

文章编号: 1001-3806(2012)06-0828-04

金属材料脉冲激光辐照瞬态温度场数值模拟研究

裴旭 吴建华

(淮阴工学院 江苏省数字化制造技术重点实验室, 淮安 223003)

摘要: 为了研究脉冲激光辐照金属材料时温度场的变化, 采用有限元模拟软件对激光辐照材料的过程进行了模拟。得到了激光辐照过程中, 材料表层及内部的瞬态温度场的变化情况。结果表明, 在脉冲激光辐照金属材料过程中, 激光热作用时间很短, 热影响区仅限于激光光斑作用区域的材料表层。

关键词: 激光技术; 激光辐照; 温度场; 有限元模拟

中图分类号: TG156.99 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.029

Numerical simulation of transient temperature field on metal material induced by pulse laser irradiation

PEI Xu, WU Jian-hua

(Jiangsu Province Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract: In order to study the temperature field on metal material induced by pulse laser irradiation, the finite element simulation software was introduced to simulate the process of laser irradiation. The material surface and internal changes of the transient temperature field was obtained. The results show that the time of hot effect is very short in the laser irradiation process, and the heat affected zone is limited to material surface of laser irradiation area.

Key words: laser technique; laser irradiation; temperature field; finite element simulation

引言

激光作为一种技术手段, 被广泛应用于医疗^[1]和工业应用研究^[2-4]等领域。激光加工的质量主要取决于激光参量、材料参量及加工条件^[5]。由于激光加热和冷却速率都极快, 分别可达到 $10^3 \text{ K/s} \sim 10^6 \text{ K/s}$ 和 10^5 K/s ^[6], 因此, 对激光加工瞬态过程进行完整、准确地控制和测试十分困难, 对其研究也主要集中于理论研究领域^[7]。为提高激光加工的质量, 研究其瞬态过程, 就需要建立相应的理论模型或数值模拟模型来进行研究。此研究对激光表面熔覆^[8]及激光焊接^[9]等技术的发展具有重要意义。

本文中利用有限元分析软件 COMSOL, 通过建立数值模拟模型, 研究了脉冲激光与金属铝相互作用时的瞬态温度场变化; 得到了脉冲激光作用过程中, 材料内部的瞬态温度分布及扩散情况, 为实际应用提供相关参考。

1 激光、材料参量及加载模型

加载的激光功率 $P_0 = 3 \times 10^9 \text{ W}$, 光斑半径为 $r_0 = 1 \text{ mm}$ 。激光的能量分布为高斯分布, 其分布函数为:

$$Q_0 = 1 \times 10^2 \cdot P_0 \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \quad (1)$$

式中 Q_0 为激光能量, P_0 为激光功率, r_0 为光斑半径, r 为距光斑中心的距离, t_0 为激光脉宽, t 为激光作用时长。

加载材料为一块 $1.1 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 的铝金属薄板, 铝材料的相关性能参量如表 1 所示。模拟时采用 2 维模型, 建立一个与薄板横切面等大小的模型, 网格采用 COMSOL 系统自动生成的三角网格。薄板模型与加载的激光能量分布情况如图 1 所示。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075173); 江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金资助项目(GZ200901)

作者简介: 裴旭(1983-), 男, 硕士, 主要从事激光冲击技术与理论方面的研究。

E-mail: peixuu@126.com

收稿日期: 2012-03-08; 收到修改稿日期: 2012-03-26

Table 1 The parameters of aluminum metal

| heat capacity $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$ | melting point /K | heat of fusion $/(J \cdot kg^{-1})$ | density $/(g \cdot cm^{-3})$ | vaporizing point/K | thermal conductivity $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ |
|--|---------------------|--|---------------------------------|-----------------------|--|
| 0.88×10^3 | 933.52 | 3.98×10^5 | 2.702 | 2740.15 | 237 |

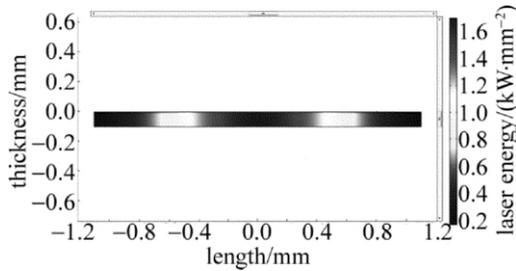


Fig. 1 Laser energy distribution on the metal sheet

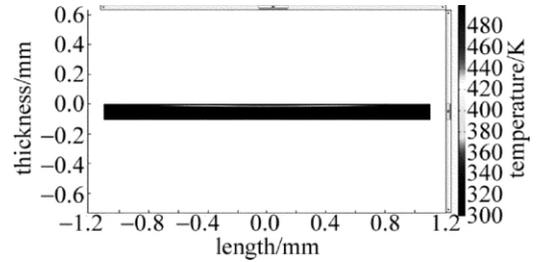


Fig. 2 Temperature distribution after loading

2 有限元模拟结果及分析

激光加载后,得到的最终温度场分布如图 2 所示。从图中可以看出,温度分布在材料表层很薄的一层。可见激光作用时,只作用在材料的表层,对材料内部不会产生较大影响。

下面看光斑内温度随时间变化的分布情况。在光斑中心表层及不同深度的点处($1 \times 10^{-6} m$, $1.5 \times 10^{-6} m$, $2 \times 10^{-6} m$ 点处)得到它们的温度随时间变化分布状况如图 3a 所示。从图中可以看出,在材料表层的

