

文章编号: 1006-9941(2006)03-0236-05

线性聚能切割器的应用研究

罗勇^{1,2}, 沈兆武², 崔晓荣^{1,2}

(1. 广东宏大爆破工程有限公司, 广东 广州 510055;

2. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为精确控制岩石定向断裂爆破中断裂面的发展, 根据爆炸力学、岩石断裂力学理论, 对线性聚能切割器应用于岩石定向断裂爆破时裂纹的产生及扩展进行了研究, 同时对线性聚能切割器进行了设计, 并在实验室进行了验证试验。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。利用自行设计的线性聚能切割器, 在大理石采石场进行了现场试验, 结果表明定向断裂爆破效果显著, 岩石断裂面平整, 凹凸量不超过 55 mm, 眼痕率高达 100%。

关键词: 爆炸力学; 断裂力学; 定向断裂爆破; 聚能切割器

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引言

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, 降低巷道围岩受损伤的程度, 瑞典学者把聚能装药引入岩石爆破, 提出了线性聚能装药 (Linear shaped charge) 爆破方法^[1]。此后, 人们对该技术在石油开发、矿山以及金属切割等方面的应用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^[2-6]。本文仅就线性聚能装药在岩石定向断裂爆破中的应用进行研究。

2 聚能射流切割原理概述

聚能罩采用楔形罩的装药称为线性聚能装药或线性聚能切割器, 也称平面对称型聚能装药。聚能装药爆炸后, 爆轰产物以高达几十万大气压的压力作用于药型罩, 使之在对称平面内发生高速碰撞, 药型罩内壁附近的金属在对称平面上挤出一向着装药底部高速运动的高温、高压、高能量密度的刀片状金属射流, 当这种刀片状聚能射流作用到岩石中炮孔孔壁上时, 可使孔壁处压力突然达到几百万大气压, 极易在孔壁上形成(初始)导向切缝; 炸药爆轰产物充满整个炮孔空间, 对孔壁岩石施加准静态载荷, 炮孔壁上导向切缝的尖端在这一准静态载荷及应力集中作用下, 先于炮孔的其它方位形成裂纹并扩展, 从而抑制了其它方位随

机裂纹的产生。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^[2-6]。

3 聚能爆破岩石定向断裂理论

金属射流在孔壁上形成定向切缝是实现岩石最终定向断裂的第一步。金属射流对孔壁的切割能力与聚能射流强度有关, 它与孔壁碰撞后产生的驻点压力 p_s 为^[3]

$$p_s = \frac{\rho_j v_j^2}{2} \quad (1)$$

式中, ρ_j 、 v_j 分别为射流密度和射流速度。

对于面对称线性聚能装药, 射流对固体介质的侵入深度 L 可由以下经验公式^[6]算出

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

$$L_0 = h / \cos \alpha \quad (3)$$

式中, L_0 为金属罩母线长; ψ 为射流伸长率, 与目标介质有关, 一般取 $\psi = 2 \sim 6$; α 为聚能罩顶角之半; ρ_j 、 ρ_t 分别为射流密度和目标体密度; σ_{zc} 、 σ_c 分别为聚能罩材料的抗压度和目标岩体强度; h 为药型罩高度。

3.1 爆炸动压的控制

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 p 为^[7]

$$p = p_k \left(\frac{p_w}{p_k} \right)^{\frac{r}{k}} \left(\frac{V_c}{V} \right)^r \quad (4)$$

式中, p 为爆生气体膨胀过程的瞬时压力; k 和 r 分别

收稿日期: 2005-11-25; 修回日期: 2006-03-31

作者简介: 罗勇 (1977 -), 男, 博士, 研究方向为现代爆炸技术与工程安全。e-mail: yongluo@mail.ustc.edu.cn

对应等熵指数和绝热指数; V 为 p 对应的气体体积; p_k 为临界压力, $p_k = 200$ MPa; p_w 为平均爆轰压力, 其值为 $p_w = \rho_0 D^2 / [2(1+k)]$, ρ_0 和 D 分别为炸药的密度和爆速。

