

攀西某铁矿山无底柱分段崩落法覆盖层厚度分析与研究

张良兵, 冷建勇, 李 翠, 陈 涛, 罗少琛

(攀钢集团矿业有限公司设计研究院, 四川 攀枝花 617063)

摘 要: 针对攀西某铁矿山露天转地下崩落法开采覆盖层合理厚度的确定问题, 采用相似模型试验与数值模拟相结合的方式, 分析研究了放矿过程中不同厚度覆盖层颗粒的运动速度、轨迹及覆盖层整体的沉降变化情况。结果表明, 数值模拟结果与室内相似材料试验匹配程度高, 覆盖层 35、40 m 时, 表面起伏角度小, 结构完整, 均能满足矿山安全生产需要。结合安全规程, 覆盖层厚度取 40 m 更安全、合理。

关键词: 矿山; 露天转地下; 挂帮矿体; 覆盖层; 数值模拟; 相似材料试验

中图分类号: TD85

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)05-0048-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Analysis and research on cover thickness of non-pillar sublevel caving method in an iron mine in Panxi

Zhang Liangbing, Leng Jianyong, Li Cui, Chen Tao, Luo Shaochen

(Design and Research Institute of Mining Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617063, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of determining the reasonable thickness of the overburden layer in the conversion of open-pit to underground caving mining of the hanging wall ore body in an iron mine in Panxi, the Similarity Model test and Numerical Simulation were used to analyze and study the movement speed and trajectory of the overburden particles with different thicknesses during the ore drawing process and the settlement change of the whole overburden layer. The results show that the numerical simulation results are highly matched with the indoor similar material test. When the overburden layer is 35 m and 40 m, the surface fluctuation angle is small and the structure is complete, which can meet the needs of mine safety production. Combined with the safety regulations, it is safer and more reasonable to take 40 m as the thickness of the covering layer.

Key words: ore, open-air to underground, hanging wall ore body, covering layer, Numerical Simulation, Similar Material test

0 引言

露天矿山转入地下开采过程中, 一方面因露天采场和地下采场间特殊的空间位置关系, 露天采空区内的汇水容易灌入井下造成淹井事故, 一般露天

转地下矿山要在地下采空区和露天采空区之间构筑层状覆盖物, 以起到迟滞水渗流的作用^[1-2]; 另一方面无底柱分段崩落法是最典型的覆岩下放矿, 覆岩下放矿的重要特征是其应用底部结构进行定点放矿, 覆盖层厚度与放矿椭球体不适应, 会对矿石损失、

收稿日期: 2023-07-20

作者简介: 张良兵, 1987 年出生, 男, 高级工程师, 长期从事采矿工艺设计与研究工作, E-mail: 674621241@qq.com。

废石混入、矿石贫化产生重要的影响^[3-6]。因此覆盖岩层的形成方式及厚度将直接影响采矿指标及经济效益, 并威胁到井下回采作业的安全。

攀西某铁矿崩落法开采及境界顶柱回收过程中, 应设置相应的覆盖层。覆盖层一般采用废石回填或边帮削坡的方式形成, 针对该矿山, 推荐采用内排的方式协同形成覆盖层, 可解决废石排弃难题, 且有利于崩落法放矿。但是较高内排土场形成覆盖层, 一方面将导致采场内地压升高, 对井巷工程稳定性造成一定影响, 同时内排土场排弃物料的结构也有相应的要求, 需要满足放矿管理。所以针对攀西某铁矿山开采条件, 通过相似模型试验和数值模拟^[7-8]相结合的方式对覆盖岩层厚度进行分析与研究, 寻求合理的覆盖层厚度以实现有序放矿, 避免投资浪费。

1 覆盖层结构参数相似试验

参考攀西某铁矿山无底柱分段崩落法的结构参数及现场矿岩散体的颗粒性质, 建立与现场尺寸、材料、性质等条件相似的物理模型, 将整个放矿过程立体、完整、直观地呈现出来, 并以此来研究覆盖层在不同厚度下覆盖层颗粒的速度、运动轨迹及覆盖层的沉降变化情况, 为构建合理厚度和安全结构的覆盖层提供指导。

