

地下爆破漏斗实验方法研究

吴春平

(北京矿冶研究总院, 北京 100160)

摘要: 爆破漏斗实验是获取岩体爆破准确参数的有效途径, 是爆破设计和施工的重要基础。经过多年的发展, 利文斯顿爆破漏斗理论成为指导爆破漏斗实验的普遍规律。爆破漏斗一般是在水平地面向下打垂直孔, 然后按照设计参数进行装药实验。对于地下矿山或隧道爆破, 除台阶爆破可以采用垂直孔进行经典的爆破漏斗实验外, 水平孔爆破、上向孔爆破和 VCR 法爆破都不宜使用标准的爆破漏斗实验方法。为此, 本文全面总结爆破漏斗实验的基本原理, 研究了地下爆破漏斗的类型、实验步骤、参数的测量方法、实验结果的分析方法, 为地下爆破漏斗实验研究提供了有益的参考。

关键词: 爆破漏斗; 地下爆破; 爆破实验; VCR 法爆破; 利文斯顿爆破漏斗理论

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2017)07-0155-04

Study on blasting crater experimental methods for underground blasting

WU Chunping

(Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China)

Abstract: Blasting crater experiment is an efficient method to obtain blasting parameters. It is also an important basis of blasting design and operation. After developing for many years, C. W. Livingston law for blasting crater is a general guideline of blasting crater experiments. It is usually to drilling some vertical blasting holes in the level ground when blasting crater experiments are conducted. Then, the blasting crater experiments can be done with designing parameters. But the classical blasting crater experiments can not be carried out in underground blasting such as horizontal hole, up hole and Vertical Crater Retreat blasting, except for bench blasting. The blasting mentioned above are usually used in underground mines and tunnels. In order to provide functional blasting crater experimental methods for underground blasting, the basic principle of it was studied. Beyond, the types, procedure, measurement and analysis methods of underground blasting crater were also offered. The methods are beneficial for underground blasting.

Keywords: blasting crater; underground blasting; blasting experiment; Vertical Crater Retreat blasting; C. W. Livingston law for blasting crater

0 引言

爆破漏斗实验是获取岩体爆破准确参数的有效途径, 是爆破设计和施工的重要基础。根据大量爆破漏斗实验, 美国科罗拉多矿业学院的利文斯顿(C. W. Livingston)于 1951 年提出第一个科学的爆破漏斗理论, 以后又做了多次完善^[1]。

从经典的利文斯顿爆破漏斗理论而言, 爆破漏斗一般是在水平地面向下打垂直孔, 然后按照设计

参数进行装药实验。在地下矿山或隧道爆破, 就采矿方法或隧道掘进而言, 有水平孔爆破、上向孔爆破和 VCR 法爆破; 在大断面巷道中, 还有一部分采用台阶爆破。除台阶爆破可以打垂直孔进行经典的爆破漏斗实验外, 水平孔爆破、上向孔爆破和 VCR 法爆破都不宜使用标准的爆破漏斗实验方法。为此, 本文全面总结爆破漏斗实验经验, 研究了适用于地下爆破的爆破漏斗实验类型、步骤、参数测量与结果分析方法。

