

何环莎,黄敏,吕冠颖,等. 矿柱形态对地下矿山采空区稳定性影响规律[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3):16-21. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.003

HE H S, HUANG M, LYU G Y, et al. Analysis of Influence of Shape Effect of Pillar on Stope Stability [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3):16-21. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.003

矿柱形态对地下矿山采空区稳定性影响规律

何环莎^{1,2*}, 黄敏^{3,4}, 吕冠颖^{1,2}, 刘畅^{1,2}

(1.长沙矿山研究院有限责任公司,湖南长沙410012;2.金属矿山安全技术国家重点实验室,湖南长沙410012;
3.紫金矿业集团股份有限公司,福建上杭364200;4.江西理工大学资源与环境工程学院,江西赣州341000)

摘要:地下矿山采用房柱法开采时采场点柱一般不进行回收,矿柱约占储量的20%~30%。为减少矿柱矿量,同时保证矿柱及采场的稳定性,利用三维建模软件Midas-GTS-NX及有限差分法软件FLAC^{3D}联合模拟计算,对矿柱形状进行模拟分析及对比研究,分析了相同围岩条件下不同形状的矿柱自身及采场顶板的稳定性。研究表明:方形和圆柱形矿柱稳定性较好,但圆柱形矿柱较方形矿柱回采率高,其余形状的矿柱在相同围岩条件下容易产生应力集中现象,稳定性较差。在实际生产中可考虑留设圆柱形点柱,既能保证采场稳定又可提高回采率。该研究为房柱法开采中的矿柱和采空区稳定性判定提供了参考依据。

关键词:房柱法开采;矿柱形状;采场稳定性;数值模拟

中图分类号:TD853 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)03-0016-06

Analysis of Influence of Shape Effect of Pillar on Stope Stability

HE Huansha^{1,2}, HUANG Min^{3,4}, LYU Guanying^{1,2}, LIU Chang^{1,2}

(1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China;

2. National Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha 410012, China;

3. Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang 364200, China;

4. School of Resources & Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: When the underground mine is mined by the room-and-pillar method, the stop-point pillar is generally not recycled, and the pillar accounts for about 20% to 30% of the reserves. In order to reduce the mineral amount of the pillar, and to ensure the stability of the pillar and stope, the three-dimensional modeling software Midas-GTS-NX and the finite difference method software FLAC^{3D} were combined to simulate the calculation, and the stability of different shapes pillars and the roof of the stope were analyzed under the same surrounding rock conditions. The research shows that the stability of square-section pillar and the circular-section pillar are good, but the circular-section pillars have a higher recovery rate than square-section pillars, the remaining shape of the pillar is prone to stress concentration under the same surrounding rock conditions, and the stability is relatively poor. In the actual production, it is considered to leave cylindrical point pillar, which can ensure the stability of the stope and increase the recovery rate. The study provides a reference basis for the stability judgment of pillars and goafs in room-pillar mining.

Keywords: room-and-pillar method; pillar shape; stope stability; numerical simulation

地下矿山开采过程中逐步形成大量采空区,采空区稳定性是矿山安全生产的关键指标.目前国内对采空区稳定性分析主要通过采场顶板稳定性和矿柱稳定性 2 个方面的指标进行量化分析与判定,其中采场顶板稳定性通常采用 Mathews 稳定性图解方法进行分析^[1-2],矿柱稳定性则主要通过经验类比或各类理论公式进行计算判定^[3-6].经过国内外学者的研究,影响矿柱稳定性的主要因素:矿柱受载大小、矿柱宽高比、矿房尺寸与矿柱尺寸、构造因素及矿柱自身的强度等^[7-8].研究者采用正交试验、回归方程等分析方法分析了以上影响因素的敏感性,并对影响因素的重要程度进行了排序^[9-16].

地下矿山采用房柱法开采时,留设合理的矿柱形状,既能保持采场稳定又能提高回采率.目前,国内针对矿柱形状及形态如何影响矿柱自身及采场稳定性的研究较少,主要通过数值模拟计算缓倾斜矿体采场开采完毕后留设的不同形状、形态的矿柱自身破坏机理及对采场稳定性的影响.