1.1 相似试验材料的选取

在试验前, 按照预先设计好的相似比用不同规格的筛子将河砂及石英砂筛分成要求粒级, 矿石及覆盖层颗粒配比方案见表 1。

表 1 矿石及覆盖层颗粒级配
Table 1 Particle gradation of ore and covering layer

现场矿岩粒径/m	室内矿岩粒径/cm	矿石配比/%	覆盖层配比/%
>0.6	>6	0	10
0.4~0.6	4~6	23	17
0.2~0.4	2~4	25	11
0.1~0.2	1~2	25	20
0.05~0.1	0.5~1	18	30

1.2 相似材料试验方案

1.2.1 方案设计

攀西某铁矿山采用无底柱分段崩落法, 分段高度 20 m, 进路间距 18 m, 采矿进路断面尺寸为 5 m×5 m(宽×高), 放矿步距为 4 m, 物理相似材料模型确定相似比为 1:100。

覆盖层作为保护垫层的厚度一般为两个分段高度, 模型中模拟覆盖层的高度应在 40 m 左右, 因此在试验中选取 30、35 m 和 40 m 来分析研究覆盖层颗粒的流动速度、运动轨迹、界面变化情况, 以此分析覆盖层的合理厚度。

由于矿石前几个分段放矿过程中对上部覆盖层的影响较大, 覆岩的移动规律明显, 故模拟矿石层时采用四个分段高度, 即模拟 80 m 的矿层高度, 为保证覆盖层具有足够的厚度, 试验模型按最高能模拟 50 m 的覆盖层设计。同时考虑到边界条件的影响, 保证中间进路不受边界条件的影响, 模型设计每个分段布置 4~5 条进路, 呈菱形布置。

1.2.2 标志性颗粒及标志线

选择大小适中的河砂颗粒染色作为标志性颗粒, 在矿岩交界面每个网格交点及中心处放置一个标志性颗粒, 并记下标志性颗粒的编号。从矿岩交界面开始, 在矿石层中每个分段高度(20 cm)紧贴玻璃板内表面的位置洒一层红色粉末作为标志线, 在覆盖层中每隔 10 cm 相同位置也洒上标志线。

1.2.3 相似材料的填装

1) 装矿工作

首先将预先设计好的不锈钢进路及进路盖板(保证能够方便拔出且对上部散体没有较大的影响)放置在模型固定位置, 同时利用钢片来模拟桃形矿柱, 形成放矿过程中未爆破的脊部矿石。其次将搅拌均匀的矿石装入相似材料模型中, 在每次装料时, 尽量保证散体块度分布均匀, 以免在放矿的过程中由于大块集中而出现严重的结拱现象, 尽量不让散体洒落到模型框体外面。矿石装到与上个分段的进路底板对齐为止, 同时在紧贴玻璃板内表面撒上一条红色标志线粉末。

2) 装岩工作

矿石层装填完毕后, 在矿石层和覆盖层的分界线位置紧贴玻璃板内表面撒上一条笔直红色标志线, 同时在矿岩交界面每个网格交点及中心处放置一个标志性颗粒。然后向模型中添加搅拌均匀的石英砂作为覆盖层, 且每 10 cm 在覆盖层上部撒上标志线。

1.3 相似试验演化过程与结果分析

1.3.1 相似试验演化过程

为更好地找出覆盖层的移动规律, 在试验过程中采用现场观察和摄影的方法进行记录。放矿时根据设计的放矿步距宽度, 将进路的盖板拔出 4 cm 的

宽度, 盖板拔出的同时矿石冒落到进路中, 形成端部放矿。用小铲子和小耙子将矿石运出, 为保持和矿山铲运机的铲斗容积相同, 模拟每次铲矿量在 300 g 左右。每次铲出矿岩后, 当即用电子秤称出每次出矿的质量, 记录铲出质量, 同时用相机记录下每次出矿时覆盖层界面的变化情况。矿石层上阶段采用无贫化放矿方式, 在放出上部覆盖层颗粒时即停

止本阶段第一放矿步距放矿。再拔出进路盖板一个放矿步距宽度, 并用相机记录拔出盖板后覆盖层的界面变化, 继续放矿直到出现覆盖层废石, 记下出现标志性颗粒时放矿的次数, 同时统计放出矿岩的质量。每个阶段进路从右向左依次放矿。放矿过程中不同厚度覆盖层移动变化情况见图 1~3。