1 爆破漏斗实验基础理论

1.1 爆破漏斗的几何参数

爆破漏斗是指当炸药在岩石中爆炸产生外部作用时, 除了将岩石破坏以外, 还会将一部分破碎

了的岩石抛掷,在地表形成漏斗状爆坑^[2]。为了准确获知矿岩的可爆性,需要做一系列爆破漏斗实验,为爆破参数优化提供依据。爆破漏斗几何参数如图 1 所示^[2]。

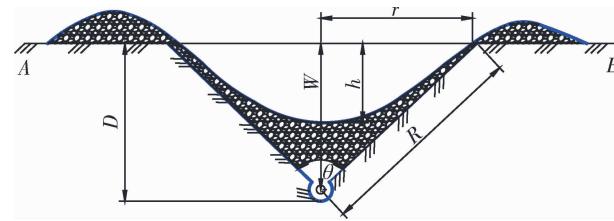


图 1 标准爆破漏斗几何参数示意图

图中的几何参数主要有:①自由面 AB,指被爆破的岩石与空气接触的面,又叫临空面;②最小抵抗线 W,是自药包中心到自由面的最短距离;③爆破漏斗半径 r,是爆破漏斗的底圆半径;④爆破作用半径 R,是药包中心到爆破漏斗底圆周上任意一点的距离,也叫破裂半径;⑤爆破漏斗深度 D,是自爆破漏斗尖顶至自由面的最短距离;⑥爆破漏斗可见深度 h,是自爆破漏斗中岩堆表面最低洼点到自由面的最短距离;⑦爆破漏斗张开角 θ,是爆破漏斗的顶角。

1.2 利文斯顿爆破漏斗理论

利文斯顿根据大量的漏斗实验,以能量平衡为准则,从能量转化和工程的角度,对爆破漏斗的产生和演变进行了分析^[1]。利文斯顿爆破漏斗理论认为炸药在岩体中爆炸时传递给岩石的能量取决于岩石性质、药包质量和药包埋深等因素,当岩石性质一定时,炸药能量在岩石弹性变形、破碎、抛掷和对空气做功上的消耗比例取决于炸药的质量和埋深^[1-3]。利文斯顿爆破漏斗理论不仅表明了装药量和爆破漏斗的关系,还能确定不同岩石的可爆性,比较不同炸药品种与岩石的匹配性。

岩石中弹性变形能和破碎能达到饱和状态时,炸药的埋置深度称为临界埋置深度 W_c ,此时炸药量和埋置深度的关系表达见式(1)。

$$W_c = E_b Q^{1/3} \quad (1)$$

式中: E_b 为变形能系数; $m/kg^{1/3}$; Q 为装药量, kg 。

变形能系数 E_b 是衡量岩石可爆性的一个指标。当埋置深度减小到某一深度时,形成的爆破漏斗体积最大,此时的炸药埋置深度称为最佳埋置深度 W_o 。埋置深度 W 与临界埋置深度 W_c 的比值为,表达式见式(2)。

$$\Delta = \frac{W}{W_c} \quad (2)$$

最佳深度比为 $\Delta_o = \frac{W_o}{W_c}$ 。对某种特定岩石而言, Δ_o 为定值。因此,爆破漏斗的炸药最佳埋置深度表达见式(3)。

$$W_o = \Delta_o E_b Q^{1/3} \quad (3)$$

实际应用中,只要通过实验求出岩石的变形能系数 E_b 和最佳深度比 Δ_o ,就可以优选炸药品种,对爆破参数进行合理设计。为便于分析,常采用比例爆破漏斗体积 V/Q 、比例埋置深度 $W/Q^{1/3}$ 、比例爆破漏斗半径 $r/Q^{1/3}$ 和深度比等参量研究爆破漏斗。爆破实验后,一般采用纵坐标为 $V/Q(m^3/kg)$,横坐标为炸药埋置深度 $W(m)$ 绘制爆破漏斗特性曲线;可用纵坐标为比例埋置深度 $W/Q^{1/3}(m/kg^{1/3})$,横坐标为比例爆破漏斗半径 $r/Q^{1/3}(m/kg^{1/3})$ 绘制爆破漏斗特性曲线。

2 爆破漏斗实验基本方法

爆破漏斗实验时,有集中(或球状)药包、柱状药包两种形式。以长径比小于 6 的短柱状药包视为集中(或球状)药包,长径比大于 6 的为柱状药包^[2]。爆破漏斗实验分为单孔爆破漏斗实验、宽孔距同段爆破漏斗实验和斜面台阶爆破漏斗实验 3 种形式^[4]。除斜面台阶爆破漏斗实验需要采用柱状药包进行实验外,其他两种爆破漏斗在实验时主要用集中(或球状)药包形式。

2.1 地下爆破漏斗的类型

通常情况下,爆破漏斗是在地表打垂直孔,然后进行装药爆破,会形成如图 1 所示漏斗形状。在地下爆破条件下,爆破漏斗可以在巷道壁打水平孔,或在巷道顶板打上向孔,也可以在巷道底板打下向孔。根据上述爆破形式的不同,可以有多种爆破漏斗类型。

