

文章编号:1673-9469(2024)06-0101-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.015

基于钻孔随钻信息的爆破设计岩石系数确定方法

赵宇飞¹, 祁利², 王震洲³, 姜岚⁴, 曹瑞琅¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100084; 2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 440000;
3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102218; 4. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 为了通过智能感知技术实时感知待爆破岩体物理力学特性, 自主研发了随钻系统, 得到了爆破孔实时钻进信息。通过对采集数据的深入挖掘与分析, 提出了表征岩体完整性以及岩块单轴抗压等力学指标的分析方法, 构建了基于数字钻进随钻信息的岩石系数的取值图谱。在此基础上将基于爆破块度反算的岩石系数作为先验数据, 利用 Bayes 理论, 不断把现场爆破施工确定的岩石系数数据融合到先验分布中, 获得岩石系数的后验分布。与传统的方法相比, 提出的岩石系数确定方法更加智能准确, 可以为下一阶段的岩体爆破参数进行优化设计。

关键词: 数字钻进; 爆破设计; 岩石系数; Bayes 理论; 确定方法

中图分类号: TV542

文献标识码: A

A Method for Determining Rock Coefficients Based on Drilling Borehole Information During Blasting Design

ZHAO Yufei¹, QI Li², WANG Zhenzhou³, JIANG Lan⁴, CAO Ruilang¹

(1. China Institution of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100084, China;

2. Economic and Technological Research Institute State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan, Hubei 440000, China; 3. State Grid Economic and Technical Research Institute Co., Ltd., Beijing 102218, China;

4. School of Electricity and New Energy, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China)

Abstract: To perceive the physical and mechanical properties of the rock mass to be blasted in real-time through intelligent perception technology, a drilling system was independently developed to obtain real-time drilling information of the blasting hole. Through in-depth mining and analysis of collected data, an analysis method was proposed to characterize the integrity of rock mass and mechanical indicators such as the uniaxial compressive strength of rock blocks. A value map of rock coefficient A based on digital drilling while drilling information was constructed. On this basis, the rock coefficient calculated based on blasting fragmentation will be used as prior data, and Bayes theory will be used to continuously fuse the rock coefficient data determined by on-site blasting construction into the prior distribution, obtaining the posterior distribution of rock coefficients. Compared with traditional methods, the proposed rock coefficient determination method is more intelligent and accurate and can optimize the design of rock blasting parameters for the next stage.

Key words: digital drilling; blasting design; rock coefficient; Bayes theory; determination method

岩体爆破是一个非常复杂的岩石动力学问题, 是岩体在强烈的冲击波作用下的动态响应过程, 在这个过程中岩体的结构面发育情况、岩块强度以及地下水等因素都会很大程度影响岩体爆破

效果。常规的岩体爆破设计主要依据岩体普氏系数、裂隙发育情况和爆破要求, 从爆破孔距、孔深、孔斜、爆破孔装药量、爆破顺序和爆破延时等方面进行设计。常规的爆破设计经验成分较多, 尤其

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5200-202322135A-1-1-ZN); 国家重点研发计划(2023YFC3007005)

作者简介: 赵宇飞(1979-), 男, 山西陵川人, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程研究。

是岩石系数的确定缺少可靠方法,爆破智能化程度较低。

随着计算机技术以及物联网技术的不断发展,通过智能感知技术实时感知待爆破岩体物理力学特性,依据爆破参数智能化设计系统进行爆破参数的优化设计,从而得到最佳的爆破效果,是智能爆破发展的方向与趋势。近几年来,专家学者在这方面做了很多探讨,李利平等^[1]对钻爆法隧道智能化施工现状进行总结,在对洞室围岩智能化感知与分类的基础上进行了智能化爆破设计;郭中安等^[2]提出了使用露天矿用钻机获得岩石物理力学特征参数的感知技术,反算出岩石强度参数,最终确定爆破参数用于指导实践;张志刚等^[3]基于开挖面暴露出的岩石结构,提出了估算预测爆破块度分布、实时优化爆破参数以及爆破方法;刘庆丰等^[4]提出了围岩实时感知、爆破参数随围岩变化快速实时确定方法以及炮孔智能化布置方法;吴新霞等^[5-7]基于三维激光扫描,提出了岩体爆破块度控制新技术和水电工程智能爆破设计的具体思路;杨林等^[8-9]开发了岩土工程中智能爆破设计与管控系统,并在实际工程中得到了初步应用;汪旭光等^[10-11]系统提出了智能爆破的基本概念。但是,在实际工程中还缺少可应用于施工过程的物联网实时感知手段,还没有真正从实时感知的数据中得到岩体物理力学特征参数。

