# 基于爆破漏斗试验的深孔爆破参数选择

付宏宁[1],刘海洋[1],侯志永[1],匡正平[1],刘再道[1],杨 帆[1],马云超[1],
刘东锐[2],张为星[2]

(1.中核韶关锦原铀业有限公司,广东 韶关 512329;
2.长沙矿山研究院有限责任公司,湖南 长沙 410012)

**摘要**:在采用深孔爆破回采时,爆破参数一般由炮孔直径推导的经验值确定,存在爆破质量偏低的问题。笔者进行了爆破漏斗试验,由单孔爆破漏斗试验得到装药质量为 300 g 的药包的最佳埋深为 0.65 m,最佳漏斗半径为 0.63 m;由变孔距多孔同段爆破试验得出最佳孔间距为 0.9~1.0 m,最佳孔间距与最佳漏斗半径的比为 1.43~1.59;由斜面台阶爆破试验初步得到最佳的最小抵抗线为 0.41 m。基于爆破相似定律,计算得到直径 65 mm 深孔的最佳孔间距为 1.7 m;考虑到斜面台阶爆破试验结果不理想,采用扇形布孔的孔底密集系数经验值(1.0~1.3)计算后,推荐深孔爆破排距为 1.3 m。

**关键词**:硬岩矿山;深孔爆破;爆破漏斗试验;爆破参数
**中图分类号**:TD868 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)04-0008-05
**DOI**:10.13426/j.cnki.yky.2023.04.05

装药爆破是开采硬岩矿山的主要方法,爆破设计与施工是矿山最重要的工作之一。爆破理论可有效指导设计与施工,但由于工程爆破的"瞬时性""高危性",理论研究尚不成熟,爆破参数的选择主要采用基础理论与工程经验结合的方法[1-2]。在爆破理论的发展过程中,利文斯顿爆破漏斗理论占有非常重要的位置,是用来确定爆破参数的基本方法,在硬岩矿山得到了广泛应用。

某铀矿一直采用浅孔爆破开采,生产能力小,机械化程度低,同时对于破碎或贫矿的开采安全性差、经济性不合理。在矿山开展了深孔采矿试验,但爆破参数主要采用由炮孔直径推导的经验值,爆破效果较差[3-4]。笔者基于爆破漏斗理论开展爆破漏斗试验选择爆破参数,以期提高爆破质量。

## 1 试验原理

针对特定岩体和炸药,通过开展小型单孔和多孔爆破漏斗试验、斜面台阶爆破漏斗试验,获取一定药量药包爆破的最佳埋深、漏斗半径、孔间距、最小抵抗线及炸药单耗。然后根据利文斯顿爆破漏斗理论,推导大直径深孔最佳的爆破参数[5-6]。利文斯顿指出在同一岩体中采用同一种炸药爆破时,小型爆破漏斗试验和大直径深孔爆破两者的爆破漏斗参数满足如下关系[7]:

$$R_{j1}/R_{j0} = \sqrt[3]{Q_1/Q_0}\ , \qquad (1)$$

式中,$R_{j0}$、$R_{j1}$分别为小型爆破漏斗试验(在药包质量为 $Q_0$ 和最佳埋深时)和大直径深孔爆破(在药包质量为 $Q_1$ 和最佳埋深时)的最佳爆破漏斗半径,m。通过爆破漏斗试验可得到最佳漏斗半径,而爆破参数中的孔间距与单孔爆破漏斗半径有关,通常取爆破漏斗半径的 1.3~1.7 倍,这就为求取大直径深孔爆破的孔间距提供了方法[8]。

