

牙轮钻头轴承表面织构三种加工方法对比分析

何霞, 李梦媛, 王国荣, 蒋龙

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘要: **目的** 研究牙轮钻头轴承上润滑减磨的有效织构加工方法, 从而进一步深入牙轮钻头轴承上仿生表面织构的研究。**方法** 开展精密雕刻、纳秒激光和飞秒激光三种加工方式在牙轮钻头轴承上加工织构的实验, 观察加工织构底部形貌, 从织构加工尺寸、加工精度、加工对象三个方面对比分析三种织构加工方式的优缺点。**结果** 精密雕刻技术可获得较规则的织构三维形貌, 但不适用加工熔点高的材料, 且仅适用于直径大于 400 μm 的织构。纳秒激光由于金属熔融堆积效应, 织构加工质量较差。飞秒激光技术的加工质量高且不受材料限制, 能获得较好的织构轮廓, 合理织构直径应小于 300 μm 。**结论** 为织构化牙轮钻头滑动轴承的加工方法提供依据。综合织构加工尺寸范围、加工对象和加工精度, 飞秒激光加工技术在牙轮钻头轴承上具有良好的应用前景, 精密雕刻技术仅在织构尺寸较大时可采用。

关键词: 牙轮钻头轴承; 表面织构; 精密雕刻; 纳秒激光; 飞秒激光

中图分类号: TE921; TG669 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0028-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.005

Contrastive Analysis of Three Processing Methods of Roller Bit Bearing Surface Texture

HE Xia, LI Meng-yuan, WANG Guo-rong, JIANG Long

(School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: Surface texture has been proved to be effective in improving lubrication performance, reducing frictional wear, but also promoting emergence of various texture processing methods. The work aims to find an effective method of texture processing for research of texture lubrication and antifriction on roller bit bearing, so as to further study bionic surface texture on the roller bit bearing. Processing modes of precision carving, nanosecond laser and femtosecond laser were used for texture experiment of the roller bit bearing, bottom morphology of the processed texture was observed to analyze advantages and disadvantages of three texture processing methods in terms of texture processing dimension, machining accuracy and processing object. Regular 3D texture morphology could be obtained by adopting precision carving technology, but is the technology was applicable to textures with diameter over 400 μm instead of materials with high melting point. Due to the effect of molten metal accumulation, nanosecond laser exhibited poor texture processing quality. Better texture profile could be obtained by femtosecond laser technology as it exhibited high processing quality and was not limited by materials, and reasonable texture diameter should be less than 300 μm . It provides a basis for processing methods of texturing sliding bearing of roller bit. Femtosecond laser technology has a good application prospect in the field of roller bit bearing in terms of texture processing dimension,

收稿日期: 2017-05-19; 修订日期: 2017-07-07

Received: 2017-05-19; Revised: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51505397)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51505397)

作者简介: 何霞 (1976—), 女, 副教授, 主要从事油气装备润滑减磨方面的研究。

Biography: HE Xia (1976—), Female, Associate professor, Research focus: lubrication and wear reduction of oil and gas equipment.

processing object and machining accuracy, and precision carving technology can be used only when the texture size is large.

KEY WORDS: roller bit bearing; surface texture; precision carving; nanosecond laser; femtosecond laser

近年来，基于不同工况下的润滑减磨机理^[1-3]，仿生表面织构已被证实能有效提高摩擦副表面的润滑性能，减少摩擦磨损，继而成为一种有效的润滑减磨方法^[4-6]。与此同时，随着织构对摩擦磨损性能影响的研究不断发展，出现了越来越多的织构加工方法，如机械加工技术^[7]、激光加工技术^[8]、化学蚀刻技术^[9]、电火花加工技术^[10]、聚焦离子束技术^[11]等，满足了不同材质、不同形貌复杂织构和各种摩擦副表面织构的加工需求，进而推动了织构润滑减磨的研究。

钻井目前油气资源勘探开发的唯一方法，而钻头又是油气钻井过程中直接形成井眼的唯一工具，所以钻头的工作性能和使用寿命对钻井效率和钻井成本等有直接影响。牙轮钻头由于具有金刚石钻头、PDC 钻头不可替代的优势，在油气勘探开发中广泛使用。牙轮钻头轴承作为牙轮钻头的关键零部件，是牙轮钻头传递扭矩和运动形式的桥梁，很大程度上影响了牙轮钻头的工作性能和使用寿命。由于牙轮钻头尺寸的限制及高温、高压、低速、重载等恶劣工况的影响，牙轮钻头轴承的摩擦学行为十分复杂，容易因不良的摩擦磨损而提前失效，成为制约牙轮钻头发展的瓶颈之一。

针对牙轮钻头轴承摩擦磨损的失效行为，研究人员从结构优化、表面处理等方面着手进行了分析。况雨春等^[12]基于有限元软件对轴承组的接触应力进行了分析，结果指出钻头轴承组的磨损程度与接触应力大小相关，降低轴承组的最大接触应力及使接触压力分布更合理能够有效提高轴承的耐磨性能。而对于牙轮钻头滑动轴承接触压力分布不合理和应力集中的现象，伍开松等^[13]采用有限元软件对牙轮钻头滑动轴承进行了优化设计，优化后的滑动轴承接触压力峰值降低了 34.6%。何畏等^[14]开展了 PVD 技术应用在牙轮钻头轴承中的研究，结果表明，利用 PVD 技术对牙轮钻头轴承镀 TiN 涂层，可进一步提高牙轮钻头轴承的耐磨性。黄志强等^[15]通过摩擦学实验研究了表面处理工艺对牙轮钻头轴承摩擦磨损性能的影响，结果指出，等离子堆焊 DH-60 粉末后，轴承的耐磨性提高了 30%左右。

