

重力方向变化对激光加工的影响

左都罗 李适民 邬鹤清 文捷

(华中理工大学激光加工国家工程研究中心, 武汉, 430074)

摘要: 本文从理论上研究了重力方向变化对激光加工的影响。熔池有一沿重力方向移动的趋势, 不同的重力方向, 熔池有不同的表面形状。熔池表面温度变化率越小, 这些效果越明显。

关键词: 重力 激光加工

Effects of gravity direction on laser processing

Zuo Duluo, Li Shimin, Wu Heqing, Wen Jie

(National Engineering Research Center for Laser Processing, HUST)

Abstract: The effects of variety of gravity direction on laser processing are studied in the paper. The melting zone has a tendency moving along with the gravity direction, so it has a different surface when the gravity direction is different. The lower the gradient of temperature on the surface, the clearer these effects.

Key words: gravity laser processing

一、引言

激光加工的热物理过程及激光加工参数对材料特性的影响已有了大量的研究结果^[1,2]。但对重力方向变化的影响却很少关注。研究者一般把重力包含在一项体积作用力^[2,3]

$$f = -\rho g \beta (T - T_d) \quad (1)$$

之中。式中, ρ 是流体密度, g 是重力加速度, β 是体积膨胀系数, T 是温度, T_d 为固液相平衡温度。(1)式暗示, 熔池周边的固液交界面能提供大小 $\rho g \cdot r + C$ 的压强维持熔池的稳定, 该压强是浮力的根源。温度 T 的流体体积元 ΔV , 将受到浮力 $-\rho g \Delta V$, 由于体积膨胀, 该体积元的密度变为 $\rho[1 - \beta(T - T_d)]$, 重力和浮力的合力即为(1)式表示的体积力。

我们认为, 体积力只在激光加工面水平, 并且不考虑熔池 Marangoni 力产生的形变时成立。若加工面和水平面有一定的夹角, 或考虑熔池的表面形变, 则(1)式不成立。如加工面竖直时, 由于自由边界是等压线, 流体无法提供(1)式所需的浮力, 流体平衡靠自由边界形变产生的表面张力维持。这时, 自由边界的形状和加工面水平时不一样, 流场和温度场与加工面水平时有区别, 最后材料特性也不会相同。最近, Hopkins 报道, 激光深透焊的钥匙孔在重力条件下较陡, 在微重力条件下平缓^[4]。这一结果从侧面证实了我们的判断。

本文给出了激光加工物理模型处理重力的理论推导, 并利用有限元方法求解了二维激光作用区的温度场和流场, 得到了熔池自由边界形貌和重力方向变化影响熔池表面形状的规律。

二、理论推导

图1给出了下面的理论推导中使用的坐标系及 V, g 等物理量的相互关系。为简便起见,

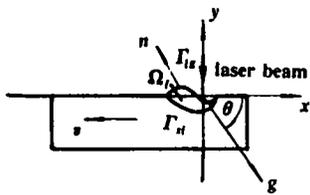


Fig.1 Two-dimensional coordinate system and relative position of each physical quantity in laser melting

本文仅考虑激光熔化情形。标准的熔池 Ω_1 内的稳态 Navier-Stokes 方程为(本文借鉴了文献[2]的符号体系):

$$\rho(V_1 \cdot \nabla) V_1 - 2\mu \nabla \cdot D(V_1) + \nabla P_1 = \rho g [1 - \beta(T - T_d)] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot V_1 = 0 \quad (3)$$

V_1 的边界条件为: 固、液边界 Γ_d 处, $V_1 = V_\infty$, 液、气边界处, $V_1 \cdot n = 0$ 。文献[2]中的压力 p_1 和本文的压力 P_1 有如下关系:

$$P_1 = p_1 + \rho g \cdot r + C \quad (4)$$

C 为一待定常数。本文的 P_1 才是真正意义上的压力, 文献[2]的 p_1 是一种等效压力。

为提高计算精度, 把动量方程化为:

$$\rho(V_1 \cdot \nabla) V_1 - 2\mu \nabla \cdot D(V_1) + \nabla (P_1 - \rho g \cdot r) = -\rho g \beta (T - T_d) \quad (5)$$

