

# 反射型云纹法在岩石爆破机理研究中的应用

孟祥跃

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要** 利用反射型动态云纹实验方法,对爆炸载荷作用下岩石平板试件中应力波传播及裂纹动态扩展进行研究,给出了高速转镜相机记录到的岩石平板爆炸加载实验时的动态云纹图。根据动态云纹图分析了炸药爆炸产生的应变场,并对裂纹的形成及其扩展速度的变化趋势进行了讨论。

**关键词** 反射型云纹法 爆炸载荷 裂纹动态扩展 高速摄影

## 1 前言

岩石爆破破碎过程,实质上是其在炸药爆炸产生的冲击波、应力波及爆生气体作用下裂纹的产生和发展过程。因此,对爆炸载荷作用下岩石介质中应变波的传播、反射和相互作用以及裂纹的形成、扩展和分叉等超动态力学现象的定量量测,在岩石爆破机理的研究中具有十分重要的意义。

爆炸载荷作用下的超动态力学量的测量主要有电测法和光测法,其中电测法只能测量有限个点,光测法中的动光弹方法难以定量分析应力波相互作用下的复杂应力场。与这些方法相比,我们采用的反射型动态云纹法对于研究爆炸加载在介质中产生的应变场、位移场,尤其是多个波系相互作用下的复杂应变场有着其他爆破量测手段无可比拟的优越性。另外,反射型动态云纹法还可以直接在岩石介质上作岩石爆破机理实验研究的优点。文献[1]中虽然介绍了用多火花相机记录爆炸加载下透射型动态云纹的实验系统,但该系统只能用透明材料作模拟实验,对于非透明的岩石介质仍无能为力。

多年来,人们对模拟材料在爆炸载荷作用下动态力学现象的研究已做了许多工作,但直接在岩石介质上作爆炸动态测量的实验还做得不够。由于岩石的非均质性,在各向同性的模拟材料上得到的实验结果,很难应用到岩石介质上。我们用反射型动态云纹实验系统直接在岩石平板中进行炮孔装药的爆炸加载实验,并对爆炸应变场、裂纹动态扩展进行定量量测计算,得到了一些有益的结果。

## 2 动云纹法测量原理

在爆炸载荷作用下,试件中各点的应变随时间的推移而变化,云纹也将呈现随时间

\* 煤炭部科学基金资助项目,并获国家教委科技进步二等奖,本文是其中一部分。

1993年8月27日收到原稿,12月14日收到修改稿。

的不同而发生疏密、倾斜、弯曲、间断及错动等变化。因此,对每一时刻记录到的云纹图象进行处理,就可得到每一时刻试件中各点的应变和位移;将他们联系起来,就可反映出试件中各点的应变和位移的动态变化过程。若云纹出现了相交或错动,则说明试件中出现了断裂;根据不同时刻云纹图上相交或错动点位置的变化,可以实测出试件中裂纹的动态扩展及分叉等。

### 3 实验方法

1. 试件 试件为岩石平板,厚 10mm。试件尺寸以及云纹栅和炮孔位置如图 1 所示。

2. 光源 选用管状高压脉冲氙灯,采用电容放电回路,由四只 MW2-400 型脉冲电容器供电。

3. 高速摄影 采用 GSJ 型转镜分幅式高速摄影机,物镜焦距 750mm,分幅摄影频率  $6.25 \times 10^4 \sim 250 \times 10^4$  幅/秒可调。

4. 加载方法 试件的加载是在爆炸加载架上实现的,通过改变不同的加载帽,可以实现保留爆生气体和不保留爆生气体作用的加载。为实现微秒加载,实验采用自制火花式微秒雷管,装药为 DDNP,采用 70 型点火器起爆雷管,高速相机控制台发出的高压脉冲信号,通过一个球隙开关来控制点火器的放电。

5. 同步方法 图 2 为同步系统示意图。该同步

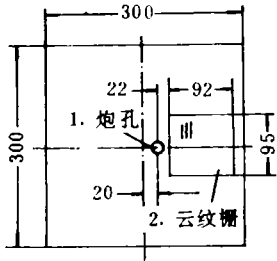
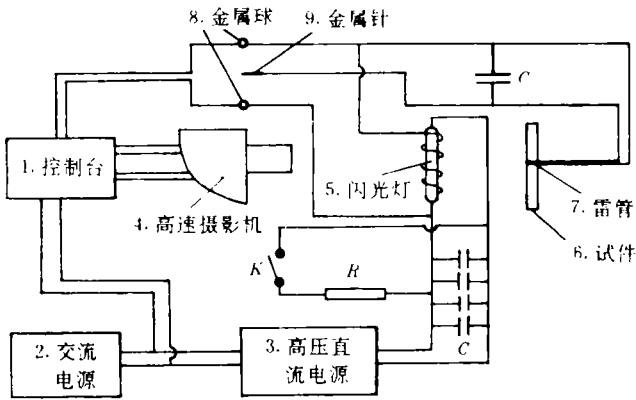


