

综放开采工作面下覆煤层采空区探测 及充填加固技术研究

Research on Detection and Filling Reinforcement Technology for Goaf in Overlying Coal Seam of Fully Mechanized Top Coal Caving Mining Face

王全征(中化地质河南局集团有限公司, 河南 郑州 450011)

摘要:本文以6303综放工作面回采为工程背景,采用钻探方法确定下覆9#煤层采空区位置,并通过理论及数值模拟技术对工作面回采期间底板稳定性进行分析,给出采空区加固技术方案并进行工程应用。研究发现:①工作面回采后底板塑性区与下覆采空区顶板联通、底板稳定性较差,而对采空区进行加固后工作面底板稳定性得以明显提出;②在分析现有加固材料基础上,发现空巷充填材料不仅可满足采空区加固需要,而且可降低加固成本、加固工程施工量;③结合6303综放工作面回采巷道及探测巷道布置情况具体给出加固钻孔布置方案、充填工艺及安全技术措施等。工程应用后,6303综放工作面回采过下覆9#煤层采空区时工作面底板及综放设备等保持稳定,开采设备、顶底板、矿压等均未出现异常,表明采用的加固技术效果显著。

关键词:综放开采;底板稳定;下覆采空区;注浆加固

中图分类号: TD352

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)06-0040-05

Abstract: Ensuring the stability of the bottom plate is the foundation for achieving safe coal mining in the fully mechanized top coal caving face. However, when there is a goaf underneath the mining area, the mining face often faces problems such as roof collapse and instability of the fully mechanized top coal caving equipment, which greatly restricts the safe coal mining and is a key problem that mines need to solve. Taking the 6303 fully mechanized mining face as the engineering background, the drilling method was used to determine the position of the overlying 9 # coal seam goaf, and the stability of the bottom plate during the mining face recovery period was analyzed through theoretical and numerical simulation technology. A reinforcement technology scheme for the goaf was proposed and applied in engineering. The research found that: ① the plastic zone of the bottom plate after the mining face recovery is connected to the overlying goaf roof, and the stability of the bottom plate is poor, After reinforcing the goaf, the stability of the working face bottom plate can be significantly improved; ② Based on the analysis of existing reinforcement materials, it was found that the filling material for the goaf can not only meet the reinforcement needs of the goaf, but also reduce the reinforcement cost and construction volume of the reinforcement project Provide a specific reinforcement drilling layout plan, filling process, and safety technical measures based on the layout of the mining roadway and detection roadway in the 6303 fully mechanized mining face. After engineering application, when the 6303 fully mechanized mining face passed through the goaf of the overlying 9 # coal seam, the working face floor and fully mechanized mining equipment remained stable, and there were no abnormalities in the mining equipment, roof and floor, and mine pressure, indicating that the reinforcement technology used had a significant effect.

Key words: fully mechanized caving mining; bottom plate stability; underlying goaf; grouting reinforcement

1 前言

当生产矿井为资源整合矿井或者矿井回采区域存在有小煤窑开采破坏区时,煤炭生产期间会遇到开采废弃的空巷或者采空区,同时上述空巷及采空

区赋存条件复杂、位置往往不详,给煤炭资源高效安全回采带来一定影响^[1-2]。受空巷及开采破坏区遗弃时间较长、顶板容易冒落且内部可能积存有瓦斯、水等影响,矿井采掘作业面过空巷或开采破坏区时容易出现矿压显现异常、冒顶、片帮、瓦斯及水异常涌出等问题,特别是采掘作业面位于空巷或开采破坏区上部时更用以引起矿压异常或者支架压架、倾倒等安全事故^[3-4]。实现空巷及开采破坏区探测并针对性制定加固技术措施可为煤炭安全回采创造

[作者简介] 王全征(1985—),男,汉,河南省台前县人,硕士研究生,高级工程师,从事水工环地质研究。

[引用格式] 王全征.综放开采工作面下覆煤层采空区探测及充填加固技术研究[J].中国矿山工程,2023,52(6):40-44+50.

