

# 基于纳秒激光加工技术的表面织构工艺参数研究

许晨辉,徐锋,施莉莉,高继业,王雪,左敦稳

(南京航空航天大学 抗疲劳制造与表面工程研究所,江苏 南京 210016)

**摘要:**研究了脉冲激光输出功率、扫描间距和扫描速度对材料表面性能的影响,使用扫描电子显微镜、表面能测量仪对材料表面形貌、润湿性及表面能进行测量表征。结果表明,在一定范围内,激光功率对材料的性能影响较大,但由于等离子屏蔽效应影响,高功率范围内材料性能随输出功率变化不大。扫描间距和扫描速度对材料的影响效果相似,过低的扫描间距和扫描速度会抑制表面织构的效果,影响表面润湿性和表面能,同时会诱发大量微裂纹;过高的扫描间距和速度会降低织构密度,减小材料的表面润湿性能。

**关键词:**纳秒激光表面织构;表面润湿性;表面能

**中图分类号:**TH16 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0011-03

## Research on Laser Surface Texturing Parameters Based on Nanosecond Laser Processing Technology

XU Chenhui, XU Feng, SHI Lili, GAO Jiye, WANG Xue, ZUO Dunwen

(Institution of Anti-fatigue Manufacturing and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The effect of laser output power, scanning spacing and speed on the surface properties of the material is investigated. The surface topography, wettability and surface energy are measured and characterized by the scanning electron microscopy and the surface energy meter. The results show that the laser power has greater influence on the material performance within a certain range, but the material performance does not change much with the output power within a high power range due to the influence of plasma shielding. It has no great effect of scanning spacing and scanning speed on the material and low scanning spacing and speed controls the effect on surface texturing and affects the surface wettability and energy. High scanning spacing and speed reduces the texture density and the wettability of the surface.

**Keywords:** nanosecond laser surface texture; surface wettability; surface energy

## 0 引言

具有特殊形貌的表面,即织构表面,可以有效地降低摩擦、减小磨损,因此表面织构技术在汽车发动机、滑动轴承、切削刀具等领域有着极其广泛的应用<sup>[1]</sup>。目前,表面织构加工的方法主要为等离子刻蚀<sup>[2]</sup>、电火花加工<sup>[3]</sup>、机械加工<sup>[4]</sup>和激光表面织构<sup>[5]</sup>等。其中,激光表面织构技术因为其可重复性高、可控性好、耗时短、成本低等优点被广泛采用<sup>[6]</sup>。目前研究表明:表面织构可以有效地提高润滑剂的存储并产生动压润滑,从而提高其承载能力<sup>[7]</sup>,同时切削刀具上的织构可以收集磨屑,降低摩擦系数和磨损率<sup>[8]</sup>。金刚石涂层刀具因其优异的切削性能,被广泛应用于高效高精度有色金属及其合金、硬脆非金属材料加工领域<sup>[9]</sup>。添加中间过渡层可以有效地改善金刚石涂层刀具的切削性能。徐俊华等<sup>[10]</sup>的研究结果表明,添加钨中间过渡层可以改善金刚石和衬底间的晶格匹配性和热学匹配性,减小膜的内应力,防止碳过度渗入基底并阻止 Co 的扩散,从而改善涂层质量,提高金刚石膜和衬底间的结合性能。同时,LI 等<sup>[11]</sup>的研究证明,使用脉

冲激光表面预处理技术可以提高金刚石与衬底之间的机械咬合力,释放制备过程中的残余应力,从而提高膜基结合性能,且预处理衬底的表面形貌和性能对涂层的结合力影响较大。目前,针对两种改善金刚石涂层结合性能方法的研究已较为完善,但鲜有将其结合使用的研究,同时,针对不同激光表面织构参数对钨表面形貌和表面润湿性能的影响研究较少。本文的目的是研究纳秒激光表面织构技术中脉冲激光输出功率、扫描速度、扫描间距对钨表面形貌及性能的影响,并建立起激光参数、表面形貌、润湿性和表面能之间的联系,并为后续研究打下基础。

