金属矿山崩落法开采的地表沉陷范围预测研究*

符富[1,2],金长宇[1],东龙宾[3],姚桂宏[4]

(1.东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2.云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖市 655099;
3.中冶北方(大连)工程技术有限公司, 辽宁 大连市 116600;
4.紫金(厦门)工程设计有限公司, 福建 厦门市 361006)

摘要:崩落法开采往往会引发大规模的岩层移动和地表变形,为准确预测崩落法开采的地表沉陷范围,有效减轻其造成的损失,以某金属矿崩落法开采为背景,分别采用数值模拟、理论分析、相似模拟试验对地表沉陷范围进行预测研究。通过数值模拟初步获取地表沉陷情况,结合崩落法开采的特点,通过理论分析,提出了一套改进的适用于金属矿山崩落法开采的威布尔分布法地表沉陷预计表达式,同时考虑岩体力学参数的随机性和变异性,基于可靠度理论对地表沉陷范围进行了预测分析。最后利用相似模拟试验对分析结果进行验证。结果表明:三种方法预测的沉陷范围的大小关系为数值模拟<相似模拟试验<基于可靠度的理论分析法,理论计算结果与试验结果的偏差率最小为0.30%,最大不到5%,验证了提出的地表沉陷范围理论计算方法的合理性与可靠性。

关键词:崩落法;地表沉陷;数值模拟;可靠度;相似模拟试验

中图分类号:TD853.36;TD325 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0101-09

Prediction of Surface Subsidence Range Induced by Caving Mining in Metal Mines

FU Fu[1,2], *JIN Changyu*[1], *DONG Longbin*[3], *YAO Guihong*[4]

(1.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
2.Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing, Yunnan 655099, China;
3.MCC North (Dalian) Engineering Technology Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116600, China;
4.Zijin (Xiamen) Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361006, China)

Abstract: Caving mining is widely recognized to trigger large-scale strata movement and ground deformation, making a reliable delineation of the surface subsidence range essential for mitigating associated losses. In this study, a representative metal mine adopting the caving method was investigated, and the subsidence range was evaluated using numerical simulation, analytical modelling, and similarity simulation model test. Numerical simulations were first performed to obtain a preliminary subsidence profile. On this basis, an enhanced Weibull-distribution-based formulation was developed to better capture the subsidence characteristics induced by caving mining in metal mines. The spatial uncertainty of rock-mass mechanical properties was then incorporated via reliability theory to provide a reliability-informed prediction of the subsidence range. Finally, the analytical predictions were validated by similarity simulation tests. The three approaches yield subsidence extents in the following ascending order: numerical simulation < similarity simulation test < reliability-based analysis. The discrepancy between theoretical predictions and test results ranges from 0.30% to less than 5%, demonstrating the robustness and credibility of the proposed method for subsidence-range delineation.

Key words: Caving method, Surface subsidence, Numerical simulation, Reliability, Similarity simulation test

0 引言

崩落法因效率高、成本低、规模大等优点被广泛应用于我国地下矿山,特别是地下倾斜矿山的开采中[1]。但崩落法的应用往往会引发岩层移动和地表大规模的变形与破坏,对地表建筑物、交通设施、基

* **收稿日期**:2025-04-06
基金项目:辽宁省科学技术计划项目(2023JH1/10400004)
作者简介:符富(1999—),男,贵州铜仁人,硕士研究生,主要研究方向为地下开采地表沉陷预测。E-mail:1811006476@qq.com
通信作者:金长宇(1979—),男,辽宁鞍山人,博士,教授,主要从事岩石力学与数值模拟方法研究。E-mail:jinchangyu@mail.neu.edu.cn

础农田和居民人身安全构成严重威胁[2-3],并且,这一过程是复杂多变的,受多种因素影响,包括矿体赋存条件、地层结构、矿体形态及开采方法等,在时间上和空间上具有较多的不确定性[4-5]。这对准确地预测地表沉陷范围带来了不小的挑战。

当前,主要采用现场监测、数值模拟、相似模拟及理论分析等方式对崩落法开采的岩体移动与地表变形范围进行预测研究。付华等[6-7]结合现场调查、变形监测、数值计算和理论分析等方法,研究了崩落法开采下的地表塌陷和滑移机理,并基于力学原理建立了地表沉陷预测概率积分法表达式;张褚强等[8]以地表水平位移监测数据为基础,研究了采矿影响范围和极限角;庞汉松等[9]通过对监测的离散水平位移数据进行分析,提出了一种确定地表危险变形区边界的方法;陆玉根等[10]采用物理相似材料模拟研究了崩落法开采上覆岩层冒落及地表塌陷规律,并重新测定了合理的岩体移动角;易四海[11]通过实测分析和相似模型试验,建立了基于采动影响传播角变化的地表移动预测模型;ZHOU Keping等[12]结合随机介质理论与岩石力学指标,提出了扰动等效中心和扰动衰减球的概念,对金属矿崩落法开采的扰动范围进行了量化分析;LIU Yang 等[13]基于极限平衡分析和临界介质柱理论,提出了一种分段崩落法开采沉降预测模型;黄继烈等[14]采用公式法对冒落带、导水裂隙高度和采空区距地表安全深度进行了计算,并以此对地表影响范围进行了预测;倪振原等[15]采用动态灰色预测方法对矿山地表的沉降量进行了中长期预测。上述研究方法中,现场监测通常需要花费较长的时间周期和较高的经济成本;数值模拟和理论分析往往是采用岩体参数平均值,忽视了其在空间分布上的随机性,或金属矿山直接套用煤层开采的相关理论,导致与工程实际出现较大误差。为了准确预测金属矿崩落法开采的地表沉陷范围,本文依托某崩落法开采的金属矿,首先采用离散元数值模拟结合基于"碎块体理论"的威布尔法构建地表沉陷预计理论模型;其次考虑岩体力学参数的随机性,对地表沉陷范围进行可靠性分析;最后结合相似模型试验,验证分析了模型的合理性与准确性。

