

条形药包空腔爆破的应用及其机理分析

秦明武

(西安冶金建筑学院)

摘要 近年来条形药包空腔爆破的应用范围有了一定的扩展,并且在提高爆破效果和控制爆破危害等方面取得了显著效果。本文通过测试资料整理和理论分析,进一步探讨了空腔和条形在爆破中的作用机理以及为什么采用这种装药结构比常用的集中药包偶合装药爆破效果好的道理。

关键词 空腔爆破 条形药包 集中药包 偶合装药

一、前言

条形药包空腔爆破近年来在国内硐室爆破中得到广泛应用,如广西黎塘、柳州和甘肃永澄石灰石矿的剥离与开采;金堆城钼矿尾矿坝加固和路堤爆破;金厂峪金矿、汉江钢铁厂和厂坝铅锌矿爆破筑尾矿坝;牡丹江二电厂贮灰坝和四川大洪沟石棉矿拦泥坝的定向爆破;另外,还有岩塞爆破和炮孔扩壶爆破等工程。这些爆破均取得了较好的爆破效果,并且非常有效地控制了爆破危害。实践证明,这种新型装药结构与过去常用的集中药包(近似为球形药包)偶合装药相比,具有增加爆破方量、加大抛距、降低地震效应、爆堆整齐规整、有利于边坡稳定和端部效应小等一系列优点。

本文结合有关试验,对其机理进行了分析和探讨。

二、空腔药室的作用

1. 应力波峰值的变化

大量的实验表明,由于空腔内空气的缓冲作用,随着空腔比的增大,作用于药室壁面上的应力波峰值相应降低。因偶合装药作用于壁面上的压力较高、作用时间短和加载速率较高,因此,应力波衰减较快,较高的压应力峰值在药室附近形成强烈的破碎区。此区虽然范围不大,但却消耗了大量的爆能,故必然影响爆破效果。空腔药室爆破与此相反,随着空腔比的加大,应力波峰值降低、作用时间增加和加载速率较小,故其衰减较慢,如图1所示。另外,药室附近产生的裂隙较少,破碎程度较轻,故能提高爆破效果和有利于边坡的稳定。

我们曾在土中做过试验,当空腔比为4~6时与集中药包偶合装药相比,在其它条件相

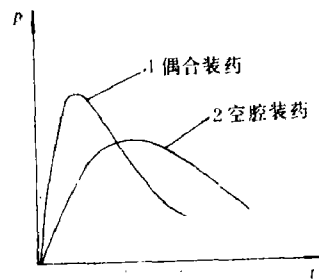


图1 爆压变化规律

Fig. 1 Variation of blasting pressure

1 — Coupling charge

2 — Charge with void space

1988年6月28日收到原稿,11月16日收到修改稿。

同或相似条件下，爆方单耗约降低32%、抛方单耗降低36%和抛掷率提高30%左右。从图1可见，在离药室一定范围之外，偶合装药的爆炸应力值将小于空腔装药的爆炸应力值。因此，空腔装药在中、远区空腔爆炸效果必然优于偶合装药，且能量分布较均匀。致于近区如前所述，虽然偶合装药应力峰值比空腔装药高，但衰减较快且作用范围较小。

2. 应力波作用时间的变化

当堵塞条件一定时，即炮泥质量 m 和炮泥飞散速度 v 一定时，则根据动量守恒定律应有

$$\int_0^t A p dt = m \cdot v \quad (1)$$

式中： p ——作用于壁面上的压力； A ——药室断面积； t ——壁面压力作用时间。

假设 $m v$ 为常数，则有

$$\int_0^t p dt = \text{const} \quad (2)$$

根据中值定理有

$$\bar{p} t = \text{const} \quad (3)$$

式中： \bar{p} ——作用于壁面上的平均应力值。

假设装药内的气体压力的变化遵循理想气体绝热膨胀规律，以条形药包为例，则有

$$p(\pi R^2 l)^\nu = p_0(\pi R_2^2 l_2)^\nu \quad (4)$$

式中： p ——距装药中心 R 处的压力； R ——距装药中心的距离（取其等于药室半径）； p_0 ——装药的爆轰压力， $p_0 = (1/4)\rho_0 D^2$ ； R_2 ——装药半径； l ——药室长度； l_2 ——装药长度； ν ——绝热指数，近似取 $\nu = 1.4$ 。

