

# 聚能药卷的爆炸裂纹定向扩展过程试验研究

李 清, 梁 媛, 任可可, 曾 佳, 张 茜

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 应用透射动焦散线试验研究爆炸裂纹定向断裂超动态破坏力学特征。试验结果表明, 爆炸主裂纹断口特征为典型的拉伸断裂, 爆炸裂纹尖端的动态应力强度因子、裂纹扩展速度、扩展长度的变化趋势几乎相同, 爆炸主裂纹主要在 60~200  $\mu\text{s}$  完成, 极限动态应力强度因子很少超过  $1.5 \text{ MN/m}^{3/2}$ , 爆炸裂纹止裂韧性约为  $0.3 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。聚能药卷具有明显的爆轰波卸载效应和聚能方向爆生气体射流效应, 高压爆生气体射流的“气楔效应”是聚能方向压缩径向裂纹进一步扩展的主要驱动力, 同时抑制了非聚能方向压缩径向裂纹的发展。双孔点射流聚能药卷、双缝线射流聚能药卷都能实现岩石定向断裂爆破, 形成良好的爆破断裂面, 多缝线射流聚能药卷适用于高瓦斯煤层增透防突的深孔预裂爆破。

**关键词:** 爆炸力学; 爆炸荷载; 断裂控制; 聚能药卷; 气楔效应; 动焦散线

**中图分类号:** O 38

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)08 - 1684 - 06

## EXPERIMENTAL STUDY OF PROPAGATION OF DIRECTIONAL CRACKS WITH SHAPED CHARGE UNDER BLASTING LOAD

LI Qing, LIANG Yuan, REN Keke, ZENG Jia, ZHANG Xi

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to make further analysis of crack propagation for blasting fracture, the paper gives a method to research dynamic mechanical characteristics by the transmitted dynamic caustics. The results indicate that the zone of fracture shows typical tensile fracture. The experiment finds that the trend of the dynamic stress intensity factors, the crack expanding lengths and velocities is almost the same with time. The lengths of blasting main cracks are achieved during 60 - 200  $\mu\text{s}$ . The ultimate values of dynamic stress intensity factors are smaller than  $1.5 \text{ MN/m}^{3/2}$ . The tough value of blasting cracks is about  $0.3 \text{ MN/m}^{3/2}$ . “Gas wedge effect” of the high-pressure gas jet is the main driving force of radial compression cracks, playing a key role in the crack propagation of the cumulative energy orientation cracks under the directional blasting, while restraining the development of the non-cumulative energy directional radial compression crack. It is analyzed the fracture characteristics of the double-point jet with the double-seam thread jet in further, and found that the results of directional fractures and the fine fracture surfaces both can be achieved. Technical ideas are brought forward that both the double thread jet and the multi-seam thread jet cumulative cartridge should be utilized in the directional fracture blasting. The multi-seam thread jet cartridge can be applied to deep-hole presplitting explosion, such as deep-hole presplit blasting, to improve the speed of seam gas drainage and prevent mine gas and coal outburst in high gassy and low permeability coal seam.

**Key words:** explosion mechanics; blasting load; fracture control; shaped charge; gas wedge effect; dynamic caustics

**收稿日期:** 2010 - 01 - 14; **修回日期:** 2010 - 04 - 27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50774086); 国家 863 计划目标导向项目(2007AA06Z131); “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2008BAB33B04 - 3)

**作者简介:** 李 清(1969 - ), 男, 博士, 2009 年毕业于中国矿业大学(北京)岩土工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事爆破工程及土木工程方面的教学与研究工作。E-mail: liq@cumb.edu.cn

## 1 引 言

爆破裂纹发展规律研究多采用如动光弹、动云纹、全息干涉及超动态应变电测、超高速摄影机<sup>[1]</sup>等方法;随着计算技术的发展,爆破裂纹扩展更多采用数值模拟<sup>[2]</sup>,但裂纹尖端奇异应力学现象使这些研究方法不可避免有局限性。而动焦散线试验<sup>[3]</sup>将应力集中区域的复杂状态转变为简单而清晰的焦散线,已成为直接研究裂纹尖端动态力学行为的重要手段,能准确确定奇异场力学特征量。中国矿业大学(北京)是国内外较早建立和应用动焦散线试验系统研究爆炸断裂问题<sup>[4, 5]</sup>单位。

