

纳秒激光在铜靶材中诱导冲击波的实验研究

王绩勋 高勋 宋超 林景全

Experimental study of shock waves induced by a nanosecond pulsed laser in copper target

Wang Ji-Xun Gao Xun Song Chao Lin Jing-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 045204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.045204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于速度干涉仪的冲击波精密调速实验技术研究

Shock timing experiment based on imaging velocity interferometer system for any reflector

物理学报.2012, 61(13): 135201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.135201>

X射线烧蚀泡沫-固体靶增压机理研究

Pressure increase in foam-solid target from X-ray driven shock waves

物理学报.2012, 61(4): 045203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.045203>

"三明治"靶型在间接驱动冲击波实验中的应用

Shock experiment with sandwiched target in laser indirect-drive experiment

物理学报.2011, 60(11): 115203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.115203>

利用成像型速度干涉仪进行聚苯乙烯材料中冲击波调速的实验研究

Shock timing experiment in polystyrene target based on imaging velocity interferometer system for any reflector

物理学报 2011, 60(8): 085203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.085203>

超高压下冲击波速度直接测量技术

Direct measurement technique for shock wave velocity under super high pressure

物理学报.2011, 60(2): 025202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.025202>

纳秒激光在铜靶材中诱导冲击波的实验研究*

王绩勋¹⁾ 高勋^{1)†} 宋超²⁾ 林景全¹⁾

1)(长春理工大学理学院, 长春 130022)

2)(长春理工大学化学与环境工程学院, 长春 130022)

(2014年8月1日收到; 2014年9月9日收到修改稿)

基于聚偏二氟乙烯压电传感器, 对铜靶材中纳秒激光脉冲诱导的冲击波传播过程进行了实验研究, 给出了铜靶材内冲击压强随激光脉冲能量和靶材厚度的变化规律. 实验结果表明: 500 mJ 激光脉冲能量作用到 2 mm 厚的铜靶材产生的冲击压强达到 2.1 MPa; 激光脉冲能量从 200 mJ 增加到 500 mJ, 在铜靶材厚度为 2 和 4 mm 条件下, 冲击压强分别增加了 162% 和 231%; 而当铜靶材厚度从 2 mm 增加到 6 mm 时, 在 400 和 500 mJ 激光脉冲能量作用下, 铜靶材内冲击压强分别降低了 32% 和 49%.

关键词: 激光诱导冲击波, 聚偏二氟乙烯压电传感器, 冲击压强

PACS: 52.35.Tc

DOI: 10.7498/aps.64.045204

1 引言

激光冲击处理 (laser shock processing) 技术是基于高强度脉冲激光在材料和周围环境介质中间产生等离子体伴随冲击波, 冲击波传播到材料中, 使得材料表层发生塑性应变, 产生很大的残余压应力, 从而大大改进材料性能, 如改善材料的电阻、提高耐磨性、延长疲劳寿命等^[1-4]. 高能激光器的发展为激光冲击强化技术提供了更好的平台. 为了更好地实时监测激光冲击波对靶材产生的压力变化, 聚偏二氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 压电薄膜传感器应运而生. PVDF 压电薄膜自 20 世纪 70 年代问世以来以其独特的介电效应、压电效应、热电效应, 具有频响宽、动态范围大、力电转换灵敏度高且重量轻、柔性好、声阻抗低, 可以加工成特定形状和用普通胶黏合等强于传统压电材料的突出优点, 迅速在力学、光学、测量、军事、交通、地质勘探等领域得到大量应用^[5-8].

