

拟煤层开擦沉陷,分析了开采工作面和开挖深度对地表变电站的影响^[11]。然而,现有的数值模拟研究中主要是对地表岩体位移的描述和地表岩体移动变形的数据坐标图形展示,很少采用数值模拟方法将地表水平变形、倾斜及曲率进行全部计算并复合到实际地表地形图中,对矿山开采下地表不同区域的建构物安全保护等级的研究较少。

本文以某多金属矿矿体开采为工程背景,矿山地表有公路和建构物存在,矿山开采可能对矿区地表建构物和公路造成影响。本研究在对矿山生产现状和地质条件进行全面踏勘和分析的基础上,利用FLAC数值模拟手段,按设计开采顺序分析充填及未充填下地表移动变形规律研究,首先使用flac中fish语音导出了矿山地表的水平变形、倾斜和曲率与对应实际坐标,将对应数据与实际地表地形进行耦合,更加直观的反映了地表建构物等所处的安全等级,对矿山地表稳定性进行了分析,所得成果为相似矿山确定地表不同区域建构物安全等级具有指导性意义。

2 工程概况

某多金属矿矿体缓倾斜、厚度大、埋深浅,位于地表以下 247.61 ~ 479.67 m,矿岩节理裂隙发育,地表环境复杂,起伏大,地表最大高差达 380 m。矿体平均倾角 8°,平均厚度 17.69 m,走向控制长 150 m,倾向控制长 1 018 m。针对矿山开采技术条件,矿山采用“隔三采一”方式对矿体进行回采,采用大直径深孔侧向崩矿和底盘深沟中深孔空场法进行回采,矿房矿柱按 15 m 宽垂直矿体走向方向依次布置,长为走向长度,高为矿体厚度,采矿方法示意图如图 1 所示。

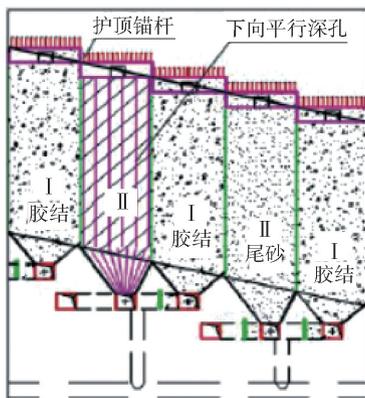


图 1 采矿方法示意图

为了更加清晰的展示本文对地表移动变形规律分析方案的实施过程,本文建立了方案实施过程,具

体如图 2 所示。

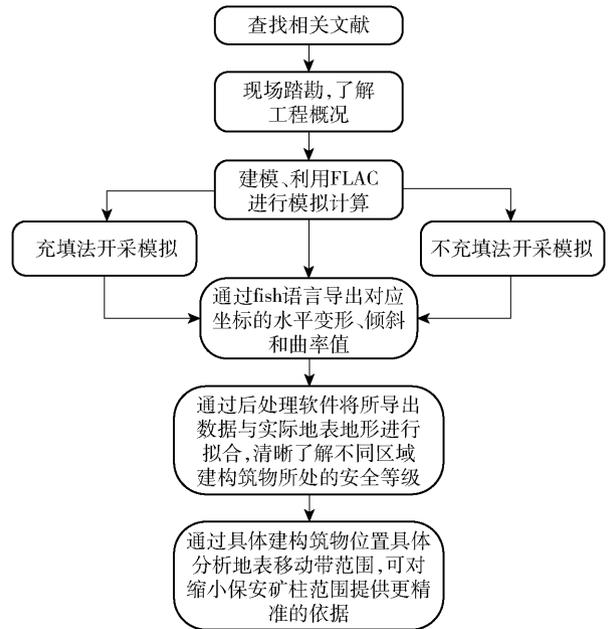


图 2 地表移动变形规律分析流程图

3 模型建立及参数确定

3.1 模型建立

根据矿体模型和地表模型,利用 3Dmine、ANSYS、suffer 软件建立了包括地表在内的完整矿岩模型,按设计确定的采矿方法和开采顺序模拟矿山实际开挖,建立了包含矿体、上下盘围岩、地表等大型三维精细模型。模型 x 方向长度为 1 460 m, y 方向长度为 1 200 m, z 方向为由 1 400 m 标高至地表,模型按不等分划分网格,共划分为 209 309 个节点和 1 190 264 个单元。矿山地表地貌如图 3 所示,三维模型如图 4 所示。



