

## 充填条件下采空区稳定性分析<sup>①</sup>

刘畅<sup>1,2</sup>, 郭泽洋<sup>1,2</sup>, 江飞飞<sup>3,4</sup>, 简锡明<sup>5</sup>, 郭晓强<sup>5</sup>, 郭豫宁<sup>1,2</sup>, 黄敏<sup>5,6</sup>, 黄明发<sup>5,6</sup>

(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.中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071; 4.岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北武汉 430071; 5.紫金矿业集团股份有限公司, 福建上杭 364200; 6.紫金(长沙)工程技术有限公司, 湖南长沙 410000)

**摘要:** 对某矿山采空区稳定性进行了分析。首先对采空区现状进行了详细调查,明确其分布状态及体积;其次,基于FLAC<sup>3D</sup>模拟结果评价采空区现状及充填后的稳定性变化规律。结果表明,矿山主要存在5个采空区,分布在700~860 m中段,采空区总体积约 $40.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;当前采空区顶板不稳定,存在较大垮落风险,1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>采空区之间未贯通的岩体受力集中,塑性区贯通,有可能产生大规模失稳破坏;对700~820 m中段之间采空区逐步充填后,采空区失稳风险逐渐消除,不会影响700 m以下中段生产活动。建议优先对1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>采空区进行充填处理,降低采空区垮塌和贯通的风险。

**关键词:** 采空区; 采空区稳定性; 数值模拟; 充填; 地下开采

中图分类号: TD327

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.004

文章编号: 0253-6099(2024)05-0017-05

## Analysis of Goaf Stability Before and After Backfill

LIU Chang<sup>1,2</sup>, GUO Zeyang<sup>1,2</sup>, JIANG Feifei<sup>3,4</sup>, JIAN Ximing<sup>5</sup>, GUO Xiaoqiang<sup>5</sup>,  
GUO Yuning<sup>1,2</sup>, HUANG Min<sup>5,6</sup>, HUANG Mingfa<sup>5,6</sup>

(1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Safety Technology for Metal Mines, Changsha 410012, Hunan, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, Hubei, China; 5. Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China; 6. Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha 410000, Hunan, China)

**Abstract:** The stability of goafs in a mine was analyzed. Firstly, the current situation of the goafs was investigated in detail to clarify the distribution and volume of goafs. Secondly, the stability variation of goafs before and after backfill was evaluated based on the FLAC<sup>3D</sup> simulation results. It is found that there are five main goafs in the mine, which are distributed in the middle section of 700–860 m, with total volume of around  $404\,500 \text{ m}^3$ . Currently, the roof of goaf is unstable, posing a greater potential risk of collapse. The rock mass that is not connected together from 1<sup>#</sup> to 4<sup>#</sup> goaf has concentrated force on it and a plastic zone penetrates through, possibly causing large-scale instability. After the goafs in the middle section of 700–820 m are gradually backfilled, the risk of goaf instability can be gradually eliminated, and production activities in the middle section below 700 m won't be affected. It is recommended that 1<sup>#</sup>–4<sup>#</sup> goafs should be preferably backfilled to reduce the risk of roof collapse and penetration.

**Key words:** goaf; goaf stability; numerical simulation; backfill; underground mining

金属非金属矿山长期开采后会形成大规模采空区,采空区坍塌引起的安全事故时有发生。采空区坍塌是金属非金属矿山安全生产和公共安全的主要危险源之一。准确判断采空区稳定性具有重要意义。已有

众多学者<sup>[1-9]</sup>采用理论分析和数值模拟等手段评价采空区整体稳定性。本文以某矿山开采后遗留的大面积采空区为研究对象,对采空区赋存现状进行详细调查,并建立采空区三维模型,明确采空区分布位置及采空

① 收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(52304156); 湖北省自然科学基金(2022CFB860)

