

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.008

水电站边坡智能爆破设计与管控系统研究*

郑祥¹, 邱浩扬², 王德明¹, 陈俊涛², 赵逢泽², 陈明²

(1. 中国水利水电第七工程局, 四川 610081; 2. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430000)

摘要: 水利工程爆破施工具有周期长、规模大的特点, 传统爆破设计与施工管控方式难以满足当前水利工程的建设和发展要求, 研究建立平台化、网络化、智能化的爆破设计与管控系统具有重大的工程意义。基于BIM、WebGIS和已开发的爆破设计软件, 利用Angular框架和SpringBoot框架, 采用前、后端分离式方法开发了智能爆破设计与管控系统, 系统由智能爆破设计模块、三维可视化模块、数字化爆破管控模块以及智能安全评价及预测预警模块四个功能模块组成, 实现了智能爆破设计与全流程爆破审核功能一体化, 能够根据现场实际施工情况, 采用模型参数化动态联合裁剪方法, 选取开挖轮廓线上的控制点进行智能爆破设计, 生成爆破设计方案, 并将设计方案上传审查, 有效地促进了爆破全流程的标准化、信息化、数字化管理, 加强设计、施工、监理等单位的实时交互办公。该系统在叶巴滩水电站边坡爆破开挖工程的应用结果表明, 系统能有效进行爆破设计, 并提高管控效率, 可为水电站边坡爆破设计开挖施工提供技术支持。

关键词: 智能爆破设计; 爆破管控; WebGIS; BIM

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)02-0060-07

Research on Intelligent Blasting Design and Management Control System of Hydropower Station Slope

ZHENG Xiang¹, QIU Hao-yang², WANG De-ming¹, CHEN Jun-tao², ZHAO Feng-ze², CHEN Ming²

(1. China seventh Bureau of water conservancy and Hydropower Engineering, Chengdu 610081, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management,

Wuhan University, Wuhan 430000, China)

Abstract: The blasting construction of water conservancy projects is characterized by its long duration and large scale. However, traditional methods for blasting design and construction control are inadequate to meet the requirements of current water conservancy project development. Therefore, it is crucial to study and establish a platform-based, networked, and intelligent blasting design and control system with significant engineering significance. To achieve this goal, this research adopts a front-end and back-end separation method using the Angular framework and SpringBoot framework based on BIM (Building Information Modeling), WebGIS (Geographic Information System), and developed blasting design software. The system comprises an intelligent blasting design module, three-dimensional visualization module, digital blasting control module, as well as an intelligent safety evaluation and prediction/

收稿日期 (Date of reception): 2023-06-16

网络首发日期 (Published online): 2023-08-14

作者简介: 郑祥 (1989-), 男, 工程师, 从事水利水电工程施工与管理 (E-mail) 18795845927@163.com.

通讯作者: 陈明 (1977-), 男, 博士、教授、博导, 主要从事水利水电工程施工技术、工程爆破及岩石动力学方面的研究工作, (E-mail) whuchm@whu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金 (51979205)

About the author: ZHENG Xiang (1989-), male, engineer, engaged in the construction and management of water conservancy and hydropower engineering, (E-mail) 18795845927@163.com.

Corresponding author: CHEN Ming (1977-), Male, Ph. D., Professor, doctoral supervisor, mainly engaged in the research work of water conservancy and hydropower engineering construction technology, engineering blasting and rock dynamics, (E-mail) whuchm@whu.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (51979205)

warning module. This integration enables intelligent blasting design along with comprehensive auditing functions throughout the entire process. Importantly, the system can select control points on the excavation contour line for intelligent blasting design based on actual site conditions. It generates blast design schemes that undergo review using a model parameterized dynamic joint cropping method before being uploaded. This approach promotes standardization, informatization, and digital management of the entire blasting process while enhancing real-time interactive collaboration among various units involved in designing, constructing, supervising hydropower stations. The application of this system in slope blasting and excavation projects at Yebatan Hydropower Station demonstrates its effectiveness in carrying out blast designs while improving control efficiency. Consequently, it provides valuable technical support for slope blasting designs during hydropower station excavations.

