DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0661-09

侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响*

冷振东[1,2],卢文波[1],范 勇[1,3],陈 明[1],严 鹏[1]
(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;
2.中国葛洲坝集团易普力股份有限公司,重庆 401121;
3.三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:为了提高不同岩石中爆破破岩的能量利用率,分析了导爆索侧向起爆和一端起爆条件下的爆炸冲击能和爆生气体能的分布规律,并结合响水沟过渡料爆破开采实验,对比了这两种起爆方式下的爆破块度级配曲线。结果表明,侧向起爆和一端起爆条件下的爆炸冲击能和爆生气体能的分布有着很大差异。可以通过改变起爆方式来调整用于爆破破岩的冲击能和气体能的比例,以提高爆破破岩的能量利用率。此在基础上,提出了不同强度岩体中起爆方式选择的原则,导爆索侧向起爆适用于软岩和裂隙岩体的爆破破碎以及轮廓爆破,而在硬岩中的级配料爆破开采则不宜采用侧向起爆。

关键词:岩石爆破;破碎效应;起爆方式;能量分布;冲击能;气体能
中图分类号:O383.1;TV554 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

中深孔爆破技术因其高效性已被广泛运用在矿山开采、路堑开挖和水电工程等施工中,光面爆破和预裂爆破技术也已经被普遍用来控制轮廓成形和超欠挖。在中深孔爆破和轮廓爆破中,经常采用导爆索沿柱状炸药轴向并敷的装药结构,以导爆索侧向起爆药柱的方式进行传爆。目前对于导爆索侧向起爆的传爆特性已有一些研究,K. Liang 等[1]测定了并敷段炸药的爆速,发现不同爆速炸药经过相互激爆以后,并敷段将沿轴向以其中较高的爆速进行传爆,在较短时间内完成爆轰过程。C. M. Lownds 等[2]在实验中发现,导爆索起爆后不会立即引起高速爆轰,而形成低速的始终跟随导爆索爆轰波的横向爆轰波。W. I. Duvall 等[3]采用短药柱在花岗岩中开展了一端起爆和轴向起爆(导爆索置于药柱的中轴线)的对比实验,发现轴向起爆在岩体中产生的径向应变有更短的上升时间,但他们未研究侧向起爆的爆破效果。

炸药爆炸后,一部分能量直接以冲击波的形式作用在炮孔周围岩石上,然后由冲击波产生的网状裂纹以及岩体的原生裂隙在爆生气体的作用下进一步扩展[4-5]。关于冲击波能和气体能的分布对爆破破碎效果的影响,颜事龙等[6]和宗琦等[7]认为炸药爆炸所产生的冲击波能量主要消耗在岩石产生变形及破碎上,而爆炸气体产物膨胀能则用于形成爆炸空腔和抛掷岩石。K. Kurokawa 等[8]通过在乳化炸药中添加铝粉调节炸药气体膨胀能的比例,发现气体膨胀能和爆速有很强的相关性。J. R. Brinkman[9]采用套管法将冲击波和爆炸产物的作用分开,证明了岩体的破碎是这两种能量综合作用的结果。W. A. Hustrulid[10]、M. A. Cook 等[11]也对导爆索起爆做了大量研究,但是由于爆轰过程的复杂性以及实验条件的限制,导爆索侧向起爆的作用机理仍不清晰。

起爆方式对爆破破岩效果有重要影响,现有研究主要集中在起爆点位置以及延时等对爆破效果的影响[12-14],而对侧向起爆爆破破岩效果的研究报道较少,特别是侧向起爆对炸药爆炸冲击能和爆生气体能的分布规律的影响尚未见深入研究。工程实践中,不合理的甚至是错误的起爆方式仍然大量存在。

* **收稿日期**:2015-09-28;**修回日期**:2016-03-21
基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2011CB013501);国家自然科学基金项目(51609127)
第一作者:冷振东(1989—),男,博士研究生;**通信作者**:卢文波,wblu@whu.edu.cn。

因此，深入研究导爆索侧向起爆条件下的爆炸能量传输规律及其对破岩效果的影响，将有助于进一步揭示中深孔爆破和轮廓爆破过程中的能量利用机制，为改进爆破技术提供理论依据。

1 导爆索侧向起爆机理

对于筒状炸药，侧向起爆时一般是将药卷捆绑在导爆索上；对于散装炸药，则是直接将导爆索并敷在炸药一侧。大量实验[15-16]表明，炸药起爆存在不定常爆轰过程，而且在时间和空间尺度上该过程往往不能忽略，特别是对小型爆轰结构而言更是如此。当冲击波速度高于被发炸药的稳定爆速时，存在一段爆速高于稳定爆速的不稳定爆轰区，如图 1 中曲线 2 所示。若起爆冲击波速度超过了临界速度但低于稳定爆速，并且满足适当的条件，则被发炸药中的爆轰将逐渐成长，在径向经过一定的距离后才能达到稳定爆轰，如图 1 中曲线 1 所示，并且传入的爆轰波速度越低，不稳定爆轰区越长。