1 数值模拟分析

1.1 模型基本参数及边界初始条件

本次数值模拟研究中矿体倾角为 10° ,平均厚度 4 m,为缓倾斜中厚矿体,采场尺寸 60 m \times 75 m,矿房宽度 35 m,矿柱间隔 30 m.分别建立 4 种不同形状的矿柱采场模型,如图 1 所示,具体矿柱形态及尺寸见表 1.

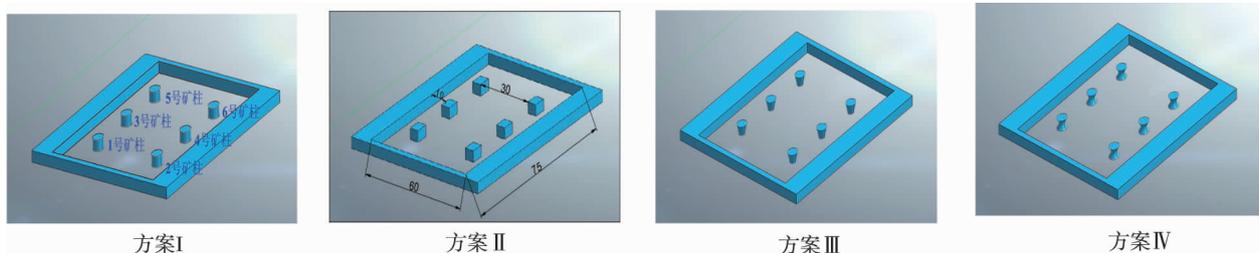
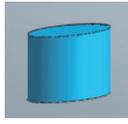
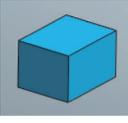
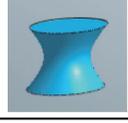


图 1 4 种不同形状矿柱采场模型

表 1 具体矿柱形态及尺寸

方案	矿柱形态	尺寸	示意图
方案 I	圆形矿柱	直径 5 m	
方案 II	方形矿柱	边长 5 m	
方案 III	上天下小圆台矿柱	顶面直径 5 m 底面直径 3 m	
方案 IV	两端大逐渐向中间变小 圆柱矿柱	顶、底面直径 5 m 中部截面直径 3 m	

数值模拟计算中矿体及围岩力学参数见表 2,基本力学模型采用摩尔-库伦本构模型,矿体开挖部分选择空单元模型.由弹塑性力学理论-圣维南原理可知:在承受均匀载荷的无限大弹性体中开挖 1 个圆孔后,孔边的应力状况将发生显著变化,但这种变化的影响范围实际上只限于附近的局部区域.在 1 倍孔径外的区域,应力只比开孔前的应力稍大、扰动较小;3 倍孔径外的应力变化在工程上就可以忽略不计.因此,根据采场尺寸建立模型(x 方向:0~240 m; y 方向:0~240 m; z 方向:0~118 m).模型顶部地表为自由面,底部采用固定约束,四周采用水平位移约束,固定轴向位移;设置重力加速度 9.8 m/s^2 ,方向垂直向下.假定采场一次性开挖完成,开挖完毕后对矿柱及采场顶板稳定性进行分析.

表2 模型材料物理力学参数

岩性	容重/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿体	27.5	5.14	3.85	0.14	2.74	33.56
围岩	27.9	1.25	0.71	1.30	1.30	30

1.2 分析剖面及监测点选取

为了更加直观地分析采场开挖后的矿柱及采场顶板稳定性状况,选取采场中部3[#]和4[#]矿柱中心垂直剖面为剖面一,用以对矿柱、采场顶底板应力变化及塑性区进行分析;选取与采场顶板平行平面为剖面二,用以分析采场顶板下沉变化,如图2所示。

选取矿柱中心与顶板相接处1[#]~6[#]这6个监测点监测开挖后矿柱水平方向位移,选取顶板中部7[#]和8[#]这2个监测点监测开挖后顶板垂直方向位移,选取3[#]和4[#]号矿柱与顶板相接处9[#]~12[#]这4个监测点监测矿柱与顶板相接处是否发生剪切破坏.采场监测点布置示意图如图3所示。

