扫码阅读下载
张卫,陈玉涛,倪倩,等. 神南矿区“110工法”采空区覆岩稳定性研究[J]. 矿业安全与环保,2024,51(2):106-110.
ZHANG Wei,CHEN Yutao,NI Qian,et al. Study on stability of goaf overlying strata with “110 construction method” in Shennan mining area[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(2):106-110.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230091

神南矿区“110工法”采空区覆岩稳定性研究

张 卫[1],陈玉涛[2],倪 倩[3],臧立岩[4]

(1. 山西能源学院 地质与测绘工程系,山西 晋中 030600; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400039;
3. 山西地质博物馆,山西 太原 030024; 4. 煤炭工业太原设计研究院集团有限公司,山西 太原 030001)

摘要:以神南矿区为工程背景,采用岩体微观室内实验、现场监测、物理模拟实验(DIC监测、应变监测)和FLAC3D数值模拟方法,分析了矿区主要岩层岩体结构特征,获得了“110工法”(一种新型的无煤柱开采技术)开采工艺下采空区上覆岩体位移场和应力场的演变规律。研究结果表明:神南矿区岩体节理裂隙发育程度较高,岩体质量等级较差;110工法利用岩体的碎胀效应和高恒阻能量吸收锚索补偿力学支护特性,在千米级埋深的煤层开采中仍具有良好的沿空留巷效果;110工法下的采空区位移沉降从大到小依次为中部区域、切线侧区域、非切线侧区域。110工法的切顶卸压和高恒阻能量吸收锚索的联合开采技术,可为其他地下空间中大变形软弱围岩的稳定性研究提供科学依据。

关键词:采空区;110工法;干湿循环;数值模拟;物理模型

中图分类号:TD323 **文献标志码**:A **文章编号**:1008-4495(2024)02-0106-56

Study on stability of goaf overlying strata with “110 construction method” in Shennan mining area

ZHANG Wei[1], CHEN Yutao[2], NI Qian[3], ZANG Liyan[4]

*(1. Department of Geology and Surveying Engineering, Shanxi Energy Institute, Jinzhong 030600, China;
2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China; 3. Shanxi Geological Museum, Taiyuan 030024, China;
4. Coal Industry Taiyuan Design and Research Institute Group Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)*

Abstract: Based on the engineering background of Shennan mining area, the structural characteristics of the rock structure of the main rock layers in the mining area were analyzed by rock microscopical laboratory experiment, field monitoring, physical simulation experiment (DIC monitoring and strain monitoring) and FLAC3D numerical simulation. The evolution law of the displacement and stress fields of overlying in goaf rock ingoaf under the mining technology of “110 construction method” (a new mining technology without coal pillar) was obtained. The research results show that the rock mass in Shennan mining area has a high degree of joint fracture development and the quality grade of rock mass is poor. The 110 construction method still has good effect of gob-side entry retaining in the mining of coal seam with kilometer level burial depth by using the fragmentation and expansion effect of rock mass and high constant resistance energy absorbing anchor cable compensating mechanical support characteristics. The displacement settlement law of the mining area under the 110 construction method is central area > tangent side area > non-tangent side area. The combined mining technology of 110 construction method of roof cutting and pressure relief and high constant resistance energy absorbing anchor cable can provide scientific basis for the stability study of large deformation and weak surrounding rocks in other underground spaces.

Keywords: goaf; 110 construction method; wetting-drying cycle; numerical simulation; physical model

近年来,随着煤炭开采深度的增加,地应力增大、围岩失稳等导致的岩爆、坍塌事故频发,严重影响煤炭企业的安全生产[1-2]。岩体的失稳多从节理处开始发育,而节理属于岩体内部的缺陷构造,是一种具有低强度的不连续面[3]。沿空留巷技术是煤矿

收稿日期:2023-02-09;2023-05-21修订

基金项目:2020年度山西省高等学校科技创新项目(2020L0730);2020年度山西省教育科学“十三五”规划专项课题项目(HLW-20137);2021年度山西省高等学校教学改革创新项目(J2021805)

作者简介:张 卫(1981—),女,山东无棣人,硕士,讲师,主要从事矿产普查与勘探方面的研究工作。E-mail:158576635@qq.com。

安全开采工艺的发展趋势之一[4-5]，但岩体节理是制约其应用效果的主要因素。110 工法作为沿空留巷技术的新成果已在多个矿区取得成功应用[6-7]，对节理发育矿区的安全生产帮助极大。