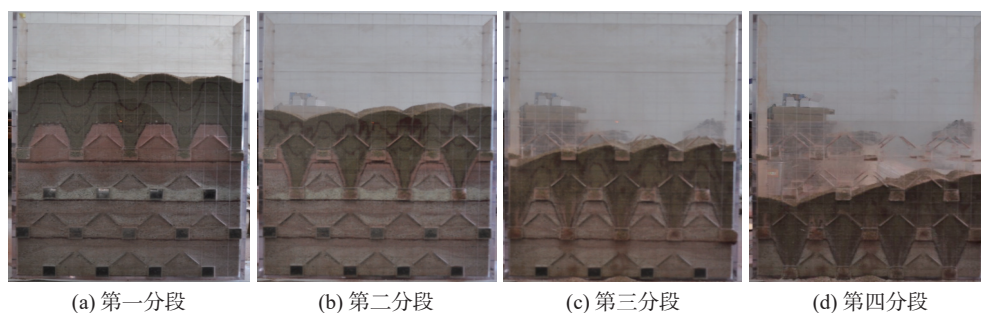


图 1 各分段放矿结束后 30 m 覆盖层变化情况

Fig. 1 The change of 30 m overburden layer after completion of each sublevel ore drawing

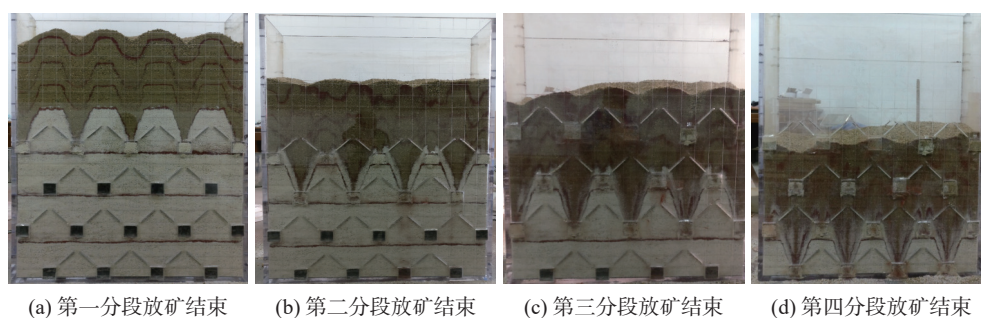


图 2 各分段放矿结束后 35 m 覆盖层变化情况

Fig. 2 The change of 35 m overburden layer after completion of each sublevel ore drawing

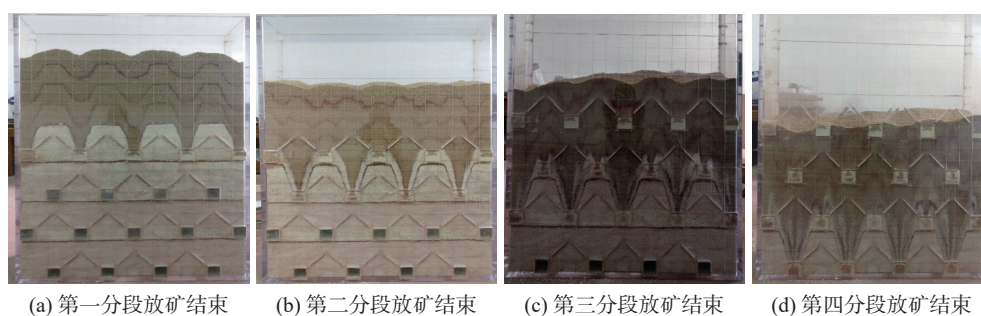


图 3 各分段放矿结束后 40 m 覆盖层变化情况

Fig. 3 The change of 40 m overburden layer after completion of each sublevel ore drawing

1.3.2 基于相似试验覆盖层厚度分析

由试验的过程可知, 当覆盖层厚度为 30 m 时, 从第一分段开始, 直到放矿结束, 覆盖层表面起伏度较大, 平均高差在 10~15 cm, 覆盖层整体结构保持

不完整, 部分区域覆盖层厚度过薄, 不能满足正常工作所需要的条件。

当覆盖层厚度为 35 m 时, 第一分段放矿结束后, 覆盖层表面塌陷较为明显, 形成波浪形, 最大高

差约为 7 cm; 在第二段分出矿时, 由于菱形进路交错开采, 覆盖层表面起伏度降低, 整体结构保持良好; 在第三分段和第四分段出矿时, 覆盖层整体下移, 表面虽有一定起伏度变化, 但最大高差缩减约为 3 cm, 且由于受到边界条件的影响, 最外侧进路放矿会导致覆盖层倾斜一定角度。全部放矿结束后可以看到虽然覆盖层厚度减少, 但整体结构仍能保持完整, 可以起到良好的滞水、防风和缓冲冲击地压的效果。

