

回采巷道围岩变形远程多源监测与控制研究

Research on Remote Multi-Source Monitoring and Control of Surrounding Rock Deformation in Remining Roadway

祝传军, 付晓光, 江海波 (枣庄矿业集团高庄煤业, 山东 济宁 277605)

摘要:回采巷道围岩的变形和破坏是制约煤炭安全、高效生产的主要因素之一,精准的巷道围岩变形检测技术与高效的巷道支护技术是井下煤炭资源正常开采的重要保障。为了有效控制巷道围岩变形,保证煤炭资源的安全高效生产,对巷道围岩变形和控制技术的研究显得尤为重要。本文结合现场原位监测,理论分析,数据处理和数值模拟等相结合的手法,对巷道围岩的岩性进行了物理力学分析,并找出巷道发生变形的内在原因。运用顶板离层仪和钻孔应力传感器对巷道围岩进行了多源监测,并针对监测数据,结合远程分析技术,及时、精准的分析出巷道围岩应力分布与位移变化特征。依据围岩移动特征,设计出科学、合理的巷道围岩控制方案,并采用有限元仿真软件FLAC^{3D}模拟检验控制效果。钻孔应力计数据显示巷道副帮沿着远离巷道的方向,围岩应力呈现先增大后减小的趋势;顶板离层仪数据显示出在巷道应力增高区,采动影响并没有引发严重的顶板离层现象。数值模拟结果表明巷道围岩控制方案使巷道原有的变形量减少了50%,从而有效控制巷道围岩的变形。所得到的巷道围岩变形监测与控制理论,为巷道围岩变形控制提供理论依据与借鉴。

关键词:回采巷道围岩; 围岩控制; 围岩变形监测; 顶板离层; 数值模拟

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1672-609X(2023)03-0056-06

Abstract:The deformation and destruction of roadway surrounding rock is one of the main factors restricting the safe and efficient production of coal. Effective roadway surrounding rock deformation detection means and supporting technology are important guarantees for the normal mining of underground coal resources. In order to ensure the safe and efficient production of coal resources, it is particularly important to study the deformation and control technology of roadway surrounding rock. Combined with in-situ monitoring, theoretical analysis, data processing and numerical simulation, the lithology analysis of roadway surrounding rock was carried out, and the internal causes of roadway deformation were deduced. Then the roof separation instrument and borehole stress sensor were used for multi-source monitoring of roadway surrounding rock, and the monitoring data were analyzed remotely. According to the analysis results of data monitoring, a scientific and reasonable roadway surrounding rock control scheme is designed, and the control effect is tested by FLAC3D numerical simulation method. The borehole stress gauge data show that the surrounding rock stress increases first and then decreases along the side wall away from the roadway. The data of roof separation instrument show that the mining influence does not cause serious roof separation phenomenon in the area of roadway stress increase. The numerical simulation results show that the surrounding rock control scheme can reduce the original deformation of roadway by 50%, so as to effectively control the deformation of surrounding rock. The study on monitoring and control of roadway surrounding rock deformation provides a theoretical basis for roadway surrounding rock deformation control.

Key words:mining roadway surrounding rock; surrounding rock control; monitoring of surrounding rock deformation; top plate delamination; numerical simulation

[作者简介] 祝传军(1974—),男,汉族,山东济宁人,大学学历,中级工程师,现任山东能源枣矿集团高庄煤矿通防科主任工程师,主要从事煤矿“一通三防”工作。

[引用格式] 祝传军,付晓光,江海波.回采巷道围岩变形远程多源监测与控制研究[J].中国矿山工程,2023,52(3):56-61.

