

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.012

## 基于智能岩性识别的炮孔装药量计算\*

陈应显, 周萌

(辽宁工程技术大学 矿业学院, 阜新 123000)

**摘要:** 现今数字化和人工智能发展已经渗透到各行各业,在爆破行业中“数字爆破”的出现推动爆破朝着数字化、精细化、可视化发展。随着智能技术的发展,将智能技术应用于工程爆破领域成为发展趋势。为了提高爆破效果和降低爆破成本,提出一种新的计算炮孔装药量的方法。通过训练SVM模型预测地层并嵌入智能钻机系统,利用智能钻机精确定位与随钻机实时识别岩性参数技术,获得精确的炮孔岩性分布数据。建立炮孔数据库,存储和管理从智能钻机中获得的炮孔岩性分布数据,并对炮孔数据进行可视化显示,生成炮孔岩性二维、三维柱状图;对炮孔位置点集和爆破范围多边形按Delaunay准则进行三角面剖分,计算每个炮孔影响面积;根据炮孔的岩性分层和影响面积计算每个炮孔各岩层所需的装药量,对各岩层所需装药进行累加,得到每个炮孔所需的装药总量。使用C++编程实现了基于智能岩性识别的炮孔装药量计算,在内蒙古自治区锡林浩特某露天煤矿进行实际应用,实现了对该矿918平盘爆破区域炮孔装药量计算。

**关键词:** 数字爆破;装药量计算;炮孔装药;智能岩性识别;露天煤矿

**中图分类号:** TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0092-08

## Blasting Charge Calculation based on Intelligent Lithology Identification

CHEN Ying-xian, ZHOU Meng

(School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Nowadays, the development of digitization and artificial intelligence has penetrated all walks of life. The emergence of "digital blasting" in the blasting industry promotes the development of blasting towards digitization, refinement and visualization. The application of intelligent technology in the field of engineering blasting have become a development trend. In order to improve blasting effect and reduce the blasting cost, a new method for calculating explosive charge is proposed. By training the SVM model to predict the strata and embedding the intelligent drilling rig system, the accurate positioning and real-time identification of lithologic parameters are obtained. A borehole database is established to store and manage the borehole lithology distribution data obtained from the intelligent drilling rig. These data can be visually displayed by generating two-dimensional and three-dimensional histograms. According to Delaunay's criterion, the polygon of hole location and blasting range is triangulated, and the affected area of each hole is calculated. Then, according to the lithologic stratification and affected area of each hole, the charge quantity required by each rock layer of each hole is calculated, and the charge quantity required by each rock layer is accumulated to obtain the total charge quantity required by each hole. The charge calculation based on intelligent lithology identification is realized by C++ programming, which has been applied in the 918 section of an open-pit coal mine in Xilinhot, Inner Mongolia.

收稿日期:2022-07-22

作者简介:陈应显(1975-),男,四川中江人,博士、副教授,从事露天开采和数字矿山的教学与研究工作,(E-mail)htucyx@163.com。

通讯作者:周萌(1998-),女,河南南阳人,硕士研究生,从事露天开采和数字矿山的科研工作,(E-mail)2480363320@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51974144,51874160);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01)

**Key words:** digital blasting; charge calculation; blast-hole charging; intelligent lithology identification; open pit coal mine

智能技术作为当今科技革命和产业革新的新引擎和核心驱动力,成为引领世界科技发展潮流的关键性战略技术<sup>[1]</sup>,将智能技术应用于工程爆破领域成为发展趋势。2009年,曲广建等提出“数字爆破”的概念<sup>[2]</sup>。2015年,段云等提出了钻孔数字化与钻孔岩性自动识别技术<sup>[3]</sup>。2020年,王敏生提出了智能钻井技术攻关方向,包括框架规划与标准体系等智能钻井一体化技术<sup>[4]</sup>。2020年,李根生等提出总结了有关智能钻井技术研究现状及未来发展趋势<sup>[5]</sup>。杨传书等提出了将人工智能技术应用到钻井领域的“三轮驱动”方法论<sup>[6]</sup>。吴思源等利用“边钻边学”的人工智能评价与决策方法,提出了一种大闭环伺服控制随钻智能导向钻井方法<sup>[7]</sup>。随着智能钻机和智能岩性识别技术的发展,已经可以获得炮孔精确的岩性分布数据,如何利用炮孔精确的岩性数据来计算装药量,将是提高爆破效果和降低爆破成本的新途径。

