

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.010

## 基于 Floyd 算法的扇形中深孔爆破布孔优化设计\*

刘益超<sup>1</sup>, 郭进平<sup>1</sup>, 李角群<sup>1</sup>, 程平<sup>1</sup>, 方晷东<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 西安 710055; 2. 武钢资源集团 金山店矿业有限公司, 大冶 435116)

**摘要:** 地下矿中深孔爆破炮孔布置设计直接影响爆破效果和生产成本, 前期研究提出的基于单源最短路径的优化算法极大提升了布孔优化设计的效率, 但不能完全满足生产实际的应用。分析了炮孔布置与中深孔爆破参数的关联性, 将炮孔孔底距作为主要控制调节参数, 应用多源点最短路径的动态规划思想, 基于 Floyd 算法建立中深孔爆破扇形炮孔排面优化设计算法模型, 解决了炮孔布置方案中预设特定炮孔参数的扇形排面布孔优化设计问题。在此基础上, 基于 Auto CAD 平台进行二次开发中深孔爆破炮孔优化设计程序模块, 并成功应用于某铁矿。中深孔爆破优化设计程序的开发, 可实现地下矿中深孔爆破炮孔快速绘制, 提高中深孔爆破设计质量, 有效控制爆破作业成本。

**关键词:** 中深孔爆破; 炮孔设计; 最短路径问题; Floyd 算法; Auto CAD 二次开发

**中图分类号:** T235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)01-0064-06

## Optimal Design of Hole Arrangement for Fan-shaped Medium-length-hole Blasting based on Floyd Algorithm

LIU Yi-chao<sup>1</sup>, GUO Jin-ping<sup>1</sup>, LI Jiao-qun<sup>1</sup>, CHENG Ping<sup>1</sup>, FANG Xuan-dong<sup>2</sup>

(1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. WISCO Resources Group JinShandian Mining Co., Ltd., Daye 435116, China)

**Abstract:** The hole layout design of medium-length hole blasting in underground mine directly affects the blasting efficiency and production cost. Previous research has proposed the optimization algorithm based on the single source & shortest path which greatly improved the efficiency of hole layout design optimization. However, the proposed methods still cannot fully meet the demands of actual application. In this paper, the correlation between the hole layout and the medium-length-hole blasting parameters was analyzed. The bottom distance between the holes was taken as one of the main control parameters. Based on dynamic programming of the shortest path from multiple sources and Floyd algorithm, an algorithm model for optimal layout design of fan-shaped medium-length hole blasting was established. The proposed model solved the problem of the hole layout optimization of fan-shaped blasting hole design with preset specific hole parameters. On this basis, the optimal design program module of medium-length-hole blasting was re-developed using the AutoCAD platform which was successfully applied to an iron mine.

**Key words:** medium-length-hole blasting; blast hole design; shortest path problem; floyd algorithm; secondary development of AutoCAD

收稿日期: 2020-10-09

作者简介: 刘益超(1995-), 男, 辽宁鞍山人, 硕士在读, 主要从事采矿工程及矿山安全研究工作, (E-mail) 757466284@qq.com。

通讯作者: 李角群(1970-), 男, 辽宁鞍山人, 副教授、博士, 从事矿山数字化、矿山计算机辅助设计软件开发教学研究, (E-mail) 404567383@qq.com。

基金项目: 陕西省企业联合基金(2019JLP-16)

无底柱分段崩落法具有采场结构简单、采准工程量小、机械化程度高、产能大的优势, 是很多大型矿山, 特别是黑色矿山采用的主要采矿方法。扇形中深孔爆破是无底柱分段崩落法回采工艺中的重要环节, 爆破质量好坏直接影响生产作业效率和企业经济效

益,中深孔爆破设计是矿石爆破质量的技术保证。目前对中深孔爆破优化设计的研究,主要从现场实验<sup>[1-4]</sup>、数值仿真<sup>[5-6]</sup>、非线性预测模型等方面对中深孔爆破孔网参数进行优化<sup>[7-9]</sup>。在生产现场,进路中心线位置和分段矿体截面形态各异,在确定的爆破孔网参数的前提下,寻找扇形排面炮孔总长度最短的排面炮孔布置方案,即扇形炮孔排面布置优化,是影响爆破效果和凿岩费用的关键因素,目前关于中深孔爆破布孔优化的相关研究比较少<sup>[10,11]</sup>。

