

文章编号: 0258-7025(2007)03-0442-05

激光快速成形过程中熔池形态的演化

陈静, 谭华, 杨海欧, 刘振侠, 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 采用高速摄影技术对激光快速成形过程中液态熔池的形成及其演化过程进行了实时观察。结果发现,以一定速度向前运动的激光束辐照基材时,基材表面开始熔化并形成液态熔池,经过一个较短的时间间隔(约1.0 s)后熔池深度增大至一定值,熔池长度则围绕一恒定值波动。以恒定送粉率向熔池中连续送进金属粉末时,熔池的长度和宽度逐渐减小,熔池寿命缩短。同时熔池后沿不断抬高即熔覆层厚度不断增加,最大熔深处熔池自由表面法向和激光束轴线之间的夹角由几度逐渐增大到 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 左右。熔池自由表面发生周期性的变化,实验观察到熔池后沿有周期性的“岛状凸起”出现和消失现象。数值计算结果证实这主要是熔池中熔体在表面张力梯度下引起的强制对流作用的结果。

关键词 激光技术;熔池形态;高速摄影;自由表面;激光快速成形;熔体流动

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Evolution of Molten Pool Shape in the Process of Laser Rapid Forming

CHEN Jing, TAN Hua, YANG Hai-ou, LIU Zhen-xia, HUANG Wei-dong

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

Abstract The high-speed photography has been employed to realize in situ observation on the formation and evolution of the molten pool in the process of laser rapid forming. The results show that the substrate begins to melt and produce a liquid molten pool with the laser beam scanning on it. After a rather short time (about 1.0 s) the molten pool depth increases to a certain value while the molten pool length fluctuates surrounding an invariableness figure. The depth and width of the molten pool decrease gradually with a constant flow rate powder being fed into the molten pool. And the lifespan of the molten pool turns to be short. Simultaneously the tail of the molten pool runs up that means the thickness of the cladding layer increases continuously with the powder ejecting into the molten pool. The angle between the normal of the free surface of the molten pool and the laser beam axis increases from a few degrees to $20\sim 30$ degree. There is an “island heave” emerging and vanishing seasonally at the tail of the molten pool free surface by in situ observation. This is the result of forced convection on the fused liquid of the molten pool induced by surface tension gradient, which has been proved by numerical simulation.

Key words laser technique; molten pool shape; high-speed photography; free surface; laser rapid forming; fused liquid evolution

1 引言

激光快速成形过程是一个十分复杂的非平衡短时物理冶金过程。在这一过程中,同时伴随发生着:

1) 连续送进到激光熔覆区的固态粉末颗粒发生熔化,基材或前一层熔覆层在激光束辐照下发生局部重熔,二者混合形成合金熔体;2) 金属熔体以米每

秒级的速度在熔池内流动^[1,2],熔体流动是为了使熔池内的温度趋于一致,熔体合金成分趋于均匀;3) 边界条件不断运动变化下运动熔池中金属熔体的非平衡近快速凝固。以上这些过程都是发生在体积很小、存在寿命又很短的液态熔池中。快速成形过程中熔池的形状、几何尺寸、温度(温度场)和存在时间,以及熔体的流动,将直接决定成形件的几何性能

收稿日期:2006-11-02;收到修改稿日期:2006-12-12

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)资助项目。

作者简介:陈静(1970—),女,甘肃兰州人,副教授,主要从事激光材料加工方面的研究。

E-mail: phd2003cjj@nwpu.edu.cn

和力学性能。激光快速成形技术在发展初期更关注如何获得高的力学性能(强度和塑性)^[3~7],随着研究的不断深入和推进,成形件几何性能(几何形状和尺寸精度)的提高逐渐成为一个新热点^[8~12]。然而,激光辐照区域所发生的是一个极快速的熔化、凝固过程,而且熔池的尺寸一般很小,其温度场、流场的变化又极为剧烈,因而大多数的研究都是以数值模拟为主。为了使问题变得能够处理,对于同步送粉激光熔覆这样复杂过程的模拟,所有的模型均在较大程度上进行了简化,例如将连续送粉过程简化为粉末预置于基材表面,假设熔池自由表面为一段圆弧甚至平面,忽视熔池形状及几何尺寸的影响等,这些假设对计算结果将产生较大的影响,所建立模型的准确性因此受到质疑^[13]。因此迫切需要发展同步送粉激光熔覆过程的实时观察技术,以准确把握熔池的形成与演化规律以及影响因素的作用机制,通过对成形工艺参数的优化与反馈控制,获得稳定、高质量的激光快速成形过程,最终改善成形件的几何性能,同时保证高的力学性能。近年来相继有学者在此方面进行了有益的尝试,虽然结果还未能达到精确的程度,但其中的某些成果还是非常令人鼓舞的^[9,14~16]。本文采用所建立的高速摄影系统对激光快速成形过程中熔化区域进行连续拍摄,重点讨论了随光束的扫描和粉末的送进,液态熔池的形成及其演化规律。

