

文章编号: 1001-1455(2003)03-0253-06

光面爆破相邻炮孔存在起爆时差的炮孔间距计算*

戴俊¹, 杨永琦²

(1. 西安科技学院, 陕西 西安 710054;
2. 中国矿业大学北京校区, 北京 100083)

摘要: 根据光面爆破炮孔爆炸载荷的时间衰减和相邻炮孔的非同时起爆, 对光面爆破的炮孔间距计算进行研究, 提出新的光面爆破参数设计方法, 并得出炮孔爆炸载荷衰减速度、相邻炮孔起爆时差对炮孔间距的影响。分析认为, 就实现较大的光面爆破炮孔间距而言, 提高炮孔堵塞质量较提高雷管起爆时间精度更有意义。

关键词: 爆炸力学; 炮孔间距; 光面爆破; 起爆时差; 相邻炮孔

中图分类号: O389; TD236 国标学科代码: 130°35 文献标志码: A

1 引言

目前生产的雷管存在一定的起爆时间漂移, 因此工程实际中, 实现光面爆破的相邻炮孔同时起爆十分困难, 即使采用同段雷管, 大多数情况相邻炮孔之间也存在起爆时差。另外, 由于爆炸载荷作用下炮孔的膨胀变形、炮孔壁周围裂纹的产生、堵孔炮泥的运动等, 炮孔内爆炸载荷是随时间而衰减的^[1]。为保证良好的光面爆破效果, 应该充分考虑相邻炮孔起爆时差和炮孔内爆炸载荷随时间衰减速度的影响, 设计出更接近于工程实际的光面爆破参数。

光面爆破是一种特殊的爆破技术, 用于消除或减少爆破超挖和降低爆破对周围环境的不利影响, 如降低爆破对周围岩石的损伤等。为获得良好的光面爆破效果, 国内外学者均对其炮孔间贯通裂纹形成机理和参数设计方法等问题进行了深入研究, 进而提出并实践了更有效的光面爆破技术——岩石定向断裂周边控制爆破技术^[2~5]。近年, 笔者还就光面爆破损伤围岩及岩石定向断裂周边控制爆破的参数设计进行了研究^[6~8]。但是, 这些研究均存在不足, 主要是没有考虑光面爆破的相邻炮孔起爆时差和炮孔内爆炸载荷随时间的衰减对光面爆破炮孔间贯通裂纹形成的影响, 研究光面爆破对围岩损伤是以单个炮孔的爆炸作用为基础, 没有考虑相邻炮孔爆炸载荷的共同作用。因此, 需要在考虑相邻炮孔起爆时差和炮孔内爆炸载荷随时间衰减的条件下, 对光面爆破的各种问题进行深入研究。

由于问题的复杂性和研究内容的十分丰富, 限于篇幅, 本文将仅就考虑相邻炮孔存在起爆时差和炮孔内爆炸载荷随时间衰减条件下的炮孔间贯通裂纹形成条件和炮孔间距计算进行研究, 提出这种条件下的炮孔间距计算方法, 并就相邻炮孔起爆时差大小和炮孔内爆炸载荷随时间衰减速度的影响进行讨论。

2 光面爆破在岩石中引起的爆炸应力场

光面爆破大都采用不耦合装药, 以保证在炮孔周围不形成压碎区。在这种条件下, 可以认为岩石中传播的是弹性应力波, 而没有冲击波。如图 1 所示, 单个炮孔爆炸载荷引起岩石中任一点的应力是炮孔距离 r 和时间 t 的函数, 可表达为

$$\sigma_r = -p_0 \left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} f \left[t - \frac{r - r_b}{c_e} \right] \quad (1)$$

* 收稿日期: 2002-07-15; 修回日期: 2002-12-25

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(02JK081)

作者简介: 戴俊(1964—), 男, 博士研究生, 教授。

$$\sigma_{\theta} = -b\sigma_r \quad (2)$$

$$p_0 = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 n \left[\frac{r_b}{r_c} \right]^{-6} \quad (3)$$

式中： σ_r 、 σ_{θ} 分别为岩石中任一点的径向应力和法向应力； p_0 为爆炸载荷峰值； r 为岩石中应力计算点到炮孔中心的距离； r_b 为炮孔半径； r_c 为装药半径；

