

爆破动态应力场量化研究原理与初步实验*

龚敏 于亚伦 方祖烈

(北京科技大学矿业研究所 北京 100083)

摘要 以近年发展的激光动光弹与全息干涉法相结合,进行实验室二维爆破模型的全场动应力求解研究。在一次加载中可同时获得四个不同时刻的等和线与等差线条纹,从而在较为一般情况下完整地给出模型的全场动应力,解决了以往爆破模型全场主应力无法获得的难题。还阐述了主应力分离的理论公式;建立了相关的实验系统;用光程变化原理研究等和线条纹的级次,作为实例,对双孔透加应力场进行了定量研究。

关键词 主应力分离 爆破加载 定量分析

中图分类号 O348.12 O384

1 前言

爆破模型的全场动应力定量分析历来比较困难。近年来动光弹在爆破模型试验研究中得到了应用,但单独用动光弹只能记录等差条纹,必须与其它方法结合才能分离主应力。以激光技术为主要特征的现代光测力学目前发展较快,不少学者用它进行了动态问题的研究^[1~3],但未见这些研究有用于爆破模型主应力的实际计算,且往往只能测取一个时刻信息,对于重复性较差的爆破加载研究有一定局限性。

利用一种高速分幅激光照相系统,我们进行了爆破模型全场动应力量化研究。该设备的主要特点是综合运用了动光弹光路和全息干涉光路,一次加载可同时记录四个不同时刻的动态等差线与等和线条纹图(共八张)。我们对在这一实验光路下分离主应力的方法进行了理论分析;对实验系统的建立,双孔同时起爆实验模型的全场动应力分布,动态条纹判据(另文专述)等进行了研究,得到了一些初步的结论。

2 实验装置和原理

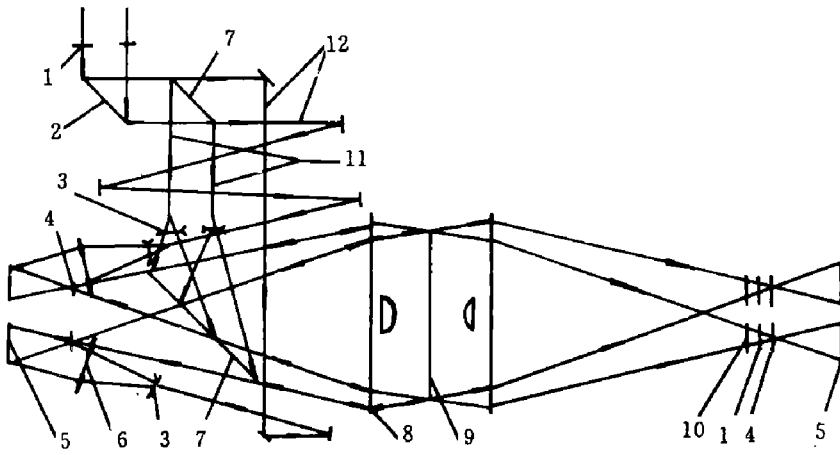
2.1 激光器光源和外光路

激光光源为红宝石序列脉冲激光器,采用一级放大,腔内分光,可按选定时间发出8个脉冲激光。在到达外光路之前,激光将在空间形成四个可调时序控制的、以方阵排列的光点^[4]。图1是外光路布置图,从光源发出的四路方阵式排列的激光(为表达清楚,图1表示的是水平两路)通过1/4波片后再过分光镜;透射光由全反射镜三次改变光路后经扩束准直镜,在照像平面(左侧干版平面)形成四路参考光斑;反射光被扩束再经过与光路成45°的半透半反镜,其中反射光通过 $\phi 300$ 的大准直镜到达模型,模型表面镀有60%的反射膜,照射在其上的反射光束又返回,通过左侧大准直镜、半透半反镜、成像物镜形成物光。在图1

