

爆破动荷载对充填体内预留巷道的 稳定性研究

Study on the Stability of the Reserved Roadway in Filling Body Under Blasting Dynamic Load

刘 晓(山东金洲矿业集团有限公司, 山东 威海 264500)

摘要: 开采爆破的动力扰动对巷道稳定性影响的研究是矿山安全生产的重要方面。为了研究不同扰动下充填体内预留巷道的动力响应规律,通过3DEC软件建立了巷道动力稳定性分析的三维数值模型并进行了数值模拟分析,分析了爆破动荷载下巷道周围的变形特征以及应力场分布特征。研究表明:爆破在一定程度上改变巷道周围的压应力、拉应力区的范围。采用钢筋网+钢丝绳的预留巷道开采方式,可以很大程度上的削弱巷道外爆破动力扰动,提高巷道稳定性。

关键词: 预留巷道开采方式; 爆破扰动; 巷道稳定性; 三维离散元分析

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)04-0024-06

Abstract: The study of the influence of dynamic disturbance of mining blasting on the stability of roadway is an important aspect of mine safety production. In order to study the dynamic response rules of the reserved roadway in the backfill under different disturbances, a three-dimensional numerical model for the dynamic stability analysis of roadway was established by 3DEC software and numerical simulation analysis was carried out, and the deformation characteristics and stress field distribution characteristics around roadway under dynamic blasting load were analyzed. The results show that blasting changes the range of compressive stress and tensile stress around the roadway to some extent. Using the reserved roadway mining mode of steel mesh + steel wire rope can greatly weaken the dynamic disturbance of blasting outside the roadway and improve the stability of the roadway.

Key words: reserved roadway mining method; blasting disturbance; roadway stability; three-dimensional discrete element analysis

1 前言

随着矿产资源的开发不断推进,浅部资源逐渐枯竭,深部开采已经成为矿山的主战场^[1-2]。巷道担负着矿井运输、通风、行人等任务,其稳定性对矿井安全生产起到至关重要的作用^[3-4]。随着矿井深部延伸,巷道受采动、矿山压力增大等影响开始变形或遭到破坏。爆破开挖是矿山生产的必要工序之一,其危害主要包括爆破振动、爆炸应力冲击及飞石等,诱导采场围岩及巷道失稳,降低矿山生产的安全性。

一般主要进行巷道支护的静力学分析,但实际上,采空区围岩和巷道在承受静压的同时,还受到来自开采爆破的动力扰动^[5-7]。姜明伟等^[8]利用FLAC3D软件分析了动力扰动对顶板稳定性和断裂

规律的影响,得到不同扰动强度下顶板破坏规律。唐礼忠等^[9]利用Abaqus软件对爆破作用下巷道围岩的力学响应进行了数值分析,探讨了软弱夹层对巷道围岩稳定性的影响,提出了支护优化方案。朱万成等^[10]采用数值分析方法,模拟了不同侧压条件下深部巷道失稳的动力触发过程,探索了动力扰动触发巷道岩爆的力学机制。邓红卫等^[11]采用Midas/GTS与FLAC3D数值模拟技术,研究了不同扰动幅值下充填体的破坏规律及动力响应规律,发现动力扰动对充填体的振动特性有显著影响。研究动力扰动作用下巷道的失稳破坏过程及其振动特性,可以为矿山安全高效生产提供技术支持,但动力扰动作用下巷道的动态响应、失稳机制及其稳定性与时间相关的分析研究较少。

本文利用3DEC离散元软件对爆破动荷载作用下充填体内预留巷道的动态响应规律进行数值模拟分析,揭示动力扰动下巷道周围的变形特征以及应力场分布特征,为理论分析提供依据,提高矿山生产的安全性保障能力。

[作者简介] 刘晓(1983—),男,工程师,从事矿山测量工作。

[引用格式] 刘晓. 爆破动荷载对充填体内预留巷道的稳定性研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(4): 24-29.

