

文章编号: 0258-7025(2008)10-1605-04

# 激光熔覆熔池表面温度场分布的检测

雷剑波 杨洗陈 陈娟 王云山

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 采用电荷耦合器件(CCD)高温检测技术,检测了送粉同步式和预置式两种不同工艺下 Ni 基合金激光熔覆熔池,得到了其在不同功率下的熔池形貌、尺寸和温度场分布。结果表明,当激光功率低于 1100 W 时,合金粉末熔化不均匀,熔池形貌不规则;当激光功率达到 1300 W 时,熔池形貌近似椭圆形分布,比较规则平滑,  $x, y$  方向尺寸分别为 2.8 mm, 2.7 mm, 平均温度为 1800 K, 其形貌和尺寸趋于稳定;当激光功率继续增加时,熔池形貌基本不变,但平均温度增加,由于高温热传导熔化,熔池尺寸会有少量增加。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;温度;检测;CCD

**中图分类号** TN 249;TG 156.99

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20083510.1605

## Measurement of Surface Temperature Field Distribution in Molten Pool of Laser Cladding

Lei Jianbo Yang Xichen Chen Juan Wang Yunshan

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** Based on charge-coupled device (CCD) technique for high temperature measurement, laser molten pool in laser cladding for Ni-base alloy powder was measured. Laser cladding experiments of powder feeding method and pre-fabricated powder method were carried out. Shape, size and temperature field distribution of laser molten pool were measured. It is shown that metal powder melt in part with rough molten pool shape when laser power was low than 1100 W. At 1300 W, the  $x, y$  dimensions of laser molten pool were 2.8 mm, 2.7 mm respectively with approximately ellipse shape, the average temperature was 1800 K. Its average temperature increased with small increase of shape dimension when laser power increased. Laser cladding parameters were optimized by the measurement results.

**Key words** laser technique; laser cladding; temperature; measurement; CCD

## 1 引言

激光熔覆作为激光制造、激光再制造、激光修复等的基础技术,已广泛用于金属零件制造、涡轮机与大型模具等精密贵重零件的表面强化和高精度修复,但许多基础问题尚待深入研究<sup>[1~8]</sup>。激光熔覆中,熔池内存在强烈的能量、动量和质量传输过程,产生传热、对流和传质等现象,其温度场分布强烈影响能量、动量和质量传输过程,直接影响激光熔覆的冶金性能和表面质量。激光熔池温度场检测研究一直是人们关注的热点<sup>[9~13]</sup>,已利用接触热电偶、红外双色温度计等进行检测,得到了很多有价值的结

果。激光能量密度高,熔池尺寸小,热过程复杂,为熔池的温度场检测带来很大困难,大多数研究只能给出熔池或者熔池附近的点温,然后采用数学推导得到温度场分布。本文采用 CCD 高温检测技术,检测并分析了送粉同步式和预置式两种工艺下的熔池温度场分布,得到其在不同激光功率下形貌、尺寸及温度变化情况,并对工艺进行了优化选择。

## 2 材料及方法

基底材料 45 碳钢,试样尺寸 120 mm×100 mm×12 mm,熔覆材料为 Ni25 合金粉末,其成分(质量

收稿日期:2007-12-21;收到修改稿日期:2008-03-10

基金项目:国家自然科学基金(60478004)和天津工业大学青年基金资助项目。

作者简介:雷剑波(1981—),男,湖北人,博士,主要从事现代激光制造理论及应用和 CCD 高温检测方面的研究。

E-mail:ljbtj@163.com

分数)为:  $w(C) \leq 0.2\%$ ,  $w(Si) = 2.0\% \sim 3.5\%$ ,  $w(B) = 1.0\% \sim 1.5\%$ ,  $w(Fe) \leq 7.0\%$ ,  $w(Cr) = 5\% \sim 10\%$ , 余量为 Ni, 粒度  $50 \sim 104 \mu\text{m}$ 。