水平孔爆破漏斗几何参数见图 2。如图 2 所示,水平孔爆破漏斗与标准爆破漏斗的区别在于:因重力和爆破抛掷作用,前者爆破后形成的漏斗内没有破碎岩石残渣,也就没有爆破漏斗可见深度变量。

如图 3 所示,在巷道顶板上进行上向孔爆破漏斗实验,或在巷道底板进行大直径深孔爆破漏斗实验时,会形成一个反向爆破漏斗。爆破后先形成真漏斗,随着时间的推移,岩石因为重力作用逐渐垮塌,如果没有得到及时支护,冒落范围将进一步扩大,得到一个扩展的漏斗^[5]。这也是垂直深孔漏斗爆破后退式采矿法(VCR, Vertical Crater Retreat)得以推广的理论基础^[6]。

2.2 地下爆破漏斗实验步骤

在进行地下爆破漏斗实验前,需要根据实际情

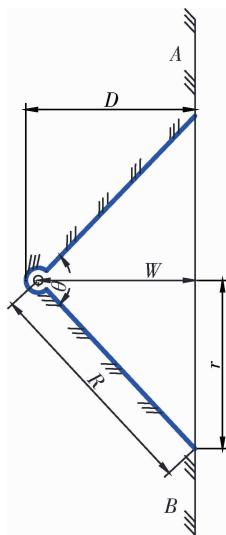


图2 水平孔爆破漏斗几何参数示意图

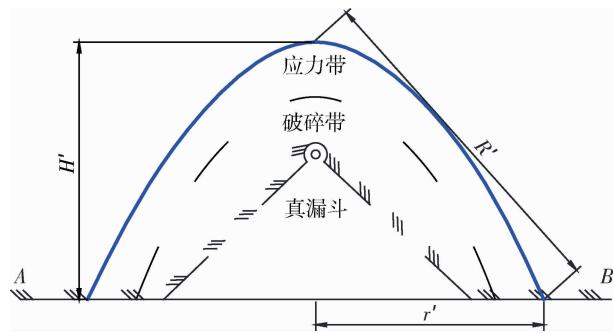


图3 反向爆破漏斗几何参数示意图

况设计实验步骤,然后选择尽量平整的自由面进行实验。一般而言,需要进行3种爆破漏斗实验(以水平孔爆破漏斗实验为例)。

2.2.1 单孔爆破漏斗实验

在实验前,应根据岩石的力学性质、炮孔直径、炸药品种等条件估算最小抵抗线,然后以此抵抗线为中值设计一组等差数列作为炮孔深度值(图4中的L)。单孔爆破漏斗实验时,除可记录如图1所示各个孔的爆破漏斗参数外,还可记录爆破漏斗的体积、爆破后的岩石质量等参数,从而判断最佳埋置深度W₀和临界埋置深度W_c,计算变形能系数E₀和最佳深度比等数值。如图4所示,单孔爆破时尤其要注意,孔间距a要大于估算的最小抵抗线的2倍,以免相邻炮孔互相影响。同时,各炮孔的药量均相同,且长径比小于6。

2.2.2 宽孔距同段爆破漏斗实验

以单孔爆破漏斗实验确定的最佳埋置深度为装药深度,同时以最佳埋置深度为孔间距b的中值,设计一组等差数列作为炮孔间距值(图5中的L),进行宽孔距同段爆破漏斗实验,以确定最大孔间距

的参数范围,从而为实际爆破的孔间距提供参考依据。爆破前各炮孔装药量与单孔爆破漏斗实验相同,各炮孔以同段雷管起爆。宽孔距同段爆破实验应尽量保证孔底在同一直线上,以便形成炮孔连心线。

