

# 应用脉冲全息法研究爆炸 引起的地表振动\*

杨永琦 秦 虎

(中国矿业大学北京研究生部)

**摘要** 本文介绍了应用于爆炸应力波研究的脉冲激光全息实验方法:记录了三维模型中爆炸应力波引起的表面位移的全息干涉图:经对干涉条纹图的分析 and 计算,发现小药量爆炸引起的表面振动随药包埋深的增加而减弱。

**关键词** 脉冲激光全息法 应力波 地表振动

## 1. 引言

临近地表的装药爆炸时所释放的一部分能量从爆源以波的形式向外传播,经过介质而到达地表,引起地表的振动。长期以来,研究人员主要采用测振仪对爆炸引起的地表振动进行观测和实验研究。但这种方法只能获得各测点的振动衰减规律,并且实测数据受多种因素影响。我们进行了小药量爆炸加载模型实验研究,应用脉冲激光全息干涉法,获得了爆炸加载条件下三维模型表面位移的全场信息。

## 2. 实验技术

根据全息干涉原理,在同一全息底片上对物体的两个不同状态相继进行全息记录。若第一次曝光在物体未加载前,第二次曝光则在爆炸加载后某一时刻。这样就得到了爆炸加载后某一时刻物体表面的全息干涉图。再现的干涉条纹与两次曝光之间物体的表面变形有关。根据我们的实验情况,条纹图表示了三维模型的离面位移轮廓。通过分析和计算干涉条纹,就可以用波长来确定模型表面的位移规律,由此可获得三维模型中爆炸应力波的传播规律。实验装置如图1所示。

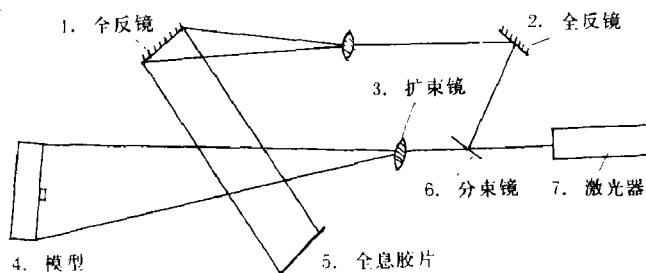


图1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experiment Set-up

1. Mirror; 2. Mirror; 3. Beam expander; 4. Model; 5. Holograph film;

6. Beam splitter; 7. Laser.

\*国家自然科学基金资助。

1989年9月21日收到原稿,1990年4月11日收到修改稿。

采用大理石作为实验模型，其纵波速度为3000米/秒，瑞利波速为1770米/秒。用自制的简易微秒雷管（药包）进行爆炸加载。所有实验中均采用集中药包。

双脉冲激光器的脉冲宽度小于 50ns。考虑到爆炸应力波的传播和脉冲激光均为瞬态现象，因此整个全息干涉实验的关键是解决同步问题。为此我们设计制作了由同步机、爆炸加载装置和脉冲激光器组成的同步控制系统。经上百次实验证明，整个系统性能稳定可靠，误差精度不超过 1 μs。

当用两次曝光法获得了全息干涉图后，就需对它再现的干涉图样进行分析，这是全息干涉法的一大难题，特别是对于动态全息。我们采用 J. E. Salid<sup>[1]</sup> 的方法，对条纹图样进行分析，如图 2 所示。由点光源 O 照明物体，物点 P 散射的光通过全息图到达 Q 点的观察者。假设在两次曝光期间物点 P 的位移矢量为  $\vec{L}$ ，物点 P 位移前后散射的光到达 Q 点的相移为  $\delta$ ，则  $\delta$  与  $\vec{L}$  有如下关系