实验装置主要包括 HL-5000 型  $\text{CO}_2$  连续激光器; SIEMENS 802D 五轴四联动数控机床; JJK-6 自动送粉器; 熔池温度检测系统: LMPT-1 型, 自主研发, 由 CCD, 光学系统, 图像卡和计算机等组成, 每秒采集 25 幅熔池热辐射图像, 采用中国计量科学研究院 BF1400 标准高温黑体辐射源标定。

激光熔覆按材料的供给方式分为预置式和同步式两种, 预置式是在基材表面预置一层合金粉末, 可采用直接铺层、粘结剂粘结、热喷涂和机械喷涂等方法预置, 再激光熔化烧结; 同步式指激光辐照同时输入合金粉末、丝材或板材, 需用专用装置输送。本实验采用直接铺层和同步送粉两种方式, 预置式的粉末层厚为  $1 \text{ mm}$ , 同步式采用送粉装置侧向送粉, 送粉量为  $18 \text{ g/min}$ , 侧向送粉角度  $20^\circ$ 。

实验前, 关闭 CCD 的自动增益, 调整好安装角度、位置及镜头焦距, CCD 测温系统安装角度  $25^\circ$ , 镜头前端距离熔池位置  $235 \text{ mm}$ 。采用的是单道熔覆实验, 激光功率  $900 \sim 1500 \text{ W}$ , 单道长度  $40 \text{ mm}$ , 扫描速度  $2 \text{ mm/s}$ , 选取开光  $8 \text{ s}$  时熔池热辐射图像进

行分析, 激光扫描长度为  $16 \text{ mm}$ , 熔池处于相对稳定状态。

### 3 结果及分析

#### 3.1 不同功率同步送粉激光熔覆

图1为不同功率下激光熔覆热辐射图像, 激光

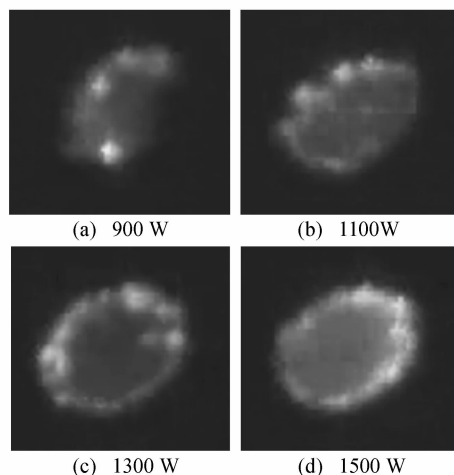


图1 不同功率同步送粉激光熔覆热辐射图像  
Fig.1 Thermal pictures of laser molten pool in laser cladding at different laser powers

