

# 条形装药硐室爆破研究

陈士海 李玉民 林从谋 赵锦桥

(山东矿业学院爆破所 山东泰安 271019)

**摘要** 从理论上分析计算了条形装药硐室爆破急待解决的最佳空腔比、装药端部效应,给出了条形装药爆破设计的有关参数,并通过具体实例验证了理论结果的准确性,同时通过地震测量,讨论了条形装药爆破的地震效应。

**关键词** 条形装药 端部效应 爆破 地震效应 硐室爆破

**中图分类号** O383.1

## 1 前言

硐室爆破技术在我国是解放后才逐步发展起来的。目前我国农田水利建设、矿山开采、铁路公路路基与场地整平等方面有着广泛应用,特别是空腔条形装药硐室爆破,近年来引起了广大爆破工作者的浓厚兴趣和极大关注。因它与集中药包硐室爆破比较,具有爆破能量利用率高、抛掷效果好、堆积集中、块度均匀,利于边坡稳定,减少药室开挖量等优点,在大中型硐室爆破中逐渐代替了集中药包爆破。

但需要指出的是,目前对条形药包,特别是空腔条形药包,无论在机理探讨,还是参数研究上都是很不充分。因此,尽管在工程上有所应用,其中也不乏有些爆破工作者通过粘土和砂土小型模拟爆破试验,取得了某些成果,但对许多问题的认识仍不统一,给设计和施工带来一定困难,有必要进行深入研究。

## 2 条形装药硐室爆破的最佳空腔比和端部效应

### 2.1 最佳空腔比

#### 2.1.1 按爆生气体等熵膨胀计算

不偶合条形装药爆生气体等熵膨胀应满足如下关系

$$\begin{cases} p_H V_H^r = p_K V_K^r, & (p > p_K \text{ 时}) \\ p_K V_K^r = p_x V_x^r, & (p < p_K \text{ 时}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p_H$ 、 $V_H$  分别是爆轰波阵面上压力和比容; $p_K$ 、 $V_K$  分别是爆生气临界压力和临界比容,对中等威力炸药  $p_K = 0.2 \text{ GPa}$ ;  $p_x$ 、 $V_x$  分别是爆生气体膨胀到硐室器壁时的压力与比容; $n$ 、 $r$  是等熵绝热指数, $n=3$ 、 $r=1.3$ 。

由(1)式得

$$p_x = \left(\frac{p_H}{p_K}\right)^{\frac{r}{n}} \cdot \left(\frac{V_H}{V_x}\right)^r \cdot p_K$$

$$\frac{V_H}{V_K} = \left(\frac{r_0}{r_2}\right)^2 = \varphi^{-2}$$

式中:  $r_0$ 、 $r_2$  分别是药卷半径和硐室半径;  $\varphi$  为空腔比(即不偶合系数)。则

$$p_x = \left(\frac{p_H}{p_K}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \varphi^{-2n} \cdot p_K \quad (2)$$

当爆生气体撞击硐室壁时, 压力增大约 8~10 倍, 即硐壁压力为

$$p = (8 \sim 10)p_x, \quad \text{取 } p = 10p_x \quad (3)$$

在动载荷作用下, 岩石的抗压强度增大系数为 10~15, 取增大系数为 10。设岩石单轴静抗压强度为  $S_c$ , 则抗动压强度为  $10S_c$ 。如果硐壁处产生的压力小于岩石的抗动压强度, 岩石中将不产生粉碎区。众所周知, 粉碎区范围虽小, 但其耗能很大, 因此避免粉碎区的产生, 使爆炸能量更多地用于对岩石的破裂破坏, 会提高炸药能量利用率和增加爆破效果, 即最优时

$$p = 10S_c \quad (4)$$

由(3)、(4)式得到最优空腔比为

$$\varphi = \left[\left(\frac{p_H}{p_K}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{p_K}{S_c}\right]^{\frac{1}{2n}} \quad (5)$$

例: 岩石抗压强度为 80MPa, 采用 2<sup>#</sup> 岩石炸药, 其密度为 1000kg/m<sup>3</sup>, 爆速为 3600 m/s, 则最优空腔比  $\varphi = 4.0$ ; 岩石抗压强为 50MPa 时,  $\varphi = 5.4$ 。

