

# 镍硅硼合金粉末激光熔覆中熔池光谱检测分析

顾振杰 雷剑波 张传鹏 王云山

(天津工业大学理学院激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 为了研究激光熔覆过程中激光熔池的光谱辐射特性,采用光栅光谱检测技术检测镍硅硼合金粉末熔覆过程中熔池光谱,得到不同功率、速度及时间下的光谱分布。结果表明:激光功率 900 W 时波长 550 nm 处熔池光谱相对强度最高为 500,功率增加到 1000 W 时,光谱相对强度增加为 600;激光功率保持不变时,光谱辐射相对强度随扫描速度增加而减小,随熔覆过程时间增加而增加,但在 15 s 后,基本达到稳定状态。激光熔覆过程中熔池光谱波动与熔覆层质量存在一定的关系,试验中发现,功率为 900 W,扫描速度 2 mm/s 时,熔覆层质量较好,试样基体变形较小,熔池光谱相对强度波动也较小。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;粉末;光谱;检测

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1103009

## Detection and Analysis of Spectrum Distribution of Laser Molten Pool in Nickel Silicon Boron Alloy Powder Laser Cladding

Gu Zhenjie Lei Jianbo Zhang Chuanpeng Wang Yunshan

(Laser Engineering Center, School of Science, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** In order to study the spectral radiation characteristics of laser molten pool in laser cladding, grating spectrum detection technology is used to detect the spectrum of molten pool in nickel silicon boron alloy powder laser cladding, spectral distributions in different powers, speed and time are obtained. It is shown that at the wavelength of 550 nm spectrum relative strength is 500 when power is 900 W, and it increases to 600 when power becomes 1000 W, keeping power constant, spectral radiation intensity decreases when scanning speed increases but increases with time and achieves the stable state after 15 s. There is a certain relationship between the quality of laser cladding layers and spectrum fluctuation of molten pool. The results show that when power is 900 W and scanning speed is 2 mm/s, the quality of laser cladding layers is better, the body has small deformation, and the fluctuations spectrum relative strength of the molten pool is relatively little.

**Key words** laser technology; laser cladding; powder; spectrum; detection

**OCIS codes** 140.3510; 140.7215; 350.2770

## 1 引 言

基于激光熔覆的增材制造(也称 3D 打印)过程中,金属熔池存在着强烈的对流、传热、传质等现象,影响了激光增材制造的质量,已成为国内外研究热点<sup>[1-3]</sup>。孙道金等<sup>[4]</sup>对纯镍同轴送粉激光熔覆中温

度场与熔池底部微观组织生长进行二维耦合模拟计算,得到熔池底部微观组织生长方向平行于热流方向;孟庆武等<sup>[5]</sup>在激光熔覆涂层过程中,对激光能量问题以及动态熔池的对流变化和温度场分布进行了分析;Kovalev 等<sup>[6-7]</sup>通过对熔池光热辐射研究,建

收稿日期:2014-04-28;收到修改稿日期:2014-05-30

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1333121)、天津市应用基础及前沿技术研究报告(12JJCQNJC02800)、天津市科技支撑重大专项(13ZCZDGX01109)

作者简介:顾振杰(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光制造应用及过程检测等方面的研究。

E-mail: gzjtgd@163.com

导师简介:雷剑波(1981—),男,副教授,主要从事激光制造理论及其应用等方面的研究。

E-mail: ljbtj@163.com(通信联系人)

立了激光熔池模型来分析其对流、传热等现象；王霄等<sup>[8]</sup>研究了在对硅与玻璃进行激光透射连接实验中，不同工艺参数对熔池几何要素的单因素及交互式影响；赵海玲<sup>[9]</sup>利用有限体积法及 FLUENT 软件对移动热源作用下，激光熔覆熔池温度场进行数值模拟；陈静等<sup>[10]</sup>结合熔池内粉末颗粒熔化时间及熔池固液界面运动分析，揭示了混合元素法激光立体成形熔覆层内未熔粉末成形机理；雷剑波等<sup>[11-12]</sup>采用 CCD 技术，得到两种不同工艺参数下熔池形貌、尺寸和温度场分布；谭华等<sup>[13-14]</sup>采用高速摄影技术对熔池形成及演化进行观察，发现与激光熔凝准稳态熔池相比，以恒定送粉率送粉激光熔覆中熔池长度和宽度减小，熔池寿命也缩短；李媛媛<sup>[15]</sup>研究了表征激光熔覆熔池自由表面的平衡方程，得出

