

地下采矿引起地表塌陷离散元 PFC^{2D} 数值模拟研究^①

魏媛¹, 王飞飞^{2,3}, 任青阳², 肖宋强², 陈斌², 靳红华²

(1. 永州职业技术学院 智能制造与建筑工程学院, 湖南 永州 425100; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 3. 长沙矿山研究院有限责任公司 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要: 采用离散元 PFC^{2D} 建立了地质剖面颗粒流模型, 研究了矿体开采过程中上覆岩层裂缝形成与发展过程, 揭示上覆岩层逐渐垮塌崩落的机理。结果表明, 随着矿体的开采, 裂隙不断向上发展, 裂隙数增加。开采矿体后形成的采空区造成了上覆岩层的拉裂-剪裂破坏, 岩层中不断有新生裂缝产生。上覆岩层主要以拉裂缝发展为主, 在拉裂缝发展区域两端产生部分剪破坏裂缝, 在空区两端已经出现向上发展的裂缝集聚, 是空区顶板逐渐垮塌崩落的征兆。开采第3分层和第4分层矿体后, 出现了局部顶板垮塌现象, 且垮塌崩落逐渐发展为整个采空区顶板垮塌, 最终垮塌崩落至地表, 在地表初步形成一个小塌陷坑。塌陷坑发展过程依据裂隙数可细分为平稳发展时期、缓慢发展时期、快速发展时期和结束发展时期, 揭示了井下矿体开采致使上覆岩层拉裂-空区两端剪裂-整体垮塌崩落的形成机理。

关键词: 采矿工程; 地质灾害; 地表塌陷; 数值模拟; 离散元 PFC^{2D}

中图分类号: TD325

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.007

文章编号: 0253-6099(2023)02-0030-05

Numerical Simulation of Surface Subsidence Caused by Underground Mining Using Discrete Element Software PFC^{2D}

WEI Yuan¹, WANG Feifei^{2,3}, REN Qingyang², XIAO Songqiang², CHEN Bin², JIN Honghua²

(1. School of Intelligent Manufacturing and Architectural Engineering, Yongzhou Vocational Technical College, Yongzhou 425100, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. State Key Laboratory of Safety Technologies for Metal Mines, Changsha Institute of Mining Research Co Ltd. Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: By establishing a particle flow model of geological profile with discrete element software PFC^{2D}, the formation and development process of overlying strata cracks during the mining of ore body were studied, and the mechanism for overlying strata gradually developing into collapse and caving was also revealed. It is found that with the mining of ore bodies, fractures grow upward and increase in numbers. The goaf after mining can cause the overlying strata with tensile-shear failure, and also the new cracks will constantly occur in the strata. Tensile fractures predominantly develop in the overlying strata, but tensile fractures occur at the both ends of fracture development region. Also, more and more concentrated fractures grow upward at both ends of goaf, presenting a potential of gradual collapse and caving of goaf roof. After the third and fourth stratified ore bodies are mined out, roof collapse will take place locally and then gradually develop into roof caving of the whole goaf, finally leading to roof collapse to the surface and forming a small sinkhole on the ground surface. Then, the development progress of sinkholes can be subdivided into stable stage, slow-progress stage, rapid-progress stage and end of progress in terms of the numbers of fractures, presenting the mechanism for overlying strata developing from tensile fracture and shear fractures at both ends of goaf to overall collapse.

Key words: mining engineering; geological hazards; surface subsidence; numerical simulation; discrete element software PFC^{2D}

① 收稿日期: 2022-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(52104184, 41472262); 重庆市博士后研究项目(2021XM3038)

作者简介: 魏媛(1983—), 女, 湖南永州人, 硕士, 讲师, 主要从事工程管理与岩土工程方面的教学与研究工作。

通信作者: 王飞飞(1990—), 男, 安徽蚌埠人, 博士研究生, 工程师, 主要从事防灾减灾与防护工程研究工作。

随着经济高速发展, 工程建设项目剧增, 工程产生的地表塌陷灾害频发。其中, 矿体开采引起的地表塌陷尤为突出^[1-3]。矿体开采引起地表塌陷的原因众多, 涉及矿山的矿体性质、地质条件、开采方法等^[4-5]。因此, 对于特定的矿山条件, 需要有针对性地开展地表塌陷形成机制研究。

