

水泥试块中小药量爆破漏斗试验 —球状和柱状装药爆破效果分析

成裕煌

(1983年6月2日收到)

本文通过四对相同药量,八组长径比 n 不同的球状和柱状装药的爆破漏斗实验室试验结果,比较柱状和球状装药爆破效果的差异,分析改变药包长径比 n 对形成漏斗的影响,探索近似球状装药爆破漏斗特征的极限值 n_{max} 及柱状装药爆破破岩的特点。试验表明, $n_{\text{max}} \approx 8$ 。对试验中出现的现象提出了初步的看法。

一、前 言

爆破漏斗试验是研究爆破的一种方法。通过爆破漏斗来探讨爆破机理,不仅是许多实际爆破工程的基础,而且是定性或定量的探讨一些爆破问题的方法和手段。因而对爆破漏斗的研究不仅有其实际意义,也有理论探讨的价值。

药包几何形状是影响爆破效果的一个重要因素。在露天或井下,有大量的爆破采用柱状装药。本文的研究是在水泥砂浆试块中,进行了装药量为 $0.65 \sim 1.25 \text{ g}$ 的爆破漏斗试验。试验比较了球状装药(长径比 $n \approx 3$)与一般柱状装药($n = 4.8 \sim 9.3$)的爆破效果,从中探索柱状装药爆破破岩的特点及球状装药的爆破漏斗理论近似适用于柱状装药长径比 n 比较合理的范围。

二、爆破漏斗实验室试验

1. 原 理:

爆破漏斗的理论根据之一是所谓“立方根比例规律”^[1],或称之为Lampson比例。这个比例是根据量纲的推理,仅仅说明大比例的原型事件与小比例的模型事件之间的线性量纲的比例因素,是与两个事件得出的数值的立方根成正比的。因此可以说,在爆破实验中,一个特殊的线性量纲 L 可表示为 $LW^{-1/3}$,其中 W 为炸药当量。即是说,在原型事件的两点之间的线性距离的关系与模型上的相应的点的比较为:

$$L_p/L_m = (W_p/W_m)^{1/3} \quad (1)$$

脚标 p 与 m 相应表示原型与模型。

这种理论已在岩石爆破研究中受到广泛的应用，并且证明为相当接近于实际的。

2. 介质及小型雷管药包：

介质材料为水泥砂浆试块。400号矿渣硅酸盐水泥，70~120目粒度的细河砂经冲洗，晒干、过筛。水灰砂配比为0.5：1：3。人工搅拌，捣固，保养期30天。试块尺寸： $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$ 。每块使用一次，在试块中心钻孔。试块物理力学性质见表1。小型雷管药包的底药是5%颗粒状石蜡钝化黑索金。装药密度 $\rho = 1.1 \text{ g/cm}^3$ ，爆速 5936 m/s 。按药量来分共四种：0.65；0.85；1.05；1.25(g)。按装药几何尺寸共分为两大组，八小组，见图1。

