

焦家金矿巷道掘进过程中围岩变形及应力分布演化规律

张旭飞¹, 郭运鸿^{2*}, 王兴亚¹, 郭奇峰²

(1. 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院)

摘要:为解决深部高应力下巷道变形严重及支护困难的问题,以焦家金矿-710 m 水平巷道为研究对象,建立 Flac^{3D} 数值分析模型,模拟分析巷道掘进过程中围岩的扰动响应规律。结果显示:因巷道开采扰动,巷道周边应力得到释放,应力进行重新分布,巷道周边应力集中,应力极值主要在顶板、拱肩及边帮上下两侧,应加强顶板、拱肩及边帮上下两侧支护;距离巷道两倍宽度范围内是支护的重点关注区域;巷道掘进后,周边围岩会出现剪切破坏和张拉破坏。通过对巷道变形和应力分布演化分析,揭示了掘进过程中巷道围岩的变形失稳过程,为支护参数设计和支护时机选择提供了科学依据。

关键词:深部开采;高应力;围岩变形;应力分布;巷道掘进

中图分类号:TD32

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)06-0001-05

doi:10.11792/hj20240601

引言

随着中国工业的蓬勃发展和社会需求的不断增长,经济发展对资源的需求日益迫切^[1-2]。为满足社会生产的需求,矿产资源开发逐渐向深部转移。深部地下开采工程具有“三高一扰动”的特点^[3-7]。深部采掘过程中,巷道围岩容易发生巨大变形,同时还存在高温和突水等问题。作为矿山井巷工程的重要组成部分,井下各类巷道的安全性直接影响矿产资源开采的安全性,作为运输通道的巷道更是直接制约矿山生产。深部高应力作用下巷道变形特征呈现出的扰动响应较浅部有所变化,掌握采掘过程中巷道围岩变形和应力分布规律,是做好巷道稳定性控制的关键。

众多学者采用数值模拟分析方法对巷道围岩稳定性进行超前模拟分析,为工程建设和支护控制提供指导。孙宇超^[8]以 Flac^{3D} 数值模拟为技术手段,对等腰梯形巷道和直角梯形巷道周边的水平应力、垂直应力和最大主应力展开了研究,发现无论采用等腰梯形巷道还是直角梯形巷道,巷道围岩稳定性的主控应力都为垂直应力。穆磊等^[9-13]采用理论分析和 Flac^{3D} 数值模拟相结合的方法对巷道围岩稳定性进行分析,研究成果为类似地质条件下巷道的支护设计提供了很好的借鉴。任赛等^[14]采用 Flac^{3D} 数值模拟方法系统地评估了某矿山基地深井围岩的岩爆风险程度,完成了巷道方位、掘进过程、巷道交叉、巷道与采空区相对关系等对岩爆风险等级程度、岩爆出现的潜在位

置、开采过程中潜在岩爆发生时机的影响分析,研究结果为现场施工提供了指导,其建模方法和分析岩爆倾向性的方法对其他赋存复杂的矿山具有一定的借鉴意义。许永山等^[15]运用 Flac^{3D} 软件,对某矿山进行了多矿房同采条件下的围岩稳定性分析,取得了良好的模拟效果。郭子源等^[16]为解决深部高应力软岩巷道围岩的支护困难问题,采用 Flac^{3D} 软件有限差分程序并结合现场实测的方法为深层软岩巷道的掘进和支护设计提供了技术指导。孙闯等^[17]以 Flac^{3D} 软件为工具,分析应变软化模型、剪胀角及不同巷道断面类型对围岩-支护相互作用的影响,并对支护系统稳定性进行评价,为高应力软岩巷道的支护结构设计及施工提供理论支撑。

本文针对山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿(下称“焦家金矿”)进入深部开采面临的巷道围岩变形和支护问题,充分考虑工况、矿岩力学特性、开采扰动等因素,结合岩石力学数据开展数值模拟分析,研究深部巷道掘进过程中的应力、变形演化规律,为支护设计和优化提供依据。

