

CW 激光辐照薄板热力响应全场测量*

黄亿辉, 袁 武, 宋宏伟, 黄晨光

(中国科学院 力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 实验研究了 CW 激光辐照铝合金薄板的热力响应过程, 利用三维数字图像相关技术(3D-DIC)结合红外测温系统对整个过程的变形场和温度场实现了全场实时测量。分析了入射激光功率对变形场和温度场的影响, 发现变形和温度均随入射激光功率线性增长。建立了三维有限元模型对实验过程进行模拟, 模拟结果与实验结果吻合较好, 验证了有限元模型的可靠性。3D-DIC 结合红外测温系统可以很好地对激光破坏试验中的靶体变形场和温度场进行实时测量, 是一种很有效的实验测量手段。

关键词: 激光辐照; 三维数字图像相关技术; 红外测温; 变形场; 温度场

中图分类号: TK 123; TN 214 文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201426.111012

强激光辐照金属靶体诱导的热力效应及其破坏行为是一直关注的热点^[1]。Boley 等对切向气流下 CW 激光辐照金属靶板的破坏机理做了大量实验研究^[2-6], 发现靶板在熔融之前就被击穿, 分析认为热软化效应和压差使靶体法向变形急剧增大, 导致靶体被击穿。赵剑衡等^[7-8]实验研究了圆柱壳几何尺寸、激光输入参数等因素对准连续激光辐照下充压圆柱壳爆裂的影响, 发现上述因素与爆裂时刻之间呈幂指数变化关系。张家雷^[9]等对充压柱壳的激光破坏能量阈值进行数值模拟, 发现破坏能量密度阈值与壳体厚度、内压大小近似成线性关系。陈裕泽^[10]等开展了 CW 激光辐照下轴向预压柱壳屈曲破坏实验, 发现材料热软化引入的缺陷会诱发预压柱壳的屈曲破坏, 屈曲临界载荷随入射激光能量的增高而降低。张永强、穆景阳^[11-12]等研究了激光对复合材料的烧蚀效应。胡鹏、陈发良^[13-18]等对切向气流下的激光破坏机理展开了研究。CW 激光辐照靶体时, 实时的变形场和温度场测量对分析靶体破坏机理意义重大, 但是前述工作均未对靶体的变形场和温度场实现实时测量。高温条件下的变形场测量存在一定难度, 目前常见的接触式变形测量方法只能得到单点的应变信息, 由于需要在试件表面布置传感器, 甚至会影响试件本身的力学特性。发展非接触式全场测量技术成为可能的解决途径, 例如, 最近 Goidescu^[19]等提出利用数字图像相关技术结合红外热像技术对碳纤维复合材料的破坏过程实现全场测量。本文实验研究了 CW 激光辐照下铝合金薄板的变形和温度响应, 利用三维数字图像相关技术(3D-DIC)结合红外测温系统对变形场和温度场实现实时测量, 分析了入射激光功率对靶体变形和温度的影响, 对温度场进行了数值模拟。

1 试验环境与测量技术

1.1 试验环境

试件采用 80 mm×80 mm×0.5 mm 的 LC4 超硬铝合金薄板, 利用夹具将试件四端固支。激光器是由中国科学院力学研究所自行研制的 Nd:YAG CW 激光器, 激光波长 1064 nm, 最大功率为 200 W, 实验布置如图 1 所示。激光光闸、热电偶、3D-DIC 测量系统和红外测温系统通过同步触发仪来控制, 实现同时启动。3D-DIC 系统和红外测温系统用来记录背表面的热变形场和温度场, 在激光辐照面布置有 2 个热电偶, 距离光斑中心距离分别为 20 mm 和 30 mm。设定入射激光功率以及辐照时间, 同步触发仪发出信号, 光闸打开, 同时热电偶、3D-DIC 系统和红

