

重复频率激光辐照涂层金属材料的温升*

袁永华 刘常龄 王伟平 刘自强 任小彬

(中国工程物理研究院流体物理研究所强辐射实验室, 成都523信箱, 610003)

摘 要 测量了重复频率 YAG 激光辐照涂层金属材料(30CrMnSiA 钢和LF6M 铝壳体)的前后表面温度, 分析了不同频率激光辐照涂层壳体材料的温升特性。实验结果表明: 在相同平均功率的条件下, 激光脉冲频率越高, 对材料的加热效率越明显, 重复频率激光对材料的加热优于连续激光。

关键词 重复频率激光 涂层金属材料 热成像 温升

ABSTRACT R thermal imaging system is used to measure the front and rear surface temperature distribution of the coated metal (30CrMnSiA steel and LF6M alloy) irradiated by repetitive frequency (RF) laser. The characteristics of temperature increase with laser irradiation time are analyzed in this paper. The experiment results show that the rear surface temperature of metal is mainly dependent on laser average power when target thickness is more than 1.6mm. The higher the laser pulse frequency is, the higher the efficiency of laser heating metal has. RF laser heating material is better than CW laser does.

KEY WORDS repetitive frequency laser, coated metal, thermal imaging, temperature rise

激光辐照在材料上, 表面薄层(趋肤深度)吸收激光能量, 温度很快上升。其热耦合效应不仅与激光波长、脉宽、光束质量和材料表面特性有关, 而且还与激光脉冲的结构有关。重复频率激光辐照金属材料, 其机理与单脉冲或连续激光作用有所不同, 重复频率激光辐照材料过程中, 材料吸收入射激光能量呈现间歇式的积累加热效应^[1]。本文研究重复频率激光脉冲辐照带有涂层的金属材料(30CrMnSiA 钢和LF6M 铝合金壳体)产生的温升, 以及不同频率激光辐照涂层金属材料的热耦合特性。

1 重复频率激光对材料加热的一维模型

设激光沿 z 轴方向入射, $z=0$ 为激光辐照面, 材料厚度为 L , 材料吸收的功率密度为 $F(t)$, 材料对激光的吸收作面处理。不考虑相变发生后的影响, 材料吸收入射激光能量产生的温升可由一维热传导方程描述^[2]

$$\frac{\partial T}{\partial z^2} - \frac{1}{K} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

及边界条件

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = F(t), \quad -K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (2)$$

式中 κ 、 K 分别是材料的热扩散系数和热导率。有效吸收功率密度为 $F(t) = (1-R)P/S = P_a/S$

* 国家863激光技术领域资助课题。
1997年4月10日收到原稿, 1997年7月6日收到修改稿。
袁永华, 男, 1955年1月出生, 高级工程师

$= F_0$, 其中 P 和 P_a 分别是入射激光功率和材料有效吸收的激光功率, S 为激光辐照材料的光斑面积; R 为材料表面对入射激光的反射系数, 与涂层材料的特性有关。涂层材料为一薄层, 在激光辐照数秒的过程中, 其对温升的影响可以忽略。

引进 Green 函数 g , 它给出了单位能量的“瞬时”热源产生的温度分布, 对于一个给定有效吸收功率 P_a 的连续热源的瞬态温度分布可写为

$$T(z, t) = P_a \int_0^t g_{us} dt \quad (3)$$

其中, g_{us} 为均匀表面源的 Green 函数。如果把激光脉冲辐照材料后冷却过程也考虑进去, 将 (3) 式中的积分在脉冲周期以外展开。如考虑均匀表面源, 其矩形脉宽为 t_p 。激光脉冲作用过程中和脉冲过后的温度分布为^[3]

$$T(z, t) = \frac{2F_0 K^{1/2}}{K} \{ t^{1/2} \text{ierfc}[\frac{z}{2(Kt)^{1/2}}] - (t - t_p)^{1/2} \text{ierfc}[\frac{z}{2K(t - t_p)^{1/2}}] \} \quad (4)$$

现在考虑重复频率激光为一系列矩形脉冲, 脉宽为 t_p , 脉冲间隔为 ΔT , 根据方程 (4), 可以写出重复频率激光脉冲辐照金属材料的温度分布满足

$$T(z, t) = \frac{2F_0 K^{1/2}}{K} \{ t^{1/2} \text{ierfc}[\frac{z}{2(Kt)^{1/2}}] + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (t - t_n)^{1/2} \text{ierfc}[\frac{z}{2K(t - t_n)^{1/2}}] \} \quad (5)$$

$$t_n = \frac{n}{2}(t_p + \Delta T) \quad (n = 2, 4, 6, \dots); \quad t_n = \frac{n+1}{2}t_p + \frac{n-1}{2}\Delta T \quad (n = 1, 3, 5, \dots)$$

