

基于数值模拟的煤矿巷道支护结构 优化研究

Optimisation of Coal Mine Tunnel Support Structure Based on Numerical Simulation

赵荣斌, 李汉明, 周云帅 (沈阳焦煤股份有限公司红阳三矿, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:在煤层开采过程中,巷道围岩变形严重且支护困难的问题突出,极大地影响了煤矿的安全生产与高效作业。本文以西山煤矿36405工作面为具体工程背景,设计出3种巷道支护方案,运用Midas数值模拟软件,对这3种不同支护方案下巷道的围岩变形情况、应力分布状态以及塑性区分布范围进行了细致的比较分析。经全面评估,最终成功确定了优选支护方案并开展现场试验。现场试验表明,巷道围岩顶底板和两帮围岩变形基本稳定在23.6 mm和15.2 mm,验证了方案3的合理性。

关键词:煤巷; 锚杆; 锚索; 支护优化; 数值模拟

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)02-0036-06

Abstract: In the process of coal seam mining, the problems of serious deformation of the roadway perimeter rock and the difficulty of support are prominent, which greatly affect the safe production and efficient operation of the coal mine. In this paper, we take 36405 working face of Xishan coal mine as a specific engineering background and carry out an in-depth research. We designed three types of roadway support schemes, and used Midas numerical simulation software to make a detailed comparative analysis of the deformation of the surrounding rock, the state of stress distribution, and the distribution range of the plastic zone in the roadway under these three different support schemes. After comprehensive evaluation, the preferred support scheme was finally determined and field tests were carried out. The field test shows that the deformation of the top and bottom slabs and the two sides of the tunnel enclosure is basically stable at 23.6 mm and 15.2 mm, which verifies the reasonableness of option 3.

Key words: coal roadway; anchor rods; anchor cables; support optimisation; numerical simulation

1 前言

在当今煤炭行业蓬勃发展的背景下,煤炭开采强度和深度持续攀升^[1-2]。然而,随着开采条件愈发复杂,在高应力以及强采掘扰动的双重作用下^[3-4],巷道围岩的变形问题日益凸显。冒顶、片帮等事故频发^[4],不仅严重威胁到井下作业人员的安全,还极大地制约了矿井安全高效生产的进程,成为煤炭行业亟待解决的关键难题^[5]。

当前,以锚杆-锚索联合支护为代表的主动支护体系已成为巷道支护工程实践中的主导技术,配合型钢支架被动支护和注浆加固补强措施,形成了复合支护技术架构^[6-7]。尽管这种多层次支护体系在维持巷道围岩稳定方面取得显著成效,但工程实践表明,支护结构参数的系统性优化与动态调整仍是

实现巷道变形精准控制的核心要素^[8-10]。尤其在深部复杂应力环境下,只有建立基于地质力学特征的精细化支护设计方法,才能充分发挥支护体系的协同承载效能,保障巷道全生命周期稳定性^[11-12]。

以典型复杂地质条件矿井——西山煤矿为例,其36405工作面兼具以下工程特征:①煤层地层存在多期构造叠加作用,形成显著的非对称地应力场;②煤层赋存状态呈现剧烈起伏变化,局部发育厚度异常带;③围岩结构面发育程度高,岩体完整性系数低于0.35。这些特殊地质条件导致巷道围岩产生非对称变形,严重制约着矿井安全生产。鉴于此,本研究构建了“理论分析-数值模拟-工程验证”三位一体的研究方法:①基于弹塑性力学理论分析围岩-支护相互作用;②采用Midas数值模拟平台开展支护参数敏感性分析;③通过现场工业试验验证优化方案的工程适用性^[13-14]。研究过程中引入支护支护变形、位移变形及塑性变形综合评估体系,并基于数值模拟对比分析了多种支护方式的稳定性,建立数值模拟测值与现场监测数据的对比分析机制,从

[作者简介] 赵荣斌(1990—),男,辽宁辽阳人,采矿工程师,主要从事采掘、一通三防、防冲现场安全及技术管理工作。

[引用格式] 赵荣斌,李汉明,周云帅.基于数值模拟的煤矿巷道支护结构优化研究[J].中国矿山工程,2025,54(2):36-41.

