Doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.03.002

地下空区顶板破坏特征物理实验及数值模拟

张 泉[1],陶治臣[2],王 磊[1],陈晓青[1]
(1.辽宁科技大学 矿业工程学院,辽宁 鞍山 114051;
2.鞍山钢铁集团矿山有限公司,辽宁 鞍山 114051)

摘 要:针对地下空区充填后难以接顶引起顶板破坏并导致地表沉陷的问题,采用物理相似模拟和数值模拟的方法从破坏形式、应力等方面研究了地下空区顶板的破坏变形规律,并对空区顶板内部进行位移监测,降低了单一因素影响的偏离性,提高了空区顶板稳定性评价的合理性。通过物理实验发现:地下空区顶板在垂直加载下,随荷载增加,裂隙首先出现在顶板中心区域,并逐渐向侧帮发育,直至模型彻底破坏;通过数值模拟实验发现:中央区域存在拉应力集中区,该区域最容易破坏;通过监测结果发现:随载荷增加,顶板周端位移较中央部位更小,越接近顶板中心,顶板的位移量差值越小。将物理实验、数值模拟实验与监测结果进行对比,三者吻合较好。研究结果对地下空区处理、地下开采方法及矿柱的留设具有指导意义。

关键词:岩石力学;地下空区;破坏形式;应力-应变;数值模拟;稳定性
中图分类号:TD 325 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-4172(2022)03-0010-06

Physical experiment and numerical simulation of roof failure characteristics in underground mined-out area

ZHANG Quan[1],TAO Zhichen[2],WANG Lei[1],CHEN Xiaoqing[1]
(1.School of Mining Engineering,University of Science and Technology Liaoning,Anshan Liaoning 114051,China;
2.Anshan Iron & Steel Group Mine Co.,Ltd.,Anshan Liaoning 114051,China)

Abstract:In response to the problem that none-tight contact of filling body and the roof in the underground mined-out area causing roof damage and surface subsidence,this paper uses physical similar simulation and numerical simulation to study the damage deformation law in the roof in the underground mined-out area in terms of damage form and stress,at the same time,the internal displacement of the roof in underground mined-out area is monitored,which reduces the deviation of the influence of single factor and improves the reasonableness of the stability evaluation of the roof of the mined-out area. Through the physical experiment,it is found that under vertical loading,with the increase of load,cracks first appear in the central area of the roof,and gradually develop to the sidewall,until the model is completely destroyed. Through the numerical simulation experiment,it is found that there is a tensile stress concentration area in the central region,which is the most vulnerable to damage. The monitoring results show that with the increase of load,the displacement of the around roof is smaller than that of the central area,the closer to the roof centre,the smaller the displacement difference of the roof. The physical experiment,numerical simulation experiment and monitoring results are compared,and the three are in good agreement. The analysis results have guiding significance for the treatment of underground mined-out areas,underground mining methods and pillar remaining.

Key words: rock mechanics; underground mined-out area; damage form; stress-strain; numerical simulation; stability

收稿日期:2022-03-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174110)
作者简介:张 泉(1996—),男,硕士研究生,主要从事金属矿山开采技术研究。
通信作者:陈晓青(1967—),男,教授,博士,主要从事数字矿山、采矿工程与工艺方面的教学和科研工作。

由于地下矿床开采或其他地质原因,地下留有大量空区[1],随着时间的推移导致空区覆岩的移动和地表的下沉。地表下沉不仅会危害人类生命和经济财产,而且也会导致地貌和地质变化,影响环保安全[2-3]。空区顶板破坏及覆岩移动规律

一直是业内专家的研究热点。

近年来,随着地下空区安全问题的出现,国内外专家对地下空区顶板的安全厚度和极限跨度进行了大量研究。如苗成文等[4]通过长宽比梁板法和数值模拟方法计算分析了安家岭露天矿地下空区顶板合理安全厚度和极限跨度。李超亮[5]通过 FLAC^{3D}和 RFPA 软件对铁矿地下空区顶板稳定性进行模拟,得到了空区顶板安全厚度与跨度的关系。FREIDIN 等[6]通过有限元数值模拟法研究了空区覆岩的应力状态和稳定性,得到了空区顶板厚度和跨度的安全值规律。王文先等[7]通过现场充分调查并采用多种不同理论分析方法计算了空区顶板安全临界厚度和采空区顶板的极限跨度。柳小波等[8]通过一种基于薄板理论的空区顶板厚度计算方法,揭示了空区顶板安全厚度与顶板几何尺寸、矿石力学性质的关系。