1 前言

近年来,由于巷道问题对煤炭正常开采造成了极大的困扰^[1-3]。为了保障煤矿生产的安全和可持续发展,巷道围岩变形监测和控制技术显得尤为重要。科学的支护参数与先进的支护技术是决定巷道

围岩控制效果的关键^[4]。在井工煤矿,常见的支护措施主要有锚杆、锚索支护以及巷道围岩灌浆等。这些支护技术有效地降低了巷道围岩的变形和破坏风险^[5]。但仍然存在许多巷道,即使采用了相关支护措施,依然存在顶板冒落,巷道片帮的现象,对煤炭的安全高效开采造成一定的威胁^[6]。基于此,广大学者展开了相关研究。诸多学者采用数学模型和计算机仿真等手段,预测巷道围岩变形的发生时间、程度和形态。更有广大学者利用深度学习、人工智能等技术手段,实现巷道围岩变形的自动化预测和预警^[7]。目前,巷道围岩变形监测与控制技术已经得到广泛应用,并在工程实践中取得了显著的效果。但是前辈们的研究,并没有将巷道围岩变形多源监测与可视化数据分析形成完整的体系,导致很难精准的对巷道围岩变形实施有效控制,因此对回采巷道围岩变形远程多源监测与控制技术的研究很有必要。随着科技的不断发展和技术的不断创新,巷道围岩变形监测与控制技术将会更加智能化、精准化和可持续化,为煤矿安全生产提供更加可靠和有效的技术支撑。

2 工程背景

陕北某矿地处陕北煤炭资源富集区,煤质赋存稳定,开采条件良好。回采工作面埋深 390 m,煤层

厚度为 2.6 ~ 3.9 m,平均厚度为 3.1 m,煤层倾向平均为 4°,属于近水平煤层,煤质较软,顶板覆岩存在节理裂隙发育现象。目前开采工作面长度 280 m,工作面走向长度 1 330 m,采用综合机械化开采,其中采高设计为 3 m。回采巷道布置如图 1 所示。

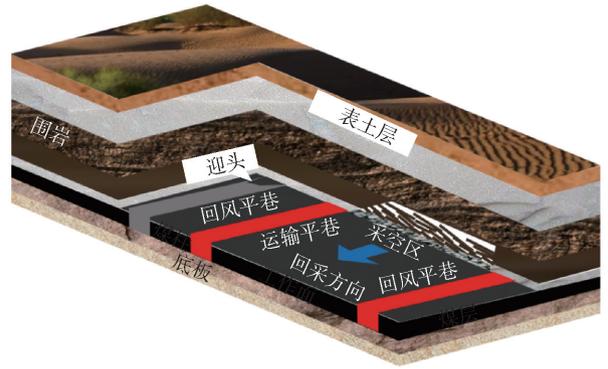


图 1 回采巷道布置示意

位于综采工作面两侧且服务于工作面煤炭开采的两条巷道(区段运输平巷与区段回风平巷)对煤炭资源高效开采起到关键作用。回采巷道两帮为煤壁,顶底板主要为砂岩。由于煤质较软,顶板存在节理裂隙发育,因此巷道易出现顶板下沉,冒顶以及帮鼓等现象,同时受采动影响,巷道围岩会出现应力集中现象,从而造成巷道围岩大变形,成为巷道有效控制的重大难题。回采巷道顶底板岩性见表 1。

表 1 回采巷道顶底板岩性

顶底板名称	岩石名称	厚度/m	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	泊松比 ν	岩性
基本顶	粗砂岩	37.22	1.42	2.06	0.123	灰白色,泥质胶结
直接顶	粗砂岩	19.36	1.38	2.06	0.123	钙泥质胶结,含有平行层理
伪顶	粉砂岩	1.87	1.84	2.75	0.2	钙质结构,半坚硬
直接底	细砂岩	5.91	1.29	3.2	3.2	层状,含有缓坡状层理
基本底	粗砂岩	6.32	1.44	2.06	0.123	浅灰色,含有均匀层理

3 巷道围岩监测

3.1 巷道围岩变形机理

赋存于地壳之中的岩体是经过长期的地质构造作用形成的,在重力作用以及长期的地质作用,从而使得岩体达到一种受力平衡的稳定状态。这种状态下,岩体所受的力就是原岩应力。但是当稳定岩体经受一定的工程扰动后,原有的应力平衡状态会遭到破坏,由于不平衡力的作用,岩体就会发生相应的变形。