激光诱导冲击波在材料中传播时, 在材料内部产生很大的冲击压强, 冲击压强的变化是非常重要的

参数. 随着对激光冲击强化的深入研究, 国内外学者对激光诱导冲击波在靶材内部传播过程进行了大量的研究. 文献[8, 9]基于仿真模型 (SHOCK-LAS), 通过耦合方法对激光冲击强化进行了理论研究; 顾永玉等^[10]研究了刚性约束层、柔性约束层以及液体约束层对激光诱导冲击波产生的冲击冲量的影响, 发现刚性约束层可大幅度提高冲击冲量; Yao 等^[11]利用压电薄膜传感器测量得到厚度为 50 μm 的铝靶材中激光冲击波的平均传播速度达到 6.67 km/s; 冯爱新等^[12]利用 PVDF 压电薄膜研究了在铝合金中高能脉冲激光诱导冲击波传播的动态变化; 张永康等^[13]利用 PVDF 压电膜传感器测量出镁合金中强脉冲激光诱导冲击波的平均速度; 刘丽等^[14]实验研究了有约束下冲击波在不锈钢中的传播过程, 得到冲击波传播速度与声波纵波的传播速度相一致. 有关不锈钢、镁合金、铝合金靶材中冲击波的研究较多, 但在金属铜靶材中强激光冲击波传播的研究未见报道.

本文基于 PVDF 压电薄膜传感器进行了纳秒脉冲激光诱导产生的冲击波在铜靶材中传播的实

* 国家自然科学基金 (批准号: 11074027, 61178022)、吉林省自然科学基金 (批准号: 201215132) 和教育部博士点基金 (新教师类) (批准号: 20112216120006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lasercust@163.com

验研究, 探讨不同脉冲能量、靶材厚度条件下铜靶材中冲击波产生的冲击压强变化规律.

2 实验装置

纳秒激光诱导冲击波在铜靶材中传播的实验装置如图 1 所示. 调 Q Nd:YAG 激光器 (Continuum, Power 8000) 输出波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ns, 光束直径约为 6 mm 的激光. 激光光束通过 $\lambda/2$ 波片和激光格兰棱镜组成的能量衰减系统, 经焦距 $F = 200$ mm 的石英平凸透镜聚焦到铜靶材表面, 光斑直径为 200 μm . 分光镜分出的激光能量由能量计 (Coherent, FieldMax II) 实时监测.

铜靶材放置在三维平移台 (SIGMA KOKI, SHOT-204MS) 上, 使每个激光脉冲都作用在新的靶面位置, 并且保证不同厚度的铜靶材表面与石英透镜间的相对距离保持不变. PVDF 压电传感器紧密黏附在铜靶材后面, 示波器 (Tektronix TDS7254 B) 测量 PVDF 压电传感器的电压变化. 激光器及示波器均由数字脉冲延时发生器 DG645 同步控制工作, 工作方式为单发 (single shot) 模式. 实验中采用的 PVDF 压电传感器为锦州科信电子材料有限公司生产的压电薄膜, 膜厚 30 μm , 压电常数 d 为 20 pc/N, 尺寸为 30 mm \times 30 mm. 示波器通过 1 M Ω 高阻探头与 PVDF 压电传感器连接, 设置示波器的内阻为 1 M Ω .