图 1 试件尺寸、云纹栅及炮孔位置示意图

Fig. 1 Sketch of specimen dimensions, moire grids and hole  
1. Hole; 2. Specimen grids

系统较好地实现了爆炸加载、高速摄影和脉冲灯闪光三者之间的同步。



1. Console;  
2. Alternating current power;  
3. High voltage direct current power;  
4. High speed camera;  
5. Flash-light;  
6. Specimen;  
7. Detonator;  
8. Metal balls;  
9. Metal needle

图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

### 4 实验结果与分析

利用图 2 所示的反射型动态云纹实验系统,在岩石平板试件上做了一系列爆炸加载实验。下面对典型的 TM-1 试件上做出的实验结果进行分析讨论。试件如图 1 所示,炮孔

快轉播和音訊圖傳聲象的印  
以功能變給音箱做該種  
移作如平被阻群在爆炸戰  
起聲的波面跨距的聯聯植  
加載點趨近衰減趨快。距  
在壓縮的聲波傳播的狀態  
即經向搜獲海龍艦仗夫番和  
用印在報錄機攝錄聲狀後尾

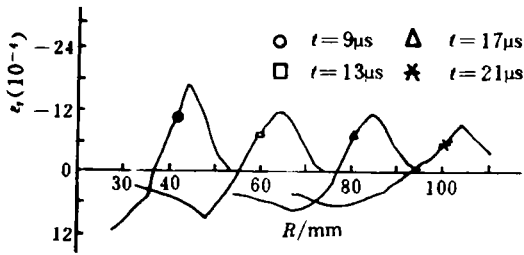


图4 几个不同时刻径向应变随径向距离的分布

Fig. 4 Radial strain as a function of radial position at several times

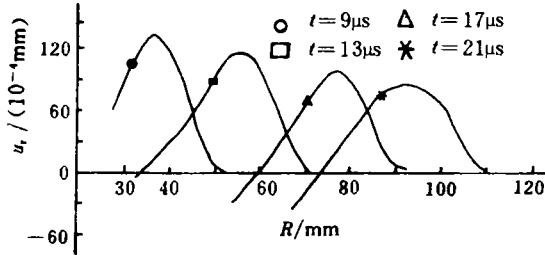


图5 几个不同时刻径向位移随径向距离的分布

Fig. 5 Radial displacement as a function of radial position at several times

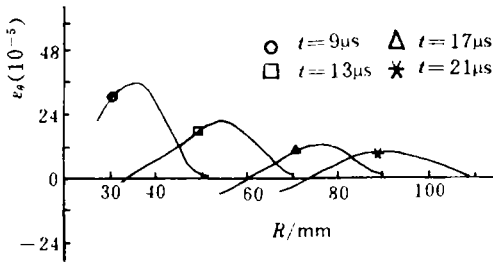


图6 几个不同时刻切向应变随径向距离的分布

Fig. 6 Tangential strain as a function of radial position at several times

移和切向应变在其尾部也可以出现负值。

图7为岩石平板试件在爆炸载荷作用下反映裂纹扩展过程的云纹照片。在 $t=33\mu s$ 时刻,有一条沿径向扩展的裂纹进入云纹视场,根据各个不同时刻云纹断开点(裂纹尖端)位置的变化,可以实测出裂纹动态扩展的速度。

图8为TM-1试件在贴片范围内一条径向裂纹的扩展速度随时间变化的曲线。由图8可以看出:在 $t=33\mu s$ 时刻,裂纹扩展速度较高,其大小为 $1830m/s$ ,然后开始急剧下降。在 $t=41\mu s$ 以后,裂纹扩展速度的下降变缓,到 $t=57\mu s$ 时刻已下降至 $460m/s$ 。这是由于

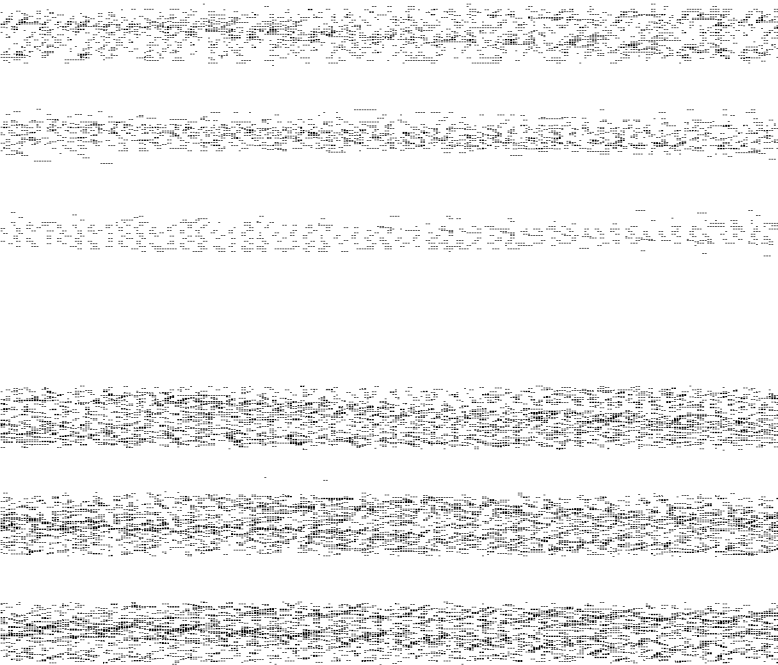
在裂纹刚进入贴片范围内时,裂纹的扩展主要由入射应力波与爆生气体共同作用引起的,所以裂纹尖端应力强度因子值较大,从而使裂纹扩展速度值较高。由于应力波的传播速度要比裂纹的扩展速度快得多,在应力波越过裂纹尖端后,裂纹尖端的应力场主要由爆生气体压力产生的,而爆生气体压力与该点距爆源距离的平方成反比,所以裂纹尖端应力强度因子值减小,从而使裂纹的扩展速度下降。