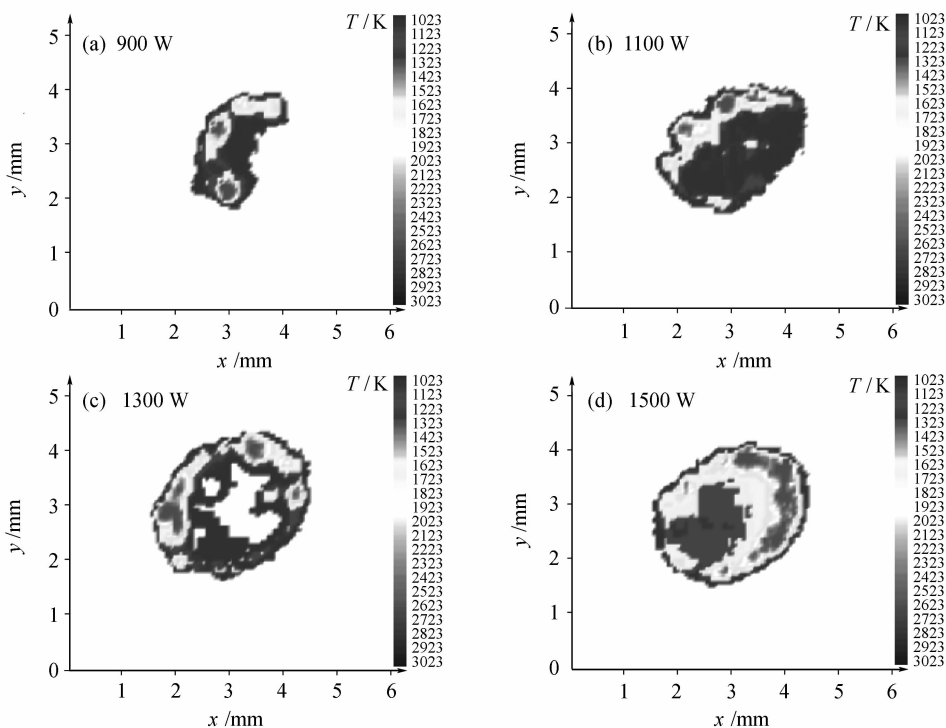


图2 不同功率同步送粉激光熔覆温度场分布  
Fig.2 Temperature distributions of laser cladding at different laser powers

运动方向向左。当功率比较低时,只有部分粉末熔化形成熔池,熔化不均匀,随功率增加,熔池尺寸增大,到1300 W时,熔池大小基本上趋于稳定。实验中发现,超过1500 W后,熔池尺寸没有多大增加,而熔池热辐射图像更加明亮,熔化更加充分。

图2为图1对应熔池的温度场分布,可见熔池边缘呈现比较明显的温度梯度分布。热辐射图像中心区域虽然和周围相比仿佛要暗,但并不表明熔池中心区域温度要低,而是由于激光熔覆时会形成一层熔渣漂浮在熔池上方,同时金属粉末的不断输入,导致激光熔池表面发射率降低。

当激光功率为1300 W时,熔覆质量比较好,熔池几乎没飞溅,粉末利用率比较高,熔池 $x, y$ 方向尺寸为2.8 mm, 2.7 mm, 平均温度1800 K;当激光功率为1500 W时,熔池发生一定的飞溅现象,熔覆比较充分,表面质量更平整,熔池 $x, y$ 方向尺寸为2.8 mm, 2.7 mm, 平均温度2000 K。如果功率继续增加会导致熔池平均温度升高,由于热传导熔池尺寸有所增加,但增加不明显,飞溅会更加剧烈,还造成粉末烧蚀,降低粉末利用率。

图3为同步送粉不同功率激光熔覆形貌,可见在送粉量相同的情况下,随着激光功率增大,熔覆层表面愈平整,熔覆层高度降低,熔覆层稀释率大大增加,降低熔覆层性能<sup>[14]</sup>。

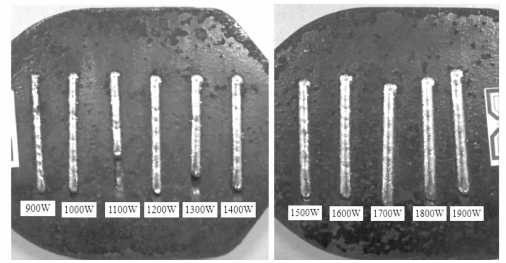


图3 同步送粉不同功率激光熔覆形貌

Fig. 3 Oversights of the cladding single track

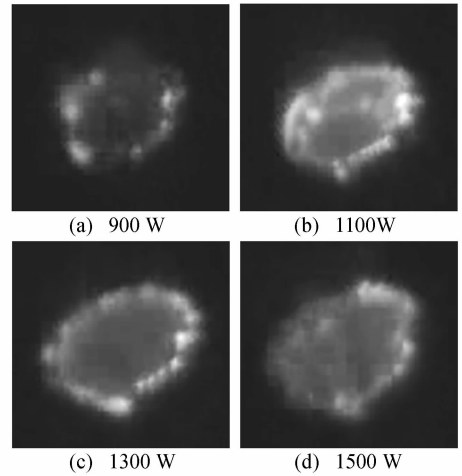


图4 不同功率预置粉末激光熔覆热辐射图像

Fig. 4 Heat emission images of pre-fabricated powder laser cladding at different laser powers

