

# 控制爆破的断裂控制与参数确定

朱瑞康 李新平 陆文兴

(武汉工业大学 武汉 430070)

**摘要** 描述了孔边线状裂纹扩展的断裂控制过程。建立了控制爆破参数与岩石强度、断裂韧度和炸药性质等之间的关系。得出了尽可能加大炮孔间距的合理尺度。

**关键词** 控制爆破 孔壁保护 断裂控制 炮孔参数

## 1 引言

目前,控制爆破(如光面爆破、预裂爆破)在岩土工程的应用越来越广泛。然而,如何在保证控制爆破的工程质量基础上,尽可能加大炮孔间距,合理地确定装药参数,无疑对提高炮孔利用率,节省工程投资,具有一定的理论研究意义和工程实用价值。

## 2 炮孔装药参数的确定

控制爆破的目的是减少对被保护围岩的破坏和保证被保护围岩的工程稳定性,质量标志是炮孔残留率较高和爆破壁面平整(如光面爆破和预裂爆破),因此它的首要条件是在爆炸冲击压力下炮孔孔壁岩石不被压坏。在不耦合装药条件下,作用在炮孔孔壁上的平均爆炸冲击压力为

$$p = \rho_0 D^2 (d_c/d_b)^6 n/8 \quad (1)$$

式中: $n$ 为爆生气体与炮眼壁碰撞时的压力增大系数, $n=8\sim 10$ ;  $D$ 为炸药爆速; $d_b$ 为炮孔直径; $d_c$ 为药卷直径; $\rho_0$ 为炸药密度。

当炸药为不耦合空气间隔装药时, $d_c$ 为体积等效下的装药直径。

爆炸应力波在岩石中传播时,径向压应力 $\sigma_r$ 和环向拉应力 $\sigma_\theta$ 分别为

$$\sigma_r = p(2r/d_b)^\alpha \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = -\sigma_r[v/(1-v)] \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为应力波传播的衰减系数, $\alpha=(2-v)/(1-v)$ ;  $v$ 为岩石泊松比,硬岩为 $v=0.25$ 。

由于孔壁围岩处于拉压动应力状态,因此岩石处于体积应力状态下。在静力条件下,岩石破坏强度的经验公式为<sup>[1]</sup>

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (4)$$

式中: $\sigma_1$ 为岩石破坏时的最大主应力; $\sigma_3$ 为作用在岩石试样上的最小主应力; $\sigma_c$ 为试样中完整岩石的单轴抗压强度; $m$ 、 $s$ 为常数,取决于岩石性质,以及在达到应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 之前岩

石的破坏程度。对于完整岩石,  $\sigma_{cs} = \sigma_c$  和  $s = 1$ , 对于有破损的岩石  $s < 1$ 。

表 1 列出了几种岩石破坏时参数  $\sigma_c, m$ 。

表 1 岩石破坏时的有关确定参数  
Table 1 Parameters for determining rock failure

参 数	岩石种类	花岗岩	石灰岩	大理岩	砂岩	石英闪长岩
$\sigma_c/\text{MPa}$		120	47.1	62.5	69.4	187.3
$m$		29.2	6.5	11.7	14.3	23.8

由(4)式和表 1 知花岗岩在拉压环境下破坏时的静力抗压值  $\sigma_1 = 12.22 \text{ MPa}$ , 抗拉值  $\sigma_3 = -4.03 \text{ MPa}$ 。岩石的动载强度与静力强度是有区别的。在爆炸应力波作用下, 岩石的动态抗压强度随着应变速率增大而提高的幅值较大, 比静力抗压强度提高 10 倍左右, 动态抗拉强度随着应变速率增大而提高的幅值较小, 比静力抗拉强度略有提高<sup>[2,3]</sup>。根据试验结果, 孔壁保护的条件可以写为

$$p \leq 10\sigma_1 \tag{5}$$

由(1)、(5)式及炸药种类, 炸药直径以及岩石性质可以确定炮孔的装药不耦合系数。当炸药为 2# 岩石炸药, 岩石为花岗岩时, 可以确定炮孔的装药不耦合系数至少为 0.3, 即

$$d_c \leq 0.3d_b \tag{6}$$

当药卷直径选择为  $d_c = 32 \text{ cm}$  时, 满足(6)式的最小炮孔直径为  $d_b = 106 \text{ cm}$ 。炮孔的每米装药量为