随着数字化矿山技术的发展,中深孔爆破设计从手工、人机交互迈入了计算模块自动化设计阶段<sup>[10]</sup>。文献[10]利用动态规划的思想,将扇形中深孔炮孔布置视为从排面炮孔起始孔到终止孔的单源最短路径问题,基于 Dijkstra 算法建立了扇形中深孔爆破设计算法模型。在实际炮孔布置设计中,为了保证爆破质量,通常需在扇形排面中某位置预设炮孔,预设炮孔情况下的扇形中深孔炮孔布置则属于多源最短路径问题,基于 Dijkstra 算法的扇形中深孔爆破设计算法模型不能满足生产实际要求。Floyd 算法是一种利用动态规划的思想寻找给定的加权图中多源点之间最短路径的算法,本文应用 Floyd 算法设计多源最短路径问题的中深孔爆破炮孔优化布置方案,建立中深孔爆破扇形排面炮孔优化设计算法模型。在此基础上,以某铁矿中深孔爆破布孔为例,基于 Auto CAD 平台进行二次开发,开发地下矿中深孔爆破优化设计系统。

## 1 中深孔爆破排面炮孔长度的确定

矿山爆破的目的是在合理的爆破块度范围崩落爆破范围内的矿岩,合理爆破参数是控制爆破质量的关键。扇形中深孔爆破参数主要包括<sup>[12]</sup>:炮孔直径  $d$ 、最小抵抗线  $W$ 、孔间距  $a$ 、炮孔密集系数  $m$ 、炸药单耗  $q$ 、排孔装药总量  $Q$ 、线装药密度  $ql$ 、排孔装药长度  $Lz$ 、排孔填塞长度  $Ls$ 、炮孔总长度  $Lp$ 、起始炮孔角度  $\alpha$  与终止炮孔角度  $\beta$ 。扇形排面中深孔的孔间距  $a$  分为孔口距和孔底距,由于孔底距对爆破效果的影响较大,设计中以孔底距表示孔间距  $a$ 。

上述的无底柱分段崩落法的中深孔爆破参数,炮孔直径与钻孔设备有关,炸药单耗与矿岩硬度性质有关,起始炮孔角度、终止炮孔角度与采场结构参数及放矿管理有关,这些影响因素是相对不变的,且参数之间没有直接的关联性。当排孔装药总量确定后,中深孔爆破设计的目标即为均匀布置炮孔且满

足装入排孔装药总量的炮孔长度要求。

$Q$ 、 $a$  与其他参数之间的关系可用式(1)、式(2)表示<sup>[12]</sup>

$$Q = q \times S \times Y \times W \quad (1)$$

$$a = m \times W \quad (2)$$

式中: $S$  为扇形孔所负担爆破面积,  $m^2$ ;  $Y$  为矿岩比重,  $kg/m^3$ ; 其他符号含义同前。

由式(1)、式(2)推导出式(3)

$$Q = q \times S \times Y \times a/m \quad (3)$$

从式(3)可以看出,在炮孔密集系数、炸药单耗和扇形孔所负担爆破面积相对不变情况下,排孔装药总量  $Q$  与孔底距  $a$  呈正比关系。

引入填塞系数  $Z(\%)$ , 假设  $Ls = Lz \times Z$ , 且知  $Lz = Q/q1$ , 则有

$$Lp' = Lp = Q/q1 \times (1 + Z) \quad (4)$$

式(4)的  $Lp'$  为排面炮孔总长度下限值,  $m$ , 即为在保证爆破质量前提下满足装药长度和填塞长度要求的所需排面炮孔总长度  $Lp$  的最小临界值。

将式(3)代入式(4),  $Lp'$  则表示为

$$Lp' = q \times S \times Y \times a/m/q1 \times (1 + Z) \quad (5)$$

$Lp'$  值是以扇形排面的整体考虑的, 而一个扇形排面是由多个独立炮孔组合的,  $Lp'$  值在实际生产中并不能保证实现。为保证排面布置炮孔分布的合理, 需要适度调整孔底距的大小, 炮孔数的变化导致炮孔总长度呈阶梯式变化。为减少凿岩成本, 控制炮孔长度在适度的变化范围内, 引入炮孔长度适度系数  $C(\%)$ , 则有