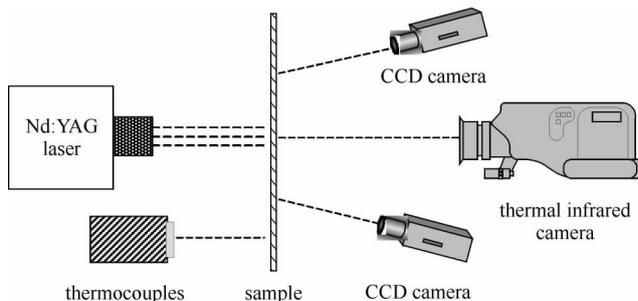


Fig. 1 Experimental setup

图 1 实验布置

* 收稿日期:2014-02-13; 修订日期:2014-08-29

基金项目:国家高技术发展计划项目;国家自然科学基金重点项目(11332011);国家自然科学基金重大研究计划项目(91016025)

作者简介:黄亿辉(1984—),男,博士研究生,主要从事激光破坏效应研究;huangyihui10@mails.ucas.ac.cn.

通信作者:宋宏伟(1973—),男,研究员,主要从事激光破坏效应和热结构研究;songhw@imech.ac.cn.

外测温系统开始记录数据,实现对实验过程中热变形场和的温度场实时监控。

1.2 三维数字图像相关技术

1.2.1 测量原理

三维数字图像相关技术是利用双目立体视觉进行测量的。双摄像机从不同角度同时获取数字图像,基于视差原理通过三维重构即可得到试件变形场。采用耐温 800 °C 以上的高温漆对试件背表面喷涂随机散斑作为标记,对试件进行标定,获取图像后对同一时刻左右两张图像进行相关性分析,即可得到试件的变形场,如图 2 所示。

1.2.2 精度校核

为了校核 3D-DIC 测量结果的精度,对于同样的试件采用三坐标测量机进行了三维重构分析,并与 3D-DIC 测量结果进行了对比,如图 3 所示,其中 a, b, c 分别为试件的长宽高。两者测量获得的三维变形场非常吻合。三坐标测量机的测量精度为 $2 \mu\text{m}$,对比结果验证了 3D-DIC 精度可靠。

