

采选工程

文章编号: 1004-4051(2023)10-0103-08

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230680

地下矿山巷道掘进凿岩爆破技术参数优化 研究进展与展望

陈程, 李全明

(北方工业大学土木工程学院, 北京 100144)

摘要: 地下矿山巷道掘进爆破技术是矿山建设和生产的关键环节,其参数的选择和优化对提高巷道掘进效率和降低成本具有重要意义。本文通过对已有文献的总结,梳理了巷道掘进凿岩爆破机理研究进展,涵盖了爆炸应力波传播机制和岩石动态破坏机制两个核心内容,需要进一步完善研究方法、拓展数据来源,并加强与实际应用的衔接;介绍了爆破参数优化的三个主要方面:炮孔装药结构优化、掏槽参数优化、起爆网络优化的研究现状,现有研究尚未给出针对不同条件下爆破参数选择和优化的具体标准,在实际应用中存在一定的难度。此外,本文还展望了未来的研究方向:爆炸释能和岩体破碎耗能耦合作用基础理论的突破,将为巷道掘进爆破的参数优化提供更准确的理论指导;巷道掘进爆破全过程智能化技术的应用将是未来的趋势,可以实现对爆破过程的精确控制和优化;爆破参数的多指标智能优化模型的建立是提高爆破效果的关键,综合考虑多个因素可以实现全面的参数优化,进而得到更好的爆破效果。

关键词: 地下矿山; 巷道掘进; 爆破参数优化; 爆破机理; 智能优化模型; 智能爆破
中图分类号: TD235 **文献标识码:** A

Research progress and prospect of parameters optimization of rock drilling and blasting technical in underground mine roadway excavation

CHEN Cheng, LI Quanming

(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The blasting technology of underground mine roadway excavation is an important part of mine construction and production. The selection and optimization of its parameters are of great significance to improve the efficiency of roadway excavation and reduce the cost. Based on a comprehensive review the existing literature, this paper combs the research on rock drilling and blasting mechanism in roadway excavation, including the two core contents of the propagation mechanism of blasting stress wave and the dynamic failure mechanism of rock. It is necessary to improve the research methods, expand the data sources, and strengthen the connection with practical applications. The

收稿日期: 2023-08-11 责任编辑: 宋菲

基金项目: 十四五国家重点研发计划资助(编号: 2021YFC3001300); 国家自然科学基金项目资助(编号: 52304202)

第一作者简介: 陈程(1990—), 男, 汉族, 安徽淮南人, 博士后, 讲师, 主要从事岩石动力学、光测力学、岩土工程开挖和灾害防控等方面的研究工作, E-mail: 002420@ncut.edu.cn。

通讯作者简介: 李全明(1979—), 男, 汉族, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、矿山安全、应急管理方面的研究, E-mail: liqm79@126.com。

引用格式: 陈程, 李全明. 地下矿山巷道掘进凿岩爆破技术参数优化研究进展与展望[J]. 中国矿业, 2023, 32(10): 103-110.

CHEN Cheng, LI Quanming. Research progress and prospect of parameters optimization of rock drilling and blasting technical in underground mine roadway excavation[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(10): 103-110.

research status of blast hole charge structure optimization, cutting parameter optimization and initiation network optimization in three main aspects of blasting parameter optimization is introduced. The specific criteria for the selection and optimization of blasting parameters under different conditions are not provided, which may pose certain difficulties in practical applications. Additionally, this paper also prospects the future research directions. The breakthrough of the basic theory of the coupling effect of blast energy release and rock crushing energy consumption will provide more accurate theoretical guidance for the parameter optimization of roadway excavation blasting. The application of intelligent technology throughout the entire process of roadway blasting excavation will be the future trend, which can realize the precise control and optimization of the blasting process. The establishment of multi-index intelligent optimization model of blasting parameters is crucial for improving the blasting efficiency. Taking multiple factors into consideration can achieve comprehensive parameter optimization and better blasting results.

Keywords: underground mine; roadway excavation; blasting parameter optimization; blasting mechanism; intelligence optimizes model; intelligent blasting

0 引言

随着科学技术的不断进步和信息化时代的到来, 2009 年智能爆破的概念被提出^[1], 2020 年汪旭光等^[2]首次提出了智能爆破的准确定义, 智能爆破理念正在逐渐被广泛应用于露天矿山爆破^[3]、煤矿巷道光面爆破^[4]、地下水封洞库爆破^[5]等方面。智能爆破技术的发展为地下矿山巷道掘进凿岩爆破带来了新的机遇。地下矿山开采中, 巷道掘进是一项重要的工作任务。巷道的掘进难度和复杂度随着矿山的深入开采而增加, 特别是在遇到硬质地层时, 巷道掘进的困难程度更为突出。地下矿山巷道掘进凿岩爆破作为矿山开采中不可或缺的环节, 其参数优化研究对提高生产效率、保障工人安全、降低矿山环境的影响具有重要意义。智能爆破技术的引入, 使得爆破作业可以更加精确、安全、环保, 为地下矿山开采提供了更好的保障。然而, 地下矿山巷道掘进凿岩爆破技术参数优化仍面临一些挑战和问题。由于爆破过程的复杂性, 爆破基础理论仍未有根本性突破; 影响爆破效果的爆破参数众多, 单一指标很难精准预测和评估爆破效果, 爆破参数优化指标和优化模型的建立难度大。