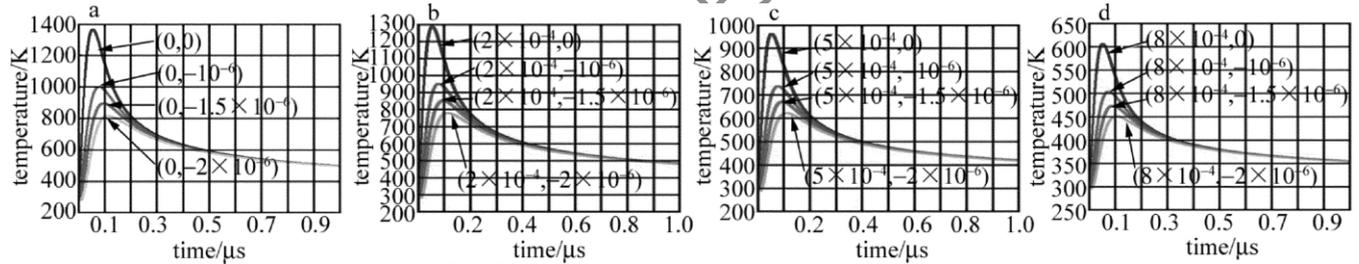


Fig. 3 Temperature change of the laser flare center on the material surface and the spots at different distance below the laser flare center
a—laser flare center b—0.2mm to the center c—0.5mm to the center d—0.8mm to the center

前面图 3 是不同点处温度随时间变化的情况,为了观测到整个光斑内温度变化情况,在材料表层取一条贯穿光斑的线段,沿此线段可得到整个光斑内的温度分布变化情况(如图 4a 所示)。因激光加载时温度场有峰值,为了便于看清图中的温度分布变化情况,以 $10^{-7} s$ 为时间分界线,分别观测其前后的温度变化。首先来看 $10^{-7} s$ 后表面的温度分

布情况,由图 4a 可知,材料表层的温度分布随着时间的增加,在不断降低;在距离材料表层不同深度处,同样也有相似的情况,图 4b ~ 图 4d 分别为距表面 $1 \times 10^{-6} m$, $1.5 \times 10^{-6} m$ 和 $2 \times 10^{-6} m$ 处在 $10^{-7} s$ 之后温度分布变化情况。比较几幅图可以看出,随着深度的增加,光斑中心所达到的最高温度也在不断降低。

布情况,由图 4a 可知,材料表层的温度分布随着时间的增加,在不断降低;在距离材料表层不同深度处,同样也有相似的情况,图 4b ~ 图 4d 分别为距表面 $1 \times 10^{-6} m$, $1.5 \times 10^{-6} m$ 和 $2 \times 10^{-6} m$ 处在 $10^{-7} s$ 之后温度分布变化情况。比较几幅图可以看出,随着深度的增加,光斑中心所达到的最高温度也在不断降低。

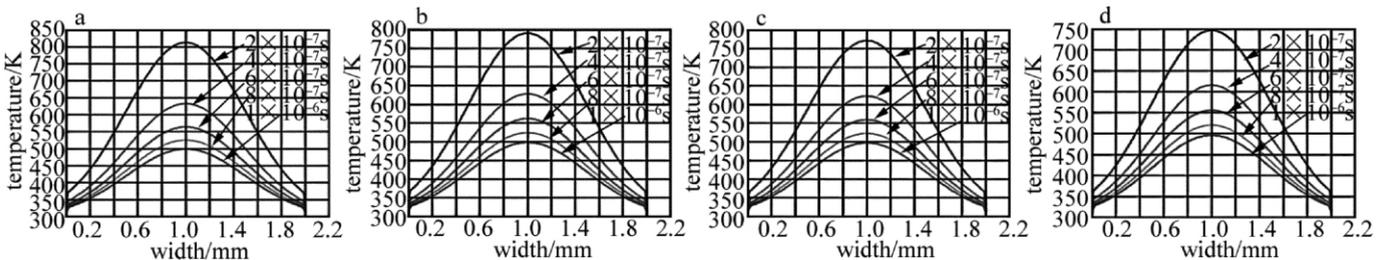


Fig. 4 Temperature distributions on the material surface and down below the surface after $10^{-7} s$
a—material surface b— $1 \times 10^{-6} m$ to the surface c— $1.5 \times 10^{-6} m$ to the surface d— $2 \times 10^{-6} m$ to the surface