目前国内外已有多位学者针对矿体开采过程中地表塌陷形成与发展机理进行了相关研究^[6-13], 取得了丰富的研究成果。但多数学者采用的研究方法主要为现场机理分析、有限元模拟等, 对于采用离散元方法模拟地表塌陷形成机制方面的研究较少。本文以某铅锌矿具体的矿山塌陷坑为研究背景, 采用离散元 PFC^{2D}建立地质剖面, 研究矿体开采过程中上覆岩层裂缝形成与发展过程, 揭示上覆岩层逐渐垮塌崩落的机理。研究结果可为塌陷区治理设计提供参考。

1 工程概况

1.1 地层岩性

某铅锌矿地层较简单, 主要由奥陶系中统多宝山组及二叠系下统宝力格组及新生界第四系组成。奥陶系中统多宝山组主要位于矿区中部, 其岩性主要为砂卡岩、大理岩、黑云母角岩, 总厚度 498 m。二叠系下统宝力格组主要位于矿区西部及北部, 其岩性主要为凝灰质板岩、含角砾岩屑凝灰岩及凝灰岩。新生界第四系分布于矿区, 岩性以残坡亚砂土含碎石、风成砂为主, 一般厚 0.8~25 m。

1.2 地表塌陷概况

该铅锌矿采用崩落法开采矿山井下矿体。2007 年以前没有出现地表塌陷, 2008 年末出现小塌陷坑。2009 年后, 随着井下矿体的开采, 塌陷坑塌陷规模逐渐扩大。2019 年初, 地表塌陷坑已经发展成一个近似椭圆的、南北约 275 m、东西约 210 m 的塌陷坑, 塌陷坑坑口面积约 5.4 万平方米, 如图 1 所示。

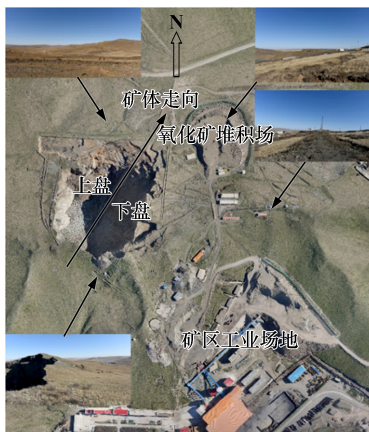


图 1 塌陷坑与周边概况

1.3 开采现状

矿山开采标高为 +890~+1 227 m。在同一水平内按照由上盘到下盘开采顺序。中段开采顺序为自上中段到下中段。在中段水平上自北翼风井向提升井由远及近后退式回采。对厚大矿体使用无底柱分段崩落法开采, 薄到中厚矿体的边角部分使用浅孔留矿法和分段空场法开采。

目前, 井下 998 m 以上分层已经回采完毕, 现回采 998 m、986 m、976 m、962 m、950 m 分层, 下部分层正在开拓巷道。

2 数值模拟

2.1 数值模型

为研究矿体开挖对上部覆盖岩层及周边围岩的影响, 根据矿体赋存条件随机选取了一处剖面(见图 2), 采用颗粒流数值模拟软件 PFC^{2D}建立了矿体开挖数值模型, 如图 3 所示。模型长和宽分别为 505 m 和 410 m, 由 112 080 个颗粒组成, 其中最小颗粒粒径为 0.588 m, 粒径比为 1.5, 颗粒粒径服从均匀分布。模型生成过程中, 控制整体孔隙率为 0.16。

