

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0171-04

激光快速成形过程的热行为及其影响

陈静, 谭华, 张凤英, 于君, 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 建立了激光快速成形(LRF)过程熔池的比色测温系统,分别采用实时跟踪和定点测量两种方式实现了熔池温度和熔池后沿冷却速率(温度梯度)的测量。结果表明,随着激光功率和送粉率的增大,熔池温度升高,熔池后沿冷却速率减小;随着激光扫描速度的增加,熔池温度下降,熔池后沿冷却速率增大。单道多层熔覆和多道搭接熔覆过程温度检测结果发现,随着沉积层数和沉积道数的增加,成形过程呈现热累积效应,即熔池温度逐渐升高,而熔池后沿的冷却速率则呈现完全相反的趋势。

关键词 激光技术; 激光快速成形; 熔池温度; 热行为; 熔覆层尺寸; 显微组织

中图分类号 TN253 文献标识码 A

Thermal Behavior and its Effect on the Process of Laser Rapid Forming

CHEN Jing, TAN Hua, Zhang Feng-ying, Yu Jun, HUANG Wei-dong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The temperature measurement system of melt pool produced in the process of laser rapid forming (LRF) is established by using a two-color infrared thermometer. The two methods named as real time tracking measurement and fixed point measurement are employed respectively to obtain the melt pool temperature and the cooling rate (temperature gradient) of the melt pool tail. The influences of LRF process parameters on the melt pool temperature are studied. The results show that with the increase of laser power and powder feeding rate the melt pool temperature rises. And the results just reverse as laser scanning speed increasing. With the number of deposition layer and deposition pass increasing, the LRF process presents characteristic of thermal accumulation effect, which means the melt pool temperature gradually elevates. Meanwhile the cooling rate (temperature gradient) of the melt pool tail takes on reverse trend.

Key words laser technique; laser rapid forming; melt pool temperature; thermal behavior; geometric size of cladding layer; microstructure

1 引言

激光快速成形(LRF)是基于快速原型和激光熔覆技术迅速发展起来的一项先进制造技术,能够实现致密金属零件的无模具、快速、近终成形,已经在航空航天等高技术领域展示出广阔的应用前景^[1~4]。激光快速成形过程的热行为直接影响到成形件的几何性能和力学性能。由于激光加工是一个快速熔化和凝固过程,熔池的尺寸一般很小,其温度场变化极为剧烈,常规测温方法难以实现熔池温度的精确测量,因而大多数的研究都是利用数值模拟的方法。但是,对于同步送粉激光熔覆这样的复杂过程而言,要建立能够全面、准确描述该过程的数值

模型,同时又能够有效地解决计算问题,其难度是非常大的^[5~8]。因此,需要对成形过程中熔化区域的温度(温度场)进行实时检测,以便为数值计算提供接近真实的边界条件,并验证计算结果的准确性,同时这也是进一步对激光快速成形过程实施反馈控制的基础。本文利用比色红外测温仪建立了激光快速成形过程熔池温度检测系统,在此基础上研究激光功率、光束扫描速度以及送粉率等工艺参数对激光快速成形过程热行为的影响。

2 实验

比色测温仪对目标温度的测量是通过两个独立

基金项目: 国家自然科学基金(50405038)和西北工业大学青年教师创新基金(W016212)资助课题。

作者简介: 陈静(1970—),女,博士,副教授,主要从事激光材料加工基础和应用方面的研究。

E-mail: phd2003cjj@nwpu.edu.cn

波段内辐射功率的比值来确定的,比较适用于激光快速成形过程中熔池以及粉尘环境。温度检测系统包括光纤式比色测温仪(测温范围:900~2400 °C,绝对精度:±10 °C,重复精度:±5 °C,响应时间:0.01 s)和自行开发的实时测温软件(包括测温仪输出信号的 A/D 转换及数据采集、实时温度和温度走势的显示以及温度数据的存储)。

为了获得激光熔池温度及熔池后沿冷却速率(温度梯度),设计了两种检测方法:(1)熔池温度的实时跟踪监测,即熔池始终处于测温探头的监视之下,从而获得整个激光快速成形过程融化区域温度的变化情况。为了保证探头视场始终对准熔池,将光学探头固定于激光加工头上并与其一起运动,采样频率设置为10次/s。(2)定点温度检测,即将光学探头的视场对准成形轨迹上某一点,当激光扫过该点时,该点温度变化被记录下来,采样频率设置为100次/s。图1所示为不同检测方法示意图, v_b 为光束扫描速度。