当药室长度足够长和采用连续装药时，可认为 $l = l_2$ ，则上式可写成

$$p = p_0 \left(\frac{R}{R_2} \right)^{-2\nu} \quad (5)$$

爆轰气体的平均压力为

$$\bar{p} = \frac{p}{2} = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \left(\frac{R_2}{R} \right)^{2.8} \quad (6)$$

根据式(3)应有

$$\bar{p}_1 t_1 = \bar{p}_2 t_2 \quad (7)$$

式中： \bar{p}_1 ——偶合装药时爆轰气体的平均压力。

$$\bar{p}_1 = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \quad (8)$$

\bar{p}_2 ——空腔时爆生气体施于壁面上的平均压力（按式(5)计算）； t_1 、 t_2 ——分别为偶合和空腔装药爆破时应力作用时间。

将式(5)和式(8)代入式(7)得

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\bar{p}_1}{\bar{p}_2} = \left(\frac{R}{R_2} \right)^{2.8} \quad (9)$$

式(9)说明, 室壁压力作用时间随空腔比的增大而加大, 二种装药结构压力作用时间的相对比值仅取决于空腔比。当然, 其中有个最优空腔比问题。当空腔比超过一定值后, 虽然应力作用时间长, 但由于空腔内的气体被压缩吸收能量增加, 所以应力反而降低, 就其爆破冲量来讲相应有所减少。例如, 我们在土中试验时, 最优空腔比为4~6, 当空腔比达到8时, 爆破效果却比偶合装药时差。

3. 应力波在介质分界面传播的变化

为了简化起见, 设应力波垂直入射分界面, 波的反射部分和透射部分的应力大小可由两个不同介质的边界条件来确定。当空腔爆破时, 可将炸药作为第一种介质, 间隙空气作为第二种介质, 入射、反射和透射应力之间有如下关系

$$\sigma_{\text{反}} = \frac{\rho_2 C_{p2} - \rho_1 C_{p1}}{\rho_2 C_{p2} + \rho_1 C_{p1}} \sigma_{\text{入}} \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{透}} = \frac{2\rho_2 C_{p2}}{\rho_2 C_{p2} + \rho_1 C_{p1}} \sigma_{\text{入}} \quad (11)$$

因为空气的密度(ρ_2)和其波速 C_{p2} 的乘积(波阻抗)和炸药的波阻抗相比小的多, 故可近似取 $\rho_2 C_{p2} \approx 0$ 。此时从式(10)可知, $\sigma_{\text{反}} = -\sigma_{\text{入}}$, 说明爆炸应力波与生成的反射波异号, 即为反射卸载拉伸波; 从式(11)可知, $\sigma_{\text{透}} = 0$, 即没有透射波, 全部生成拉伸应力波。这一结果不但说明空腔爆破可以提高爆破效果和有利于边坡稳定, 而且正象应力波由硬材料向软材料传入一样, 各种软垫起着减震作用。例如, 我们在土中做空腔爆破, 当空腔比为4~6时, 和集中药包偶合装药相比, 垂直振速几乎降低一半。由此可见, 空腔爆破具有显著的减震效果。