空区稳定性涉及因素不仅包含空区顶板厚度和跨度,其他影响因素也非常多,如采矿方法、构造应力、覆岩岩性等,是一个极其复杂的矿山问题,国内外学者通过从不同角度或采取不同方法已经对空区稳定性进行了大量的细致研究。如郭广礼等[9]根据不同岩层的特点建立了空区顶板相似物理模型,通过模型计算得到了空区稳定安全的埋深。张建等[10]根据矿区现场地质条件,在基于工程实践的基础上,建立了不同深度的空区相似物理模型进行空区顶板稳定性分析。张海波等[11]根据矿区现场地质条件,通过有限差分软件 FLAC^{3D}对空区进行了模拟研究。杨金林等[12]根据矿区现场地质条件,通过 UDEC 软件建立了地下空区模型,研究了不同开采条件及外界因素的影响下空区的稳定性。汪杰等[13]基于 Kachanov 蠕变损伤理论构建了采场顶板蠕变损伤模型,深入分析了空区顶板破坏失稳时间。刘洋等[14]通过综合考虑区域地质水文、岩石强度性等多项因素,建立了基于 AHP —模糊评价失稳预测模型的空区稳定性评价指标体系。目前学者对于空区顶板稳定性分析预测大多方法单一,鲜有两种及以上分析方法综合评价空区顶板稳定性问题。

本文基于弹性薄板理论,配制空区顶板的相似模拟材料,通过构建空区模型研究空区顶板的破坏特征,与此同时,采用数值模拟手段从位移、应力等方面研究均布荷载下空区顶板移动变形规律,降低单一因素影响的偏离性,提高采空区顶板稳定性评价的合理性。

1　相似模拟实验

依据王正红[15]基于弹性力学对薄板理论的基本阐述,本文选用薄板理论对空区顶板所产生的力学反应形式进行分析。为便于计算分析,本文模型采用以下假设与规定:①将顶板视为连续均匀介质,空区各板面的强度都是一致且规则分布;②模型中的顶板厚度取其实际厚度的平均值;③忽略由于各向载荷的增加所引起的微小位移;④只考虑空区顶板受到的纵向上方的力。

用 C20 混凝土制作试件,试件外形为长方体形状,顶部及底部长 38 cm,宽 28 cm,高度为 45 cm,顶板厚度为 15 cm,其内部形成采空区,侧帮的厚度为 5 cm,每组制作三个模型。

材料规格配比表如表 1 所示。试件示意如图 1 所示。

表 1　材料规格配比表

Table 1　Material specification and proportion

规格/强度等级	32.5 MPa 水泥	中砂	碎石	水
配比	0.400	0.411	0.870	0.220

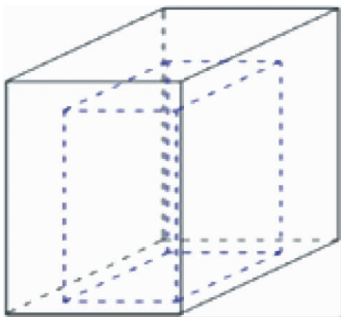


图 1　地下空区物理模型

Fig. 1　Physical model of goaf

试件在辽宁科技大学矿业工程学院实验室单轴压力试验机上进行,实验加载速率设置为 0.05 mm/min,采用分布均匀施压的方式,准备 12 个 4 cm×4 cm×1 cm 的铁块,放置在顶板的上部,每个铁块的间距为 4 cm,并且距顶板的四个边界保持同等的距离,均匀分布在顶板的上方,通过铁块布置进行加载,如图 2 所示。