$$Lp'' = Lp' \times (1 + C) \quad (6)$$

式中; $Lp''$  为炮孔总长度上限值,  $m$ 。

从式(5)可知, 通过爆破试验确定爆破参数后, 在炮孔直径一定情况下, 炮孔总长度  $Lp$  与排孔装药总量  $Q$  成正比, 而排孔装药总量  $Q$  与孔底距  $a$  呈正比, 即炮孔总长度  $Lp$  与孔底距  $a$  呈线性变化。从以上分析可知, 孔底距  $a$  是中深孔爆破设计中的主要可变因素, 合理设置炮孔长度适度系数以控制孔底距  $a$  的允许可变范围, 由公式(6)即可获得炮孔总长度上限值。

根据上述分析, 可建立中深孔爆破设计的流程, 设计步骤如下:

步骤1: 根据式(3)计算出排孔装药总量;

步骤2: 根据式(5)、式(6)计算出炮孔长度的下限值与上限值;

步骤3: 调整孔底距, 优化炮孔布孔设计, 获得中深孔爆破设计的炮孔长度;

步骤4: 比较设计的炮孔长度是否在计算的炮孔长度上、下限之间, 是则完成设计; 否则执行步骤3。

## 2 扇形中深孔爆破炮孔优化设计算法模型构建

### 2.1 扇形中深孔布孔优化的最短路径问题

通过前文的分析可知<sup>[10]</sup>,在排孔装药总量确定后,确定排面炮孔长度的下限值与上限值,通过孔底距的调整,优化炮孔布孔设计,得到中深孔爆破设计的排面炮孔长度最优值。下面通过示例讨论分析中深孔布孔优化的最短路径问题。

如图1所示,假设扇形中深孔排面布孔设计的起始角为 $20^\circ$ ,终止角为 $170^\circ$ ,角度步距 $1^\circ$ ,共有151个炮孔。假设孔底距变化允许区间为 $1.8 \sim 2.2$  m,从炮孔1开始,有4个炮孔(13、14、15、16)满足孔底距区间要求。同理,从炮孔13开始,有4个炮孔(26、27、28、29)满足孔底距区间要求,从炮

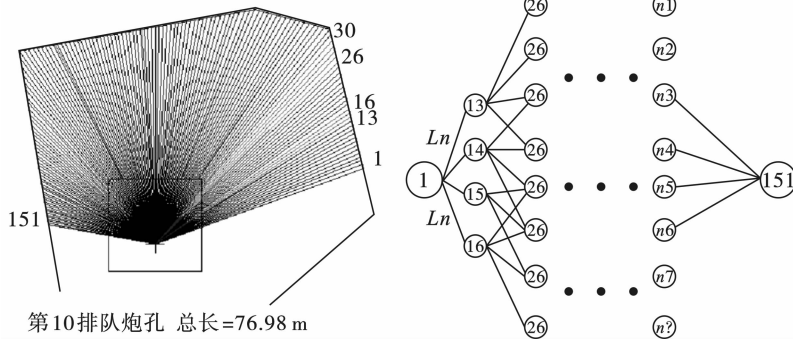


图1 中深孔优化设计示例

Fig. 1 Example of optimization design of medium-length hole

因此,扇形中深孔排面布孔设计从几何构图来说,就是在两个多边形(巷道轮廓线和爆破外形边界轮廓线)之间,在满足炮孔孔底距要求前提下的最短路径寻优问题,目标值为炮孔总长最短。在寻得设计炮孔长度后,与计算炮孔长度上下限进行比较,如果超出上限值可以适当增大孔底距,减少炮孔个数,如果超出下限值可以适当减小孔底距,增加炮孔个数,重新设计直至满足炮孔长度要求。

### 2.2 最短路径算法思想

最短路径问题的目的是寻找图中两结点之间的最短路径,也就是沿此路径上各边的权值总和(路径长度)达到最小<sup>[13]</sup>。如上所述,如果单纯从起始边到终止边寻优,属于单源最短路径问题,可以采用经典的Dijkstra算法<sup>[10,14]</sup>。而在矿山实际情况的中深孔爆破设计中,为了保证爆破质量,排面炮孔布置方案中要根据爆破轮廓区域形态人为指定炮孔位置参数,这就将问题转化为需要计算出从指定的顶点出发,经过一些指定的中间节点,达到指定的终点的