目前普遍采用的计算炮孔装药量的方法,主要依据地质勘探钻孔数据或经验来估计炮孔的岩性,并由此计算炮孔的装药量。由于所依据的地质勘探钻孔密度太大或人为因素,这种确定爆破岩性的方法往往无法准确获得炮孔的岩性分布,所得到炮孔装药量计算结果对爆破效果和爆破成本产生较大的影响。为提高爆破效果和降低爆破成本,很多学者和工程技术人员在炮孔装药量辅助计算和爆破效果分析等方面做了很多研究。Persson Per-Anders 提到了正确地使用炸药威力以产生最佳的破碎程度,可以减少设备的磨损,显著提高生产能力<sup>[8]</sup>。1985年,缪纯组对露天矿爆破中采用体积公式计算炮孔装药量的偏差进行了调整<sup>[9]</sup>。1987年,崔顺英等利用电子计算机,实现了在露天矿生产爆破中炮孔剖面图的绘制及装药量计算使用 CAD 技术<sup>[10]</sup>。2000年,G R Adhikari 通过对比爆破的经验方法,发现爆破能量的理想破碎度分布、传递和利用很大程度上影响爆破的稳定性<sup>[11]</sup>。2003年,G V Basheev 等提出了一种岩石钻孔装药爆破作用的流体力学模型<sup>[12]</sup>。2005年,郑明焦使用排孔装药系数来计算炮孔装药量<sup>[13]</sup>。2007年,M Rount,C Parida 建立了适合矿山的爆破模型、采用简单的方法以获得更好的爆破效果<sup>[14]</sup>。2008年,R Mikhelson 设计了露天矿山钻爆作业的计算机程序<sup>[15]</sup>。2009年,Shim, Hyun-Jin 等根据岩石因子的三维空间分布提出每种类型的最佳爆破方式<sup>[16]</sup>。2015年,Victor MwangoB-

owa 以实际露天矿为例,对露天台阶爆破设计参数进行优化<sup>[17]</sup>。2018年,张晋对优化炮孔布置参数来降低炮孔炸药单耗的方法进行了说明<sup>[18]</sup>。2019年,董少南提出了一种最优炸药量计算及最优装药结构布置的方法<sup>[19]</sup>。2019年,Mingzheng Wang 等基于改进 Harries 数学模型对多环爆破优化装药方案进行计算<sup>[20]</sup>。2019年,张勤彬等提出了两种不同炮孔理论装药长度计算模型<sup>[21]</sup>。2021年,耿伟为基于隧道爆破设计理论,开展了隧道钻爆开挖爆破方案智能设计方法与系统研究<sup>[22]</sup>。2021年,庄又军解决了深孔封堵劳动量大、含水地层封堵困难、炸药拒爆等不易处理的难题<sup>[23]</sup>。2021年,原文杰利用 ABAQUS 数值模拟软件 CEL 技术建立了深孔爆破计算模型,分析不同药柱中部隔离装药长度对爆破效果的影响<sup>[24]</sup>。上述研究对计算炮孔装药量提出了很多种方法,但这些研究中未涉及通过炮孔中的岩性分布来优化炮孔装药量计算。

论文基于智能钻机岩性识别得到的炮孔岩性数据,提出一种基于智能岩性识别的炮孔装药量计算方法。主要包括以下步骤:首先,通过智能钻机获取岩性识别数据,建立炮孔数据库,存储炮孔岩性数据数据库,存储炮孔岩性数据,生成炮孔岩性柱状图;对炮孔位置点集和爆破范围多边形按 Delaunay 准则进行三角面剖分,计算炮孔影响面积;最后,根据炮孔的岩性分层和影响面积,计算炮孔装药量。计算方法的流程如图 1 所示。



图 1 炮孔装药量计算流程图

Fig. 1 Flow chart of charge

# 1 智能岩性识别

采用辽宁瀚石机械制造有限公司生产的LWD200型液压矿用钻机。智能钻机上的岩性识别数据采集系统编程软件由丹佛斯提供的PLUS+1、Service Tool和CAN King所编写,该系统初步实现钻机的自动钻进功能,通过各类传感器能够对数据进行实时收集,并对其简单分析做出相应的机械操控<sup>[25,26]</sup>。

