

# 深孔爆破一次成井炮孔合理堵塞长度

李启月, 刘冰川, 陈亮, 李金跃

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 炮孔堵塞长度是深孔爆破一次成井设计的重要参数之一。为合理确定堵塞长度, 提高深孔爆破一次成井爆破质量, 基于岩石破碎理论, 分析了深孔爆破一次成井存在的上端、中间和下端 3 种情况下堵塞物的作用机理。基于堵塞物的材料特性和弹塑性力学理论, 建立了爆炸载荷作用下堵塞物变形量的计算模型。从动能定理着手, 分析了堵塞物变形过程和运动过程中的能量传递, 同时结合堵塞物的抛出时间与岩石介质破碎时间、爆破漏斗初始形成时间以及相邻分层堵塞范围内岩石破碎时间的关系, 建立了深孔爆破一次成井堵塞理论。在三道庄矿区 32m 充填天井试验中, 应用堵塞理论, 同时结合施工条件选取实际堵塞长度, 形成爆破方案, 取得了深孔爆破一次成井试验的成功, 从而验证了堵塞理论的正确性, 为深孔爆破一次成井技术提供了一定的指导意义。

**关键词** 炮孔堵塞; 一次成井; 变形量; 堵塞理论

**中图分类号** TD235

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.19.001

## Blast-hole Reasonable Stemming Length for Raise Excavation Using One-step Deep-hole Blasting

LI Qiyue, LIU Bingchuan, CHEN Liang, LI Jinyue

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Stemming length is one of the most important parameters during the raise excavation by one-step deep-hole blasting. For properly determining the blast-hole stemming length and improving the blasting effect of one-step deep-hole blasting, a study is carried out. Rock fragmentations are checked up to analyze how stemming length has an effect on raise excavation by one-step deep-hole blasting. Based on the material characteristics of hole stemming and the theory of elastic-plastic mechanics, the deformation calculation model of stemming under the explosion load has been set up. Based on the energy transfer in the process of deformation and movement, and the relation among the time when the stemming moves out of the hole, the time that rock crushes, the time that blasting crater forms, and the time that adjacent stratified rock starts to break, the stemming theory of one-step deep-hole blasting has been deduced from the theorem of kinetic energy. In the experiment with a 32 meters filling up raise located at Sandaozhuang mining area, the stemming theory is applied to; combining with the actual engineering geological conditions, the actual stemming length is selected, an explosive solution is formed, and the raise excavation by one-step deep-hole blasting wins a success. And the stemming theory has been verified and it provides the guidance for raise excavation by one-step deep-hole blasting.

**Keywords** blast-hole stemming; one-step raise excavation; deformation variable; stemming theory

### 0 引言

深孔爆破一次成井技术是指按天井断面尺寸, 沿天井全高钻凿一组平行深孔, 然后沿天井全断面, 采用微差一次爆破成井<sup>[1]</sup>。该技术的主要特点是将炮孔分成若干分层装药, 分层和炮孔两端之间充填合适的炮泥长度, 各分层采用微差一次爆破成井。深孔爆破一次成井的主要模式是分层爆破, 这使得炮孔堵塞相对复杂, 且更为重要。如果任一分层堵塞出现问题, 都直接影响整个深孔爆破一次成井的爆破质量。

可见, 深孔爆破一次成井的关键之一就是必须选择合理的炮孔堵塞长度。一些研究者<sup>[2-6]</sup>给出了堵塞长度的计算公式, 但是纵观所有的研究理论, 很少考虑到爆破过程中堵塞物的压缩性这一因素。虽然堵塞物的压缩变形量相对较小, 但是爆炸冲击载荷下堵塞物的压缩代表着大量能量的传递。由 Isakov<sup>[7]</sup>等的观测结果知道, 炮孔堵塞物被爆炸冲击波压缩变形后才向孔口移动, 这就表明堵塞物在炮孔中存在压缩和运动两个过程。根据力学原理和爆炸力学理论可以知道, 堵

