

文章编号: 1001-1455(2006)03-0250-06

# 聚能药包在岩石定向断裂爆破中的应用研究\*

罗勇, 沈兆武

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 以爆炸动力学、岩石断裂力学理论为原理, 对聚能药包用于岩石定向断裂爆破时导向裂缝的形成, 裂纹的起裂、扩展和贯通进行了初步研究, 同时对该方法的爆破参数进行了设计, 并通过现场进行试验验证其正确性。结果表明由聚能射流形成的切缝有明显的定向作用, 使爆生气体的能量沿预定方向集中, 裂纹的定向断裂控制效果良好, 表明该方法是一种比较理想的断裂控制爆破技术。最后指出了该方法目前需要进一步研究的方面。研究成果对相关理论研究和现场应用均有一定的指导意义。

**关键词:** 爆炸力学; 定向断裂爆破; 断裂力学; 聚能药包

**中图分类号:** O389; TD235.37

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引言

随着开采技术的发展, 在岩土、采矿工程的巷道掘进或饰面石材等的开采, 特别是“精雕细刻”开挖工程中, 爆破开挖岩石与保护围岩的矛盾日益突出<sup>[1]</sup>。为了减小粉碎圈, 降低爆炸冲击波对炮孔壁的作用, 传统的光面爆破采用径向不耦合装药和轴向间隔装药<sup>[2]</sup>。实践证明, 无论怎样优化光面爆破参数和孔网参数, 均不能避免在孔壁上产生随机的径向裂纹, 因而造成围岩损伤, 特别是在岩层裂隙发育的条件下, 更难获得预期的爆破效果。

目前国内外采用的石材分离方法大致有传统爆破法、火焰机切割法、静态裂石法、金刚石串绳锯切割和矿山荒料切石机切割等, 但这些方法由于不安全、或者成本高、或者切割效果差, 使用范围都受到不同程度的限制。为了精确控制光面爆破和预裂爆破中的岩石断裂方向, 获得平整的岩石开挖面, 提高石料开采的成材率, 同时降低巷道围岩受损伤的程度, 以便提高其稳定性, 瑞典学者把聚能装药引入岩石爆破, 提出了线型聚能装药爆破方法<sup>[1]</sup>。我国学者<sup>[2~4]</sup>对将该技术应用在石油开发、井巷掘进以及金属切割等方面进行了大量的实验和理论研究, 并对装药结构进行了一定的改进。尽管该方法有很多优点, 效果也很明显, 但由于理论和工艺上的原因, 使得该技术在各领域的推广应用受到了限制。

本文中拟对聚能药包应用于岩石定向断裂爆破进行研究, 力求使其能够成为一种对钻孔没有特殊要求且能精确控制断裂面形成的爆破方法, 并得以推广。

## 2 聚能药包岩石定向断裂爆破裂纹形成机理

根据聚能原理<sup>[5~6]</sup>, 带楔形聚能罩的药包在炮孔内起爆后, 爆轰波一方面沿着装药的长度方向传播, 另一方面向着聚能罩运动, 并以高达数千万帕的压力作用于楔形罩, 使楔形罩以很高的速度向内运动并在对称平面上发生碰撞, 罩内壁附近的金属在对称平面上形成向着楔形罩开口方向运动的高温、高压、高能量的刀片状射流。射流首先作用在炮孔壁上并在此方向的孔壁岩石上形成导向切缝。在炮孔的其他方位, 由于药包外套管对爆轰产物具有瞬间缓冲和抑制作用, 并且套管与炮孔壁之间的不耦合介质(空气)具有缓冲作用, 极大地减少了冲击波对炮孔壁的直接作用和破坏程度, 从而抑制了裂纹的发展。初始导向切缝裂纹形成后, 炸药爆轰产物充满整个炮孔空间, 对炮孔壁岩石施加准静态载荷, 炮孔

\* 收稿日期: 2005-03-23; 修回日期: 2005-04-18

作者简介: 罗勇(1977—), 男, 博士研究生。

壁上导向切缝的尖端在这一准静态载荷作用及应力集中作用下形成裂纹并扩展,若炮孔间距适当,相邻炮孔间的裂纹就能贯通,形成光滑的定向控制爆破断裂面<sup>[2~6]</sup>。