如何合理控制炸药能量的定向释放一直是爆破理论和工程应用研究的主要课题。爆破断裂定向控制的实现可归纳为选择合理爆破参数、改变炮孔形状、改变装药结构等 3 类途径,其中以改变装药结构控制裂纹扩展是最活跃研究方向。杨永琦等<sup>[6]</sup>在大量实验室和现场试验基础上,提出了双切缝聚能药卷定向断裂爆破技术,笔者曾作为该技术现场推广的主要组织和实施者,先后在 20 多个煤矿岩巷施工中应用,尽管目前没有得到实际使用,但聚能药卷定向断裂爆破仍是最具有工程应用前景的技术。Y. Q. Yang 等<sup>[7, 8]</sup>研究了切缝聚能药卷定向断裂技术与作用机制,分析了切缝管材料种类、强度、管壁厚度、切缝宽度等对定向断裂效果的影响。定向断裂控制爆破技术主要采用双切缝线射流聚能药卷,侧重应用于岩巷周边控制爆破,本文进一步研究有别于双切缝的新型双孔点射流聚能药卷装药结构,比较双孔点射流、双缝线射流聚能药卷及普通装药结构的爆炸裂纹扩展的动力学特征,为爆炸裂纹定向控制提供理论依据和应用技术指导。

## 2 测试原理与试验模型设计

有机玻璃为脆性材料,与岩石性质类似,是广泛适用于透射式动焦散线试验材料。透射式动焦散线系统包括 DDGS-II 多火花高速摄影光路系统、加载装置、延迟与控制装置、同步控制系统、光-电转换系统。爆炸裂纹动态应力强度因子计算式为

$$K_1^d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3|c_t|dz_0} \left[ \frac{3}{10\sin\left(\frac{2}{5}\pi\right)} \right]^{\frac{5}{2}} \left( \frac{D_t}{\delta_t} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中:  $K_1^d$  为 I 型裂纹动态应力强度因子;  $z_0$  为模型到参考平面的距离,考虑到裂纹尖端塑性变形影响,取  $z_0 = 900 \text{ mm}$ ;  $d$  为模型厚度;  $c_t$  为透射焦散线的应力光学常数,取  $0.88 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ ;  $D_t$  为焦散斑纵向直径;  $\delta_t$  为由裂纹扩展速度  $v$  引入的修正因子,已有研究<sup>[3]</sup>表明由裂纹扩展速度引起误差较小,所以取  $\delta_t \approx 1$ 。

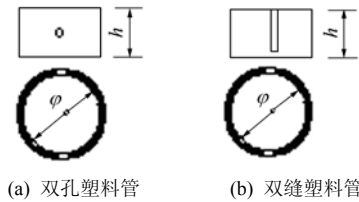
对于有机玻璃模型的动态力学参数,已知纵波波速  $C_p = 2\,252 \text{ m/s}$ ,横波波速  $C_s = 1\,200 \text{ m/s}$ , $E_d = 4.5 \times 10^9 \text{ Pa}$ , $\nu_d = 0.38$ 。利用动焦散线方程及焦散斑特征长度的定义,裂纹尖端距焦散斑前沿的距离为

$$X_c = \frac{1}{2\sin\left(\frac{2}{5}\pi\right)} D_t = 0.525\,7 D_t \quad (2)$$

由动焦散线图片,应用图形处理软件 Photoshop 精确确定爆炸裂纹焦散斑前沿位置和焦散斑纵向直径  $D_t$ 。由式(1), (2)求出不同时刻裂纹尖端位置与动态应力强度因子,获得对应时刻裂纹扩展长度、裂纹扩展平均速度。

炸药采用感度高、炮烟少的叠氮化铅( $\text{PbN}_6$ )。炮孔内放置 2 组探针,一组连高压脉冲起爆器,利用起爆器高压放电引爆炸药;另一组提供断通信号触发延迟控制器按设定幅间时间传递 16 个触发信号给高速摄影机,火花头在预定时间放电产生强脉冲光,得到与预置时间对应的 16 幅动焦散线图片。