* 国家自然科学基金资助项目。

1995-10-05收到原稿,1996-07-19收到修改稿。

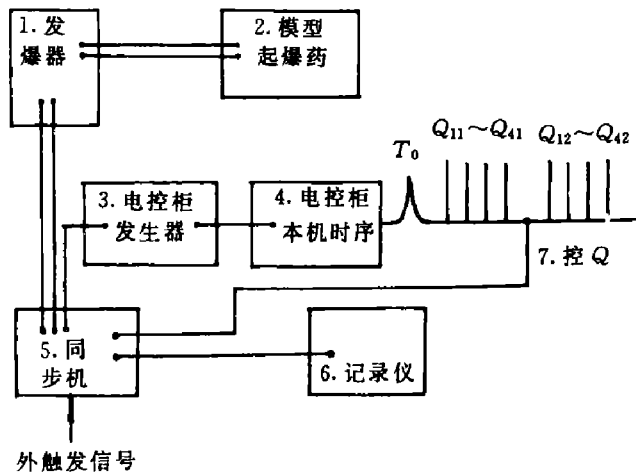
左侧的干版平面上,物光和参考光完成反射式全息干涉光路,二次曝光后形成等和线条纹(在模型与左侧大准直镜间加一平面玻璃,在两次曝光间转动玻璃,因光程发生变化导致玻璃边界处条纹错动,以此可判别等和条纹级次)。通过模型的透射光,经模型右侧的大准直镜、1/4 波片、检偏镜、成像物镜,在图 1 右侧干版平面上形成等差条纹。



1. $\frac{1}{4}$ 波片; 2. 全反射镜; 3. 扩束镜; 4. 成像物镜; 5. 干版; 6. 小准直镜; 7. 分光镜; 8. 大准直镜; 9. 模型; 10. 偏振片; 11. 物光; 12. 参考光
1. Quarter wave plate; 2. Mirrors; 3. Lens; 4. Object lens; 5. Photographic plate; 6. Lens; 7. Partial mirror; 8. Lens; 9. Model; 10. Polaroid plate; 11. Object beam; 12. Reference beam

图 1 外光路布置图

Fig. 1 Arrangement of external optical path



1. Initiation; 2. Model charge; 3. Trigger circuit in the electronic control device; 4. Time delay system in the electronic control device; 5. Synchronizing apparatus; 6. Recording device; 7. Q-switching device

图 2 同步控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of synchronizing control system

记录时用明场光路,记录介质为柯达 SO-173 全息胶片。

2.2 同步控制

图 2 是爆炸与拍照的同步控制方框图,其工作程序是:外触发信号给同步机,同步机一路给激光器电控柜,使其按预定时序点燃二级氙灯,直至发出第一激光;经同步机延时后另一路给 Q 开关进行第二次曝光(Q 开关的作用是使激光脉冲变窄,并使激光的发出在输入电压信号后具有可控时间间隔);第三路输入起爆电路,起爆器发出高压使雷管爆炸。

2.3 爆破加载设备与记录

模型材料采用聚碳酸脂板,爆炸载荷源为 DDNP,另加少量 PbN_6 作起爆药,用电离探针法起爆,起爆电压 2000V。

3 动态主应力的获取

由图 1 可知, 透射光场形成等差条纹图光路与普通动光弹是相同的, 故有

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N_c f_{\sigma_d} / \tau \quad (1)$$

式中: N_c 为等差条纹级次; τ 为模型厚度; f_{σ_d} 为动态等差材料条纹值。对于反射式全息干涉光路, 设模型上一点为 P , 变形后移至 P' 点, 点 S 表示光源, 点 O 位于全息图上 (如图 3), 对于变形前后的位相差 $\Delta\alpha$, 根据光学公式易得

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\vec{PS}}{|\vec{PS}|} + \frac{\vec{PO}}{|\vec{PO}|} \right) \cdot \vec{PP}' \quad (2)$$

即光程位相差是一标量, 为 \vec{PS} 、 \vec{PO} 单位矢量之和与 \vec{PP}' 的数量积。

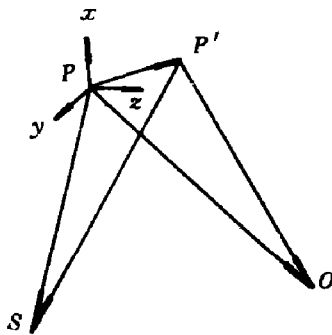


图 3 变形体的光程分析图
Fig. 3 Analyses of the optical path to deformed object

根据全息干涉理论, 二次曝光全息图的虚像光强为

$$I = C[1 + \cos(\Delta\alpha)] \quad (3)$$

C 是与物光和参考光光强有关的常数。

如图 4 所示, 由图 1 确定的光路反射物光部分, 其反射角 θ 等于入射角, 反射光投影在成像平面上, 光源位于 yz 平面内, x 轴垂直纸面, 屏幕和全息图平行于 x 轴

