

# 缓倾斜中厚矿体充填开采上覆岩层运移规律研究

关守安<sup>1,2</sup>, 李爽<sup>3,4</sup>, 金长宇<sup>1</sup>, 刘冬<sup>3,4</sup>  
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省安全科学研究院, 辽宁 沈阳 110004;  
3. 汕头大学 工学院, 广东 汕头 515063; 4. 汕头大学 智能制造技术教育部重点实验室, 广东 汕头 515063)

**摘 要:** 针对缓倾斜中厚矿体下行充填开采过程中岩层移动和地表塌陷规律展开了研究. 通过 FLAC3D 三维数值计算确定典型勘探线剖面, 以河砂为骨料, 重晶石粉为胶结剂进行大型相似材料模型试验, 利用 3DEC 数值分析软件对模型试验结果进行验证分析. 结果表明, 充填开采能有效抑制岩层移动和地表塌陷, 使地表沉降范围集中在矿体顶部且沉降中心随下行开采过程中向矿体中心移动; 深埋矿体的开采对上覆岩层移动范围的影响较浅埋矿体的采动影响小; 岩层移动塌落的角度随开采深度的增加先变小后变大, 最终沉降以筒型陷落为主.

**关 键 词:** 缓倾斜中厚矿体; 充填开采; 岩层运移; 相似材料; 数值模拟  
**中图分类号:** TD 32      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)11-1630-06

## Study on Overlying Strata Movement Law in Backfill Mining of Gently Inclined Medium Thick Orebody

GUAN Shou-an<sup>1,2</sup>, LI Shuang<sup>3,4</sup>, JIN Chang-yu<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>3,4</sup>  
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Academy of Safety Science, Shenyang 110004, China; 3. College of Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China; 4. Intelligent Manufacturing key Laboratory of Ministry of Education, Shantou University, Shantou 515063, China. Corresponding author: LIU Dong, E-mail: liud@stu.edu.cn)

**Abstract:** The laws of strata movement and surface subsidence during downward backfill mining of gently inclined medium thick orebody were studied. Typical exploration line profiles were numerically determined via FLAC3D. The river sand and cementing agent were adopted as the materials of the aggregate and barite powder to perform large-scale similar material model tests. The model test results were verified and analyzed via the numerical analysis software-3DEC. The results showed that the strata movement and surface subsidence can be effectively restrained by the method of backfill mining, and cause to the surface subsidence area to concentrate on the top of the orebody and move to the center of the orebody along with the downward mining process. It was also indicated that the mining of deep-buried orebody has less influence on the movement range of overlying strata than that of the shallow-buried orebody. The angle of strata movement and subsidence first decreased and then increased with the increase of the mining depth. The final settlement is mainly found to be cylindrical subsidence.

**Key words:** gently inclined medium thick orebody; backfill mining; strata movement; similar material; numerical simulation

地下矿产资源开采深度一般为数百米, 随着矿石需求增长、采矿技术的发展, 开采深度会越来越深<sup>[1]</sup>. 与此同时, 地下开采导致的岩层移动和地表塌陷问题也日趋严重, 由此带来了社会、经济、环境等一系列问题.

为了研究地下开采对岩层运移的影响, 国内外学者开展了大量研究工作. 文献[2-3]考虑各种影响因素, 基于 Knothe 时间函数, 建立了可以

预测开采后地表移动变形的三维影响函数. Baryakh 等<sup>[4]</sup>在概率积分法的基础上考虑并加入时间因素,提出了动态移动变形的预测方法. 一些学者对不同采矿方法下地表移动和沉降规律进行了统计分析<sup>[5-7]</sup>. 随着计算机的出现与科学技术的快速发展,数值模拟法被广泛运用到岩移和地表塌陷问题的研究中<sup>[8-9]</sup>. 然而,已有的研究侧重理论分析与现场监测,很少采用室内相似材料模型实验,对缓倾斜中厚矿体的开采导致岩层移动规律研究不足,数值模拟方法也多采用连续元分析手段,较少利用可以更真实模拟岩层移动的离散元进行分析.