尽管已有研究学者开展了表面织构对牙轮钻头轴承摩擦磨损性能影响的摩擦学实验，但针对轴承特殊工况，实验研究仍相对较少且不够深入，而针对牙轮钻头轴承表面织构加工研究仍然空白。因此，本文通过精密雕刻、纳秒激光和飞秒激光三种加工方法对

牙轮钻头轴承进行表面织构加工，对比分析三种织构加工方法的优缺点，找出合理有效的牙轮钻头轴承表面织构加工方法，继而促进仿生表面织构应用于牙轮钻头轴承上更深入的研究。

1 加工设备与方法

1.1 试验方法

织构化牙轮钻头滑动轴承表面织构加工于铍青铜轴颈上，铍青铜材料的物理性能如表 1 所示。

表 1 铍青铜材料特性
Tab.1 Material properties of beryllium bronze

参数	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
数值	127.5	0.40	1200	8.3

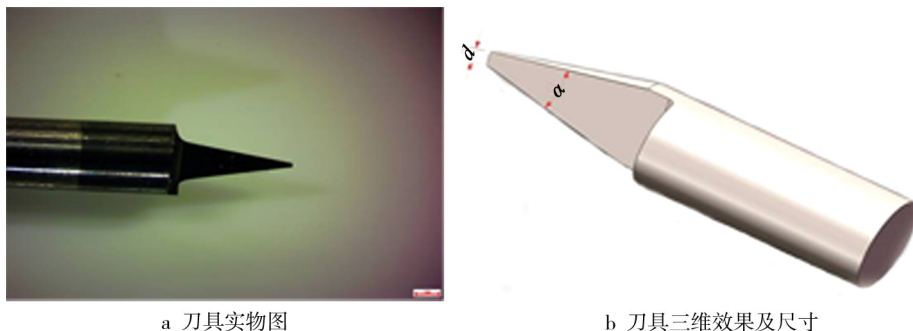
设计七种不同直径（100~700 μm）的圆形微凹坑织构，采用三种设备对织构进行加工，并使用奥林巴斯光学显微镜和电子扫描显微镜对织构三维形貌及表面特征进行观察，继而对比分析不同加工方法对织构加工精度的影响。

1.2 加工设备及参数

1.2.1 精密雕刻加工设备

精密雕刻表面织构所采用的加工设备为北京精雕科技集团有限公司生产的精雕 JDPMS80_A 雕刻机，最大工作负重为 100 kg，主轴最高转速为 24 000 r/min，设备较广泛地应用于文字图案、各类铜模加工和小型冲模的精加工。由于需加工的表面织构尺寸较小，需采用较小底部直径和锥度的刀具，因此文中选择开半锥刀刀具。此外，刀具的底径和锥度是影响刀具切削性能的主要参数，当刀具底部直径小且锥度很小时，刀尖较细，刀具的强度和刚度不满足要求。本次加工实验所选的刀具底部直径 $d=0.05\text{ mm}$ ，锥度 $\alpha=30^\circ$ 。刀具示意图如图 1 所示。

织构加工过程中，走刀方式和路径间距对表面加工的底部形貌有较大影响。本研究采用行切走刀、螺旋走刀和旋切走刀三种走刀方式进行织构加工，三种走刀方式路径示意图如图 2 所示。精密雕刻设置的加工深度为 0.05 mm，主轴转速为中等转速 6000 r/min，进给量及开槽深度为 0.01 mm，下慢距离及下慢速度分别为 0.02 mm 和 0.001 m/s。

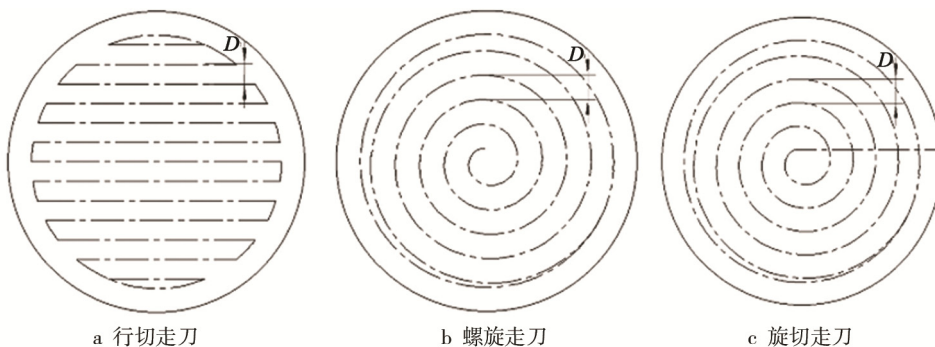


a 刀具实物图

b 刀具三维效果及尺寸

图 1 刀具示意图

Fig.1 Sketch of cutting tool: (a) physical picture of cutting tool, (b) three-dimensional effect and size of cutting tool



a 行切走刀

b 螺旋走刀

c 旋切走刀

图 2 精密雕刻三种走刀路径示意图

Fig.2 Three feeding path diagrams of precision carving: (a) raster mode, (b) spiral mode, (c) rotary cut mode

