

中文引用格式:黄明清,李兆岚,刘青灵,等. 超大规模自然崩落法开采岩移非线性发展特征[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 67-74.

英文引用格式:HUANG Mingqing, LI Zhaolan, LIU Qingling, et al. Nonlinear evolution of rock movement in ultra-large-scale block caving mining[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 67-74.

超大规模自然崩落法开采岩移非线性发展特征^{*}

黄明清¹教授, 李兆岚¹, 刘青灵¹副教授, 申逸凌¹, 郭晓强²高级工程师

(1 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108; 2 塞尔维亚紫金铜业有限公司, 波尔 19210)

中图分类号: X936; TD853

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.0058

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2903900); 福建省自然科学基金资助(2024J01365)。

【摘要】 为提高矿山安全管控水平, 构建国外某超大规模自然崩落法矿山大尺度精细化三维数值模型, 采用 FLAC^{3D} 模拟开采生命周期内崩落体发展及地表岩移时空演化特征, 并基于复合岩移标准评估地表构筑物的安全性。结果表明: 崩落体的发育呈现出显著的不连续、间歇式、跳跃性的非线性特征, 且其扩展模式存在明确临界转换条件——未崩通地表前以竖向崩落为主, 崩通地表后转变为以侧向扩展为主。地表崩落区的扩展过程呈现出 2 阶段演化特征, 初期因表土层松软而快速扩展, 中后期则因地表散体碎屑物的填充进入速率衰减期, 最终形成与拉底面积和位置高度耦合的崩落区。基于复合岩移标准的岩移区评估显示, 该矿山开采生命周期内地表重要建(构)筑物均处于岩移区之外, 且曲率“率先超限”的特征可作为预测崩通地表时机的早期指标。

【关键词】 超大规模; 自然崩落法; 岩移标准; 非线性发展; 崩落区; 岩移范围

Nonlinear evolution of rock movement in ultra-large-scale block caving mining

HUANG Mingqing¹, LI Zhaolan¹, LIU Qingling¹, SHEN Yiling¹, GUO Xiaoliang²

(1 Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China;

2 Serbia Zijin Copper D. o. o. , Bor 19210, Serbia)

Abstract: In order to enhance mine safety management, a ultra-large refined three-dimensional numerical model for an oversea ultra-large-scale block caving mine was established. The spatiotemporal evolution patterns of underground cave bodies and surface rock movement throughout the mining were simulated using FLAC^{3D}, and the safety of surface infrastructures was evaluated according to composite surface subsidence criteria. Results demonstrate that caving morphology development exhibits discontinuous, intermittent and leapfrogging characteristics. A definitive transition threshold exists in propagation modes – vertical caving dominates prior to surface breakthrough, shifting to lateral propagation afterwards. Caving crater expansion follows bimodal evolutionary patterns: initial rapid large-scale caving due to weak superficial strata, transitioning to velocity attenuation in mid-late stages through debris infill, ultimately forming cave zones with high spatial correlation to undercut areas and location. Evaluations based on composite subsidence criteria confirm that critical surface infrastructures remain outside the

subsidence limit throughout the mining. Furthermore, the "priority exceedance" characteristic of curvature parameters proves effective as an early warning indicator for surface breakthrough.

Keywords: ultra-large-scale; block caving; surface subsidence criteria; nonlinear evolution; cave zone; subsidence limit

0 引言

自然崩落法是一种大规模、高效率、低成本的采矿方法^[1],自1895年在美国Pewabic铁矿成功应用以来,引起了矿业界的高度关注^[2],特别是在过去20年中,矿石品位的持续下降,使得这种能够有效处理低品位厚大矿体的方法变得更加具有吸引力^[3]。然而,采用自然崩落法进行开采时,连续的拉底和出矿作业往往会引发地表的大范围塌陷以及移动,这些问题限制了该方法更广泛的推广应用^[4]。因此,准确预测地表塌陷及岩体移动范围显得尤为重要。

