

激光熔覆熔凝过程等离子体光信号的监测

洪 蕾 胡肇炜 马保亮

(上海海事大学物流工程学院, 上海 201306)

摘要 激光熔覆熔凝过程监测是激光熔覆层质量控制的方法之一。采用基模激光, 以类似预置粉末的方式, 在一定的工艺条件下对 45# 钢样件表面激光熔覆 Ni60, 并采用光电管传感器对此实验条件下熔覆再熔凝过程中产生的等离子体特征信号之一光信号进行检测, 并分析了激光功率、扫描速度与等离子体蓝紫光信号强度的关系以及蓝紫光信号强度与熔覆层质量的关系。实验结果表明, 在此实验条件下光强信号随激光功率增大而增大, 但幅度不大。在激光功率未达到某特定值时, 激光功率不变, 扫描速度增加光强减小; 当激光功率达到或超过此值后, 激光功率一定时光强信号随着扫描速度的增加而增大; 当光强信号处于 $1.7 \sim 2.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 间且波动幅度较小时熔覆层质量好。分析表明当激光功率突破阈值后, 扫描速度增加熔深变浅, 用于材料气化的能量增加, 因此蓝紫光强度增大。

关键词 激光技术; 等离子体; 蓝紫光; 实时监测

中图分类号 TN247; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0203006

Monitoring Plasma Light in Laser Cladding and Melting

Hong Lei Hu Zhaowei Ma Baoliang

(Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract Laser cladding monitoring is one of the cladding layer quality controlling methods. In this paper, one of the characteristic signal of plasma optical signal has been detected by phototube. TEM₀₀ laser has been used in experiments with two scans like powder present cladding. Powder use Ni60 and the base material is 45# steel. The relationship between blue-violet light intensity and laser power scan velocity, as well as the relevance between quality of layer and intensity have been discussed. The results indicate that while laser power grows, the intensity increases just at a low rate, and the intensity decreases as scan velocity increases when the power is lower than a definite value. But when the power is greater than the values, the intensity will rise as velocity increases. The quality of layer is improved greatly when the intensity value ranges from 1.7 to 2.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ with a slight fluctuation. Analysis shows that when the laser power threshold is broken, the scanning speed increases and penetration shallows, and energy for material vaporizing increases, so intensity of blue-violet light grows.

Key words laser technique; plasma; blue-violet light; real-time monitoring

OCIS codes 140.0140; 140.3390; 350.0350; 350.3390

1 引 言

激光熔覆过程监测是熔覆层质量控制的重要方法之一。熔覆工艺参数对熔覆过程的作用最终通过一些过程输出参量, 如熔池的形状和尺寸、熔池温度等体现出来。这些参量将最终决定激光熔覆过程的稳定性和熔覆质量。国内外学者对熔覆过程监测做了很多研究, 如利用熔池的自发光、小目标的特性监测熔覆过程^[1]; 或者利用激光三角测量原理对熔池

附近已熔覆点和未熔覆点的高度差进行实时检测^[2]; 或者集成多传感器对熔覆过程进行监测^[3]; 以及通过红外传感器及 CCD 摄像对激光熔覆过程进行实时检测^[4]; 或者采用 CCD 对熔池表面温度场进行检测^[5]; 或者采用 CCD 摄像机对粉末流温度场进行检测等^[6,7]。本文以观察等离子体拾取其表征信号达到监测激光熔覆过程的目的, 通过实验分析熔覆过程参数对熔覆层质量的影响, 为熔覆实时控制

收稿日期: 2010-05-31; **收到修改稿日期:** 2010-10-25

基金项目: 教育部博士点基金(20093121120001)、上海市自然科学基金(09ZR1421300)、上海市教委科技重点项目(10ZZ99)和上海市曙光计划(09SG47)资助课题。

作者简介: 洪蕾(1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: huzw0731@sina.com