试验模型尺寸为  $400 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 4.48 \text{ mm}$  (长×宽×厚),塑料管内外直径分别为 6.5, 9.0 mm,炮孔装药量为 130 mg 的  $\text{PbN}_6$ 。主要比较 3 种装药结构的爆炸裂纹扩展特征,模型 81104-1 采用图 1(a)在塑料管壁相对加工成直径 2, 1 mm 的 2 个小孔形成双孔点射流聚能药卷,炮孔直径  $R_0 = 9 \text{ mm}$ ;模型 90219-5 采用图 1(b)在塑料管壁对称加工成宽 0.6 mm 的 2 条狭长缝形成双缝线射流聚能药卷,炮孔直径  $R_0 = 9 \text{ mm}$ ;模型 81013-2 为直接将炸药装在炮孔内的普通装药结构,炮孔直径  $R_0 = 6 \text{ mm}$ 。



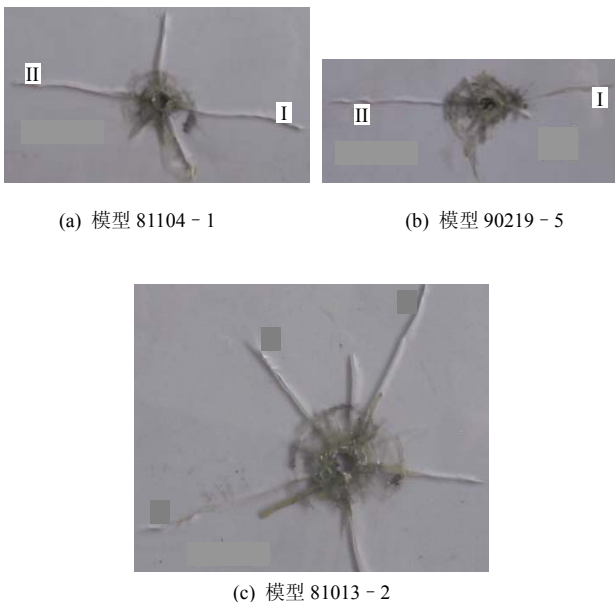
(a) 双孔塑料管 (b) 双缝塑料管  
图1 2种装药结构的塑料管示意图

Fig.1 Sketches of two types of cartridge structures

### 3 试验结果与爆炸裂纹动力学特征

#### 3.1 爆炸裂纹定向扩展试验效果

图2为不同装药结构的有机玻璃模型爆后裂纹扩展效果。在分析试验结果之前,先将由炮孔径向扩展较长的裂纹称为爆炸主裂纹。



(a) 模型 81104 - 1 (b) 模型 90219 - 5  
(c) 模型 81013 - 2  
图2 不同装药结构的有机玻璃模型爆后裂纹扩展效果  
Fig.2 Cracks of PMMA with different cartridge structures after blasting

如图2(a)所示,模型81104-1双孔点射流聚能药卷的两相对小孔形成定向爆炸主裂纹I,II长分别为73.55,71.2mm,非聚能方向较长爆炸主裂纹有45,42,41,23,20mm,共5条,聚能方向单个爆炸主裂纹扩展长为非聚能方向的1.7~3.8倍,聚能方向爆炸主裂纹长度为炮孔直径的8.22倍。聚能方向爆炸主裂纹总长约为非聚能方向爆炸主裂纹0.85倍。同时,双孔点射流聚能药卷的射流孔径2和1mm形成的定向爆炸主裂纹接近一致。由此可

知,一定范围的射流孔径大小对定向断裂裂纹形成效果影响不明显。

如图2(b)所示,模型90219-5为双切缝线射流聚能药卷,切缝方向裂纹I,II扩展长分别为67.96,78.16mm,非切缝方向爆炸主裂纹长主要有21,17,15,12,12mm,共5条,切缝方向单个爆炸主裂纹扩展长度为非切缝方向的3.7~6.5倍,切缝方向裂纹I,II长分别为炮孔直径的7.55,8.68倍。切缝方向爆炸主裂纹总长约为非切缝方向的1.9倍。

如图2(c)所示,模型81013-2采用炸药直接装在炮孔内的普通装药结构,爆炸主裂纹在炮孔周围随机分布,较长的裂纹有68,64,62,49,43mm,共5条;较短的裂纹有33,30,24,18,17mm,共5条。

比较可知,在压缩爆炸冲击波作用下,3种装药结构形式的炮孔周围形成分布相似的密集微小径向裂纹区。小药量(130mg)、小当量 $PbN_6$ 爆炸近区的压缩径向裂纹区范围较小,约为 $1.0\text{cm}(4R_0)$ 。