巷道开挖,工作面开采,地下钻井等工程活动,都是破坏原岩应力的主要原因。位于回采工作面巷道周围岩体出现应力重新分布和应力集中现象。由图 2 巷道围岩应力分布可以看出,越靠近巷道,岩体受扰动程度也就越大,引起的围岩变形就越难控制。从回采巷道到未受工程扰动的区域,依次为破裂区,塑性变形区,弹性变形区,和原岩应力区,分别对应图中 A、B、C、D 四个区域,其中岩体的破裂与变形是造成巷道顶板下沉甚至冒落,巷道帮鼓和

底鼓的重要原因。

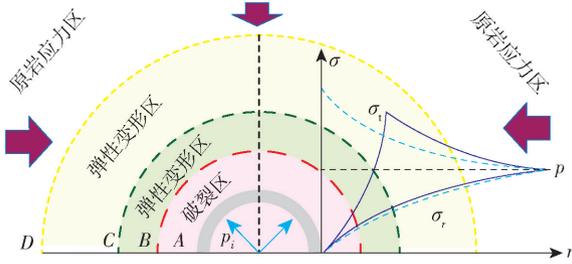


图2 巷道围岩应力分布

3.2 围岩参数原位监测

运用多元化、多视角、多方位的监测手段,将现场原位实测与数据可视化分析相结合,获取现场巷道围岩变形参数,并通过信息传输系统实时传输,最后借助智能数据处理软件对数据进行可视化处理并精准分析,进而直观地再现巷道围岩变形情况。

巷道围岩变形原位监测主要包含两个部分,一方面是巷道现场的顶板离层监测和巷道侧帮煤柱侧的钻孔应力传感器进行实时监测;另一方面则是对传输上来的顶板离层仪数据与包心空体钻孔应力数据进行及时分析。具体回采巷道围岩变形监测流程如图3所示。

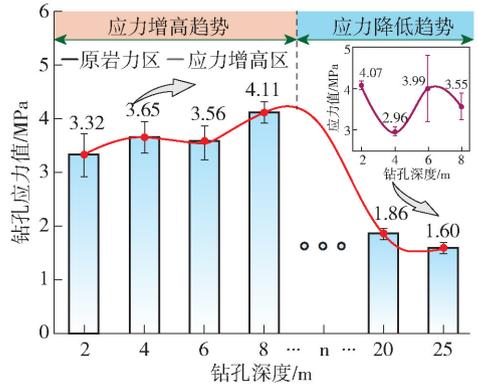


图3 回采巷道围岩变形监测流程

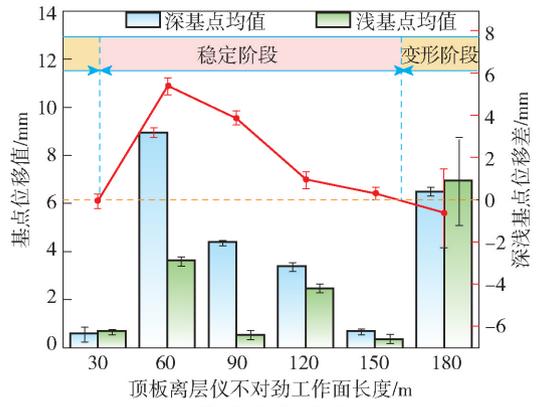
在现场原位监测阶段,首先采用锚杆钻机进行打孔,然后再装传感器探头。顶板离层仪从回采工作面30 m处开始布置,间隔30 m,总共布置六个断面,最远处可达到距离回采工作面180 m处。钻孔应力每隔2 m布置一个,总共布置两组。第一组布置在靠近综采工作面10 m处,对应力增高区巷道围岩应力进行监测,共计6个断面,钻孔深度分别为2 m、4 m、3 m、8 m、20 m、25 m,第二组布置在距离综采工作面100 m处,对原岩应力区巷道围岩应力进行监测,共计4个断面,钻孔深度分别为2 m、4 m、3 m、8 m。两组钻孔应力计可获取10组数据。整个巷道围岩监测过程是在正常开采条件下进行的,每个监测传感器每隔5 min上传一次数据。