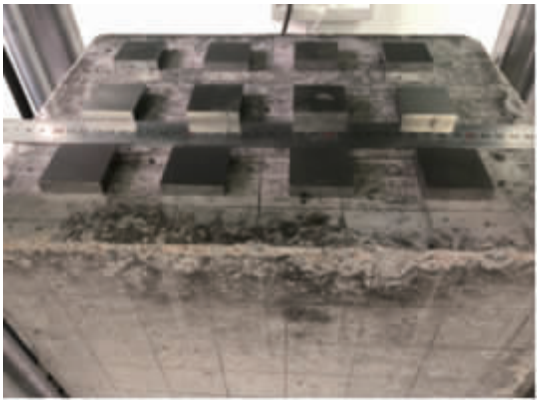


图 2 均布加载铁块布置情况

Fig. 2 Layout of uniformly loaded iron blocks

2 实验结果分析

经过多次实验结果对比,发现得到的破坏规律大体一致,因此选用其中一个模型进行试验结果分析。

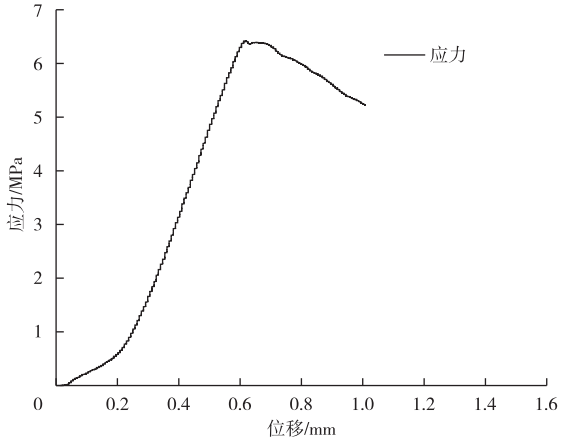


图 3 加载试件应力-应变曲线图

Fig. 3 Stress-strain curve of loaded specimen

由图 3 应力-应变曲线可知该模型所能承受的最大应力约为 6.4 MPa。加载过程可分为压密阶段、线弹性变形阶段、非线性变形阶段、残余变形阶段四个阶段。其中在位移产生约 0.2 mm 之后发生突变,模型产生大幅度位移。

从图 4 中可以看出,顶板破坏所呈现的裂隙发育现象为在顶板中心区域出发形成一条竖直裂隙直达顶板长边两侧中部,在到达两侧时呈放射状向左右两侧发育,裂隙发育直达侧帮部位,最终应力达到峰值时模型彻底破坏。由此可知,空区顶板受纵向加载的作用时,最易破坏的部位为中心部位,应在其后的采矿工作中,给予一定的支护手段以达到工业安全保障。

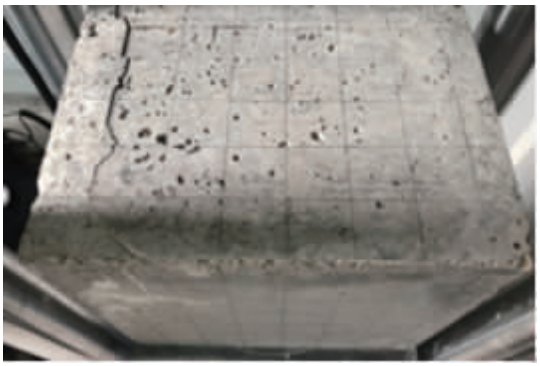


图 4 空区顶板破坏情况

Fig. 4 Roof damage of empty area

3 地下空区顶板数值模型构建

由于开展研究的地下空区顶板、围岩都是地质材料,在力学角度来讲,顶板可以看作各向同性的弹塑性连续介质,在 FLAC^{3D} 数值模拟计算中需选用莫尔库伦破坏准则来进行模拟[16],其力学模型为:

$$f_s=\sigma_1-\sigma_3\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}-2C\sqrt{\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}} \tag{1}$$

$$f_t=\sigma_3-\sigma_t \tag{2}$$

式中:σ_1 为最大主应力,MPa;σ_3 为最小主应力,MPa;σ_t 为抗拉强度,MPa;C 为内聚力,MPa;ϕ 为内摩擦角,(°)。

其中,在地下空区顶板处于拉应力作用下,当拉应力大于模型材料的抗拉强度时,即:f_t 大于 0 时,顶板将会产生受拉破坏。

为了更准确地得到顶板各部位的变化情况,在顶板中部切面设置监测点,探究顶板受到纵向载荷时,各个区域的应力场变化情况,通过模拟计算得出等值云图从而对顶板所产生的位移、应力应变等进行分析。基于莫尔—库仑强度理论的地下空区数值模型如图 5 所示,设置物理力学参数如表 2 所示。