$$\frac{\vec{PS}}{|\vec{PS}|} = (\cos\theta)\mathbf{j} - (\sin\theta)\mathbf{k} \quad (4)$$

$$\frac{\vec{PO}}{|\vec{PO}|} = (\cos\theta)\mathbf{j} + (\sin\theta)\mathbf{k}$$

故 $I = C[1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda})(2\cos\theta)]\mathbf{j} \cdot \vec{PP}'$ (5)

当平面模型受力时, 模型上任意点 y 方向应变为 $\epsilon_y = -\gamma/E(\sigma_1 + \sigma_2)$, 则 y 方向位移分量

$$v = \frac{1}{2}\epsilon_y\tau = -\frac{\gamma\tau(\sigma_1 + \sigma_2)}{2E} \quad (6)$$

式中: γ 为泊松比; E 为弹性模量; τ 为未受力时模型厚度。代式(6)入(5)

图 4 \vec{PS} 、 \vec{PO} 和坐标轴的关系。

$$I = C \left\{ 1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda}) \left[-\frac{\gamma\tau}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)\cos\theta \right] \right\} \quad (7)$$

Fig. 4 Relations of \vec{PS} 、 \vec{PO} and coordinate axes

设 $-\frac{\gamma\tau}{\lambda E}(\sigma_1 + \sigma_2)\cos\theta = N_p$ (8)

为等和条纹级次; 则 $I = C[1 + \cos(2N_p\pi)]$, 当 $n = \pm 1/2, \pm 3/2, \dots$ 时, $I_{\min} = 0$, 出现明场下的暗条纹。

令 $f_{pd} = \lambda E / \gamma$ 为动态等和条纹值, 并代入(8)

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{N_p f_{pd}}{\tau \cos\theta} \quad (9)$$

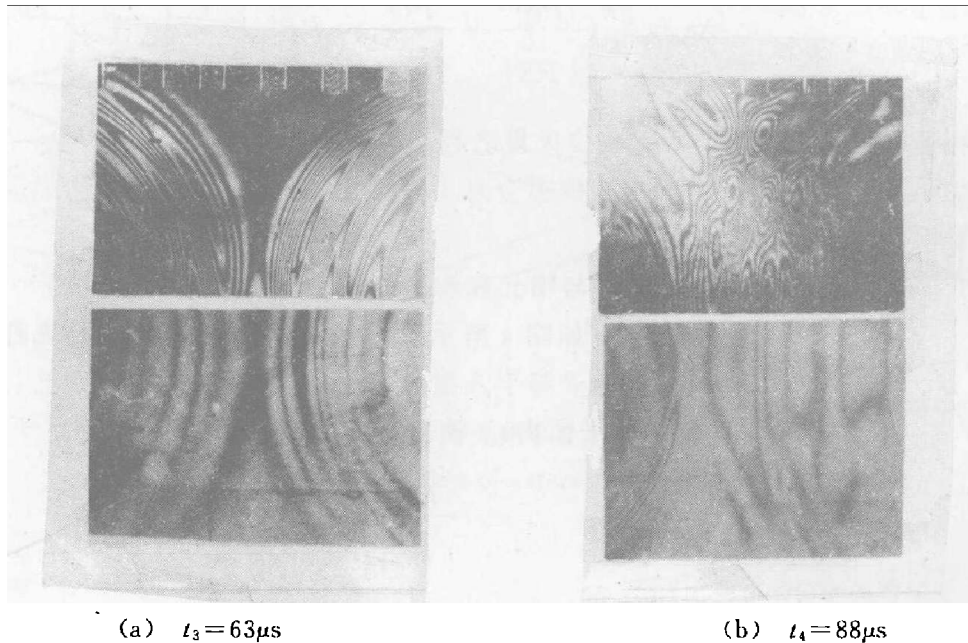
联立(1)、(9),即可求得 σ_1 、 σ_2 ,实现二维动应力定量分析。

试验中测取了模型有关动态力学参数,结果为: $c_p = 1734\text{m/s}$; $c_s = 810\text{m/s}$; $E_d = 3025\text{MPa}$; $f_{\sigma_d} = 0.987\text{N/m}$; $f_{p_d} = 0.53\text{N/m}$ 。