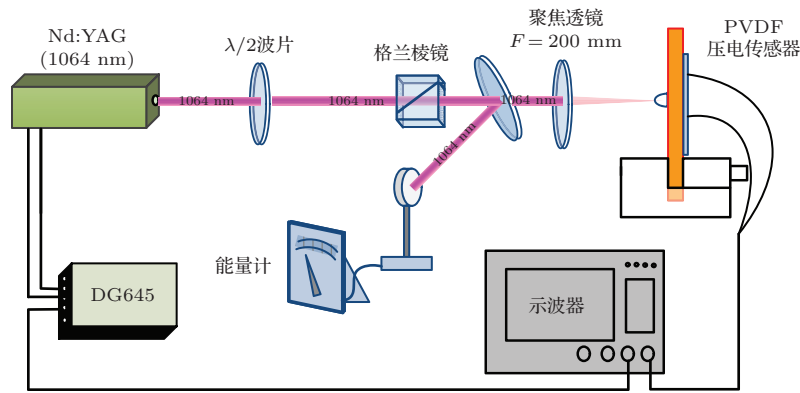


图 1 纳秒激光诱导冲击波在铜靶材中传播的实验装置示意图

3 实验结果与讨论

激光诱导冲击波在铜板中传播致使靶材产生形变, 冲击波作用到 PVDF 压电传感器表面, 在机械应力波作用下 PVDF 产生电压信号, 当冲击波传播到靶材后表面时便在 PVDF 压电传感器上产生一个电压脉冲, 示波器测量到 PVDF 压电传感器的电压信号为研究激光冲击波在铜靶材中的传播提供条件. 300, 400, 500 mJ 的激光脉冲分别作用到厚度 $h = 2, 4, 6$ mm 的铜靶材后 PVDF 压电传感器的电压波形如图 2 所示. 在相同激光脉冲能量下, PVDF 压电传感器的峰值电压信号随着铜靶材厚度的增加而减小, 并且靶材厚度越大, 电压降低的幅度越大. 在激光脉冲能量为 500 mJ、靶材厚度为 2 mm 时 PVDF 产生的峰值电压达到 0.097 V, 而厚度达到 6 mm 时, 峰值电压降低到 0.052 V, 衰减比达到 46%; 铜靶材厚度相同时, PVDF 压电传感器的峰值电压信号随着激光脉冲能量的增加而升高,

并且激光脉冲能量越大, 电压升高的幅度越大. 在靶材厚度为 2 mm 时, 300 mJ 激光诱导的冲击波致使 PVDF 峰值电压为 0.066 V, 而激光脉冲能量为 500 mJ 时, PVDF 峰值电压为 0.097 V, 升高 32%.

对于强激光冲击靶材产生的冲击压强, PVDF 压电薄膜的压电方程为

$$D = dT + \epsilon E, \quad (1)$$

式中, D 为面电荷密度矩阵, d 为压电常数矩阵, T 为应力, ϵ 为介电常数矩阵, E 为电场强度.

在无加电场条件下, (1) 式可化简为

$$D = dT. \quad (2)$$

(2) 式还可以写成

$$D_3 = d_{31}\sigma_{xx} + d_{32}\sigma_{yy} + d_{33}\sigma_{zz}, \quad (3)$$

式中 σ 为应力 T 的方向分量. 由于 $d_{31}\sigma_{xx} + d_{32}\sigma_{yy} \ll d_{33}\sigma_{zz}$, 所以 (3) 式可以化简为