良好基础^[5]。为此,众多学者及工程技术人员对工作面回采过开采破坏区展开研究,其中吴士良等^[6]针对蒋庄矿3下煤层710工作面回采过底板巷道为该工程背景,通过理论分析工作面过底板巷道期间围岩应力、稳定性情况,随后提出通过工作面煤层注水降低矿压显现,以便确保工作面安全回采,工程应用后注水区域煤层强度降低23%、工作面超前影响区距离降至70 m以内,工作面过底板巷道期间液压支架等开采设备保持稳定、底板巷道顶底板位移量控制在160 mm以内,取得较好应用效果;侯艳峰^[7]针对口前矿4203综放工作面底板下覆11#煤层存在采空区问题,采用钻探方式确定空巷分布范围,并采用注浆充填方式加固采空区,现场应用后采面过底板空巷期间采面底板、液压支架等保持稳定;史占东等^[8]针对近距离煤层群开采条件下回采工作面下覆煤层遗放弃空巷期间面临空巷顶板坍塌、工作面液压支架不稳、底板塌陷等问题,综合理论分析、数值模拟等技术方法对工作面过底板空巷期间底板岩体稳定性进行分析,并提成通过架设#字型木垛方式提高空巷支护强度,为工作面过底板下覆煤层空巷创造良好条件。文中就以某矿6#煤层6303综放工作面回采为工程背景,对工作面回采过下覆9#煤层采空区期间采用的探测技术、采空区填充加固方案等进行分析,以期为其他矿井类似情况工作面回采提供经验借鉴。

2 工程概况

某矿设计产能为300万t/a,为低瓦斯矿井,井田内主要含煤地层为石炭系上统太原组和二叠系下统山西组,矿井主采煤层从自上而下依次为3、6、9、10、11、12#煤层,其中3、9、11#为稳定的全区可采煤

层,6、10、11、12#煤层局部可采。井田地质构造总体为一宽缓的背斜向斜相间的褶曲构造,地层平缓,地层倾角均值为9°。6#煤层6303综放工作面设计走向630 m、倾向斜长为213 m,埋深均值为100 m,回采区域内煤层厚度为4.95 m,顶板岩性以粉砂岩、砂质泥岩为主,底板岩性以泥岩为主。6303综放工作面设计推进速度为4.8 m/d,采高为2.7 m、放煤高度为2.1 m,工作面布置的主要综放设备包括有ZF6800/17/32型支撑掩护式液压支架、MGTY300/700-WD的双滚筒采煤机割煤(采高2.7 m、滚筒截深0.8 m)、前部SGZ-764/630刮板输送机、后部SGZ-800/800刮板输送机等,工作面回采瓦斯绝对涌出量为0.79 m³/min。

6#煤层下覆9~11 m为9#煤层,煤层厚度均值为3.6 m、煤质为优质的无烟煤、开采经济效益十分显著。6303综放工作面下覆9#煤层疑似存在的不明采空区,而且出于安全考虑无法深入采空区探测采空区的实际状况,因此需结合现场情况针对性制定下覆煤层采空区探测及充填加固技术方案,以便确保工作面煤炭安全回采。

3 底板采空区探测及稳定性分析

3.1 底板采空区探测

为了探测6303综放工作面下覆9#煤层疑似采空区分布情况,矿并于2022年12月在回采运输巷、回风巷按照50 m间距布置钻场,并在钻场内均按30°角施工探测钻孔;其中运输巷内布置的探测钻孔均正常钻进,而布置在回风巷侧的探测钻孔探测到9#煤层采空区,具体探测探测钻孔布置情况及探测底板9#煤层采空区情况如图1所示。回风巷探测钻孔探测结果见表1。