当覆盖层厚度为 40 m 时, 试验效果与 35 m 相差不大, 第一段放矿时覆盖层表面塌陷凹坑不明显, 稍有起伏, 最大高差仅为 3.5 cm, 松动椭球体发育良好, 第二段放矿后起伏基本消失, 上表面较为平整, 全部放矿完成后, 覆盖层整体结构保持完整, 同样能起到良好的滞水、防风和缓冲冲击地压的效果。

基于试验条件相似, 攀西某铁矿山露天转地下开采覆盖层最小厚度应大于 35 m。

2 覆盖层结构数值模拟

2.1 计算模型与参数

2.1.1 覆盖层数值计算模型

采用通用的 PFC2D 即二维颗粒流程序进行数值模拟, 为了将数值模拟和室内相似材料试验对应起来, 本次模拟按照室内相似材料试验模型大小建立同等尺寸的模型, 即总共 4 个分段, 分段高度 20 m, 进路间距 18 m。模型下部为矿石层(蓝色颗粒), 上部为覆盖层(绿色颗粒), 覆盖层厚度分别为 40、35 m 和 30 m。为方便观察覆盖层在放矿过程

中的移动情况, 在覆盖层中添加多条标记线(红色颗粒), 标记线间距为 6 m。3 种覆盖层厚度的模型分别如图 4 所示。

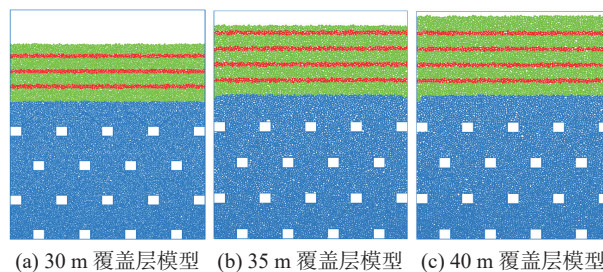


图 4 覆盖层厚度模型
Fig. 4 Cover thickness model diagrams

模拟放矿时, 当有矿石颗粒进入进路时, 删除此颗粒, 使矿体上方的覆盖层逐渐下落。当有覆盖层颗粒进入进路时, 终止此进路的放矿, 之后进行下一进路的放矿计算。在同一分段中按位置顺序依次进行放矿, 待此分段所有进路都放矿完毕后, 将进路删除并进行下一分段的放矿计算。

2.1.2 覆盖层数值计算模型参数的选取

1) 颗粒直径。在数值模拟颗粒直径配比时, 若配比的粒径差距太大, 会使颗粒数量增多, 降低计算速度, 同时小颗粒的运动状态也很难观察, 故选取最大半径为最小半径的 3 倍, 并按 0.06 的孔隙率生成颗粒。

2) 颗粒密度。根据相关资料, 选取矿石颗粒密度为 $3.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 覆盖层颗粒密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

3) 接触模型。采用线性接触模型。

4) 颗粒的其它参数见表 2。

表 2 PFC2D 模型参数
Table 2 PFC2D model parameters

岩石类型	颗粒法向接触刚度/(GN·m ⁻¹)	颗粒切向接触刚度/(GN·m ⁻¹)	法向接触强度/MPa	切向接触强度/MPa	摩擦系数	重力加速度
覆盖层	4	1.0	1.8	12	0.3	9.8
矿石	6	1.5	1.8	12	0.3	9.8

2.2 数值计算结果及分析

2.2.1 数值模拟结果

PFC2D 二维颗粒流程序数值模拟放矿过程中 30 m 覆盖层、35 m 覆盖层和 40 m 覆盖层的变化情况如图 5~7 所示。

2.2.2 基于数值模拟覆盖层厚度分析

由图 5~7 可知, 随放矿作业进行, 3 种厚度的覆盖层表面起伏度都会发生变化, 逐渐出现斜坡面,

且斜坡坡面角度随覆盖层厚度的减小逐渐增大, 同时 3 种覆盖层中的标记线均出现有较大起伏的波浪形, 但直到所有分段均放矿结束, 40 m 和 35 m 覆盖层的整体结构仍保持完整, 依旧能起到防风、保暖、滞水及防冲击地压的作用, 但 30 m 厚度的覆盖层的表面斜坡面角度较大, 容易积存雨水, 易发生危险。同时所模拟的结果与室内相似材料试验所观察到的试验现象基本吻合。