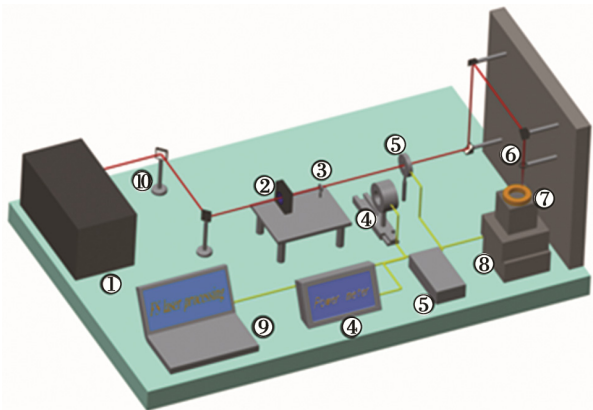
1.2.2 纳秒激光加工设备

纳秒激光表面织构加工所采用的加工设备为成都添彩激光生产的光纤激光打标机 (TG-20GT), 激光源的最大功率为 20 W, 激光波长为 1064 nm。该设备适用于普通金属 (铁、铜、铝等)、稀有金属及合金 (金、银、钛等) 的特殊表面处理, 也适用于一些要求精度高、较深的孔。

1.2.3 飞秒激光加工设备

飞秒激光织构加工采用的装置为自主搭建的飞秒激光试验平台, 试验平台示意图如图 3 所示。该飞

秒激光加工平台主要包括: 激光源、光路定位孔、中性衰减片、激光功率计、关闸控制系统、聚焦透镜和高精度三轴运动平台。其中所采用的激光源 (Coherent Inc.) 的中心波长为 800 nm, 激光频率为 1 kHz, 脉冲时间为 40 fs, 光斑直径为 8.8 mm。织构加工控制流程图如图 4 所示。



1.激光源; 2.光线定位孔; 3.中性衰减片; 4.激光功率计;
5.光闸控制系统; 6.聚焦透镜; 7.待加工试件;
8.三轴移动平台; 9.电脑控制系统; 10.全反光镜

图 3 飞秒激光加工平台示意图

Fig.3 Processing platform sketch of femtosecond laser

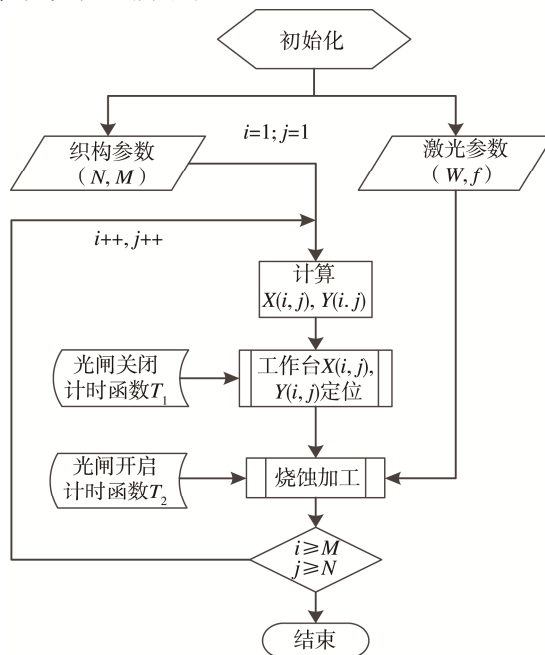


图 4 飞秒激光织构加工控制流程

Fig.4 Control flow chart of femtosecond laser texture processing

2 织构加工质量分析

2.1 精密雕刻织构

图 5 为精雕织构加工得到的实际直径和设计直径的关系。在同一设计直径下,不同走刀方式加工得到的实际织构直径与设计直径的差异较小,因而加工路径对织构直径偏差无明显影响。此外,由于加工刀具具有一定的锥度,所以实际加工所得的织构直径与设计直径存在一些差别,扩大约 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 。图 6 为直径偏差分析示意图,当加工深度为 $40\ \mu\text{m}$ 的织构时,由刀具的几何关系计算得到理论偏差值约为 $21.4\ \mu\text{m}$,与测量得到的实验结果的误差相差很小。