及自动化控制做准备,对建立熔覆理论基础有一定的指导意义。

2 实验设备、材料与方 法

激光熔覆过程中会产生等离子体,表征等离子体特性的参量主要有光信号、声波信号及电位差信号。对等离子体监测的最佳方法是采用光、声、电 3 种传感器多路联合监测。采用光电管传感器对等离子体蓝紫光信号进行了检测。等离子体产生时辐射出的蓝紫光强弱体现了等离子体的强弱。实验采用对蓝紫光敏感的单个光电管检测等离子体光信号,其波长范围为 320~500 nm,中心波长为 420 nm,辐照度范围 $(0.1 \sim 1.999) \times 10^5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,工作温度范围 $(20 \pm 20) \text{ }^\circ\text{C}$ 。

实验采用 SLC-20X30D 数控激光多功能加工机,配备 ROFIN DC 030 激光器(最大输出功率为 3 kW,模式为 TEM₀₀),DPSF-2 型同轴自动送粉器(空气送粉),西门子数控系统和四轴联动数控机床。基体材料为 45# 钢,尺寸为 100 mm × 50 mm × 4 mm。熔覆材料为 Ni60 自熔性合金粉末,粒度尺寸为 45~105 μm。采用 Kugler 积分镜,焦距为 200 mm,光斑尺寸为 1.5 mm × 6 mm。实验采用偏轴采集的方式检测蓝紫光信号如图 1 所示。采用双道扫描工艺,即来回两道扫描,第一道同轴送粉,第二道不送粉,与预置粉末式激光熔覆类似。

3 实验结果

激光熔覆工艺参数包括激光功率、扫描速度、送粉率等,进行了 6 组实验以研究工艺参数与蓝紫光强度的关系。实验工艺参数如表 1 所示,其中送粉率为第一道扫描时的参数,第二道扫描时功率及扫描速度不变,以下讨论均针对第二道扫描过程。

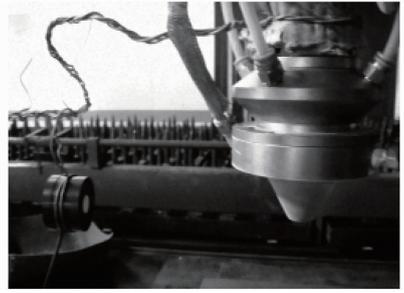


图 1 光信号采集系统示意图

Fig. 1 Light signal acquisition system diagram

表 1 实验工艺参数

Table 1 Process parameters

Number	Power /W	Scanning speed /(mm/s)	Powder feeding rate /(g/min)
1	800~3000	3	17.6
2	800~3000	4	17.6
3	800~3000	5	17.6
4	800~3000	7	17.6
5	800~3000	8	17.6
6	2000	2~13	17.6

3.1 光强信号与工艺参数的关系

实验采用来回两次扫描的方式进行研究,并主要采集了第二道扫描过程中的蓝紫光信号。

为研究激光功率与蓝紫光信号强度的关系,同时为了比较不同工艺参数下的熔覆层质量,扫描长度取一定值 60 mm。图 2 给出了整个采集过程中光强值的变化情况,从图中可以看出各时刻的蓝紫光强度。

改变激光功率从 800 W 增加至 3000 W,其他工艺参数不变,即扫描速度为 3 mm/s,送粉速率为 17.6 g/min。实验结果见图 2,图 2(a)为蓝紫光信号强度时域图,图 2(b)为各个功率下的强度均值及其二次曲线拟合图。