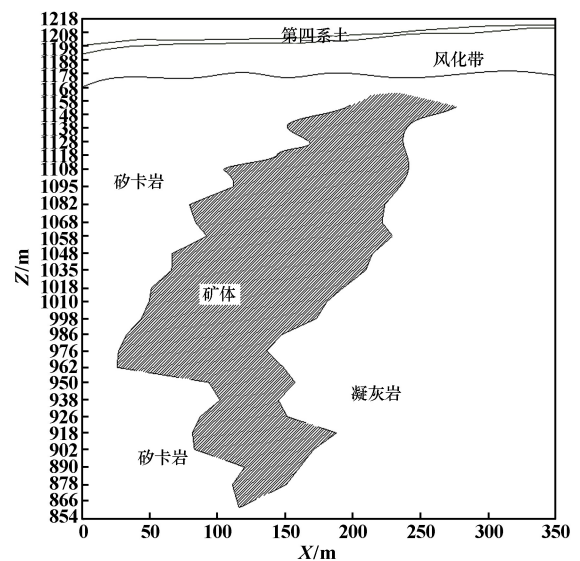


图 2 地质剖面

首先, 建立数值模型边界, 采用 wall create 命令生成四边墙, 用于控制颗粒生成范围以及设置边界条件。之后, 设定随机种子, 使数值模拟结果能够被复现, 同时设置颗粒间以及颗粒与墙体间默认的接触方式, 采用 ball distribute 命令按给定参数在模型范围内生成颗粒。由于初始颗粒相互重叠量大, 为使颗粒能够快速弹开、模型快速实现平衡, 此处采用缩放时间步, 并采用 calm 命令每运行 1 000 步进行速度清零, 设置模型平衡的标准为 aratio 小于 1×10^{-5} 。

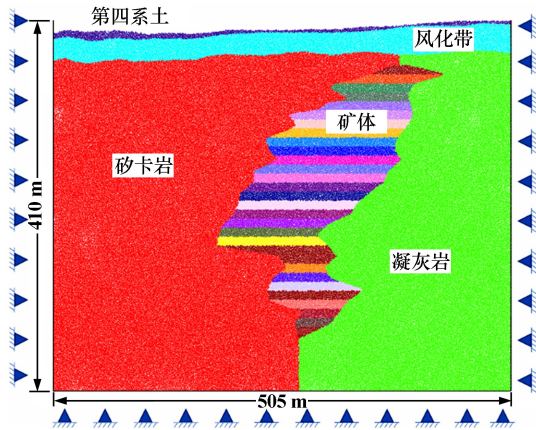


图3 矿体开采数值模型

初始模型颗粒间内力较大,采用伺服控制的方式进行模型应力释放,设定墙与颗粒间接触应力 1 MPa 后,通过实时监测墙受到的应力大小,并及时反馈调整墙运动的方向及速度,以达到设定标准。伺服后的模型在各方向均质性都能够得到保证,大大提高了数值模拟的精度。

根据现场岩体调查结果,整个剖面有 5 种不同性质的岩土,从上到下分别为第四系土、风化带、砂卡岩、矿体、凝灰岩。根据岩体力学参数测试结果,第四系土力学性质差、抗压强度低,采用散体进行模拟,设定其颗粒间接触模型为 linear model;风化带抗压强度比大于 8,为在数值模拟中体现这一特性,设定风化带颗粒间的接触模型为 flat-joint model;对于砂卡岩、矿体及凝灰岩,采用 parallel-bond model 进行模拟。

为方便区分不同岩性的岩土体,同时也为标记分段开采的矿体,在赋予颗粒间接触模型之后,使用 ball group 命令对颗粒进行了分组。之后,设定模型边界条件,上边界为自由面,并固定左、右、下边界。设置模型重力加速度为 9.8 g/cm^2 ,并开始进行重力沉降,在自重作用下进行试算使模型达到平衡。模型平衡后即可进行矿体开挖,同时记录相应数据,在风化带中按照 20 m 间距设置一排监测点,记录矿体开挖过程中不同位置覆岩层位移变化情况。

