

# 起爆时差对孔间裂缝贯穿影响的动光弹研究<sup>\*</sup>

朱振海 曲广建 杨永琦<sup>\*</sup> 商健<sup>\*\*</sup>

(南京工程兵工程学院, 南京 210007)

(<sup>\*</sup> 中国矿业大学北京研究生部, 北京)

(<sup>\*\*</sup> 南京市公安局消防处, 南京)

**摘要** 文章用动光弹试验方法研究了相邻两个炮孔被同时起爆和采用不同的起爆时差起爆时炮孔之间应力波的传播及其应力波对裂纹扩展的影响, 并重点研究了炮孔之间裂纹的产生、扩展及贯穿过程和机理。研究表明: 在先起爆的炮孔爆炸产生的动态应力场存在时起爆另一个炮孔, 即起爆时差  $\Delta t$  基本满足  $l/c_1 < \Delta t < l/c_2$ , 是在后起爆的炮孔孔壁上产生主导控制裂纹的最有利条件; 在先起爆的炮孔旁钻导向孔, 并采用合适的起爆时差可以获得炮孔间的最佳贯穿。

**关键词** 延时起爆 炮孔 裂纹贯穿, 动光弹

## 1. 前言

光面爆破, 预裂爆破技术在我国井巷开拓、隧道建设以及要求减震和获得较平整的壁面的爆破工程中得到了广泛的应用, 并取得了明显的经济和社会效益。尽管人们在不断应用这些新技术的同时也对其机理进行了大量的研究, 但是限于该问题的复杂性以及有关理论基础、测试设备, 试验条件和手段的限制, 至今为止, 对光面爆破和预裂爆破机理的研究还不够深入, 尤其是对爆破成缝机理还不能作出有说服力的基本一致的解释。

影响爆破成缝的因素很多, 本文将重点讨论的起爆时差(又称起爆延时)就是一个重要的影响因素。有些研究者<sup>[1]</sup>曾用模型试验方法比较了起爆时差对炮孔间裂缝贯穿的影响, 但没有记录动态过程, 因而不能令人信服地解释起爆时差对炮孔间裂缝贯穿的影响。国外有些学者<sup>[2]</sup>曾用动光弹方法研究炮孔延时起爆时炮孔之间应力波的干涉, 但对裂缝贯穿问题涉及较少。文献[3]也曾初步探讨了起爆时差对孔间裂缝贯穿的影响, 但只研究了两炮孔同时起爆( $\Delta t=0$ )和长延时起爆( $\Delta t=\infty$ )这两种情况, 而对于  $0 < \Delta t < \infty$  这一极重要条件下炮孔间应力场和裂纹扩展问题涉及很少。

本文在文献[2, 3]的研究基础上, 用动态光弹性模型试验方法研究了两炮孔同时起爆和不同时起爆时炮孔间裂缝扩展、贯穿, 应力波传播、叠加的动态全过程, 在试验条件下提出了最佳起爆时差和实现炮孔间贯穿的最佳形式。这对于光爆参数的优化处理和工程实践都具有一定的参考价值。

• 国家自然科学基金资助项目。  
1990年6月29日收到原稿。

### 2. 试验方法

试验中用具有双折射特性的环氧树脂和有机玻璃板制作模型。模型几何尺寸一般为  $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。模型上的炮孔位置如图 1 所示。为了后续文中叙述方便,在此分别约定左边的炮孔为炮孔 A,右边的炮孔为 B 孔,两炮孔中心距为  $l$ ,两炮孔的孔壁与炮孔连心线相交的点分别为 D、E、F 和 G 点。模型材料的力学参数可参见文献[4]。起爆源为自制简易微秒雷管<sup>[5]</sup>,起爆作用时间为  $1\mu\text{s}$ ,保证了同步的可靠性。记录仪器为国产多火花式动态光弹性仪,详细的性能介绍可参考文献[6]。