4 双孔同时起爆后动态应力场的全场定量分析

4.1 实验结果

图5是双孔同时起爆后两个关键时刻的等差与等和条纹图,为研究爆生气体的影响,左边孔加有导烟装置(为节省篇幅,各图均只取了对称部分)。



(a) $t_3 = 63\mu\text{s}$

(b) $t_4 = 88\mu\text{s}$

上为等和第纹;下为等差条纹

Up—*isopachic fringe*; Down—*isochromatic fringe*

图5 双孔同时起爆后的两种条纹图

(模型尺寸:264mm×250mm×5mm;药量:60mg DDNP)

Fig. 5 Two kinds of fringe patterns from two simultaneously detonated charges

(Figure size of the model:264mm×250mm×5mm;Weights of the explosive charge:60mg DDNP)

由图5可以看出,两孔起爆 $63\mu\text{s}$ 时两P波正好相遇,而到 $88\mu\text{s}$ 时,两P波完全叠加,波前已达到和另一源发出的S波刚好相切的位置。

图6是根据试验结果绘制的两个时刻两种条纹沿连心线上的分布图(以右边保气孔爆源为坐标原点),图7是根据式(1)、(9)计算的相应的主应力分量。

这里需指出,两P波完全迭加后($88\mu\text{s}$)条纹计级是相当麻烦的,必须尽量排除干扰因素,实施条纹追踪。尤其是等和条纹较等差条纹要致密,我们通过光程变化原理确定了两种条纹判据,据此在 t_4 时刻从左侧一孔P波尾部顺次计级到右侧此P波波前,条纹级数正好为0.5级(明场),而这恰好是另一孔S波波前,这充分证实了所确定条纹判据的正确性。