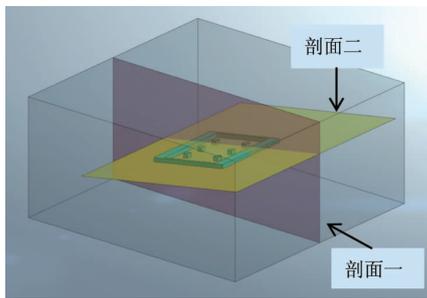


图2 计算模型三维视图

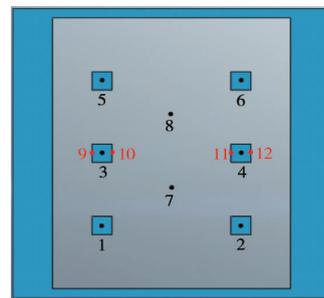


图3 采场监测点布置

2 采场顶板稳定性及矿柱稳定性分析

2.1 位移分析

2.1.1 采场顶板整体沉降分析

根据采场顶板中部7[#]和8[#]监测点Z方向位移变化曲线可见采场开挖后采场顶板产生了垂直向下的位移,随着开挖进行顶板沉降量逐渐趋于稳定,结合采场顶板Z方向位移云图可以看出,沉降范围从采场中部逐渐向周围减小,最大沉降量出现在采场顶板中部,其中方案II方形矿柱采场顶板下沉量最小,方案III上大下小矿柱采场顶板下沉量最大.根据监测数据曲线,可知4种不同形状的矿柱采场顶板沉降量均不超过4cm,变化量较小,采场顶板较稳定.顶板下沉量大小顺序为方案II<方案I<方案IV<方案III,具体下沉量见表3。

表3 不同形状矿柱采场顶板下沉量数据

监测点号	顶板最大下沉量/cm			
	方案I	方案II	方案III	方案IV
7 [#]	3.36	3.24	3.75	3.67
8 [#]	3.40	3.20	3.76	3.68

将4种不同方案的顶板下沉数据提取,利用插值绘图软件surfer绘制4种方案的顶板下沉量等值线图,可以看出采场开挖后采场中部都出现了规则的下沉盆地,矿柱起到了较好的支撑作用.其中下沉量最小的是方案II方形矿柱.等值线图见图4。

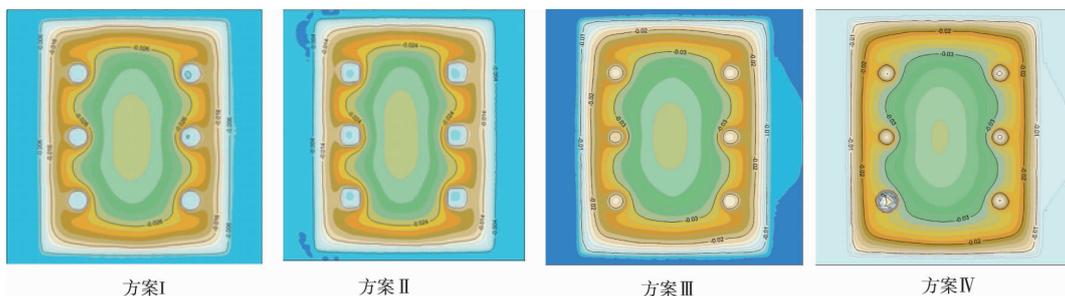


图4 采场顶板沉降等值线

2.1.2 矿柱水平位移分析

根据矿柱中心 1#~6# 监测点的水平方向位移变化曲线可知,开挖后沿矿体倾向采深较深一侧的 1#, 3#, 5# 矿柱发生了 X 负向位移,采深较浅一侧的 2#, 4#, 6# 矿柱发生 X 正向位移,方案 I、方案 III 采场最大水平位移发生在 4# 矿柱,方案 II、方案 IV 最大水平位移发生在 3# 矿柱.水平位移最小绝对值 3.5 mm 为方案 I,最大绝对值 5.6 mm 为方案 III.矿柱 X 向位移值大小顺序依次为方案 I<方案 II<方案 IV<方案 III,具体位移量见表 4.

表 4 不同形状矿柱水平位移

监测点号	监测点位移量(绝对值)/mm			
	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV
1#	3.5	3.8	4.1	4.6
2#	4.0	3.6	5.1	3.8
3#	3.8	4.2	4.4	5.2
4#	4.6	4.0	5.6	4.5
5#	3.6	3.6	4.2	4.4
6#	4.1	3.9	5.2	4.2

2.2 应力分析

2.2.1 最大、最小主应力分析

由最小主应力云图可以看出采场开挖后,采场顶底板围岩在一定范围内受扰动产生不同程度的拉伸变形,拉应力最大值出现在方案 II 采场顶板中央位置,但未超过围岩抗拉强度 1.3 MPa,因此采场顶板稳定性较好,出现顶板冒落等危险情况的可能性较小.