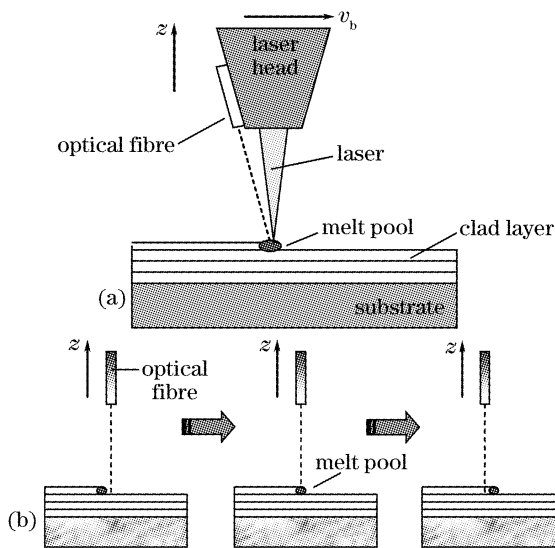


图1 熔池温度不同检测方法示意图。(a)实时跟踪;
(b)定点

Fig. 1 Sketch of different measurement of melt pool temperature. (a) real time tracking; (b) fixed point

采用 Ni20 自熔合金粉末作为熔覆材料,不锈钢板状试样(尺寸为 70 mm×20 mm×8 mm)作为基材,在其上进行单道熔覆和多层熔覆。

3 结果与讨论

3.1 成形工艺参数对熔池温度的影响

回归正交实验结果表明,对激光快速成形过程影响显著的工艺参数主要有激光功率 P ,加工点尺寸 D ,光束扫描速度 v_b 和送粉率 m_p 。测温实验中采用固定的加工点尺寸,考察了其他三个工艺参数

对成形过程热行为的影响,如图2所示。

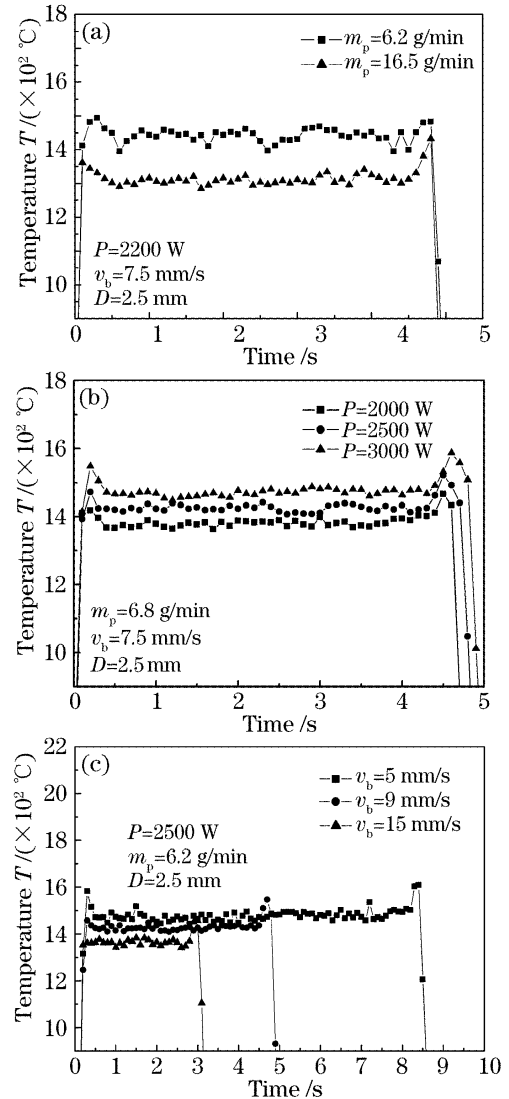


图2 成形工艺对熔池温度的影响。(a)送粉率;(b)激光功率;(c)光束扫描速度

Fig. 2 Influence of process parameters on the melt pool temperature. (a) powder feeding rate; (b) laser power; (c) laser scanning speed