Key words: intelligent blast design; blast control; WebGIS; BIM

大型水利水电工程建设,存在工程周期长、规模大的特点^[1]。爆破施工是工程建设的重要环节,爆破施工环节复杂,各种设计、监测资料数量庞大,具有较大的管理难度,因此,需要对坝区岩体的爆破开挖进行智能化管控,通过自动化智能化爆破设计,简化爆破开挖设计过程。

在智能爆破设计系统方面,许多学者基于 AUTOCAD 软件的二次开发或者利用 AUTOCAD 的图形引擎功能进行开发^[2,3],如璩世杰等开发了露天矿场爆破基于 blast-code 模型爆破设计软件^[4];张耿城等建立了基于改进 ELM 算法的地下矿爆破参数智能设计模型^[5],并借助 CAD 二次开发技术,开发了中深孔爆破智能设计系统;赵明生等使用 VC 平台开发露天台阶爆破智能化设计软件^[6]。除此之外,赵丽屏等采用 Python 语言开发了想到掘进爆破辅助设计系统^[7],实现了炮孔自动布置及在线调整;魏文义等开发了隧道掘进爆破方案设计系统^[8],实现了高校、精细化和实用性的爆破方案设计;刘军等基于 Vc++ 平台,基于 Delaunay 三角形网格迭代算法以及 Voronoi 随机网格技术实现了台阶爆破炮孔自动布置及起爆网路自动设计^[9];杨林兵等开发了一套智能化台阶爆破设计优化系统^[10],并结合 GPS 实现了智能爆破设计及设计数据的反馈。在爆破管控方面,曲广建等针对“数字爆破”,对爆破行业近几年在信息化建设与应用方面所做的工作进行了总结^[11,12],同时还提出了当前“数字爆破”的发展目标。陶刘群和汪旭光研究了爆破器材智能管理、爆破现场智能监测管理和爆破振动智能监测与分析等三大智能应用系统^[13],侧重监测与器材管理,同时汪旭光等还针对目前“智能爆破”存在的问题进行了总结^[14]。解放军理工大学建立了一种爆破振动预报与控制平台,包含工程信息采集功能、重要度分析功能、预报模型功能、信号分析功能、模态分析功能等,应用于工程爆破施工的振动安全控制^[15]。

虽然爆破设计以及管控的研究成果较多,然而,目前仍然缺乏将爆破设计与管控有机结合的成熟研究成果。因此本文针对上述问题,基于爆破设计与管控研究,同时,将该系统与跨平台的 WebGIS 相结合,实现了二、三维一体化与实时数据动态显示,开发一套爆破设计与管控平台,用以指导爆破设计与管控。

1 爆破设计管控系统开发研究

1.1 系统构成

爆破设计与管控平台需要实现四个模块:智能爆破设计、三维可视化、数字化爆破管控、智能安全评价及预测预警,系统各模块功能及实现方法如图 1 所示,具体如表 1 所示。其中智能爆破设计模块采用本团队已经开发的爆破智能设计系统^[16]。

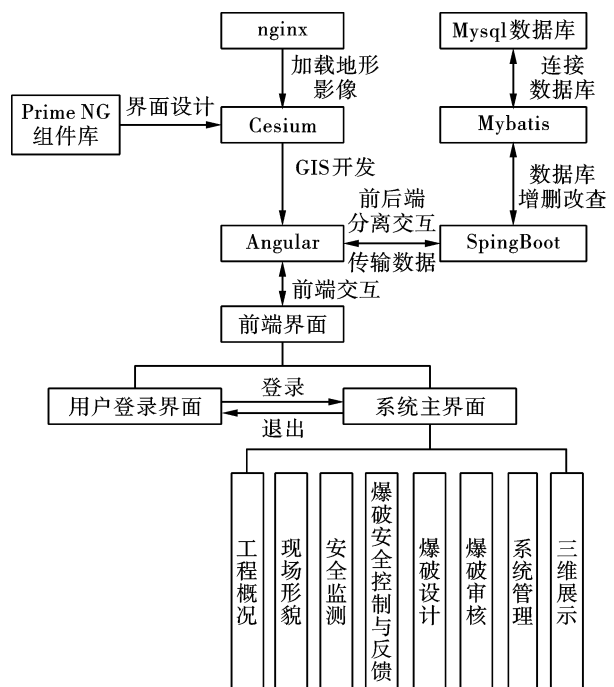


图 1 爆破设计管控系统各模块及实现方法
Fig. 1 Blast design control system modules and realisation methods

表 1 爆破设计管控系统各模块功能及实现方法
 Table 1 Functions and realisation methods of each module of blasting design control system