2 实 验

液态熔池本身是一个自发光体,因此采用可视成像系统能够记录熔池及其附近区域的空间信息和时间信息。本文建立的激光熔化区域高速摄影系统由背光源、滤光片、近摄附加透镜和日本 NAC E-10 型高速摄影机组成。拍摄时将取景框对准熔池侧面,所获得的影像为熔化区域的侧视图,拍摄规范见表 1。记录介质 10 mm 胶片经冲洗放印后获得 4 mm×3 mm 黑白照片,如图 1 所示。其中亮白色区域为熔池,灰色区域为热影响区。由于采用了正逆光拍摄物体阴影的方法,因此熔池上方粉末颗粒的影像也比较清晰。

表 1 高速摄影规范

Table 1 High-speed photography specification

Frame rate / (frame/s)	Shutter speed / s	Record medium	Shooting time / s
300	1/1500	10 mm film	10

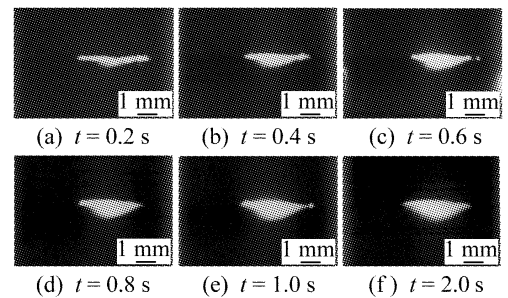


图 1 激光熔凝过程准稳态熔池的形成

Fig. 1 Formation of the quasi-steady state molten pool during the laser surface melting process

3 结果与讨论

3.1 表面重熔时液态熔池的形成与演化

激光表面熔凝过程可以看作是送粉率为零时的激光熔覆过程,在这一过程中激光束辐照基材并以一定速度向前运动,在其作用下基材表面开始熔化。设激光束开始辐照基材表面的瞬间为 $t = 0$ 时刻,图 1 所示是在激光工艺参数为 $P_1 = 3100 \text{ W}$, $d_1 = 4 \text{ mm}$, $v = 5 \text{ mm/s}$ 下,分别在 $t = 0.2 \text{ s}$, 0.4 s , 0.6 s , 0.8 s , 1.0 s , 2.0 s 时刻高速摄影系统所获得的熔化区域侧视图。由图 1 可见,随着输入热量的不断积累,基材表面开始熔化并形成液态熔池,熔池深度不断增大至一定值,熔池长度围绕一恒定值波动。经过一个较短的时间间隔(约 1.0 s)后熔池形态即达到稳定,熔池形状和几何尺寸基本保持不变,表明激光熔凝过程从非稳态达到准稳态。此时熔池的运动速度和光束扫描速度相等。

3.2 熔池自由表面形状

熔池自由表面的形状反映了作用于其上的各种力的相互平衡,它是熔池能量输入的界面,与表面张力梯度直接相关,而这又直接影响到熔池内部的流场和温度场。

图 2(a) 所示为激光熔凝过程达到准稳态后某一时刻熔池的高速摄影照片,采用迭代阈值法对该图像进行分割,分割后的图像如图 2(b) 所示。为了清晰地展示典型的激光熔凝熔池的自由表面形状,提取熔池的气液界面曲线,并采用二次多项式拟合,如图 2(c) 所示,图中坐标点 (x, y) 表示熔池气液界面上各像素点的位置。从中可以看出,激光熔凝过程中熔池的自由表面并非平面,而是呈圆弧形并向外凸起,不同位置处圆弧的曲率不同,表明熔池的自由表面并非是一段圆弧,而是复杂的曲面。熔池后沿可观察到“岛状凸起”,这一现象周期性地出现

和消失。熔池自由表面相对于激光束轴线是不对称的,图中最大熔深处熔池自由表面法线方向与入射激光束轴线方向之间的夹角为 5.3° 。图像处理结果表明,在不同时刻最大熔深处熔池自由表面法线方向在不断发生变化,但变化的幅度仅为几度。