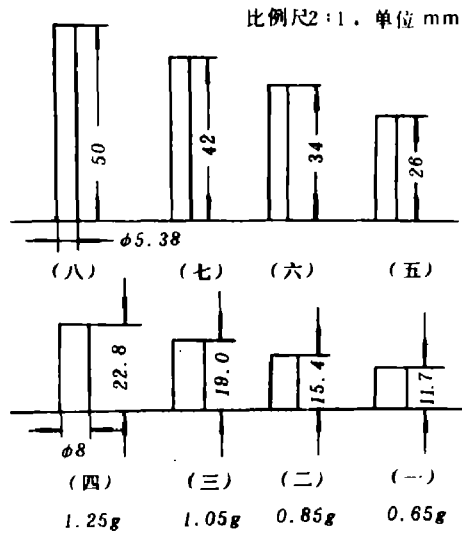


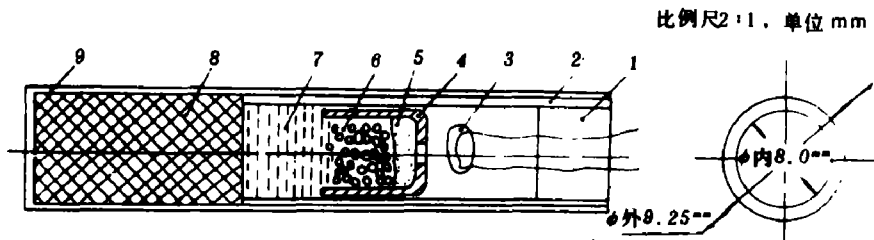
图1 各组装药几何尺寸及装药量

表1 水泥砂浆试块物理力学参数

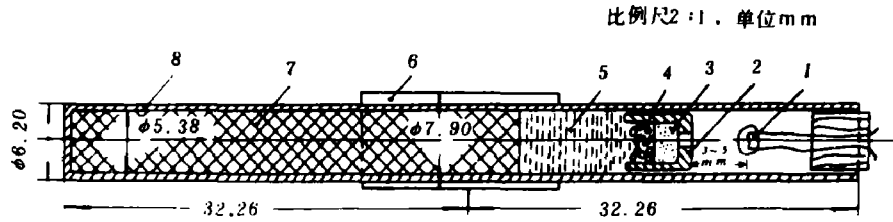
试块物理力学性质	数值	备注
1. 极限抗压强度 σ_c (kg/cm^2)	176	实测
2. 极限抗拉强度 σ_t (kg/cm^2)	15.7	按文献(2)计算。
3. 杨氏弹性模量 E (kg/cm^2)	2.85×10^7	按文献(2)计算。
4. 纵波波速 V (m/s)	3048	实测
5. 比重 ρ (g/cm^3)	2.085	实测

注：试件模型尺寸： $7.5 \times 7.5 \times 7.5 \text{ cm}^3$ ，折算系数取0.88。

近似球状装药的 n (以下简称球状)：1.5；1.9；2.4；2.8。柱状装药的 n ：4.8；6.3-7.8；9.3。药包内部结构见图2。



1. 塞子；2. 卷纸四层；3. 引火头；4. 8#雷管壳改制加强帽；
 5. THPC 80 mg；6. RD1333 250 mg；7. 松装RDX 0.35g；
 8. RDX 0.9g, $\rho_s = 1.1 \text{ g/cm}^3$ ；9. 卷纸长105.56 mm，四层。
- (a) 近似球状(简称球状)药包内部构造图(装药量 $Q = 1.25 \text{ g}$ ，长径比 $n_s = 2.8$)



1. 引火头; 2. 铝加强帽; 3. 史梯芬铅 (THPC) 60 mg;
4. 羧甲基纤维素 (RD1333) 120 mg; 5. 松装黑索金 (RDX) 150 mg;
6. 套接纸壳; 7. 0.9 g 黑索金 (RDX); 8. 铜管壳。
(b) 柱状装药药包内部构造图 (装药量 $Q = 1.05 \text{ g}$, 长径比 $n = 7.8$)

图2 药包内部构造

3. 实验方法:

试验是在不耦合的情况下进行的。对球状装药不耦合系数为 1.31, 对柱状为 1.49。

钻头直径: 对球状装药 $\phi 10.5 \text{ mm}$; 对柱状装药 $\phi 8.0 \text{ mm}$ 。

钻孔深度视药包置埋深度 x 而定。装药深度 x 是药柱中心到自由面的垂直距离。对一种药包的一组试验, x 自钻孔深度等于药包长度始, 每隔 $0.5 \sim 1.0 \text{ cm}$ 往下取点, 逐步加深, 直至在试块表面不出现漏斗为止。此时 x 为临界深度。

用细河沙堵塞, 正向起爆。爆破后, 将漏斗内残渣落石吹净, 然后量取漏斗各参数及残孔的参数, 绘经纬向剖面图。漏斗及下部残孔的体积用填满的砂子来量取。对每一参数测量 2 ~ 3 次取其平均值。数据的量取如图 3 所示。试验数据见表 (2)。