1 矿区概况

焦家金矿位于山东省黄县弧形大断裂带,总面积 25 km²,下辖 3 个矿区:焦家矿区、望儿山矿区和寺庄矿区。矿区内矿体赋矿围岩主要为玲珑花岗岩,位于矿体下盘及深部,浅肉红色,中粒花岗结构,块状构造、片麻状构造。主要矿物成分有斜长石(35%~40%)、钾长石(25%~35%)、石英(25%~30%)、黑云母

收稿日期:2023-12-28;修回日期:2024-01-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001301)

作者简介:张旭飞(1992—),男,工程师,从事采矿技术研究工作;E-mail:1253031969@qq.com

*通信作者:郭运鸿(2002—),男,硕士研究生,研究方向为岩石力学;E-mail:793936117@qq.com

(5 %),以及少量楣石、锆石等副矿物。矿化类型可分为浸染状(Ⅰ号矿体)、细脉浸染状(Ⅱ号矿体)及细脉状(Ⅲ号矿体)。围岩蚀变类型多样,可分为绿泥石化、红化、钾长石化、绢云母化、硅化等,且有良好的分带性。焦家金矿采用上向水平分层和上向水平进路尾砂胶结充填采矿法进行开采,深部巷道掘进过程中围岩稳定性控制难度大,支护结构易破坏,返修率高。随着开采范围和深度的增加,焦家金矿已进入深部开采,岩体在高应力环境下的采掘扰动响应更为明显,易出现破碎岩体变形大、完整硬岩动力破坏等潜在的地压灾害。

2 模型建立

以焦家矿区-710 m水平巷道为工程背景,建立Flac^{3D}数值分析模型,研究巷道掘进过程中围岩变形及应力分布规律。数值分析模型采用的岩体物理力学参数见表1。

表 1 -710 m 水平巷道岩体物理力学参数
Table 1 Physical mechanics parameters of -710 m horizontal surrounding rock mass

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	内摩擦角/ (°)	内聚力/ MPa	泊松比	抗拉强度/ MPa
2 630.4	48.61	36.3	29.27	0.10	11.2

计算模型四周边界与巷道中心的距离约为5倍的巷道宽度,减少边界条件对模拟分析结果的影响。开挖计算采用位移边界条件,模型根据区域地应力场分布特征施加梯度应力边界,并对模型整体施加重力场,最大水平主应力与巷道轴向平行。巷道采用分步开挖,开挖总长度为16 m,每次开挖2 m。数值计算模型及

网格划分见图1。

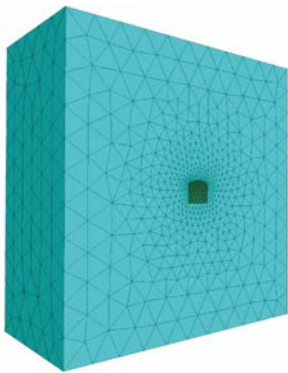


图 1 数值计算模型及网格划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of model and grid division

3 巷道应力分布规律分析

应力状态是影响巷道稳定性的主要因素,为实现安全开采必须分析巷道应力分布特征。巷道开挖引起应力重新分布。巷道分步开挖完成后的围岩应力分布云图见图2。由图2可知:巷道周边最大主应力集中于巷道拱肩和边帮与底板拐角处,应力集中区最大应力达到80.55 MPa,极易产生破坏;最小主应力云图显示,在巷道表面产生一定的拉应力,极值约为1.32 MPa,易破坏剥落;水平主应力极值集中在巷道顶板处及两帮墙底角,极值约为52.77 MPa;垂直主应力极值与前三者有所不同,主要集中在边帮上下两侧,极值约为57.96 MPa。模拟结果显示:随着巷道开挖扰动,巷道周边应力得到一定的释放,但在局部区域产生严重的应力集中,主要在顶板、拱肩及边帮上下两侧,施工和支护过程中应重点关注上述区域,及时排险。