收稿日期: 2013-02-25; 修回日期: 2013-03-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732004); 国家自然科学基金项目(50934006, 10872218)

作者简介: 李启月, 副教授, 研究方向为采矿方法与工程爆破, 电子信箱: qyli@csu.edu.cn

塞物的压缩变形和运动本身就是一种能量的传递过程,因此要找到更为合理的堵塞长度计算理论,就必须首先从堵塞物的压缩变形过程着手,而不是忽略这一关键过程。

一般认为,堵塞物是松散体,而爆炸载荷作用下松散体的压缩变形过程极为短暂而复杂,因此关于堵塞物在爆炸载荷作用下压缩变形量的研究理论尚不多见。本文根据堵塞物的作用机理、弹塑性力学理论以及堵塞物本身的特性,对堵塞物的压缩过程予以简化,提出了爆炸载荷下堵塞物压缩变形量的计算理论。基于该理论分析了炮孔堵塞物压缩和运动过程中的能量传递,同时结合深孔爆破一次成井存在的上端、中间和下端3种堵塞情况,基于炮孔堵塞物的抛出时间与岩石介质破碎时间、爆破漏斗初始形成时间以及相邻分层堵塞范围内岩石破碎时间的关系,提出了深孔爆破一次成井堵塞理论。通过32m深孔爆破一次成井试验验证了该堵塞理论的正确性。

## 1 深孔爆破一次成井炮孔堵塞作用机理

目前普遍认为岩石破碎是由爆炸冲击波和爆生气体两者共同作用完成。炮孔堵塞可以增加爆轰压力作用于岩石介质的时间,延长爆生气体的高温高压过程,提高爆炸能量的利用率。炸药起爆后,在爆炸冲击波(包括应力波)的作用下,炮孔孔壁产生初始裂纹,形成微裂隙区,爆生气体迅速充满炮孔和裂隙区,形成准静态应力场,在气楔作用下使得裂隙区进一步扩展,使得整个岩石破碎。要达到理想的爆破效果,不仅要求爆炸产生足够的能量,而且还要求爆生气体充分作用于岩石介质。炮孔堵塞物的惯性阻力及其与孔壁的摩擦阻力,不仅延长了爆生气体对孔壁周围岩体的作用时间,使得更多的能量转移到岩石中并使其破碎,而且可以有效防止有毒气体的产生<sup>[2]</sup>。

深孔爆破一次成井采用分层爆破模式,因此存在上端、中间和下端堵塞3种情况,需要分别计算堵塞长度。对于上、下端堵塞而言,如果长度过短,堵塞物就会过早冲出炮孔,这样不仅会减少爆生气体的作用时间,而且还造成爆炸能量的浪费;堵塞长度过长,单孔装药量减少,爆破能量降低,岩石得不到充分破碎,且容易造成破碎岩石挤死现象,不能形成槽腔。对于中间堵塞情况,如果堵塞过短,爆破使得堵塞范围内的岩石破碎,不仅会造成中间分层呈无堵塞状态,而且容易挤死中间分层的装药,造成哑炮;堵塞过长,同样会影响中间分层的爆破效果。

## 2 炮孔堵塞物变形量的计算

虽然堵塞物为松散体,从微观角度来说,松散体并不是连续分布的材料,但对于堵塞物而言,研究的是其整体的变形和运动,而不是单个颗粒的运动,同时堵塞物的颗粒度与整个炮孔相比是很小的,因此可以把堵塞物视为由无数连续分布的、各向同性的颗粒所组成的连续介质。由于堵塞物从被压缩到冲出炮孔所用时间相对短暂,堵塞物冲出炮孔前孔

内压力又远远大于堵塞物的惯性阻力及其与孔壁的摩擦阻力,因而堵塞物的被压缩过程更为短暂,故认为堵塞物呈未充分压缩变形成状态即开始运动过程。考虑到堵塞物压缩过程的复杂性、短暂性及其压缩变形量的相对较小性,故对堵塞物的压缩过程予以简化,假设堵塞物只存在弹性压缩变形过程。由于爆炸冲击波压力又相对大于爆生气体的准静态压力,故认为堵塞物在爆炸冲击波作用后其变形就已经完成。

