

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.003

露天矿山爆破共享控制理论的基本方法*

李萍丰^{1,2}, 徐振洋^{3,4}, 王雪帆^{2,5}, 郭润泽^{3,4}, 姜立春⁶

- (1. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 510623;
2. 非煤露天矿山安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室, 肇庆 526530;
3. 辽宁科技大学矿业工程学院, 鞍山 114051; 4. 辽宁省金属矿产资源绿色开采工程研究中心, 鞍山 114051;
5. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 6. 华南理工大学, 广州 510640)

摘要: 在露天矿山爆破作业中, 为充分考虑各工序环节间的衔接, 合理配置矿山生产资源、降低总能耗, 提出爆破共享控制理论。结合矿石宏观破碎和细观损伤的关联关系, 创新地提出铲运过程的矿石损伤模型。通过优化各工序作业的衔接, 考虑生产设备的磨损、折旧等因素, 将钻孔、破碎用电(油)、现场装药爆破、铲装、运输等环节的总能耗进行合理分配, 提出各工序的评价和控制指标, 建立爆破共享控制模型。结果表明: 矿石损伤模型揭示了岩石爆破破坏过程的多阶段特性, 通过调控破碎量对破碎能耗进行有效预测, 拟合精度达到0.8以上, 能够实现破碎机运行效率的优化和破碎能耗的降低。通过爆破共享控制模型, 计算得到爆破参数设计的最优解, 建立约束条件下最优综合能耗公式, 能够实现各环节能量的精准调整, 为矿山作业的高效、安全和可持续发展提供了有力支持。

关键词: 露天矿山; 爆破; 破碎; 能耗; 控制

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)03-0016-10

Basic Method of Open-pit Mine Blasting Sharing Control Theory

LI Ping-feng^{1,2}, XU Zhen-yang^{3,4}, WANG Xue-fan^{2,5}, GUO Run-ze^{3,4}, JIANG Li-chun⁶

- (1. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;
2. Safety Intelligent Mining of Non-Coal Open-Pit Mines Key Laboratory of
National Mine Safety Supervision Bureau, Zhaoqing 526530, China; 3. School of Mining
Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, China;
4. Liaoning Province Metal Mineral Resources Green Mining Engineering Research Center,
Anshan 114051, China; 5. China University of Geosciences Beijing, Beijing 100083, China;
6. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Efficient coordination between different processes is crucial in optimizing resource allocation and minimizing energy consumption during blasting operations in open-pit mines. To address these challenges, the theory of blasting sharing control is proposed, which integrates macroscopic ore fragmentation with mesoscopic damage analysis and introduces a novel ore damage model for the shoveling process. By optimizing inter-process connections and con-

收稿日期 (Date of reception): 2024-08-11

网络首发日期 (Published online): 2024-08-23

作者简介: 李萍丰(1966-), 男, 江西萍乡人, 博士、正高级工程师, 主要从事工程爆破技术和管理方面研究, (E-mail) hdbplpf@163.com。

通讯作者: 徐振洋(1982-), 男, 河南洛阳人, 博士、教授, 主要从事工程爆破理论与技术的研究, (E-mail) xuzhenyang@ustl.edu.com。

基金项目: 辽宁兴辽英才(XLYC2203173)

About the author: LI Ping-feng(1966-), male, born in Pingxiang, Jiangxi Province, Ph. D, is a senior engineer, mainly engaged in engineering blasting technology and management research, (E-mail) hdbplpf@163.com.

Corresponding author: XU Zhen-yang(1982-), male, from Luoyang, Henan Province, Ph. D, Professor, mainly engaged in the study of engineering blasting theory and technology, (E-mail) xuzhenyang@ustl.edu.com.

Fund Programs: Liaoning Xingliao Yingcai(XLYC2203173)

sidering factors such as wear and depreciation, a comprehensive energy distribution model is developed across drilling, crushing, blasting, shoveling, and transportation processes. Evaluation and control indices are proposed for each process, leading to the establishment of a blasting sharing control model. The results demonstrate that the ore damage model reveals the multi-phase characteristics of rock blasting failure and effectively predicts the crushing energy consumption by regulating fragmentation levels. With a fitting accuracy exceeding 0.8, this model optimizes the crusher operations while reducing energy consumption. Using the blasting sharing control model enables calculation of the optimal solutions for blast parameter design while establishing an optimal comprehensive energy consumption formula under the constraint conditions, thus enabling the accurate adjustment of energy at each link and providing strong support for efficient, safe, and sustainable mine operations.

Key words: open-pit mine; blasting; crushing; energy; control

长期以来,爆破破岩是露天矿山开采最有效的方式。然而在当前露天矿山爆破作业中,仍存在利用经验化、框架式思维制定爆破设计参数的现象,使得矿石爆后块度尺寸分布不均匀,造成后续铲装、运输和选矿环节等破磨工序的资源浪费较多,不利于矿山总体生产资源的合理配置。基于矿石破碎总能耗,结合前后工序对爆堆块度分布制定目标范围,是提高资源利用率,合理配置矿山生产资源的有效手段。

在矿山生产过程中,岩石破碎主要分为两个阶段,第一阶段是采用机械掘进机法和钻爆法进行岩石开挖,第二阶段是开挖后的矿石在破碎机中进行破碎。随着全球能源紧缺和环保意识的日益增强,露天矿山在提高炸药单耗、减少总能耗方面取得了显著进展。2023年,我国工业炸药消耗量超过450万吨,炸药破岩技术以其经济高效的突出优势,在岩石开挖中仍将长期占据绝对主导地位^[1]。在露天矿山爆破开采中,钻爆法作为一种经济、高效的破岩手段而得到广泛应用,大部分学者认为目前爆炸破碎岩石的能量利用率仅有5%~25%,绝大部分能量转变成热能、振动和噪声等无用且有害的不良效应^[1,2]。因此,通过有效手段控制爆破能量传递,进而实现对爆破能量的更多利用十分重要。

在矿山生产中,爆破环节的效果将直接影响到破碎环节的破碎效率与能耗,其中主要取决于矿石在爆堆中的分布和爆破后的矿石损伤程度等因素,爆破块度是衡量爆破效果的重要指标,爆破后岩石块度的分布和级配对于后续的挖掘、装载、运输等工作都有着重要的影响^[3]。在20世纪90年代初,国外率先提出了基于采选总成本的联合优化理念^[4]。国内学者针对爆破能耗和破碎能耗提出了“以爆代破”的概念,其核心思想是通过爆破手段代替传统的机械破碎方法,通过提高炸药单耗降低矿石的机械破碎能耗。然而,当前研究仅考虑到爆破与机械