图 7 为加工实际直径大于 $400\ \mu\text{m}$ 的织构时,不

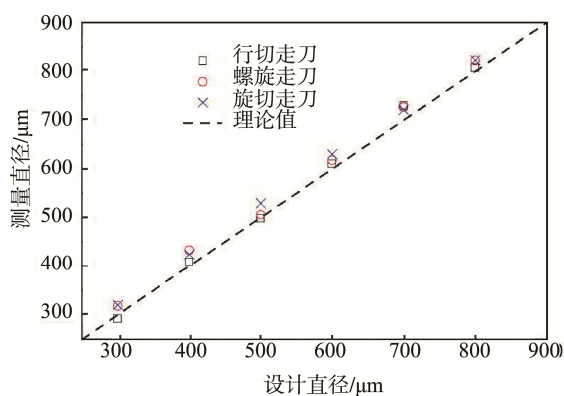


图 5 精雕织构直径测量结果

Fig.5 Diameter measurements of precision carved texture

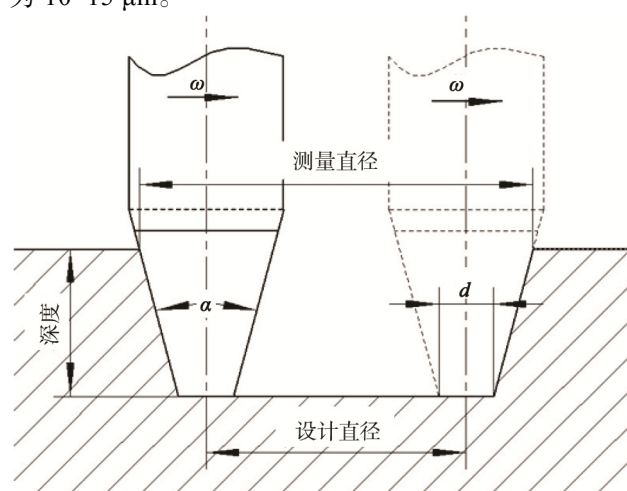


图 6 偏差分析示意图

Fig.6 Diagram of deviation analysis

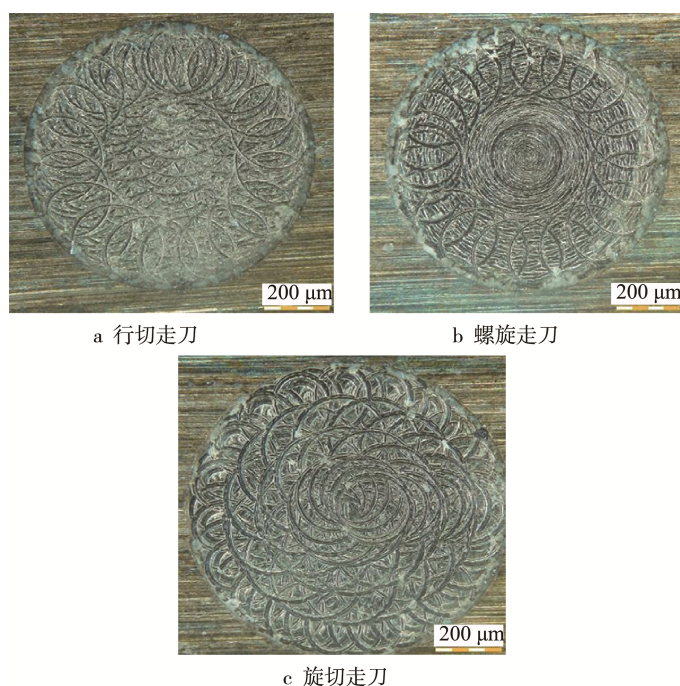


图 7 不同走刀方式形成的底部形貌

Fig.7 Bottom morphology formed in different path mode: (a) raster mode, (b) spiral mode, (c) rotary cut mode

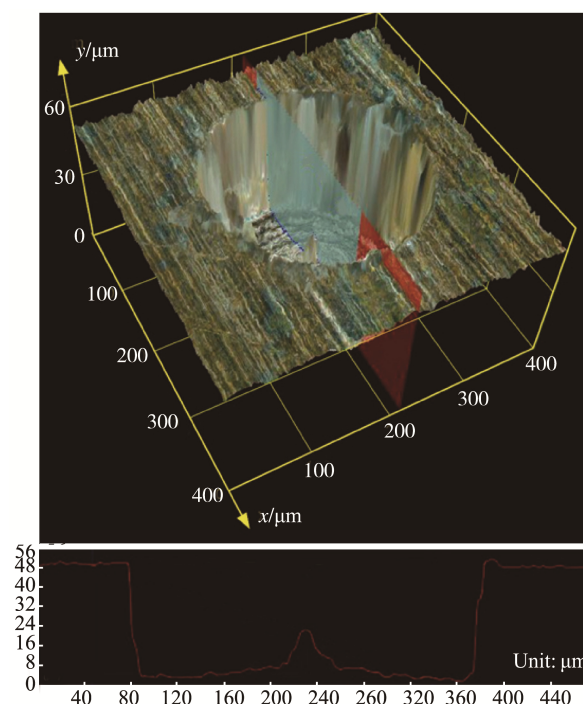


图 8 精雕织构三维形貌

Fig.8 3D morphology of precision carving texture

同走刀方式形成的底部形貌。从图 7 可以看出,织构凹坑的底部形貌与走刀方式有关。采用行切走刀方式加工得到的底部形貌呈“鱼鳞”状,不同的加工方向得到的“鱼鳞”方向也不同。采用螺旋走刀方式获得外围各向均匀分布的螺旋线状底部形貌,织构底部中间部分纹理清晰。采用旋切走刀方式加工得到的织构底部有由内向外扩张且堆叠的刀痕,底部形貌与该方式的走刀路径相对应。如图 8 所示,当加工的织构实际直径小于 $400\ \mu\text{m}$ 时,织构底部因未能全部切除材料而形成中心凸起区域,由实验结果可知,该凸起的高度为 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ 。