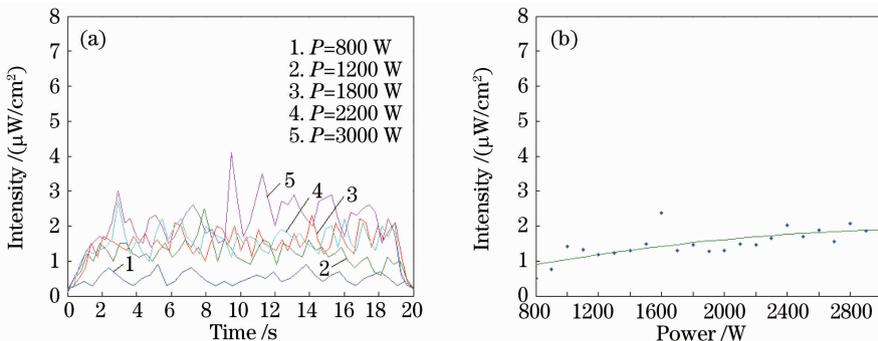


图 2 其他工艺参数不变,功率变化时的光强图

Fig. 2 Intensity at different powers and other parameters constant

从图 2 可以看出,同一功率下不同时间信号强度大小不一,不同功率时信号波动大小也不一样,从均值图可以看出,不改变其他参数时,随着激光功率增加,蓝紫光强度均值有所波动,整体趋势趋于增强但幅度不大。

为研究扫描速度对蓝紫光强度的影响,保持其他工艺参数不变,改变扫描速度,此时蓝紫光强度图表明当功率增加至某一个值后,扫描速度才对蓝紫光强度产生较大的影响。图 3~5 分别是激光功率为 800,1600,3000 W,扫描速度从 4 mm/s 增加至 8 mm/s 时的蓝紫光强度时域图。图 6 是激光功率 2000 W,扫描速度从 2 mm/s 增加至 12 mm/s 时的光信号强度时域图。

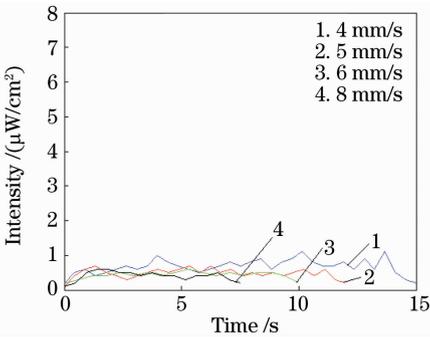


图 3 功率 $P=800$ W 时,不同扫描速度下蓝紫光强度图
Fig. 3 Intensity of blue-violet light at power of 800 W while scanning speed is different

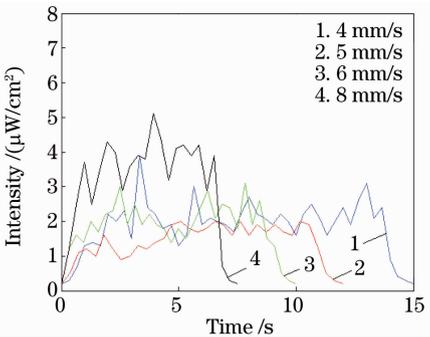


图 4 功率 $P=1600$ W 时,不同扫描速度下蓝紫光强度图

Fig. 4 Intensity of blue-violet light at power of 1600 W while scanning speed is different

从图 3~6 可以看出,功率 800 W 时扫描速度为 8 mm/s 对应的光强信号强度相对 4 mm/s 时较小。功率增加至 1600 W 以后,扫描速度为 8 mm/s 时的光信号强度较 4 mm/s 时的强度明显增大。保持其他工艺参数不变时,改变扫描速度,当功率增加至某一个值 P_0 (1600 W) 后,扫描速度才对蓝紫光

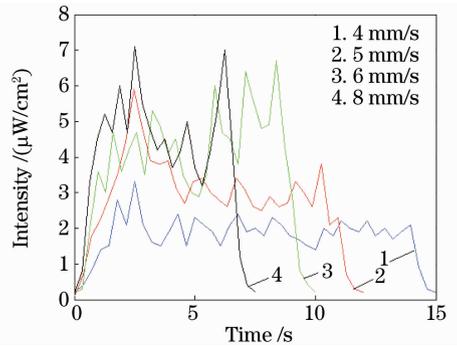


图 5 功率 $P=3000$ W 时,不同扫描速度下蓝紫光强度图

Fig. 5 Intensity of blue-violet light at power of 3000 W while scanning speed is different