破碎的关联关系,对于其他各环节的关联关系的考虑还远远不够,相关研究表明^[5]:机械破碎耗电量与进入破碎机械的岩石块度分布密切相关。如何综合联系矿山钻孔、爆破、铲装、运输和破碎等环节,有效降低矿石破碎的总体能耗是目前矿山亟待解决的问题。

综上所述,在露天矿山开采过程中,各个工序的协同作业和有序衔接是至关重要的。研究爆破能量共享与控制理论,对降低矿山总能耗、提高矿山生产效率具有重要意义。研究围绕矿山开采各工序之间的高效衔接、能耗调控理论等方面,系统提出爆破共享控制理论的概念,建立爆破共享模型,对矿山工序衔接具有较大应用价值。

1 爆破共享控制理论的定义及概念

爆破共享控制理论就是采用精准爆破和科学调配,降低岩石块度以及矿山全产业链综合能耗的控制方法,这一理论对于矿山作业的钻进、爆破、铲装、运输和机械破碎等多个关键环节的能效提升均发挥了显著作用。爆破共享控制理论结合地质条件、生产资源等因素,合理优化钻进参数,通过对爆破过程的高效、精确控制,实现钻进能耗降低;合理安排起爆点的位置和起爆时间,精确控制起爆顺序,使炸药能量在时间和空间上得到合理分配,确保爆破能量均匀分布,降低爆破能耗;合理分配不同爆堆铲装、运输的顺序,降低爆后矿石孔隙度,提高铲装的满斗率,提高铲运环节工作效率;精准控制破碎机械进口矿石块度分布,有效降低机械破碎能耗;爆破共享控制理论实现了对矿山爆破作业全流程和矿石破碎的精准控制,有效达到降低矿山全产业链总能耗的目标,为矿山作业的高效、安全和可持续发展提供了有力支持。随着技术的不断进步和应用的深入,该理论将在矿山作业中发挥重要的作用。露天矿山各工序间的关系如图1所示。

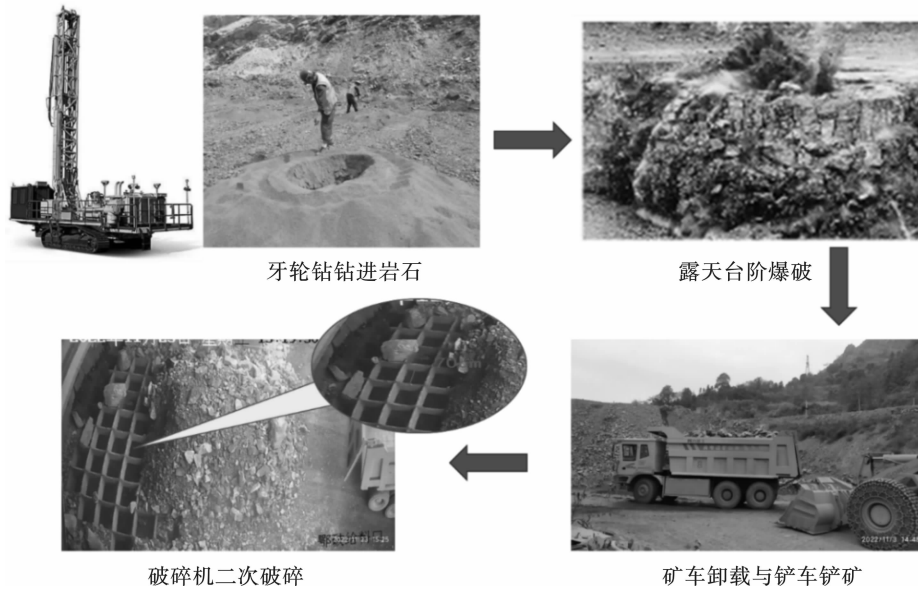


图1 露天矿山各工序关系图

Fig. 1 Relationship of each process in open-pit mine

2 岩石破碎理论研究

2.1 岩石损伤理论

岩石是一种成分组成复杂的自然材料,具有明显的非线性和各向异性力学行为,且内部包含各种形状尺寸的裂纹和空隙,细观裂纹形成与发展形式是描述岩石损伤的一种方式^[6,7]。这些损伤可能是由于岩石在地质历史过程中受到的应力、温度、化学作用等因素造成的,这些岩石内部的初始损伤会影响岩石的物理力学性质及损伤演化规律等^[8,9]。这些损伤在岩石受到外界作用时会进一步发展和扩大,影响岩石的破坏效率,因此损伤分析是研究岩石破碎效率时的一个重要的内容。岩石损伤理论的研究始于20世纪中叶,早期的研究主要集中在岩石损伤的宏观表现上,通过观察岩石的破坏形态和力学性能变化,提出了一些基本的损伤概念和模型^[10]。随着研究深入和模拟手段的进步,学者对岩石损伤的细观机制开始进一步研究。

岩石损伤的实质是微裂纹的形成、扩展和连接,细观损伤通常通过力学描述体现微裂纹的状态。为避免繁琐计算,采用平均化思想,忽略微观物理过程来描述岩石的细观损伤演化过程的几何和物理特征,同时反映岩石的宏观力学行为。众多学者通过建立孔壁压力与细观裂纹的关系,描述爆炸应力波与准静态爆生气体共同作用下的岩石损伤,提出了考虑各项条件与裂纹之间相互作用的方法^[11-16],对不同类型初始损伤对岩石破坏的影响,以及岩石损伤评价方法上做了大量研究:根据岩石内部损伤的

数量、种类以及组合形式对于岩石力学性质、损伤变形、破坏模式的影响,证明了不同类型初始损伤对岩石破坏特征影响密切;根据细观损伤力学理论,从细观损伤力学中微裂纹体的有效模量角度出发,通过有效模量计算方法建立了微裂纹体与损伤分布特征的关系。随着技术的不断进步和应用的深入,岩石损伤理论在矿山作业中发挥着越来越重要的作用。通过对岩石损伤的研究,对岩石的初始损伤进行定义,可以预测矿山的稳定性和安全性,制定合理的开采方案,避免或减少矿山事故的发生。同时,岩石损伤理论还可以指导爆破作业的设计和优化,提高爆破效果和经济效益。

岩石的初始细观损伤与后续钻孔、爆破工序存在决定性的联系。目前最常用的方法是定义岩石的损伤因子,主要通过细观材料参数间接地对损伤程度进行表征。根据细观物理力学参数可建立如下岩石损伤因子 D 的关系见式(1)^[17]

$$D = 1 - (1 - \varphi)^2 = 1 - \left(\frac{C}{C_0}\right)^2 = 1 - K_w = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

式中: φ 为声速衰减率; C 和 C_0 为岩石爆前与爆后的声速; K_w 为岩石的常规系数,表示岩石的完整程度; E 和 E_0 为岩石爆前与爆后的弹性模量。