3.3 监测参数分析

对监测数据进行准确分析,进而绘制出钻孔应力随钻孔深度的变化关系,以及顶板离层仪深基点、浅基点所发生的位移以及深浅基点位移差值随监测点到工作面距离的变化关系。具体数据监测与处理的结果如图4所示。



(a) 钻孔应力数据变化



(b) 顶板离层数据变化

图4 监测数据分析结果

采动影响下会使得巷道围岩应力遭受一定程度的破坏,使得原有的应力平衡遭受两次破坏。第一次为巷道掘进时对原岩应力进行破坏,第二次为采动工作面推进对巷道应力进行破坏。根据监测结果显示,在原岩应力区,巷道围岩钻孔应力值随钻孔深度先增大后减小,钻孔深度在2~8 m,钻孔应力均值呈现出缓慢增加的趋势,其中2 m深度应力值最小,达到3.32 MPa,在8 m深度钻孔应力平均值最大,达到4.11 MPa;而钻孔深度在20~25 m处,钻孔应力均值出现明显的下降,在孔深处于20 m、25 m的位置,其钻孔应力均值分别为1.86 MPa和1.60 MPa,远小于起始位置的3.32 MPa。并且整个钻孔应力值始终介于1.60~4.11 MPa,在钻孔深度介于2~8 m时,钻孔应力出现波动。这一现象说明

在靠近巷道的位置,巷道围岩应力不恒定,进而可以得出越靠近巷道,围岩越不稳定,距离巷道越远处,岩体赋存会更加稳定。反观受采动影响的区域,钻孔应力没有明显的变化趋势,随着钻孔深度的增加,钻孔应力变化幅度较大,同时不同位置的应力波动也没有明显规律,其中在钻孔处于6 m深处,其应力波动范围最大。

顶板离层仪是专门用来监测巷道顶板岩层移动的仪器,通过在顶板岩层不同深度安装传感器探头来监测顶板岩体的运移情况。每个探头监测到的位移即为该处岩体发生的位移,两个探头之间的位移差值反映的是两探头之间岩体是否发生离层。本次监测顶板离层仪装有两个传感器探头,其中深基点距离巷道顶板6 m,浅基点距离距离2 m。顶板离层仪深6 m浅2 m布置,能够很好地反映顶板岩层2~6 m的离层情况。如果深基点下沉值大于或等于浅基点值,说明巷道周边围岩没有发生离层,巷道侧围岩得到了良好的控制,反之巷道则发生了离层,根据基点差值大小来判断巷道顶板围岩的离层程度。根据顶板离层仪获取数据分析的结果可以得到,随着顶板离层仪到回采工作面距离的增加,深基点位移值出现先猛然增大,后平稳降低,最后再急速增大的趋势,浅基点位移值则没有明显的变化规律,深基点位移最大值为9 mm,浅基点位移最大为7 mm,两基点最小值接近于0,除过顶板离层仪距离工作面180 m处的浅基点位移值波动幅度很大外,其他各基点位移变化幅度不大,说明绝大多数顶板离层仪所显示的顶板岩层是稳定的。随着顶板离层仪到回采工作面距离的增加,基点差值呈现出先增大后不断减小的趋势,并且在顶板离层仪距离工作面60 m处达到峰值,为11 mm。基点差值曲线表明在顶板离层仪距离回采工作面长度30~150 m,巷道顶板围岩没有发生离层,该段顶板处于稳定状态,而在顶板离层仪距离回采工作面长度150~180 m出现基点差值为负的情况,这段区域的巷道顶板覆岩发生了顶板离层现象,巷道顶板不稳定,要时刻注意预紧监测并加强支护。