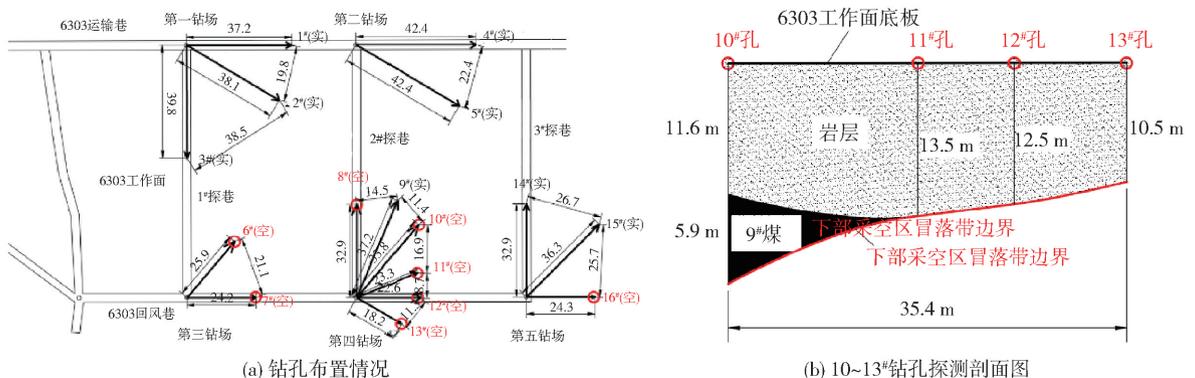


图1 6303综放工作面探测孔布置及探测结果

根据图1、表1可知,6303综放工作面底板到下覆9#煤层上边界的距离在9.5~14.5 m;下覆9#煤

层采空区集中分布在工作面回风巷一侧;探测发现4203采面底板的层理较发育,完整性较差。

表1 探测孔探测过程

钻孔编号	方位角/(°)	倾角/(°)	钻进描述	钻孔断面
7#	90	-30	1~8 m 灰水, 8~11 m 白水, 11~21 m 自灰水, 21~22 m 黑灰水, 22~27 m 黑水钻到28 m 处突然不回水	
8#	0	-30	1~2 m 水, 3~8 m 黑灰色, 9~11 m 黑水, 12 m 黑灰水, 13~27 m 白灰水, 28~29 m 黑灰水, 30~38 m 黑, 39 m 见空	
10#	40	-30	1 m 黑水, 2~5 m 灰水, 6~7 m 黑灰水, 8~9 m 灰水, 10~29 m 白灰水, 24~85 黑灰水, 36~39 m 白灰水, 40 m 见空	
11#	68	-30	1~2 m 黑水, 3~15 m 灰水, 16~27 m 白灰水, 28 m 见空	
12#	90	-30	1~4 黑水, 5 m 灰水, 6~11 m 黑灰水, 12~25 m 白灰水, 26 m 见空	
13#	120	-30	1~6 m 白水, 7~9 m 黑灰水, 10~21 m 白水, 22~25.5 m 不回水见空	
16#	90	-30	1 m 黑水, 2~4 m 黑灰水, 5~7 m 灰水, 8~16 m 白水, 17~19 m 白灰水, 20~28 m 黑水, 29 m 见空	

3.2 工作面底板稳定性分析

3.2.1 理论分析

6303 综放工作面回采引起的超前支承压力集

中在工作面前方煤体以及底板深部,随着应力重新分布导致底板一定范围内形成塑形破坏区,具体底板破坏区可细分为主动极限区域(OAB)、过渡区域

(OBC)及被动极限区(OCD),具体如图2所示。工作面回采引起的支承压力会导致底板出现变形破坏,主要影响因素有工作面斜长、开采深度、底板岩性情况等。由于6303综放工作面底板与下覆9#煤层采空区岩性以泥岩、砂质泥岩及砂岩为主,因此采面回采后底板破坏深度综合采用断裂力学、塑性力学进行分析。

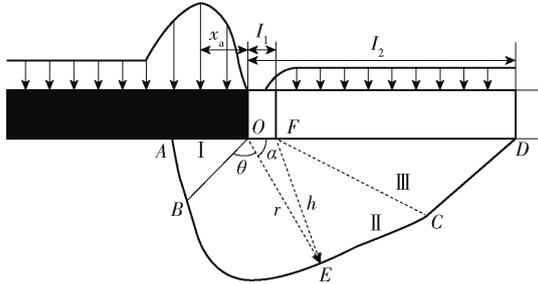


图2 工作面底板破坏区分布示意图

按照断裂力学进行分析时,工作面回采后底板最大脆性破断深度 D_{1max} 可通过下述公式计算:

$$D_{1max} = \frac{1.57\gamma^2 H^2 L}{4R_C^2} \quad (1)$$

式中: γ 为工作面底板岩体容重,取 25 kN/m^3 ; H 为工作面埋深,取 100 m ; L 为工作面斜长,取 213 m ; R_C 为底板岩层抗压强度,取 26.25 MPa 。将上述参数带入公式(1)即可求得 $D_{1max} = 0.75 \text{ m}$ 。

按照塑性力学进行分析时,工作面回采后底板最大塑性深度 D_{2max} 可通过下述公式计算:

$$D_{2max} = \frac{0.015H\cos\varphi_0}{2\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)\tan\varphi_0\right] \quad (2)$$