本文以某金矿缓倾斜中厚矿体开采为工程背景,利用相似材料模型试验与离散元数值模拟手段开展采矿过程中上部岩层运移规律研究,所得成果对相似矿体条件的矿山有效控制岩层移动与地表塌陷具有指导意义.

## 1 工程概况

某金矿矿体赋存条件复杂、岩破碎、理裂隙发育,属于典型的缓倾斜中厚破碎矿体,矿体平均倾角为 35°,厚度 10 ~ 15 m,节理裂隙发育,矿岩稳固性差,品位变化不均,地表不允许陷落. 针对矿床开采技术条件,矿山长期采用小规格机械化上向进路充填采矿法开采,如图 1 所示,采场沿矿体走向布置,进路规格 3.5 m × 3.5 m.

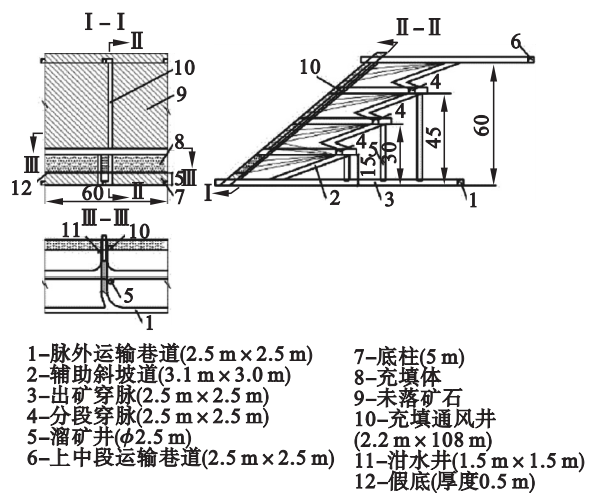


图 1 进路机械化充填采矿法示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the approach mechanized filling mining method

根据现场钻孔摄像、三维节理扫描的结果证实,矿体上盘岩体受断层影响而极为破碎,矿体上方的地表存在一条与矿体走向平行的公路,矿体

的开挖及覆岩沉降导致地表出现了裂缝与塌陷,如图 2 所示.



图 2 某金矿开采导致地表塌陷  
Fig. 2 Surface subsidence caused by mining in a certain gold mine

为了研究该金矿继续下行开采过程中岩层运移规律和地表塌陷问题,通过 FLAC3D 对下行开采过程进行数值模拟计算,三维模型如图 3 所示. 结合计算结果与工程地质实际情况发现,该金矿 14 勘探线剖面位于整个矿体几何中心和开采后地表沉陷的中心. 因此,本文选取 14 勘探线剖面为原型(图 4)开展大型相似材料模型试验和基于离散元的数值模拟研究,总结分析缓倾斜中厚矿体充填开采过程中的岩层运移规律.

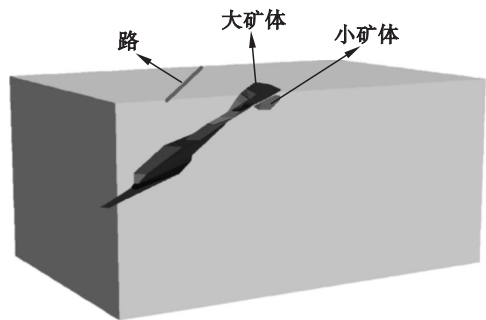


图 3 FLAC3D 数值计算三维模型  
Fig. 3 Three-dimensional model of FLAC3D numerical calculation

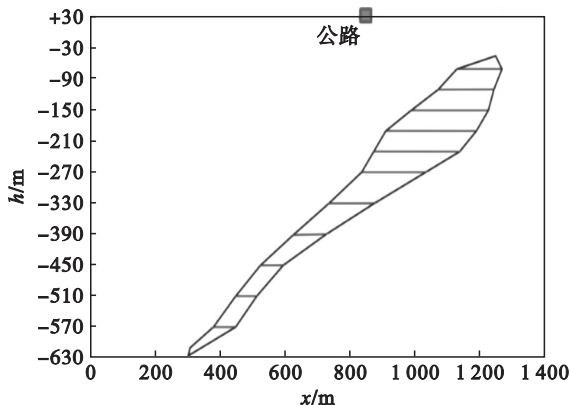


图 4 某金矿 14 勘探线剖面图  
Fig. 4 Sectional view of the 14 exploration line of a certain gold min