## 1 实验

### 1.1 实验参数与样品表征

本实验采用的纳秒激光器为 Nb:YAG 激光器,激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 20 ns,激光脉冲光斑直径为 30  $\mu\text{m}$ ,被加工材料为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 1 mm 的钨片,纯度为

**基金项目:**国家自然科学基金(51575269);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20170503)

**作者简介:**许晨辉(1994—),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,研究方向为表面工程技术。

99.995%。激光扫描方式采用平行激光扫描(图1),加工环境为大气氛围,详细的织构工艺参数见表1。激光表面织构的形貌采用扫描电子显微镜进行表征,采用角接触测量仪以及其配带的计算软件对材料表面能进行测量。

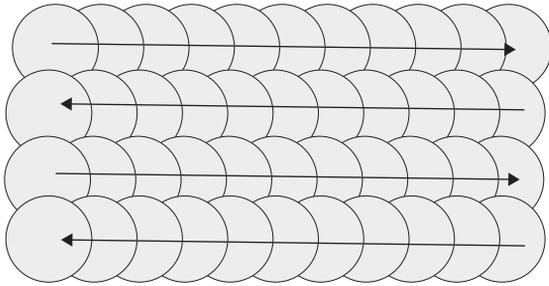


图1 激光扫描示意图

表1 激光表面织构工艺参数

分组	扫描速度/(mm/s)	功率/W	频率/kHz	扫描间距/ $\mu\text{m}$
输出功率组	800	100	100	25
	800	95	100	25
	800	90	100	25
	800	80	100	25
扫描速度组	2 250	90	150	25
	1 500	90	150	25
	750	90	150	25
	150	90	150	25
扫描间距组	1 200	90	150	50
	1 200	90	150	30
	1 200	90	150	15
	1 200	90	150	5

## 1.2 表面润湿性和表面能

当液滴与固体平面接触时,其最终形状取决于液滴内部的内聚力和液滴与固体间粘附力的相对大小。液滴放置在固体平面上时,液滴能自动地在固体表面铺展开或以与固体表面成一定接触角的液滴存在<sup>[12]</sup>,如图2所示。假定不同的界面间力可用作用在界面方向的界面张力来表示,则当液滴在固体平面上处于平衡位置时,这些界面张力在水平方向上的分力之和应等于0<sup>[13]</sup>,即

$$\gamma_{S/A} = \gamma_{S/L} + \gamma_{L/A} \cos\theta$$

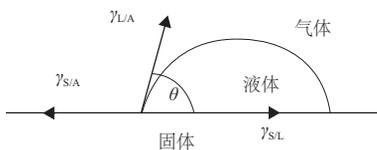


图2 液滴量角法示意图

式中: $\gamma_{S/A}$ 、 $\gamma_{L/A}$ 、 $\gamma_{S/L}$ 分别为固体表面能、液体表面能和固体/液体界面能; $\theta$ 为液体与固体间的界面和液体表面的切线所夹(包含液体)的角度,称为接触角。由于本实验

使用的试验液体的表面能已知,因此可以计算出固体的表面能<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 输出功率对表面性能的影响

图3为在不同激光输出功率下,金属材料表面形貌图。在输出功率>90 W的情况下,可以观察到脉冲激光辐照边缘规整度很差,在扫描轨迹边缘能明显看见金属堆积产生的带状结构,但单脉冲边缘由于金属的飞溅被掩盖。这一形貌的产生主要源于相爆现象。一旦激光强度高到足以将目标加热到接近液-气临界温度,就会发生大密度波动,导致液体内部气泡的快速形成和生长,导致相爆炸<sup>[14]</sup>。研究表明,在激光功率较高情况下,相爆作用对形貌的影响要大于蒸发和熔体流动去除机制,相爆的阈值取决于液-气临界温度。