国内外学者多采用理论分析^[5-6]、物理试验^[7-8]和数值模拟^[9-10]等方法预测或阐释自然崩落法引起地表岩移范围或岩移机制。其中,数值模拟因计算机与建模软件的发展,成为地表岩移预测的重要工具^[11-12]。SJÖLANDER等^[13]使用FLAC^{3D}模拟了瑞典Luossavaara-Kiirunavaara AB矿开采至2070年的地表岩移过程,并通过水平和垂直应变来界定地表塌陷区,同时利用岩移角确定地表移动带;结果表明:地表塌陷区的扩展方向与开采方向基本相同,且水平和垂直应变所界定的地表塌陷区范围显示出高度的一致性,但岩移角随开采深度的增加而略有减小。FUENZALIDA等^[14]使用FLAC^{3D}研究澳大利亚Cadia East矿崩落特征时,使用崩落损伤因子判断地表塌陷区域,发现由该指标界定的地表塌陷区与现场实际基本一致。同样地,ÁLVAREZ等^[9]利用FLAC^{3D}模拟国外某矿山地表崩落区发展过程,并将其与过去不同时间点已知的塌陷坑边界进行对比,结果显示,二者之间的吻合度较高。HEBERT等^[15]提出一种将FLAC^{3D}与CAVESIM软件耦合的方法,用于模拟和研究崩落的发展特征,并探讨节理对崩落过程的影响,结果表明:陡倾斜断层会导致更快的垂直崩落速率,并使地表塌陷区的形成时间提前。WANG Feifei等^[16]构建了大梁铅锌矿的三维数值模型,通过竖向沉降来界定地表岩移范围,并探讨地下开采引发的地表沉降、塌陷过程;指出地表沉降、塌陷过程可分为上覆岩层变形、地表开裂、地表局部塌陷及地表大范围塌陷4个阶段。GARZA-CRUZ

等^[17]提出以总应变及垂直位移分别定义地表塌陷区及岩移区,并基于FLAC^{3D}评估了墨西哥La Encantada矿因崩落引起的大范围地表沉降及其对区域内建筑物可能造成的破坏影响;结果显示,当该银矿C660开采完成时,岩移区边界将在其南部边缘向矿山办公大楼方向增加15~20 m。上述研究为预测岩移范围提供了良好的基础,但倾向于应用单一的岩层移动标准,限制了其在复杂地表构筑物情况下的适用性;同时,对地下崩落体与岩移发展的相互关系关注较少。

鉴于此,笔者引入一套复合岩移标准,并以国外某原矿设计产量为1800万t/a的超大规模自然崩落法矿山为研究对象,建立该矿山大尺度精细化三维数值模型,使用FLAC^{3D}有限元软件模拟分析塌陷坑废石回填条件下开采生命周期内地表岩移发展过程,并评估该矿山关键地表构筑物的安全性,以期矿山安全生产建设提供科学依据,也为相关工程领域的岩移评估提供参考。

1 地表岩移界定标准

参照国内外的岩移标准及矿山实例,对于地表岩移的界定通常采用一系列特征量参数,包括垂直位移、水平位移、倾斜、水平变形、曲率以及相对转角等。

1.1 岩移参数

为明确岩移特征参数,选取典型剖面,假设沉降前的原始地表有A、B、C、D这4个参考点,由于矿体开采导致沉降后地表参考点对应A'、B'、C'、D',如图1所示。下面分别论述岩移特征量参数:

1) 垂直位移。垂直位移为特征点的竖向位移,图1中 S_V 。

2) 水平位移。水平位移为特征点的横向位移,图1中 S_H 。

3) 倾斜。倾斜为垂直位移在水平方向的导数,图1中 i_{BC} ,则:

$$\Delta S_V = S_{VB} - S_{VC} \quad (1)$$

$$i_{BC} = \frac{\Delta S_V}{l_{BC}} \quad (2)$$

式中: S_{VB} 为 B 点垂直位移; S_{VC} 为 C 点垂直位移; l_{BC} 为 B 、 C 这 2 点间距。

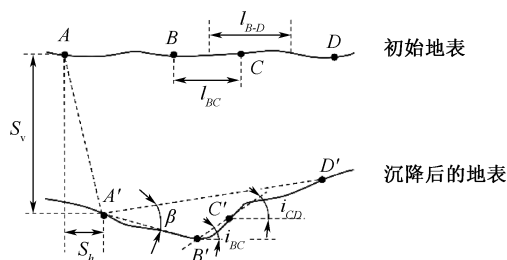


图1 沉降前后地表特征点

Fig. 1 Surface feature points before and after subsidence

4) 水平变形。水平变形 ε_{BC} 为水平位移在水平方向的导数。

$$\Delta S_H = S_{HB} - S_{HC} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{BC} = \frac{\Delta S_H}{l_{BC}} \quad (4)$$

式中: S_{HB} 为 B 点横向位移; S_{HC} 为 C 点横向位移。

5) 曲率。曲率是针对曲线上某个点的切线方向角对弧长的转动率,表明曲线偏离直线的程度。 BC 段的倾斜 $i_{BC} = (S_{VB} - S_{VC}) / l_{BC}$, CD 段的倾斜为 $i_{CD} = (S_{VC} - S_{VD}) / l_{CD}$, 则 C 点的曲率 K_C 为:

$$K_C = \frac{i_{BC} - i_{CD}}{l_{B-D}} \quad (5)$$

式中: S_{VD} 为 D 点垂直位移; l_{B-D} 为 BC 和 CD 中点的水平距离。

6) 相对转角。图1中 β 为 AB 与 AD 位移之后的夹角,表明地表不均匀变形的程度,可通过下式计算:

$$\beta = \arccos^{-1} \frac{\mathbf{A'B'} \cdot \mathbf{A'D'}}{|\mathbf{A'B'}| \cdot |\mathbf{A'D'}|} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A'B'}$ 为 A 到 B' 点的向量; $\mathbf{A'D'}$ 为 A 到 D' 点的向量; $|\mathbf{A'B'}|$ 、 $|\mathbf{A'D'}|$ 为向量的模长。