目前，国内外学者从微观、宏观角度出发分析了岩体的稳定性，并取得了丰硕的成果。张振南等[8]通过岩体压实实验，研究了岩块变形模量与应力、应变的关系；李建林等[9]分析了卸荷岩体的尺寸效应，得出了岩体节理的非线性动力学特征；SAINOKI 等[10-11]建立了遍布节理模型，分析了不同开采影响因素下最大剪切位移的响应规律；孙世杰等[12]构建了考虑节理强度的节理岩体力学模型，获得了节理岩体破碎程度对工作面稳定性的影响规律；杨舒冰等[13]研究了切顶卸压的角度和位置对留巷顶板的运移影响，得出了锚索支护角度对留巷的影响；杨光辉等[14]探讨了预制充填体的宽度对切顶卸压开采的支撑效果；孙广建等[15]分析了高应力大松动圈巷道围岩破坏特征与失稳原因，探究了顶板软岩巷道力学变形机制；许延春等[16]研究了工作面在回采过程中底板岩体视电阻率的变化特征，得出了切顶卸压能够有效减小底板破坏深度的结论；王维维等[17]在东荣三矿进行切顶成巷试验，成功通过超前切顶实现了安全留巷。此外，赤平极射投影法、岩芯非弹性应变恢复法、有限元及颗粒流数值模拟等方法也为岩体稳定性研究提供了帮助[18-21]。

综上所述，针对岩体稳定性，前人的研究多是从单一尺度进行。笔者基于神南矿区复杂的工程地质背景，结合电镜扫描实验、现场监测和物理模拟实验（DIC 监测、应变监测）方法对神南矿区 110 工法工作面上覆岩层岩体结构的稳定性进行多元化分析，获得更加全面、科学的采空区上覆岩体运动规律。

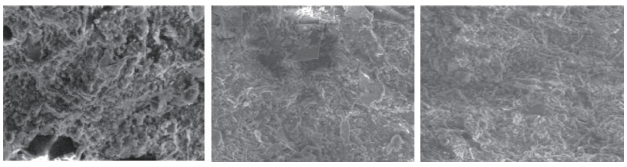
1　矿区地质概况

神南煤矿位于陕西省神木市西北部，地处黄河支流窟野河流域，以风沙区和黄土丘陵沟壑区为主，整体地形较为平坦。矿区干旱少雨，全年平均降雨量为 436.6 mm，蒸发量大，平均蒸发量为 1 740.1 mm，属典型的中温带半干旱大陆性季风气候。

神南矿区地层由老至新依次如下：三叠系上统永坪组（T_3y），侏罗系中统延安组（J_2y）、直罗组（J_2z），新近系上新统保德组（N_2b），第四系中更新统离石组（Q_2l），第四系上更新统萨拉乌苏组（Q_3s），第四系全新统风积沙（Q_4^{eol}）和冲积层（Q_4^{al}）。其中，侏罗系中统延安组（J_2y）为矿区的主要含煤地层。该地层上部遭受了不同程度的剥蚀，主要由浅灰白色中细粒长石砂岩、岩屑长石砂岩、灰—青灰色砂质泥岩、泥岩和煤层组成。

2　砂岩微观结构特征分析

煤矿井下施工主要采用清水钻进。为了研究干湿条件下砂岩的软化机制，运用 SEM 电镜扫描技术对不同饱水时间的砂岩进行研究，从微观结构入手观察饱水过程中砂岩孔隙、裂隙形态等变化。统一取放大 1 000 倍的照片进行对比，如图 1 所示。



（a）天然状态　（b）第一次干湿循环　（c）第二次干湿循环

图 1　干湿循环作用下砂质页岩 SEM 照片

Fig. 1　SEM photos of sandy shale under dry-wet cycle

由图 1 可看出：

1）天然状态下只有零星的孔隙及裂隙且范围小，黏粒组合呈薄层状结构，颗粒胶结完整，整体性好；断面上矿物颗粒清晰，结构致密光滑，棱角分明。岩体质量较高。

2）第一次干湿循环后，裂隙明显发育，集合体周围胶结物被溶蚀，形成环状沟槽；紧密的薄层状结构转变为薄片状开裂，薄片之间裂隙众多；矿物颗粒间有很多细小孔隙，局部微裂纹发育，脱落颗粒明显增多；矿物颗粒逐渐趋于圆滑，部分颗粒突出于胶结物之外。岩体质量中等。

