

地下开采对上覆围岩稳定性的数值模拟研究

吴鹏

(紫金(厦门)工程设计有限公司长沙分公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:为分析某铜矿地下开采过程中采场的稳定性以及开采活动对地表河床及上部覆岩的影响,利用FLAC3D有限差分软件建立矿床开采的三维数值模型,对3种计算剖面下各赋存条件矿体采用的不同采矿方法进行模拟,得出了采空区附近围岩应力变化规律并进行综合对比分析。研究表明:在留设足够宽的安全间隔矿柱条件下,现有采空区无论位于拟采矿体的上部、中部、下部,与地下采矿活动的相互扰动均较小,仅4[#]勘探线矿体回采存在小范围相互影响,建议增大安全间隔矿柱尺寸。

关键词:数值模拟;地下开采;FLAC3D;围岩应力;稳定性分析

0 引言

地下开采会形成大量的采空区,同时造成周边围岩的地应力重分布,形成二次应力场,当采场地质条件较差时可能发生顶板失稳冒落、岩层变形甚至是地表沉陷等重大事故,对矿山正常开采造成极大的影响^[1-5]。因此,有必要针对采空区引发的应力重分布规律进行研究,从而避免其可能引发的一系列事故。目前,国内外对于采空区稳定性常用的分析方法有预测法、解析法、物理模拟法与数值模拟法^[6-10],其中数值模拟法是运用最为广泛的方法之一,常用的数值模拟软件包括ANSYS、FLAC、ADINA等^[11]。张胜光等^[12]利用Phase2对某石膏矿采空区建立相关地下采场分析模型,分析了一150 m水平上部采空区坍塌后岩层移动和应力重分布规律,并为下一步采空区治理方案提供了参考依据。王万红等^[13]运用3Dmine与FLAC3D耦合建立数值计算模型,分析了采空区围岩应力、位移、塑性区大小及分布状况,研究表明,房柱法大面积开采中大部分矿柱仍有一定的支撑能力,顶底板均处于安全边界内,为下一步开采方案提供了相应的依据。高兴红等^[14]利用FLAC3D以龙门山铜矿东部采场为研究对象建立矿体三维模型,采用不同的充填方案填充采空区并进行研究,结果表明,暂不处理现有采空区,在采场内留设矿柱及回采后部分充填的方案安全系数较高,且回采成本稍低。

本文以云南某铜矿为例,综合考虑不同厚度区

域所采用的采矿方法、回采顺序以及周围采空区的影响等因素,分别选择4[#]勘探线剖面、1[#]自选剖面、2[#]自选剖面建立对应模型进行分析,从而对开采矿房及附近采空区稳定性进行评价。

1 矿山概况

某铜矿位于云贵高原中高原亚区,区内群山起伏,属低山中山地貌,区内整体地形北高南低,构造发育以北东向为主,区域成矿条件较为有利。矿体主要赋存于因民组顶部过渡层及落雪组底部白云岩中,其次是落雪组中上部白云岩风化土中(土状氧化矿)与鹅头厂组底部含砾石英砂岩中。矿体形态产状严格受层位和岩性控制,呈似层状、透镜状产出。矿体长轴的分布方向大致与矿段褶皱构造线的分布方向相同,含矿区段西起11线,东至18线,长1600 m,宽300 m。

2 模型参数

2.1 岩体力学参数

本次模拟选用的岩体物理力学参数见表1。

2.2 力学模型

模型采用Mohr-Coulomb屈服准则^[15]判断岩体的破坏,并且均不考虑塑性流动(不考虑剪胀)。Mohr-Coulomb屈服准则判别表达式如下:

$$\tau_f = C - \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

由

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi \quad (2)$$

表 1 岩体物理力学参数

岩性描述	密度/ (t/m ³)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	静性模量/ GPa	泊松比	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦角/ (°)
层状板岩与硅质白云岩互层	2.6	35	1.75	14	0.25	9.33	5.60	40
薄层炭质板岩夹薄层白云岩	2.5	15	0.75	4	0.30	3.33	1.54	38
上部为中-厚层状硅质白云岩, 下部为中-厚层状结晶白云岩	2.8	45	2.25	23	0.22	13.69	9.43	42
中层状泥、砂质含铜白云岩	2.5	22	1.10	7	0.27	5.07	2.76	38
云母板岩、砂质板岩、砂质白云岩	2.6	30	1.50	12	0.27	8.70	4.72	40