## 2 爆破漏斗试验方案

### 2.1 试验地点选择

试验地点选择的主要要求:1)试验地点的矿岩条件应与深孔爆破区的岩性基本一致;2)脉内巷道且巷道通风良好,巷道边帮平整度较好,巷道可利用长度不小于 20 m。

经现场勘查,试验地点选择在南部矿段 0 m 中段 0 m 层脉内巷道,2 号勘探线附近(图 1)。该

**收稿日期**:2023-04-13
**第一作者简介**:付宏宁(1986—),男,甘肃庆阳人,工程师,主要从事铀矿地质、采矿技术及管理工作。

巷道主要服务于前期凿岩及后期受矿，考虑到出矿结构的稳定性，试验钻孔尽可能布置在脉内巷道与出矿进路不相交的一侧边帮（即东侧边帮）。

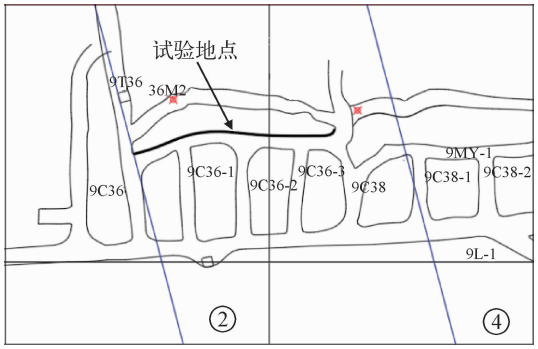



**图 1　试验地点平面布置图**

**Fig. 1　Layout plan of the test site**

### 2.2　单孔爆破漏斗试验方案

#### 2.2.1　炮孔参数及布置

为获得特定矿岩内炸药量爆破的最佳埋深（爆破漏斗体积最大且爆破块度均匀时的药包中心埋深）及在最佳埋深时的最佳漏斗半径，减小对既有巷道的破坏，单孔装药质量设定为 300 g，炮孔长度设为 0.5～1.4 m，共施工 10 个炮孔。凿岩后需现场测量实际炮孔深度，对于超深炮孔用炮泥调整到设计深度。最佳埋深一般与炸药量的三分之一次方成正比[9]。

10 个炮孔爆破后形成的漏斗互不干扰，孔口自由面平整且足够大，钻孔轴线垂直于帮壁，深孔和浅孔交替布置。相邻炮孔间距设计为 2.5 m，炮孔距巷道底板高度为 1.2 m。采用 YT-28 钻机进行钻孔，所成炮孔直径为 40 mm。

#### 2.2.2　装药及爆破

采用卷状的 2 号岩石乳化炸药，单卷装药质量为 300 g，药卷长 0.3 m、直径 32 mm，长径比为 9.4。由于长径比过大，因此装药时将药卷切成 2 等份，先后装入孔中，挤出炸药，缩小长径比，以满足球状药包的长径比要求。

试验设计了 10 孔，准备 10 卷乳化炸药，每孔 1 卷，装药质量为 300 g。在装药前，用炮泥对超深炮孔进行调整，然后插入雷管到药卷内并推入孔底，反向起爆；将炮孔的剩余长度填满炮泥，以防爆破冲孔。

### 2.3　变孔距多孔同段爆破漏斗试验方案

通过单孔爆破漏斗试验可得到药包最佳埋深和最佳漏斗半径。在此基础上开展变孔距多孔同段爆破漏斗试验，寻求药包最佳埋深条件下的最佳孔间距，以及最佳孔间距与最佳漏斗半径间的关系。在最佳孔间距时，达到爆破块度均匀、两孔间不留三角脊柱的爆破效果。

#### 2.3.1　炮孔参数及布置

变孔距多孔同段爆破漏斗试验的炮孔直径为 40 mm，炮孔深度与单孔爆破漏斗试验中药包最佳埋深时对应的炮孔深度一致，炮孔数量设计为 5 孔。根据单孔爆破漏斗试验得到的最佳漏斗半径确定炮孔间距，可设计 4 个不同的数值，通常炮孔间距与最佳漏斗半径的比为 1.3～1.7。5 孔的相邻孔间距依次增大，孔口的平整自由面足够大，钻孔轴线垂直于帮壁，炮孔距巷道底板高为 1.2 m。

