过程时使这些区域的表面金刚石转变为石墨相,即 $sp^3C-C \rightarrow sp^2C=C$ 。采用皮秒激光加工结构时,槽顶区域的 R 值明显高于槽底和槽壁。甚至 CG150 结构的槽顶区域 R 值达到 13.91,高于初始 PCD 样品。一方面的原因是槽顶的石墨化程度低,另一方面该区域的金金刚石晶粒很可能在局部高温的驱动下长大,这还有待进一步深入研究、确认。总的来看,在皮秒激光加工槽型结构的过程中组织表面无疑发生了或多或少的石墨化转变,且转化程度与组织位置有关。

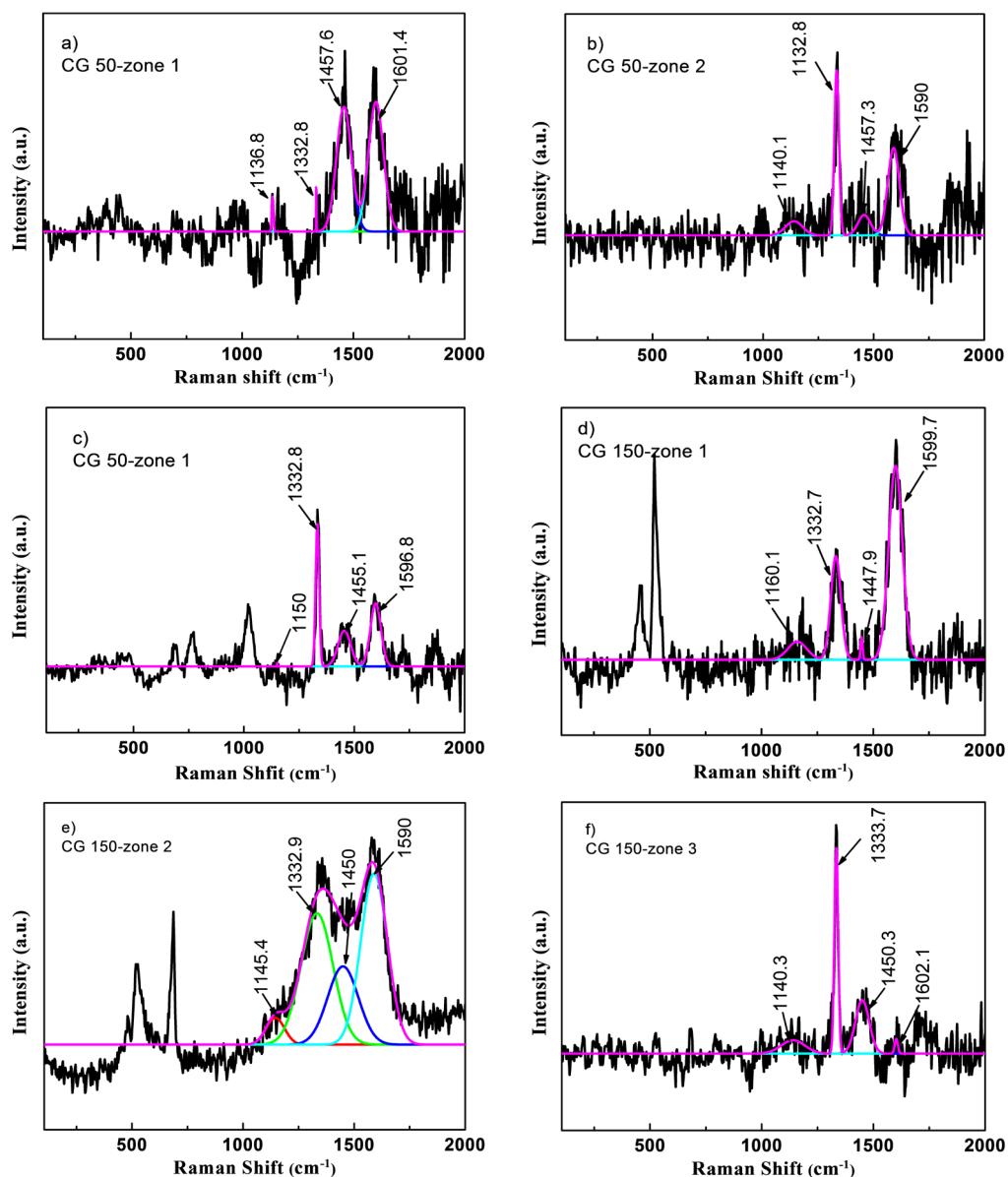


Figure 6. Raman spectra of different location of G50 and G150 specimen

图 6. G50 及 G150 样品不同位置处的拉曼光谱

Table 2. R value of different zones of textured specimens
表 2. 织构 PCD 片不同区域处的金刚石含量峰强比 R 值

	zone 1	zone 2	zone 3
CG50	0.36	1.39	2.26
CG150	0.53	0.77	13.91

3.4. 讨论

采用高效环保的激光加工手段已成为各种材料表面制备的重要手段，激光的波长、脉冲宽度、重复频率、平均最大功率、束斑尺寸、扫描速度等诸多因素影响着织构的质量[25]-[31]，同时束斑覆盖、被加工材质的特性，如导热性、组成相的稳定性等同样影响着织构的质量。金刚石材料本身是亚稳态物质，其热力学稳定的同素异构态是石墨相。激光束斑集聚的高密度能量使束斑中心的碳气化挥发；中心的局部超高温向外散热，导致临近区域的金刚石相石墨化。激光束斑附近的金刚石相或石墨相暴露于高温、大气环境，这为环境介质(尤其氧)的化学吸附创造了条件。因此，激光织构化后的 PCD 表面富石墨相、且氧含量高，如表 1 所示。

