

面向碳纤维增强树脂基复合材料/钢异质结构连接的 汽车钢板高速激光毛化工艺研究

谭向虎¹ 单际国^{1,2} 唐磊¹ 陈武柱¹

¹清华大学机械工程系激光加工研究中心, 北京 100084

²清华大学先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084

摘要 为了解决激光连接碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)/钢异质接头中的缩孔问题,采用光纤激光对GMW2钢板进行高速毛化试验,系统研究了激光功率、扫描速度、扫描长度和扫描次数对微凸起宽度和高度的影响,并利用高速摄像实时观察了毛化过程。结果表明,微凸起宽度与熔池宽度相当,增加激光功率或减小扫描速度将导致熔池宽度增加,微凸起宽度也将增加;而扫描长度和扫描次数不影响熔池的宽度,因此微凸起宽度也不发生变化。微凸起高度由蒸气压力、表面张力和液体动压力决定,激光功率增加将导致蒸气压力的增加和表面张力的减小,液态金属向熔池尾部流动的驱动力增大,适当地增加激光功率有利于微凸起的长高,但激光功率过高将产生大量飞溅,导致微凸起高度不稳定;随着扫描速度的增加,蒸气压力、表面张力和液体动压力都将发生变化,熔池液体流动的驱动力和阻力存在竞争关系,导致微凸起高度呈先增加后减小的趋势;扫描长度增加,蒸气压力水平分量增大,驱动力增加,微凸起高度逐渐增大。

关键词 激光技术; 高速激光毛化; 微凸起几何形貌特征; 毛化工艺控制; 汽车钢板

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303002

Study on Laser Surfing-Sculpt of GMW2 Autobody Sheet Steel for Carbon Fiber Reinforced Polymer/Steel Dissimilar Joint

Tan Xianghu¹ Shan Jiguo^{1,2} Tang Lei¹ Cheng Wuzhu¹

¹Laser Processing Research Center, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China

²Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua
University, Beijing 100084, China

Abstract To solve the problem of shrinkage voids in carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/steel dissimilar joint, the fiber laser surfing-sculpt on the GMW2 autobody sheet steel is adopted. The effects of laser power, scanning speed, scanning length and scanning repeats on the width and height of protrusion are systematically investigated. The laser surfing-sculpt process is studied by high speed visual detection system. The results show that the protrusion width is the same as the molten pool width. Increasing the laser power or decreasing the scanning speed will cause the increase of molten pool width, leading the protrusion width to increase. While scanning length and scanning repeats do not affect the molten pool width, so they have no effect on protrusion width. The protrusion height is determined by vaporization pressure, surface tension and hydrodynamic pressure. With the laser power increasing, the vaporization pressure increases and the surface tension decreases. Namely the driving force for the liquid metal flow to the behind of molten pool increases. So the

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2014-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51275271)

作者简介: 谭向虎(1987—),男,博士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: tanxh10@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 单际国(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光焊接、激光切割和焊接冶金等方面的研究。

E-mail: shanjg@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

appropriate increase of laser power is beneficial for protrusion to grow taller. When the laser power is too high, a large number of spatters will be produced, leading to the protrusion height instable. With the increase of scanning speed, vaporization pressure, surface tension and hydrodynamic pressure will change. There is a competition between driving force and resistance, which leads the protrusion height first to increase and then decrease. With the increase of scanning length, the horizontal component of vaporization pressure and the driving force increase, leading to the increase of protrusion height.

Key words laser technique; high speed laser surf-sculpt; protrusion geometry morphology; process control; autobody sheet steel

OCIS codes 140.3510; 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

高速激光毛化技术是英国焊接研究所(TWI)近年来开发的一种新型激光表面微加工技术^[1]。高速激光毛化有别于传统的激光毛化技术^[2-3],不再使用侧吹辅助气体作为熔池流动的动力源,而是利用高速运动的聚焦激光束快速扫描材料表面产生驱动力,促使熔池金属朝着与激光束移动相反的方向迅速流动,随后在熔池后方发生凝固,多次扫描使熔融金属不断堆积,最终形成明显的表面微凸起^[4-5]。高速激光毛化技术在金属与纤维增强树脂基复合材料的连接、热交换器和超厚涂层等领域有着潜在的应用^[6-9],不同的应用场合对微凸起的几何形貌要求不尽相同,而微凸起的几何形貌与激光毛化工艺参数密切相关,深入了解二者的关系有助于获得精确可控的毛化表面形貌。