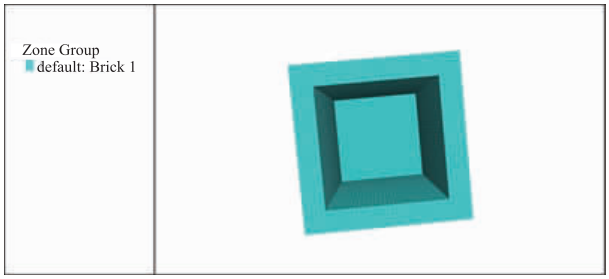


图 5 地下空区初始数值模型

Fig. 5 Initial numerical model of goaf

表 2　数值计算岩体物理力学参数选取

Table 2　Selection of physical and mechanical parameters of rock mass for numerical calculation

宏观参数	密度/(kg·m^{-3})	单轴抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)
取值	2 400	1.54	2.55×10^4	0.2	45

4　模拟结果分析

4.1　主应力分布规律

图 6 为地下空区顶板在加载过程中分为四个阶段垂直走向的最大主应力分布情况。通过应力云图中主应力变化情况可以看出,顶板上出现了拉应力集中区域,主要集中在顶板的中央部位。随着载荷的持续增加,在顶部周围形成一圈较为明显的压应力,压应力值逐渐增大;而在顶板的中部,最大拉应力由环状慢慢向中心收缩,最终集中在中心部位。由此可以推导出顶板产生拉应力最大的部位为顶板的中心部位。