鉴于此, 本文总结了近些年巷道掘进爆破机理和地下矿山巷道掘进凿岩爆破技术参数优化研究现状, 提出了地下矿山巷道掘进爆破参数优化研究应深入发展的方向。这将为地下矿山巷道掘进领域的同行提供重要的参考和借鉴, 同时也将促进巷道掘进爆破技术的进一步创新和应用。

1 巷道掘进凿岩爆破机理研究

巷道掘进凿岩爆破是一项复杂而重要的工程, 深入了解其爆破机理可以帮助优化爆破参数、提高巷道掘进的效率和安全性。研究者们通过实验、数值模拟和理论分析方法, 围绕爆炸应力波传播机制

和岩石动态断裂机制核心内容, 深入探讨了凿岩爆破机理的本质。

1.1 爆炸应力波传播机制研究

模型实验研究可以提供爆炸应力波传播过程的直接观测和数据收集。CHEN 等^[6]利用具有暂时双折射效应的环氧树脂模型试件, 通过构建白光光源的动态光弹性实验系统(图 1(a)), 采集全场随时间变化的等差条纹(图 1(b)), 可视化表征了斜入射爆炸应力波在含预制裂纹模型中的传播路径和传播过程, 为进一步研究爆炸应力对材料和结构的影响提供了重要的实验数据, 有助于预测和评估爆破效果。DING 等^[7]基于数字图像相关方法, 利用爆炸载荷数字图像相关实验系统(图 1(c)), 通过分析应变场数据(图 1(d)), 揭示了爆炸应力波的叠加效应, 对于了解爆炸应力波的能量传播和分布规律具有重要意义。孙冰等^[8]采用相似模型实验, 通过爆破振动仪采集振动数据, 分析了爆炸应力波在层状节理岩体中的传播规律, 对于含节理岩体巷道掘进爆破的爆破参数优化和安全管理具有重要意义。王伟等^[9]将 PVDF 压力传感器埋入水泥砂浆模型试件中, 通过采集压力数据, 对比分析了耦合和水耦合条件下爆炸应力波的传播规律, 对于理解爆炸应力波在不同介质中的传播特性, 以及选择合适的耦合介质和装药结构具有重要意义。

林从谋等^[10]利用 Laplace 积分法和 Miklowitz 围道积分法定量给出了无限黏弹性介质中延长药包爆炸应力波传播的解析解。这项研究考虑了岩石的黏弹性本构, 为深入理解爆炸应力波在岩石介质中的传播机制和特性提供了重要参考。WANG 等^[11]基于修正的时域递归法分析了含线黏弹性充填节理岩体中应力波的传播特性。李鹏等^[12]利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对比分析了完整岩体与节理岩体中爆炸应力