模块名称	功能描述
智能爆破设计模块 ^[16]	(1)输入爆破规模、台阶高度、岩体性质等爆破信息与单耗控制、起爆方式、布孔方式等爆破设计要求,实现爆破孔网参数、装药结构、起爆网路设计;(2)输入现场爆破振动、爆堆块度等监测数据进行爆破效果评价;(3)根据实际工程需求及评价结果结合常用理论模型(如萨道夫斯基公式、Kuz-Ram模型等)和BP神经网络进行爆破参数优化设计。
三维可视化模块	(1)基于BIM技术建立爆破设计图像显示模块,包括爆区三维位置图、炮孔布置平面图、炮孔布置剖面图和起爆网络图等;(2)基于Ajax技术建立监测数据的可视化模块,实现各类监测信息的浏览、查询和分析以及图形显示功能;(3)基于WebGL技术建立高陡边坡工程地质信息和安全监测信息三维可视化模块,实现边坡虚拟场景漫游、监测仪器的定位与变化时程展示、双向互动选择等功能。
数字化爆破管控模块	(1)采用信息化手段对爆破设计、爆破施工、爆破监测、爆破控制和爆破评价进行管理和控制,实现爆破作业流程的信息化、数字化管理;(2)实现爆破器材管理、爆破监测管理、爆破质量检查管理。
智能安全评价及预测预警模块	(1)采用多种无线网络技术将爆破振动、边坡位移等数据收集到数据服务器中,对监测设备及监测资料等进行远程监控管理;(2)针对边坡监测的特点设计专门的监测数据库,实现数据的预处理、整编、存储、管理、分析等功能,提供可靠数据源;(3)根据边坡的安全等级,基于预警指标,提出预警方法及预警流程;基于监测信息评估边坡安全状态及其爆破施工影响。

1.2 系统设计

1.2.1 总体架构

本系统采用前后端分离的开发方式,以B/S模式,将网页作为用户客户端,结合BIM与WebGIS进行开发,且所采用的软件均为开源软件。

系统后端基于SpringBoot框架,使用Eclipse进行开发,整合Mybatis持久化框架与Mysql数据库进行数据的CRUD操作。前端基于Angular框架,使

用VSCode进行开发设计,脚本语言选用Typescript,通过HTML5与CSS并结合PrimeNG组件库对页面进行优化设计,加入开源WebGIS引擎Cesium进行前端网页的GIS开发,并通过nginx网络服务进行地形、影像、文件的加载。

系统总体架构,如图2所示。

图2中数据层、数据访问层、业务层及表现层的具体功能及实现方法如下:

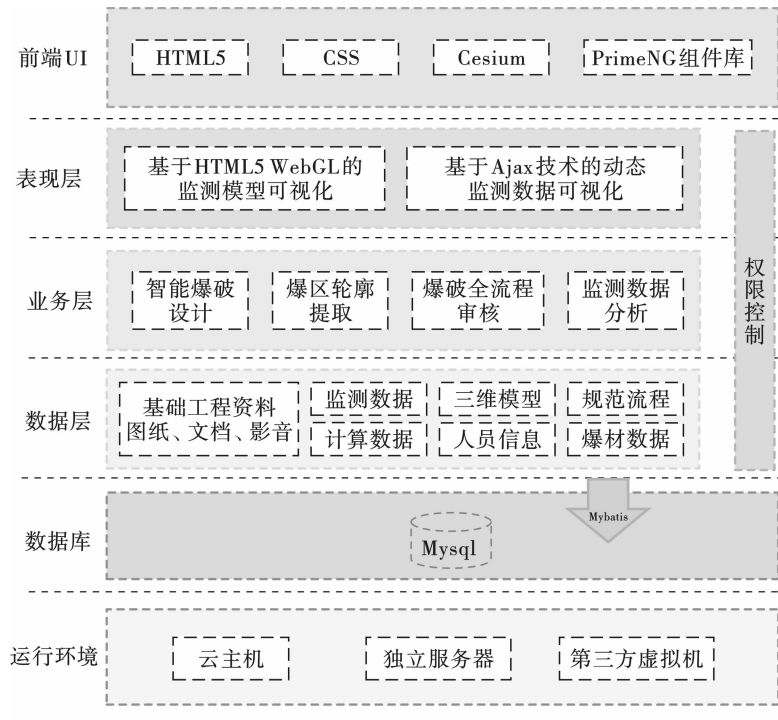


图 2 系统总体架构

Fig. 2 Overall system architecture

(1)数据层。设计合理的多维动态数组、多级链表等数据结构,基于ORMapping技术,按需求将数据库里的数据映射到内存中,提高访问速度及系统响应速度。

(2)数据访问层。基于JDBC接口通过Mybatis持久化数据,对其进行CRUD操作(即数据的增、删、改、查),并进行事务处理及异常捕获。包括基础工程资料、监测数据、三维模型、规范规程、计算数据、人员信息以及爆材数据。