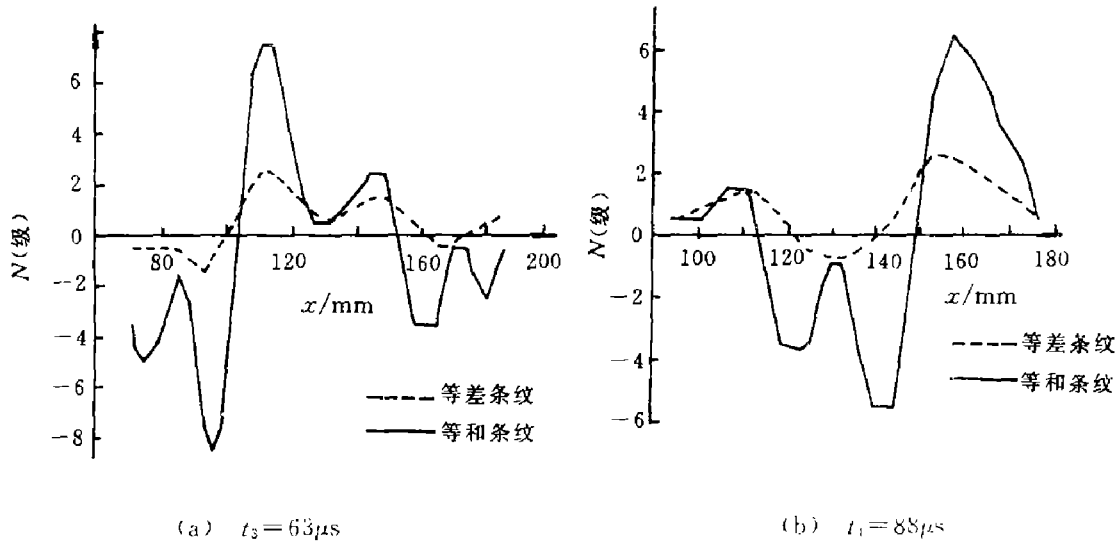


图 6 两个时刻连心线上条纹级次分布图

Fig. 6 Distribution of fringe order along symmetric axis at t_3 and t_4

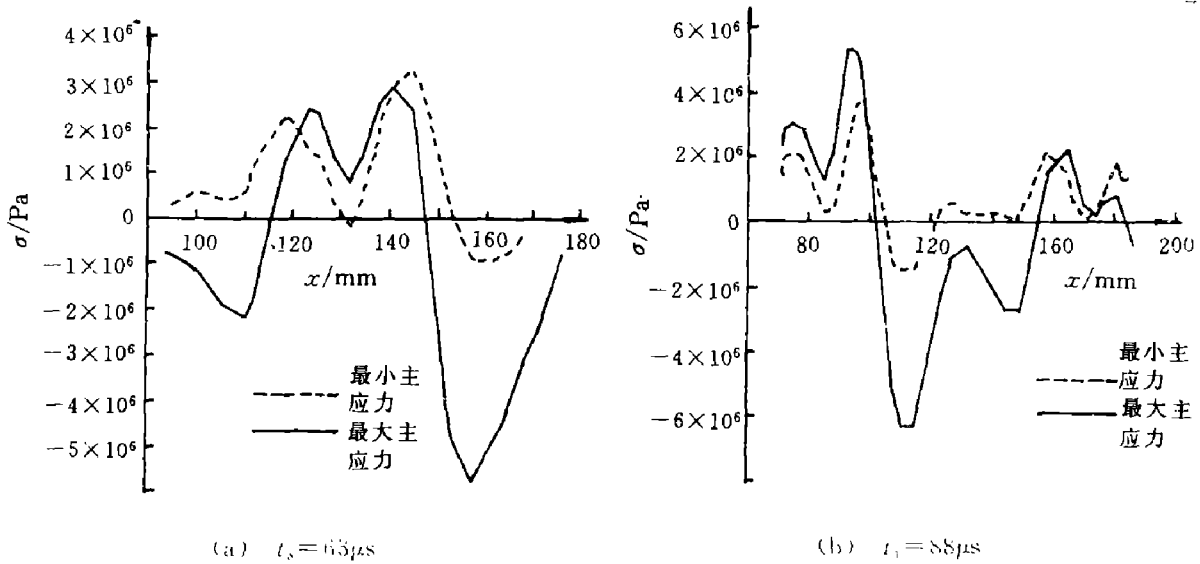


图 7 两个时刻连心线上主应力分布图

Fig. 7 Distribution of principal stress along symmetric axis at t_3 and t_4

4.2 动态应力场分析

$t_3 = 63\mu s$ 时, 两膨胀波前刚刚相切, 右边为保气孔 (距原点较近孔), 可以看出, 应力值远比左边 (非保气孔) 大。在距原点 112mm 处, 保气孔两主应力均达压应力峰值, 分别为 6.32MPa 和 1.48MPa, 在不保留爆生气体孔中, 最大主应力压应力峰值为 2.75MPa, 两孔最大主压应力峰值之比为 2.3 : 1, 保气孔最小主拉应力极值为 3.7MPa, 非保气孔最大拉应力极值为 2.22MPa, 二者之比为 1.67 : 1。

由此可见, 无论最大主应力之压应力还是最小主应力之拉应力, 保留爆生气体作用炮孔应力值的增大都是显著的。

下面重点分析 $t_4 = 88\mu s$, 两膨胀波进入完全迭加时的应力场。

根据图 6(b) 所示条纹级次, 计算了连心线上 40 个点的应力分量, 其分布规律由图 7

(b)给出。

在连心线中点($x=132\text{mm}$)附近,模型除了最大主应力小部分受压外,基本上呈双向受拉状态,在P波与S波相切部位,最大应力为压应力,最小应力为拉应力,这和两P波未叠加时(如 t_3 时刻)情况正好相反。整体上, t_4 时刻整个连心线上最小主应力基本上都为拉应力,最大主应力在叠加中点附近受拉,两边受压。最大主应力中拉应力极值为 2.88MPa ,最大压应力为 5.8MPa ;最小主应力中,压应力极值为 0.96MPa ,拉应力极值为 3.34MPa 。由此可知,当P波完全叠加、波前与另一孔S波相切时,叠加的各应力分量极值均有不同程度降低,但降低的幅度与单孔起爆(对比组试验同一时刻)相比并不大。