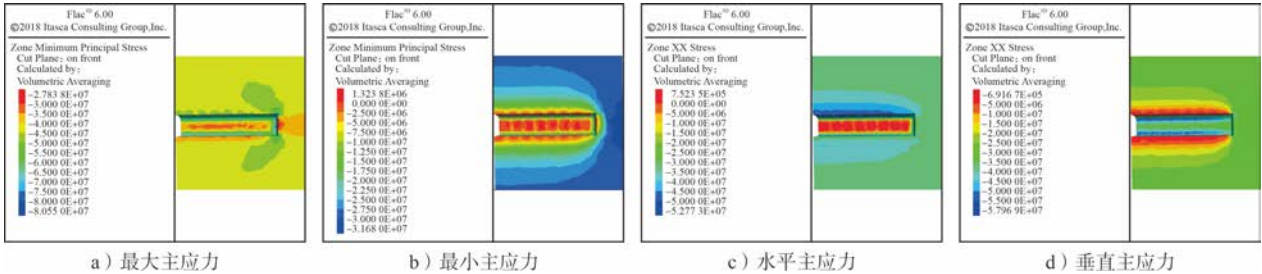


图 2 巷道围岩应力分布情况纵剖面图

Fig.2 Vertical cross-section of stress distribution in roadway surrounding rock

在巷道边帮及顶板中设置监测点,分析掘进过程中应力演化规律。随着掘进工作面的推进,巷道左帮、顶板监测点的三向应力变化曲线见图3。其中, σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 分别为x、y、z方向的应力。掘进过程中,垂直巷道走向的边帮水平应力逐渐减小,随着掘进工作面的远离逐渐趋于稳定,主要是开挖临空面形成后两帮向巷道变形,水平应力得到释放;垂直应力随着掘

进面的推进,呈现逐步增加的趋势,最后趋于稳定,其主要原因是巷道顶部围岩失去竖向支撑,垂直荷载向两帮扩散转移,导致边帮垂直应力增大;巷道轴向应力出现先增大后降低的趋势,但总体变化较小。顶板巷道轴向应力随进尺增加先增大后降低,与边帮一致;然而,水平应力和垂直应力变化趋势与边帮相反,垂直巷道走向的水平应力逐渐增加后趋于稳定;垂直应力则

先下降后缓慢增加至稳定值,源于顶板垂直应力向两

帮的扩散及巷道竖向变形得到一定程度的应力释放。

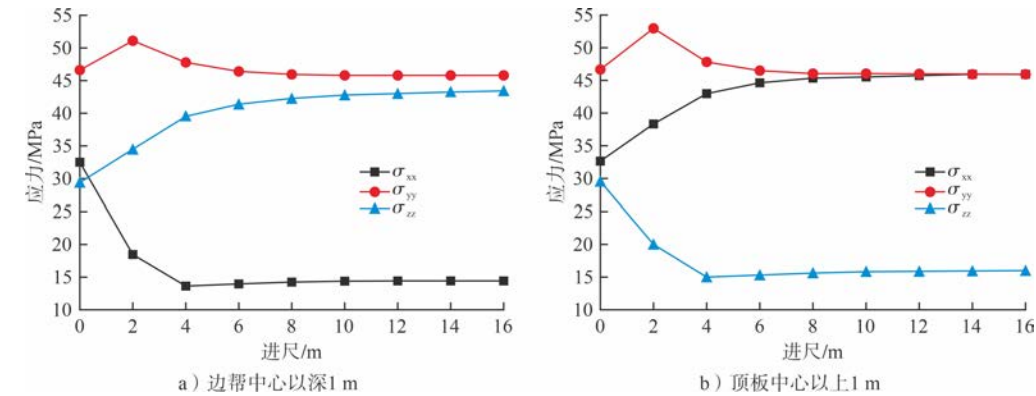


图 3 巷道左帮、顶板监测点的三向应力变化曲线

Fig. 3 Triaxial stress variation curves of monitoring points on the left side and roof of the roadway

至巷道边帮和顶板不同距离岩体的应力演化曲线见图 4。巷道边帮垂直应力随进尺增加而增大,增大幅度越来越小,最后趋于稳定。由图 4 - a) 可知:越靠近巷道,垂直应力值变化越大;与之相反,远离巷道时,围岩垂直应力受开采扰动的影响极小。顶板垂直应力随进尺增加出现先极速减小,后缓慢增大至稳

定的趋势;距离巷道顶板越远,垂直应力变化越不明显,这与边帮应力变化相同。边帮和顶板的水平应力变化与垂直应力变化截然相反,边帮水平应力出现先减小后增大的趋势,而顶板水平应力则与边帮垂直应力变化一致,随着工作面的推进逐渐增大到稳定。