(3)业务层。平台功能核心层。基于CodeBehind技术,实现了界面与数据的分离,提高平台的扩展性。与数据访问层相对应,把概要设计分出的角色类添加方法、属性、事件、索引、接口等,实现智能化爆破设计、爆区轮廓提取、爆破全流程审核以及安全监测分析等功能。

(4)表现层。即网页,用户进行交互操作的界面,实现数据的可视化。包括:(a)广域范围内开挖爆破体的可视化。采用WebGIS技术展示开挖爆破体的位置分布、连接走向;(b)监测模型可视化:显示各监测设备的空间位置,通过交互操作定位监测设备,查找监测设备的相关属性及对应各种监测物理量,以便快速查找监测情况和监测数据。拟采用HTML5 WebGL技术,展示监测设备组成与监测布置,实现测点的交互选择、属性显示、视点跟踪和动态漫游,通过交互式菜单实现平台的各项功能。根据电脑客户端的功能需求,调用多细节层次的模型,制作不同的界面与菜单。(c)监测数据可视化:采用Ajax技术,动态绘制图表。

1.2.2 开发环境

(1)采用PaaS平台,选择B/S模式,以WEB浏览器为客户端。

(2)采用SpringBoot作为系统后端开发框架,通过Mybatis持久化框架与Mysql数据库进行数据交互。

(3)采用Angular作为前端开发框架,整合开源WebGis引擎Cesium,创建用于共享动态地理空间数据的交互式Web应用程序,使用PrimeNG组件库进行网页交互界面的设计优化。

(4)采用Cesium作为数据引擎。值得说明的是,系统开发过程中,在保留Cesium三维一体化和时态数据显示优势基础上,通过前后端数据交互,弥补了其在空间数据统计和分析方面的弱势。

2 工程应用

2.1 叶巴滩水电站边坡开挖需求

以叶巴滩水电站边坡工程项目为例进行工程应

用。针对叶巴滩水电站边坡的施工流程,主要需求如下:

(1)结合工程施工进度,进行爆破设计及开挖施工方案的预设计工作,模拟并指导现场爆破开挖。

(2)结合BIM与WebGIS技术,通过现场实测地形数据,建立高陡边坡工程地质信息和安全监测信息三维可视化模块,对爆区进行三维可视化展示,实现虚拟场景漫游、监测仪器的定位与变化时程展示、双向互动选择等功能。

(3)对爆破设计、爆破施工、爆破监测、爆破控制和爆破评价进行管理和控制,实现爆破作业流程的信息化、数字化管理。进一步地实现爆破器材管理、爆破监测管理、爆破质量检查管理。

(4)根据设备反馈监测信息,基于安全等级、预警指标,智能化、自动化评估工程安全状态及其爆破施工影响,针对接近或已超出安全标准的工程区域,提前预测、预警。

2.2 功能模块设计

系统功能模块设计如图3,主要分为爆区轮廓提取模块、智能爆破设计系统模块、监测数据分析模块、数字化爆破管控系统模块。各模块的功能如下:

(1)爆区轮廓提取模块:包括模型选取隔离操作,对模型进行三维裁剪,最后获得爆区轮廓度参数。

(2)智能爆破设计系统模块:将爆破设计软件整合到系统平台^[16],通过将软件注册COM组件,生成DLL动态链接库进行调用,软件包括输入模块、爆破参数计算模块、炮孔布置设计模块、装药结构设计模块、起爆网路设计模块、输出模块并生成设计简报(设计简报中的设计图纸均从爆破设计系统导出的dxf格式的设计图中获取)。