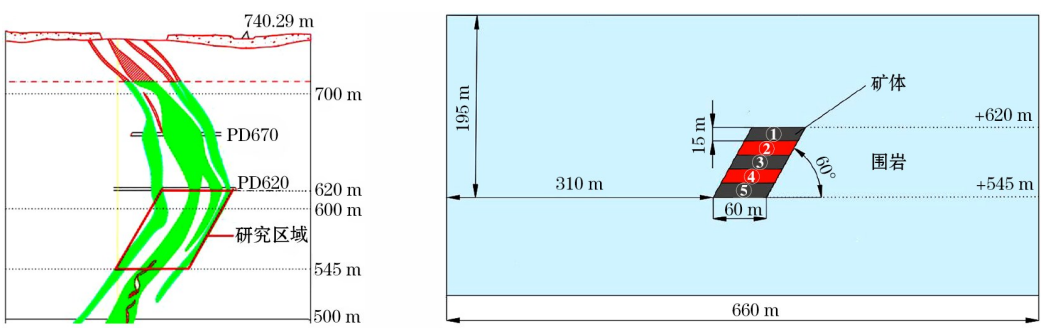
1 地表沉陷范围数值模拟分析

1.1 工程概况

某铁矿属于沉积变质磁铁矿床,矿区平均海拔为 740 m,矿体围岩以黑云斜长片麻岩为主,其次为斜长角闪岩等,岩石块体强度较高,但结构面较发育。矿区内断裂构造不发育,未见规模较大断层。含矿层由多个层状矿体构成,矿体间基本平行产出且间距较小,走向控制长 680～1 080 m,平均倾角为 60°,属于典型的急倾斜矿体,主要矿体各矿层水平平均累计厚度为 60 m。该矿前期采用空场法开采,+670 m 中段的部分采空区顶柱坍塌,和地表相通形成塌陷区,+620 m 中段矿柱保存完好,采空区、塌陷坑已回填。现为了提升生产效益,拟将+620 m 以下拟改用崩落法开采。根据工程情况,本文选取+620～+545 m 区段为研究对象。

1.2 数值模型构建

根据地质资料,选取矿体倾斜主断面作为研究对象,并适当简化。考虑节理的影响,采用离散元软件 UDEC 进行数值计算,如图 1 所示。模型尺寸为 660 m×300 m,顶部设置为自由边界,忽略水平应力影响,只考虑自身重力作用,并假定其为平面应变问题,选用 Mohr-Coulomb 本构模型。矿体共设计 5 个分段(图 1 中①～⑤),分段高度为 15 m。



(a) 工程剖面 (b) 数值模型

图 1 工程剖面与数值模型

Fig.1 Engineering sections and numerical model

岩石参数通过室内试验获取。采用 AE 立体图像采集仪获取节理信息,含两组优势节理,倾角分别为 40°～68°、120°～140°,并利用 Hoek-Brown 强度准则获取岩体宏观力学参数,见表 1。

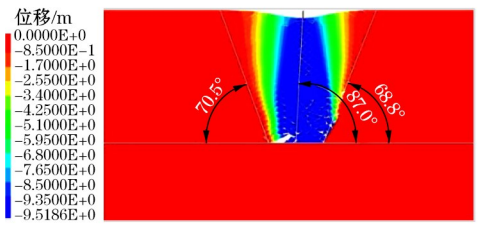
表 1　数值模型力学参数

Table 1　Mechanical parameters of the numerical model

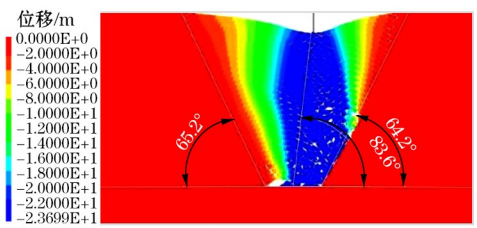
岩性	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	抗拉强度/MPa	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	密度/(kg/m³)
岩体	4.20	1.60	33.0	0.25	0.30	—	—	2 670
节理	—	0.20	22.0	—	0.03	30	30	—

1.3　数值模型结果分析

根据设计方案，至上而下进行分段模拟开采，单次开采一个分段，各分段模拟垂直位移如图 2 所示。采用岩移角的概念表征地表沉陷范围，岩移角分别按《冶金矿山采矿设计规范》中规定的倾斜率应小于±3 mm/m 及《城市轨道交通工程监测技术规范》中规定的地表沉降量应小于 30 mm 的标准计算。对比两种标准计算结果，以沉陷范围较大值作为本研究的沉陷范围，将岩移角在对应分段云图中标定。根据计算结果可知，随着开采水平的延深，岩移角逐渐减小并趋于稳定，沉陷坑两翼不对称的特征也愈加明显。在此情况下，概率积分法不再适合作为沉陷预计的理论模型。因此，本文采用更适合描述崩落法开采地表沉陷特征的威布尔分布法作为理论模型。



