

文章编号:1000-582X(2003)04-0118-04

螺旋切槽孔松动爆破参数*

郑周练, 陈山林, 叶晓明, 言志信

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:在螺旋切槽孔松动爆破机理研究的基础上, 为避免爆炸冲击波对孔壁的破碎, 采用不耦合装药方式, 同时对其爆破参数加以分析研究, 获得理论计算式, 并得到爆破裂纹的宽度、裂纹扩展长度、爆破块度等的表达式。分析了爆破效果与螺旋升角、切槽角的关系, 在岩石破碎中, 为获得合理块度的爆破方案提供依据。

关键词:螺旋切槽; 松动爆破; 爆破参数

中图分类号:TD235.1; TD235.4

文献标识码:A

在控制爆破中, 将传统的轴向切槽方式进行改变, 即把沿轴向平行的直槽改成绕轴线旋转螺旋切槽。切槽方向在轴向和径向之间变化, 这种切槽方式可以在轴向调整切槽的密度, 控制爆破块径。由于切槽是螺旋形的, 爆破对象的切割也是螺旋形的, 因此称为螺旋切槽孔爆破^[1-2]。用该方法爆破时, 相对普通松动爆破产生的粉碎区很小, 爆破范围大, 节省能耗, 成本低, 工期短, 爆破振动较小, 可减少爆破粉尘、噪声、振动对环境的影响, 具有较大的应用推广价值。

1 螺旋切槽孔松动爆破的装药结构

螺旋切槽孔爆破中, 为避免爆炸冲击波对孔壁的破碎, 通常采用不耦合装药。因为爆炸产生的作用首先通过炮眼和药卷间的空气缓冲之后再作用于孔壁上, 因而使波峰较高的压力变缓, 故能减少对孔壁的破碎作用; 又由于空气有一被压缩和膨胀的过程, 所以能增加爆生气体的作用时间。有关研究指出^[3], 当增大不耦合比及选用低能炸药时, 孔壁所受到的冲击压力会急剧衰减。当衰减到一定值时, 孔壁所受的冲击压力不足以使岩石开裂扩展。因此, 为充分利用爆生气体的膨胀作用, 减少冲击波对孔壁的破碎, 可采用不耦

合装药, 选择合理的不耦合系数。

2 螺旋切槽孔松动爆破参数

螺旋切槽孔松动爆破主要参数有: 装药不耦合系数、装药药卷直径、装药长度、装药量、切槽螺旋角、切槽角、周边炮眼间距等。

2.1 不耦合系数 K_c

根据炸药爆轰理论和凝聚炸药的状态方程, 不耦

$$\text{合系数计算式}^{[4]}: K_c = \left(\frac{P_H}{P_l}\right)^{\frac{1}{2\gamma}} \left(\frac{K_b P_l}{n S_c}\right)^{\frac{1}{2\kappa}} \quad (1)$$

式中: P_H 为爆生气体的初始平均压力, 2号岩石炸药为 1 653 MPa; P_l 为临界压力, 取 $P_l = 100$ MPa; κ 为绝热指数, 取 1.4; γ 为等熵指数, 取 3; K_b 为体积应力下岩石强度增大系数, 取 10。

2.2 装药药卷直径 d_c

$$d_c = \frac{d_e}{K_c} \quad (2)$$

式中: d_c 为药卷直径, mm; d_e 为炮孔等效直径, mm。

2.3 炮孔有效体积 V_e

炮孔切双螺旋槽后, 其体积为:

* 收稿日期: 2003-01-15

基金项目: 重庆市科委资助项目(99-5489); 重庆大学青年教师科研资助项目

作者简介: 郑周练(1971-), 男, 四川蓬安人, 重庆大学博士研究生, 主要从事结构工程研究。

$$V_b = \left\{ \frac{\pi}{4} d_b^2 (L_b - L_s) + 2 \left[2a^2 \tan \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \left(2d_b^2 \arcsin \frac{a \tan \frac{\alpha}{2}}{d_b} - 2a \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{d_b^2 - a^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \right] \frac{(L_b - L_s)}{\sin \beta} \right\} \quad (3)$$

式中： V_b 为炮孔有效体积， mm^3 ； L_b 为炮孔深度， mm ； L_s 为炮孔堵塞长度， mm ； a 为切槽深度， mm ； α 为切槽夹角弧度； β 为螺旋升角弧度。