$f \left[t - \frac{r - r_b}{c_e} \right]$ 为炮孔内爆炸载荷的时间衰减函数，

t 为时间， c_e 为岩石中的弹性波速度； α 为应力波的距离衰减指数， $\alpha = 2 - \frac{\mu}{1 - \mu}$ ， μ 为岩石的泊松比； b 为侧向应力系数， $b = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ； ρ_0 为炸药密度； D 为炸药爆速； n 为炮孔内爆炸产物碰撞炮孔壁时的压力增大系数， $n = 8 \sim 11$ 。

炮孔内爆炸载荷的时间衰减是一个十分复杂的过程，受许多因素的影响，至今还无法对其进行准确描述。李宁等^[9]对此进行了研究，提出了炮孔内爆炸载荷的数值模拟，但由于其中涉及许多需要确定的常数，使得模拟结果带有一定的随意性，不便于工程设计中应用。在此，参照文献[1, 9]的结果作简化处理，认为炮孔内爆炸载荷随时间是线性衰减的，并取衰减函数为

$$f(t) = \begin{cases} 1 - t/t_0 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： t_0 为炮孔内爆炸载荷的作用持续时间。 t_0 越大，炮孔内爆炸载荷的衰减速度越低； t_0 取小值时，炮孔内的爆炸载荷将很快衰减。

尽管这样的炮孔内爆炸载荷的时间衰减函数假定与实际有一定差距，但所采用的分析方法对问题的最终解决是有意义的，所得结果在定性意义上是正确的，仍具有参考价值。

由于光面爆破炮孔间贯通裂纹的形成是相邻炮孔共同作用的结果，因此需要知道相邻炮孔爆破在炮孔连线上引起的应力。这一应力是相邻炮孔各自引起应力的叠加。如图 1 所示，假定炮孔 1 先起爆，则在相邻炮孔连线上，有

$$\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} = p_0 \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} f \left[t - \frac{r - r_0}{c_e} \right] + \left(\frac{a - r}{r_b} \right)^{-\alpha} f \left[t - \Delta t - \frac{a - r - r_b}{c_e} \right] \right] \quad (5)$$

式中： σ_{r1} 、 σ_{r2} 分别为炮孔 1、炮孔 2 在相邻炮孔连线上引起的径向应力； Δt 为相邻炮孔的起爆时差； a 为炮孔间距。

知道径向应力后，相邻炮孔连线上的切向应力由式(2)计算，于是可得到了相邻炮孔连线上的应力分布。

3 相邻炮孔间形成贯通裂纹的条件

现有的光面爆破理论认为，炮孔间贯通裂纹的形成是拉应力引起的。通常认为，裂纹首先在炮孔壁产生，而后延伸，当岩石中拉伸应力小于岩石的抗拉强度时，裂纹止裂，即炮孔间连线上的某点沿炮孔连线方向拉伸裂纹的产生以切向拉应力超过岩石的抗拉强度为条件。因此，为保证相邻炮孔之间贯通裂纹的顺利形成，要求炮孔间连线上每一点的切向拉应力均大于或等于岩石的抗拉强度。于是，形成炮孔间贯通裂纹的条件可表示为

$$\min\{\bar{\sigma}_{\theta}(r)\} \geq \sigma_t \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta}(r) = \max\{\bar{\sigma}_{\theta 1}, \bar{\sigma}_{\theta 2}, \bar{\sigma}_{\theta}\} \quad (7)$$

式中： $\bar{\sigma}_{\theta}(r)$ 为炮孔间连线上任意一点经历的切向应力最大值，是 r 的函数； σ_t 为岩石的抗拉强度； $\bar{\sigma}_{\theta 1}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta 2}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta}$ 分别为炮孔 1、炮孔 2 和相邻两炮孔共同作用引起的切向拉应力峰值。这里指出：就相邻炮孔连