3）第二次干湿循环后，粗颗粒与集合体联结的胶结成分基本丧失，松散地堆叠在一起，明显可见片状颗粒堆叠结构由原来的压实紧密状转变为呈一定程度的翻转状态；孔隙周围的微裂隙数量急剧增多，矿物颗粒基本无钙质胶结物包裹，大颗粒分解为小颗粒，可见较多脱落的颗粒；颗粒间的孔隙、裂隙发育明显，并逐渐汇集贯通，矿物发生明显崩解。岩体质量较差。

实验分析发现，干湿循环作用下砂岩微观结构特征变化明显，清水钻进时岩体内部节理裂隙发育，岩体强度变低，软化效应明显。

3　物理模拟实验

3.1　模型应力加载方式

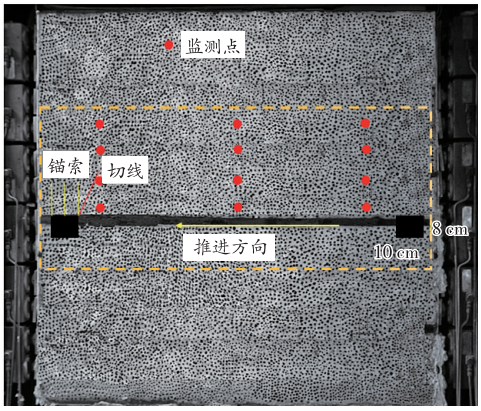
为分析在 110 工法的切顶卸压和高恒阻能量吸收锚索共同作用下的煤层沿空留巷效果，根据神南矿区煤层及岩层赋存地质条件，建立物理相似模型（相似比 1∶40，模型尺寸 1.6 m×0.4 m×1.6 m），

利用 DIC 位移监测技术和应变片对其进行监测。

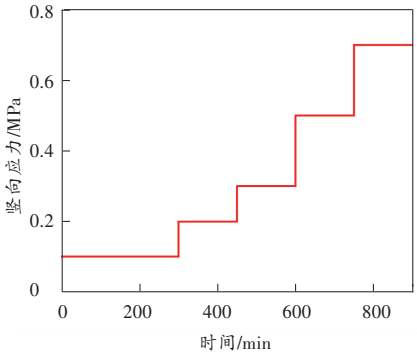
在模型工作面顶板每隔 40 cm 铺设 1 层应变片,每层设置 3 个监测点,共布置 4 层应变监测线;在左侧巷道设置 1 条长 10 cm、倾角 60°的切线,在左侧巷道顶板布设 27 根高恒阻能量吸收锚索,各锚索间距 4 cm。物理模型如图 2(a)所示。实验期间,前 300 min 对模型加载 0.1 MPa 模拟原岩竖向应力;300~450 min 加载 0.2 MPa,模拟 330 m 埋深的应力;450~600 min 加载 0.3 MPa,模拟 500 m 埋深的应力;600~750 min 加载 0.5 MPa,模拟 830 m 埋深的应力;750~900 min 加载 0.7 MPa,模拟 1 200 m 埋深的应力。竖向应力加载路径如图 2(b)所示。

3.2 监测数据分析

不同加压阶段采空区顶板竖向位移见表 1。由表 1 可以看出,当加压值为 0.7 MPa 时,切线侧顶板最大位移仅 18.82 mm,表明 110 工法工作面切线侧巷道支护成功。监测线距离采空区越近,其位移量越大。由于切线切断了巷道顶板与工作面顶板间力的传递,并且高恒阻能量吸收锚索对左侧巷道顶板的强力支护作用,因此巷道顶板位移呈现非对称分布,锚索控制区域的采空区顶板位移主要集中于切线侧和工作面中部区域。