普通装药结构爆炸主裂纹最长,分别为双孔点射流、双缝线射流聚能药卷的爆炸主裂纹1.29倍、1.83倍,表明聚能药卷起爆后,爆轰波在聚能药卷的内外表面发生卸载反射,聚能药卷管壁对炸药爆轰波具有衰减作用。

试验表明,双孔点射流聚能药卷同双缝线射流聚能药卷一样能有效实现爆炸裂纹的定向断裂,都能适用于岩石定向断裂爆破技术,但双孔点射流聚能药卷的加工和应用更容易。

2种聚能药卷均可演变为多缝线射流聚能药卷,在炮孔径向形成多股聚能射流,实现爆炸主裂纹多方向扩展,多缝线射流聚能药卷定向预裂爆破技术<sup>[9]</sup>在煤层获得较大范围的爆生裂隙网,增大炮孔间距,大大减少钻孔工作量,提高煤层透气性,解决高瓦斯、低透气性煤层的瓦斯抽排放问题。

#### 3.2 不同装药结构的爆炸裂纹动力学特征分析

图3为2种聚能药卷的有机玻璃爆炸裂纹定向扩展动焦散线图片,结合普通装药结构模型81013-2动焦散线图片<sup>[9]</sup>,比较不同装药结构爆炸裂纹扩展规律。

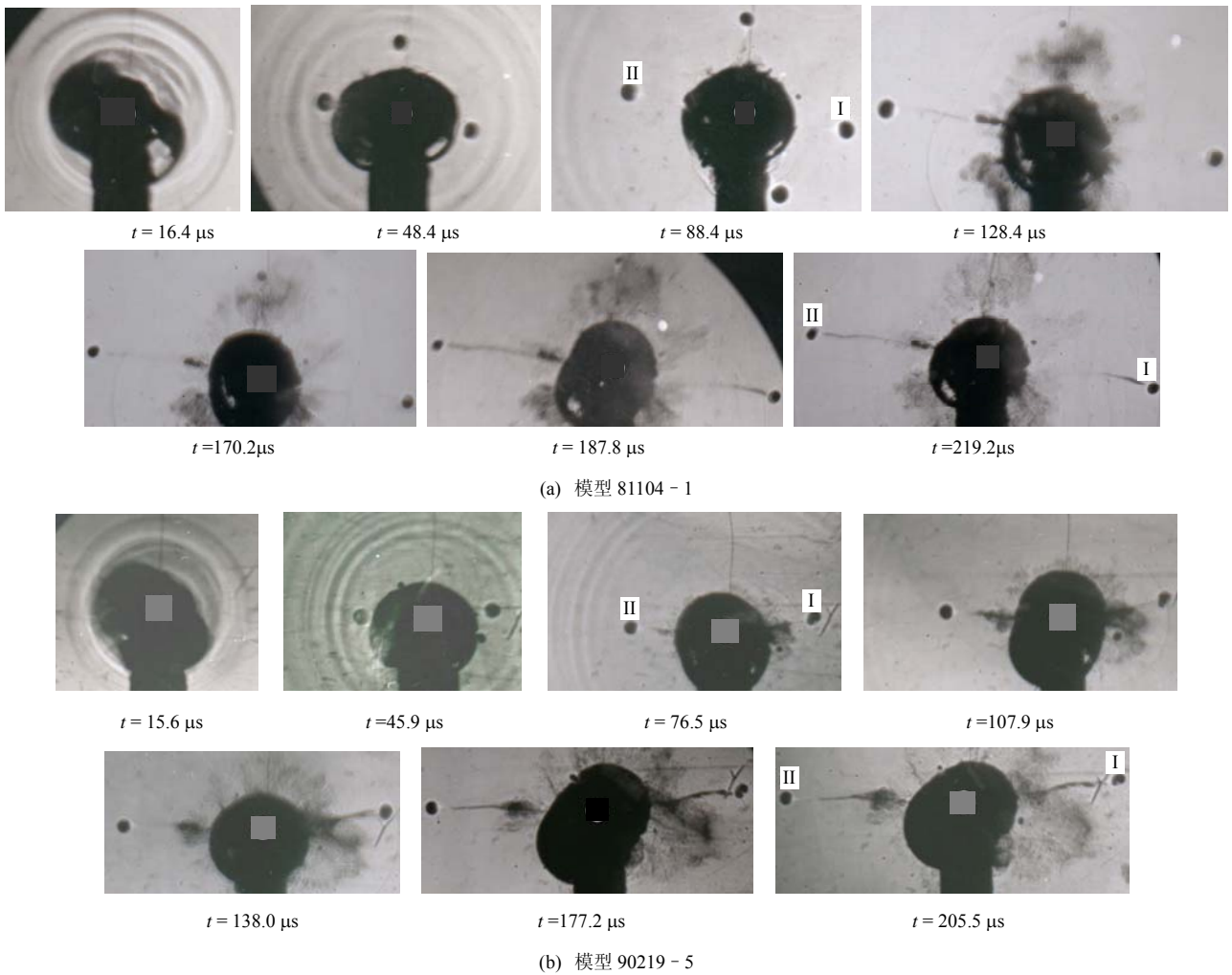
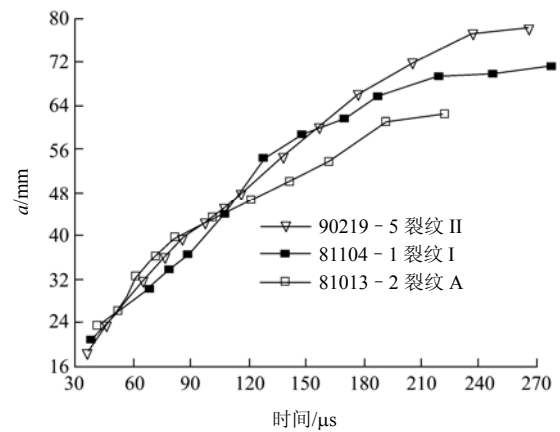