(a) 开采至分段②



(b) 开采至分段⑤

图 2　数值模拟结果

Fig.2　Numerical simulation results

2　威布尔分布法地表沉陷预计模型

2.1　威布尔分布法基本原理

针对概率积分法[16-17]过于理想化的假设而导致计算精度差的问题，何国清提出了基于“碎块体理论模型”的威布尔分布法，如图 3 所示。该方法充分考虑了岩体的各向异性、非均质和不连续性，对于沉陷坑两翼不对称的情况具有良好的应用效果。

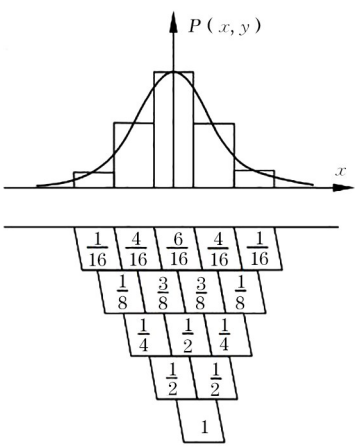


图 3　威布尔分布法模型

Fig.3　Weibull distribution model

威布尔分布法认为：地下开采引起的岩层移动和地表变形是由该开采中无限多个小单元开采引起的移动和变形的总和，由此建立了岩体的随机游动模型(如图 4 所示)，其满足以下关系式：

$$j+q+r=1 \tag{1}$$

式中：j、q 分别表示将岩块 C 移走后岩块 A、B 移向 C 所留位置的概率；r 表示岩块 C 移走的空位不被 A、B、C 以外的岩块所填补的概率。

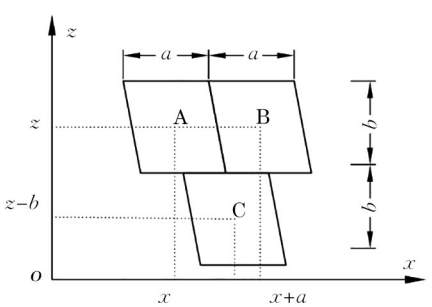


图 4　碎块体随机游动模型

Fig.4　Random-walk model of fragments

2.2　威布尔分布法地表沉陷计算

2.2.1　威布尔分布法坐标系统

利用威布尔法计算地表沉降需要明确计算坐标

系统。由于本文引入的威布尔分布法原本是用于煤层开采的地表沉陷预计,在崩落法开采中不能直接套用原来的坐标系统,而需要根据金属矿山实际情况做出调整。本文调整后的坐标系统如图5所示。

图5中:β_0、γ_0 分别为下沉盆地下山方向和上山方向的边界角,(°);L_1、L_2 分别为下山方向和上山方向半盆地长,m;x_m 为最大沉降点与坐标原点的水平距离,m;θ 为最大沉陷角,(°);H 为开采下边界的埋深,m;D_1 为开采下边界水平长度,m;$W°(x)$为地表在横坐标为 x 处的沉降量,m;$i°$ 为地表倾斜率,mm/m;$k°$ 为地表曲率,mm/m^2。

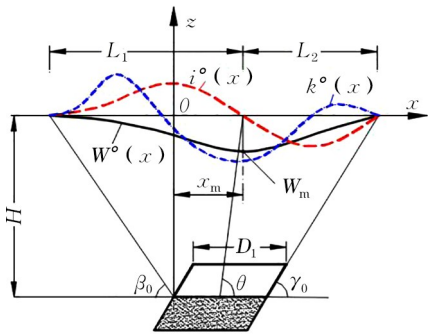


图5 调整后的威布尔分布法坐标系统

Fig.5 The adjusted Weibull distribution method coordinate system

2.2.2 威布尔分布法表达式

根据威布尔分布法原理和上述的坐标系统,可以得到倾斜断面地表沉陷预计表达式为:

$$\begin{cases} W°(x)=W_m \cdot S(z)=W_m \cdot z^{p-1}e^{(\frac{1}{p}-1)(z^p-1)} \\ i°(x)=W_m \cdot \dfrac{(p-1)(1-z^p)}{-L \cdot z} \cdot S(z) \\ k°(x)=W_m \cdot \dfrac{[(p-1)^2(1-2z-z^{(2p-3)})-(p-1)]}{L^2 \cdot z^2} \cdot S(z) \end{cases} \tag{2}$$

式中:W_m 为沉降曲线最大沉降值,m;$S(z)$为任意位置的单位沉降量,m;当 $z \leqslant 0$ 时,取 $i°(x)=k°(x)=0$。p 和 z 均为形态参数,通过地表沉降实测数据拟合获取,文献[16]中给出了具体的计算公式(下文统称"原始公式")。本文针对崩落法开采,重新对其进行分情况讨论,表达式如下:

$$\begin{cases} p=\begin{cases} p_1,(x<x_m) \\ p_2,(x>x_m) \end{cases} \\ z=\begin{cases} 1+\dfrac{x_m}{L_1}-\dfrac{x}{L_1},(x<x_m,L=L_1) \\ 1+\dfrac{x_m}{L_2}-\dfrac{x}{L_2},(x>x_m,L=L_2) \end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