表 1 45 钢成分及质量分数

Table 1 Compositions and mass fractions of 45 steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
Mass fraction	0.42%~0.50%	0.17%~0.37%	0.50%~0.80%	≤0.040%	≤0.04%	98.54%

表 2 粉末材料成分及质量分数

Table 2 Dusty material compositions and mass fractions

Element	B	C	Fe	Si	Ni
Mass fraction	1.00%~2.00%	0.20%	8.00%	2.20%~3.20%	86.6%~88.6%

## 2.2 实验方法

在熔覆实验时采用 NCLT CW-1 kW 固体 Nd:YAG 激光器，功率为 700~1000 W、FANUC R-2000iB/125L 型机器人及送粉器。送粉方式为同轴送粉，送粉器的转速与送粉量的关系如表 3 所示。

表 3 送粉器转速与送粉量之间关系

Table 3 Relationship between feeding amount and feeding machine speed

Speed /(r/min)	10	20	30	40
Power amount /mg	350	800	1400	2200

采用光栅光谱仪检测激光熔池光谱辐射相对强度，选取 532~552 nm 波长范围，以相对光强度最

大值与最小值之差，作为衡量熔池光谱相对强度波动大小的依据。基于已有实验测试数据，熔覆合金层表面越光滑、均匀、平整，熔覆道边缘的热影响区及熔融越少，熔覆层质量往往越好，检测对比较好熔覆质量时的光谱辐射相对强度波动值，作为判断激光熔覆质量依据。

金属熔池的光热辐射中包含大量反应熔池特性的信息，对其开展深入研究对激光熔覆技术的发展具有重要意义<sup>[16-17]</sup>。本文采用光栅光谱仪检测镍硅合金粉末激光熔覆中熔池光热辐射，得到不同工艺参数下熔池光谱，为 3D 打印技术材料选择及工艺优化提供实验依据。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

用于激光熔覆基体材料选用的是 45 钢，基体尺寸为 100 mm×160 mm×2.5 mm；粉末材料选用的是 Stellite Ni25 合金，它们的化学成分分别如表 1、表 2 所示。

用于检测熔池光谱的光栅光谱仪主要由 CCD、光电倍增管、1200 line/mm 光栅、准直镜和聚焦镜等组成。如图 1(a)所示，激光束经光纤传输及光学工作头会聚成形后，辐照在熔覆层表面形成熔池，熔池辐射光谱由透镜 1 采集由透镜 2 耦合进光纤，并

用于检测熔池光谱的光栅光谱仪主要由 CCD、光电倍增管、1200 line/mm 光栅、准直镜和聚焦镜等组成。如图 1(a)所示，激光束经光纤传输及光学工作头会聚成形后，辐照在熔覆层表面形成熔池，熔池辐射光谱由透镜 1 采集由透镜 2 耦合进光纤，并

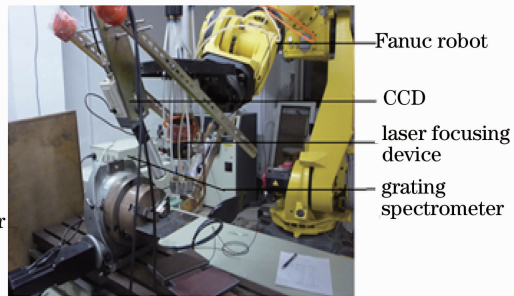
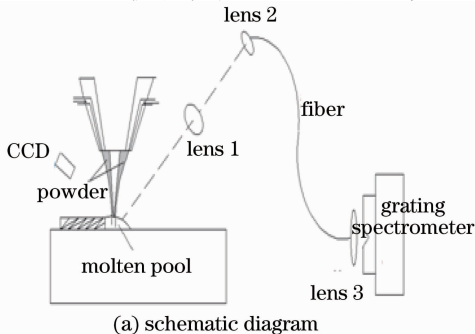


图 1 激光熔池光谱检测系统图

Fig. 1 Spectrum detection system of laser molten pool

经准直透镜 3 变换成平行光投射进光谱仪,从而实现熔池光谱检测。透镜 1 为凸透镜,与熔池距离 60 mm,通光孔径为 31 mm、厚度为 7 mm、焦距为 40 mm;透镜 2 是双胶合消色差透镜,由低折射率的正透镜和高折射率的负透镜组成,能较好地校正球差、慧差和色差,通光孔径为 10 mm。图 1(b)为实验现场图,采用侧向方式检测熔池光谱信号,光纤的接收透镜组合固定在激光加工头上,透镜组的光轴与激光夹角约为 25°,激光聚焦镜焦距为 200 mm。