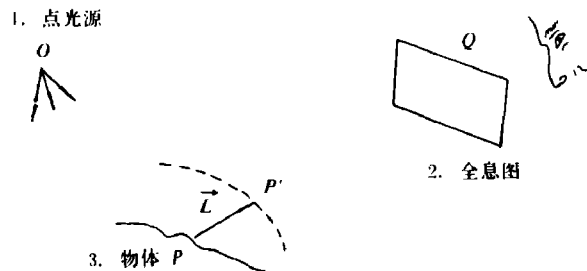


图2 全息法系统简图

Fig. 2 Schematic diagram of the holograph system  
1. Light source; 2. Hologram picture; 3. Object

$$\delta = (\vec{K}_1 - \vec{K}_0) \cdot \vec{L} = \vec{K} \cdot \vec{L} \quad (1)$$

式中  $\vec{K}_0$  和  $\vec{K}_1$  分别是 P 点的照明光和向着观察者的散射光的传播矢量。其大小为  $2\pi/\lambda$ ； $\vec{K} \equiv \vec{K}_1 - \vec{K}_0$  是灵敏度矢量。

若  $\vec{L}$  的位移位于 OPQ 平面内，则称为共面位移，如图 3 所示。由式 (1) 可得

$$\delta = 2KL \cos\theta \cos\varphi \quad (2)$$

这样可求出平行于灵敏度矢量的  $\vec{L}$  分量  $L'$  的大小

$$L' = \delta / 2K \cos\theta \quad (3)$$

考虑到  $\delta = 2N\pi$ ，(3) 式变为

$$L' = N\lambda / 2 \cos\theta \quad (4)$$

式中 N 为条纹级数。L 和 L' 分别为其矢量的模， $\theta$  为 P 点的照明光矢量和向着观察者散射的光的传播矢量所构成的夹角之半。

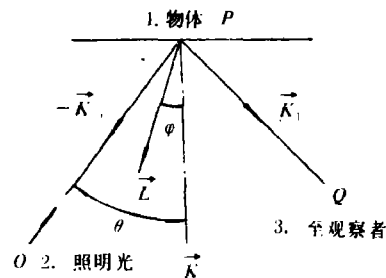


图3 位移矢量关系图

Fig. 3 Relation of the displacement vector  
1. Object; 2. Light source; 3. Observer

根据全息干涉原理，暗条纹对应半级数，亮条纹对应整数级。这样如果已知某点的灵敏度矢量和条纹级数，就可确定该点的离面位移的大小。

### 3. 实验结果及分析

#### (1) 表面加载

作为浅埋药包的特例，分别记录了爆轰后不同时刻表面振动的序列全息干涉图。图 4 为 29 mg 的药包爆轰后 103 μs 时的典型全息干涉图。爆源位于模型的右边，距边缘为 8 cm。由图可知，应力波在三个方面已经反射。而爆源左边的应力波，其波前已到距爆源 18 cm 处。根据波阵面的位置及传播时间可知，此时 P 波的振幅已完全衰减，图中的干涉条纹完全是由瑞

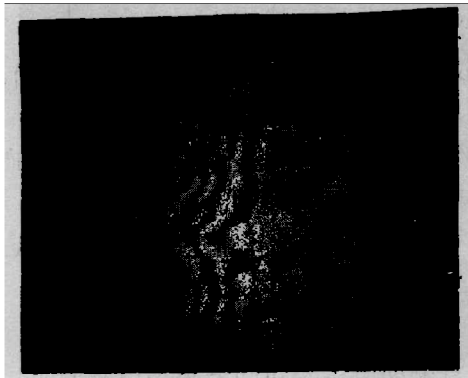


图4 表面药包爆轰后103 μs时的全息干涉图  
Fig. 4 Holograph interferogram at 103 μs after explosion of surface explosive