目前,针对高速激光毛化工艺参数对微凸起几何形貌影响规律的研究报道并不多,英国焊接研究所的学者在Ti-6Al-4V钛合金、304不锈钢和碳锰钢等金属表面进行了高速激光毛化处理,探讨了影响微凸起高度的主要因素^[4-5,10],分别研究了激光功率、扫描速度、离焦量、扫描长度、保护气体成分、扫描次数以及两次扫描时间间隔等工艺参数对微凸起高度的影响,发现扫描速度、激光功率和扫描长度对微凸起的高度影响最为显著,但是并未解释原因,也没有关注毛化工艺参数对微凸起宽度的影响作用。

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)/钢异质结构激光连接过程中CFRP内部产生缩孔是导致接头强度不够高的主要原因^[11-13],高速激光毛化微凸起可能改变搭接接头处CFRP的凝固过程,因此,对钢表面进行激光毛化处理是抑制缩孔的可能途径。针对激光连接CFRP/钢异质接头的缩孔问题,通过改变高速激光毛化工艺参数获得不同几何尺寸的微凸起,探究了激光功率、扫描速度、扫描长度和扫描次数对微凸起高度和宽度的影响规律;利用高速摄像实时观察高速激光毛化过程,分析了高速激光毛化工艺参数对微凸起几何尺寸的影响机理,为调控毛化表面微凸起的几何形貌提供依据,也为解决CFRP/钢异质结构激光连接过程中CFRP内部产生的缩孔问题提供技术基础。

2 实验方法

高速激光毛化实验采用IPG生产的YLR-2000型光纤激光器,激光波长为1.07 μm ,透镜焦距为200 mm,焦点处光斑直径为0.13 mm,四轴三联动工作台可实现的最大行走速度为24 m/min。激光毛化所用的母材为1.2 mm厚的GMW2汽车钢板,钢板长、宽分别为40 mm和30 mm,其名义化学成分(质量分数,%)为:C 0.006, Mn 0.2, P 0.025, S 0.02, Al 0.015, Ti 0.03, Fe余量。先使用200号砂纸打磨去除表面氧化物,然后丙酮去油,再后用温水和酒精清洗,冷风吹干后毛化。离焦量为0 mm,保护气体是纯度99.99%的氩气,气流量为20 L/min。

图1是高速激光毛化所得到的微凸起的扫描电镜(SEM)典型形貌,微凸起呈上窄下宽的形状,顶端面为金属液滴凝固形成的球面,从微凸起侧面可明显看到因激光多次扫描金属堆积而形成的横向纹理。利用高度计和光学显微镜分别对微凸起的高度和宽度进行测量。采用NAC公司的Memrecam HX-6型高速摄像机对高速激光毛化过程进行视觉检测,采样频率为5000 frame/s,获得不同工艺参数下毛化过程的熔池图像和等离子体喷射图像。

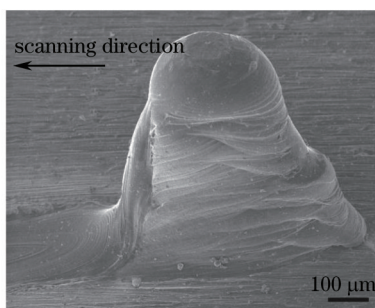


图1 微凸起典型形貌

Fig.1 Typical morphology of protrusion

3 实验结果

固定扫描速度为 24 m/min、单次扫描长度 2 mm 和扫描次数 30 次不变,研究激光功率对微凸起高度和宽度的影响规律。图 2 表明,当激光功率较小(200 W)时,几乎不产生微凸起;随着激光功率的增加,微凸起高度逐渐增加;当激光功率过高(500 W 和 600 W)时,毛化过程不稳定,微凸起高度剧烈波动。由此可见,激光功率对微凸起高度有着显著影响,本实验条件下微凸起高度的最大值为 0.31 mm。当激光功率较小时,微凸起宽度为 0.17 mm,稍大于光斑直径(0.13 mm);随着激光功率的增加,微凸起宽度增大,最大值为 0.33 mm。