(a)物理模型



(b)竖向应力加载路径

图 2 物理模型及竖向应力加载路径图

Fig. 2 Physical model and vertical stress loading path diagram

表 1 采空区顶板竖向位移对比

Table 1 Comparison of vertical displacement of goaf roof

竖向应力/MPa	非切线侧顶板位移/mm	切线侧顶板位移/mm	顶板最大位移/mm	裂隙发育情况
0.1	1.63	5.82	3.47	直接顶未发生明显变形
0.2	7.43	12.61	8.86	直接顶出现裂缝,基本顶无明显变化
0.3	8.13	19.23	21.46	直接顶断裂,基本顶出现裂缝
0.5	14.62	24.47	29.87	基本顶断裂,直接顶被填充
0.7	18.82	38.51	42.52	基本顶裂隙高度增高,形成裂隙带

4 数值模拟实验

物理模拟实验只研究了超载条件下 110 工法工作面的采空区覆岩位移规律。为了进一步研究在工作面推进过程中,110 工法对采空区覆岩位移的影响,利用 FLAC3D 模拟技术构建了三维数值模型,分析在 10.0 MPa 竖向应力作用下 110 工法工作面的采空区顶板位移规律。模型尺寸为 100 m×20 m×30 m,工作面布置方式同物理相似模型,其地层岩性及力学参数如表 2 所示。

表 2 模型地层岩性及力学参数

Table 2 Information of stratigraphic lithology and mechanical parameters of the model

岩层类别	厚度/m	密度/(kg·m^{-3})	体积模量/GPa	切变模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
中粒砂岩	6	2 450	1.86	1.12	1.5	4.2	27
泥岩	12	1 875	1.21	0.92	1.0	5.5	22
粉砂岩	2	2 200	2.57	2.31	2.5	4.5	30
煤岩	4	1 450	0.79	0.71	1.5	4.2	25
粉砂岩	8	2 200	2.57	2.31	2.5	4.5	30

当工作面推进超过 50 m 后,110 工法工作面采空区覆岩的竖向位移(z 方向)基本稳定,位移场云图如图 3 所示。

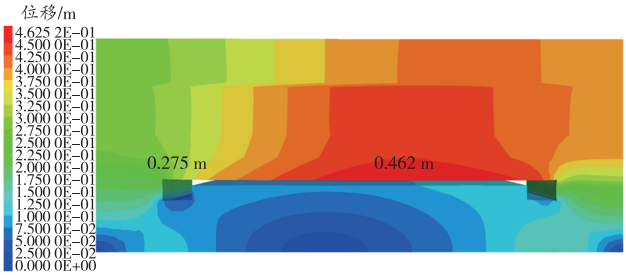


图 3　工作面推进 50 m 时采空区覆岩位移云图

Fig. 3　Cloud map of overlying rock displacement in goaf 50 m after the advancing of working face

由图 3 可知:随着工作面推进,工作面采空区和右侧未支护巷道的顶板最大位移为 0.462 m,支护巷道顶板的最大位移仅 0.275 m。由上覆岩体 z 方向位移场来看,采用高恒阻能量吸收锚索支护的巷道上覆岩体顶板位移较小且集中,周围岩体变形小且趋于稳定,在右侧未支护的巷道顶板工作区域内,顶板位移约为左侧支护区域位移的 1.7 倍,经过高恒阻能量吸收锚索支护,巷道周围岩体整体性较好。由于巷道开挖,顶板处出现应力集中现象,损伤裂隙在顶板处萌生,开挖工作面的上覆岩体内部层间的裂隙逐渐增多,上覆岩体损伤扩展并相互融合,最终形成开挖损伤区。

5　结束语

1)由扫描电镜实验得出,神南矿区含煤地层的岩体内部节理裂隙发育程度较高,岩体的组别质量为差和中等。在干湿循环作用下,砂岩整体强度变低,软化效应明显。进行第二次干湿循环后岩体内颗粒间的孔隙、裂隙发育明显,并逐渐汇集贯通,岩体发生明显崩解。

2)110 工法不同于传统采煤工法,切线的存在切断了巷道顶板与工作面顶板间力的传递,降低了回采动压对巷道围岩的影响程度。工作面回采后,顶板沿预裂位置垮落,利用矸石的碎胀特性进行采空区充填,随后通过高恒阻能量吸收锚索对巷道围岩进行支护。其中,当竖向加压 0.7 MPa(模拟现场 28.0 MPa)时巷道顶板竖向位移最大约为 42.52 mm,证明了 110 工法在千米级埋深的煤层开采中具有良好的沿空留巷效果。

3)由物理模型实验和数值模拟结果可知:高恒阻能量吸收锚索支护下的巷道顶板位移小于非切线侧位移,完全开挖时采空区和未支护巷道顶板的最大位移为 0.462 m,支护巷道顶板的最大位移为 0.275 m。110 工法下的上覆岩体位移沉降由大到小依次为采空区中部区域、切线侧区域、非切线侧区域。

参考文献(References):

[1] 陈卫忠,王鲁瑀,谭贤君,等.裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):1945-1961.
CHEN Weizhong, WANG Luyu, TAN Xianjun, et al. State-of-the-art and development tendency of the underground engineering stability of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1945-1961.