作者简介: 刘畅(1987—),男,湖南株洲人,博士,高级工程师,主要从事矿山岩石力学方面的研究工作。E-mail: liuchangcimr@163.com

通信作者: 江飞飞(1990—),男,湖北广水人,博士,助理研究员,主要从事深部岩体/充填体力学与灾害防治、岩土大数据与智能安全管控技术研究。E-mail: ffjiang@whrsm.ac.cn

区体积;基于有限元数值模拟的方法评价当前采空区的稳定性,同时进一步模拟充填过程中采空区稳定性的变化规律,以期保障矿山安全生产。

## 1 采空区现状调查

湖南某金矿开采历史悠久,目前已形成 700 m 中段、740 m 中段、780 m 中段、820 m 中段、860 m 中段等多个开采中段,采空区主要分布在 700 m 以上中段。初步估算,采空区体积约 40.45 万立方米。采空区基本信息如表 1 所示。由采空区测量数据生成采空区三维模型,形成采空区位置图,如图 1 所示。

表 1 采空区基本信息统计

采空区标号	位置	跨度/m	长度/m	采高/m	暴露面积/m <sup>2</sup>	采空区体积/m <sup>3</sup>
1 <sup>#</sup>	700~740 m 中段	43.88	72.62	30.28	3 871.63	53 306
2 <sup>#</sup>	700~780 m 中段	34.83	89.51	68.50	6 878.53	190 739
3 <sup>#</sup>	740~820 m 中段	14.66	21.39	40.21	915.47	6 267
4 <sup>#</sup>	740~820 m 中段	35.61	40.08	67.30	3 051.71	77 756
5 <sup>#</sup>	820 m 以上中段	46.61	84.52	26.88	4 547.17	76 413

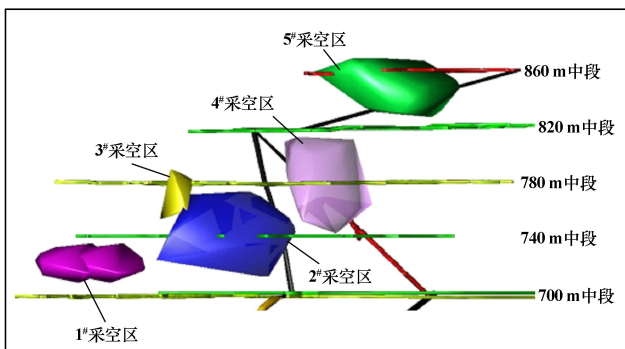


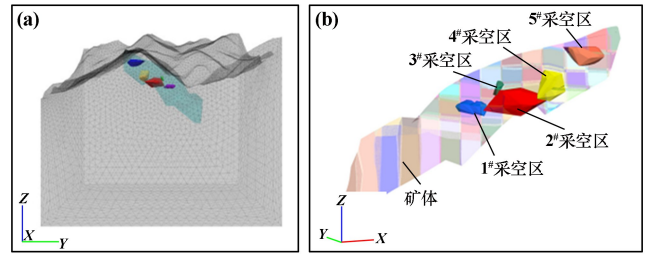
图 1 采空区位置示意图

## 2 模型建立及模拟方案

### 2.1 数值模型的建立

根据开采初步设计,矿山主要采用分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法和浅孔留矿法开采,采场沿走向布置,采场长度 50 m,宽度为矿体厚度,中段高度 40 m。根据采场结构参数,对矿体进行划分,对采空区与矿体进行布尔运算,得到矿体-采空区模型,总体模型范围大小为  $X=0\sim 1\ 000\text{ m}$ ,  $Y=0\sim 1\ 200\text{ m}$ ,  $Z$  方向 0 至地表,模型共 139.6 万个单元,如图 2 所示。

建好模型后通过相关插件导入 FLAC<sup>3D</sup> 软件中完成后续计算任务。首先开挖形成采空区,然后按中段高度对采空区从下至上逐步充填,具体步骤如表 2 所示。