式中: φ_0 为工作面底板岩层内摩擦角,取值 30° ; H 为工作面埋深,取值 100 m 。将上述参数带入公式(2)即可求得 $D_{2max} = 11 \text{ m}$ 。

通过上述分析得知,6303综放工作面回采后底板 $0 \sim 0.75 \text{ m}$ 范围内出现脆性破断、 $0.75 \sim 11 \text{ m}$ 范围内出现塑性破坏,而前期探测发现6303综放工作面底板到下部9#煤层采空区上边界的距离 $9.5 \sim 14.5 \text{ m}$,同时底板岩层自身承载能力较差,在6303综放工作面开采扰动、采动压力等作用下容易导致底板出现下沉,从而导致工作面开采出现安全风险。

3.2.2 模拟分析

采用FLAC^{3D}分析,6303综放工作面在9#煤层采空区上回采时底板塑性区分布表情况、垂向应力分布情况等,以便更好的掌握底板9#煤层采空区对

工作面回采影响。具体现场模拟时采用的工作面顶底板岩性参数见表2,构建的模拟模型长、宽、高分别为 180 m 、 150 m 、 60 m ,模型底部及四周均为固定边界,顶部为自由边界且均匀施加 2.5 MPa 载荷。模拟时6303综放工作面与下覆9#煤层采空区层间距取 11 m ,岩层岩性以泥岩为主。

表2 工作面顶底板岩性参数

岩性	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	剪切模量/GPa	体积模量/GPa
粉砂岩	2450	4.8	6.0
砂质泥岩	2350	1.6	1.9
煤	1300	0.9	1.2
泥岩	2400	1.4	1.6

具体在9#煤层采空区上部回采时工作面底板塑性区、应力分布情况如图3所示。从图3看出,6303综放工作面在9#煤层采空区上回采底板塑性区与采空区顶板直接连通,底板塑性破坏深度超过层间距;特别是在采面迎头位置垂向应力集中,底板出现拉应力、峰值为 0.78 MPa ,底板在拉应力、垂向应力等综合作用下更容易出现离层、垮落等问题,从而导致工作面底板出现较大变形;6303综放工作面在9#煤层采空区上回采时容易出现底板下沉、塌陷问题,进而引起工作面液压支架、采煤机、刮板输送机等设备倾倒、失稳等,给工作面煤炭安全高效生产带来严重威胁^[9-10]。

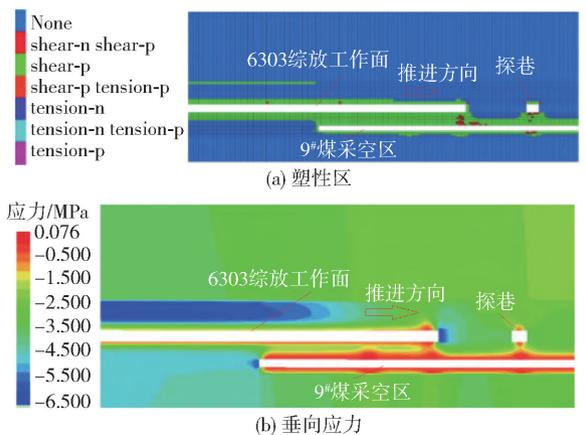


图3 采空区上覆工作面回采期间塑性区及应力分布图

对采空区进行充填加固后模拟结果如图4所示,采空区充填加固后充填体给9#煤层采空区顶板提供较大的支撑作用力;在充填体支撑作用下6303综放工作面在9#煤层采空区上回采底板塑性区分布范围明显降低,底板塑性区与采空区顶板塑性区未能联通,底板存在有一定范围的弹性区,弹性区宽