被发炸药的爆轰反应是由导爆索从侧面激发引起的，普通导爆索的结构如图 2 所示，导爆索中心为黑索金或泰安药芯，外部为棉纱、纸条、防潮层等包缠物。导爆索起爆后，爆轰波沿轴向以 D_1 的速度高速传播，高温高压的爆生气体透过侧向包缠物后，最终作用在与导爆索接触的被发炸药上的冲击速度 D_i 显著低于其轴向爆速 D_1。虽然导爆索的爆速高于主爆药的爆速，但作用在被发炸药上的侧向冲击波的速度却远低于被发炸药的包爆速。考虑到导爆索的直径比炮孔直径小得多，可以认为导爆索侧向起爆形成的是低速过渡区。

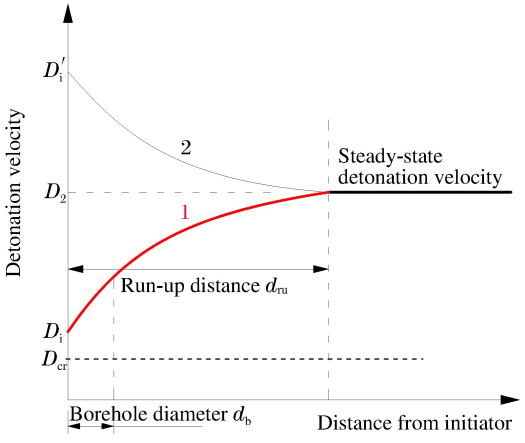

图 1 炸药在冲击波激发下的爆轰过程

Fig. 1 Detonation process of explosives under shock wave

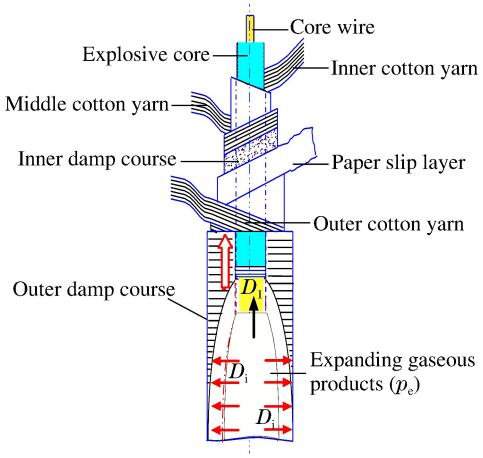

图 2 普通导爆索结构示意图

Fig. 2 Structural schematics of a detonating cord

对于侧向起爆，目前至少有两种错误的认识。一些研究者认为导爆索起爆属于强冲击起爆，低爆速炸药被高爆速导爆索引爆后，先经过过速爆轰，一段时间后才达到稳定爆轰，爆轰过程如图 1 中的曲线 2 所示。同时更多的研究中则为了简化爆轰过程，将导爆索起爆等效成无数个起爆点依次快速起爆，甚至把导爆索起爆近似为瞬时爆轰；这些研究中假设炸药被导爆索起爆后，立刻到达其稳态爆速，忽略了炸药起爆后的不稳定爆轰过程。

W. A. Hustrulid[10]和 M. A. Cook[11]指出，导爆索起爆时，总是在相当长的距离内经历了缓慢的加速，爆速才从一个较低的数值到达稳定状态的数值，这个加速距离一般大于炮孔直径。N. M. Junk[15]通过实验发现，即使是在大孔径、铵油炸药装药的炮孔中，不稳定爆轰区的长度 d_{ru} 也有炮孔直径的 3～6 倍。S. P. Singh[16]采用导爆索侧向起爆的几组套管爆破实验的实测结果也表明，铵油炸药的轴向视爆速约等于导爆索的爆速，侧向爆速仅为其稳定爆速的 45%～55%。

一方面由导爆索本身爆炸形成的爆轰波沿药柱轴向自上而下高速传播；另一方面，由导爆索激起的沿药柱径向传播的爆轰波，持续从侧面以较低的侧向爆速引爆与之接触的被发炸药。被发炸药与导爆索的爆轰波同步向前传爆，如图 3 所示，因此表面上炸药的爆速提高了，但是由于不稳定爆轰区的存在，爆轰波实际传播速度反而低于其固有爆速。

2　侧向起爆条件下的爆炸能量分布

2.1　一端起爆下冲击能和气体能的分布

在正式研究侧向起爆前，有必要先了解一端起爆这种简单形式下的爆轰波传播过程和能量分布特征。在一端起爆条件下，经过距离 d_{ru} 的传播后，爆轰波阵面几乎变为平面，在理想条件下爆轰波将保持稳定的爆轰速度沿药柱传播，如图 4 所示。由于 d_{ru} 远小于炮孔深度 L，一端起爆产生的不稳定爆轰区相对整个炮孔深度而言比例很小，计算时，可以认为整个炮孔内仍以稳定爆轰为主。

炮孔内炸药释放的总爆炸能[11,17]：

$$E_t=\frac{1}{4}\pi d_b^2 L\left[\frac{p(r)}{\gamma-1}+\frac{1}{2}\rho(r)u^2(r)\right] \tag{1}$$