(a) 围岩模型; (b) 采空区模型

图 2 三维数值模拟模型

表 2 模拟步骤模拟内容

步骤	模拟内容
1	计算自重作用下的初始应力场
2	开挖采空区,形成 1 <sup>#</sup> 、2 <sup>#</sup> 、3 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 、5 <sup>#</sup> 采空区
3	充填 700~740 m 中段之间的采空区
4	充填 740~780 m 中段之间的采空区
5	充填 780~820 m 中段之间的采空区

### 2.2 岩体力学参数与力学模型

本次计算采用莫尔-库仑本构模型<sup>[10-13]</sup>。根据矿山工程地质条件及模拟内容,模拟考虑 3 种力学介质:绢云母砂质板岩、矿体和充填体。板岩、矿体力学参数根据现场调查和室内试验获得,充填体力学参数参考相关资料<sup>[14-15]</sup>,详细参数见表 3。

表 3 数值模拟计算参数

岩性	容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性 模量/ GPa	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	抗拉 强度/ MPa	黏聚力/ MPa	摩擦角/ (°)
绢云母 砂质板岩	27.92	8.68	8.68	0.17	0.28	3.37	25.00
矿体	27.26	9.96	9.96	0.26	0.30	3.89	26.81
充填体	9.21	1.00	2.01	1.76	0.05	0.35	19.32

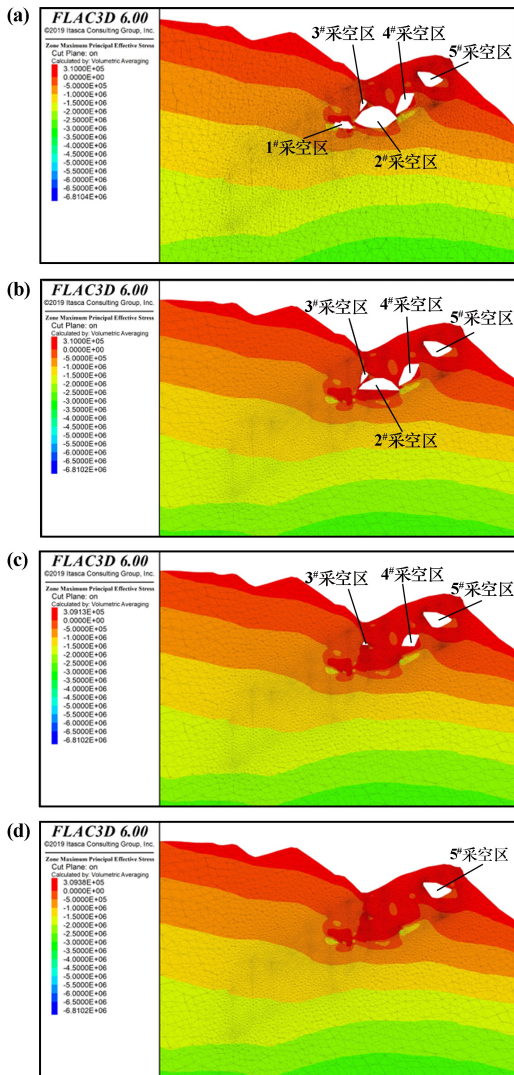
## 3 计算结果分析

### 3.1 应力分析

图 3 为采空区拉应力分布云图。由图 3 可知,采空区未充填时,顶板岩层所受最大拉应力 0.31 MPa 左右,超过上覆岩层绢云母砂质板岩的最大抗拉强度。700~820 m 中段采空区之间未贯通区域岩体受力超过其自身最大抗拉强度,采空区之间有贯通失稳的风险。对 700~740 m 中段之间的采空区进行充填后,1<sup>#</sup>采空区完全充填,2<sup>#</sup>采空区中部以下充填完成。已完全充填的采空区失稳风险消除,但未充填和未完全充填的采空区顶板暴露面积未改变,顶板及采空区之间的岩体所受最大拉应力 0.31 MPa 左右,采空区顶板依然存在垮塌风险,采空区之间岩体有破坏的倾向,有可能在