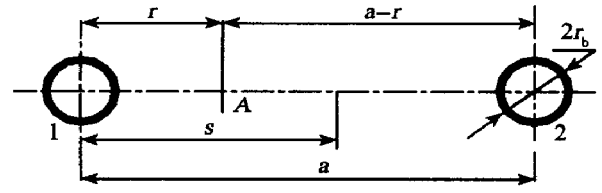


图 1 光面爆破中的相邻炮孔

Fig.1 The adjacent shot holes for smooth blasting

线上的某一点而言,由于 Δt 的存在, $\bar{\sigma}_{\theta_1}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta_2}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta}$ 的作用可能是非同时的,因此也就不存在叠加关系,而是分别对炮孔间贯通裂纹的产生起作用。

以图 1 所示为例说明如下。A 是相邻炮孔连线上距离孔 1 为 r ($0 \leq r \leq a/2$) 的点, A 点距孔 2 的距离为 $a-r$ 。若孔 1 先起爆,孔 2 在 Δt 后起爆,则 $\bar{\sigma}_{\theta_1}$ 达到 A 点的时间 $t_1=r/c_e$, $\bar{\sigma}_{\theta_2}$ 达到 A 点的时间 $t_2=\Delta t+(a-r)/c_e$ 。如果 $\bar{\sigma}_{\theta_1}$ 的作用时间足够长,则 $\bar{\sigma}_{\theta}$ 达到 A 点的时间 $t_3=t_2$, 否则,在 A 点没有应力叠加, $\bar{\sigma}_{\theta}$ 在 A 点作用为零。当 $t_1 \neq t_2$ 时, $\bar{\sigma}_{\theta_1}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta_2}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta}$ 在 A 点的作用是非同时的。于是,有

$$\bar{\sigma}_{\theta_1} = bp_0 \left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} \tag{8}$$

$$\bar{\sigma}_{\theta_2} = bp_0 \left[\frac{a-r}{r_b} \right]^{-\alpha} \tag{9}$$

$$\bar{\sigma}_{\theta} = bp_0 \left\{ \left[\frac{a-r}{r_b} \right]^{-\alpha} + \left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} f \left[\frac{2(s-r)}{c_e} \right] \right\} \quad r_b \leq r \leq s \tag{10}$$

$$\bar{\sigma}_{\theta} = bp_0 \left\{ \left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} + \left[\frac{a-r}{r_b} \right]^{-\alpha} f \left[\frac{2(r-s)}{c_e} \right] \right\} \quad s < r \leq a-r_b \tag{11}$$

式中: s 为相邻炮孔两应力波峰相遇点距炮孔 1 中心的距离

$$s = 0.5(a + c_e \Delta t) \tag{12}$$

在既定岩石和炮孔间距条件下, s 依赖于 Δt 。若 Δt 较大,使得 $s > a-r_b$, 则相邻炮孔的应力波峰值将不可能在炮孔连线上相遇、叠加。这种情况下的炮孔间距计算已有研究^[10]。

4 炮孔间距的计算

将式(8)~(11)代入式(7),可以看出在 $r_b \leq r \leq a-r_b$ 范围内, $\bar{\sigma}_{\theta}$ 有最小值,于是可通过

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{\theta}}{\partial r} = 0 \tag{13}$$

求出炮孔间距 a 一定的条件下,使 $\bar{\sigma}_{\theta}(r)$ 取得最小值的 r (为 a 的函数),再将 r 代入式(6),即可求出炮孔间距 a 。

这样的求解过程十分复杂,但利用数值方法可以很方便地作图求解炮孔间距 a 。以 $\Delta t=0.25a_0/c_e$ 和 $0.6a_0/c_e$ (a_0 为可能的最大炮孔间距)两种情况为例,在同一坐标系改变炮孔间距 a 作 $\bar{\sigma}_{\theta_1}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta_2}$ 、 $\bar{\sigma}_{\theta}$ 图,找到炮孔间连线上任何一点满足式(2)~(6)的 a 的最大值,这个 a 即是炮孔间距。