式中：ρ、p、u、γ 分别为爆轰波阵面上的密度、压力、质点运动速度和多方指数，L 为装药长度。括号中第 1 项为冲击能，第 2 项为气体能。

由 C-J 爆轰理论[12]有：

$$p=\frac{\rho_0 D_2^2}{\gamma+1},\ \rho=\frac{\gamma+1}{\gamma}\rho_0,\ u=\frac{1}{\gamma+1}D_2$$

代入式(1)计算得到：

$$E_t=\frac{(3\gamma-1)\rho_0 D_2^2\pi d_b^2 L}{8\gamma(\gamma^2-1)} \tag{2}$$

炸药爆轰反应时释放的能量包含冲击能 E_s 和气体能 E_g：

$$E_s=\frac{2\gamma}{3\gamma-1}E_t,\qquad E_g=\frac{\gamma-1}{3\gamma-1}E_t \tag{3}$$

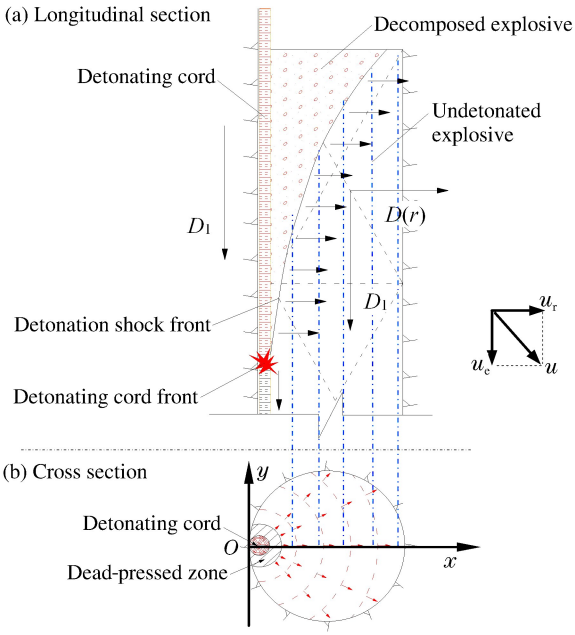

图 3　导爆索侧向起爆下的炮孔内的爆轰过程

Fig. 3　Detonation process of side initiation in the borehole

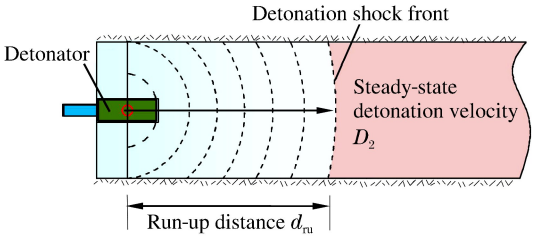

图 4　一端起爆爆轰示意图

Fig. 4　Detonation process of end initiation in the borehole

2.2　侧向起爆下冲击能和气体能的分布

如图 3(a)所示，侧向起爆时，在距离起爆点 r 处，被发炸药的爆速为 $D(r)$，爆轰速度增长过程可用以下方程来描述：

$$D=\begin{cases}D_i+(D_2-D_i)r^n d_{ru}^{-n} & r<d_{ru}\\ D_2 & r\geqslant d_{ru}\end{cases} \tag{4}$$

式中：D_i 为初始爆轰速度，与导爆索爆速和结构有关；D_2 为稳定爆轰速度；d_{ru} 为不稳定爆轰区的长度；n 为反映爆速上升速率的指数，可以通过实验测得，$0<n<1$。

导爆索侧向起爆时，靠近导爆索附近的炸药会出现“压死”的现象，但是这部分区域很小，暂不考虑其影响。那么，在极坐标系(θ,r)下，炮孔中炸药爆轰总能量有以下关系式：

$$E_t=\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_0^{d_b\cos\theta}\left[\frac{p(r,\theta)}{\gamma-1}+\frac{1}{2}\rho(r,\theta)u^2(r,\theta)\right]rL\,\mathrm{d}\theta\mathrm{d}r \tag{5}$$

相应的总的冲击能为：

$$E_s=\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_0^{d_b\cos\theta}\frac{\rho_0 D^2}{\gamma^2-1}Lr\,\mathrm{d}\theta\mathrm{d}r=\frac{d_b^2 L\rho_0}{\gamma^2-1}\left(\frac{\pi}{4}D_i^2+\Gamma\right) \tag{6}$$

$$\Gamma=\frac{(D_2-D_i)^2 d_{ru}^{-2n}d_b^{2n}}{n+1}\int_0^{\pi/2}\cos^{2n+2}\theta\mathrm{d}\theta+\frac{4D_i(D_2-D_i)d_{ru}^{-n}d_b^n}{n+2}\int_0^{\pi/2}\cos^{n+2}\theta\mathrm{d}\theta$$

从能量守恒的角度，则总的气体能为：

$$E_g = E_t - E_s \tag{7}$$

导爆索侧向起爆时，虽然被发炸药的视爆速提高到导爆索的爆速 D_1，但是由于不稳定爆轰，被发炸药的实际有效爆速 D 反而会小于其固有爆速 D_2。波阵面实际爆轰压力降低，因此冲击能 E_s 减少，根据能量守恒方程，冲击能 E_s 的减小，必然引起气体能 E_g 的增加，即炸药爆轰冲击能 E_s 转化为气体能 E_g。在这个能量转化的过程中，其总量 E_t 保持不变。