当岩石处于完整状态时,内部没有受到损伤,此时 $D=0$ 。引入参数 φ 用于判断岩石受到爆破作用影响而产生的损伤,考虑到爆破损伤对岩石产生的影响, $\varphi > 10\%$ 时可判定岩石受到爆破损伤的影响,此时对应的岩石损伤阈值为0.19。

在地质勘探中,加强岩石损伤微观机制的研究,深入分析岩石损伤的细观过程,以岩石损伤因子为指标对岩石进行评价,探索多因素耦合作用下岩石损伤的演化规律,为复杂环境下的工程设计提供理论指导。针对岩石的初始损伤对爆破参数进行调整,为工程实践提供有力支持。

2.2 钻进破岩机理研究

岩石钻进过程的实质是通过钻头侵入岩石,使岩石受力破坏,从而达到破岩的目的。该过程不仅包括钻头在钻机动力系统提供的轴向压力和扭矩力作用下对岩石的压碎与切削破坏,还存在钻头表面与岩石接触面之间的摩擦力作用下造成的磨损破坏^[18]。目前国内外学者对钻进过程中的岩石破碎过程进行了许多研究,通过理论分析推导相关公式和建立数学模型,深入了解钻头与岩石之间的相互作用、岩石的受力状态以及破岩过程的动力学特性;利用室内试验模拟不同地层条件和钻进参数下的钻进过程,记录并分析钻头的破岩效率、岩石的破碎形态以及钻进过程中的力学响应特征;采用有限元、离散元模拟方法,分析钻进过程中的岩石变形、裂纹扩展以及破碎过程,对比模拟与实验结果,验证理论分析的准确性,进一步优化钻进参数,提高钻进效率,降低钻进能耗。

岩石在钻头侵入过程的应力-应变曲线如图 2 所示,岩石损伤程度可分为初始损伤、线弹性损伤、弹塑性损伤、材料软化行为四个阶段。随着应力的增大,岩石内部应变也随之增大,最终岩石损伤不断累积直至到达材料的临界损伤值时,岩石彻底破坏,标志着钻进过程完成。其中 σ_{cc} 为材料初始损伤临界值, σ_{ci} 为损伤演化临界值, σ_{cd} 为裂纹损伤临界值, σ_{peak} 为材料的临界损伤值。

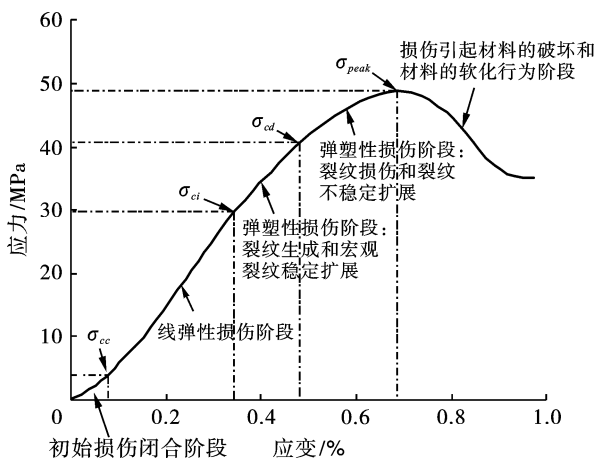


图 2 岩石损伤程度变化

Fig. 2 Change of rock damage degree

2.3 岩石爆破机理研究

爆炸能量对岩石的压缩和拉伸作用是造成岩石破碎的主要原因,研究爆破能量的分布特征对研究岩石爆破破坏机理具有重要意义^[19]。学者普遍认为岩石的破碎主要由炸药爆炸产生的爆轰波的动压缩荷载和爆生气体的静压缩荷载综合作用造成^[20,21]。当冲击力大于岩石抗压强度,岩石内部就会产生断裂和损伤。

炸药在岩石中爆炸时,周围岩石受到多种荷载的综合作用。在台阶爆破中,岩石表面往往会被炸裂成不规则的块状岩石,对于后续铲装环节影响巨大。炸药对于岩石的破坏主要分为爆炸冲击波对岩石的压缩、冲击波反射引起自由面岩石掉落、爆生气体楔入裂隙进一步破坏岩石三个阶段。其中第一、二阶段主要受到爆炸冲击波作用,当炸药爆炸产生的冲击波携带的应力大于岩石的动态抗压强度时,岩石就会产生损伤,表现为径向与环向的裂纹不断扩展;第三阶段主要由炸药爆轰产生的爆生气体在应力波冲击形成的裂纹之间膨胀造成裂隙扩展与碎石的抛出。因此在进行台阶爆破作业时,需要考虑岩石残块的大小和形状对后续工作的影响,合理安排爆破参数,以降低后续作业的难度和成本。

综上所述,岩石爆破破碎机理及岩石抛掷受到多种因素的影响,包括岩石性质、炸药类型、装药结构以及爆破参数等。岩石性质如强度、硬度、韧性等会影响其抵抗破碎的能力;炸药类型和装药结构决定了爆炸能量的释放方式和作用时间,对岩石的破碎效果具有重要影响;此外,爆破参数如孔距、排距、装药密度等也会对破碎效果产生显著影响。综合考虑爆破环节各因素的影响,合理设计爆破参数,使矿石爆后块度分布在合理范围内,对爆后能量的合理分配、后续铲装等环节的合理进行至关重要。

为使得钻孔、爆破环节相互联系,结合岩石初始细观损伤,合理分配钻孔、爆破能量,提出爆后块度作为指标评价爆破效果^[22],爆后炸药单耗作为指标评价爆破能耗:平均破碎尺寸(d_{50})、大块破碎尺寸(d_{90})和最大块度(d_{max})。 d_{50} 值越小破碎后块度平均值越小, d_{90} 值越大,破碎后大块块度越大; d_{max} 值越大破碎后大块块度越大;炸药单耗表示 1 kg 炸药爆破岩石的质量(体积),单位 kg/t(kg/m^3),单耗越低,代表每千克炸药破碎的岩石越多,破岩效果越好。

2.4 岩石碎磨研究

碎磨作业是矿山生产中能耗最高的作业单元,碎磨能耗与碎磨方法、碎磨设备以及矿石性质等诸

多因素有关^[23],一般认为占矿山总能耗的30%~50%,因此控制碎磨作业能耗十分重要。考虑到实际入料矿石非爆破原始块度级配,以矿石块度为关键参数,分别联系采场爆破参数与爆堆块度数据、破碎工段入料块度与破碎能耗数据;同时考虑生产设备的磨损、折旧等成本,作为碎磨矿环节的评价指标。某生产线破碎矿石能耗公式见式(2)

$$E_0 = -0.8597 \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (2)$$

式中: E_0 为破碎矿石能耗比; d_1 、 d_2 分别为矿石在碎磨环节前后的粒径尺寸。

将爆破参数-能耗数据关系对应,使用超前钻孔确定矿石种类、硬度、完整性来优化爆破参数的设

计;根据爆堆矿石种类、块度与能耗的关系,按照指标在采场二次破碎环节增加设备数量和控制对大块的破碎程度。生产设备的磨损、折旧等会导致钻孔困难、爆后大块率高、根底、铲装不便、运输滞后、破碎效率低下等问题的出现,严重影响了各环节的高效运转。因此综合考虑生产设备的成本,对露天矿山爆破过程加以控制。