2 相似材料模型试验

2.1 相似材料模型制备

选取河砂为骨料,并加入重晶石粉以改善相似材料的力学特性.考虑到本试验模型较大,为了使骨料与胶结剂混合均匀,缩短风干养护时间,提高效率,因此试验中也选取石蜡作为胶结剂.根据相似理论,试验中各相似比之间应满足式(1).

$$C_L = \frac{L_p}{L_m},$$
$$C_\gamma = \frac{\gamma_p}{\gamma_m},$$
$$C_\sigma = C_{\sigma c} = C_E = C_{\sigma t} = C_c = C_L \cdot C_\gamma,$$
$$C_\varepsilon = C_\mu = C_\phi = 1.$$

}

(1)

式中: $C_L$  为几何相似比; $L_p$  为原型几何尺寸; $L_m$  为模型几何尺寸; $C_\gamma$  为容重相似比; $\gamma_p$  为原型容

重; $\gamma_m$  为模型容重; $C_\sigma$  为应力相似比; $C_{\sigma c}$  为单轴抗压强度相似比; $C_E$  为弹性模量相似比; $C_{\sigma t}$  为抗拉强度相似比; $C_c$  为内聚力相似比; $C_\varepsilon$  为应变相似比; $C_\mu$  为泊松比相似比; $C_\phi$  为摩擦角相似比.应变、泊松比和摩擦角均无量纲,因此  $C_\varepsilon, C_\mu, C_\phi$  均为 1.

原型(14 线剖面)尺寸为 1 200 m × 600 m,选取  $C_L$  为 500,因此相似材料试验模型尺寸为 2.4 m × 1.2 m.通过室内力学试验以及 Hoek – Brown 强度准则获得了原岩物理力学参数,为了保证相似材料在刚度和强度方面达到相似比的要求,本研究进行了大量的配比试验,确定了容重  $C_\gamma = 1.21 \sim 1.55, C_{\sigma c} = 605 \sim 775$ .考虑试验误差,相似材料的单轴抗压强度最终确定在 0.1 ~ 0.2 MPa 之间,选取  $m$ (砂): $m$ (石蜡): $m$ (重晶石粉) = 22:1:2 的配比进行相似材料模型试验,原岩及相似材料的物理力学参数如表 1 所示.

Table 1 Physical and mechanical parameters of raw rock and similar materials							
材料	密度 g · cm <sup>3</sup>	单轴抗压强度 MPa	抗拉强度 MPa	弹性模量 GPa	摩擦角 (°)	内聚力 MPa	泊松比
原岩	2.62	71.5	4 ~ 6	34.83	41.21	12.07	0.26
相似材料	1.96	0.21	0.02	1.46	41.31	0.021	0.24

如图 5 所示流程,选取 2.5 mm 粒径的天然河砂,经过制料、填料和拆料处理后,得到相似材料试验模型,其中矿体模型用木块代替,并按照矿

山实际开采阶段划分矿体,模拟下行充填开采过程.

图 5 相似材料模型制作过程

Fig. 5 Making process of similar materials model

(a) — 固定粒径筛砂; (b) — 融化石蜡; (c) — 骨料配比混合; (d) — 混合加热搅拌; (e) — 装模填料; (f) — 预置木块; (g) — 胶锤捣实; (h) — 分层填料; (i) — 成型养护; (j) — 脱模; (k) — 确定矿体界限; (l) — 模型养护.



2.2 相似材料模型试验结果

按照试验计划,首先对-30~-70 m 阶段进行开采,模型中开采高度即为 8 cm,开采完成后立即用一定密度的海绵进行充填(图 6b).随后在第二层至第五层的开采过程中,矿体受到自重应力的作用,上盘围岩内部应力达到岩体屈服断裂强度,出现了少许围岩垮落现象,但由于充填体的存在,使垮落的围岩覆盖在充填体上,覆岩内部运移较小,采动影响尚未传递至地表,因此在垮落区上方形成了应力平衡拱(图 6f).上覆岩层重力由应力平衡拱传递至下方围岩,在达到其屈服断裂强度前,应力平衡拱保持稳定状态.

