

脉冲激光辐照下金属/液体结构温度变化初探

袁立国, 赵国民, 焦路光

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:通过 1053 nm 重频脉冲激光辐照铝合金板和铝合金/水结构实验, 初步研究了水的存在对铝合金板温度变化的影响。采用有限元方法, 计算了脉冲激光辐照下铝合金板和铝合金/水结构中的温度场变化。数值结果和实验结果基本相符, 水的存在加速了热扩散, 延缓了铝合金板的温升。

关键词:脉冲激光; 金属/液体结构; 温度场

中图分类号: TN246 **文献标识码:** A

Preliminary study on the temperature history of metal/liquid structure under pulsed laser irradiation

YUAN Li-guo, ZHAO Guo-min, JIAO Lu-guang

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Experiment is carried out to record temperature history of aluminum alloy slab for single aluminum alloy slab and aluminum alloy chamber containing water, both irradiated by 1053nm pulsed laser. Finite element models are set up to simulate the temperature field variation process, and simulation results agree well with the experimental results. Our work shows that the water in the chamber accelerates thermal diffusion process inside the aluminum alloy slab thus delaying the temperature rise inside the slab.

Key words: pulsed laser; metal/liquid structure; temperature field

1 引言

对于金属材料在激光辐照下的响应规律, 国内外学者从实验和数值模拟方面开展了大量的研究^[1-4]。钟明、王伟平等还分别研究了激光辐照下金属/炸药结构的温度场分布^[5-6]。但激光对装有液体的金属容器(简称金属/液体结构)的辐照效应、液体的存在对金属壳内温度变化的影响尚未见有公开的报道。本文从实验及数值模拟上对脉冲激光辐照金属/液体结构引起的温度变化进行了初步研究。使用波长为 1053 nm 重频脉冲激光分别辐照铝合金板和铝合金/水结构, 用热电偶记录铝合金板后表面的温度变化, 分析了水的存在对铝合金板温度变化的影响。采用有限元方法, 计算了重频脉冲激光辐照下铝合金板和铝合金/水结构中的温度场

分布及变化, 并与实验结果进行了对比。初步分析了影响计算结果的主要因素。

2 实验装置简介

用厚度为 1.5 mm 的 LF21 铝合金制成尺寸为 70 mm × 70 mm 的板试件和 70 mm × 70 mm × 70 mm 的结构试件, 结构试件里面装满水。实验中采用固体热容激光器对试件进行辐照, 激光参数如下: 波长 1053 nm, 单脉冲能量 70 ~ 80 J, 单脉冲宽度约 0.5 ms, 重复频率 1 ~ 10 Hz 可调。图 1 为激光单脉冲输出波形。

作者简介:袁立国(1980 -), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: ylgdream@126.com

收稿日期:2009-07-22; **修订日期:**2009-08-27

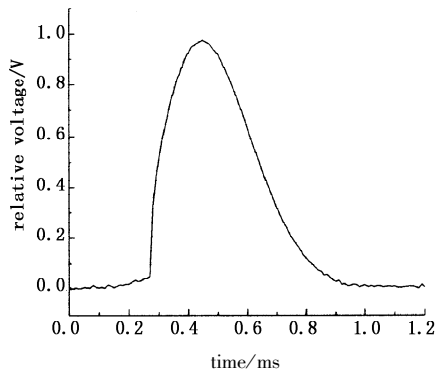


图1 激光单脉冲输出波形

Fig.1 the wave shape of single laser impulse

实验装置简图如图2所示。激光器输出的光束经凸透镜聚焦后在靶面上形成的光斑直径约为20 mm,光斑内激光强度分布基本均匀。在板试件辐照面的后表面中心、距离中心2 mm,6 mm处各焊接一个热电偶,在结构试件激光辐照面的后表面同样焊接三个热电偶。使用OR1400多功能测量仪测量记录各热电偶测点的温度。设置激光器重复频率为10 Hz,脉冲数为20个,进行实验获得实验数据。实验过程中激光辐照铝合金板的单脉冲能量约为72 J,激光辐照铝合金/水结构的单脉冲能量约为78 J。