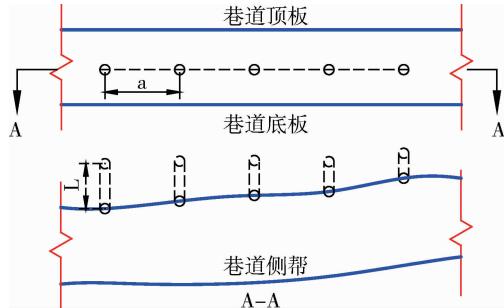


图4 单孔爆破漏斗实验示意图

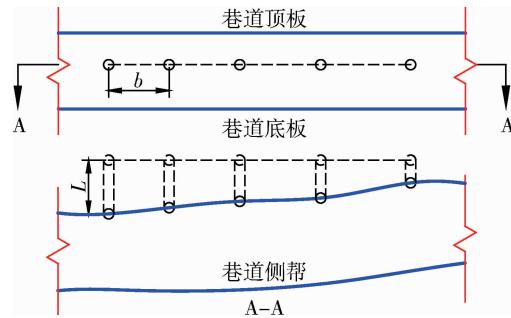


图5 宽孔距同段爆破漏斗实验示意图

2.2.3 斜面台阶爆破漏斗实验

利用斜面台阶爆破抵抗线连续变化的特点,以连续柱状药包的方式进行单孔斜面台阶爆破,测量爆破的最大抵抗线W_{max},如图6所示。一般来说,爆破前以单孔爆破漏斗实验获得的最佳埋置深度作为预估的爆破漏斗中心线长度的中值,设计斜面台阶爆破漏斗实验的炮孔长度和炸药装填深度、堵塞长度。作为对比,一般进行两组斜面台阶爆破漏斗实验。同时,为便于钻孔施工和后续计算,炮孔与自由面AB的夹角α可设计为30°和45°。

斜面台阶爆破后,用炮棍插入原孔中,使用卷尺测量爆开处抵抗线,取爆开处抵抗线的平均值为最大抵抗线W_{max}。

2.3 爆破漏斗参数的测量方法

爆破漏斗实验的成败很大程度上取决于爆破漏斗参数能否准确测量,因此测量方法的选择十分重要,通常采用计算品位、矿量常用的垂直断面法测量爆破漏斗参数^[7]。需要准备的测量工具包括:1.5 m直杆、10 m软皮尺、5 m钢卷尺、150 kg电子台秤、铁锹、竹筐、炮棍、格筛(50 mm×50 mm、100

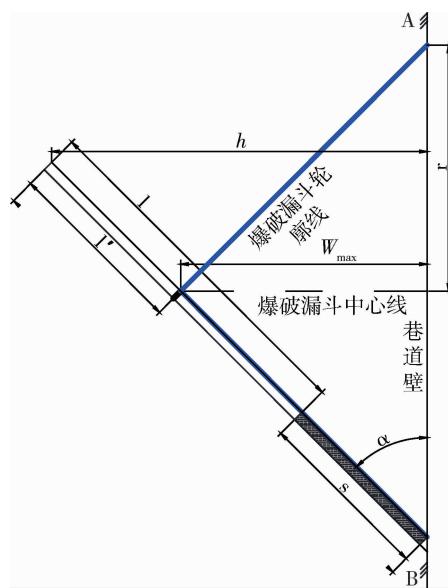


图 6 斜面台阶爆破漏斗几何参数示意图

$\text{mm} \times 100 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 等规格的栅格, 根据爆破块度大小确定)、喷漆、记录本等。爆破前后按照如下方式进行测量。

1) 爆破前, 用钢卷尺分别测量炮孔直径、炮孔深度、炸药装填深度、堵塞深度。

2) 爆破后, 用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 或 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 规格的格筛覆盖在爆破漏斗轮廓面上作为基准自由面, 按照 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 或 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的网度测量基准自由面和漏斗轮廓之间的距离, 其差值即为各测点爆破深度, 由此绘制爆破漏斗圆锥面的三维图形。

3) 以炮孔中心线为轴线, 在基准自由面上建立平面坐标系, 记录爆破漏斗轮廓边界底面每隔 45° 方向上 8 个点的坐标, 以及与底面平行且为漏斗深度一半的平面上相对应的 8 个点坐标, 由此分别绘制爆破漏斗底圆边界及中值断面轮廓线。

4) 扣除漏斗口周边岩石片落部分, 用喷漆和 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 或 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的栅格圈定漏斗边界, 然后以炮孔中心线为轴线, 每隔 45° 直接量取 8 个不同方位的漏斗边界与轴线之间的距离, 取其平均值作为爆破漏斗半径。