考虑深孔爆破一次成井存在的3种堵塞情况,对一次成井模型加以简化,建立如图1所示炮孔堵塞模型。图中, $l_s$ 为堵塞的长度, $h$ 为堵塞的位移分量, $p$ 为堵塞物受到的压力。图1所示的炮孔存在上端、中间和下端3个分层,对应于深孔爆破一次成井的3种堵塞情况。以上端分层炸药上端面和下端分层炸药下端面分别作为 $xy$ 面,以铅直向上和向下分别作为 $z$ 轴,建立上、下两个坐标系,分别研究两种堵塞情况。

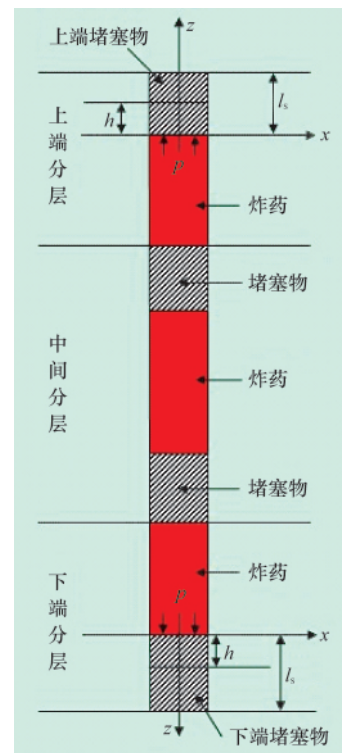


图1 深孔爆破一次成井堵塞模型

Fig. 1 Stemming model of raise excavation by one-step deep-hole blasting

设 $xy$ 界面上堵塞物受到的压力为 $p$ ,堵塞物的体力分量分别为 $f_x=0, f_y=0, f_z=\pm mg$ ( $z$ 轴向下取+,向上取-, $m$ 为堵塞物质量。假设

$$u=0 \quad v=0 \quad h=h(z) \quad (1)$$

式中, $u, v, h$ 为位移分量,正负符号选取对应于 $f_z$ 中的符号“ $\pm$ ”。可得

$$\theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{dh}{dz} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{d^2h}{dz^2} \quad (3)$$

式中,  $\theta$  为体应变,  $\omega$  为位移分量。

由平衡微分方程可得

$$\frac{E}{2(1+\mu)} \left( \frac{1}{1-2\mu} \frac{d^2h}{dz^2} + \frac{d^2h}{dz^2} \right) \pm mg = 0 \quad (4)$$

式中,  $m=14\pi d_b^2 l_s \rho_s$ , 其中  $d_b$  为炮孔直径,  $m$ ;  $l_s$  为堵塞长度,  $m$ ;  $\rho_s$  为堵塞物密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $E$  为弹性模量;  $\mu$  为动态泊松比。

简化积分后得

$$\theta = \frac{dh}{dz} = \mp \frac{(1+\mu)(1-2\mu)mg}{E} (z+A) \quad (5)$$

$$h = \mp \frac{(1+\mu)(1-2\mu)mg}{2E(1-\mu)} (z+A)^2 + B \quad (6)$$

式中  $A$  和  $B$  为待定常数。

由边界条件, 求得

$$A = \pm \frac{q}{mg} \quad B = \pm \frac{(1+\mu)(1-2\mu)mg}{2E(1-\mu)} \left( l_s - \frac{p}{mg} \right)^2 \quad (7)$$

带入式(6)得

$$h = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)mg}{E(1-\mu)} \cdot \left[ p(l_s - z) \mp \frac{mg}{2} (z^2 - l_s^2) \right] \quad (8)$$

可以看出, 堵塞物的最大压缩量为

$$h_{\max} = h_{z=0} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)mg}{E(1-\mu)} \cdot \left[ pl_s \pm \frac{mg}{2} l_s^2 \right] \quad (9)$$