CG50 及 CG150 的表面发生的 $sp^3C-C \rightarrow sp^2C=C$ 转变(表 2 所示)导致表面层密度和体积发生变化。金刚石相的密度为 3.2 g/cm^3 ，而石墨相的密度仅为 2.4 g/cm^3 。体积变化及束斑附近巨大的温度梯度导致织构表面疏松，甚至产生裂纹及表面剥落[30]，如图 2(b)。虽然还缺乏深入的研究，但从表 1 及图 1，图 2 的结果来看，槽型织构的深/宽比值对表面石墨化具有一定的影响，这可能与金刚石相及石墨相导热性差异、表面疏松化程度等有关。金刚石具有极高的导热系数，激光脉冲输入的能量通过金刚石不停地传输到表面，因此槽顶部位可能具有较高的局部温度。在此温度驱动下，该位置处的金刚石晶粒可能聚合长大。这是皮秒激光加工的织构槽顶区 R 值高，甚至达到 13.91 的可能原因。

PCD/MCD 材质的刀具作为高速、精密加工的主要工具之一，既要保持高硬耐磨，又要保持低摩擦系数。但从本文的研究结果来看，激光加工无疑导致织构表面发生石墨化，并形成富 sp^2C 的疏松表面层。一方面可能降低表面硬度，另一方面可能具有极佳的固体润滑效果。要实现织构金刚石超硬刀具的实际应用，还需要更深入研究开发，包括合理地调制表面织构及去除疏松层等。

4. 结论

室温大气环境下采用皮秒激光在金刚石基 PCD 复合片上加工了两种深度的槽型织构，较系统地研究了织构化表面的形貌和及其组织结构变化。采用 Raman 光谱拟合的金刚石峰(T_{2g})及石墨峰(E_{2g})的强度比值 R 表征了表面金刚石相的相对含量和金刚石晶粒的质量。研究发现皮秒激光加工 PCD 表面槽型织构时，织构表面存在一层疏松层，织构化表面的成分随着皮秒激光加工时间增加发生较大变化，即表面 Co 含量增加，C 含量损失。织构的表面粗糙度随着激光刻蚀时间的增加而增加，CG150 织构的平均粗糙度约是 CG50 的 6 倍，而後者的平均粗糙度为 $5.39 \mu\text{m}$ 。皮秒激光加工织构时表面发生了金刚石相(sp^3C-C)向石墨相($sp^2C=C$)的转化，该转化的程度与织构位置有关：槽顶区域的 R 值明显高于槽底和槽壁。CG150 织构的槽顶区域 R 值达到 13.91，甚至高于未经织构加工的 PCD 样品。

