

文章编号: 1001-1455(2005)03-0227-05

全息干涉法在条形药包离面位移场研究中的应用*

龚 敏¹, 王德胜¹, 黎剑华²

(1. 北京科技大学, 北京 100083;

2. 中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘要: 以新型红宝石激光照相装置为基础, 进行动态全息实验系统研究及设计, 实现了一次爆破加载获取四个动态过程爆破模型的位移场条纹图, 用此研究了线型载荷爆破时质点离面位移振动的变化规律。研究表明: 端部延长线方向离面位移值在全场所有剖面始终最小, 发现在线型载荷离面位移场和应力场一样, 同样存在端部效应现象; 中垂线上的最大位移值在不同时间都高于其它计算剖面位移极值; 瑞利波产生的位移衰减很慢。

关键词: 爆炸力学; 动态位移; 全息干涉法; 爆破模型

中图分类号: O389

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引 言

激光全息干涉方法是当今比较前沿的研究手段。20 世纪 80 年代中期以前主要是如何运用激光这种手段进行研究, 如 D. C. Holloway^[1] 用全息干涉法研究了 R 波遇沟槽的反射波, J. F. Cordenas-Garcia 等^[2] 用双脉冲激光器进行了 R 波 Lamb 解的实验研究。90 年代后研究的重点放在工程的初步应用上。秦虎等^[3] 用全息法进行地震波效应分析。但研究中也暴露出一些问题: 实验成功率相当低(国内外均如此), 研究成本昂贵; 动态全息实验一次只能记录一个时刻信息, 至今不能进行多个动态过程的研究; 实验非常复杂, 必须靠技术人员的经验进行操作等。这些问题限制了全息干涉方法在爆破研究中的发展。

针对上述困难, 我们对实验系统进行专题研究, 设计红宝石序列脉冲激光器的光路以及附属的爆破加载、同步控制系统; 试图在一次爆破加载中获取四个时刻较为复杂的全息干涉条纹图, 并在对其进行判读和数据分析的基础上进行条形药包位移场的研究; 此外实验成功率和成本将有明显改善。

2 实现多时刻位移场记录的实验系统

多时刻动态全息位移实验可行的必要条件在于全息干涉光路, 为达到一次爆破加载能同时记录四个动态时刻位移图的目的, 对激光光源进行了设计, 采用腔内分光, 可按预先设置的时序发出八个脉冲激光, 使其在空间形成四个方阵排列的光点(每次曝光发出四个, 四个方阵的同一点先后发出两次激光以进行二次曝光)。在同一次曝光的四个方阵光点中, 每个光点可按选定的时刻先后发出激光。

图 1 是外光路布置图, 为表达方便, 图中只画了水平两路。四路不同时间发出的激光。每一光点通过图 1 的光路分别到达空间上独立的照相平面, 即不同时刻的条纹图在不同的照相平面成像实现分幅, 这一设计思想和多火花动光弹的光路布置有相同之处, 即用空间分幅达到时间分幅的目的。

在外光路设计上, 从光源发出的激光通过分光镜, 透射光由全反射镜三次、四次改变光路后经扩束准直镜, 在照相平面形成四路参考光斑; 反射光被扩束再经过与光路成 45° 的半透射半反射镜, 其中反射光通过 $\varnothing 300$ 的大准直镜到达模型, 模型表面镀有 70% 的反射膜, 照射在其上的反射光束又返回, 通

* 收稿日期: 2004-08-25; 修回日期: 2004-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(19802002)

作者简介: 龚 敏(1963—), 男, 博士, 副教授。

过左侧大准直镜、半透平反镜、成像物镜形成物光。物光和参考光在干版平面的重叠，完成反射式全息干涉光路，再经过二次曝光形成全息干涉条纹。

在光路布置中，虽然光路原理设计正确，但在实际空间布置和内外光路调试中，却是十分的复杂和艰难。即使在激光技术发展到今天，仍然没有太好的办法可以解决这一问题，这也是多时刻爆破模型位移图试验的难点之一。

3 全息干涉条纹的分析理论

经过理论分析和推导^[4]，爆破后垂直振动位移振幅的模 L' 和激光器波长 λ 、条纹级次 N 、光的入射角 θ 有如下关系

$$L' = \frac{N\lambda}{2\cos\theta} \quad (1)$$

在实验中， $\theta \approx 4^\circ$ ， $\cos 4^\circ \approx 1$ 。激光器的波长 $\lambda = 694.3 \text{ nm}$ 。全息干涉测量的离面位移量在微秒至数十微秒之间，测量精度在 $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ 以内。