图 3 2 种聚能药卷的有机玻璃爆炸裂纹定向扩展动焦散线图片

Fig.3 Series of photographs of dynamic caustics showing the directional blasting cracks with two types of shaped charges in PMMA

从图 3 可以看出, 爆炸裂纹尖端焦散斑形状表明爆炸早、中期裂纹为 I 型或近似 I 型, 裂纹尖端以张开变形占优, 不发生锐化变形, 启裂位置、方向与扩展方向趋于稳定, 随爆炸载荷变化呈一定的规律性, 爆炸主裂纹断口特征为典型的拉伸断裂。由式(1), (2)可得 3 种装药结构爆炸主裂纹的尖端位置  $a$ 、扩展速度  $v$  及动态应力强度因子  $K_I^d$  的断裂力学特征量随时间的变化(见图 4, 5)。

从图 4, 5 可以看出, 早期爆炸裂纹扩展速度极快, 距炮孔 20~35 mm 的裂纹扩展速度达 500~650 m/s, 距炮孔 35~60 mm 的裂纹扩展速度 300~400 m/s。由于爆生气体高压射流作用于孔壁, 加大裂纹



(a) 爆炸裂纹尖端扩展位置

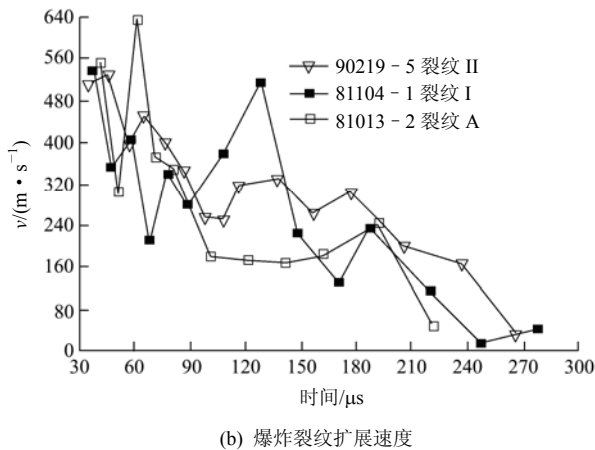


图4 不同装药结构的爆炸裂纹扩展随时间变化曲线  
Fig.4 Relation curves of crack propagation versus time with different cartridge structures

尖端拉应力，延长了裂纹尖端拉应力作用时间，爆炸主裂纹扩展速度在炸药起爆 50 μs 后出现第 2 个大值。模型 81104 - 1 双孔点射流聚能药卷聚能方向定向爆炸裂纹 I 极限扩展速度达 537.98 m/s、极限动态应力强度因子为 1.19 MN/m<sup>3/2</sup>。模型 90219 - 5 双切缝聚能药卷的定向断裂爆炸裂纹 II 极限扩展速度分别达 530.3 m/s、极限动态应力强度因子达 1.43 MN/m<sup>3/2</sup>。大量试验发现，小药量平面模型的爆炸裂纹尖端极限动态应力强度因子很少超过 1.5 MN/m<sup>3/2</sup>。