采用罚式方法 (penalty method)^[5] 处理速度的无旋约束, 即

$$P_1 - \rho g \cdot r = -1/\epsilon_p \nabla \cdot V_1 \quad (6)$$

式中, ϵ_p 是一小量。注意文献[5]推导罚式约束时, (6)式右端是单独的压力 P_1 。实际上, 只要是 ϵ_p 足够小, (6)式左端使用 P_1 还是 $P_1 - \rho g \cdot r$ 对速度场影响不大。由于对速度无旋约束用了罚式处理, 则对激光熔化时法向速度为零的约束应用下式代替:

$$\sigma_n = -(V_1 \cdot n) / \epsilon_n \quad (7)$$

为避免跟踪固-液界面, 还利用罚式方法在整个区域对速度求解。在动量方程的固相区添加一项源:

$$i = (V - V_\infty) / \epsilon_s \quad (8)$$

使固相速度近似于加工面的移动速度, (8)式中 ϵ_s 也是一个小量。

同样, 我们采用有限元法迭代求解(5)式, 对(5)式两端乘以权重函数 W_h , 利用格林公式积分, 得有限元的迭代方程式:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} [(\rho(V_h - v_h) \cdot W_h + \rho \tau (v_h \cdot \nabla) V_h \cdot W_h + 2\tau \mu_1 D(V_h) : D(W_h))] dx \\ & + \int_{\Omega} \frac{\tau}{\epsilon_p} (\nabla \cdot V_h) (\nabla \cdot W_h) dx + \int_{\Omega} \frac{\tau}{\epsilon_s} (V_h - V_\infty) \cdot W_h dx \\ & + \tau \int_{\Gamma_{lg}} \left[\frac{1}{\epsilon_n} (V_h \cdot n) - \rho g \cdot r \right] (W_h \cdot n) ds \\ & = -\tau \int_{\Omega} \rho \beta (T - T_d) g \cdot W_h dx + \tau \int_{\Gamma_{lg}} \frac{d\gamma_{lg}}{dT} \cdot \frac{\partial T_h}{\partial \tau} \cdot (W \cdot \bar{\tau}) ds \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式左端第六项中的 $-\rho g \cdot r$ 反应了重力方向变化的影响。如果加工面水平, 且不考虑熔池表面的变化, 则表面上 $-\rho g \cdot r = \text{常数}$, 可归入待定常数 C 中, 这时(9)式和文献[2]中的(30)式

一致, 如果上述两个条件不满足, 当 $\rho g \Delta H \sin \theta$ 与 $\frac{d\gamma_{lg}}{dT} \frac{\partial T}{\partial \tau}$ 可比拟时(角 θ 的定义见图 1), 重力方向变化会有明显影响。

三、计算结果与讨论

附表给出了我们在计算中用到的物理量的值(主要引自文献[1])。对激光功率和移动速度, 我们仅给出了两种组合的结果(A: $v = -0.01\text{m/s}$, $P = 0.6 \times 10^5\text{W/m}$; B: $v = -0.001\text{m/s}$ 。

$P = 0.26 \times 10^5 \text{ W/m}$)。图2给出了不考虑边界变化的激光加热金属板的等温线图(情形A)。图中在激光器($x = 0$)的左端有一等温区。这一等温区是重力对熔池施加影响的关键。从第二节的理论推导中我们知道,如果在熔池边界处处满足 $\rho g \Delta H \sin \theta$ 远小于 $\frac{d\gamma_{lg}}{dT} \frac{\partial T}{\partial \tau}$, 则重力的影响可忽略不计。但在等温区, 上面的条件不满足, 重力要由粘滞力来平衡, 因此重力将对熔池产生重要影响。

图3给出了A条件下重力方向与水平线夹角 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 时自由边界的形状。图4给出了B条件下重力方向与水平线夹角 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 时自由边界的形状。在图3和图4可看出, 重力方向对自由边界有较明显的影响, 熔池在重力作用下出现了重心移动。这一点图3最明显。

$\theta = 90^\circ$ (通常的情形), 运动方向前端(图3的左面)的凸起高于右端的凸起, 当重力方向与运动方向一致时, 前端突起

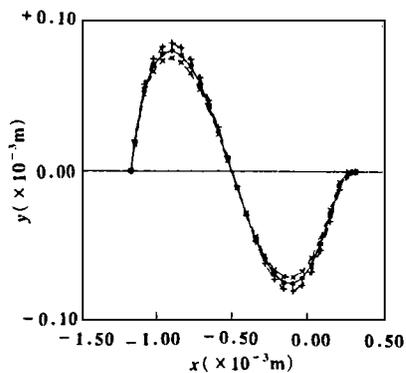


Fig. 3 Free boundary curves at different gravity direction when $v = 0.01 \text{ m/s}$
 $\times - \theta = 0^\circ$
 $* - \theta = 90^\circ$ $+ - \theta = 180^\circ$

更高, 但当重力方向与运动方向相反时, 前端的突起反而低于后端的突起。

决定重力方向变化影响自由边界程度的不只是单独的移动速度, 而是由移动速度, 激光功率密度等因素综合决定的熔池表面的最大温度变化速率 $(\partial T / \partial \tau)_{\max}$ 。情形A, $(\partial T / \partial \tau)_{\max} = 3.46 \times 10^6 \text{ K/m}$, 情形B, $(\partial T / \partial \tau)_{\max} = 1.30 \times 10^6 \text{ K/m}$, 因此重力方向变化对B的影响, 比情形A明显得多。