同时,由图3a-图3c)可以发现,在较高功率情况下,功率的改变对材料表面形貌的影响不大。SIZYUK<sup>[15]</sup>的研究表明,在激光辐照过程中,被烧蚀的材料会在辐照区形成等离子体羽流。该羽流在激光脉冲的早期形成,其中包含了自由电子、离子、中性原子等。入射脉冲激光的剩余部分能量被羽流自身的自由电子通过逆韧致辐射<sup>[16]</sup>被吸收,进一步导致了电离密度的升高,形成大量的热离子和电子。当等离子体密度增加超过入射激光的临界密度时,等离子体倾向于屏蔽目标,阻止入射激光的剩余部分与目标相互作用,这种现象称为等离子体屏蔽效应。在这一效应的作用下,在一定范围内,输出功率的变化对材料表面形貌的影响较小。值得注意的是,当输出功率降低到80 W时,织构形貌出现较大变化,辐照边缘相较于其他样品更加平整,无明显的溅射物产生。这表明,当功率降低到不足以将材料表面加热到液-气临界温度时,金属表面去除机制以熔体流动去除机制为主。

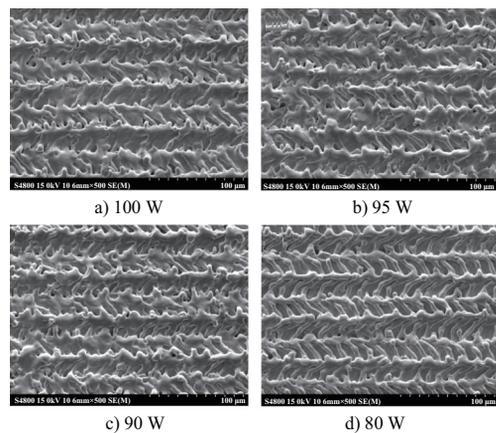


图3 在不同激光输出功率下表面织构形貌

图4为在不同激光输出功率情况下的液滴显微图和材料表面能测量结果。结果表明,当输出功率>80 W时,其材料表面能较大,润湿性好,但由于等离子屏蔽效应的影响,其性能相差不大。样品在输出功率为80 W时具有最小的表面能,这主要是由于在低脉冲功率的情况下,激