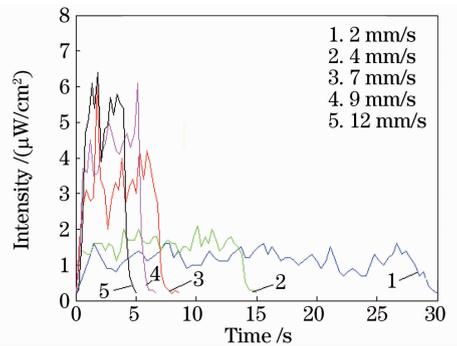


图 6 功率 $P=2000$ W 时,不同扫描速度下蓝紫光强度图

Fig. 6 Intensity of blue-violet light at power of 2000 W while scanning speed is different

强度产生较大的影响。在激光功率达到 P_0 前,随着扫描速度的增加蓝紫光信号减弱但幅度不大;而达到此功率 P_0 以后,扫描速度对信号影响较大,且扫描速度增加信号强度也增加。

3.2 光强信号与熔覆表面质量的关系

实验集中观察了 129 份实验样品熔覆层的表面质量,发现主要问题为熔覆层平整度及熔覆层表面熔化均匀度。

观察熔覆表面质量较好时的检测信号,实验研究发现此时的蓝紫光信号波动较小,在 $1.7 \sim 2.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的强度值区间中波动。信号强度过大和过小时熔覆质量都不理想。

图 7,8 是熔覆层表面质量较好时的蓝紫光信号强度图,图 9,10 为其对应的熔覆层表面质量较好的工件图,其扫描电镜图显示没有宏观裂纹(见图 11)。而信号强度过大或过小时熔覆质量都不理想,如图 12,13 所示。图 14 是熔覆层有裂纹的扫描电镜图(SEM)。

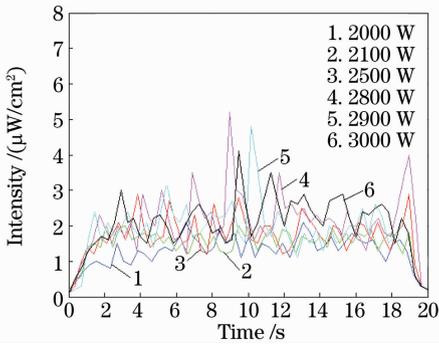


图 7 扫描速度为 3 mm/s, 功率不同时时的光强图
Fig. 7 Intensity at different powers with scanning speed of 3 mm/s

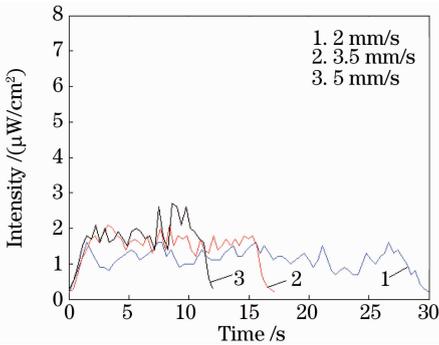


图 8 功率 2000 W, 扫描速度不同时时的光强图
Fig. 8 Intensity of light at different scan speeds while power is 2000 W



图 9 功率为 2700 W, 扫描速度为 2 mm/s 时熔覆层表面图

Fig. 9 Layer when power is 2700 W and scanning speed is 2 mm/s



图 10 功率为 2000 W, 扫描速度为 2 mm/s 时熔覆层表面图

Fig. 10 Layer when power is 2000 W and scanning speed is 2 mm/s

4 分析与讨论

实验中研究的等离子体主要是在第二道扫描过程中产生的, 分析模型是针对第二道扫描过程建立的, 类似于预置粉末式的熔覆模型。第一道激光扫描过后, 粉末已经粘结在基体表面甚至有部分已经与基本冶金结合, 但是也有部分粉末未熔。分析第二道扫描时即如分析预置粉末熔覆过程, 于整个扫