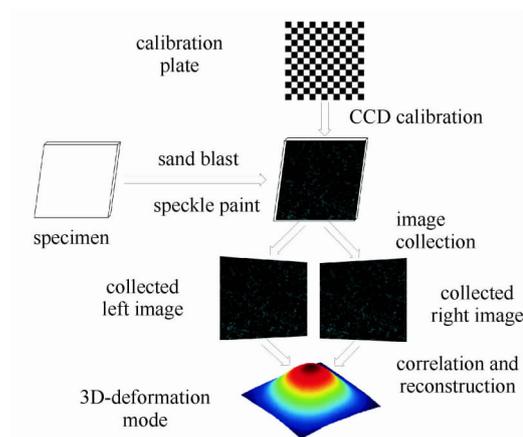


Fig. 2 Schematic of 3D-DIC procedure

图 2 3D-DIC 测量原理图

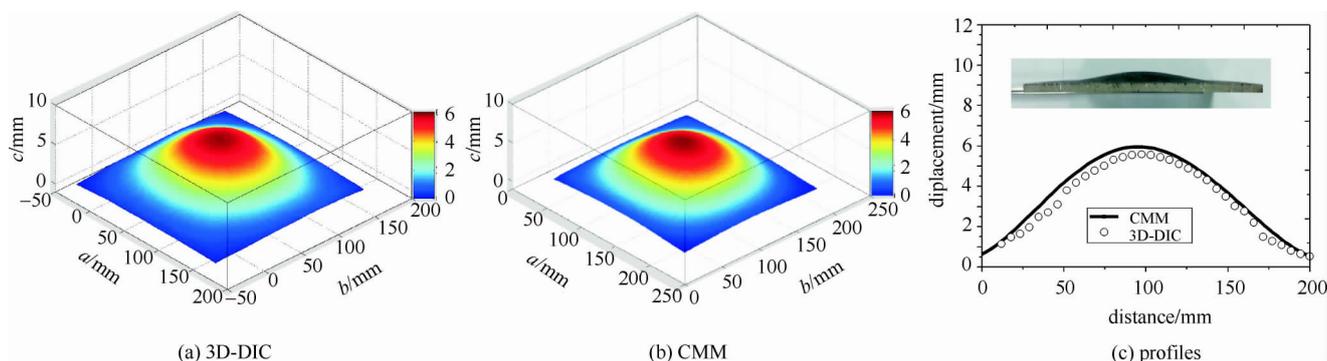


Fig. 3 Results from 3D-DIC and CMM

图 3 3D-DIC 测量结果与三坐标测量结果对比

2 实验结果分析

2.1 典型实验结果

激光功率 $P=200 \text{ W}$,光斑直径 $\Phi=15 \text{ mm}$,发现激光辐照 10 s 之后升温缓慢。主要原因是空气自然对流对铝板有冷却作用,加之激光功率不高,导致 10 s 之后铝板达到热平衡。铝板温度较低,忽略热辐射影响,热传导过程可以用下列方程来描述

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

在光斑区有

$$-k(\partial T / \partial n) = \alpha I_0 - h(T - T_0) \quad (2)$$

在其他区域

$$-k(\partial T / \partial n) = -h(T - T_0) \quad (3)$$

式中: ρ 为材料的密度; α 为激光能量耦合系数; C 为比热; k 为导热系数; h 为空气自然对流换热系数; T_0 为环境温度; I_0 为入射激光功率密度; x_i 为坐标; T 为铝板温度; n 为法向量。

对上述控制方程进行数值求解,得到温度场的数值计算结果。图 4 为不同点温度演化历程数值和实验结果

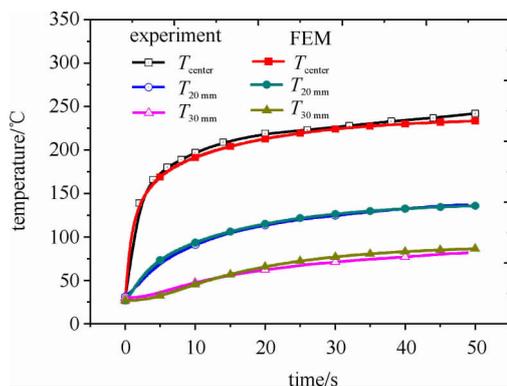


Fig. 4 Evolution of temperature at different sampling points

图 4 不同测点温度演化历程

对比。光斑区温度梯度最大,激光输入的净功率密度 $q_{\text{laser}} = \alpha I_0$,一部分被对流换热 $h(T - T_0)$ 带走,另一部分通过热传导 $k \frac{\partial T}{\partial x_i}$ 向四周扩散,剩余的能量沉淀下来使光斑区升温;在距离光斑中心 20 mm 处温度远低于光斑中心,此处的能量输入全部来自热扩散,所以升温速率比较慢;在远离光斑中心 30 mm 处温度更低,约从 5 s 之后温度才开始升高,说明 5 s 时刻热扩散才达到此处。

图 5 为温度场和变形场演化过程。由于厚度方向上的温度梯度,薄板在激光辐照之后局部发生屈曲,迅速向辐照面鼓起形成鼓包。温度进一步升高,薄板进入后屈曲阶段,变形加剧鼓包继续增大。温度场和变形场具有相同的变化趋势,温度场的数值模拟结果与实验测量结果吻合较好。

