

GCr15 轴承钢表面的激光凹/凸微织构工艺

华希俊¹, 张加力^{1*}, 解玄³, 平国峰², 张玲慧², 尹必峰³

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²江苏希西维轴承有限公司, 江苏 镇江 212009;

³江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用光纤激光器对 GCr15 轴承钢试样表面进行了激光织构加工, 使用共聚焦显微镜观察了微织构的形貌, 分析了功率、脉宽、重复次数对织构点形貌的影响。试验结果表明, 织构点直径随脉宽的增大而增大, 在一定脉宽范围内, 织构点深度随脉宽的增大而明显增大; 在单脉冲作用下, 当脉宽为 1000 μs 时形成凸起形貌, 当脉宽增大到 5000 μs 以上时形成凹坑形貌; 随着功率的增大, 织构点的直径和深度增大; 随着重复次数的增加, 热效应尤为明显, 凹坑先逐渐变深然后部分被填平, 凸起高度先不变然后急剧增大。研究验证了同一台激光器同时实现凹/凸微织构的可行性, 为实现表面不同形貌的加工提供了新的思路。

关键词 激光技术; 形貌; 微织构; 光纤激光; 工艺参数

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302009

Laser Concave/Convex Micro-Texture Process of GCr15 Bearing Steel Surface

Hua Xijun¹, Zhang Jiali^{1*}, Xie Xuan³, Ping Guofeng², Zhang Huiling², Yin Bifeng³

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²Jiangsu CCVI Bearing Company, Zhenjiang, Jiangsu 212009, China;

³School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract Laser texture process is carried out on the surface of GCr15 bearing steel by a fiber laser and the morphology of micro texture is observed by the confocal microscope. The effects of power, pulse width and repetition times on texture morphology are analyzed. The experimental results show that with the increment of pulse width, the diameter of textured point increases and the depth of textured point significantly increases in a certain range of pulse width. Under the condition of single pulse, when the pulse width is 1000 μs , textured structure forms a convex profile, and when the pulse width increases to be more than 5000 μs , textured structure forms a concave pit. With the increment of laser power, the diameter and depth of the textured point increase. The heat effect is more obvious with the increase of repetition times. The pit is gradually deepened and then partially filled up. The height of the convex profile is firstly almost invariable and then rapidly increases. The study verifies the feasibility of the same laser to realize concave or convex micro textures simultaneously, and also provides new ideas for processing different surface topography.

Key words laser technique; morphology; micro-texture; fiber laser; processing parameters

OCIS codes 140.3390; 060.3510; 160.3900; 170.1790

收稿日期: 2018-08-09; 修回日期: 2018-10-23; 录用日期: 2018-12-18

基金项目: 江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)(BE2017122, BE2016144)、扬州市科技成果转化项目(YZ2018125)、镇江市重大科技专项(ZD2018001)、镇江市高技术研究重点实验室(SS2018007)、2017年度泰州市高层次创新创业人才引进计划(110)

* E-mail: 1210729682@qq.com

1 引言

表面织构作为改善摩擦副表面性能的一种新型技术,对提高机械系统承载能力和使用寿命有着积极的作用^[1-4]。在诸多的表面织构技术中,激光织构技术因具有设备简易、成本低、加工速度快、加工质量好、织构形貌易控制等特点,得到更广泛的应用^[5-6]。Hoppermann等^[7]对比了多种表面织构技术,发现激光表面织构技术在加工效率、质量及可控性方面具有显著优势。

凹坑(槽)以及毛化凸起织构是应用最广泛的两种表面织构形貌,通过优化的排列方式,合理设计表面织构,可以有效改善接触表面的摩擦特性。微凹坑能够减小对偶副接触面积,增强流体动压效应、捕捉磨损颗粒、储存释放润滑剂,这些特性使其广泛应用于推力轴承、缸套-活塞环系统、机械密封等机械系统关键摩擦副表面^[8-9]。毛化形貌具有微凸起的结构特征,可以改变两个接触面表面的摩擦特性,同时可以有效分离两接触面,降低材料之间的粘着与吸附,毛化形貌也因此广泛应用于轧辊、磁盘及模具表面^[10-11]。