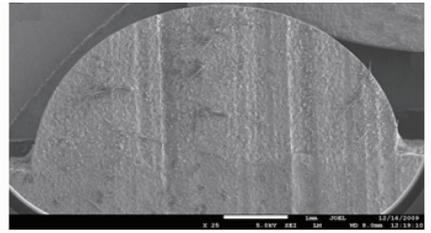


图 11 熔覆层横截面电镜图, $P=2000\text{ W}$, $v_s=2\text{ mm/s}$, 电镜 25 倍

Fig. 11 SEM of layer cross section under 25 magnification when power is 2000 W and scanning speed is 2 mm/s



图 12 功率为 800 W, 扫描速度为 2 mm/s 时熔覆层表面图

Fig. 12 Layer when power is 800 W and scanning speed is 2 mm/s



图 13 功率为 3000 W, 扫描速度为 8 mm/s 时熔覆层表面图

Fig. 13 Layer when power is 3000 W and scanning speed is 8 mm/s

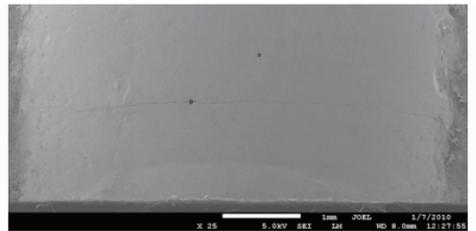


图 14 熔覆层表面电镜图, $P=3000\text{ W}$, $v_s=8\text{ mm/s}$, 电镜 25 倍

Fig. 14 SEM of layer under 25 magnification when power is 3000 W and scanning speed is 8 mm/s

描长度上取一个光斑长度的熔覆粉末(或者说是熔覆层及熔覆粉末的混合物)及其下面的基体作为研究对象。此时首先吸收激光的是熔化后凝固的和少数未熔化的熔覆粉末材料(暂称为混合物), 因此不再考虑粉末对激光的遮蔽及粉末利用率的问题。激光无粉末遮蔽, 直接辐照到工件上后, 首先吸收到激光的混合物迅速再熔化形成熔池, 并发生一系列复杂的过程如熔池传热、熔覆材料或基体材料气化被击穿形成等离子体等。

第一道扫描过后, 熔覆层在短时间内迅速冷却, 温度迅速下降, 因此将温差假设为室温与粉末熔点的差值。

激光熔覆过程中粉末及基体吸收激光能量后熔化及蒸发,形成金属蒸气,随着激光能量的继续增加,蒸气温度迅速升高,发生蒸气电离,当电离达到一定的浓度时等离子体被点燃即形成等离子体。形成等离子体必须要求激光的能量达到一定的点火阈值,点火阈值与气体电子密度密切相关,当局部电子密度达到 10^{14} cm^{-3} 时,相应的点火阈值仅需要 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$,且等离子体形成后在较低的能量密度下就可以保持^[8]。因此,影响等离子体形成的主要是激光能量密度及蒸气的电子浓度。激光熔覆过程中若激光功率一定,即能量密度不变。因此以激光扫描 Δl 长度时金属蒸气量的变化来分析扫描速度对等离子体信号的影响。

熔覆过程中激光扫描 Δl 长度时送粉器送出的粉末质量 m_p 为

$$m_p = \frac{v_g \Delta l}{v_s}, \quad (1)$$

式中 v_g 为送粉率, v_s 为扫描速度。

质量为 m_p 的粉末熔化所需要吸收的能量为^[8]

$$Q_p = m_p c_{Ni} \Delta T_1 + m_p \Delta H_{fNi}, \quad (2)$$

式中 c_{Ni} 为熔覆粉末材料的比热容, ΔT_1 为熔覆粉末熔点与环境温度的差值, ΔH_{fNi} 为熔覆粉末材料的熔化潜热。

表 2 不同功率下的熔池深度和宽度

Table 2 Pool depth and width parameters at different powers

$(h/b) /$ mm	$v_s /$ (mm/s)	P / W									
		1300	1500	1700	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
h	4	0.6	0.8	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	2.3
	8	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
b	4	5.25	5.5	6	6	6.25	6	6	6	6.25	6.5
	8	5.75	6	6.25	6.35	6.25	6.25	6	6.5	6	6