以费用和爆破方量来计算凿岩钻孔(C_1)和爆破(C_2)的吨成本;统计月均原矿出矿量和费用支出,并按采剥比1:3计算出铲装(C_3)和运输(C_4)的吨成本;分别统计月均入破量、入磨量、设备维修次数和成本及电耗计算出破碎(C_5)和磨矿(C_6)吨成本。各环节吨矿成本及占比如表1及图3所示。

表1 某矿山生产成本分析

Table 1 Production cost analysis of a mine

类型	钻孔	爆破	铲装	运输	破碎	磨矿
吨成本(元/t)	0.564	1.962	1.234	1.839	3.990	37.542
占比(%)	1.20	4.16	2.62	3.90	8.47	79.65

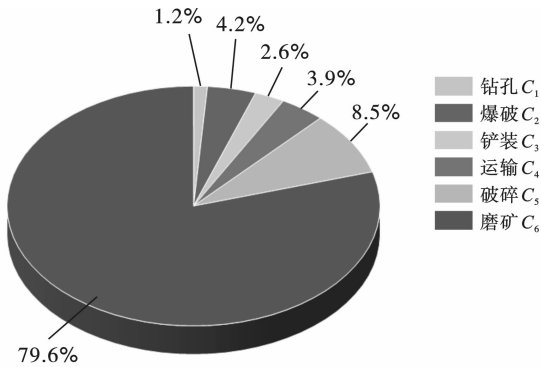


图3 各环节吨矿成本及占比

Fig. 3 Cost and proportion of tons of ore in each link

3 爆破共享控制模型

岩石在损坏和变形过程中,能量起着至关重要的作用。岩石内部所蕴含的能量超过了其最大承受限度,导致出现无法挽回的能量耗散,这是岩石毁坏的根本原因^[24-26]。Wang等在对经历冻融循环的红砂岩进行冲击实验后^[27],研究了样品的能量变化曲线和能量标准,通过比较四个时期的能量消耗和损伤积累来评估材料的性能表现。根据动能损耗理论,Wang等提出了一种评估岩石破裂能力的强度标准^[28],并研究了不同压力条件下砂岩能量变化的规律。Xie等提出了基于能量消耗的岩石强度减退和变形损坏规则^[29]。Liu等通过对两种典型石材进行单向循环压力和卸压试验^[30],提出了一种考虑能耗

因素的损伤修复模型,以验证该理论。综上所述,岩石的损伤破坏与其内部的能量分布情况关系密切相关,研究各环节的能量消耗,对于岩石内部的能量控制以及破岩效果十分重要。

3.1 钻进能耗计算

研究岩石在钻进和爆破中的能量耗散问题至关重要。在钻孔过程中主要存在压力做功 W_Y 和扭矩做功 W_N ,总能量的一部分会转化为摩擦破坏岩石时所消耗的热量 E_R 和压缩破坏岩石时所消耗的热量 E_Y ,为方便计算,忽略其他钻进过程中消耗的能量,由此得到钻进过程的能量方程

$$W_Y + W_N = E_R + E_Y \quad (3)$$

其中,压力做功可表示为

$$W_Y = Fv \quad (4)$$

扭矩做功可表示为

$$W_N = 2\pi nNt \quad (5)$$

式中: F 为作用于岩石的压力; v 为钻头下压速度; n 为钻头的转速; N 为钻头的扭矩; t 为钻头作用时间。

其中,摩擦破坏岩石时所消耗的热量 E_M 包括底部摩擦能量 E_d 、侧向摩擦能量 E_c 以及水的摩擦能量 E_s 。 E_d 可表示为

$$E_d = 2\pi n\mu Ft \int_0^R r dr = \pi n\mu FR^2 t \quad (6)$$

式中: $\mu = 0.21$, μ 为摩擦系数; R 为钻头半径,其他参数与上式相同。

E_c 可表示为

$$E_c = 2\pi R n \mu_c K_c F t \quad (7)$$

式中: $\mu_c = 0.2$; $K_c = 0.23$, K_c 为轴向压力的侧向转换因子。

E_s 包括轴向能量 E_z 和环向能量 E_h

$$E_z = N_z v t \quad (8)$$

$$E_h = \pi n R N_h t \quad (9)$$

环向能量 E_h 作用与水的能量 E_s 相同

$$E_s = E_h = \frac{1}{2} m v_h^2 = \frac{1}{8} \rho \pi^3 n^2 R^4 v t \quad (10)$$

综合可得,岩石研磨破碎所需能量 E_c 为

$$E_c = W_M + W_F - (E_d + E_m + E_a + E_h) \approx$$

$$W_M + W_F - (E_d + E_m + E_k) \approx$$

$$\pi n t \left(2M - \mu_d F R^2 - \frac{2\mu_c v F R}{1-v} - \frac{\rho n v \pi^2 R^4}{8} \right) + F v t \quad (11)$$

定义研磨单位体积岩石消耗的能量为 η_e , 可表示为

$$\eta_e = \frac{E_c}{\pi R v t} = \frac{n(2M - \mu_d F R^2)}{\pi R^2} - \frac{2n\mu_c v F}{R(1-v)v} - \frac{\rho \pi^2 R^2 n^2}{8} + \frac{F}{\pi R^2} \quad (12)$$

钻进能耗与地质条件、炸药特性等因素有关,由爆破孔的数量、孔径、孔深、装药量等参数控制。对爆破设计的优化能够实现钻进能耗的降低,以及影响后续爆破环节的装药及布孔设计等参数,对于施工生产环节意义重大。

3.2 爆破能耗计算

现场爆破施工多采用柱状乳化炸药,柱状炸药在爆破过程中主要包含五部分能量^[31]:冲击波扩展爆腔(W_1)、应力波扩展岩石裂隙(W_2)、应力波引起岩石弹性变形(W_3)、爆生气体扩展岩石爆腔(W_4)、爆生气体扩展岩石裂隙(W_5)五个部分。

(1) W_1 的计算公式为

$$W_1 = 2\pi r_b^2 P_d \left(1 - \frac{r_b}{R_1} \right) \quad (13)$$

$$P_d = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \gamma} \frac{2\rho_m C_p}{\rho_m C_p + \rho_0 D} \quad (14)$$