### 3 结果与分析

#### 3.1 光谱检测系统标定

光谱仪是精密光学仪器,具有高精度度和高分辨率特性,系统参数的变化和环境温度的变化都将导致波长的漂移,使波长出现判读误差<sup>[18-19]</sup>;此外,长期使用过程中,步进电机控制的丝杆位置由于各种原因也会发生变化,因此在使用光谱仪之前需要对其进行标定。波长标定的目的在于确认光谱仪器的色散曲线,为光谱的测量提供波长标准。

标定原理是以发光光源的已知谱线为基准对波长进行修订,试验中通过低压汞灯特征波长的检测来实现波长的校正,其主要辐射谱线如图 2 所示。在可见光波段,利用汞灯的 5 根已知光谱线(标准值为 407.78、435.84、546.07、576.96、579.07 nm)进行仪器校准。

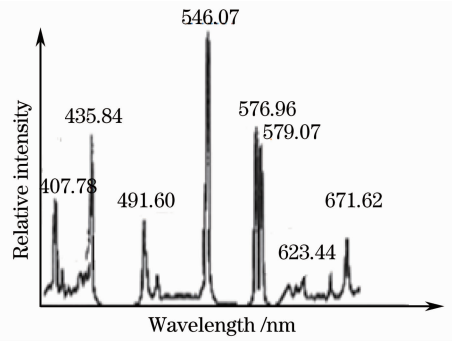


图 2 汞灯主要谱线

Fig. 2 Mercury lamp main spectra

标定实验装置如图 3 所示,完成汞灯预热后,将中心波长调节至 560 nm,调整积分时间,使 CCD 能检测到标准光源的一级谱线,同时记录光谱峰值处波长所对应的 CCD 像素位置。重复这一过程,得到的数据整理如表 4 所示,表中  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  分别为汞灯光谱标准值 546.07、576.96、579.07 nm。

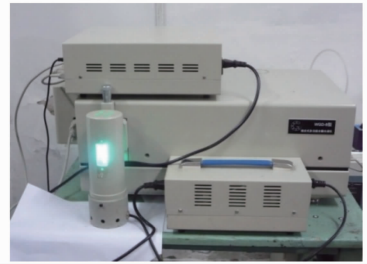


图 3 标定实验装置图

Fig. 3 Calibration experiment device

表 4 标准波长与像素对应关系

Table 4 Corresponding relationship between standard wavelengths and pixels

Standard wavelength /nm	Real pixel /pixel					
	First	Second	Third	Fourth	Fifth	Sixth
$\lambda_1$ 546.07	190	189	190	190	190	189.8
$\lambda_2$ 576.96	1716	1716	1716	1716	1716	1716
$\lambda_3$ 579.07	1820	1820	1821	1820	1820	1820.2

假设入射角不变,则光栅的角色散率公式为

$$d\theta/d\lambda = m/(d \cos \theta), \quad (1)$$

式中  $\theta$  为衍射角,  $m$  为衍射级数,  $d$  为光栅常数,当衍射角变化很小时,角色散率为常数,与波长无关,

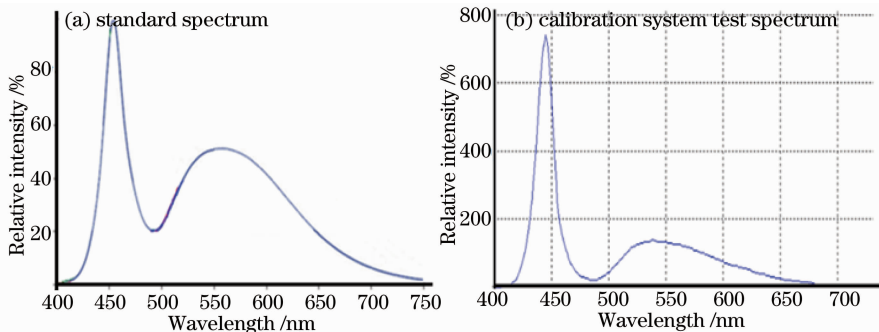


图 4 白色 LED 光谱曲线

Fig. 4 White LED spectral curves

即衍射角的变化与波长的变化成线性关系。采用最小二乘法对标准光源特征峰向像素位置与波长间关系进行多项式拟合,得到多项式系数,对波长进行校正,实现光谱系统的标定。

为验证标定结果的准确性,采用标定后的光谱检测系统检测白色 LED 光谱,并与其标准光谱曲线进行比较。结果如图 4 所示,其中(a)为标准光谱, (b)为标定后系统检测光谱。