2 矿区简介

山东金洲矿业集团有限公司金青顶矿区位于山东省乳山市下初镇境内,坐落在黄垒河南岸南东庄南部的金青顶上,行政区划隶属乳山市下初镇管辖。矿区地理坐标:东经 $121^{\circ}38'00'' \sim 121^{\circ}41'15''$,北纬 $37^{\circ}04'00'' \sim 37^{\circ}07'30''$ 。矿区南距乳山市约 25 km,距威海至桃村铁路下初站 15 km,北距烟台港 75 km,均有公路相接,交通方便,交通位置如图 1 所示。

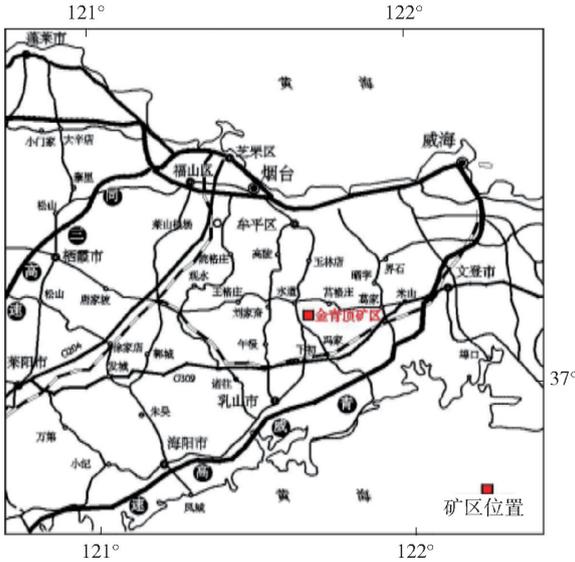


图 1 交通位置图

金青顶矿区地貌属低缓丘陵区,地面标高 55.7 ~ 133.80 m,最高海拔 133.8 m,地势较缓,地形坡度 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$,沟谷发育,植被广布。地表水主要为

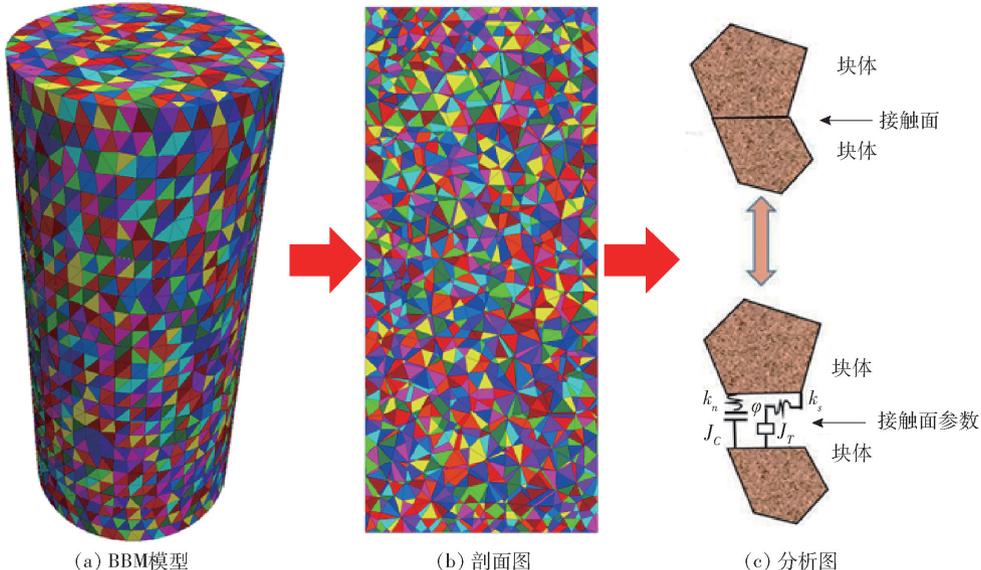


图 2 BBM 模型及块体之间的接触

黄垒河,发源于昆崙山南麓,自北向南从矿区西 2 km 处流过,向南注入黄海,当地历史最高洪水水位为 43.8 mm。

成矿带内地层简单,构造及岩浆活动强烈,成矿地质条件优越。区内成矿前北北东、北东向断裂最为发育,成矿期北北东向断裂继续活动,成矿后以北西向断裂为主。主要控矿构造为北北东向断裂,纵贯全区,区域上有 5 条规模较大的断裂。这些断裂对金矿的形成和分布起控制作用。随着矿山开采深度的不断增加,矿体内外环境发生一系列变化,矿山压力逐渐增加,矿体赋存条件变得更加复杂,严重影响了采场的稳定性。