由图8还可以看出:在 $t>57\mu s$ 以后,裂纹扩展速度开始回升, $t=73\mu s$ 时刻,裂纹扩展速度已增至 $1580m/s$ ,然后又开始下降。这是由于应力波传播到达试件边界后发生反射,由反射波形成的应力场与扩展裂纹尖端应力场叠加,使裂纹尖端处的应力强度因子值发生变化,从而使裂纹扩展速度上下波动。

根据运动裂纹扰动区域的大小,可以估计出裂纹在应力波作用下的最大扩展速度<sup>[3]</sup>:

$$v_m = 0.38c_p$$

实测TM-1试件中纵波传播速度 $c_p=4970m/s$ ,因此 $v_m=1889m/s$ 。实验中测到的最大裂纹扩展速度为 $1830m/s$ ,比 $v_m$ 值略低。当裂纹扩展速度接近 $v_m$ 时,就可能出现裂纹的分叉。



裂纹向外扩展而形成主裂纹。(3)由图4可以看出:膨胀纵波传播时,其尾部有较强的拉伸相,而岩石的抗拉强度比抗压强度要小得多,因此在岩石试件内形成了环向裂纹。(4)扩展着的径向裂纹在遇到环向裂纹后立刻止裂(图中A、B、C、D等裂纹)。(5)裂纹扩展速度较高时可以出现裂纹的分叉现象(图中E点)。(6)入射压缩波与反射拉伸波的相互作用会在最小抵抗线及其附近产生由边界向试件内部扩展的裂纹,但这些裂纹的扩展在遇到环向裂纹后立刻止裂(图中F、G、H等裂纹)。

## 5 结束语

利用反射型动态云纹实验系统,成功地拍摄出了岩石试件在爆炸载荷作用下能用于定量计算的动态云纹照片,从而获得了应变波的传播规律;同时还观察到了爆炸载荷作用下产生的裂纹动态扩展过程以及止裂、分叉现象等。结果表明,用反射型动态云纹方法研究非透明岩石介质在爆炸加载时产生的应变波传播及裂纹动态扩展现象是可行的;而且具有原理简单,实验系统性能可靠的优点。

反射型动态云纹方法用于非透明材料爆炸应变波的传播和全场应变定量分析,显示了现有其它爆破量测手段所无可比拟的优越性。运用这种方法可以在不知道介质动态力学性质的情况下直接得到爆炸产生的应变场和位移场,尤其是对多个波系的相互作用。另外,将转角云纹的 $u$ 场和 $v$ 场配合使用,便可使复杂应变场和位移场迎刃而解。

对王树仁教授的悉心指导以及清华大学叶绍英研究员的热情帮助表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- 1 王树仁,等. 爆炸加载的动云纹方法及其在应力波传播中的应用. 实验技术与管理, 1985, (4): 6~12
- 2 曹起骥,等编. 密栅云纹法原理及应用. 北京:清华大学出版社, 1983. 31
- 3 徐小荷,等编. 岩石破碎学. 北京:煤炭工业出版社, 1984. 32

## APPLICATION OF DYNAMIC REFLECTION MOIRE METHOD IN STUDYING ROCK BLASTING MECHANISM

Meng Xiangyue

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**ABSTRACT** This paper studies stress wave propagation and dynamic crack extension in rock plate under explosive loading by means of dynamic reflection moire method, and demonstrates dynamic moire pictures recorded by a GSJ rotating mirror framing camera. Based on the dynamic moire records, the blasting strain fields in rock specimens are analysed, and the variation of the velocity of crack propagation with time and the phenomena of crack branching and crack arresting occurred in experiments are discussed.

Experimental results show that it is feasible to study the propagation of blasting strain waves and cracks by dynamic reflection moire method.

**KEY WORDS** reflection moire method, explosive loading, dynamic crack extension, high speed photography