### 3.2 不同时刻同轴送粉激光熔覆

图 5 表示激光功率为 900 W、扫描速度为

2 mm/s,不同时刻  $t$  时激光熔覆过程中熔池光谱相对强度曲线及其波动。图 5(a)为 0.25 s 时熔池光谱曲线,此时光谱强度很弱,只有 100 左右;图 5(b)为 3 s 时熔池光谱曲线,光谱辐射强度有所增加,达到 270 左右;图 5(c)为 5 s 时熔池的光谱曲线,光谱强度相比较之前时刻有所增加但依然不大,波长 534 nm 处最大相对光强度为 348,波长 538 nm 处最小相对光强度为 255,相对光强度波动为 93;图 5(d)为 10s 时光谱曲线,此时最大相对光强度为 380 (位于波长 534 nm 处),最小相对光强度为 290(位

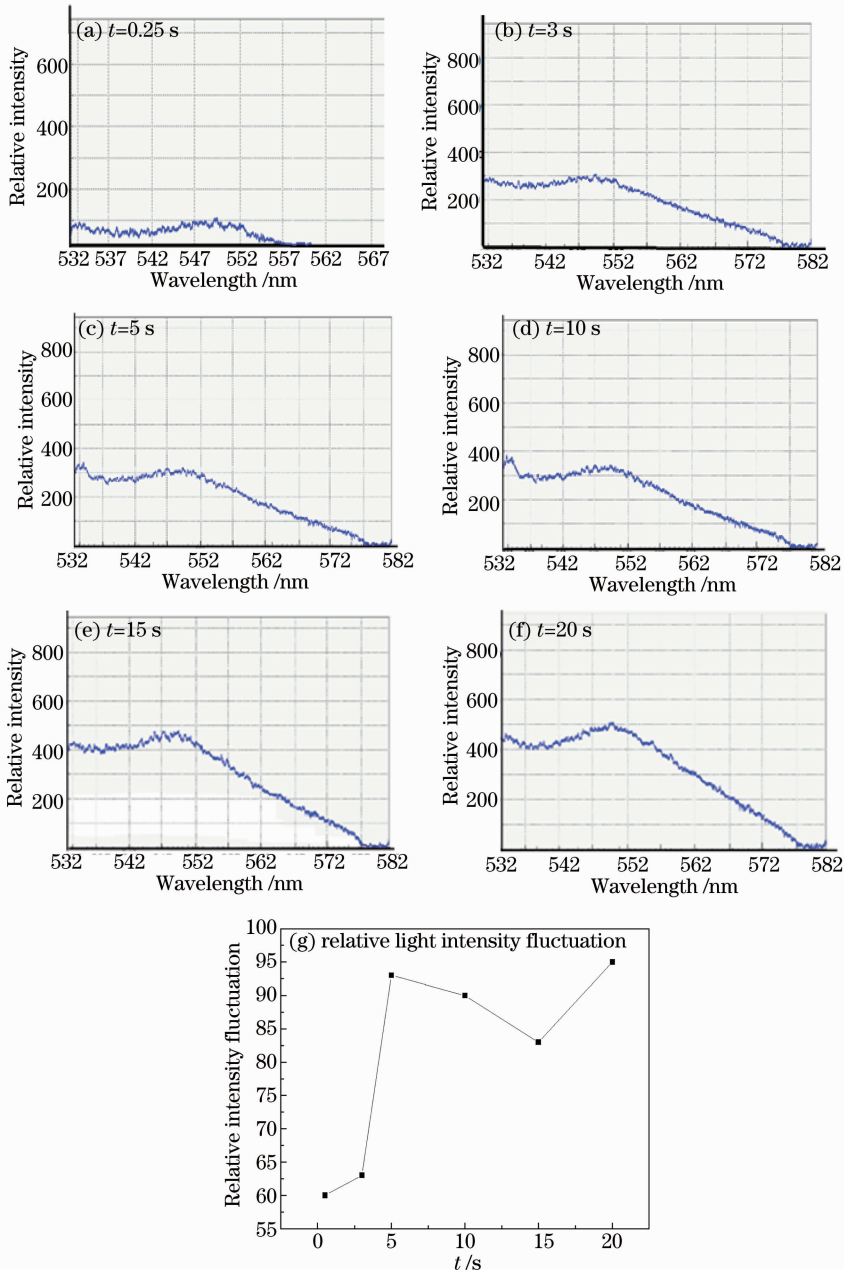


图 5 不同时刻熔池光谱曲线及相对光强度波动

Fig. 5 Different time molten pool spectral curves and relative light intensity fluctuations