5) 采用 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 等规格的格筛对爆破后的碎石进行筛分, 然后用电子台秤分别称重, 得到碎石的块度级配特征、总质量和大块率等参数。

2.4 爆破漏斗实验结果分析方法

爆破漏斗实验参数测量后, 还需要对爆破漏斗实验结果进行分析。借助 CAD、3DMine、Dimine 或

Surpac 等软件, 可以轻松、精确地处理实验数据^[8-9], 获得需要的结果。

1) 首先选择上述软件中的一种软件, 对照测量数据, 将爆破漏斗形态以三维形式绘出。根据实际经验, 以 3Dmine、Dimine 或 Surpac 等矿业类专用软件更实用。

2) 以 3Dmine 为例, 采用样条曲线构建爆破漏斗各断面轮廓后, 各断面面积可直接选择相应断面轮廓的样条曲线, 在样条曲线属性框中查询到的“面积”或“最佳面积”即为爆破漏斗对应断面的面积。

3) 以 3Dmine 为例, 爆破漏斗各断面曲线和测点在软件中确定后, 可采用“实体”相关功能绘制爆破漏斗实体, 再用“实体-实体体积”功能直接得出爆破漏斗体积。

4) 再结合 WPS 表格或 excel 等软件, 即可绘制爆破漏斗特性曲线, 从而分析变形能系数 E_0 和最佳深度比等数值。

5) 根据爆破块度筛分和称重结果, 分析爆破块度级配特征、爆破能量利用率等指标。

3 结论

本文总结了爆破漏斗实验的基本原理, 研究了地下爆破漏斗的类型、实验步骤、参数的测量方法、实验结果的分析方法, 为地下爆破漏斗实验研究工作提供了一些参考方案。

1) 为保证实验成功, 钻孔前要根据岩石的性质和爆破条件, 事先预估炮孔深度和药量等参数, 再进行相应的实验方案设计。

2) 炮孔深度、偏斜率、炸药埋置深度、堵塞长度要严格控制在设计值误差范围内。

3) 炮孔直径较小时, 实验不容易形成爆破漏斗, 要加强堵孔工作, 可采用锚固剂等材料堵孔。炮孔直径较大时, 可使用湿度在 $18\% \sim 20\%$ 之间、比例为 $1:3$ 泥沙混合炮泥堵孔。

4) 爆破碎石的筛分称重花费时间较多, 因此需要合理选择格筛, 一般以 2 个格筛进行 3 级筛分比较合理, 太多的格筛会加重工作强度。同时, 格筛的孔径也需要合理设计, 应根据预估的爆破块度确定。

5) 实验结果的分析处理应尽可能借助软件工具, 以提高分析的速度和精度。

致谢: 在研究爆破漏斗实验方法的过程中, 作者得到了孙忠铭、陈何和王湖鑫等的无私指导和帮助, 还得到北京矿冶研究总院矿山工程研究设计所的

(下转第 172 页)