以砂岩为例,取泊松比 $\mu=0.25$, 则应力波的距离衰减指数 $\alpha=1.67$, 侧向应力系数 $b=0.33$, 取弹性波速度 $c_e=3200\text{m/s}$, 单向静态抗压强度 $\sigma_c=80\text{MPa}$, 动态抗拉强度等于静态抗拉强度 $\sigma_t=6.7\text{MPa}$, 取裂纹扩展速度为弹性纵波速度的 0.4 倍,即 $c_c=0.4c_e$, 爆炸载荷作用持续时间取为爆炸裂纹传播可能的最大炮孔间距的一半长度所需时间,即 $t_0=0.5a_0/c_c=0.5a_0/0.4c_e$ 。

炮孔间距用相对值表示,设 a_0 为不考虑炮孔中爆炸载荷时间衰减和相邻炮孔起爆时差条件下的计算炮孔间距,为

$$a_0 = 2r_b \left[\frac{2bp_0}{\sigma_t} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \tag{14}$$

根据周边控制爆破不能在炮孔周围出现压碎区的要求,其极限值为

$$a_0 = 2r_b \left[\frac{2bK\sigma_c}{\sigma_t} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \tag{15}$$

式中: K 为岩石受三轴动态应力时引起的强度增大系数,可取 $K=10$; σ_c 为岩石的单轴静态抗压强度。

将有关参数代入式(15),计算得光面爆破的极限炮孔间距 $a_0=27.33r_b$, 这里取 $a_0=26r_b$ 。

根据对式(10)~(11)的分析,炮孔 1 先起爆条件下,爆炸载荷形成炮孔间贯通裂纹的不利点 r 在 $r_b \leq r \leq s$ ($s \geq a/2$) 之间。若炮孔 2 在 $\Delta t=0.25a_0/c_e$ 之后起爆,为了求出炮孔间距,这里先计算下列值

$$t_0/s = 0.5a_0/0.4c_e = 0.01r_b/m$$

$$s = 0.5(a + c_e\Delta t) = 0.5a + 3.25r_b$$

$$f \left[\frac{2(s-r)}{c_e} \right] = 1 - \frac{2(s-r)}{c_e t_0} = 1 - \frac{a + 6.5r_b - 2r}{32r_b}$$

将式(10)可近似改写为

$$\bar{\sigma}_\theta = bp_0 \left[\left[\frac{a-r}{r_b} \right]^{-\alpha} + \left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} \left[1 - \frac{a + 6.5r_b - 2r}{32r_b} \right] \right] \quad (16)$$

由此,可求解炮孔间距,结果为 $a = 24.2r_b$, 见图 2(a)。

当 $\Delta t = 0.6a_0/c_e$ 时,结果为 $a = 21.2r_b$, 见图 2(b)。

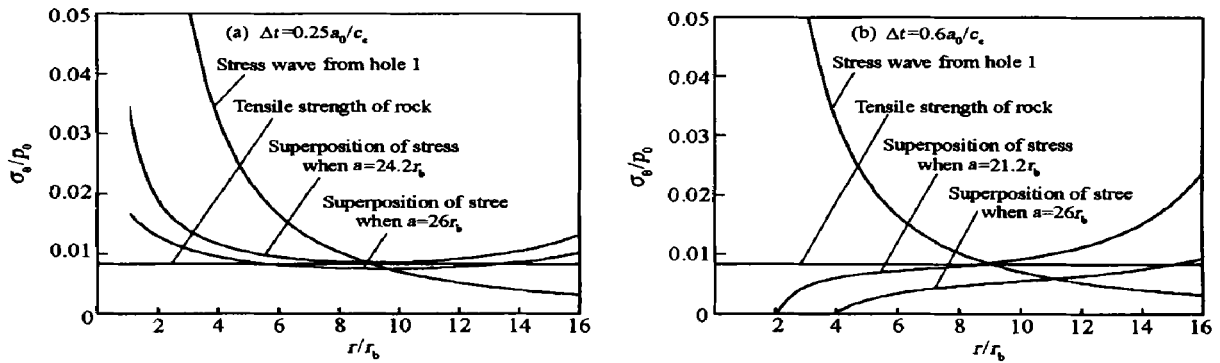


图 2 炮孔间距的作图法求解

Fig.2 The schematic solution of spacing

5 分析与讨论

现在分析讨论 t_0 和 Δt 对炮孔间距的影响。在式(10)~(11)中取 $\Delta t = 0$, 则 $s = a/2$, 炮孔间连线上的应力分布关于 $r = a/2$ 对称, 应力分布可表示为

$$\bar{\sigma}_\theta = bp_0 \left[\left[\frac{a-r}{r_b} \right]^{-\alpha} + \left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} f \left[\frac{a-2r}{c_e} \right] \right] \quad r_b \leq r \leq a/2 \quad (17)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = bp_0 \left[\left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} + \left[\frac{a-r}{r_b} \right]^{-\alpha} f \left[\frac{2r-a}{c_e} \right] \right] \quad a/2 < r \leq a - r_b \quad (18)$$