图1给出了典型的重复频率激光辐照硅型片时的加热响应^[4]。从图中看出: 重复频率激光对材料加热的温升存在明显的间歇振荡, 并且与激光脉冲的频率、脉宽和微结构有关。

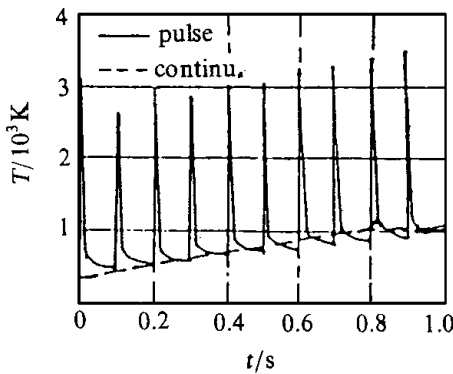


Fig 1 The thermal response of Si plate irradiated by RF laser

图1 硅型片对脉冲加热的响应

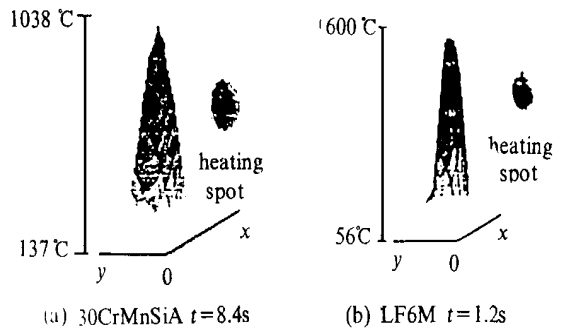


Fig 2 A three dimensional temperature of coated metal irradiated by RF laser beam for diameter 14mm, power 300W, RF 80Hz, pulse width 0.3ms

图2 激光辐照涂层壳体材料的三维温度场

2 实验安排和结果分析

激光束由重复频率或连续 YAG 激光器输出, 脉冲宽度和间隔与重复频率有关 (80Hz 对应 0.3ms, 10Hz 对应 2ms)。用激光功率计监测到达涂层壳体材料上的辐照功率, 靶材上的光斑直径 $\Phi 4\text{mm}$ 。实验样品的涂层工艺为: 首先对金属壳体材料表面进行处理, 并涂 H06-2/HG2-605-84 锌黄环氧树脂底漆, 然后分别再对 30CrMnSiA 钢壳体 (厚度 2mm) 表面喷浅兰色

防锈漆, LF6M 铝合金壳体(厚度1.6mm)表面喷深灰色海防漆。用红外热像仪测量激光辐照涂层壳体材料的前后表面温度。由同步控制器实现重复频率(或连续)激光与红外热像仪的同步触发。图2给出了在激光辐照涂层壳体材料过程中,用红外热像仪拍摄的前表面热斑三维温度场图象。实验使用激光束束径14mm,功率300W,重复频率80Hz,脉宽0.3ms。

根据在重复频率80Hz条件下,拍摄的不同平均功率激光辐照涂层壳体材料的红外热像图,图3给出了相应涂层壳体表面温度随激光辐照时间的变化曲线。从图中可以看出:在高重复率激光辐照涂层壳体材料过程中,单个激光脉冲辐照材料后的冷却散热影响很小。当辐照激光功率较低时(如80W),壳体前表面呈现间歇温升,LF6M比30CrMnSiA的温升振荡更明显。当入射激光功率足够(如300W)时,前表面温度几乎呈线性增加。

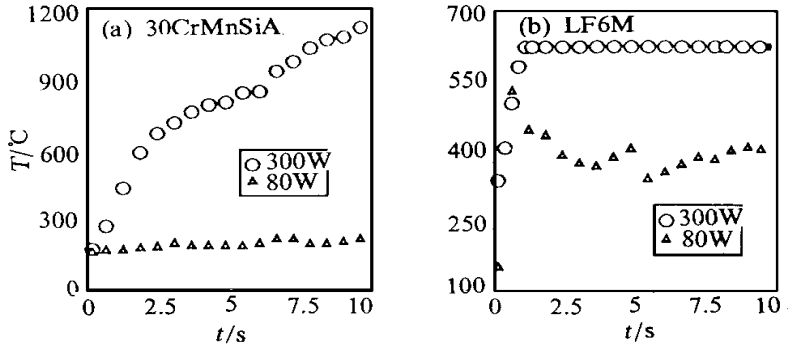


Fig 3 The front temperature rise of coated metal irradiated by the different average power laser

图3 不同平均功率激光辐照涂层壳体材料的前表面温升

图4给出了在相同平均功率激光辐照涂层壳体材料过程中壳体前后表面的温升。从图中的曲线可以看出:即使重复频率激光辐照涂层壳体材料前表面出现明显的间歇振荡升温,但对壳体后表面的温升来说,由于热传导使温升明显降低,前表面的间歇加热对后表面的温升影响很小。