其中:

$$x_m=\frac{D_1}{2}+H\cot\theta \tag{4}$$

2.2.3 理论模型参数确定

以数值模拟结果为基准值,对上述表达式中的相关参数进行拟合分析。根据计算需求,将相关参数提取并汇总于表2中。考虑监测仪器的精度、人为误差以及地形的影响,采用垂直位移为10 mm处的地表点到原点的距离作为 L_1、L_2 的取值依据[18]。

(1) 参数 p 的表达式。

将表2中的参数代入地表沉陷表达式,分别对各分段的 p_1、p_2 进行拟合,汇总于表3。绘制出对应的地表沉陷曲线并与"原始公式"计算得到的沉陷曲线进行对比分析,以分段①和分段②为例,结果见图6和图7。从整体上看,分段①开采后,原始公式对地表沉降的预计效果具有较高的精度,能够准确地描述地表沉陷盆地的形态;当开采至分段②时,原始公式计算结果与数值模拟结果出现较大偏差,而本文分段拟合的结果仍具有较高精度。从局部看,原始公式在近地表处的预测结果与模拟结果相差较大,本文提出的方法在预测精度上具有显著优势,证明了将沉陷曲线进行分段分析是合理且准确的。

表2 威布尔分布法计算参数

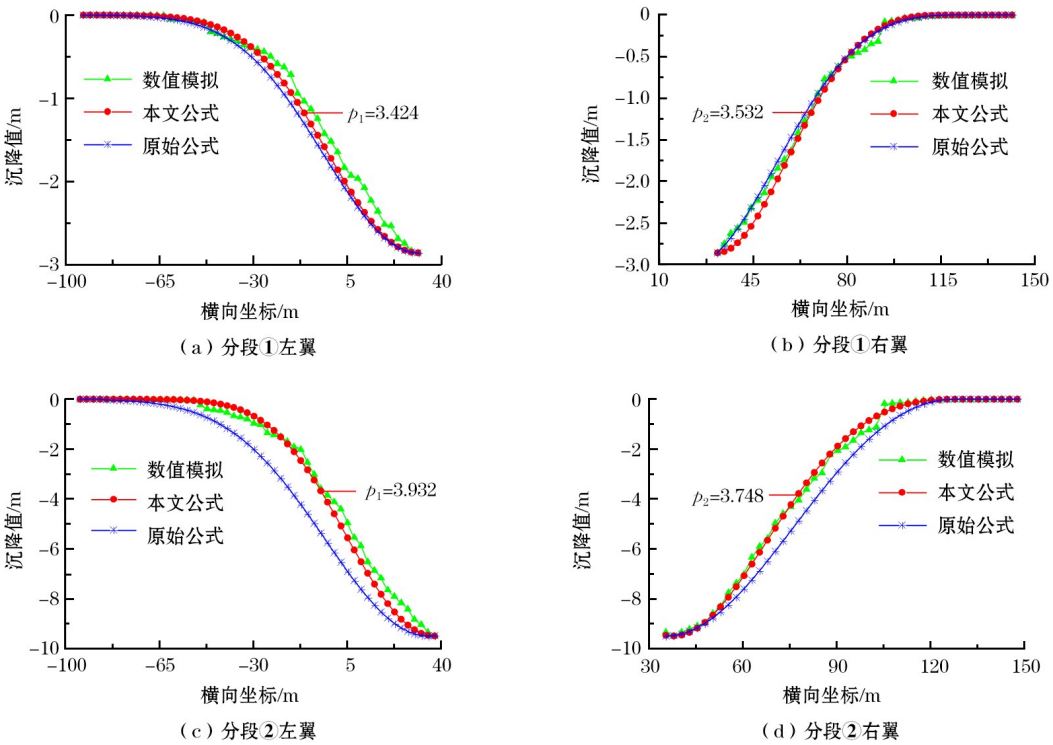
Table 2 Calculation parameters of the Weibull distribution method

开采分段	W_m/m	L_1/m	L_2/m	x_m/m	θ/(°)	上盘岩移角/(°)	下盘岩移角/(°)
分段①	−2.867	96	85	31.7	89.3	67.0	70.2
分段②	−9.517	108	92	37.9	87.0	70.5	68.8
分段③	−13.423	118	102	44.7	84.9	69.6	67.3
分段④	−17.241	147	112	49.6	83.8	66.4	65.9
分段⑤	−23.700	156	121	51.9	83.6	65.2	64.2

表3 形态参数 p 的取值

Table 3 Values of the morphological parameter p

分段	p_1	p_2
分段①	3.424	3.532
分段②	3.932	3.748
分段③	3.825	4.064
分段④	3.766	4.532
分段⑤	3.678	5.012



(a) 分段①左翼　(b) 分段①右翼

(c) 分段②左翼　(d) 分段②右翼

图 6　沉陷曲线对比

Fig.6　Comparison of subsidence curves

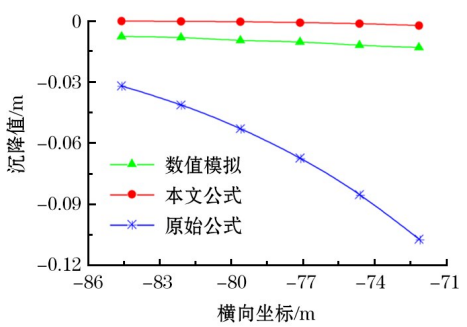


图 7　近地表处沉降量对比

Fig.7　Comparison of near-surface subsidence

分析过程中发现，形态参数 p 与沉陷坑的倾斜程度显著相关，因此，利用 L 和 W_m 建立了其函数表达式，即：

$$p=-0.002\ 5W_m^2-0.001\ 4L^2+0.004\ 6W_m\cdot L-0.349\ 7W_m+0.23L-6.333\ 6\quad(R^2=0.971) \tag{5}$$

