

强激光辐照引起的气化反冲与冲击波传播

汤文辉¹, 冉宪文¹, 龚德良²

(1. 国防科学技术大学 理学院 工程物理研究所, 长沙 410073; 2. 湘南学院 计算机系, 郴州 423000)

摘要: 材料在强脉冲激光辐照下, 表面将出现气化反冲, 从而在内部形成冲击波。文章介绍了确定靶面压力的常用定标关系, 计算了铝靶和涤纶靶在激光辐照下的表面压力和冲量耦合系数; 文中还对激光冲击波的传播进行了数值模拟, 得到了激光冲击波的传播图像及其与激光脉宽的关系。

关键词: 强脉冲激光; 冲击波; 冲量耦合系数

中图分类号: O347.3; O347.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)01-0014-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.01.003

0 引言

就一般情况而言, 激光与材料的相互作用可分为三个层面: 第一个层面是激光辐照没有引起靶材料的特性和状态发生变化, 这时主要表现为材料对激光的反射、折射和吸收; 第二个层面是靶材料有了明显的能量沉积, 从而使材料特性和状态都发生了较明显的变化; 第三个层面是足够强的激光使材料特性和状态发生了重大变化, 这些变化反过来影响激光束的传播。其中第一层面所涉及的激光强度较弱, 第三个层面的激光可认为是超强激光, 而第二个层面的激光为一般强激光, 也是本文所讨论的激光强度范围。

当强脉冲激光辐照材料后, 由于能量沉积, 靶表面将气化甚至形成等离子体; 高温气体迅速反向膨胀, 并在靶中耦合冲量, 从而诱导出应力波或冲击波。本文主要分析强激光与靶材的冲量耦合效应, 并对激光诱导冲击波的传播过程进行数值模拟。

1 激光在靶表面的冲量耦合

当强脉冲激光辐照靶材时, 能量的沉积使靶表面物质迅速气化(靶由初始状态转变为蒸气或等离子体), 气化了物质将沿入射激光的反方向高速喷出。根据动量守恒定律, 气化反冲物质对未气化的靶体产生冲量作用, 并在靶表面形成反冲压力。显然, 冲量的大小和表面反冲压力与入射激光强度

有密切关系。更进一步的分析表明, 冲量和反冲压力还与激光波长、靶物质元素组成以及能量沉积过程有关; 但由于相互作用机理复杂, 影响因素多^[1], 定量的理论关系式难以获得, 因此人们普遍采用经验关系式确定靶面压力与激光参数之间的关系。

当脉冲激光的入射功率密度为 $q_0 = 10^3 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 靶板不会发生剧烈气化, 靶面压力主要起源于Grüneisen效应。由激光能量沉积所引起的热压可近似表示为 $\gamma q_0 \tau_0 / \lambda_0$ (τ_0 为脉冲激光的辐照脉宽; λ_0 为激光波长; γ 为格林爱森参量), 其幅值最高可达 $10^7 \sim 10^8 \text{ Pa}$ 量级^[2]。研究表明这时的表面压力峰值正比于 q_0^2 。

当脉冲激光功率密度为 $q_0 = 10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 时, 表面压力起源于热压和靶蒸气的气化反冲两种机制。研究表明, 这时的压力峰值正比于 $q_0^{2/3}$, 最大约为 10^8 Pa 量级。

当脉冲激光功率密度为 $q_0 = 10^9 \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 时, 表面压力主要起源于等离子体的反冲。对于这种条件下的热击波, 国内外普遍使用定标关系确定靶面峰值压力^[3-5], 约为 $1 \text{ GPa} \sim 1 \text{ TPa}$ 。

研究表明: 对于金属材料, Steverding等^[3]已给出靶面压力公式, 不仅理论严密, 而且与实验结果符合较好。Steverding等所给出靶面压力 p_0 与激光功率密度和激光脉宽的关系为

$$p_0 = (a\tau_0)^{-1/8} q_0^{3/4}, \quad (1)$$

收稿日期: 2011-11-07; 修回日期: 2012-01-05

作者简介: 汤文辉(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事脉冲激光辐照动力学、计算流体动力学、材料动态力学性能等方面的研究。E-mail: wenhuitang@163.com。