因素是烟气高温、CO 和低能见度。火灾发生后至完成反风的 600 s 时间内,前 200 s,是火源下风侧

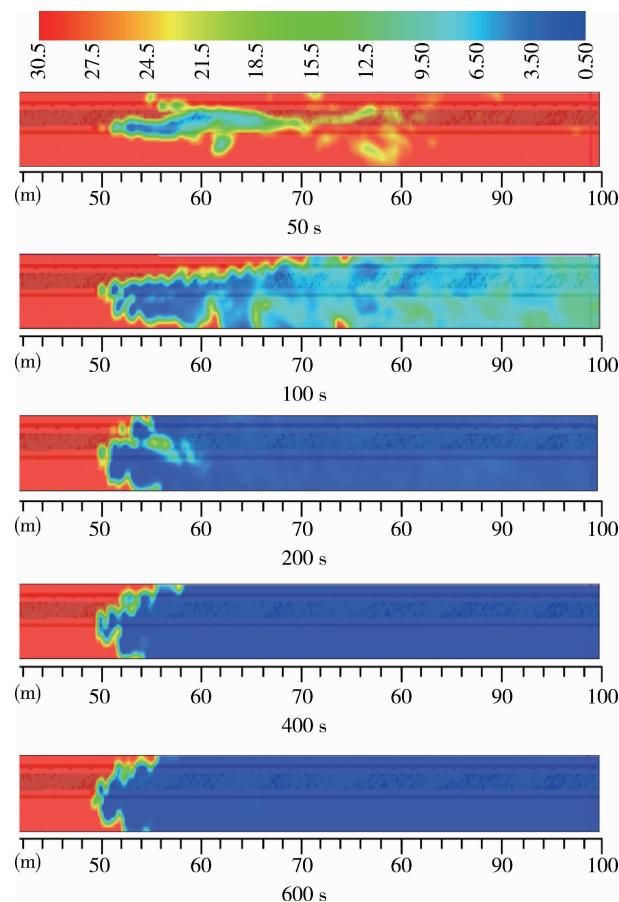


图 8 运输斜井 1.7 m 高度能见度随时间的变化

人员顺利逃生的关键时期;200 s 至 400 s,是下风侧人员逃生难度加大的时期;400 s 至 600 s 是下风侧人员生命受到威胁最严重时期。

参考文献

- [1] 王德明,程远平,周福宝,等.矿井火灾火源燃烧特性的实验研究[J].中国矿业大学学报,2002,31(1):30-33.
- [2] 季经纬,程远平.PVC 输送带点燃温度判据及应用[J].燃烧科学与技术,2006,12(5):438-441.
- [3] 张圣柱,程卫民,张如明,等.矿井胶带巷火灾风流稳定性模拟与控制技术研究[J].煤炭学报,2011,35(5):812-817.
- [4] 齐庆杰,王欢,董子文,等.矿井胶带运输巷火灾蔓延规律的数值模拟研究[J].中国安全科学学报,2016,26(10):36-41.
- [5] 刘汝正.细水雾防治胶带火灾的数值模拟和实验研究[D].太原:太原理工大学,2016.
- [6] 程远平,陈亮,张孟君.火灾过程中火源热释放速率模型及其实验测试方法[J].火灾科学,2002,11(2):70-74.
- [7] 封士彩,黄民.矿用带式输送机火灾监控技术的研究[J].煤炭科学技术,2002,30(2):54-57.
- [8] 何翊.烟气毒性评价预测技术在性能化设计中的应用[C]// Proceedings of 2010 (Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology. Northeastern University. 2010:434-438.
- [9] 游波.深井受限空间物理实验系统研发与安全人因参数实验研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [10] 王文才,姜宇鸿,张博,等.巷道中煤燃烧时热释放速率的研究[J].煤矿安全,2013,44(12):40-42.
- [11] 王志刚,倪照鹏,王宗存,等.设计火灾时火灾热释放速率曲线的确定[J].安全与环境学报,2004(S1):50-54.

* * * * *

(上接第 158 页)

大力支持,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] 齐金铎.现代爆破理论的发展阶段[J].爆破,1996,13(4):7-10.
- [2] 汪旭光,等.爆破手册[M].北京:冶金工业出版社,2010:31-35.
- [3] 王运敏.现代采矿手册(上册)[M].北京:冶金工业出版社,2011:773-778.
- [4] Ye Tuqiang. Field experiment for blasting crater[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(2):

224-228.

- [5] 肖继荣.球状药包漏斗爆破法[J].爆破器材,1983(4):30-33.
- [6] 孙忠铭,刘庆林,余斌,等.地下金属矿山大直径深孔采矿技术[M].北京:冶金工业出版社,2014.
- [7] 陈爱国.爆破漏斗试验数据测定与计算机处理方法[J].长沙矿山研究院季刊,1988,8(3):38-45.
- [8] 孙永茂,王邦策.基于 Dimine 的爆破漏斗体积计算[J].现代矿业,2015(6):208-209.
- [9] 李晓晖,袁峰,张明伟,等.基于 Surpac 的垂直断面资源储量估算方法研究与实现[J].吉林大学学报:地球科学版,2015,45(1):156-165.