1.2 岩移标准

矿山地表环境由基础设施、公共建筑、自然景观及铁路、隧道等多元要素构成。不同类型的地表构筑物对各类监测指标的响应各异,其破坏程度也有所不同。如垂直位移对某些公共建筑物的影响有限,却可能导致道路和铁路等构筑物的断裂破坏。相比之下,水平变形和曲率等可能对承重墙等结构造成严重的损害^[19]。

对于复杂矿区,单一岩移标准难以全面评估矿山地表构筑物对于岩移的响应程度。因此,通过结合中国行业规范、欧洲岩移标准及同类矿山工程经

验,提出适用于该矿山的复合岩移标准,以期实现对地表构筑物的风险防控。

复合岩移标准是适用于地表自然景观、公用、民用建构筑物及矿山基础设施,确定岩移范围时必须同时满足倾斜、水平变形、相对转角及曲率的以下指标:①倾斜: $i = \pm 3 \text{ mm/m}$; ②水平变形: $\varepsilon = \pm 2 \text{ mm/m}$; ③相对转角: $\beta = 1/500$; ④曲率: $K = \pm 0.2 \times 10^{-3} / \text{m}$ 。

2 岩移数值模型构建与模拟方案

2.1 超大规模自然崩落法开采条件

欧洲某超大规模低品位斑岩型铜矿的矿体总体走向北西-南东,倾向南西,倾角 $45 \sim 55^\circ$ 。矿体走向长度约 $1\,450 \text{ m}$,宽度约 360 m 。该矿浅部矿体前期历经露天开采和空场法开采,目前老露天坑作为相邻露天矿山的排土场使用,地采形成的采空区位于露天坑下方,埋深范围 $510 \sim 630 \text{ m}$,总体积约为 290 万 m^3 。

该矿深部矿体计划采用超大规模自然崩落法开采,设计原矿生产能力 $1\,800 \text{ 万 t/a}$;在埋深 818 、 788 m 分别布设主、副拉底层,拉底层高 10 m ,初始拉底位于矿体中部偏南区域,拉底方向从中部向四周推进。

矿山地表环境复杂,包括矿部、老露天坑、老排土场、墓地、河流、地下引水涵洞等关键建(构)筑物或景观。可能受自然崩落法开采影响的主要基建工程包括上盘1号回风井、2号回风井,下盘进风井,新副井及相应的工业场地。

2.2 矿区大尺度精细化三维数值模型

数值建模涵盖泥岩、安山岩、矿岩、断层、砾岩等主要岩层,以及老露天坑、老排土场、回填废石、地表基础设施、地形地貌等。建模方法与王伟澄等^[18]的研究一致,采用CAD和Rhino软件构建一个尺寸为 $3\,600 \text{ m}$ (长) $\times 3\,000 \text{ m}$ (宽) $\times 1\,000 \text{ m}$ (高)的连续介质模型。模型采用四面体单元进行网格划分,最小单元边长为 1.5 m ,最大边长 $30 \sim 35 \text{ m}$,总网格数量约为 $(310 \sim 415)$ 万。数值模型导入FLAC^{3D}后,如图2所示。

2.3 岩移发展数值模拟条件

1) 岩体力学参数。经由室内试验获得岩石力学参数后,利用Rocscience RocData软件计算不同岩性岩体的力学参数,模型所输入的岩体力学参数见表1,剪胀角取 10° 。

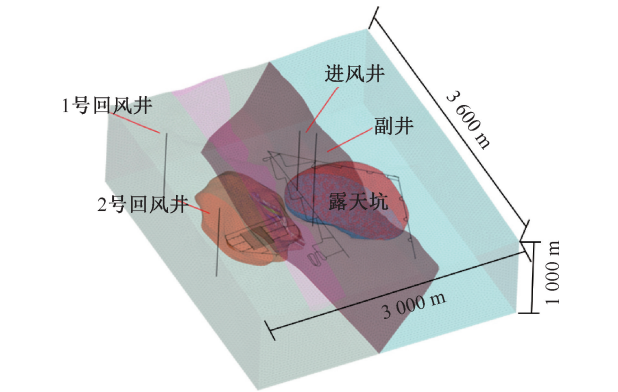


图2 矿区大尺度精细化三维数值模型
Fig. 2 Large-scale detailed three-dimensional numerical model of mine