$$D_3 = d_{33}\sigma_{zz}. \quad (4)$$

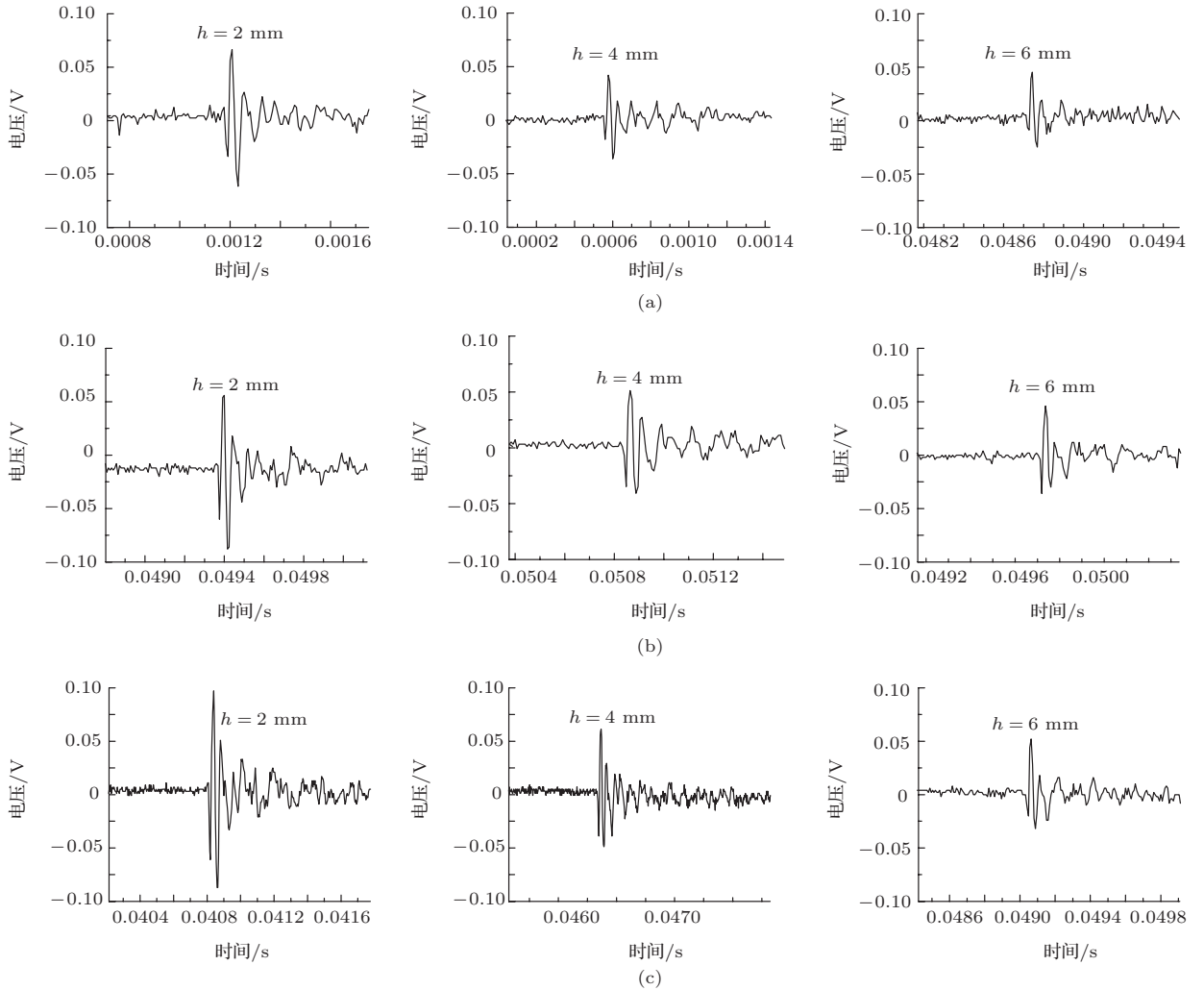


图2 不同能量的激光诱导产生的冲击波在铜靶材中传播, PVDF 压电传感器的电压信号 (h 为铜靶材厚度) (a) 激光能量为 300 mJ; (b) 激光能量为 400 mJ; (c) 激光能量为 500 mJ

PVDF 薄膜表面产生的电荷为

$$Q = D_3A = d_{33}A\sigma_{zz}. \quad (5)$$

式中 A 为有效积分面积.

图3是激光诱导冲击波作用下, PVDF 压电传感器的电压测量电路. PVDF 压电传感器与数字示波器连接, 当 PVDF 薄膜受到铜靶材内传播的冲击应力作用后, 产生电荷量 Q 经示波器内电阻 R 放电形成电流回路 $I(t)$, 测量电阻 R (50Ω) 上的电压为 $U(t)$, 则实验中冲击波在靶材中传播致使 PVDF 压

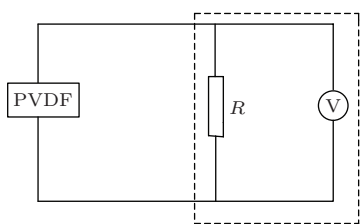


图3 PVDF 压电传感器的电压测量电路

电传感器上产生的总电荷量为

$$Q = \int_0^t I(t)dt = \int_0^t U(t)/Rdt, \quad (6)$$

从而 PVDF 压电传感器测量激光冲击波在铜靶材中传播产生的冲击压力为

$$\sigma = KQ/A, \quad (7)$$

式中 K 为 PVDF 压力传感器动态灵敏度系数. 通过霍普金森压杆技术^[15] 标定得到压力传感器动态灵敏度系数: $K = 49.2 \text{ GN/C}$.