Table Physical data

specific heat	c_p	421.24	J/kgK
thermal conductivity	k	14.7	W/mK
density	ρ	8380	kg/m ³
latent heat	l_d	2.983×10^5	J/kg
fusion temperature	T_d	1573	K
surface tension coeff.	γ	0.5	N/m
surface tension deriv.	$d\gamma/dT$	-3.0×10^{-4}	N/mK
liquid thermal expansion coeff.	β	1.0×10^{-4}	1/K

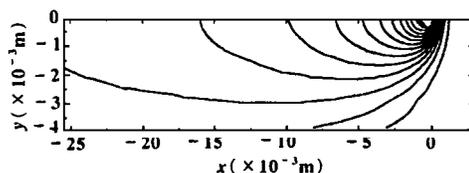


Fig. 2 Laser melting isotherms in the whole calculation domain, from 100 to 1300°C, by step of 100°C. The shade area is the isothermal zone of 1300°C

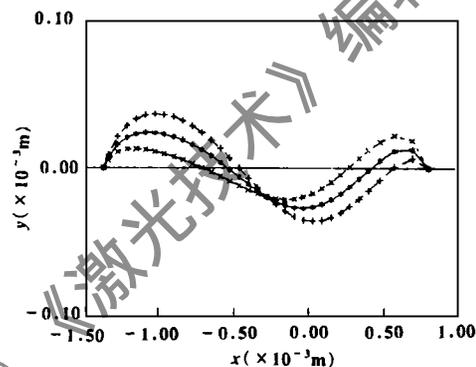


Fig. 4 Free boundary curves at different gravity direction when $v = 0.001 \text{ m/s}$
 $\times - \theta = 0^\circ$
 $* - \theta = 90^\circ$ $+ - \theta = 180^\circ$

参考文献

- 1 Mazumder J, Kar A. Laser Applications for Mechanical Industry, NATO ASI Series, Series E, Applied Sciences, 1992; 238:47~76
- 2 Piccaso M, Hoadley A F A. Inter J of Numerical Heat & Fluid Flow, 1994;4(1):61~83
- 3 Zacharia T, David S A, Vitek J M et al. Welding Journal, 1989;68(12):499-s~509-s

KrF 准分子激光烧蚀氧化镁单晶的实验研究

范永昌 P.E.戴尔* P.H.凯夷*

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

*(英国赫尔大学应用物理系)

摘要: 本文采用光谱学和离子探针等检测手段, 对 KrF 准分子激光烧蚀氧化镁单晶的物理过程进行了实验研究。结果表明, 激光烧蚀等离子体内的主要粒子形态是镁原子和一价的镁离子, 其粒子的动能可在 30~45eV 范围。从烧蚀部位的扫描电镜形貌分析表明, 在激光能量密度近于烧蚀阈值时, 激光辐照的氧化镁单晶表面呈现出一定程度的层离特征。

关键词: 激光烧蚀 氧化镁单晶 光谱测量

Experiment studies of laser ablation of magnesium oxide crystal

Fan Yongchang, P. E. Dyer*, P. H. Key*

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

*(Applied Physics Department, University of Hull, United Kingdom)

Abstract: The Excimer laser ablation of Magnesium oxide crystal was studied by emission spectroscopy and ion probe diagnostic techniques. The experiment results show that the main particle species existed in the laser ablated plasma are Mg atoms and Mg⁺ ions. and their kinetic energy is in the range of 30 to 45eV. A threshold fluence for significant material removal of 3 J/cm² was determined by ablation depth rate measurement, and below this value, surface damage in the form of micro-crack was observed.

Key words: laser ablation MgO crystal spectroscopic analysis

一、引言

由于氧化镁晶体可以作为激光烧蚀沉积 MgO 薄膜的靶材^[1], 因而从实验上研究准分子激光烧蚀氧化镁单晶的物理过程及其基本特点和规律, 对于采用激光沉积法制备出高质量的 MgO 薄膜缓冲层和绝缘层具有指导意义。同时这种研究也将为高温超导——MgO 多层膜结构体系后续的激光制版及微加工提供实验参数。

基于以上考虑, 作者采用 248nm KrF 准分子激光对氧化镁单晶进行了烧蚀研究, 首次观察到氧化镁单晶表面呈现出的层离特征。

-
- 4 Hopkins J A, McCay J D, McCay M H *et al.* Proc of the 1993 ASME Winter Annual Meetings, New Orleans, LA, USA, 1993:17~24
 - 5 Cuvelier C, Segal A, Van Steenhoven A A. Finite element methods and Navier-Stokes equations. Holland:D. Reidel Publishing Company, 1986:263~287