(2) 最大沉陷角 θ 的表达式。

根据数值模拟的结果发现，最大沉陷角 θ 随最大开采深度 H 的增大而减小并逐渐趋于稳定，其关系式如公式(6)所示。

$$\theta=\frac{H-86.172\ 1}{0.012\ 7H-1.162\ 5} \tag{6}$$

(3) 最大沉陷值 W_m 的表达式。

根据地表沉陷的规律和特点、影响最大沉降值的因素以及崩落法开采的特点，综合考虑了几何参数(平均埋深 h、开采跨度 K、开采累积厚度 M，各参数的含义见图 8)和力学参数(岩体黏聚力 C、弹性模量 E_m、内摩擦角 φ)的影响，采用不含交叉项二次多项式拟合 W_m 的表达式，如公式(7)所示。

$$W_m=a+\sum_{i=1}^{n=6}b_iX_i+\sum_{i=1}^{n=6}c_iX_i^2 \tag{7}$$

式中：X_i 与上述 6 个参数一一对应($i=1,2,\cdots,6$)，其中的几何参数采用公式(9)进行确定；a，b_i，c_i 为待定系数。

结合工程实际，采用数值模拟方法进行了 24 组正交试验，对上述系数求解，结果如下：

$$\begin{cases}a=180.561\ 2\\ b_i=(-1.058\ 6,0.315\ 6,0.349\ 8,13.243\ 3,\\ \qquad -77.369\ 6,\cdots,-4.684\ 1)\\ c_i=(0.003\ 7,-0.001\ 1,-0.001\ 8,-1.354\ 6,\\ \qquad 22.790\ 8,\cdots,0.059\ 4)\end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} K_2 = M\cot\alpha \\ K = K_1 + K_2 \\ H_2 = H_1 + \dfrac{1}{2}M \\ h = \dfrac{K_2 \cdot H_2 + K_1 \cdot H_1}{K_1 + K_2} \end{cases} \tag{9}$$

式中,当采至分段①时,地表沉陷受矿体倾角影响较小,取 $K = K_1$。

由此,结合公式(2)至公式(9),建立了完整的威布尔分布法地表沉陷预计表达式。

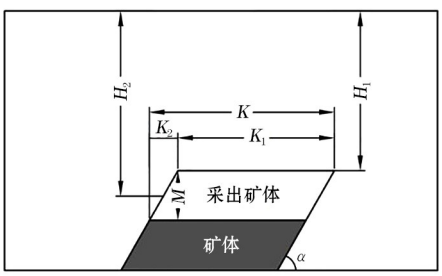


图 8 几何参数含义

Fig.8 Meanings of geometric parameters

3 地表沉陷预计可靠度分析

3.1 功能函数与参数选取

工程岩体通常在性质上和结构上都具有非均匀性,导致岩体的力学参数在空间分布上具有随机性,采用均值计算会缺乏一定的准确性。而进行可靠度分析可以有效地解决这一问题。为了计算的便利性,直接采用蒙特卡洛法进行可靠度分析。

地表沉陷的判定标准同前文所述。根据可靠度分析中极限状态和功能函数的含义[19],结合本文提出的沉陷预计公式,可以将开采至各分段垂直沉降功能函数 $G_1(X)$ 和倾斜率功能函数 $G_2(X)$ 表示如下:

$$G_1(X) = Z_1 = 0.03 - |W^\circ(x)| = 0.03 - \left|W_m \cdot z^{p-1} e^{(\frac{1}{p}-1)(z^p-1)}\right| \tag{10}$$

$$G_2(X) = Z_2 = 0.003 - |i^\circ(x)| = 0.003 - \left|W_m \frac{(p-1)(1-z^p)}{-L \cdot z} S(z)\right| \tag{11}$$

考虑到工程中几何参数往往是确定的,则将矿体的平均埋深 $h(X_1)$、开采跨度 $K(X_2)$、累计开采厚度 $M(X_3)$ 看成是常规基本变量,不考虑其随机性;又考虑工程地质在力学参数上的随机特性,即把弹性模量 $E_m(X_4)$、黏聚力 $C(X_5)$、内摩擦角 $\varphi(X_6)$ 看成随机变量进行可靠度分析。各随机变量的均值、标准差、变异系数与分布类型见表 4。

表 4 岩石力学参数取值

Table 4 Values of the rock mechanics parameters

参数取值	弹性模量 E_m/GPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 φ/(°)
均值 μ_X	4.200	1.600	33.000
标准差 σ_X	0.370	0.250	4.100
变异系数 V_X	0.088	0.156	0.124
分布类型	正态分布	对数正态分布	正态分布

