

炮孔之间爆炸应变场的光力学分析*

朱振海

(南京工程兵工程学院)

摘要 本文分别运用动态云纹-光弹性和电阻应变测量方法研究了相邻两炮孔之间爆炸应变场。多火花式高速像机和超动态量测系统被用于动态记录。根据动态云纹-光弹条纹分析了应力波的叠加作用,定量地计算了爆炸应力波叠加作用期间内不同时刻炮孔连心线上 ϵ_x (沿连心线方向)和 ϵ_y (垂直于连心线方向)的分布以及 ϵ_x 在连心线中垂线上的分布。用应变片记录了爆炸应力波叠加作用时连心线上应变-时间示波器轨迹。测量和计算所得炮孔间应力波叠加和衰减的规律与理论分析和动光弹模拟分析结果一致。

关键词 动态云纹-光弹性 爆炸应变场 应力波叠加 炮孔连心线

一、前言

在预裂爆破、光面爆破中,相邻炮孔之间裂缝的产生和贯穿机理一直是个有争议的问题,深刻地认识和理解相邻炮孔之间爆炸应变场的变化规律、正确地解释炮孔之间裂缝贯穿的机理对于采矿和巷道掘进中爆破参数的设计具有重要意义。曾有许多研究者^[1-4]对这个问题进行过有意义的研究,但是,由于爆炸应力波在炮孔之间的相互作用使得炮孔之间成为复杂波区,对于这样的复杂波区,理论上只能作定性分析。尽管现代数值计算方法能作些计算,但由于对计算模型的简化而导致计算结果只能是定性的。动光弹方法是一种比较好的模拟研究方法,但是由于爆炸波的相互干扰使得应力条纹级数难以确定,因而也不好进行定量分析。虽然电测方法可以进行定量记录,但由于它的测点少,易受干扰,因此,大量的实验往往只能得到较少的结果。

本文运用作者提出的云纹-光弹性方法^[5]记录两个炮孔同时起爆时应力波叠加的云纹-光弹条纹,定量地分析了炮孔之间炮孔连心线上应变(ϵ_x 、 ϵ_y)的分布,并用电测方法记录了炮孔之间应力波叠加作用下应变-时间示波器轨迹,把电测结果与云纹-光弹结果进行了比较,获得了比较满意的结果。

本文研究工作进一步提高了动态云纹-光弹性在爆破机理研究中的重要价值,为定量分析和研究复杂波区中应变场开拓了一条新途径。

二、动态云纹-光弹性实验技术

试件由5 mm厚的聚碳酸酯板制成,尺寸为260 mm×260 mm,动弹模 E_d 为3026 MPa,动态条纹值 f_{sd} 为9360 N/m·f,动态泊松比为0.35,膨胀波速度为1590 m/s,质量密度为1220 Ns²/m⁴。

* 本文主要内容曾在第31届国际光学和光电应用科学与工程学术会议上交流(1987年8月,美国)。1988年11月21日收到原稿,12月29日收到修改稿。

在试验中用了两个试件, 在一个试件上, 云纹栅的主方向平行连心线 (见图1a) 以测取沿着连心线的应变 ϵ_x , 在另一个试件上, 云纹栅的主方向垂直连心线 (见图1b) 以测取垂直于连心线的应变 ϵ_y 。

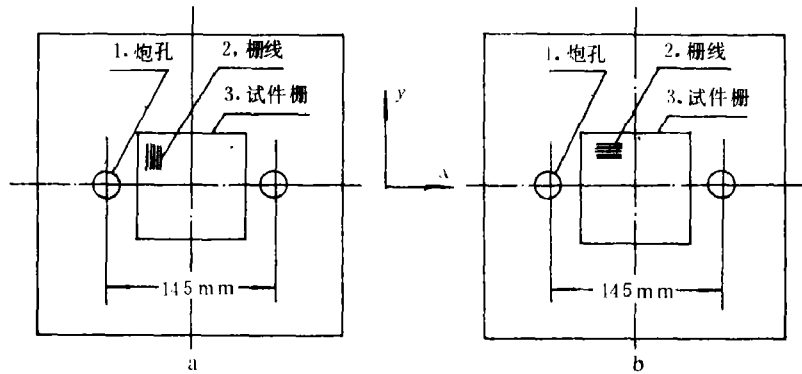


图1 试验中所用模型的几何图

Fig.1 The geometry of models used in the test

1. Borehole; 2. Grid lines; 3. Working grid

云纹栅规格为40线/mm的单线栅, 用502*胶水把试件栅粘在试件上, 再用特配的透明液体把参考栅粘附在试件栅上并用手排掉两栅片之间的气泡和多余的液体。经过多次试验, 对于爆炸载荷, 两栅片的栅线间的初始相对转角在 $0.2^\circ \sim 0.3^\circ$ 之间为宜, 相应条件下云纹条纹之间的间距为5~7 mm。