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin\varphi \quad (3)$$

可得

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = C\cos\varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi \quad (4)$$

式中, σ_1 、 σ_3 为最大和最小主应力, MPa; C 为材料的黏聚力, MPa; φ 为内摩擦角, (°); σ 和 τ_f 分别为滑移面上的正应力和切应力。

2.3 几何模型

为尽量对各赋存条件下的矿体及采用的不同采矿方法下采空区围岩进行分析, 本次研究选取了 3 种不同的剖面, 分别为 4[#] 勘探线、1[#] 自选剖面与 2[#] 自选剖面, 其对应模型分别命名为模型 1、模型 2 与模型 3。建立的 3 个模型反映了矿区内大部分采空区及本次设计的主要回采矿体, 同时涵盖了底盘漏斗空场法、房柱法及留矿全面法等拟用采矿方法, 具有针对性和代表性。

4[#] 勘探线拟采矿体(2203~2225 m)埋深范围约为 100~126 m, 矿体倾角变化为 0°~24°, 矿体厚度为 0~3.8 m。涵盖了两种采矿方法, 对于 2200 m 中段采用留矿全面法进行回采, 设置中段矿柱宽度为 4 m, 矿块间柱宽度为 6 m; 而 2220 m 中段间柱设置为 5 m, 底柱为 10 m, 矿房内留设点柱, 规格为 2.5 m×2.5 m, 间距为 5~7 m。坐标 X8650 至 X8550 范围的矿体已回采并形成采空区, 位于回采矿体上部。最终生成的网格模型及采区布置如图 1 所示。

1[#] 自选剖面矿体(2225~2300 m), 矿体埋深范围约为 55~83 m, 平均埋深为 56 m 左右, 矿体倾角变化为 0°~19°, 矿体厚度为 0.75~8.2 m。2220 m、2240 m 与 2260 m 中段采用房柱法进行回采, 矿块长度为 50 m, 间柱为 5 m, 底柱为 10 m; 2280 m 中段采用底盘漏斗空场法进行回采, 盘区宽度为 36 m, 盘区间柱宽度为 5 m, 中段矿柱宽度为 5 m, 矿房内留设点柱, 规格为 2.5 m×2.5 m, 间距为 5~7