(3)监测数据分析模块:通过埋设的监测计进行爆破振动监测与位移监测,同时针对现场的爆破块度进行测试,并进行爆破效果分析。

(4)数字化爆破管控系统模块:参照OA系统进行爆破审批文件的多部门层层审核^[17],实现爆破全流程管控。

2.3 主要功能实现

2.3.1 自动化爆破设计

自动化爆破设计模块通过输入工程地质条件、爆区参数、钻孔参数及炸药参数等初始条件,进行炮孔布置设计、装药结构设计、起爆网路设计,最后输出工程所需的材料清单、爆破方案设计简报。

初始爆破参数输入:通过手动输入爆破设计所需的爆破规模、台阶高度、岩体性质等爆破信息以及单耗控制、起爆方式、布孔方式等爆破设计参数,如图4。

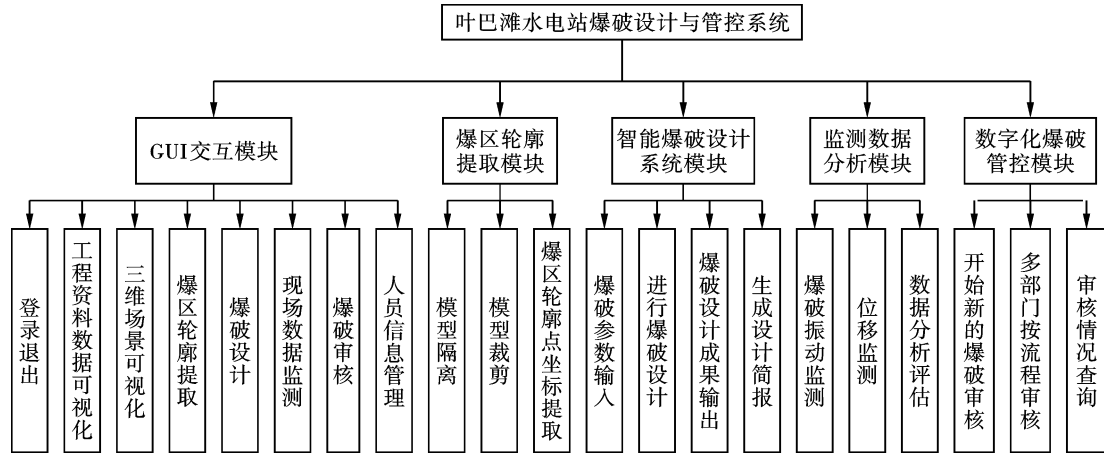


图3 系统功能模块图

Fig. 3 System functional module diagram



图4 初始参数输入

Fig. 4 Initial parameter input

根据输入的初始条件计算得到炮孔布置设计、装药结构设计、起爆网路设计图、所需爆材数据等爆破设计结果。炮孔布置及各炮孔信息如图5。



图5 炮孔布置设计成果

Fig. 5 Results of the design of the blasthole layout

2.3.2 参数化设计拾取爆区轮廓点

进行爆破设计需要确定爆区轮廓点,但照传统方法确定爆区轮廓较为繁琐,通过在 Cesium 平台的裁剪平面 (ClippingPlanes) 进行模型参数化动态联合裁剪,位于平面法线的反方向的模型将被剪切,如图6,被裁剪区域 (黄色区域) 在视图中不再进行渲染,使得爆区虚拟模拟设计成为可能。

通过 ClippingPlaneCollection 可指定一组剪切平面,对模型进行联合剪切。设置属性 unionClipping

Regions 为 true,则所有平面外部 (法向的反方向) 都被剪切。否则,只有区域位于每个平面的外侧,才会剪切区域,即切片的交集,如下图7。

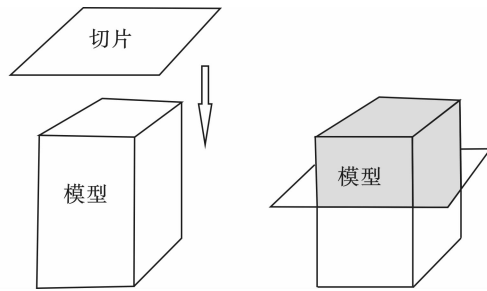


图6 ClippingPlane 剪切原理

Fig. 6 ClippingPlane shear principle

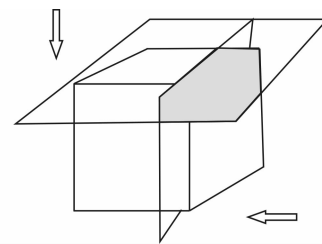


图7 联合剪切原理

Fig. 7 Combined shear principle

设计人员得到所需的爆区轮廓后,通过在三维模型中点选拾取爆区轮廓点,即可保存该次爆区轮廓提取的数据,作为爆破设计系统中的爆区参数,如下图8、9、10、11。将爆区轮廓数据整合后自动导入自动化爆破设计模块,进行爆破设计。