本文结合中国水利水电科学研究院自主研发的随钻系统,在常规水电站地下厂房的钻爆法施工中,将多臂凿岩台车进行了便携式改装,安装了相关传感器,得到了爆破孔实时钻进信息,在数据的深入挖掘与分析的基础上获得了待爆破岩体单轴抗压强度、完整性系数,进而为块度控制爆破设计中岩石系数的确定提供重要途径,为地下厂房开挖得到的渣料高效利用、水利水电工程的高效绿色开发提供技术支撑。

1 随钻技术

1.1 随钻技术原理

钻孔过程中钻具实时响应特征蕴藏着大量工程地质信息,通过解译钻进数据定量评价岩体完整性,可为快速获取工程岩体的地质特征提供新途径。本工程应用中国水利水电科学研究院研制的新型地质钻机数字钻进技术(Digital Drilling Technology, DDT),DDT采用高精度数字液压、转速

和激光位移传感器实时记录各种钻进信息,并利用这些信息综合确定钻进过程指数(Drilling Process Index, DPI)。DPI的变化趋势能综合反映岩体的破碎程度,可以据此获取岩体完整性特征指标,减少人工统计岩体完整性、编纂岩芯柱状素描图等工序。

基于DDT研制的地质钻机数字钻进系统主要由高精度数字传感器、自动采集仪以及数据分析软件组成,该系统示意图见图1。压力传感器安装于钻机推进装置的输油管道,用于监测钻进压力。在钻机钻杆上设立特殊的标志点,转速传感器安装在距离标志点10~12 mm处,用于监测钻杆转速,并通过非接触式空气耦合装置传输数据信号。扭矩传感器安装于钻杆上,内部转子随钻杆转动时测量受力,由外部定子解译信号并传输到数据采集仪,用于监测钻进扭矩。通过位移传感器监测钻进位移,位移传感器的标靶放置在随钻杆移动的钻机磨盘上,监测精度可达0.1 mm。钻进压力、钻杆转速、钻进扭矩和钻进位移会被同步和实时采集,数据采样时间间隔为1 s,并传输给数据自动采集仪和网络云端。

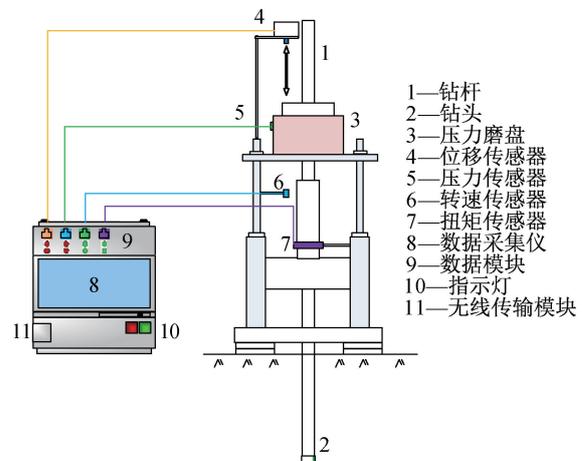


图1 地质钻机数字钻进系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of digital drilling system of geological drilling rigs