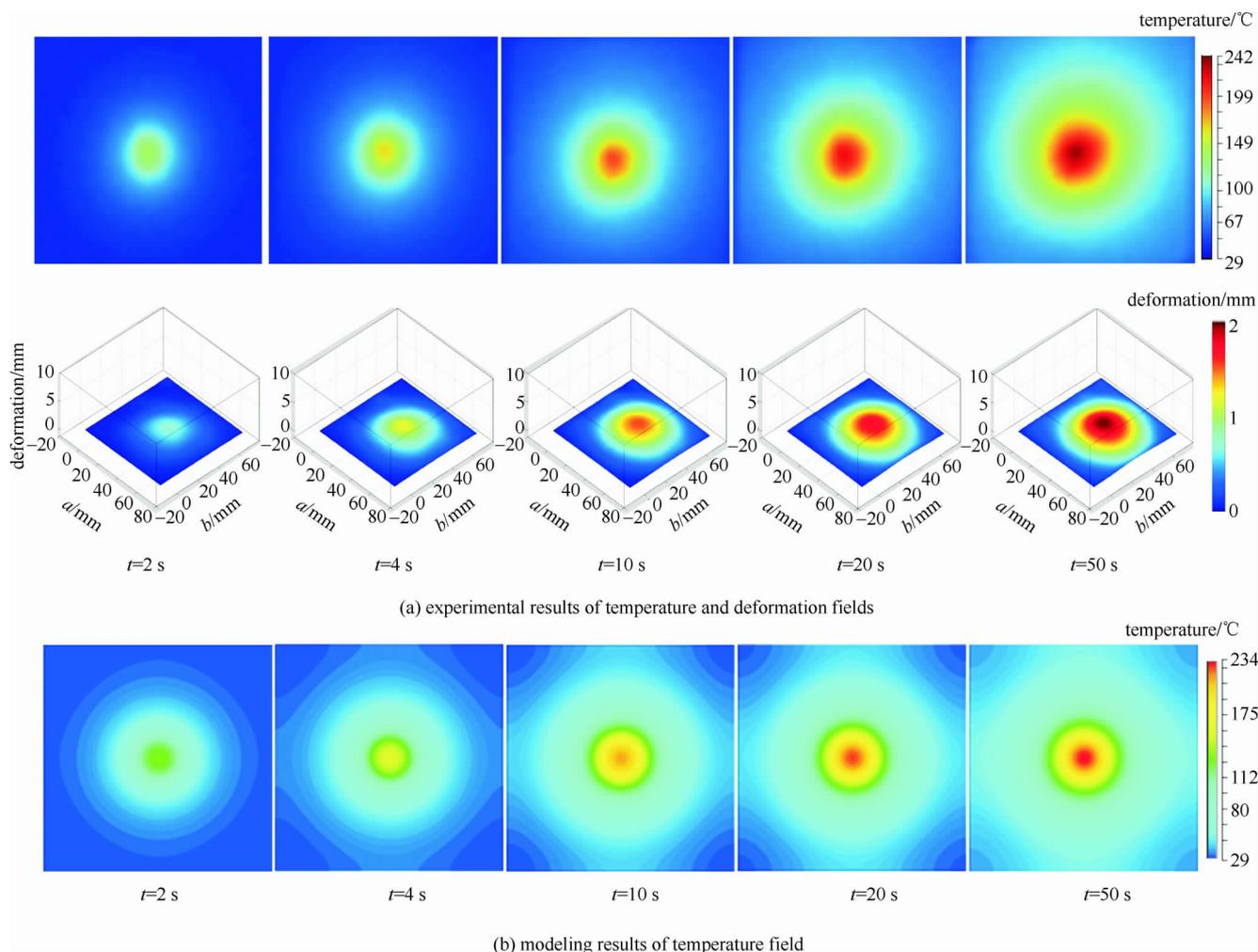


Fig. 5 Evolution of temperature and deformation fields

图 5 温度场和变形场演化历程

2.2 入射激光功率影响

光斑直径 $\phi = 15$ mm,分析不同入射激光功率下温度场和变形场。图 6 为不同时刻光斑中心温度和法向变形随功率变化过程。光斑中心温度和法向变形均随入射激光功率线性增长,且辐照时间越长,随功率变化越剧烈。图 7 为 50 s 时刻不同入射激光功率下的温度场和变形场,两者具有相同的变化趋势。