于波长 538 nm 处), 相对光强度波动为 90, 光谱曲线波动减小, 熔覆过程开始达到准稳定状态; 图 5 (e)、(f) 分别为 15 s、20 s 光谱曲线, 可以看出, 最大相对光强度为 478(位于波长 550 nm 处), 最小相对光强度为 395(位于波长 538 nm 处), 相对光强度波动为 83, 进一步减小, 而且走势基本一致, 说明此时熔覆过程达到准稳定状态。

由图 5(a)~(f) 可以看出可以看出, 随着熔覆时间的增加, 熔池光谱曲线强度增加, 15 s 之后, 光谱相对强度曲线变化不明显, 基本达到稳定状态。图 5 (g) 表示不同时刻熔池相对光强度波动, 从图中可以看出, 刚开始熔池相对光强度波动很小, 3~5 s 内波动急剧增加, 5 s 以后波动开始下降, 15 s 达到最低值, 之后又开始上升。

### 3.3 不同功率同轴送粉激光熔覆

实验中采用的固体激光器最大功率为 1000 W, 激光扫描速度为 1 mm/s, 送粉量为 20 r/min。在激光熔覆中, 激光功率  $P$  过低时, 熔覆层与基体不易

形成良好的冶金结合, 并且熔池在检测波段辐射较弱, 无法检测。因此试验中只对激光功率为 1000、950、900 W 时的激光熔覆进行光谱检测。

图 6 表示激光熔覆 15 s 时, 不同功率激光熔池光谱相对强度曲线及其波动, 从图中可以看出, 当激光功率为 900 W 时, 波长 550 nm 处最大相对光强度为 500, 波长 538 nm 处最小相对光强度为 385, 相对光强度波动为 115; 而当功率增加至 1000 W 时, 熔池的辐射强度也增加, 最大相对光强度为 600(位于波长 550 nm 处), 最小相对光强度为 469(位于波长 538 nm 处), 此时相对光强度波动为 131。但整体而言, 它们相对光强度为 385~600, 光谱辐射强度很小, 这是因为粉末流在到达熔池之前先与激光束作用, 粉末流对激光产生一定的屏蔽效果, 吸收激光能量提高温度, 从而降低了到达熔池的激光能量。图 6(d) 表示不同功率熔覆时熔池相对光强度波动, 从图中可以看出, 随激光功率的增加, 熔池相对光强度波动也增加。

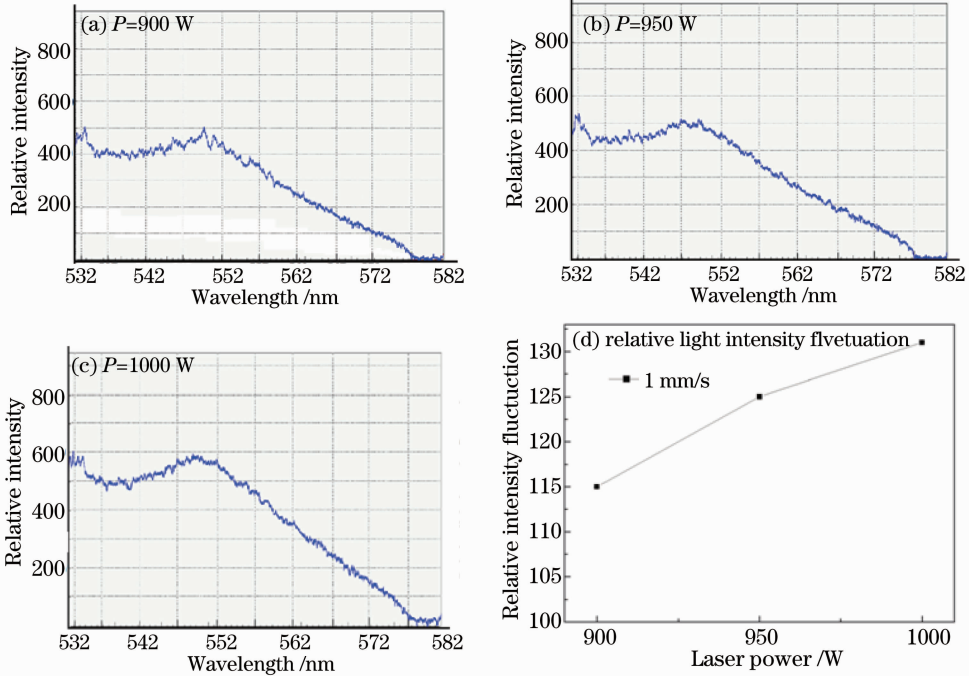


图 6 不同功率激光熔覆熔池光谱曲线及相对光强度波动

Fig. 6 Different power laser cladding pool spectral curves and relative light intensity fluctuations