由于  $pl_s \gg \frac{1}{2} mg l_s^2$ , 故上式可简化为

$$h_{\max} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)mg}{E(1-\mu)} \cdot pl_s \quad (10)$$

由于压缩时间相对较短, 故认为堵塞物被压缩的过程中受到的压力保持不变, 即

$$p = p_a \cdot \frac{1}{4} \pi d_b^2 \quad (11)$$

式中,  $p_a$  为爆炸冲击波的初始冲击载荷, 由文献[8]和[9]可得

$$p_a = \frac{\rho_0 D^2}{2(1+\gamma)} T \quad (12)$$

式中,  $\rho_0$  为炸药密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $D$  为炸药爆速,  $\text{m/s}$ ;  $T$  为透射系数;  $\gamma$  为绝热(等熵)指数, 取 3。

### 3 炮孔合理堵塞长度确定

堵塞物在炮孔中的运动分为两步: 首先是爆炸冲击波的压缩过程, 然后是堵塞物冲出炮孔。为了确定合理的堵塞长度, 就必须分析堵塞物压缩和运动过程中的能量传递, 找到堵塞物冲出炮孔所需时间关系式, 并将其与岩石介质的破碎时间相结合, 从而得到合理堵塞长度的计算公式。对于深孔爆破一次成井而言, 合理的堵塞长度应该保证岩石充分破碎且顺利抛出, 并不破坏中间分层堵塞范围内的岩石。

#### 3.1 炮孔上、下端堵塞长度

##### (1) 堵塞物压缩过程的能量传递

堵塞物的压缩过程就是爆炸冲击波对其做功的过程, 从堵塞物压缩开始到结束的过程中由动能定律得

$$\int_0^h \frac{\pi}{4} d_b^2 p_a dz - \int_0^h F_z dz = \frac{1}{2} mv_0^2 \quad (13)$$

式中,  $F_z$  为堵塞物受到的摩擦阻力,  $F_z = \pi d_b (l_s - z) \lambda f p_a$ ;  $\lambda$  为侧压力系数,  $\lambda = \mu / (1 - \mu)$ ;  $f$  为摩擦系数;  $v_0$  为堵塞物做整体运动时的初始速度, 即堵塞物压缩完成后的速度。有

$$v_0 = \sqrt{\frac{\pi h d_b^2 p_a - 4mgh - \pi d_b (4lh - 2h^2) \lambda f p_a}{2m}} \quad (14)$$

由于  $mg \ll \pi d_b^2 p_a$ , 可以忽略, 于是有

$$v_0 = \sqrt{\frac{hd_b^2 - d_b(4lh - 2h^2) \lambda f}{2m} \pi p_a} \quad (15)$$

##### (2) 堵塞物运动过程的能量传递

假定爆生气体在堵塞物压缩完成时已经充满整个炮孔, 并以准静态压力作用于孔壁, 此时可以认为爆生气体为理想气体<sup>[10]</sup>。假设堵塞物压缩完成后便立即向孔口方向运动, 随着堵塞物的运动, 炮孔内压力的衰减规律为

$$p_z = \left[ V_0 / \left( V_0 + \frac{1}{4} \pi d_b^2 z \right) \right]^\gamma p_a \quad (16)$$

式中,  $V_0$  为起爆前除去堵塞段的炮孔体积,  $V_0 = \frac{1}{4} \pi \phi^2 (l_b - l_s)$ ;  $l_b$  为炮孔长度,  $m$ ;  $\phi$  为形成粉碎圈直径, 由文献[9]可得

$$\phi = \left( \frac{p_a C}{\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{1/\alpha} d_b \quad (17)$$

式中,  $C = \sqrt{(1+\lambda)^2 + (1+\lambda^2) - 2\mu(1-\mu)(1-\lambda)^2}$ ;  $\sigma_{cd}$  为岩石动态抗拉强度,  $\text{Pa}$ ;  $\alpha$  为冲击波衰减指数,  $\alpha = (2+\mu)/(1-\mu)$ 。