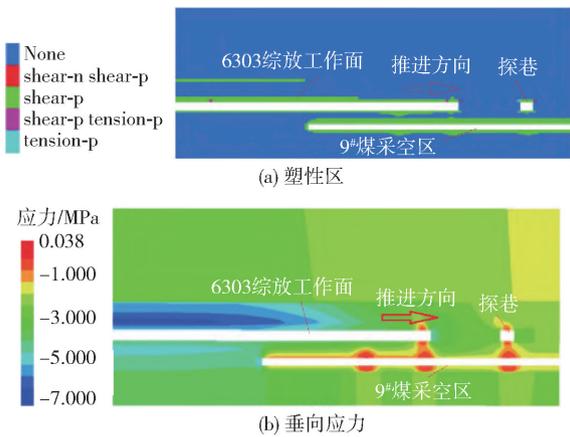


图4 采空区加固后上覆工作面回采期间塑性区及应力分布图

度约为 2 m;同时 6303 综放工作迎头底板位置应力分布得以明显改善,底板拉应力分布范围明显降低,虽然底板仍出现有拉应力,但是应力峰值降至 0.038 MPa 以内,拉应力整体较小,不会导致底板岩层出现大范围变形问题,有助于维护工作面底板稳定^[11-12]。

4 工作面底板采空区加固技术

充填材料是 6303 综放工作面下部采空区充填中的关键组成部分,目前使用的充填材料有化学浆液、水泥浆液、高水材料与粉煤灰混合料,以及空巷充填材料四大类。具体上充填材料的优缺点对比见表 3。

表 3 充填材料优缺点分析结果

加固材料	优点	缺点	加固成本/元·m ⁻³
普通水泥浆液	单价低、来源广、强度高	流动性差、用量大、劳动强度高	1 100
水泥-水玻璃双液浆	凝结时间可调、结石率高	流动性差、用量大;钻孔工作量大、劳动强度高、结石体强度低	1 300
波雷因、马丽散等	凝固时间可调、强度大	对环境有一定污染,反应固化热高、单价高、用量大、钻孔工作量大	2 500
高水材料 + 粉煤灰	材料单价较低	流动性差、运输成本高、钻孔工作量大、工艺复杂、劳动强度高	875
空巷充填材料	凝结时间可调、水灰比高、工艺简单、工期短、劳动强度低	强度偏低	633

6303 综放工作面埋深较浅(均值为 100 m),对下覆的 9#煤层采空区进行充填加固后即可与采空区内破碎煤岩体相互配合实现工作面底板支撑。在确保充填效果基础上,为降低成本、钻孔工程量及劳动强度,在分析现有充填材料基础上选用空巷充填加固采空区^[13-14]。

煤层采空区进行加固,根据以上研究结果,参考以往的工程实践,考虑孔底可能存在部分老窑水,浆液的水灰比确定为 4:1,凝结体终强 2.5 MPa,注浆压力控制在 3 ~ 5 MPa。空巷充填材料分甲、乙料两部分,配比 1:1,需分别加水搅拌输送,泵站点用 2 路钢管供水,供水能力 20 m³/h 以上。具体充填系统布置情况如图 5 所示。

利用 6303 综放工作面内布置的探测钻孔对 9#

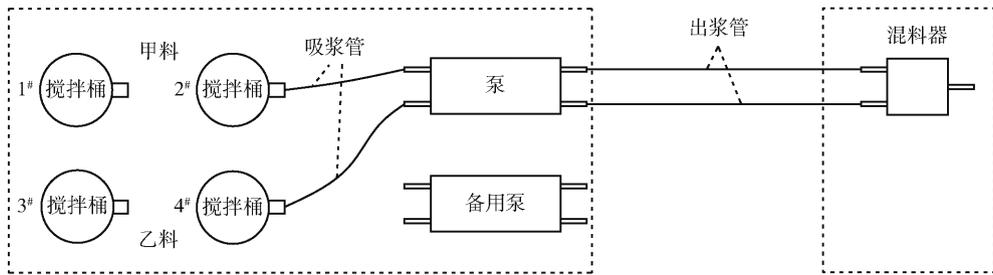


图5 充填系统示意图

5 结论

(1)6303 综放工作面回采面临的隐患为下覆 9#煤层采空区范围不确定,工作面底板不稳定、液压支架在过采空区过程中存在失稳、陷落等问题。为此,在 6303 综放工作面布置钻场探测下覆 9#煤层

采空区分布范围,发现下部 9#煤层的采空区集中分布在 6303 综放工作面回风巷侧;6303 综放工作面与 9#煤层采空区见岩层厚度在 9.5 ~ 14.5 m,岩层完整性较差、层理较发育。

(下转第 50 页)