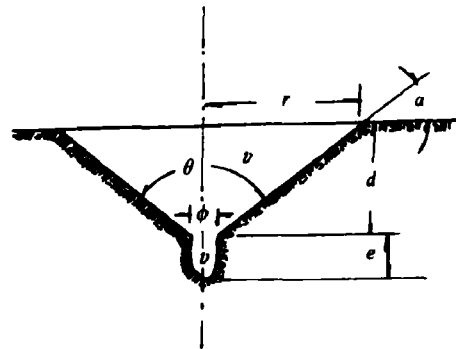


图3 爆破漏斗数据的量测

三、柱状装药与球状装药爆破漏斗的比较

在垂直于一个自由面的情况下, 由浅至深爆破给定的药包后将产生漏斗, 其漏斗参数 (体积 v , 半径 r , 深度 d) 随装药深度不同而变化。研究这一物理过程, 然后比较不同药量和几何形状的药包在相同介质情况下, 这一过程的差异, 分析其原因, 是本文的主要目的。

在这一物理过程中, 比较重要的参数有:

最佳装药深度—产生最大漏斗体积时的装药深度。

最大漏斗参数—在获得最大漏斗体积时, 其体积、半径、深度值。

临界深度—爆破后在自由面上不产生漏斗的最小深度。(按 C. W. 利文斯顿的定义为在自由面上不出现裂缝的最小深度¹, 由于本文试验是在无约束的试块上进行的, 故如此提法)

数据处理:

爆破漏斗原始数据用立方根比例法则来分析

表 2 爆破漏斗实测数据

装药深度 $x(cm)$	漏斗体积 $v(cm^3)$	漏斗半径 $r(cm)$	漏斗深度 $d(cm)$	装药深度 $x(cm)$	漏斗体积 $v(cm^3)$	漏斗半径 $r(cm)$	漏斗深度 $d(cm)$
装药量 $Q = 0.65g$ $n_1 = 1.5$				装药量 $Q = 0.65g$ $n_1 = 4.8$			
4.0	129	6.5	3.0	4.0	92	6.0	2.8
5.5	59	4.85	3.35	4.5	115	6.1	2.9
6.0	58	5.0	2.7	5.5	188	6.5	3.1
6.5	74	4.5	2.65	6.0	43	4.1	2.3
7.0	125	6.3	3.1	6.5	80	5.3	2.7
8.0	247	8.0	4.45	7.0	119	6.0	3.0
8.5	0	0	0	7.5	295	10.0	3.1
装药量 $Q = 0.85g$ $n_2 = 1.9$				装药量 $Q = 0.85g$ $n_2 = 6.3$			
5.0	188	7.5	3.2	5.0	168	6.5	3.3
6.5	43	4.5	3.0	6.0	45	4.3	2.4
7.0	135	7.0	3.0	7.0	84	6.0	2.8
8.0	225	7.5	4.4	7.5	350	9.5	3.5
8.5	196	7.0	4.2	8.0	418	10.0	3.9
9.5	481	10.5	4.9	8.5	450	10.5	4.0
10.0	0	0	0	9.0	0	0	0
装药量 $Q = 1.05g$ $n_3 = 2.4$				装药量 $Q = 1.05g$ $n_3 = 7.8$			
5.0	186	7.0	3.9	5.0	118	6.25	3.2
6.0	85	6.0	3.1	5.5	265	9.0	3.0
6.5	100	6.5	2.6	6.5	308	8.5	4.4
7.5	181	7.5	3.0	7.0	145	7.1	3.1
8.0	410	10.5	4.0	8.0	539	10.5	4.9
8.5	347	6.0	4.6	9.0	207	8.5	3.2
9.5	623	11.5	5.0	9.5	0	0	0
10.0	0	0	0				
装药量 $Q = 1.25g$ $n_4 = 2.8$				装药量 $Q = 1.25g$ $n_4 = 9.3$			
5.5	94	5.5	3.0	5.0	138	6.7	3.0
6.0	62	5.2	2.7	5.5	162	7.2	3.2
6.5	61	5.0	2.6	6.0	204	7.5	3.5
7.0	188	7.0	4.4	6.5	228	11.0	4.0
8.0	362	9.0	4.5	7.0	86	6.0	2.3
8.5	402	9.0	4.8	7.5	88	6.0	2.5
9.0	410	9.0	5.2	8.0	168	8.0	3.0
9.5	750	12.0	5.2	8.5	249	8.5	3.2
10.0	0	0	0	9.0	693	12.1	5.2
				9.5	523	10.0	5.0
				10.0	0	0	0