故有

$$p_z = \left[ 1 / \left( 1 + \frac{d_b^2 z}{\phi_2 (l_b - l_s)} \right) \right]^\gamma p_a \quad (18)$$

由于  $\frac{d_b^2 z}{\phi_2 (l_b - l_s)}$  趋近于 0, 可以略去, 即  $p_z = p_a$ 。

堵塞物运动过程中, 根据受力分析, 由牛顿第二定律得

$$\frac{1}{4} \pi d_b^2 p_a - F_z - mg = m \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (19)$$

两边对  $t$  求一阶积分得

$$v(t) = \frac{\frac{1}{4} \pi d_b^2 p_a - F_z - mg}{m} t + v_0 \quad (20)$$

当  $z = l_s$  时, 有

$$v(t)_{z=l_s} = \frac{\frac{1}{4} \pi d_b^2 p_a - F_z}{m} t + v_0 = \frac{\pi d_b^2 p_a}{4m} t + v_0 \quad (21)$$

堵塞物从压缩到到达炮孔口的过程中, 由动能定律可得

$$\int_0^{l_s} \frac{1}{4} \pi d_b^2 p_a dz - \int_0^{l_s} \pi d_b (l_s - z) \lambda f p_a dz = \frac{1}{2} mv^2(t)_{z=l_s} \quad (22)$$

故可求出堵塞物从爆炸开始到抛出炮孔的时间  $t$ , 则

$$t = \frac{\sqrt{8\pi m l_s d_b^2 p_a - 16m l_s^2 \pi d_b \lambda f p_a - 4mv_0^2}}{\pi d_b^2 p_a} \quad (23)$$

##### (3) 堵塞长度最大值和最小值的确定

为了充分发挥堵塞的封堵作用, 应该保证堵塞物冲出炮孔之前, 岩石破碎完成, 同时保证爆破漏斗周边裂隙形成前, 堵塞物冲出炮孔。由爆炸力学和应力波理论可知, 岩石破碎所需时间  $T_1$  为

$$T_1 = \frac{2w_1}{c_p} + \frac{w_1}{c_r} \quad (24)$$

式中,  $w_1$  为最小抵抗线, m;  $c_p$  和  $c_r$  分别为岩石中纵波速度和表面锐利波速度, m/s。

爆破漏斗初始形成所需时间  $T_2$  为<sup>[11]</sup>

$$T_2 = \frac{2W}{c_p} + \frac{W}{c_1 \cos(\beta/2)} \quad (25)$$

式中,  $W$  为爆破漏斗深度 (m);  $\beta$  为破碎角 ( $^\circ$ );  $c_1$  为裂隙扩展平均速度 (m/s),  $c_1 \approx 0.1c_p$ 。

需要满足  $T_1 \leq t \leq T_2$ , 得

$$\frac{2w_1}{c_p} + \frac{w_1}{c_r} \leq \sqrt{m} \frac{\sqrt{l_s d_b^2 - 2l_s^2 d_b \lambda f} - \sqrt{h d_b^2 - d_b (4lh - 2h^2) \lambda f}}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi p_a}{2}} d_b^2} \leq \frac{2W}{c_p} + \frac{W}{c_1 \cos(\beta/2)} \quad (26)$$

由此可以求出炮孔上、下端堵塞长度  $l_s$  的最大值和最小值。

### 3.2 炮孔中间分层堵塞长度

对于中间分层炮孔堵塞而言, 应该保证前面分层爆破之后, 中间分层仍有足够长的堵塞物, 以保证中间分层的爆破效果。对于中间分层而言, 堵塞范围内岩石初始破碎所需时间  $T_3$  为<sup>[12]</sup>

$$T_3 = \frac{2W}{c_p} \quad (27)$$

为了充分发挥堵塞物的作用, 需满足  $T_3 \leq t \leq T_2$ , 得

$$\frac{2W}{c_p} \leq \sqrt{m} \frac{\sqrt{l_s d_b^2 - 2l_s^2 d_b \lambda f} - \sqrt{h d_b^2 - d_b (4lh - 2h^2) \lambda f}}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi p_a}{2}} d_b^2} \leq \frac{2W}{c_p} + \frac{W}{c_1 \cos(\beta/2)} \quad (28)$$