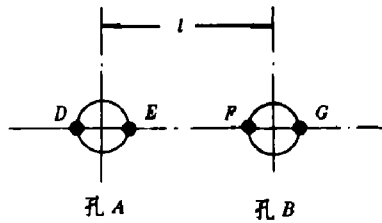
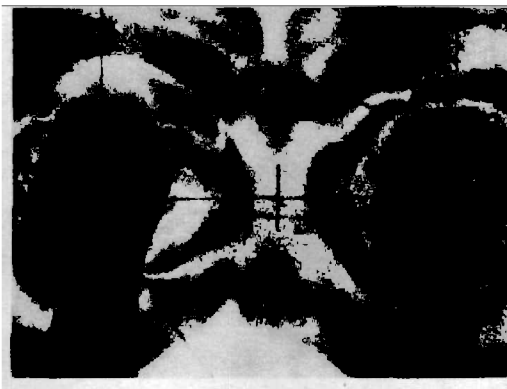


图 1 模型几何图

Fig. 1 The geometric figure of the model

### 3. 试验结果与分析

#### 1. 两炮孔同时起爆( $\Delta t = 0$ )



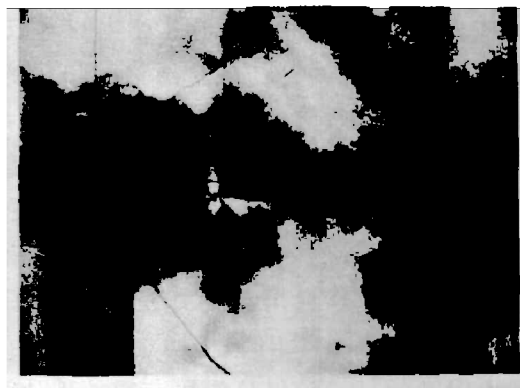
(a)  $t = 40\mu\text{s}$



(b)  $t = 70\mu\text{s}$

图 2 两炮孔同时起爆时( $\Delta t = 0$ )炮孔间应力波叠加及裂纹扩展的等差条纹照片,图下数字为雷管起爆后开始记录的时间

Fig. 2 The photos of the isochromatic fringe patterns of the superposition of stress waves and the extension of cracks between two boreholes which were initiated simultaneously ( $\Delta t = 0$ ), the numbers under the photos are the time recorded after the initiation of the detonator



(c)  $t = 110\mu\text{s}$

图2给出了两炮孔同时起爆时炮孔之间应力波干涉和裂纹扩展的等差条纹照片。模型材料为有机玻璃,照片上炮孔下方黑色宽带为支撑试件的夹具。炮孔直径为9mm,装药直径为6mm,每个炮孔中药量为90mg,孔间距 $l$ 为120mm。图2a中的应力条纹表明了两炮孔是同时起爆的,在相邻炮孔传来的应力波与炮孔作用之前,在各自炮孔孔壁上已产生了若干条径向裂纹,因此,炮孔壁上的径向裂纹是随机的。图2b显示了爆炸后没有在A孔壁上的E点(见图1中说明)产生裂纹,在B孔上的F点产生了沿连心线方向扩展的裂纹。在两炮孔应力波叠加作用的高拉应力区也没有产生任何裂纹。图2c给出了由F点产生的裂纹的进一步扩展。由图2的分析可得如下认识:同时起爆时尽管在炮孔之间连心线上存在应力波的叠加,切向拉伸应力较大,但是,难以在中点附近首先产生断裂,除非炮孔间距很小、或炮孔之间某处存在结构性的缺陷。炮孔之间的贯穿主要是依靠来自两炮孔孔壁的裂纹的扩展。在炮孔A(B)产生的应力波到达炮孔B(A)之前,各自炮孔上的径向裂纹已产生。因此,两炮孔同时起爆对于在点D、E、F和G产生裂纹没有控制作用,炮孔上裂纹的产生是随机的。如果在炮孔连心线方向没有裂纹,则同时起爆时炮孔之间裂缝贯穿结果也是较差的。对于图2中的结果,如果炮孔之间应力场衰减快,那么,就可能由炮孔B产生的裂纹扩展不到炮孔A的孔壁,炮孔之间就不能贯穿。所以,同时起爆并不是实现炮孔之间裂缝贯穿的最佳条件。