试件放入偏振光场中, 同时记录与应力波传播相应的云纹条纹和等差条纹, 等差条纹被同时用来确定应力波传播和叠加的特性。

载荷源为用PbN. 装填的简易微秒雷管^[6], 该炸药具有良好的起爆性能, 用1600伏电容脉冲式起爆器, 爆炸作用时间为1 μ s。记录仪器为WZDD-1型多火花式动光弹仪^[7]。

三、炮孔之间应力波叠加作用的动态云纹-光弹分析

1. 典型的实验记录照片

图2给出了两炮孔同时起爆时炮孔之间应力波叠加的云纹 (U -场)-光弹条纹分布, 云纹条纹的变化对应着云纹栅覆盖区域中的 $\epsilon_x (= \partial u / \partial x)$ 和角应变 γ_{xy} 中的 $\partial u / \partial y$ 的变化。由光弹条纹可以看出在照片2a上两个P波前沿刚要相遇, 在照片2b上, P波波峰叠加, 连心线中间部位云纹条纹的倾斜度最大, 在波峰叠加作用区两边压缩波头与拉伸波叠加, 导致此处应变减小, 相应的云纹条纹倾斜度开始变小。在照片2c上, P波波峰传过后, 云纹条纹倾斜度逐渐减小。从图2中照片可见, 云纹条纹与光弹条纹的重叠并不影响各自的分析。

图3给出了两炮孔同时起爆时炮孔之间应力波叠加的云纹 (V -场)-光弹条纹分布。云纹条纹的变化对应着云纹栅片覆盖区中 $\epsilon_y (= \partial v / \partial y)$ 和角应变 γ_{xy} 中 $\partial v / \partial x$ 分量的变化。把图3与图2相比可以看出, 在图3中炮孔连心线上云纹条纹的倾斜度较小, 说明相应的应变值也较小。

2. 数据处理方法

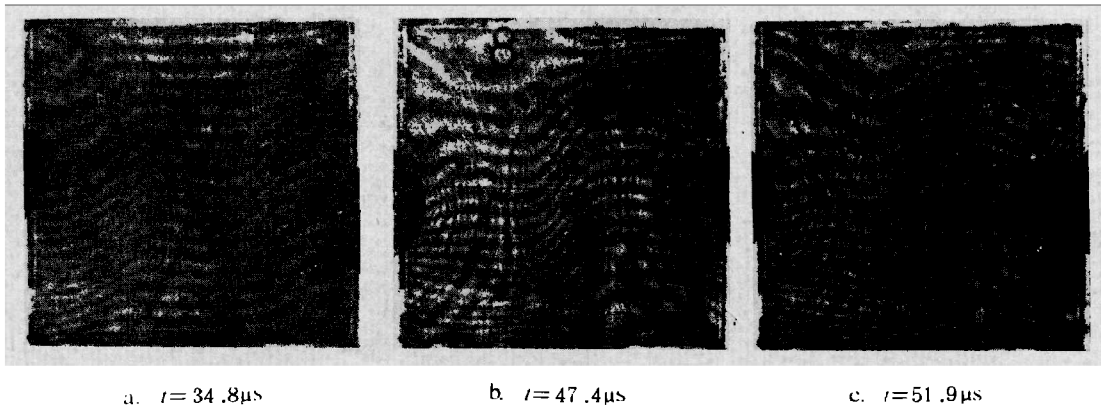


图2 炮孔之间应力波叠加的云纹-光弹条纹分布 (U-场)
 Fig.2 The moiré-photoelastic fringe patterns associated with the superposition of the stress waves between two simultaneously-initiated boreholes (U-field)