由最大主应力云图可知采场开挖完毕后围岩应力场进行了重新分布,矿柱受压明显,但由于矿柱形状不同,受压范围及位置有所不同,方案 I 矿柱受压范围从矿柱四角延伸至矿柱中部,方案 II 矿柱应力集中只出现在柱壁四角未延伸至矿柱中段,方案 III 矿柱应力集中主要出现在矿柱底部,方案 IV 矿柱应力集中主要分布在矿柱中段且压力值最大.由于岩体产生破坏的类型主要为拉伸破坏和剪切破坏,矿柱主要受压应力影响,但受压导致的应力集中位置对矿柱稳定性也会造成一定程度的影响.不同形状矿柱采场最大最小主应力值见表 5,方案 I 最大最小主应力云图见图 5.

表 5 不同形状矿柱采场最大、最小主应力

方案	主应力/MPa	
	最小主应力	最大主应力
方案 I	0.81	16.35
方案 II	1.01	16.31
方案 III	0.79	22.11
方案 IV	0.69	27.07

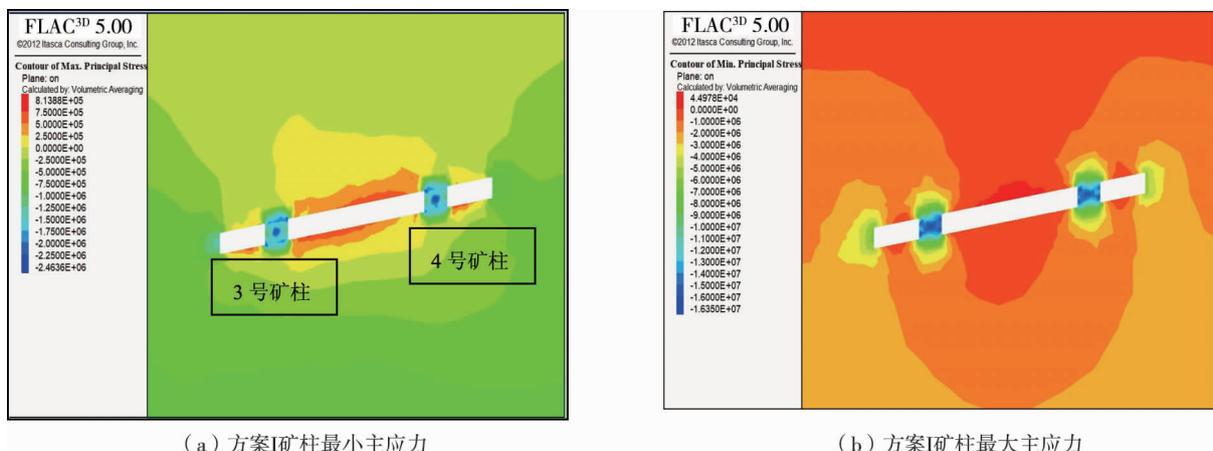


图 5 应力分布云图(剖面一)

2.2.2 剪切破坏分析

根据剪切破坏的摩尔库伦判据,岩体内任一点发生剪切破坏时,破坏面上的剪应力(τ)应大于岩体

本身的内聚力(C)和作用于该面上由法向应力引起的摩擦阻力($\theta \tan \varphi$)之和.根据剪切破坏的监测曲线图可以看出方案 I、方案 III、方案 IV 矿柱与顶板相接处均有一处监测点位置发生了剪切破坏,破坏发生在 3# 矿柱与顶板相接处,只有方案 II 矿柱下的 4 个监测点位置均未发生剪切破坏,稳定性最好,剪切破坏监测曲线如图 6 所示.

2.3 塑性区分析

通过塑性区分布图可看出 4 种矿柱柱体、矿柱与顶底板相连区域单元均产生剪切破坏及少量的拉伸破坏区域,方案 II 塑性破坏单元体积量最少,方案 I 塑性破坏单元体积量较方案 II 多但破坏区域未贯穿矿柱,方案 III、方案 IV 矿柱中部及底部发生大面积剪切破坏并贯穿矿柱,矿柱极有可能发生断裂造成失稳,危险性较大,塑性区单元体积统计见表 6,塑性区破坏分布如图 7 所示,矿柱塑性破坏率大小顺序依次为方案 II < 方案 I < 方案 IV < 方案 III.