## 2. 两炮孔延时起爆( $l/c_r < \Delta < l/c_s$ )

图3给出了延时起爆时炮孔之间应力波干涉及裂缝贯穿的动态过程等差条纹照片。模型材料为环氧树脂,炮孔直径为8.5mm,装药直径为6mm,每个炮孔中药量为90mg,两炮孔中心距为120mm,两炮孔的起爆延时 $\Delta$ 为60 $\mu$ s。由图3a可见,当B孔起爆时,A孔装药爆炸产生的P波的先导压缩脉冲正掠过B孔,因此,两炮孔爆炸产生的P波波阵面几乎相切。此时,E点已产生了裂纹,该裂纹向右传播,其扩展方向有点偏离连心线。

炮孔A爆炸产生的P波的压缩脉冲在B孔壁上反射、绕射产生拉伸应力场,在这样的条件下,炮孔B爆炸产生的拉伸应力场与炮孔A产生的应力波在炮孔B附近形成了叠加的拉伸应力场,创造了在B孔孔壁与连心线的交点F、G上产生沿连心线方向扩展的裂纹的有利条件,这样的裂纹一旦产生,B孔内的爆生气体及其由气体引起的准静态应力场将有力地促进该裂纹的扩展。在图3b中可以看到由炮孔B的孔壁扩展来的裂纹基本上沿连心线。另外可见,由于受B孔产生的P波的影响,使得由A孔孔壁来的且原来向连心线下方扩展的裂纹的扩展方向得到有利的改变,向连心线靠拢。图4给出了与图3相应的应力波叠加和裂纹贯穿的 $x \sim t$ 图。由图4可清楚地看到炮孔之间应力波与裂纹相互作用的动态过程。当B孔爆炸产生的P波与从炮孔A来的裂纹相互作用后,裂纹的扩展速度有所提高。譬如,在 $t=90\mu$ s时,裂纹扩展速度 $c=450$ m/s,在 $t=100\mu$ s时,裂纹速度已提高到580m/s,大约是该材料的P波速度的0.3倍。这是应力波与运动裂纹相互作用的结果,有关这方面机理的探讨可参见文献[7]。由图4还可见,沿连心线传播的两裂纹在第一个炮孔起爆后约120 $\mu$ s时相遇,相遇点离A孔中心大约74mm,完成了炮孔之间的裂缝贯穿。

由上面的试验结果分析可获得如下认识:在试验中所采用的起爆延时条件下,先爆炮孔产生的应力波在后爆炮孔壁上反射和绕射,使得后爆炮孔周边上产生不对称的应力分布,在连心线上受拉<sup>[6]</sup>,因而在后爆炮孔的爆炸作用下在连心线上优先产生裂缝,而且由

于拉伸应力集中存在,使得后爆炮孔上产生的裂纹具有扩展速度较快或趋于分叉的特征。因此,采用这样的起爆延时,即  $l/c_p < \Delta < l/c_s$  ( $c_p$  和  $c_s$  分别为平板中  $P$  波和  $S$  波的速度),为在后爆炮孔上产生沿连心线方向的裂纹创造了有利的条件。

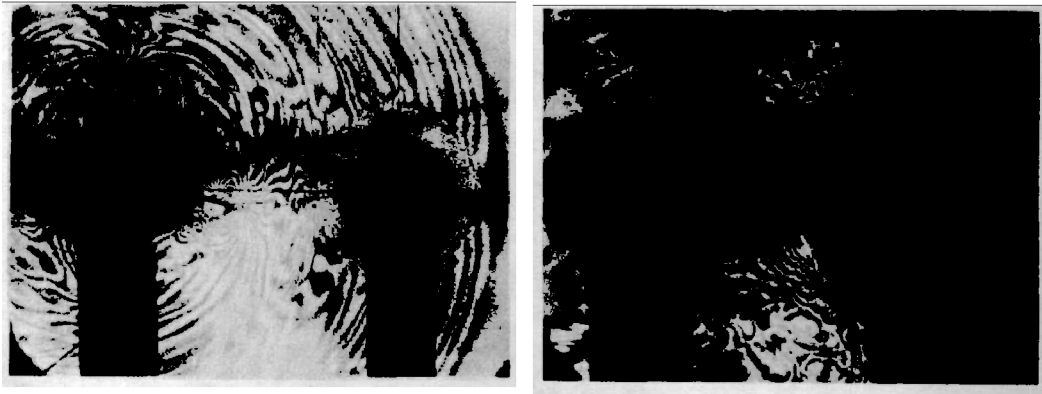
(a)  $t=70\mu\text{s}$ (b)  $t=100\mu\text{s}$ (c)  $t=120\mu\text{s}$ 