在其他条件不变时改变扫描速度,微凸起高度随着扫描速度的增加逐渐增加,在扫描速度为 20 m/min 时微凸起高度达到最大值,扫描速度进一步增加,微凸起高度逐渐减小;微凸起宽度随着扫描速度的增加逐渐减小(图 3)。

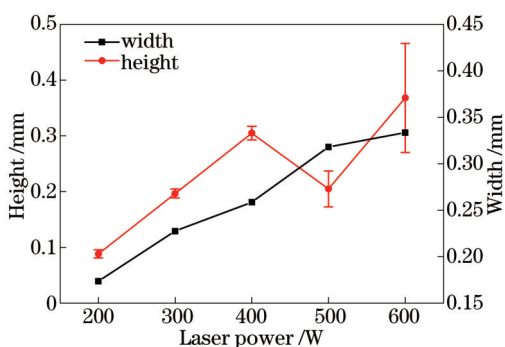


图2 激光功率对微凸起几何形貌的影响

Fig.2 Effect of laser power on geometrical morphology of protrusion

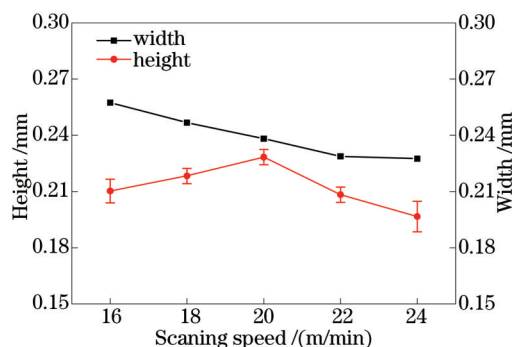


图3 扫描速度对微凸起几何形貌的影响

Fig.3 Effect of scanning speed on geometrical morphology of protrusion

图 4 是微凸起高度和宽度随扫描长度的变化曲线。固定激光功率、扫描速度和扫描次数不变,当扫描长度较小(0.4 mm)时,几乎不产生微凸起,随着扫描长度增加,微凸起高度逐渐增加;而随着扫描长度的增加,

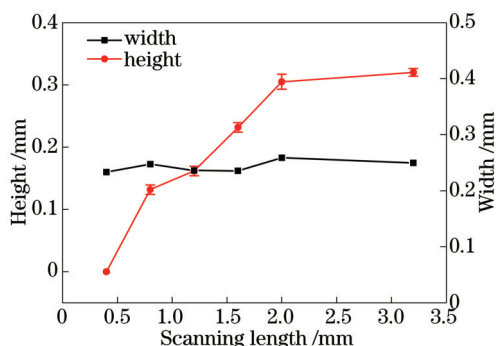


图4 扫描长度对微凸起几何形貌的影响

Fig.4 Effect of scanning length on geometrical morphology of protrusion

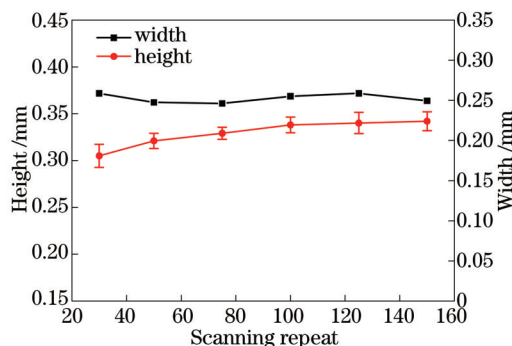


图5 扫描次数对微凸起几何形貌的影响

Fig.5 Effect of scanning repeats on geometrical morphology of protrusion

微凸起宽度在 0.25 mm 附近波动,即扫描长度对微凸起宽度的影响不显著。

图 5 是激光功率为 400 W,扫描速度 V 为 24 m/min,扫描长度为 2 mm 时,不同扫描次数下微凸起高度和宽度的变化曲线。微凸起高度随着扫描次数的增加缓慢增加,最后趋于稳定,微凸起高度最大值为 0.34 mm。随着扫描次数的增加,微凸起宽度基本不变,即扫描次数对微凸起宽度的影响不显著。