1.2 基于随钻数据的岩体物理力学特征参数确定

通过前期大量研究,在对数字钻进得到的海量信息综合分析的基础上,提出了钻速系数 α 和耗能系数 β 的定义^[12],这两个参数体现了不同岩石物理力学特性,与钻进过程所采用的钻具没有直接关系。根据得到钻速系数和耗能系数可进一步推求岩石物理力学特性参数,为岩体智能爆破参数设计提供重要技术参考。

钻进速率 v 与钻进参数冲击压强 P_e 、推进压强 P_i 的关系可以表示为

$$v = \alpha \cdot f(P_e) \cdot f(P_i) \quad (1)$$

钻速系数是一个仅与岩石属性有关的参数,不受推进压强 P_i 和冲击压强 P_e 的影响。利用现场工程试验数据,拟合得到的钻速系数的具体表达式为

$$v = \alpha \cdot P_i \cdot (-P_e + 32P_e - 210) \quad (2)$$

钻进耗能 E_R 同时受推进压强 P_i 和冲击压强 P_e 的影响,合理评价岩石属性同样需要滤除钻进参数 P_e 、 P_i 对 E_R 的影响,得到一个不受钻进参数影响仅和岩石相关的新指标——耗能系数。

通过现场工程试验数据,可以拟合得到的钻进耗能的具体表达式为

$$E_R = \beta \cdot \frac{(P_e^2 - 32P_e + 497)}{P_i} \quad (3)$$

通过前期相关试验数据分析^[12],得到了不同完整岩石的钻速系数和耗能系数的取值,如表 1 所示。

表 1 常见岩石的钻速系数与耗能系数取值范围

Tab. 1 Range of penetration rate coefficient and energy consumption coefficient of common rocks

岩石类型	钻速系数	耗能系数
片麻岩	0.97~1.40	1.31~1.71
大理岩	1.25~1.60	0.98~1.12
石英岩	1.38~1.71	1.10~1.20
白云岩	1.38~1.71	1.19~1.36

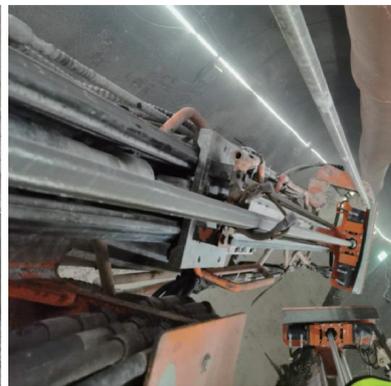
2 基于围岩力学参数洞室爆破开挖优化设计

2.1 凿岩台车数字钻进改装

本文结合某抽水蓄能电站地下厂房开挖工



(a) 工程爆破常用多臂凿岩台车



(b) 凿岩台车推进臂传感器安装

图 2 凿岩台车及其数字钻进改装

Fig. 2 Rock drilling jumbo and its digital drilling modification

程,对实际工程中采用的多臂凿岩台车进行台车数字钻进感知改造。在台车上安装了数字钻进传感器,利用该设备的液压表接口进行施工过程中推进压力、冲击压力等重要数据的实时采集;在推进钻杆上安装了霍尔传感器,能够实时记录施工时推进钻杆的实际转速,利用搭建的传输局域网络和传感器数据线将所有采集到的数据进行实时传输。凿岩台车及其数字钻进改装见图 2。

2.2 待爆破围岩物理力学特征参数确定

2.2.1 岩体完整性系数

定义钻进过程指数 DPI 表征岩体完整性状态。DPI 在均质材料中具有唯一性,基于数字钻进数据变化规律,采用多元函数回归,将 DPI 定义为

$$DPI = \alpha VF^{-0.5}N^{-0.5} \quad (4)$$

式中: F 为钻进压力,kN; N 为钻头转速,rev/s; V 为钻进速度,mm/s。

DPI 和岩体完整性存在如下关系:当 $0 < DPI \leq 2$ 时,岩体呈完整状;当 $2 < DPI \leq 3$ 时,岩体呈块体状;当 $DPI > 3$ 时,岩体呈破碎状。