三、条形药包的作用

1. 爆破冲量的变化

(1) 集中药包

设爆轰气体膨胀的平均速度为 u , 质量为 m_1 、施于与气体运动方向成 α 角障碍物单位面积上的单位冲量

$$s = 2m_1 u \cos\alpha \quad (12)$$

而且, $m_1 = m \cos\alpha / 4\pi r^2$, $C = mg$, 则式(12)变为

$$s = \frac{u}{2\pi g} \times \frac{C \times \cos^2\alpha}{r^2}$$

令 $A = u/2\pi g$, 则

$$s = A \frac{C}{r^2} \cos^2\alpha \quad (13)$$

式中: m ——装药质量; g ——重力加速度; C ——装药重量; r ——与装药中心的距离。

$$u = \sqrt{2 \times 427 g Q_0} \quad (\text{米/秒}) \quad (14)$$

式中: Q_0 ——炸药的爆热(千卡/公斤)。

下面计算作用于位在距装药中心 a 处无限平面上的总冲量。为此, 在平面中划出一个半径为 x 、宽为 dx 的圆环, 如图2所示。该圆环的面积为

$$dF = 2\pi x dx \quad (15)$$

施加于圆环单位面积上的单位冲量，由式(13)确定。由直角三角形得出

$$a = r \cos \alpha = x \operatorname{ctg} \alpha \quad (16)$$

将式(16)代入式(13)中，得

$$s = (AC \cos^4 \alpha) / a^2$$

由式(15)得

$$dF = \{(2\pi a^2 \operatorname{tg} \alpha) / \cos^2 \alpha\} dx$$

因此，总冲量等于

$$S = \int s dF = 2\pi AC \left[\frac{\sin^2 \alpha}{2} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = \pi AC \quad (17)$$

(2) 条形药包

条形药包爆破时，作用于固定障碍物单位面积上的单位冲量，计算方法同上。当条形药包较长时（设条长为 L ），且障碍物面系和装药纵轴平行，单位冲量为

$$s = \frac{Cu \cos^2 \alpha}{\pi g L r} = 2A \frac{C}{Lr} \cos^2 \alpha \quad (18)$$

此时的总冲量为

$$S = L \int s dF = 2AC \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^2 \alpha d\alpha = 4AC \quad (19)$$

因此，在装药量相同的情况下，条形装药的总冲量将大于集中装药，二者的比值为 $4:\pi$ ，即约增加27%的总冲量。

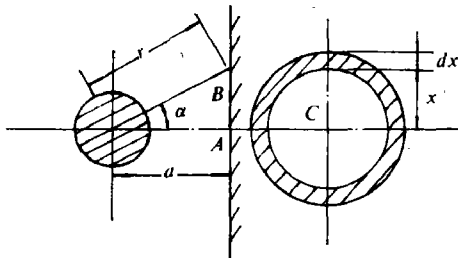


图2 冲量计算示意图

Fig. 2 Diagram of impulse calculation

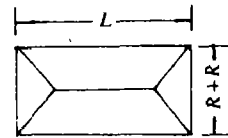


图3 端部效应示意图

Fig. 3 Diagram of end effect

2. 端部效应的变化

在爆区内及其附近如有断层、大裂隙、冲沟等地质构造时，为了避免侧向逸出，在集中装药爆破时，侧向不逸出半径（ R ）应大于最小抵抗线（ w ），一般取 $R = 1.2w$ 。如按此处理，则条形药包的长度势必受到限制，这样将会影响爆破效果。为此，现在就条形药包的不逸出半径进行如下探讨。

假设条形药包的形状为正圆柱体，当其爆破时，应力波的主应力方向垂直于条形药包的纵轴，而其端部的应力仅有以圆柱体底面为底的直角圆锥体内的药量有所贡献，如图3所示。该圆锥体的体积为

$$V_1 = \frac{\pi R^3}{3} \quad (20)$$

整个装药的体积为

$$V_0 = \pi R^2 L \quad (21)$$

二者的体积比为

$$\eta = \frac{R}{3L} \quad (22)$$

由式(22)可见,当装药半径 R 相同时, η 值随装药长度 L 的增加而减少,即条长越长,端部药量所占整个药量的比重愈小,端部效应也就越小。如在牡丹江贮灰坝和汉钢尾矿坝的爆破工程中,个别药室的逸出半径等于或小于最小抵抗线,均取得了较好的爆破效果就是这个道理。