3 数值模拟方案

本文采用钢丝绳 + 钢丝网的形式进行充填体预留巷道,预留巷道的尺寸为 3 m × 3 m 的三心拱,数值模拟采用的充填体高 60 m,宽 40 m。使用数值分析软件 3DEC 对爆破动荷载下充填体内预留巷道的稳定性进行模拟,3DEC 软件是在二维软件 UDEC 基础上发展而来,内置几种常用的材料模型以及 12 种分析模式,可以对接触面的非连续力学行为进行模拟,除可模拟连续介质外,在处理非连续介质在外力作用下静、动态响应等问题上相对有限元软件有本质优势。在 3DEC 软件中可以将实体离散为黏结块体(Bonded Block Model, BBM)模型,具体如图 2 所示,其中,图 2a 为一柱状 BBM 模型,2b 为其剖面示意图。

采用灰砂比 1:8 的充填体材料进行空区的充

填,充填体及钢筋的力学参数见表1,其中1:8充填体接触面的内摩擦角为36.94,黏聚力为0.171,法向刚度和切向刚度均为0.3 GPa/m。

表1 充填体及钢筋网力学参数

材料	密度/ kg·m ⁻³	弹性模 量/GPa	抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	泊松比
1:8充填体	2 100	0.231 1	2.116	0.181	0.19
钢筋网	7 860	200	235	410	0.30

为了分析动荷载作用下充填体预留巷道的稳定性,分别在距离预留巷道中心轴线10 m、15 m、20 m以及25 m分别建立半径为10 cm、长度为1 m的炮孔模型。由于3DEC软件中需要对炮孔附近块体进行离散化处理,全模型采用BBM将极大地增加计算量,严重降低计算效率。因此,为了突出充填体损伤特征,仅在充填体预留巷道的重点研究区域,采用BBM模型进行充填体离散化处理,以获得充填体受动载作用下的裂隙扩展规律。在模型的BBM区域,块体遵守线性关系,接触面采用摩尔-库伦准则,模型其余部分采用连续体,其本构关系采用摩尔-库伦准则。

本文从巷道周围应力场分布特征以及破坏特征(塑性区)两方面对充填体巷道的动荷载稳定性做出全方位的定性定量分析评价。根据爆破动载理论,图3所示为简易爆破动载时程曲线,分别由上升阶段以及下降阶段组成,一般情况下,爆破动载的上升时间明显小于下降时间。根据工程实际,一般炸

药爆破岩石产生的峰值应力取1.0 GPa,上升时间与总时间的比值为1:5,爆破作用时间为600 us。

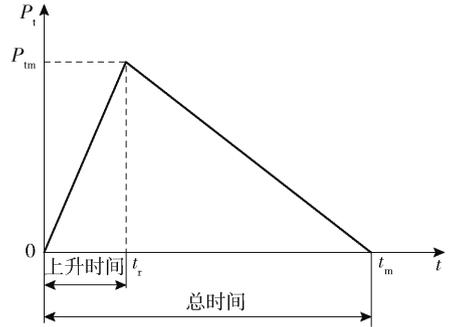


图3 数值仿真采用的爆破波理论曲线

本文仅考虑爆破距离为10 m的爆破动荷载对支护条件下预留巷道的稳定性影响,重点分析巷道周围的应力场分布特征以及巷道周围的破坏特征等。

4 数值模拟结果及分析

4.1 爆破作用下巷道周围应力场分布特征

图4所示为预留巷道周围最大主应力的分布云图,分析范围为0~1 MPa(-号表示压应力)。从图中可以看出,炮孔周围由于爆破作用,为主要的冲击受压区,在未受到动载作用之前,充填体预留巷道周围最大主应力表现为压应力,在应力波作用于巷道周围时,巷道上方植入的钢筋网以及悬吊钢丝绳等支护材料,能有效减小巷道顶板上方的受压范围,使钢筋网为主要受压承重体,在应力波影响后,巷道右侧上方及右侧底部位置的压应力区有所增加,但局