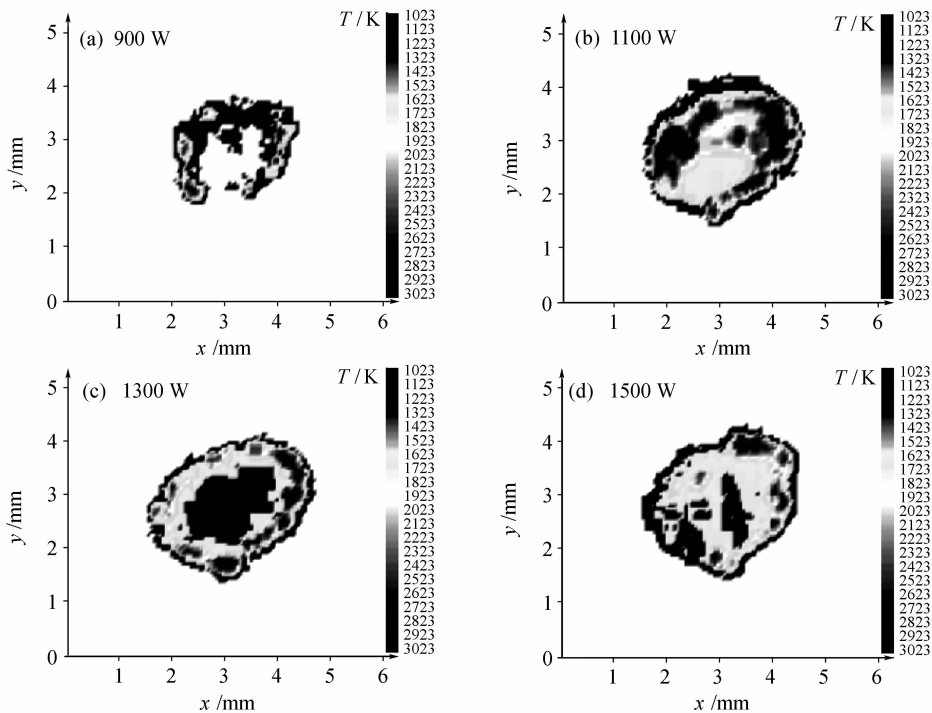


图5 不同功率预置粉末激光熔敷温度场分布

Fig. 5 Temperature distributions of pre-fabricated powder laser cladding at different laser powers

### 3.2 不同功率预置粉末激光熔覆

图4所示为预置粉末的熔池热辐射图像,可见,与送粉方式相比,在相同功率下,预置粉末的热辐射图像要比送粉时明亮。

图5为图4对应熔池温度场分布,和送粉方式相比,激光熔池呈现比较明显的温度梯度分布。由于没有粉末输入的影响,熔池表面温度分布比较均匀,在1300~1500 W时熔池 $x,y$ 方向尺寸为2.8 mm,2.7 mm,平均温度2000 K。由于造渣因素,造成熔池中心区域发射率降低,该区域温度略显低。激光功率增加时,熔池飞溅会导致部分熔渣溅出,其中心区域熔渣覆盖减少,温度分布比较均匀。

图6为预置粉末熔覆形貌。由于采用的是预置粉末,粉末层首先受到激光辐照熔化,与基材结合主要靠热传导,和送粉方式相比,粉末利用率高,但形成比较好的熔覆形貌需要更大的功率,在相同工艺参数下,表面质量明显比送粉方式差,容易造成表面凹凸不平现象。