2.2 参数标定

在开展矿体开挖数值模拟前需要进行岩体强度参数标定,使模型能够真实反映实际岩体的宏观力学性能。对于完整岩体,在 PFC^{2D} 中进行参数标定的大致流程为:① 建模;② 调整接触参数;③ 开展单压数值试验;④ 结果比对。一直重复第 2~4 过程,直到模型表现出与物理试验相同的宏观力学性质,这个标定过程才能终止。本模型中,涉及到风化带、砂卡岩、凝灰

岩 3 种不同岩性的岩体,砂卡岩及凝灰岩采用平行黏结模型 (PBM) 进行模拟,风化带采用平板黏结模型 (FJM) 进行模拟。完整岩体材料宏观力学参数实验值与数值模拟值对比如表 1 所示。

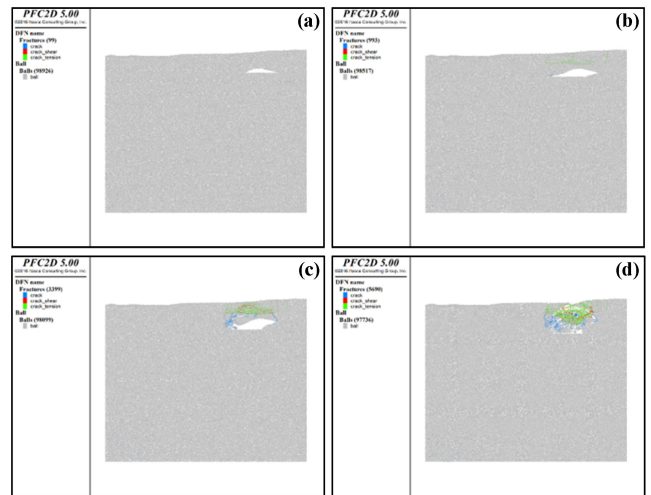
表 1 完整岩体材料宏观力学参数实验值与数值模拟值对比

岩体类别	参数类别	实验值	数值模拟值
砂卡岩	单轴抗压强度 (MPa)	10.2	10.6
	单轴抗拉强度 (MPa)	3.2	3.2
	弹性模量 (GPa)	7.5	7.6
	泊松比	0.29	0.28
凝灰岩	单轴抗压强度 (MPa)	14.2	14.4
	单轴抗拉强度 (MPa)	3.2	3.1
	弹性模量 (GPa)	6.2	6.1
	泊松比	0.23	0.21
风化带	单轴抗压强度 (MPa)	2.4	2.5
	单轴抗拉强度 (MPa)	0.4	0.4
	弹性模量 (GPa)	2.4	2.4
	泊松比	0.31	0.30

3 数值模拟结果分析

3.1 塌陷区形成过程离散元结果分析

地表塌陷过程中产生了众多裂隙。裂隙的发展演化展现了地表形成塌陷的过程,具体见图 4。



(a) 开采第 1 分层; (b) 开采第 2 分层;
(c) 开采第 3 分层; (d) 开采第 4 分层

图 4 围岩体裂隙发展演化

由图 4 可知,随着矿体的开采,裂隙不断向上发展,裂隙数不断增加。在 PFC 计算的第 190 500 步,即开采第 1 分层矿体,产生了 99 条裂隙,分布在空区的临近围岩中,在模型中不易察觉。开采第 2 分层矿体后,在采空区上覆岩层中产生了一定数量的裂隙,产生裂隙的区域与采空区有一定距离,说明采空区的形成