### 3 裂缝扩展方向的力学分析

#### 3.1 射流形成的切缝参数

当聚能射流作用于目标物体时,射流穿透目标物的压力以及穿透速度,均可应用冲击波理论来计算<sup>[5]</sup>,其中射流遇障碍物的压力  $p_k$  可由如下公式计算

$$p_k = \rho_{zc} v_{j,\max}^2 / 4 \quad (1)$$

式中: $\rho_{zc}$ 是聚能罩材料密度,若目标材料密度小于聚能罩材料密度,则应代换成目标材料密度; $v_{j,\max}$ 为射流最大速度,与炸药性能、聚能罩形状、罩材料以及装药参数等因素有关。

显然,射流要在目标物上形成射孔或切槽,压力  $p_k$  至少不能小于目标物体的破坏强度。因此,射流速度是药包设计的一个关键参数。对于面对称线型聚能装药,射流对固体介质的侵彻深度  $H$  可由以下经验公式<sup>[6]</sup>算出

$$H = L_0 \psi (1 + \cos \alpha) \sqrt{\frac{\rho_j \sigma_{zc}}{\rho_t \sigma_c}} \quad (2)$$

式中: $L_0$ 为聚能罩母线长; $\psi$ 为射流伸长率,与目标介质有关,一般取  $\psi = 2 \sim 6$ ;  $\alpha$ 为聚能罩顶角的一半; $\rho_j$ 、 $\rho_t$ 分别为射流密度和目标岩体密度, $\rho_j = 10\rho_{zc}/9$ ; $\sigma_{zc}$ 、 $\sigma_c$ 分别为聚能罩材料的抗压度和目标岩体强度。

根据文献<sup>[7]</sup>的解析理论,聚能射流着靶后产生的切缝入口处宽度  $B$  可由如下经验公式计算

$$B = D_j v_j \sqrt{\frac{\rho_j}{2\sigma_c (1 + K(\rho_j/\rho_t)^2)}} \quad (3)$$

式中: $D_j$ 为射流元尺寸,与炸药性能、楔形罩几何参数等因素有关; $v_j$ 为射流元速度,文献<sup>[6~7]</sup>对楔形罩微元射流速度的计算作了详细的推导。 $K$ 为实验确定的常数,与炸高有关。

显然,保证岩石定向断裂的最关键问题是金属射流应达到一定的速度。因此需要选择合适的炸药,优化设计聚能药包及装药条件,使聚能射流速度和切割深度达到最佳。

#### 3.2 切缝尖端裂纹扩展

根据岩石断裂动力学理论,在准静态压力作用下,裂纹尖端处的应力强度因子

$$K_I = pF \sqrt{\pi(R_b + a)} \quad (4)$$

式中: $p$ 为裂缝中的准静态压力, $a$ 为裂缝长度, $R_b$ 为炮孔半径, $F$ 为应力强度因子修正系数<sup>[4]</sup>,是  $a$  与  $R_b$  的函数,即  $F = F[(R_b + a)/R_b]$ 。

若满足  $K_I \geq K_{ID}$  ( $K_{ID}$ 为岩石断裂韧性),则裂缝就能继续起裂、扩展,反之则止裂。对于定向断裂爆破,炮孔内爆生气体的压力就是裂缝起裂和扩展的驱动力。设炮孔孔壁上形成初始导向切缝后炮孔内压力为  $p_0$ ,则导向切缝需要满足如下条件才能扩展<sup>[4,6]</sup>

$$p_0 \geq \frac{K_{ID}}{F \sqrt{\pi(a_0 + R_b)}} \quad (5)$$

式中: $a_0$ 为射流形成的切缝深度,即式(2)中的  $H$ 。

由于炸药爆轰迅速,炸药爆轰瞬间产生的气体被“局限”于炸药体积  $V_c$  之内。将爆生气体视为理想气体,且在孔内等熵膨胀,则在聚能射流停止作用前,任意瞬间炮孔内爆生气体压力<sup>[8]</sup>

$$p = p_c \left( \frac{p_{av}}{p_c} \right)^{r/k} \left( \frac{V_c}{V} \right)^r \quad (6)$$

式中: $p$ 为爆生气体膨胀过程的瞬时压力; $k$ 和  $r$ 分别对应等熵指数和绝热指数; $V$ 为与  $p$  对应的气体体积; $p_c$ 为临界压力, $p_c = 200$  MPa; $p_{av}$ 为平均爆轰压力, $p_{av} = \rho_0 D^2 / [2(1+k)]$ , $\rho_0$ 和  $D$ 分别为炸药的密度和爆速。