m。坐标 X8650 至 X8550 范围的矿体已回采并形成采空区, 位于待采矿体下部。最终生成的网格模型及采区布置如图 2 所示。

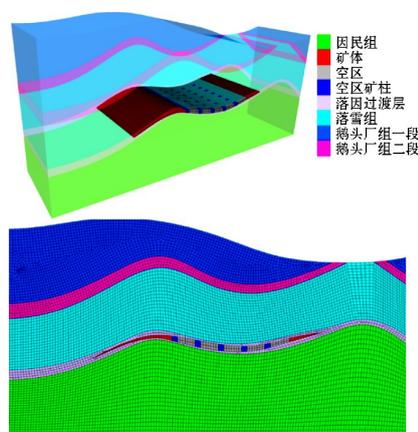


图 1 4[#] 勘探线采场布置及计算模型

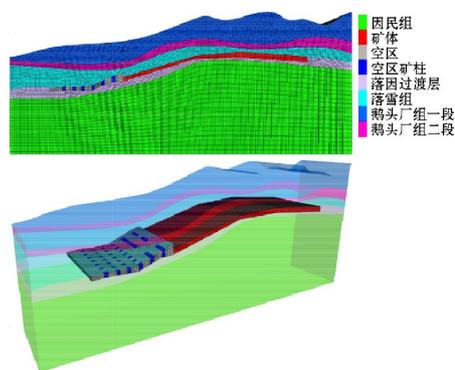


图 2 1[#] 自选剖面采场布置及计算模型

2[#] 自选剖面为多层矿体(2188~2328 m), 主要回采对象由下往上为 I-1、I-2、III-1、III-3, 矿体埋深范围约为 33~192 m, 矿体倾角变化为 0°~29°, 矿体厚度为 0.5~7.0 m。I 号矿体主要采用房柱法进行回采, 矿块长度为 50 m, 间柱为 5 m, 底柱为 10 m; III 号矿体主要采用留矿全面法进行回采, 矿块长度为 50 m, 中段矿柱宽度为 4 m, 矿块间柱宽度为 6 m, 矿房内留设点柱, 规格为 2.5 m×2.5 m, 间距为 5~7 m。坐标 X8930 至 X8960 范围的矿体

已回采并形成采空区,待采矿体位于空区两侧。最终生成的网格模型及采区布置如图 3 所示。

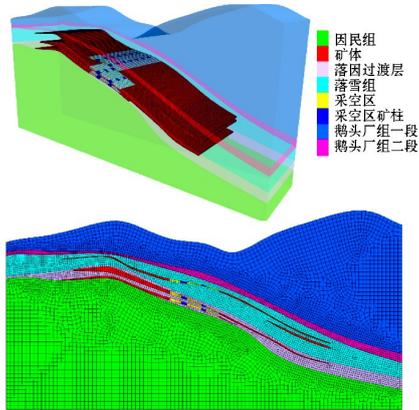


图 3 2[#] 自选剖面采场布置及计算模型

3 种模型在矿体未进行开采时的原岩应力如图 4 所示,由于矿体位于山体内部且埋藏较浅,构造应力弱,整体原岩应力较小,最深部矿块原始铅直应力为 4.5 MPa 左右。

对于 3 种模型而言,矿体回采并形成采空区后,改变原岩应力的分布情况,矿体顶底板应力均有不同程度的减小,局部出现拉应力,矿柱及两侧围岩出现应力集中现象,最大值可达 7~8 MPa,出现于 4[#] 剖面线模型中。从塑性区情况来看,采场顶板及矿柱出现较多塑性区,多为开挖后应力释放所造成,整体未持续发生塑性变形,采场顶底板和矿柱整体而言基本稳定。3 种模型的采空区应力云图与塑性区分布图如 5 所示。

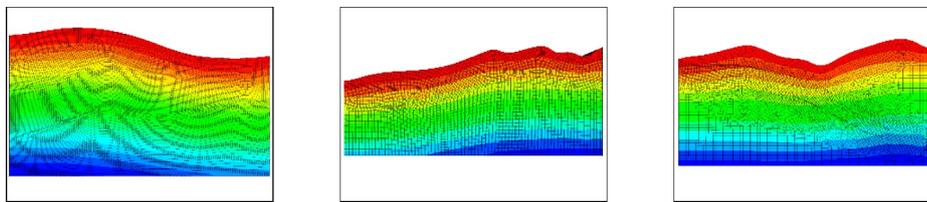
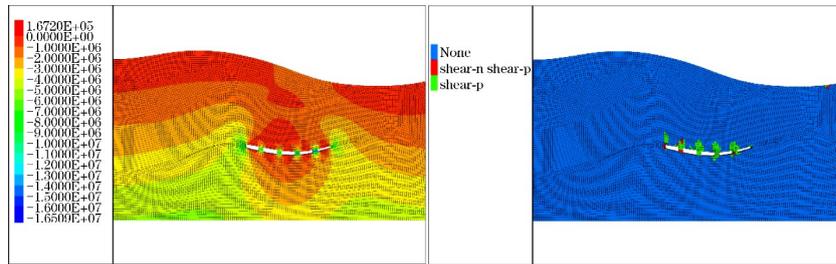
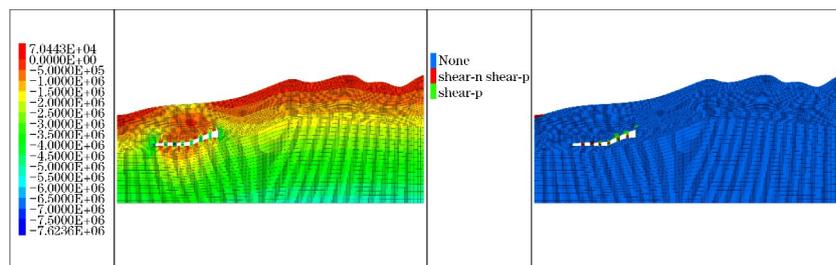