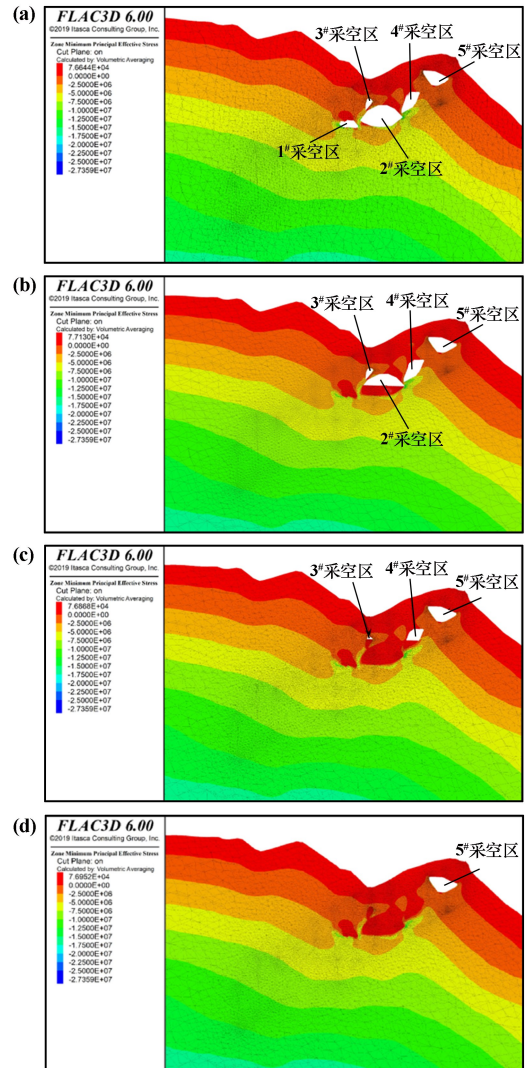
采空区之间形成贯通。对 700~780 m 中段之间的采空区进行充填后,700~820 m 中段之间仅有 3<sup>#</sup>采空区和 4<sup>#</sup>采空区上部未被充填,采空区暴露面积较小,顶板失稳的可能性降低,采空区之间贯通的风险消除。对 700~820 m 中段之间的采空区进行充填后,700~820 m 中段之间的采空区被完全处理,采空区失稳风险消除。不同充填方案中,5<sup>#</sup>采空区顶板受拉 0.31 MPa 左右,超过绢云母砂质板岩最大抗拉强度,存在失稳破坏的风险;5<sup>#</sup>采空区与下部采空区之间的岩体受拉 0.23 MPa 左右,未超过绢云母砂质板岩和矿体最大抗拉强度,且距离其他采空区距离较远,失稳风险较小。

2<sup>#</sup>采空区之间未完全贯通的岩体所受最大压应力 8 MPa 左右,2<sup>#</sup>采空区和 4<sup>#</sup>采空区之间的岩体所受最大压应力 7.5 MPa 左右,存在贯通的风险。各采空区顶板局部所受最大压应力 4.3~4.5 MPa,存在一定垮塌失稳的风险。对 700~740 m 中段之间的采空区进行充填后,1<sup>#</sup>采空区和 2<sup>#</sup>采空区中间未完全贯通的岩体两边被充填体包围,不会发生失稳破坏,2<sup>#</sup>采空区和 3<sup>#</sup>采空区、4<sup>#</sup>采空区未贯通的岩体两侧处于暴露状态,所受最大压应力 7.5 MPa 左右,有较大失稳贯通风险;未充填的采空区顶板仍然有较大范围处于暴露状态,采空区顶板局部所受最大压应力 4.3~4.5 MPa,存在一定垮塌失稳的风险。对 700~780 m 中段之间的采空区进行充填后,现阶段 700~780 m 中段采空区之间暴露的岩体被充填体完全包围,没有失稳破坏的风险,采空区之间不会发生相互贯通,3<sup>#</sup>采空区和 4<sup>#</sup>采空区