国内外学者针对激光表面织构的工艺可控性做了大量的研究工作。Vilhena等^[12]利用Nd:YAG激光器在100Cr6试样表面上进行凹坑加工以改善接触表面的摩擦学性能并优化激光参数,研究了激光加工参数对凹坑三维形貌的影响规律。黄志辉等^[13]基于冲击强化技术在Al7075表面开展微凹坑造型研究,考察了脉冲能量、冲击次数、离焦量、约束层K9玻璃厚度对凹坑形貌的影响,设计需求的凹坑形貌。张培耘等^[14]利用固体激光器在45#钢材表面进行织构试验研究,发现通过选择合适的激光加工工艺参数,可加工出高质量的凹坑形貌。钱振华^[15]对关节轴承内圈进行微凹坑和微凹槽的激光织构工艺试验,通过对不同脉冲重复次数、重叠度等条件下试验数据的分析,掌握微凹坑和微凹槽几何形状和分布的控制方法,得到表面形貌参数可控的激光微织构。Liu^[16-17]利用YAG激光器对轧辊

试样表面进行织构加工,通过优化激光工艺参数实现特殊毛化形貌-球冠状凸起形貌的加工,为激光毛化加工工艺参数的优化及应用提供了重要参考。靳广林等^[18]研究了激光能量、脉冲个数以及辅助气体对激光表面微造型尺寸的影响,发现脉冲个数对微坑直径和凸起的影响有限,辅助气体对微造型的变化有一定的影响趋势,带有凸起的微造型试样有着更好的摩擦学性能。叶云霞等^[19]利用波长1064 nm的脉冲激光在45#钢表面进行凸起造型试验,得到三种典型形貌(球冠状、墨西哥帽状和M状),提出凸起形貌是激光与材料作用过程中热、力耦合作用的结果,通过试验与数值计算指导控制凸起形貌,优化摩擦学金属表面。

在现有的研究工作中,微凹坑织构主要是利用短脉宽激光的气化作用形成,而毛化织构则主要是通过长脉宽激光的熔凝作用形成,采用同一台激光器很难同时实现凹/凸形貌加工。在工业化应用中常常需要在同一表面实现凹凸复合形貌加工,但现有技术一般通过两台激光器来实现,单一的织构形貌加工对于工业化应用非常不利,其效率低、成本高,应用受到限制。本文利用英国SPI光纤微秒激光系统功率、脉宽等参数覆盖范围较广的特点,结合自主开发的数控技术,系统研究了不同激光加工参数对织构形貌的影响规律,分析了不同形貌形成作用机理,验证了同一激光器同时实现凹/凸织构的可行性。本研究有助于激光织构技术的产业化推广,具有重要的工程应用价值。

2 试验

2.1 试验准备

试验材料选用GCr15轴承钢,试验中试样尺寸为30 mm×30 mm×10 mm,试样表面经砂纸打磨及抛光后的粗糙度 $R_a=0.1 \mu\text{m}$ 。试验激光加工采用英国SPI光纤激光器,其型号为SP-100C-A-S6-A-A,主要参数见表1。SPI激光器与传统YAG激光织构设备相比,具有高功率激光输出、散热效果好、光束质量高、脉宽调节范围广等优点。

表1 SPI光纤激光器参数

Table 1 Parameters of SPI fibre laser

Output power /W	Single pulse energy / μJ	Frequency range /kHz	Wavelength /nm	Pulse width / μs	Divergence angle /mrad	Power instability /%
≤ 100	1	≤ 100	1064	≥ 10	< 0.4	$< \pm 0.5$

2.2 试验方案

采用单因素轮换试验法考察功率、脉宽、重复次

数等激光主要参数对织构形貌的影响,试验过程中控制激光头处于焦点位置。具体试验方案如下:

1) 采用 200 #、400 #、600 #、800 #、1000 #、1200 # 砂纸依次打磨, 并进行抛光处理;

2) 将试样装夹在工作台上, 依次改变功率为 10, 30, 50, 70, 90 W, 脉宽为 500, 1000, 5000, 10000, 20000 μs , 重复次数为 1, 5, 10, 15。每个参数加工 5 次, 尺寸参数取 5 次平均值;