4 巷道围岩变形控制

4.1 巷道围岩支护理论

锚杆预紧力是锚杆支护作用中的一个重要参数,主要是通过旋拧锚杆尾部螺母,使其压紧托板来

实现的。锚杆尾部螺母在旋拧过程中所产生的预紧扭矩对锚杆预紧力的大小起到关键的影响因素^[8]。

$$p_0 = \frac{4\pi k_2(1+k_0)M}{2(s+\pi d_2 k_0) + \pi k_1(1+k_0)(D_1+d_0)}$$

式中, p_0 为锚杆预紧力,kN; M 为螺母预紧力矩, $N\cdot m$; k_0 为螺纹与螺母之间摩擦系数; k_1 为螺母与垫圈之间摩擦系数; k_2 为岩石完整性修正系数; t 为螺距,m; n 为螺纹头数; s 为螺纹导程; d_0 为垫片内径,m; d_2 为螺纹中径,m; D_1 为螺母端部有效接触面外接圆直径,m。

$$\text{若当, } k = \frac{4\pi k_2(I+k_0)}{2(s+\pi d_2 k_0) + \pi k_1(1+k_0)(D_1+d_0)}$$

则有, $p_0 = kM$,此时可得到锚杆预紧力与预紧力矩呈正比例关系。相关锚杆支护参数之间的相关关系如图5所示。

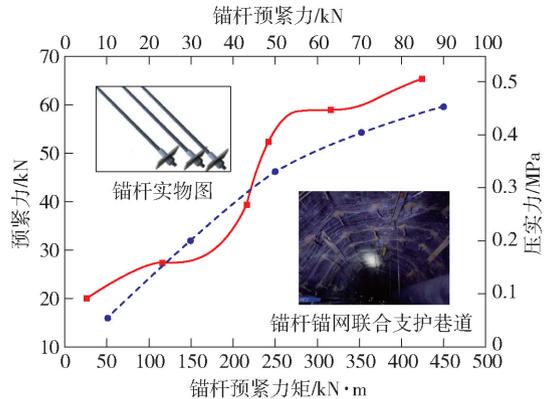


图5 锚杆支护参数相关关系

巷道刚开掘不久,顶板下沉量较小,帮鼓也比明显。此时对巷道进行锚杆加固,能够有效控制顶板的离层与滑动。锚杆预紧力越大则锚固范围内岩层的整体刚度越高,岩层处于压缩状态,岩层间不发生离层和弯曲变形等有害变形,岩层的完整性和整体强度得到保持。

由图5可知,锚杆预紧力与预紧力矩之间存在正相关关系,并且随着锚杆预紧力矩逐渐增大,锚杆预紧力增长的趋势有所降低;同样地,随着锚杆预紧力的不断增加,锚杆的压应力也在不断增加,但增加的幅度大致分为先减小再增大最后再娇小的趋势,进而推出锚杆的压应力与预紧力矩之间的关系,即锚杆应力与预紧力矩呈正相关关系。

4.2 围岩控制方案

科学合理的支护方案,一方面能够有效控制巷道变形,减少巷道冒顶,片帮等事故的发生,为煤炭

资源安全开采提供保障^[9];另一方面能够节约成本,提高掘进效率,进而达到既快速又经济的效果。安全、经济是煤炭开采不懈追求的目标^[10]。基于安全与经济两大原则,设计出具体的支护参数,回采巷道变形控制方案如图6所示。