$$\left. \begin{aligned}
 \text{比例漏斗体积 } V: & \quad V = v/Q \\
 \text{比例漏斗半径 } R: & \quad R = r/Q^{1/3} \\
 \text{比例漏斗深度 } D_r: & \quad D_r = d/Q^{1/3} \\
 \text{比例装药深度 } X: & \quad X = x/Q^{1/3}
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 v, r, d, x 分别为各比例值对应的原始值, Q 为装药量。本文假设 $Q^{1/3}$ 等于以 cm 为单位的数值, 因此, V, R, D_r, X 都化成无量纲数量。

实验中发现, 无论是柱状装药还是球状装药, 当装药深度逐渐增大时, 漏斗体积增大到最大值后迅速下降到零。这是由所用炸药的性质和砂浆试块的物理力学性质决定的。在本文所讨论的 n 的范围 ($1.5 \sim 9.3$) 内与 n 关系不大。因此, 漏斗各特征参数 (比例值) 随比例装药深度 X 而变化的回归直线的比较, 着重自 X 始值至最佳值之间。

根据漏斗各特征参数点的分布, 按最小二乘法原理, 自始值至最佳值用直线拟合散点。最佳值与临界值之间用直线相连。

本文共进行以下几种比较:

(1) 装药量 Q 相同, n 不同, 四对八组, 漏斗三个比例参数随比例装药深度 X 而变化的回归直线的比较。(图 4、5、6。)

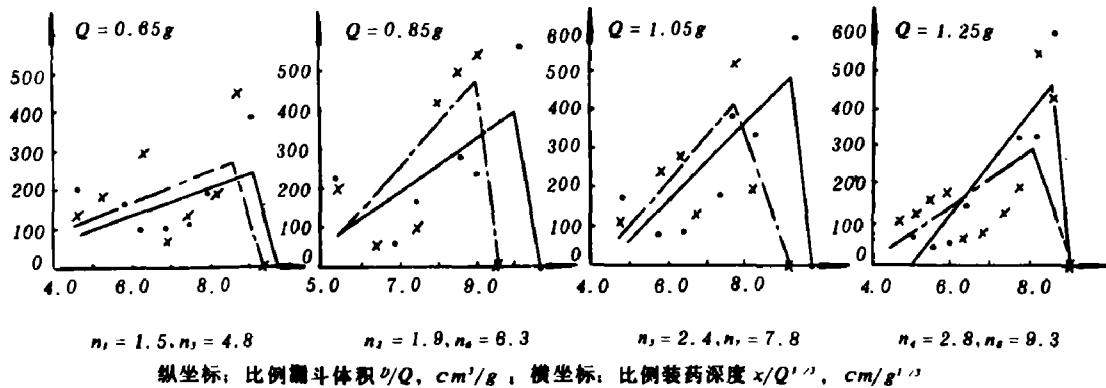


图 4 药量相等, 球、柱状装药, 爆破漏斗比例漏斗体积随比例装药深度变化的回归直线的比较
 图例: \cdot 球状装药实测点; \times 柱状装药实测点; — 球状装药回归线; - - - 柱状装药回归线。