### 2.1.2 按冲击波理论计算

若考虑爆炸产物膨胀时的速度, 并以此速度撞击硐壁。假设产物与硐壁碰撞为弹性碰撞, 因产物与爆轰波撞击空气, 在空气中产生空气冲击波, 可认为空气冲击波阵面上质点速度为产物的膨胀速度。由爆轰理论知, 爆轰产物速度由  $u_H$  迅速增大为界面处的运动速度  $u_e$ , 所以

$$u_e = u_H + \int_{r_K}^{r_H} \frac{u_H dp}{\rho c} \quad (6)$$

式中:  $\rho$ 、 $c$  分别为爆轰产物的密度和音速。

结合(1)式

$$u_e = u_H + \int_{r_K}^{r_H} \frac{u_H dp}{\rho c} + \int_{r_K}^{r_K} \frac{u_H dp}{\rho c} = u_H + \frac{2c_H}{n-1} \left(1 - \frac{c_K}{c_H}\right) + \frac{2c_K}{r-1} \left(1 - \frac{c_e}{c_K}\right) \quad (7)$$

式中:  $c_H$ 、 $c_K$ 、 $c_e$  分别表示爆炸产物膨胀各个状态音速。

$$\text{已知 } c_K = \sqrt{r p_K V_K}, \quad \frac{c_K}{c_H} = \left(\frac{\rho_K}{\rho_H}\right)^{\frac{n-1}{2}} = \left(\frac{p_K}{p_H}\right)^{\frac{n-1}{2n}}, \quad \frac{c_e}{c_K} = \left(\frac{p_e}{p_K}\right)^{\frac{r-1}{2r}}$$

整理得

$$u_e = \frac{D}{n+1} \left\{ 1 + \frac{2n}{n+1} \left[ 1 - \left(\frac{p_K}{p_H}\right)^{\frac{n-1}{2n}} \right] \right\} + \frac{2c_K}{r-1} \left[ 1 - \left(\frac{p_e}{p_K}\right)^{\frac{r-1}{2r}} \right] \quad (8)$$

同时

$$p_e = \frac{k+1}{2} \rho_0 u_e^2, \quad V_K = V_H \left(\frac{p_H}{p_K}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{\rho_K} \quad (9)$$

式中:  $k$  为空气的等熵绝热指数,  $k=1.2$ ;  $\rho_0$  为空气的初始密度,  $\rho_0=1.25\text{kg/m}^3$ 。

(8)、(9)两式联立求解即可得初始空气冲击波质点速度  $u_e$ 。

根据流体力学汇源原理,对条形药包爆炸产生的空气冲击波,其质点速度随距离的一次方增大而减少,即

$$\frac{u_r}{u_2} = \frac{r_2}{r_0} = \varphi, \quad \frac{p_r}{p_2} = \varphi^2 \quad (10)$$

式中: $u_2$ 、 $p_2$  分别为爆炸产物到达硐壁处的质点速度和压力。

爆炸产物以质点速度  $u_2$ 、压力  $p_2$  冲击硐壁属弹性撞击,根据硐壁处质点速度  $u_b$  和应力  $p_b$  连续,有

$$\text{爆炸产物:} \quad p_b - p_2 = -\rho_e c_e (u_b - u_2) \quad (11)$$

$$\text{硐壁:} \quad p_b = \rho_m c_m u_b \quad (12)$$

式中: $\rho_e$ 、 $c_e$  各为爆炸产物密度和音速; $\rho_e = \rho_0 \frac{u+1}{u} \varphi^{-2}$ ,  $c_e = \frac{k u_e}{\varphi}$ ;  $\rho_m$ 、 $c_m$  分别是岩石密度和音速。

则解得

$$p_b = \frac{\rho_m c_m \cdot \rho_e c_e}{\rho_m c_m + \rho_e c_e} u_2 + \frac{\rho_m c_m}{\rho_m c_m + \rho_e c_e} p_2 \quad (13)$$