式中: r_b 、 R_1 分别为炮孔与爆腔半径,m; P_d 为爆炸荷载最开始作用于岩石径向的应力值,MPa; ρ_0 为采用炸药的密度,kg/m³; D 为炸药的爆速,m/s; $\gamma = 3$, γ 为爆轰产物膨胀绝热指数; ρ_m 为岩石的密度,kg/m³; C_p 为岩石爆后应力波传播的声速,m/s。

$$R_1 = [R_c^2 - (R_c^2 - r_b^2)\rho_m/\rho_0]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$R_c = r_b \left(\frac{P_d A}{\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (16)$$

$$A = [(1 + \lambda)^2 + (1 + \lambda^2) - 2\mu(1 - \mu)(1 - \lambda)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

式中: R_1 为爆腔半径,m; R_c 为粉碎区半径,m; A 为粉碎区半径,m; σ_{cd} 为岩石单轴动态抗压强度; α 为压力衰减系数; λ 为应力波对岩石的侧向压力系数; μ 为岩石的静泊松比。

(2) W_2 的计算公式为

$$W_2 = \frac{n_1 \pi \lambda^2 P_d r_b^2 (1 - \mu^2)}{E(1 - \alpha)} \left[\left(\frac{R_T}{r_b} \right)^{2(1-\alpha)} - 1 \right] \quad (18)$$

$$R_T = r_b \left(\frac{P_d A}{\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (19)$$

式中: n_1 为径向裂隙数量; R_T 为裂隙区半径,m; σ_{td} 为岩石动态抗拉强度; E 为动态弹性模量; β 为荷载衰减系数。

(3) W_3 、 W_4 和 W_5 的计算公式分别为

$$\alpha = 2 - \mu/(1 - \mu)$$

$$\lambda = \mu(1 - \mu)$$

$$W_3 = \int_{r_b}^{+\infty} 2\pi r \Delta E dr = \frac{\pi(1 + \lambda^2)}{E_i} \frac{P_d^2 r_b^2}{2(\alpha - 1)} \quad (20)$$

$$P_0 = \rho_0 D / (2 + 2\lambda)$$

$$W_4 = \begin{cases} \frac{\pi P_0 r_b^2}{2} \left(\frac{r_b}{R_1} \right)^4 \left[1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^4 \right], & P_s \geq P_k \\ \frac{4\pi P_k r_b^2}{3} \left(\frac{P_0}{P_k} \right)^{\frac{9}{4}} \left(\frac{r_b}{R_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left[1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{2}{3}} \right], & P_s < P_k \end{cases} \quad (21)$$

$$W_5 = n_1 \int_{R_T}^L \frac{1 - \mu}{E_i} K_1^2 dr \quad (22)$$

式中: ΔE 为单位体积的岩石产生的变形能; P_0 为爆生气体的初始压力,MPa; R_2 为爆腔瞬时半径,m; P_s 与 P_k 分别为当前压力与临界压力,MPa; L 为裂隙长度; K_1 为应力强度因子。

综上所述,爆破总能量 E_b 为

$$E_b = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 \quad (23)$$

某矿山爆破参数与爆堆块度对应关系见表2,该爆区矿石性质基本一致,由表看出随着炸药单耗等炸药参数,排距、布孔数、台阶高度等爆破参数发生变化,爆堆矿石块度也随之改变。炸药单耗越大,排距越大,爆堆矿石块度越小;台阶高度越大,爆堆矿石块度越大,爆破过程中的爆破能耗也受到影响。

由此可知爆破能耗被炮孔半径等爆破参数,岩石密度等岩石参数,炸药密度、炸药爆速等炸药参数影响,爆破能耗在被钻进条件影响的同时,也将对后续

铲装、运输、破碎环节产生影响,如何精确控制爆破,实现炸药能量的合理分配,对于实现炸药单耗的提升和爆破环节能耗的降低十分重要。

表 2 某矿山爆破参数与爆堆块度对应关系

Table 2 Correspondence between blasting parameters and boulder yield of a mine

序号	爆破参数					爆堆矿石块度/cm	
	炸药单耗/(kg·m ⁻³)	孔距/m	排距/m	孔数/个	台阶高度/m	平均 X50	平均 X80
1	0.45	5.8	4.3	49	13.2	36.40	68.79
2	0.49	5.8	4.3	44	12.8	29.35	55.78
3	0.47	5.8	4.3	41	12.0	36.72	66.72
4	0.41	5.8	4.8	43	12.5	34.65	76.14
5	0.38	5.8	4.8	98	12.5	47.00	82.34
6	0.49	5.8	4.3	38	11.8	35.53	81.69
7	0.46	5.8	4.3	62	12.0	37.76	70.31
8	0.46	5.8	4.3	62	12.0	35.88	64.16
9	0.48	5.8	4.3	63	12.5	35.30	60.59
10	0.47	5.8	4.3	35	12.0	28.06	62.77

3.3 破碎能耗计算

无论化学能或是机械能,为了将矿石破碎均需要消耗能量;将单位体积的矿石破碎成特定尺寸,所需消耗的最小能量是确定的,称之为断裂能,主要由岩石的断裂面积决定,定义为矿石单位面积断裂所消耗的能量,断裂能定义为表面自由能的两倍^[32]

$$G_d = 2\gamma \quad (24)$$

假设将体积为 V 的矿石破碎为形状为边长为 d 的立方体小块,破碎后得到的块体数量为 n ,可表示为

$$n = V/d^3 \quad (25)$$

单个块体表面积表示为

$$S = 6d^2 \quad (26)$$

定义块体总表面积为

$$S_t = 6V/d \quad (27)$$

联立式(23)~式(26),得到破碎矿石到小块消耗的能量为

$$E_1 = 6\gamma V/d = 3G_d V/d \quad (28)$$

假设某矿石的体积为 1 m^3 ,断裂能为 100 J/m^2 ,计算在破碎矿石到不同尺寸时对应消耗的能量,绘制二者关系图如图 4 所示。发现在破碎中矿石尺寸逐渐减小时,所消耗的能量增大,当目标尺寸非常小时,消耗的能量增多的程度更大。

岩石强度随尺寸的减小会增高,可表示为

$$\sigma_d = \sigma_w + \sigma_a e^{-d/d_x} \quad (29)$$

式中: σ_d 为岩石在任意尺寸时的强度; σ_w 为无

限延伸岩石的强度; σ_a 为特定情况下的岩石强度; d_x 为特定情况下的岩石尺度。

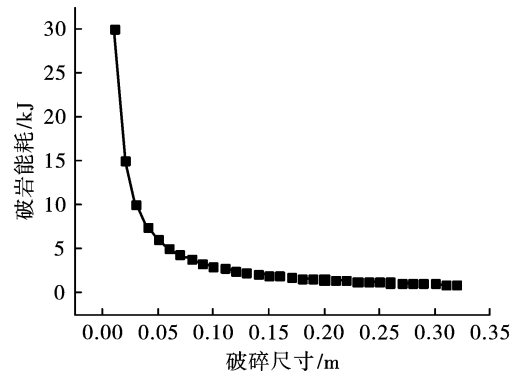


图 4 单一强度下破碎尺寸与破岩能耗关系变化
Fig. 4 Relationship between crushing size and rock breaking energy consumption under single strength