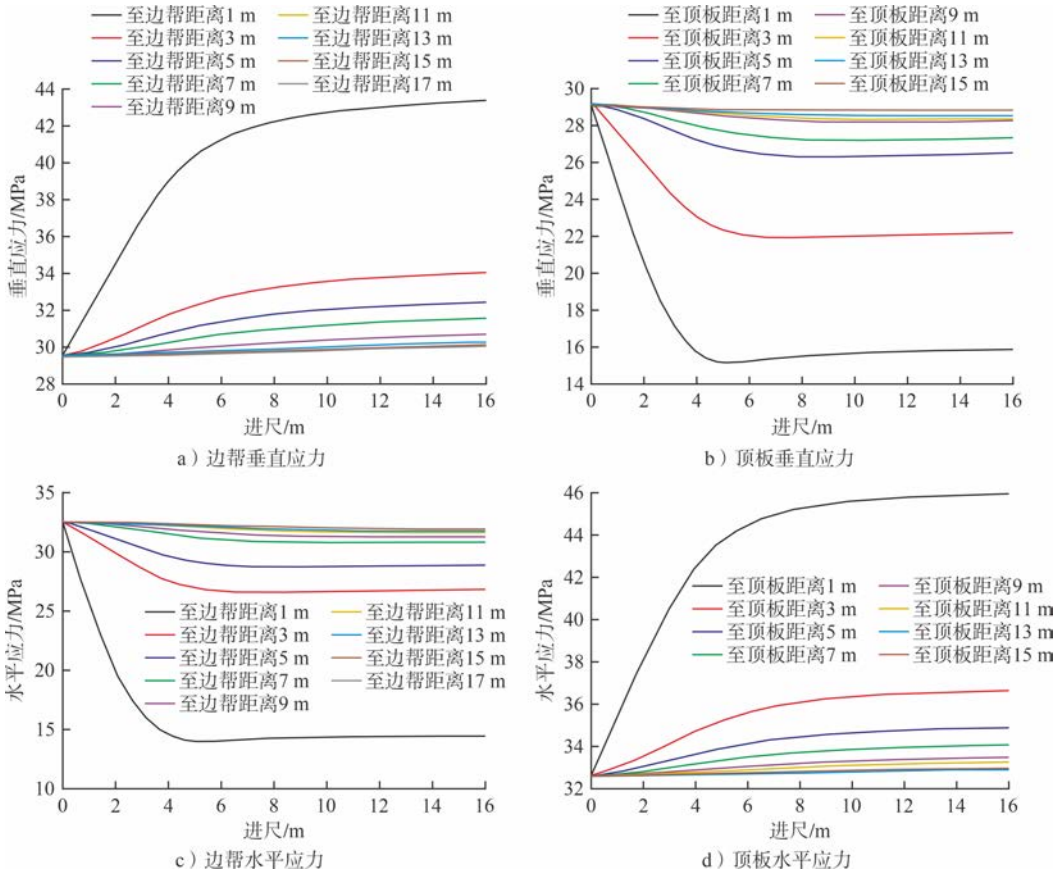


图 4 至巷道边帮和顶板不同距离岩体的应力演化曲线

Fig. 4 Stress evolution curves of rock mass at different distances to roadway side and roof

4 巷道变形规律

巷道开挖完成后的位移变化云图见图 5。由图 5 可知,开挖后巷道出现较为明显的边帮收敛现象。至

掘进工作面距离不同时的巷道表面位移变化曲线见图 6。由图 6 可知:巷道顶板和边帮表面位移均随掘进工作面推进逐渐增大,掘进工作面持续推进过监测点 7 m 左右时,边帮变形达到最大值并趋于稳定,顶