2.2 纳秒激光织构

不同直径纳秒激光织构三维形貌如图9所示。从图9可以看出,织构设计直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时,织构周围及激光的烧蚀去除区域内部均有较多堆积物,熔融材料堆积严重,因而无法满足加工要求。由于加工的织构直径较小,激光对织构加工区域的扫描路径较短,烧蚀时间不够长,导致材料去除不够。织构设计直径为 $300\sim 500\text{ }\mu\text{m}$ 时,从图9c—e中可以看出,纳秒激光加工可以得到较明显的有圆形轮廓的表面织构。纳秒激光烧蚀过程中受到去除材料及其再凝结等多因素的影响,加工得到的织构周围及底部分布再凝结材料,因此得到的圆形织构轮廓较差,底部形貌多变。当织构设计直径为 $600\text{ }\mu\text{m}$ 和 $700\text{ }\mu\text{m}$ 时,织构加工区域周围的堆积明显增多,无法达到预期的加

工目标。由于织构加工尺寸的增加,激光的烧蚀面积大,烧蚀时间较长,激光会对织构周围的堆积材料再次加工,导致堆积层再次热熔后向四周扩散,冷凝堆积在已加工的织构凹坑中。

为确定造成加工织构底部形成凸起的原因,在金相显微镜下,对纳秒激光加工得到的织构剖面进行了观察。从图10可以看出,在织构加工区域有间距较均匀的微小孔,织构加工区域上部有较明显的重铸层。由此可以确定织构加工区域形成凸起的原因是:由于纳秒激光加工所形成的织构被热熔材料再次覆盖,形成了一些封闭的微小孔。图11为电子扫描电子显微镜下的微纳米壁面形貌,由于纳秒激光加工对材料的热熔作用,铍青铜表面材料在热作用下熔化形成的液态金属发生再凝结,所以壁面上有较多直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右的粘附颗粒相互粘接在一起。