联系能量角度得到

$$G_d = G_w + G_a e^{-d/d_x} \quad (30)$$

式中: G_d 为岩石在任意尺寸时的断裂能; G_w 为无边界延伸岩石的能量; G_a 为特定情况下使得岩石发生断裂所消耗的能量。

代入式(31)到式(29)中得到消耗能量为

$$E_2 = 3V(G_w + G_a e^{-d/d_x})/d \quad (31)$$

假设某矿石的体积为 1 m^3 ,断裂能为 100 J/m^2 ,特征断裂能为 200 J/m^2 ,特征尺寸为 0.2 m ,计算破碎尺寸与破岩能耗关系变化如图 5 所示。

矿石破碎时存在一定的尺寸分布,并不是尺寸

单一均匀的块体,常通过 $R-R$ 曲线进行表征

$$R = 1 - e^{-(d/d_x)^n} \quad (32)$$

式中: R 为规定尺寸下的块体总量; d 为块体尺寸; d_x 为特征尺寸,表示 $R=63.21\%$ 时的块体尺寸; n 为不均匀指数。

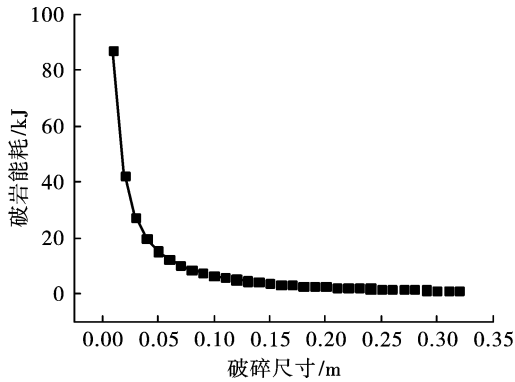


图 5 任意强度下破碎尺寸与破岩能耗关系变化
Fig. 5 Relationship between crushing size and rock breaking energy consumption under any strength

求导式(33)得到函数为

$$f = \frac{1}{d} \left(\frac{d}{d_x} \right)^{n-1} e^{-(d/d_x)^n} \quad (33)$$

随着不均匀系数 n 的减小,小尺寸的块度比例会增加;而随着 n 的增大,大尺寸的块度比例会减少。特征尺寸越小,概率密度就会越高,特别是当非均匀度指标 n 小于 1 时。随着不平衡系数 n 的增加,特征规模的扩大会导致概率密度先上升后下降。此外,随着 n 的增加,概率密度达到最高点时的特征增加。

根据式(34),破碎块体的尺寸从 x 到 $x + d_x$ 对应的破碎体积为

$$dV_x = \frac{1}{X_0} \left(\frac{x}{X_0} \right)^{n-1} e^{-(x/X_0)^n} V dx \quad (34)$$

根据式(35)可得,破碎块体消耗的总能量可表述为

$$E_3 = \int_0^V \frac{3(G_m + G_0 e^{-x/d_0})}{x} dV_x \quad (35)$$

将式(34)代入式(36),可得

$$E_3 = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{3(G_m + G_0 e^{-x/d_0})}{x} \frac{1}{X_0} \left(\frac{x}{X_0} \right)^{n-1} e^{-(x/X_0)^n} V dx \quad (36)$$

式中, d_{\min} 及 d_{\max} 为受到破碎后的岩石块体的尺寸分布最小值与最大值。

在现实破碎工况下的破碎能耗为

$$E_d = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{3G_f}{x} \frac{1}{X_0} \left(\frac{x}{X_0} \right)^{n-1} e^{-(x/X_0)^n} V dx \quad (37)$$

某矿山入料块度与破碎能耗对应关系见表 3,看出破碎量与破碎电耗之间呈正相关关系,破碎量越大,破碎电耗越高;入料矿石块度尺寸对破碎过程耗量比也存在影响,入料矿石块度的平均块度尺寸与大块率越小,耗量比越低,破碎能耗更小。绘制破碎量与破碎电耗拟合图如图 6 所示,得到破碎量的变化与破碎过程中消耗的电能之间成正相关关系,拟合精度高于 0.8,表示破碎机能耗效率较稳定。可以通过控制破碎量有效预测破碎能耗,制定更为精确的能耗预算和成本控制模型。其次通过调整破碎量,可以优化破碎机的运行效率,降低能耗,提高经济效益。

表 3 某矿山入料块度与破碎能耗对应关系

Table 3 The corresponding relationship between feed fragmentation and crushing energy consumption in a mine

序号	入料矿石块度		破碎量/t	破碎电耗/(kW·h ⁻¹)	耗量比/(kW·h·t ⁻¹)
	平均 X50	平均 X80			
1	27.510	46.85	600.15	3330	5.55
2	24.890	59.25	439.94	2169	4.93
3	21.580	45.12	481.65	2250	4.67
4	23.280	44.65	775.13	3840	4.95
5	15.300	28.83	1012.16	3720	3.68
6	21.770	34.54	670.72	2100	3.13
7	21.350	36.90	994.14	3780	3.80
8	22.660	36.93	719.31	3000	4.17
9	19.850	36.13	1069.92	3900	3.65
10	22.910	40.73	1035.36	4260	4.11
11	23.730	37.81	930.72	3480	3.74
12	25.580	46.12	434.88	1440	3.31
13	17.090	40.82	354.71	1920	5.41
14	23.185	52.05	265.10	1200	4.53
15	18.490	36.38	1026.87	3000	2.92
16	18.230	42.17	1605.27	5190	3.23
17	17.320	48.69	949.93	3030	3.19
18	20.590	40.13	167.03	630	3.77

3.4 爆破共享控制模型建立

矿石经过爆破挖掘后,被铲装搬运至目的地,随后需经过初步破碎处理,再进行筛分分离工序,方可完成处理。开展爆破全过程综合能耗控制,关键是根据采场的地质条件等因素,调整各项影响爆破成本的条件,最终实现最佳露天矿山开采总成本,各工序消耗的能量如图 7 所示。

在进行工程建设时,必须考虑各种费用支出。需要对不同爆破块度分布进行统计分析,以发现爆破参数与爆破块度分布之间的关系。通过消除对结

果影响不大的参数,最终可以利用一个公式来描述它们之间的联系。

$$X_b = f(n_1, n_2, n_3, \dots, n_n) \quad (38)$$

式中: X_b 为爆破作用后爆堆块体块度; $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ 分别为爆破参数决策变量。