(a) 采空区现状; (b) 740 m 中段充填结束;  
(c) 780 m 中段充填结束; (d) 820 m 中段充填结束

图 3 采空区拉应力分布整体云图



(a) 采空区现状; (b) 740 m 中段充填结束;  
(c) 780 m 中段充填结束; (d) 820 m 中段充填结束

图 4 采空区压应力分布整体云图

图 4 为采空区压应力分布云图。由图 4 可知,压应力主要集中在采空区之间还未贯通的岩体,顶板局部也有应力集中现象。采空区未充填时,1<sup>#</sup>采空区和

上部仍有局部未充填,但采空区暴露面积大幅减小,采空区失稳风险降低。对700~820 m中段之间的采空区进行充填后,700~820 m中段之间采空区失稳的风险完全消失。与拉应力分布规律相似,5#采空区顶板所受压应力较大,但与下部采空区之间的岩体所受压应力较小,存在顶板垮塌风险,和下部采空区贯通的可能性较小。

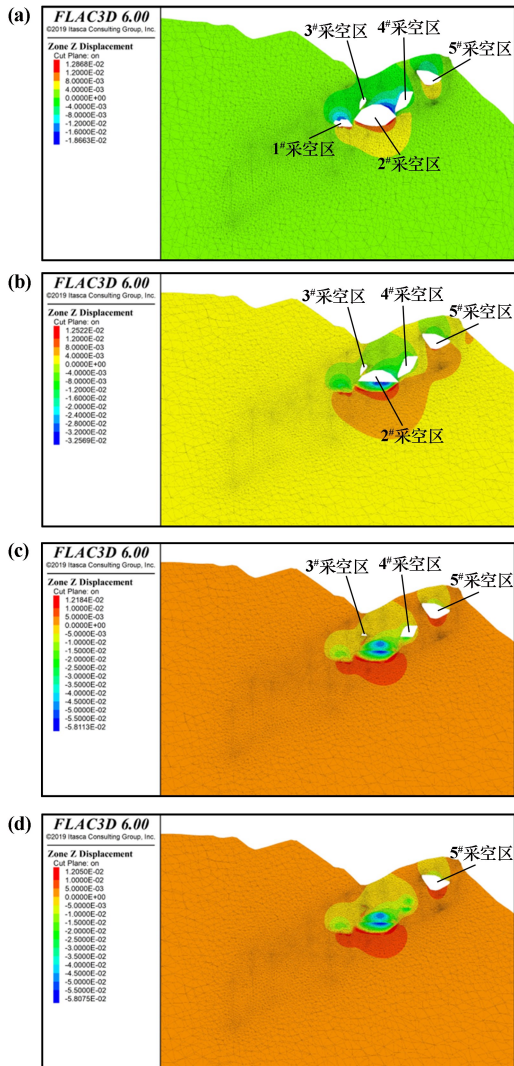
### 3.2 位移场分析

图5为采空区位移分布整体云图。采空区未充填时,1#采空区的顶板位移1.5 cm左右,1#采空区和2#采空区之间未完全贯通的岩体位移1 cm左右,2#采空区和3#采空区,4#采空区之间未贯通的岩体最大位移1.86 cm左右,4#采空区顶板最大位移1.6 cm左右,5#采空区位移0.9 cm左右。700~740 m中段之间的采空区充填结束后,1#采空区被完全充填,其他未充填采空区顶板位移较大,2#采空区和3#采空区,4#采空区之间

未贯通的岩体位移1.6 cm左右,5#采空区位移0.9 cm左右。700~780 m中段之间的采空区充填后,未充填的采空区位移变化较小,其中,3#采空区顶板有0.35 cm左右的位移,4#采空区顶板有0.8 cm左右的位移,5#采空区有0.9 cm左右的位移。700~820 m中段之间的采空区充填后,5#采空区顶板有0.9 cm左右的位移。