## 1.1 智能岩性识别原理

在进行智能岩性识别的过程中,使用数学方法构建岩性特征与物理力学指标之间的关系,涉及机器学习和大规模数据运算。采用支持向量机<sup>[27]</sup>(Support Vector Machine, SVM)方法进行炮孔智能岩性识别,充分考虑岩层岩石划分的模糊性和同种岩性之间物理力学性质数值范围变化较大等问题。在此基础上,利用支持向量机引入样本强化不同参数岩性类别的区分度,使得不同的样本参数值分成不同的样本空间,从而使支持向量机在岩性识别方面的应用具有较好的抗噪能力和分类能力。SVM是在线性可分的情况下求解最优分类面,基本思想是根据样本集的特征分为不同的类别,如图2所示,图中★和◆分别代表不同的样本数据,在这样本数据中找到能让所有样本分类可信度最高的那条线H即为分类线, $H_1$ 和 $H_2$ 是通过离分类线最近的样本且平行于分类线的直线,他们之间的距离叫做分类间隔。SVM是对于非线性问题转化为高维空间的线性问题,即在变换空间中求解最优分类面,把一维空间的 $x$ 映射到高维空间的 $\phi(x)$ ,分类线方程为 $f(x) = \phi(x)w + b$ ( $b$ 为常数),对它进行归一化,使得线性可分的样本集 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n, x \in R^d, y \in [+1, -1]$ ,分类间隔为 $2/\|w\|$ 。

$$y_i f[\phi(x_i)] \geq 1, i \in 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

求解最优分类面是求式分类间隔在式(1)约束条件下的极值,过超平面 $H_1$ 和 $H_2$ 上的样本点称为支持向量机。

利用Lagrange优化方法,把求解最优分类面问题转化为对偶问题,即在两个约束条件下

$$\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i = 0; \alpha \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

求下列函数的最大值

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - 1/2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \phi(x_i)^T \phi(x_j) \quad (3)$$

找到一个替代函数即核函数 $k(x_i, x_j)$ 替代 $\phi(x_i)^T \phi(x_j)$ 。径向基函数属于局部逼近神经网络,是一种性能良好的前向网络,具有最佳逼近及克服局部极小值问题的性能。本文选用径向基函数(RBF)

$$K(x, x_i) = \exp\{-|x - x_i|^2/\sigma^2\} \quad (4)$$

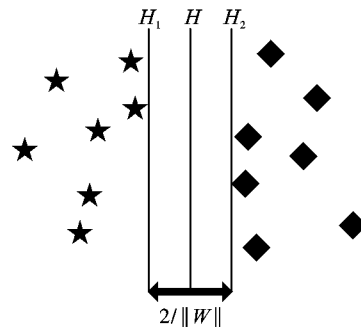


图2 SVM最优分类平面示意图

Fig. 2 Plane diagram of SVM optimal classification

## 1.2 炮孔岩性数据的识别与存储

在智能钻机的自学习初期,根据钻孔响应识别的原则,把岩性分为泥岩、粉(细)砂岩、砂质泥岩或者泥质砂岩、粗砂岩、炭质泥岩、煤。在钻机穿孔过程中,由于不同岩石类型所对应的参数指标的不同,对回转速度、钻进速度、加压压力1、加压压力2、回转压力差、风压和钻孔深度7个指标进行数据采集。使用MATLAB编写程序,运用机器学习中的支持向量机的方法对采集到的样本进行训练,利用训练后的SVM模型预测地层。

通过大数据机器学习得到回转速度等7个参数指标与岩石类型之间的关系。将机器学习获得的参数指标与岩石类型之间的关系嵌入到智能钻机岩性识别系统中,完成对智能钻机自动岩性识别训练。智能岩性识别钻机在钻进过程中进行实时的自动岩性判别及相关参数采集,最终从岩性数据中得出岩性分布,结果如表1、表2所示<sup>[21]</sup>。

表1 岩层表  
Table 1 Strata table

钻孔编号	钻孔深度/m	回转速度/ $(r \cdot \min^{-1})$	回转压差/MPa	加压压力1/MPa	加压压力2/MPa	钻进速度/ $(cm \cdot s^{-1})$	风压/MPa	识别岩性	钻孔深度顺序	录入时间
ZK2023	4.68	75	46	30	7	3	4	3	1	2017/11/6 11:15:28
ZK2024	5.79	105	50	51	7	5	4	3	4	2017/11/6 11:31:36
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ZK2164	15.62	120	73	32	8	6	4	2	3	2017/11/22 20:46:09

表2 岩性表  
Table 2 Lithology table

岩性号	岩层名称
1	泥岩
2	粉(细)砂岩
3	砂质泥岩或者泥质砂岩
4	粗砂岩
5	炭质泥岩
6	煤
7	钙质或硅质胶结砾岩

### 1.3 炮孔数据库建立

建立炮孔关系数据库,将智能钻机获得的炮孔原始数据进行存储和管理。在MySQL数据库中创

表3 炮孔表

Table 3 Gun hole table

炮孔编号	炮孔名称	X/m	Y/m	Z/m	炮孔采集时间
1	ZK2023	19477.49	74464.34	916.62	2017/11/6 11:15:28
2	ZK2024	19480.17	74458.97	916.19	2017/11/6 11:31:36
...	...	...	...	...	...
165	ZK2187	19400.55	74492.93	917.48	2017/11/8 13:37:55

