

脉冲激光离散加工熔池形态 及其影响因素的研究*

罗耕星 武晓雷 陈光南
(中国科学院力学研究所)

摘要 研究了Nd:YAG脉冲激光离散加工时功率密度和作用时间对熔池几何形态的影响。5CrMnMo钢的实验结果表明:在本文所涉及的加工条件下,熔池存在热传导型和深熔型两种形态;激光作用时间小于4ms时,在相同作用时间下,随着激光功率密度的增加,熔池深宽比显著增加;但当作用时间大于4ms后,功率密度对深宽比的影响减弱。基于线性热传导模型的计算结果表明:熔凝起始阶段的固态加热过程可忽略;熔池几何尺寸在激光脉冲结束后某个时刻达到最大值;当平均功率密度大于 $5 \times 10^3 \text{W/cm}^2$,同时激光作用时间大于2ms时,热传导型激光熔池向深熔型激光熔池转变。

关键词 脉冲激光熔凝; 几何形态; 热传导; 热物性参数
分类号 TG456.7

与连续激光相比,脉冲激光离散加工因具有更高的峰值功率、加热速度与冷却速度,在材料表面的改性和改形加工方面显示了独特优势并已获得重要的工业应用^[1]。关于激光加工熔池形态特征方面的研究工作很多,但多是针对焊接和表面连续扫描形成的熔池^[2,3],关于脉冲激光离散点加工形成的熔池形态及其影响因素方面的研究工作则不多见。由于熔池形态取决于激光工艺条件和材质,又直接影响加工后材料的组织与性能,揭示熔池形成规律和影响因素,可为优化激光加工工艺和提高表面强化效果提供依据。将重点研究不同激光功率密度和作用时间条件下的熔池形态及其变化规律,并讨论所涉及的热物性参数。

1 实验材料和方法

本实验采用Nd:YAG脉冲激光,光斑直径为 $200 \mu\text{m}$,其功率密度近似为圆形高斯分布,控制参

数为脉冲能量和作用时间,在脉冲作用时间内光束与工件位置相对静止,氩气保护熔池。试验材料为5CrMnMo钢,主要成分 $w(\%)$ 为:Fe-0.56C-0.72Cr-1.46Mn-0.19Mo,试样经调质处理,尺寸为 $10\text{mm} \times 40\text{mm} \times 150\text{mm}$ 。制取熔池最大纵剖面,利用Neophot-21金相显微镜观察熔池形貌,熔池轮廓曲线由金相照片测量。

2 分析模型及热物性参数

忽略对流和辐射,仅考虑热传导,可将激光对工件的加热过程简化为半无限大物体表面加热的三维不稳定导热问题^[4]。选用柱坐标系,光斑中心定为坐标原点,光斑位置定为 $(r, \theta, 0)$ 平面。应用点热源法^[5]及线性叠加法^[6],可得激光加热过程中任一时刻 t 的温度。

$$T - T_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^l \frac{A_b I r'}{4\rho C_p [\pi\alpha(t-t')]^{3/2}} \cdot$$

收稿日期:1998-07-07。

罗耕星, 博士生。中国科学院力学研究所材料工艺中心, 北京市海淀区中关村路15号, 北京100080。

* 中国科学院重大项目资助课题(KY951-A1-601-03)。

$$\exp\left[-\frac{r^2+r'^2+z^2-2rr'\cos(\theta-\theta')}{4\alpha(t-t')}\right]dt'dr'd\theta' \quad (1)$$

式中 T 为 t 时刻的温度; T_0 为环境温度; A_b 为材料对激光的吸收率; a 为光斑半径; C_p 为材料比热; α 为热扩散率; ρ 为材料密度; I 为光斑处激光功率密度分布, 其表达式为:

$$I=I_0\exp\left(-\frac{2r'^2}{a^2}\right) \quad (2)$$

式中 I_0 为激光峰值功率密度, 其值等于平均功率密度的二倍。

分析温度表达式(1), 可知在上述假设条件下同一熔池轮廓(即固-液等温面)的深宽比(熔池深度与宽度之比)的最大极限为0.5, 因此将深宽比小于此值的熔池归类于热传导型熔池, 其余的归类于深熔型熔池。