3) 将加工好的试样放入超声波清洗机中清洗 15 min 后取出吹干;

4) 利用德国 NanoFocus 共聚焦显微镜($\mu\text{surf mobile}$)对试样表面进行测量。

3 结果与讨论

3.1 单次作用功率和脉宽对形貌的影响

图 1 为不同功率下织构点三维形貌随脉宽的变化情况。可以看出, 不同功率下, 织构点三维形貌随着脉宽增大, 变化规律几乎一致。当脉宽为 1000 μs 时, 织构点中心区域形成毛化凸起形貌; 当脉宽增大到 5000 μs 以上时, 织构中心区域凸起形貌消失, 形成凹坑形貌。

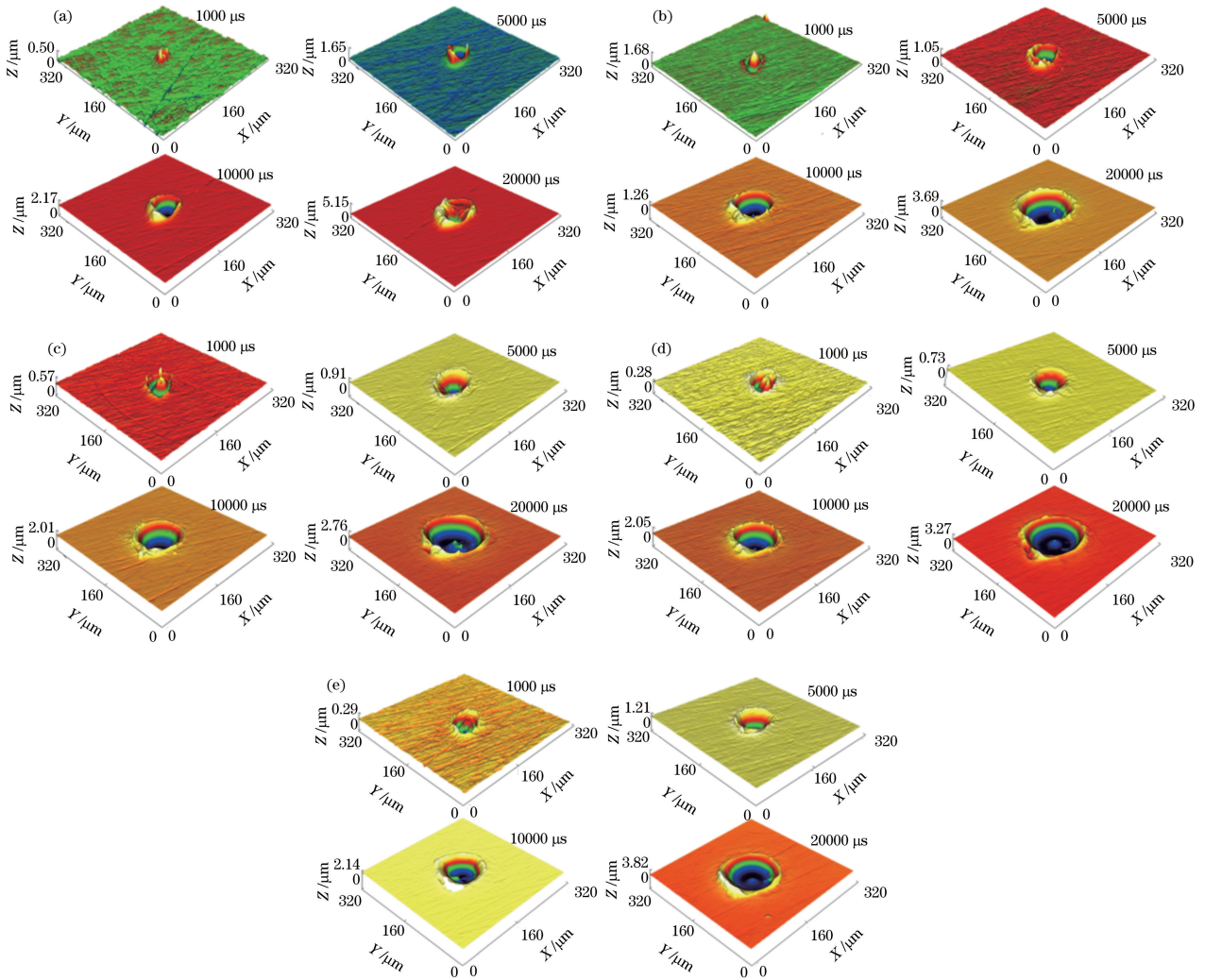


图 1 不同功率下织构点形貌随脉宽的变化。(a) 10 W;(b) 30 W;(c) 50 W;(d) 70 W;(e) 90 W

Fig. 1 Morphology changes of textured point with pulse width at different powers.

(a) 10 W; (b) 30 W; (c) 50 W; (d) 70 W; (e) 90 W

当脉宽为 1000 μs 时, 材料快速发生重熔, 重熔区表面张力发生改变, 由于光斑为高斯分布, 熔池中心温度最高, 其表面张力大于四周, 导致熔池中较强的向内 Marangoni 流动^[20], 因此材料向中心流动, 中心区域形成了“微凸体”形貌。当脉宽增大至