4 模型试验设计

模型选用普通有机玻璃，无暂时双折射效应。模型的尺寸为 $25 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ，在 O 、 D 两点同时起爆，以 OA 、 OC 、 OB 和 EE 剖面，即条形药包端部各方向、中垂线上质点位移的变化进行研究，各剖面原点位置规定： OA 、 OC 、 OB 以 O 点为坐标原点， EE 以 OD 的中点为原点，各剖面的延长线方向为 x 轴方向，实验采用两端(O 、 D)同时起爆，图 2 是模型设计图。

5 条形药包爆破模型离面位移条纹图的获取及数据处理分析

5.1 实验结果和根据条纹图中的应力波信息的分析

图 3 是爆破实验获得的全息干涉条纹图。与动光弹等差条纹图明显不同的是，全息干涉条纹图上级次的正负并不表示它的受力性质，其力学意义是离面位移振动方向。另外，等差条纹图是一次成像，图片质量较好，而全息干涉图在两次曝光过程中受诸多因素影响，每一个图片质量是不均匀的，图 3 所示的三个照片的差异亦说明了这一点。根据近年来的研究成果^[5]，条纹图无论性质如何，均隐含了应力波作用的信息，因此对应力波传播的情况进行定性的分析。

在图 3(a)中，P、S 波的波阵面已被标示。外部条纹表达了膨胀波的传播，其后的剪切波也已形成，瑞利波尚未出现。在炸药起爆后 $43 \text{ }\mu\text{s}$ ，由于条形药包多点起爆后应力波的复杂迭加^[6]，波阵面上的膨胀波(P 波)在中垂线方向迭加迅速外鼓，使整个波阵面形状更接近一个椭圆。经过对条纹图位移计算

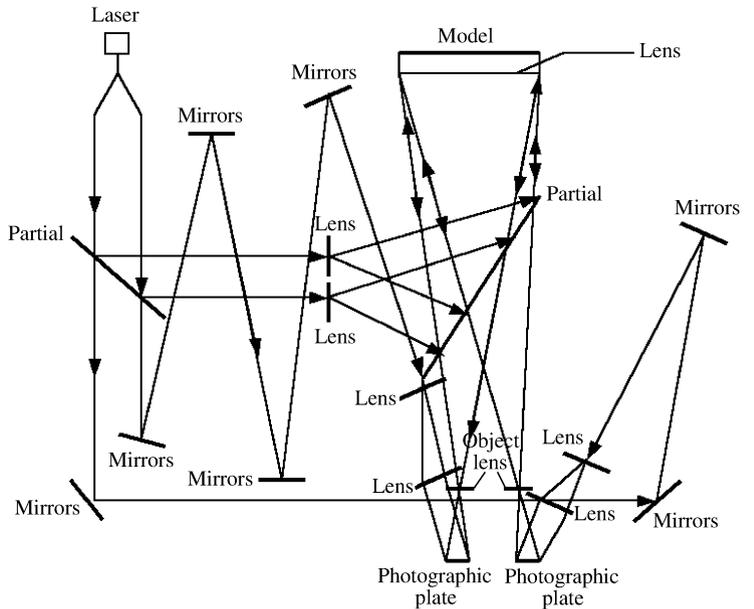


图 1 多时刻记录的全息干涉外光路布置图
Fig. 1 Arrangement of external optical path of holo-interferometry to record at different time

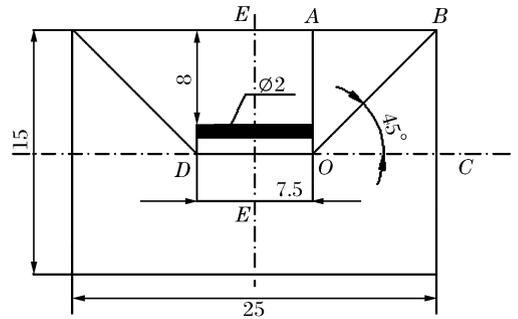


图 2 爆破模型设计图
Fig. 2 Design of blasting model

分析,45°方向所在区间的应力波形状主要为条叶形,这是瑞利波在所有条纹图中的典型特征,从该波阵面的传播的波速与膨胀波的比较同样证明了瑞利波的存在。在记录的最后一个时刻,柱部应力波在中垂线方向仍以膨胀波占主导地位,维持了稳定的速度,端部和中垂线方向之间的区域是瑞利波传播区间,整个波阵面形状已接近集中药包传播的同心圆,但质的区别在于后者的同心圆里是不均匀的,表现在两端应力波较低,而中垂线上较高的现象。