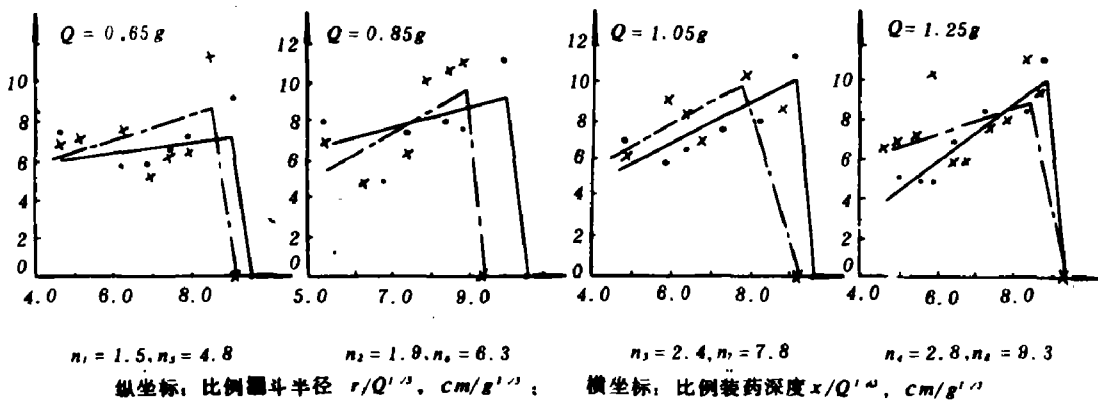


图 5 药量相等, 球、柱状装药, 爆破漏斗比例漏斗半径随比例装药深度变化的回归直线的比较
 图例: \cdot 球状装药实测点; \times 柱状装药实测点; — 球状装药回归线; - - - 柱状装药回归线。

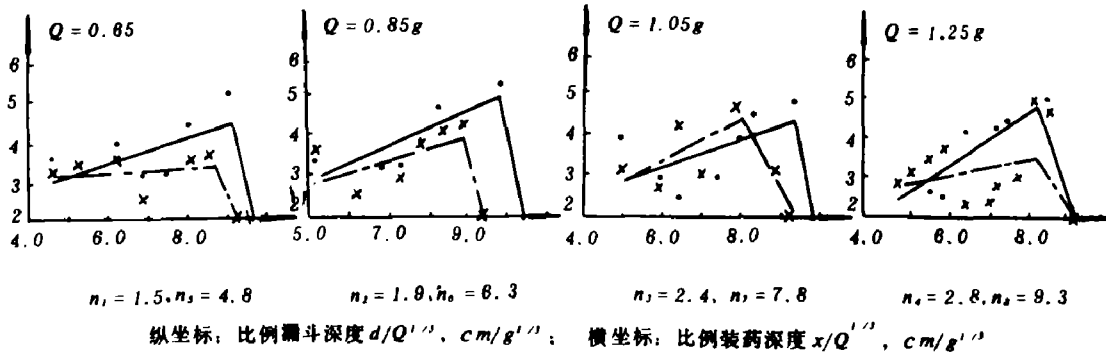


图 6 药量相等，球、柱状装药，爆破漏斗比例漏斗深度随比例装药深度变化的回归直线的比较
图例：· 球状装药实测点；× 柱状装药实测点；— 球状装药回归线；- - - 柱状装药回归线。