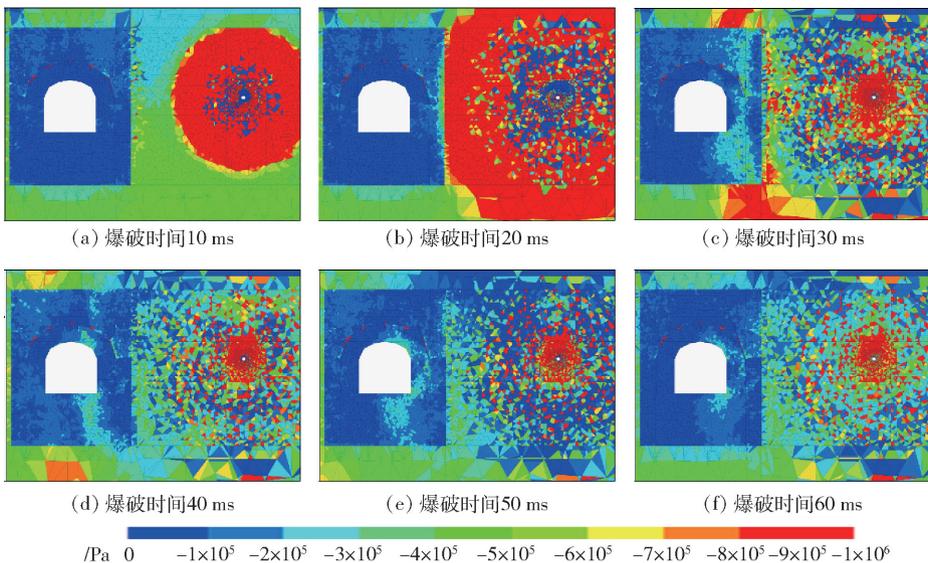


图4 距离10 m巷道周围最大主应力随时间变化

限在 1 MPa 之内,表明爆破作用对充填体预留巷道产生的影响较小。

图 5 所示为预留巷道周围最小主应力的分布云图,分析范围为 0 ~ 1 MPa(- 号表示压应力,白色部位表示最小主应力为拉应力)。在未受到爆破作用前,BBM 巷道模型中,除顶板钢筋网支护上端部位最小主应力表现为压应力,其余部位均变

现为拉应力,随着爆破应力波的推进,爆破时间为 30 ms 时,应力波正好作用于巷道中心,上下顶板部位受到 P 波影响而表现为压应力,但也出现了靠近巷道表面的充填体表现为拉应力的现象,当应力波作用过后,时间为 60 ms 时,巷道顶板上方的压应力区相较爆破前有所减小,而巷道右侧下方压应力区有所增加。