板变形虽持续增加,但增速明显减缓,说明巷道表面变形在掘进工作面持续推进约巷道两倍宽度时趋于

稳定。这为柔性支护和让压支护设计提供了依据和优化思路。

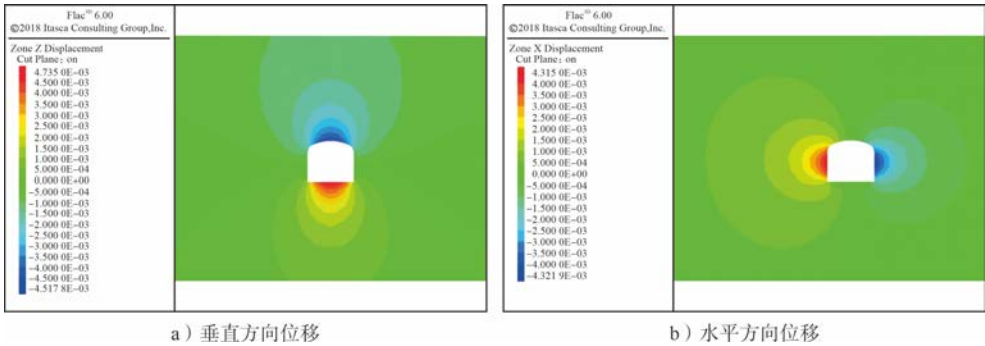


图5 巷道开挖完成后的位移变化云图

Fig.5 Displacement variation cloud chart after roadway excavation

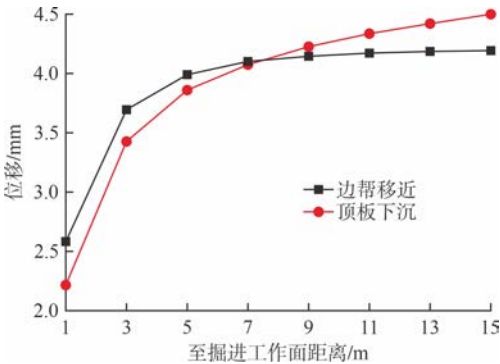


图6 至掘进工作面距离不同时的巷道表面位移变化

Fig.6 Displacement variation of roadway surface at different distances to excavation face

距巷道表面不同距离岩体的位移变化见图7。边帮水平位移和顶板位移均随着进尺的增加而增加,近巷道表面1 m范围内的变形量较为突出,一定程度上能够反映出巷道围岩在采掘扰动后的松动损伤范围,为支护结构的设计和参数确定提供参考。

5 结 论

采用 Flac^{3D} 软件对焦家金矿焦家矿区-710 m 水平巷道围岩开挖扰动过程进行了模拟分析,得到了巷道变形和应力的时间和空间演化规律,主要结论如下:

1) 因巷道开采扰动,巷道周边应力得到释放,应力进行重新分布,应力集中主要聚集于顶板、拱肩及边

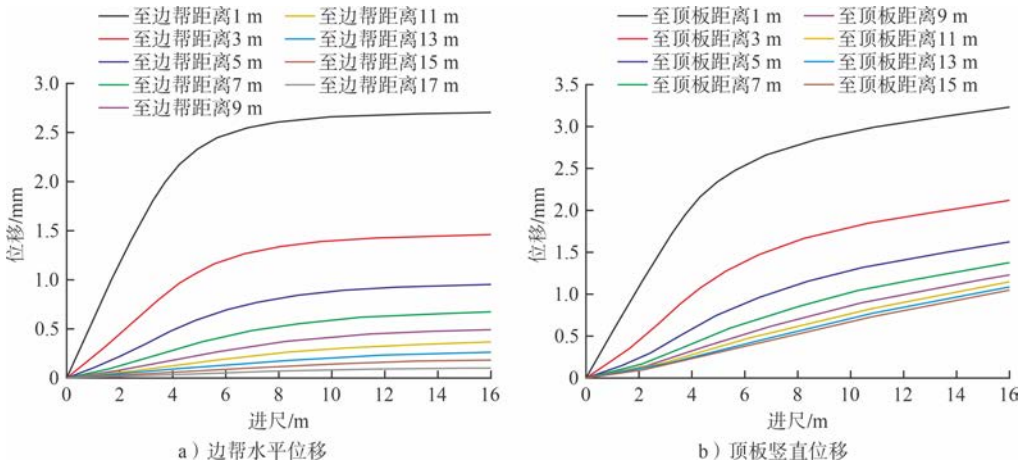


图7 距巷道表面不同距离岩体的位移变化

Fig.7 Displacement variation of rock mass at different distances to roadway surface

