

文章编号: 1001-3806(2016)04-0512-04

硬质合金激光毛化工艺试验研究

符永宏, 顾亚励, 康正阳, 王海波, 李玉弟

(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了探究激光毛化技术在硬质合金材料表面实现微织构的应用潜能, 采用单因素分析法, 在 YG6X 硬质合金刀片表面进行了激光毛化工艺试验研究, 获得了直径约 270 μm , 高度约 6 μm 的火山口形貌的微织构。结果表明, 激光脉冲宽度、抽运电压、气体压力对毛化微织构形貌有着显著影响, 脉冲宽度和抽运电压会较大地增大织构尺寸, 气体压力显著减小织构高度约 43%; 硬质合金激光毛化微织构易出现微裂纹, 由中心延伸至周边; 组织中材料分布不均, 中间有大块孔洞与空腔, 但与基体有着紧密的结合强度。

关键词: 激光技术; 激光毛化; 微织构; 工艺试验; 硬质合金

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.012

Experimental research of laser texturing of cemented carbide

FU Yonghong, GU Yali, KANG Zhengyang, WANG Haibo, LI Yudi

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To explore the potential application of micro-textures on the surface of cemented carbide material by laser texturing, process tests of laser texturing were carried out on the surface of YG6X cemented carbide cutters by using single factor analysis method. Crater micro-textures with approximate 270 μm diameter and 6 μm height were obtained. The experimental results show that laser pulse width, pump voltage and air pressure have important effects on the textured topography dimensions and quality of the convex textures. Pulse width and pumping voltage can increase the dimension of convex textures greatly, gas pressure can significantly reduce the height of convex textures about 43%. However, micro-cracks exist from the center to the surrounding of micro-texture materials on cemented carbide by laser texturing. Furthermore, micro-texture materials by laser texturing on cemented carbide show uneven distribution with bigger hole and cavity in the center, but have close bonding strength with substrate.

Key words: laser technique; laser texturing; micro-textures; process test; cemented carbide

引言

仿生学和摩擦学研究表明, 非光滑表面具有脱附减摩和耐磨等功能^[1-5], 不同形状及尺寸的微织构对接触界面的摩擦磨损性能有着不同效果。其中, 毛化微凸起形貌是一种特殊的非光滑表面的表现形式, 因而对毛化微凸起形貌与质量的研究具有重要意义。

表面毛化技术有喷丸毛化技术 (shot blast texturing, SBT)、电火花毛化技术 (electro discharge texturing, EDT)、电子束毛化技术 (electron beam texturing, EBT) 及激光毛化技术 (laser texturing, LT) 等。激光毛

化技术是利用高能量密度的激光束照射于材料表面, 使材料在极快的速度内 ($10^6\text{ }^\circ\text{C/s} \sim 10^8\text{ }^\circ\text{C/s}$) 发生熔凝, 形成致密组织、超细硬质相的凸起形貌, 对材料表面改形的同时达到改性的目的。因其独特优势, 在众多毛化技术中占据愈来愈重要的地位, 展示出巨大的应用前景。LIU^[6] 和 DU^[7] 等人用 YAG 激光器, 在轧辊试样表面加工出球冠状毛化形貌, 并分析了工艺参数对尺寸的影响规律, 工业中已将其成功应用于轧辊, 生产出优质冷轧钢板^[8]。CHILAMAKURI 等人^[9] 设计一种算法, 通过输入不同参量, 在磁盘上生成 3 种 (球冠状、火山口状和 W 状) 典型的毛化形貌, 有效地提高磁盘质量与寿命^[10]。VILHENA^[3] 和 DUNN^[4] 等人通过光纤激光器在几种不同钢材上研究激光工艺参量对毛化织构尺寸的影响, 并发现毛化织构显著提高了基材硬度, 增大了界面摩擦系数。而激光毛化模具亦能显著地提高其表面的耐磨性能, 延长使用寿命^[5]。

目前, 激光毛化技术应用主要集中于上述材料, 但

基金项目: 国家重大科技成果转化资助项目 (2060403); 国家自然科学基金资助项目 (51175233)

作者简介: 符永宏 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事摩擦润滑理论及激光应用技术的研究。

E-mail: fyh@ujs.edu.cn

收稿日期: 2015-06-03; 收到修改稿日期: 2015-06-19

少见关于对硬质合金材料的研究报道。硬质合金是由难熔金属硬质化合物(WC, TiC等)和金属粘结剂(Co, Ni等)通过粉末冶金烧结制成,具有高硬度、高强度、高耐磨性等一系列优良性能,作为切削刀具、采掘工具和耐磨零件的主要材料,其需求与发展不断提升。尤其在作为摩擦副零件的接触表面,往往要求具备较高的润滑与耐磨性能。