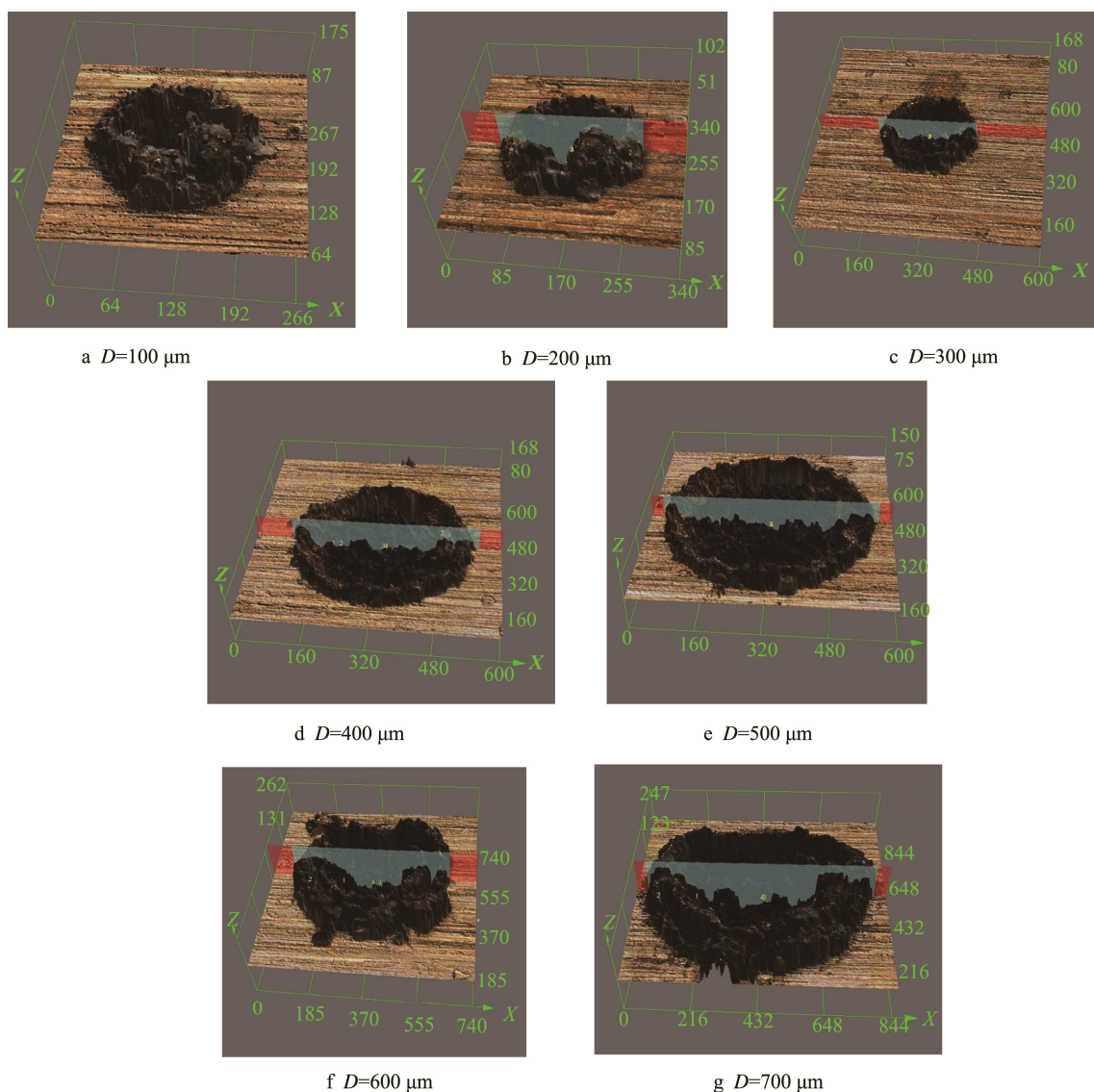


图9 不同直径纳秒激光织构三维形貌

Fig.9 3D morphology of nanosecond laser texture of different diameter: (a) $D=100\text{ }\mu\text{m}$, (b) $D=200\text{ }\mu\text{m}$, (c) $D=300\text{ }\mu\text{m}$, (d) $D=400\text{ }\mu\text{m}$, (e) $D=500\text{ }\mu\text{m}$, (f) $D=600\text{ }\mu\text{m}$, (g) $D=700\text{ }\mu\text{m}$