激光扫描 Δl 长度时,激光辐照到工件表面的能量为

$$Q_r = P \eta \Delta l \frac{1}{v_s}, \quad (6)$$

式中 P 为激光功率, η 为粉末材料对激光的吸收率。

激光辐照到工件表面后的能量 Q_r 一部分被粉末材料吸收,用于粉末材料的熔化及气化;另一部分

联立(1),(2)式,激光熔覆过程中粉末熔化所需的能量为

$$Q_p = v_g \Delta l (c_{Ni} \Delta T_1 + \Delta H_{fNi}) \frac{1}{v_s}, \quad (3)$$

从(3)式可见,粉末熔化需要的能量与送粉率、扫描速度、扫描长度有关。

被激光辐照熔化的基体质量 m_b 为

$$m_b = \rho_{45} S \Delta l, \quad (4)$$

式中 S 为熔池横截面积, ρ_{45} 为基体材料密度。

假设基体熔池为圆弧状,熔池深度为 h ,宽度为 b ,则基体熔池横截面面积为 $S = \left(\frac{4h^2 + b^2}{8h} \right)^2 \arcsin \frac{4bh}{4h^2 + b^2} - \frac{(b^2 - 4h^2)b}{16h}$,质量为 m_b 的基体熔化所需能量 Q_b 为^[9]

$$Q_b = m_b c_{45} \Delta T_2 + m_b \Delta H_{f45}, \quad (5)$$

式中 c_{45} 为基体材料的比热容, ΔT_2 为基体材料熔点与环境温度的差值, ΔH_{f45} 为基体材料的熔化潜热。

可见基体熔化需要的能量与熔池的深度 h 和宽度 b 相关。扫描速度增加,激光与材料作用的时间减小,则形成熔池的熔深减小,且熔深的减小对传导到基体材料的能量影响很大。经测量各参数下的熔池深度 h 和熔池宽度 b 如表 2 所示。

传导给基体材料,用于基体材料的熔化甚至气化。用于粉末气化的能量 Q_v 为

$$Q_v = Q_r - Q_p - Q_b. \quad (7)$$

比较 $v_{s1} = 4 \text{ mm/s}$, $v_{s2} = 8 \text{ mm/s}$,功率从 1300 W 增加 3000 W 时用于粉末气化的能量 Q_v 。各工艺参数如表 3 所示。

表 3 材料性能参数

Table 3 Material properties

$v_g / (\text{g/min})$	$\Delta l / \text{mm}$	η	$c_{Ni} / [J / (\text{kg} \cdot \text{K})]$	$c_{45} / [J / (\text{kg} \cdot \text{K})]$	$\Delta T_1 / \text{K}$	$\Delta T_2 / \text{K}$	$\Delta H_{fNi} / (\text{J/g})$	$\Delta H_{f45} / (\text{J/g})$	$\rho_{45} / (\text{kg/m}^3)$
17.6	1.5	0.9	460	718	1007	1500	2480	2500	7840

计算结果(见图 15)表明,随激光功率的增大用于材料气化的能量 Q_v 增加。扫描速度不同,基体熔深变化也不同, Q_b 减小趋势不同, Q_v 的增大趋势

也不同,会在某个功率($P_0 = 1600 \text{ W}$)下相交。激光功率未达到 P_0 时,辐照到材料上的能量较少,形成的熔池较浅,扫描速度对熔深的影响不大,扫描速度

增加,用于气化金属材料的能量减小,金属蒸气量减少,等离子体信号减弱。

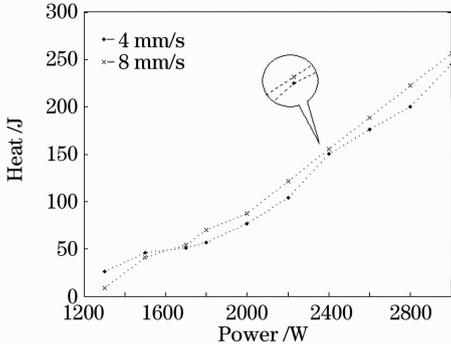


图 15 用于气化的能量 Q_0

Fig. 15 Energy for the gasification

当功率增加到 P_0 以后,辐照到材料上用于形成熔池的能量增加,基体熔池深度明显增加。扫描速度低时熔深随功率变化幅度较大,扫描速度高时熔深随功率变化较小。当功率不变时扫描速度增加,熔深减小, Q_0 减小,用于材料气化的能量增加,金属蒸气量增多,等离子体信号增强。