## 2 炮孔装药量计算方法

炮孔装药量的准确计算对爆破效果和爆破成本产生较大的影响,普遍采用的计算装药量的公式为<sup>[8]</sup>

$$Q = qawh \quad (5)$$

式中: $Q$ 为炮孔装药量,kg; $q$ 为单位炸药消耗量,kg/m<sup>3</sup>; $a$ 为相邻两炮孔之间的距离,m; $w$ 为最小抵抗线,m; $h$ 为台阶高度,m。

炸药的单位消耗量 $q$ 是根据岩石性质的不同而改变,但只能通过现场工作人员的经验来确定,存在很大的人为因素。为了解决这一问题,提出一种基于智能岩性识别的炮孔装药量计算方法。这种方法通过智能钻机确定炮孔岩石类型分布,精确计算出炮孔的装药量。炮孔装药量计算的过程主要包括:(1)对炮孔位置点及爆破范围多边形按Delaunay准则进行三角剖分,得到爆破范围三角网,基于爆破范围三角网,计算炮孔的影响面积;(2)根据炮孔岩性分层数据和炮孔影响面积,计算炮孔的装药量。

### 2.1 计算炮孔影响面积

在露天矿采剥工程平面图上圈定爆破范围多边形,从炮孔数据库中提取炮孔数据,描绘爆破范围多边形内的炮孔孔口位置,得到炮孔位置点集 $H = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n\}$ ,其中, $p_i$ 为第 $i$ 个炮孔位置

建炮孔数据库,炮孔数据库由炮孔表、岩层表和岩性表组成。使用C++语言编写的数据结构包括炮孔数据结构、岩层数据结构、岩性数据结构和岩性炸药单耗数据结构这四类数据结构,每类数据结构包括的具体信息分别如下:

炮孔数据结构,该数据结构中包括炮孔编号、炮孔名称、炮孔 $X$ 坐标、炮孔 $Y$ 坐标、炮孔 $Z$ 坐标和炮孔采集时间,如表3所示;岩层数据结构,该数据结构包括炮孔编号、炮孔深度、回转速度、回转压差、加压压力1、加压压力2、钻进速度、风压、岩性号,如表1所示。岩性数据结构,该数据结构包括岩性号和岩层名称,如表3所示。岩性炸药单耗数据结构,该数据结构包括岩性号和炸药单耗。

点, $i \in [1, n]$ , $n$ 为炮孔总数, $p_i$ 由空间三维坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ 构成,对炮孔位置点集 $H$ 和爆破范围多边形顶点按Delaunay准则进行三角面剖分,得到三角面集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_m\}$ ,其中, $t_j$ 为第 $j$ 个三角面, $j \in [1, m]$ , $m$ 为三角面的总数。

设有 $b$ 个三角面与该炮孔连接,炮孔的影响面积的计算公式如下

$$a_i = \sum_{o=1}^b S_o / \lambda_o \quad (6)$$

式中: $a_i$ 为第 $i$ 个炮孔的影响面积; $S_o$ 为与该炮孔连接的第 $o$ 个三角形的面积, $o \in [1, b]$ , $b$ 为与炮孔 $i$ 相连接三角面的总数; $\lambda_o$ 为与第 $o$ 个三角形连接的炮孔个数。

根据与炮孔点连接的三角形计算该炮孔的影响面积,得到炮孔影响面积集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ ,其中, $a_i$ 为第 $i$ 个炮孔的影响面积, $i \in [1, n]$ , $n$ 为炮孔总数。

### 2.2 计算炮孔装药量

基于岩性分层数据和炮孔影响面积,计算炮孔装药量。由于炮孔按岩性分层,所以计算炮孔的装药量时,按岩层分层顺序计算各岩层所需要的炸药量 $Q_{ik}$ ,其中 $Q_{ik}$ 为第 $i$ 个炮孔第 $k$ 层岩层所需的炸药量, $k \in [1, l]$ , $l$ 为第 $i$ 个炮孔的岩层分层总数;各分层所需炸药量之和即为该炮孔的装药量 $Q_i$ ,其中,