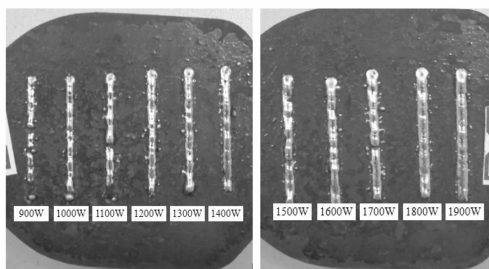


图6 预置粉末不同功率熔覆形貌

Fig. 6 Oversights of the cladding single track

## 4 结 论

1) 采用 $\text{CO}_2$ 激光在45碳钢上熔覆Ni25合金粉末,检测了运动过程中送粉同步式和预置式激光熔覆熔池,得到其在不同功率下形貌、尺寸及温度场分布。扫描速度和送粉量恒定情况下,激光功率低时只有部分粉末熔化,熔池温度较低且分布不稳定,随功率增大,熔池尺寸及温度增加,到1300 W时熔池尺寸和温度分布达到相对稳定状态。2) 熔池形貌近似椭圆形,由于熔覆过程中有造渣因素,导致熔池中心区域覆盖少量熔渣,从而降低熔池表面发射率,影响熔池温度检测真实性。在激光熔覆过程中,采用发射率修正,并同时考虑熔池形貌、尺寸大小及飞溅进行分析控制。3) 激光功率1300~1500 W,扫描速度2 mm/s,送粉量18 g/min时,可得到比较好的熔覆层,此时对应的熔池 $x,y$ 方向尺寸为2.8 mm,2.7 mm,熔池平均温度1800 K,通过控制

激光熔池尺寸、温度场分布和形貌,可获得均匀一致的熔覆层。

### 参 考 文 献

- Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):442~446  
陈静,谭华,杨海鸥等. 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
- Liu Rongxiang, Ji Zesheng. Microscopic morphology and microstructure of phases between dilution zone and clad zone in laser remelting NiCrBSi/TiN layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1292~1296  
刘荣祥,吉泽升. 激光重熔层稀释区与熔覆区界面区域的组织结构[J]. 中国激光, 2007, **34**(9):1292~1296
- M. Irvani-Tabrizipour, E. Toyserkani. An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height [J]. *Machine Vision and Applications*, 2007, **18**(6):343~354
- J. Tusek, B. Taljat, D. Klobcar. How to extend the life of die-casting tools [J]. *Metallurgija*, 2007, **46**(1):67~71
- Niu Xin, Chao Mingju, Wang Wenli *et al.*. In situ synthesized NbC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):987~992  
牛薪,晁明举,王文丽等. 原位生成NbC颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):987~992
- Sirong Yu, Yan Liu, Luquan Ren *et al.*. Development of laser-cladding layers containing nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles for wear-resistance materials [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, **37**(12):3639~3645
- L. Dubourg, L. St-Georges. Optimization of laser cladding process using taguchi and EM methods for MMC coating production [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, **15**(4):790~795
- Li Huiling, Zeng Xiaoyan. Effect of overlapped spaces on structure property of thick-film resistors flexibly and directly fabricated by laser micro-cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1554~1560  
李慧玲,曾晓雁. 搭接量对激光微细熔覆柔性直写厚膜电阻组织性能的影响[J]. 中国激光, 2005, **32**(11):1554~1560
- Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ti telescope collimation component [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):482~486  
钟敏霖,杨林,刘文金等. 激光快速直接制造W/Ti合金太空望远镜准直器[J]. 中国激光, 2004, **31**(4):482~486
- Li Yanmin, Liu Zhenxia, Yang Haiou *et al.*. Measurement and simulation of temperature field during multi-layer laser cladding [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, **39**(5):521~525  
李延民,刘振侠,杨海鸥等. 激光多层涂敷过程中的温度场测量与数值模拟[J]. 金属学报, 2003, **39**(5):521~525
- J. Müller-Borhanian, C. Deininger, F. Dausinger *et al.*. Camera based monitoring during laser beam welding influences of the detection wavelength [C]. Proc. Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, 2005. 137~141
- Shoujin Sun, Yvonne Durandert, Milan Brandt. Correlation between melt pool temperature and clad formation in pulsed and continuous wave Nd:YAG laser cladding of satellite 6 [C]. Proc. 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, 2004. 7~12
- Lei Jianbo, Yang Kichen, Chen Juan *et al.*. Study on measurement of dynamic process in laser molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(Suppl.):357~359  
雷剑波,杨洗陈,陈娟等. 激光熔池动态过程检测研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(增刊):357~359
- G. Bi, A. Gasser, K. Wissenbach *et al.*. Temperature measurement and its application for monitoring and control in laser cladding [C]. Proc. Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, 2005. 143~148