(2) 球状装药四组之间，漏斗三个比例参数随 X 变化回归直线的比较 (图 7)。

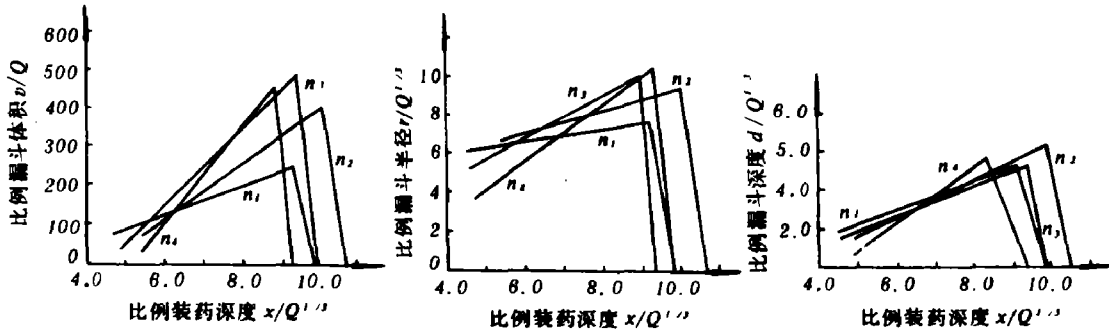


图 7 球状装药，不同药量之间，比例漏斗参数随比例装药深度变化的回归直线比较

(3) 柱状装药四组之间，漏斗三个比例参数随 X 变化回归直线的比较 (图 8)。

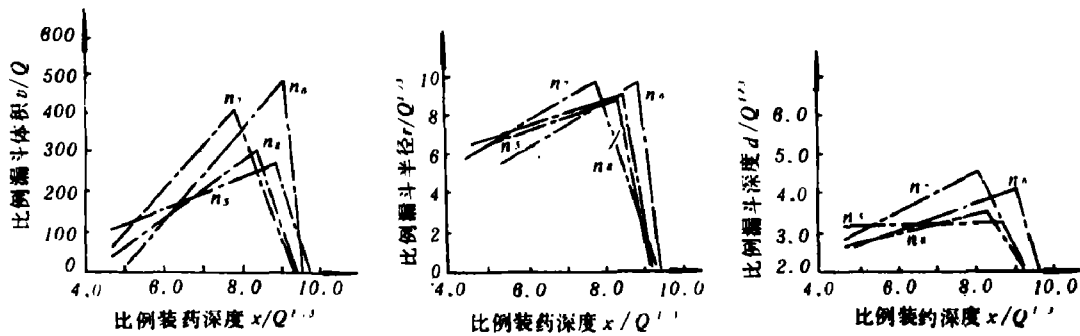


图 8 柱状装药，不同药量及长径比之间，比例漏斗参数随比例装药深度变化的回归直线比较。

(4) 八组试验最佳比例漏斗参数的比较 (图 9)。

从图 4 中可看出：对比例漏斗体积而言，第一对 $Q = 0.65 g$ ， $n_1 = 1.5$ ， $n_2 = 4.8$ 及第三对 $Q = 1.05 g$ ， $n_3 = 2.4$ ， $n_4 = 7.8$ ，其回归直线两两平行或大致平行。第二对 $Q = 0.85 g$ ，

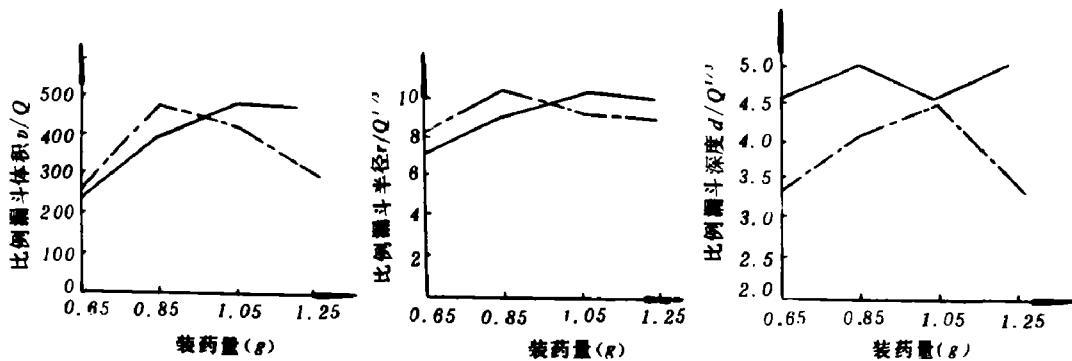


图9 装药量不同时,球状装药和柱状装药最佳比例漏斗参数的比较(回归值比较)