#### 2.3.2　装药及爆破

装药前对超深炮孔用炮泥调整到药包最佳埋深对应的炮孔深度，炸药种类和装药量与单孔爆破漏斗试验相同。5 个炮孔采用的雷管同段，孔底反向起爆；将炮孔的剩余长度填满炮泥，以防爆破冲孔。

### 2.4　斜面台阶爆破漏斗试验方案

通过斜面台阶爆破漏斗试验可获得最小抵抗线（即排距），利用斜面台阶最小抵抗线从小到大连续变化的特点，观察延长药包爆破后漏斗的轮廓，以确定当量药包适宜的最小抵抗线[10]。

#### 2.4.1　炮孔参数及布置

采用 YT-28 钻机凿岩，炮孔直径为 40 mm，炮孔深度为 1.8 m。在巷道边帮间设计 2 个斜面台阶爆破漏斗试验孔，其中 1# 炮孔与巷道帮壁成 45°，距离巷道底板高为 1.2 m；2# 炮孔与巷道帮壁成 30°，距离巷道底板高为 1.2 m。

#### 2.4.2　装药及爆破

炸药种类与单孔爆破漏斗试验相同，为 2 号岩石乳化炸药，采用连续柱状不耦合装药，药卷不用切开挤出炸药，每孔设计 5 卷药卷。孔底反向起爆，孔口堵塞长约 300 mm 的炮泥，以防爆破冲孔。

## 3　爆破漏斗试验结果分析

### 3.1　单孔爆破漏斗试验

实际施工炮孔 9 个，孔深为 0.7～1.1 m，所

用凿岩机受巷道空间限制，不能垂直巷道边帮施工，孔轴线与巷道边帮角度统一为 70°。孔深控制不良，会导致试验数据的离乱；而且需要用炮泥修正孔深，增加装药难度。所用药包直径32 mm、长 0.3 m，长径比较大；为了满足球状药包的要求，将长径比控制在 6 左右，装药时将药包一分为二，在炮孔中挤出炸药，装药长度缩减为 0.2 m 左右，形成耦合装药。基于现有炮孔条件试验，经过现场测量、计算和统计后，得到单孔爆破漏斗试验数据见表 1。

**表 1 单孔爆破漏斗试验数据**

**Table 1 Single hole blasting crater test data**

| 炮孔编号 | 炮孔深度/m | 药包埋深/m | 漏斗深度/m | 漏斗半径/m | 漏斗体积/$m^3$ | 爆破块度评价 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 0.75 | 0.63 | — | — | — | 拒爆 |
| 2# | 0.75 | 0.57 | 0.28 | 0.25 | 0.018 | 个别大块 |
| 3# | 0.85 | 0.68 | 0.60 | 0.63 | 0.249 | 较均匀 |
| 4# | 0.94 | 0.60 | 0.52 | 0.61 | 0.203 | 多大块 |
| 5# | 1.10 | 0.47 | 0.32 | 0.45 | 0.068 | 个别大块 |
| 6# | 1.00 | 0.90 | 0.41 | 0.45 | 0.087 | 有大块 |
| 7# | 1.05 | 0.82 | 0.47 | 0.53 | 0.138 | 多大块 |
| 8# | 1.05 | 0.52 | 0.53 | 0.55 | 0.168 | 较均匀 |
| 9# | 1.10 | 1.00 | 0.28 | 0.34 | 0.034 | 个别大块 |

现场爆破效果一般，爆破大块多，主要原因是矿岩节理裂隙发育，且巷道形成时间早、表层风化严重，岩块在爆破冲击波作用下沿裂隙面脱落，爆生气体沿裂隙面逸散，削弱爆破能量。