前面图4是 10^{-7} s之后的情况。 10^{-7} s前,材料表层光斑内温度分布变化情况如图5a所示,图中给出了 4×10^{-8} s、 6×10^{-8} s、 8×10^{-8} s和 1×10^{-7} s时刻温度分布曲线,从图中可以得到,温度随时间变化规律为先上升,又下降,这是因为所取时间点

出现时刻的前后的缘故。在表面以下不同深度处(如图5b~图5d所示),温度分布情况也出现此现象,只是峰值的时间点分布不同,结合图5a可以得到,这是由于随着深度的增加,相应的时间峰值出现也后移的结果。

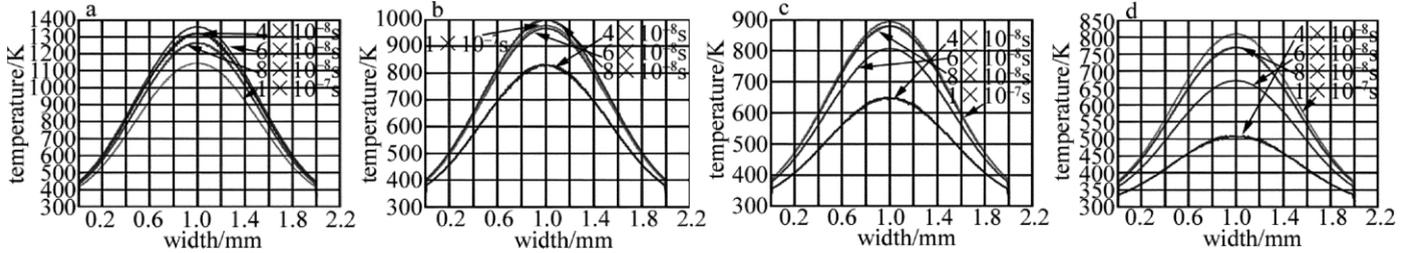


Fig. 5 Temperature distributions on the material surface and down below the surface before 10^{-7} s

a—material surface b— 1×10^{-6} m to the surface c— 1.5×10^{-6} m to the surface d— 2×10^{-6} m to the surface

以上是水平温度分布情况,下面再看竖直方向上的温度变化情况。取一条长为 5×10^{-6} m的竖直线段,从表面贯穿于薄板之中,观察沿此线段温度分布变化情况。为了便于观测,同样以 10^{-7} s作为时间界限,分别观测前后的温度分布变化情况。首先看 10^{-7} s后温度分布变化情况,图6a所示是光斑中心分别在 2×10^{-7} s、 4×10^{-7} s、 6×10^{-7} s、 8×10^{-7} s和 1×10^{-6} s时刻

温度分布的情况。可以看到在前面时段内表面温度较高。随着深度的增加,温度变化较大,表层和薄板内部温差较大。在后面时段内,温度的落差较小,变化趋缓。同样,在距中心 2×10^{-4} m、 5×10^{-4} m和 8×10^{-4} m处,竖直方向上其温度分布变化也有此特点,如图6b~图6d所示。比较几幅图可以看出,随着距中心的距离增加,表层所达到的最高温度也在不断降低。

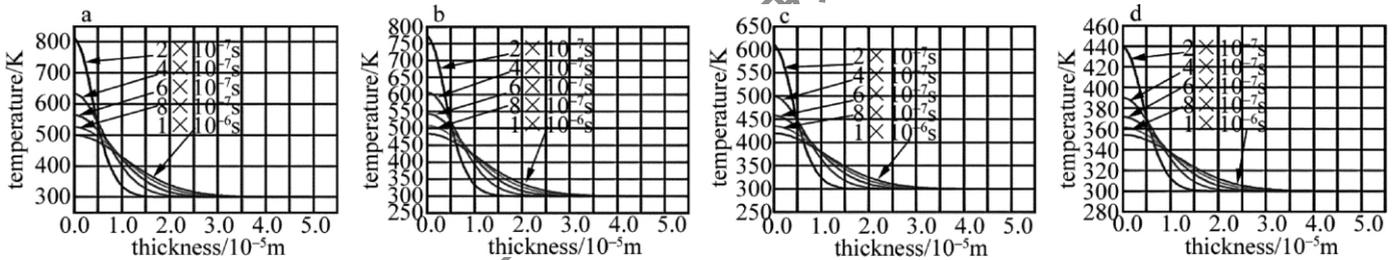


Fig. 6 Temperature distributions of the laser flare center and the spots at different distance from the center in the vertical direction after 10^{-7} s

a—laser flare center b— 2×10^{-4} m to the center c— 5×10^{-4} m to the center d— 8×10^{-4} m to the center