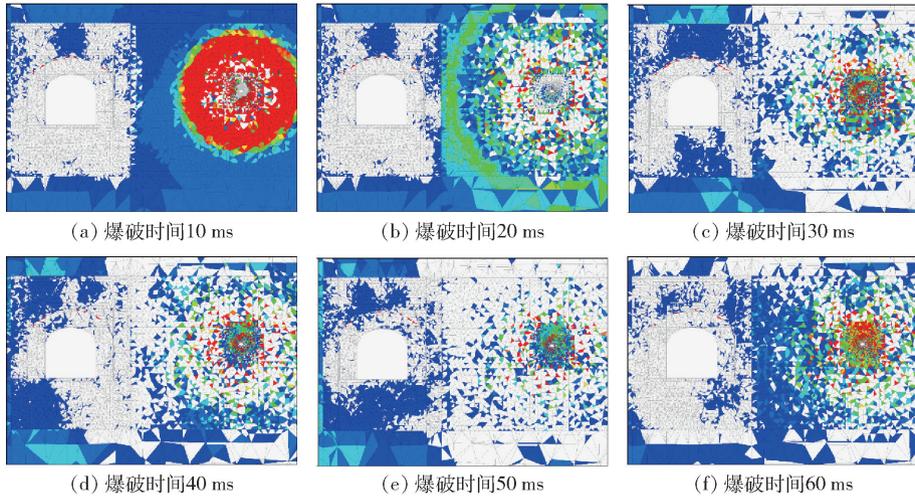


图 5 距离 10 m 巷道周围最小主应力随时间变化

以上说明,爆破作用在一定程度上改变了巷道周围的压应力、拉应力区的范围,对于巷道顶部而言,拉应力区有所增大,这对充填体的稳定性是不利的,另外,钢筋网 + 钢丝绳的支护方式对于减弱巷道周边由压应力区转变为拉应力区的范围起到了一定的作用。

4.2 爆破作用下巷道周围变形特征

1) 未支护(不加网)条件下巷道稳定性分析

图 6、图 7 所示是在未支护条件下,爆破距离

为 10 m,爆破时间为 30 ms、40 ms 和 50 ms 时巷道周围裂隙的法向位移和切向位移。从图 6 和图 7 中可以看出,在爆破应力波传播过程中,巷道右侧帮首先出现较为明显的拉伸状态,而顶板右侧下部易出现较为明显的压缩状态,这种状态一直持续到爆破应力波传播之后,可以判定的是,巷道右侧帮容易出现拉伸破坏。底板部位由于应力波的作用,裂隙的剪切位移量也相对来说有所增大。