气体能的增加可以用以下过程解释：被发炸药的爆轰波阵面质点既随导爆索有轴向的运动，同时相对其有径向运动。如图 3 所示，由速度合成定理，质点绝对速度：

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_e + \boldsymbol{u}_r \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{u}_e$ 为被发炸药爆轰波阵面上质点相对导爆索的速度，$\boldsymbol{u}_r$ 为被发炸药因导爆索轴向传播而具有的牵连速度。

由于导爆索侧向传爆的作用，被发炸药中爆轰波阵面上质点速度增大，并向径向偏转，则相应的气体能为：

$$E_g = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{d_b \cos\theta} \frac{1}{2}\rho(r,\theta)\left[u_e^2(r,\theta) + u_r^2(r,\theta)\right] L r \,\mathrm{d}\theta \mathrm{d}r \tag{9}$$

那么冲击能和气体能的比值为：

$$\frac{E_s}{E_g} = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{\frac{\pi}{4}D_i^2 + \Gamma}{\frac{\pi}{4}D_i^2 + \frac{\pi}{4}D_i^2 + \Gamma} \tag{10}$$

显然，式(10)等号右边第 2 项小于 1，可以证明，不同起爆方式下冲击能与气体能的比例：

$$\left(\frac{E_s}{E_t}\right)_{side} < \left(\frac{E_s}{E_t}\right)_{end}, \qquad \left(\frac{E_g}{E_t}\right)_{side} > \left(\frac{E_g}{E_t}\right)_{end} \tag{11}$$

相同的炸药在侧面起爆和一端起爆时，炸药所产生的总能量是相等的，但是这些能量转化为冲击能和气体能的比例却大不相同。相对于一端起爆，采用导爆索侧向起爆时所产生的冲击能与气体能的比值 E_s/E_g 降低了，冲击能 E_s 转化为气体能 E_g。

2.3 侧向起爆影响因素分析

可见，冲击能和气体能的比值 E_s/E_g 主要和导爆索爆速 D_1、被发炸药爆速 D_2、不稳定爆轰区长度与炮孔直径的比值 d_{ru}/d_b 等因素相关。如图 5 所示，在给定参数下，随着导爆索爆速的升高，初始爆轰速度升高，冲击能比例将增大，气体能比例减小。同样，随着爆速增长区长度与炮孔直径的比值 d_{ru}/d_b 增大，气体能比例增大，当 d_{ru}/d_b 增大到一定值时，两者的比例趋于稳定，如图 6 所示。

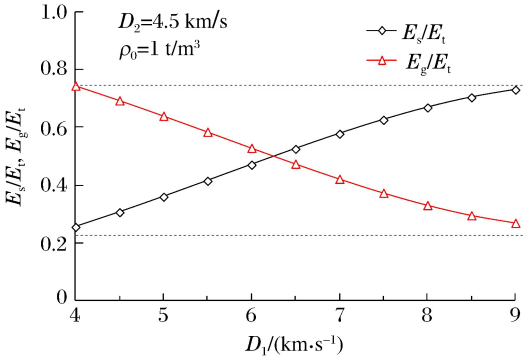

图 5 冲击能和气体能的分布随导爆索爆速的变化

Fig. 5 Partition of shock and gas energies varying with detoantion velocity of detonating cord

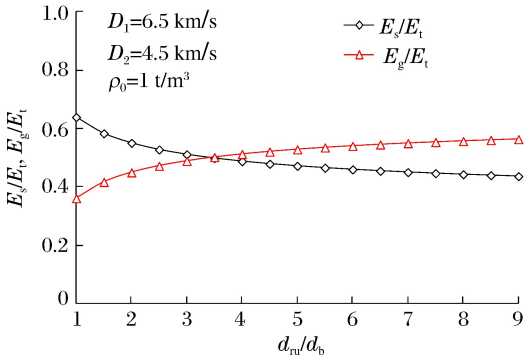

图 6 冲击能和气体能的分布随 d_{ru}/d_b 的变化

Fig. 6 Partition of shock and gas energies varying with d_{ru}/d_b

3　侧向起爆爆破破岩效果的影响分析

同种炸药在侧向起爆和一端起爆条件下的 p-V 曲线不同，如图 7 所示。侧向起爆相对一端起爆有更低的炮孔压力，但是两者释放的总能量是相等的。炸药释放的总能量是恒定的，不随药柱瞬态爆速的升高而增加。爆速的降低，导致产生的冲击能更少，同时意味着气体能增加，这样才能保持总能量不变。C. M. Lownds 等[18]利用体积功 p-V 图分析了非理想爆轰和理想爆轰在不同岩石中的能量利用率，参考这种方法，利用 p-V 图来对比侧向起爆和一端起爆方式下硬岩和软岩中的爆炸能量利用率，如图 8 所示。由于侧向起爆和一端起爆下炸药释放的气体能和冲击能的比例不同，它们在不同强度岩石中爆破的能量利用率也有显著差异。因此，通过改变起爆方式来调整作用于岩体破碎的冲击能和气体能的比例，来适应不同的岩性条件，获得理想的爆破效果。