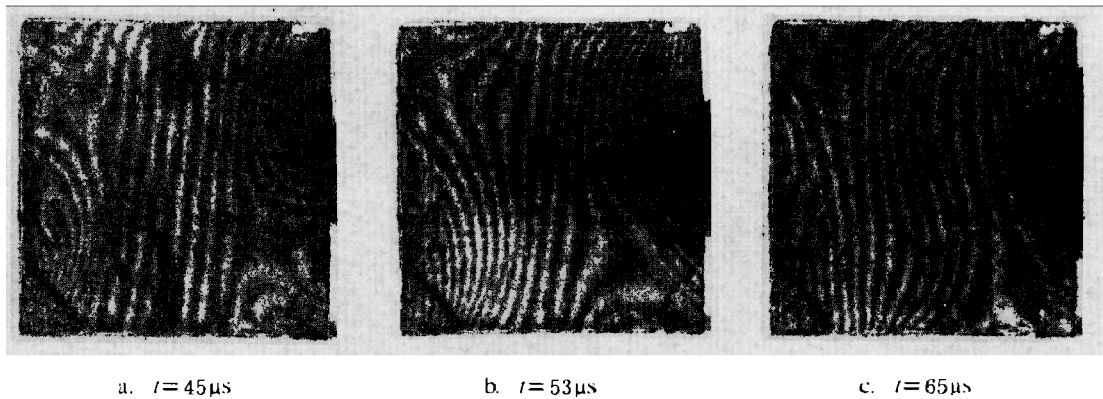


图3 炮孔之间应力波叠加的云纹-光弹条纹分布 (V-场)
 Fig.3 The moiré-photoelastic fringe patterns associated with the superposition of the stress waves between two simultaneously-initiated boreholes (V-field)

求图3中连心线上 ϵ_v 的分布可用双间距公式^[8]：

$$\epsilon_v = (P/L)(\Delta S/S) \tag{1}$$

式中， L ——任意选取的一段云纹长度； P ——云纹栅节距； ΔS ——云纹曲线在参考栅线上投影长度； S ——平行于参考栅次方向测量的云纹间距。

求图2中连心线中垂线上 ϵ_x 的分布也用式(1)。但在求图2中连心线上 ϵ_x 的分布时若用式(1)，则处理计算工作量太大，故采用文献〔9〕建议的近似方法。

$$\epsilon_x = P \cdot \text{ctg} \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \right) / S \tag{2}$$

式中参数 P, S 含义同式(1)， β_1, β_2 的含义见文献〔9〕中说明。

3. 计算结果和分析

图4给出了炮孔连心线上 ϵ_x 的分布，它相应于图2中三幅照片。由图4可以看出在应力波叠加期间 ϵ_x 值是变化的。在34.8 μs 时，从左、右炮孔来的应力波中最大应变值都在6000

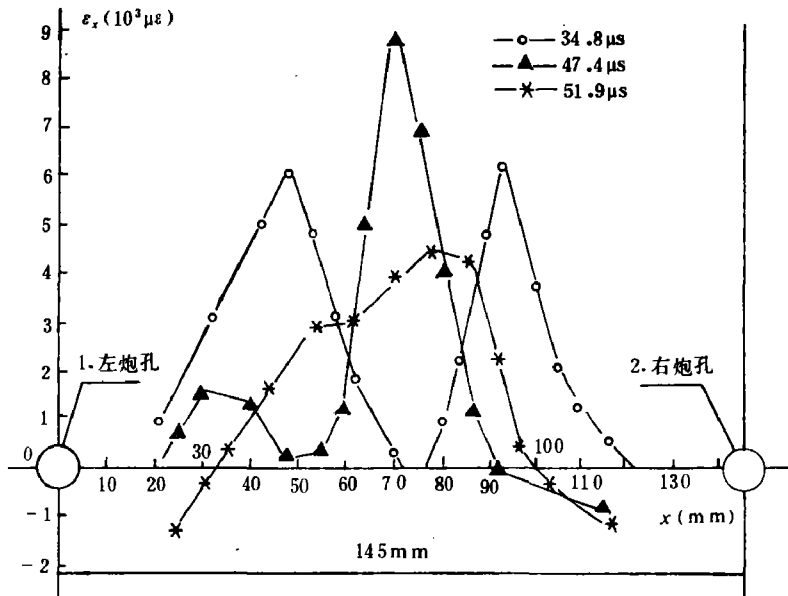


图4 与图2中三幅照片相应的炮孔连心线上 ϵ_x 的分布曲线
 Fig.4 The distribution of ϵ_x in the linking-center line associated with the photos shown in Fig.2