表1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

岩性	容重 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗 拉强度 σ_t /MPa	地质强 度指标	Hoek- Brown 常数 m_i	弹性 模量 E_i /GPa
砾岩	25.63	0.070	47	20.394	24.30
矿岩	28.76	0.832	65	9.543	48.10
安山岩	26.41	0.489	67	21.697	46.23
泥岩	27.38	0.053	30	6.000	29.68
断层	25.63	0.090	41	6.000	2.49
废石堆	18.82	0.000 1	40	19	4.88

2) 本构模型。使用高级应变软化模型,该本构模型通过构建一个屈服包络线以及2条用于描述峰后行为的残余强度包络线,能够准确捕捉岩石从初始破裂到最终碎胀的全过程^[20],在模拟岩体崩落过程中的渐进性破坏行为方面表现出色^[19]。

3) 边界条件。边界条件为模型底部周界采用刚性约束条件(完全固定),在沿走向方向和垂直走向采用位移约束条件(滚支固定),模型顶部采用柔性约束条件,并作为自由面施加初始应力。

4) 地应力反演。为准确反映岩体内部的应力状况,在考虑岩体自重应力及构造应力的基础上,进行地应力反演分析,所获得的结果可用来表示不同埋深水平下的初始地应力分布。埋深818 m拉底主层的地应力反演结果分别为:垂直地应力 $\sigma_z = 16.54$ MPa,垂直走向地应力 $\sigma_x = 20.17$ MPa,沿走向地应力 $\sigma_y = 21.66$ MPa。

2.4 岩移发展数值模拟方案

1) 拉底方案。矿山开采周期内设20个模拟步骤,其中,基建期共4年设为1个模拟节点,拉底1次;基建结束后第1年至基建结束后第19年每年

设为1个节点,拉底19次,累计拉底面积491 700 m^2 ,随后无新增加拉底面积和放矿点。拉底过程数值模型如图3所示,数值模拟方案见表2。

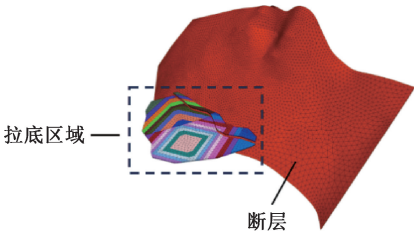


图3 拉底过程数值模型
Fig. 3 Numerical model of the undercut process

表2 自然崩落法岩移发展数值模拟方案
Table 2 Numerical simulation schemes of rock movement in block caving

数值模拟步骤	生产进度	累计拉底面积/ m^2
1	基建	30 000
2	基建结束后第1年	60 000
3	基建结束后第2年	90 000
4	基建结束后第3年	120 000
5	基建结束后第4年	144 000
6	基建结束后第5年	144 000
7	基建结束后第6年	168 000
8	基建结束后第7年	193 500
9	基建结束后第8年	220 500
10	基建结束后第9年	241 500
11	基建结束后第10年	262 500
12	基建结束后第11年	283 500
13	基建结束后第12年	307 500
14	基建结束后第13年	331 500
15	基建结束后第14年	355 500
16	基建结束后第15年	379 500
17	基建结束后第16年	409 500
18	基建结束后第17年	439 500
19	基建结束后第18年	469 500
20	基建结束后第19年	491 700

2) 废石回填方案。相邻某露天矿向该矿老露天坑排放废石,在填平闭合坑口之后再往上堆高至标高440.0 m,堆置总高度280 m。模拟初期,一次性排放废石至340 m标高,废石排放总量约 1.24×10^8 t,对应年限为基建结束后第1年至基建结束后第5年,共5年;基建结束后第6年,一次性排放废石至440 m标高,累计排放总量约 2.60×10^8 t。对应年限为基建结束后第6年至基建结束后第19年,共14年。

3 岩移非线性发展过程模拟及讨论

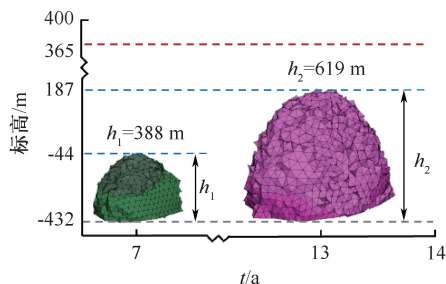
3.1 崩落体非线性发展特征

自然崩落过程中的矿岩损伤演化过程可通过弹性区崩落损伤因子 d_1 及剪胀行为崩落损伤因子 d_2 表征^[20]。

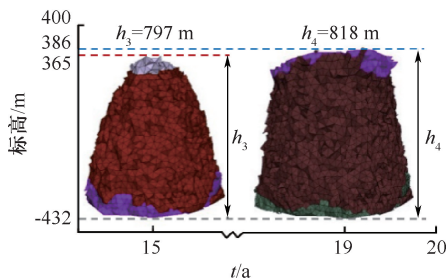
$$\begin{cases} d_1 = 1 - \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_{cr}^p} \\ d_2 = n \cdot \frac{\varepsilon^v}{\varepsilon_{cr}^v} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε^p 为剪切塑性应变; ε_{cr}^p 为临界塑性应变; $n=1$ (剪切) 或 $n=-1$ (剪胀); ε^v 为体积应变; ε_{cr}^v 为临界体积应变。