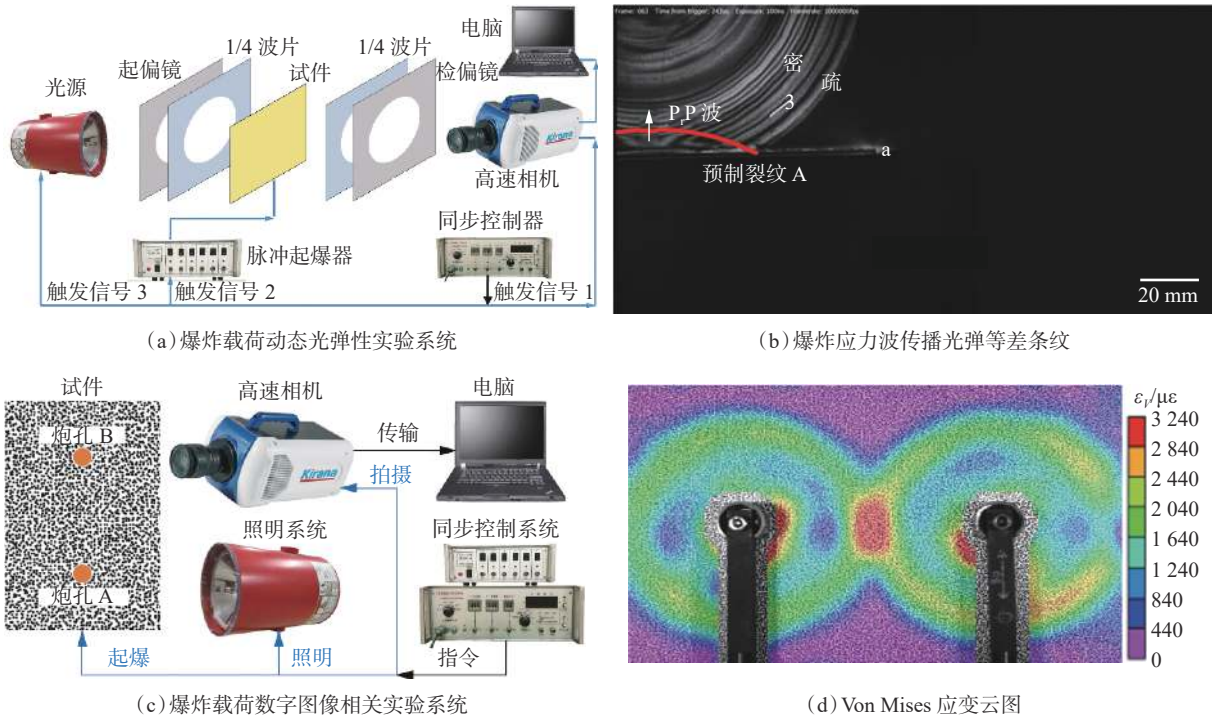


图 1 爆炸应力波传播实验研究图
 Fig. 1 Experimental study on propagation of explosion stress wave
 (资料来源: 文献 [6] 和文献 [7], 有修改)

波质点速度。这项研究提供了一种有效的数值模拟方法, 可以模拟和预测爆炸应力波在不同类型岩体中的传播特性。杨仁树等^[13]基于有限元方法分析了爆炸应力波在节理岩体中的传播规律。通过该研究可以更好地了解爆炸应力波与节理岩体之间的相互作用关系。这些研究成果对于深入研究和应用爆炸应力波在不同介质中的传播规律具有重要意义。

1.2 岩石动态破坏机制研究

爆破破岩过程就是岩石在爆炸载荷作用下发生破裂和破碎的演化过程。在这一过程中, 岩石动态破碎机制是一个关键环节, 它决定了爆破效果的好坏。通过对岩石动态破碎机制的研究, 可以更好地了解岩石在动态载荷下的破碎规律, 从而为爆破参

数选取和优化提供理论依据。

考虑深部岩体所处的地应力情况, LI 等^[14]研发了动静组合霍普金森杆实验系统, 并利用该系统开展了动静组合作用下的岩石动态力学性质测试。考虑地下岩体的三向受力特征, 徐松林等^[15]研制了真三轴霍普金森杆实验系统(图 2(a)), 并利用该系统对不同真三轴静载条件下混凝土的动态各向异性特性进行研究, 并对试样的破坏形貌进行了分析, 其实验装置如图 2(b)所示。这些研究成果模拟了复杂的地下岩体受力条件, 分析岩石材料在动态载荷下的力学性质和破坏行为, 可以更好地理解地下岩体的动态响应特性, 并为相关领域的岩石工程设计和地下工程施工提供重要的参考和指导。

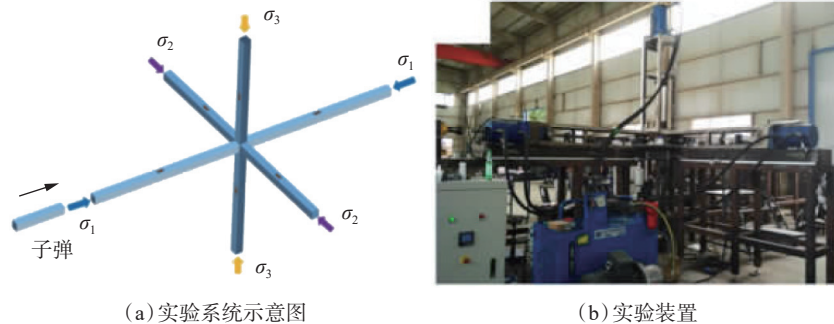


图 2 三维霍普金森杆实验系统
 Fig. 2 Three-dimensional Hopkinson bar experimental system
 (资料来源: 文献 [15])

为了更好地描述和预测岩石在动态载荷下的破坏行为,研究者们提出了一系列的岩石材料破坏准则。这些模型基于岩石的物理性质和力学行为,考虑了动态载荷的影响,能够较好地模拟岩石的断裂过程。钱七虎等^[6]基于岩石强度对应变率的明显依赖效应,提出了考虑岩石强度-应变率效应的岩石类材料莫尔-库仑准则,该准则能够较好地解释岩石在高速加载下的破坏行为。周昌台等^[7]基于岩石材料动态最大能量释放率,提出了考虑应变率效应的岩石动态破坏准则,该准则能够很好地描述岩石在动态载荷下的破坏过程。这些岩石破坏准则提供了一种理论框架,用于分析和预测岩石在动态载荷下的破坏行为。通过研究和应用这些准则,可以更好地理解岩石的动态响应特性。

随着计算机技术的不断发展,研究者们能够利用数值模拟方法对岩石的动态破坏机制进行研究。通过建立合适的数值模型和采用适合的数值方法,可以模拟和预测岩石在动态载荷下的破坏行为,为地下矿山巷道掘进爆破参数的设计、优化提供科学依据。崔年生等^[8]基于有限差分法和离散元法,模拟分析了不同冲击载荷下非均质岩石的动态破坏过程。通过建立岩石的数学模型,考虑岩石的物理性质和力学行为,能够模拟和预测岩石在不同冲击载荷下的破坏过程,进一步了解岩石的动态响应特性。周文海等^[9]基于有限元方法模拟分析了节理岩体中爆生裂纹的扩展特性。基于节理岩体的几何形态和物理性质,建立了相应的有限元模型,可以模拟和预测爆破裂纹在节理岩体中的扩展过程。这些研究可以深入理解岩石的响应特性,并根据模拟结果进行优化设计,提高巷道掘进爆破工程的安全性和效率。