造成了上覆岩层的拉裂-剪裂,岩层中新生裂缝与既有裂缝不断循环往复产生。上覆岩层主要以拉裂缝发展为主,在拉裂缝发展区域两端产生部分剪破坏裂缝,矿体开采后形成采空区,岩层失去了下部支撑作用力,在重力作用下受拉破坏。在空区两端已经出现向上发展的裂缝集聚,是空区顶板逐渐垮塌崩落的征兆。开采第3分层矿体后,裂缝数发展到3399个,主要分布在采空区的上覆岩层中,主要为拉裂缝与剪裂缝。大量劣化后的裂缝失去了黏结力与抗剪力,此阶段采空区发生了局部冒顶垮塌崩落现象,且会持续发展下去,直至垮塌到地表形成小的塌陷坑。开采第4分层矿体后,裂缝数发展到5690个,主要分布在采空区上覆岩层中,主要为拉裂缝、剪裂缝与劣化裂缝。开采第3分层后即出现了局部顶板垮塌现象,开采第4分层延续并发展了顶板垮塌冒落现象,且垮塌崩落逐渐发展为整个采空区顶板垮塌,垮塌逐渐向上部覆盖层发展,距离地表越来越近,最终由于岩层抗拉强度与抗剪强度较低,在重力作用下垮塌崩落至地表,在地表初步形成一个小塌陷坑。

3.2 塌陷区发展过程离散元结果分析

围岩体裂隙数见图5,塌陷坑岩体裂隙演化过程如图6所示。

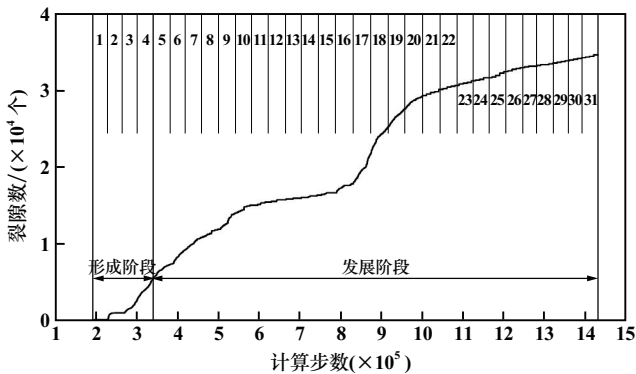
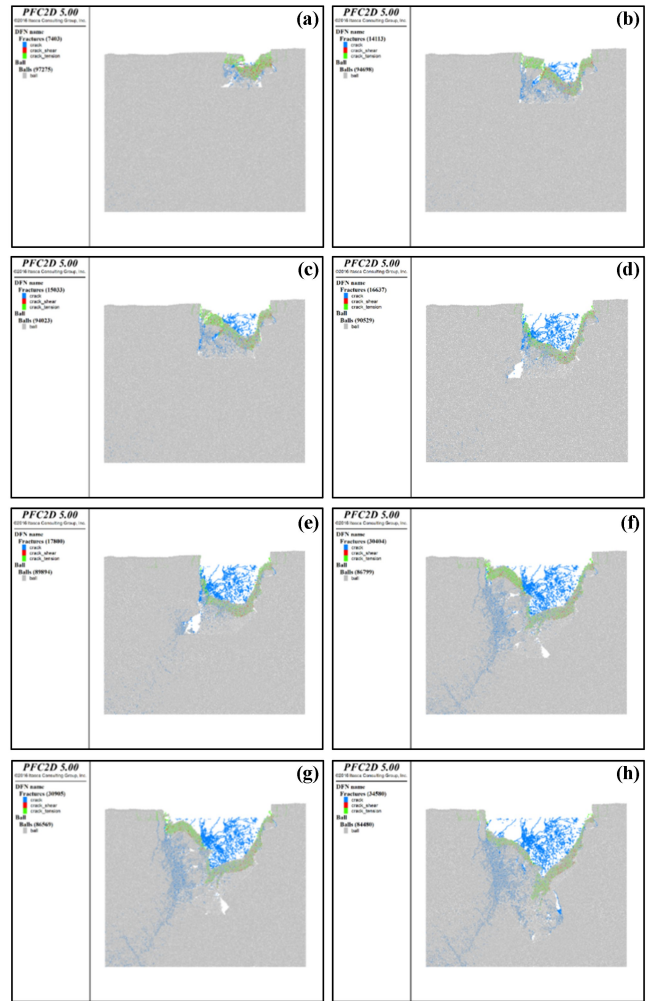