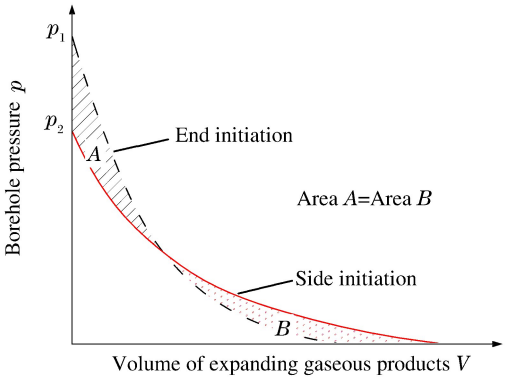

图 7　一端起爆和侧向起爆时的 p-V 曲线

Fig. 7　p-V curves for side initiation and end initiation

岩石的破碎块度与冲击加载速率有较强的相关性，随加载速率的提高迅速减小[19]。等能量下短延时的冲击波脉冲的破坏性更大，冲击能的峰值和加载速率显著高于气体能的峰值和加载速率，裂纹密度更大，破坏能量消耗更快，最终的破碎尺寸更小。

如图 8(a)、(b)所示，硬岩中的爆破需要较多的冲击能以产生足够的初始裂隙，导爆索降低了炮孔压力，造成爆生裂隙网的产出质量受到影响，因此导爆索应用于硬岩和超硬岩时要慎重，这类岩石爆破更适宜采用一端起爆；对于软岩、裂隙岩体，这些岩石的破碎并不需要很高的冲击能，而需要得到堆积好、粉矿率低、容易挖掘的爆堆，气体能的增加有利于这类岩体的破碎，并增强了抛掷作用，如图 8(c)所示，因此软岩、裂隙岩体的爆破破碎以及轮廓爆破适宜采用侧面起爆。

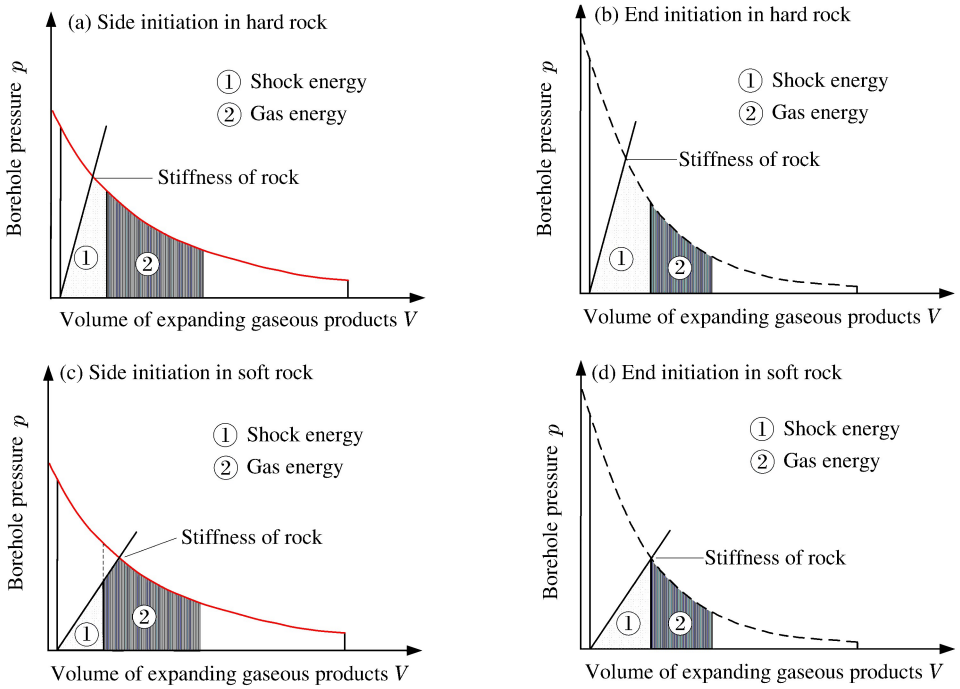

图 8　侧向起爆和一端起爆在不同岩石中的能量利用

Fig. 8　Energy utilization for hard and soft rocks with side and end initiations, respectively

4 爆破实验

4.1 爆破实验参数

长河坝水电站是大渡河干流水电梯级开发的第 10 级电站，电站总装机容量 2 600 MW。坝体为超高心墙堆石坝，整个大坝填筑方量达 2 764 万米^3，其中过渡料达 200 多万米^3。响水沟料场料源岩性为花岗岩，岩石弱-微风化，饱和湿抗压强度为 94.5～120.0 MPa，天然密度为 2.61～2.99 g/cm^3。长河坝石料场岩石强度高、岩体完整性好，过渡料爆破开采中，已经采用了很高的炸药单耗，但是如何减少超粒径料、增加细颗粒含量和开采出符合设计级配要求的石料依旧是个难题。