$Q_i$  为第  $i$  个炮孔的装药量,  $i \in [1, n]$ ,  $n$  为炮孔总数; 计算炮孔的装药量为各分岩层所需要炸药量的总和, 计算公式如下所示

$$Q_i = \sum_{k=1}^i Q_{ik} \quad (7)$$

式中:  $Q_i$  为第  $i$  个炮孔的装药量;  $Q_{ik}$  为第  $i$  个炮孔第  $k$  层岩层所需的炸药量,  $k \in [1, l]$ ,  $l$  为第  $i$  个炮孔的岩层分层总数。  $Q_{ik}$  的计算公式如下所示

$$Q_{ik} = a_i q_k L_k \quad (8)$$

式中:  $a_i$  为第  $i$  个炮孔的影响面积;  $q_k$  为第  $k$  层岩层的炸药单耗;  $L_k$  为第  $k$  层岩层的厚度。

### 3 应用实例

此次应用实例位于内蒙古锡林浩特某露天矿的 918 平盘, 作业范围长 125 m, 宽 65 m, 智能钻机获得的 165 个炮孔的岩性分层数据, 存储到炮孔数据库中, 利用炮孔岩性分层数据, 实现对炮孔装药量的计算。

#### 3.1 存储炮孔岩性数据

建立炮孔数据库, 对智能钻机获得的炮孔岩性数据进行存储和管理。炮孔数据库由炮孔表、岩层表和岩性表组成。数据库中存储的 165 个炮孔的数据如表 1 所示。炮孔的位置分布如图 3 所示, 图中显示的是炮孔名称和炮孔的平面位置, 具体数值如图 3 中局部放大图所示。

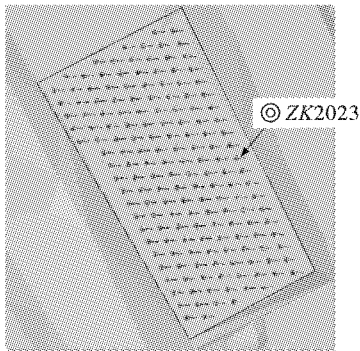


图 3 炮孔的分布俯视图示意图

Fig. 3 Overlook diagram of hole distribution

岩层表和岩性表分别如表 1 和表 2 所示。

#### 3.2 生成炮孔岩性柱状图

对炮孔数据进行可视化显示, 生成炮孔二维柱状图和三维柱状图。炮孔二维柱状图如图 3 所示, 炮孔三维柱状图如图 4 所示, 图中显示的是炮孔名称、炮孔分层岩性和分层岩层厚度。

#### 3.3 计算炮孔影响面积

对 165 个炮孔位置点和爆破范围多边形顶点按

Delaunay 准则进行三角面剖分, 得到 390 个三角面, 如图 5 所示。根据炮孔影响面积计算公式(2)分别计算出所有炮孔的爆破影响面积, 计算结果如表 4 所示。见图 6。

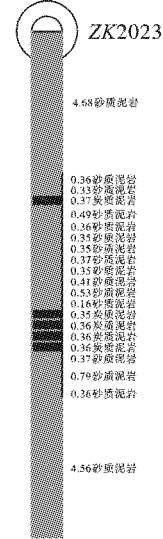


图 4 炮孔二维柱状图

Fig. 4 Two-dimensional histogram of hole

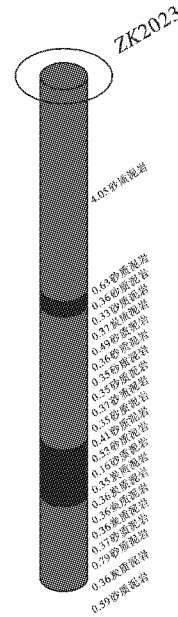


图 5 炮孔三维柱状图

Fig. 5 Three-dimensional histogram of borehole

表 4 炮孔影响面积表

Table 4 The affected area of the hole

炮孔编号	炮孔名称	影响面积/m <sup>2</sup>
1	ZK2023	70.72
2	ZK2024	70.00
3	ZK2025	71.27
...	...	...
165	ZK2187	82.26