图5 围岩体裂隙数

由图5~6可知,离散元模拟地表塌陷过程中产生了众多裂隙,主要以拉裂缝与剪切裂缝为主。开采第4分层矿体后在地表形成了小塌陷坑。开采第5~31分层矿体为塌陷区不断发展的阶段,开采不同分层对塌陷区的发展产生了不同影响。为了能够深入研究塌陷区发展过程,依据裂隙数产生的快慢与个数,将发展阶段主要细分为平稳发展时期、缓慢发展时期、快速发展时期和结束发展时期。平稳发展时期主要为开采第5~9分层矿体,缓慢发展时期主要为开采第10~15分层矿体,快速发展时期主要为开采第16~22分层矿体,结束发展时期主要为开采第23~31分层矿体。



(a) 开采第5分层; (b) 开采第9分层;
(c) 开采第10分层; (d) 开采第15分层;
(e) 开采第16分层; (f) 开采第22分层;
(g) 开采第23分层; (h) 开采第30分层

图6 塌陷坑岩体裂隙演化过程

平稳发展时期,围岩体内裂隙发展延续了塌陷坑形成过程的趋势,裂隙数由第5分层的7403个增加到第9分层的14113个。由于开采深度相对较浅,在矿体上盘形成的陡立边坡高度较小,矿体上盘岩层发生了小规模的垮塌,产生裂隙数的变化趋势较为平稳。

缓慢发展时期,围岩体内裂隙数产生速率较慢,曲线较为平缓,裂隙数由第10分层的15033个增加到第15分层的16637个。开采第5~9分层时,塌陷坑完成了初步的发展规模,矿体上盘陡立边坡体产生了较多裂隙,边坡体完成了垮塌,已经形成了初步稳定的状态。缓慢发展时期是矿体上盘岩体进一步垮塌发展的孕育初步,围岩体处于基本稳定状态,裂隙产生速率缓慢且较少。

快速发展时期,围岩体内裂隙数产生速率较快,曲线陡峭,裂隙数由第16分层的17800个增加到第22

分层的 30 404 个。该时期产生大量裂隙,分层之间矿体宽度较大,上下盘岩体失去了支撑,产生大范围垮塌崩落。

结束发展时期,围岩体内裂隙数产生速率较慢,曲线较为平缓,裂隙数由第 23 分层的 30 905 个增加到第 31 分层的 34 580 个。23~31 分层之间矿体宽度较小,为深部矿体,之前垮塌崩落的岩石在矿体上部形成了覆盖层,对塌陷坑四周的陡壁有一定支撑作用,且陡立边坡在快速发展时期发生了较大范围的垮塌,已经处于基本稳定状态。因此,开采第 23~31 分层矿体产生裂隙数的速率较小,裂隙数增加较为缓慢。

4 结 论

采用离散元 PFC^{2D} 建立了地质剖面,研究了矿体开采过程中上覆岩层裂缝形成与发展过程,揭示上覆岩层逐渐垮塌崩落的机理,得到以下结论:

1) 随着矿体的开采,裂隙不断向上发展,且裂隙数增加。开采矿体后形成的采空区造成了上覆岩层拉裂-剪裂破坏,岩层中不断有新生裂缝产生。

2) 上覆岩层主要以拉裂缝发展为主,在拉裂缝发展区域的两端产生部分剪破坏裂缝,在空区的两端已经出现向上发展的裂缝集聚,是空区顶板逐渐垮塌崩落的征兆。

3) 开采第 3 和第 4 分层矿体后,出现了局部顶板垮塌现象,且垮塌崩落逐渐发展为整个采空区顶板垮塌,垮塌逐渐向上部覆盖层发展,最终由于风化岩层的抗拉强度与抗剪强度较低,在重力作用下垮塌崩落至地表,在地表初步形成一个小塌陷坑。