为了尽量减少粉碎圈或避免形成粉碎圈,保证爆破效果,要求爆炸作用对炮孔壁产生的冲击动压不

大于岩石的极限动抗压强度<sup>[8]</sup>,即  $p$  还需要满足

$$p \leq K_b \sigma_c \quad (7)$$

式中:  $K_b$  为在体积应力状态下岩体的抗压强度增大系数,计算时取  $K_b = 10$ ;  $\sigma_c$  为岩体的单轴抗压强度。

结合理想气体状态方程可知,初始导向切缝形成瞬间,孔内爆生气体压力即导向切缝扩展的初始压力  $p_0$  由式(6)可得

$$p_0 = p_c \left( \frac{p_{av}}{p_c} \right)^{r/k} \left( \frac{V_c}{V_b + NV_s} \right)^r \quad (8)$$

式中:  $N$  为切缝条数;  $V_b$  为炮孔除去堵塞段的体积;  $V_s$  为每条切缝的体积,根据切缝深度  $H$  和入口宽度  $B$  以及炮孔深度可近似求出。

### 3.3 裂纹扩展方向

炮孔壁上导向切缝形成后,岩体内部的应力分布也随之发生变化,同时岩体内切割裂缝的扩展所造成的岩体破坏已不再是简单的拉断或剪断,而是在复杂应力作用下的张开型脆性断裂破坏。因此,裂缝的扩展可由最大拉应力准则来讨论,即:(1)裂缝沿环向拉应力  $\sigma_\theta$  取得极大值的方向扩展;(2)当此方向的拉应力达到临界断裂值时,裂缝失稳扩展。利用爆炸力学理论,可推知裂缝的扩展方向与开裂方向一致,这已为工程试验所证实。

## 4 单孔药量

设计的装药量不但要满足产生切缝的要求,还要求聚能射流产生切缝后爆生气体仍有足够能量对切缝进行压裂,使之按预定方向扩展。为达到理想的工程效果,药量的控制显得更为重要。根据文献[9],得到定向断裂爆破单孔装药量  $q$  的计算公式为

$$q = \pi R_c^2 \rho_0 l_c l \quad (9)$$

$$\left( \frac{8K_b \sigma_c}{\rho_0 D^2} \right)^{1/3} \left( \frac{R_b}{R_c} \right)^2 \geq l_c \geq \left( \frac{8K_{1D}}{\rho_0 D^2 \sqrt{\pi a_0 F}} \right)^{1/3} \left( \frac{R_b}{R_c} \right)^2 \quad (10)$$

式中:  $\rho_0$  为装药密度;  $D$  为炸药爆速;  $R_b$  为炮孔半径;  $R_c$  为装药半径;  $l$  为炮孔深度;  $l_c$  为炮孔轴向装药系数,与单个药包长度及单位长度炮孔中的药包个数  $n$  有关。欲使初始裂纹扩展,单位长度炮孔中的药包个数  $n$  至少应为<sup>[3]</sup>

$$n = \frac{V_d}{V_c} \left( \frac{p_c}{p_{min}} \right)^k \left( \frac{p_{av}}{p_c} \right)^\gamma \quad (11)$$

式中:  $V_d$  为单位长度炮孔体积;  $V_c$  为每个聚能药包的体积;  $p_{min}$  为使初始裂纹扩展所需要的最小压力值(一般认为该压力值近似等于孔壁的破坏强度)。

## 5 炮孔间距的确定

根据爆破理论,裂纹扩展程度由爆生气体的压力和岩体的断裂强度因子确定。随着裂纹的扩展,爆生气体的压力会逐渐降低。根据止裂判据就可计算出裂隙扩展的最大长度,从而确定炮孔间距。在定向裂缝的扩展过程中,裂隙尖端的应力强度因子  $K_I$  可记为

$$K_I = 2p(R_b - R_b^3/a^2)(\pi a)^{-1/2} \quad (12)$$

式中:  $p$  为炮孔内气体压力,由式(6)可以求出;  $a$  为任一时刻裂纹长度。

将式(12)写成

$$K_I = pF(\lambda) \quad (13)$$

式中:

$$\lambda = a/R_b, F(\lambda) = 2(R_b/\pi)^{1/2} (1 - \lambda^{-2}) \lambda^{-1/2} \quad (14)$$