为此,本文中针对硬质合金 YG6X 材料进行激光毛化工艺试验,采用灯抽运 YAG 固体激光器研究脉冲宽度、抽运电压、气体压力对毛化形貌及尺寸的影响规律,并对毛化区域材料的截面显微组织进行了观测,探索运用激光毛化技术进行硬质合金表面微结构的应用潜能。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料选用的是型号为 4160511 的无涂层硬质合金 YG6X 铣刀片,主要成分是 94% 的碳化物(WC)和 6% 的钴(Co)。其中 WC 熔点 2800℃,沸点 6000℃,Co 熔点 1495℃,沸点 2927℃;硬度 91HRA,密度 $14.7\text{g}\cdot\text{cm}^{-3} \sim 15.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,导热系数 $79.6\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,线膨胀系数 $4.4 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$,抗弯强度 $1.35\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。试验表面经抛光处理后表面粗糙度为 $0.05\mu\text{m}$ 左右。

1.2 试验装置

本试验中所采用的激光毛化设备为 LD802M 多功能激光加工系统,主要由激光器、工作台、计算机控制系统等组成。激光毛化工艺试验装置如图 1 所示。其中灯抽运 YAG 固体激光器的主要性能如表 1 所示,工作台的三

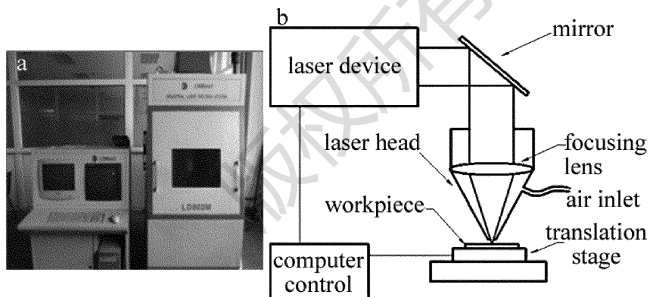


Fig. 1 Experiment of laser texturing
a—experiment setup b—schematic diagram of system

Table 1 The properties of YAG laser

laser parameters	values
averageoutput power	$\leq 200\text{W}$
pulse energy	$\leq 60\text{J}$
impulse frequency	$1\text{Hz} \sim 100\text{Hz}$
laser wavelength	1064nm
pulse width	$0.3\text{ms} \sim 20\text{ms}$
divergence angle	$< 10\text{mrad}$
power instability	$< \pm 5\%$

向行程为 300mm,重复定位精度可达 $\pm 0.005\text{mm}$,转台可实现 360° 旋转,重复定位精度为 1° 。

1.3 试验方案

基于先前的试验研究^[11-12],采用单因素分析法,固定离焦量为 0mm,脉冲频率为 5Hz,扫描速率为 2.5mm/s ,辅助气体为空气,垂直吹气,依次改变脉冲宽度 $0.6\text{ms}, 1.0\text{ms}, 1.4\text{ms}, 1.8\text{ms}, 2.2\text{ms}$,抽运电压为 380V,400V,420V,440V,气体压力为 0MPa,0.1MPa,0.3MPa,0.5MPa。试样加工前后用无水酒精棉球擦净,装夹于 3 维工作平台,调整激光头与试样待加工表面之间的距离,确保待加工试样表面处于激光焦点上。

采用 WYKO-NT1100 非接触式表面轮廓仪和 JSM-7001F 热场发射电镜观测毛化点形貌与尺寸。将部分试样沿对称面线切割,经 $240^\#, 600^\#, 1200^\#$ 砂纸和 W10 金相砂纸打磨,PG-2 落地式抛光机抛光,在 S-3400N 可变真空钨灯丝扫描电镜上观测毛化点剖面显微组织。

2 结果分析与讨论

通过对 YG6X 硬质合金的激光毛化工艺试验,发现在本试验参量下所形成的毛化点形貌基本都为边缘微凸起的火山口形貌,如图 2 所示。进一步发现,火山口微结构易出现微裂纹,由中心延伸至周边,图 3 为典型的单个毛化点形貌图,毛化点直径约 $270\mu\text{m}$,高度约 $6\mu\text{m}$ 。其对应激光加工工艺参量为:脉冲宽度 1.4ms ,抽运电压 380V,脉冲频率 5Hz,离焦量 0mm,扫描速率 2.5mm/s ,辅助气体为空气,气体压力 0.5MPa,垂直吹气。