3.2 成形工艺参数对熔池后沿冷却速率的影响

图3(a)所示为在不同激光功率条件下,利用定点温度检测方法获得的熔池后沿冷却曲线,曲线上某一点的斜率即为该点的冷却速率。可以看到,激光功率越大,熔池后沿冷却速率反而越小。由于光束扫描速度一定,可知熔池后沿的温度梯度随激光功率的增大而减小,而且从温度变化轮廓可以看出,激光功率越大,熔池几何尺寸也越大。为了进一步揭示光束扫描速度对激光成形热行为的影响,假设激光熔覆处于稳态,那么,根据 $x = v_b t$,可以计算得到温度随位置的变化曲线(温度梯度),图3(b)所示即为熔池后沿的温度分布情况。可以看出,光束扫描速度越大,熔池后沿温度梯度也越大,同时固/液界面温度出现的位置越靠近熔池中心,熔池越小。

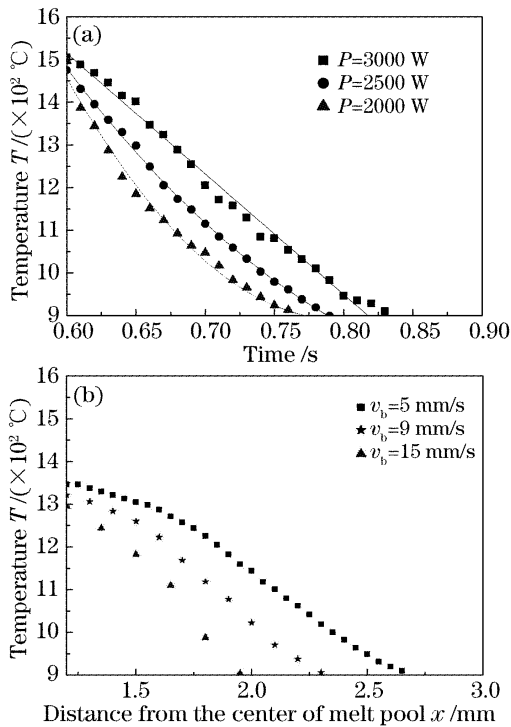


图 3 定点温度检测结果。(a) 不同激光功率下熔池后沿冷却曲线；(b) 熔池后沿的温度分布

Fig. 3 Measurement results of fixed point measurement. (a) cooling curve of melt pool tail at different power; (b) temperature distribution of melt pool tail

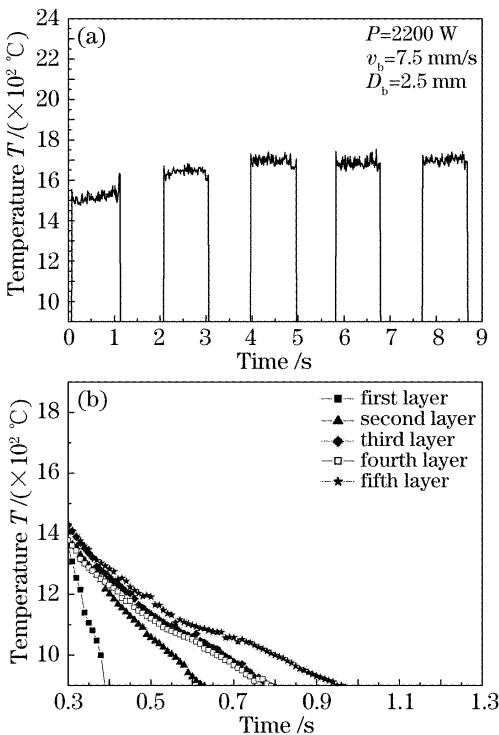


图 4 单道多层熔覆时温度检测结果。(a) 沉积层数对熔池温度的影响；(b) 沉积层数对熔池后沿冷却的影响

Fig. 4 Temperature measurement results during single pass multi-layer cladding. (a) influence of number of deposition layer on melt pool temperature; (b) influence of number of deposition layer on cooling curve of melt pool tail

3.3 成形过程的热积累效应

以上所述为单层单道熔覆实验结果,实际成形过程通常是多层多道搭接的结果,将出现热积累效应。图 4(a)所示是激光单道多层熔覆成形薄板试样时熔覆前五层的熔池温度测量结果,可以看出,熔覆第一层时熔池温度较低,熔覆第二层时熔池温度有较大幅度的升高,熔覆第三层时温度仍有一定的攀升,从第四层开始熔池温度基本保持恒定。沿沉积高度方向上呈现出的温度逐渐上升并趋于恒定现象,将会造成薄板试样的宽度在整个沉积高度方向上不一致,靠近基材一侧熔覆层宽度小于靠近试样顶部一侧,从而影响成形试样的几何形状和尺寸精度。此外,在熔覆第一层时如果激光功率过小或扫描速度过快,有可能造成熔覆层和基材界面熔合不良,在随后的成形过程中多层熔覆层将与基材在界面处剥离。显然,在沉积前几层熔覆层时采用较高的激光功率或较慢的扫描速度是有利的。