3.2 可靠度计算与分析

可靠度的选用标准是根据结构的重要程度、年限要求、安全等级来确定的。本文工程地处山区,对地表建筑影响较小,因此选择失效概率 $p_f < 1 \times 10^{-3}$ 作为可靠的标准,将失效概率 $p_f = 1 \times 10^{-3}$ 所对应的横坐标作为地表沉陷边界,并用其计算岩移角。采用 MATLAB 编制基于蒙特卡洛的可靠度计算程序,进行 10^6 次随机抽样以保证计算的精度。可靠度计算结果见表 5。

表 5 基于可靠度的岩移角计算结果

Table 5 Calculation results of rock movement angle based on reliability

分段	上盘岩移角/(°)	下盘岩移角/(°)
分段①	67.0	67.6
分段②	67.5	64.9
分段③	66.8	63.0
分段④	61.8	62.2
分段⑤	61.0	61.9

对比数值模拟计算的结果可知,表 5 中考虑参数随机性计算的岩移角均比数值模拟计算的小,即地表沉陷范围更大,上盘最大偏差达到了 4.6°,偏差率为 6.93%,下盘最大偏差为 4.3°,偏差率为 6.39%。造成这一情况最直观原因是数值模拟采用均值计算,忽视了岩体力学参数的随机性和变异性。

4 地表沉陷相似模拟试验

由于工程原型开采的周期较长,以及部分开采条件的不可预见性,采用相似模拟试验对理论模型进行验证分析,同时实现对工程的超前预测。

4.1 模型设计方案

相似材料模型采用二维应变模型,结合工程实际,选用和数值模型相同的尺寸并等比例缩小。本次试验台装填平台尺寸为 2.4 m×0.2 m×1.2 m,根据相似原理[20-21],确定试验几何相似常数 $C_L = 275$,容重相似常数 $C_\gamma = 1.5$,应力相似常数 $C_\sigma = 413$,无量纲相似常数为 1。根据崩落法开采岩体的破坏特点,选用石英砂、石膏和水作为围岩相似材料,矿体

采用特质木块预埋，节理采用云母片制作。通过借鉴成功案例[22-23]和多次配比试验，得到理想相似材料配比为砂：石膏：水＝7：1：1.1。岩石和相似材料物理力学参数见表 6。

表 6　岩石和相似材料物理力学参数

Table 6　Physical and mechanical parameters of rocks and similar materials

材料	容重/(g/cm³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
岩石	2.67	114.630	7.260	28.070	12.820	44.25	0.23
相似材料	1.77	0.276	0.019	0.066	0.035	45.07	0.24

为更好地还原工程实际情况，根据数值模拟结果，在主要变形区设置了两类节理：一是随机的细小节理，与相似材料均匀混合后进行模型的搭建，用于划分岩块；二是优势节理，根据调查结果按相似准则换算后设置，用于控制岩体移动和变形。结构如图 9 所示。由于模型中设置了节理，模型材料采用岩石参数进行配置。

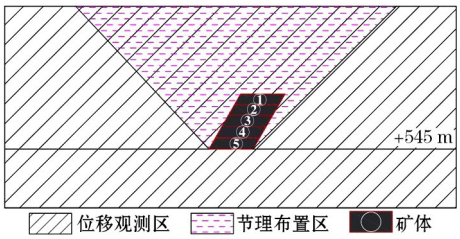
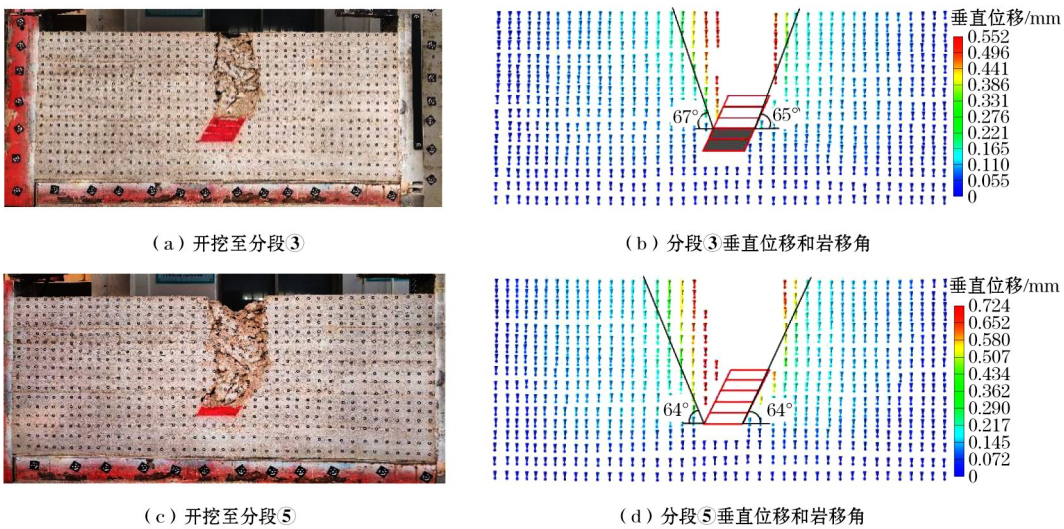


图 9　相似材料试验结构

Fig.9　Structure of similarity material test

4.2　试验结果分析

按设计方案至上而下模拟开挖，每开采一个分段静置 24 h，待模型形变稳定后，采用 XTDP 三维光学摄影测量系统进行位移监测，根据位移结果计算地表沉陷范围，结果如图 10 所示。整理各分段开采的地表位移数据并计算岩移角，汇总于表 7。