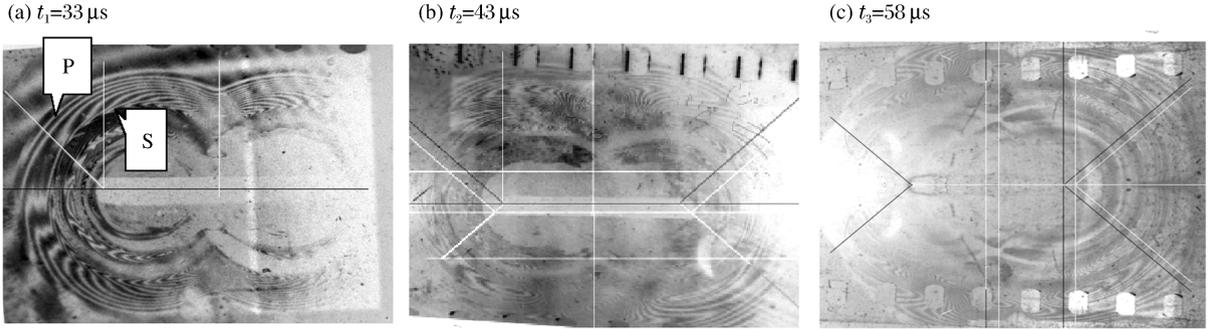


图 3 条形药包爆破时的全息干涉条纹图

Fig. 3 The holo-interferometry fringes patterns from linear charge detonation

5.2 数据处理结果分析

利用动态条纹判读准则^[5]确定了图 3 三个时刻条纹图的条纹级数,然后根据式(1)计算了起爆后三个时刻四个剖面的离面位移值,如图 4 所示。

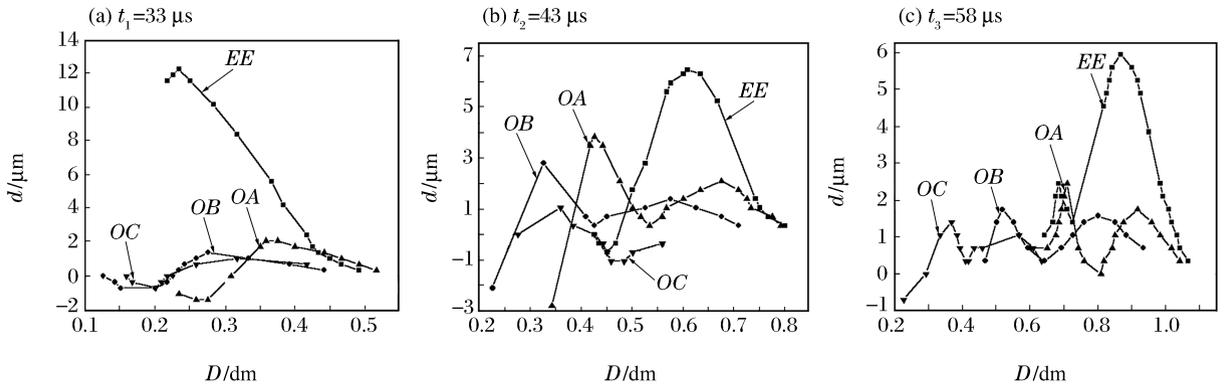


图 4 不同时刻四个特征剖面的离面位移分布比较

Fig. 4 The vertical displacement of four sections at different time

从图 4 可知,当 $t_1=33 \mu s$ 时,中垂线 EE 、45°线 OB 、起爆点竖直线 OA 、端部延长线 OC 最大离面位移值分别为 12.25、1.40、2.10、1.05 μm ,在 $t_2=43 \mu s$ 、 $t_3=58 \mu s$ 时,四个剖面的最大离面位移值分别为 6.48、2.80、3.85、1.05 μm 和 5.95、1.75、2.45、1.05 μm 。由此可发现,在记录的三个时刻中垂线上的位移极值较其它三个剖面大得多,特别是在起爆后的初期(如起爆后 33 μs),中垂线上的位移极值较其它剖面的大 5 倍以上;从中垂线向药包轴线方向,各剖面的位移极值逐渐变小,至药包轴线上最弱,在端部,垂直振动的位移维持在一个较低的水平,换言之,越往轴线端部方向靠近的剖面离面位移越小。因此在大爆破布药设计时,对药包中垂线方向的爆破振动应予以充分的重视,在可能的情况下尽量避免该方向正对建、构筑物,如条件实在不允许可利用条形药包的转向来实现最大振动方向的改变。究其原因,中垂线方向最大位移极值是由膨胀波不断叠加形成的,而在 45°及侧边方向是由瑞利波形成的位移极值。