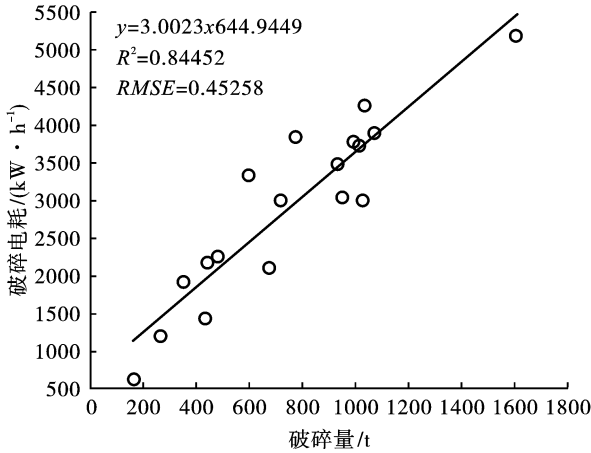


图6 破碎量与破碎电耗拟合

Fig. 6 Fitting of crushing amount and crushing power consumption

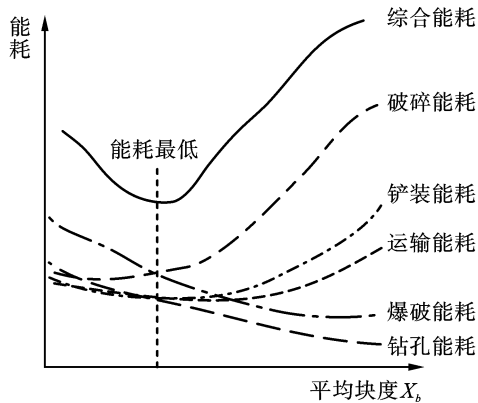


图7 各工序消耗的能量

Fig. 7 Energy consumed by each process

研究各个阶段所需的能量,并建立一个能耗与爆破效果之间的函数关系

$$E = f(X_x) = wX_x^3 + xX_x^2 + yX_x + z \quad (39)$$

式中: w, x, y, z 为爆破过程中通过数据拟合得到的参数; X_x 为爆破作用后爆堆块体块度的平均值。基于得到的参数建立有关能量耗散程度最低的相关函数为

$$\min[Q] = \min[Q_c + Q_b + Q_t + Q_h + Q_d] \quad (40)$$

式中:总成本为 Q ;钻孔成本为 Q_c ;爆破成本为 Q_b ;铲装成本为 Q_t ;运输成本为 Q_h ;破碎成本为 Q_d 。为保证模型运算的准确性,对于模型的求解过程还需要增加三个对参数的约束,分别是爆破大块率、粉

矿率和爆破振动

$$\begin{cases} X_m < [X] \\ V_m < [V] \\ P_{fine} < [P] \end{cases} \quad (41)$$

式中: X_m 为实际爆破振动值; $[X]$ 为爆破振动控制标准; V_m 为实际大块率; $[V]$ 为大块率控制标准; P_{fine} 为实际粉矿率; $[P]$ 为粉矿率控制标准。在约束条件下,得到了最优综合能耗的公式

$$\min[Q] = \min[g(n_1, n_2, n_3, \dots, n_n)] \quad (42)$$

联立式(41)和式(42),表示通过优化模型的计算,能够得到爆破参数设计的最优解,实现矿山爆破各环节能耗在总能耗中的最优占比,实现了矿石产出总能耗的分配模型及铲运过程的矿石损伤模型的建立,能够对爆破过程各环节能量进行精准调整,为矿山作业的高效、安全和可持续发展提供了有力支持。

4 结论

在露天矿山爆破作业中,以总能耗为基础,综合分析各生产环节生产能源成本,考虑生产设备的磨损、折旧等因素,将钻进、爆破、铲装、运输和破碎工序环节联系起来,提出通过优化爆破参数,建立各工序的评价与控制指标,实现矿山各工序协同作业和有序衔接的新方法。根据爆破过程中矿石的宏观损伤特性及其关联,创新地提出了铲运过程的矿石损伤模型,通过调整矿石破碎量,对破碎电耗的变化进行分析,拟合二者精度高达 0.84,证明通过破碎量预测破碎阶段能耗的手段具备可行性。通过公式计算爆破过程各工序能耗的最优解,联合各参数得到最优综合能耗公式,建立了爆破共享控制模型,实现了对各工序环节总能量的调控,对降低矿山总能耗、提高矿石破碎效率具有较大应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 冷振东,高启栋,卢文波,等. 岩石钻孔爆破能量调控理论与应用技术研究进展[J]. 金属矿山,2023(5): 64-76.
- [1] LENG Zhen-dong, GAO Qi-dong, LU Wen-bo, et al. Research progress in theory and technology of energy regulation for rock drilling and blasting [J]. Metal Mine, 2023(5):64-76. (in Chinese)
- [2] GAO Qi-dong, LU Wen-bo, YAN Peng, et al. Effect of initiation location on distribution and utilization of explosion energy during rock blasting [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3433-3447.