5000 μs 以上时, 中心部位凸起被“削平”, 随着脉宽增大, 逐渐形成越来越大的“凹坑”, 单个脉冲作用时间增大, 热量发生累积, 中心部位受热最多, 部分材料达到气化阈值, 材料气化去除, 且由于激光作用时间较长, 中心表面张力逐渐与四周趋同, 但中心区受

热影响较大,材料不断重熔流向四周,因此最终织构点中心部位形成深度较大的凹坑,而四周部位凸起高度也逐渐增大。

为了进一步定量分析织构点形貌与功率和脉宽的关系,用 NanoFocus 共聚焦显微镜观测织构轮廓形貌,绘制不同功率下织构点直径、凸起高度、深度随脉宽变化关系,分别如图 2~4 所示。

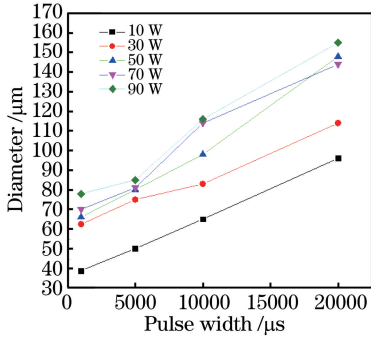


图 2 不同功率下织构点直径随脉宽变化关系图

Fig. 2 Relationship between diameter of textured point and pulse width at different powers

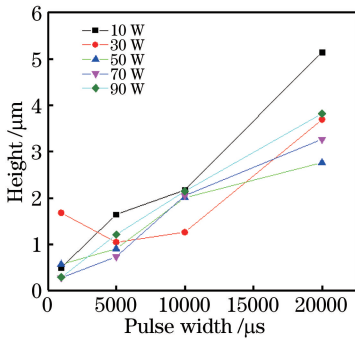


图 3 不同功率下凸起高度随脉宽变化关系图

Fig. 3 Relationship between height of convex profile and pulse width at different powers

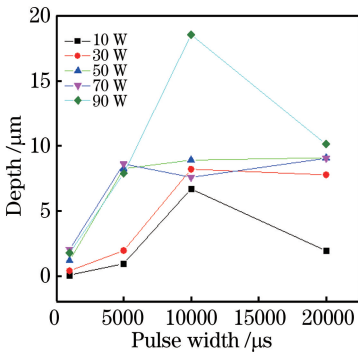


图 4 不同功率下织构点深度随脉宽变化关系图

Fig. 4 Relationship between depth of textured point and pulse width at different powers