如果 $t_0 = \infty$, 则 $f(t) = 1$, 即忽略炮孔内爆炸载荷随时间的衰减, 则式(10)~(11)可统一表示为

$$\bar{\sigma}_\theta = bp_0 \left[\left[\frac{r}{r_b} \right]^{-\alpha} + \left[\frac{a-r}{r_b} \right]^{-\alpha} \right] \quad (19)$$

表 1 炮孔内爆炸载荷作用持续时间和相邻炮孔的起爆时差对炮孔间距的影响

Table 1 The effect of the lasting time of explosion loading in a shot hole and the delay time between adjacent shot holes on the spacing

$\frac{\Delta t}{a_0/c_e}$	a/r_b						
	$t_0/s = 0.004r_b/m$	$t_0/s = 0.006r_b/m$	$t_0/s = 0.008r_b/m$	$t_0/s = 0.010r_b/m$	$t_0/s = 0.012r_b/m$	$t_0/s = 0.015r_b/m$	$t_0/s = 0.020r_b/m$
0.10	22.0	23.5	24.8	25.5	26.0		
0.25	20.2	22.0	23.2	24.2	24.8	25.8	26.0
0.40	18.8	20.5	22.0	23.0	24.2	24.8	25.2
0.60	17.1	18.6	20.3	21.2	22.5	23.5	24.2

可以看出, 这种情况下相邻炮孔起爆时差 Δt 对炮孔间距没有影响, 炮孔间距可达到极限值 a_0 。因此可以认为, 光面爆破中提高炮孔的堵塞质量(降低破孔内爆炸载荷的衰减速度), 比减小相邻炮孔的起爆时差, 对提高光面爆破效果更加重要。这一结论具有十分重要的实际意义, 因为提高炮孔的堵塞质量是施工的工艺问题, 比减小相邻炮孔的起爆时差更容易实现。

当 $f(t)$ 不恒为 1, $\Delta t \neq 0$ 时, 炮孔间距受炮孔内爆炸载荷作用时间和相邻炮孔起爆时差的共同影响, 见表 1。由表可知, 在炮孔内爆炸载荷作用时间一定时, 炮孔间距随相邻炮孔起爆时差的增大而减小; 当相邻炮孔起爆时差一定时, 炮孔间距随炮孔内爆炸载荷作用时间的增大而增大, 最终趋近极限值。

6 结束语

(1) 光面爆破炮孔间距的计算, 必须考虑炮孔内爆炸载荷随时间的衰减和相邻炮孔非同时起爆的影响。考虑这些影响后, 光面爆破的炮孔间距计算式变得较为复杂, 但利用数值方法, 可以很容易地使问题得解。

(2) 炮孔内爆炸载荷随时间的衰减和相邻炮孔间起爆时差的影响, 将使光面爆破中能够实现炮孔间贯通裂纹的间距减小, 而且衰减速度越大 (t_0 越小), 起爆时差 Δt 越大, 能够实现贯通裂纹的炮孔间距越小。因此光面爆破中减小相邻炮孔的起爆时差, 提高炮孔的堵塞质量, 对提高光面爆破的经济效益是有益的。这与过去对光面爆破效果影响因素方面研究得出的结论一致。

(3) 在忽略炮孔内爆炸载荷随时间的衰减时, 相邻炮孔起爆时差将不对炮孔间距产生影响。因此, 光面爆破中提高炮孔的堵塞质量比减小相邻炮孔的起爆时差对提高光面爆破效果更有意义。