孔14开始,有4个炮孔(28、29、30、31)满足孔底距区间要求。以此类推,满足炮孔151的孔底距区间要求的炮孔有4个( $n3$ 、 $n4$ 、 $n5$ 、 $n6$ )。以炮孔编号为节点号,从起始边孔开始,到终止边孔结束,每个炮孔都由孔底距区间确定有限个可选相邻炮孔,从而构建出炮孔拓扑关系图(无向图)。

分析炮孔拓扑关系图可知,从炮孔1出发,到炮孔151结束,任何一个联通的路径都是一个可行设计方案,即满足孔底距变化允许区间的可行设计方案有很多种组合。如果把单个炮孔长度( $L_n$ )作为边的权值,中深孔布孔设计就转换为寻找最短路径问题,即确定从起点到终点的最短路径问题。起点为起始边孔,终点为终止边孔,是从无数可行方案中找最优布孔方案,即排面炮孔总长最短。

最短路径,属于多源最短路径问题<sup>[15]</sup>。Floyd算法是一种利用动态规划思想寻找给定的加权图中多源点之间最短路径的算法<sup>[16]</sup>,本文应用Floyd算法设计多源最短路径问题的中深孔爆破炮孔优化布置方案,建立中深孔爆破扇形排面炮孔优化设计算法模型。

Floyd算法思想是:从任意节点A到任意节点B的最短路径不外乎两种可能,一是直接从A到B,二是从A经过若干个节点到B。假设 $dist(AB)$ 为节点A到节点B的最短路径的距离,对于每一个节点K,检查 $dist(AK) + dist(KB) < dist(AB)$ 是否成立。如果成立,证明从A到K再到B的路径比A直接到B的路径短,即设置 $dist(AB) = dist(AK) + dist(KB)$ 。遍历完所有节点K, $dist(AB)$ 中记录的便是A到B的最短路径的距离。已知图 $G = \{V, E\}$ ,构筑权值邻接矩阵 $N = [a(i, j)] (n \times n)$ ,同时还可引入一个后继节点矩阵 $path = [a(i, j)] (n \times n)$ 来记录两点间的最短路径。具体算法步骤如下:

(1)从任意一条单边路径开始。所有两点之间

的距离是边的权,如果两点之间没有边相连,则权为无穷大,构筑出图权值邻接矩阵  $A$  和节点矩阵  $path$ 。

(2)插入节点,对于每一对顶点  $i$  和  $j$ ,看看是否存在一个顶点  $k$  使得从  $i$  到  $k$  再到  $j$  比已知的路径更短。如果存在顶点  $k$ ,更新结果。

(3)重复上述步骤(2),直到遍历所有节点直至结束。

### 2.3 扇形中深孔布孔优化设计的 Floyd 算法模型构建

依据上述的 Floyd 算法思想,结合扇形中深孔布孔优化设计多源最短路径的特点,构建基于 Floyd 的扇形中深孔布孔优化设计的算法模型。

扇形中深孔爆破排面炮孔布置优化设计的 Floyd 算法模型构建如下:

(1)确定炮孔允许长度的上下限值  $L_p'$ 、 $L_p''$ 。根据第1节所述的方法计算扇形中深孔排面炮孔允许长度的上下限值  $L_p'$ 、 $L_p''$ ,确定炮孔间的孔底距的可调整区间。

(2)构筑炮孔邻接矩阵。从起始炮孔角  $\alpha$  开始到终止炮孔角  $\beta$ ,按设定的步距角度  $\varphi$  依此建立  $n$  个炮孔,  $n = (\beta - \alpha) / \varphi + 1$ 。初始化数组  $M = [a(i, j)](n \times n)$ ,数组元素初始值设为无穷大,满足孔底距区间要求的邻接矩阵权值设为炮孔长度。

(3)指定炮孔下的炮孔邻接矩阵检验。如果有指定炮孔,检查指定炮孔权值是否为无穷大,如果是则调整孔底距重新构筑炮孔邻接矩阵。

(4)最短路径的炮孔长度的计算。调用 Floyd 算法模块,如果有指定炮孔,分别找到从起始炮孔到指定炮孔,从指定炮孔到终止炮孔的最短路径,累加最短路径的炮孔长度获得优化设计炮孔长度。