3 结论

3D-DIC 技术结合红外测温系统能够很好地对激光破坏实验中靶体的变形场和温度场实现全场、实时地测量,是一种有效的测量手段,对深入分析和理解破坏机理意义重大。CW 激光辐照薄铝板的过程中,光斑中心温度和法向变形量均随入射激光功率线性增长,且辐照时间越长,变化越剧烈。

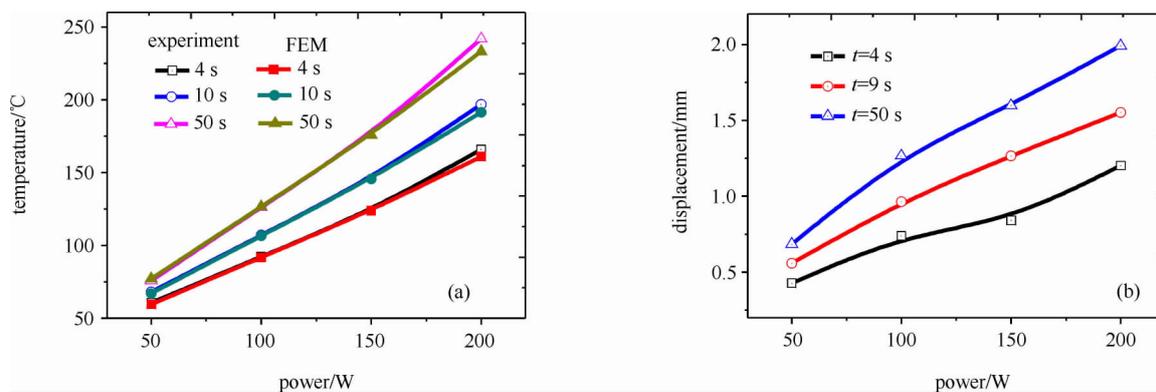


Fig. 6 Temperature-power and displacement-power curves of spot center, irradiated for different time