### 3.4 不同速度同轴送粉激光熔覆

图 7(a)、(b) 为激光功率为 900 W 时, 不同扫描速度  $V_s$  的激光熔池光谱曲线, 结合图 6(a) 所示, 可以看出, 当激光功率保持不变, 随着扫描速度的增加, 光谱曲线平均光强度变小。激光功率 900 W、扫描速度 2 mm/s 时, 波长 550 nm 处最大相对光强度为 478, 波长 538 nm 处最小相对光强度为 395, 相对

光强度波动为 83; 当扫描速度增加至 3 mm/s 时, 最大相对光强度为 385(位于波长 550 nm 处), 最小相对光强度为 469(位于波长 538 nm 处), 其相对光强度波动为 87。

图 7(c)、(d) 是激光功率 1000 W 时, 不同扫描速度  $V_s$  的激光熔池光谱线。当扫描速度为 2 mm/s 时, 光谱最大相对光强度为 570(位于波长 550 nm

处),最小相对光强度为 443(位于波长 538 nm 处),相对光强度波动为 127;而当扫描速度增加到 3 mm/s时,最大相对光强度则减小为 512(位于波长 550 nm 处),最小相对光强度 398(位于波长 538 nm处),则其相对光强度波动为 114。从图 7 (a)~(d)可以看出,随着扫描速度的增加,激光能量注入减少,金属熔池辐射的能量也减少;熔池光谱相对强度最大值与最小值均在 550 nm 与538 nm附近

处取得。图 7(e)表示不同功率及扫描速度熔池相对光强度波动,从图中可以看出,相同扫描速度下,功率 1000 W 时相对光强度波动比功率为 900 W 时大;功率为 1000 W 时,相对光强度波动随扫描速度增加而减小;功率 900 W 时,相对光强度波动随扫描速度增加而增大;功率 900 W、扫描速度 2 mm/s 时,相对光强度波动 83 为最小。