随着继续向深部开采的进行,应力平衡拱向下传递的压力不断增大,当第六层开采结束时,充

填体上方一定高度岩体发生断裂下沉,使围岩出现张开破坏(图 6g),应力得以释放,此时应力平衡拱向浅部迁移并出现失稳前兆.结合图 7 所示的三维光学测量位移云图,当开采至第七层时,上覆岩层重力不断向张拉破坏的裂隙尖端处集中,导致其继续产生张开扩展的大变形现象,当裂隙发育至上层岩体时,尖端处集中的应力超过岩体强度,使上盘围岩部分塌落(图 6h),塌落的围岩覆盖在充填体上,应力平衡拱继续向浅部迁移.当对第八至十二层回采时,深部围岩受到高应力的作用,继续出现塌落和大变形张开破坏,并在不同分层出现多个应力平衡拱(图 6k),而上方应力平衡拱继续向浅部运移,最终到达地表,使地表出现张拉裂缝(图 6l).

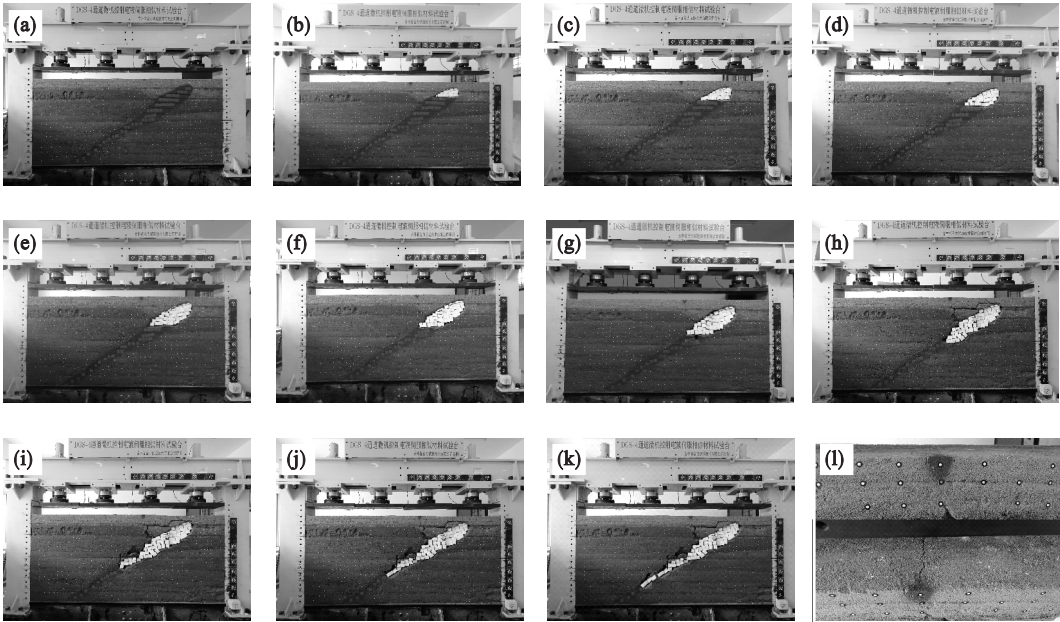


图 6 下行开采过程中岩层的破坏与运移

Fig. 6 Destruction and movement of rock stratum during downward mining

(a)—大型相似材料试验;(b)—第一层开采;(c)—第二层开采;(d)—第三层开采;(e)—第四层开采;(f)—第五层开采;(g)—第六层开采;(h)—第七层开采;(i)—第八层开采;(j)—第九层开采;(k)—第十层开采;(l)—地表出现裂缝.