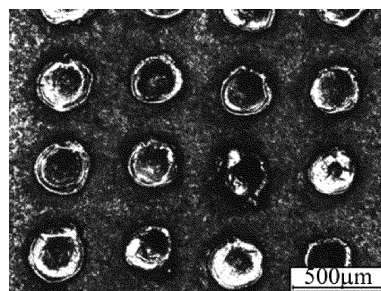


Fig. 2 Topography of micro-textures on YG6X by laser texturing

2.1 工艺参量对毛化点尺寸的影响

2.1.1 脉冲宽度 激光脉冲宽度对毛化点高度和宽度的影响如图 4 所示。当脉冲宽度小于 1ms 时,毛化点几乎未形成微凸起。由于试验采用单脉冲加工,脉冲宽度较小时,单脉冲能量小,在激光光斑直径不变时,峰值功率密度小,甚至未突破材料的烧蚀阈值,此时没有发生熔化,毛化点高度几乎为零。单脉冲能量随脉冲宽度的增大而增加,熔融的金属材料增多,毛化点直径和高度逐渐增大。当脉冲宽度继续增加,能量增大使得熔液体积变多,毛化点直径随之变大,高度变化趋缓。

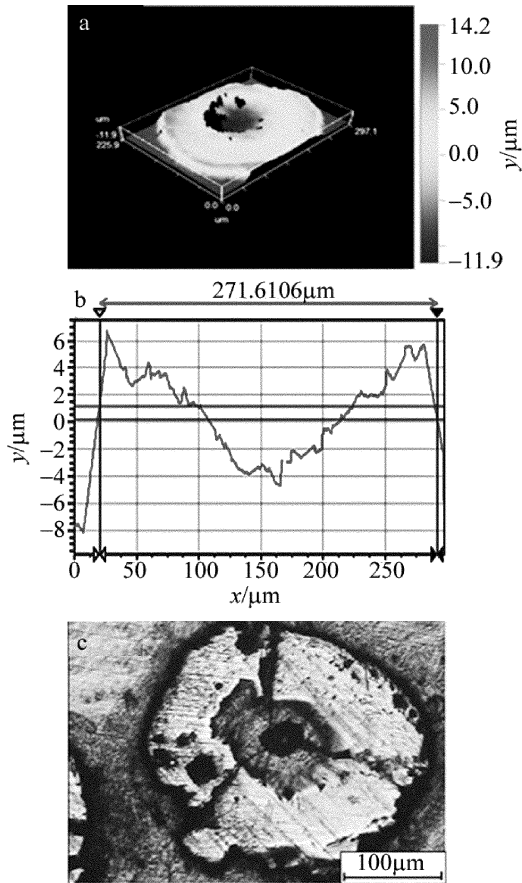


Fig. 3 Morphology of single convex texture
a—3-D topography b—2-D section c—SEM image

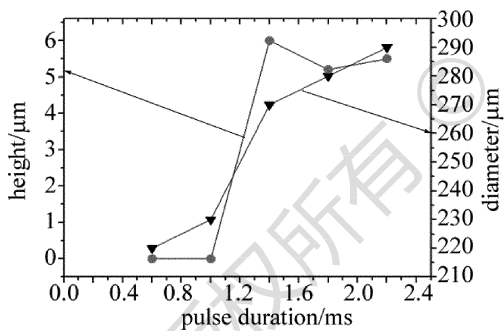


Fig. 4 Influence of pulse duration on convex texture height and diameter

2.1.2 抽运电压 固定脉冲宽度为 1.4ms, 气体压力为 0.5MPa。抽运电压对毛化点高度和直径的影响如图 5 所示。毛化点高度和直径随着抽运电压增大而近似线性增大。由于单脉冲能量随抽运电压的增加而逐