根据岩体完整性的实际意义和 DPI 的特点,提出用于表达岩体完整性系数的指标——岩体完整率(Rockmass Integrity,RI)。RI 表示完整岩体的占比,RI 越高,岩体完整性越好,当岩体完全为一个整体时,RI 为 100%。因此,RI 和 DPI 的关系可定义为

$$RI = \frac{\sum L_i(0 < DPI \leq 2)}{L} \times 100\% \quad (5)$$

式中: L 是总钻进长度,m; L_i 是 L 范围内 DPI 处于 0~2 时对应的钻孔钻进长度,m。

2.2.2 岩体力学特征参数

在实际工程应用中,需要开展爆破试验凿岩台

车的爆破孔钻进数据与岩石单轴抗压强度之间相关关系的率定,通过爆破试验中得到的率定关系,利用概率拟合分析及 Bayes 理论不断进行相关关系的优化与完善,确定基于数字钻进信息的岩石单轴抗压强度的映射函数。

对目前积累的凿岩台车数字钻进场内机-岩映射模型试验得到的试验数据,进行统计分析、回归分析得到岩块单轴抗压强度 σ_{UCS} 与钻速系数、耗能系数之间的映射函数,见式(6)(7)。

$$\sigma_{UCS} = -114.39 \cdot \alpha + 246.34 \quad (\text{相关系数 } R = 0.79) \quad (6)$$

$$\sigma_{UCS} = 62.62 \cdot \beta^{1.60} \quad (\text{相关系数 } R = 0.77) \quad (7)$$

2.2.3 岩体质量分级

根据实际工程经验可知,计算得到的岩体完整性系数 RI 与《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)中常用的岩体完整系数 K_V 基本上一致,因此,可以利用钻孔随钻得到的岩体单轴抗压强度与 RI 值直接套用《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)中的公式进行岩体质量分级。

2.3 爆破块度预测模型参数确定

水利水电工程中,利用地下厂房开挖得到的渣料作为大坝坝料进行大坝填筑,是目前水电绿色开发的重要理念,尤其是在抽水蓄能电站建设中,通过边坡、地下厂房等区域的精细化爆破施工,得到块度级配满足大坝填筑设计要求的坝料,实现小料场甚至无坝料料场开采,达到无专门坝料开采的挖填平衡。

以往研究者们针对有块度要求的料场坝料爆破开采技术进行了大量的研究,提出了多种爆破块度预测模型,较为著名的有 Rosin-Rammler 分布函数模型^[13]、Kuz-Ram 模型^[14]及郑瑞春提出的 Bond-Ram 模型^[15],其中以 Kuz-Ram 模型的应用最为广泛。该模型由 Kuznetsov 和 Cunningham 于 1973 年提出,用于台阶爆破平均块度尺寸的预测。由于平均块度尺寸与爆破参数、岩石等有关,因此,模型的基本表达式由 Kuznetsov 方程、Rosin-Rammler 分布函数和块度不均匀指数三个部分组成。其中 Kuznetsov 方程可以表示为

$$x_{50} = A \times q^{-0.8} \times Q^{\frac{1}{6}} \times \left(\frac{115}{E}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (8)$$

式中: x_{50} 为平均块度值, m; A 为岩石系数, 与岩体裂隙、结构面发育程度有关; q 为炸药单耗, kg/m^3 ;

Q 为每个钻孔炸药的质量, kg; E 为炸药相对重量威力, 炸药类型不同, 取值也有所差异。

由式(8)可以看出, 岩石系数 A 是一个仅仅与岩体质量相关的参数, 与爆破参数并无关系, 但是在实际工程中如何确定岩石系数的数值是一个值得探讨的问题。

2.4 基于数字钻进的岩石系数确定方法

在以往的研究中, 有相关学者提出了岩石系数的确定方法, 如 Lilly^[16] 提出了一个确定岩石系数的经验公式, 在实际工程中得到了应用, 但是没有很好地解决实际工程问题。