图3 起爆时差为  $60\mu\text{s}$  时炮孔间应力波叠加及裂缝贯穿的动光弹照片

Fig. 3 The dynamic photoelastic photos of the superposition of stress waves and the penetration of cracks between two boreholes which were initiated delayedly ( $\Delta=60\mu\text{s}$ )

对于先起爆的炮孔来说,裂纹的产生是随机的,如果在先起爆的炮孔旁钻一个空孔(导向孔),就可以克服先爆炮孔周围裂纹产生的随机性,而达到控制的目的<sup>[9]</sup>。由此,我们可设计出获得炮孔之间裂缝贯穿的最佳方案,即在先起爆的炮孔旁钻一个空孔,并采用合适的起爆时差。图5给出了这一最佳方案的模拟试验动态过程照片。在照片(a)上,炮孔A被先起爆,当  $P_A$  波传过离A炮孔30mm的空孔时,在空孔壁上产生了沿连心线方向扩展的导向裂纹,在照片(b)上可见到B孔已被起爆( $\Delta \approx l/c_p$ ),由空孔扩展来的裂纹正在高速扩展。由于B孔是在A孔产生的动态拉伸应力场存在的情况下起爆的,所以在B孔上F点产生了主导裂纹,其扩展方向沿着连心线,见照片c。此时,B孔产生的  $P$  波( $P_B$  波)正与由空孔传来的裂纹相互作用。在照片d上,两炮孔之间的裂缝恰好贯穿,而且在孔间仅一条裂缝,几乎紧挨连心线。这种布孔和延时起爆方式无论从能量利用方面还是从裂纹分布

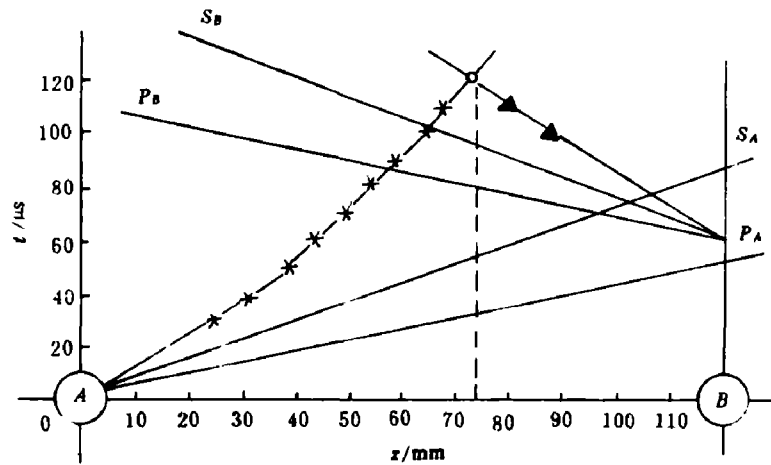
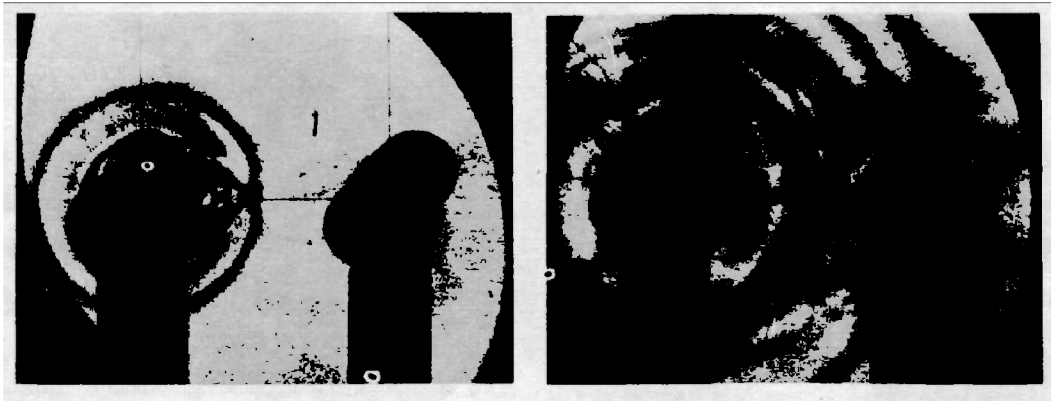