综上所述,学者们综合运用多种手段对巷道掘进凿岩爆破机理开展了相关研究,为深入理解巷道掘进凿岩爆破机理提供了一定的基础,也为巷道掘进凿岩爆破设计和优化提供理论支持。然而,尽管取得了一些进展,但目前的研究仍存在一些不足和尚未解决的问题。实验研究方面,由于巷道掘进凿岩爆破的复杂性,实际实验条件受到一定的限制,很难在实际巷道工程中进行大规模现场爆破实验,实验数据现场应用的可靠性和代表性仍有待提高。现有实验研究大多集中在单一岩石样本或理想化模型上,缺乏针对实际巷道工程中不同岩石类型和工况的全面研究。由于岩石的材料特性复杂多变,动态实验中难以准确模拟实际工程中的复杂载荷和边界条件,需要开发更加真实和可靠的动态试验方法,

开展多尺度、多物理场耦合的研究,以全面、准确地介绍岩石动态破坏的机制。数值模拟方面,岩石在爆炸载荷下的动态断裂过程是一个复杂的非线性问题,现有的数值模型往往基于一些简单假设和经验参数,难以准确描述爆炸载荷作用下岩石破坏的本质,数值模型在对岩石断裂过程的准确模拟方面还有待提高,参数的选择和确定也需要更为准确和可靠的依据。针对复杂动态加载条件下的岩石破坏行为,需要开发更加高级和精细的数值方法,以提高数值模拟方法的准确性和效率。理论研究方面,虽然有一些理论方法可以对巷道掘进凿岩爆破的机理进行分析,但仍缺乏一套完整和准确的理论框架。例如,对于爆炸应力波传播机制的理论分析仍较为有限,对于复杂的巷道实际工况下的应力波传播规律还需要更深入的研究和理论支持。爆炸应力波在不同介质中的传播特性、岩石断裂模式、裂纹扩展机制和破碎行为等方面的机理尚未得到全面深入的研究。未来的研究需要进一步加强实验与理论相结合、多种方法综合应用的研究策略,以提高对巷道掘进凿岩爆破机理的认识和理解;进一步完善研究方法、拓展数据来源,并加强与实际应用的衔接。

2 地下矿山巷道掘进凿岩爆破技术参数优化研究

爆破技术参数优化是地下矿山巷道掘进爆破技术的关键,通过合理的爆破参数选择和调整,可以提高施工效率、降低成本、提升安全性和保证工程质量。巷道掘进爆破参数优化主要包括炮孔装药结构优化、掏槽参数优化、起爆网络优化三个方面。

2.1 炮孔装药结构优化

炮孔装药结构优化是提高爆破效果的重要手段之一。巷道的装药结构对爆破效果和巷道稳定性有着重要影响。炮孔装药结构的优化包括爆破药剂的选择、装药量、装药方式等方面。通过合理优化炮孔装药结构,可以提高破碎效果和岩体的开挖性能。

对于爆破药剂的选择,需要考虑巷道岩性、巷道尺寸和爆破要求等因素,选择具有适当爆破能量和安全性的药剂。杨仁树等^[20]从能量释放和传递机制角度出发,对比分析了铁矿石在三种不同炸药爆破作用下的机制,揭示了炸药爆热和铁矿石阻抗匹配程度对铁矿石破坏程度的影响,发现炸药爆热越大、炸药铁矿石波阻抗匹配程度越高,铁矿石破坏程度越大。这一发现为选择合适的装药量提供了明确的指导,有助于工程师们根据具体情况确定合理的装药量,以优化爆破效果。在选择装药量时,需要考虑到爆破效果和安全性。过高的装药量可能导致爆破效果过于强烈,造成巷道的破坏;过低的装药量则无

法达到预期的爆破效果, 影响巷道的掘进进度。杨仁树等^[21]发现增加炸药的装药量可以提高用于岩石破碎的能量利用率, 从而进一步优化爆破效果。采用光测力学方法和分形理论计算开展研究, 指出炸药装药量的增加会增大炮孔周边粉碎区面积、爆生裂纹扩展速度峰值和裂纹尖端应力强度因子。装药方式主要有耦合连续装药、不耦合连续装药、耦合分段装药和不耦合分段装药, 其示意图如图 3 所示。左进京等^[22]利用数字图像相关分析方法分析了轴向分段装药条件下爆炸应变场的分布规律, 采用电子计算机断层扫描实验方法, 得到轴线分段装药条件下岩石材料爆炸裂隙的分布规律, 指出轴向分段装药方式可以提高炸药用于岩石破碎的能量利用率, 其合理的分段比例为上段装药占比 0.4。研究者揭示了轴向分段装药方式的优势, 这将有助于在实际爆破作业中选择合适的装药方式, 提高爆破效果和工作效率。研究结果提供了合理的分段比例, 这有助