其中 a 为与入射激光波长和靶材原子有关的参数, 即

$$a = 4 \times 10^{29} \frac{z^3 (1+z)^{3/2}}{2^{3/2}} \left(\frac{2.73 \times 10^{15} \lambda_0}{2\pi c} \right)^2 M_A^{-1/2}, \quad (2)$$

式中: z 为离子价数; M_A 为原子质量; c 为真空中的光速。

Phipps等^[4]对若干金属和非金属材料进行了研究, 得到靶面峰值压力 P_0 的表达式为

$$p_0 = b q_0^{n+1} (\lambda_0 \sqrt{\tau_0})^n, \quad (3)$$

式中: b 和 n 均为经验常数, 对于金属, $b \approx 5.6$, 对于碳-氢材料, $b \approx 6.5$; n 对于不同材料均为-0.3; τ_0 的单位为ns; P_0 的单位为GPa。

分析表明, 式(3)与式(1)在本质上是一致的, 只是系数略有差别。此外, 人们有时用冲量耦合系数来表征强脉冲激光与靶相互作用的动力学效应。所谓冲量耦合系数是指靶在激光辐照后的总气化反冲冲量 I 与入射激光能量 Q_0 之比, 它也等于靶面峰值压力与入射激光功率密度之比, 因此有

$$\xi = \frac{I}{Q_0} = \frac{P_0}{q_0}. \quad (4)$$

可以预期, 不同的定标关系将得到不同的表面压力值, 它们都不可能很准确, 但在数量级上是差不多的。与此同时, 如果采用经验关系计算靶面压力, 则不同的定标关系必然得到不同的冲量耦合系数值, 但一些实验结果表明, 冲量耦合系数值基本上处于 $1 \times 10^{-5} \sim 10 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 范围^[1]。

取激光波长为 $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$, 辐照时间为 $\tau_0 = 10^{-8} \text{ s}$, 功率密度为 $q_0 = 10^{10} \text{ W}/\text{cm}^2$ 。对于铝靶, 采用式(1)和式(4)计算得到, 当表面压力峰值为4.87 GPa时, 冲量耦合系数为 $\xi = 4.87 \times 10^{-10} \text{ GPa}\cdot\text{cm}^2/\text{W} = 4.87 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$; 对于涤纶靶即碳-氢材料, 采用式(3)和式(4)计算, 表面峰值压力为4.36 GPa, 冲量耦合系数为 $\xi = 4.36 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$ 。如果脉宽增大10倍, 即 $\tau_0 = 10^{-7} \text{ s}$, 功率密度仍为 $q_0 = 10^{10} \text{ W}/\text{cm}^2$, 则铝靶表面的峰值压力为3.65 GPa, 冲量耦合系数为 $\xi = 3.65 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$; 涤纶靶表面的压力峰值为3.27 GPa, 冲量耦合系数为 $\xi = 3.27 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{J}$ 。对以上结果进行归纳如表1所示。

表1 激光辐照靶材的表面峰值压力和冲量耦合系数

Table 1 The coupling coefficients of impulse and peak pressure on the surface of targets radiated by pulsed laser

靶材	激光参数		冲量/(Pa·s)	冲量耦合系数/($\times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$)	峰值压力/GPa
铝	$\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$	$\tau_0 = 10^{-8} \text{ s}$	48.7	4.87	4.87
	$q_0 = 10^{10} \text{ W}/\text{cm}^2$	$\tau_0 = 10^{-7} \text{ s}$	365	3.65	3.65
涤纶	$\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$	$\tau_0 = 10^{-8} \text{ s}$	43.6	4.36	4.36
	$q_0 = 10^{10} \text{ W}/\text{cm}^2$	$\tau_0 = 10^{-7} \text{ s}$	327	3.27	3.27

2 激光诱导冲击波的传播

如前所述, 强脉冲激光与材料相互作用将在靶表面形成压力脉冲, 该脉冲在靶体内部的传播就是冲击波。由于激光脉冲一般非常窄, 所以激光冲击波加载所形成的应变率比碰撞、炸药爆炸冲击波产生的应变率更高, 因而是一种研究材料极端高应变率动态响应的实验手段。如果要从理论上研究激光冲击波的传播, 通常需要采用流体动力学方法进行数值模拟。