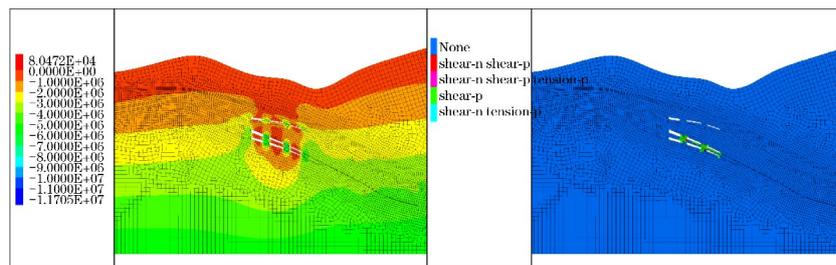
图 4 不同模型矿体未开采时原岩应力分布



(a) 模型 1



(b) 模型 2



(c) 模型 3

图 5 不同模型采空区最大主应力与塑性区云图

3 数值模拟计算结果分析

3.1 模型 1 回采结果分析

图 6 为模型 1 中不同回采阶段采区最大主应力云图,图 7 为不同回采阶段采区与矿柱塑性区分布图。

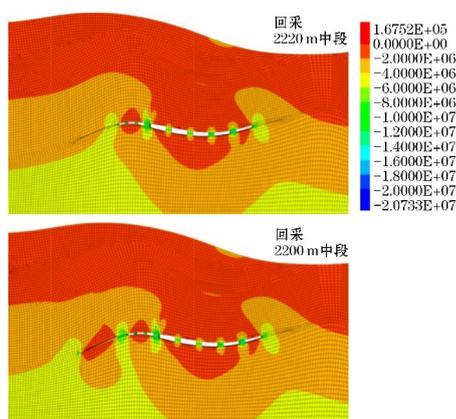


图 6 模型 1 不同回采阶段采区最大主应力云图

(1) 2200 m 中段采用留矿全面法进行回采,回采过程中顶底板均出现塑性区,并未持续发展,考

虑到矿体较薄,平均埋深仅 100 m 左右,整体上认为基本稳定。

(2) 2220 m 中段采用房柱法进行回采,回采过程中顶底板及点柱均出现塑性区,间柱与中段矿柱未发生变形,采场整体较为稳定。靠近现采空区一侧留设矿柱变形较大,同时从最大主应力云图来看,应力集中较为显著,最大值可达 12~14 MPa,对两侧新老采空区均存在一定的安全隐患。

3.2 模型 2 回采结果分析

图 8 为模型 2 中不同回采阶段采区最大主应力云图,图 9 为不同回采阶段采区与矿柱塑性区分布图。

(1) 2220 m 中段至 2240 m 中段(标高 2225~2260 m)回采过程中,采用房柱法进行回采,顶底板与间柱均未出现塑性区,点柱与老空区一侧安全矿柱出现较多塑性变形区域,但并不随向上回采持续发展,最大主应力仅为 4~6 MPa,整体稳定。