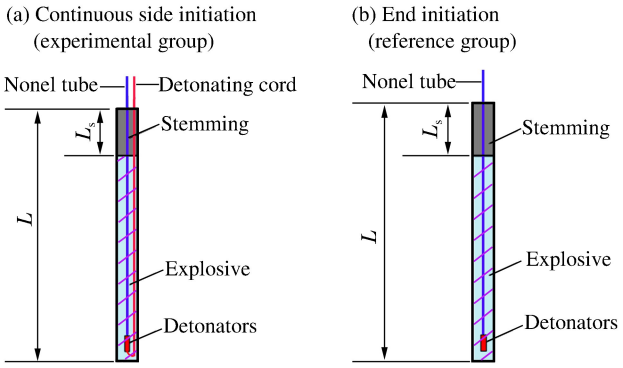

图 9 装药结构示意图

Fig. 9 Schematics of charge structures

为了进一步对比侧向起爆和一端起爆条件下的爆破破岩效果，在长河坝响水沟料场 EL.1745～1760 平台进行了多次过渡料爆破实验。A 组实验位于 II 区靠近料场后边坡，B 组位于 III 区，C、D 组位于 VII 区靠近料场中部，并在同一平台上岩体特性类似的区域进行一端起爆作为对比实验，爆破参数见表 1。实验组采用两发 400 ms 延时的高精度导爆管雷置于装药段底部，如图 9(a)所示，为了防止装药时卡孔造成炸药拒爆，在每孔侧面并敷导爆索至孔底，这种起爆方式实质上构成了侧向起爆，起爆雷管引爆后，会首先激发爆速相对较高的导爆索从侧面引爆与之接触的炸药，自下而上连续从侧边引爆炸药。对比组采用普通非电导爆管雷管 MS13 孔底起爆，如图 9(b)所示。导爆索爆速为 6.0～7.2 km/s，2＃岩石乳化炸药(筒状)爆速为 4.5～5.1 km/s，散装乳化炸药爆速为 4.2～5.0 km/s。

表 1 长河坝过渡料开采爆破实验参数

Table 1 Blasting parameters for transition material excavation field tests

爆破参数	编号 A、B		编号 C、D	
	侧向起爆	一端起爆	侧向起爆	一端起爆
炮孔直径/mm	120	120	90	90
台阶高度 H/m	15.0	15.0	15.0	15.0
超深 Δh/m	1.5	1.5	1.5	1.5
钻孔深度 L/m	16.5	16.5	16.5	16.5
钻孔倾角 θ/(°)	90	90	90	90
孔距×排距/(m×m)	2.3×2.0	2.3×2.0	1.85×1.85	1.85×1.85
堵塞长度 L_s/m	2.0	2.0	2.0	2.0
单耗 q/(kg·m^{-3})	2.2	2.2	1.8	1.8
装药结构	连续耦合	连续耦合	连续不耦合	连续不耦合
起爆网络	V 形起爆	V 形起爆	V 形起爆	V 形起爆
炸药品种	散装乳化炸药	散装乳化炸药	2＃岩石乳化炸药	2＃岩石乳化炸药

4.2 爆破实验结果分析

工程上常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来反映爆破块度级配情况：

$$\begin{cases} C_u = d_{60}/d_{10} \\ C_c = d_{30}^2/(d_{60}d_{10}) \end{cases} \tag{12}$$

式中：d_{60}、d_{30}、d_{10} 为特征块度，分别为筛下累计率为 60%、30%、10%时的块度尺寸。长河坝的过渡料级配的设计要求不均匀系数 C_u 大于 10，曲率系数 C_c 介于 1 和 3 之间，小于 5 mm 的颗粒含量不小于

10%，不大于 30%，且级配宜连续良好。

图 10 给出了相同的装药结构、钻孔参数、起爆网络的条件下，分别采用侧向起爆和一端起爆方式爆破后的块度分布曲线。在实际生产中大块率、平均块度等也常被用来评价爆破破碎程度[20]，表 2 为爆破效果统计。4 组爆破实验结果规律一致：一端起爆的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 明显大于侧向起爆的对应值。当采用侧向起爆时，爆堆中小尺寸级别块度（<5 mm）的产出率明显低于采用一端起爆的对应值，平均块度 d_{50}、最大块度 d_{max} 以及大尺寸级别块度（>110 mm）的产出率则高于一端起爆。其原因是，侧向起爆条件下的冲击能与气体能的比值 E_s/E_g 较一端起爆的低，作用在炮孔壁上的峰值压力较低，级配料中的细颗粒主要来自于炮孔周围压剪破坏形成的细小碎块，冲击能的减少影响了细颗粒的产出，因而爆堆中小于 5 mm 的颗粒含量仅为 4.68%～8.63%，不符合设计要求。