另外, 在金属射流作用于孔壁的同时, 爆炸动压对孔壁也有一定的作用。为了尽量减小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^[7], 即

$$p \leq K_b \sigma_c \quad (5)$$

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 $K_b = 10$; σ_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 可由式(6)计算

$$p_0 = p_k \left(\frac{p_w}{p_k} \right)^{\frac{r}{k}} \left(\frac{V_c}{V_b + NV_s} \right)^r \quad (6)$$

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; 一般来讲, V_s 比 V_b 小得多, 所以计算时忽略不计。其余符号含义同上。

3.2 裂缝的扩展和止裂

金属聚能作用于孔壁形成初始导向切缝之后, 爆生气体准静态压力也随之作用于孔壁, 在导向切缝尖端形成裂纹并进一步扩展, 裂纹的扩展可由最大拉应力准则来讨论, 利用爆炸力学理论, 可推知裂纹的扩展方向与开裂方向一致, 这已为工程试验所证实。

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。在定向裂纹的扩展过程中, 裂隙尖端的应力强度因子 K_I 可记为^[8]

$$K_I = 2p \left(r_b - \frac{r_b^3}{a} \right) \cdot (\pi a)^{-1/2} \quad (7)$$

式中, p 为裂纹中的准静态压力, a 为裂纹长度, r_b 为炮孔半径。

文献[4,6]研究表明: $K_I \geq K_{I0}$ 当时, 裂纹才能起裂、扩展, 反之则止裂。 K_{I0} 为岩石动态断裂韧性, 可通过实验来确定。

由裂纹的扩展和止裂条件, 结合式(4)~(6)就可求得炮孔壁上的最大裂纹长度 a_{\max} , 工程上一般选取炮孔间距 S 为

$$S = 2a_{\max} \quad (8)$$

另外, 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。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, 一般选取 2.0~5.0 能达到较为理想效果。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 0.7~1.0 倍。

3.3 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, 使其尖端产生的裂纹按预定方向扩展。欲使初始裂纹扩展, 单位长度炮孔中的聚能药包的个数 n 至少应为^[3]:

$$n = \frac{V_d}{V_c} \left(\frac{p_k}{p_{\min}} \right)^k \left(\frac{p_w}{p_k} \right)^r \quad (9)$$

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)。

由此可知, 单位长度炮孔装药量 q 为 $q = nq_0$, q_0 为单个小聚能药包的装药量。

4 聚能切割器的设计

聚能切割器爆破应确保对目标体有足够的切割能力。理论分析和实验研究都表明, 在聚能罩确定后, 影响炸药对材料侵彻深度的主要因素是爆压。随着炸药爆压的增加, 侵彻深度也会增加^[5]。因此, 为了提高侵彻能力, 必须尽量选取高爆压的炸药, 优化设计聚能药包及装药条件。

文献[3]提出聚能切割器装药参数设计应遵循以下原则, 现利用图1加以说明。(1) 聚能药包尺寸需大于其临界直径, 沿炮孔轴向的尺寸大于其径向尺寸; (2) 装药高度 $A/2$ 不是一个严格控制的参数, 改变它的值就可调整聚能药包的装药量, 一般装药高度满足 $A = 3B_0$ 即可; (3) 聚能药包尺寸应满足 $\sqrt{A^2 + B_0^2} \leq 2r_c$; (4) 炸高等于楔形罩底部宽度, 即 $B_0 = r_b - A/2$, 此时炸高等于或接近射流焦距。

除此之外, 药型罩母线长、罩厚、装药厚度等参数对射流的速度和质量也有一定的影响, 它们之间存在一个最合适的匹配关系, 可以通过正交实验法优化得到。文献[9]的结论是, 楔形罩顶角在 $80^\circ \sim 90^\circ$ 时侵彻深度最佳; 楔形罩厚度为其底部宽度 0.05~0.08 倍时, 切割效果最好。文献[10]对切割器(聚能药包)的形状和几何参数作了详细介绍, 还列举了近年来聚能切割工程应用实例。