公式(1)是基于加热材料元相变时的热传导结果, 铁基材料受热熔化包括固-固相变和固-液相变传热过程, 因此在公式(1)应用时必须考虑固相和液相热物理特性(如导热率, 热扩散率, 比热以及密度等)的差异、不可忽视的各种潜热以及激光加热非平衡过程中临界点的变化^[7]。在已有的研究中, 潜热有不同的处理方法, 如将固态相变潜热折算成温度降低值^[8], 或仅考虑熔化潜热^[9]。本文同时考虑固态相变潜热和熔化潜热, 比热 C_p 取计算温度范围内的平均值:

$$\bar{C}_p = \frac{\int C_p(T)dT + \Sigma\Delta H}{\Sigma T} \quad (3)$$

式中 ΔH 为计算温度范围内某一相变点(或熔化点)的焓变。

热扩散率 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, 式中 λ 为与温度相关的导热系数, 取计算温度范围内的平均值。 ρ 取所计算温度范围内的平均值。

据此由相关数据[7,9-12]计算得本研究所需计算热物理参数, 列于表1。

另外, 温度显著影响材料对激光的吸收率, 接近熔点时, 吸收率会急剧增加, 计算时选取固态时材料吸收率为0.3^[13], 液态时材料吸收率为0.5^[14]。

3 实验结果与分析讨论

3.1 分析模型验证

表1 材料参数

Table 1 Data used for heat transfer calculation

室温到熔点的平均密度	7.5g/cm ³
室温到沸点的平均密度	7.0g/cm ³
室温到熔点的平均比热	0.6785J/(g·℃)
室温到沸点的平均比热	0.6367J/(g·℃)
室温到熔点的平均热传导系数	0.3523W/(cm·℃)
室温到沸点的平均热传导系数	0.2328W/(cm·℃)
室温到熔点的平均导热系数	0.06435cm ² /s
室温到沸点的平均导热系数	0.05223cm ² /s
沸点	3070℃
熔点	1537℃
加热时奥氏体化温度	1000℃

图1为热传导型熔池轮廓的计算结果及实验对比。 h 为轮廓深度, R 为轮廓半径, 计算参数同上一节, 熔凝轮廓线处温度取熔点温度, 相变轮廓线处温度取加热时奥氏体化转变温度, 计算相应实验点的轮廓线, 计算结果与实验结果较好吻合。 计算熔池宽度比实验熔池宽度大, 是由于忽略了熔池表面温度梯度引起的表面张力梯度所造成的表面流动, 但该误差小于15%, 因此计算模型及热物理参数的处理是合理的, 可用于本研究的热传导过程分析。

3.2 熔池深宽比

深宽比 S 即是熔池最大深度与熔池最大直径之比, 它是表示熔池形状及在型的一个综合特征参数。 从图2(a)中可以看出, 在相同作用时间下, 随着功率密度的增加, 深熔型熔池的深宽比(大于0.5)显著增大。 由图2(a)中的数据经处理得到深宽比与作用时间的关系, 如图2(b)所示, 可以看出在相同的功率密度下, 当作用时间大于4ms时, 脉宽的继续增加对深度比变化的影响减弱。

3.3 固态加热时间

图3为根据公式(1)计算所得的光斑原点温度在不同功率密度下达到熔点所需的加热时间, 计算选用表1中室温到熔点的平均热物性参数, 光斑直径取值0.2mm。 图3中的拐点说明: 对于本实验条件, 当激光功率密度小于拐点值时, 材料表面向基体的热传导能量大于表面沉积的能量, 熔化现象不会发生。 参照图4的实验条件, 可以看出, 在相同功率密度条件下, 材料表面