1# 炮孔在装药时药包挤压过紧，出现了拒爆情况；2# 炮孔药包埋深较小，未形成明显的漏斗，因此在试验数据处理时，剔除 1#、2# 炮孔。单孔爆破漏斗试验数据处理主要是基于最小二乘法拟合药包中心埋深($L$)与漏斗体积($V$)、漏斗半径($R$)之间的数值曲线，寻找最大爆破漏斗体积对应的药包最佳埋深，该值即为变孔距多孔同段爆破漏斗试验的药包中心埋深；其次是得到药包最佳埋深对应的最佳漏斗半径，该值决定了变孔距多孔同段爆破试验的孔间距范围，一般孔间距取最佳漏斗半径的 1.3～1.7 倍，具体数值需通过变孔距多孔同段爆破漏斗试验确定。

采用四次多项式拟合爆破漏斗特征曲线(图 2～图 3)。对四次多项式求极大值，计算得到药包的最佳埋深($L_j$)＝0.65 m，最佳漏斗半径($R_j$)＝0.63 m。

### 3.2 变孔距多孔同段爆破漏斗试验

根据单孔爆破漏斗试验结果，将变孔距多孔同段爆破漏斗试验的药包埋深设定为 0.65 m，试验炮孔间距取最佳漏斗半径的 1.3～1.7 倍(即 0.82～1.07 m)，依次为 0.8、0.9、1.0、1.1 m，以求得该小型爆破漏斗试验的最佳孔间距与最佳漏斗半径的具体倍数。根据利文斯顿爆破漏斗试验原理，在同一岩体中采用同一种炸药爆破时，小型爆破和大直径深孔爆破两者的最佳漏斗半径之比等于两者药包(长径比相等)药量之比的三分之一次方；由于最佳孔间距与最佳漏斗半径比为常数，由此可先求得大直径深孔爆破的最佳漏斗半径，进而再计算得到最佳孔间距。

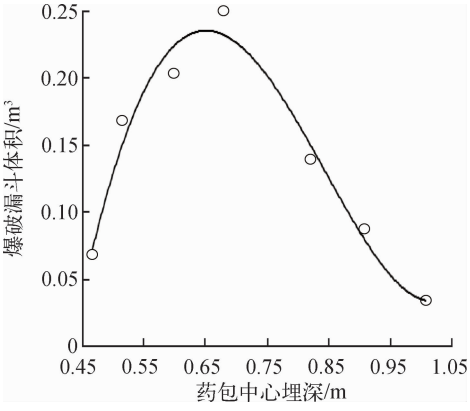



**图 2 爆破漏斗体积与药包埋深关系**

**Fig. 2 Relationship between the blasting crater volume and the depth of charge embedding**

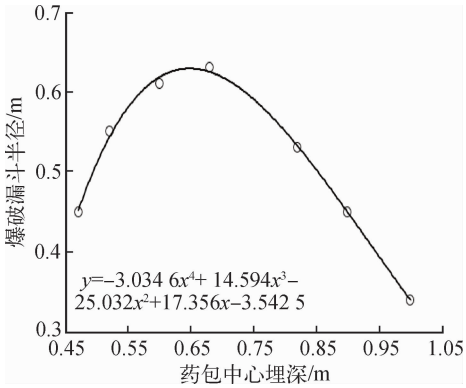



**图 3　爆破漏斗半径与药包埋深关系**

**Fig. 3　Relationship between the blasting crater radius and the depth of charge embedding**

爆破试验后重点观测炮孔之间的沟槽或三角脊柱情况，当炮孔间距较小时，孔间基本上不存在脊柱；但随着炮孔间距离的增大，逐步形成脊柱。

现场 4 个炮孔的装药爆破试验结果见表 2。可以看出，孔 1# 和孔 2#、孔 2# 和孔 3# 间都沿炮孔中心连线贯通，形成沟槽，孔间无脊柱，相邻孔爆破能量叠加，沟槽深度略大于漏斗深度。孔 3# 和孔 4# 的间距增加到 1.0 m，孔间形成三角脊柱，沟槽中间深度降低近半。因此，本试验条件下的最大孔间距应不大于 1.0 m，最佳孔间距为 0.9～1.0 m，最佳孔间距与最佳漏斗半径比为 1.43～1.59。