下面再看 10^{-7} s前竖直方向温度分布变化情况。光斑中心处的温度在不同时间的分布情况如图7a所示,图中的4条曲线从下到上分别对应 5×10^{-8} s、 7×10^{-8} s、 9×10^{-8} s和 1×10^{-7} s时刻的温度分布情况。从图中可以看出,温度随深度的变化几乎是呈一次函数分布的,时间越靠前,温度曲线

斜率的绝对值越大,即温度的前后落差越大。在距离光斑中心 2×10^{-4} m、 5×10^{-4} m和 8×10^{-4} m处,竖直方向温度分布变化也有类似的情况,如图7b~图7d所示。且从图7的几幅图中可以看出,随着距光斑中心距离增加,表层所达到的最高温度也在不断降低。

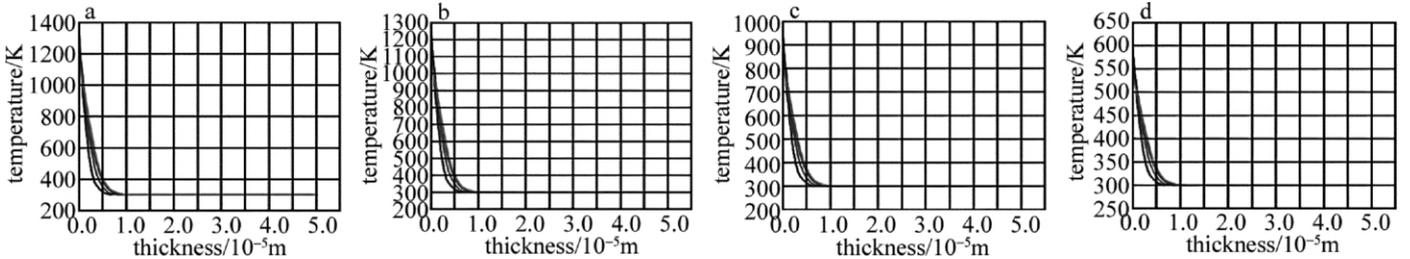


Fig. 7 Temperature distributions of the laser flare center and the spots at different distance from the center in the vertical direction before 10^{-7} s

a—laser flare center b— 2×10^{-4} m to the center c— 5×10^{-4} m to the center d— 8×10^{-4} m to the center

3 小结

从以上的数值模拟和分析可以看出,在脉冲激光

辐照铝金属材料过程中,热作用时间很短,热影响区仅限于激光光斑作用区域的材料表层。热作用区域在极短时间内达到温度峰值,最大热影响深度约为 $3 \times$

10^{-5} m。能量在铝材料内部传输时,其运动分布状态与激光的能量分布状态相似,呈高斯分布,且此现象越靠近材料表面越明显。

参 考 文 献

- [1] TANG F, NIU Y X, ZHANG Ch, *et al.* Calculation of thermal effect in skin-tissue induced by laser [J]. *Laser Technology* 2008 32(5): 542-544(in Chinese) .
- [2] WANG W, ZHANG Y K, LU J Zh, *et al.* Numerical simulation of 3-D nondestructive marking based on laser shock wave [J]. *Laser Technology* 2008 32(1): 38-43(in Chinese) .
- [3] YAN D Y, WU A P, JIAO H J, *et al.* Numerical simulation of residual stress and deformation on laser welding of "grooved-coat" structure [J]. *Transactions of the China Wilding Institution*, 2008, 29(11): 13-16(in Chinese) .
- [4] RUBIO-GONZÁLEZ C, OCANA J L, GOMEZ-ROSAS G, *et al.* Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Materials Science & Engineering*, 2004, 350(1): 291-295.
- [5] XU B Q, WANG H, XU G D, *et al.* Numerical modeling of laser induced molten pool for laser interaction with metal material [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(3): 358-362(in Chinese) .
- [6] CHEN J M, XU X Y, XIAO R Sh, *et al.* Laser modern manufacturing technology [M]. Beijing: Defense Industry Press 2007: 1-286(in Chinese) .
- [7] LI J Ch, MA K, GUI J B, *et al.* The study of image heat source used temperature field calculation in laser heat treatment [J]. *Laser Journal*, 2004, 25(5): 73-75(in Chinese) .
- [8] WANG D Sh, TIAN Z J, SHEN L D, *et al.* Research development of nano-structured coatings prepared by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2008 35(11): 1698-1709(in Chinese) .
- [9] ZHONG M L, LIU W J. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2008, 35(11): 1654-1659(in Chinese) .

版权所有 © 《激光技术》编辑部