多维度验证数值模拟方法的科学性与可靠性。研究成果不仅为西山煤矿提供了定制化支护解决方案,更形成了可推广的复杂条件巷道支护设计方法体系,对提升我国深部资源开采巷道控制技术水平具有重要实践价值。

2 工程概况

36405 工作面瓦斯治理巷位于北四采区 6 号煤层,属 1 051 m 水平,埋深 331 m,设计长度为 1 320 m,采用矩形断面,全锚支护,净宽 5.2 m,净高不大于 3.5 m,不小于 3.3 m。基本顶为石灰岩,直接顶为泥灰岩和砂质泥岩,直接底为泥岩,基本底为石灰岩。采用理论计算对工作面巷道进行了锚杆(索)支护初始设计,支护参数见表 1。

表 1 巷道支护材料

材料名称	材质	规格/型号
锚杆	左旋螺纹锚杆杆体	$\phi 20 \times 2\ 000\text{ mm}$
锚索	钢绞线	$\phi 21.6 \times 5\ 500\text{ mm}$
树脂锚固剂	树脂药卷	MSK2380

3 数值模拟支护参数设计

3.1 支护设计

以 36405 工作面瓦斯治理巷作为工程依托,基于现场实地调研所得信息以及实际工况条件,计划通过对锚杆、锚索间排距进行调整,进而设计出以下三种巷道支护方案。

方案 1:顶板、左帮、右帮均采用 $\phi 20 \times 2\ 000\text{ mm}$ 左旋螺纹锚杆杆体,顶板锚杆间排距为 1 600 mm,每排共有 4 根锚杆。两帮锚杆间排距为 900 mm,每排共有 6 根锚杆,左右两帮对称安装,无安装锚索。

方案 2:顶板、左帮、右帮均采用 $\phi 20 \times 2\ 000\text{ mm}$ 左旋螺纹锚杆杆体,顶板锚杆间排距为 1 000 mm,每排共有 6 根锚杆。两帮锚杆间排距为 900 mm,每排共有 6 根锚杆,左右两帮对称安装,无安装锚索。

方案 3:顶板、左帮、右帮均采用 $\phi 20 \times 2\ 000\text{ mm}$ 左旋螺纹锚杆杆体,顶板锚杆间排距为 1 000 mm,每排共有 4 根锚杆和两根锚索。两帮锚杆间排距为 900 mm,每排共有 6 根锚杆,左右两帮对称安装。锚索设计: $\phi 21.6$ 的 19 股钢绞线,长度 5.5 m,采用 2-0-2 循环布置,垂直顶板岩面。

三种巷道支护方案如图 1 所示。

3.2 模型构建

基于上述三种方案,运用 Midas GTS NX 软件构

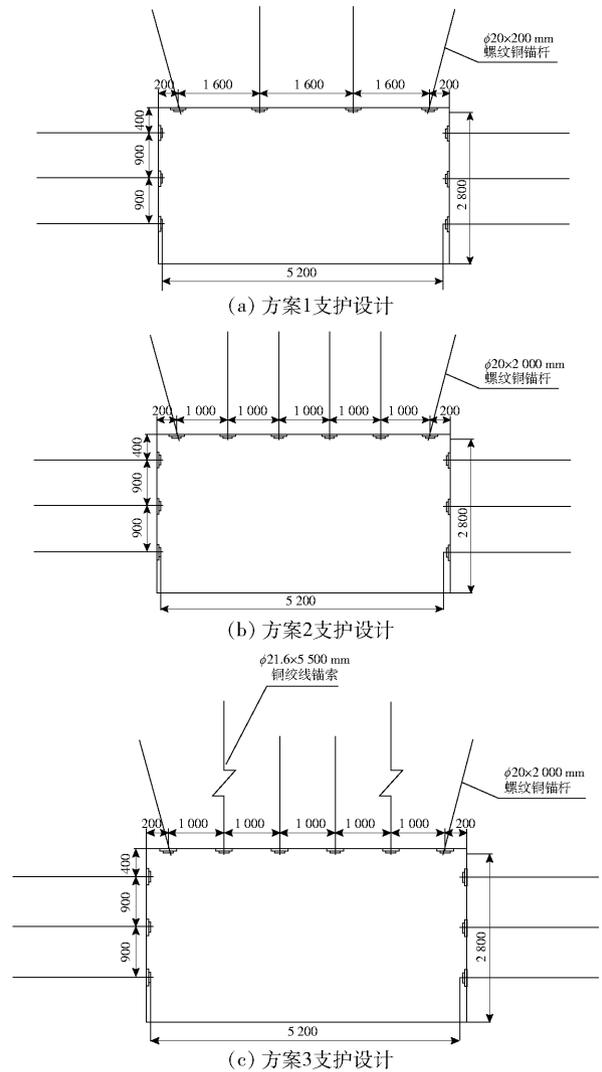


图 1 36405 工作面瓦斯治理巷支护方案 (mm)