4 分析与讨论

与激光深熔焊类似,高速激光毛化过程会产生匙孔。匙孔后沿熔池液态金属同时受到液体静压力 P_g 、辐射压力 P_r 、液体表面张力 P_σ 、液体动压力 P_h 和蒸气压力 P_v 等的^[14]。高速运动的激光束与熔池相互作用会导致流体流动速度呈几何级数增长^[15],液体动压力将成为流体流动的主要驱动力之一,而 P_g 和 P_r 数量级较其他作用力要小的多,可以不予考虑^[14](图 6)。由受力示意图可知,激光束沿扫描速度 V 所示的方向移动, P_h 和 P_v 促使匙孔后沿液态金属向熔池后方流动,有利于微凸起的形成,而 P_σ 阻止液态金属向后流动,阻碍微凸起的形成。

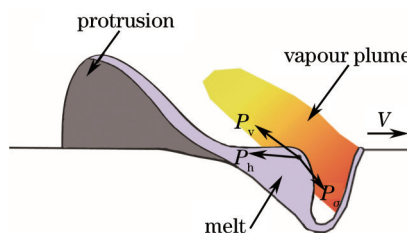


图 6 高速激光毛化匙孔后沿熔池液态金属受力示意图

Fig.6 Force schematic representation of liquid metal behind laser surf-melt key hole

改变激光毛化工艺参数,各个作用力的大小和方向可能发生变化,导致液态金属的流动状态不同,最终形成不同形貌的微凸起。阻力项表面张力 P_σ 的表达式^[14]为

$$P_\sigma = \sigma \left[\frac{1}{r_1(z)} + \frac{1}{r_2(z)} \right], \quad (1)$$

式中 σ 为表面张力系数, z 为匙孔深度和为匙孔半径。表面张力系数是温度的函数,激光功率或扫描速度等工艺参数发生变化将导致熔池温度场改变,从而表面张力随之改变。动力项中液体动压力 P_h 的表达式^[14]为

$$P_h = \frac{\rho_l}{2} [V_{\max}^2(z) - V_{\min}^2(z)], \quad (2)$$

式中 ρ_l 为熔融金属的密度, V_{\max} 和 V_{\min} 分别是匙孔周围流体最大、最小流动速度。激光束高速运动条件下,流体流动速度主要由激光扫描速度决定^[15]。动力项中蒸气压力 P_v 的表达式^[14]为

$$P_v = mn_g u_g^2, \quad (3)$$

式中 m 为金属蒸发量, n_g 为克努森层密度, u_g 为克努森层气体速度。蒸气压力的大小主要由金属蒸发量决定,方向与等离子体喷射方向一致。温度越高,金属蒸发量越大,蒸气压力越大。综上所述,阻力项液体表面张力 P_σ 和动力项蒸气压力 P_v 的大小由熔池温度场决定,动力项液体动压力的大小由扫描速度决定。

首先,分析激光功率对微凸起高度和宽度的影响机理。图 7 是不同激光功率下高速激光毛化熔池图像,固定扫描速度为 24 m/min,扫描长度为 2 mm,扫描次数为 30。可以发现,随着激光功率的增加,熔池宽度逐渐增加,且微凸起的宽度与相同功率下的熔池宽度相当(图 2),这是微凸起宽度随激光功率增加而增加的根本原因。熔池的温度会随着激光功率的增加而升高,导致表面张力减小,蒸气压力增大;液体动压力主要由激光扫描速度决定,不随激光功率变化而改变;激光功率分别为 200、400 和 600 W 时,金属蒸气的喷射方向与水平方向的夹角 α 基本相同,约为 56° (图 8),即激光功率变化时,蒸气压力作用方向基本不变。因此,由各作用力的综合作用效果(图 6)可知,激光功率的增加必然促进微凸起高度的增加;当激光功率过高时,蒸气压力过大,毛化过程产生大量飞溅[图 8(c)],导致微凸起高度非常不稳定(图 2)。

其次,分析扫描速度对微凸起高度和宽度的影响机理。图 9 是不同扫描速度下高速激光毛化熔池图像,固定激光功率为 300 W,扫描长度为 2 mm,扫描次数为 30。对比图 9(a)~(c)可知,随着扫描速度的增加,熔池