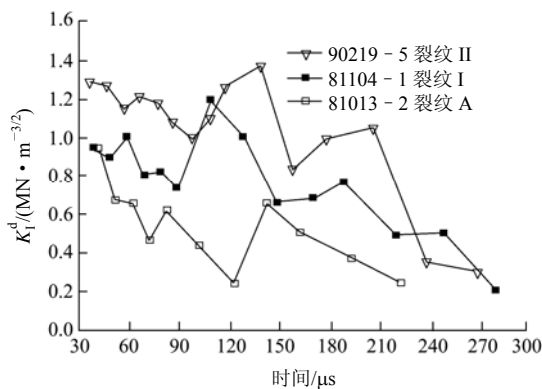


图5 不同装药结构爆炸裂纹动态应力强度因子  $K_I^d$  与时间关系曲线  
Fig.5 Relation curves of  $K_I^d$  versus time with different cartridge structures

不同装药结构的爆炸主裂纹动态应力强度因子变化趋势基本相同， $K_I^d$  随裂纹扩展时间总体上减小，但表现出波动现象。裂纹尖端  $K_I^d$ ， $v$  和扩展长度三者关系密切，一般是同一发展趋势，裂纹尖端  $K_I^d$  数值高，裂纹扩展长度和  $v$  一般也大。聚能药卷定向爆炸主裂纹  $K_I^d$ ， $v$  在 60~200 μs 以较稳定数值

扩展，爆炸主裂纹主要在这一段时间完成，表明爆生气体射流的动作用在裂纹扩展中占有重要地位。

传统的爆破理论<sup>[10]</sup>多认为爆破破碎是应力波和准静态气体联合作用，忽略了高压爆生气体的动作用。如图 3 所示，炸药起爆后，首先在炮孔周围由压缩冲击波形成径向压缩裂纹区，但高速传播的爆炸应力波很快衰减为引起微量变形的“弱波”，爆炸主裂纹的扩展明显滞后于爆炸应力波传播，从动焦散线图片及裂纹面清晰的炮烟痕迹表明高压爆生气体在爆炸主裂纹扩展中起主要作用。试验发现，尽管爆炸径向压缩裂纹密布在炮孔壁周围，但爆炸主裂纹数量极其有限，聚能药卷管壁限制了爆生气体径向膨胀，延长了爆生气体作用时间，高温高压气体沿聚能药卷管壁小孔或切缝方向优先形成射流的“气楔效应”。因此，爆炸主裂纹扩展是利用爆轰气体的高压膨胀静作用，同时利用压强势能转变为射流动能的动作用，促使炮孔切缝方向的压缩径向裂纹受到强烈拉应力作用而快速扩展；另一方面，爆炸应力波在裂纹尖端反射和绕射，产生拉应力波，进一步加剧裂纹尖端的拉应力集中。

分析发现 2 种聚能药卷的爆炸主裂纹动态应力强度因子、扩展速度比普通装药结构模型 81013 - 2 的爆炸主裂纹在相同作用时间的断裂力学量都要大，同时爆炸主裂纹以较大动态应力强度因子、较高扩展速度的持续时间也长。

因此，双孔点射流聚能药卷、双缝线射流聚能药卷改善了炸药的爆轰性能，维持了炸药爆轰的稳定传播，聚能方向的高压气射流的“气楔效应”加强了聚能方向径向压缩裂纹的扩展，同时抑制了非聚能方向径向压缩裂纹的扩展。

#### 4 聚能药卷的爆炸断裂物理过程分析

##### (1) 压缩径向预裂纹的生成

聚能药卷装药起爆后，爆轰波通过聚能药卷管壁后产生径向压缩冲击波作用于孔壁，在介质中形成一个动态应力场，炮孔近处介质的能量增量以压缩应力波的形式向外传播，爆炸冲击波促使炮孔周围形成微小的密集径向压缩裂隙区，消耗了大量的爆炸应力波的能量。聚能药卷管壁对非聚能方向爆炸作用有一定的衰减效应，但不能抑制非聚能方向压缩径向裂隙的生成，径向压缩裂隙区却为聚能药