图 5 表示了每一特征剖面不同时刻的离面位移随距离变化的比较,由图可知,对于中垂线剖面, t_2 时的离面位移极值较 t_1 时下降了近一倍, t_2 较 t_3 减少了 8%,但即使降到 t_3 时刻仍比其它任意剖面任一

时刻的离面位移极值大得多,所记录的后两个时刻中仍至少比其它剖面的位移极值大近两倍;值得注意的是 45° 线和起爆点竖直线剖面上是瑞利波占主导地位,条形药包爆破后期,侧向的瑞利波得到加强,使得垂直振动位移增强。在 t_2 时较 t_1 离面位移极值分别上升了2倍和1.8倍,在 t_3 时,位移极值较 t_2 时下降,但仍高于 t_1 时刻。尽管在几个计算剖面的位移值不如中垂线方向大,但衰减较慢,并且经数据分析发现 45° 方向附近区域的位移极值和中垂线方向的极值接近。

从图5(d)中可以看出,端部延长线上的位移随时间的变化非常小,三个时刻的最大位移极值均为 $1.05 \mu\text{m}$,维持在一个较低的强度范围内。过去动光弹研究中,条形药包等差条纹图中应力波的数值的变化规律与此相当吻合^[7],在全场应力及位移数据中均表现出最弱的特点。爆破设计时,在地形许可的条件下,应尽量将端部方向和保护物方向一致。