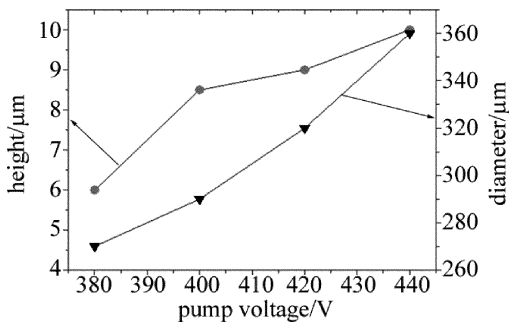


Fig. 5 Influence of pump voltage on convex texture height and diameter

渐增大, 光斑直径不变时, 峰值功率密度随之增大, 熔融的金属增多, 熔池的尺寸相应增加, 表现为毛化点的高度与直径近乎线性增大。

2.1.3 气体压力 固定脉冲宽度 1.4ms, 抽运电压 380V。辅助气体压力对毛化微织构尺寸的影响如图 6 所示。在气压大于 0.3MPa, 毛化点的直径与高度迅速减小, 其高度减小约 43%。由于激光功率与脉冲宽度不变, 单个脉冲能量未改变, 达到材料熔化和汽化时的熔融金属体积亦不变, 进而直径和高度变化很小。随着气体压力的不断增强, 气体流量增多, 加剧熔池中热量传递, 降低了影响表面张力的温度, 导致金属向周边流动减弱, 毛化点高度与直径整体上快速缩小, 尤其熔融材料向周边流动作用减弱, 毛化点高度显著降低。因此, 为获得较小直径、适中高度的毛化微织构, 吹气压力应该控制在一定范围内。

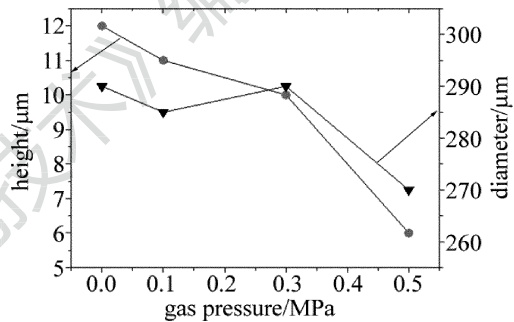


Fig. 6 Influence of gas pressure on convex texture height and diameter

2.2 激光毛化区域的截面显微组织

图 7 为激光毛化处理 YG6X 硬质合金刀片后表面的扫描电镜图 (scanning electron microscope, SEM) 形貌。硬质合金材料中 WC 颗粒受热边缘出现熔化圆整, 重凝后紧密地结合在熔池周边, 形成微凸起; 毛化点底部与基体有着明显清晰的分界线。进一步发现, 重凝层材料分布不均匀, 除中间材料汽化留下的大块孔洞与空腔外, 组织中有着分布不均的细小孔隙的产生。

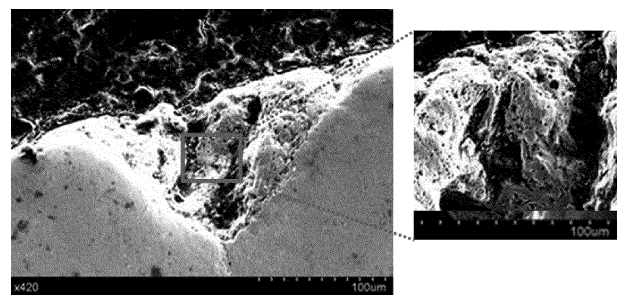


Fig. 7 Cross-section micrograph of convex texture

由于激光毛化为熔凝造型, 材料被瞬间加热并极速冷却, 形核率大幅增加, 可获得细小、致密的细晶组织, 因而硬度会增加; 此外, 金属熔池边缘与被加热至微熔状态的固态基体晶粒相接触, 非均匀晶核依附于

这个表面形核,因而在靠近分界线处,形核率更高,组织更致密,与基材的结合更为紧密。

2.3 火山口毛化形貌的形成机理

在激光照射区域,材料表面会发生复杂的化学、物理变化,材料局部受热形成金属熔池,熔池中熔液受体积力和表面力的作用而流动^[13],最终形成微观形貌。金属由固态受热熔化成液态,密度发生改变,体积力的动态分力由于惯性力作用,驱动熔液远离表面流动,促使形成不同微观形状;时间在纳秒尺度内,体积力的静态分力影响甚微。熔池中金属冷却过程中,表面力成为微观形貌最终形成的关键。表面力包括正应力和切应力。金属材料在熔化的过程中,部分材料会发生汽化,汽化产生的反冲力与熔液流经弯曲接触界面过程中的拉普拉斯应力构成了正应力;表面张力梯度产生切应力,切应力驱动熔液流动产生 Marangoni 对流, Marangoni 对流是熔池中对流的主要形式^[14]。表面张力梯度是热毛细张力与化学毛细张力的函数。热毛细张力由于温度梯度作用,致使材料向较冷端流动,即使得材料向熔池冷端边缘堆砌,同时,空气中氧气的助燃效果亦使得熔池表面温度升高^[13,15],亦增强了热毛细张力;化学毛细张力是化学活性剂作用的结果,会使得材料向着相反方向运动,即驱使熔液向着较高温度的中心区域流动,易在熔池中心形成微隆起。