图 3 矿山地貌

3.2 模拟参数及边界条件

模型按岩体自重应力和水平构造应力施加应力边界,其中侧向压力系数为 1.2,在模型的底部施加 z 方向约束,在模型四周分别施加 x 、 y 方向的约束,地表为自由面,选用摩尔-库伦本构模型,然后分别

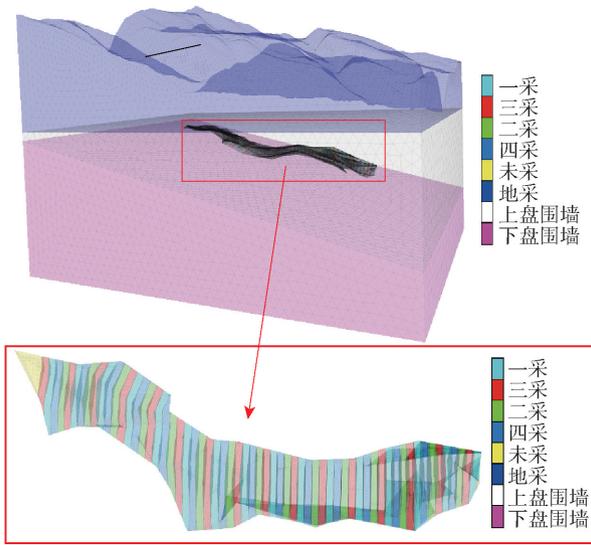


图4 三维数值计算模型

对充填及未充填情况下地表的稳定性进行三维数值分析。依据室内岩石力学试验以及 Hoek - Brown 强度准则,并参考类似矿岩属性,获得模拟中使用的矿岩物理力学参数,模拟计算参数见表 1。

表 1 矿岩体物理力学参数

岩性	容重/ kg·m ⁻³	弹性模 量/GPa	泊松 比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa
1750 矿体	3 320	26	0.22	49	1.8	4.6
围岩上盘	2 510	12	0.28	43	0.8	3
第四系	2 700	8	0.26	38	0.6	2.3
1810 矿体	2 650	15	0.25	49	1.2	3.9
围岩下盘	2 250	5	0.35	27	0.2	1.7
1,2 步充填	1 820	0.45	0.24	27	0.36	0.67
3,4 步充填	1 800	0.38	0.25	25	0.3	0.48

3.3 模拟方案设计

根据初步设计中的开采技术方案,按照“隔三采一”的方式对矿房依次进行开采,模拟开挖大部分矿体,分别沿走向分为四类矿房进行模拟开挖,具体如图 5 所示,整个矿体的开采分为四个步骤,首先开采 1 号矿房、然后开采 2 号矿房、而后开采 3 号矿房,最后开采 4 号矿房,分别计算充填时和未充填时地表的移动变形情况。

4 模拟分析结果

两种模拟方案开挖顺序相同,按顺序开采 1、2、3、4 号矿房,充填时在每个矿房开挖后一次性充填。本文利用 flac 中 fish 语言命令导出了地表节点的水平变形、倾斜及曲率数据,并主要从两种方案下地表的位移、水平变形、倾斜及曲率进行分析,对比两种

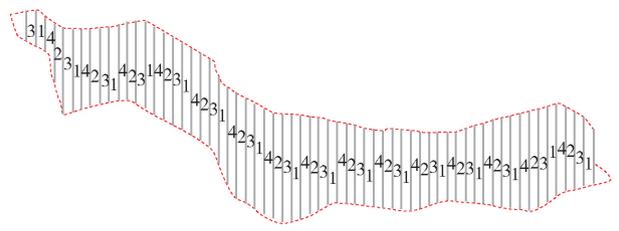


图5 模拟开采示意图

方案下地表稳定性。

4.1 位移分析

通过模拟计算充填及未充填下的地表位移变化情况,得到了如图 6、图 7 所示的地表位移云图。从图中可以看出,采用充填法开采地表最大位移变化为 25 mm,采用不充填开采的最大位移变化为 55 mm,说明充填法可以有效减小地表的沉降量。