利用 (7) 式对靶材厚度为 2 和 4 mm 条件下的冲击波图像积分计算出靶材内传播的冲击压强随激光脉冲能量的变化, 如图4所示. 由图4可知, 冲击压强随能量的增加呈非线性上升, 激光脉冲能量越大, 冲击压强上升速率增加. 在靶材厚度为 2 mm 时, 冲击压强在脉冲能量大于 400 mJ 后急剧增加, 而厚度为 4 mm 时, 脉冲能量在 300 mJ 后冲击压强急剧上升. 铜靶材厚度为 2 mm 条件下,

激光脉冲能量从200 mJ增加到500 mJ时,冲击压强从1.3 MPa增加到2.1 MPa,增加了162%。而厚度为4 mm条件下,冲击压强从0.68 MPa增加到1.57 MPa,增加了231%。

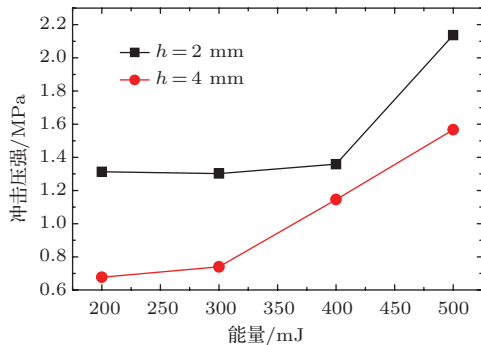


图4 铜靶材内冲击压强随激光脉冲能量的变化

图5为脉冲能量为400, 500 mJ时,冲击压强随靶材厚度的变化。从图5可以看出,在脉冲能量为400和500 mJ时,铜靶材内的冲击压强均随靶材厚度的增加近似呈线性下降,表明铜靶材内部的均一性较好,对冲击波衰减比较均匀。当能量为400 mJ时,在2 mm厚的铜靶材内冲击压强为1.36 MPa,在6 mm厚的铜靶材内冲击压强为0.93 MPa,降低了32%;而脉冲能量为500 mJ时,在2 mm厚的铜靶材内冲击压强为2.14 MPa,在6 mm厚的铜靶材内冲击压强为1.10 MPa,衰减比为49%。实验结果表明激光能量越大,铜靶材对冲击波的衰减能力越强。

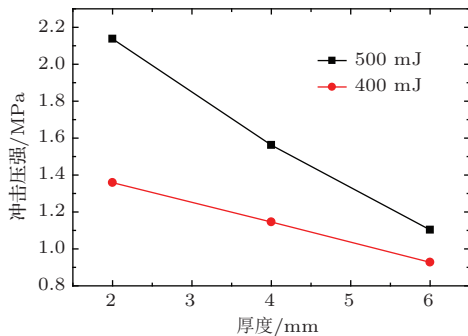


图5 铜靶材内冲击压强随靶材厚度的变化

4 结 论

本文利用PVDF压电传感器实验研究了铜靶材中纳秒激光脉冲诱导的冲击波传播过程。实验结果表明:冲击压强随激光脉冲能量的增加呈非线性上升,而随靶材厚度的增加近似呈线性下降;

能量为500 mJ的脉冲激光作用到2 mm厚的铜靶材所产生的冲击压强达到2.1 MPa;激光脉冲能量从200 mJ增加到500 mJ,在铜靶材厚度为2和4 mm条件下,冲击压强分别增加了162%和231%;而当铜靶材厚度从2 mm增加到6 mm时,在400和500 mJ脉冲激光作用下,铜靶材内冲击压强分别降低了32%和49%。这些研究结果对于铜靶材的激光冲击强化处理具有重要的实验指导意义,不仅改善了铜靶材的机械化学效应,提高铜的抗腐蚀性和硬度,而且对铜在电气、轻工、机械制造等方面的广泛应用提供了珍贵的实验数据。