由此可以求出中间分层炮孔堵塞长度的最大值和最小值。

## 4 工程实例

### 4.1 工程地质条件

三道庄露天矿为处理采空区, 要求形成 32m 的空区充填天井, 天井断面尺寸为  $\phi 6m$ 。矿区成井地点岩石为矽卡岩,  $f$  取 14~16, 岩石松散系数为 1.5。炸药选用 2# 岩石乳化炸药, 药卷直径为 90mm, 长度为 300mm, 每卷药重 3kg。结合矿山钻孔条件, 炮孔直径取 250mm。

### 4.2 爆破方案

采用深孔爆破一次成井技术, 即一次性钻凿炮孔, 分层装药堵塞, 层内微差起爆, 逐层爆破。由于方形布孔难以解决角孔的夹制性, 故采用圆形布孔。在半径为 3.3m 的外圆上均匀布置 8 个孔, 在半径为 1.5m 内圆上布置 4 个炮孔, 如图 2 所示。为了解决中间层的夹制性, 故爆破方式采用上抛下压模式, 即上端上抛 2 个分层, 分层微差时间取 350ms, 下端下压 7 个分层, 分层微差时间取 250ms。由于分层较多, 为了保证各分层炸药起爆的可靠性, 因此采用数码雷管起爆。同时考虑炮孔偏斜情况和补偿空间的需求, 无约束自由面分层高度取 4.0m, 有约束自由面分层高度取 2.6~2.8m, 故 32m 一次

爆破成井共分为 10 个分层。利用现场地质条件数据, 采用本文堵塞长度计算公式得到各分层最大和最小堵塞长度, 然后根据炮孔偏斜、分层位置及装药过程的简单化等因素选取实际堵塞长度, 形成爆破方案, 不同高度分层的爆破参数见表 1, 炮孔各分层实际堵塞效果如图 3 所示。