根据理想流体弹塑性模型, 其一维平面流动的Lagrangian方程组^[7]为

$$u = \frac{\partial R}{\partial t}; \quad (5)$$

$$v = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial R}{\partial r}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\sigma + q)}{\partial r} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + (\sigma + q) \frac{\partial v}{\partial t} = 0; \quad (8)$$

$$\sigma = p + s_D; \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial s_D}{\partial t} = 2G \left(\frac{1}{3v} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial R} \right), & |s_D| < \frac{2}{3} Y \\ s_D = \pm \frac{2}{3} Y, & |s_D| \geq \frac{2}{3} Y \end{cases}; \quad (10)$$

$$p = p(e, v); \quad (11)$$

式中: R 为欧拉坐标; r 为拉氏坐标; v 为比体积; ρ_0 为常态密度; u 为质点速度; σ 为应力; q 为人为

黏性； e 为比内能； s_D 为偏应力； G 为剪切模量； Y 为屈服强度。式(11)为物态方程，通常可采用格林爱森方程。我们根据上述方程组，采用有限差分方法编写了材料动力学响应分析软件DRAM^[8]，利用该软件对两种激光冲击波进行了数值模拟。取激光波长为 $\lambda_0=1.06\ \mu\text{m}$ ，辐照脉宽为 $\tau_0=10^{-8}\ \text{s}$ ，功率密度为 $q_0=10^{10}\ \text{W}/\text{cm}^2$ ，铝靶表面的峰值压力为4.87 GPa。在这种情况下，得到不同时刻冲击波的波形和到达位置如图1所示。可以看出：冲击波迅速衰减，约0.5 μs 时基本上衰减为弹性波，峰值压力0.5 GPa左右。

保持激光功率密度不变，将脉宽放大为原来的10倍，表面峰值压力为3.65 GPa。此时，冲击波的传播图像如图2所示。与第一种情况相比，虽然表面峰值压力下降了1.22 GPa，但冲击波的衰减要慢得多，并且冲击波波形有明显展宽。

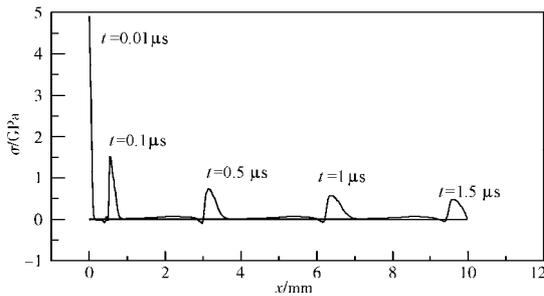


图1 脉宽0.01 μs 时铝靶中应力波的传播与衰减

Fig. 1 Propagation and attenuation of stress wave in aluminum target radiated with 0.01 μs pulsed laser

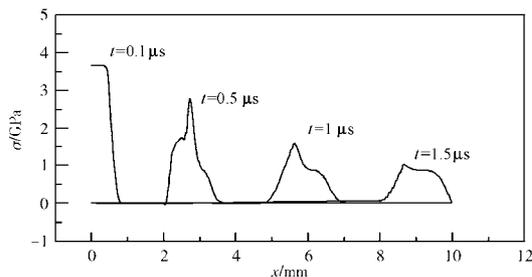


图2 脉宽0.1 μs 时铝靶中应力波的传播与衰减

Fig. 2 Propagation and attenuation of stress wave in aluminum target radiated with 0.1 μs pulsed laser

3 结束语

当材料受到中等强度脉冲激光辐照时，由于能量沉积，靶表面物质将气化形成靶蒸气或等离子

体，并对靶体形成冲量作用。靶表面的压力一般采用定标关系进行确定，对于不同的材料可以采用不同的定标关系。如果激光功率密度为 $q_0=10^{10}\ \text{W}/\text{cm}^2$ ，则表面压力峰值约为几GPa量级，而冲量耦合系数大致为 $(3\sim 5)\times 10^{-5}\ \text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 。由于冲量耦合效应，靶中将产生冲击波。若激光脉宽为 $10^{-8}\ \text{s}$ 以下，则靶中冲击波在传播过程中迅速衰减；如果激光脉宽增大到 $10^{-7}\ \text{s}$ 以上，则冲击波的衰减速度显著减慢。因此，激光脉宽对靶中冲击波传播特性有重要影响。