(2) 2260 m 中段(标高 2260~2280 m)回采过程中,采用房柱法进行回采,顶底板、间柱、中段矿柱均未出现塑性区,点柱出现较多塑性变形区域,

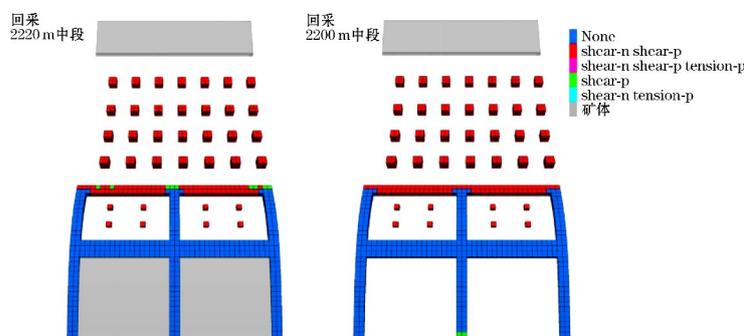


图 7 模型 1 不同回采阶段采区与矿柱塑性区分布

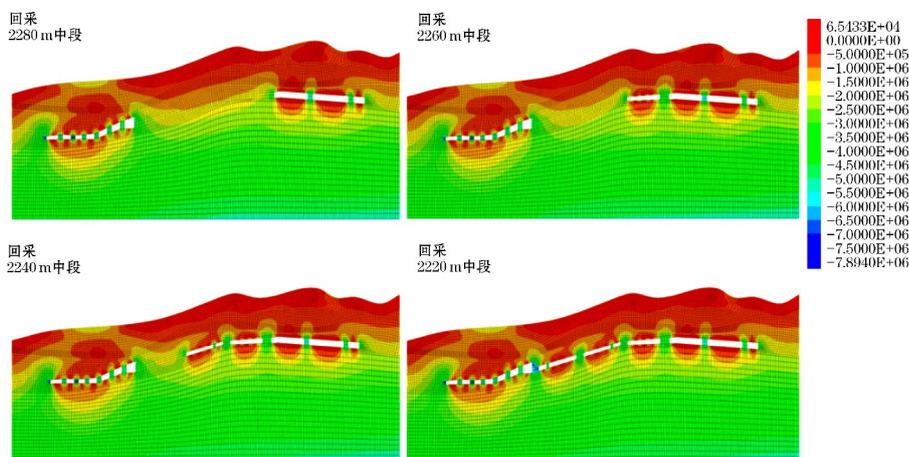


图 8 模型 2 不同回采阶段采区最大主应力云图

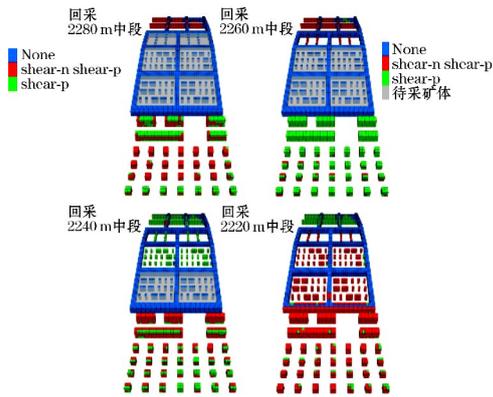


图9 模型2不同回采阶段采区与矿柱塑性区分布

最大主应力仅为3~5 MPa,整体稳定。

(3) 2280 m中段(标高2280~2300 m)回采过程中,采用底盘漏斗空场法进行回采,顶底板零星出现塑性区,间柱和中段矿柱出现较多塑性变形区域,最大主应力仅为3~5 MPa。由于该采矿方法回采上层矿体为土状氧化矿,矿柱上部及顶板风化程度较强,建议视顶板及矿柱稳定情况增大矿柱尺寸,减少空区暴露面积。