- [3] 刘英,毛羽,徐士超,等.基于 PSO-BPNN 模型的爆破块度预测[J].爆破,2024,41(2):136-142.
- [3] LIU Ying, MAO Yu, XU Shi-chao, et al. Blasting fragmentation prediction based on PSO-BPNN Model[J]. Blasting, 2024, 41(2):136-142. (in Chinese)
- [4] 张长奎,贾建军,冯春,等.露天金属矿采选联合优化的研究进展[J].金属矿山,2017(7):1-7.
- [4] ZHANG Chang-kui, JIA Jian-jun, FENG Chun, et al. Study advances of comprehensive optimization of mining and mineral processing in open-pit metal mine[J]. Metal Mine, 2017(7):1-7. (in Chinese)
- [5] 过江,赵培东,张琛,等.能耗控制视角下的 MOPSO 爆破参数优化研究[J].工程爆破,2022,28(5):9-16,51.
- [5] GUO Jiang, ZHAO Pei-dong, ZHANG Chen, et al. Research on MOPSO blasting parameters optimization from the perspective of energy consumption control[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(5):9-16, 51. (in Chinese)
- [6] ZHANG Hui, GUO Pan-pan, WANG Yi-xian, et al. Fracture behavior of rock with initial damage: theoretical, experimental, and numerical investigations[J]. Geofluids, 2020, 2020:1-9.
- [7] GAO Wei, CHEN Xin, HU Cheng-jie, et al. New damage evolution model of rock material[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 86:207-224.
- [8] 张尔辉.岩石损伤动态演化规律及其定量表征研究[D].河北:华北科技学院,2021.
- [8] ZHANG Er-hui. Study on dynamic evolution and quantitative characterization of rock damage[D]. Hebei: North China Institute of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [9] SHEN Ming-xuan, ZHAO Yu, BI Jing, et al. Micro-damage evolution and macro-mechanical property of preloaded sandstone subjected to high-temperature treatment based on NMR technique[J]. Construction and Building Materials, 2023, 36:9130638.
- [10] LIN Hang, FENG Jing-jing, CAO Ri-hong, et al. Comparative analysis of rock damage models based on different distribution functions[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(1):301-310.
- [11] JIANG X, XUE Y, REN X, et al. Dynamic response characteristics and damage calculation method of fractured rock mass under blasting disturbance[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024:192.
- [12] CHENG Pan, XIE Li-Xiang, LI Xing, et al. Numerical investigation of effect of eccentric decoupled charge structure on blasting-induced rock damage[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2):663-679.
- [13] GUO Y, YANG R, PENG S, et al. Experimental study on decoupled charge blasting-induced crack propagation with parabolic shaped charge[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024:304.
- [14] 戚承志,夏晨,李晓照,等.拉-拉疲劳下 15MnMoVN 多裂纹扩展研究[J].振动与冲击,2020,50(2):111-119.
- [14] QI Cheng-zhi, XIA Chen, LI Xiao-zhao, et al. Multi-crack propagation of 15MnMoVN steel under tensile fatigue[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 50(2):111-119. (in Chinese)
- [15] GUO Y, YANG R, PENG S, et al. Experimental study on decoupled charge blasting-induced crack propagation with parabolic shaped charge[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024:304.
- [16] 杨仁树,左进京,杨立云,等.爆炸应力波作用下动、静裂纹相互作用的实验研究[J].爆炸与冲击,2017,37(6):952-958.
- [16] YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, YANG Li-yun, et al. Dynamic and static crack interaction under action of explosive stress wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6):952-958. (in Chinese)
- [17] 闫长斌.基于声速变化的岩石爆破累积损伤效应[J].岩土力学,2010,31(S1):187-192.
- [17] YAN Chang-bin. Blasting damage cumulative effect of rock mass based on sound velocity variation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1):187-192. (in Chinese)
- [18] 王玉杰,余磊,赵宇飞,等.基于数字钻进技术的岩石强度参数测定试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(9):1669-1678.
- [18] WANG Yu-jie, TU Lei, ZHAO Yu-fei, et al. Experimental study on measurement of rock strength parameters based on digital drilling technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9):1669-1678. (in Chinese)
- [19] XU Peng, YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, et al. Research progress of the fundamental theory and technology of rock blasting[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(4):705-716.
- [20] MMD Banadaki, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, s 40-41(2):16-25.
- [21] ZHANG Z, CHI L, YI C. An empirical approach for predicting burden velocities in rock blasting[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(4):767-773.

- ing, 2016, 49(9):3481-3494.
- [12] ZHOU Xiao-ping, WANG Yun-teng, ZHANG Jian-zhi. Fracturing behavior study of three-flawed specimens by uniaxial compression and 3d digital image correlation: sensitivity to brittleness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(3):691-718.
- [13] ZHOU Xiao-ping, ZHANG Jian-zhi, WONG Louis-ngai-yuen. Experimental study on the growth, coalescence and wrapping behaviors of 3d cross-embedded flaws under uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(5):1379 - 1400.
- [14] 李地元, 韩震宇, 孙小磊, 等. 含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(12):2872-2883.
- [14] LI Di-yuan, HAN Zhen-yu, SUN Xiao-lei, et al. Experimental study on dynamic mechanical damage characteristics of SHPB with prefabricated fractured marble[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12):2872-2883. (in Chinese)
- [15] 王建国, 梁书锋, 高全臣, 等. 节理倾角对类岩石冲击能量传递影响的试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(5):1237-1243.
- [15] WANG Jian-guo, LIANG Shu-feng, GAO Quan-chen, et al. Experimental study on the effect of nodal dip angle on impact energy transfer of rock-like[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2018, 49(5):1237-1243. (in Chinese)
- [16] 潘博, 汪旭光, 徐振洋, 等. 节理角度对岩石材料的动态响应影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3):566-575.
- [16] PAN Bo, WANG Xu-guang, XU Zhen-yang, et al. Study on the effect of nodal angle on the dynamic response of rock materials[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3):566-575. (in Chinese)
- [17] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014:258-287.
- [17] LI Xi-bing. *Fundamentals and applications of rock dynamics*[M]. Beijing: Science Press, 2014:258-287. (in Chinese)

(上接第 25 页)

- [22] 金鑫, 高佳明, 苏宏伟, 等. 露天矿深孔台阶爆破间隔装药爆破试验研究[J]. *爆破*, 2023, 40(2):42-47.
- [22] JIN Xin, GAO Jia-ming, SU Hong-wei, et al. Experimental study on interval charging blasting of deep hole bench blasting in open pit mine[J]. *Blasting*, 2023, 40(2):42-47. (in Chinese)
- [23] NAPIER-MUNN T. Is progress in energy-efficient comminution doomed[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 73:1-6.
- [24] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21):3565-3571.
- [24] XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21):3565-3571. (in Chinese)
- [25] 杨小彬, 程虹铭, 裴艳宇. 不同加载方式下岩石变形及峰后能量演化特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(2):3229-3237.
- [25] YANG Xiao-bin, CHENG Hong-ming, PEI Yan-yu. Study on the evolution characteristics of rock deformation and post-peak energy under different loading methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(2):3229-3237. (in Chinese)
- [26] 孟庆彬, 王从凯, 黄炳香, 等. 三轴循环加卸载条件下岩石能量演化及分配规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(10):2047-2060.
- [26] MENG Qing-bin, WANG Cong-kai, HUANG Bin-xiang, et al. Rock energy evolution and distribution law under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(10):2047-2060. (in Chinese)
- [27] WANG P, XU J Y, FANG X Y, et al. Energy dissipation and damage evolution analyses for the dynamic compression failure process of red-sandstone after freeze-thaw cycles[J]. *Engineering Geology*, 2017, 221:104-113.
- [28] WANG Y F, CUI F. Energy evolution mechanism in process of Sandstone failure and energy strength criterion[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 154:21-28.
- [29] XIE H P, LI L Y, PENG R D, et al. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009, 1(1):11-20.
- [30] LIU X S, NING J G, TAN Y L, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 85:27-32.
- [31] 吴亮, 卢文波, 宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. *岩土力学*, 2006(5):735-739.
- [31] WU Liang, LU Wen-bo, ZONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006(5):735-739. (in Chinese)
- [32] CHESTER J, CHESTER F, KRONENBERG, et al. Fracture surface energy of the punchbowl fault[J]. *San Andreas System. Nature*, 2005, 437:133-136.