卷聚能方向的定向断裂提供了预裂纹。

## (2) 径向预裂纹的扩展与开裂角控制

当裂纹尖端的应力强度因子达到岩石断裂韧度时,裂纹启裂。控制裂纹扩展长度的另一个力学量是炮孔超压,压力过低,聚能方向的预裂纹也难以启裂;压力过高,非切缝方向的压缩径向裂纹会被激发而扩展。炮孔较远区域爆炸应力波能量衰减较快,后续高温、高压爆生气体使动态应力场中的介质再次获得能量增量,促使裂纹进一步扩展。因此,爆炸应力波和爆生气体的动、静作用在爆炸主裂纹扩展过程中相互依存、密不可分。

炮孔壁附近初始压缩径向裂纹形成后,岩体内部应力分布随之发生变化,岩体不再是简单拉断或剪切破坏,而是复杂应力作用下张开型脆性断裂。裂纹环向拉应力 $\sigma_\theta$ 达到临界断裂值时,由最大拉应力准则,裂纹沿环向拉应力极大值方向失稳扩展,炮孔壁上的环向拉应力 $\sigma_\theta$ <sup>[11]</sup>表达式如下:

$$\sigma_\theta = \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}}(1 + \cos\theta)\cos\frac{\theta}{2} \quad (3)$$

式中: $\theta$ 为极角,表示炮孔壁预裂纹开裂方向; $K_I$ 为裂纹尖端应力强度因子,与 $\theta$ 无关。

由最大拉应力准则确定压缩径向裂纹扩展方向与开裂方向的开裂角 $\theta_0$ 。由 $\partial\sigma_\theta/\partial\theta=0$ ,可得

$$\sin\frac{\theta_0}{2} + 2\sin\theta_0\cos\frac{\theta_0}{2} + \sin\frac{\theta_0}{2}\cos\theta_0 = 0 \quad (4)$$

显然开裂角 $\theta_0=0^\circ$ ,即裂纹的扩展方向与炮孔预裂纹方向一致,这已被工程试验所证实。

聚能方向炮孔预裂纹最早受到能流密度大的爆轰气体射流的“气楔”效应,应力波在径向预裂纹尖端绕射形成拉应力集中区,加速了聚能方向裂纹继续扩展,T. Kobayashi和J. W. Dally<sup>[12]</sup>通过试验确定了裂纹尖端应力强度因子和裂纹扩展速率的关系,指出预裂纹被启动后便立刻以较高速度扩展,这与动焦散线试验结论一致<sup>[9]</sup>。同时,聚能药卷管壁抑制了炮孔其他方向上随机爆炸主裂纹的产生、扩展。若炮孔间距合适,则可形成贯通断裂面。

## (3) 裂纹止裂

由于爆炸应力波衰减很快,同时爆生气体的膨胀和释放,裂纹尖端动态应力强度因子很快低于岩石止裂韧度,爆炸裂纹止裂。由试验结果<sup>[9]</sup>可知,爆炸主裂纹动态应力强度因子似乎存在变化幅度较小的一个极限值,将爆炸裂纹扩展长度接近停止的 $K_I^d$ 定义为爆炸裂纹止裂韧性 $K_{IC}$ ,只与材料性质有

关,与炸药量等因素无关。基于大量试验可知 $K_{IC}\approx 0.3\text{ MN/m}^{3/2}$ ,是裂纹极限扩展速度时 $K_I$ 值的0.2倍,这个值比静态和低冲击载荷的断裂韧度要低。

岩体长0.025~0.25 mm的天然微裂纹对定向断裂爆破的宏观裂纹影响不大,但高速扩展爆炸裂纹遇到岩体内宏观裂纹(如断层、破碎带、节理、层理或风化带等)时,爆炸裂纹尖端应变能很快释放,炮孔的爆生气体压力很快下降,爆炸裂纹可能止裂、转向或分叉,影响爆炸裂纹的定向扩展效果,这些现象已被岩石爆破试验结果所证实。