光对表面的作用效果不明显导致。同时,熔融金属液体会自发地向表面能较小的结构转变,而相爆效应可以有效地抑制这一现象,从而增加材料的表面能提高其润湿性能。

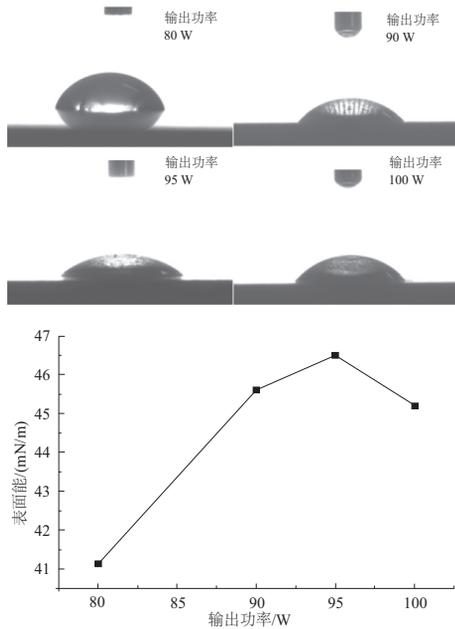


图4 在不同激光输出功率情况下的液滴显微图和材料表面能

## 2.2 扫描间距和扫描速度对表面性能的影响

图5是在不同扫描间距下金属材料表面形貌图。由图5可知,在扫描间距 $>5\mu\text{m}$ 时,单个辐照区域的形貌和扫描间距之间的关系不明显,扫描间距的改变仅改变了表面织构的密度。但当扫描间距为 $5\mu\text{m}$ 时,材料的表面形貌发生了很大的改变,织构组织边缘基本不可见,且表面粗化程度被很大程度地抑制。这主要是由于过小的扫描间距导致脉冲激光对表面的作用由轰击作用向热作用转变,微区内散热能力变弱,增加了熔融金属凝固的时间,单个熔池内的金属在凝固之前相互连接,并在扫描结束后再凝结。在图5d)中还可以观察到大量裂纹的存在,这主要是由于金属融化再凝固过程中,巨大的温度变化产生了较大的残余热应力,从而诱发裂纹的产生。图5a)扫描间距为 $50\mu\text{m}$ ,在此时激光扫描轨迹才发生了分离。扩大的辐照尺寸主要归因于激光脉冲的翼效应:随着脉冲激光输出功率的增加,激光脉冲的边缘区域能量提高,足以熔化和烧蚀辐照目标,从而增加其热影响区域。

图6是在不同扫描间距下的液滴显微图和材料表面能测量结果。结果表明,随着扫描间距的增加,表面能大小呈现先增加后减小的趋势,并在扫描间距为 $30\mu\text{m}$ 时达到最大。较大扫描间距会减小金属表面织构密度,降低其表面粗化程度,一定程度上减低了其表面能。而过小的扫描间距会导致熔池的连接,抑制材料表面的织构效果。

图7是在不同扫描速度下的材料表面能测量结果。结果表明脉冲激光的扫描速度对材料表面形貌的影响与扫描间距的影响效果类似。在较大扫描速度情况下,单个熔池相互分离,织构密度较低,表面能较小,而较小的扫描

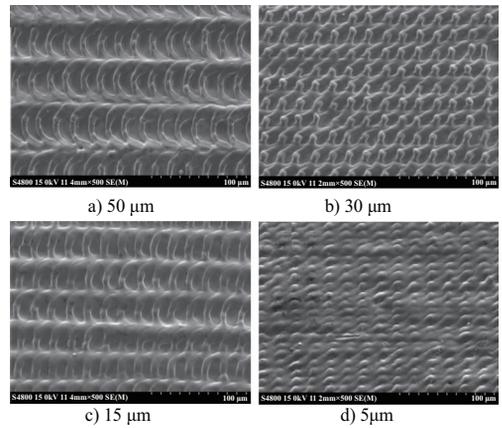


图5 在不同激光扫描间距下表面织构形貌

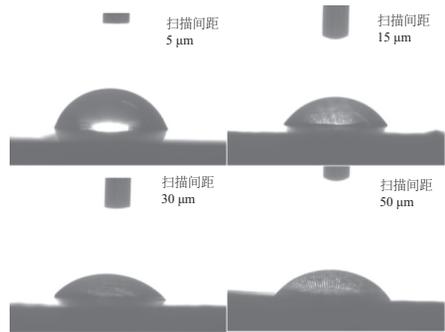


图6 在不同激光扫描间距下的液滴显微图和材料表面能

速度会导致材料表面微区内部散热能力变弱,熔池相互连接而抑制表面织构能力,表面能降低。

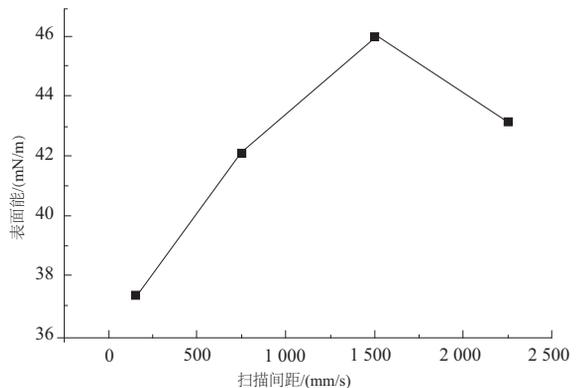


图7 在不同激光扫描速度下的材料表面能

(下转第46页)