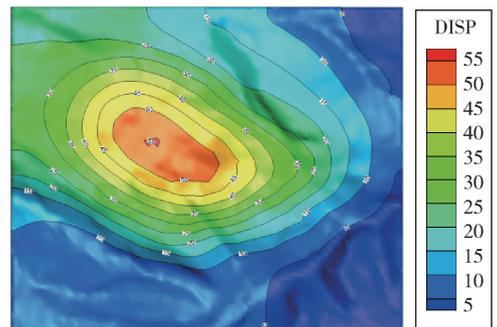


图6 未充填方案地表位移变形

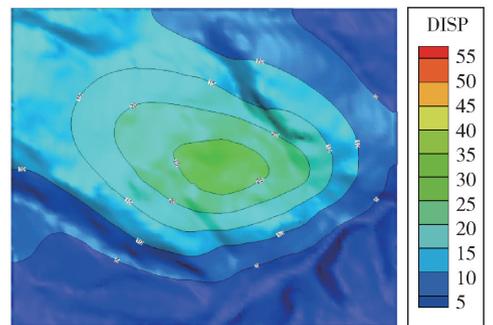


图7 充填方案地表位移变形

4.2 地表建构筑物安全等级分析

1) 地表移动变形指标对建构筑物影响

井下的开采对地表的影响是非常复杂的,为了分析地表移动变形对建构筑物安全等级的影响,本文先介绍 3 项指标:水平变形、倾斜和曲率。

水平变形: 两点间的水平位移差除以两点间的水平距离,单位为 mm/m。

地表倾斜: 为地表下沉盆地沿某一方向的坡度值,其平均值以两点间的下沉除以两点间的水平距离,单位 mm/m。

地表曲率: 为下沉盆地剖面线的弯曲度,其平均

值以相邻两线段倾斜差除以两线段地表水平长度的平均值,习惯规定:上凸为正,下凹为负,单位为 $10^{-3}/m$ 。

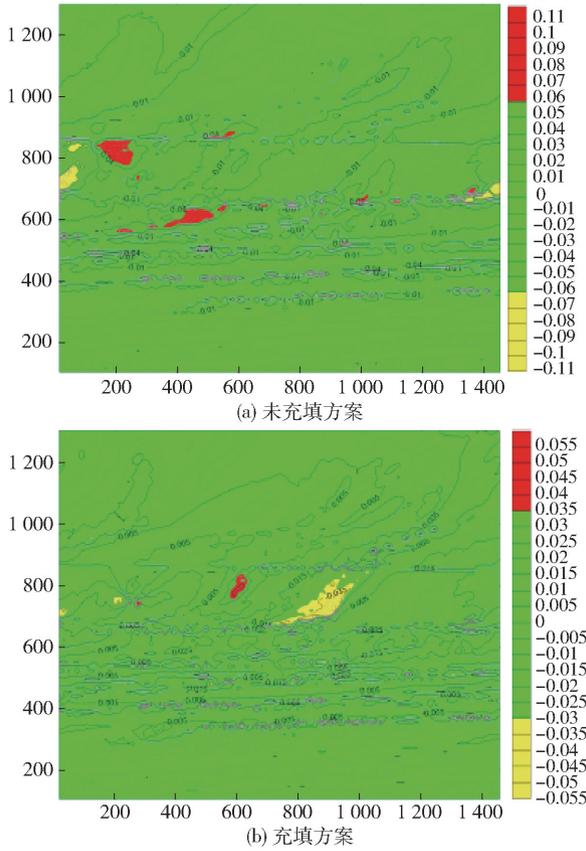


图8 未充填(上)及充填(下)方案地表X方向水平变形复合平面图

根据《有色金属采矿设计规范》(GB50771—2012),地表建、构筑物保护等级及位移与变形允许值见表2。

表2 建、构筑物位移及变形允许值

建、构筑物保护等级	倾斜 $i/mm \cdot m^{-1}$	曲率 $k/10^{-3} \cdot m^{-1}$	水平变形 $\varepsilon/mm \cdot m^{-1}$
I	± 3	± 0.2	± 2
II	± 6	± 0.4	± 4
III	± 10	± 0.6	± 6
IV	± 10	± 0.6	± 6

2) 地表水平变形、倾斜及曲率分析

通过模拟计算分析,将水平变形、倾斜及曲率的数据与地表相应坐标对应,形成相应的地表复合平面图。导出充填及不充填下的地表水平变形(X方向和Y方向)、倾斜及曲率复合平面图如图8至图12所示。