## 5 结 论

(1) 早期爆炸裂纹尖端附近的高应变速率和加载速率促使初始压缩径向裂纹尖端形成高应力集中区而扩展,中后期裂纹在高压爆生气体射流的作用下继续以张开变形占优扩展。

(2) 爆炸裂纹尖端的动态应力强度因子、裂纹扩展速度、扩展长度的变化趋势基本相同,表现出明显的波动现象。聚能药卷爆炸主裂纹主要在60~200  $\mu\text{s}$ 完成, $K_I^d$ , $v$ 相对稳定;爆炸主裂纹极限扩展速度约600 m/s,极限动态应力强度因子很少超过1.5  $\text{MN/m}^{3/2}$ ,爆炸裂纹的止裂韧性约0.3  $\text{MN/m}^{3/2}$ 。

(3) 聚能药卷维持了炸药稳定爆轰的传播,高压爆生气体“气楔效应”是聚能方向的压缩径向裂纹扩展主要驱动力,同时抑制了非切缝方向压缩径向裂纹的发展,在定向裂纹扩展中占有主要地位。

(4) 比较了不同装药结构爆炸裂纹扩展的断裂力学特征,发现双孔点射流聚能药卷如双缝线射流聚能药卷一样都能实现定向断裂爆破,形成较好的断裂面。双孔聚能药卷、双缝聚能药卷都能适用于岩石的定向断裂爆破技术。聚能药卷爆炸主裂纹的 $K_I^d$ , $v$ 比普通装药结构爆炸主裂纹在相应作用时间的数值都要大,同时以较大 $K_I^d$ , $v$ 的持续时间也长。

## 参考文献(References):

- [1] 肖正学,张志呈,郭学彬.断裂控制爆破裂纹发展规律的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):546-549.(XIAO Zhengxue, ZHANG Zhicheng, GUO Xuebin. Research on crack development law of rock fracture controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 546-549.(in Chinese))
- [2] 夏祥,李海波,李俊如,等.岩体爆生裂纹的数值模拟[J].岩土力学,2006,27(11):1987-1991.(XIA Xiang, LI Haibo, LI Junru, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1987-1991.(in Chinese))
- [3] PAPADOPOULOS G A. Fracture mechanics—the experimental

- method of caustics and the det.-criterion of fracture[M]. London: Springer-Verlag London Limited, 1993: 211 - 220.
- [4] 李 清, 杨仁树. 节理介质中爆炸裂纹扩展的微观行为研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 271 - 274.(LI Qing, YANG Renshu. Micro-behaviors of crack propagation in jointed materials under blasting load[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(3): 271 - 274.(in Chinese))
- [5] 李 清, 杨仁树, 李均雷, 等. 爆炸荷载作用下动态裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 912 - 2 916.(LI Qing, YANG Renshu, LI Junlei, et al. Experimental study of propagation of dynamic cracks under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 912 - 2 916.(in Chinese))
- [6] 杨永琦, 金乾坤, 杨仁树, 等. 岩巷定向断裂爆破新工艺[J]. 工程爆破, 1995, 1(1): 8 - 13.(YANG Yongqi, JIN Qiankun, YANG Renshu, et al. A new technology of directional fracture blasting in rock drift[J]. Engineering Blasting, 1995, 1(1): 8 - 13.(in Chinese))
- [7] YANG Y Q, GAO Q C, YU M S, et al. Experimental study of mechanism and technology of directed crack blasting[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1995, 5(2): 69 - 77.
- [8] 杨永琦, 戴 俊, 单仁亮, 等. 岩石定向断裂控制爆破原理与参数研究[J]. 爆破器材, 2000, 29(6): 24 - 28.(YANG Yongqi, DAI Jun, SHAN Renliang, et al. A study of the mechanism of directional split of rock by controlled blasting and its parameters[J]. Explosive Materials, 2000, 29(6): 24 - 28.(in Chinese))
- [9] 李 清. 爆炸致裂的岩石动态力学行为与断裂控制试验研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2009.(LI Qing. Experiment of fracture behaviors and control for crack propagation under blasting load broken[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.(in Chinese))
- [10] KUTTER H K, FAIRHURST C. On the fracture process in blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1971, 8(2): 181 - 202.
- [11] 北京工业学院. 爆炸及其作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. (Beijing Institute of Technology. Explosion and action[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979.(in Chinese))
- [12] KOBAYASHI T, DALLY J. W. Relation between crack velocity and stress intensity factor in birefringent polymers[C]// Symposium on Fast Fracture and Crack Arrest. [S. l.]: [s. n.], 1977: 627.