当岩体发生碎胀行为时, 该区域发生崩落, 其对应的崩落损伤因子取值范围为 $-1 \sim 0$ 。生产周期内, 崩落体形态演变如图 4 所示。在基建拉底后, 崩落体形态呈现出“锥状”。随着水平拉底作业的不断进行, 上覆岩层在地应力及次生应力的作用下失稳破坏, 使得崩落体不断扩展。至基建结束后的第 15 年, 崩落体贯通地表, 此后崩落模式由竖向崩落转变为侧向崩落, 最终形成圆台状的崩落体形态。



(a) 基建结束后第7年与第13年崩落体形态



(b) 基建结束后第15年与第19年崩落体形态

图 4 不同生产时期崩落体形态演变

Fig. 4 Morphological evolution of cave bodies during different production periods

在不同生产时期, 岩体崩落过程表现出显著的不连续、间歇式、跳跃性的非线性发育特征。不同生

产时期崩落体体积与高度如图 5 所示。崩落体高度随时间变化呈现出 S 型曲线, 对应着崩落体发展的 4 个阶段: 快速增长期、缓慢增长期、急剧增长期和崩通地表及以后的稳定期。

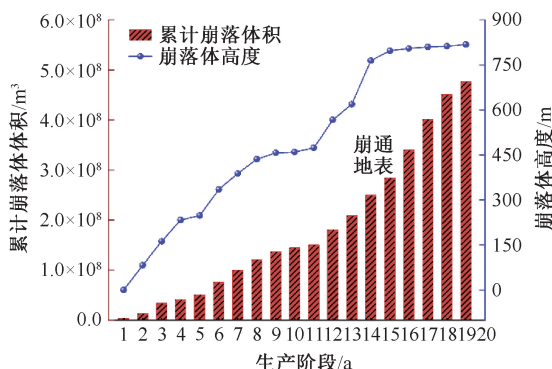


图 5 不同生产时期崩落体体积与高度

Fig. 5 Volume and height evolution of cave bodies during different production periods

1) 崩落体快速增长 (基建期至基建结束后第 7 年)。在此期间, 崩落体体积激增至 $9.98 \times 10^7 \text{ m}^3$, 年均增速 $1.25 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$; 崩落体高度跃升至 388 m, 年均增速 48.5 m/a, 且增速近乎无衰减。基建结束后的第 7 年内, 崩落体突破矿体与围岩之间的交界面, 触发后续演化模式的首次速率突变。

2) 崩落体缓慢增长 (基建结束后第 8 ~ 11 年)。突破矿岩交界面后, 崩落体于上部安山岩中继续扩展, 体积增速较上一时期维持稳定, 高度增速骤降至 9.5 m/a, 且年际波动显著, 具有“跳跃-间歇性停滞”增长的特征。

3) 崩落体急剧增长 (基建结束后第 12 ~ 15 年)。该时期内崩落体接触到浅部泥岩, 引起二次速率突变, 崩落体体积年均增速跃升至 $3.36 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ (增长约 268%), 高度年均增速同步提升至 80.8 m/a。截至基建结束后的第 15 年, 崩落体高度增至 797 m 并贯通地表, 累计崩落体体积达到 $2.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。标志着崩落体扩展模式由竖向扩展转变为侧向扩展, 同时该生产年份内, 地表大面积塌陷, 形成初始崩落区。

4) 崩通地表及以后 (基建结束后第 16 ~ 19 年)。该阶段内崩落体体积-高度演化趋势显著分离, 崩落体体积持续增长至 $4.76 \times 10^8 \text{ m}^3$, 但高度演化基本停滞, 此时, 崩落体扩展由侧向扩展主导, 于地表处表现为崩落区面积不断扩大。

3.2 地表崩落区阶段式扩展特征

基建结束后第 15 年首次崩通地表, 随着地下开

采活动的持续进行,崩落区逐渐扩大,其空间发育方向呈现出显著差异:西向和北向扩展较为显著,而南向、东向扩展则较为滞后。这种差异性与该区域分布的泥岩密切相关,泥岩强度较低,在崩落扰动引起的地应力重分布过程中,更容易产生连贯性的塌陷。最终的地表崩落区如图 6 所示,其空间分布基本位于拉底区域对应的地表范围内,且其面积小于拉底面积,约 0.27 km²。此外,上盘区域崩落区发育高度连续,表现出“肾状”的几何形态;下盘区域受地表起伏影响,崩落区呈现出离散状的“天窗”形态,空间连续性显著降低。