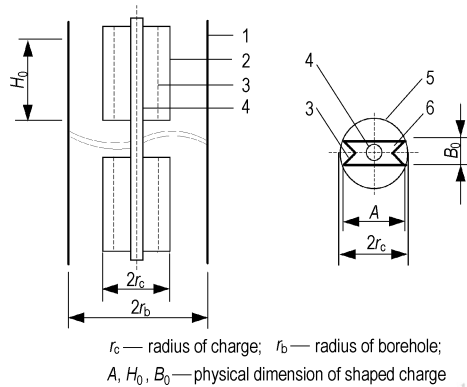


图1 聚能切割器在炮孔中的安置方法
1—炮孔, 2—聚能切割器, 3—药型罩,
4—导爆索, 5—外壳, 6—主装药

Fig. 1 Installation of cumulative cutting charge in a bore hole
1—bore hole, 2—cumulative cutting charge, 3—liner,
4—detonating cord, 5—outer shell, 6—explosive

5 砂浆试件切割试验

文献[9]根据上述原则制作了聚能切割器,进行了切割钢板的实验,结果钢板被切割成两部分,切割面平直,效果好,其它部位均未受到损伤,说明聚能射流是定向作用于靶体的。这表明,聚能爆炸切割技术可以用于加工金属板材、管材等坚硬材料的切割。但值得指出的是,炸药爆炸后有相当多能量存在于爆生气体中,而这部分能量却未能充分利用。因此,笔者自制多面聚能切割器(见图2),对在有堵塞条件下聚能装药定向断裂爆破进行了实验研究。

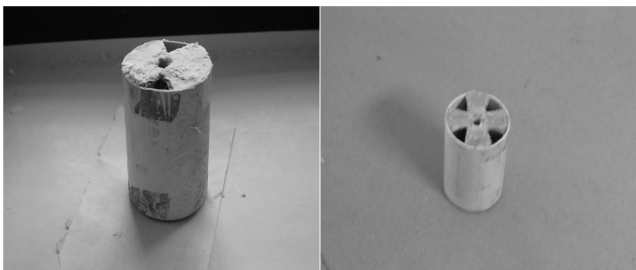


图2 自制线性聚能切割器

Fig. 2 Photograph of linear cumulative cutting charge

水泥砂浆试件利用特制的高强度钢质模型制作,不但可以保证试件成型后具有高强度,还可以削弱爆破时引起的边界效应。砂浆试件的配比为500#普通硅酸盐水泥、砂子和水的比率为1:2:0.4。试件均为高400 mm的圆柱体,其直径为500 mm和800 mm,在直径为500 mm的试件中心处,直径为800 mm砂浆试件偏离其圆心300 mm处开有直径40 mm、深300 mm

的孔,用来装药,每种试件各三个。砂浆试件单轴抗压强度为18.0 MPa,抗拉强度为1.54 MPa,弹性模量为10.27 MPa,泊松比为0.17,密度为 $2.07 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,纵波速度为 $3393 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,动态断裂韧性为 $1.9 \times 10^6 \text{ N/m}^{3/2}$ 。药包采用内径为16 mm长为70 mm的PVC管制备,其基本参数见表1。

表1 药包和V形聚能罩参数

Table 1 Parameters of charges and V-shaped liner

charge			V-shaped liner (copper)			
density	length	diameter	length	thickness	cone	generatrix
$/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	/mm	/mm	/mm	/mm	angle/ $(^\circ)$	length/mm
1.60	70	16	70	1	90	5

每个试件孔内装三个用导爆索等间隔串联的聚能药包,单个聚能药包药量为4.5 g(RDX),封孔长度为80~100 mm,堵塞材料为黄泥。切割器在孔中的安置如图1所示。试验后撤除钢质模型发现,试件均完全分成两部分,其中试件1的切割面贯通不平整,没有发现金属射流痕迹,且试件有少许破坏;而试件2和3的切割面上金属射流痕迹明显,贯通平整,边界上也看不出明显破坏;这说明聚能切割器切割效果较好。