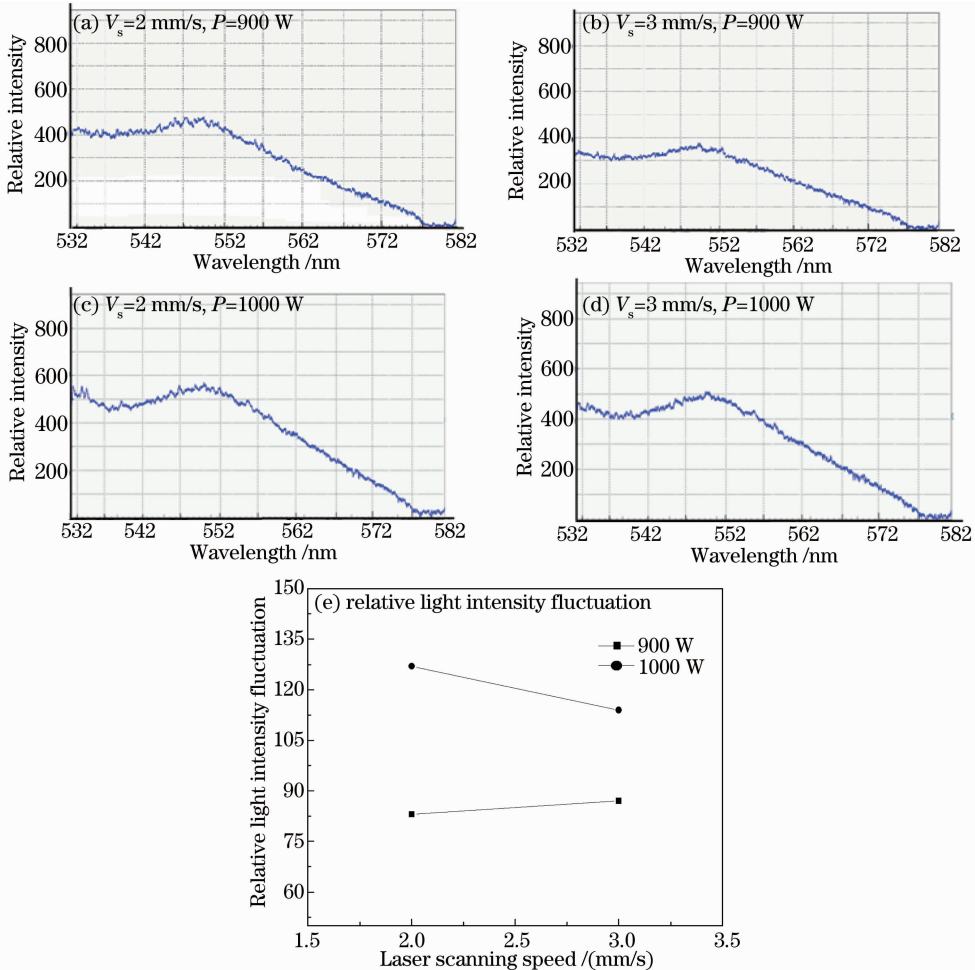


图 7 不同功率、不同扫描速度激光熔覆熔池光谱曲线及相对光强度波动

Fig. 7 Different power and speed molten pool spectral curves and relative light intensity fluctuations

### 3.5 不同功率及扫描速度下激光熔覆形貌

图 8(a)、(b)分别表示送粉量(20 r/min)保持不变的条件下激光功率为 900 W 及 1000 W 时不同扫描速度下激光熔覆形貌。从图 8 中可以看出,扫描速度为 1mm/s 时,熔覆层边缘分布着大量球状颗粒,且熔覆道中心层较厚,这是因为扫描速度为 1 mm/s时,虽然激光能量注入增加,但相同时间内粉末输入量也增加,导致边缘出现不完全熔化,粘接在基体表面,激光光斑中心熔覆层较厚;当扫描速度为 2 mm/s 时,球状颗粒明显减少,熔覆层平整厚度

均匀;而当扫描速度为 3 mm/s 时,熔覆道边缘也存在较多球状颗粒,可能由于激光注入能量较少,形成的球状颗粒未与基体粘接,经表面清理后,未在图中显示,同时熔覆层厚度较薄。

在激光功率、送粉量不变时,随着速度的变化,熔覆层表面质量出现比较明显变化。激光功率为 900 W、速度为 2 mm/s 时,送粉量、激光功率和运动速度形成了比较好的匹配,表面质量比较好,且基体未出现明显变形,且熔覆过程中熔池光谱相对强度波动较小;而在功率 1000 W、速度为 2 mm/s

时,表面质量虽然提升,但零件变形较严重。随着熔覆工艺参数的变化,激光熔覆中熔池的光热辐射分布也呈现较大的区别,可通过选择工艺参数较好时熔池的光谱分布对激光熔覆过程进行监测。

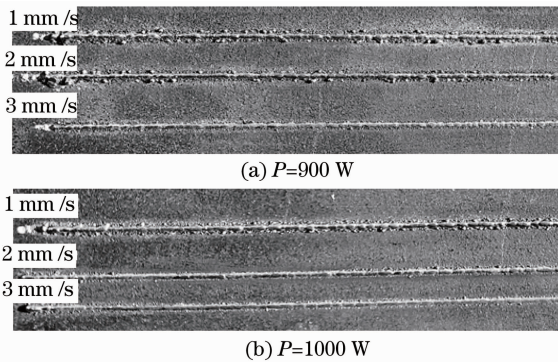


图 8 不同功率激光熔覆形貌

Fig. 8 Different power laser cladding morphologies

## 4 结 论

1) 建立了一套激光熔池光谱检测系统,系统由传像光纤、光学采集单元及光栅光谱仪等组成,采用汞灯对系统进行了标定。实时检测了运动状态下激光熔覆熔池光谱强度,得到不同功率、速度及时间下熔池的光谱相对强度辐射曲线。

2) 当激光功率为 900 W,扫描速度 2 mm/s 时,熔覆质量较好,熔池光谱辐射相对光强度波动较小,试样基体变形也较小;熔池光谱辐射强度随熔覆过程时间增加而增加,在 15 s 左右时达到准稳定状态,光谱辐射相对强度波动比较稳定。