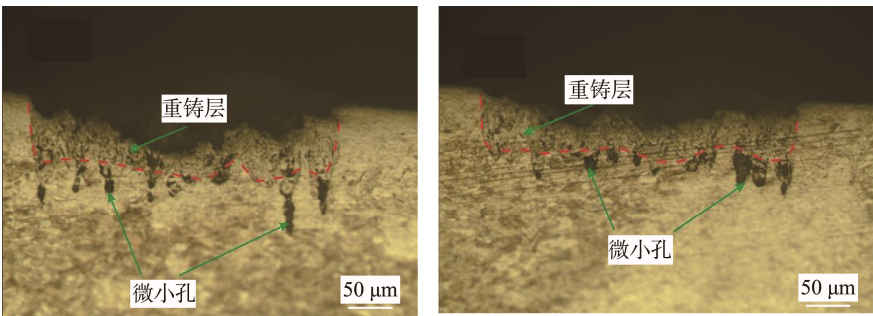


图 10 纳秒激光织构剖面图
Fig.10 Profile of nanosecond laser texture

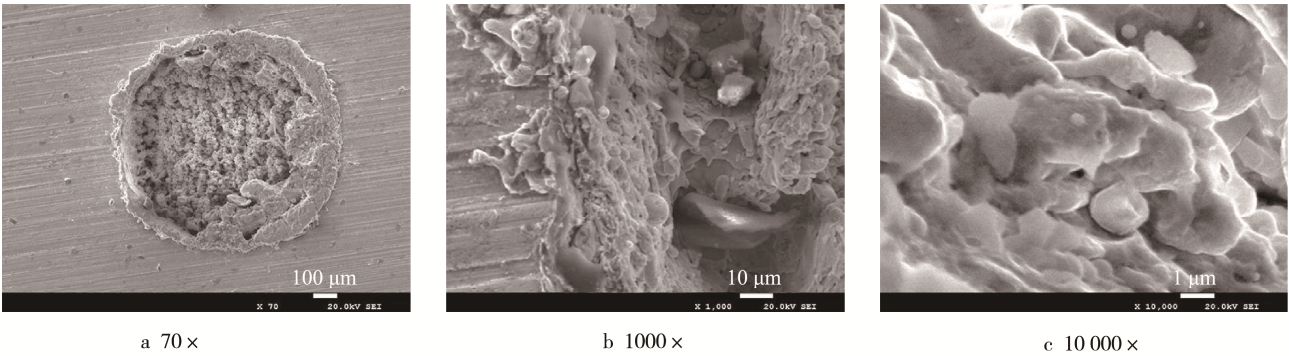


图 11 纳秒激光织构电镜扫描图
Fig.11 SEM images of nanosecond laser texture

2.3 飞秒激光织构

采用扫描电子显微镜对所加工的微凹坑织构表

面进行观察，得到如图 12 所示的微小凹坑表面形貌。从图 12 中可看出，微凹坑周围有小面积的热影响区

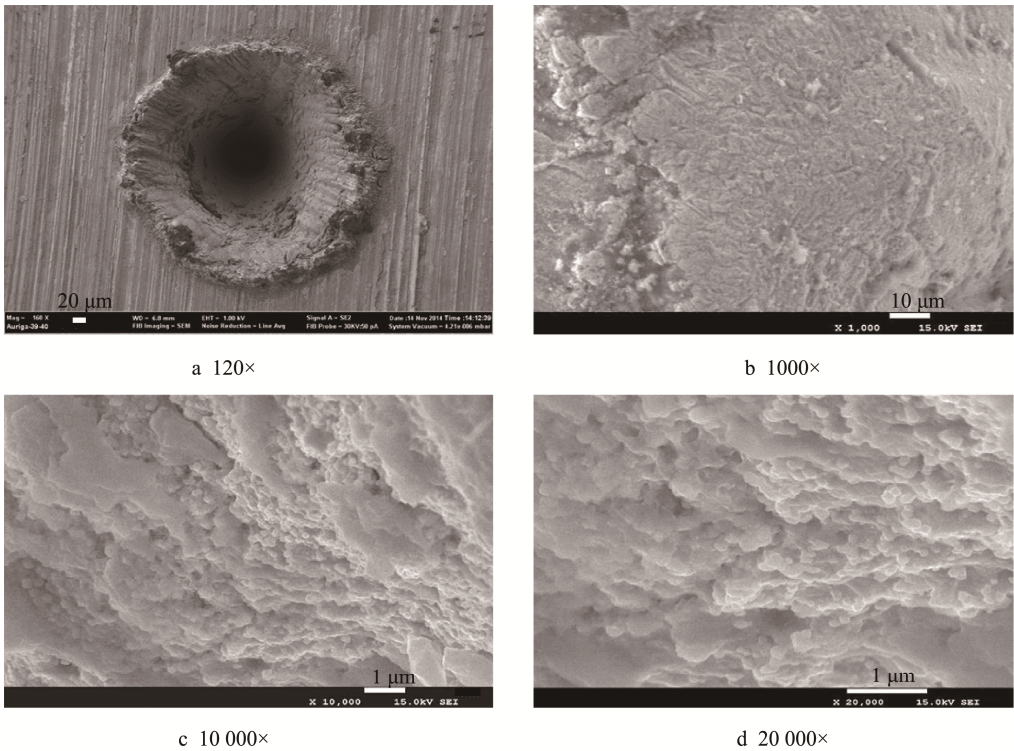


图 12 飞秒激光织构电镜扫描图谱
Fig.12 SEM images of femtosecond laser texture

域,根据激光光斑能量分布情况分析,激光能量与离光斑能量中心点的距离相关,距离越远,激光的能量越低而无法达到加工材料的烧蚀阈值,加工效果不太理想。此外,由于飞秒激光对铍青铜材料进行加工的过程中,金属熔融而形成材料堆积,部分烧熔材料重新凝固覆盖在微凹坑边缘,形成重铸层,但该重铸层的厚度远远小于纳秒激光加工所形成的。另外,图13为飞秒激光加工所得到的织构三维形貌图。从图13中可看出,织构周围和内部并无明显的金属堆积现象,微凹坑织构形状比较规则,横截面形状类似于抛物线形。

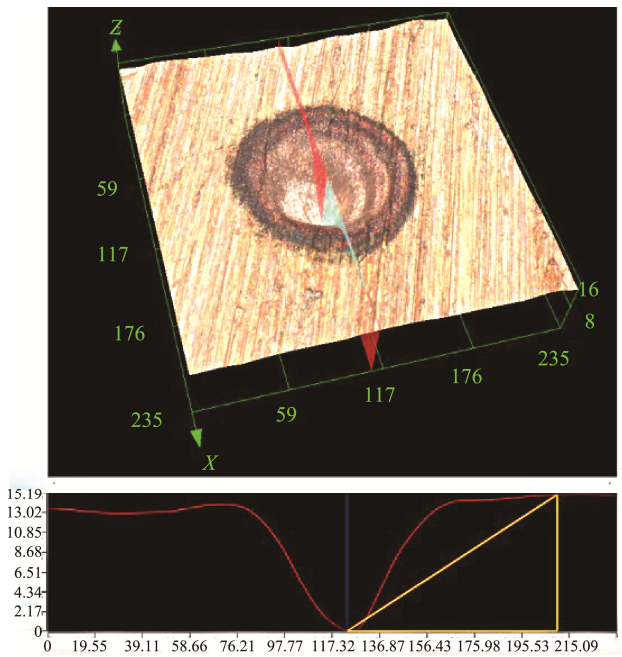


图13 飞秒激光织构的三维形貌

Fig.13 3D morphology of femtosecond laser texture

2.4 三种织构加工方法优缺点对比分析

为了选择合理有效的牙轮钻头轴承表面织构加工方法,在分析精密雕刻、纳秒激光和飞秒激光三种方法所加工织构质量的基础上,从织构加工尺寸范围、织构加工精度和加工对象对三种织构加工方法进行对比分析:

1) 织构加工尺寸。采用精密雕刻、纳秒激光和飞秒激光三种加工方法均能加工从微米级到毫米级的表面织构,但每种加工方法所适应的织构加工尺寸范围不同。其中,精密雕刻加工适于加工织构直径大于 $400\ \mu\text{m}$ 的表面织构,织构直径小于 $400\ \mu\text{m}$ 时,精密加工所加工的织构底部因未能全部切除材料而有明显的中心凸起。纳秒激光加工的织构范围约为 $200\sim 600\ \mu\text{m}$,织构直径大于 $600\ \mu\text{m}$ 时,堆积材料的再加工导致熔融材料进入已加工的微凹坑中,加工底部表面不平整;而织构直径小于 $200\ \mu\text{m}$ 时,由于加

工织构的孔径很小,激光烧蚀路径短,不能满足加工要求。飞秒激光适于加工直径小于 $300\ \mu\text{m}$ 表面织构,过大的织构直径会增加加工成本,不够经济。

2) 织构加工精度。精密雕刻技术能够加工得到较理想的表面织构,实际织构尺寸与设计尺寸能够较好地吻合,精密雕刻加工的精度与刀具底部直径和锥度、织构直径和壁面倾斜度相关,受到加工工具的限制。纳秒激光加工所得到的织构精度较差,由于纳秒激光加工基于材料的热熔作用,液态金属的再凝结导致织构形状不规则。飞秒激光加工精度高,因为飞秒激光加工技术利用材料对光子的非线性吸收原理,热影响区域小,使用飞秒激光能够得到形状轮廓较好、无明显金属熔融堆的表面织构。