根据裂缝止裂判据,裂纹扩展到最大长度时必定满足止裂条件,用岩体的断裂韧度  $K_{1D}$  代替式(13)中应力强度因子  $K_I$ ,则有

$$F(\lambda) = K_{1D}/p_b \tag{15}$$

式中： $p_b$  为裂纹扩展到最大长度时炮孔内爆生气体的压力。假定各条裂纹尺寸和传播规律相同，且裂缝宽度沿其扩展方向成线性变化。设最大裂纹长度为  $a_{max}$ ，则由式(2)和式(3)可求得裂缝的体积，然后用式(6)求出  $p_b$ ，再由式(14)和式(15)就可求得炮孔壁上的最大裂纹长度  $a_{max}$ 。由此可以确定炮孔间距

$$S = 2(a_{max} + R_b + H) \tag{16}$$

### 6 孔内装药结构

对于石材切割等需要严格控制裂纹发展的爆破，一般采用不耦合装药来减小甚至避免粉碎圈的形成。实践表明，增加不耦合系数对爆破裂纹有明显的影响，当炮孔内装药径向不耦合系数增大即炸高增加时，孔壁受到的冲击压力减小，应力波的作用被削弱。同时，爆生气体准静态压力的作用将得到加强，这样可以减小粉碎圈的大小而有利于裂纹扩展。工程经验表明，当装药径向不耦合系数为 1 时，炮孔壁上所产生的裂缝总是随机的，不耦合系数过大，也难以取得控制裂缝的良好效果。在炸药性能和岩石参数一定的情况下，当径向装药不耦合系数达到甚至超过其临界值时，可以避免粉碎圈的形成，并能有效控制裂纹的扩展。文献[10]对临界装药不耦合系数的计算作了详细分析。由于受到装药量及孔径大小的限制，不耦合系数选取还要结合工程实际，工程上一般选取 1.3~1.8。至于炮孔封孔的长度选择，一般采用抗滑稳定性计算并参考工程经验，并保证填塞长度不得小于最小抵抗线的 0.7 倍。

### 7 药包设计

装药参数设计应遵循以下原则：聚能药包尺寸需要大于其临界直径，且药包长度  $L$  大于炮孔直径  $2R_b$ ；聚能药包尺寸必须受到炮孔直径的限制，应有  $\sqrt{A^2 + B_0^2} \leq 2R_c$ ，如图 1 所示。文献[11]指出，楔形罩顶角在  $80^\circ \sim 90^\circ$  时侵彻深度最佳； $A = 3B_0$  时为最佳装药高度，再增加装药高度对侵彻深度贡献不大；炸高等于楔形罩底部宽度，即满足  $B_0 = R_b - A/2$  时为最佳炸高（等于或接近射流焦距），由于受到装药量及炮孔孔径的限制，这一点在岩土工程上通常难以满足；楔形罩厚度为其底部宽度的 0.05~0.08 倍时，切割效果最好。考虑装药外套管的作用，在炮孔径向上的装药不耦合系数实际上是指名义不耦合系数  $d_b/(d_{c1} + \Delta d_c)$ ， $\Delta d_c$  为外壳折算成药柱直径的增量<sup>[12]</sup>

