

文章编号: 1000-7598-(2006) 05-0735-05

岩石中柱状装药爆炸能量分布

吴 亮¹, 卢文波¹, 宗 琦²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 安徽理工大学 土木工程系, 淮南 232001)

摘 要: 岩石中装药爆炸产生的爆破能量可分为爆炸冲击波能量和爆生气体膨胀能量。对爆炸能量分布的理论分析有助于改善爆破效果, 提高爆破质量。在柱状耦合装药情况下, 分析了冲击波作用下岩石变形和破坏的特点、爆生气体对爆腔的扩腔作用, 考虑了在岩体的损伤情况下爆生气体对裂纹的驱裂作用。计算结果表明: 埋深在临界深度以下时, 岩石中柱状装药爆破冲击波做功消耗的能量约占爆炸总能量的 40%, 剩余爆生气体能量中用于扩腔和扩展主要裂隙的能量约占总能量的 23%, 剩余大约 37% 的能量中有小部分能量用于新增裂纹数目, 而大部分损失掉了。

关 键 词: 岩石爆破; 柱状装药; 爆炸能量; 冲击波

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock

WU Liang¹, LU Wen-bo¹, ZONG Qi²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The explosive energy of charge in rock is composed of shock wave energy and gaseous explosive energy. Analysis of the distribution of explosive energy can help to improve the blasting effect and blasting performance. During coupling column blasting, the features of deformation and destruction of rock by shock wave, the explosion of cavity by detonation gas, and moving of cracks by the detonation gas with considering advance damage are analyzed. The result calculated for several rocks shows that the shock wave energy consumed makes up about 40% of the total energy of the charge. The energy consumption in the course of the cavity and main cracks expansion accounts for about 23% of the total blasting energy. The spare energy among which most is consumed to increase the amount of cracks is lost.

Key words: rock blasting; column charge; explosion energy; shock wave

1 引 言

理论研究与生产实践均表明^[1~4]: 在岩石爆破时, 岩石的破裂、破碎及抛掷是爆炸应力波和爆生气体共同作用的结果, 即爆破能量是通过冲击波和爆生气体传递给岩石的, 前者主要消耗在爆腔的初始扩张, 引起岩石弹性变形, 形成粉碎区和产生裂隙上; 后者则主要用于扩大爆腔, 延伸裂隙和抛掷岩石。就炸药本身而言, 水下爆炸能量测试表明, 爆炸能量可以分为冲击波能量和爆炸产物形成的气泡波能量, 两种能量的分布随炸药特性参数而变化, 对于 2[#]岩石炸药, 其能量分布为: 冲击波能量和气泡波能量分别占炸药总能量的 48 % 和 52 %^[3]。另

外, 露天矿爆破的高速摄影表明^[5]: 一般情况下 (负载值为 6~8 m 时), 炸药起爆后台阶面的胀裂、抛掷时间在 20~30 ms 之间, 而冲击波的作用时间一般不超过 5~6 ms, 剩下的较长时间内为爆生气体的准静态作用时间。因此, 将炸药在岩石中爆炸能量分为作用于岩石中的应力波能量和爆生气体能量是比较合适的。装药爆轰后, 炮孔周围岩石中激起的爆炸冲击波径向剧烈冲击压缩岩石而形成粉碎区, 同时造成岩石质点位移, 扩张爆腔。冲击波对岩石做功, 能量迅速衰减, 至粉碎区边缘冲击波依次衰减为塑性及弹性应力波, 应力波的传播使岩石切向拉伸产生径向裂隙, 其扩展过程中继续消耗冲击波能量, 应力波作用强度降低, 以至在裂隙区之

收稿日期: 2004-08-23

修改稿收到日期: 2004-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.50239097), 教育部优秀青年教师资助计划 (No.2081)。

作者简介: 吴亮, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事水利水电工程施工技术、工程爆破等方面的研究。E-mail: wuliang1980@hotmail.com