（a）开挖至分段③　（b）分段③垂直位移和岩移角

（c）开挖至分段⑤　（d）分段⑤垂直位移和岩移角

图 10　相似模拟试验结果

Fig.10　Similarity simulation test results

表 7　相似模拟试验的岩移角

Table 7　Rock movement angles of the similarity simulation tests

分段	上盘岩移角/(°)	下盘岩移角/(°)
分段①	68.0	69.0
分段②	68.0	67.0
分段③	67.0	65.0
分段④	65.0	64.0
分段⑤	64.0	64.0

4.3　对比分析

通过计算并对比分析表 6 和表 7 的计算结果，可以得到：总体上相似模拟试验得到的岩移角范围较基于可靠度计算方法的更小。上盘岩移角最大的差距发生在分段④，相差 3.2°，偏差率 4.92%，最小的差距发生在分段③，相差 0.2°，偏差率为 0.30%，上盘平均偏差率为 2.85%。下盘最大偏差发生在分段⑤，相差 2.1°，偏差率 3.28%，最小偏差发生在分段①，偏差率为 2.03%，下盘平均偏差率为 2.87%。这一差距小于数值模拟计算的差距，且在理想范围内，验证了提出的理论方法的准确性。

绘制三种方案岩移角的直方图，如图 11 所示。从图 11 中可以看出，虽然参数的均值相同，但三种方法计算的结果存在差异，沉陷范围的大小关系为：数值模拟＜相似模拟试验＜基于可靠度的理论分析

法。相似模拟试验的结果与可靠分析的结果最为接近。相似材料虽是以力学参数的平均值进行配比设计,但材料的粒度、搅拌的时间和充分度、搭建过程中捶打的力度和位置、节理的分布等都具有非均匀性,这使得试验模型在结构和力学性质上也具有随机性,从而与工程原型有了更高的相似度。因此,相似模拟试验结果与基于可靠度计算结果更为接近,进而证实了本文理论模型和可靠度分析的合理性和准确性。

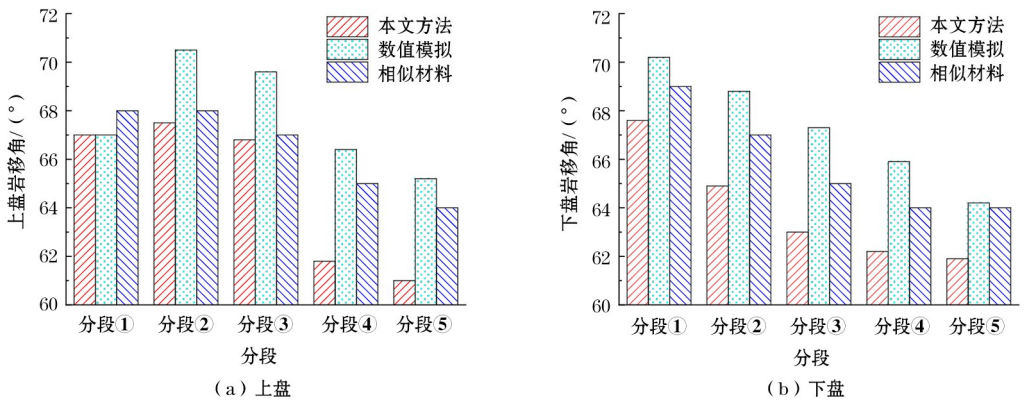


图 11 三种计算方案岩移角结果对比

Fig.11 Comparison of calculation result of rock movement angle under three schemes

5 结论

(1) 针对金属矿山崩落法开采的工艺特点与地表沉陷坑两翼形态不对称的特点,引入基于碎块体理论的威布尔分布法,对地表沉陷范围进行预测研究。在原方法基础上,将开采过程中各分段进行单独分析,并综合考虑了几何因素和力学因素的共同影响,提出了一种改进的适用于金属矿山崩落法开采的威布尔分布法地表沉陷预测方法。

(2) 在提出的理论方法的基础上,考虑了工程岩体力学参数在空间分布上的随机性和变异性,采用蒙特卡洛法对地表沉陷范围进行可靠度分析,并与数值模拟和相似模拟试验结果进行对比。三种方法预测的沉陷范围大小关系为:数值模拟<相似模拟试验<基于可靠度的理论分析法;相似模拟试验结果与本文方法计算结果的偏差率最小为 0.30%,最大不到 5%,充分验证了本文提出的地表沉陷范围预测方法的准确性,可为矿山地表沉陷范围的划定提供指导,也为金属矿山地下开采地表沉陷范围的预测提供了一种新的研究思路。

参考文献(References):

[1] 张志贵,刘兴国,于国立.无底柱分段崩落法无贫化放矿理论及其在矿山的实践[M].沈阳:东北大学出版社,2007.
ZHANG Zhigui, LIU Xingguo, YU Guoli. Theory of non-dilution ore drawing and non-dilution ore drawing in pillarless sublevel caving method and its practice in mines [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2007.

[2] CIDU R, DADEA C, DESOGUS P, et al. Assessment of environmental hazards at abandoned mining sites: a case study in Sardinia, Italy[J]. Applied Geochemistry,2012,27(9):1795-1806.

[3] 周建华.断层影响下崩落法开采金属矿巷道破坏规律[J].采矿技术,2024,24(4):52-55.
ZHOU Jianhua. Roadway failure law of caving mining metal mine under the influence of fault[J]. Mining Technology, 2024,24(4):52-55.