4) 依据裂隙数产生的快慢与个数,将发展阶段主要细分为平稳发展时期、缓慢发展时期、快速发展时期和结束发展时期。

5) 揭示了井下矿体开采致使上覆岩层中间拉裂-空区两端剪裂-整体垮塌崩落的形成机理。

参考文献:

- [1] 姜安民,董彦辰,江学良,等. 露天转地下开采引起露天采场边坡垮塌数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):14-17.
- [2] 刘洋,刘晓光,侯奎奎,等. 深部矿体开采对隔离矿柱及回填体的稳定性影响研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):29-35.
- [3] 王田龙,陈从新,夏开宗,等. 基于监测数据的陡倾结构金属矿山下盘岩层移动机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022,41(7):1409-1426.
- [4] 亓文斌,田春艳,王飞飞,等. 采矿引起地表塌陷过程中的地应力转移演化规律研究[J]. 有色金属工程, 2021,11(12):86-92.
- [5] 亓文斌,刘会林,王飞飞,等. 地下采矿引起山体滑坡发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):29-32.
- [6] 王飞飞,田春艳,任青阳,等. 地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):22-25.
- [7] 王飞飞,任青阳,邹平,等. 查干敖包铁锌矿地表塌陷形成机制与发展机制研究[J]. 岩土力学, 2020,41(11):3757-3768.
- [8] 甯瑜琳. 多中段层叠采空区处理与地表塌陷坑治理方案研究[J]. 矿业研究与开发, 2017,37(11):26-29.
- [9] 宋许根,刘秀敏,陈从新,等. 程潮铁矿西区采空区地表塌陷机制与变形规律初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,37(S2):4262-4273.
- [10] 邓洋洋,陈从新,夏开宗,等. 程潮铁矿西区地表塌陷成因分析[J]. 岩土力学, 2019,40(2):743-758.
- [11] 王栋毅,李夕兵,黎崇金,等. 地下采矿引起地表塌陷机理研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(1):16-21.
- [12] 丁飞,付俊,周罕,等. 河流下开采岩层移动及地表变形预测研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):14-16.
- [13] XIA Kaizong, CHEN Congxin, LU Zude, et al. Investigation of the ground movement due to underground mining at the Jinshandian Iron Mine in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78:715.

引用本文:魏媛,王飞飞,任青阳,等. 地下采矿引起地表塌陷离散元 PFC^{2D}数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):30-34.

(上接第 29 页)

- [5] MENG Qingbin, HAN Lijun, ZHANG Jian, et al. Research and application of supporting technology in deep hing stress fractured softrock roadway[J]. Journal of Central South University (Nature Science Edition), 2016,47(11):3861-3872.
- [6] 王伟东,苏承东,孟亚周. 基于煤层顶底板岩石力学参数的综采技术可行性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018,46(12):113-118.
- [7] 丁振杰,郑俊,吕庆,等. 《工程岩体分级标准》中边坡工程岩体质量指标计算方法的讨论[J]. 岩土力学, 2019,40(S1):275-280.
- [8] 姜明伟,刘焕新,王玺,等. 基于 Sirovision 节理岩体调查及岩体质量分级与支护研究[J]. 有色金属工程, 2022,12(1):115-121.
- [9] 沙鹏,赵逸文,高书宇,等. 隧道层状岩体质量评价的 BQ 分级改进[J]. 工程地质学报, 2020,28(5):942-950.
- [10] 张钦礼,李晓孟. 基于 Mamdani FIS 模型及 RMR 法的岩体质量分级研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):1-4.
- [11] 范文录,刘育明,陈晓云,等. 眼前山铁矿矿岩分区可崩性评价研究[J]. 中国矿山工程, 2020,49(1):27-29.
- [12] 关崇峻. 基于 MRMR 的岩体数据采集及边坡角初定[J]. 现代矿业, 2017,33(12):67-71.

引用本文:杨子超,张绍国,钟炮,等. 铜坑矿 92 号矿体巷道顶板岩体质量评价[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):26-29.