[2] 尹超宇,冯光明,高鹏,等.工作面过空巷围岩失稳机理研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3):457-464.
YIN Chaoyu, FENG Guangming, GAO Peng, et al. Research on instability mechanism of surrounding rock in stage of working face passing abandoned roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 457-464.

[3] 蒋明镜,江华利,廖优斌,等.不同形式节理的岩质边坡失稳演化离散元分析[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(2):167-174.
JIANG Mingjing, JIANG Huali, LIAO Youbin, et al. Distinct element method analysis of the failure evolution of rock slope with different types of joints[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(2): 167-174.

[4] 陶志刚,张庆周,杨晓杰,等.下穿隧道开挖对松散堆积边坡稳定性影响的物理模型试验研究[J].煤炭学报,2022,47(增刊 1):61-76.
TAO Zhigang, ZHANG Qingzhou, YANG Xiaojie, et al. Physical model test study on the influence of tunnel excavation on the stability of loose accumulation slope[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 61-76.

[5] 司俊鸿,王乙桥,程根银,等.沿空留巷采空区煤自燃堵漏控风机制数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2022,49(2):40-45.
SI Junhong, WANG Yiqiao, CHENG Genyin, et al. Numerical simulation study on the mechanism of coal spontaneous combustion plugging and air control in goaf of gob-side entry retaining[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 40-45.

[6] 左建平,左书豪,孙运江,等.柠条塔矿不同深度覆岩波速特性及其物理参数相关性研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(4):791-799.
ZUO Jianping, ZUO Shuhao, SUN Yunjiang, et al. Wave velocity characteristics and its correlation with physical parameters of overlying strata at different depths in Ningtiaota Mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 791-799.

[7] 张文杰,何满潮,王炯,等.逆断层影响下无煤柱自成巷矿压规律及围岩控制[J].煤田地质与勘探,2023,51(5):1-10.
ZHANG Wenjie, HE Manchao, WANG Jiong, et al. Application of pillar-free self-formed roadway technology under the influence of reserse faults: Strata behavior law and surrounding rock control[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(5): 1-10.

[8] 张振南,缪协兴,葛修润.松散岩块压实破碎规律的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):451-455.
ZHANG Zhennan, MIAO Xiexing, GE Xiurun. Experimental study on compaction and crushing law of loose rock block[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 451-455.

[9] 李建林,王乐华,孙旭曙.节理岩体卸荷各向异性力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):892-900.
LI Jianlin, WANG Lehua, SUN Xushu. Experimental study on

anisotropic mechanical characteristics of jointed rock masses under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(5):892-900.

[10] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic modelling of fault-slip with Barton's shear strength model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2014,67:155-163.

[11] SAINOKI A,MITRI H S. Effect of slip-weakening distance on selected seismic source parameters of mining-induced fault-slip[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015,73:115-122.

[12] 孙世杰,田茂霖,肖洪天.基于GSI的深部节理化岩体工作面稳定性分析[J].煤矿安全,2023,54(6):107-112.
SUN Shijie,TIAN Maolin,XIAO Hongtian. Stability analysis of deep jointed rock face based on GSI[J]. Safety in Coal Mines,2023, 54(6):107-112.

[13] 杨舒冰,王梅,杨永康,等.缓倾斜煤层无煤柱切顶成巷切缝角度及位置研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(5):32-46.
YANG Shubing,WANG Mei,YANG Yongkang,et al. Study on the dip angle of borehole and position of roof cutting for gob-side entry retained by roof pre-fracturing in gently inclined coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2023,5(5):32-46.

[14] 杨光辉,王开,张小强.深井巷内预制充填体切顶无煤柱开采技术研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(1):67-74.
YANG Guanghui,WANG Kai,ZHANG Xiaoqiang. Study on non-pillar mining technology of preset packing body and roof cutting in deep well roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2020,2(1):67-74.