外只能引起岩石的弹性变形及质点振动。紧随冲击波之后,爆生气体继续膨胀,进一步扩腔,并冲入裂隙产生“气楔效应”引起裂隙延伸。最终破碎的岩石在爆生气体剩余能量的作用下向外抛掷。当炸药量一定时,随着药包深度的减小,传给地面附近岩石的爆炸能量将随之增加,至一定程度时,地面将开始破坏。根据岩石性质不同,脆性岩石将产生“片离现象”,塑性岩石将产生“隆起现象”,并伴有裂隙产生。此时药包的埋深称为临界深度。本文主要讨论岩石中柱状装药爆破,其埋深在临界深度以下的能量分配。

2 爆炸应力波破裂区的计算

2.1 岩石中柱状装药爆炸荷载

在耦合装药条件下,岩石中的柱状药包爆炸,向岩石施加强冲击荷载,按声学近似原理有^[6~8]:

$$P_d = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \gamma} \frac{2\rho_m C_p}{\rho_m C_p + \rho_0 D} \quad (1)$$

式中 P_d 为透射入岩石的冲击波初始压力; ρ_0 , ρ_m 分别为炸药的装药密度和岩石的密度; C_p , D 分别为岩石中的声速和炸药爆速; γ 为爆轰产物的膨胀绝热指数,一般 $\gamma = 3$ 。

冲击波能量的大量消耗使其迅速衰减,在粉碎区外变成应力波。考虑问题为平面应变时,应力波在岩石中任一点所引起的应力状态有^[4, 9]:

$$\sigma_r = P_d \bar{r}^{-\alpha} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = -\lambda \sigma_r \quad (3)$$

$$\sigma_z = \mu(1 - \lambda) \sigma_r \quad (4)$$

式中 σ_r , σ_θ , σ_z 分别为径向、切向、轴向应力; $\bar{r}$ 为对比距离, $\bar{r} = r_i/r_b$, r_i 为计算点到装药中心的距离, r_b 为炮孔半径; α 为压力衰减系数,对于冲击波区 $\alpha \approx 3$ 或 $\alpha = 2 + \mu/(1 - \mu)$, 应力波区 $\alpha = 2 - \mu/(1 - \mu)$, 根据有关研究^[7, 10], 在工程爆破的加载率范围内, $\mu = 0.8\mu_0$, μ_0 为岩石的静态泊松比; λ 为侧向压力系数, $\lambda = \mu/(1 - \mu)$ 。

2.2 爆炸荷载作用下岩石破坏准则

外荷载作用下材料的破坏准则,取决于材料的性质和实际的受力状况。岩石属于脆性材料,抗拉强度明显低于抗压强度。根据文献^[9]可得岩石的有效应力 σ_i 表达式:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_r \left[(1 + \lambda)^2 - 2\mu(1 - \lambda)^2(1 - \mu) + (1 + \lambda^2) \right]^{1/2} \quad (5)$$

根据 Mises 准则,如果 σ_i 满足 $\sigma_i \geq \sigma_{cd}$ (压碎区)、 $\sigma_i \geq \sigma_{td}$ (裂隙区),则岩石破坏。其中 σ_{cd} , σ_{td} 分别为岩石的单轴动态抗压强度和单轴动态抗拉强度。由于岩石的 σ_i 随加载应变率的提高而增大,而且不同岩石对应变的敏感程度不同,对常见的爆破岩石,可以用式 $\sigma_{cd} = \sigma_c \dot{\epsilon}^{1/3}$ 来表示, σ_c 为岩石的单轴静态抗压强度; $\dot{\epsilon}$ 为加载应变率。资料表明^[11]: 岩石的加载率在 $10^0 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 之间。在粉碎区内,加载率较高,可取 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$; 在粉碎区外,加载率降低,可取 $10^0 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 之间。岩石的 σ_{td} 随加载率的变化很小,在岩石工程爆破的加载应变率范围内,可取 $\sigma_{td} = \sigma_t$, σ_t 为岩石的单轴静态抗拉强度。

2.3 粉碎区与裂隙区的计算

柱状耦合装药条件下,炸药爆炸后,将在岩石中的炮孔周围形成粉碎区,由式(1)、式(2)和式(5),并使 σ_i 满足 $\sigma_i \geq \sigma_{cd}$ 可得粉碎区半径^[9]:

$$R_c = r_b \left(\frac{P_d A}{\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{1/\alpha} \quad (6)$$