帮上下两侧,掘进施工过程中应加强安全管理和支护。

2) 巷道顶板和边帮的位移随掘进工作面的推进而增加,掘进工作面后方约7 m处的巷道边帮变形趋于稳定,顶板下沉速度明显降低,趋于稳定,对柔性让压支护和支护时机选择具有指导意义。

【参 考 文 献】

[1] 郭良银,蒋万飞,宋召法,等.新城金矿阶段空场嗣后充填法开

采大直径深孔切槽爆破方法[J].黄金科学技术,2022,30(4): 585-593.
[2] 梁旭.井下采矿技术及井下采矿的发展趋势探究[J].能源与节能,2021(12):149-150.
[3] 郑要伟.我国金属矿山采矿技术现状与发展趋势[J].工程建设与设计,2021(16):33-35.
[4] 张永政.井下采矿技术和井下采矿的发展形势[J].世界有色金属,2019(8):65,67.

[5] 赵钺. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 中国金属通报, 2020(9):3-4.

[6] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2 803-2 813.

[7] 徐冬东. 金属矿深部开采现状与发展探讨[J]. 世界有色金属, 2020(22):51-52.

[8] 孙宇超. 不同梯形巷道围岩应力特征及变形规律的数值模拟研究[J]. 采矿技术,2021,21(5):113-116,132.

[9] 穆磊,赵龙刚. 基于 FLAC^{3D} 数值模拟的巷道围岩稳定性及支护参数设计研究[J]. 能源与环保,2018,40(12):170-173.

[10] 何富连,张广超. 深部高水平构造应力巷道围岩稳定性分析及控制[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(3):466-476.

[11] 代碧波,李怀宾,张姝婧,等. 深部采动影响下硬岩巷道围岩稳定性数值模拟研究[J]. 金属矿山,2021(4):70-75.

[12] 夏德威,冷坤鹏,张镇铄,等. 基于 FLAC^{3D} 数值模拟的软岩巷道围岩稳定性及布置方案研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(12):92-99.

[13] 范顺刚,姜永恒,赵桥波,等. 镇沅金矿松软破碎岩体巷道稳定性分析及支护技术[J]. 黄金,2021,42(2):41-47.

[14] 任赛,程光华,于宝民. 基于 FLAC^{3D} 的某铀矿深井开采岩爆倾向性研究[J]. 现代矿业,2017,33(8):220-223.

[15] 许永山,孙忠文,曲玉峰,等. 基于 FLAC^{3D} 多矿房同采围岩的稳定性研究[J]. 现代矿业,2015,31(9):7-8,11.

[16] 郭子源,赵国彦,彭康. 深部高应力软岩巷道开挖与支护围岩变形的 FLAC^{3D} 模拟[J]. 矿冶工程,2012,32(2):18-22,29.

[17] 孙闯,张向东,李永靖. 高应力软岩巷道围岩与支护结构相互作用分析[J]. 岩土力学,2013,34(9):2 601-2 607,2 614.

Deformation and stress distribution evolution of surrounding rock during the roadway excavation in Jiaojia Gold Mine

Zhang Xufei¹, Guo Yunhong², Wang Xingya¹, Guo Qifeng²

(1. Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining Industry (Laizhou) Co., Ltd.;

2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: To solve the problem of serious deformation and difficult support of the roadway under deep high stress, the research centers on the -710 m horizontal roadway in Jiaojia Gold Mine, establishes Flac^{3D} numerical model to simulate and analyze the disturbance response law of the surrounding rock during the roadway excavation process. The results show that due to the mining disturbance of the roadway, the stress around the roadway is released. Thus, the stress is redistributed, with the stress around the roadway concentrated, and the stress peaks mainly occurring in the roof, the arch shoulder, and the upper and lower sides of the side walls, so the support should be strengthened in the roof, the arch shoulder, and the upper and lower sides of the side walls; within a range twice the width of the roadway is the focus area for support; after excavation, surrounding rock mass will experience shear and tensile failure. By analyzing the evolution of deformation and stress distribution in the roadway, the process of deformation failure of surrounding rock during excavation is revealed, providing a scientific basis for support parameter design and support timing.

Keywords: deep mining; high stress; surrounding rock deformation; stress distribution; roadway excavation