3. 速度场分布的变化

分析高速摄影资料表明,集中药包偶合装药爆破时,速度场的分布是很不均匀的,最小抵抗线出口方向上速度最大,两侧速度渐小;致使其出口方向上个别飞石抛的较远,两侧介质又抛的较近,因而导致爆堆不集中。我们在土中用条形药包试验时,曾用二台相机进行高速立体摄影观测,其测点布置如图4所示。图5和图6分别表示初速度方向和大小的分布。

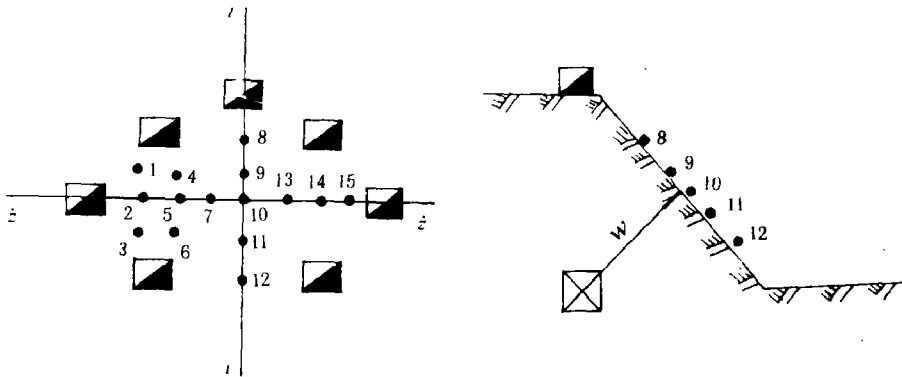


图4 高速摄影测点布置图

Fig. 4 Location of measuring points for high-speed motion-picture camera

图5中虚线为待测点 2^* 、 5^* 、 7^* 和 10^* 等的运动轨迹(代表初速度方向)在水平面上的投影,可见条形药包爆破时所形成的初速度方向明显向对称轴集中,侧向扩散小,这正是堆积集中的原因所在。图6中横坐标表示待测点离最小抵抗线出口点(10^*)的距离, i 和 j 分别为坡面上下和水平方向的剖面线。图中1、2、3及1'分别为 $v_L = w \sim z$ 、 $v_L = w \sim i$ 、 $v_L = w \sim j$ 及 $v_L = 0.6 w \sim z$ 的关系曲线。曲线1与1'表明,药包顺 z 方向延长,在条长范围内速度分布较均匀,药包端部以外速度递减率明显增大。另外,当条长 $L=0.6 w$ 与 $L=w$ 相比,速度变化较大,说明条长越长速度场分布愈均匀。曲线2、3表明,药包轴线两侧方向的初速度递减率较大。从鼓包表面速度分布规律分析,进一步说明条形药包有利于改善端部效应。