于指导实际操作中的装药设计, 使炸药能够更加充分地利用能量, 提高爆破效果。杨仁树等^[23]利用动态焦散线实验系统, 分析了空气轴向不耦合装药结构对被爆介质破坏效应的影响, 指出炸药不耦合系数为 1.67 时, 岩石破碎效果最佳。研究结果提供了一个具体的不耦合系数参考值, 对于实际爆破作业中的装药设计和操作提供了指导, 有助于提高爆破效果。DING 等^[24]利用爆炸载荷数字图像相关实验系统, 研究了装药位置变化对爆炸应力波和爆生气体作用效应的影响, 指出通过调节装药位置可以调整爆生气体的作用特性, 进而达到调整被爆介质的破坏形态的目的。通过数字图像相关实验系统的应用, 能够准确地观测和测量爆炸载荷的作用效应, 提高了研究的精确性。通过调节装药位置, 可以对爆生气体的作用特性进行控制, 进而调整被爆介质的破坏形态, 这对于爆破作业中的效果控制和安全性提供了重要的参考。

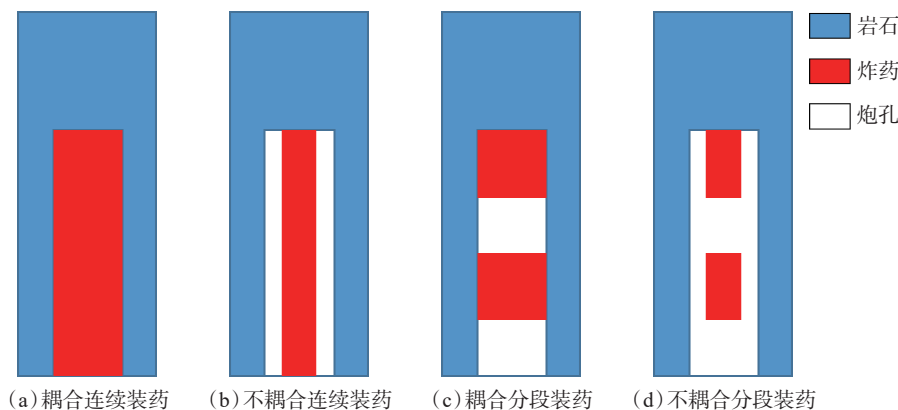


图 3 装药方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of charging method

2.2 掏槽参数优化

地下矿山巷道掘进爆破施工中, 巷道掘进速度的关键在掏槽。地下矿山巷道爆破处于单自由面空间岩体中, 爆破夹制作用大, 掏槽孔的作用是将被爆岩体中的部分岩石粉碎并抛掷出来, 形成第二临空面, 为后续炮孔的爆破提供补偿空间。掏槽的方式主要有直眼掏槽和楔形掏槽。在直眼掏槽爆破中, 增加大直径孔口可以提高掏槽爆破的破碎效果^[25], 相似掏槽爆破可以减少炮孔数和提高炮孔利用率^[26]。这些结论为合理设计掏槽孔直径和掏槽孔布置方式提供了依据。在楔形掏槽爆破中, 二阶二段掏槽爆破可以提高爆破进尺和炮孔利用率, 降低破碎岩石的大块率^[27-28], 合理的掏槽孔超深可以提高爆破效率, 掏槽孔合理的超深系数范围为 0.17~0.22 之间^[29-30]。

这为工程实践提供了一种有效的掏槽方案和掏槽孔超深的选择范围。实际工程中的地质条件和巷道状态可能存在较大的差异, 研究结果的普适性有待进一步验证。当前研究主要聚焦于掏槽爆破的技术参数和效果, 对于掏槽爆破的机理和优化方法的研究还较少。对于掏槽在特定岩石类型和巷道尺寸下的最佳方案的研究也有限。未来可以进一步深入研究掏槽爆破的机理, 探索不同掏槽方式对岩体破碎的影响机制; 可以针对特定地质条件和巷道尺寸, 开展更加针对性的掏槽方案研究, 以优化掏槽爆破效果; 可以结合现代数字化技术, 进行数值模拟和实验研究, 对掏槽爆破进行更加全面深入的探索。