图 4(b)所示为对单道多层熔覆过程中前五层扫描轨迹上的同一位置的定点温度测量结果,不同曲线的斜率代表不同层数熔覆过程中熔池表面后沿的冷却速率。可以看出,随熔覆层数的增加,熔池后沿冷却速率逐渐减小,这将直接影响到成形件显微组织沿沉积高度方向上的均匀性。

激光快速成形过程的热积累效应将影响到组织的均匀性。图 5 所示为激光成形薄板试样沿沉积高度方向上不同位置处的显微组织,可以看出,从成形件的底部到顶部,其枝晶一次间距逐渐变大,平均一次间距逐渐增大,同时二次分枝逐渐发达。这是由

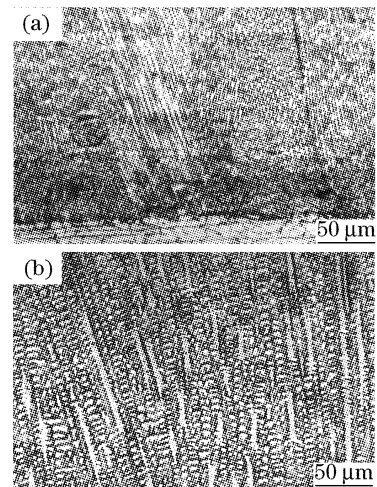


图 5 沿沉积高度方向上不同位置处的显微组织 (a)熔覆层与基材界面处;(b)成形试样顶部

Fig. 5 Microstructure at different position along deposition height increment. (a) at the surface of the substrate; (b) on the top of the specimen

于枝晶一次间距与凝固速度和温度梯度之间存在近似关系,即枝晶一次间距随温度梯度的减小而逐渐增大。此外,对于镍基高温合金,随多层熔覆过程的进行,由于固液界面前沿(熔池后沿)温度梯度的减小,外延生长枝晶组织将倾向于发生列状晶/等轴晶转变^[9]。

4 结 论

利用比色测温仪建立了一套激光快速成形测温系统,实现了熔覆过程的实时跟踪检测和定点温度检测。揭示了成形工艺,包括激光功率、光束扫描速度和送粉率对熔池热行为的影响。激光快速成形过程中随着沉积层数和沉积道数的增加,成形过程呈现热累积效应,即熔池温度逐渐升高,而熔池后沿的冷却速率则呈现完全相反的趋势。成形过程的这种热行为导致沿沉积高度方向上熔覆层尺寸不一致,枝晶一次间距逐渐增大。

参 考 文 献

1 D. H. Abbott, F. G. Arcella. Laser forming titanium

- components [J]. *Advanced Materials and Processes*, 1998, **153**(5): 29~30
- 2 J. O. Milewski, D. J. Thoma. Development of a near net shape processing method for rhenium using directed light fabrication [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1998, **13**(5): 719~730
- 3 M. Gaumann, S. Henry, F. Cleton *et al.*. Epitaxial laser metal forming; analysis of microstructure formation [J]. *Materials Science & Engineering A*, 1999, **271**(1~2): 232~241
- 4 F. G. Arcella, F. H. Froes. Producing titanium aerospace components using laser forming [J]. *J. Metals*, 2000, **52**(5): 28~30
- 5 Liu Zhenxia. Mathematics model and numerical analysis of laser remelting and laser cladding [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003
- 刘振侠. 激光熔凝及激光熔覆的数学模型及数值分析 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003
- 6 Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Steve Corbin. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection; effects of laser pulse shaping on the process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**(6): 849~867
- 7 Chongdu Cho, Guiping Zhao, Si-Young Kwak *et al.*. Computational mechanics of laser cladding process [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2004, **153~154**: 494~500
- 8 R. Jendrzewski, G. Sliwinski, M. Krawczuk *et al.*. Temperature and stress fields induced during laser cladding [J]. *Computers and Structures*, 2004, **82**: 653~658
- 9 Lin Xin, Li Yanmin, Wang Meng *et al.*. Columnar to equiaxed transition during alloy solidification [J]. *Science in China (Series E)*, 2003, **33**(5): 475~489