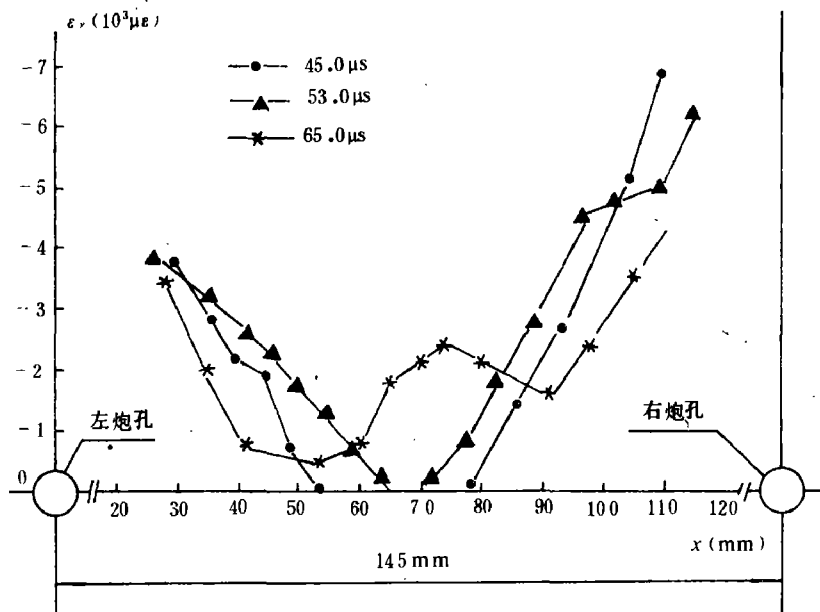


图5 与图3中照片相应的炮孔连心线上 ϵ_x 的分布
 Fig.5 The distribution of ϵ_x in the linking-center line associated with the photos shown in Fig.3

$\mu\epsilon$ 左右，在47.4 μs 时，波峰叠加，叠加作用使得中心区最高应变达9000 $\mu\epsilon$ ，在51.9 μs 时，叠加作用的波峰通过后，最大应变下降到4500 $\mu\epsilon$ 左右。

图5给出了与图3相应的三个时刻连心线上 ϵ_r 的分布曲线，在45 μs 时，应力波尚未相遇，在连心线中部应变为零，在53 μs 时，应力波前沿开始叠加，但在叠加区中云纹条纹变化不大，相应的应变值较低，仅大约数百微应变，这一结果说明了栅线的变化滞后于应力波的传播；在65 μs 时，连心线中部应变值的极大值大约2000 $\mu\epsilon$ ，而在孔口附近应变大于3000 $\mu\epsilon$ ，这一计算结果与一般波动学理论分析不太一致，这个不一致性是因为波动理论没有考虑到爆炸气体对炮孔周围应力场的增压作用，而云纹计算结果则定量地反映了爆炸气体的增压作用。尽管栅线的变化滞后于应力波传播，但由云纹条纹获得的计算结果仍能定量地反映炮孔之间应力场的叠加作用。