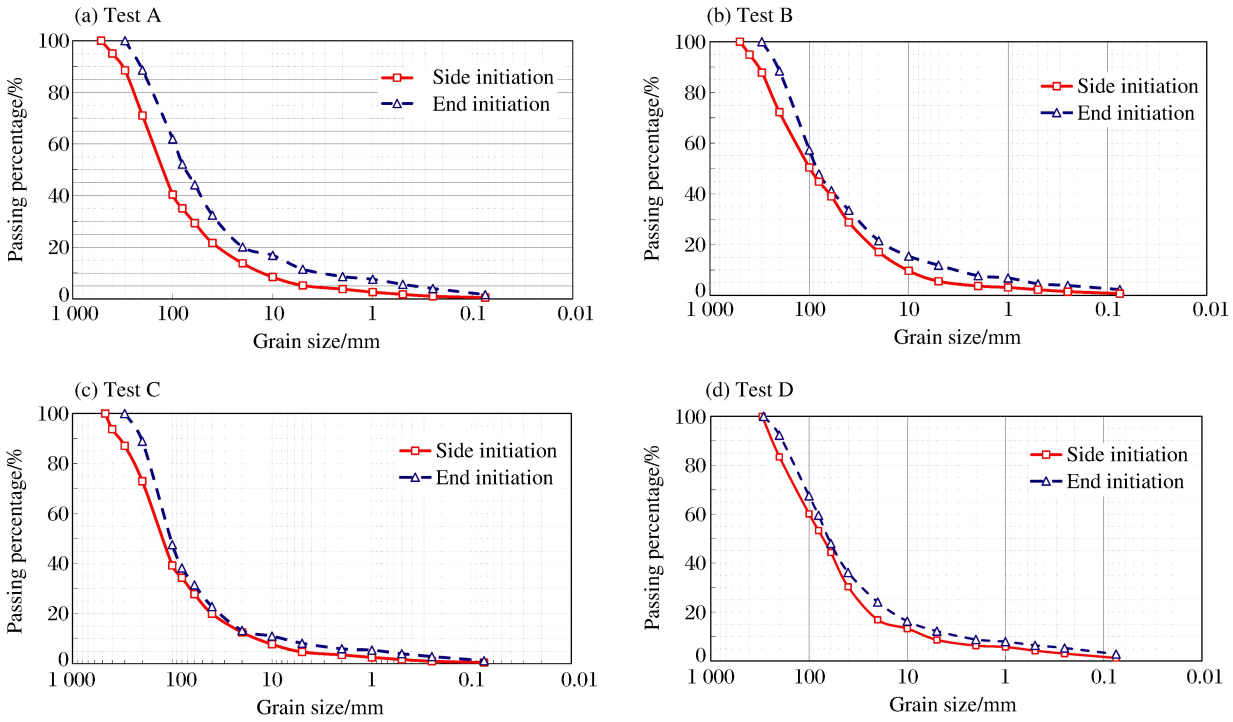

图 10　4 组实验爆破块度分布曲线

Fig. 10　Fragment size distributions of four blasting field tests

表 2　4 组爆破破碎结果统计

Table 2　Summary of fragmentation results of four groups field tests

实验区域	起爆方式	d_{50}/mm	C_u	C_c	产出率/%		d_{max}/mm
					d<5 mm	d>110 mm	
A	侧向起爆	111	11.21	2.55	5.20	29.03	520
	一端起爆	75	24.72	2.90	11.50	11.37	320
B	侧向起爆	100	12.45	1.62	5.56	27.76	500
	一端起爆	86	30.29	2.74	11.90	11.55	310
C	侧向起爆	114	10.00	2.66	4.68	27.12	470
	一端起爆	105	12.64	2.83	8.26	11.10	<300
D	侧向起爆	73	15.40	2.62	8.63	16.56	<300
	一端起爆	64	21.67	2.79	12.25	7.72	<300

炸药释放的总能量中爆炸冲击能与爆生气体能的分布直接关系到炸药能量利用率和破碎效果，合理的起爆方式选择，直接关系到爆破块度分布和开挖经济性。长河坝过渡料爆破开采实践表明，如果在

坚硬岩石级配料爆破开采中采用侧向起爆，会导致冲击能与膨胀能的比值偏小，使爆炸应力波峰值偏低，造成爆生裂隙网的产出质量受到影响，致使爆破质量降低。因此，就坚硬致密岩体破碎而言，应适当增大冲击能的比例，确保足够的爆炸冲击能作用于介质中产生充分的初始裂隙网，为气体能参与介质的破碎创造条件，使尽可能多的爆炸能传递到待破碎的介质中去，因此硬岩中的级配料爆破开采更适宜采用一端起爆，而不宜采用导爆索侧向起爆。

受现场条件的限制，未进行软岩、裂隙岩体中的爆破实验。但是，可以预测，由于岩体中已经存在足够多的初始裂缝，过多的冲击波能量只会造成能量浪费和近区的过粉碎。侧向起爆时，气体能的增加有利于这类岩体的破碎，增强抛掷作用，减小粉矿率而不降低爆破的有效性，因此软岩和裂隙岩体的爆破破碎以及轮廓爆破适宜采用侧面起爆。

5 结 论

通过对侧向起爆条件下爆炸能量传输过程和爆破破岩效果的研究，并结合长河坝过渡料爆破开采实验，得到的主要结论如下：

(1)不同的起爆方式直接会影响炸药的能量释放特性，侧向起爆和一端起爆条件下的爆炸冲击能和爆生气体能的分布有很大差异。在能量传输上，相对于一端起爆，侧向起爆时炸药的冲击能向爆生气体能转化，冲击能减少，气体能增加。

(2)可以通过改变起爆方式来调整用于爆破破岩的冲击能和气体能的比例，以提高爆破破岩的能量利用率。虽然导爆索在很多场合作为准爆的重要保证措施，但是导爆索起爆影响炸药能量释放，冲击能比例降低，因此，导爆索应用于硬岩和超硬岩时要慎重。

参考文献：

[1] Liang K, Zhang J, Liu C. Detonation propagation characteristics of superposition explosive materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2003,18(1):80-82.