建数值模型。考虑到围岩的岩体破碎状况,模型共设置了四层岩体,由上至下依次为石灰岩、砂质泥岩、煤层、泥岩。为有效降低边界效应,本次模型的上部延伸至地表,左右两侧距离选取大于巷道宽度 3 倍的开挖跨度,下部围岩取至距巷道底部 3 倍开挖跨度处,隧道埋深设定为 331 m。最终确定的计算模型尺寸为 385 m \times 505 m (巷道横向方向 x ,巷道竖向方向 y)。将其视作连续、单一且各向同性的理想弹塑性介质。在边界条件设定方面,模型的左右两侧设置为水平约束边界,底部设置为垂直约束边界,上表面则设定为自由边界。模型网格采用混合型网格,以满足模拟分析的精度与效率需求^[15],模型如图 2 所示。

3.3 模型材料属性

在计算模型中,围岩参数依据实际工程的围岩情况进行选取。数据参数则是通过对实际工程中所

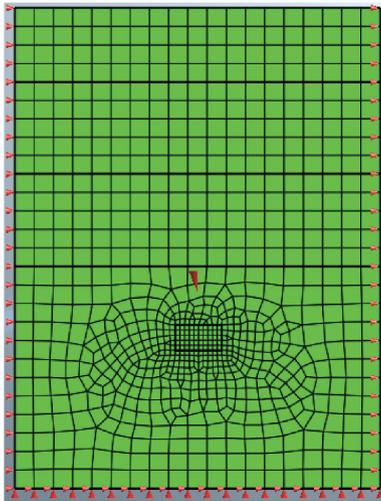


图2 模型图

采集的岩样开展室内试验而得出,具体数据详见表2。岩体本构模型选用 Mohr-Coulomb 本构模型,围岩利用实体单元构建,锚杆采用植入式1D单元。

表2 围岩物理力学参数

围岩	重力密度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
石灰岩	24.32	800	0.3	20	35
砂质泥岩	24.61	1 085	0.25	2.45	36
煤层	12.5	400	0.26	0.3	28
泥岩	23	1 500	0.2	3.4	30

4 数值模拟计算结果与讨论

4.1 位移结果分析

如图3所示,其展示了在三种不同支护方案下,36405工作面瓦斯治理巷掘进过程中的位移云图。通过对该图的细致观察,可以清晰地发现,在这三种支护方案里,位移最大值无一例外均出现在顶板位置,紧随其后的是底板以及两侧区域。具体来看,方案一由于顶板处布置的锚杆数量相对较少,这种设置使得顶底板以及两侧在掘进过程中出现了较为明显的变形。经对比可知,该方案产生的位移变形量

在三种方案中居于首位,最大位移值达到了16.1 cm。而方案二则在此基础上做出改进,适当增加了顶板位置的锚杆数量。这一调整有效提升了锚固效果,使得整个巷道的位移变形相较于方案一有了显著降低。尤其值得注意的是,底板处的变形位移降幅十分明显。不过,即便如此,方案二的最大位移变形依然出现在顶板位置,其最大位移为3.46 cm。方案三,此方案在顶板位置额外加入了锚索进行加固处理。经过这样的强化支护,位移变形相较于方案二实现了进一步减小。与前两种方案类似,方案三的最大位移变形同样出现在顶板位置,最大位移为2.10 cm。深入分析可知,方案一位移变形最大的主要根源在于,当巷道开挖之后,围岩应力会发生重新分布。此时,由于上侧顶板锚杆数量不足,难以有效地对围岩应力进行调整与分散,进而导致巷道周围的应力集中现象愈发严重。特别是在巷道边角以及顶板等关键部位,应力集中程度的增加直接促使围岩塑性变形区不断扩大,岩体的力学性能也随之降低,最终引发了更大的位移。综合比较三种方案可以看出,随着支护加固措施逐步强化,支护效果呈现出不断提升的趋势。其中,方案三凭借其更为合理有效的支护设计,展现出了最为优异的支护效果。

4.2 应力结果分析

在巷道工程的支护设计中,应力分布情况对于评估支护方案的有效性起着关键作用。图4所示呈现了三种不同支护方案下的主应力云图,这为我们深入探究各方案的力学特性提供了直观依据。