基金项目

广州市科技计划项目(201902010018)。

参考文献

- [1] Mao, B., Siddaiah, A., Liao, Y.L. and Menezes, P.L. (2020) Laser Surface Texturing and Related Techniques for En-

- hancing Tribological Performance of Engineering Materials: A Review. *Journal of Manufacturing Processes*, **53**, 153-173. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.009>
- [2] Montes-Seguedo, J., Dominguez-Lopez, I. and Barceinas-Sanchez, J. (2021) Effect of Surface Texturing of UHMWPE on the Coefficient of Friction under Arthrokinematic and Loading Conditions Corresponding to the Walking Cycle. *Materials Letters*, **284**, Article ID: 129039. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129039>
- [3] 陈汇丰, 连云崧, 穆晨亮. 面向绿色切削的表面微织构刀具设计及其切削性能的有限元仿真研究[J]. 工具技术, 2018, 52(4): 13-20.
- [4] 王国荣, 廖代胜, 钟林, 廖文玲, 李梦媛, 魏刚. 沟槽形表面织构对柱塞密封副摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 165-173.
- [5] 盖小红, 莫继良, 刘铭倩, 阳江舟, 陈光雄, 朱旻昊. 织构化表面处理抑制界面摩擦尖叫噪声[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 102-107.
- [6] Jagadish, R. and Malar, P. (2020) Surface Texturing of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Thin Films for Enhanced Optical Absorbance. *Solar Energy*, **201**, 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.022>
- [7] 苏峰华, 毛川, 李助军. 织构深度对不锈钢表面油润滑条件下摩擦学性能影响的试验和仿真研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(2): 181-186.
- [8] 李星亮, 岳文, 庞长涛, 徐昌语, 康嘉杰, 田斌. 渗氮处理对表面织构化钛在月壤介质中摩擦磨损性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(5): 561-567.
- [9] 李丹, 杨学锋, 王守仁, 刘文波, 万壮, 夏国峰. 工件表面微/纳织构的研究现状与进展[J]. 机械强度, 2020, 42(6): 1348-1355.
- [10] 郭飞飞, 秦立果, 任明基, 杨轶飞. 类金刚石膜与表面织构双重改性下 CoCrMo 合金摩擦性能研究[J]. 真空科学与技术, 2020, 40(10): 907-913.
- [11] Rosenkranz, A., Costa, H., Baykara, M. and Martini, A. (2021) Synergetic Effects of Surface Texturing and Solid Lubricants to Tailor Friction and Wear—A Review. *Tribology International*, **155**, Article ID: 106792. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106792>
- [12] Pena-Paras, L., Maldonado-Cortes, D., Rodríguez-Villalobos, M., Romero-Cantú, A.G. and Montemayor, O.E. (2020) Enhancing Tool Life, and Reducing Power Consumption and Surface Roughness in Milling Processes by Nanolubricants and Laser Surface Texturing. *Journal of Cleaner Production*, **253**, Article ID: 119836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119836>
- [13] Ma, C., Liu, J., Zhu, X., Yan, Z., Cheng, D., Xue, W., et al. (2021) Optimization of Surface Texture Fabricated by Three-Step Microarc Oxidation for Self-Lubricating Composite Coating of Diesel Engine Piston Skirts. *Wear*, **466-467**, Article ID: 203557. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203557>
- [14] Guimaraes, B., Fernandes, C.M., Figueiredo, D., et al. (2020) Effect of Laser Surface Texturing on the Wettability of WC-Co Cutting Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **111**, 1991-1999. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06155-3>
- [15] Sathiya, N., Baskar, N., Vedha, B., Sankaran, R. and Ramya, D. (2019) Cross-Chevron Surface Texture Filled with Green Synthesized AluminiumOxide Nanoparticles. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 17803. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54346-0>
- [16] 赵文杰, 王立平, 薛群基. 结构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 622-631.
- [17] 逢明华, 聂永芳, 申福猴, 马利杰. 刀具表面织构对刀-屑界面摩擦学特性的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 109-118.
- [18] 张娜, 杨发展, 刘国华, 王黎阳. YG8 硬质合金表面沟槽织构的制备及其减摩特性[J]. 机械工程材料, 2020, 44(7): 38-42, 56.
- [19] Arslan, A., Masjukih, H., Kalam, M.A., Varman, M., Mufti, R.A., Mosarof, M.H., et al. (2016) Surface Texture Manufacturing Techniques and Tribological Effect of Surface Texturing on Cutting Tool Performance: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **41**, 447-481. <https://doi.org/10.1080/10408436.2016.1186597>
- [20] 苏永生, 李亮, 王刚, 王建彬. 结构化刀具切削性能测试及切削温度仿真分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(3): 92-97.
- [21] 刘泽宇, 魏昕, 谢小柱, 华显刚, 洪继伟. 激光加工表面微织构对陶瓷刀具摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(10): 33-39.
- [22] 杨奇彪, 陈中培, 杨涛, 张弘, 娄德元, 刘顿. 飞秒激光加工 YG6 不同微织构表面浸润性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 269-274.