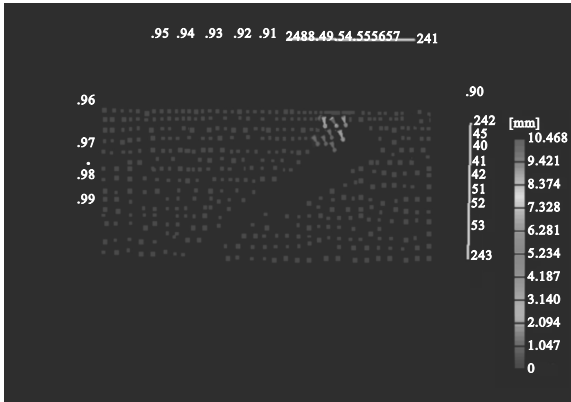


图 7 开采至第七层时三维光学测量位移云图

Fig. 7 Displacement nephogram of optical measurement at seven level

根据以上分析,随矿体向深部开采,围岩所受应力不断增大,当达到岩体屈服断裂强度时,宏观上则出现一定的剪切滑移面和张拉破断面,应力得以释放,受到岩体自身强度的影响,此时出现应力平衡拱并使岩体保持稳定.随着开采深度的继续增大,应力不断向张拉破断面的裂隙尖端处集中,导致裂隙继续张开扩展,并与上层岩体贯通,使围岩出现较大的折线式破断面.随后,继续向深部开采的过程中,上述破坏过程循环出现,直至应力平衡拱到达地表,地表出现较大的张拉裂缝.

### 3 离散元数值模拟分析

#### 3.1 数值计算模型与参数

结合矿岩的地质与节理调查,利用 3DEC 数值模拟软件建立二维精细化模型. 模型长 1 320 m,高 660 m,厚 8 m,提前划分 12 个分层. 通过对不同阶段巷道内 15 个测点进行三维激光扫描测试,图 8 给出了测点 10 的节理分布情况. 综合测试结果发现,围岩两组节理比较发育,产状分别为  $261^{\circ} \sim 292^{\circ} \angle 74^{\circ} \sim 82^{\circ}$ ,  $41^{\circ} \sim 113^{\circ} \angle 72^{\circ} \sim 83^{\circ}$ ,此外,还存在一组缓倾节理  $201^{\circ} \sim 282^{\circ} \angle 18^{\circ} \sim 43^{\circ}$ ,这三组节理的平均间距分别为 0.624, 0.434 和 0.611 m. 根据三维激光扫描获得的节理分布规律,对 3DEC 计算模型进行节理切割,得到模型如图 9 所示.



图 8 10#测点节理分布

Fig. 8 Joint distribution at 10 # measuring point

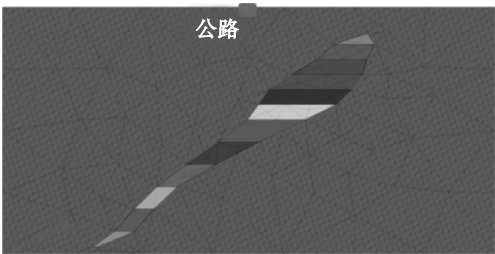


图 9 某金矿 3DEC 数值计算模型

Fig. 9 3DEC numerical calculation model of a certain gold mine

根据室内岩石力学实验,利用 Hoek – Brown 强度准则估算矿石与充填体数值计算力学参数,如表 2 所示(原岩力学参数见表 1). 其中节理面力学参数利用现场监测信息反演获得(表 3);通过在井下巷道布设多点位移计获得围岩变形,结合钻孔摄像分析围岩内部裂隙开裂情况,进而确定松动圈范围. 然后利用 3DEC 计算获得开挖后的围岩变形、松动圈深度与节理参数的样本空间,建立变形值、松动圈深度——节理参数非线性映射关系的进化神经网络模型. 最后,通过现场实测的围岩变形对节理面的法向刚度与切向刚度进行

反演,利用松动圈的深度对节理面的抗剪强度与抗拉强度进行反演. 具体方法参见文献[10]. 地应力测试表明,矿区范围的水平初始地应力约为 3 MPa,竖直初始地应力约为 6.3 MPa,基本以自重应力场为主.