2.3 起爆网络优化

通过合理的起爆网络优化, 可以实现多点同时

起爆,提高工作效率。同时,起爆网络优化还可以控制爆破的时序和间隔,以减少能量损失,提高爆破效果。

为了确定合理的爆破时差,杨仁树等^[31]和 XU 等^[32]利用光测力学实验方法研究了双孔延时起爆时爆炸应力波与相向运动裂纹相互作用,指出爆炸应力波与运动裂纹反向时, P 波对运动裂纹的扩展起抑制作用, S 波对运动裂纹的扩展起促进作用。杨仁树等^[33]和岳中文等^[34]利用动态焦散线实验系统,研究了起爆时差对炮孔间裂纹贯通效果的影响,研究结果指出延时起爆作用下,短延时造成的水平运动裂纹的竖向偏移值大,在合理的延时时间内,延长炮孔间的延时时间可以增大炮孔间的主裂纹长度。这些基础理论研究为确定合理的爆破时差提供了理论依据。数码电子雷管可以任意调整雷管起爆时间的特点,为起爆网络的设计和优化提供了非常大的空间。王雁冰等^[35]将煤矿许用数码电子雷管应用于煤矿井巷爆破,在满足煤矿井下爆破延期时间不超过110 ms的条件下,通过增加中心空孔和将煤矿原有的5段爆破优化为6段爆破,在减少总炮孔数的情况下提高了炮孔利用率。李洪伟等^[36]利用爆破相似模型实验,得到电子雷管起爆条件下隧道掘进的掏槽孔和辅助孔之间最佳延时范围为8~24 ms。陈之兼等^[37]通过地下铁矿巷道掘进现场试验研究,指出在同一段内的不同炮孔中设置短延时的起爆网络优化方案,可以提高爆破进尺,减少丢炮概率。通过应用数码电子雷管,可以提高爆破效率和安全性。同时,通过优化爆破方案和延时设置,可以提高炮孔利用率,增加爆破进尺,并减少炸药的浪费和环境影响。然而,在实际应用中还需要综合考虑多种因素,并进一步验证和推广这些研究成果。

总体而言,地下矿山巷道掘进凿岩爆破技术参数优化研究在提高巷道工程施工质量方面取得了显著的成果。然而,由于地质条件的复杂性和巷道掘进凿岩爆破的特殊性,目前的研究还存在一些不足和尚未解决的问题。首先,在炮孔装药结构优化、掏槽参数优化和起爆网络优化等方面具体的参数选择和调整上仍缺乏具体的指导和方法,没有给出具体的优化方法和标准,在实际应用中可能存在一定的难度。其次,虽然爆破参数优化中考虑了孔装药结构、掏槽参数、起爆网络等因素,但在实际应用中可能受到其他因素的影响,如地质条件、爆破参数的选择等。在实际工程中需要综合考虑多种因素进行爆破设计和方案优化,不同条件下的权衡和取舍仍需要进一步研究。未来的研究可以结合新的材料、技

术和装备,借助计算机技术和智能算法进行巷道爆破方案的智能优化设计,还需要对优化方案进一步验证和推广,扩大适用范围和应用场景。

3 展望

随着科学技术的不断进步和对环境保护的要求不断提高,地下矿山巷道掘进爆破参数优化研究也面临着新的挑战和机遇。未来,可以向以下几个方向深入发展。

1) 充实爆炸释能和岩体破碎耗能耦合作用机理研究。随着科学技术的不断进步,可以预见未来将有更多的理论突破,从而更好地理解巷道掘进爆破的机理。通过深入研究爆炸应力波传播机制、岩石动态断裂机制等,可以建立更加完善的爆炸释能和岩体破碎耗能耦合作用基础理论,为巷道掘进爆破的参数优化提供更准确的依据。在充实爆炸释能和岩体破碎耗能耦合作用机理的研究中,需要进行多学科交叉和综合应用。例如,可以研究不同类型的岩石体在爆炸作用下的响应特性,以及不同参数下爆炸释能和岩体破碎耗能的关系。同时,还可以结合材料力学、岩石力学、断裂力学、光测力学等学科的知识,进一步研究巷道掘进爆破中的能量转移和分布规律,为工程实践提供更加可靠的理论依据。

2) 加大巷道掘进爆破全过程智能化技术的应用。随着智能化技术的不断发展和应用,巷道掘进凿岩爆破的全过程智能化已经成为未来的发展方向。通过引入智能化系统和新型传感器技术,可以实时感知爆破过程中的各项数据,并对其进行评估和反馈,从而实现对爆破过程的精确控制和优化。在智能化系统中,可以利用各种传感器来监测爆破过程中的各项参数,例如振动、飞石、烟尘、声波等。这些传感器可以通过无线网络将数据传输到中央控制系统,实现对爆破过程的实时监测和评估。通过对这些数据进行分析 and 处理,可以了解巷道掘进的情况,并及时调整爆破参数,以达到最佳的爆破效果。未来的研究将进一步推动智能化技术的发展和应用,为巷道掘进凿岩爆破工程提供更加科学、可靠的技术支持。

3) 加强爆破参数的多因素多指标智能优化模型的建立。传统的爆破参数选择主要依靠经验和试验,这种方式存在着效率低、成本高、可靠性差等问题。为了应对这些问题,引入爆破参数的多因素多指标智能优化模型是一种有效的解决方案。该智能优化模型基于先进的人工智能和机器学习算法,利用大量的实验数据和现场监测数据进行模型的训练和优化。通过模型的学习和优化,能够自动化地搜索最优的爆破参数组合,从而实现更好的爆破效果。在

爆破参数多参数智能优化模型中, 需要考虑的因素很多, 包括巷道的地质特征、岩石力学参数、炸药性能、孔网参数等。这些因素与爆破效果密切相关, 通过对这些因素进行分析和评估, 能够帮助模型更准确地预测爆破效果。在爆破参数多指标智能优化模型中, 需要考虑多个指标的综合优化。例如, 岩石破碎度是评价爆破效果的关键指标之一, 而振动、噪声、能耗等则是评价爆破安全性和环保性的重要指标。可以将这些指标进行关联分析, 找到其中的相互影响关系, 并在不同权重下进行综合优化。在爆破参数的多因素多指标智能优化模型算法优化过程中, 可以采用先进的优化算法进行参数搜索。例如, 遗传算法、粒子群算法等可以在参数空间中进行智能化的搜索和优化, 找到最优的爆破参数组合。通过结合这些优化算法, 可以提高模型优化的效率和精度。