参考文献 (References)

- [1] 王乃彦. 新兴的强激光[M]. 北京: 原子能出版社, 1992
- [2] Hetteche L R, Tucker T R, Schriempf J T, et al. Mechanical response and thermal coupling of metallic targets to high-intensity 1.06- μm laser radiation[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(5): 1415-1421
- [3] Steverding B, Dudel H P. Laser-induced shocks and their capability to produce fracture[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(5): 1940-1945
- [4] Phipps C R Jr, Turner T P, Harrison R F, et al. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO single-pulse lasers[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(3): 1083-1096
- [5] 孙承纬, 庄士明. 脉冲激光引起金属靶板层裂的阈值条件[J]. 强激光与粒子束, 1990, 2(3): 347-352
Sun Chengwei, Zhuang Shiming. The spalling threshold of metallic targets resulted in pulse laser radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1990, 2(3): 347-352
- [6] 赵伊君. 强激光脉冲辐照金属材料时产生高压效应的估算[J]. 国防科学技术大学工学学报, 1979 (3): 27-51
Zhao Yijun. Estimation of high pressure in metals radiated by high intensity pulse laser[J]. Journal of Engineering of National University of Defense Technology, 1979(3): 27-51
- [7] 汤文辉, 张若棋, 赵国民. 脉冲X射线诱导的热冲击波[J]. 高压物理学报, 1995, 9(2): 107-111
Tang Wenhui, Zhang Ruoqi, Zhao Guomin. Thermal shock wave induced by impulsive X-ray[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1995, 9(2): 107-111
- [8] 汤文辉, 冉宪文, 陈华, 等. 材料动力学响应分析软件DRAM: 中国, 软著登字第0208045号[P], 2010-05-04

The blow-off impulse and shock wave propagation in materials induced by high-intensity pulsed laser irradiation

Tang Wenhui¹, Ran Xianwen¹, Gong Deliang²

(1. Institute of Engineering Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Computer Science Department, Xiangnan College, Chenzhou 423000, China)

Abstract: When a body is irradiated by a beam of high-intensity pulsed laser, a reversed impulse will be generated on its surface, and at the same time, a shock wave will be formed and propagate inside the body. This paper proposes a formula to estimate the pressure on the surface, and the impulse coupling coefficients are obtained for aluminum and polyester targets. The propagation images of the shock wave and their relation with the pulse width of the laser are analyzed.

Key words: high-intensity pulsed laser; shock wave; impulse coupling coefficient

写作技巧

科技论文中引言和结论部分的写法

引言部分也称前言、序言或概述。主要是提出文中主要研究的问题,引导读者阅读和理解原文。应以简短的篇幅介绍论文的写作背景和目的,以及相关领域内前人所做的工作和研究的概况,说明本研究与前人工作的关系,目前研究的热点、存在的问题及作者工作的意义。引言也可点明本文的理论依据、实验基础和研究方法,简要阐述研究内容,预示研究的结果、意义和前景,但不必展开讨论。引言宜开门见山,突出重点,其内容不应与摘要雷同,也不应是摘要的注释;一般应与结论相呼应,但也应避免与结论雷同。不必交待开题过程和成果鉴定程序,也不必引用有关合同公文和鉴定的全部结论。引言最好不要分段论述,不带插图列表和数学公式的推导证明。为了说明作者对前人所作的工作进行了广泛和深入的了解,在引言中适当地列举参考文献给予佐证,可以增加可信度。

结论不是论文的必要组成部分,如在文中不能明显导出应有结论,也可以没有结论而进行必要的讨论。结论不应是正文中各段小结的简单重复,它应以正文中的实验或考察得到的现象、数据的阐述分析为依据,完整、准确、简洁地指出以下内容,并注意突出创新之处,呼应引言提出所要解决的问题:

- (1) 由对研究对象进行考察或实验得到的结果所揭示的原理及其普遍性;
- (2) 研究中有无发现例外或本论文尚难以解释和解决的问题;
- (3) 与先前已发表过的(包括他人和作者自己)研究工作的异同;
- (4) 本论文在理论上和实用上的意义及价值;
- (5) 进一步深入研究本课题的建议。

有些论文属于阶段性的研究成果或试验工作总结,不一定有明确的结论意见,此时也可以用结束语作为论文的结尾。