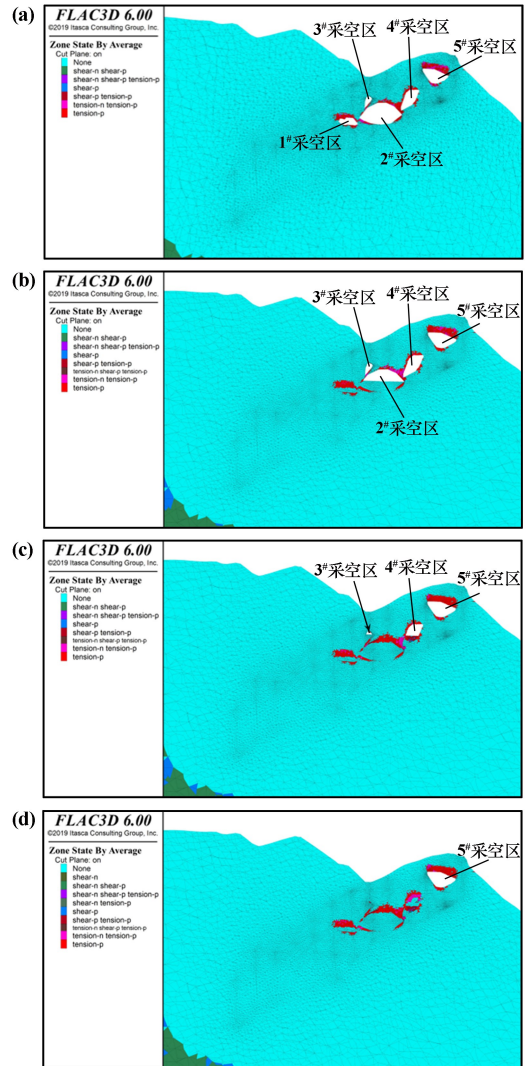
### 3.3 塑性区分析

采空区塑性区分布如图6所示。由图6可知,1#采空区顶板发生了大范围的塑性破坏,1#采空区和2#采空区之间未完全贯通的岩体产生了塑性破坏且局部贯通,2#采空区和4#采空区顶板发生较大的塑性破坏,2#采空区和3#采空区,4#采空区之间的岩体产生塑性破坏完全贯通,4#采空区和5#采空区之间的岩体基本没有塑性单元,5#采空区则有大范围塑性破坏。由此可知,700~820 m中段采空区之间岩体易发生失稳导致采空区贯通,进而诱发大面积的采空区失稳。



(a) 采空区现状; (b) 740 m中段充填结束; (c) 780 m中段充填结束; (d) 820 m中段充填结束

图5 采空区位移分布整体云图



(a) 采空区现状; (b) 740 m中段充填结束; (c) 780 m中段充填结束; (d) 820 m中段充填结束

图6 采空区塑性区分布整体云图

700~740 m 中段之间的采空区充填后,2<sup>#</sup>采空区和3<sup>#</sup>采空区、4<sup>#</sup>采空区之间的贯通风险未消除;采空区顶板暴露面积未减小,顶板产生了较大范围的塑性破坏。700~780 m 中段之间的采空区充填后,采空区之间相互贯通的风险消失,但4<sup>#</sup>采空区和5<sup>#</sup>采空区顶板仍有塑性破坏,顶板有可能发生垮塌;700~820 m 中段的采空区充填后,1<sup>#</sup>采空区、2<sup>#</sup>采空区、3<sup>#</sup>采空区、4<sup>#</sup>采空区塑性破坏的风险消除,但5<sup>#</sup>采空区有大范围的塑性破坏。

## 4 结 论

1) 采空区主要分布在700 m 以上中段,其中2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>采空区体积较大,初步估算,采空区总体积约 $40.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2) 基于数值模拟计算结果,当前采空区顶板不稳定,存在较大垮落风险;1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>采空区之间未贯通的岩体受力集中,塑性区贯通,有可能产生大规模失稳破坏。

3) 对700~820 m 中段采空区逐步充填后,采空区失稳风险逐渐消除,不会影响700 m 以下中段生产活动,建议优先对1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>采空区进行充填处理,可有效降低采空区大规模垮塌的风险。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王维. Mathews 图解法和 Q 系统分类法在苍山铁矿采场参数优化的应用[J]. 现代矿业, 2021,37(4):61-64.