参考文献 (References):

- [1] 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.
WANG Xuguang, WU Chunping. Background and new thinking about intelligent blasting[J]. Metal Mine, 2022(7): 2-6.
- [2] 汪旭光, 吴春平, 陶刘群. 智能爆破[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
- [3] 韩新平, 吴崇, 王明君. 基于物联网的露天矿智能爆破系统设计研究[J]. 金属矿山, 2015(4): 250-254.
HAN Xinping, WU Chong, WANG Mingjun. Design of intelligent blasting system in open pit mine based on internet of things[J]. Metal Mine, 2015(4): 250-254.
- [4] 凌天龙, 武宇, 李胜林, 等. 煤矿巷道光面爆破智能设计系统开发与应用[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 29-35.
LING Tianlong, WU Yu, LI Shenglin, et al. Development and application of intelligent design system for smooth blasting of coal mine roadway[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2018, 37(2): 29-35.
- [5] 高静. 绿色数字智能爆破在地下水封石油洞库的应用探讨[J]. 四川水力发电, 2021, 40(3): 19-21, 27.
GAO Jing. Discussion on application of green, digital and intelligent blasting in water-sealed underground oil depot[J]. Sichuan Hydro Power, 2021, 40(3): 19-21, 27.
- [6] CHEN C, YANG R S, XU P, et al. Experimental study on the interaction between oblique incident blast stress wave and static crack by dynamic photoelasticity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 148: 106764.
- [7] DING C X, YANG R S, FENG C. Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 138(11): 104622.
- [8] 孙冰, 袁登, 曾晟, 等. 爆炸应力波在层状节理岩体中的传播规律试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(11): 118-123.
SUN Bing, YUAN Deng, ZENG Sheng, et al. Experimental study on propagation law of explosion stress wave in bedding joint rock mass[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(11): 118-123.
- [9] 王伟, 李小春. 不耦合装药下爆炸应力波传播规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1723-1728.
WANG Wei, LI Xiaochun. Experimental study of propagation law of explosive stress wave under condition of decouple charge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6): 1723-1728.
- [10] 林从谋, 杨林德. 延长药包爆炸应力波在线粘弹性介质中传播规律的解析解[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2001, 20(3): 1-3.
LIN Congmou, YANG Linde. Analytic solution on propagating law of stress wave from explosion of extended charge in linear viscoelastic medium[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2001, 20(3): 1-3.
- [11] WANG R, HU Z P, ZHANG D, et al. Propagation of the stress wave through the filled joint with linear viscoelastic deformation behavior using Time-Domain recursive method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(12): 3197-3207.
- [12] 李鹏, 周佳, 李振. 爆炸应力波在层状节理岩体中传播规律及数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 97-102.
LI Peng, ZHOU Jia, LI Zhen. Blasting stress wave in layered jointed rock mass propagation law and numerical simulation[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5): 97-102.
- [13] 杨仁树, 许鹏, 杨立云, 等. 节理岩体中爆炸应力波传播规律的研究[J]. 金属矿山, 2016(6): 49-54.
YANG Renshu, XU Peng, YANG Liyun, et al. Study of regularity of explosive stress wave propagation in jointed rock mass[J]. *Metal Mine*, 2016(6): 49-54.
- [14] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 739-748.
- [15] 徐松林, 王鹏飞, 赵坚, 等. 基于三维Hopkinson杆的混凝土动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 180-185.
XU Songlin, WANG Pengfei, ZHAO Jian, et al. Dynamic behavior of concrete under static triaxial loading using 3D-Hopkinson bar[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 180-185.
- [16] 钱七虎, 戚承志. 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(12): 1599-1605.
QIAN Qihu, QI Chengzhi. Dynamic strength and dynamic fracture criteria of rock and rock mass[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2008, 36(12): 1599-1605.
- [17] 周昌台, 谢和平, 朱建波. 基于能量理论的岩石动态破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1890-1898.
ZHOU Changtai, XIE Heping, ZHU Jianbo. A dynamic strength criterion of rock materials based on energy theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(8): 1890-1898.
- [18] 崔年生, 危剑林, 袁增森, 等. 非均质岩石动态断裂损伤微观特征模拟分析[J]. 高压物理学报, 2023, 37(4): 125-136.
CUI Niansheng, WEI Jianlin, YUAN Zengsen, et al. Simulation analysis of mesoscale characteristics in the dynamic fracture damage of het-