$$q = \pi d_c^2 \rho_0 \times 10014 \leq 7.065 d_b^2 \rho_0 \tag{7}$$

(7)式中的长度单位为 cm。

### 3 孔边线状裂纹的产生与控制

由于邻近炮孔的作用, 爆炸应力波将在炮孔连线方向的炮孔孔壁产生动应力集中, 并且产生孔边线状裂纹。产生孔边线状裂纹的条件是

$$\sigma_\theta = \sigma_3 \tag{8}$$

由(2)、(3)及(8)式可确定孔边线状裂纹的初始断裂长度为

$$b = \left[ -pv \cdot \frac{1}{\sigma_3(1-v)} \right]^{1/a} d_b / 2 \tag{9}$$

结合(4)、(5)及(9)式可以确定  $b \leq 1.99d_b$ , 其中  $v = 0.25$ 。可以看出, 孔边线状裂纹的初始断裂长度与炮孔直径、岩石性质  $v$  及爆炸冲击压力  $p$  等有关。

在爆炸应力波作用之后, 爆生气体的准静态压力将使孔边线状裂纹进一步扩展而相互贯通, 因此孔边线状裂的扩展过程(或止裂)可以视为在炮孔准静态压力作用下进行的, 其断裂扩展模型如图 1 所示。图中  $b$  为孔边线状裂纹的初始长度,  $a$  为裂纹扩展长度。

在裂纹断裂扩展过程中, 裂纹尖端的应力强度因子可以确定为<sup>[4,5]</sup>

$$K_I = 2p_b r (1 - r^2/a^2) / (\pi a)^{1/2} = p_b F(\lambda) \tag{10}$$

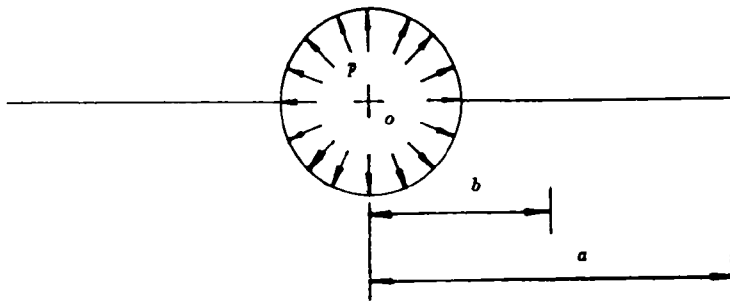


图 1 孔边线状裂纹的断裂扩展模型

Fig. 1 The model for the extension of linear cracks intersecting a borehole

$$p_b = (p_c/p_k)^{k/n} (d_c/d_b)^{2k} p_k \tag{11}$$

$$p_c = \rho_0 D^2 / 8 \tag{12}$$

$$F(\lambda) = 2(r/\pi)^{1/2} (\lambda)^{1/2} (1 - \lambda^{-2}) \tag{13}$$

其中： $r$  为炮孔半径， $r = d_b/2$ ； $p_b$  为炮孔准静态气体压力； $p_k$  为爆生气体膨胀过程临界压力， $p_k = 100 \text{ MPa}$ ； $k$  为凝聚炸药的绝热指数， $k = 1.3$ ； $\lambda$  为  $\lambda^{-1} = r/a$ 。

表 2 列出了炮孔半径  $r = 2.1 \text{ cm}$  时， $F(\lambda)$  随  $\lambda$  变化的计算值。

表 2  $F(\lambda)$  随  $\lambda$  变化计算值  
Table 2 Computed  $F(\lambda)$  values Versus  $\lambda$

$\lambda$	4	5	8	10	12	15	17	19
$F(\lambda)$	0.767	0.702	0.569	0.512	0.469	0.421	0.395	0.374

当炮孔半径为  $r'$  时，其  $F(\lambda')$  与表 2 所列的计算值提高  $(r'/2.1)^{1/2}$  倍。由表 2 知，裂纹断裂扩展时，其应力强度因子是逐渐下降的，因此有可能止裂。裂纹的断裂扩展长度由下式确定

$$p_b F(\lambda) = K_{Ic} \tag{14}$$

$$a = r\lambda \tag{15}$$

式中  $K_{Ic}$  为岩石断裂韧度，表 3 列出了几种岩石的断裂韧度<sup>[6]</sup>。

表 3 岩石断裂韧度值  
Table 3 Values of fracture toughness of some rocks

$K_{Ic}$	岩石种类	花岗岩	砂岩	石灰岩	石英闪长岩	大理岩
$K_{Ic}/(\text{MPa}/\text{cm}^{3/2})$		60.4~65.9	27~46.3	44	46~70	65.7~68

显而易见，控制爆破的炮孔间距可确定为  $2a$ 。

#### 4 理论分析与实际应用对比

对于花岗岩，当取  $K_{Ic} = 62 \text{ MPa}/\text{cm}^{3/2}$  以及炮孔直径为  $42 \text{ mm}$  时，由(7)式知每米炮孔