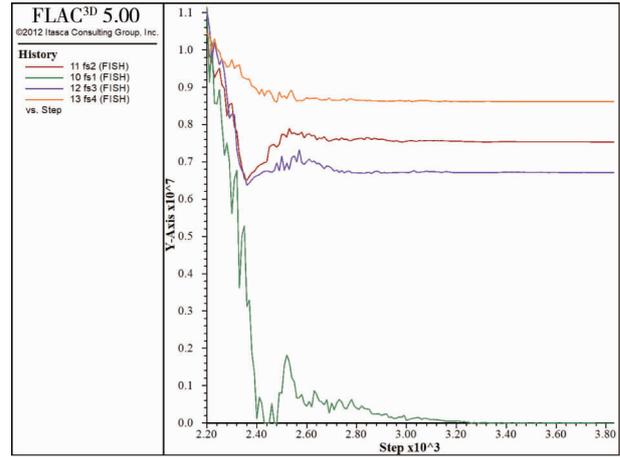


图 6 方案 II 剪切破坏监测曲线

表 6 不同形状矿柱塑性破坏率统计

矿柱方案	塑性破坏单元统计			
	矿柱单元体积/个	剪切破坏单元/个	拉伸破坏单元/个	破坏率/%
方案 I	2 644	608	10	23.2
方案 II	3 084	537	5	17.6
方案 III	1 734	775	29	46.4
方案 IV	2 550	977	23	39.2