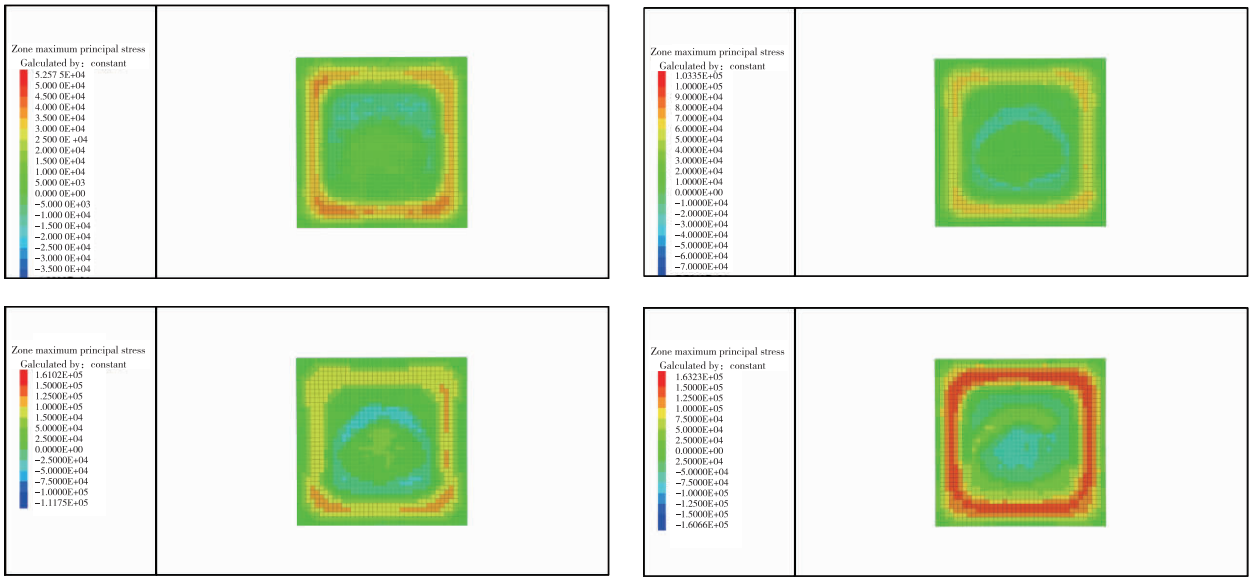


图 6　顶板最大主应力分布情况

Fig. 6　Distribution of maximum principal stress of roof

4.2　正应力分布规律

随着顶板接受载荷的递增,每个阶段所呈现的正应力情况有所改变,空区顶板的水平正应力分布等值云图如图 7 所示。顶板上水平正应力分布通过

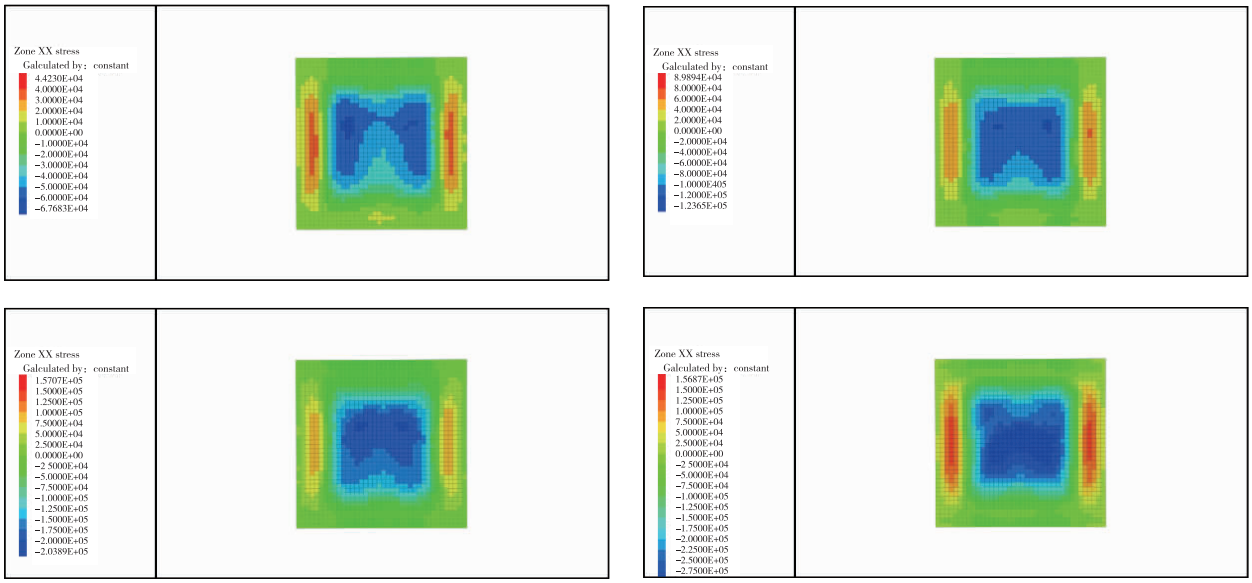


图 7　水平正应力分布情况

Fig. 7　Horizontal normal stress distribution

X 方向应力云图进行分析,随着载荷的增加,顶板上最大拉应力逐渐向顶板中心收缩,且数值逐渐增大;在 Y 方向上的侧帮上方出现两段压应力区域,同时随着载荷增加而数值增大,但应力最大的区域始终是在顶板的中心区域,可推导顶板中心部位是最易产生破坏的,破坏的形式是受拉破坏。

4.3 剪应力分布规律

图 8 为四个阶段加载后地下空区顶板的最大剪应力云图,剪应力分布存在以下规律:从顶板上方施加载荷开始,剪应力也会出现应力集中的现象;剪应力主要在顶板上形成一个“X”型分布,而不是像正应力集中于顶板的中部。随着载荷的增加,剪应力值也在不断增加,从整体来看,应力变化的幅度较小。