装药量  $q=125\text{ g/m}$ ,由(6)式及(11)式得到  $p_c=14.74\text{ MPa}$  进一步由(14)、(15)式确定  $a=15r$ ,即炮孔间距为  $2a=630\text{ mm}$ 。当炮孔深度超过  $1\text{ m}$ 时,则将药量分段串在导爆索上起爆,底部药量增加  $1$  倍。这些理论计算结果与一般控制爆破的设计标准是一致的。

另外,对某水电站进行的宽孔距预裂爆破的现场试验也取得了满意的结果<sup>[7]</sup>。试验现场的岩石为花岗岩,单轴抗压强度为  $120\text{ MPa}$ ,选择的宽孔距预裂爆破参数为:炮孔直径  $d_b=100\text{ mm}$ ,炮孔间距  $2a=2\text{ m}$ ,每孔的  $2^\#$  岩石炸药( $d_c=32\text{ mm}$ )的线密度为  $q=453\text{ g/m}$ 。根据本文的理论分析计算,由(7)式知炮孔线装药密度满足孔壁保护条件( $q<706.5\text{ g/m}$ ),而(13)、(14)、(15)式的断裂分析表明炮孔间距为  $2a=1.9\text{ m}$ ,与实际使用的炮孔间距基本一致。

通过炮孔直径为  $42\text{ mm}$  和  $100\text{ mm}$  的理论分析与实际应用结果对比表明,本文提出的控制爆破的断裂控制分析模型与炮孔参数确定公式对工程爆破的工程设计具有一定的指导意义。

## 5 结 语

控制爆破的力学行为可分为两部分。首先爆炸冲击载荷应满足拉压条件下炮孔孔壁保护条件,并由动拉应力集中产生孔边线状裂纹,为准静态气体压力作用下的断裂扩展创造条件,炮孔的装药量由这部分控制。其次准静态气体压力的作用使炮孔断裂扩展而贯通(或止裂),因此炮孔间距应由这一部分控制。理论分析和计算还表明:

1. 岩石抗压强度和断裂韧度是控制爆破炮孔装药量和孔间距的主要指标。如果抗压强度高而断裂韧度低,则装药量和炮孔间距皆可以相对提高,反之则减少。

2. 控制爆破断裂扩展的应力强度因子随裂纹扩展而下降,因此存在止裂的可能,这为尽量加大炮孔间距和合理确定炮孔参数提供了设计依据。同时,加强炮孔堵塞,延长和保持准静态气体压力的作用效果,对提高控制爆破断裂扩展长度是大有益处的。

3. 在花岗岩中,选择  $2^\#$  岩石炸药,如不耦合连续装药时,当药卷直径  $d_c=32\text{ mm}$ ,则炮孔直径至少为  $d_b=106\text{ mm}$ ,则炮孔间距可达  $2a=2.5\text{ m}$ ;当炮孔药卷直径  $d_c=36\text{ mm}$ ,则炮孔直径至少为  $d_b=120\text{ mm}$ ,炮孔间距可高达  $2a=3.0\text{ m}$ 。这也表明应加工特殊药卷以适应宽孔距控制爆破的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Hoek E, Brown E T 著;连志升,等译. 岩石地下工程. 北京:冶金工业出版社,1986,107~125
- 2 哈努卡耶夫 AH 著;刘殿中译. 矿岩爆破物理过程. 北京:冶金工业出版社,1980
- 3 朱瑞康,李 铮. 爆炸与冲击,1982,2(1):60~67
- 4 Zhang X S. Engineering Fracture Mechanics, 1987,27(1):111~119
- 5 李新平,朱瑞康. 岩土力学,1988,9(1):29~36
- 6 袁晓刚. 爆破,1986,(2):27~31
- 7 朱瑞康,等. 广东省花山水电站宽孔距预裂爆破试验报告,武汉:武汉工业大学岩土与环境工程研究所,1992

## THE FRACTURE CONTROL AND DETERMINATION OF THE PARAMETERS IN CONTROL BLASTING

Zhu Ruigeng, Li Xinping, Lu Wenxing

(*Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070*)

**ABSTRACT** In this paper, the propagation of linear cracks intersecting a borehole is described in fracture control process. The relation in control blasting among parameters, rock strength, rock fracture toughness, behaviour of explosive, etc. is developed. As a result, the method is obtained to increase the distance between boreholes to the greatest extent.

**KEY WORDS** control blasting, borehole wall protection, fracture control, borehole parameters