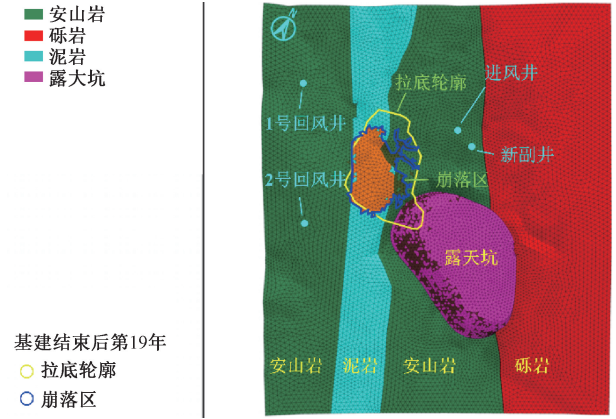


图 6 崩落区分布 (基建结束后第 19 年)
Fig. 6 Distribution of the cave zone (19 years after infrastructure completion)

基建结束后第 19 年,主要井巷工程中上盘 1 号、2 号回风井,下盘进风井、新副井距离崩落区边缘均较远,进风井在不规则的崩落区最东侧之外约 537.7 m,表明地表主要基建工程受崩落区的直接安全威胁较小。

将拉底面积作为自变量 x ,崩落区面积作为因变量 y ,进行拟合,获得如下拟合公式(拟合曲线如图 7 所示):

$$y_1 = (-2.12 \times 10^8) \exp\left(\frac{-1}{57.237}\right)x + 311\,865.78 \quad (8)$$

式中: y_1 为崩落区面积, m²; x 为拉底面积, m²。

由图 7 可知:崩落区扩展过程呈现出 2 阶段演化特性,并具有典型的非线性演化特征。基建结束后第 15~16 年内(崩通地表初期),崩落区面积以年均 7.09×10^4 m²/a 激增,累计达 1.42×10^5 m²;至基建结束后第 17 年出现拐点,崩落区年均扩展速率降至 4.33×10^4 m²/a,随后持续趋缓。这种阶段性演化特征源自崩落区与碎屑散体的交互作用。崩通地表

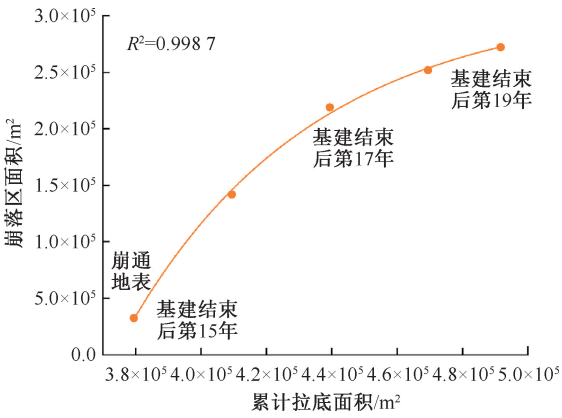


图 7 崩落区面积随拉底面积变化趋势
Fig. 7 Relationship between cave zone and undercut area

初期,表层土壤相对松软,易发生大面积的快速坍塌,导致崩落区初期的增长速率较高;随着崩落区的不断扩展,由地表崩落形成的散体碎屑物质不断填充到崩落区内部,对崩落区边壁起到侧向支撑作用,从而减缓了塌陷速度,使崩落区的面积增长趋于缓慢。

3.3 地表岩移区非线性发展特征

提取岩移标准各指标(倾斜 $i = \pm 3$ mm/m; 水平变形 $\varepsilon = \pm 2$ mm/m; 相对转角 $\beta = 1/500$; 曲率 $K = \pm 0.2 \times 10^{-3}/m$)对应的岩移区外轮廓,再复合形成的最大岩移范围即为岩移区。

不同生产时期岩移区演变如图 8 所示。由图 8 可知:当采用复合岩移标准作为岩移评估指标时,在基建结束后第 14 年,首次在拉底区域正上方监测到岩移现象,随后岩移区沿四周均匀扩展;至基建工程完成后第 17 年,岩移区东、西 2 侧的扩展近乎停止,南部略有扩展,而北部则成为主要扩展方向。最终,岩移区范围涵盖整个崩落区范围,面积 0.69 km²,且大部分与拉底区域重合,这表明地下开采活动对地表产生直接且显著的影响。此外,最终岩移区并未扩展至下盘进风井、新副井、上盘的 1 号和 2 号回风井及其工业场地,所有关键设施与岩移区边界至少保持 320 m 以上的安全距离。

以拉底面积作为自变量 x ,岩移区面积作为因变量 y ,进行拟合,获得如下拟合公式(拟合曲线如图 9 所示):

$$y_2 = (3.70 \times 10^{-10})x^3 + (-4.96 \times 10^{-4})x^2 + 223.77x - 3.35 \times 10^7 \quad (9)$$