3.3 模型3回采结果分析

图10为模型3中不同回采阶段采区最大主应力云图,图11为不同回采阶段采区与矿柱塑性区分布图。

(1) 2220 m中段至2240 m中段(标高2225~2260 m)回采过程中,I号矿体采用房柱法进行回采,顶底板与点柱均出现较多塑性区,但整体未持续发生变形,间柱与中段矿柱未发生塑性变形,矿柱应力集中较为明显,最大应力可达10~12 MPa,采场和矿柱基本稳定,但需要加强对顶板和矿柱的监测,及时进行废石充填;Ⅲ号矿体采用留矿全面法回采,两层矿体相距较近,回采后中间夹层出现较多塑性区,不随开采持续变形,仍建议对下层空区进行及时充填封闭或者放弃Ⅲ-3矿体的回采,保证顶板的完整性。

(2) 2260 m中段至2280 m中段(标高2260~2300 m)回采过程中,I号、Ⅲ号矿体均采用留矿全面法进行回采,顶底板和中段矿柱出现较多塑性区,但整体未持续发生变形,间柱未发生塑性变形,

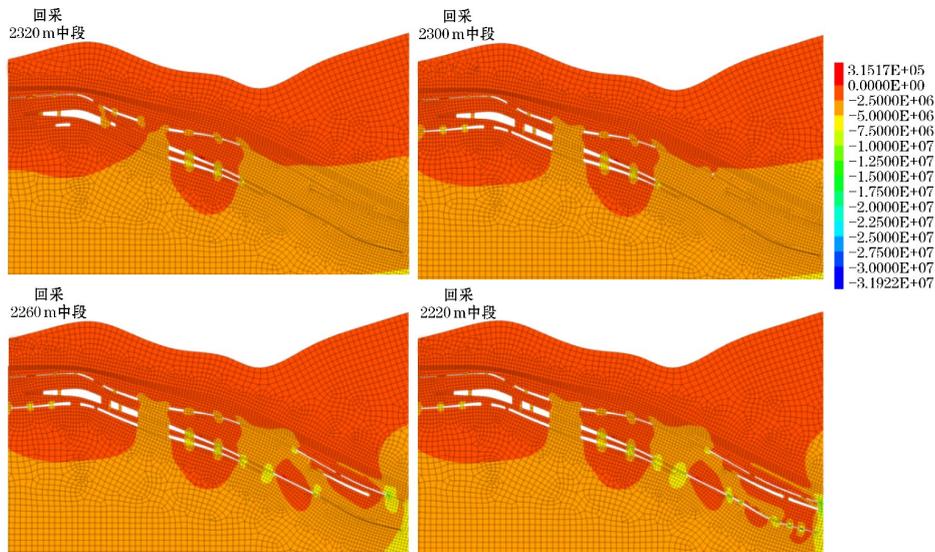


图10 模型3不同回采阶段采区最大主应力云图

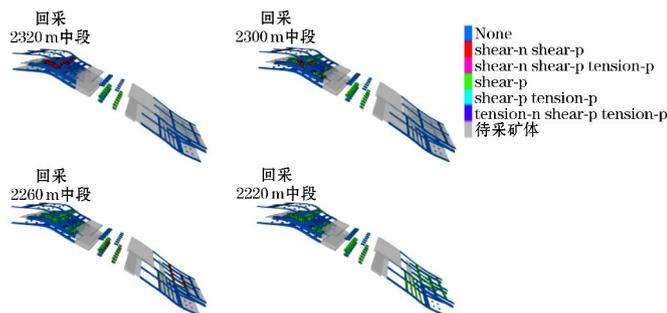


图11 模型3不同回采阶段采区与矿柱塑性区分布

矿柱应力集中较为明显,最大应力可达8~10 MPa,采场和矿柱基本稳定,但需要加强对顶板和矿柱的监测,及时进行废石充填;Ⅲ号矿体中间夹层出现较多塑性区,不随开采持续变形,仍建议对下层空区进行及时充填封闭或者放弃Ⅲ-3矿体的回采,确保顶板的完整性。