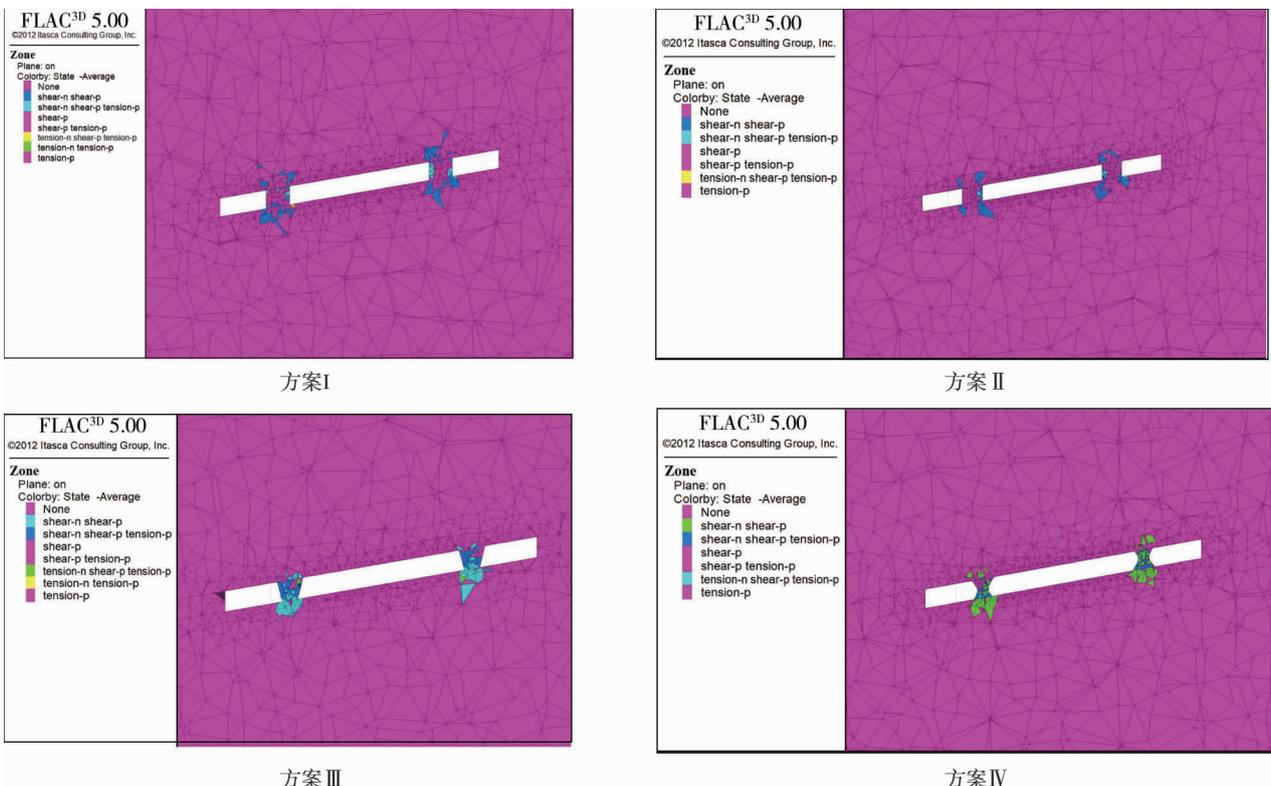


图 7 矿柱塑性破坏区域分布

3 结论

1) 根据数值模拟计算后的采场顶板沉降、矿柱中心水平位移、矿柱与顶板相连接处剪切破坏及矿柱塑性破坏率4组变化量进行分析,稳定性从好到差的矿柱排序依次是方案 II、方案 I、方案 IV、方案 III,即方形矿柱和圆柱形矿柱稳定性较好.但在方形矿柱横截面边长与圆形矿柱横截面直径相等的情况下,方形矿柱体积较大,回采率低.在保证回采率的前提下可选择圆柱形矿柱.

2) 采场开挖后,不同形状矿柱的采场应力变化趋势基本相同,均表现为采场顶底板出现受拉影响区域,但拉应力强度未超过岩体抗拉强度,发生大面积冒落的可能性小;而矿柱中部、矿柱与顶底板相连处受压容易产生应力集中现象产生破坏造成失稳.

3) 在矿山实际生产中为保证采场的稳定,必须保持点柱的形态完整,若为提高产量擅自切削矿柱底部或中部导致矿柱的规则形状发生改变,可能会造成矿柱内部产生大面积的剪切破坏和拉伸破坏,严重影响矿柱强度和采场稳定.

参考文献:

- [1] 高永.房柱采矿法采场稳定性研究[J].冶金管理,2020(5):15.
- [2] 刘畅,张见,彭云,等.采场顶板安全厚度与跨度及暴露面积的关系研究[J].矿冶工程,2016,36(6):18-21.
- [3] 崔大勇.矿柱形态研究及其对勘探工作的影响[J].有色矿冶,2016,32(3):10-12.
- [4] 龚新华.缓倾斜薄矿体点柱群稳定性分析及回采方案优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
- [5] 左国义,刘洪兴,张吉勇.基于 FLAC(3D)数值模拟的某钨矿缓倾斜矿体采场矿柱稳定性研究[J].湖南有色金属,2016,32(6):1-5.
- [6] 赵斌.特殊围岩房柱应力与变形规律及合理结构参数的研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [7] 张涛,张帅,张百胜.矿柱安全留设尺寸的宽度折减法与应用[J].岩土力学,2014,35(7):2041-2046.
- [8] 胡建军,刘红.浙江省某硅灰石矿不规则矿柱稳定性区划研究[J].金属矿山,2009(s1):647-648.
- [9] 宋卫东,曹帅,付建新,等.矿柱稳定性影响因素敏感性分析及其应用研究[J].岩土力学,2014,35(s1):271-277.
- [10] 尹升华,吴爱祥,李希雯.矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析[J].煤炭学报,2012,37(s1):48-52.
- [11] 陈顺满,吴爱祥,王贻明,等.深部回采矿柱稳定性影响因素分析及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(8):2050-2057.
- [12] 寇永渊,盛佳,李向东,等.深部高应力复杂环境特大型水平矿柱开采方案优化研究[J].矿业研究与开发,2020,40(5):1-4.
- [13] 陈光飞,罗昌繁,陈飞.矿柱稳定性影响因素分析及合理尺寸设计[J].中国矿业,2019,28(10):152-157.
- [14] 肖屈日,赵国彦,刘建,等.矿柱稳定性判别的 ICA-RoF 模型及其工程应用[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(4):116-122.
- [15] 谢学斌,谢和荣,田听雨,等.开挖扰动下矿柱损伤破裂失稳微观机制研究[J].矿冶工程,2019,39(2):30-36.
- [16] 罗周全,彭东,苏汉语,等.基于正交设计与主成分回归的矿柱稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):50-55.