式中 $A = \left[(1 + \lambda)^2 + (1 + \lambda^2) - 2\mu(1 - \mu)(1 - \lambda)^2 \right]^{1/2}$ 。

同理,由式(1)、式(2)和式(5),并使 σ_i 满足 $\sigma_i \geq \sigma_{td}$, 可得裂隙区半径为^[9]

$$R_t = R_c \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{1/\beta} = r_b \left(\frac{P_d A}{\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{1/\alpha} \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{1/\beta} \quad (7)$$

这里为区别 α , 衰减指数 $\beta = 2 - \mu/(1 - \mu)$ 。

3 冲击波对岩石做功分析

3.1 冲击波膨胀爆腔

在冲击波的强烈作用下,孔壁岩石质点发生径向位移,炮孔直径增大,爆腔膨胀,冲击波粉碎岩石做功,并迅速衰减。当冲击波传播到粉碎区边缘,冲击压缩过程结束,由冲击波引起的爆扩过程也随之结束。在此过程中岩石遵守质量守恒,并可表示成下式^[1, 2]:

$$(r^2 - r_b^2) \rho_m = \int_{r_i}^r 2\rho r dr \quad (8)$$

式中 r 为冲击波作用半径; r_i 为与 r 对应的爆腔半径; ρ 为冲击波波阵面上的岩石密度。

有关研究表明:冲击波波阵面后岩石密度变化很小,可按等密度处理,因此可用压缩后孔壁处的岩石密度 ρ_t 取代公式中的 ρ , 由此得出冲击波作用下的爆腔扩展规律^[2]:

$$r_1 = [r^2 - (r^2 - r_b^2) \rho_m / \rho_r]^{1/2} \quad (9)$$

在粉碎区 $r = R_c$ 时, 爆扩过程结束, 最终的爆腔半径为

$$R_1 = [R_c^2 - (R_c^2 - r_b^2) \rho_m / \rho_r]^{1/2} \quad (10)$$

在应力波的爆扩过程中, 根据文献[4]有:

$$\rho_r = \frac{a + bu}{a + (b-1)u} \rho_m \quad (11)$$

式中 a, b 为岩石试验常数; u 为孔壁岩石质点初始运动速度。

冲击波能量的消耗等于冲击波对岩石所做的功, 在爆腔膨胀过程中冲击波所做的功为

$$W_1 = \int_{r_b}^{R_1} 2\pi r \sigma_r dr \quad (12)$$

将岩石冲击波峰值压力的衰减公式 $\sigma_r = P_d r^{-\alpha}$ 代入式(12)积分得

$$W_1 = 2\pi r_b^2 P_d \left(1 - \frac{r_b}{R_1}\right) \quad (13)$$

3.2 应力波产生径向裂隙做功

粉碎区外, 冲击波衰减为应力波, 引起岩石切向受拉形成裂隙区。资料表明^[12]: 采用平面楔形裂纹模型比较合适。同时, 根据岩石断裂力学原理, 考虑炮孔柱状装药爆破可以看作平面应变问题, 可得能量释放率: $G_1 = \frac{(1-\mu^2)}{E} K_1^2$, K_1 为应力强度因子。由于裂隙长度扩展 Δa 时, 其裂隙端部的应力强度因子可认为相等。因此可求得裂隙在扩展过程中切向应力所做的功为

$$W_2 = n_1 \int_{r_b}^{R_1} \frac{(1-\mu^2)}{E} K_1^2 dr \quad (14)$$

式中 n_1 为径向裂隙的条数。

根据资料, 主导裂隙将从裂隙群中突出发展, 由试验所得主导裂隙为 4~12 条, 计算取 $n_1 = 8$ 。对于张开型裂纹, 在其延长线上, 即有 $\theta = 0$, 则裂隙端部的切向应力与应力强度因子的关系为: $\sigma_\theta = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r_j}}$, 式中 r_j 为炮孔中心到裂隙端部的距离, 将

上式代入式(14)后积分整理得

$$W_2 = \frac{n_1 \pi \lambda^2 P_d^2 r_b^2 (1-\mu^2)}{E(1-\alpha)} \left[\left(\frac{R_1}{r_b} \right)^{2(1-\alpha)} - 1 \right] \quad (15)$$