方案一的应力分布有着鲜明的特征。最大应力显著集中于巷道的左右两侧,这意味着在该方案下,巷道的左右方向承受着较大的压力。从力学原理角度来看,这种应力集中可能是由于巷道在水平方向上受到的地质构造力或开采活动影响较为突出。方案一的最大应力峰值达到了50.2 kPa,如此高的应力峰值表明该区域的岩体受到了强烈的挤压作用。而最小主应力大多分布在巷道的上下两侧,其最小

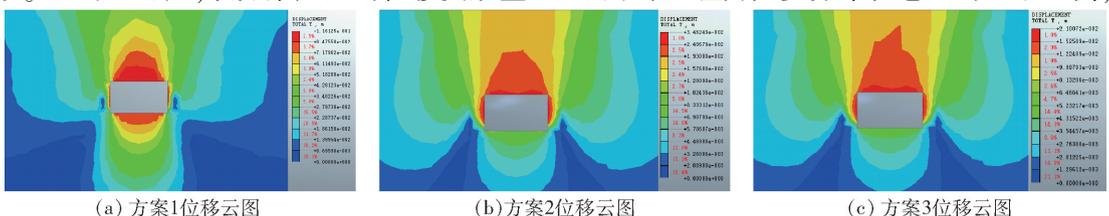


图3 三种支护方案下位移云图

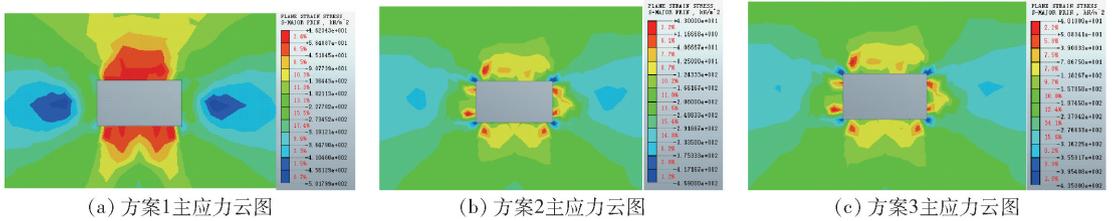


图4 三种支护方案下主应力云图

应力峰值为 4.62 kPa,相对较低的数值反映出上下方向的受力相对较小。

方案二与方案一相比,应力分布态势出现了一定的差异。虽然最大应力依旧集中在巷道左右两侧,然而最小主应力的分布却发生了显著变化,广泛分布于巷道四周。这种变化可能源于支护结构的调整以及支护材料的力学性能改变。方案二的最大应力峰值为 45.9 kPa,相较于方案一有所降低,这说明该方案在一定程度上缓解了巷道左右两侧的应力集中情况。其最小应力峰值为 4.3 kPa,也略低于方案一。

方案三的应力分布状况与方案二较为相似,但也存在细微差别。最大应力峰值为 43.5 kPa,是三个方案中最低的,这进一步表明该方案在控制最大应力方面表现出色。最小应力峰值为 4.01 kPa,同样低于前两个方案。从应力云图上可以看出,方案三的应力分布相对更为均匀,这得益于其独特的支护参数设计和支护工艺。

对三种方案的应力分布进行全面且深入的综合分析后,能够清晰地发现:随着支护强度的逐步提升,巷道周围的应力集中区域呈现出明显的减少趋势。这是因为更强的支护强度能够更好地分散和承受岩体的压力,从而降低应力集中程度。同时,最大应力峰值与最小应力峰值均在持续降低,这表明支护方案的优化有效地减小了巷道岩体所承受的应力极值。

在这三种方案中,方案3的应力集中范围最小,应力峰值也最低。从实际应用角度出发,方案3能

够更有效地保障巷道的稳定性,减少因应力集中导致的巷道变形、坍塌等安全隐患。无论是从理论分析还是从实际工程需求来看,方案3的支护效果最为理想,在后续的巷道施工和维护中,采用方案3可能会带来更好的经济效益和安全保障,具有显著的应用优势。

4.3 塑性结果分析

图5所示为三种支护方案下巷道塑性区的分布云图。在矩形巷道中,角部应力集中现象最为显著,因此,对于这三种支护方案而言,塑性区在角部的分布范围越小,支护效果就越好。从图5可以看出,方案1至方案3的塑性区均分布在矩形巷道的左右两侧,而上下两顶的塑性区范围相对较小。其中,方案1的塑性区分布范围最大。随着支护强度的逐步提升,方案2和方案3的塑性区分布范围相应减小。这表明,增加锚杆数量、优化锚杆布局以及增设锚索,能够有效缩小塑性区的分布范围,显著增强支护效果。