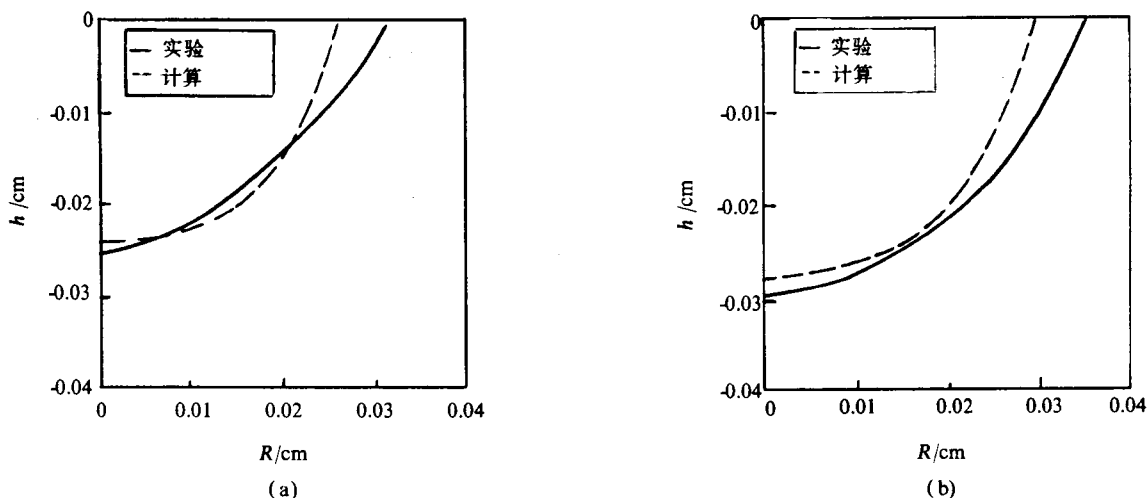


图1 熔池轮廓 (3.03J × 2ms)

(a) 熔凝区轮廓 (b) 相变区轮廓

Fig.1 Pool outlines (3.03J × 2ms)