从图 2 中可以看出,功率一定时,织构点直径随脉宽增大而增大,说明随着脉宽增大,脉冲作用时间

增长,单个激光脉冲作用累积能量增大,因此激光作用热影响区增大,熔池区域增大,最终形成的织构点直径也随之增大。此外,功率密度较小时,产生的等离子体稀疏,依附于工件表面,对于激光束而言近似透明,对织构点直径的影响较小;而当功率密度增大到一定范围之后,材料蒸发气化,气体被激光持续加热,高温蒸汽形成高度电离、整体呈中性气体状的等离子体,等离子体的增强对激光束形成一定的屏蔽效应^[21],因此功率增大到一定值之后,织构点直径增大的趋势变缓。

从图 3 中可以看出,当脉宽为 1000 μs 时,织构点中心区域凸起高度随功率呈现先增大后减小的趋势,且功率为 30 W 时凸起高度最高,凸起高度约 2 μm 。说明功率过小或过大都不利于毛化凸起形貌的形成,功率较小时,激光功率密度较小,材料发生熔化速度较慢,形成的凸起高度也就越低;当功率较大时,功率密度较大,材料容易气化,不易形成凸起,因此功率过小或过大时凸起高度都不高。当脉宽较大(5000 μs 以上)时,凹坑周围的凸起高度随脉宽的增大而增大,而与功率并没有明显的对应关系,因为随着脉宽增大导致温度升高,此时材料流动加剧,熔池内表面张力由正变为负,导致熔池内形成方向向外的对流,中心部位材料迅速流动至四周,脉宽越大,流动速度和流动量越大,四周凸起高度也越高;此外,凹坑四周凸起的部分是激光热效应作用产生的熔渣,而脉宽越大,累积能量越大,激光作用热效应产生的熔渣也越多,进一步造成了凹坑四周凸起高度的增加。

从图 4 中可以看出,功率一定时,当脉宽小于 10000 μs 时,织构点深度随脉宽增大而增大,且增幅明显,但当脉宽大于 10000 μs 时,深度不再增加甚至有所减小。当脉宽一定时,纵向对比功率对织构点深度的影响,可以发现功率越大,深度越大,但功率对深度变化的影响幅度相对脉宽较小。

当脉宽为 1000 μs 时,材料发生微熔形成中间凸起的毛化形貌,少量材料发生流动而在凸起部位旁形成深度较浅的凹坑。当脉宽增大,单个脉冲累积能量增大,材料流动变快,发生气化的材料也越多,因此形成的凹坑深度也越深。当脉宽大于 10000 μs 时,凹坑区域重熔作用明显,材料堆积在凹坑底部,凹坑深度变小。当功率增大时,能量密度增大,也会造成材料流动加快、气化的材料增多,凹坑深度随之增大,但由于脉宽较大(5000 μs 以上)而导致功率对深度的影响相对脉宽较小。

3.2 重复次数对形貌的影响

采用“单脉冲同点间隔多次”加工方法具有热效应影响小、形貌质量高、加工效率高等优势^[22],为了研究 SPI 光纤微秒激光器加工织构时不同功率和脉宽参数下激光作用重复次数对形貌的影响,本次试验分别考量功率 30 W、50 W 和脉宽 1000, 5000, 10000 μs 时重复次数对织构形貌的影响,重复次数

变化范围为:1, 5, 10, 15 次。织构点三维形貌变化如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,激光作用重复次数对织构点形貌影响较大,且重复次数与脉宽大小对形貌的影响有协同效果。为了进一步分析重复次数对形貌的影响规律,将各个织构点的深度和凸起高度绘制如图 6 所示。