**表 2　变孔距多孔同段爆破漏斗试验结果**

**Table 2　Test results of multi-hole blasting crater with variable hole spacing**

| 炮孔编号 | 药包埋深/m | 炮孔间距/m | 孔间距与最佳漏斗半径之比 | 孔间沟槽或脊柱情况 | 爆破块度评价 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1#～2# | 0.65 | 0.8 | 1.27 | 沟槽深度大，无脊柱 | 较均匀 |
| 2#～3# | 0.65 | 0.9 | 1.43 | 沟槽深度大，无脊柱 | 个别大块 |
| 3#～4# | 0.65 | 1.0 | 1.59 | 三角脊柱形成，沟槽中间深度降低近半 | 个别大块 |
| 4#～5# | 0.65 | 1.1 | 1.75 | — | 炮孔破坏 |

### 3.3　斜面台阶爆破试验

斜面台阶爆破试验的目的是获得最小抵抗线（炮孔排距），炮孔中心线与巷道边帮斜交成一定角度，炮孔全长装入炸药并堵塞后，从孔口至孔底炸药的最小抵抗线从小到大连续变化，岩块会从炮孔的某一深度爆开，从该深度位置到原巷道边帮的垂直距离即为最小抵抗线。

试验设计了 2 个炮孔，实际实施 1 个炮孔，实测孔深 1.7 m、角度 29°，装药长为 1.2 m，堵塞长为 0.3 m，药包未能捅至孔底。现场测量残留孔深为 0.85 m，爆破孔深为 0.85 m，计算得到最小抵抗线为 0.41 m。

## 4　采场深孔爆破参数计算

### 4.1　孔间距计算

采场深孔爆破的孔间距由变孔距多孔同段爆破漏斗试验结果换算而来。变孔距多孔同段爆破漏斗试验炮孔直径为 40 mm，药包直径32 mm，长 0.3 m，装药质量（$Q_0$）为 300 g；实际装药直径 35 mm、装药长 0.2 m，长径比为 5.7。试验得到的最佳孔间距为 0.9～1.0 m，最佳漏斗半径为 0.63 m，最佳孔间距与最佳漏斗半径比为 1.43～1.59。

采场深孔爆破炮孔直径为 65 mm，耦合装药，装药直径为 65 mm，当药包长径比为 5.7 时，装药长为 0.37 m，装药质量（$Q$）为 1.92 kg。

参考式（1）得到深孔爆破孔间距（$a$）的计算公式为

$$a=(1.43\sim1.59)\times R_j\times Q^{1/3}\times Q_0^{-1/3}。\quad(2)$$

将相关数据代入式（2），求得 $a=1.67\sim1.86$ m，取 1.7 m。

### 4.2　排间距计算

基于爆破相似定律，小型爆破漏斗试验和大直径深孔爆破的最小抵抗线之比为两者装药直径之比。斜面台阶爆破试验实际装药直径就是药包直径（32 mm），得到的最小抵抗线为 0.41 m；而深孔爆破炮孔直径为 65 mm，耦合装药，装药直径即为 65 mm，可求得深孔爆破的最小抵抗线为 0.84 m。根据矿山实际经验，该值显然偏小，不适合作为深孔爆破参数的推荐值。

参考相关深孔爆破参数选取资料[11]，可根据炮孔密集系数(孔间距与排距的比值)和孔间距计算排距。扇形布孔一般采用孔底密集系数，取系数为1.0～1.3，代入孔间距(1.7 m)，可计算得到排间距为 1.3～1.7 m。考虑到大孔距、小抵抗线爆破时能量分布更均匀，推荐深孔爆破排间距为 1.3 m。