利波 (R波) 产生的。在应力波未传到的地点, 模型表面没有位移 (在两次曝光期间), 因而无干涉条纹产生。所以, 该点对应着零级条纹级数。

若从左向右观察, 遇到第一个暗条纹后, 位移梯度变小, 出现第一个峰值 (外凸); 然后条纹变密, 但位移方向发生转变, 出现第二个峰值 (内凹), 之后条纹又变密, 位移又逐渐减小。在爆源附近, 由于空气冲击波的影响, 干涉条纹的信息无法量测到。图5表示了上述干涉条纹级数沿  $x$  轴的分布规律。在水平方向, 离面位移符合共面位移的条件。因此可确定 R波引起的离面位移与爆心距之间关系, 如图6所示。

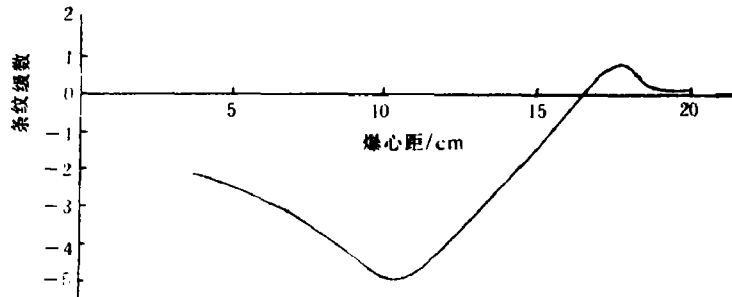


图5 条纹级数与爆心距之间关系

Fig. 5 Order of the fringe patterns versus distance from the center of explosion

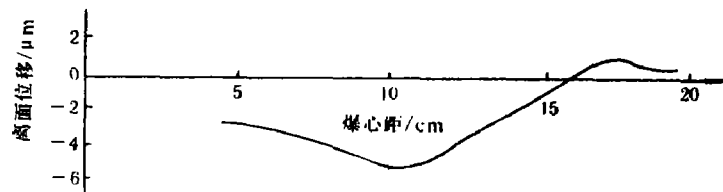


图6 离面位移与爆心距之间关系

Fig. 6 Displacement from the surface versus distance from the center of explosion

### (2) 浅埋药包

经过十几次试验, 成功地记录了不同埋深的临近表面爆炸的全息干涉图。其加载方法是将集中药包放入  $\phi 3.4$  mm 的钻孔内。通过对干涉条纹的分析, 即可了解炸药爆炸后不同时刻的离面位移状况。

图7是埋深为7 mm 的药包在爆轰后53 μs 时的干涉条纹图。加载源为29 mg 的药包位于模型左上角, 距边缘均为10 cm。由图可知, 应力波正向右传播。干涉条纹比较稀疏, 说明位移梯度不大。按照前述的分析方法, 即可获得爆源右方水平方向上的离面位移分布规

律, 见图8。

图9再现了埋深为11mm的药包在爆轰后52 $\mu$ s时的应力波分布。爆源为31mg的药包位于模型右上角, 距边缘8cm。此时P波已传播了15.9cm, 但其强度严重衰减到不足以产生干涉条纹。而在爆源的近区, 仅有残余的R波产生了一些干涉条纹。

图10显示了埋深为15mm的药包在爆轰后24 $\mu$ s时的全息干涉图。此次装药量增加到50mg, 因此爆炸产生的位移梯度很大, 特别是在爆源附近。爆源右方的干涉环是应力波与空孔作用的结果。该空孔是前一次实验时的爆源。显然应力波的传播并不是完全对称的, 这是由前次爆炸引起的轻微破坏和大理石模型固有的非均质性造成的。

现分析一下爆源左边水平方向的条纹分布情况。从离爆源最远的左侧开始: 第一个暗条纹代表P波的波前, 此点离爆源8.4cm; 接着遇到两个位移峰值, 第一个为最小值, 第二个为最大值; 之后是高梯度的变形区。其位移与爆心距的关系如图11所示。



图7 埋深为7 mm的药包在爆轰后53 $\mu$ s时的全息干涉图

Fig. 7 Holograph interferogram at 53 $\mu$ s after explosion under the condition that the explosive cartridge is at the depth of 7 mm