3.3 应力波引起弹性变形

裂隙区外, 应力波只能引起弹性变形。在计算

弹性变形消耗的能量时, 单位体积内岩石的弹性变形能为^[2]

$$\Delta E = \frac{1}{2} (\sigma_r \varepsilon_r + \sigma_\theta \varepsilon_\theta) = \frac{\sigma_r^2}{2E} (1 + \lambda^2) \quad (16)$$

由此, 应力波、冲击波引起岩石弹性变形所做的功为

$$W_3 = \int_{r_b}^{+\infty} 2\pi r \Delta E dr = \frac{\pi (1 + \lambda^2)}{E} \frac{P_d^2 r_b^2}{2(\alpha - 1)} \quad (17)$$

4 爆生气体对岩石的做功分析

当由冲击波引起的爆扩过程终结后, 爆生气体迅速膨胀充满爆腔, 并继续以准静态压力的形式作用在腔壁上, 从而引起腔壁岩石质点继续作径向移动, 即爆腔继续膨胀, 随着爆腔体积的增大, 爆生气体的压力降低。当压力下降到与周围的围岩压力相均衡时, 爆扩过程结束。

4.1 爆生气体的扩腔

紧随冲击波之后, 爆生气体膨胀继续扩大爆腔, 当腔内爆生气体压力 P 等于围岩压力 P_s 时, 爆扩过程结束, 爆扩过程中的围岩压力^[13]为

$$P_s = P_{atm} + \sigma_s + \gamma_m W \quad (18)$$

式中 P_{atm} 为大气压力; σ_s 为多向应力条件下岩石极限抗压强度, $\sigma_s = (\rho_m C_p^2 / \sigma_c)^{1/4} \sigma_c$, γ_m 为岩石的重度; W 为抵抗线。由于 P_{atm} , $\gamma_m W$ 与 σ_s 相比可以忽略不计, 即有 $P_s = \sigma_s$ 。为了简化计算, 忽略气体孔口和裂隙泄漏, 对于绝热膨胀, 在爆腔内的膨胀规律有^[1]:

$$P = \begin{cases} P_0 (r_b / r_2)^6 & (P \geq P_k) \\ P_k (r_k / r_2)^{8/3} & (P < P_k) \end{cases} \quad (19)$$

式中 P 为爆生气体膨胀过程的瞬时压力; P_0 为膨胀开始的爆生气体压力, 耦合装药时其值等于平均爆轰压力, 即 $P_0 = \rho_0 D^2 / (2 + 2\lambda)$; r_2 为与 P 相对应的爆腔瞬时半径; r_k 为爆生气体由等熵绝热膨胀时的临界爆腔半径; P_k 为与 r_k 对应的临界压力。变换式(19)可得爆生气体膨胀作用下的爆腔膨胀规律, 即

$$r_2 = \begin{cases} r_b (P_0 / P)^{1/6} & (P \geq P_k) \\ r_b (P_0 / P_k)^{1/6} (P_k / P)^{3/8} & (P < P_k) \end{cases} \quad (20)$$

以 P_s 取代式(20)中的 P , 便可得爆腔的最终半径:

$$R_2 = \begin{cases} r_b (P_0/P_s)^{1/6} & (P_s \geq P_k) \\ r_b (P_0/P_k)^{1/6} (P_k/P_s)^{3/8} & (P_s < P_k) \end{cases} \quad (21)$$

由此, 可得爆生气体扩腔做功的计算式:

$$W_4 = \int_{R_1}^{R_2} 2\pi r P dr \quad (22)$$

将式(19)代入式(22)积分得

$$W_4 = \begin{cases} \frac{\pi P_0 r_b^2}{2} \left(\frac{r_b}{R_1} \right)^4 \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^4 \right] & (P_s \geq P_k) \\ \frac{4\pi P_k r_b^2}{3} \left(\frac{P_0}{P_k} \right)^{4/9} \left(\frac{r_b}{R_1} \right)^{2/3} \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3} \right] & (P_s < P_k) \end{cases} \quad (23)$$