图6给出了相应于图2试验中四个时刻连心线中垂线上 ϵ_r 的分布。由图6可见，随着波

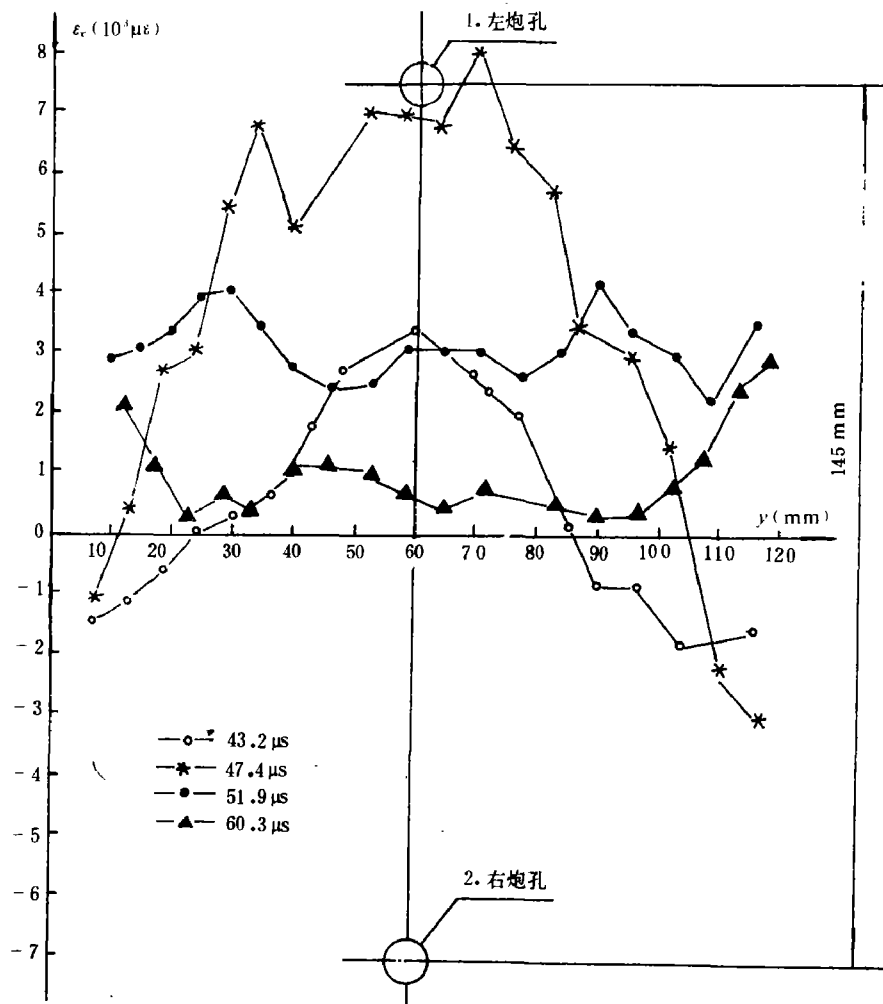


图6 与图2中照片相应的炮孔连心线的中垂线上 ϵ_r 的分布

Fig.6 The distribution of ϵ_r in the middle vertical line of the linking-center line associated with the photos shown in Fig.2

的叠加, 中垂线上应变值渐增。当峰值叠加时 ($47.4\mu\text{s}$) 中垂线上应变值较高, 随着波的进一步传播, 叠加作用降低, 相应的应变也减小, 沿着中垂线应变值变化不大。

四、炮孔之间应力波叠加作用的电测分析

实验中用大理石、砂浆板、有机玻璃板制作试件, 在试件上钻两个炮孔, 在炮孔连心线上设置 6 个应变片, 分别放在试件两个表面上, 三个径向, 三个切向, 记录两个炮孔同时起爆时应力波叠加作用下的应变信号, 模型上应变片和炮孔相对位置如图 7 所示, 实验重复了多次, 在此取 5 次较有代表性的结果来进行分析, 以对云纹—光弹的结果作些补充和比较。5 次试验的材料、尺寸及记录的最大应变值列在表 1 和表 2 中, 表中应变值的单位为 $\mu\epsilon$ 。

表 1 试件几何尺寸表
Table 1 The size of the models

试件序号	材料名称	孔径 (mm)	药径 (mm)	每孔药量 (mg)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	s (mm)
ED-60	大理石	9	6	500	30	50	70	140
ED-61	大理石	9	6	300	30	50	70	140
ED-62	砂浆板	9	6	350	30	50	70	140
ED-63	砂浆板	9	6	250	30	50	70	140
ED-81	有机玻璃	5.2	5.2	85	20	40	60	120

表 2 叠加作用时最大应变值
Table 2 The maximal strain values of superposition

试件序号	A 点		B 点		C 点	
	径向	切向	径向	切向	径向	切向
ED-60	4000	-2100	3100	-1600	7500	-300
ED-61	3000	-1400	1500	-700	4000	-1900
ED-62	4700	-2000	3800	-2200	7800	-3200
ED-63	2900	-1300	2500	-1000	4400	-2000
ED-81	10250	-2250	7500	-3750	13000	-4000

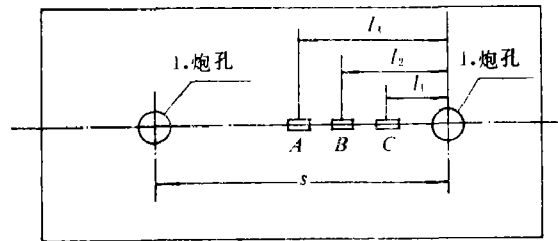


图 7 应变片及炮孔在试件上的相对位置, A、B、C 点为贴应变片处, 正面为径向应变片, 背面为切向应变片。

Fig.7 The relative position of the strain gauges and boreholes in the models, point A, B and C is strain gauge, one side is radial and another is tangential
1. Borehole