5 现场试验

为验证方案3可行性,在36405工作面开展现场试验,通过JSS30A数显收敛计分别监测围岩变形。图6所示为现场监测设备安装图。

为监测围岩顶底板和两帮变形量,在巷道布置4个测点,设置观测周期60d,监测频率每2天1次。图7所示为具体的现场与模拟围岩变形量监测图。

从图7中可以看出,模拟沉降测点与实际现场测点在顶底板变形量和两帮变形量上的趋势基本一致,表明所用的模拟方法能有效地预测实际变形情

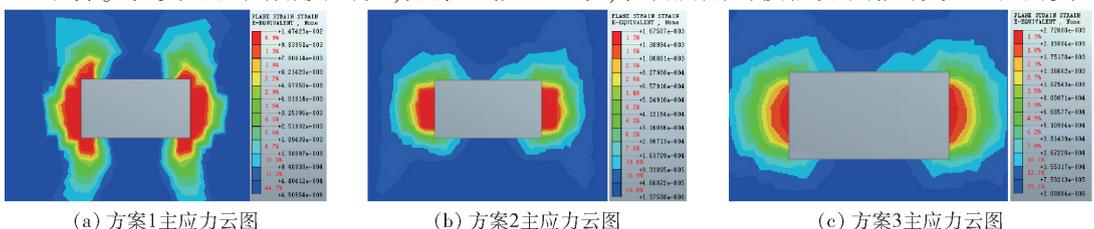


图5 三种支护方案下塑性区分布云图



(a) JSS30A数显收敛计



(b) 现场安装

图6 现场监测设备安装图

况。在变形初期阶段(大约前10天),所有测点的变形量增长较快,可能是由于荷载快速增加或地质条件突变所致。随着时间的推移,变形增长速度逐渐减缓,曲线趋于平稳,说明结构经过一段时间沉降后逐渐稳定。不同测点之间变形量存在差异,可能与测点位置、地质条件或受力情况有关,例如现场测点1和模拟测点1的变形量较大,而现场测点3和模拟测点3的变形量相对较小。现场测点中顶底板最大变形约为23.6 mm,模拟测点中最大变形约为19.8 mm,变形趋势一致。现场测点中两帮最大变

形约为15.2 mm,模拟测点中最大变形约为12.5 mm,变形趋势一致。整个过程中,时间是影响变形量的关键因素,变形量随时间增加而增长,但在达到一定时间后,变形量变化趋于平缓。总体而言,模拟数据与现场数据的高吻合度验证了模拟方法在预测顶底板变形方面的准确性,这对于工程实践具有重要意义,可以帮助工程师更好地进行设计和风险评估。

6 结论

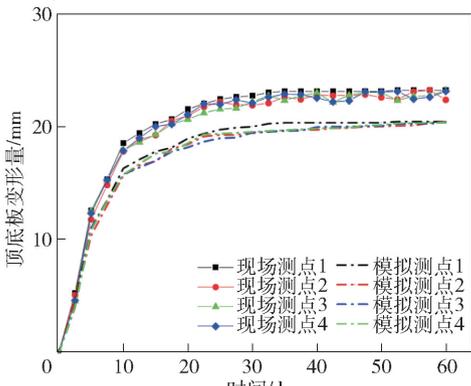
在煤矿开采中,工作面瓦斯治理巷支护效果关乎开采安全与效率。为实现最佳支护,我们确定了顶板及帮部的支护参数,包括锚杆、锚索规格与布置,以及支护材料强度等级。

基于这些参数,我们设计了3种支护方案并使用Midas软件进行数值模拟。构建地质模型,输入地质和力学参数,从垂直应力分布、顶底板位移、塑性区范围等维度进行评估。结果显示,方案3在各指标上表现最佳,能有效分散应力、控制位移和缩小塑性区范围,为后续开采提供可靠保障,是最优方案。