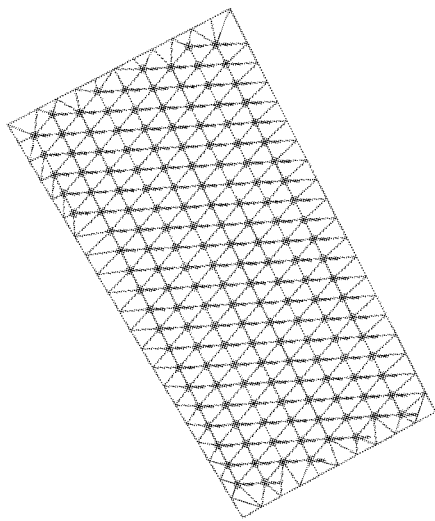


图6 爆破范围三角网

Fig. 6 Triangulation network of blasting range

### 3.4 计算炮孔装药量

以炮孔 ZK2023 为例计算该炮孔的装药量,该炮孔共分为 10 个岩层,如图 3 所示,炮孔的影响面积为  $70.72 \text{ m}^2$ ,根据计算公式(8)分别计算这 10 个岩层所需要的炸药量,这 10 个岩层所需要炸药量的总和即为炮孔 ZK2023 的装药量:175.91 kg。所有炮孔装药量计算结果如表 5 所示。

表5 炮孔装药量结果表

Table 5 Charging results of hole

炮孔编号	炮孔名称	炮孔装药量/kg
1	ZK2023	175.91
2	ZK2024	117.67
3	ZK2025	98.10
...	...	...
165	ZK2187	138.75

## 4 结论

通过机器学习对钻孔岩性数据进行识别,获得准确的岩性分布数据,在此基础上,提出了一种基于智能岩性识别的炮孔装药量计算方法,结论如下:

(1) 运用支持向量机方法对采集到的样本进行训练,利用训练后的 SVM 模型实现智能钻机岩性识别。

(2) 建立炮孔数据库,对智能岩性识别数据进行存储和管理,对炮孔数据进行可视化显示,生成炮孔岩性二维柱状图和三维柱状图。

(3) 对炮孔位置点集和爆破范围多边形按 Delaunay 准则进行三角面剖分,计算炮孔影响面积,根据炮孔的岩性分层和影响面积计算炮孔装药量。

使用 C++ 编程实现了基于智能岩性识别的炮孔装药量计算,以内蒙古自治区锡林浩特某露天煤矿为应用实例,完成了对实际矿山爆破炮孔装药量计算。

## 参考文献(References)

- [1] 闫 铁,许 瑞,刘维凯,等. 中国智能化钻井技术研究发展[J]. 东北石油大学学报,2020,44(4):15-21,6.
- [1] YAN Tie, XU Rui, LIU Wei-kai, et al. Research and development of intelligent drilling technology in China[J]. Journal of Northeastern Petroleum University, 2020, 44(4):15-21,6. (in Chinese)
- [2] 费鸿禄,郭连军. 爆破施工的数字化[J]. 爆破,2015,32(3):31-40.
- [2] FEI Hong-lu, GUO Lian-jun. The digitization of blasting construction[J]. Blasting, 2015, 32(3):31-40. (in Chinese)
- [3] 段 云,熊代余,徐国权. 钻孔数字化与钻孔岩性自动识别技术[J]. 金属矿山,2015(10):125-134.
- [3] DUAN Yun, XIONG Dai-yu, XU Guo-quan. Borehole digitization and automatic identification technology of borehole lithology[J]. Metal Mine, 2015(10):125-134. (in Chinese)
- [4] 王敏生,光新军. 智能钻井技术现状与发展方向[J]. 石油学报,2020,41(4):505-517.
- [4] WANG Min-sheng, GUANG Xin-jun. Current situation and development direction of intelligent drilling technology[J]. Journal of petroleum, 2020, 41(4):505-517. (in Chinese)
- [5] 李根生,宋先知,田守崮. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术,2020,48(1):8-9.
- [5] LI Gen-sheng, SONG Zhen-heng, TIAN Shou-sheng. Research status and development trend of intelligent drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1):8-9. (in Chinese)
- [6] 杨传书,李昌盛,孙旭东,等. 人工智能钻井技术研究方法及实践[J]. 石油钻探技术,2021,49(5):7-13.
- [6] YANG Chuan-shu, LI Chang-sheng, SUN Xu-dong, et al. Research method and practice of artificial intelligence drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5):7-13. (in Chinese)
- [7] 吴思源,李守定,陈 冬,等. 大闭环伺服控制随钻智能导向钻井方法[J]. 地球物理学报,2021,64(11):4215-4226.
- [7] WU Si-yuan, LI Shou-ding, CHEN Dong, et al. Large closed loop servo control while drilling intelligent guided drilling method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11):4215-4226. (in Chinese)