$$\Delta d_c = \frac{2\rho_m(d_c - d_{c1})}{\rho_0} \tag{17}$$

式中： $\rho_m$  为药包外套管密度； $d_c$  为药包直径，即套管外径； $d_{c1}$  为套管内径； $d_b$  为炮孔直径。

### 8 现场试验

工程试验场地在安徽寿县大理石采石场。试验的大理石密度为  $2.7 \text{ t/m}^3$ ，抗压强度为  $131.7 \text{ MPa}$ ，抗拉强度为  $7.6 \text{ MPa}$ ，弹性模量为  $47 \text{ GPa}$ ，动态断裂韧性为  $3.1 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。根据药包设计原则，严格保证聚能药包的设计尺寸和工艺要求，药包长  $100 \text{ mm}$ ，楔形聚能罩用厚度为  $1 \text{ mm}$  的紫铜板加工而成，与药包同长；楔形罩母线长  $7 \text{ mm}$ ，为了加工方便，罩顶角取  $90^\circ$ 。套管为定制的 PVC 管，内径  $29 \text{ mm}$ ，厚  $2 \text{ mm}$ 。炮孔深  $1 \text{ m}$ 、直径  $42 \text{ mm}$ ，炮孔间距  $450 \text{ mm}$ ，封孔  $300 \text{ mm}$ 。径向装药名义不耦合系数为  $1.36$ 。炸高约为其最佳炸高的  $0.8$  倍，且  $A = 3B_0$ （见图 1）。每个炮孔装 5 个药包，由导爆索传爆，单个聚能药包药量为  $10 \sim 15 \text{ g}$  (RDX)。每个炮孔装一个  $8^\#$  雷管，脚线  $1.2 \text{ m}$ ，反向起爆。钻孔时采用 ZW-1 型炮

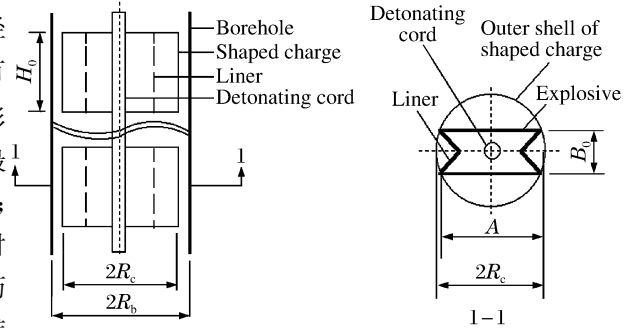


图 1 带楔形罩的聚能药包装药结构  
Fig. 1 The structure of shaped charge with wedge-type liners



孔角度定向测量仪控制炮孔的定位定向几何偏差。药包用小竹片送入炮孔并定位,保证楔形罩开口方向精确对准预裂面。

爆破效果如图 2 所示。装药起爆后,炮孔直径约为 50 mm,为起爆前的 1.2 倍,炮眼周边没有明显的损伤,在开裂面上可找到金属射流残留物,被切割岩石从母岩上分离并推移 2~80 mm。试验表明,聚能装药爆破切割岩石的作用过程大致分为三个阶段:(1)聚能射流在炮孔连心线方向的孔壁上造成初始切缝纹;(2)准静应力场造成裂纹的失稳、扩展、贯通;(3)爆生气体的残压作用,将切割下来的岩块向外推移一定距离。裂缝沿预裂面贯通,切割面平整光滑,孔内爆破后的断裂痕迹清晰可见,凸凹量小,最大值不超过 25 mm,眼痕率高达 100%,开采出的大理石成材率高,切片检验结果表明,石料内部未受伤。由于实际爆破的线装药密度仅为 50~75 g/m,所以,石料生产中的爆破器材成本较低,而爆破效果和生产效率显著提高,将为企业带来显著的经济效益。试验结果验证了理论分析的正确性。

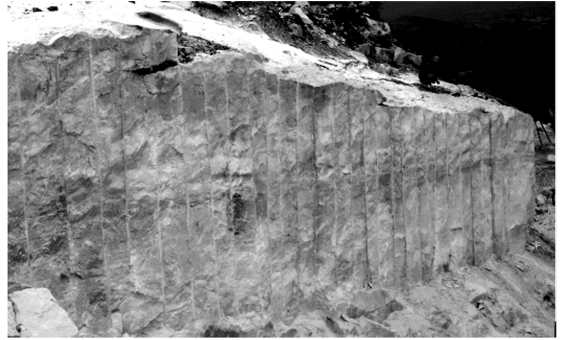


图 2 聚能药包岩石定向断裂爆破大理石效果图

Fig. 2 Photo of fracture blasting with shaped charge in marble

## 9 结 论

基于爆炸力学和岩石断裂力学理论,对带楔形罩的聚能药包用于岩石定向断裂爆破进行了初步研究,推导了其爆破参数的计算公式。结果表明:聚能药包定向破裂岩石由聚能射流形成导向切缝、切缝尖端形成裂纹并扩展以及爆生气体的残压推移过程三阶段构成。现场初步试验结果表明聚能药包用于岩石定向断裂爆破时,扩孔率小,裂纹仅在预定的方向上稳定扩展,定向断裂控制好;断裂面平整,凸凹量最大值不超过 25 mm,眼痕率高达 100%,开采出的大理石损伤小,成材率高。试验结果验证了理论分析的正确性,表明对于岩石断裂控制爆破,聚能切割技术是理想的选择。但也应看到,药包制作工艺比较复杂,而且现场条件的复杂多变,使得药包产品难以系列化生产,因而影响其推广。若能不断提高药包制作工艺和施工工艺,使得装药名义不耦合系数尽量接近临界不耦合系数甚至更大,减小甚至避免粉碎圈的形成并能有效控制裂纹扩展;加强石材内伤检验,并据此完善定向断裂爆破理论,则该方法是有成为爆破切割石材的主要方法的。