$n_2 = 1.9$, $n_6 = 6.3$, 柱状装药回归直线的斜率大于球状。第四对 $Q = 1.25 \text{ g}$, $n_4 = 2.8$, $n_8 = 9.3$, 与第二对情况相反。

图5表明,比例漏斗半径之间的差异较之体积要小。其回归直线的各对比较结果大致与体积相似。

从图6可看到,比例漏斗深度之间的差异较大,除第三对之外,其余三对都是柱状装药为小。

由图7,球状 V 、 R 、 D 随 X 的变化率随着 Q 的增加而增大, R 及 D 的最佳值之间差别不大。

图8显示,柱状 V 、 R 、 D 随 X 的变化率,当 n 从4.8增大到7.8时,由小变大,从7.8到9.3时又由大变小。

由图9,八组最佳漏斗参数对比结果是:前三对,对应药量之间三个参数变化不大,第四对($n_4 = 2.8$, $n_8 = 9.3$)差别较大。

通过以上对比可看出:

当柱状装药直径为定值时,其比例漏斗参数随 n 的变化有一个极值。在 n 小于或等于该极值时,比例漏斗参数随 X 而变化的回归直线斜率随 n 的增大而增大,亦即比例漏斗参数随 n 的增大而增大,和等药量的球状装药之间差异不大。当 n 超过该极值后,随 n 的增大,漏斗各比例参数反而下降。在本文试验条件下, $n_{\text{最佳}} = 7.8 \sim 8$ 。

从图4~9还可看出,当 $n = 6.3$ 时,爆破漏斗比例参数随比例装药深度 X 的变化率较之等药量的 $n = 1.9$ 时为大。其最佳 V 的回归值470大于 $n = 1.9$ 时的对应值400。 $n = 6.3$ 时爆破效果优于等药量的球状装药,为最佳长径比,其单位药量获得最佳爆破效果。

在 V 、 R 、 D 三个参数中,等药量球、柱状装药比较明显的差别在于 D 。

柱状 X 的分布区间比球状者要小,其获得最佳漏斗参数及临界值时的 X 都要小于对应的球状。

球状与柱状爆破效果的相同之处在于其比例漏斗参数随比例装药深度的变化特点大体一致。由表(2)及图4~9,比例漏斗参数随比例装药深度的变化都呈现了小→大→小→最大→0这种特点。在两个峰值间出现了一个极小值。例如,球状 V 随 X 的变化,就呈现了这种特点。原因是 X 不同,形成漏斗机理不同。下面用原始数据来分析:

在浅部, $4.0 \leq x \leq 6.5 \text{ cm}$ 时, 爆生气体大部分冲出钻孔口耗散在大气中, 漏斗的形成主要是由于介质中应力波的作用, 浅部的最小抵抗线小, 在直达入射应力波压缩及切向拉伸、反射应力波的拉伸作用下形成较大的漏斗。

在深部, $6.5 \leq x \leq 10 \text{ cm}$ 时, 由于堵塞加长, 爆生气体发挥了较大的作用。漏斗的形成是应力波、反射波、爆生气体共同作用的结果。

在上述二者之间, 尽管最小抵抗线加大, 但爆生气体尚未能发挥作用, 大部分仍耗散在大气中, 应力波在爆破近区消耗大量的能量, 形成“封闭式”爆破粉碎圈, 扩大了药室腔。在反射应力波的作用下形成剥落漏斗。该漏斗为这一组试验中漏斗的极小值。

柱状与球状爆破效果差异的原因是介质中的应力波和爆生气体对介质作用的时间及方式发生了变化。

起爆方式对球状影响不大, 但对柱状, 不同的起爆方式将产生不同的作用, 造成不同的破坏形式。柱状时应力波及爆生气体对自由面作用减弱了, 能量沿柱轴线分布在更大的范围内, 单位装药长度沿最小抵抗线方向造成岩石的破坏作用减弱了, 故漏斗深度较球状小。它对平行于自由面方向的侧向作用的加强在一定深度内扩大了漏斗半径。故其漏斗半径比等药量球状稍大。但 $n > 7.8$ 以后, 它对侧向作用的加强增大漏斗半径的效果已不显著, 因其装药直径是定值, 限制了它在自由面上造成破坏的范围。