3) 织构加工对象。精密雕刻技术适于加工硬度较低的金属和非金属材料。纳秒激光加工技术对材料的熔点有要求,无法加工熔点较高的材料。而飞秒激光加工对加工材料没有明显要求,不受材料熔点、硬度等物理性质的限制。

因此,如表2所示,综合织构加工尺寸范围、织构加工精度和加工对象,飞秒激光织构加工技术具有较好的应用前景,精密雕刻仅仅在织构尺寸较大时可采用。而纳秒激光技术由于织构加工质量较差,且精密雕刻和飞秒激光技术可满足其加工尺寸范围,在保证织构加工精度的基础上应避免使用。

表2 三种不同加工方法特点对比

Tab.2 Characteristics contrast of three different processing methods

加工方法	精密雕刻	纳秒激光	飞秒激光
织构加工尺寸	$>400\ \mu\text{m}$	$200\sim 600\ \mu\text{m}$	$<300\ \mu\text{m}$
织构加工精度	高	低	高
织构加工对象	硬度低	熔点低	几乎无限制

3 结论

1) 采用精密雕刻技术可获得三维形貌较规则的表面织构,不适于硬度较高的材料,且仅适用于织构直径大于 $400\ \mu\text{m}$ 的织构,加工织构底部因未能全部切除材料而有明显的中心凸起。

2) 纳秒激光织构可加工熔点较低的材料。该方法所加工的表面织构在织构周围会形成熔融堆积物,因而影响织构加工质量。

3) 飞秒激光织构加工技术不受材料的限制,且几乎没有热影响和熔融堆积物的产生,能获得较好的织构轮廓,适用于织构直径小于 $300\ \mu\text{m}$ 的情况,织构直径过大时对激光源的要求较高。

4) 综合织构加工尺寸范围、加工对象和加工精度, 飞秒激光加工技术在牙轮钻头轴承上具有良好的应用前景, 精密雕刻技术仅在织构尺寸较大时可采用。而纳秒激光技术由于织构加工质量较差, 且精密雕刻和飞秒激光技术可满足其加工尺寸范围, 应避免使用。

参考文献:

- [1] PETTERSSON U, JACOBSON S. Textured Surfaces in Sliding Boundary Lubricated Contacts-mechanisms, Possibilities and Limitations[J]. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces, 2007, 1(4): 181-189.
- [2] KIM B, CHAE Y H, CHOI H S. Effects of Surface Texturing on the Frictional Behavior of Cast Iron Surfaces[J]. Tribology International, 2014, 70: 128-135.
- [3] SHEN X H, TAO G C. Tribological Behaviors of Two Micro Textured Surfaces Generated by Vibrating Milling under Boundary Lubricated Sliding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9-12): 1995-2002.
- [4] HAN J, FANG L, SUN J, et al. Hydrodynamic Lubrication of Microdimple Textured Surface Using Three-dimensional CFD[J]. Tribology Transactions, 2010, 53(6): 860-870.
- [5] LU X, KHONSARI M M. An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings[J]. Tribology Letters, 2007, 27(2): 169-176.
- [6] WANG X, LIU W, ZHOU F, et al. Preliminary Investigation of the Effect of Dimple Size on Friction in Line Contacts[J]. Tribology International, 2009, 42(7): 569-578.
- [7] GUO P, EHMANN K F. An Analysis of the Surface Generation Mechanics of the Elliptical Vibration Texturing Process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 64: 85-95.
- [8] AHMED K M, GRAMBOW C, KIETZIG A M. Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining[J]. Micromachines, 2014, 5(4): 1219-1253.
- [9] PARREIRA J G, GALLO C A, COSTA H L. New Advances on Maskless Electrochemical Texturing (MECT) for Tribological Purposes[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 212: 1-13.
- [10] KUMAR S, SINGH R, SINGH T P, et al. Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A Review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3675-3687.
- [11] ADAMS D P, VASILE M J, MAYER T M, et al. Focused on Beam Techniques for Fabricating Geometrically-complex Components and Devices[J]. Report for Sandia, 2004, 24: 911.
- [12] 况雨春, 马德坤, 夏宇文. 单牙轮钻头滑动轴承组接触应力分布研究[J]. 石油机械, 2002, 30(4): 7-9.
KUANG Yu-chun, MA De-kun, XIA Yu-wen. The Contact Stress Research of Single Cone Bit Journal Bearing[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(4): 7-9.
- [13] 伍开松, 马德坤. 牙轮钻头滑动轴承的接触有限元优化设计[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2003, 35(5): 16-18.
WU Kai-song, MA De-kun. Optimal Design of Sliding Bearings for Roller Bit with Contact FEA[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003, 35(5): 16-18.
- [14] 何畏, 熊尉伶, 李波, 等. 淬火硬度场数值模拟与 PVD 技术在牙轮钻头轴承套中的应用[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12): 182-186.
HE Wei, XIONG Wei-ling, LI Bo, et al. Numerical Simulation of Quenching Hardness and PVD Technology in Cone Bit Bearing Sleeve[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(12): 182-186.
- [15] 黄志强, 涂小芳, 王晓凤, 等. 高速牙轮钻头轴承表面强化技术实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 143-145.
HUANG Zhi-qiang, TU Xiao-fang, WANG Xiao-feng, et al. The High Speed Roller Bit Bearing Surface Strengthening Technology[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(2): 143-145.