## 参考文献:

- [1] Bjarnholt G, Holmberg R, Ouchterlong F. A linear shaped charge system for contour blasting[A]. Konya C C. Proceeding of 9th Conference on Explosives and Blasting Technique[C]. Dallas: Society of Explosives Engineers, 1983:350-358.
- [2] 杨永琦. 岩石聚能装药爆破[A]. 工程爆破文集[C]. 北京:冶金工业出版社,1993:175-180.
- [3] 陆守香,林玉印. 间隔聚能装药爆破技术与应用[J]. 煤炭学报,1997,22(1):42-46.  
LU Shou-xiang, LIN Yu-yin. Blasting technique with discrete shaped charges and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1997,22(1):42-46.
- [4] 张继春,李平,张志呈. 聚能药包爆炸切割原理及其试验研究[J]. 爆炸与冲击,1991,11(3):265-272.  
ZHANG Ji-chun, LI Ping, ZHANG Zhi-cheng. Study of theory and test of cutting with energy collected explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 1991,1(3):65-272.
- [5] 张守中. 爆炸基本原理[M]. 北京:国防工业出版社,1988:531-578.
- [6] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆:重庆出版社,2000.
- [7] Szendrei T. Analytical model of crater formation by jet impact and its application to calculation of penetration curves

- and hole profiles[A]. Proceeding of 7th International Symposium on Ballistics[C]. Brussels Belgium, 1983:1-10.
- [8] 徐颖,宗琦. 光面爆破软垫层装药结构参数理论分析[J]. 煤炭学报,2000,25(6):610-614.  
XU Ying, ZONG Qi. Theoretical analysis on the parameters of smooth blasting soft mat layer charging constructing[J]. Journal of China Coal Society, 2000,25(6):610-614.
- [9] 王汉军,付跃升,蓝成仁. 定向致裂爆破法在煤矿瓦斯抽放中的应用研究[J]. 安全与环境学报, 2001,1(4):50-52.  
WANG Han-jun, FU Yue-sheng, LAN Cheng-ren. Application of directional split blasting on gas taking out in coal mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2001,1(4):50-52.
- [10] 袁山. 饰面石材爆破力学模型与参数计算[J]. 非金属矿,1994,4:52-54.  
YUAN Shan. Explosion mechanics model to cutting stone and parameters calculation[J]. Non-Metallic Mines, 1994,4:52-54.
- [11] 祝逢春,邓振礼,胡瑜. 线性聚能切割器的设计计算[J]. 火工品,2000,1:20-23.  
ZHU Feng-chun, DENG Zhen-li, HU Yu. Design and calculation of linear shaped charge cutter[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2000,1:20-23.
- [12] 魏有志,王仁树. 断裂控制的新方法及其理论[A]. 全国第二届采矿学术会议煤炭分册[C]. 1986.

## Application study on directional fracture controlled blasting with shaped charge in rock

LUO Yong\*, SHEN Zhao-wu

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China,  
Hefei 230026, Anhui, China*)

**Abstract:** Based on dynamics of explosion and fracture mechanics, the mechanism of crack initiation and its expansion of directional fracture controlled blasting by shaped charge with wedge-type liners in rock were studied, the blasting parameters were designed and tested in field. The results show that the energy from blasting be directionally concentrated by the joint-cutting produced by cumulative jet. The directional expansion of crack is satisfactory, field test suggest that this blasting is a good means in excavating tunnels or cutting rock. It points out the aspects of this method need to be studied further. All these will give beneficial references to related theoretical study and field application.

**Key words:** mechanics of explosion; directional fracture controlled blasting; fracture mechanics; shaped charge

---

\* Corresponding author: LUO Yong  
E-mail address: yongluo@ustc.edu  
Telephone: 0551-3655152