从图8和图9可以看出,充填及未充填的地表

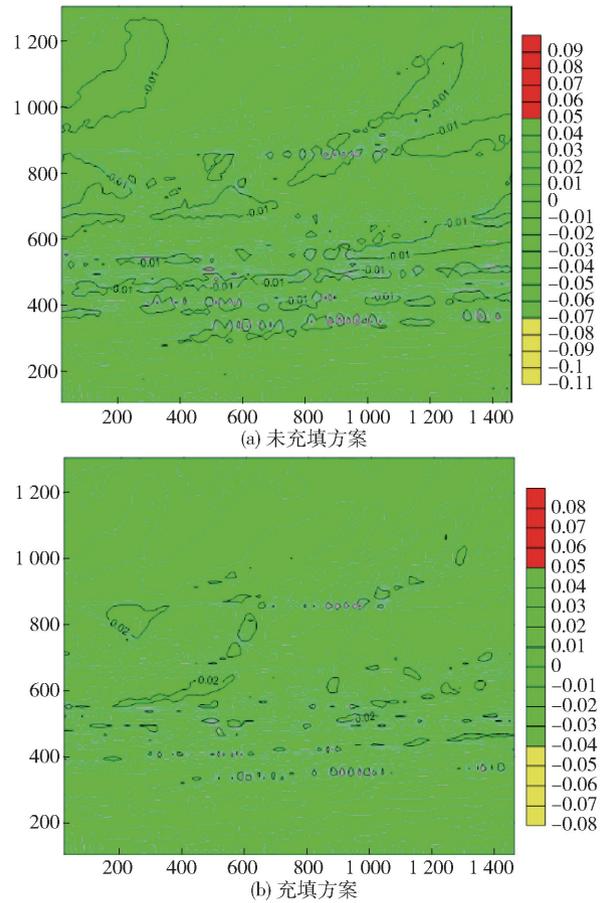


图9 未充填(上)及充填(下)方案地表Y方向水平变形复合平面图

的水平变形(X方向未充填:0.11;充填法:0.055。Y方向未充填:0.11;充填法:0.08)均小于一级建构筑物的水平变形允许值2 mm/m。从图10可以看出,采用不充填开采地表的倾斜值 $-0.55 \sim 0.65$ mm/m,采用充填法开采地表的倾斜值 $-0.26 \sim 0.34$ mm/m,均小于I级建筑物要求的倾斜变形允许值。

从图11图12中可以看出,采用未充填开采后地表的曲率值在 $-1.1 \sim 1$,采用充填开采后地表的曲率值在 $-0.6 \sim 0.45$ 。为了更加直观看地出地表I~IV级建筑物保护等级的区域,根据表2中规定的建、构筑物位移与变形允许值,将图中I级建筑物保护等级区域用绿松石颜色,II级建筑物保护等级区域用黄色标注,III级建筑物保护等级区域用紫色标注,IV级建筑物保护等级区域用红色标注,从图中可以明显看出,充填开采方案下地表的建筑物安全等级区域比不充填开采方案下地表的建筑物安全等级区域高很多,且不充填下地表曲率 >0.6 的区域很大,说明充填开采下地表的稳定性有了显著的提高,可以提升地表建构筑物的安全保护等级。