式中 y_2 为岩移区面积, m²。

岩移面积随累计拉底面积的变化呈现出典型的非线性发展趋势,与 3 次函数吻合度较高 ($R^2 =$

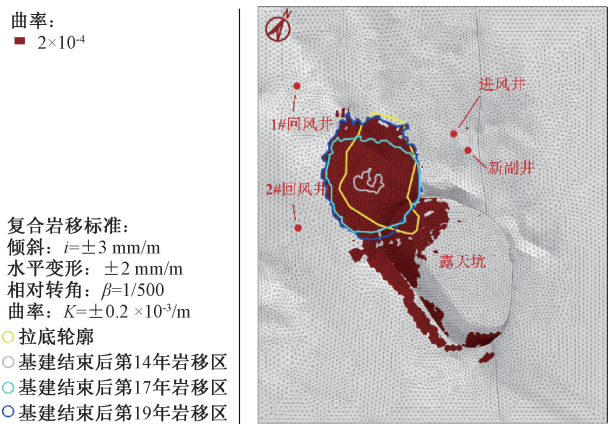


图 8 不同生产时期岩移区演变

Fig. 8 Evolution of subsidence zone during different production periods

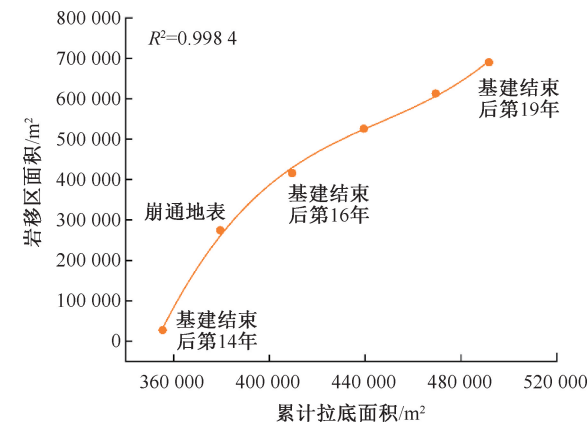


图 9 岩移区面积随拉底面积变化趋势

Fig. 9 Relationship between subsidence zone and undercut area

0.992)。基建结束后第 14~16 年,岩移区面积以年均 $1.38 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{a}$ 的速率快速增长至 $5.25 \times 10^5 \text{ m}^2$,此时期地表塌陷诱发应力重分布,进而引起地表大范围变形。至基建结束后第 17 年,演化出现拐点,

岩移区面积增速放缓 $1.09 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{a}$;随后,岩移区向北泥岩弱带发展,岩移区面积增速回升。

此外,复合岩移标准中,各岩移参数的阈值突破呈现出明显的“时序演化特征”:

1) 地表岩移启动阶段(基建结束后第 14 年)。曲率先突破阈值 ($K \geq \pm 0.2 \times 10^{-3}/\text{m}$),首次界定出局部岩移区。此时,倾斜、水平变形及相对转角均处于未触发监测警报亚临界状态。

2) 地表塌陷阶段(基建结束后第 15~19 年)。伴随着崩落体贯通地表,倾斜、水平变形、相对转角同步超越阈值,标志地表塌陷进入不可逆阶段。

曲率参数“率先超限”的特征(较崩通地表提前 1 年),可为地表安全防控提供关键的预警指标。因此,曲率不仅是岩移启动的标志,更是超大规模自然崩落法开采大范围塌陷风险的前兆性指标。

4 结 论

1) 在超大规模自然崩落法开采不同生产时期,由于上覆岩体强度的变化,崩落体的发展表现出不连续、间歇式、跳跃性的非线性发展特征。未崩通地表前崩落体发展以竖向崩落为主,随后转变为侧向崩落。

2) 地表崩落区产生初期,因表土相对松软,易发生大面积快速塌陷;而随着崩落区进入中后期发展阶段,其扩展速度因地表碎屑物质的逐渐填充而减缓;最终形成的崩落区范围与拉底面积、位置高度对应。

3) 依据复合岩移标准(倾斜 $i = \pm 3 \text{ mm/m}$;水平变形 $\varepsilon = \pm 2 \text{ mm/m}$;相对转角 $\beta = 1/500$;曲率 $K = \pm 0.2 \times 10^{-3}/\text{m}$)界定的地表岩移结果显示,矿山开采生命周期内地表重要建(构)筑物均处于安全状态;此外,曲率“率先超限”的特征可作为预测即将发生地表塌陷的重要早期指标。

参 考 文 献

[1] JIN Changyu, LI Guang, LIU Huiyang, et al. Development of directional hydraulic fracturing technology based on guided grooves and its application to block caving mining[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41:3 211-3 223.