- random vibration analysis of a 3D train-bridge system using the probability density evolution method [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 366: 173 - 189.
- [15] XIN L, LI X, ZHU Y, et al. Uncertainty and sensitivity analysis for train-ballasted track-bridge system [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(3): 453 - 471.
- [16] SU C, XIAN J, HUANG H. An iterative equivalent linearization approach for stochastic sensitivity analysis of hysteretic systems under seismic excitations based on explicit time-domain method [J]. *Computers and Structures*, 2021, 242: 106396.
- [17] SU C, WU Z, XIAN J. Stochastic dynamic analysis of vehicle-bridge coupled systems with nonlinear Hertz contacts by explicit time-domain method [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020(1): 1 - 23.
- [18] 任新惠, 苟利珍, 武彤. 运力受扰下的物流无人机干扰恢复模型[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(1): 407 - 413.
- [19] 尼俊红, 吕梦楠. 无人机与车辆协助下的分布式多任务边缘计算卸载算法[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 1045 - 1051.
- [20] 崔琼, 李建华, 王宏, 等. 基于节点修复的网络化指挥信息系统弹性分析模型[J]. *计算机科学*, 2018, 45(4): 117 - 121, 136.

(上接第44页)

(2) 综合断裂力学、塑性力学理论分析方法及数值模拟手段对6303综放工作面回采过9#煤层采空区时底板稳定性进行分析, 发现: ①工作面回采后底板0~0.75 m范围内出现脆性破断, 0.75~11 m范围内出现塑性破坏; ②在未对采空区进行加固时工作面回采后底板塑性区与采空区顶板直接联通, 同时工作面前方应力集中明显、底板稳定性较差, 而对采空区进行加固后工作面底板塑性区分布范围明显降低, 底板存在有一定的弹性区同时应力分布得以明显改善, 对底板采空区进行加固有助于维护工作面底板稳定。

(3) 在综合分析现有充填加固材料基础上, 提出采用空巷充填材料加固9#煤层采空区, 并针对性给出充填加固方案及安全技术措施。工程应用后, 6303综放工作面过下覆9#煤层采空区期间, 底板未出现下沉、断裂及裂隙等情况出现, 综放设备等始终保持稳定, 工作面推进保持4.8 m/d推进速度。

[参考文献]

- [1] 韩磊, 董浩, 陆银龙. 小窑破坏区残留煤资源精细复采研究现状及进展[J]. *中国矿业*, 2022, 31(11): 89 - 94, 122.
- [2] 白亚光. 浅埋煤层重复采动下覆岩运动及裂隙演化规律分析[J]. *中国矿山工程*, 2022, 51(2): 60 - 65.
- [3] 陈永超, 孔德文, 孔庆伟. 薄层间距采空区下开采及3_下煤层破坏区开采的技术研究与应用[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2022(13): 159 - 161.
- [4] 刘县委, 张彦董, 单成方, 等. 煤层群接续开采方案优选评价研究[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(3): 32 - 39, 54.
- [5] 韦昌新, 李树静, 于贵生, 等. 大同矿区小窑开采严重破坏区安全掘进关键技术研究[J]. *煤炭技术*, 2020, 39(6): 24 - 25.
- [6] 吴士良, 李焯. 采用工作面超前注水法提高跨采底板巷道围岩稳定性[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(6): 46 - 50.
- [7] 侯艳峰. 4203综放工作面下覆采空区探测及充填稳定技术研究[J]. *山东煤炭科技*, 2021, 39(12): 48 - 51.
- [8] 史占东, 赵铁林. 近距离煤层过空巷底板破坏机制及支护对策[J]. *能源与环保*, 2023, 45(7): 298 - 305.
- [9] 张剑. 西山矿区近距离煤层群开采巷道围岩控制技术及应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
- [10] 张绍雨. 近距离煤层下行开采覆岩破坏规律及岩质边坡稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [11] 李昂, 纪丙楠, 牟谦, 等. 深部煤岩层复合结构底板破坏机制及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(3): 559 - 572.
- [12] 高建良, 蔡行行, 卢方超, 等. 特厚煤层分层开采下伏煤层应力分布及破坏特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 19 - 26.
- [13] 刘雨杭. 高应力软岩巷道膨胀混凝土充填接顶支护技术[J]. *有色设备*, 2020, 34(6): 36 - 40.
- [14] 吴昊燕, 刘育明, 寇永渊, 等. 深井矿山下向水平分层充填开采与水平矿柱应力演化研究[J]. *中国矿山工程*, 2021, 50(6): 1 - 6.