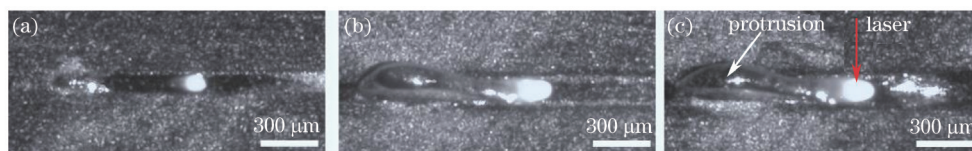


图7 不同激光功率下高速激光毛化熔池图像。(a) 200 W; (b) 400 W; (c) 600 W

Fig.7 Molten pool of laser surf-sculpt under different laser powers. (a) 200 W; (b) 400 W; (c) 600 W

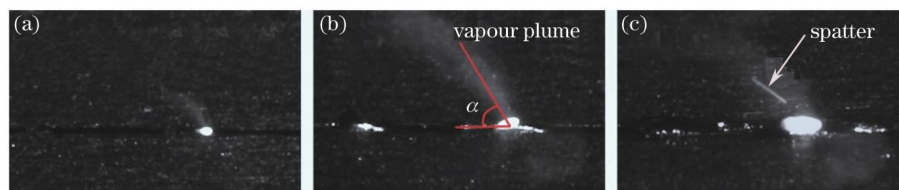


图8 不同激光功率下熔池金属蒸气的喷射角度。(a) 200 W; (b) 400 W; (c) 600 W

Fig.8 Angle between vapour plume and pool surface under different laser powers. (a) 200 W; (b) 400 W; (c) 600 W

宽度逐渐减小,这应该是微凸起宽度也相应减小(图3)的原因。熔池的温度会随着扫描速度的增加而降低,导致表面张力增加,蒸气压力减小;流体流动速度随着扫描速度增加呈几何级数增加,由(2)式可知,液体动压力将增大;此外,扫描速度变化会引起蒸气压力作用方向的改变,扫描速度越大,蒸气压力作用方向与水平方向的夹角 α 越小(图10),蒸气压力的水平分量 $P_v \cos \alpha$ 越大。由图6可知,表面张力增加或蒸气压力减小都不利于微凸起的长高,而液体动压力增加或 α 角减小有利于微凸起的长高。由此可见,随着扫描速度的增加,驱动力和阻力存在竞争关系,所以微凸起高度先增加后减小(图3),其可能的原因是:当扫描速度小于 20 m/min 时,液体动压力的增加和 α 角的减小对微凸起的产生起主导作用,因此导致微凸起高度随扫描速度的增加而增加;当扫描速度大于 20 m/min 时,液体表面张力的增加和蒸气压力的减小对微凸起的产生起主导作用,从而导致微凸起高度随扫描速度的增加而减小。

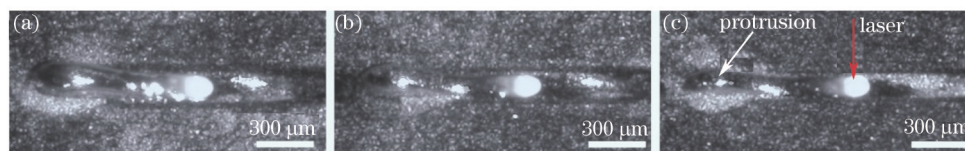


图9 不同扫描速度下高速激光毛化熔池图像。(a) 16 m/min; (b) 20 m/min; (c) 24 m/min

Fig.9 Molten pool of laser surf-sculpt under different scanning speeds. (a) 16 m/min; (b) 20 m/min; (c) 24 m/min



图10 不同扫描速度下熔池金属蒸气的喷射角度。(a) 16 m/min; (b) 20 m/min; (c) 24 m/min

Fig.10 Angle between vapour plume and pool surface under different scanning speeds. (a) 16 m/min; (b) 20 m/min; (c) 24 m/min