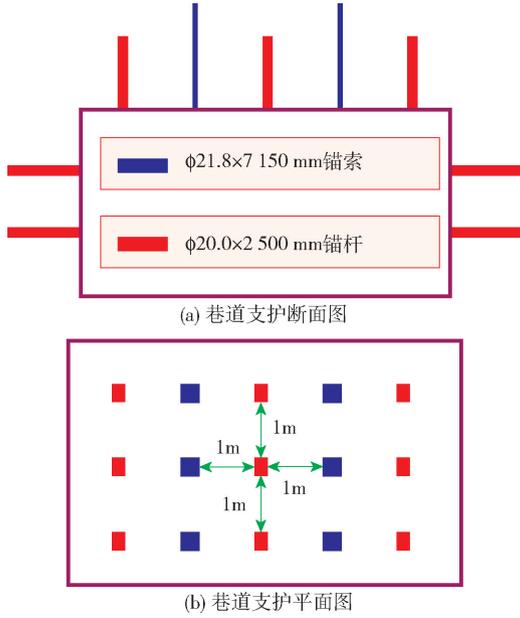


图6 回采巷道变形控制方案

顶板锚索选用 $\phi 21.8 \text{ mm} \times 7\ 100 \text{ mm}$ 型号的锚索支护,锚索间排距为 $2\ 000 \times 1\ 000 \text{ mm}$,矩形布置,每孔充填2节MS23352360型树脂药卷及一块规格为 $300 \times 300 \times 16 \text{ mm}$ 托盘。顶板锚杆选用 $\phi 20.0 \times 2\ 500 \text{ mm}$ 型号的锚杆支护,顶板锚杆间排距为 $2\ 000 \times 1\ 000 \text{ mm}$,矩形布置,每孔充填1节MS23352360型树脂药卷及一块规格为 $300 \times 300 \times 16 \text{ mm}$ 托盘。帮部锚杆采用 $\phi 20 \times 2\ 500 \text{ mm}$ 左旋玻璃钢锚杆,每孔充填1节MS23352360型树脂药卷,间排距为 $1\ 000 \times 1\ 000 \text{ mm}$,矩形布置。

5 围岩控制效果数值模拟

根据现场实际建立长 \times 宽 \times 高为 $25 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 的模型,模型两侧边界各留 11 m ,底板边界留 10 m ,顶板边界留 12.2 m ,建立的有限元数值模型,所模拟的煤岩层物理力学参数见表2。FLAC^{3D}数值模拟选用摩尔-库仑屈服准则,同时给模型施加 5 MPa 的垂直应力。数值模拟分为模型构建,巷道开挖,锚杆支护与应力应变计算等步骤^[11]。

支护前后巷道总变形位移云图如图7所示,由图可知所研究巷道在支护前后位移变化趋势差距不

表2 模拟的煤岩层物理力学参数

岩石名称	厚度/ m	容重 d / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 E/GPa	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	泊松比 ν	内聚力/ MPa	摩擦 角/ $(^\circ)$	抗拉 强度/MPa
粉砂岩	6.3	2 460	19.5	10.83	8.13	0.2	2.75	38	1.84
泥岩	3.0	2 461	8.75	6.08	3.47	0.26	1.2	30	0.605
砂质泥岩	3.9	2 510	5.425	2.56	2.36	0.147	2.16	36	0.75
细砂岩	1.2	2 873	33.4	21.01	13.52	0.235	3.2	42	1.29
砂岩	7.2	2 487	13.5	5.97	6.01	0.123	2.06	40	1.13
煤	3.4	1 380	11.7	5.3	5.24	0.32	0.15	32	1.25