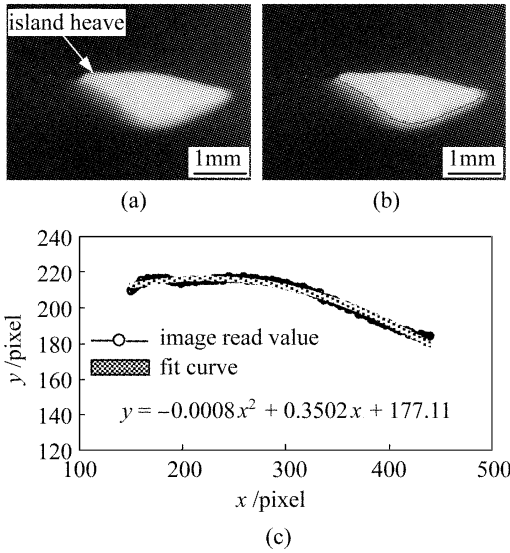


图 2 典型的激光熔凝熔池

(a)原始图像;(b)分割以后的图像;(c)熔池自由表面拟合结果

Fig. 2 Representative molten pool in the process of laser surface melting

(a) original image; (b) image being trimmed;
(c) fit result of molten pool surface

3.3 熔体的流动

激光表面熔凝过程达到准稳态后熔池形态即达到稳定,此时熔池的几何尺寸几乎不再发生改变,但这并不表示在每一时刻熔池形态都完全相同。实际

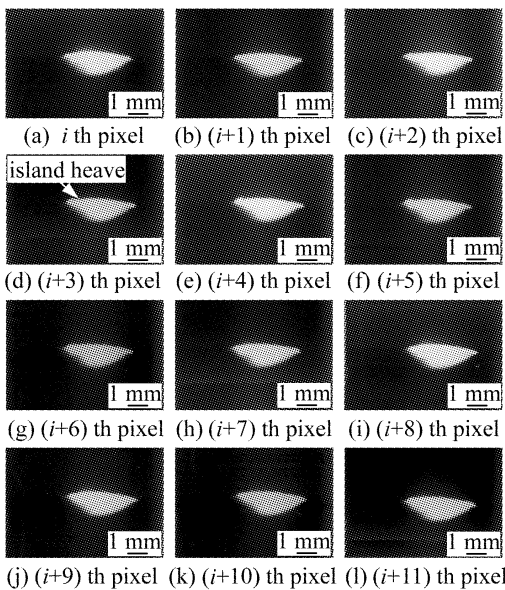


图 3 激光熔凝过程熔池形态的演化

Fig. 3 Evolvement of the molten pool shape during the laser surface melting process

上,由于熔池中熔体的流动行为,熔池自由表面将发生周期性的变化。图 3 所示是表面熔凝过程达到准稳态后的 12 幅连续高速摄影照片,从图中可以发现,熔池后沿“岛状凸起”经历“出现→逐渐升高→逐渐降低→消失→再次出现”这样的循环过程。

目前的研究结果表明熔池中熔体的对流驱动力主要来自两种不同的机制,一是表面张力梯度引起的强制对流机制,另一是熔池水平温差梯度决定的浮力引起的自然对流^[17],正是二者的综合作用决定了熔体的流动特征。数值计算结果表明浮力驱动的自然对流其速度在微米每秒的量级上,因此可以忽略,而仅考虑表面张力驱动的强制对流。一般情况下,液态金属系统的表面张力温度系数小于零,在表面张力差的作用下近自由表面的熔体由熔池中心流向熔池边沿,从而使液面产生了高度差,由此所形成的重力梯度又驱使熔体回流,结果在熔池的右侧形成一个宏观的沿顺时针方向流动的主循环对流回路,对称地在熔池左侧形成逆时针方向对流回路。图 4 所示为由激光熔凝数学模型计算得到的熔池中熔体流动速度矢量图,光束扫描速度为 15 mm/s。图 4 中两个方向相反的对流回路是负表面张力温度系数作用的结果,左右两个对流循环回路的大小及强度不同,靠近熔池前沿的熔体流动环路较小,强度较弱,而后沿的环路较大,强度也较强,数值计算结果很好地印证了高速摄影实时观察结果。