- [3] 刘畅. 基于房柱法开采的缓倾斜大面积采空区群稳定性研究[D]. 长沙:长沙矿山研究院, 2013.
- [4] 赵延林,吴启红,王卫军,等. 基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(7):1424-1434.
- [5] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 基于突变理论的石膏矿矿柱-护顶层支撑体系的破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(增刊2):3837-3845.
- [6] 周科平,曹立雄,李杰林,等. 复杂采空区群稳定性数值分析及安全分级评价[J]. 黄金科学技术, 2022,30(3):324-332.
- [7] 赵亮,文兴,覃敏,等. 某石膏矿床深部开采稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2022,42(5):54-59.
- [8] 宋卫东,付建新,杜建华,等. 基于精密探测的金属矿山采空区群稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012,33(12):3781-3787.
- [9] 张宗国,史秀志,邱贤阳. 利用 Mathews 合成图与动静荷载数值模拟评价倾斜矿体采场稳定性[J]. 中国有色金属学报, 2022,32(5):1504-1514.
- [10] 杨勇,张敏思,张飞,等. 红岭多金属矿复杂采空区稳定性[J]. 科学技术与工程, 2021,21(35):14982-14987.
- [11] 王炳文,熊庭永,雷强,等. 玲珑矿区多阶段遗留采空区群稳定性分析及治理[J]. 矿业科学学报, 2019,4(5):425-433.
- [12] 阳俊,曾维伟. 基于 GA-BP 神经网络的采空区地表沉降预测模型[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):42-45.
- [13] 戴水平,李恒,李佳建. 基于数值模拟的大型采空区稳定性数值模拟研究[J]. 采矿技术, 2023,23(5):126-132.
- [14] 徐卫东,张永亮,陈晓利,等. 庙岭金矿采空区混合强度充填方法研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):14-18.
- [15] 张晶,周宗红,任凤玉,等. 充填条件下复杂采空区围岩冒落规律与治理方案研究[J]. 有色金属工程, 2023,13(3):121-128.

引用本文:刘畅,郭泽洋,江飞飞,等. 充填条件下采空区稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):17-21.

(上接第16页)

- [6] 何理,刘易和,李琳娜,等. 基于粒子群-最小二乘支持向量机模型的矿山爆破振动速度预测[J]. 金属矿山, 2022(7):145-150.
- [7] MONJEZI M. DEGHANI H. Evaluation of effect of blasting pattern parameters on back break using neural networks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45:1446-1453.
- [8] 田睿,李燕卿,刘占宁,等. 基于改进樽海鞘算法优化支持向量机的岩爆预测模型[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):5-9.
- [9] 刘英,毛羽,徐士超,等. 基于 PSO-BPNN 模型的爆破块度预测[J]. 爆破, 2024,41(2):136-142.
- [10] JIA Z, SONG Z, FAN J, et al. Prediction of blasting fragmentation based on GWO-ELM[J]. Shock and Vibration, 2022:7385456.
- [11] PATLE B K, BABU L G, PANDEY A, et al. A review: on path

planning strategies for navigation of mobile robot[J]. Defence Technology, 2019,15(4):582-606.

- [12] 赵红梦,姜志侠. PCA-BP 算法在地面爆破振动中的应用[J]. 工程爆破, 2020,26(5):30-35.
- [13] 徐国权,王鑫瑀. 基于神经网络算法的爆破振动预测模型开发[J]. 有色金属工程, 2023,13(5):94-102.
- [14] LIU Y, LI A, DAI F, et al. An AI-powered approach to improving tunnel blast performance considering geological conditions[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2024,144:105508.

引用本文:陈莎莎,何理,李腾飞,等. 基于 ACO-BP 模型的岩石爆破破碎块度预测[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):12-16.