2.4 对称双螺旋切槽炮孔的等效直径 d_e

$$d_e = \sqrt{\frac{4V_b}{\pi(L_b - L_s)}} \quad (4)$$

2.5 装药密度(假设堵塞长度 L_s)

在爆生气体压力 P_0 作用下，裂纹失稳扩展的临界条件为^[5]：

$$P_0 \geq \frac{K_k}{F\lambda \sqrt{\pi a}} \quad (5)$$

式中： K_k 为岩石的断裂韧度；

$$\lambda = \left[\sec^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin \beta \tan \frac{\alpha}{2} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \left[\sin \left(\frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \right) \right]$$

F 为应力强度因子修正系数； a 为切槽深度， mm 。即

$$P_k \left(\frac{P_h}{P_k} \right)^{\frac{\gamma}{k}} \left\{ \frac{\Delta_{\text{线,临}}}{\left[\pi R^2 + 2 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) \cdot a^2 \cdot \frac{1}{\cos \beta} \right] \rho_0} \right\}^{\gamma} \geq \frac{K_k}{F \sqrt{\pi a}} \quad (6)$$

式中： P_k 为气体的临界压力，通常认为中等威力炸药一般 $P_k \geq 200 \text{ MPa}$ ，对于 TNT， $P_k = 280 \text{ MPa}$ ； γ 为绝热指数，取 1.4； R 为炮孔半径， mm ； ρ_0 为炸药密度； $\Delta_{\text{线,临}}$ 为临界线装药密度。

临界线装药密度：

$$\Delta_{\text{线,临}} \geq \left[\frac{K_k}{F \sqrt{\pi a} P_k \left(\frac{P_h}{P_k} \right)^{\frac{\gamma}{k}}} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \left[\pi R^2 + 2 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) \cdot a^2 \cdot \frac{1}{\cos \beta} \right] \rho_0 \quad (7)$$

2.6 作用在炮眼壁的冲击压力 P_c

在空气间隔装药条件下，

$$P_c = n \frac{\rho_0 D^2}{2(k+1)}$$

$$\left\{ \frac{\frac{\pi}{4} d_c^2 L_c}{\left[\frac{\pi}{4} d_b^2 (L_b - L_s) + 2l^2 \tan \frac{\alpha}{2} (L_b - L_s) \frac{1}{\sin \beta} \right]} \right\}^3 \quad (8)$$

式中： $L_c + L_a = L_b$ ，其中 L_b 为炮眼长度， mm ； L_c 为装药长度， mm ； L_a 为间隔空隙长度， mm 。

2.7 每米装药长度 L_{c1}

当 $P_c \leq K_b S_c$ 时，炮眼的装药长度 L_{c1} ：

$$L_{c1} = \frac{8gK_b S_c}{n\rho_0 D_c^2} \left(\frac{d_c}{d_e} \right)^6 \quad (9)$$

2.8 炮眼装药量 q_m (装药集中度)

每米炮眼装药量按式(10)计算

$$q_m = \frac{\pi d_c^2}{4} L_{c1} \rho_0 \quad (10)$$

2.9 裂缝宽度 b

$$b = \frac{\pi d_b^2 \sin \beta + 8a^2 \tan \frac{\alpha}{2}}{3.04 C_p A} C_0 \quad (11)$$

式中： C_0 为爆生气体音速， $C_0 = \frac{k}{k+1} D = 2400 \text{ m/s}$ ；

C_p 为岩石弹性纵波波速，取 $C_p = 1568 \text{ m/s}$ ； $A = 0.27 L_b$ 。

2.10 开裂长度 a_c

对于螺旋切槽孔松动爆破，开裂长度关系到参数的选择和爆破方法的成败。通过螺旋切槽孔爆破的成缝机理研究，其开裂长度：

$$\frac{K_k}{\lambda \sqrt{\pi(a+a_s)}} = P_0 \left(\frac{\frac{\pi}{4} d_b^2 + 2a^2 \tan \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\sin \beta}}{\frac{\pi}{4} d_b^2 + 2(a+a_s) b \frac{1}{\sin \beta}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (12)$$

解关于 a_c 的函数，即可得到开裂长度。

2.11 周边炮眼间距 Y

周边炮眼间距的计算，多数计算理论基础是爆炸应力波和爆轰气体综合作用理论。按综合作用理论计算周边眼间距的依据是：因采用了不耦合装药结构，这就使在爆轰结束瞬间，作用在炮眼壁上的冲击压力很小，就导致了因爆炸应力波作用产生的初始裂缝数量