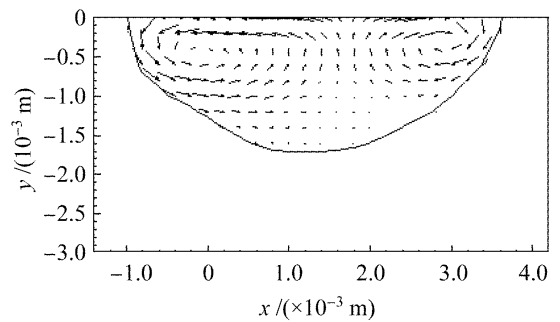


图 4 熔池纵截面熔体流动速度矢量图

Fig. 4 Fused liquid evolution velocity vector map of the longitudinal section of the molten pool

设熔池后沿“岛状凸起”从开始出现到消失为一个循环周期,由图 3 可见一个循环周期跨越连续 9 幅高速摄影照片(从第 i 幅到第 $i + 8$ 幅),高速摄影时所选取的拍摄帧率为 300 frame/s,因此循环周期为 0.03 s。实测熔池长度为 4.6 mm,熔池左侧中熔体的平均流动速度约为二者的比值即 153.3 mm/s,可见熔池中熔体的流动速度远高于光束扫描速度 (5 mm/s),是光束扫描速度的数十倍。

3.4 粉末送进后熔池形态的演化

为了考察连续送进到液态熔池的粉末流对熔池形态的影响,设计这样一组实验,即在 3.1 节所述的激光熔凝过程达到准稳态后开始向熔池中连续送进恒定送粉率的粉末流,并假定粉末送进的瞬时为 $t = 0$ 时刻,图 5 所示为粉末流开始送进后熔池形态的演化。由图可见,熔池自由表面仍然呈圆弧形并向外凸起,但是随着粉末流的送进熔池逐渐开始倾斜,熔池后沿不断抬高,熔覆层厚度不断增加。经过一个较短的时间(约 1.0 s)后熔池形态达到稳定,此时熔池形状和几何尺寸基本保持不变,表明激光熔覆过程从非稳态达到准稳态。

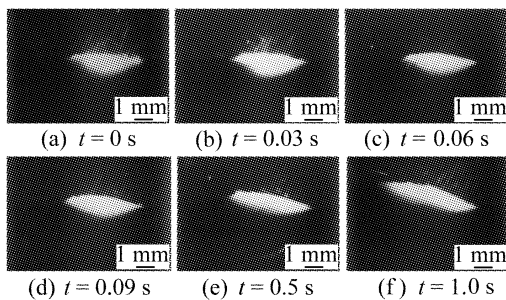


图 5 连续送进粉末流对熔池形态的影响

Fig. 5 Influence of the continuous feeding powder jet on the molten pool shape

以本文拍摄到的熔池侧视形态来定义表征激光

熔覆熔池形态的特征参量为:熔池长度 L_p 为沿光束扫描方向上熔化区域的最大长度;熔池宽度 W_p 为垂直于光束扫描方向上熔化区域的最大宽度;熔池深度 D_p 为 z 方向(即成形零件高度增加方向)上熔化区域的最大深度;再熔化深度 H_r 为熔覆第一层时基材被熔化的深度或熔覆后一层时前一层被熔化的深度,即熔池深度 D_p 与单层熔覆厚度 H_c 之间的差;熔池自由表面曲率 ρ 为熔池自由表面曲线上不同位置处曲线的曲率;熔池自由表面方向 γ 为熔池自由表面法向与光束轴线之间的夹角;熔池寿命 t_{max} 为熔池在液态存在的最大时间,其值为熔池长度 L_p 和光束扫描速度 v 之比。

表 2 所示为粉末送进前后激光熔凝和激光熔覆过程准稳态熔池特征参量值的对比,从中可以看出,连续送进到液态熔池的粉末流使熔池在沿光束扫描方向上收缩,熔池长度由 4.63 mm 减小到 4.16 mm,熔池宽度由 3.9 mm 减小到 3.6 mm,熔池存在寿命由 0.926 s 缩短到 0.832 s。因此,连续送进到熔池中的粉末使熔池变暗、变小,这和人眼观察这一过程时获得的直观认识是一致的。另一个显著特点是随粉末的连续送进,熔池后沿不断抬高,熔池自由表面逐渐向激光束轴线方向倾斜,熔池最大熔深处自由表面法线方向和激光束轴线之间的夹角由 1.47° 左右逐渐增大到 25.24° 左右。