由于3个试件均被一分为二,因而能确定出定向裂纹的最大传播距离至少大于250 mm。对直径为800 mm的三个试件试验后发现,离炮孔500 mm一侧的裂纹均扩展了近350 mm,而另一侧(离炮孔300 mm)的裂纹则基本上扩展至边界,尽管这一侧裂缝较早达到边界,会释放爆破能量从而影响裂缝的扩展长度,但砂浆试件外圈的钢质模型可以削弱这方面的影响,因而可以大致确定最大的定向裂纹扩展长度为350 mm,等于炮孔直径的8.75倍,也就是说,炮孔间距至少能达到炮孔直径的17.5倍。

试验中未发生冲炮现象,说明炮孔堵塞效果好,因而存在于爆生气体中的大量能量可得到利用。聚能射流在孔壁上形成切缝后,切缝尖端在气楔和应力集中共同作用下产生裂纹并向前发展至较长的距离;根据弹性力学及断裂力学理论可知,该方向上裂纹的产生及发展,会在很大程度抑制在其它方向产生裂纹,同时,由于药包外套管阻挡和管壁与炮孔壁之间空气的缓冲作用,使得其它方向上的孔壁受到的撞击作用很小,从而大大降低了随机裂纹产生的概率,但药包外套管的强度及临界厚度还有待于进一步研究。

试验结果表明所设计的聚能切割器参数基本合理,切割效果较好。同时也说明采用线性聚能切割器

开裂岩体的方法是可行的。

6 现场试验

在皖南泾县某大理石采石场进行了聚能药包岩石定向断裂爆破的可行性试验,试验时某些参数的选取还依赖于工程经验。大理石密度为 $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,抗压强度为 117.3 MPa ,抗拉强度为 7.2 MPa ,弹性模量为 41 GPa ,泊松比为 0.21 ,纵波速度为 $4000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,动态断裂韧性为 $3.1 \times 10^6 \text{ N/m}^{3/2}$ 。

药包外套管为定制的 PVC 管。根据药包设计原则和上述理论计算,严格保证聚能药包的设计尺寸和工艺要求。炮孔间距按上文砂浆模型实验得到的结论来取值。为了保证不形成粉碎圈或减少其范围,本次试验径向装药不耦合系数取 2.1 。每个炮孔装的聚能药包个数按式(9)确定为 10 个,导爆索等间隔串联,单个聚能药包药量为 10 g (试验选用 RDX)。药包、炮孔参数及单孔药量如表 2 和表 3 所示。药包用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。共用一个 $8^{\#}$ 雷管,导爆索传爆。

表 2 现场试验的药包和 V 形聚能罩参数

Table 2 Parameters of charges and V-shaped liner in field test

outer shell of charge			V-shaped liner (copper)			
length	thickness	inner	length	thickness	cone	generatrix
/mm	/mm	diameter/mm	/mm	/mm	angle/($^{\circ}$)	length/mm
150	1.5	20	150	1	90	6

表 3 炮孔参数及单孔药量

Table 3 Parameters of borehole and charge amount

parameters of borehole			spacing of borehole		charge amount in one borehole /g	linear charge density / $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$
depth	diameter	sealed length	calculation	application		
3000	42	900	665	660	100	33.4

图 3 为起爆后的效果图,炮眼周边没有明显的损伤,被切割岩石 ($25 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 4 \text{ m}$) 从母岩上分离并推移 $2 \sim 80 \text{ mm}$ 。在开裂面上可找到金属射流残留物,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 55 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 $33.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,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。试验结果验证了理论分析的正确性。