例:石灰岩,  $\rho_m = 2500 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_m = 3600 \text{ m/s}$ ,  $S_c = 80 \text{ MPa}$ , 2" 岩石炸药,求得最优空腔比  $\varphi = 1.84$ ; 页岩,  $\rho_m = 2350 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_m = 2900 \text{ m/s}$ ,  $S_c = 50 \text{ MPa}$ , 有  $\varphi = 2.05$ 。

综合考虑,我们认为,条形药包爆破的最佳空腔比为  $\varphi = 2 \sim 6$ ,这也为我们条形硐室爆破实践所证实。

## 2.2 药包的端部效应

大量爆破实践证明,无论采用毫秒差,还是同段雷管起爆,处于同一直线上两相邻条形药包,若它们的药室端部距离超过一定值,则会出现未能爆通(即留下岩坎)情况,严重影响了整个爆破效果。因此,相邻条形药室的端部距离的临界值,就成为工程爆破设计中的重要问题。文献[1]采用分析方法将条形药室与虚拟集中药室进行等效处理,利用能量平衡观点,分析了条形药室  $l > 3w$  ( $l$  为药室长,  $w$  为最小抵抗线)情况下的端部效应。由于集中药室与条形药室的破岩机理存在着差异,因此在爆炸近区两者消耗的能量显著不同,而且为减少硐室的开挖量,缩短施工工期,大量采用的条形药室为  $l > 3w$  情形。在此,试图应用应力波理论,对条形药室的端部效应进行数值分析,并回答下列工程上急需解决的问题:(1)两相邻条形药室端部能爆透的临界距离值;(2)将条形药室等效成集中药室的条件。

### 2.2.1 基本假设

(1)介质性质 通常在工程爆破中,使用的药量有限,多采用大空腔比的装药结构。在药室壁上产生的冲击压力尚不属于强冲击波,而且距爆源为  $(2 \sim 3)r_2$  ( $r_2$  为药室半径)范围内,只有短暂瞬间进入冲击波现象,因此可认为爆炸介质是具有线性的弹性介质。

(2)条形药室装药性质 为数学处理方便,认为硐室壁面光滑,炸药在药室内沿药室轴线方向上,以相同密度呈圆柱型堆放。

(3)条形药室起爆 由于存在炸药的管道效应,条形药室起爆通常采用两端或多点起爆方式,以提高炸药传爆的稳定性,并常在药室端部设置一个起爆点,对此可认为炸药的爆轰波自药室端部向中间传播。

### 2.2.2 数学模型简述

考虑到集中药室与条形药室在破岩机理上的差异,利用球形药包爆炸在周围激起的应力场可用解析式表示其特点,采用迭加原理将条形药室的爆破等效成一串球形药室的爆破。

(1)等效方法 通常采用下面等效方法:使球体积与长度为球直径的圆柱体的体积相等,这样能使条形药室的长度与模拟链状球药包的长度保证相等。此时: $r_1 = 1.2247r_0$  ( $r_1$ 为等效球药包半径, $r_0$ 条形装药半径)。

(2)腔壁压力 根据上述将条形药室等效处理为链状球装药后,可采用下面孔壁压力计算方程

$$p(t) = 4p_m[\exp(-\omega t/1.414) - \exp(-1.414\omega t)] \quad (14)$$

式中: $p_m$ 为孔壁峰值压力; $\omega$ 为波形函数, $\omega = 0.269c_1/b$ ;  $c_1$ 为介质中纵波波速; $b$ 为条形药室半径。

球形药室不耦合装药条件下介质中的爆破应力场解析式为

$$p_1 = \frac{-2\mu p e^{-t}}{\alpha^2} + p e^{-t} \exp\left(-\frac{\alpha^2 t}{\mu c_1 b}\right) \left[ \left( \frac{\alpha(\lambda + 2\varepsilon)}{\beta \mu c_1^2} - \frac{2\mu}{\alpha\beta} \right) \sin \frac{\alpha\beta t}{\mu c_1 b} + \left( \frac{2\mu}{\alpha^2} - \frac{\lambda + 2\mu}{\mu c_1^2} \right) \cos \frac{\alpha\beta t}{\mu c_1 b} \right] \quad (15)$$