Cunningham^[17] 对现场反馈的实际资料进行改进和修正, 提出确定岩石系数 A 的新方法, 并给出了式中各值的取值方式:

$$A = 0.06(RMD + JF + RDI + HF) \quad (9)$$

$$RDI = 25RD - 50;$$

$$\text{当 } E_c < 50 \text{ GPa 时, } HF = E/3;$$

$$\text{当 } E_c \geq 50 \text{ GPa 时, } HF = UCS/5.$$

式中: RMD 为岩体性能参数; JF 为节理特征系数, 无量纲; RDI 为密度系数, g/cm^3 ; RD 为岩石密度, g/cm^3 ; HF 为硬度系数; E_c 为弹性模量, GPa; UCS 为抗压强度, MPa。

在常规的爆破设计中, 对于岩石系数的取值, 主要依据工程师现场经验。一般情况下, 中等岩石取 7, 裂隙发育的硬岩取 10, 裂隙发育不太明显的硬岩取 13。但是这样的定性描述是完全依靠人为经验的取值方法, 对爆破质量控制与智能爆破的发展形成了巨大的障碍。在这样的情况下, 结合凿岩台车数字钻进改造, 利用获得的大量数据以及以往岩石系数取值经验, 提出了爆破设计中岩石系数的取值图谱, 如图 3 所示。

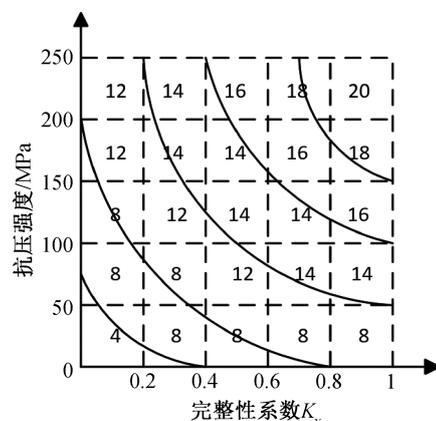


图3 爆破设计中岩石系数的取值图谱

Fig. 3 Map of values of rock coefficients in blasting design

在实际爆破设计中,可以通过图 3 首先确定岩石系数,然后在爆破试验过程中通过实际爆破岩块块度的级配分布,进行岩石系数的反算,将得到的岩石系数作为先验数据进行小样本统计分析,一般的岩石系数基本上都可以采用正态分布或对数正态分布来表示。通过爆破块度检测反算得到岩石系数与先验数据相结合,利用 Bayes 理论可以实现对岩石系数的不断优化与完善,结合凿岩台车得到的岩体信息,共同确定具体工程中不同层位岩体的岩石系数,进而实现岩体智能化爆破参数设计。具体的流程见图 4。

当样本服从正态分布及对数正态分布时,利用 Bayes 计算后验公式为

$$\pi(\theta | x) = \frac{p(x | \theta) \pi(\theta)}{m(x)} \quad (10)$$

式中: $\pi(\theta | x)$ 为先验分布; $p(x | \theta)$ 为给定样本分布,对于连续函数 $m(x) = \int p(x | \theta) \pi(\theta) d\theta$ 为 x 的边缘分布。

本文将爆破块度反算的岩石系数作为先验数据,当其分布密度函数服从正态分布时,记为 $N(A_1, \sigma_{A_1}^2)$; 现场爆破施工确定的岩石系数作为给定样本,其分布密度函数也服从正态分布,记为 $N(A_2, \sigma_{A_2}^2)$ 。其后验分布的分布密度函数 $h(\cdot)$ 同样也服从二维正态分布^[18]。根据 Bayes 公式:

$$h(\cdot) = \frac{N(A_1, \sigma_{A_1}^2) \cdot N(A_2, \sigma_{A_2}^2)}{\iint_{\Omega} N(\cdot) N'(\cdot) d\Omega} \quad (11)$$

式中:分母是一个独立的常数因子,它在计算后验

分布密度中仅仅起到正则化因子的作用,所以可将其省略掉 Bayes 公式改写为

$$h(\cdot) \propto N(A_1, \sigma_{A_1}^2) \cdot N(A_2, \sigma_{A_2}^2) \quad (12)$$