[15] 孙广建,张洋,常晓亮,等.大松动圈围岩沿空留巷切顶卸压-恒阻补强分区支护技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2022, 4(4):43-55.
SUN Guangjian, ZHANG Yang, CHANG Xiaoliang, et al. Technology of partition support by cutting-roof pressure relief and constant resistance reinforcement for double-used roadway with deep excavation-induced damage zone[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2022,4(4):43-55.

[16] 许延春,罗亚麒,张书军,等.切顶卸压工作面底板采动破坏实测研究[J].煤矿开采,2018,23(6):94-98.
XU Yanchun, LUO Yaqi, ZHANG Shujun, et al. Practical study of mining failure of working face floor with roof cutting pressure relief[J]. Coal Mining Technology,2018,23(6):94-98.

[17] 王维维,李凤义,兰永伟.切顶卸压沿空留巷技术研究及应用[J].黑龙江科技大学学报,2014,24(1):20-23.
WANG Weiwei,LI Fengyi,LAN Yongwei. Study on and application of pressure relief by roof cutting on gob-entry retaining[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2014, 24(1):20-23.

[18] 张水兵,谢建斌,林煌超,等.岩体稳定性分析的赤平极射投影法[J].现代矿业,2017,33(12):204-208.
ZHANG huibing,XIE Jianbin,LIN Huangchao,et al. Stereographic projection method for stability analysis of rock mass[J]. Modern Mining,2017,33(12):204-208.

[19] EMAD M Z,MITRI H,KELLY C. Dynamic model validation using blast vibration monitoring in mine backfill[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,107:48-54.

[20] XU D, FU P F, NI W, et al. Characterization and hydration mechanism of ammonia soda residue and Portland cement composite cementitious material[J]. Materials,2021,14(17):4794.

[21] 赵洲,魏江波.基于颗粒流方法的堆积层滑坡运动过程模拟[J].煤田地质与勘探,2017,45(6):111-116.
ZHAO Zhou,WEI Jiangbo. Simulation on the movement process of accumulated layer landslide based on PFC2D[J]. Coal Geology & Exploration,2017,45(6):111-116.

(责任编辑:林桂玲)

(上接第105页)

[21] 于斌,杨敬轩,高瑞.大同矿区双系煤层开采远近场协同控顶机理与技术[J].中国矿业大学学报,2018,47(3):486-493.
YU Bin,YANG Jingxuan,GAO Rui. Mechanism and technology of roof collaborative controlling in the process of Jurassic and Carboniferous coal mining in Datong mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(3):486-493.

[22] 王娟,薛楠楠,张建荣,等.基于G1法的电力工程质量管理标准化评价云模型研究[J].工程管理学报,2022,36(1):129-134.
WANG Juan, XUE Nannan, ZHANG Jianrong, et al. Quality management standardization evaluation of power engineering based on G1 method and cloud model[J]. Journal of Engineering Management,2022,36(1):129-134.

[23] ZHANG F,WANG P Y,MU P,et al. A comprehensive evaluation method for the service status of groins in waterways based on an AHP-improved CRITIC combination weighting optimization model [J]. Sustainability,2022,14(17):10709.

[24] 严惊涛,刘树光.基于组合赋权的对地攻击无人机自主能力云模型评价[J].北京航空航天大学学报,2023,49(12):3500-3510.
YAN Jingtao, LIU Shuguang. Combination weighting based cloud model evaluation of autonomous capability of ground-attack UAV [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023,49(12):3500-3510

[25] 张逢雨.基于云模型的EPC装配式混凝土建筑供应链风险评价研究[D].赣州:江西理工大学,2020.

[26] 汪明武,王霄,龙静云,等.基于多维联系正态云模型的泥石流危险性评价[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(2):368-375.
WANG Mingwu, WANG Xiao, LONG Jingyun, et al. Risk assessment of debris flow based on multidimensional connection normal cloud model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021,29(2):368-375.

[27] 山红梅,杨雪静.基于云模型-IAHP的生鲜农产品冷链物流服务水平评估[J].公路交通科技,2020,37(10):142-150.
SHAN Hongmei,YANG Xuejing. Evaluation of cold chain logistics service level of fresh agricultural products based on cloud model-IAHP[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2020,37(10):142-150.

(责任编辑:熊云威)