3) 在熔覆过程中通过检测激光熔池光谱辐射相对强度波动,选择合适的激光功率、熔覆速度、送粉量等,可实现对激光熔覆过程的实时监控。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Tianzhu. Development of Three Dimensional Printing System Using Piezoelectric Inkjet Technology and Its Experimental Study [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. 1-11.  
朱天柱. 压电式喷射三维打印成型系统开发与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. 1-11.
- 2 Scalfani, V F Josh Sahib. A model for managing 3D printing services in academic libraries[J]. Issues in Science & Technology Librarianship, 2013, 72: 1-8.
- 3 Feifei Yan, Yuanyuan Liu, Haying Chen, *et al.*. A multi-scale controlled tissue engineering scaffold prepared by 3D printing and NFES technology[J]. AIP Advances, 2014, 4(3): 031321.
- 4 Sun Daojin, Liu Jichang, Li Qindong. Phase-field method simulation of microstructure evolution at the bottom of melt pool in coaxial laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403005.  
孙道金, 刘继常, 李钦栋. 激光熔覆纯镍熔池底部组织生长的相

- 场法模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403005.
- 5 Meng Qingwu, Geng Lin, Zhu Wenhui, *et al.*. Exothermic reaction pool state analysis in the process of laser cladding[J]. Applied Laser, 2009, 29(4): 282-285.  
孟庆武, 耿林, 祝文卉, 等. 反应放热激光熔覆过程中的熔池状态分析[J]. 应用激光, 2009, 29(4): 282-285.
- 6 O B Kovalev, A M Gurin. Multivortex convection of metal in molten pool with dispersed impurity induced by laser radiation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 68: 269-277.
- 7 D Beckmann, D Schnitzler, D Schaefer, *et al.*. Beam shaping of laser diode radiation by waveguides with arbitrary cladding geometry written with fs-laser radiation[J]. Optics Express, 2011, 19(25): 25418-25425.
- 8 Wang Xiao, Xue Guochun, Li Pin, *et al.*. Investigation on melt pool in transmission laser bonding of silicon and grass[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603007.  
王霄, 薛国春, 李品, 等. 激光透射连接硅与玻璃熔池研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603007.
- 9 Zhao Hailing. Numerical Simulation of Temperature Field and Flow Field during Laser Cladding of Molten Pool [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013. 19-40.  
赵海玲. 激光熔覆熔池温度场和流场的数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013. 19-40.
- 10 Chen Jing, Zhang Fengying, Tan Hua, *et al.*. Alloying mechanics in moving melt pool during laser solid forming from blended elemental powders[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2154-2159.  
陈静, 张凤英, 谭华, 等. 激光多层熔覆沉积预混合 Ti-xAl-yV 合金粉末在熔池中的熔化与偏析行为[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2154-2159.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Tan Hua, Chen Jing, Huang Weidong, *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 442-446.  
谭华, 陈静, 黄卫东, 等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 442-446.
- 14 Tan Hua, Zhang Fengying, Huang Weidong, *et al.*. Numerical simulation of powder feed of laser solid forming[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003003.  
谭华, 张凤英, 黄卫东, 等. 激光立体成形粉末流输送的数值模拟研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003003.
- 15 Li Yuanyuan. Effect of Gas-Powder Flow on Molten Pool Morphology for Coaxial Powder-Feed Laser Cladding [D]. Changsha: Hunan University, 2012. 16-22.  
李媛媛. 同轴送粉式激光熔覆气体-粉末流对熔池形貌的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012. 16-22.
- 16 Hu Xiaodong, Yu Chengsong, Yao Jianhua. Review of laser cladding molten pool temperature measurement and control system[J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2013, 50(12): 120003.  
胡晓冬, 于成松, 姚建华. 激光熔覆熔池温度监测与控制系统的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 120003.
- 17 Hong Lei, Hu Zhaowei, Ma Baoliang. Monitoring plasma light in laser cladding and melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0203006.

- 洪 蕾, 胡肇炜, 马保亮. 激光熔覆熔凝过程等离子体光信号的监测[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0203006.
- 18 Xin Chengyun, Cheng Xiaofang, Zhang Zhongzheng. Radiation temperature measurement method based on spectral response scaling[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(10): 2735-2738.
- 辛成运, 程晓舫, 张忠政. 基于光谱响应定标的辐射测温方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2735-2738.
- 19 Xiaohui Li, Benjamin W Smith, Nicolò Omenetto, *et al.*. Relative spectral response calibration of a spectrometer system for laser induced breakdown spectroscopy using the argon branching ratio method[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2014, 29(4): 657-664.

栏目编辑: 史 敏