4.2 爆生气体的驱裂

岩石的爆破破碎是应力波和准静态气体联合作用的结果^[14]。该理论认为: 首先在应力波的作用下, 在炮孔周围岩石中形成初始裂纹网, 随后在爆生气体的准静态作用下, 初始裂纹得到进一步延伸。考虑应力波超前传播的力学效应, 即对岩体的损伤, 岩体的微观细观结构已有所改变。Kutter 和 Fairhurst 认为, 应力波对岩体起着预荷载的作用。据此, 炮孔间准静态爆生气体驱动的平面楔形裂纹模型可由图 1 所示。图中 $L(t)$ 为爆生气体驱动的裂纹扩展总长度; $L_1(t)$ 为爆生气体在裂纹中的贯入长度, 而 L_0 为应力波作用下产生的径向裂纹初始长度。

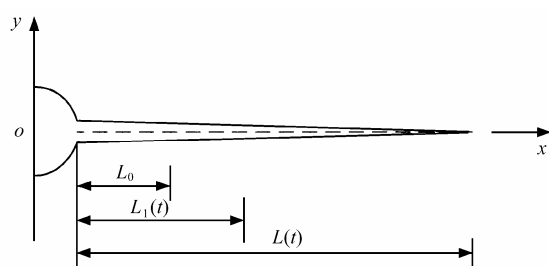


图 1 爆生气体驱动裂纹扩展模型

Fig.1 The model of crack propagation driven by gases of explosion products

初始裂隙由冲击波所引起, 随后在爆生气体的作用下进一步得到发展。作为工程计算时, 当裂纹长度大于炮孔尺寸时, 炮孔本身可作为裂纹的一部分, 则有此模型下裂纹间断的应力强度因子^[12,15,16]:

$$K_I = \frac{2}{1-D} \left[\frac{L(t)+r_b}{\pi} \right]^{1/2} \int_0^{L(t)+r_b} \frac{P(x,t)-\sigma}{\{[L(t)+r_b]^2-x^2\}^{1/2}} dx \quad (24)$$

式中 $P(x,t)$ 为沿裂纹长度方向的气体压力分布; σ 为垂直于裂纹面方向的远场应力; D 为裂纹尖端的损伤值, 要获得岩体中每一点的损伤值, 必须知道该点处应变及应变率, 文献[15]推荐了经验与理论相结合的办法, 给出应变波的简便求法。当裂纹发展到最后一次止裂后, 将不再扩展, 设此时炮孔内压力为 P , 最终裂纹长度为 L , 则有:

$$K_I = \frac{2}{1-D} \left[\frac{L+r_b}{\pi} \right]^{1/2} \int_0^{L+r_b} \frac{P-\sigma}{\{[L+r_b]^2-x^2\}^{1/2}} dx = K_a \quad (25)$$

式中 K_a 为岩石的止裂韧度。

由上式可得裂纹在计损伤情况下应力波与准静态爆生气体压力作用下的最后裂纹长度, 并可求得爆生气体对产生裂纹所做的功为

$$W_5 = n_1 \int_{R_1}^L \frac{(1-\mu^2)}{E} K_I^2 dr \quad (26)$$

5 算例计算及分析

爆炸过程中各项所做的功等于其所消耗的能量, 它们与炸药总能量的比值为其所消耗的能量占总能量的百分比。单位长度的炸药能量为 $E_0 = \pi r_b^2 \rho_0 Q$, Q 为炸药爆热, $2^\#$ 岩石硝铵炸药 ($\rho_0 = 1\,000\text{ kg/m}^3$, $v = 3\,600\text{ m/s}$) 爆热可取 3.76 MJ/kg , 岩石物理参数见表 1。由计算结果分析得到 (见表 2): 冲击波做功消耗的能量约占爆炸总能量的 40%, 剩余爆生气体能量约占总能量的 60%, 其中用于扩腔和扩展主要裂隙的能量约占总能量的 23%; 剩余大约 37% 的能量中有小部分能量用于新增裂纹数目, 而大部分损失掉了; 计算结果和相关资料很接近。

表 1 岩石的物理力学性质及其 a , b 值^[2]