由表2中数据可见，对于这几个试件，在炮孔连心线上，由于C点离炮孔最近，因而，C点应变值最高，由于应力波的叠加作用，A点又高于B点的值，但是A点又低于C点值，这说明，尽管在连心线中点有叠加作用，但由于在模型材料中应力波衰减快，因此，当应力波在连心线中部叠加时，其幅值已下降了很多。图8给出了炮孔连心线上应力波叠加作用的典型的应变—时间波形。

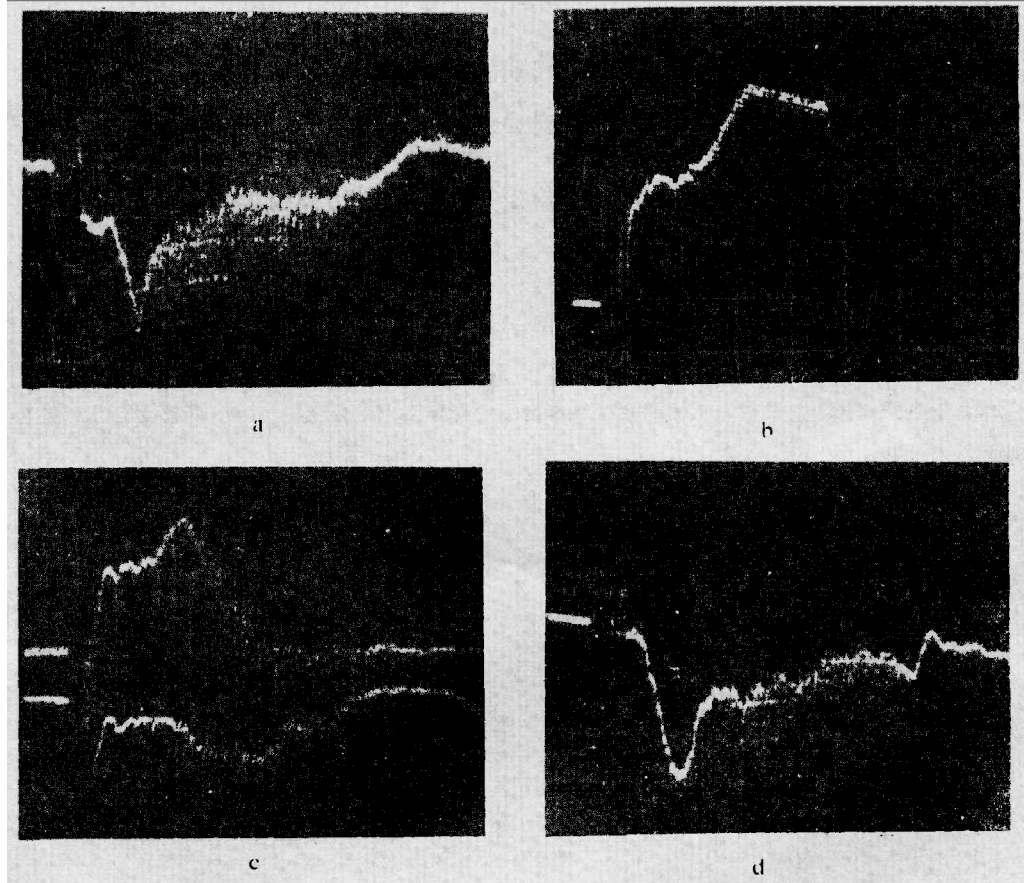


图8 典型的应力波叠加作用的应变波形

- a. ED-61 A点切向应变，横向：40 μ s/格，纵向：400 μ ϵ /格；
- b. ED-62 C点径向应变，横向：40 μ s/格，纵向：2000 μ ϵ /格；
- c. ED-62 A点径、切向应变，横向：40 μ s/格，纵向：1667 μ ϵ /格；
- d. ED-63 A点切向应变，横向：40 μ s/格，纵向：400 μ ϵ /格。

Fig.8 The typical oscillations of strains vs. time associated with the superposition of stress waves

- a. ED-61(A) ϵ_r , transverse: 40 μ s/unit, vertical: 400 μ ϵ /unit.
- b. ED-62(C) ϵ_r , transverse: 40 μ s/unit, vertical: 2000 μ ϵ /unit.
- c. ED-62(A) ϵ_r (up), ϵ_r (down), transverse: 40 μ s/unit, vertical: 1667 μ ϵ /unit.
- d. ED-63(A) ϵ_r , transverse: 40 μ s/unit, vertical: 400 μ ϵ /unit.