式中: $p$ 为炸药爆轰压力; $\rho$ 为岩石密度; $\varepsilon$ 为装药不耦合系数(空腔比); $\gamma$ 为岩石泊松比; $k$ 为炸药绝热指数; $\lambda, \mu$ 为岩石拉梅系数; $\alpha^2 = [2(1 - 2\gamma)\rho c_1^2 + 3(1 - \gamma)k e^{-t} p]/2(1 - \gamma)$ ; $\beta^2 = [2\rho c_1^2 - 3(1 - \gamma)k e^{-t} p]/2(1 - \gamma)$ 当  $t = t_m = \frac{\mu c_1 b}{\alpha\beta} \arctg\left(\frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 - \beta^2}\right)$  时,  $p_1$  取得极大值  $p_m$ 。

(3)应力场计算 由于从波动方程中得到岩体中的应力状态只包含几何衰减而不包含物理衰减,为了尽可能将岩体的非均质连续和非完全弹性对应力波传播过程的影响考虑进去,利用相似分析和分离变量法,设距爆源  $r$  的点上的球面波产生的位移为

$$u(r, t) = u_r(r) u_w(t) \quad (16)$$

式中: $u_r(r) = (r/b)^{-1}$ ;  $u_w(t) = \frac{2(1+\gamma)b}{E} p(t)$ ;  $n$  为波传播衰减系数; $E$  为岩石弹性模量; $t$  为以波前到达该点瞬间作零点的时间。

上式与弹性动力学中的几何方程和物理方程联立求解,就可计算  $t$  时刻介质中空间点  $(r, z)$  处的应力状态。利用迭加原理迭加各球形药包产生的子波解。便可求出条形药室装药爆破的真实应力场和位移场。

由于自由面的存在,介质中空间点  $(r, z)$  所受的应力扰动来自三个方面:入射纵波,反射纵波和反射横波(这些有可能不是由同一个球药包产生),见图1。因此计算应力场时还需考虑自由面的影响。

(4)岩石破碎判据 根据凯尔哥霍夫的实验,证明一维强度理论可用于复杂应力状态,因此本模型选用最大拉应力准则和最大剪应力准则

$$\sigma_3 \leq -N[\sigma] \quad (17)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \leq N[\tau] \quad (18)$$

式中: $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ 分别为介质的单轴抗拉、抗剪强度; $N$ 为岩石动态强度系数。

取  $N=10$  来判断岩体的破坏与否,只要某处的拉应力值超过岩体的抗拉强度,就认

为岩体在该处产生与拉应力方向垂直的裂纹,并表示此处岩体已经破裂,同样岩体中某处的剪应力超过岩体的抗剪强度时,即认为产生脆性剪切破坏。据此,编写了名为“SCFMM”计算机程序。

2.2.3. 计算实例

(1)初始参数 本数值计算主要是针对济南市外环路工程,岩石为石

灰岩,其力学参数为:容重  $V=2500\text{kg/m}^3$ ,弹性模量  $E=21.7\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.26$ ,拉梅参数  $\mu=9.1\text{GPa}$ ,剪切模量  $G=8.5\text{GPa}$ ,单轴抗拉强度  $\sigma=5\text{MPa}$ ,单轴抗剪强度  $\tau=25\text{MPa}$ 。

炸药为自制铵油炸药,其性能参数为:爆速  $D=3143\text{m/s}$ ,绝热指数  $r=1.4$ ,密度  $\rho=900\text{kg/m}^3$ ,爆轰压力  $p=4\text{GPa}$ 。装药为多排多段条形药室,装药洞室断面为  $1.7\text{m}\times 1.2\text{m}$ ,装药空腔比为 3,装药直径为  $0.93\text{m}$ ,最小抵抗线为  $12\text{m}$  和  $23\text{m}$ 。