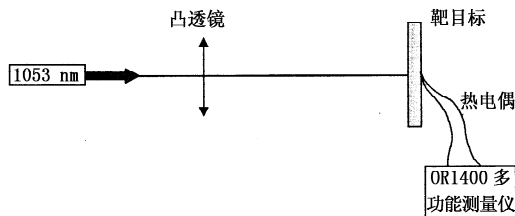


图2 实验装置简图

Fig.2 schematic of experimental setup

3 数值计算方法简介

本文的物理模型如图3、图4所示,直径为20 mm,能量均匀分布的圆形激光光斑分别辐照于铝合金板和铝合金/水结构的前表面。用ANSYS软件进行数值模拟,选用8节点的SOLID70单元类型。考虑到靶目标以及激光光斑的对称性,取模型的1/4进行分析。采用在辐照表面加载热流密度的方法模拟激光辐照,热流密度载荷加载至前表面的单元之上。在计算激光辐照铝合金/水结构引起的温度变化时,对铝合金/水结构采用分层处理,第一层为厚1.5 mm的铝合金板,第二层为厚68.5 mm的水,对水中的换热按照热传导来计算,不考虑水升温后引起的对流换热的影响。计算模型的外边界

均采用绝热边界条件,不考虑周边空气对流、辐射散热的影响。设初始温度为20℃。

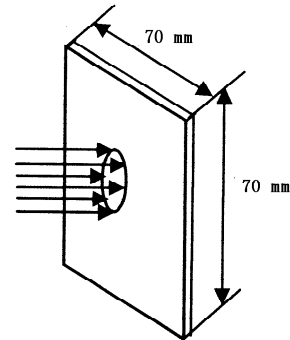


图3 激光辐照铝合金单板物理模型

Fig.3 physical model of aluminum alloy slab under laser irradiation

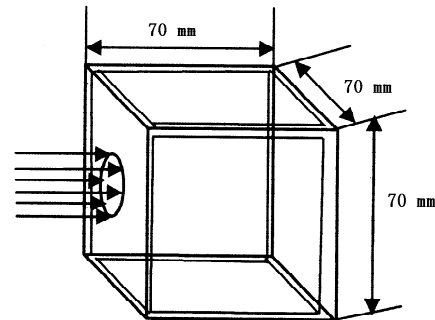


图4 激光辐照铝合金/水结构物理模型

Fig.4 physical model of aluminum alloy/water structure under laser irradiation

LF21 铝合金^[7]和水两种材料的热传导系数、比热容和密度如表1所示。使用U4100分光光度计对铝合金板常温下的反射谱进行了测量,在1053 nm处其反射率约为0.71,所以取能量耦合系数 $\alpha = 0.29$ 。数值模拟中在脉冲作用时间内加载的热流密度值为: $I = \frac{E \cdot \alpha}{\pi \cdot r^2 \cdot t}$,其中, E 为单脉冲能量; r 为光斑半径; t 为脉冲宽度。脉冲作用时间内加载到铝合金板和铝合金/水结构上的热流密度依据实验数据分别取 $1.3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $1.4 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$,脉冲间隔时间的热流密度为0,计算时间均为2 s。

表1 热物性参数

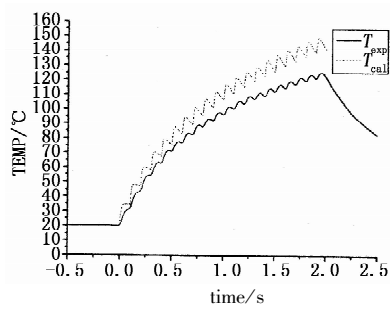
Tab.1 thermal parameters

物理参数	材料	LF21 铝合金	水
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		2730	1000
$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$		1089	4158
$h / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$		180	0.6

4 实验和计算结果分析

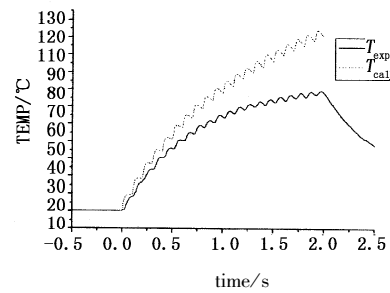
图5(a)、图5(c)、图5(e)分别给出的是铝合金板后表面中心、距离后表面中心2 mm、6 mm处的温度变化曲线, T_{exp} 为实验结果, T_{cal} 为数值模拟结果。从中可以看出在整个辐照过程中数值结果比实验结果略偏大, 主要原因可能有: 在弱光下测的铝合金板能量耦合系数偏大; 计算用的铝合金热物性参数和实验中所用铝合金的热物性参数不相符; 数值模拟计算中没有考虑空气对流和辐射散热的影响。图5(b)、图5(d)、图5(f)分别给出

的是铝合金/水结构中铝合金板后表面中心、距离后表面中心2 mm、6 mm处的温度变化曲线, T_{exp} 为实验结果, T_{cal} 为数值模拟结果。从中可以看出数值模拟计算结果和实验结果偏差较大, 主要原因是数值模拟中仅按照热传导处理了水中换热, 没有考虑水对流换热的影响。在实际的辐照过程中水通过热传导吸收壳体的热量, 体积膨胀、密度减小, 在重力的作用下形成自然对流, 对流的产生加强了水从铝合金壳体吸收热量的能力, 延缓了铝合金板的温升。