- [8] PERSSON P-A, HOLMBERG R, LEE J. Rock blasting and explosives engineering[M]. CRC Press, 1993: 264-233.
- [9] 缪纯组. 露天矿爆破采用体积公式计算炮孔装药量的偏差与调整[J]. 煤炭科学技术, 1985(11): 23-28.
- [9] MIAO Chun-zu. Duration and adjustment of blast-hole charging quantity by volume formula in open-pit mine blasting[J]. Coal Science and Technology, 1985(11): 23-28. (in Chinese)
- [10] 崔顺英, 张中元, 肖艳平. 露天矿生产爆破中 CAD 技术——炮孔剖面图的绘制及装药量计算[J]. 爆破, 1987(3): 18-27.
- [10] CUI Shun-ying, ZHANG Zhong-yuan, XIAO Yan-ping. Drawing of CAD technology blast-hole profile and calculation of charge in open-pit mine production blasting[J]. Blasting, 1987(3): 18-27. (in Chinese)
- [11] ADHIKARI G R. Empirical methods for the calculation of the specific charge for surface blast design[J]. Frag-blast, 2000, 4(1): 19-33.
- [12] BASHEEV G, EFREMOV A, CHERNIKOV A. Parameter calculation for efficient allocation of charge in borehole during bench blasting of rock[J]. Journal of Mining Science, 2003, 39(6): 565-637.
- [13] 郑明焦. 中深孔爆破炸药量计算方法的应用[J]. 中国矿山工程, 2005, 34(4): 15-22.
- [13] ZHENG Ming-jiao. Application of explosive quantitation calculation method for medium deep hole blasting[J]. China Mine Engineering, 2005, 34(4): 15-22. (in Chinese)
- [14] ROUT M, PARIDA C. Optimization of blasting parameters in opencast mines[J]. Department of Mining Engineering National Institute of Technology, 2007: 48-45.
- [15] MIKHELSON R, KHOMERIKI S, KHOMERIKI D. The computer program of designing drilling and blasting operations in open-cast mine [J]. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2008(24): 163-169.
- [16] SHIM H-J, RYU D-W, CHUNG S-K. Optimized blasting design for large-scale quarrying based on a 3-D spatial distribution of rock factor[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 326-358.
- [17] BOWA V M. Optimization of blasting design parameters on open pit bench a case study of nchanga open pits [J]. Int J SciTechnolRes, 2015, 4(9): 45-51.
- [18] 张晋. 深孔爆破中降低炸药单耗的方法研究[J]. 科技风, 2018(4): 196.
- [18] ZHANG Jin. Research on method of reducing unit consumption of explosive in deep hole blasting[J]. Science & Technology Wind, 2018(4): 196. (in Chinese)
- [19] 董少南, 张宝忠, 李向明, 等. 一种最优炸药量计算及最优装药结构布置的方法, 中国: CN109446472A[P/OL]. 2019-03-08].
- [19] DONG Shao-nan, ZHANG Bao-zhong, LI Xiangming, et al. A method for calculating the optimal explosive quantity and optimal charge structure layout, China: CN109446472A[P/OL]. 2019-03-08].
- [20] WANG M, SHI X, ZHOU J. Optimal charge scheme calculation for multiring blasting using modified harries mathematical model[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(2): 11-13.
- [21] 张勤彬, 程贵海, 唐春海. 两种不同炮孔理论装药长度计算模型[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(3): 19-22.
- [21] ZHANG Qin-bin, CHENG Gui-hai, TANG Chun-hai. Two different theoretical charging length calculation models of blast-hole[J]. Chemical Minerals and Processing, 2019, 48(3): 19-22. (in Chinese)
- [22] 耿伟卫. 隧道钻爆开挖爆破方案智能设计方法与系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [22] GENG Wei-wei. Research on intelligent design method and system of tunnel drilling and blasting excavation blasting scheme[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [23] 庄又军, 薛峰, 张卫, 等. 深孔预裂爆破装药量计算方法及水耦合装药结构优化[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 150-154.
- [23] ZHUANG You-jun, XUE Feng, ZHANG Wei, et al. Calculation method of deep hole presplitting blasting charge and optimization of water coupling charge structure[J]. China Mining, 2021, 30(1): 150-154. (in Chinese)
- [24] 原文杰, 熊紫琛, 候鑫, 等. 深孔间隔装药爆破效果数值模拟研究[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(6): 16-19.
- [24] YUAN Wen-jie, XIONG Zi-chen, HOU Xin, et al. Numerical simulation of deep hole interval charge blasting effect[J]. Open-pit Mining Technology, 2021, 36(6): 16-19. (in Chinese)
- [25] 朱海成, 韩新平, 冀常鹏. 钻孔岩性识别条件下的数字爆破技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 184-193.
- [25] ZHU Hai-cheng, HAN Xin-ping, JI Chang-peng. Study on digital blasting technology under the condition of lithologic identification of borehole[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 184 - 193. (in Chinese)
- [26] 许振浩, 马文, 林鹏, 等. 基于岩石图像迁移学习的岩性智能识别[J]. 应用基础与工程科学学报,