(4) 炮孔内爆炸载荷随时间的衰减关系描述十分复杂, 涉及到爆生气体与岩石的本构(或状态)方程。本文中在假定为线性衰减的前提下进行的研究与实际有一定差距, 但在定性意义上, 所得结论式可靠的, 所提出的方法用于其它的炮孔内爆炸载荷衰减形式分析仍然有效, 本文方法与结论有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 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—146.
LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. Theoretical analyses on pressure history in shot hole in pre-split blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(2): 140—146.
- [2] 阜新矿业学院, 编译. 光面爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [3] 朱瑞赓, 李新平, 陆文兴. 控制爆破的断裂控制与参数设计[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(4): 314—317.
ZHU Rui-geng, LI Xin-ping, LU Wen-xing. Split control and parameter design of controlled blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(4): 314—317.
- [4] 杨仁树, 商厚胜. 断裂控制爆破新技术在软岩巷道施工中的应用[A]. 何满朝, 黄福昌, 闫吉太. 世纪之交软岩技术现状与展望[C]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 239—242.
- [5] YANG Yong-qi, GAO Quan-chen, YU Mu-song, et al. Experimental study of mechanism and technology of directed crack blasting [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 5(2): 69—72.
- [6] 戴俊, 杨永琦. 软岩巷道周边控制爆破研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(4): 374—378.
DAI Jun, YANG Yong-qi. Research on controlled perimeter blasting for soft tunnel [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(4): 374—378.
- [7] 戴俊, 杨永琦, 罗艾民. 周边控制爆破度对围岩损伤的分形研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 265—269.
DAI Jun, YANG Yong-qi, LUO Ai-min. Fractal research on damage in surrounding rock from controlled perimeter blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 265—269.
- [8] 杨永琦, 戴俊, 单仁亮, 等. 岩石定向断裂控制爆破原理与参数设计[J]. 爆破器材, 2000, 29(6): 24—28.
YANG Yong-qi, DAI Jun, SHAN Ren-liang, et al. Principle and parameter design of controlled directional-split rock blasting [J]. Explosive Materials, 2000, 29(6): 24—28.
- [9] LI Ning, Swobodo G. The numerical modeling of blasting loading [A]. Proceeding of International Symposium on Application of Computer Method in Rock Mechanics [C]. Xi'an China, 1993: 547—552.
- [10] 戴俊. 光爆孔间隔分段起爆方法的探讨[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1996, 15(4): 429—433.
DAI Jun. Study on the method of priming every other shot hole in sequence in smooth blasting [J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science Edition), 1996, 15(4): 429—433.

Calculation of shot hole separation in smooth blasting

DAI Jun¹, YANG Yong-qi²

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Beijing Campus of China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: A new method for calculating the shot hole separation is presented. The impacts of explosion loading decay rate and delayed exploding time between the adjacent holes on the shot hole separation were analyzed. The results indicate that improving the stemming quality is more effective than minimizing the delayed exploding time distribution for achieving larger shot hole separation.

Key words: mechanics of explosion; spacing; smooth blasting; delayed exploding time; adjacent shot hole

在学术论文中规范关键词选择的通知

据科协学发字[2002]049号通知《关于在中国科协系统科技期刊中规范关键词选择的决定(试行)》,为了规范学术论文,深化学术文献的研究和统计,多层面提高中文文献检索水平,使更多的学术论文进入科技工作者的引用范畴,达到促进我国科学技术研究的目的,特对中国科协系统学术期刊学术论文中的关键词选择和排序,做出有关规定。

发表在中国科协系统学术期刊中所有学术论文,必须在摘要后列出不少于4个关键词。这些关键词按以下顺序选择:

第一个关键词列出该文主要工作或内容所属二级学科名称。学科体系采用国家技术监督局发布的《学科分类与代码》(国标GB/T 13745-92)。

第二个关键词列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。对于综述和评述性学术论文等,此位置分别写“综述”或“评论”等。对科学研究方法的研究论文,此处不写被研究的方法名称,而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个关键词列出在前三个关键词中没有出现的,但被该文作为主要研究对象的事或物质的名称,或者在题目中出现的作者认为重要的名词。

如有需要,第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

《爆炸与冲击》编辑部

2003年5月