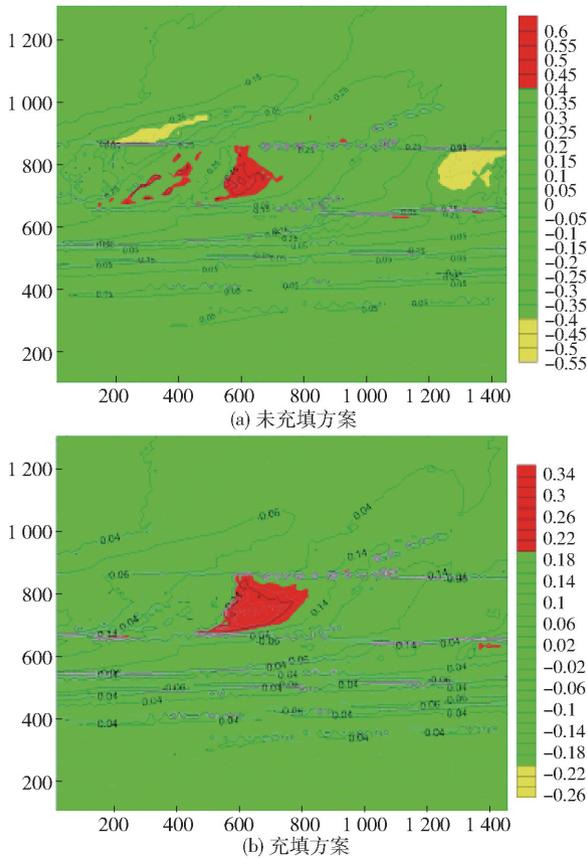


图10 未充填(上)及充填(下)方案地表倾斜复合平面图

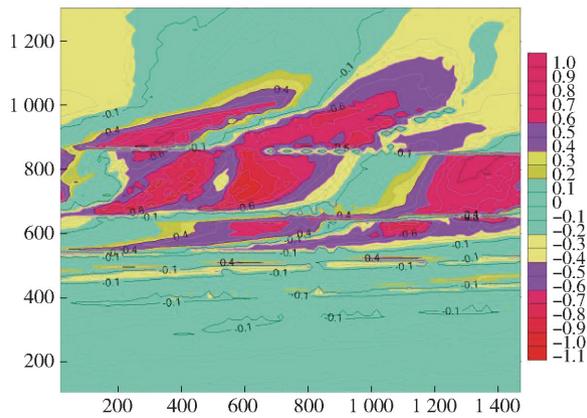


图11 未充填方案地表曲率复合平面图

5 结论

(1) 利用数值模拟分析了矿体开采下地表的位移、水平变形、倾斜和曲率四项指标,得到井下开采对地表建筑物产生损害和破坏的区域范围,并通过地对地表移动变形的三项指标复合平面图可以准确全面了解各区域的建构筑物保护等级。总结出一种新的计算方式将地表建构筑物安全等级图形化的表示出来,在今后矿山开采之前可以利用此方法针对矿山开采方式来研究确定地表哪些区域可以建造 I 级建筑物,哪些区域可以用来建造其他等级建筑物。

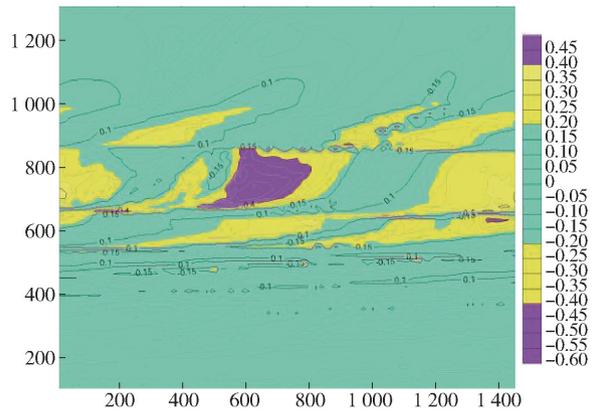


图12 充填方案地表曲率复合平面图

(2) 模拟结果对比分析表明,充填方案开采可以明显增强地表稳定性,位移、水平变形、倾斜和曲率值急剧降低,显著增强地表建构筑物安全等级。

(3) 采用充填模拟采场充填时,根据实际情况使用了未接顶的充填方式对其进行三维数值模拟,可以更接近实际开采充填过程。

[参考文献]

[1] 陈从新. 复杂条件下地下采矿稳定性研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004.

[2] 林德军. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 化工管理, 2016(32): 309.

[3] 姜岳, R. MISA, 李鹏宇, 袁鑫, 等. 矿山开采沉陷理论发展历程综述[J]. 金属矿山, 2019(10): 1-7.

[4] 侯春来, 吴爱祥, 王贻明. 高速公路下开采的地表沉降控制与预测[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(5): 23-27.

[5] Ghose A K. Green mining-A unifying concept for mining industry[J]. Journal of Mines Metals & Fuels, 2004, 52(12): 393-395.

[6] Greco V R. Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 517-525.

[7] 杨宝贵, 彭杨皓, 李杨, 等. 充填开采地表移动变形规律数值模拟分析[J]. 金属矿山, 2014(12): 169-174.

[8] 刘艳章, 吴恩桥, 冯毓松, 等. 基于有限元分析的大包庄矿地表移动带圈定[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3): 11-15.

[9] 王海军, 张长锁. 复杂地表环境条件的地下开采地表移动带的圈定研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(4): 94-97.

[10] 李同鹏, 胡崴, 方胜勇, 等. 风景名胜区内铜矿开采地表沉降安全影响研究[J]. 金属矿山, 2020(12): 216-220.

[11] 张天军, 羽玥, 张磊, 等. 矿山开采沉陷的 FLAC^{3D} 数值模拟分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(2): 11-14.