2.3.3 数字化爆破管控系统

参考 OA 工作流进行模块开发,创建各部门共享信息资源平台,信息能在不同的执行者之间传递、执行,不同部门的员工可通过 OA 系统及时了解爆破审批进度的最新信息,有利于部门之间的沟通与合作。

采用最简单的顺序流,即待审核文件项按次序一步一步完成审核,前一个工作项处理完成后,就可以处理后一个工作项。



图 8 爆区模型隔离界面

Fig. 8 Blast zone model isolation interface



图 9 单剪切面剪切模型

Fig. 9 Single shear plane shear model



图 10 多剪切面联合剪切模型

Fig. 10 Joint shear model with multiple shear surfaces



图 11 轮廓面坐标拾取

Fig. 11 Contour surface coordinate pickup

系统分为审核进度查询、设计文件上传、根据权限的部门审核功能,如管理员权限可查看使用所有功能,各自审核部门仅能进行本部门的审核与审核进度查询。如图 12~14 所示。



图 12 开始审核流程

Fig. 12 Starting the review process



图 13 各部门审核

Fig. 13 Review by departments



图 14 部门审核意见与结果

Fig. 14 Sectoral Review Comments and Results

3 结语

(1)系统实现爆破全流程的标准化、信息化、数字化管理,加强设计、施工、监理等单位的实时交互办公。利用 BIM 能够有效地实现监测信息的集成以及相关功能的开发,能够有效提高监测信息的可视化以及监测系统的交互性,实现监测信息的及时共享。

(2)将爆破相关信息、BIM、WebGIS 集合于一体,不仅可以展示宏观区域内地形、建筑物、开挖轮廓及相互关系,也可以精细展示微观领域内各监测点的监测信息,实现爆破开挖全过程的智能化、可视化与科学化。

(3)本平台可应用于水利工程、矿山、铁道和交通等领域的岩体爆破开挖安全和质量控制、智能爆破设计以及管控。

参考文献 (References)