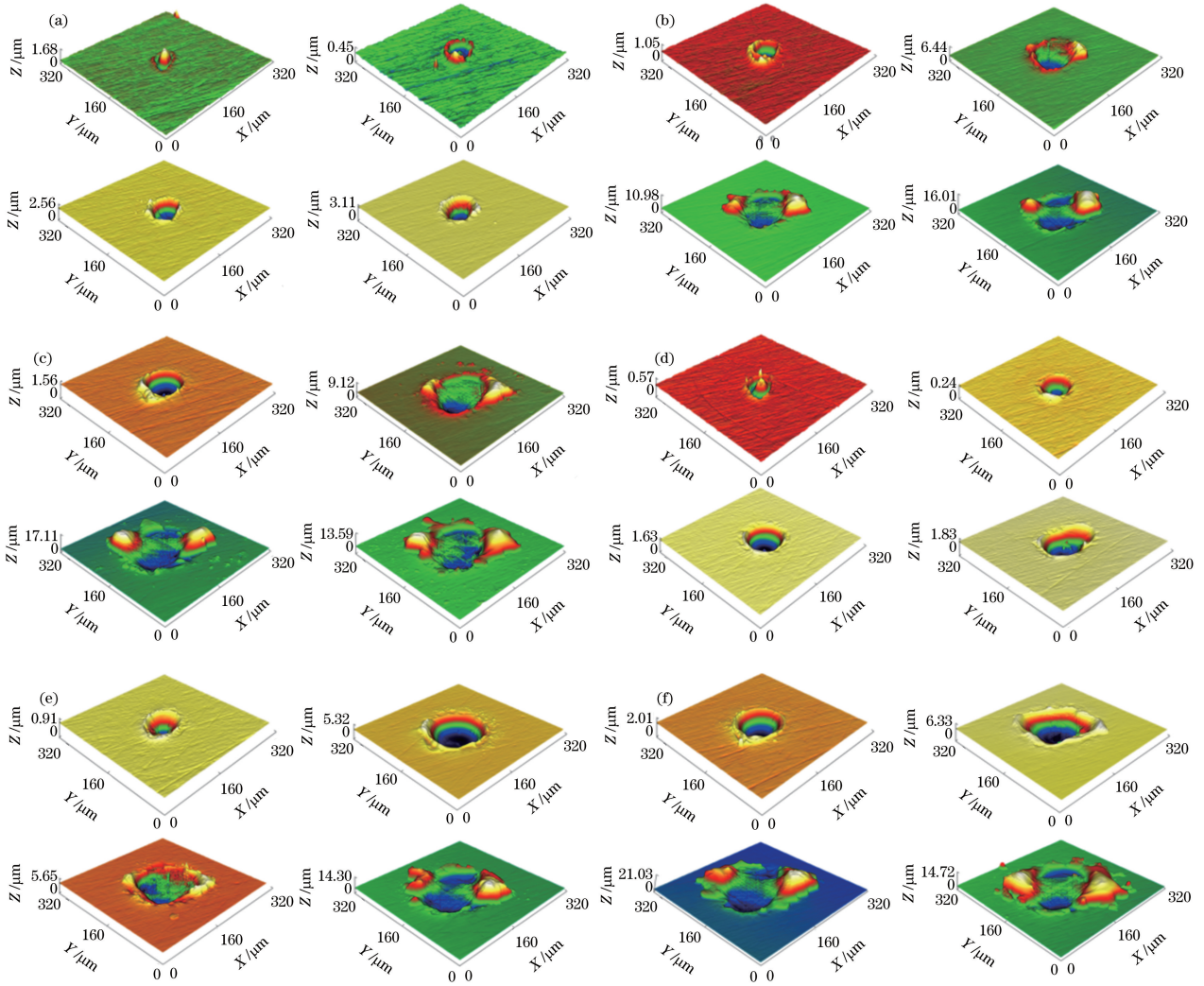


图 5 不同功率和脉宽下织构点形貌随重复次数的变化。(a) 30 W, 1000 μs ; (b) 30 W, 5000 μs ;
(c) 30 W, 10000 μs ; (d) 50 W, 1000 μs ; (e) 50 W, 5000 μs ; (f) 50 W, 10000 μs

Fig. 5 Morphology changes of texturedpoint with repetition times at different powers and pulse widths.