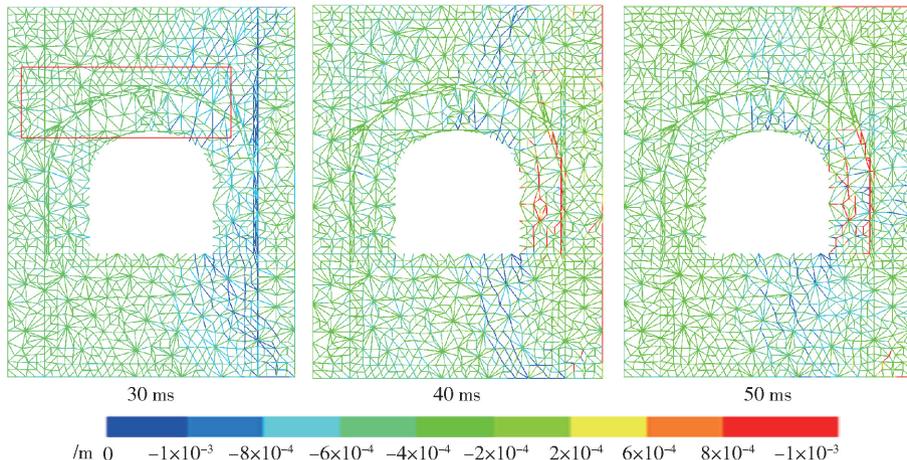


图 6 未支护条件下不同爆破时间巷道周围裂隙法向位移图

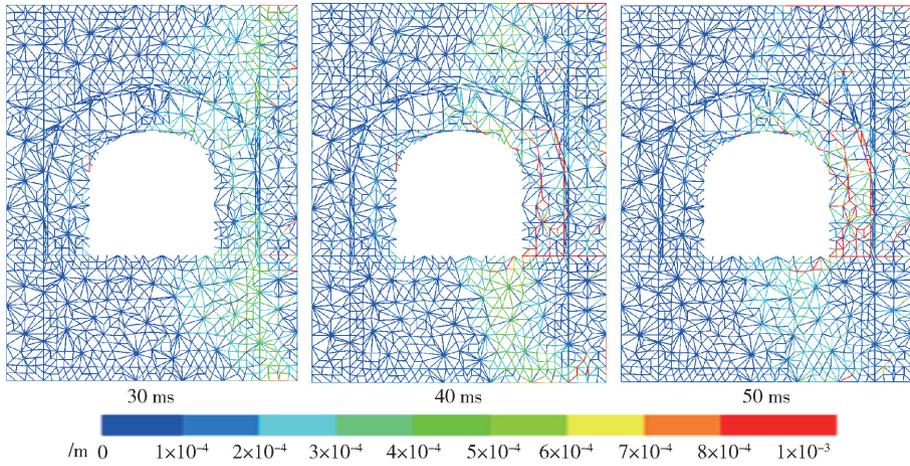


图7 未支护条件下不同爆破时间巷道周围裂隙切向位移图

2) 支护条件下巷道稳定性分析

爆破距离为 10 m 时,预留巷道周围的充填体的裂隙张拉错动位移如图 8、图 9 所示。从图 8 和图 9 中可以看出,在钢筋网及钢丝绳支护的上端,裂隙的

剪切位移量增加较少,而在钢筋网及钢丝绳支护下端的巷道右上侧部位,裂隙的剪切位移量则明显增多。

对图 6 和图 8 支护前后预留巷道周围裂隙法向

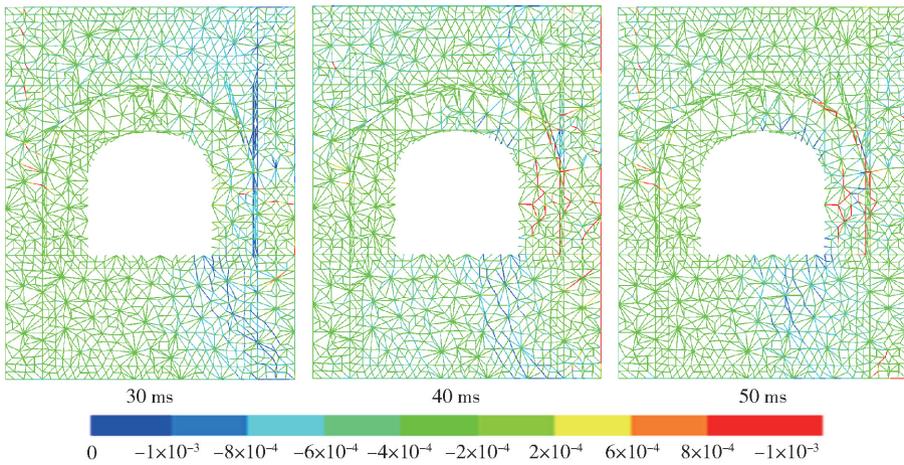


图8 支护条件下不同爆破时间巷道周围裂隙法向位移图

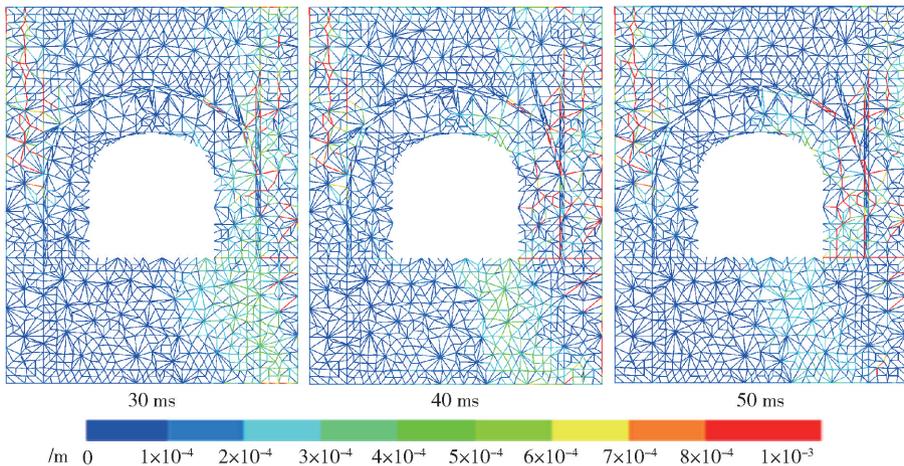


图9 支护条件下不同爆破时间巷道周围裂隙切向位移图

位移量进行对比分析。暂且将图 6 以及图 8 中 30 ms 时方框作为钢筋网 + 钢丝绳柔性支护的影响范围区。从图中可以看出,在应力波的传播过程中,支护影响范围区的裂隙法向位移量要明显小于未支护条件下的裂隙法向位移量,且在未支护条件下,红色方框内的裂隙一般呈现出压缩变形,对应于负的裂隙法向位移量。但是,随着时间的推移,应力波的作用减弱,除了支护影响区域以外,巷道周围其余部位的裂隙法向位移量未出现较为明显的差异。

对图 7 和图 9 支护前后预留巷道周围裂隙切向位移量的进行对比分析。巷道周围裂隙切向位移量的空间分布特点与法向位移量的空间分布特点较为一致。在应力波传播的 30 ms 左右,巷道右侧上墙周边裂隙切向位移量的分布尤为明显,在未支护条件下,巷道直接受到应力波的强烈冲击影响。

这说明了采用钢筋网 + 钢丝绳的支护方式,对于削弱充填体预留巷道在爆破扰动下的剪切破坏,具有较强的效果。

5 结论

采用 3DEC 软件对爆破动载荷作用下充填体内预留巷道的动态响应规律进行数值模拟分析,研究结果表明:

(1) 爆破作用在一定程度上改变了巷道周围的压应力、拉应力区的范围,对于巷道顶部而言,拉应力区有所增大,这对充填体的稳定性是不利的。

(2) 钢筋网 + 钢丝绳的支护方式对于减弱巷道周边由压应力区转变为拉应力区的范围起到了一定的作用。对于削弱充填体预留巷道在爆破扰动下的剪切破坏,具有较强的效果。