- [1] 凌 莉. 水利工程混凝土施工质量控制策略[J]. 四川水泥, 2022(1):156-157.
- [1] LING Li. Water conservancy project concrete construction quality control strategy [J]. Sichuan Cement, 2022 (1): 156-157. (in Chinese)
- [2] 璩世杰, 庞永军, 尚峰华, 等. 水厂铁矿地质地形数据库及其在爆破设计中的应用[J]. 金属矿山, 2001(2):12-15.
- [2] QU Shi-jie, PANG Yong-jun, SHANG Feng-hua, et al. Geological and topographical data base of Shuichang iron mines and its application in blasting design [J]. Metal Mine, 2001(2):12-15. (in Chinese)
- [3] 段玉贤, 李发本. 基于三维模型的露天矿台阶爆破设计及其应用[J]. 现代矿业, 2011, 27(8):10-12.
- [3] DUAN Yu-xian, LI Fa-ben. Open-pit mine bench blasting design and the application based on three-dimensional model[J]. Modern Mining, 2011, 27(8):10-12. (in Chinese)
- [4] 璩世杰, 尚峰华, 李宝辉, 等. 露天矿爆破设计与模拟 Blast-Code 模型及其在水厂铁矿的应用[J]. 工程爆破, 2001(2):18-24.
- [4] QU Shi-jie, SHANG Feng-hua, LI Bao-hui, et al. Blast-code model for design and simulation of open-pit blasting and its application in shuichang iron ore mines [J]. Engineering Blasting, 2001(2):18-24. (in Chinese)
- [5] 张耿城, 吴 凡, 韩荣灿, 等. 地下矿扇形中深孔爆破智能设计系统的开发与应用[J]. 现代矿业, 2021, 37(3):153-156.
- [5] ZHANG Geng-cheng, WU Fan, HAN Rong-can, et al. Development and application of intelligent design framework for fan-shaped medium-deep-hole blasting in underground mine [J]. Modern Mining, 2021, 37(3):153-156. (in Chinese)
- [6] 赵明生, 张光雄, 刘 军, 等. 露天台阶爆破智能化设计软件[J]. 爆破, 2018, 35(2):72-79.
- [6] ZHAO Ming-sheng, ZHANG Guang-xiong, LIU Jun, et al. Intellectualized design software for open bench blasting [J]. Blasting, 2018, 35(2):72-79. (in Chinese)
- [7] 赵丽屏, 刘爱军, 盛益明, 等. 巷道掘进爆破计算机辅助设计系统的研发[J]. 煤矿爆破, 2023, 41(1):1-5.
- [7] ZHAO Li-ping, LIU Ai-jun, SHENG Yi-ming, et al. Research and development of computer aided design system for tunnel excavation blasting [J]. Coal Mine Blasting, 2023, 41(1):1-5. (in Chinese)
- [8] 魏文义, 李世才, 李哲民, 等. 隧道掘进爆破方案自动化系统设计研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(11):290-293, 298. DOI:10.19389/j.cnki.1003-0506.2021.11.048.
- [8] WEI Wen-yi, LI Shi-cai, LI Zhe-min, et al. Design and research of automatic system for tunnel excavation blasting scheme [J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(11):290-293, 298. DOI:10.19389/j.cnki.1003-0506.2021.11.048. (in Chinese)
- [9] 刘 军, 王 鹏, 赵明生, 等. 露天矿台阶爆破优化设计软件系统[J]. 金属矿山, 2023(2):173-181. DOI:10.19614/j.cnki.jsks.202302024.
- [9] LIU Jun, WANG Peng, ZHAO Ming-sheng, et al. Open-pit mine bench blast optimization design software system [J]. METAL MINE, 2023(2):173-181. DOI:10.19614/j.cnki.jsks.202302024. (in Chinese)
- [10] 杨林兵, 赵昌龙. 基于 GPS 的智能化设计在露天石灰石矿山爆破中的应用[J]. 爆破, 2022, 39(2):81-84, 93.
- [10] YANG Lin-bing, ZHAO Chang-long. Application of intellectualized blasting design based on gps in limestone openpit mine [J]. Blasting, 2022, 39(2):81-84, 93. (in Chinese)
- [10] YANG Lin-bing, ZHAO Chang-long. Application of intellectualized blasting design based on gps in limestone openpit mine [J]. Blasting, 2022, 39(2):81-84, 93. (in Chinese)
- [11] 曲广建, 黄新法, 江 滨, 等. 数字爆破(I)[J]. 工程爆破, 2009, 15(2):23-28.
- [11] QU Guang-jian, HUANG Xin-fa, JIANG Bin, et al. Digital blasting engineering (I) [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(2):23-28. (in Chinese)
- [11] QU Guang-jian, HUANG Xin-fa, JIANG Bin, et al. Digital blasting engineering (I) [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(2):23-28. (in Chinese)
- [12] 曲广建, 黄新法, 江 滨, 等. 数字爆破(II)[J]. 工程爆破, 2009, 15(3):5-13.
- [12] QU Guang-jian, HUANG Xin-fa, JIANG Bin, et al. Digital blasting engineering (II) [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(3):5-13. (in Chinese)
- [12] QU Guang-jian, HUANG Xin-fa, JIANG Bin, et al. Digital blasting engineering (II) [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(3):5-13. (in Chinese)
- [13] 陶刘群, 汪旭光. 基于物联网技术的智能爆破初步研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2012, 64(6):59-62.
- [13] TAO Liu-qun, WANG Xu-guang. Preliminary study of intelligent blasting based on internet of things technology [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2012, 64(6):59-62. (in Chinese)
- [13] TAO Liu-qun, WANG Xu-guang. Preliminary study of intelligent blasting based on internet of things technology [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2012, 64(6):59-62. (in Chinese)
- [14] 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):5.
- [14] WANG Xu-guang, WU Chun-ping. Background and new thinking about intelligent blasting [J]. METAL MINE, 2022(7):5. (in Chinese)
- [14] WANG Xu-guang, WU Chun-ping. Background and new thinking about intelligent blasting [J]. METAL MINE, 2022(7):5. (in Chinese)
- [15] 钟明寿, 谢全民, 刘 影, 等. 爆破振动危害智能监测系统研究进展[J]. 爆破器材, 2017, 46(3):57-64.
- [15] ZHONG Ming-shou, XIE Quan-min, LIU Ying, et al. Research progress of intelligent monitoring system for blasting vibration damage [J]. Explosive Materials, 2017, 46(3):57-64. (in Chinese)