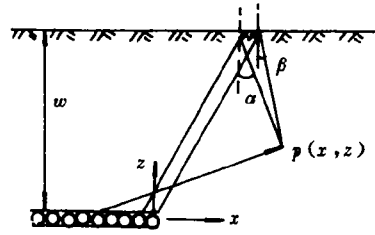
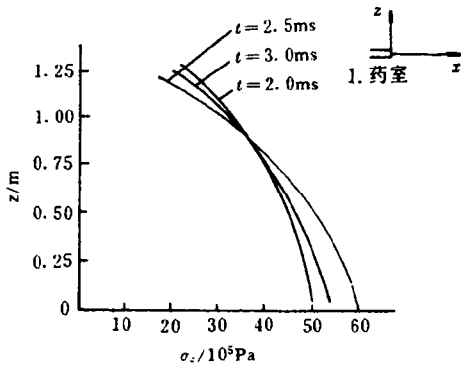


图 1 空间 P 点爆炸应力场  
Fig. 1 Explosive stress field at point P in space



1. Chamber

图 2 单药室爆破时  $\sigma_z$ -z 曲线 ( $x=2.0\text{m}, w=23\text{m}$ )  
Fig. 2  $\sigma_z$ -z curve of a single explosive

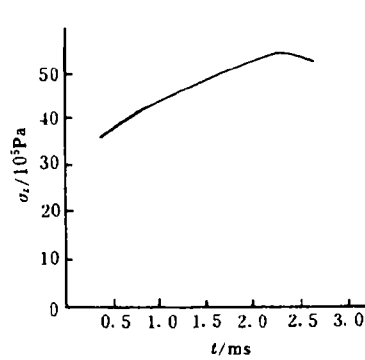


图 3 单药室爆破时  $\sigma_z$ -t 曲线 ( $x=2.0\text{m}, w=23\text{m}$ )

Fig. 3  $\sigma_z$ -t curve of a single explosive

(2)计算结果与分析 图 2、图 3 表示单药室爆破时,在  $t=2.0, 2.5, 3.0\text{ms}$  时刻  $x=2\text{m}$  点处的应力场。从图中看出,当  $t>2.5\text{ms}$  时  $x=2\text{m}$  点处的应力幅值已过峰值。若认为爆炸应力波为陡峭的波形,由此可说明  $l>12r$  之外的装药已对条形药室的端部基本没有影响。这一结论与实际情况是相吻合的。

表 1~3 表示同一轴线布置的双药室同时起爆和微差起爆,药室端部距离为  $4, 6, 8\text{m}$  三种情况下端部之间的破碎情况,从表中可以看出:当两药室端部距离超过  $6\text{m}$  时,就可能出现硬梗(未能完全爆通)现象。

上述计算结果,为济南外环路工程的条形药室大爆破设计提供了理论依据。

表 1 药室间距为 4m 时岩体破碎表( $t=2.5\text{ms}$ )

Table 1 Broken situation of rock when charge distance is 4m

x	z																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0
2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
4	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0

表 2 药室间距为 6m 时岩体破碎表( $t=2.5\text{ms}$ )

Table 2 Broken situation of rock when charge distance is 6m

x	z																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
2	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0
3	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
4	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0
5	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0
6	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0

表 3 药室间距为 8m 时岩体破碎表( $t=2.5\text{ms}$ )

Table 3 Broken situation of rock when charge distance is 8m

x	z																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
2	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
3	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
4	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0
5	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
6	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
8	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0

说明:(1)计算步长  $x=0.5\text{m}$ ,  $z=1.0\text{m}$ ;(2)表中“0”表示岩体该点应力已被解除(即已破碎),“1”表示该点还有应力(即未破碎);(3)“·”表示起爆点;(4)“——”线表示未破碎与已破碎岩体分界线。