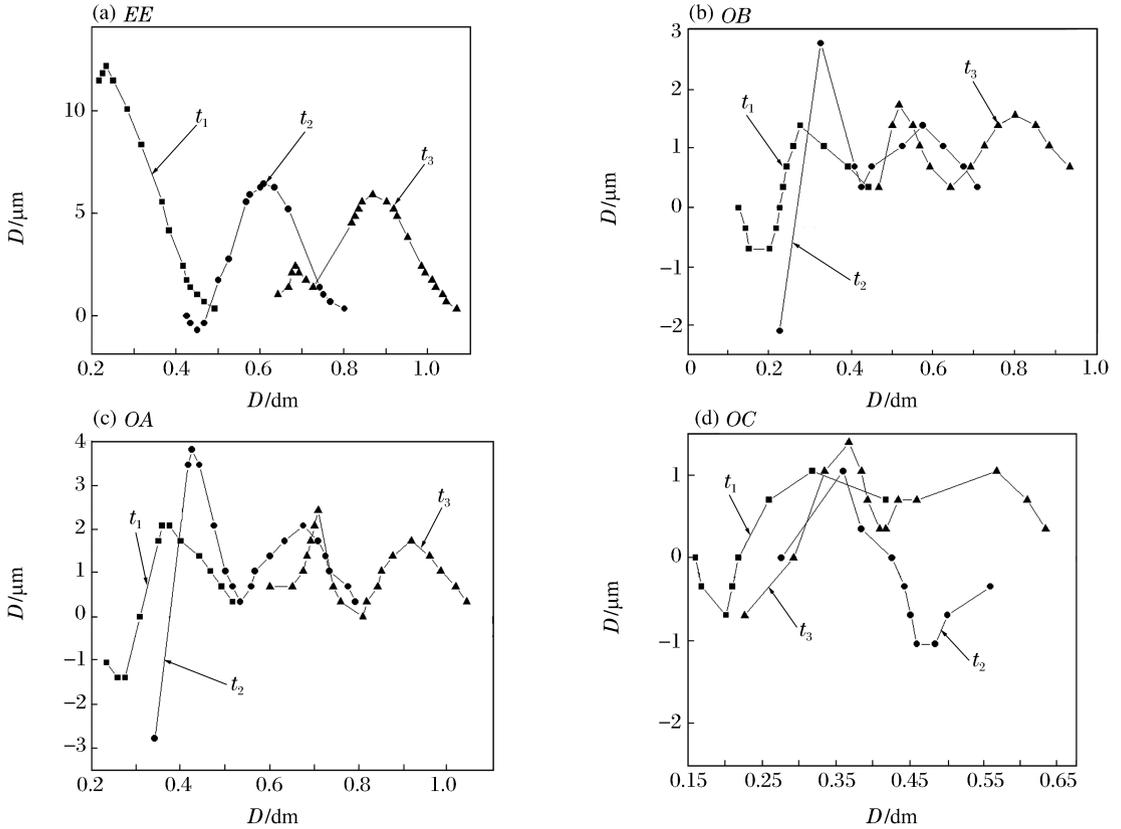


图5 同一特征剖面不同时间的离面位移变化比较

Fig. 5 The vertical displacement of the same section at different time

6 结论

(1)全息干涉爆破模型的位移场全场定量分析在经过大量的工作后,已经具备了对工程爆破应用问题进行研究的条件,将此方法运用于爆破模型的研究是非常有意义的。现在的研究只是一个初步的探索,还有大量的研究有待深入进行,尽管如此,它已经展示了其良好的应用前景。

(2)无论在哪一动态时刻,条形药包中垂线上的极值位移条纹都是全场的最大位移值,比其它剖面的对应值至少大近两倍,并且它的平均离面位移(即质点垂直振幅)也是最高的。大爆破工程药包布药设计时,对该方向的爆破振动应予以足够的重视。

(3)在位移场的变化过程中,中垂线上的位移值在爆破的初期很快达到了整个应力波作用的最大值。在 45° 线及其附近的区域,最大振幅值则较之明显滞后,从时间效应的角度看, 45° 线上的较大位移持续时间较长,且衰减缓慢。

(4)端部及延长线上垂直方向振幅的变化过程比较稳定,数值较低,显示出了明显的端部效应,它表

明对于条形药包爆破震动也存在端部效应现象,在布药设计时,如有可能应尽量使被保护建、构筑物位于药包端部方向。

(5)在位移场的变化过程中,中垂线上最大垂直振幅的极值是由膨胀波引起的,其余区间最大振幅则由瑞利波产生。也正由此表现出了 45° 线及附近区域位移场衰减较慢的情况。

参考文献:

- [1] Holloway D C. Application of holographic interferometry to stress wave and crack propagation problems[J]. *Optical Engineering*, 1982,21(3):468—473.
- [2] Cardenas-Garcia J F, Holloway D C. On the lamb solution and Rayleigh-wave induced cracking[J]. *Experimental Mechanics*, 1988,(6):105—109.
- [3] 秦虎,杨永琦.应用脉冲全息法研究爆炸引起的地表震动[J].*爆炸与冲击*,1990,10(4):355—359.
QIN Hu, YANG Yong-qi. Studies on surface vibration induced by explosion with a method of pulsed laser holography[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1990,10(4):355—359.
- [4] 维斯特.全息干涉度量学[M].樊雄文,王玉洪,译.北京:机械工业出版社,1984:77—80.
- [5] 龚敏,于亚伦,佟景伟.爆破等差与等和条纹图分析方法探讨[J].*爆炸与冲击*,1997,17(3):265—271.
GONG Min, YU Ya-lun, TONG Jing-wei. Study on the methods of analysis for transient isochromatic and isopachic fringes[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997,17(3):265—271.
- [6] Starfield A M, Pugliese J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurement[J]. *Int J of Rock Mech and Min Sci*, 1968,(5): 65—77.
- [7] 邓志勇,张志毅,王中黔.条形药包端部爆炸应力场的动光弹试验研究[J].*爆炸与冲击*,1996,16(1):86—90.
DENG Zhi-yong, ZHANG Zhi-yi, WANG Zhong-qian. Dynamic photoelastic studies of explosive stress field at the end of linear charge[J]. *Explosion and Shock waves*, 1996,16(1):86—90.

Application of holographic interferometry to study vertical displacement field in linear charge

GONG Min^{*}, WANG De-seng, LI Jian-hua

(1. *University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

2. Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: On the basis of the new ruby laser apparatus, the experiment system of transient holographic interferometry is devised, by which vertical displacement fringe patterns at four different times are acquired in one blasting loading. And the vertical displacement changing of different sections is studied in linear blasting charge. The result shows that the displacements in axis direction are the smallest in any sections; it is found that the phenomenon of “end effect” which exists in stress field exists in the displacement field in linear charge too. Extreme values of vertical displacement at perpendicular line of the linear charge middle point is the biggest in all of the sections analyzed in the full field after any time of detonation; The strength of the displacement which is caused by Rayleigh wave reduces slowly.

Key words: mechanics of explosion; dynamic displacement; holographic interferometry; blasting model

* Corresponding author: GONG Min

E-mail address: gongmin@ces.ustb.edu.cn

Telephone: 010-62333268