参考文献

- [1] Fairand B P, Clauer A H, Jung R G, Wilcox B A 1974 *Appl. Phys. Lett.* **25** 431
- [2] Sano Y, Mukai N, Okazaki K, Obata M 1997 *Nucl. Instrum. Meth. B* **121** 432
- [3] Peyre P, Fabbro R, Merrien P, Lieurade H P 1996 *Mater. Sci. Eng.* **210** 102
- [4] Ocana J L, Molpeceres C, Porro J A, Gomez G, Morales M 2004 *Appl. Surf. Sci.* **238** 501
- [5] Luo H, Hanagud S 1997 *38th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Kissimmee, USA*, April 7-10, 1997 AIAA-97-1159
- [6] Liu X Y, Ye S G 1999 *Acta Acoust.* **24** 429 (in Chinese) [刘小宙, 叶式功 1999 声学学报 **24** 429]
- [7] Zhao R, Liang Z C, Han B, Zhang H C, Xu R Q, Lu J, Ni X W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1877
- [8] Ocana J L, Molpeceres C, Morales M, Garcia-Beltran A 2000 *Proc. SPIE* **3885** 252
- [9] Morales M, Ocana J L, Molpeceres C, Porro J A, Garcia-Beltran A 2008 *Surf. Coat. Technol.* **202** 2257
- [10] Gu Y Y, Zhang Y K, Zhang X Q, Shi J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5885 (in Chinese) [顾永玉, 张永康, 张兴全, 史建国 2006 物理学报 **55** 5885]
- [11] Yao H B, Ma G D, Tong Y Q, Zeng X B, Zhen X L, Jiang G P, Zhang Y K 2013 *Appl. Mech. Mater.* **437** 358
- [12] Feng A X, Shi F, Han Z C, Xie W, Li B, Yang R, Lu Y 2013 *High Power Laser Particle Beams* **25** 872 (in Chinese) [冯爱新, 施芬, 韩振春, 薛伟, 李彬, 杨润, 卢轶 2013 强激光与离子束 **25** 872]
- [13] Zhang Y K, Yu Y S, Yao H B, Wang F, Ren A G, Pei X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5602 (in Chinese) [张永康, 于永生, 姚红兵, 王飞, 任爱国, 裴旭 2010 物理学报 **59** 5602]
- [14] Liu L, Wang S B, Wu H X, Guo D H, Liao P Y 2007 *Laser Technol.* **31** 134 (in Chinese) [刘丽, 王声波, 吴鸿兴, 郭大浩, 廖培育 2007 激光技术 **31** 134]
- [15] Xi D Y, Zheng Y L 1995 *Explo. Shock Waves* **15** 174 (in Chinese) [席道瑛, 郑永来 1995 爆炸与冲击 **15** 174]

Experimental study of shock waves induced by a nanosecond pulsed laser in copper target*

Wang Ji-Xun¹⁾ Gao Xun^{1)†} Song Chao²⁾ Lin Jing-Quan¹⁾

1) (School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

2) (School of Chemistry and Environmental Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(Received 1 August 2014; revised manuscript received 9 September 2014)

Abstract

In this paper, the shock waves induced by a nanosecond pulsed laser in copper target are studied and the relative pressures of shock waves are measured by using the piezoelectric polyvinylidene fluoride piezoelectric sensors. The evolutions of the relative pressures of shock waves with laser pulse energy and target thickness are discussed. Experimental results show that the pressure of shock wave is 2.1 MPa when the nanosecond pulsed laser with an energy of 500 mJ irradiates on a 2 mm thick copper target. When the laser energy increases from 200 to 500 mJ, the pressures of shock wave can increase 162% and 231%, with the target thickness values being 2 and 4 mm respectively. But when the thickness of the copper target increases from 2 to 6 mm, the pressures of shock waves with laser pulse energies of 400 and 500 mJ are reduced by 32% and 49%, respectively.

Keywords: laser induced shock wave, piezoelectric polyvinylidene fluoride sensor, pressure of shock wave

PACS: 52.35.Tc

DOI: 10.7498/aps.64.045204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11074027, 61178022), the Natural Science Foundation of Jilin Province, China (Grant No. 201215132), and the Doctoral Fund of Ministry of Education of China-New Teacher (Grant No. 20112216120006).

† Corresponding author. E-mail: lasercust@163.com