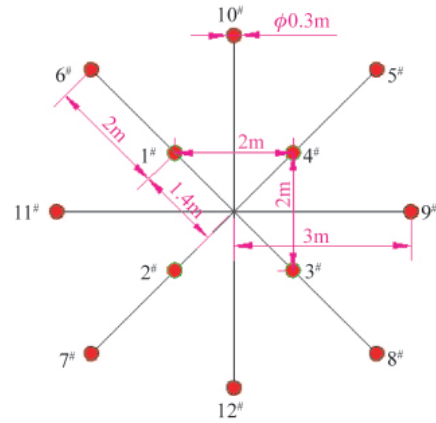


图 2 深孔爆破一次成井炮孔布置

Fig. 2 Blast-hole layout for raise excavation by one-step deep-hole blasting

表 1 不同高度分层的爆破参数

Table 1 Blasting parameters for different height slicing

分层高度/m	堵塞长度/m	装药量/kg
2.6	1.6	54
2.7	1.7	54
2.8	2.8	54
4.0	3.0	54

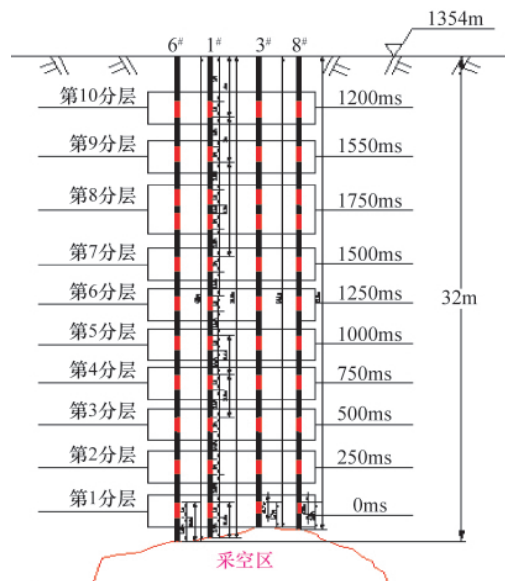


图 3 深孔爆破一次成井分层

Fig. 3 Slicing diagram for raise excavation by one-step deep-hole blasting

### 4.3 成井效果

采用深孔爆破一次成井技术,在确保合理堵塞长度的前提下,成功形成了 32m 的空区充填天井,成井效果如图 4 所示。



图 4 深孔爆破一次成井效果

Fig. 4 Effect of raise excavation by one-step deep-hole blasting

## 5 结论

本文通过对深孔爆破一次成井技术堵塞问题的深入研究,分析了现有炮孔堵塞理论存在的不足,同时考虑到深孔爆破一次成井技术堵塞问题的特殊性,提出了从堵塞物变形量入手的思路进行堵塞长度的研究,得出结论如下:

(1) 根据堵塞物的作用机理,从堵塞物的压缩变形过程着手,结合力学理论,建立了堵塞物的压缩变形量的计算理论。通过分析堵塞物的压缩过程以及运动过程中的能量传递,得到了堵塞物抛出炮孔的时间关系式,然后结合深孔爆破一次成井的实际堵塞情况,建立了深孔爆破一次成井堵塞理论。

(2) 在 32m 深孔爆破一次成井试验中,应用堵塞理论,确定各分层堵塞长度的最大值和最小值,然后结合炮孔偏斜、分层位置及装药过程的简单化等确定炮孔实际堵塞长度,保证了深孔爆破一次成井试验的成功。

### 参考文献 (References)

[1] 蒋跃飞. 盲天井深孔爆破一次成井掏槽方式试验研究 [D]. 昆明: 昆明

理工大学, 2006.

Jiang Yuefei. The theoretical calculations and experiment of the cutting method for completion of blind shafting in deep-hole blasting [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.

[2] 陆文, 张志呈. 钻孔爆破中炮孔堵塞作用机理研究 [J]. 爆破, 2001, 18(1): 16-18.

Lu Wen, Zhang Zhicheng. Blasting, 2001, 18(1): 16-18.

[3] 郑文信. 炮孔合理堵塞长度的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(6): 44-45.

Zheng Wenxin. Mining Research and Development, 2000, 20(6): 44-45.

[4] 刘恺德. 炮孔堵塞机理与试验[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2009.

Liu Kaide. Stemming function of blast hole and experiment[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2009.

[5] 赵新涛, 黄海龙. 影响岩体爆破质量的垂直炮孔堵塞长度研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27(7): 94-99.

Zhao Xintao, Huang Hailong. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 94-99.

[6] 罗勇, 沈兆武. 钻孔爆破中炮孔堵塞效果及堵塞长度的研究 [J]. 力学与实践, 2006, 28(2): 48-52.

Luo Yong, Shen Zhaowu. Mechanics in Engineering, 2006, 28(2): 48-52.

[7] Isakov A L. Model investigation of stemming behavior and calculation of the pulse during firing of borehole charges [J]. Soviet Mining Science, 1979, 15(4): 331-339.

[8] 徐颖, 孟益平, 程玉生. 装药不耦合系数对爆破裂纹控制的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1843-1847.

Xu Ying, Meng Yiping, Cheng Yusheng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1843-1847.

[9] 张奇. 岩石爆破的粉碎区及空腔膨胀[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(1): 68-75.

Zhang Qi. Explosion and Shock Waves, 1990, 10(1): 68-75.

[10] Yan C B, Xu G Y, Zuo Y J. Destabilization analysis of overlapping underground chambers induced by blasting vibration with catastrophe theory[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(3): 735-740.

[11] 李廷春, 刘洪强. 一次成井掏槽爆破炮孔合理堵塞长度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 384-389.

Li Tingchun, Liu Hongqiang. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 384-389.

[12] 赵新涛, 程贵海. 南宁市阳光新城地基开挖工程的爆破振动测试[J]. 爆破, 2006, 23(2): 105-107.

Zhao Xintao, Cheng Guihai. Blasting, 2006, 23(2): 105-107.

(责任编辑 侯澄芝)