和范围都不会太大。

按相邻炮眼形成贯穿裂缝的条件(假设爆轰气体压力只作用于炮眼上,并忽略炮泥长度不计),沿切槽方向形成贯通裂缝必须满足条件

$$P_0 d_e = [Y - 2(a_s + a)] S_T \quad (13)$$

$$\text{即} \quad Y = \frac{P_0 d_e}{S_T} + 2(a_s + a) \quad (14)$$

式中, P_0 为爆生气体充满炮眼时的静态膨胀压力,

$$P_0 = P_k \left(\frac{V_c}{V_b} \right)^\gamma \left(\frac{P_c}{P_k} \right)^\kappa \quad (15)$$

2.12 抵抗线 W

螺旋切槽孔松动爆破时,要求选择合理的抵抗线,避免爆破漏斗的产生。因此,要求药包至各边界距离必须大于形成爆破漏斗的临界距离,利用爆炸冲击波在自由面方向产生的径向和环向拉伸应力大于岩石的抗拉强度,使岩石破碎。而且,应保证爆轰应力波在达到最小抵抗线 W 的自由面的时间和炮眼之间应力波叠加的时间相等。

工程中通常定义炮孔间距 Y 与抵抗线 W 的比值为炮孔的密集系数 m , 为避免产生大量的大石块和二次爆破, 一般情况 $m = 1.0 \sim 1.25$, 即 $Y = (1.0 \sim 1.25)W$ 。

2.13 石方松动体积量 V

$$V = \frac{\pi(d_b + 2a + 2a_s)^2 L_b}{4} \quad (16)$$

3 爆破块度

3.1 爆破块度与总成本关系

爆破工程的合理破碎度,直接与穿爆、铲装、运输及选矿工效和成本有直接关系,因破碎度的确定,要综合考虑才能达到系统优化,所以总成本最低,相应的破碎度为矿岩开采的合理破碎度。生产 1 m^3 的总成本包括^[4]:

$$C_{\min} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 \quad \text{元}/\text{m}^3 \quad (17)$$

式中: C_1 、 C_2 分别为第1次、第2次凿岩成本; C_3 、 C_4 分别为第1次、2次爆破成本; C_5 为矿岩装载成本; C_6 为岩石运输成本; C_7 为矿岩一次粗碎成本。

根据装运和破碎设备的合理能力,按二次爆破和有益矿岩加工到第2次破碎阶段费用最省来确定,即: $\Delta C_3 + \Delta C_4 + \Delta C_5 + \Delta C_6 \leq (\geq) \Delta C_7$ (18) $\Delta C_3 + \Delta C_4$ 为改变矿岩的控制尺寸不规格大块2次破碎费用的变化值; $\Delta C_5 + \Delta C_6$: 与改变矿岩控制尺寸和采用大型挖掘类似的装运费用变化值; ΔC_7 : 由于安装了大型破碎机第一阶段机械破碎费用变化值。

如果式(18)左端小于右端,则加大矿岩块径是合理的;反之,则减小矿岩块径的控制尺寸。

3.2 螺旋切槽爆破后的块度估算

不考虑岩石存在的天然裂隙,螺旋切槽孔松动爆破最大块体积估算可按根据下式:

$$V_{\max} = [\pi^2(d_b + 2a + 2a_s)^3 \tan \beta / 16] \quad (19)$$

从式(19)中可知道,最大块体积由炮孔直径、切槽深度、螺旋升角、爆破裂纹扩展长度决定。一旦炮孔直径确定,爆破裂纹扩展长度受螺旋升角影响,所以,最大块体积主要由切槽螺旋升角控制。根据挖掘机的铲斗容量,可改变螺旋角,从而改变其最大块体积。

4 爆破效果与切槽夹角和螺旋升角的关系

爆破效果主要指裂纹扩展长度、爆破土石方松动体积、最大块体积以及装药量。为计算分析方便,以下例进行说明。

某土石方工程岩石坚固系数 $f = 12$, 岩石抗压强度 $S_c = 24.9 \text{ MPa}$, 岩石动态抗拉强度 $S_t = 1.62 \text{ MPa}$, 岩石泊松比 $\mu = 0.25$, 炮眼直径 $d_b = 40 \text{ mm}$, 炮孔深度 $L_b = 1 \text{ m}$, 采用2号岩石炸药 $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$, 爆生气体余容 $\zeta = 0.66$, 2号岩石炸药比容 $v = 924 \text{ L/kg}$, 爆温 $T = 2787 \text{ K}$, 炸药爆速 $D = 3200 \text{ m/s}$, 爆轰气体与炮孔壁碰撞时的反射压力为入射压力的 $n = 10$ 倍, 体积应力下岩石抗压强度增大系数 $K_b = 10$, 设爆生气体的初始平均压力(按2号岩石炸药) $P_h = 1653 \text{ MPa}$ 。