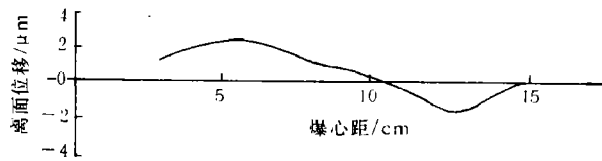


图8 离面位移与爆心距之间关系

Fig. 8 Displacement from the surface versus the distance from the center of explosion



图9 埋深为11 mm的药包在爆轰后52 $\mu$ s时的全息干涉图

Fig. 9 Holograph interferogram at 52 $\mu$ s after explosion under the condition that the explosive cartridge is at the depth of 11 mm



图10 爆轰后24 $\mu$ s时的干涉条纹图  
Fig. 10 Interference fringe at 24 $\mu$ s after explosion

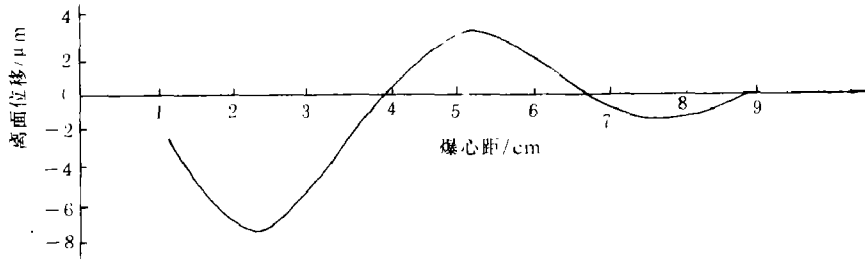


图11 离面位移与爆心距之间关系

Fig. 11 Displacement from the surface versus the distance from the center of explosion

#### 4. 结语

根据模拟实验研究结果, 已证明脉冲全息干涉法用于研究爆炸引起的表面位移问题是完全可行的。本方法的主要优点是能够提供有关表面位移的直观全场信息。直接采用地质材料作实验模型, 而且不需对其表面作特殊处理, 大大减小了模拟实验的难度。

初步实验研究表明, 在小药量爆炸加载条件下, 爆炸引起的表面振动随药包埋深的增加而减弱。

临近表面的一次爆炸传递着三种波: 即 P 波、S 波和 R 波。它们在传递过程中逐渐分离, 而且在不同的爆心距范围内 (或不同的爆炸时刻后), 它们分别起着不同的主要作用。

总之, 脉冲全息干涉法在爆炸实验中的成功应用, 为研究固体中的应力波提供了新的手段, 这对实验力学的发展将产生一定的作用。

本实验采用的 DJ-2 型脉冲激光器是华东工学院研制的, 并由中国矿业大学北京研究生部与其共同开发作者感谢华东工学院林太基研究员、王其祥教授及 809 研究室对实验工作的支持和帮助。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] C. M. 维斯特: 全息干涉度量学, 机械工业出版社, (1984).
- [ 2 ] Holloway, D. C. et al., Holographic study of Dynamic Surface Response to Explosive Loading. 5th Inter. Cong. on Exp. Mech. (1984), Montreal.

**STUDIES ON THE SURFACE VIBRATION INDUCED BY  
EXPLOSION WITH A METHOD OF PULSED  
LASER HOLOGRAPHY**

Yang Yongqi, Qin hu

*(Beijing Graduate School, China Institute of Mining and Technology)*

**ABSTRACT** The experimental method of pulsed laser holography, which is applied to the study of stress waves in explosion, has been used in this paper. The holographic interference patterns of the surface displacements caused by stress waves in explosion, has been obtained in 3D model. Through analysis and calculation of the interference fringe patterns, it has been found that the surface vibration caused by small amount of charge decreases with the increase of the burying depth of the charge.

**KEY WORDS** method of pulsed laser holography, stress waves, surface vibration.