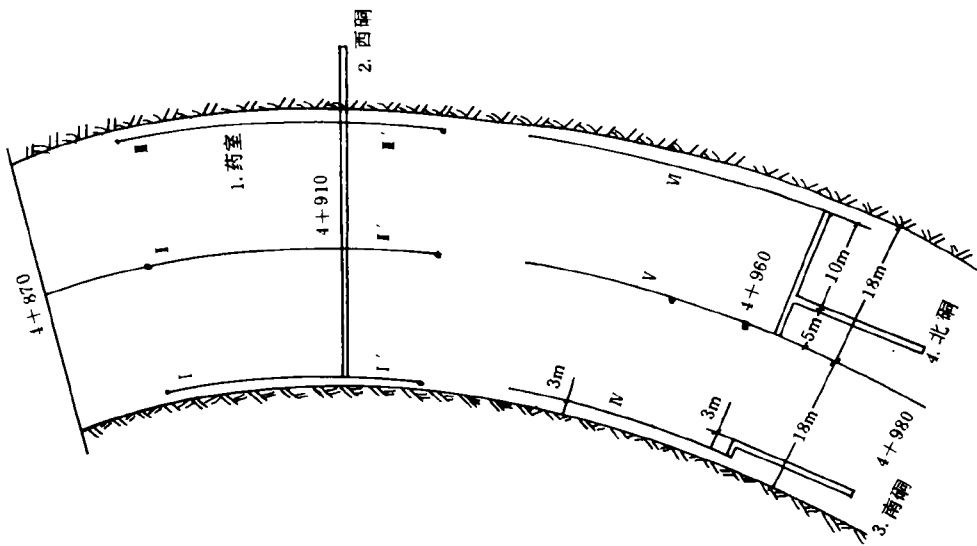
### 3 条形装药洞室爆破的地震效应

#### 3.1 工程概述

济南市东南外环路 4+600~5+000 段是历城区、乃是整个济南东南外环路的硬骨头工程,是保证外环路按期通车的关键路段,特别是 4+870~5+000 段最大挖深达 25m,土方量为 12.6 万  $\text{m}^3$ 。本区段为石灰岩,宽缓单斜构造,上部岩石风化较严重,节理、层理较发育。爆破区域为山梁顶部,北侧为冲沟。

为保证工期,并使爆破边坡稳定、岩石破碎好、震动小等,设计采用条形装药洞室爆破

技术,沿路基两侧和中间布置三条洞室,长共 352m,并采用单层、分段起爆的药包布置方式。(详见图 4)。



1. Chamber; 2. West cavern; 3. South cavern; 4. North cavern

图 4 药室布置(距离单位 m)

Fig. 4 Arrangement of the charge cavern

### 3.2 爆破参数

(1)单位用药量  $K$  本区石灰岩体坚固性系数为 6~8,根据爆破定额和有关类似爆破工程,结合实地小型模拟爆破漏斗试验,确定  $K=1.4$ 。

(2)爆破作用指数  $n$  综合考虑爆破区域地形及爆破后形成  $45^\circ$  边坡,确定靠北边坡的条形药包其  $n=1$ ,南边坡条形药室  $n=0.9$ ,路基中线的条形药室最后起爆,存在南北药包爆后的渣阻抗,需加大  $n$  值,取  $n=1.6$ 。

(3)装药量  $q$  条形药室单位长度装药量为

$$q = \frac{2(0.4 + 0.6n^2)}{n + 1} kw^2e, \quad k(\text{g/m})$$

式中: $w$  为最小抵抗线,  $m$ ;  $e$  为炸药修正系数,对铵油炸药,  $e=1.2$ ; 各药室装药量见表 4。

(4)压碎带厚度  $R$ , 亨利奇基于冲击波阵面之后介质可按不可压缩流体模型处理和认为柱状装药的爆轰是瞬间完成的假设得出

$$R_r = r_0 \left( \frac{u_0 \rho_m c_1}{10 S_c} \right)$$

式中: $u_0$  为孔壁周边围岩质点速度,  $u_0 = 0.5(\sqrt{A^2 + 4B} - A)$ ,  $A = (\rho' D + \rho_m a) / \rho_n b$ ,  $B = D^2 \rho' / 4b \rho_m$ ;  $\rho'$ 、 $\rho_m$  分别为炸药与岩体密度;  $D$  为爆速;  $a$ 、 $b$  为与岩体性质有关的冲击波常数,其它符号同前。