(a) 30 W, 1000 μs ; (b) 30 W, 5000 μs ; (c) 30 W, 10000 μs ; (d) 50 W, 1000 μs ; (e) 50 W, 5000 μs ; (f) 50 W, 10000 μs

从图 6 中可以看出,当脉宽为 1000 μs 时,凹坑深度随重复次数的增大逐渐增大,而凸起高度几乎不变。当脉宽大于 5000 μs ,功率为 30 W 时,凹坑深度几乎不变;功率为 50 W 时,凹坑深度随重复次数的增大先增大后减小;凸起高度随重复次数的增大均有明显的增大趋势,重复次数 10 次以上时,脉宽为 10000 μs 的参数下凸起高度略微下降。

结合图 6 织构点三维形貌随重复次数的变化可以得出如下结论:当脉宽较小(1000 μs)时,增大脉冲重复次数能够降低材料的烧蚀阈值^[23],熔池中间部位材料容易发生气化,材料在较短脉宽时间内迅速得到去除,凸起部位被“削平”,随着重复次数增加能量迅速累积,逐渐形成深度较大的凹坑,同时熔池周围没有明显材料堆积。当脉宽达到 5000 μs 以上

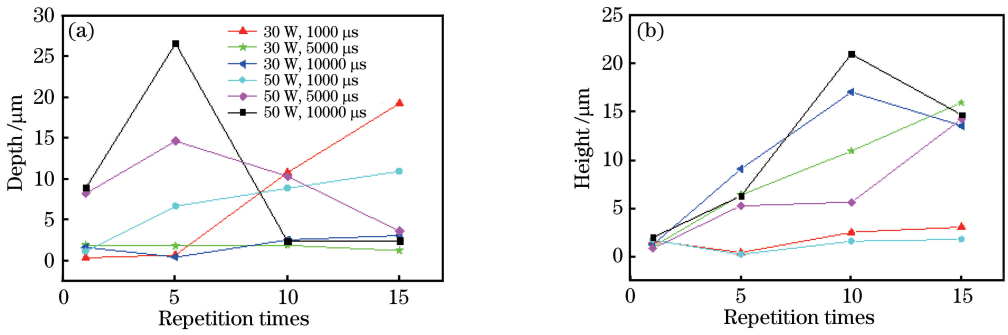


图 6 不同功率和脉宽下重复次数对织构点深度和凸起高度的影响。(a)深度;(b)凸起高度

Fig. 6 Effects of repetition times on depth and convex profile height of textured point at different powers and pulse widths. (a) Depth; (b) height of convex profile

时,由于脉冲作用时间较长,材料重熔效应及热影响作用明显,材料发生堆积,脉冲重复次数较少,配合较高功率,有一定深度的凹坑形成,重复次数进一步增多,材料堆积速度及热效应影响迅速增大,熔池周围凸起高度急剧增大,并且蔓延至熔池内部,熔池周围形成较高的“山峰”状凸起,熔池内部凹坑有部分被填平。由于材料的堆积与脉宽有密切的关系,脉宽越大,凸起高度越高,当脉宽达到 10000 μs 时,凸起高度过高,此时材料不再继续向上堆积,而向周围蔓延,因此“山峰”高度略微减小,但面积继续增大。

4 结 论

探究了 SPI 微秒级光纤激光器的激光功率、脉宽、重复次数等不同工艺参数对 GCr15 轴承钢表面织构形貌的影响。单脉冲作用时,脉宽对形貌形成影响较大,脉宽为 1000 μs 左右,熔凝作用明显,易形成毛化凸起型形貌,但功率过大或过小都不利于毛化形貌的形成;脉宽持续增大,熔池中心材料会发生气化,形成微凹坑形貌。脉冲重复次数会加剧熔池中心材料气化,有利于凹坑形成,但过多的脉冲重复次数会导致热效应过大,熔渣累积。

揭示了通过激光能量累积效应来控制不同织构形貌形成的基本原理和参数调控方法,成功利用一台微秒级激光器实现了凹/凸形貌织构的加工。未来有望将该项技术应用于拉伸模具、机床导轨等工业应用中。