- gy,2013,42(5):755-760. (in Chinese)
- [12] 张召冉,丁晨曦,左进京,等. 岩巷二级二段掏槽破岩机制与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(1):93-104.
- [12] ZHANG Shao-ran, DING Chen-xi, ZUO Jin-jing, et al. Experiment study on rock breaking mechanisms of two-step cutting technology in rock roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1):93-104. (in Chinese)
- [13] DING Jia-jun, YANG Jia-hua, YE Zhi-wei, et al. Cut-blasting method selection and parameter optimization for rock masses under high in situ stress [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(12):04023211.
- [14] 漆涛,陶铁军,田兴朝,等. 大断面隧道“楔形掏槽+高能孔”布设方法研究[J/OL]. 爆破:1-15. [2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20231228.1603.010.html>.
- [14] QI Tao, TAO Tie-jun, TIAN Xing-chao, et al. Research on layout method of “wedge cut + high energy holes” for large section tunnels [J/OL]. Blasting:1-15. [2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20231228.1603.010.html>. (in Chinese)
- [15] 王雁冰,孔维文,王国豪,等. 深孔掏槽超深爆破破岩机制及最佳超深值研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(6):1210-1218.
- [15] WANG Yan-bing, KONG Wei-wen, WANG Guo-hao, et al. Mechanism of rock breaking by deep hole ultra-deep cut blasting and the optimum ultra-deep value determination [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(6):1210-1218. (in Chinese)
- [16] 戴俊,杜晓丽. 岩石巷道楔形掏槽爆破参数研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(2):90-93, 104.
- [16] DAI Jun, DU Xiao-li. Research on blasting parameters of wedge-shaped cutting for rock tunnel driving [J]. Mining Research and Development, 2011, 31(2):90-93, 104. (in Chinese)
- [17] CHENG Bin, WANG Hai-bo, ZONG Qi, et al. Study of the double wedge cut technique in medium-depth hole blasting of rock roadways [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46:4895-4909.
- [18] SI Xue-feng, GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, et al. Dynamic Mohr Coulomb and Hoek Brown strength criteria of sandstone at high strain rates [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 115:48-59.
- [19] CHENG Bin, WANG Hai-bo, ZONG Qi, et al. Study on the novel technique of straight hole cutting blasting with a bottom charged central hole exploded supplementally [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14:1-12.
- [20] 秦桂芳,曾灿,徐问锋,等. 基于HJC损伤本构模型的灰岩隧道光面爆破数值模拟及工程验证[J]. 爆破器材, 2022, 51(6):45-51.
- [20] QING Gui-fang, ZENG Can, XU Jian-feng, et al. Numerical simulation and engineering verification of smooth blasting in limestone tunnel based on hjc damage constitutive model [J]. Explosive Materials, 2022, 51(6):45-51. (in Chinese)
- [21] 马泗洲,刘科伟,杨家彩,等. 初始应力下岩体爆破损伤特性及破裂机理[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(10):152-173.
- [21] MA Si-zhou, LIU Ke-wei, YANG Jia-cai, et al. Blast-induced damage characteristics and fracture mechanism of rock mass under initial stress [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(10):152-173. (in Chinese)

(上接第66页)

- [16] 赵逢泽,郑祥,陈明,等. 坝肩槽边坡保护层开挖爆破三维自动布置研究[J]. 爆破, 2021:1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20211126.0931.004.html>.
- [16] ZHAO Feng-ze, ZHENG Xiang, CHEN Ming, et al. Study on three-dimensional automatic layout of blasting in protection layer excavation of dam shoulder groove slope [J]. Blasting, 2021:1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20211126.0931.004.html>. (in Chinese)
- [17] 齐健,罗三华,刘佳,等. 基于工作流和J2EE技术的检测中心OA协同系统平台设计研究[J]. 工程质量, 2022, 40(12):84-88.
- [17] Qi Jian, LUO San-hua, LIU Jia, et al. Design and research of oa collaborative system platform of detection center based on workflow and J2EE technology [J]. Construction Quality, 2022, 40(12):84-88. (in Chinese)