因此,为了降低爆破动荷载对充填体的影响,保持充填体稳定性,保证矿山生产的安全性,可以采用钢筋网 + 钢丝绳的预留巷道开采方式,合理有效地

对巷道外爆破动力扰动进行很大程度上的削弱,这对于巷道稳定性的保持是非常有利的。

[参考文献]

- [1] 刘立顺,杨小聪,万串串,等. 金属矿山深井开采中的力学问题研究进展[J]. 有色金属(矿山部分), 2022,74(4):14-18.
- [2] 于世波,杨小聪,原野,等. 深部区域采矿时序的地压调控卸荷效应研究[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(3):345-352.
- [3] 靳舒博. 高硬度岩石巷道掘进掏槽方式技术研究与应用[J]. 世界有色金属, 2018(24):186-187.
- [4] 王捷. 炮掘岩石巷道的爆破参数优化[J]. 山东煤炭科技, 2019(9):26-28.
- [5] 徐剑坤,朱亚飞,宋大钊. 基于剪切梁理论的爆破扰动对巷道顶板稳定性影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013,9(7):25-31.
- [6] 左宇军,唐春安,朱万成,等. 深部岩巷在动力扰动下的破坏机理分析[J]. 煤炭学报, 2006(6):742-746.
- [7] 隋斌,朱维申,李树忱. 深部岩柱在动态扰动下力学响应的数值模拟[J]. 岩土力学, 2009,30(8):2501-2505.
- [8] 姜明伟,刘焕新,王玺,等. 基于 Sirovision 节理岩体调查及岩体质量分级与支护研究[J]. 有色金属工程, 2022,12(1):115-121.
- [9] 唐礼忠,高龙华,王春,等. 动力扰动下含软弱夹层巷道围岩力学响应特性[J]. 科技导报, 2014, 32(21):56-61.
- [10] 朱万成,左宇军,尚世明,等. 动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5):915-921.
- [11] 邓红卫,罗黎明,李爽,等. 动力扰动作用下充填体的力学响应研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016,12(2):62-67.