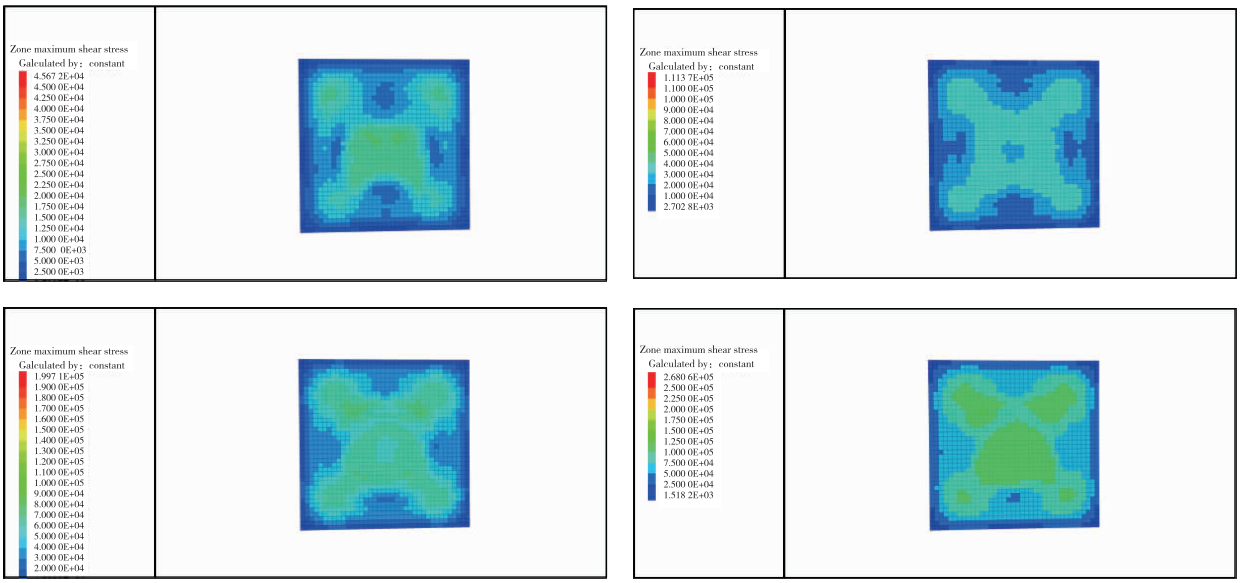


图 8 顶板剪应力分布情况

Fig. 8 Distribution of roof shear stress

4.4 空区顶板变形与位移特征

在空区顶板内部布置一系列的监测点,伴随着载荷的增加监测顶板各个部位的下沉量与时间的关系,监测点的坐标为(x,14,42),x 属于{0~19},在 x 轴上从中心部位开始每隔 3 cm 布置一个监测点,由中心出发分别命名为 A、B、C、D、E,通过模拟计算自动输出每个监测点在垂直方向的位移。随着载荷的增加,顶板各个位置都出现了下沉量,顶板中央部位的下沉量相比更为明显,且越接近顶板中心,产生的位移量差值越小;由于顶板出现位移情况为左右对称,顶板两端的位移量相比于中央部位较小,因此接近侧帮的部位呈现近乎水平的状态。表 3 为空区顶板的垂直位移情况。

表 3 顶板监测点随时间的位移量

Table 3 Displacement of roof monitoring points with time

监测点	每阶段监测点位移量/mm			
	第四阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段
A	0.66	2.04	4.21	6.88
B	0.64	2.01	4.15	6.79
C	0.61	1.90	3.91	6.39
D	0.54	1.69	3.46	5.67
E	0.43	1.37	2.80	4.64

5 结论

1)物理实验结果表明,空区模型在加载作用下,顶板出现了受拉破坏,顶板中央区域最容易破坏,因此,地下空区处理应该在中央区域加强支护或加固,充填采矿法中央区域矿体的回采应当保留矿柱,矿柱不宜二次回采。

2)数值模拟实验结果表明,随着荷载增加,必然会导致空区顶板侧帮应力出现变化,顶板中央区域存在拉应力集中区,这是造成顶板出现受拉破坏的

根源所在,顶板裂隙发育完全时将发生破裂甚至冒落。在载荷增加过程中,剪应力也会缓慢集中,在剪应力集中区域发生剪切破坏。

3)监测结果表明,随荷载增加,顶板各部位出现的下沉量逐渐增大,顶板中央部位的下沉量更为明显,且越接近顶板中心,三者产生的位移量差值越小。监测结果与物理试验和数值模拟实验结果较为吻合。

参　考　文　献

[1] 王新民,柯愈贤,鄢德波,等. 基于熵权法和物元分析的采空区危险性评价研究[J]. 中国安全科学学报,2012,22(6):71-78.
WANG Xinmin, KE Yuxian, YAN Debo, et al. Underground goaf risk evaluation based on entropy weight and matter element analysis [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(6):71-78.

[2] 秦秀山,王湖鑫,许文远,等. 某矿采空区灾害分析与处理对策研究[J]. 有色金属(矿山部分),2014,66(5):22-26.
QIN Xiushan, WANG Huxin, XU Wenyuan, et al. Study on hazard analysis of mined-out area and treatment measures for a mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2014, 66(5): 22-26.