再次,分析单次扫描长度对微凸起高度和宽度的影响机理。固定激光功率为 400 W,扫描速度为 24 m/min,扫描次数为 30,由不同扫描长度下高速激光毛化熔池图像(图11)可知,扫描长度的变化对熔池宽度几乎没影响,因此微凸起宽度也不发生变化。激光功率和扫描速度不变,扫描长度的变化不会引起熔池温度场的改变,因此表面张力和蒸气压力的大小不变;如图12所示,当扫描长度为 0.4 mm 时,金属蒸气喷射方向与水平方向的夹角 α 约 90° ,蒸气压力的水平分量几乎为零,其对液态金属沿水平方向流动的作用可以忽略;当扫描长度为 1.6 mm 和 2.4 mm 时,蒸气压力作用方向与水平方向的夹角 α 分别为 64° 和 40° ,蒸气压力的水平分量 $P_v \cos \alpha$ 相应增加。因此,随着扫描长度的增加,液体动压力、液态金属表面张力和蒸气压力的大小不变,蒸气压力作用方向与水平方向的夹角减小,蒸气压力的水平分量增大,导致微凸起高度逐渐增加(图4)。

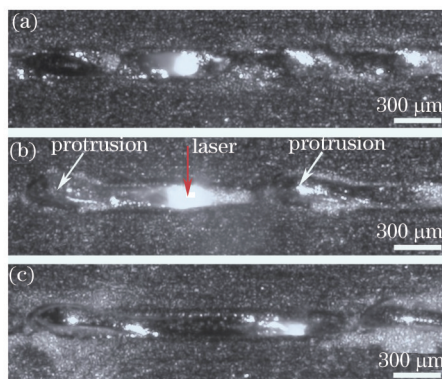


图 11 不同扫描长度下高速激光毛化熔池图像。(a) 0.4 mm; (b) 1.6 mm; (c) 2.4 mm

Fig.11 Molten pool of laser surf-melt under different scanning lengths. (a) 0.4 mm; (b) 1.6 mm; (c) 2.4 mm

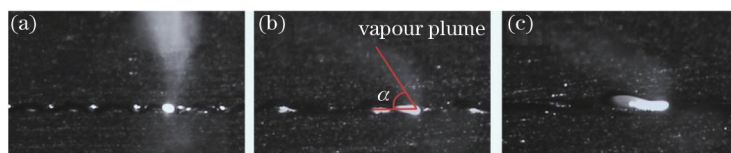


图 12 不同扫描长度下熔池金属蒸气的喷射角度。(a) 0.4 mm; (b) 1.6 mm; (c) 2.4 mm

Fig.12 Angle between vapour plume and pool surface under different scanning lengths. (a) 0.4 mm; (b) 1.6 mm; (c) 2.4 mm

最后,分析扫描次数对微凸起高度和宽度的影响机理。其他工艺参数不变,扫描次数从30次[图7(b)]增加到50次(图13),熔池宽度几乎没有变化,因此微凸起宽度(约为0.25 mm)也未发生变化。对比图8(b)和图14可知,扫描次数分别为30次和50次时,等离子体的喷射角度(约为 56°)也没有改变。由于在高速激光毛化过程中,多次扫描之间都是相互独立的,作用在匙孔后沿液态金属的表面张力、液体动压力和蒸气压力的大小和方向相同。因此,微凸起随着扫描次数的增加而长高,是多次扫描液态金属在钢表面累积的结果;当微凸起堆积到一定高度时,下一次的高速激光扫描,新形成的液态金属在外力作用下向微凸起顶部流动,当运动到一定高度时,动能全部转化为势能和内能,液态金属无法进一步爬升,因而微凸起高度趋于稳定(图5)。

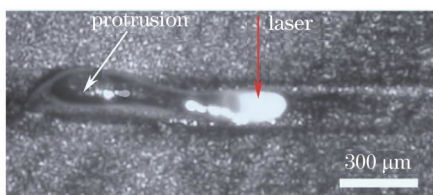


图 13 扫描次数 50 次时高速激光毛化熔池图像

Fig.13 Molten pool of laser surf-melt under scanning repeats of 50

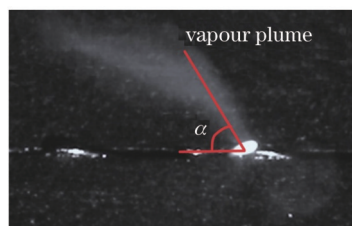


图 14 扫描次数 50 次时熔池金属蒸气的喷射角度

Fig.14 Angle between vapour plume and pool surface under scanning repeats of 50

5 结 论

1) 随着激光功率的升高,微凸起宽度和高度增加;随着扫描速度的增加,微凸起宽度减小,微凸起高度先增加后减小;随着扫描长度或扫描次数的增加,微凸起宽度几乎不发生改变,微凸起高度逐渐增加。