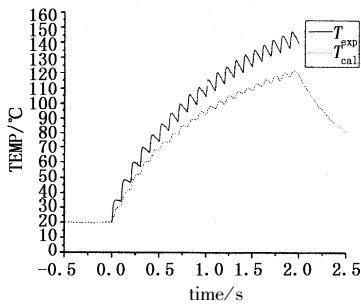
(a) 铝合金单板中心

(a) the center of the rear surface; for the single slab



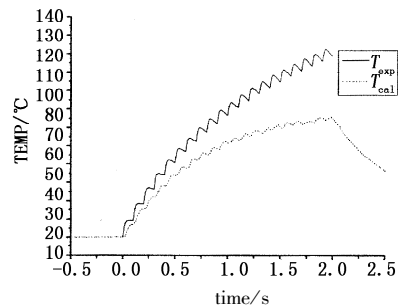
(b) 铝合金/水结构中铝合金板中心

(b) the center of the rear surface; for the chamber



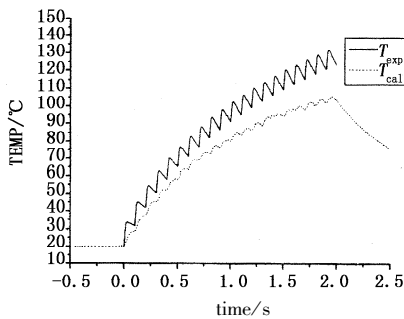
(c) 距离铝合金单板中心 2 mm 处

(c) the spot 2 mm from the center of the rear surface; for the single slab



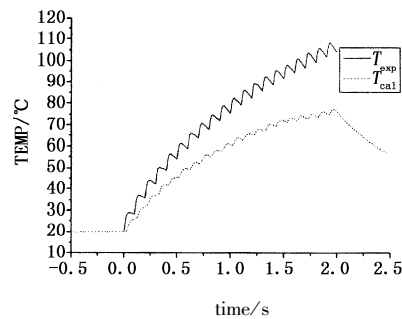
(d) 距离铝合金/水结构中铝合金板中心 2 mm 处

(d) the spot 2 mm from the center of the rear surface; for the chamber



(e) 距离铝合金单板中心 6 mm 处

(e) the spot 6 mm from the center of the rear surface; for the single slab



(f) 距离铝合金/水结构中铝合金板中心 6 mm 处

(f) the spot 6 mm from the center of the rear surface; for the chamber

图5 铝合金板后表面不同位置处温度变化

Fig.5 temperature history at different spots on the rear surface of aluminum alloy slab

由图 5(a)和图 5(b)可得,实验中激光辐照结束时铝合金板后表面中心温度达 125 °C,而铝合金/水结构中铝合金板后表面中心温度仅 89 °C。表明水的存在对延缓铝合金板的温升有很大的作用,水从铝合金板中吸收了大量热量,加速了热扩散,延缓了铝合金板的温升。

5 结 论

通过 1053 nm 脉冲激光辐照铝合金板和铝合金/水结构实验,初步研究了水的存在对铝合金板温度变化的影响。采用有限元方法,计算了脉冲激光辐照下铝合金板和铝合金/水结构中的温度场变化,数值结果和实验结果基本相符。水的存在对铝合金板的温度变化有很大的影响,水从铝合金板中吸收了大量热量,加速了热扩散,延缓了铝合金板的温升。因此要对金属/液体结构目标造成熔融、烧蚀等热破坏,需要比破坏金属板更高的激光功率密度或者更长的激光辐照时间,才有可能使金属/液体结构中的金属发生热破坏。

参考文献:

- [1] Boley C D, Rubenchik A M. Modeling of material Removal by Sshel[R]. UCRL-JC-146480, 2002.
- [2] Boley C D, Rubenchik A M. Modeling of high-energy pulsed laser interactions with coupons [R]. UCRL-JC-146480, 2003.
- [3] 强希文. 强激光与靶材相互作用的力学效应研究[J]. 激光与红外, 2000, 30(3): 141 - 144.
- [4] 王伟平, 刘常龄, 王春彦. 重复脉冲激光作用下钢靶动态响应数值模拟 [J]. 应用光学, 1995, 15(5): 204 - 206.
- [5] 钟明, 罗大为, 等. 激光辐照金属/炸药复合介质温度场的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 137 - 140.
- [6] 王伟平, 王翔. 激光辐照下金属/炸药温度场的计算 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(2): 205 - 209.
- [7] 工程材料实用手册编写编委会. 工程材料实用手册: 第 3 册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1989.