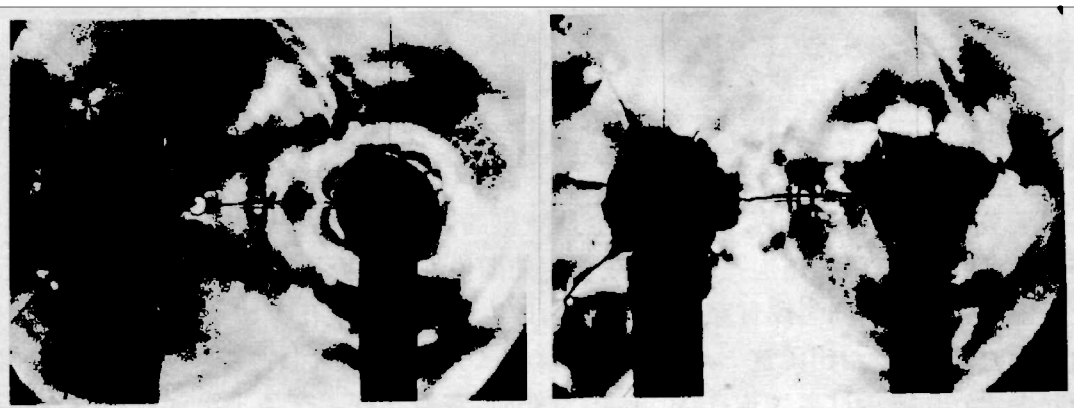
图4 相应于图3的应力波和裂纹传播的  $x-t$  图

Fig. 4 The  $x-t$  curves associated with the propagation of stress waves and cracks shown in Fig. 3



(a)  $t = 30\mu s$

(b)  $t = 70\mu s$



(c)  $t = 90\mu s$

(d)  $t = 120\mu s$

图5 炮孔间最佳贯穿方案的试验记录照片,空孔距左孔 30mm,孔间延时 50μs

Fig. 5 The dynamic photoelastic photos of the test of the optimum penetration between two boreholes, the distance between the hollow hole and left borehole is 30mm, the delayed time  $\Delta t = 50\mu s$

形式上来说都是很理想的。可以推测,在此条件下,若采用较大的孔距(如此次试验中孔距是炮孔直径的13.3倍),也可获得较好的光爆效果。图6给出了与图5相应的 $x-t$ 图。由图6可进一步看到,当 $P_A$ 掠过空孔后,空孔上就产生了裂纹,该裂纹开始扩展较慢,当 $S_A$ 波与裂纹作用后,裂纹速度开始提高,当 $P_B$ 波与裂纹作用后,裂纹速度进一步提高,当 $S_B$ 波与该裂纹相互作用后,该裂纹扩展速度开始下降。炮孔之间两裂纹大约在 $t=116\mu\text{s}$ 时相遇,相遇点离左炮孔中心大约78mm。