图 6 不同时刻光斑中心温度和变形随功率变化曲线

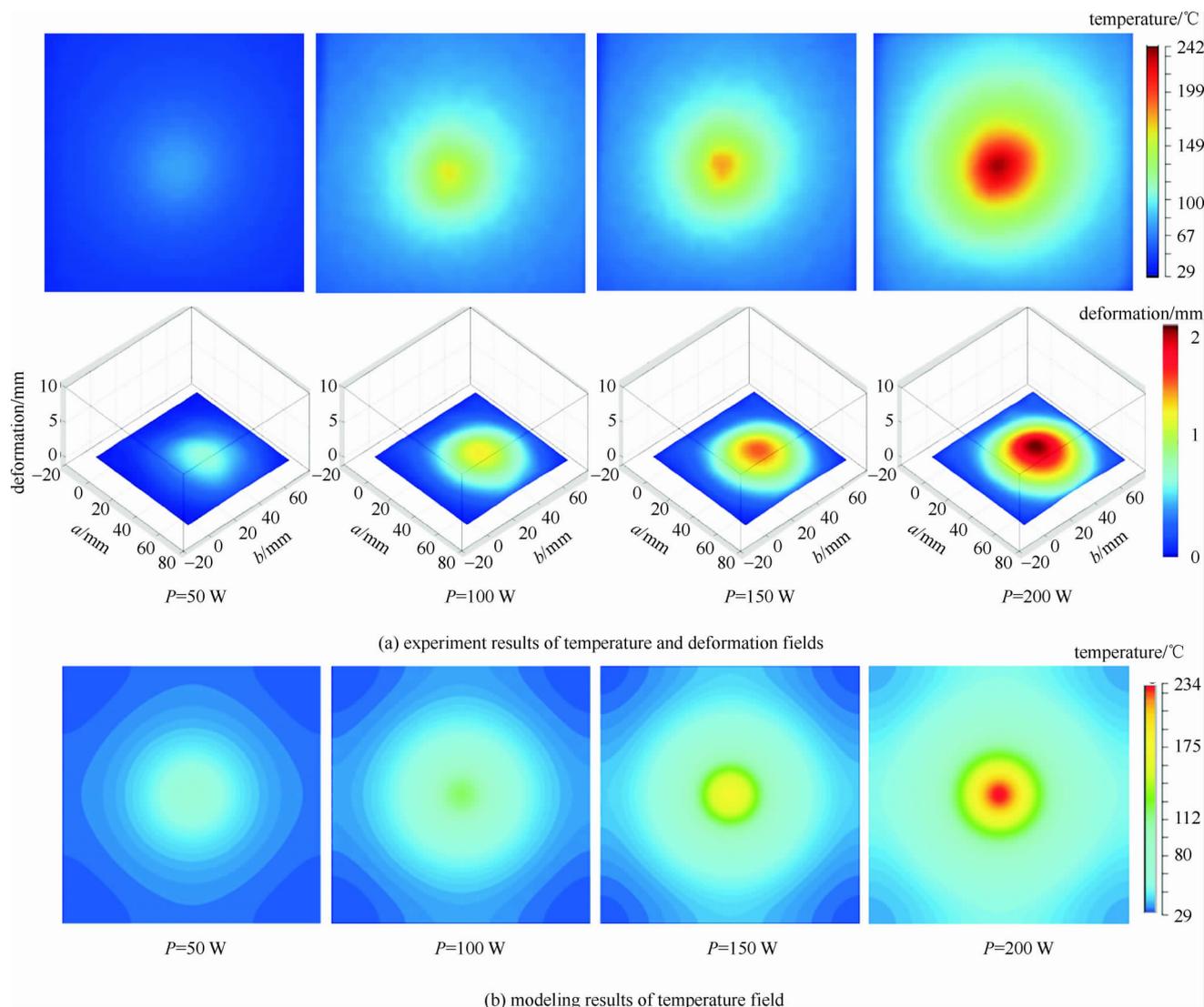


Fig. 7 Temperature and deformation fields when irradiated by different power at $t=50$ s

图 7 50 s 时刻不同功率下的温度场和变形场

参考文献:

[1] 孙承纬, 范正修, 陈裕泽, 等. 强激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 1-151. (Sun Chengwei, Fan Zhengxiu, Chen Yuze, et al. *High Power Laser Irradiation Effects*. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-151)

[2] Abbot R P, Boley C D, Fochs S N, et al. High-power solid-state laser; lethality testing and modeling[R]. UCRL-CONF-224732, 2006.

[3] Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Lethality effects of a high-power solid-state laser[J]. *Journal of Directed Energy*, 2007, 3(1): 15-24.