由照片可以看出，由于不完全同时起爆，在应力波叠加时出现双峰（台阶）型波形。如在照片a上，第一台阶约为-500 μ ϵ ，峰值为-1400 μ ϵ 。在照片b上，第一台阶约为4200

$\mu\epsilon$ ，峰值约为 $7800\mu\epsilon$ 。照片 c 中的结果与照片 a、b 中相类似，而照片 d 却表示了两个波峰的同时到达，应变峰值为 $-1300\mu\epsilon$ 。

五、结 论

本文用动态云纹—光弹及电测方法定量地分析和比较了炮孔之间应力波叠加作用及应变场变化规律，可得如下几点结论：

1. 动态云纹—光弹方法是一种很有价值的试验和分析方法，用该方法可以获得复杂波区中的全场数据，通过简单地处理云纹条纹可以获得定量结果，为炮孔间爆炸应力场的研究开辟了一条途径；

2. 由云纹条纹得到的炮孔连心线上应变(ϵ_x 和 ϵ_y)的变化规律与用应变计或理论估计的结果一致；

3. 试件栅的变化滞后于应力波的传播；

4. 可以用动态云纹方法定量研究非透明材料（如岩石）中炮孔之间应变场。

作者十分感谢杨善元教授、王树仁教授对本研究的指导，也十分感谢杨永琦副教授、方文儒工程师等老师的大力协助。

参 考 文 献

- [1] Dally, J. W. et al., A Dynamic Photoelastic Evaluation of Some Current Practices in Smooth Blasting. *Mining Engineering*, (Feb. 1978), 184.
- [2] Simha, K. R. Y. et al., Dynamic Photoelastic Studies on Delayed Pre-split Blasting. *Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Sweden, (Aug. 1983), 97.
- [3] Yang Yongqi et al., Propagation of Stress Waves and Cracks between Two Adjacent Boreholes. *Proceedings of International Symposium on Mining Technology and Science*, Xiu Zhou, The P. R. of China (Sept. 18—20, 1985).
- [4] Wang Shuren et al., The Dynamic Photoelastic Study of Blasting Stress Fields and Rock Breakage. *Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects*, Beijing, China, (June 3—7, 1986), 306.
- [5] 朱振海，测定爆炸加载时光弹性材料的 $(f_0)_d$ 的方法，*科学通报*，18 (1987)。
- [6] 朱振海，简易微秒雷管，*火工品*，3 (1984)。
- [7] 朱振海、杨永琦，多火花式动态光弹性仪在爆炸力学实验中的初步应用，*爆炸与冲击*，5 (3) (1985)。
- [8] 曹起骧等编，密栅云纹法原理与应用，清华大学出版社，(1985)，31。
- [9] 朱振海、杨善元，爆炸应力场的动态云纹—光弹研究，*爆炸与冲击*，7 (1) (1987)。

STUDIES ON THE BLASTING FIELDS BETWEEN TWO ADJACENT BOREHOLES WITH DYNAMIC MOIRE-PHOTOELASTICITY AND STRAIN GAUGES

Zhu Zhenhai

(Nanjing Engineering Institute of Engineer Corps)

ABSTRACT The blasting strain fields between two adjacent boreholes initiated simultaneously were investigated with the dynamic moire-photoelasticity and strain gauges. A multiple spark dynamic photoelastic apparatus (Mode WZDD-1) and the super-dynamic measuring system were utilized in dynamic recording. According to the dynamic moire-photoelastic fringe patterns, the superposition of blasting stress waves were analysed, and the distribution of ϵ_x (in the direction of the line linking two adjacent borehole centers) and ϵ_y (in the direction which is normal to the linking-center line) in the linking-center line and ϵ_z in the line which is vertical to the linking-center line through its middle point were calculated quantitatively. The oscillations of strain vs. time in the linking-center line due to the superposition of blasting stress waves were recorded with the foil strain gauges. The law of superposition and attenuation of stress waves between boreholes derived from the measured and calculated results are in agreement with the results from the theoretical analyses.

KEY WORDS dynamic moire-photoelasticity, blasting strain fields, superposition of stress waves.