- 2021,29(5):1075-1092.
- [26] XU Zhen-hao, MA Wen, LIN Peng, et al. Lithology intelligent recognition based on rock image transfer learning [J]. Journal of applied Basic and Engineering Sciences, 2021,29(5):1075-1092. (in Chinese)
- [27] 宋延杰,张剑风,闫伟林,等. 基于支持向量机的复杂岩性测井识别方法[J]. 大庆石油学院学报,2007,31(5):18-20.
- [27] SONG Yan-jie, ZHANG Jian-feng, YAN Wei-lin, et al. Identification method of complex lithology logging based on support vector machine[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007,31(5):18-20. (in Chinese)
- 英文编辑:黄 刚

(上接第84页)

## 7 结束语

(1)老龙山石灰岩矿在90 mm孔径下选择4.0 m×3.8 m孔排距达到爆破效果,炸药综合单耗从2019年全年平均0.164 kg/t,降低到20年实施该项目后平均0.138 kg/t,并满足每日生产所需矿石量。

(2)110 mm孔径下炸药单耗在5.0 m×4.8 m孔排距下达到0.114 kg/t,满足综合经济效益及生产效率。

(3)第二阶段优化试验初步结果统计110 mm孔径下炸药单耗低、单次爆破矿量多,间接增加了有效生产时间,同时也存在钻孔效率低、直接造成人工成本偏高,下一步公司需重新核定穿孔人工工资。

### 参考文献(References)

- [1] 彭静波. 极硬岩条件下露天台阶深孔爆破质量改善研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2015.
- [1] PENG Jing-bo. Study on improvement of open-pit bench blasting quality under the condition of extremely hard rock [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [2] 马 力,涂宇航,马成卫,等. 露天矿台阶深孔大孔距小排距爆破参数优化[J]. 中国科技论文,2019,14(5):506-509.
- [2] MA Li, TU Yu-hang, MA Cheng-wei, et al. Blasting parameters optimization for larger hole spacing and smaller burden of deep hole bench for surface coal mine[J]. China Sciencepaper, 2019,14(5):506-509. (in Chinese)
- [3] 马 力,丁小华,孙健东,等. 深孔台阶抛掷爆破岩石破碎及抛掷机理[J]. 中国科技论文,2017,12(21):2445-2448.
- [3] MA Li, DING Xiao-hua, SUN Jian-dong, et al. Rock breaking and throwing mechanism of deep hole throwing blasting[J]. China Sciencepaper, 2017,12(21):2445-2448. (in Chinese)
- [4] 郭春阳,池恩安,赵民生,等. 别山台阶深孔爆破孔排距优化试验及应用[J]. 爆破,2018,35(1):59-65.
- [4] GUO Chun-yang, CHI En-an, ZHAO Ming-sheng, et al. Optimization test and application of holes distance of deep holes bench blasting in Biesikuduke mine[J]. Blasting, 2018,35(1):59-65. (in Chinese)
- [5] 饶运章,王春华,黄铁平,等. 某石灰岩矿中深孔爆破参数优化研究[J]. 有色金属科学与工程,2011,2(6):47-51.
- [5] RAO Yun-zhang, WANG Chun-hua, HUANG Tie-ping, et al. The optimization of blasting parameters in the medium depth hole in a limestone mine[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011,2(6):47-51. (in Chinese)
- [6] 王 涛. 黄麦岭露天矿台阶爆破探索最优孔排距[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [6] WANG Tao. The bench blasting parameters optimization and the study of blasting vibration effect of Huangmailin Open-pit[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [7] 沈慧明,吴爱祥,余佑林,等. 狮子山铜矿中深孔爆破参数优化设计研究[J]. 中国钼业,2003,27(1):14-17.
- [7] SHEN Hui-ming, WU Ai-xiang, YU You-lin, et al. Study on optimization design of medium-length-hole blasting parameters in Shizishan copper mine[J]. China Molybdenum Industry, 2003,27(1):14-17. (in Chinese)
- [8] 陈 寿,周桂松,周 云,等. 逐孔起爆技术在太和铁矿的应用[J]. 工程爆破,2011,17(1):43-45,49.
- [8] CHEN Shou, ZHOU Gui-song, ZHOU Yun, et al. Application of hole-by-hole initiation technique in Taihe iron mine[J]. Engineering Blasting, 2011,17(1):43-45,49. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