(5)最短路径的炮孔长度检验。将炮孔允许长度的上下限值与计算炮孔长度比较,如果在合理区间之外,调整孔底距重新构筑炮孔邻接矩阵。

(6)扇形中深孔炮孔排面参数确定。重复(2)~(5),直至设计排面炮孔长度满足炮孔长度区间要求。绘制最短路径的炮孔,统计各个炮孔长度、倾角等,并形成表格完成中深孔爆破优化设计。

根据扇形中深孔爆破排面炮孔布置优化设计的 Floyd 算法模型,给出程序设计的流程框图如图2所示。

根据上述的模型和程序设计流程框图,给出程序设计算法伪码描述如下:

1. Initialization parameters
2.  $Q = \text{function}(q, s, w, r)$

3.  $L_p = \text{function}(Q, d, ql, L_z, L_s)$

4. select Specify hole line km

5. Floyd Algorithm

Initialization:  $A[i, j]; D[i, j] = A[i, j]; path[i, j]$

If  $A[i, km] = \infty$  then chang a; goto Floyd Algorithm

For k = 1 to n

For i = 1 to n

For j = 1 to n

If  $D[i, j] > D[i, k] + D[k, j]$  Then

$D[i, j] = D[i, k] + D[k, j]$

$path[i, j] = k$

6.  $L_p = D(1, k1) + D(k1, k2) + \dots + D(km, n)$

7. If  $L_p'' < L_p$  or  $L_p < L_p'$  then chang a; goto Floyd Algorithm

8. Draw Hole line and list

## 3 扇形中深孔爆破优化设计系统应用实例

依据上述的模型,基于 Auto CAD 平台进行二次开发,开发地下矿扇形中深孔爆破优化设计系统。系统软件模块主要分两个功能:一是根据三维巷道模型切割爆破小剖面,即确定单一扇形排面爆破的边界范围;二是在爆破小剖面中进行中深孔爆破布孔优化设计。下面以某铁矿为例,介绍扇形中深孔爆破优化设计系统具体应用。

矿山采用无底柱分段崩落法,使用上向扇形中深孔爆破设计。进路垂直矿体走向布置,进路巷道尺寸为  $3.4 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ ,采场结构参数为  $16 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 。起始炮孔角度  $50^\circ$ ,终止炮孔角度  $130^\circ$ 。钻孔设备采用 141 台车,钻孔直径  $7 \text{ cm}$ 。矿山前期进行中深孔爆破参数优化研究,矿石比重  $3.4 \text{ t/m}^3$ ,确定排距(最小抵抗线)  $1.7 \text{ m}$ ,孔底距允许变化范围  $1.6 \sim 2.2 \text{ m}$ ,炸药单耗  $0.45 \text{ kg/t}$ ,线装药密度  $3.85 \text{ kg/m}$ ,填塞系数  $20\%$ ,炮孔长度适度系数  $6\%$ 。

在爆破小剖面已确定情况下,根据爆破参数优化取值,如图3、图4所示,按提示选择爆破轮廓线及巷道轮廓线,程序会自动进行中深孔爆破布孔优化设计,并根据设计结果弹出提示对话框供选择。当不满足设计要求时,程序可返回参数对话框,调整孔底距重新设计。当满足设计要求后,程序自动完成中深孔爆破设计,如图5所示。