(5)条形药包部距  $S$  根据模型试验  $S = 0.5w(1+n)$ 。

(6)起爆时差 大爆破的起爆时差还没有较好的理论计算公式和实践经验,在此采用

了井巷爆破中的时差 100ms。分 9 段起爆,其药包起爆顺序为 VI→Ⅲ'→N→I'→Ⅱ→V→I→I'→I。最大起爆药量为 26 t。

表 4 药量计算表  
Table 4 Calculated charge

药室 编号	桩 号	药室标高 /m	抵抗线 /m	单位用药量 /(kg/m <sup>3</sup> )	爆破作 用指数	药量/(kg/m)
I (I')	4+920	240.64	24.1			860.1
	4+910	241.24	25.2			940.4
	4+900	241.84	24.8		0.9	910.8
	4+890	242.44	22.0			716.7
	4+880	243.04	23.4			810.9
I (I')	4+920	240.64				
	4+910	241.24				
	4+900	241.84	15		1.6	830.9
	4+890	242.44				
	4+880	243.04				
Ⅲ (Ⅲ')	4+920	240.64	9.7			158.1
	4+910	241.24	12.1			246.0
	4+900	241.84	13.0		1	284.0
	4+890	242.44	13.5	1.4		306.2
	4+880	243.04	15.2			388.2
N	4+960	238.24	15.2			342.2
	4+950	238.84	22.9		0.9	776.6
	4+940	239.44	23.0			783.4
	4+930	240.04	24.1			860.1
V	4+960	238.24				
	4+950	238.84	15		1.6	830.9
	4+940	239.44				
	4+930	240.04				
VI	4+960	238.24	6.1			62.5
	4+950	238.84	9.5		1	15.16
	4+940	239.44	10.0			168.0
	4+930	240.04	11.1			207.0
平均						609.3
总计						127953

### 3.3 爆破测震

此次硐室大爆破采用了三套测试系统,以监测爆破震动速度的垂直方向为主,兼有爆



破震动。加速度的数据。主要设备有 B&K 加速度传感器,CD-1 及磁电式速度传感器, TACK7 线与 SONY14 线磁带记录仪,HP35660A 信号处理机,CS2092L 型动态测试分析仪。测点布置与测试结果见表 5 和图 5~7。

表 5 爆破震动测试结果

Table5 Measuring result of the blasting seismic wave

测点 编号	测点至爆 源距离/m	比例 距离/m	速度最大值/(cm/s)			加速度 最大值/g	速度 主频/Hz
			z	x	y		
1	70	0.423	20.55				
3	216	0.137	5.33				19.53
4	266	0.111	4.36				14.65
5	194	0.153	7.95				19.53
6	254	0.117	4.72				14.65
7	314	0.094	3.27				14.65
8	536	0.055	3.35				12
9	548	0.054	2.13			0.357	12
10	730	0.041	1.62	2.83	1.40	0.348	38
11	755	0.039	0.73	1.90	1.67		9

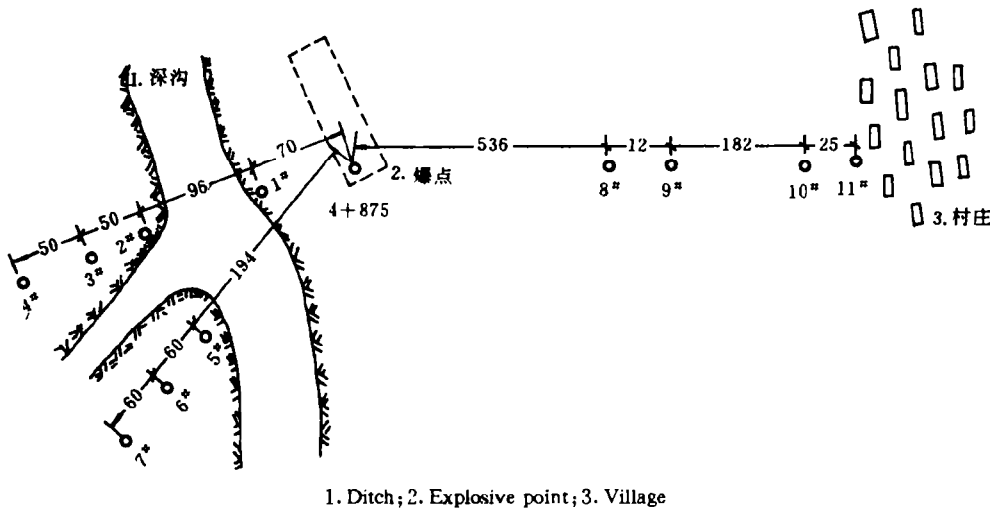


图 5 测点布置

Fig. 5 Arrangement of measuring piont

从表 5 测试数据看出:

- (1)条形药包抛掷相反方向上质点震动速度在远区有水平方向大于垂直方向的现象。
- (2)条形药包的震动在遇到深壕沟时,震动水平从 20.55 衰减到 7.95,衰减幅度相当大。
- (3)条形药室爆破的主震频率较低在 20Hz 内,且呈随距离增加频率缓慢降低的现象。
- (4)此次爆破分 9 段起爆,段间时差为 100ms,在震动波形上相互分离的 9 组波峰没

有出现,而且峰峰相连,即各段震动产生了相互作用,说明条形药室大爆破应采用时差大于100ms的微差爆破技术。

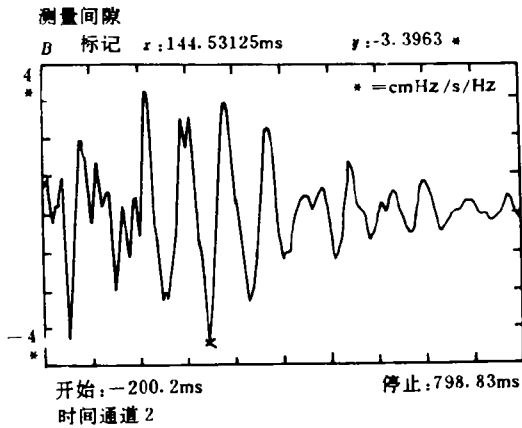


图6 测点9速度响应曲线(z向)

Fig. 6 Velocity response curve at measuring spot 9

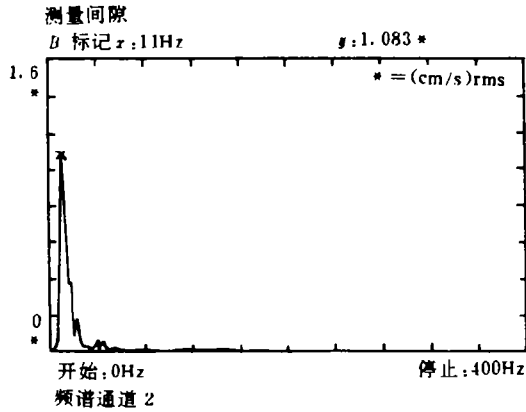


图7 测点9速度响应幅值谱(z向)

Fig. 7 Velocity response frequency spectrum

#### 4 结论

- (1) 条形装药硐室爆破的最佳空腔比为2~6。
- (2) 条形装药稳定传爆长度为10m。
- (3) 条形药包在 $l > 12r$ 之外的装药对药室端部破碎基本没有影响,两药室端部距离超过6m时可能会出现硬梗,在端部增大药量可扩大此距离。
- (4) 对硐室大爆破讲使地震波不发生迭加的微差时间必须大于100ms。
- (5) 实践证明,采用本文的爆破设计参数能取得良好效果。

## 参 考 文 献

- 1 秦明武,等. 空腔条形药包爆破的试验研究. 见:冯叔瑜编,工程爆破文集第二辑.北京:冶金工业出版社,1985. 80~87
- 2 亨利奇 J 著;熊建国,等译. 爆炸动力学及其应用. 北京:科学出版社,1986. 63~93.

## STUDIES ON TWIG CHARGE CAVERN BLASTING

Chen Shihai, Li Yumin, Lin Changmu, Zhao Jinqiao

(*Shandong Mining Institute, Taian, Shandong, 271019*)

**ABSTRACT** The urgent solving problems of twig shape charge cavern blasting, such as the optimum hollow rate, end effect of explosives are presented theoretically in this paper. The referred parameters of twig charge blasting are given, and their accuracy is tested and verified by an example. At the same time, seismic effect of blasting is discussed by the results of measuring seismic waves.

**KEY WORDS** twig charge, end effect, blasting, seismic effect, cavern blasting