[4] 王运敏,陆玉根,孙国权.崩落法深部开采岩移及地表塌陷规律分析研究[J].金属矿山,2015(6):6-9.
WANG Yunmin, LU Yugen, SUN Guoquan. Study on the law of rock movement and surface subsidence by deep mining with sublevel caving[J]. Metal Mine,2015(6):6-9.

[5] LI C C. Disturbance of mining operations to a deep underground workshop [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2006,21(1):1-8.

[6] 付华.崩落法开采引起的地表塌陷与滑移机理研究[D].北京:中国科学院大学,2017:87-93.
FU Hua. Study on mechanism of surface subsidence and slip caused by caving mining[D]. Beijing: University of China Academy of Sciences,2017:87-93.

[7] 付华,陈从新,夏开宗.崩落法引起的地表塌陷机制分析[J].矿业研究与开发,2017,37(8):47-51.
FU Hua, CHEN Congxin, XIA Kaizong. Mechanism analysis of surface subsidence caused by caving method[J]. Mining Research and Development,2017,37(8):47-51.

[8] 张褚强,沈强,陈从新,等.程潮铁矿西区分段崩落法开采影响范围和极限角研究[J].岩土力学,2021,42(6):1713-1723.
ZHANG Chuqiang, SHEN Qiang, CHEN Congxin, et al. Study on influence range and limit angle in the west area of Chengchao Iron Mine by sublvel caving[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(6):1713-1723.

[9] 庞汉松,陈从新,夏开宗,等.基于监测数据的分段崩落采矿法地表危险变形区边界确定方法研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4):736-748.
PANG Hansong, CHEN Congxin, XIA Kaizong, et al. Study on the methodology for determining the ground acceptable deformation limit in sublevel caving mining based on monitoring data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(4):736-748.

[10] 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(增刊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 Mines,2015(Suppl.1):1-6.

[11] 易四海.特厚急倾斜煤层水平分层开采地表沉陷规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2009:67-84.
YI Sihai. Research on surface subsidence due to mining horizontal slice of extra-thick and steep coal seam[D]. Beijing:China University of Mining and Technology-Beijing, 2009:67-84.

[12] ZHOU Keping, LI Liang, LIN Yun, et al. New method and application of disturbance range prediction for caving method of metal ore[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2023,33(3):889-901.

[13] LIU Yang, ZHOU Yanjun, HE Rongxing, et al. New prediction method for surface subsidence scope induced by the sublevel caving mining method[J]. Mining Metallurgy & Exploration,2022,39(2):603-614.

[14] 黄继烈,余杰.矿山地下采空区对地表塌陷影响范围研究[J].中国煤炭地质,2018(1):60-64.
HUANG Jilie, YU Jie. Study on mine underground gob area impact on surface subsidence range[J]. Coal Geology of China,2018(1):60-64.

[15] 倪振原,明建,金爱兵,等.动态灰色预测模型在崩落法矿山地表沉降预测中的应用[J].有色金属(矿山部分),2019,71(2):24-27.
NI Zhenyuan, MING Jian, JIN Aibing, et al. Application of dynamic gray forecasting models in forecasting of surface subsidence for mines using caving method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2019,71(2):24-27.

[16] 何国清,杨伦.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991:160-166.
HE Guoqing, YANG Lun. Mining subsidence[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991: 160-166.

[17] 何国清.岩移预计的威布尔分布法[J].中国矿业大学学报,1988(1):11-18.
HE Guoqing. The Weber-Distribution method for calculating mining subsidence[J]. Journal of China University of Mining and Technology,1988(1):11-18.

[18] CUI X M, LI C Y, HU Q F, et al. Prediction of surface subsidence due to underground mining based on the zenith angle[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2013,60:246-252.

[19] 张明.结构可靠度分析:方法与程序[M].北京:科学出版社,2009:8-13.
ZHANG Ming. Structural reliability analysis: methods and procedures[M]. Beijing: Science Press,2009:8-13.

[20] 詹志发,贺建先,郑博文,等.边坡模型相似材料配比试验研究[J].地球物理学进展,2019,34(3):1236-1243.
ZHAN Zhifa, HE Jianxian, ZHENG Bowen, et al. Experimental study on similar material proportion of slope model[J]. Progress in Geophysics,2019,34(3):1236-1243.

[21] 盛佳,万文,江飞飞,等.深部双中段卸荷连续开采相似模拟试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):1-12.
SHENG Jia, WAN Wen, JIANG Feifei, et al. Similar simulation test study of unloading continuous mining in deep double middle sections[J]. Mining Research and Development,2024,44(12):1-12.

[22] 李光,马凤山,郭捷,等.大尺寸工程模型试验中的相似材料配比试验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(11):1653-1660.
LI Guang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Experimental study on similar materials ratio used in large-scale engineering model test[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2020,41(11):1653-1660.

[23] 颜嘉俊,王新民,王晓军,等.板裂状围岩下薄矿脉开采稳定性相似模拟试验研究[J].化工矿物与加工,2021,50(1):1-4+19.
YAN Jiajun, WANG Xinmin, WANG Xiaojun, et al. Study on the analog simulation test on stability of mining thin vein under the splintering surrounding rock[J]. Chemical Minerals and Processing,2021,50(1):1-4+19.