## 5 结论

采用深孔爆破回采优选爆破参数，单孔爆破漏斗试验得出药包最佳埋深为 0.65 m，最佳漏斗半径为 0.63 m；变孔距多孔同段爆破试验得出最佳孔间距为 0.9～1.0 m，其与最佳漏斗半径的比为 1.43～1.59；斜面台阶爆破试验得出最佳的最小抵抗线为 0.41 m。

基于爆破相似定律，计算得到直径为 65 mm 深孔的最佳孔间距为 1.7 m；考虑到斜面台阶爆破试验结果不理想，采用扇形布孔的孔底密集系数经验值计算后推荐深孔爆破排距为 1.3 m。

## 参考文献：

[1] 刘博，王茂玲. 数字化爆破理论成熟度和可行性应用概述[J]. 爆破，2015，32(3)：40-44＋69.

[2] 苏静，吴桂义，张义平，等. 扇形垂直中深孔爆破参数选取的正交试验研究[J]. 矿业研究与开发，2012，32(4)：100-101＋104.

[3] 赵磊，王伟，马运超. 某矿井采场爆破工艺优化研究[J]. 铀矿冶，2022，41(1)：30-35.

[4] 谢国森，罗春梧，宋丽霞，等. 某矿床破碎矿体深孔连续采矿工艺研究[J]. 铀矿冶，2022，41(4)：394-400.

[5] 刘子强，陈功，刘奇，等. 柿竹园多金属矿爆破参数优化研究[J]. 采矿技术，2020，20(1)：155-158.

[6] 文兴，赵亮，朱青凌，等. 基于爆破漏斗试验的采场凿岩爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发，2021，41(7)：28-31.

[7] 杨福波. 沙溪铜矿爆破漏斗工业试验研究[J]. 采矿技术，2018，18(5)：102-105＋109.

[8] 李艳刚，马鸿录，郭元华. 大梁矿业中深孔爆破参数优化研究[J]. 采矿技术，2021，21(2)：135-138.

[9] 陈何，万串串，王湖鑫. 束状孔当量球形药包爆破漏斗的模型研究[J]. 金属矿山，2021(5)：36-42.

[10] 张生. 爆破漏斗实验在中深孔爆破参数确定中的应用[J]. 现代矿业，2013，29(3)：8-10＋40.

[11] 张耿城，贾建军，乔继延，等. 炮孔密集系数对破碎效果的影响[J]. 金属矿山，2018(11)：63-66.

## Parameter Selection of Deep-hole Blasting Based on Blasting Crater Test

FU Hongning[1], LIU Haiyang[1], HOU Zhiyong[1], KUANG Zhengping[1], LIU Zaidao[1], YANG Fan[1], MA Yunchao[1], LIU Dongrui[2], ZHANG Weixing[2]

(1. Shaoguan Jinyuan Uranium Co., Ltd., CNNC, Shaoguan 512329, China;
2. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China)

**Abstract**: Deep-hole blasting is used in the mining of hard rock uranium ore in Mianhuakeng mine, the blasting parameters are derived from the experience value of the diameter of the blasting hole, which has the problem of low blasting quality. The optimum depth and radius of 300 g charge are 0.65 m and 0.63 m respectively from the single hole blasting crater test, the optimum distance between holes is 0.9～1.0 m and its ratio to the optimum crater radius is 1.43～1.59 from the multi-hole blasting test with variable hole spacing, the optimum minimum resistance line from the slope step blasting is 0.41 m. Based on the blasting similarity law, the optimum hole spacing of 65 mm deep hole is calculated to be 1.7 m. Considering that the test results of slope step blasting are not ideal, the empirical value of hole bottom density coefficient of fan-shaped hole layout is 1.0～1.3, and the row spacing of deep-hole blasting is recommended to be 1.3 m after calculation.

**Key words**: hard rock mine; deep-hole blasting; blasting crater test; blasting parameters