(3) 2300 m中段(标高2300~2320 m)回采过程中,采用房柱法进行回采,顶底板零星地出现塑性区,间柱和中段矿柱未出现塑性区,最大主应力仅为3~5 MPa,采场与矿柱整体较为稳定。I-2号矿体厚度较大,空区点柱塑性变形较为明显,且持续发展,建议适当增加点柱尺寸。

(4) 2320 m中段(标高2320~2340 m)回采过程中,I号和Ⅲ号矿体采用房柱法进行回采,顶底板零星地出现塑性区,间柱和中段矿柱未出现塑性区,点柱塑性变形较为明显,且持续发展,建议2300 m中段回采结束后对其进行废石充填并封闭空区,以确保上层矿体回采的稳定性;Ⅲ号矿体采用留矿全面法,顶底板及矿柱均未出现塑性区,整体较为稳定。

4 结论

(1) 通过对不同区域矿体回采的模拟,在留设足够宽度安全间隔矿柱条件下,现有采空区与地下采矿活动的相互扰动均较小,仅4[#]勘探线矿体回采存在小范围相互影响,建议增大安全间隔矿柱尺寸。

(2) 根据矿体厚度采用不同的采矿方法时,采场稳定性基本能够得到保证,但对于底板漏斗空场而言,矿柱会出现大面积塑性区,建议开采后尽快进行废石充填,并封闭空区。

参考文献:

- [1] 曾宇,白瑶,李鹏辉,等.采空区下近距离煤层回采巷道应力分布规律研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):88-94.
- [2] 谢伟,倪彬,李乾龙,等.基于Mathews图解法的采空区稳定性分析[J].金属矿山,2022(6):40-45.
- [3] 牛小明,颜平,潘懿.石人嶂矿莲花山采空区塌陷影响分析研究[J].矿业研究与开发,2021,41(10):99-103.
- [4] 何荣兴,韩智勇,周颜军,等.金属非金属矿山采空区灾害特征分析及预防措施[J].矿业研究与开发,2020,40(9):33-38.
- [5] 李海港,李仕杰,郑小龙,等.采空区隐患影响下的残矿协同开采技术研究[J].金属矿山,2020(5):26-33.
- [6] 何东林,白云,唐安业,等.基于FLAC3D对不同采序下采空区变形规律的研究[J].煤炭技术,2019,38(10):28-31.
- [7] 宗翔,樊欣.采煤沉陷对地表建筑群影响的FLAC3D模拟研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2022,42(4):7-14.
- [8] 程力,朱明德,吴钦正,等.模糊综合评判在采空区稳定性评价中的应用[J].现代矿业,2020,36(12):177-180.
- [9] 张宗生.柿竹园露天地下联合开采相互影响稳定性分析[J].采矿技术,2020,20(4):104-107+127.
- [10] 陈怀利.基于盲数理论的采空区危险性评价模型[J].采矿技术,2019,19(3):43-46.
- [11] 刘书瑶.某金属矿山采空区上覆岩层变形机理及稳定性分析[D].赣州:江西理工大学,2022.
- [12] 张胜光,卿自强,戴军,等.某石膏矿采空区坍塌影响数值模拟研究[J].采矿技术,2022,22(5):105-108.
- [13] 王万红,王远,杜翠凤,等.房柱法开采大面积采空区群的稳定性分析[J].矿业研究与开发,2020,40(8):41-44.
- [14] 高兴红,操帅,李同鹏.基于FLAC^{3D}的龙门山矿东采区回采方案优选[J].现代矿业,2022,38(10):73-76.
- [15] JIANG Hua. Simple three-dimensional Mohr-Coulomb criteria for intact rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,105:145-159.

(收稿日期:2023-02-24)

作者简介:吴鹏(1986—),男,山西朔州人,硕士,工程师,主要从事采矿设计工作,E-mail:529240319@qq.com。