根据式(1) - 式(19), 用 MATLAB 绘制出螺旋切槽孔松动爆破效果与切槽角和螺旋角的关系, 如图1。

从图1中可知: 1) 当切槽角一定时, 随着螺旋角的增加, 裂缝的扩展长度增大, 松动爆破的体积量增大, 松动 1 m^3 岩石消耗的炸药量增大, 最大体积也增大, 说明改变螺旋切槽的升角, 可以调整爆破后块度的大

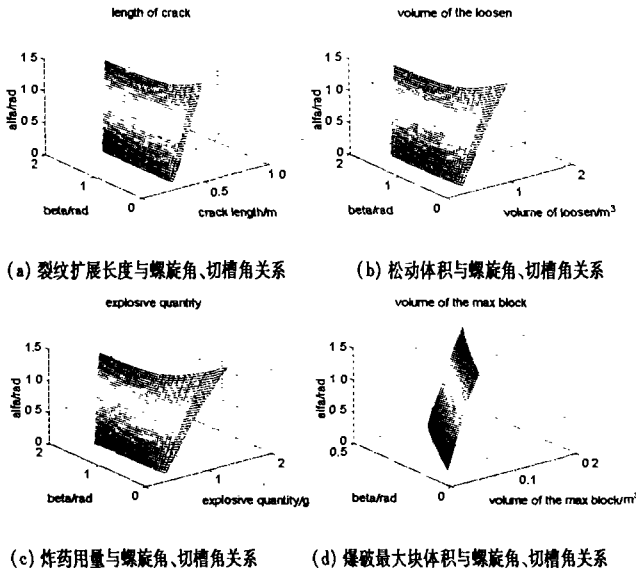


图 1 切槽角、螺旋角与爆破参数关系

小,从而为土石方松动爆破、矿岩开采选取合理的螺旋切槽爆破参数,达到最低成本提供依据;2) 当螺旋切槽升角一定时,随着切槽张角增大,则裂缝的扩展长度减小,松动爆破的体积量减小,最大块体积减小,松动 1 m^3 岩石消耗的炸药量增大,说明增加的炸药在爆炸过程中所多余的能量主要消耗在增大裂缝宽度和降低其块度尺寸。

Parameters of Spiral V – notch Loosen Blasting

ZHENG Zhou-lian, CHEN Shan-lin, YE Xiao-ming, YAN Zhi-xin
(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on the mechanism of spiral V-notch loosen blasting, uncoupled explosive loading is adopted to prevent the explosion waves from breaking the wall of the blasting hole. Relative parameters of spiral V-notch are analyzed and their calculating formulae are achieved. The expressions of the width of the blasted crack, the length of the developed crack and of the sizes of the blasted lumps are obtained. The relationship between the blasted effect, the spiral angle, and the notching angle is studied, which provides a theoretical base for developing a blasting strategy with desirable lump sizes.

Key words: spiral V-notch; loosen blasting; the parameter of spiral V-notch

5 结 语

从上述分析可知,螺旋切槽孔松动爆破以螺旋形切槽形成孔壁的初始开裂点,在不耦合装药条件下,选择合理的抵抗线,调整螺旋升角,从而控制岩石的爆破块度,降低成本,达到开采要求。

参考文献:

- [1] 郑周练,陈山林,叶晓明. 切槽爆破研究的历史及现状[J]. 重庆建筑大学学报,2001,23(6):103 - 108.
- [2] 叶晓明,李成芳. 三维切槽孔爆破方法[J]. 地下空间,1999,19(3):212 - 218.
- [3] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 中国科学出版社,1981.
- [4] 张志呈. 光面爆破参数选择[J]. 西南工学院学报,2000,15(4):58 - 64.
- [5] 丁德馨,刘永. 预裂爆破力学模型探讨[J]. 衡阳工学院学报,1994,8(2):1 - 5.
- [6] 张志呈. 爆破基础理论与设计施工技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社,1993.

(责任编辑 陈移峰)