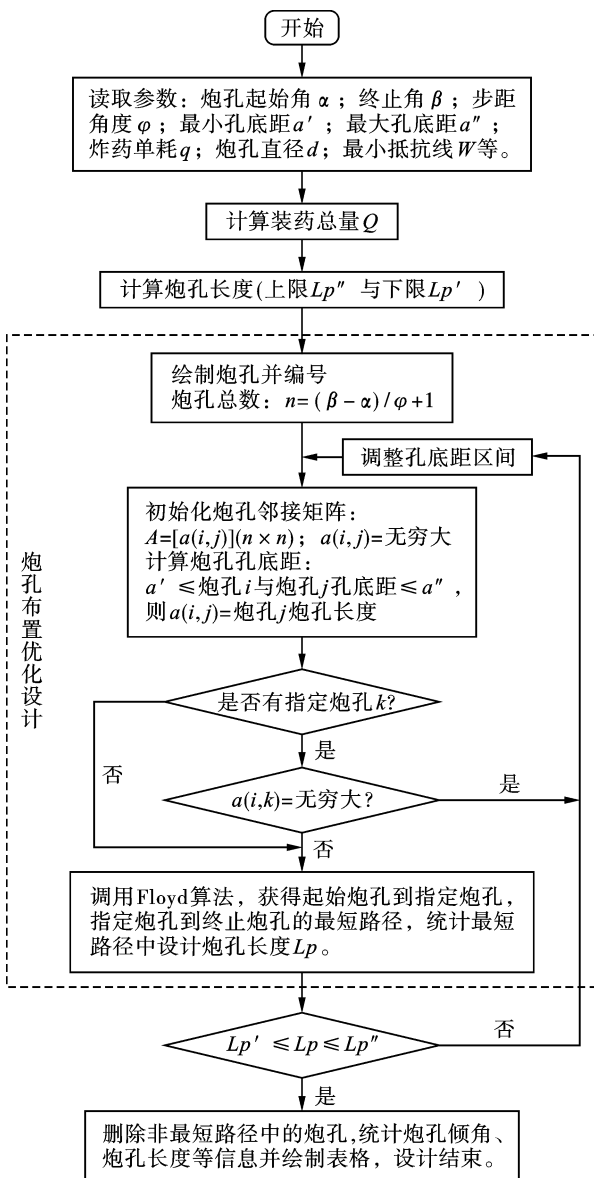


图2 中深孔优化程序设计框图

Fig. 2 Block diagram of optimization program design for medium-length hole

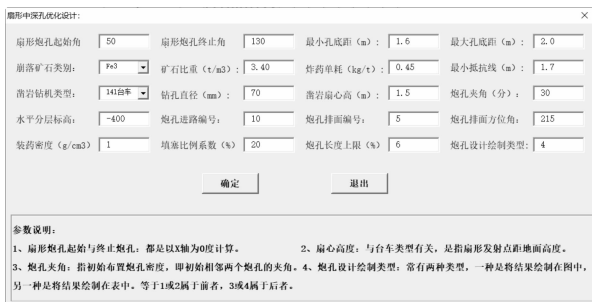


图3 基于Floyd算法中深孔爆破设计  
Fig. 3 Design of medium-length hole blasting based on Floyd Algorithm

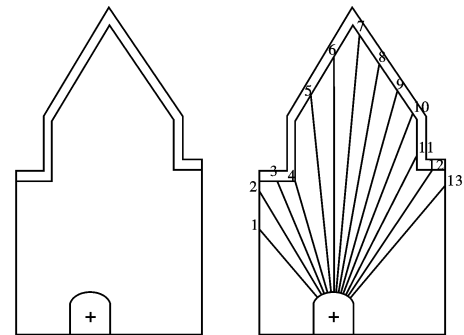
如果在上述中深孔设计中加入指定炮孔,如图

6中蓝色炮孔线,采用相同设计原理和程序提示步骤,同样可以完成含指定炮孔的中深孔布孔设计。由图5、图6及表1、表2可以看出,为了合理的分布药量,需要预设炮孔位置,使得炮孔总长度在允许范围内略有增加,达到了优化布孔的目的。



图4 提示选择对话框

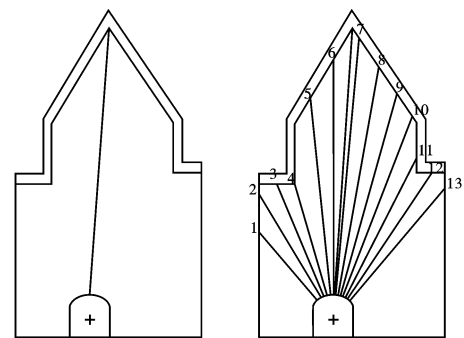
Fig. 4 Prompts the selection dialog



后排孔长192.53 m;前排孔长0;总长=192.52 m

图5 无指定炮孔的中深孔布孔优化设计

Fig. 5 Optimal design of medium and deep hole layout without designated hole



后排孔长194.05 m;前排孔长0;总长=194.04 m

图6 含指定炮孔的中深孔布孔优化设计

Fig. 6 Optimal design of medium and deep hole layout with designated holes

### 4 结论

通过对扇形中深孔炮孔排面优化设计的 Floyd 算法研究,得到以下结论:

- (1) 地下矿山中深孔扇形炮孔排面布置优化设计实质为最短路径问题,即炮孔总长最短的优化布置。
- (2) 炮孔孔底距是完成中深孔优化设计的主要

调节参数,在满足可以装入排孔装药总量前提下,在适当的孔底距区间范围内完成中深孔均匀布置。

(3)在含有指定炮孔的中深孔布孔优化设计中,最短路径的多源Floyd算法比单源Dijkstra算法更具优势。

表1 无指定炮孔的炮孔布置结果

Table 1 Hole layout results without designated holes

第五排炮孔布置				
分层	孔号	孔深/m	倾斜/°	方位/°
第-400 m 分层	1	7.73	50.0	35
	2	10.39	59.5	35
	3	10.53	67.5	35
	4	10.11	75.0	35
	5	16.94	84.0	35
	6	20.23	90.0	215
	7	22.35	85.0	215
	8	20.04	80.0	215
	9	18.12	74.5	215
	10	16.66	69.0	215
	11	13.55	63.0	215
	12	13.06	565.0	215
	13	12.81	50.0	215
小计	192.50			

表2 含指定炮孔的炮孔布结果

Table 2 Hole layout results with designated holes

第五排炮孔布置结果				
分层	孔号	孔深/m	倾斜/°	方位/°
第-400 m 分层	1	7.73	50.0	35
	2	10.58	60.0	35
	3	10.48	68.0	35
	4	10.97	76.0	35
	5	16.72	83.5	35
	6	19.59	89.0	35
	7	22.89	86.0	215
	8	20.45	81.0	215
	9	18.43	75.5	215
	10	16.78	69.5	215
	11	13.55	63.0	215
	12	13.06	56.5	215
	13	12.81	50.0	215
小计	194.00			

(4)在AutoCAD平台进行二次开发,可实现地

下矿中深孔爆破炮孔快速绘制、保障中深孔爆破设计精度,对提升爆破效果和控制生产作业成本具有重要意义。

参考文献 (References)

[1] 任凤玉,周宗红,穆太升,等.夏甸金矿中深孔爆破参数优化研究[J].金属矿山,2005(11):4-6.

[1] REN Feng-yu,ZHOU Zong-hong,MU Tai-sheng,et al. Parameter optimization for blasting with medium-to-deep holes[J].Metal Mine,2005(11):4-6. (in Chinese)

[2] 邓飞,胡龙飞,刘晓军,等.千家坪钒矿中深孔爆破参数优化试验研究[J].矿业研究与开发,2014,34(3):118-122.

[2] DENG Fei,HU Long-fei,LIU Xiao-jun,et al. Experimental study on optimization of medium length hole blasting parameters in Qianjiaping vanadium mine[J].Mining Research and Development,2014,34(3):118-122. (in Chinese)

[3] 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):100-104.

[3] SU Jing,WU Gui-yi,ZHANG Yi-ping,et al. Study on parameters selection of vertical fan-shaped medium-length hole blasting by orthogonal experiment[J].Mining Research and Development,2012,32(4):100-104. (in Chinese)

[4] 姜永恒,雷恒永,杨杰,等.镇沅金矿中深孔爆破参数数值模拟研究[J].爆破,2019,36(1):77-83.

[4] JIANG Yong-heng,LEI Heng-yong,YANG Jie,et al. Numerical simulation of Zhenyuan Gold Mine blasting parameters[J].Blasting,2019,36(1):77-83. (in Chinese)

[5] 秦绍兵,秦绍红.井下中深孔爆破模型试验的相似性研究[J].工程爆破,2001,7(2):9-12.

[5] QIN Shao-bing,QIN Shao-hong. Study on the similarity of model experiment of underground medium-length-hole blasting[J].Engineering Blasting,2001,7(2):9-12. (in Chinese)

[6] 潘森昌,武永猛,史秀志,等.凡口铅锌矿扇形中深孔爆破参数数值模拟研究[J].采矿技术,2013,13(5):87-89,142.

[6] PAN Miao-chang,WU Yong-meng,SHI Xiu-zhi,et al. Numerical simulation of fan-shaped medium length hole blasting parameters in Fankou Lead Zinc mine[J].Mining Technology,2013,13(5):87-89,142. (in Chinese)

[7] 谭臻,李广悦.扇形中深孔爆破块度预测的神经网络法[J].爆破,2004,21(1):13-16.

[7] TAN Zhen,LI Guang-yue. An artificial neural network approach to the prediction of fragmentation size in moderate longhole blasting[J].Blasting,2004,21(1):13-16. (in Chinese)