同理,激光辐照能量小时熔化的熔覆材料和基体材料都少,熔化过程不彻底,被击穿的金属蒸气少,产生的等离子体少,体现为蓝紫光信号小,熔覆层表面熔化不均匀,凹凸不平,熔覆材料与基体的结合不紧密。激光辐照能量增加,击穿的金属蒸气增多,等离子体信号增强,但是等离子体量增多后,等离子体对激光辐射影响增大,如等离子体的屏蔽作用,导致能量的吸收降低,信号波动增大,反映为熔覆层表面不平整,波纹明显。

5 结 论

1) 等离子体蓝紫光信号的强弱与激光功率有关。其他工艺参数不变时,蓝紫光信号强度随着激光功率的增加而增强,但是幅度不是很大。

2) 等离子体蓝紫光信号的强弱与扫描速度密切相关。在某一个功率 P_0 (1600 W) 以下,辐照能量较少,扫描速度对熔深影响不大,熔深较浅,扫描速度增加,用于气化金属材料的能量减小,金属蒸气量减少,表现为蓝紫光等离子体信号强度减弱;但功率

增加到 P_0 后,辐照能量增加,扫描速度对熔深的影响增大,扫描速度增大熔深减小,用于气化金属材料的能量增加,金属蒸气量增加,等离子体蓝紫光信号强度增大。

3) 等离子体蓝紫光信号的数值大小和波动大小一定程度上反映了熔覆层质量的好坏。针对该实验设备,熔覆层质量结果表明蓝紫光信号强度在区间 $1.7 \sim 2.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 中波动且波动幅度不大的情况下,熔覆层表面质量较好,表面平整。

参 考 文 献

- 1 J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition: art to part [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2000, **34**(10): 397~414
- 2 M. L. Griffith, G. Akonorovsky, D. O. Maclallum *et al.*. Direct laser additive fabrication system with image feedback control[P]. United States Patent, 6, 459, 951, 2002
- 3 G. J. Bi, B. Schurmann, A. Gasser *et al.*. Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**: 555~561
- 4 Yu Dong, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Realtime monitoring research for melt pool images in laser cladding process [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 86~90
于 栋, 钟敏霖, 刘文今等. 激光熔覆过程中熔池图像的实时检测[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 86~90
- 5 Lei Jianbo, Yang Xichen, Chen Juan *et al.*. Measurement of surface temperature field distribution in molten pool of laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1605~1608
雷剑波, 杨洗陈, 陈 娟等. 激光熔覆熔池表面温度场分布的检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1605~1608
- 6 Li Li, Yang Xichen, Dong Zhe. CCD measurement of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2431~2437
栗 丽, 杨洗陈, 董 哲. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的 CCD 检测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2431~2437
- 7 Yang Xichen, Li Li, Zhang Ye. Numerical simulation of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3114~3120
杨洗陈, 栗 丽, 张 烨. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的数值模拟[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3114~3120
- 8 Shi Junfeng. Mathematical Modeling for the Behaviors of Laser Induced Plasma during CO₂ Laser Penetration Welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001
史俊锋. CO₂ 激光深熔焊接光致等离子体行为的数值模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2001
- 9 Zhong Sheng, Dai Yongnian. Energy calculation and analysis of evaporation and condensation in a vacuum [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 1997, **22**(2): 39~42
钟 胜, 戴永年. 真空蒸发冷凝蒸发过程的能量计算与分析[J]. *昆明理工大学学报*, 1997, **22**(2): 39~42