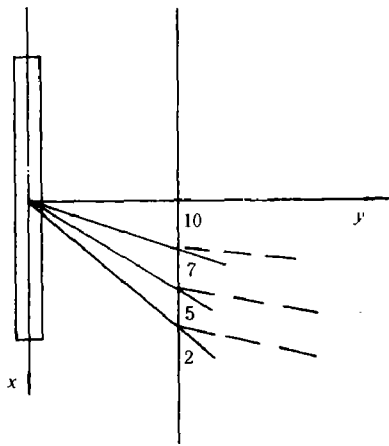


图 5 初速度方向分布

Fig. 5 Direction distribution of initial velocity

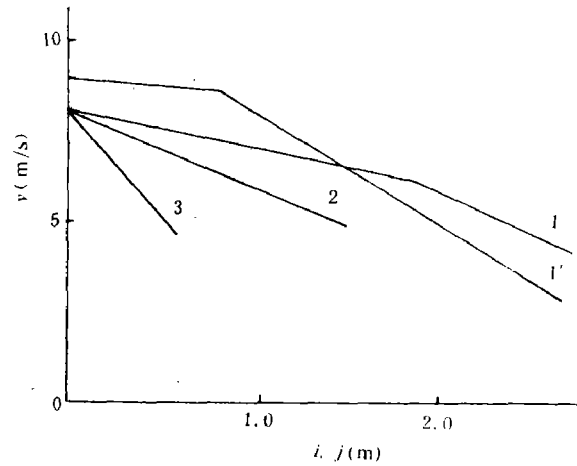


图 6 初速度大小分布

Fig. 6 Magnitude distribution of initial velocity

四、结 束 语

上面分别叙述了空腔与条形药包的作用，空腔主要是起缓冲作用；条长主要是起能量和速度场分布均匀化的调节作用，空腔条形装药爆破是以上综合作用的结果。

我们在黄土中曾做如下试验，在其它条件固定或相似的情况下，仅变化条长和空腔比两个因素，其对比结果如表 1 所示。从表中可以看出，空腔的作用是主要的。

表 1 条形和空腔爆破作用分析

Table 1. Analysis of blasting effect of column charge and void charge

装药结构	最小抵抗线 (m)	装药量 (kg)	条长 (m)	空腔比	爆方 (m ³)	抛方 (m ³)	质心抛距 (m)	垂直振速 (cm/s)
只有条长无空腔	3.0	32.5	3.0	1.0	104	37	7.2	5.0
既有条长又有空腔	3.0	32.5	3.0	5.0	115	50	10	2.9

总之，在硐室大爆破中，无论是抛掷还是松动爆破，采用带有空腔的条形药包可以改善爆破作用条件：提高炸药能量的有效利用率；有效控制爆破危害作用；这已为工程爆破的实践所证明。上面虽然通过某些测试资料和理论分析，进一步验证和阐述了这种装药结构的机理，但仅仅是粗略的。为了使这种具有发展前途的装药结构，能在正确理论的指导下得以迅速推广和应用，今后应对其机理加以深入探讨和研究。

参 考 文 献

- [1] 秦明武, 集中药包空气间隙装药试验研究, 西安冶金建筑学院学报, (3) (1980).
- [2] 秦明武, 我国药室爆破技术发展趋势展望, 陕西冶金, (1) (1982).
- [3] 秦明武, 空腔条形药包爆破的试验研究, 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, (1985).
- [4] 秦明武, 黄土中条形药包空腔爆破, 爆破器材, (1) (1983).
- [5] 秦明武, 土中条形药包空腔爆破抛掷堆积分析, 力学与实践, (1) (1985).
- [6] 秦明武, 复杂条件下爆破筑尾矿坝的实践, 爆破, (2) (1987).
- [7] 秦明武, 大空腔比条形分集药包在爆破筑坝中的应用, 金属矿山, (11) (1987).
- [8] 朱瑞康等, 条形药包爆破时的空腔效应, 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, (1985).
- [9] 吴灵光, 土中空腔条形药室爆破的鼓包运动特征, 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, (1985).
- [10] Власов. О. Е. 著, 钟以文译, 爆炸动力学, 中国人民解放军军事工程学院, (1957).

APPLICATIONS AND MECHANISM OF AIR-CUSHION BLASTING WITH COLUMN CHARGE

Qin Mingwu

(Xian Institute of Metallurgy and Construction Engineering)

ABSTRACT Recently air-cushion blasting with column charge has been widely used and gained remarkable results in improvement of fragmentation and controlling damage. Based on the experimental data and theoretical analysis, this paper studies the mechanism of air-cushion and column charge in blasting and explains the reason why this charge structure is better than the traditional concentrated and coupling charge.

KEY WORDS air-cushion blasting, column charge, concentrated charge, coupling charge.