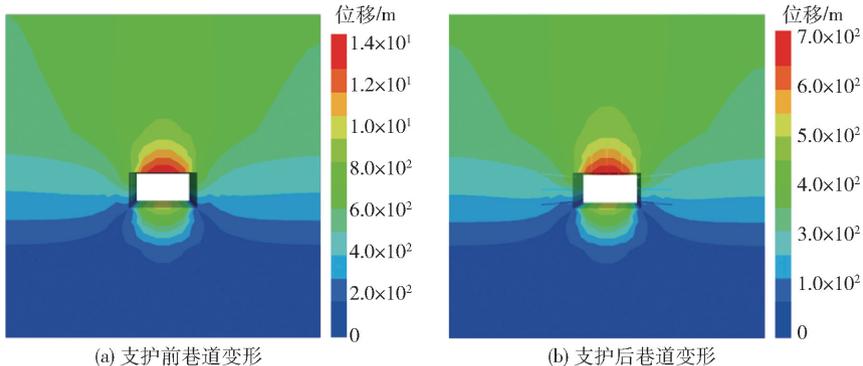


图7 支护前后巷道总变形云图

大,支护前后巷道的位移主要发生在巷道顶板,并由顶板向上扩展,顶板岩体发生的位移量逐渐减少,在最靠近巷道顶板的位置岩体发生的位移最大,其次是底板,但从巷道底板处向下延伸,岩体所发生的位移量很快就减低至0 m,最后是两帮,呈对称状,两帮发生的位移相对较小并且随着岩体位置远离巷道,其位移变化不明显。然而在回采巷道支护前后,巷道各处发生的位移大小发生了明显变化,在顶板处支护前的0.14 m降低至0.07 m,支护前后顶板变形量减少了0.07 m,显然锚杆支护对巷道顶板的下沉值减少了一半。巷道底板处的位移由0.1 m减低至0.05 m,巷道两帮位移由0.04 m降低到0.02 m。综上所述,锚杆支护作用有效地控制了巷道的顶底板以及两帮的变形,控制效果可使支护前的巷道变形量减少一半^[12]。

6 结论

(1)通过对巷道围岩进行岩性分析,推导出巷道变形发生的内在原因,进而运用顶板离层仪和钻孔应力传感器对巷道围岩进行多源监测,并对监测数据进行远程分析。得出钻孔应力计数据显示巷道副帮沿着远离巷道的方向,围岩应力呈现先增大后减小的趋势;顶板离层仪数据显示出在巷道应力增高区,采动影响并没有引发严重的顶板离层现象。

(2)依据数据监测的分析结果,设计出科学合理的巷道围岩控制方案,并采用FLAC^{3D}数值模拟的方法检验其控制效果。数值模拟结果表明巷道围岩控制方案使巷道原有的变形量减少了50%,从而有效控制巷道围岩的变形。

[参考文献]

- [1] 康晓波. 围岩移动传感器在巷道围岩监测中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2022, 174(2): 88-90+94.
- [2] 王蔚, 卫彦昭, 贾天让, 等. 华北煤系变形特征与煤矿瓦斯赋存规律[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 121-130.
- [3] 吴星宇, 蒋力帅, 徐兴港, 等. 动静载叠加作用下深部巷道围岩变形破坏数值模拟研究[J]. 中南大学学报, 2021, 28(2): 543-555.
- [4] 杨乾龙, 王沉, 张村, 等. 巷道围岩全断面变形监测方法[J]. 煤矿安全, 2015, 46(11): 107-110.
- [5] 武金浩. 基于视觉计算的煤矿巷道形变监测方法的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [6] 崔峰, 杨彦斌, 来兴平, 等. 基于微震监测关键层破断诱发冲击地压的物理相似材料模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 803-814.
- [7] 康晓波. 围岩移动传感器在巷道围岩监测中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2022, 174(2): 88-90+94.
- [8] 刘辉, 高贯林. 锚杆螺母相关技术参数对预紧力的影响[J]. 煤矿安全, 2018, 49(12): 126-127+131.
- [9] 张斌, 王冲, 贾海滨. 深井构造异常区小煤柱巷道支护优化研究[J]. 山东煤炭科技, 2020(5): 22-24.
- [10] 荆琪, 贾超. 数值模拟在巷道支护优化设计中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2021(4): 90-92+95.
- [11] 吕坤, 赵志超, 赵志强. 特厚煤层综放工作面回撤通道支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 39-43.
- [12] 靳峰. 望云煤矿15101运输顺槽围岩松动圈测试分析与控制技术研究[J]. 煤矿现代化, 2021, 30(4): 129-131+134.