参 考 文 献

[1] Merlo A M. The contribution of surface engineering to the product performance in the automotive industry [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174/175: 21-26.
 [2] Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-reducing

surface-texturing in reciprocating automotive components [J]. Tribology Transactions, 2001, 44 (3): 359-366.
 [3] Kligerman Y, Etsion I, Shinkarenko A. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing [J]. Journal of Tribology, 2005, 127(3): 632-638.
 [4] Feng A X, Yang R, Shi F, et al. Wettability of laser micro-textured carbide surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(2): 299-302.
 冯爱新, 杨润, 施芬, 等. 激光微织构硬质合金表面润湿性 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26 (2): 299-302.
 [5] Grabon W, Koszela W, Pawlus P, et al. Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing[J]. Tribology International, 2013, 61: 102-108.
 [6] Wan Y, Xiong D S. Study of laser surface texturing for improving tribological properties[J]. Tribology, 2006, 26(6): 603-607.
 万轶, 熊党生. 激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(6): 603-607.
 [7] Hoppermann A, Kordt M. Tribological optimisation using laser-structured contact surfaces[J]. Ölhydraulik und Pneumatik, 2002, 46: 1-23.
 [8] Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings[J]. Tribology International, 2009, 42(4): 542-547.
 [9] Hua X J, Sun J G, Zhang P Y, et al. Research on discriminating partition laser surface micro-texturing technology of engine cylinder[J]. Tribology International, 2016, 98: 190-196.
 [10] Lei Z H. Application and development of laser texturing technology for rolls [J]. Applied Laser, 2013, 33(5): 563-566.
 雷泽红. 轧辊激光毛化技术的应用及发展[J]. 应用激光, 2013, 33(5): 563-566.
 [11] Baumgart P, Krajnovich D J, Nguyen T A, et al. A

- new laser texturing technique for high performance magnetic disk drives[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 2946-2951.
- [12] Vilhena L M, Sedlaček M, Podgornik B, *et al.* Surface texturing by pulsed Nd : YAG laser [J]. Tribology International, 2009, 42(10): 1496-1504.
- [13] Huang Z H, Liu H X, Shen Z B, *et al.* Process parameters analysis on surface texturing under laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0503004.
黄志辉, 刘会霞, 沈宗宝, 等. 工艺参数对激光冲击微造型效果的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503004.
- [14] Zhang P Y, Hua X J, Fu Y H, *et al.* Experimental investigations on laser surface micro-texturing technology and application[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 55-58, 73.
张培耘, 华希俊, 符永宏, 等. 激光表面微织构工艺试验及应用研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 55-58, 73.
- [15] Qian Z H. Laser micro texturing with controllable surface morphology parameters of spherical plain bearings[J]. Bearing, 2018(2): 14-17.
钱振华. 关节轴承表面形貌参数可控的激光微织构技术[J]. 轴承, 2018(2): 14-17.
- [16] Liu Y. Experimental investigation of laser-textured on roller with micro-convex topography[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 107-110.
- [17] Du D, He Y F, Sui B, *et al.* Laser texturing of rollers by pulsed Nd : YAG laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161(3): 456-461.
- [18] Jin G L, Yu Z, Hu J. Laser surface texturing and the influence of bulges produced by laser surface texturing on the sliding friction[J]. Applied Laser, 2015, 35(5): 536-540.
靳广林, 虞宙, 胡俊. 激光表面微造型与凸起形貌摩擦性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(5): 536-540.
- [19] Ye Y X, Jia Z Y, Fu H, *et al.* Study on evolution law of manufacturing micro-convex points on 45 # steel surface by pulse-width laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031408.
叶云霞, 贾子扬, 符昊, 等. 脉冲激光作用下 45 # 钢表面微凸起形貌演变规律的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031408.
- [20] Wang X S, Xu W T, Liu L, *et al.* Magnetic-field-assisted fabrication of micro-convex domes using long pulse laser[J]. Applied Physics A, 2017, 123(9): 592.
- [21] Fu Y H, Liu Q X, Ye Y X, *et al.* Research on laser surface micro texturing processing of single pulse intervals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1203005.
符永宏, 刘强宪, 叶云霞, 等. 同点间隔多次激光微织构工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203005.
- [22] Vadillo J M, Fernández Romero J M, Rodríguez C, *et al.* Effect of plasma shielding on laser ablation rate of pure metals at reduced pressure[J]. Surface and Interface Analysis, 1999, 27(11): 1009-1015.
- [23] Luther-Davies B, Rode A V, Madsen N R, *et al.* Picosecond high-repetition-rate pulsed laser ablation of dielectrics: the effect of energy accumulation between pulses[J]. Optical Engineering, 2005, 44(5): 051102.