硬质合金是通过粉末冶金烧结而成,材料中仅有两种合金成分,且熔沸点不同。当熔池内温度分布与入射高斯光束的辐照度具有相似分布特征^[14],即熔池中心温度相对四周温度较高,此时,Co 完全蒸发逃离,Wc 仅少部分发生蒸发,中间材料快速减少,因而在其原位留下孔洞与空腔。另外,在激光与工件材料相互作用的过程中,汽化蒸发产生的气体反冲压力对毛化形貌的形状也会有一定程度的影响,从而使中心发生凹陷;而熔池边缘与基材接触的传热作用,相对温度较低,该区域材料基本仅发生熔化而没有发生汽化,熔池中心区域熔融金属向边缘区域流动,在边缘堆砌形成微凸起,且硬质合金材料中未有化学活性较强元素,缺少化学毛细张力的作用,因而最终形成的形貌都为的火山口毛化微织构。

3 结论

(1) 对于硬质合金 YG6X 材料,激光毛化作用能形成边缘微凸起的火山口形貌;并伴随着微裂纹的产生,由中心延伸至四周。

(2) 脉冲宽度和抽运电压对毛化点形貌尺寸有着

显著影响,毛化点尺寸随之增大;辅助气体压力有减小毛化点尺寸的作用,尤其对高度的影响较大。

(3) 硬质合金激光毛化作用形成的微织构,织构重凝层材料分布不均匀,中间有大块孔洞与空腔,但微凸起部分与基体结合强度较为紧密,因而激光毛化作用区域材料的耐磨性也会增强。

参 考 文 献

- [1] TIAN L M, REN L Q, HAN Z W, *et al.* Applications of anti-adhesion and anti-resistance of biomimetic non-smooth surface in engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 138-142(in Chinese).
- [2] CHEN Z K, LU S C, SONG X B, *et al.* Effects of bionic units on the fatigue wear of gray cast iron surface with different shapes and distributions[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 66(3): 166-174.
- [3] VILHENA L M, SEDLACEK M, PODGORNIK B, *et al.* Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser[J]. Tribology International, 2009, 42(10): 1496-1504.
- [4] DUNN A, CARSTENSEN J V, WLODARCZYK K L, *et al.* Nanosecond laser texturing for high friction Applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 62(11): 9-16.
- [5] MI T, LI Ch D, NI J, *et al.* Laser texturing of spherical cap slight protuberance profile on mould & die surface[J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 500-502(in Chinese).
- [6] LIU Y, CHEN D R, YANG W Y. Experimental investigation of laser-textured on roller with micro-convex topography[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 107-110(in Chinese).
- [7] DU D, HE Y F, SUI B. Laser texturing of rollers by pulsed Nd:YAG laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161(3): 456-461.
- [8] CHEN G N. A new method of textured surface of roll and its application [J]. Applied Laser, 1996, 16(4): 155-158(in Chinese).
- [9] CHILAMAKURI S, BHUSHAN B. Effect of peak radius on design of W-type donut shaped laser textured surfaces [J]. Wear, 1999, 230(2): 118-123.
- [10] DUAN J. Present and future development of laser micro-processing on disk substrate—laser texture [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 490-493(in Chinese).
- [11] XU H. Analytical and experimental investigation on the formabilities of axisymmetric dies by composite laser surface texturing [D]. Zhengjiang: Jiangsu University, 2012: 56-67 (in Chinese).
- [12] FU Y H, FU H, XU H, *et al.* Experiment of laser texturing process and mechanical properties of textures [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2013, 34(2): 206-211 (in Chinese).
- [13] BENNETT T D, KRAJNOVICH D J, GRIGOROPOULOS C P. Marangoni mechanism in pulsed laser texturing of magnetic disk substrates [J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119(3): 589-596.
- [14] XU B Q, WANG H, XU G D, *et al.* Numerical modeling of laser-induced molten pool for laser interaction with metal material [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2010, 31(3): 358-362(in Chinese).
- [15] CHEN S C, CAHILL D G, GRIGOROPOULOS C P. Melting and surface deformation in pulsed laser surface micro-modification of Ni-P disks [J]. Journal of Heat Transfer, 2000, 122(1): 107-112.