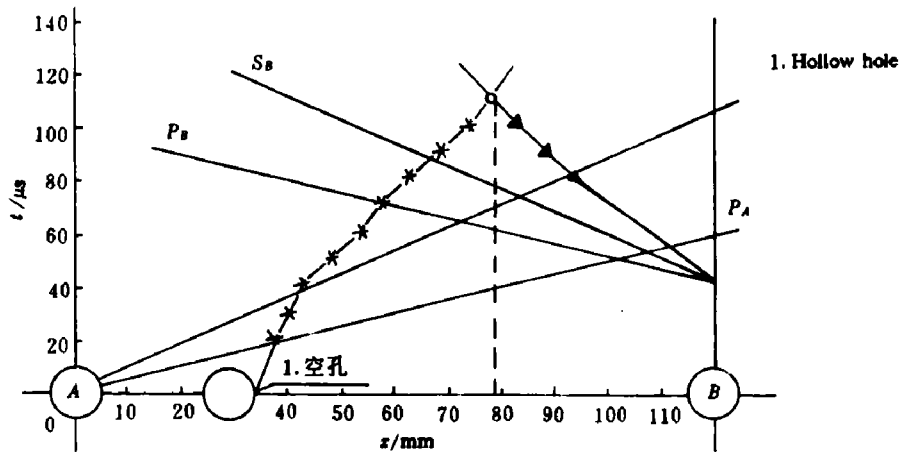


图6 与图5相应的应力波、裂纹传播的 $x-t$ 图

Fig. 6 The  $x-t$  curves associated with the propagation of stress waves and cracks shown in Fig. 5

#### 4. 几点认识

本文用动光弹模拟试验方法研究了两炮孔之间裂缝贯穿的全过程,描述了起爆延时效对裂缝产生、扩展和贯穿的影响,概括起来,可得如下四点认识,供进一步探讨和工程实践参考:

1. 采用同时起爆方法,虽然在炮孔之间存在应力波的叠加,但没有见到在叠加作用处优先产生裂缝,裂缝都是从炮孔壁产生,并在炮孔之间贯穿的。这说明了应力波叠加作用会优先产生裂缝的观点尚需进一步探讨。

2. 当起爆延时较短( $l/c_p < \Delta < l/c_s$ )时,先爆炮孔产生的应力波在后爆炮孔孔壁附近产生动态拉应力集中,在此条件下起爆另一个炮孔,就可以在后爆炮孔孔壁上产生沿连心线方向的裂缝。

3. 在先起爆的炮孔旁钻导向孔可以减小甚至消除在先起爆的炮孔孔壁上产生随机裂缝的可能性,从而达到控制裂缝产生和扩展的目的。

4. 在先起爆的炮孔旁钻导向孔,同时采用合适的起爆延时,可以获得炮孔间裂缝的最佳贯穿。

#### 参 考 文 献

- [1] 高士才等,预裂爆破成缝机理的研究,土岩爆破文集(第二辑),冶金工业出版社,1985年7月,47-53。
- [2] Simha, K. R. Y., Dynamic photoelastic studies on delayed pre-split blasting, The proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Luleå, Sweden, August, (1983), 97-114.

- [3] 杨水琦、朱振海,起爆时差对光面爆破效果的影响,煤炭科学技术,(9)(1985),19-21.
- [4] 朱振海,爆炸加载下光弹性材料动态性能参数的测定,爆炸与冲击,8(1)(1988),29-36.
- [5] 朱振海,筒身微秒雷管,火工品,(2)(1984),32-34.
- [6] 朱振海,杨水琦,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),67-76.
- [7] 朱振海,应力波对裂纹扩展影响的动光弹研究,(待发表).
- [8] 朱振海,空孔与应力波的相互作用,爆破,(2)(1986),(30-34).
- [9] 王树仁,朱振海等,空孔导向作用的动光弹研究,爆破,(2)(1985).

## DYNAMIC PHOTOELASTIC STUDIES IN THE INFLUENCE OF DELAY IGNITION ON THE PENETRATION OF CRACKS BETWEEN BOREHOLES

Zhu Zhenhai, Qu Guangjian, Yang Yongqi\*, Shang Jian\*\*

(*Nanjing Engineering Institute of Engineer Corps, Nanjing*)

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

(\*\* *Fire Protection office of Nanjing Public Security Bureau, Nanjing*)

**ABSTRACT** The propagation of the stress waves and the influence of the waves on the extension of cracks between two adjacent boreholes initiated simultaneously or delayedly were investigated with the method of dynamic photoelasticity. The analysed results expressed that the delay-initiation borehole was initiated during the present of the dynamic stress fields generated by the explosion of the former-initiation borehole is the favourable condition of generating guiding cracks on the wall of the delayed borehole. The optimum form of the penetration between boreholes may be realized by means of drilling a guiding-hole near the former-initiation borehole with an available delay time.

**KEY WORDS** delayed ignition, borehole, penetration of cracks, dynamic photoelasticity.