式(12)右侧为非标准形式密度函数,是后验分布 $h(\cdot)$ 的核,可以利用适当的方式计算出后验分布密度函数,特别是当 $h(\cdot)$ 的核为某常用分布的核时,不需计算就可以很快恢复所缺的常数因子,简化了后验分布的计算,其对于共轭先验分布与非共轭先验分布均适用。

根据文献[18]可以很快确定正态分布的后验分布密度函数 $N(A, \sigma_A^2)$, 后验分布函数中的 2 个参数的加权优化方法,可以按照下式进行简单计算:

$$A = \frac{A_1 \cdot \sigma_{A_2}^2 + A_2 \cdot \sigma_{A_1}^2}{\sigma_{A_1}^2 + \sigma_{A_2}^2} \quad (13)$$

$$\sigma_A^2 = \frac{\sigma_{A_1}^2 \cdot \sigma_{A_2}^2}{\sigma_{A_1}^2 + \sigma_{A_2}^2} \quad (14)$$

通过式(13)(14),可以由具体工程确定的强度参数的样本分布密度函数和先验分布密度函数,计算得到其后验分布密度函数,即 Bayes 优化结果。

2.5 算例分析

某抽水蓄能电站地下厂房开挖施工过程中,开挖得到的爆破料需要控制其块度级配,以便作为大坝坝料,从而减少料场开挖,体现了目前新能源建设过程中的绿色概念与对两山理论的实践。

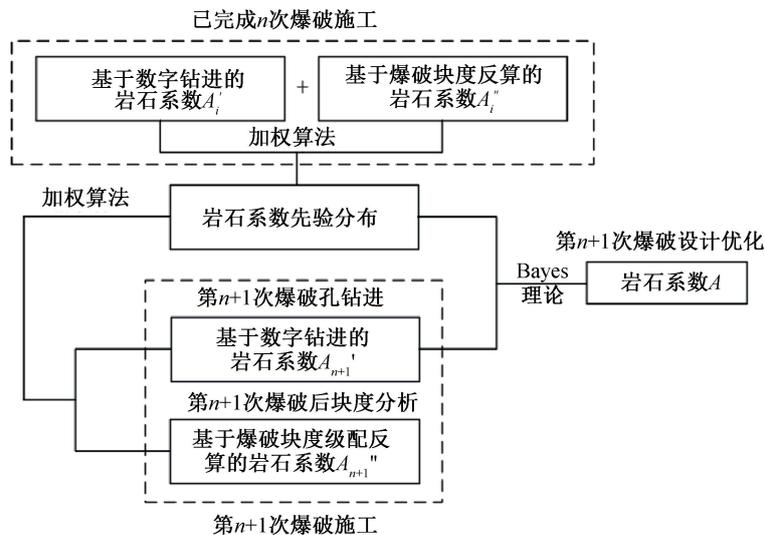


图 4 基于数字钻进的岩石系数智能优化流程

Fig. 4 Intelligent optimization process for rock factor based on digital drilling

通过爆破孔随钻信息挖掘得到的地下主厂房 II 类岩体不同钻孔的随钻信息,基于随钻信息的分析得到该钻孔 II 类岩体的平均单轴抗压强度,进而得到抗压强度对应的 RI 值。按照图谱可取的每一个钻孔所对应的岩石系数,并将其进行正态分布拟合,得到基于随钻信息的 II 类岩体的岩石系数正态分布为 $N(14, 1.20^2)$ 。将岩石系数 14 作为爆破装药参数等优化中的初始值,在爆破完成之后,进行爆破碎裂块度分析,并按照本文公式进行岩石参数的反算,将得到的岩石系数进行正态分布拟合分析,得到的岩石系数的正态分布为 $N(13, 3.50^2)$ 。