#### 3.2 计算结果分析

1) 该金矿在下行充填开采过程中,当开采至第三分层时,地表的沉降不足 7 cm,其中公路处沉降不足 3 cm,沉降范围主要集中在矿体顶部. 第六层开采完毕后,地表沉降量急速增加并超过 10 cm,公路处最大沉降量 7 cm 左右,如图 10a 所示. 由第七层向第十二层开采过程中,地表沉降发展缓慢,最终沉降量在 13 cm 左右,公路处沉降量超过 10 cm,如图 10b 所示. 从沉降范围来看,第一分层至第六分层开采过程中,岩层沉降范围加速扩大,岩层快速移动;至第六分层开采后,岩层沉降范围增长速度变慢,并趋于稳定.

表 2 矿石和充填体力学参数				
Table 2 Mechanics parameters of ore and filling body				
材料	弹性模量 GPa	摩擦角 ( $^{\circ}$ )	黏聚力 MPa	抗拉强度 MPa
矿石	34.83	41.21	12.07	4.65
充填体	7.62	36.60	0.35	0.12

表 3 节理面力学参数				
Table 3 Mechanics parameters of joints				
法向刚度 GPa	剪切刚度 GPa	摩擦角 ( $^{\circ}$ )	黏聚力 MPa	抗拉强度 MPa
1.44	2	30	5	$5.2 \times 10^{-3}$

2) 图 10c 给出了地表沉降量曲线,由此计算得到倾斜量曲线,如图 10d 所示. 可以看出,开挖第六分层后,地表部分倾斜量已经达到 10 mm/m,超过《岩土工程勘察规范 GB50021—2001》中临界值. 因此,矿体在下行开采过程中,前期充填体的作用可以有效抑制岩层移动和地表塌陷,但进入深部后,继续下行开采便会出现明显的岩层移动和地表塌陷问题.

3) 根据数值模拟结果与沉降量曲线可以发现,矿体下行开采过程中,岩层移动角前期呈减小趋势,移动范围逐渐增大,到第六分层开采完毕后,岩层移动角呈加大趋势,移动范围趋于稳定.

由此可见,深埋矿体的开采对于上覆岩层及地表移动的影响范围较浅埋矿体的采动影响小,且全部采矿完毕后,岩层整体沉降以筒型陷落为主.