表 2 射入粉末对熔池特征参量的影响

Table 2 Influence of the powder jet on characteristic parameters of the molten pool

Type of molten pool	L_p /mm	W_p /mm	D_p /mm	H_r /mm	ρ /mm ⁻¹	γ /($^\circ$)	t_{max} /s
Laser surface melting	4.63	3.9	0.83	—	0.063	1.47	0.926
Laser cladding	4.16	3.6	1.30	0.05	0.030	25.24	0.832

实际上,在激光表面熔凝过程中当运动激光束扫描基材使其熔化并形成准稳态熔池后,连续送进到液态熔池的粉末流对于已经达到准稳态的熔池而言既有质量的输入,又有能量的输入。因此,为了重新达到能量和质量的动态平衡,熔池形态将随粉末流的送进而发生剧烈变化,并经过一个较短的时间后再次达到准稳态。

4 结 论

1) 激光熔凝过程中,激光束辐照基材并以一定速度向前运动,随着输入热量的不断积累,基材表面开始熔化并形成液态熔池,熔池深度不断增大至一定值,熔池长度围绕一恒定值波动。经过一个较短

的时间间隔(约 1.0 s)后激光熔凝过程从非稳态达到准稳态,此时熔池的形状和几何尺寸基本保持不变;

2) 随粉末连续送进到激光熔凝过程所形成的准稳态熔池,熔池的几何尺寸逐渐减小,熔池后沿不断抬高,熔池自由表面逐渐向激光束轴线倾斜,熔池最大熔深处自由表面法线方向和激光束轴线之间的夹角由几度逐渐增大到 $20^\circ \sim 30^\circ$ 左右;

3) 激光熔化区域的高速摄影实验观察到熔池后沿周期性出现“岛状凸起”现象,这主要是熔池中熔体在表面张力梯度引起的强制对流作用的结果,由此得到熔池中熔体的流动速度远高于光束扫描速度,是光束扫描速度的数十倍。

参 考 文 献

- 1 J. Mazumder, J. Choi, K. Nagarathnam *et al.*. The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components [J]. *JOM*, 1997, **49**(5):55~60
- 2 P. S. Mohanty, J. Mazumder. Solidification behavior and microstructural evolution during laser beam-material interaction [J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 1998, **29B**:1269~1279
- 3 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
- 4 C. L. Atwood, M. L. Griffith, L. D. Harwell *et al.*. Laser spray fabrication for net-shape rapid product realization LDRD [R]. Sandia Report, Sandia99-0739, 1999. 1~32
- 5 M. Gäumann, S. Henry, F. Cléton *et al.*. Epitaxial laser metal forming; analysis of microstructure formation [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, **271**(1-2):232~241
- 6 Jae-Do Kim, Yun Peng. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2000, **104**(3):284~293
- 7 F. G. Arcella, F. H. Froes. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming [J]. *JOM*, 2000, **52**(5):28~30
- 8 J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition; art to part [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2000, **34**(4-6):397~414
- 9 Dongming Hu, Radovan Kovacevic. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, **43**(1):51~60
- 10 A. J. Pinkerton, L. Li. An analytical model of energy distribution in laser direct metal deposition [C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2004, **218**:363~374
- 11 D. P. Hand, M. D. T. Fox, F. M. Haran *et al.*. Optical focus control system for laser welding and direct casting [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2000, **34**(4-6):415~427
- 12 M. T. Ensz, M. L. Griffith, L. D. Harwell. Software Development for Laser Engineered Net Shaping [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories Report, 2006
- 13 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
- 14 Liu Zhenxia, Chen Jing, Huang Weidong *et al.*. Temperature rise model of laser cladding material powder by side-injection with experiment investigation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):875~878
刘振侠, 陈 静, 黄卫东 等. 侧向送粉激光熔覆粉末温升模型及实验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(7):875~878
- 15 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. High power CO₂ laser powder welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):714~718
张盛海, 陈 铠, 肖荣诗 等. 铝合金高功率 CO₂ 激光粉末焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(5):714~718
- 16 M. L. Griffith, M. E. Schlienger, L. D. Harwell *et al.*. Understanding thermal behavior in the LENS process [J]. *Materials and Design*, 1999, **20**:107~113
- 17 Liu Jianglong, Zou Zhirong, Su Baorong. Heat Treatment by High Energy Beam [M]. Beijing: China Machine Press, 1997
刘江龙, 邹至荣, 苏宝熔. 高能束热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997