按照图 4 流程,利用加权算法将爆破后块体分析反算得到的岩石系数正态分布纳入到已有的岩石系数先验分布中,得到的某工程确定的 II 类岩体的爆破岩石系数正态分布为 $N(14.11, 1.29^2)$,可作为下一阶段的岩体爆破时同类别岩体爆破中岩石系数确定时的先验分布。

3 结论

1) 利用中国水利水电科学研究院自主研发的随钻系统,在常规水电站地下厂房的钻爆法施工中,将多臂凿岩台车进行了便携式改装,安装了相关传感器,实时采集了炮孔钻进过程中的进尺、钻杆转速、脉动压力等施工信息。

2) 提出了表征岩体完整性以及岩块单轴抗压等力学指标的分析方法,构建了基于数字钻进随钻信息的岩石系数的取值图谱。

3) 将基于爆破块度反算的岩石系数作为先验数据,利用 Bayes 理论,不断把现场爆破施工确定的岩石系数数据融合到先验分布中,获得岩石系数的后验分布,本文提出的方法使获得的后验正态分布更具有实践性和真实性,为爆破智能化程度的提高提供重要途径与技术支撑。

参考文献:

[1] 李利平, 邹浩, 刘洪亮, 等. 钻爆法隧道智能建造研究现状与发展趋势[J]. 中国公路学报, 2024, 37(7): 1-21.
[2] 郭中安, 赵启生, 尹聪. 矿山开采坚硬岩石深孔爆破参数智能优化研究[J]. 世界有色金属, 2022, (24):

36-38.

- [3] 张志刚, 李学斌. 基于岩石爆破块度的快速分析与智能控制系统的研究[J]. 技术与市场, 2023, 30(10): 60-66.
[4] 刘庆丰, 肖清华, 吴剑, 等. 隧道光面爆破质量与智能化控制方法[J]. 铁路工程技术与经济, 2023, 38(6): 44-49.
[5] 吴新霞, 胡英国, 刘美山, 等. 水利水电工程爆破技术研究进展[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 112-120+147.
[6] 周先平, 李彦坡, 吴新霞, 等. 岩体爆破块度控制技术新进展[J]. 水利水电技术, 2018, 49(S1): 7-13.
[7] 耿威, 梁尔祝. 影响爆破块度因素的灰色关联分析[J]. 广东化工, 2017, 44(14): 42-43+28.
[8] 杨林, 梁晓腾, 杨钊, 等. 隧道爆破设计辅助系统开发与应用[J]. 建筑机械, 2024, (1): 24-27+34.
[9] 郑祥, 邱浩扬, 王德明, 等. 水电站边坡智能爆破设计与管控系统研究[J]. 爆破, 2024, 41(2): 60-66+95.
[10] 汪旭光, 吴春平. 智能爆破的产生背景及新思维[J]. 金属矿山, 2022, (7): 2-6.
[11] 吴春平, 汪旭光. 智能爆破的基本概念与研究内容[J]. 金属矿山, 2023, (5): 59-63.
[12] 曹瑞琅, 王玉杰, 邢泊, 等. 基于冲击耗能指数定量评价岩石硬度试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2619-2627.
[13] PELEG M. Determination of the parameters of the Rosin-Rammler and betadistributions from their mode and variance using equation-solving software [J]. Powder Technology, 1996, 87(2): 181-184.
[14] KUZNETSOV V M. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock [J]. Soviet Mining Science, 1973, 9(2): 144-148.
[15] 郑瑞春. 爆岩块度分布预测的 Bond-Ram 模型[J]. 金属矿山, 1988(6): 11-15+29.
[16] LILLY P A. An empirical method of assessing rock mass blastability [J]. Symposia Series-Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1986, 48: 89-92.
[17] CUNNINGHAM C V B. The effect of timing precision on control of blasting effects [C]//Proceedings 1st EFEE Conference on Explosives and Blasting Technique, Munich, Detnet Solutions, 2000.
[18] 赵宇飞, 汪小刚, 杨健. 基于二维正态分布的岩土参数 Bayes 方法优化[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, (2): 93-96.

(责任编辑 周雪梅)