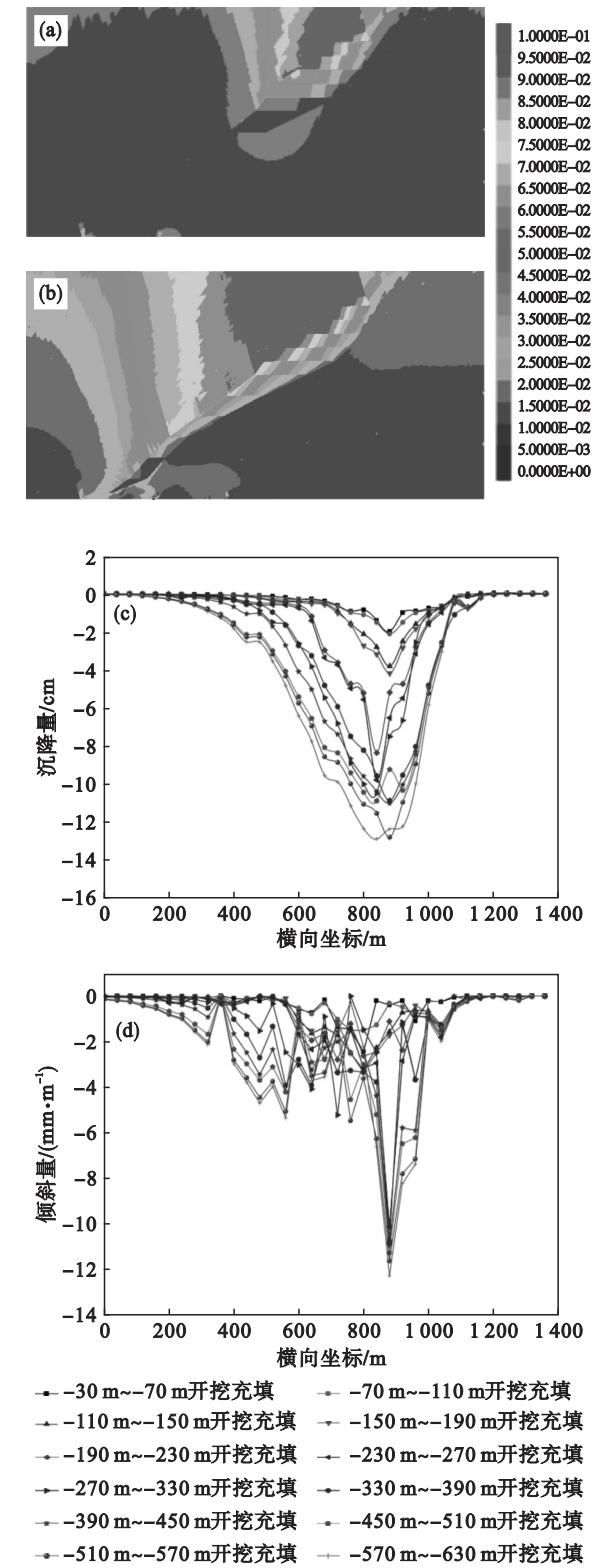


图 10 计算结果  
Fig. 10 Calculated results  
(a)—开采充填第六分层位移云图;  
(b)—开采充填第十二分层位移云图;  
(c)—地表沉降量曲线;(d)—地表倾斜量曲线.

## 4 结 论

1) 大型相似材料模型试验和数值模拟结果

显示,充填开采能有效抑制地表塌陷和岩层移动,使地表沉降范围集中在矿体顶部且沉降中心随下行开采过程中向矿体中心移动.

2) 缓倾斜中厚矿体下行充填开采过程中,浅部岩层的移动范围持续增大并传至地表,开采至某一深度后,岩层移动范围趋于稳定,深埋矿体的开采对上覆岩层移动范围的影响较浅埋矿体的采动影响小.

3) 岩层移动塌落的角度随开采深度的增加先由大变小,开采至某一深度后,角度再由小变大,最终沉降以筒型陷落为主.

致谢:感谢中钢集团马鞍山矿山研究院丁成功工程师为模型试验和数值模拟提供的指导与帮助!

### 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.  
(Chen Cong-xin. A study of stability of underground mining in complex conditions[D]. Wuhan: The Chinese Academy of Sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics),2004. )

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

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

[4] Baryakh A A, Telegina E A, Samodelkina N A, et al. Prediction of the intensive surface subsidences in mining potash series[J]. *Journal of Mining Science*,2005,41(4):312–319.

[5] Luo Y,Peng S S. Integrated approach for predicting mining subsidence in hilly terrain[J]. *Mining Engineering*,1999,51(6):100–104.

[6] Culshaw M G,Nathanail C P,Leeks G J L,et al. The role of web-based environmental information in urban planning—the environmental information system for planners[J]. *Science of the Total Environment*,2006,360(1/2/3):233–245.

[7] Tehrany M S,Pradhan B, Jebur M N. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS[J]. *Journal of Hydrology*,2013,504:69–79.

[8] 张天军,羽玥,张磊,等. 矿山开采沉陷的FLAC<sup>3D</sup>数值模拟分析[J]. 煤炭技术,2018,37(2):11–14.  
(Zhang Tian-jun, Yu Yue, Zhang Lei, et al. Numerical simulation analysis of mining subsidence of mine by FLAC<sup>3D</sup> [J]. *Coal Technology*,2018,37(2):11–14. )

[9] 栗帅,郭广礼,徐斗斗,等. 基于FLAC3D和SURFER的矽石充填开采沉陷数值模拟[J]. 金属矿山,2010(7):19–22.  
(Li Shuai, Guo Guang-li, Xu Dou-dou, et al. Exploration of numerical simulation on the mining subsidence of the Gangue backfill based on FLAC3D and SURFER[J]. *Metal Mine*, 2010(7):19–22. )

[10] Jin C Y,Yang C X, Fang D, et al. Study on the failure mechanism of basalts with columnar joints in the unloading process on the basis of an experimental cavity [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2015(48):1275–1288.