- [4] Boley C D, Rubenchik A M. Modeling of laser-induced metal combustion[R]. LLNL-CONF-401854, 2008.
- [5] Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Large-spot material interactions with a high-power solid-state laser beam[J]. *Journal of Directed Energy*, 2008
- [6] Boley C D, Cutter K P, Fochs S N, et al. Study of laser interaction with thin targets[R]. LLNL-PROC-411215, 2009.
- [7] 赵剑衡, 孙承纬, 袁永华, 等. 激光辐照下充压圆柱壳爆裂规律的实验研究[J]. *应用激光*, 1998, **18**(5): 196-200. (Zhao Jianheng, Sun Chengwei, Yuan Yonghua, et al. Experimental study on the rupture regulation of inner-pressurized cylindrical shells under laser beam loading. *Applied Laser*, 1998, **18**(5): 196-200)
- [8] 赵剑衡, 章冠人, 刘绪发. 激光辐照下充压柱壳结构变形的数值模拟[J]. *高压物理学报*, 1996, **10**(4): 262-268. (Zhao Jianheng, Zhang Guanren, Liu Xufa. A numerical simulation to the deformation of an internally pressured cylinder tank under intensive laser irradiation. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, **10**(4): 262-268)
- [9] 张家雷, 谭福利, 全延锦. 激光辐照下充压柱壳的破坏能量阈值数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(5): 991-995. (Zhang Jialei, Tan Fuli, Tong Yanjin. Numerical simulation of failure energy threshold of internally pressured cylindrical shell under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(5): 991-995)
- [10] 陈裕泽, 李思忠. 轴压柱壳在连续波激光辐照下的屈曲破坏[J]. *强激光与粒子束*, 1995, **7**(3): 404-408. (Chen Yuze, Li Sizhong. Bulking failure of the axially pressed cylindrical shell irradiated by CW CO₂ laser beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(3): 404-408)
- [11] 张永强, 王贵兵, 唐小松, 等. 两种纤维增强复合材料连续激光烧蚀阈值测量及吸收特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2): 199-202. (Zhang Yongqiang, Wang Guibing, Tang Xiaosong, et al. Ablation threshold measurement and absorption characteristic analysis of two fiber reinforced composites irradiated by CW laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 199-202)
- [12] 穆景阳, 万红, 白书欣. 长脉冲激光辐照下环氧树脂的热烧蚀规律[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1): 36-40. (Mu Jingyang, Wan Hong, Bai Shuxin. Thermal ablation law of cured epoxy under long pulse laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 36-40)
- [13] 胡鹏, 陈发良. 高速气流中激光加热平板数值模拟与分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(7): 1935-1939. (Hu Peng, Chen Faliang. Numerical simulation of plane target in airflow under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(7): 1935-1939)
- [14] 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 切向气流对激光辐照树脂基复合材料的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(12): 2848-2852. (Chen Minsun, Jiang Houman, Liu Zejin. Effect of tangential airflow on resin composite irradiated by laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(12): 2848-2852)
- [15] 陈敏孙, 江厚满, 焦路光, 等. 切向气流作用下玻璃纤维复合材料的激光辐照效应[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(5): 1075-1080. (Chen Minsun, Jiang Houman, Jiao Luguang, et al. Laser irradiation effect on glass fiber composite subjected to tangential gas flow. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(5): 1075-1080)
- [16] 黄亿辉, 宋宏伟, 黄晨光. 超声速气流下强激光辐照靶体失效数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(9): 2229-2234. (Huang Yihui, Song Hongwei, Huang Chenguang. Numerical simulation of failure of target irradiated by high-power laser subjected to supersonic airflow. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(9): 2229-2234)
- [17] 郑艳丽, 杜太焦, 束庆邦, 等. 不同气流环境下激光辐照金属材料温升的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(11): 2531-2534. (Zheng Yanli, Du Taijiao, Shu Qingbang, et al. Numerical simulation of thermal effect on metal irradiated by high-power laser beam in different airflow. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2531-2534)
- [18] 石卫波, 李四新, 肖雨, 等. 气动加热对高超声速飞行器激光毁伤效应影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(6): 1215-1218. (Shi Weibo, Li Sixin, Xiao Yu, et al. Laser lethality of hypersonic vehicles under aero-heating. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(6): 1215-1218)
- [19] Cristina G, Hélène W, Christian Gr, et al. Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques; Combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography[J]. *Composites; Part B*, 2013, **48**: 95-105.

Full-field measurement of thin plate irradiated by CW laser

Huang Yihui, Yuan Wu, Song Hongwei, Huang Chenguang

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling System, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A three-dimensional digital image correlation technique (3D-DIC) combined with infrared temperature measurement system is presented to investigate the thin aluminium alloy plate irradiated by CW laser for full-field measurement, which can present real-time deformation and temperature results. The influence of incidence laser power is investigated, and the result shows that the deformation and temperature of the spot center increase linearly as the incidence laser power increases. The model result agrees well with the experiment result. The three-dimensional digital image correlation technique (3D-DIC) combined with infrared temperature measurement system is a kind of effective measuring method to the analysis and understanding of the failure mechanism.

Key words: laser irradiation; 3D-DIC; infrared measurement; deformation field; temperature field

PACS: 72.15.Eb; 07.20.-n