[3] 袁子清,秦云东,陈璐,等. 某铅锌矿井下采空区对地表沉降的影响分析[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(4):1-6.
YUAN Ziqing, QIN Yundong, CHEN Lu, et al. Impact analysis about ground subsidence effected by goaf of a lead-zinc mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2020, 72(4): 1-6.

[4] 苗成文,韩磊,丁峰. 安家岭露天矿采空区顶板安全厚度的研究[J]. 露天采矿技术,2015(7):75-78,81.
MIAO Chengwen, HAN Lei, DING Feng, et al. Research on goaf roof safety thickness in Anjialing openpit mine [J]. Opencast Mining Technology, 2015(7):75-78,81.

[5] 李超亮. 铁矿山采空区顶板安全厚度数值模拟[J]. 现代矿业,2012,28(6):28-31,43.
LI Chaoliang. Numerical simulation on safe roof thickness for mined-out area of iron mine[J]. Modern Mining, 2012, 28(6): 28-31,43.

[6] FREIDIN A M, NEVEROV S A. Mine stability with application of sublevel caving schemes[J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(1): 82-91.

[7] 王文先,张吉龙. 夹沟矿采空区顶板的临界安全厚度分析[J]. 矿业研究与开发,2007,27(5):17-19.
WANG Wenxian, ZHANG Jilong. Analysis on critical roof thickness of mined-out area in Jiagou mine [J]. Mining Research and Development, 2007, 27(5): 17-19.

[8] 柳小波,彭建宇. 采空区顶板破坏机理研究及安全厚度确定[J]. 金属矿山,2012,41(11):5-8,13.
LIU Xiaobo, PENG Jianyu. Goaf roof failure mechanism and its security thickness[J]. Metal Mine, 2012, 41(11): 5-8, 13.

[9] 郭广礼,邓喀中,汪汉玉,等. 采空区上方地基失稳机理和处理措施研究[J]. 矿山压力与顶板管理,2000(3):39-42.
GUO Guangli, DENG Kazhong, WANG Hanyu, et al. Research on the mechanism and treat measures of foundation instability above the mined-out area [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000(3): 39-42.

[10] 张建,张远芳,袁铁柱,等. 采空区稳定性分析与评价[J]. 水利与建筑工程学报,2010(2):145-146,155.
ZHANG Jian, ZHANG Yuanfang, YUAN Tiezhu, et al. Analysis and appraisal for stability of goaf [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010(2): 145-146, 155.

[11] 张海波,宋卫东. 基于 FLAC^{3D} 数值模拟的采空区稳定性分析[J]. 黄金,2013,34(3):31-34.
ZHANG Haibo, SONG Weidong. Analysis on the stability of mined cavity based on FLAC^{3D} numerical simulation[J]. Gold, 2013, 34(3): 31-34.

[12] 杨金林,李夕兵,周子龙,等. 动力扰动对采空区稳定性影响的离散元分析[J]. 科技导报,2010(24):48-52.
YANG Jinlin, LI Xibing, ZHOU Zilong, et al. Stability analysis of underground goaf influenced by dynamic disturbance with dimensional distinct element [J]. Science & Technology Review, 2010(24): 48-52.

[13] 汪杰,张超,郑迪,等. 考虑时间效应的采空区顶板稳定性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2020,2(1):43-51.
WANG Jie, ZHANG Chao, ZHENG Di, et al. Stability analysis of roof in goaf considering time effect[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 43-51.

[14] 刘洋,李克钢,李明亮,等. 基于 AHP-模糊评价的采空区稳定性研究[J]. 有色金属工程,2020,10(11):114-119.
LIU Yang, LI Kegang, LI Mingliang, et al. Study on the stability of mined-out area based on AHP-fuzzy evaluation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(11): 114-119.

[15] 王正红. 基于薄板理论的煤层顶板运移规律研究[D]. 贵州:贵州大学,2016.
WANG Zhenghong. Analysis on roof deformation based on thin plate theory[D]. Guizhou: Guizhou University, 2016.

[16] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础工程与实例[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2013.
CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D foundation engineering and examples[M]. 2 Ed. Beijing: China Water and Power Press, 2013.

(编辑:周叶)