- [23] 向道辉, 胡永伟, 陈艳彬, 张治蒙, 史战立, 郭振海, 等. 刀具基体表面织构化对硼掺杂金刚石薄膜性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 153-160.
- [24] 郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面织构化刀具的研究现状与进展[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 170-181.
- [25] Tshabalala, L. and Pityana, S. (2016) Surface Texturing of Si₃N₄-SiC Ceramic Tool Components by Pulsed Laser Machining. *Surface & Coatings Technology*, **289**, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.01.028>
- [26] 赵恩兰, 杨海峰, 孙渤, 郭华锋, 王磊, 董妍. 微织构激光加工及表面空蚀性能测试[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 106-108.
- [27] 胡哲, 魏昕, 谢小柱, 胡伟. 陶瓷刀具表面微织构激光刻蚀正交工艺实验研究[J]. 机械工程师, 2018(12): 51-53.
- [28] 苏永生, 李亮, 何宁, 赵威. 激光加工硬质合金刀具表面微织构的试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 60-66.
- [29] 万轶, 李建亮, 熊党生, 李航. 激光脉冲次数对织构化涂层的摩擦学性能影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031403.1-031403.7.
- [30] 刘绪超, 杨发展, 罗佳, 魏海明. 刀具表面微织构激光加工方法研究与分析[J]. 工具技术, 2019, 53(1): 74-77.
- [31] 朱楠. 条形槽微织构对 PCBN 刀具切削性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(3): 80-85.
- [32] 谈耀麟. 金刚石表面织构化处理技术(上) [J]. 超硬材料工程, 2012, 24(3): 53-56.
- [33] Trucchi, D., Bellucci, A., Girolami, M., Mastellone, M. and Orlando, S. (2017) Surface Texturing of CVD Diamond Assisted by Ultrashort Laser Pulses. *Coatings*, **7**, Article No. 185. <https://doi.org/10.3390/coatings7110185>
- [34] 苏永生, 李亮, 高洪, 王建彬, 王刚. 超硬刀具激光表面织构化及织构形貌控制[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 286-292.
- [35] Peng, J., Zeng, J., Xiong, C. and Li, L. (2020) The Effect of Interlayer Reactivity on the Quality of Diamond Coating by HFCVD Deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, **835**, Article No. 155035. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155035>