(a) Remelted zone (b) Hardened zone

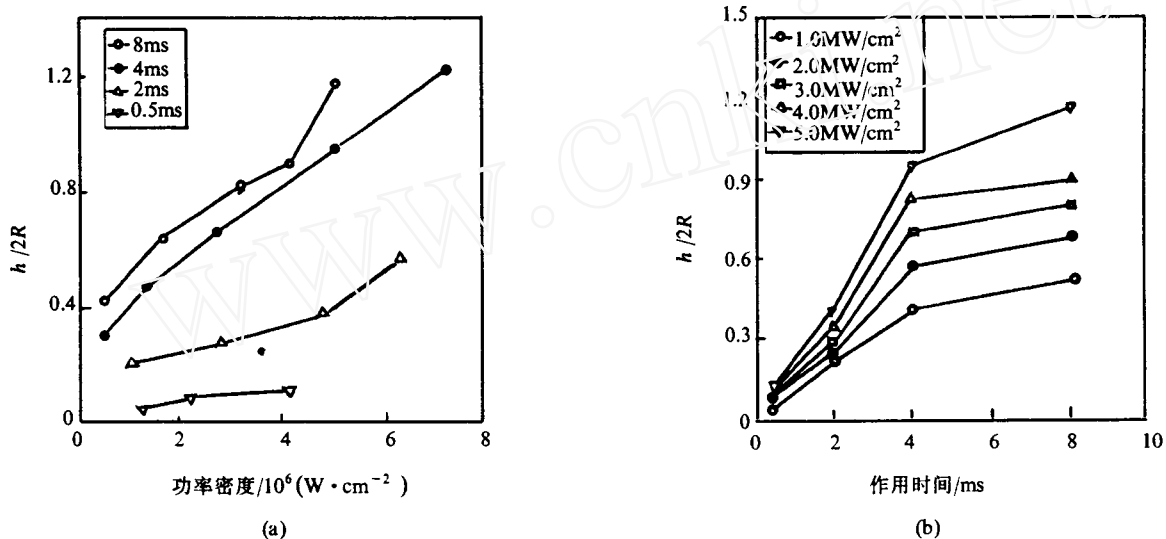


图2 功率密度 (a) 及作用时间 (b) 对熔池深宽比的影响

Fig.2 Influences of power intensity (a) and pulse time (b) upon aspect ratios (depth/width)

开始熔化所需加热时间一般不及相应实验脉宽的5%，因此在激光熔凝计算中的初始固态热传导过程可以忽略。

3.4 熔池几何形态转变

采用表1中的室温到沸点的平均热物理参数，由公式(1)可计算出热传导型激光熔池任意深宽比时功率密度及相应的作用时间。如果选取热传导型向深熔型熔池转变的临界深宽比，可计算获得该转变的临界功率密度和临界作用时间，计算中发现熔池深宽比取0.45时的临界转变

曲线与实验结果吻合良好，图4为该转变曲线及实验点条件，曲线与坐标轴所围区域的熔池深宽比小于0.45。图中显示：当激光平均功率密度大于 $5 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ ，同时激光作用时间大于2ms时，热传导型激光熔池向深熔型激光熔池转变。

4 结论

(1) 实验证明：在激光功率密度和脉宽的显著影响下，可得到热传导型和深熔型两类熔池；在相同作用时间下，随着激光功率密度的增

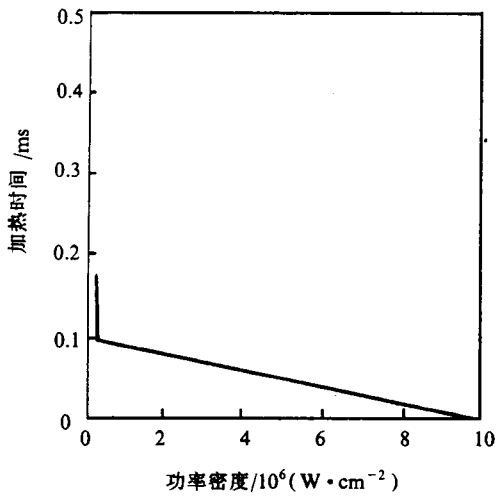


图3 激光熔凝时固态加热时间
Fig.3 Time of heating in solid

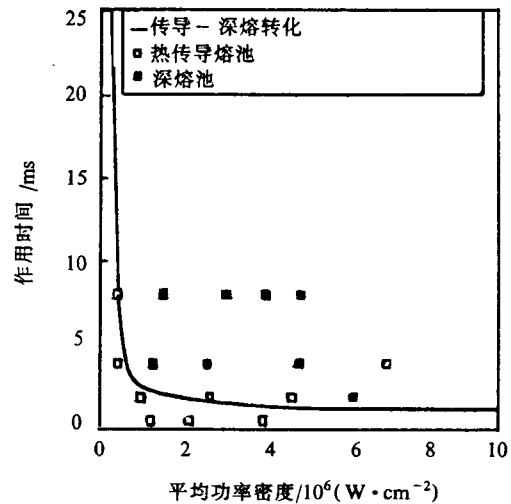


图4 根据深宽比的熔池分类

Fig.4 Classification of molten pool according to aspect ratios

加;当作用时间大于4ms时,功率密度对深宽比的影响减弱。

(2) 计算表明:对材料热物性参数进行平均处理,可较好满足计算需要;脉冲激光熔凝起始阶段的固态加热过程可忽略;铁碳合金在脉冲激光熔凝加工时,当平均功率密度大于 $5 \times 10^5 W/cm^2$,同时激光作用时间大于2ms时,热传导型激光熔池向深熔型激光熔池转变。