几点看法

1. 药包几何形状是影响爆破效果的重要因素之一。柱状装药的长径比 $n < 8$ 时, 其爆破漏斗特征参数可按等药量的球状装药近似处理。 $n > 8$ 时, 则不可以。亦即近似球状装药爆破漏斗特征的极限值为 $n = 8$ 。

2. 药包几何形状的变化有利于提高爆破能量利用系数, 改善爆破效果。试验中发现, 柱状装药 $n = 6.3$ 时, 爆破漏斗特征参数要优于等药量的球状装药。 $n = 6.3$ 为最佳长径比。对于给定的炸药, 介质及柱状装药的直径, 一定存在一个最佳长径比 n 。此时, 柱状装药的爆破效果要优于球状装药。该最佳长径比 n 随爆破条件的不同而异。最佳 n 值是探索柱状装药对自由面破坏的力学效应的一个重要的参数, 有待于进一步研究。

3. 柱状与球状装药在不同深度爆破后, 漏斗的特征曲线上出现两个峰值。在 $X = 6 (\text{cm} / g^{1/3})$ 左右形成第一个峰值, 在 $X = 8 \sim 9.5 (\text{cm} / g^{1/3})$ 时形成第二个峰值。第二峰值为最大值。它反映了 X 不同时形成漏斗的机理不同。在实际土岩爆破作业时应考虑在不同深度处漏斗形成机理不同对漏斗几何尺寸的影响。

4. 通过本文试验及对结果的比较与分析, 为认识柱状装药的爆破特点, 最终揭示柱状装药的爆破机理, 从漏斗这个侧面提供了实验数据和观察结果。

5. 近似球状药包爆破漏斗特征的极限值 n 受介质、炸药的性质及密度、炸药量等因素的影响, 为此, 应进行大量的试验。

由于试验是在有限尺寸且四周无约束的试块上进行的, 试块是人工捣固、搅拌的, 试验仅局限于小药量, 共进行了 137 次, 次数也不够多, 同时对药包几何形状的改变引起介质中波作用的差异未能进行观察研究。所以, 上述讨论结果与实际土岩爆破作业将产生一定的差异有待于进一步探讨。

本文在进行实验和写作过程中,得到中国矿业学院北京研究生部杨善元教授、王树仁付教授、杨永琦老师的细心指导,该部爆破实验室及北京工业学院841教研室对实验给予很大帮助,特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Harry, C. Saxe, Explosion Crater Prediction Utilizing Characteristic Parameters, *Rock Mechanics*, ed. C. Fairhurst, (1963), 273.
- [2] 淮南煤炭学院, 山东矿业学院编, 建井工程结构, 下册, 1979, 6, 第一版, 2:
- [3] 潘静澜, 隧道译丛, 78(5), 1.

EXPERIMENTS OF BLASTING FUNNEL WITH A SMALL AMOUNT OF POWDER IN CEMENT BLOCKS - ANALYSIS ON THE BLASTING EFFECTS OF SPHERICAL AND CYLINDRICAL CHARGES

Cheng Yuhuang

Abstract

The experiments of blasting funnel with spherical and cylindrical charges were performed in our laboratory in four pairs of charges with the same q quantity and eight groups of package with different length-diameter ratios. In this paper, we compare the results of blasting funnel effect of cylindrical and spherical charges; analyse the influence of changing the length-diameter ratio of explosive package on the funnel formation; estimate the limit value n_{max} of blasting funnel characteristics of the ball-like package and the characteristics of cylindrical charge on the breaking of rocks. The experiments show that $n_{max} < 8$. We also give some superficial point of views on the phenomena observed in the experiments.