[2] Lownds C M, Du Plessis M P. Behaviour of explosives in intermediate-diameter boreholes[J]. Quarry Management, 1984,11:799-804.

[3] Duvall W I, Pugliese J M. Comparison between end and axial methods of detonating an explosive in granite[M]. Pittsburgh: US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1965.

[4] 卢文波，陶振宇. 预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析[J]. 爆炸与冲击，1994,14(2):140-147.
Lu Wenbo, Tao Zhenyu. Theoretical analysis of the pressure-variation in borehole for pre-splitting explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 1994,14(2):140-146.

[5] 冷振东，卢文波，陈明，等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进[J]. 爆炸与冲击，2015,35(1):101-107.
Leng Zhendong, Lu Wenbo, Chen Ming, et al. Improved calculation model for the size of crushed zone around blasthole[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(1):101-107.

[6] 颜事龙，陈叶青. 岩石中集中装药爆炸能量分布的计算[J]. 爆破器材，1993,77(6):1-5.
Yan Shilong, Chen Yeqing. Distribution of the explosive energy of concentrated charge in rock blasting[J]. Explosive Materials, 1993,77(6):1-5.

[7] 宗琦，杨吕俊. 岩石中爆炸冲击波能量分布规律初探[J]. 爆破，1999,16(2):1-6.
Zong Qi, Yang Lüjun. Shock energy distribution of column charge in rock[J]. Blasting, 1999,16(2):1-6.

[8] Kurokawa K, Hashimoto K, Tabuchi M. The experimental study on the effect of performances of explosives on rock fracture[C]// Proceedings of the Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 1993: 379-386.

[9] Brinkman J R. Separating shock wave and gas expansion breakage mechanisms[C]// Proceedings of the Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 1989:6-15.

[10] Hustrulid W A. Blasting principles for open pit mining: Theoretical foundations[M]. Rotterdam: Balkema, 1999:205-207.

[11] Cook M A. The science of industrial explosives[M]. Salt Lake City: IRECO Chemicals, 1974:120-123.

[12] Long Y, Zhong M S, Xie Q M, et al. Influence of initiation point position on fragmentation by blasting in iron ore [C]// Proceedings of the Tenth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 2012:111-116.

[13] 郑炳旭. 经山寺铁矿优化开采综合爆破技术[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(8)：1530-1536.
Zheng Bingxu. Multiple blasting techniques for exploitation optimizion of jinshan temple iron mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8):1530-1536.

[14] 邢光武，郑炳旭. 采石场爆破块度分区及块度预测研究[J]. 地下空间与工程学报，2009，5(6)：1258-1261.
Xing Guangwu, Zheng Bingxu. Study on prediction of block zoning and block size in quarry blasting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6):1258-1261.

[15] Junk N M. Overburden blasting takes on new dimensions[J]. Coal Age, 1972, 77(1):92-96.

[16] Singh S P. Mechanism of tracer blasting[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1996, 14(1):41-50.

[17] Lin Shaochi. Cylindrical shock waves produced by instantaneous energy release[J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(1):54-57.

[18] Lownds C M. The strength of explosives[C]// Proceedings of the International Conference of the South African Institute of Mining and Metallurgy: Planning and Operation of Open-Pit and Strip Mines, 1986:151159.

[19] 许金余，刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学，2012，33(11)：3225-3229.
Xu Jinyu, Liu Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11):3225-3229.

[20] 周传波. 基于回归分析理论的爆破块度预测模型研究[J]. 爆破，2003，20(4)：1-4.
Zhou Chuanbo. Model of predicting the blasting fragmentation based on regressional analysis[J]. Blasting, 2003, 20(4):1-4.

Explosion energy distribution by side initiation and its effects on rock fragmentation

Leng Zhendong[1,2], Lu Wenbo[1], Fan Yong[1,3], Chen Ming[1], Yan Peng[1]

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan* 430072, *Hubei, China*;
2. *China Gezhouba Group Explosive Co. Ltd, Chongqiing* 401121, *China*;
3. *College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *Hubei, China*)

Abstract: To improve the energy utilization and fragmentation effect in rock blasting, the explosion energy partitions of end initiation and continuous side initiation were analyzed. In addition, field blasting tests were conducted in Xiangshuigou Quarry, and the results show significant differences in the partition of shock and gas energy between the two initiation methods. The effective energy utilization of these two initiation methods in different rocks varies considerably. On this basis, a selection principle of initiation methods for rocks with different intensities was put forward. The continuous side initiation with a detonating cord is advantageous in soft and fissured rocks and contour blasting, while blasting for graded material in hard rock, the end initiation is recommended instead of the side initiation.

Keywords: rock blasting; fragmentation effect; initiation method; energy partition; shock energy; gas energy

（责任编辑　张凌云）