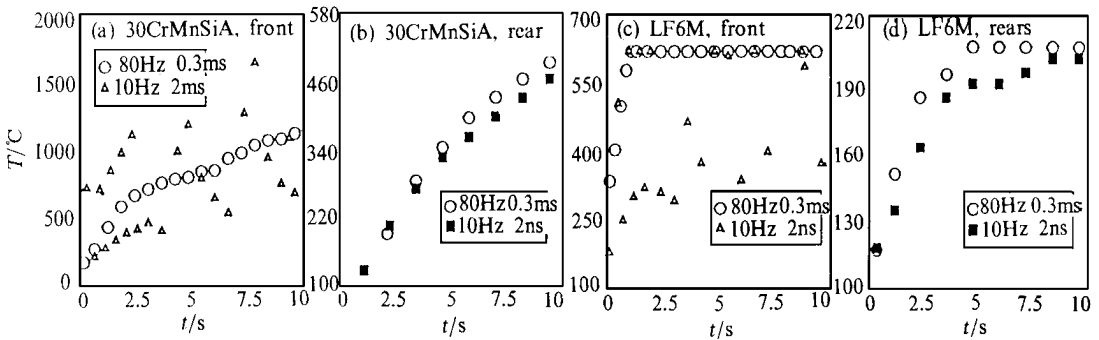


Fig 4 The front and rear surface temperature of coated metal irradiated by RF laser

图4 不同重复频率激光作用下,两种壳体材料前后表面的温升

图5给出了在平均功率80W条件下,不同频率激光辐照涂层壳体材料的表面温升随激光辐照时间的变化。从图中的曲线可以看出:在低重复频率下,激光脉冲辐照靶材产生的前表面温度随微脉冲结构呈强烈的周期振荡升温。激光脉冲一来,温度迅速上升,激光脉冲结束后,由于热量向靶内传导及靶面与环境对流、辐射换热造成热损失,使得靶面温度快速下降。随着激光脉冲重复频率的增加,这种温升振荡特性逐渐减弱,以致用连续激光辐照靶材时,温升振荡特性就消失了。脉冲频率越低,激光脉冲对涂层壳体材料的间歇加热效应越明显;连续

激光比重复频率激光对材料的加热效率低。这主要是由于重复频率激光在对壳体材料加热过程中瞬时功率密度较高造成的。

综上所述,激光重复频率决定了涂层壳体材料前表面产生的间歇加热效应的温度分布。对靶厚大于1.6mm的样品来说,其后表面的温升不会出现类似于前表面的明显振荡升温。壳体后表面的温度将主要依赖于辐照壳体的平均激光功率。

激光对涂层壳体材料的加热效率表明:在相同平均功率下,激光脉冲越多,材料加热效率越明显。重复频率激光对材料的加热明显优于连续激光,这主要是瞬时激光脉冲功率密度较高造成的。

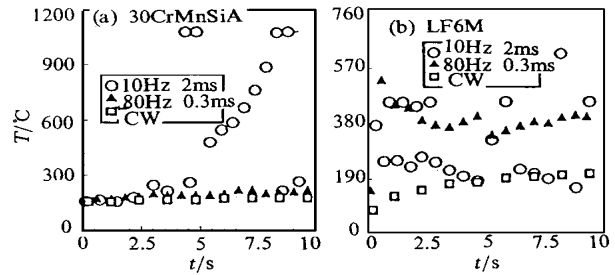


Fig 5 The front temperature of coated metal irradiated by the different frequency laser under low power: average power 80W, beam diameter 14mm

图5 低功率下不同频率激光对涂层壳体材料前表面的加热

参考文献

- 1 Legner H H et al A IAA 24th Plasma Dynamics Laser Conference, Orlando, 1993
- 2 Schriempf J T. AD-785010
- 3 (德)M Von 奥尔曼著 漆海滨等译 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
- 4 Mezines S A and Fived H J. Thermal performance of material exposed to pulsed laser heating A IAA - 81- 1149

THE TEMPERATURE RISE OF COATED METAL IRRADIATED BY REPETITIVE FREQUENCY YAG LASER

Yuan Yongha, Liu Changling, Wang Weiping, Liu Ziqiang, Ren Xiaobin

Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu 610003

A one-dimensional model is assumed to evaluate the temperature rise of materials irradiated by repetitive frequency (RF) laser. The results show that the RF laser heating material is obviously characterized by oscillating rise and depends on the frequency of laser pulses, pulse duration and wave structure. Thermal imaging system is used to measure the front and rear surface temperature distribution of the coated metal (30CrMnSiA steel and LF6M alloy). The temperature rise characterization and the variable heating spot with laser irradiation time are analyzed in this paper. The experiment results show that the rear surface temperature of metal is mainly dependent on laser average power when target thickness is more than 1.6mm. Different pulse frequency has little influence on target rear surface temperature under high average power. The higher laser pulse frequency is, the higher the efficiency of laser heating metal is. RF laser heating material is better than CW laser does.