综上所述,在本试验条件下,最小主应力在叠加后几乎都为拉伸应力,这和双孔同时起爆的有关理论——叠加后连心线上各点均产生很大的切向拉伸应力,其观点是较为一致的。并且可知,应力P波从叠加至与另一方的剪切波相切,各应力分量仅比刚叠加时略有降低,这段时间大约在 $25\mu\text{s}$ 左右。因应力波在同一介质传播速度不随载荷大小而变化,故可断定,双孔叠加应力峰值应当在 $63\sim 88\mu\text{s}$ 之间某个时刻,从以往对多火花动光弹获得的等差条纹分析,峰值应力区在叠加时是肯定存在的,且比叠加前高约 30% ,此时各应力分量将普遍增大。在增加试验次数的基础上,峰值应力的确切值是较容易获取的。

5 动态条纹级次判读研究

根据式(1)、(9),要获得 σ_1 、 σ_2 ,在 $f_{\sigma d}$ 、 f_{pd} 、 τ 、 β 均可测知情况下, N_c 、 N_p 的正确判断就成为最关键的问题,这历来也是动光弹研究的难点。

以前的动光弹大多只能得到等差条纹图,关于等差条纹判据,Durelli作了系统的研究,朱振海在此基础上深入研究了一些较复杂的条纹图,对上述方法的某些观点人们还持有异议。对于等和条纹的一般判读方法和定量分析所必需获得的两种条纹图怎样分析、如何协调两种条纹判据,因过去无法得到两族条纹,进行这类研究非常困难。

我们在研究中采用在二次曝光之间改变物光光程办法来判断等和条纹级次,它具有较严密的理论基础;用此还证实了现行Durelli等差条纹判读方法的正确性;发现在两种条纹之间存在特殊的条纹对应区域。具体的分析较繁,我们将在另一篇文章中专门加以介绍。

6 结 论

随着激光技术的迅速发展,动态光测力学在爆破机理研究中的应用已进入一个新的阶段,它对爆破模型研究向着全场、动态、量化方向发展将产生重要的作用。现在,对于以往很不容易实现的双孔叠加应力场全场定量分析已变得较易实现,并且由于激光精度远远高于电火花光源,S波应力场分辨已可进行,尽管还有大量的工作有待完成,但可以指出,这种方法应用在爆破理论研究的前景是十分光明的。

参 考 文 献

- 1 Lallemand J P, Lagard A. Separation of Isochromatics and Isopachics Using a Faraday Rotator in Dynamic-holographic Photoelasticity. *Exp Mech*, 1982, 25(5): 174~179
- 2 Qin Y W. Application of Faraday's Effect in the Holographic Photoelasticity. *Proceeding of the International Congress on Experimental Mechanics*, 1981, 291~295
- 3 Holloway D A, Ranson W T, Taylor C E. A Neoteric Interferometer for Use in Holographic Photoelasticity. *Exp Mech*, 1972, 12(10): 461~465
- 4 龚敏. 全息动光弹在爆破模型全场定量分析中的应用研究:[硕士论文]. 北京:北京科技大学, 1993-03

PRINCIPLE AND PRELIMINARY EXPERIMENT OF QUANTITATIVE ANALYSES IN BLASTING STRESS FIELD

Gong Min, Yu Yalun, Fang Zulie

(*Institute of Mining, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083*)

ABSTRACT A new method in which dynamic holophotoelasticity combined with holographic interferometry is used in laboratory test to study the full field dynamic stress for two-dimensional blasting model. Four groups of transient isopachic and isochromatic fringe patterns at different time are acquired at one load, therefore, an integrated full field dynamic stress of the model is gotten at general conditions for the first time, and the two principal stress of the blasting model is established. In the paper, the theoretical formulas of separate principal stress are derived, the experimental system is setup, the principle of optical path changing is used in judgement for fringe orders, as an example, result of quantitative analyses during stress wave interference when two-hole simultaneously detonated charges is acquired. This paper is very important for full field analyzing of the explosive charge.

KEY WORDS separate principale stress, explosive charge, quantitative analysis