- erogeneous rock[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(4): 125-136.
- [19] 周文海, 胡才智, 包娟, 等. 含节理岩体爆破过程中应力波传播与裂纹扩展的数值研究[J]. 力学学报, 2022, 54(9): 2501-2512. ZHOU Wenhai, HU Caizhi, BAO Juan, et al. Numerical study on crack propagation and stress wave propagation during blasting of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(9): 2501-2512.
- [20] 杨仁树, 李炜煜, 杨国梁, 等. 炸药类型对富铁矿爆破效果影响的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(6): 96-107. YANG Renshu, LI Weiyu, YANG Guoliang, et al. Experimental study on the blasting effects of rich-iron ore with different explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(6): 96-107.
- [21] 杨仁树, 肖成龙, 陈程, 等. 基于分形理论不同装药量的爆破动焦散线实验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 80-86, 93. YANG Renshu, XIAO Chenglong, CHEN Cheng, et al. Experimental study on the blasting dynamic caustics under different charge weight based on the fractal theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(14): 80-86, 93.
- [22] 左进京, 杨仁树, 龚敏, 等. 分段装药爆炸应变场与裂隙场分布规律[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(3): 169-180. ZUO Jinjing, YANG Renshu, GONG Min, et al. On the distribution of explosion strain field and fracture field in segment charge[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(3): 169-180.
- [23] 杨仁树, 王雁冰. 切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1337-1343. YANG Renshu, WANG Yanbing. Experimental study of dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1337-1343.
- [24] DING C X, YANG R S, CHEN C, et al. Space-time effect of blasting stress wave and blasting gas on rock fracture based on a cavity charge structure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 160: 105238.
- [25] 丁晨曦, 梁欣桐, 杨仁树, 等. 高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-10[2023-09-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230721.1634.002.html>. DING Chenxi, LIANG Xintong, YANG Renshu, et al. Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-10[2023-09-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230721.1634.002.html>.
- [26] 杨仁树, 李成孝, 陈骏, 等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224-241. YANG Renshu, LI Chengxiao, CHEN Jun, et al. Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224-241.
- [27] 张召冉, 丁晨曦, 左进京, 等. 岩巷二阶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. ZHANG Zhaoran, DING Chenxi, ZUO Jinjing, 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.
- [28] 张渊通, 汤文达, 郭盛华, 等. 岩石巷道二阶二段掏槽爆破优化分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4273-4278. ZHANG Yuantong, TANG Wenda, GUO Shenghua, et al. Optimization analysis of two-step cutting blasting on rock roadway[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4273-4278.
- [29] 王雁冰, 张航, 杨仁树, 等. 掏槽孔超深度对爆破效果的影响[J]. 工程科学学报, 2023, 45(2): 182-194. WANG Yanbing, ZHANG Hang, YANG Renshu, et al. Experiment study on overdepth coefficient of the cut hole in coal mine roadway excavation blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(2): 182-194.
- [30] 杨仁树, 王渝, 宫国慧, 等. 弓长岭铁矿巷道掘进掏槽孔超深长度优化试验研究[J]. 金属矿山, 2020(7): 16-24. YANG Renshu, WANG Yu, GONG Guohui, et al. Experimental study on the ultra-deep length optimization of the excavation cutting holes in the tunnel of Gongchangling Iron Mine[J]. Metal Mine, 2020(7): 16-24.
- [31] 杨仁树, 许鹏, 陈程. 爆炸应力波与裂纹作用实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8): 30-40. YANG Renshu, XU Peng, CHEN Cheng. Interaction between blast stress waves and cracks[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(8): 30-40.
- [32] XU P, YANG R S, GUO Y, et al. Investigation of the effect of the blast waves on the opposite propagating cracks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2021, 144(11): 104818.
- [33] 杨仁树, 丁晨曦, 杨国梁, 等. 微差爆破的爆生裂纹扩展特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(24): 97-102. YANG Renshu, DING Chenxi, YANG Guoliang, et al. Tests for blasting induced crack propagation characteristics of short-delay blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(24): 97-102.
- [34] 岳中文, 张士春, 邱鹏, 等. 切缝药包微差爆破爆生裂纹扩展机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 638-645. YUE Zhongwen, ZHANG Shichun, QIU Peng, et al. Mechanism of explosive crack propagation with slotted cartridge millisecond blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 638-645.
- [35] 王雁冰, 鲍舟琦, 谢平, 等. 基于数码电子雷管的准楔形复式掏槽爆破试验研究[J]. 金属矿山, 2023(3): 73-79. WANG Yanbing, BAO Zhouqi, XIE Ping, et al. Experimental study of quasi wedge compound cut blasting based on digital electronic detonator[J]. Metal Mine, 2023(3): 73-79.
- [36] 李洪伟, 吴延梦, 吴立辉, 等. 电子雷管起爆条件下隧道掏槽孔与辅助孔的延时优化试验研究[J]. 高压物理学报, 2023, 37(1): 171-181. LI Hongwei, WU Yanmeng, WU Lihui, et al. Experimental study on delay time optimization of tunnel cutting holes and caving holes under electronic detonator initiation condition[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(1): 171-181.
- [37] 陈之兼, 王铭锋, 张阳阳. 电子雷管在某井下铁矿应用中存在的问题及对策[J]. 煤矿爆破, 2022, 40(3): 35-38. CHEN Zhijian, WANG Mingfeng, ZHANG Yangyang. Problems and countermeasures of electronic detonator application in an underground iron mine[J]. Coal Mine Blasting, 2022, 40(3): 35-38.