[2] GE Qifa, FAN Wenlu, ZHU Weigen, et al. Application and research of block caving in Pulang copper mine[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 108(4): DOI:10.1088/1755-1315/108/4/042006.

[3] MORALES K, SUORINENI F, HEBBLEWHITE B. Orebody cavability prediction challenges in block caving mining: a review[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(1): DOI:10.1007/s10064-023-03516-6.

[4] XIA Kaizong, CHEN Congxin, LIU Xuanting, et al. Ground collapse and caving mechanisms in strata overlying sublevel caving mines: a case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(1): DOI:10.1007/s10064-023-03529-1.

[5] MA Kai, YANG Tianhong, ZHAO Yong, et al. Mechanical model for calculating surface movement related to open-pit and underground caving combined mining[J]. Minerals, 2023, 13(4):DOI:10.3390/min13040520.

- [6] BARYAKH A, FEDOSEEV A, LOBANOV S. Deformations and fracture of rock strata during deep level potash mining[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2021, 32:109–116.
- [7] CUMMING-POTVIN D, WESSELOO J, JACOBSZ S, et al. Physical modelling of cave breakthrough into an overlying cave[C]. *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, 2020: 478–488.
- [8] 陆玉根, 孙国权, 徐刚, 等. 崩落法开采岩移及塌陷规律相似材料模拟试验[J]. *金属矿山*, 2015(增1):1–6.
LU Yugen, SUN Guoquan, XU Gang, et al. Similar material simulation experiment of the law of rock movement and collapse[J]. *Metal Mine*, 2015 (S1):1–6.
- [9] ÁLVAREZ C, GÓMEZ P, ORREGO C, et al. Calibration of structurally controlled caving propagation using 3DEC: the esmeralda block 1 case study[C]. *Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, 2020: 418–427.
- [10] RAFIEE R, ATAIE M, KHALOOKAKAIE R, et al. Numerical modeling of influence parameters in cavability of rock mass in block caving mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 105:22–27.
- [11] 郭鑫, 鲁义, 施式亮, 等. 高流态注浆材料膨胀及蠕变特性试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(10): 143–151.
GUO Xin, LU Yi, SHI Shiliang, et al. Experimental study on expansion and creep characteristics of high flow sealed grouting material[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(10):143–151.
- [12] 刘迪, 杨辉, 卢才武, 等. 基于 MISSA-CNN-BiLSTM 模型的尾矿坝位移预测[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(9):145–154.
LIU Di, YANG Hui, LU Caiwu, et al. Prediction of displacement of tailings dams based on MISSA-CNN-BiLSTM model[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(9):145–154.
- [13] SJÖLANDER M, JONSSON L, FIGUEIREDO B, et al. Analysis of caving and ground deformations in Malmberget using a coupled CAVESIM-FLAC^{3D} model[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, 2022: 781–796.
- [14] FUENZALIDA M, ORREGO C, GHAZVINIAN E, et al. Application of rock mass strength scale effect at Cadia East mine[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, 2022: 951–962.
- [15] HEBERT Y, SHARROCK G. Three-dimensional simulation of cave initiation, propagation and surface subsidence using a coupled finite difference-cellular automata solution[C]. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, 2018: 151–166.
- [16] WANG Feifei, REN Qingyang, JIANG Xueliang, et al. Engineering geology and subsidence mechanism of a mountain surface in the Daliang lead-zinc ore mine in China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(11): DOI:10.1007/s10064-022-02983-7.
- [17] GARZA-CRUZ T, GHAZVINIAN E, FUENZALIDA M, et al. Surface subsidence analysis associated with caving at La Encantada Silver mine[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, 2022: 733–748.
- [18] 王伟澄, 黄明清, 刘青灵, 等. 自然崩落法拉底参数对矿岩初始与持续崩落的影响机制[J]. *金属矿山*, 2024(8): 1–9.
WANG Weicheng, HUANG Mingqing, LIU Qingling, et al. Mechanism of initial caving and propagative caving induced by undercutting parameters of block caving method[J]. *Metal Mine*, 2024(8):1–9.
- [19] SHI Yungang, WANG Huaijian, TAN Xin, et al. A stability analysis of an abandoned gypsum mine based on numerical simulation using the itasca model for advanced strain softening constitutive model[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(23): DOI: 10.3390/app132312570.
- [20] 黄明清, 张厚缘, 郭晓强, 等. 硬岩矿体自然崩落过程成拱特征及其边界弱化[J]. *金属矿山*, 2024(5): 84–91.
HUANG Mingqing, ZHANG Houyuan, GUO Xiaoqiang, et al. Arching characteristics and boundary weakening in block caving of hard orebodies[J]. *Metal Mine*, 2024(5):84–91.

作者简介: 黄明清 (1986—),男,福建龙岩人,博士,教授,主要从事金属矿绿色开采方面的研究。E-mail:seango@126.com。