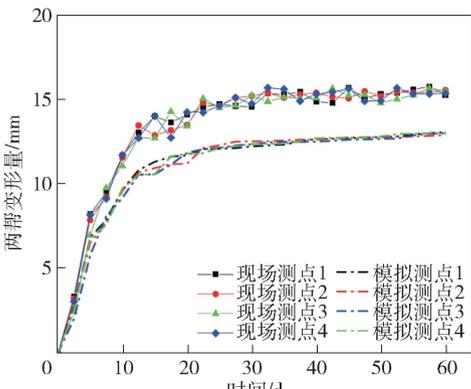
开展现场试验对围岩的顶底板及两帮进行监测,结果表明支护方案3的围岩变形控制效果较好,具有良好的可行性。

[参考文献]

[1] 孙海波. 某煤矿煤巷支护优化设计分析[J]. 山西焦煤科技, 2019, 43(2): 22 - 27 + 31.
 [2] 刘乐枝, 刘华举, 陈登红, 等. 深井复杂条件下煤巷快速掘进支护参数调整可行性研究与应用[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(11): 82 - 89.
 [3] 李焕伟. 坡底煤矿煤巷层巷道顶煤支护优化设计研究[J]. 山西焦煤科技, 2022, 46(1): 29 - 31 + 56.
 [4] 李鑫. 关于锚杆支护技术在煤巷施工中的应用探讨



(a) 顶底板变形量



(b) 两帮变形量

图7 现场与模拟围岩变形量

- [J]. 内蒙古煤炭经济,2024(19):142-144.
- [5] 李政. 综放工作面沿空侧煤巷围岩非对称支护控制应用[J]. 山西焦煤科技,2022,46(4):22-25.
- [6] 陈宗泰,范文昌. 深部软弱煤层特大断面巷道支护参数优化设计[J]. 山东煤炭科技,2024,42(10):41-46+51.
- [7] 吕传庆. 综放工作面两侧平巷顶板支护研究与探讨[J]. 山西焦煤科技,2022,46(2):11-14.
- [8] 田敬. 南阳矿三采区巷道支护优化设计研究[J]. 山东煤炭科技,2024,42(12):35-38.
- [9] 刘东峰. 破碎顶板煤层巷道掘进超前注浆加固技术研究[J]. 山西焦煤科技,2021,45(4):31-33.
- [10] 高亮,杜君武,王琳. 煤巷扩帮增跨围岩稳定性研究及支护参数设计[J]. 煤炭工程,2024,56(9):56-64.
- [11] 王东平. 深部大断面煤巷全锚索支护技术研究[J]. 煤,2024,33(9):90-92+101.
- [12] 毋会兵. 基于地应力的煤巷围岩分级方法及其应用[J]. 山西焦煤科技,2020,44(6):47-50.
- [13] 张保军. 围岩控制与煤巷快速掘进工艺研究[J]. 自动化应用,2024,65(16):175-178+181.
- [14] 刘义孟,张自政,王克伟,等. 近距离煤层下煤层巷道合理布置及分级支护技术研究[J]. 煤炭技术,2024,43(8):114-119.
- [15] 李利军. 采空区下覆煤层巷道稳定性分析及支护优化[J]. 山西焦煤科技,2019,43(8):25-28.

(上接第35页)

- [9] 张盛,徐瑞泽,刘佳伟,等. 极软厚煤层切顶卸压沿空留巷主动超前支护技术研究[J/OL]. 河南理工大学学报(自然科学版),1-13[2024-11-23].
- [10] 杨涛,孙佳瑞,张杰,等. 山阳煤矿区段煤柱留设宽度优化研究[J]. 矿业研究与开发,2024,44(7):7-14.
- [11] 李周波. 青洼煤矿沿空巷道应力分布特征与合理煤柱宽度确定[J]. 煤炭科技,2020,41(3):39-41+49.
- [12] 田二霏. 沿空留巷深孔预裂爆破切顶设计研究[J]. 能源与节能,2024(11):153-155.
- [13] 秦永洋,许少东,杨张杰. 深井沿空掘巷煤柱合理宽度确定及支护参数优化[J]. 煤炭科学技术,2010,38(2):15-18.
- [14] 马其华,王宜泰. 深井沿空巷道小煤柱护巷机理及支护技术[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(4):520-523.
- [15] 关亚东,熊浩. 小煤柱沿空掘巷联合支护技术研究与应用[J]. 煤炭工程,2013,45(5):42-44.
- [16] 石强. 小煤柱护巷技术在厚煤层中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2021,41(7):159-160.
- [17] 温卓越,杜兆文,李帅乾. 基于不同浓度氯盐作用下充填膏体时效性特征研究[J/OL]. 煤炭科学技术,1-13[2024-11-23].