图 3 现场试验效果图

Fig. 3 Photograph of fracture blasting with linear cumulative cutting charge

7 结 论

借助爆炸力学和岩石断裂动力学理论,对线性聚能切割器用于岩石定向断裂爆破进行了初步研究。现场初步试验结果表明,线性聚能切割器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,定向断裂控制效果好;断裂面平整,凸凹量最大值不超过 55 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,现场条件复杂多变,因此应对实际工程中的侵彻对象的力学性能有比较透彻的认识,才能设计制作出满足工程实际需要的聚能药包。

参考文献:

- [1] Bjarnholt G, Holmberg R, Ouchterlong F. A linear shaped charge system for contour blasting [A]. Proceeding of 9th Conference on Explosives and Blasting Technique [C], Dallas. Society of Explosives Engineers, 1983.
- [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.
YANG Yong-qi. Blasting with Shaped Charge in Rock [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [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, 11(3): 265-272.
- [5] 张守中. 爆炸基本原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
ZHANG Shou-zhong. Basic Principle of Explosion [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988.

- [6] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆: 重庆出版社, 2000.
ZHANG Zhi-cheng. Directional Fracture Controlled Blasting [M].
Chongqing: Chongqing Press, 2000.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 焦丽娟, 刘天生. 关于楔型罩的初步研究[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(1): 70-74.
JIAO Li-juan, LIU Tian-sheng. Preliminary study on the cuneiform
charge liner [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2001,
22(1): 70-74.
- [10] 于亚伦. 工程爆破理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
YU Ya-lun. Theory and Technology of Engineering Blasting [M].
Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.

Application Study on Blasting with Linear Cumulative Cutting Charge in Rock

LUO Yong^{1,2}, SHEN Zhao-wu², CUI Xiao-rong^{1,2}

(1. Guangdong Hongda Blasting Engineering Co., Guangzhou 510055, China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: According to explosion mechanics and fracture mechanics, the initiation mechanism of the crack and its expansion of orientation fracture blasting were studied, the mechanism of crack initiation and its expansion of orientation fracture blasting by linear cumulative cutting charge in rock were studied, then the linear cumulative cutting charge was designed and tested in laboratory and field. The directional expansion of crack is satisfactory from the experiment and the result of field test is very good, the ruggedness fracture plane is less than 55 mm and the rates of half-hole marks are 100%.

Key words: explosion mechanics; fracture mechanics; orientation fracture blasting; cumulative cutting charge



会议信息 (二)

1. 第9届全国分析化学年会暨第9届原子光谱学术会议

会议主题: 分析化学学科的新成就、新进展和新挑战

定于2006年10月8-11日在南昌市召开, 人数700人, 邀请外宾港澳台人数40人。

会议负责人: 倪永年 电话: 0791-8326232 电子信箱: mstang@zsu.edu.cn

会议联系人: 万益群 电话: 0791-8304654 电子信箱: rpliang@ncu.edu.cn; pingqiu@ncu.edu.cn

地址: 南昌市南昌大学化学系, 450052 传真: 0791-8321370

2. 2006年全国高分子材料科学与工程研讨会

定于2006年10月在四川省绵阳市召开, 人数300人。

承办单位: 中国工程物理院化工材料研究所; 清华大学化工系; 四川大学高分子研究所

会议负责人/联系人: 谢续明 电话: 010-62773607 传真: 010-62784550 电子信箱: xxm-dce@tsinghua.edu.cn

地址: 北京清华园清华大学化工系, 100084

3. 第九届全国特种应用化学学术研讨会

定于2006年12月在海南召开, 人数150人。

承办单位: 中国热带农业科学院分析测试中心; 防化研究院第四研究所

会议负责人: 谢德芳 电话: 0898-66895005 传真: 0898-66895008 电子信箱: xdfang1@163.com

地址: 海口市成西路华南中国热带农业大学, 571101

会议联系人: 杜兰波 电话: 010-66758341 传真: 010-68904756 电子信箱: lb_du@bnchina.com

地址: 北京市1044信箱400号防化研究院第四研究所, 100037