参 考 文 献

- 1 陈光南.毛化轧辊的新方法及其应用.应用激光,1996,16,(4):155~158
- 2 Mazumder J, Mohanty P S, Kar A. Mathematical modelling of laser materials processing. Int. J. of Materials and Product Technology, 1996, 11 193~252
- 3 Liu J T, Weckman D C, Kerr H W. The Effect of Process Variables on Pulsed Nd: YAG Laser Spot Welds: Part 1. AISI409 Stainless Steel, Metall. Trans B., 1993, 24B, 1065 ~ 1076
- 4 M. Von 奥尔曼著.激光束与材料相互作用的物理原理及应用.北京:科学出版社,1994. 51
- 5 Carlslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in

- Solids, 2nd.ed, Oxford Univ.Press, Oxford, 1959
- 6 王补宣著.工程传热传质学(上册).科学出版社,北京:1982. 213~215
- 7 罗耕星等.激光快速熔凝中的主要热物理问题,金属材料研究,1997,23,(2),5-9
- 8 朱祖吕,李培耀,俞少罗.钢激光热处理的数值模拟和表面温度场测定.金属热处理学报,1996,17 Suppl, 109 ~ 115
- 9 陈家祥编著.炼钢常用图表数据手册.北京:冶金工业出版社,1984,242,469
- 10 陈家祥主编.连续铸钢手册.北京:冶金工业出版社,1991,255
- 11 马宏声编著.金属及合金的熔炼与铸锭(上)(教材).东北工学院加工系,1987,6~59
- 12 W.M. 罗森诺等主编.传热学手册(上册).科学出版社,1985,114
- 13 Bloehs W et al. Recent Progress in Laser Surface Treatment: I. Implications of laser wavelength, Journal of laser application, 1996, 1(8): 15 ~ 23
- 14 Ion J C et al. Diagrams for Laser Materials Processing, Acta Metall. Mater., 1992, 40(7): 1539 ~ 1551

Effect of Power Intensity and Pulse Time on Remelting Characteristics in Pulsed Nd:YAG Laser Spot Processing

Luo Gengxing Wu Xiaolei Chen Guangnan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Geometrical characteristics of melted pools were studied as for Nd:YAG pulse laser spot remelting. The experimental results showed: the depth/width ratio of pool increased significantly with the power intensity; when the pulse time surpassed 4ms, the influence of power intensity on the depth/width ratio became weak. From the liner heat conduction model, the calculated results of the steel showed that a heat conduction-type pool would become a deeper pool when critical power intensity and critical pulse time surpassed $5 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ and 2ms. The theoretical prediction was well consistent with experimental results.

Key words pulse laser remelting; geometrical characteristics of melted pool; heat conduction; heat physical properties

(上接第5页)

self-designed rotating circular disk tensile and impact apparatus. An experimental study of Fe_3Al was performed at the strain rate ranging from 30s^{-1} to 1200s^{-1} and complete stress-strain curves are obtained for Fe_3Al under tensile and impact. It can be seen from the results, that Fe_3Al obviously has dynamic ductility and effect of strain-rate hardening. The yield strength, the ultimate strength and the failure strain increase with the increasing of strain rate. From the linear least-squares fit, the relationship between the yield strength, the ultimate strength, the failure strain and strain rate are obtained under tensile and impact. At the same time, we derived one-dimensional macro-constitutive equation for Fe_3Al under tensile impact according to the elastic-viscoplastic constitute theory. At room temperature, the observation of the fracture surface on SEM showed that the dominant fracture process in the formation of transgranular cleavage and grain-boundary cracks. The major factor of failure on Fe_3Al is hydrogen embrittlement. We observed that the grain size on the fracture surface decreases at higher strain rates. In addition, we proved that water can improve the process of hydrogen embrittlement.

Key words tensile impact; Fe_3Al ; dynamic ductility; transgranular cleavage