2) 微凸起宽度与熔池宽度相当,增加激光功率或减小扫描速度将导致熔池宽度增加,因而微凸起宽度也增加;而扫描长度和扫描次数不影响熔池的宽度,因此微凸起宽度不受扫描长度和扫描次数的影响。

3) 微凸起高度由蒸气压力、表面张力和液体动压力决定,提高激光功率将导致蒸气压力的增加和表面张力的减小,液态金属向熔池尾部流动的驱动力增大;适当增加激光功率有利于微凸起的长高,激光功率过高将产生大量飞溅,从而导致微凸起高度不稳定。改变扫描速度,蒸气压力、表面张力和液体动压力都将发生变化,驱动力和阻力存在竞争关系,微凸起高度随扫描速度的增加呈现先增加后减小的趋势。扫描长度

增加,蒸气压力水平分量增大,驱动力增加,微凸起高度逐渐增大。

参 考 文 献

- 1 B G I Dance, E J C Kellar, D B G Irvine, *et al.*. Workpiece Structure Modifying Method in Aerospace and Vehicle Manufacturing Industries, Involves Melting Workpiece by Relative Movement of Power Beam, and Displacing Melted Material to Form Projection and Holes at Different Locations[P]. WO2004028731-A1, 2004-04-08.
- 2 Zhou Le, Chen Peifeng, Wang Ying. Study and practice on multi-head laser texturing technology using polygon scanning for beam modulation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 210-215.
周 乐, 陈培锋, 王 英. 多棱镜扫描分光多头激光毛化技术研究与实践[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 210-215.
- 3 Zhang Ruihua, Han Shuai, Liang Haijiao, *et al.*. Study on fiber laser surface texturing technology for the roller[J]. Applied Laser, 2011, 31(6): 451-455.
张瑞华, 韩 帅, 梁海皎, 等. 轧辊表面光纤激光毛化工艺研究[J]. 应用激光, 2011, 31(6): 451-455.
- 4 C Earl, P Hilton, B O'Neill. Parameter influence on surfi-sculpt processing efficiency[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 327-335.
- 5 J Blackburn, P Hilton. Producing surface features with a 200 W Yb-fibre laser and the surfi-sculpt (R) process[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 529-536.
- 6 M Alfano, S Pini, G Chiodo, *et al.*. Surface patterning of metal substrates through low power laser ablation for enhanced adhesive bonding[J]. J Adhesion, 2014, 90(5-6): 384-400.
- 7 E G Baburaj, D Starikov, J Evans, *et al.*. Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification[J]. Int J Adhes Adhes, 2007, 27(4): 268-276.
- 8 P Molitor, T Young. Investigations into the use of excimer laser irradiation as a titanium alloy surface treatment in a metal to composite adhesive bond[J]. Int J Adhes Adhes, 2004, 24(2): 127-134.
- 9 P Hilton, I Jones. A new method of laser beam induced surface modification[J]. The Laser User, 2008, (51): 46-48.
- 10 J Blackburn, P Hilton. Low power laser surfi-sculpt[J]. Rare Metal Mat Eng, 2011, 40(S4): 147-150.
- 11 K W Katayama, Y Jung. Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel[J]. Mater Design, 2013, 47: 179-188.
- 12 Tan Xianghu, Shan Jiguo, Ren Jialie. Effects of Cr plating layer on shear strength and interface bonding characteristics of mild steel/CFRP joint by laser heating[J]. Acta Metal Sin, 2013, 49(6): 751-756.
谭向虎, 单际国, 任家烈. 镀Cr层对低碳钢/CFRP激光连接接头剪切强度及界面结合特征的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(6): 751-756.
- 13 Tan Xianghu, Zhang Jing, Shan Jiguo, *et al.*. The damage characteristics and mechanism of CFRP during laser joining of CFRP/mild steel dissimilar joint[C]. 32th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2013.
- 14 W W Duley. Laser Welding[M]. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1998. 83-97.
- 15 P Berger, H Hugel. Fluid dynamic effects in keyhole welding-an attempt to characterize different regimes[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 216-224.

栏目编辑: 宋梅梅