Table 1 Physico-mechanical properties of rock and a , b value

岩石名称	$\rho_m / \text{kg} \cdot \text{m}^3$	$C_p / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	σ_c / MPa	σ_t / MPa	E / GPa	μ_0	$a / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	b
花岗岩	2670	5500	180	15	70	0.24	3 600	1.0
玄武岩	2670	6200	250	18	100	0.25	2 600	1.6
大理岩	2700	5000	160	12	80	0.26	4 000	1.32
辉长岩	2980	6000	240	18	80	0.25	3 500	1.32

表2 爆炸能量分布计算结果

Table 2 Results of distributions of the explosive energy

岩石名称	W_1/E_0	W_2/E_0	W_3/E_0	W_4/E_0	W_5/E_0	其他
花岗岩	27.6	5.9	7.1	5.0	17.7	37.3
玄武岩	31.9	4.8	5.3	3.0	14.4	40.6
大理岩	27.5	6.7	7.0	5.9	20.1	32.8
辉长岩	22.7	6.1	6.8	6.9	18.3	39.2

6 结 语

理论分析可知, 岩石的破裂、破碎及抛掷是爆炸应力波和爆生气体共同作用的结果, 即爆破能量是通过冲击波和爆生气体传递给岩石的, 前者主要消耗在爆腔的初始扩张、引起岩石弹性变形、形成粉碎区和产生裂隙上, 后者则主要用于扩大爆腔、延伸裂隙和抛掷岩石。

通过计算分析, 埋深在临界深度以下的岩石中柱状装药爆破时, 冲击波做功消耗的能量约占爆炸总能量的 40%, 剩余爆生气体能量中用于扩腔和扩展主要裂隙的能量约占总能量的 23%; 剩余大约 37% 的能量中有小部分能量用于新增裂纹数目, 而大部分损失掉了。

目前, 还需进一步分析不同性质的岩石爆破能量分配规律, 以及炮孔埋深在临界深度以上的爆破情况, 以便了解岩石的抛掷能量。同时, 对不同的岩石条件下, 不同的工程爆破要求, 应分析改善爆炸能量分布来提高爆破质量。

参 考 文 献

- [1] 宗琦. 岩石爆破的扩腔作用及能量消耗[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4): 392—396.
ZONG Qi. Function of cavity expansion and energy consumption in rock blasting[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(4): 392—396.
- [2] 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 Lu-jun. Shock energy distribution of column charge in rock[J]. *Blasting*, 1999, 16(2): 1—6.
- [3] 颜事龙. 岩石集中装药爆炸消耗能量分布的计算[J]. 淮南矿业学报, 1993, 13(3): 82—88.
YAN Shi-long. Distribution of the explosive energy consumed by concentrated charge in rock[J]. *Journal of Huainan Mining Institute*, 1993, 13(3): 82—88.
- [4] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [5] 潘井澜. 爆破破岩机理的探讨[J]. 爆破, 1994, (4): 1—6.
PAN Jing-lan. The discussion of rock mechanism by blasting[J]. *Blasting*, 1994, (4): 1—6.
- [6] 杨永琦. 矿山爆破技术与安全[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [7] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [8] 张奇. 工程爆破动力学分析及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [9] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [10] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
- [11] 单仁亮. 岩石冲击破坏力学模型及其随机性研究[D]. 北京: 中国矿业大学北京研究生部, 1997.
- [12] 卢文波, 陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 264—268.
LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. A study of fracture propagation velocity driven by gases of explosion products[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1994, 14(3): 264—268.
- [13] J. 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 江近仁, 陆顺永, 等译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [14] Kutter H K, Fairhurst. On the fracture process in blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1971, 8(2): 181—202.
- [15] 王家来, 徐颖. 应变波对岩体的损伤作用和爆生裂纹传播[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(3): 212—216.
WANG Jia-lai, XU Ying. Damage effect in rock by strain waves and crack propagation by explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(3): 212—216.
- [16] 徐颖, 孟益平, 宗琦, 等. 断层带爆炸裂隙区范围及裂纹扩展长度的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 81—84.
XU Ying, MENG Yi-ping, ZONG Qi, et al. Study on range of cranny and length of fissure expansion in fault zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(1): 81—84.