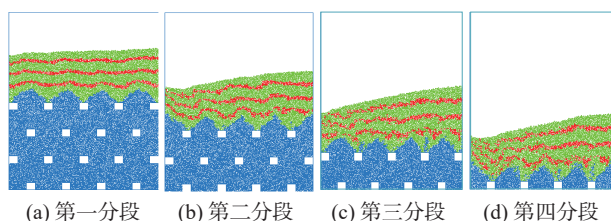


图 5 各分段放矿结束后 30 m 覆盖层变化过程

Fig. 5 The change process of 30 m overburden layer after completion of each sublevel ore drawing

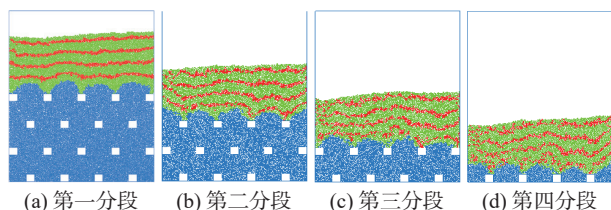


图 6 各分段放矿结束后 35 m 覆盖层变化过程

Fig. 6 The change process of 35 m overburden layer after completion of each sublevel ore drawing

根据安全规程要求,《金属非金属矿山安全规程》(GB16423-2006)规定:“回采工作面上方,应有大于分段高度的覆盖岩层,以保证回采工作的安全;若上盘不能自行冒落或冒落的岩石量达不到所规定的厚度,应及时进行强制放顶,使覆盖岩层厚度达到分段高度的二倍左右”。综上所述,推荐矿山取覆盖层厚度 40 m 更为安全、合理。

参考文献

- [1] 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.
(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.)
- [2] Song Hua, Ren Gaofeng, Ren Shaofeng, et al. Application study of pillarless sublevel caving method in transition from open pit to underground mining[J]. *Metal Mine*, 2011, (7): 36-38.
(宋华, 任高峰, 任少峰, 等. 无底柱分段崩落法在露天转地下矿山的应用研究[J]. *金属矿山*, 2011, (7): 36-38.)
- [3] Li Nan, Ren Fengyu, Zhao Yunfeng, et al. Study on the formation of overburden layer during the transition from open-pit to underground mining in Xiaowanggou iron mine[J]. *Metal Mine*, 2010, (12): 9-11.
(李楠, 任凤玉, 赵云峰, 等. 小汪沟铁矿露天转地下覆盖层形成方法研究[J]. *金属矿山*, 2010, (12): 9-11.)
- [4] Meng Guifang. The current situation of open-pit to underground mining at home and abroad[J]. *China Nonferrous Metals*, 2008, (22): 70-71.
(孟桂芳. 国内外露天转地下开采现状[J]. *中国有色金属*, 2008, (22): 70-71.)
- [5] Huang Xingyi. Research on overburden layer thickness of no-pillar sublevel caving in Jianshan iron mine[J]. *Nonferrous Metals Design*, 2011, 38(3): 6-10.
(黄兴益. 尖山铁矿无底柱分段崩落法覆盖层厚度的研究[J]. *有色金属设计*, 2011, 38(3): 6-10.)
- [6] He Jiafeng, Chen Xingming, Lei Gang, et al. Simulation study on ore overburden process by sublevel caving method[J]. *Non-ferrous Metal*, 2016, 68(3): 5-8.
(何佳峰, 陈星明, 雷刚, 等. 某铁矿无底柱分段崩落法矿石覆盖层形成模拟研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2016, 68(3): 5-8.)
- [7] Wang Ping, Li Bin, Li Yan, et al. Numerical simulation of ore drawing under non-pillar sublevel caving method[J]. *Mining Research and Development*, 2013, 33(6): 4.
(王平, 李彬, 李艳, 等. 无底柱分段崩落法放矿数值模拟[J]. *矿业研究与开发*, 2013, 33(6): 4.)
- [8] Zhu Huabi, Tao Ganqiang. Study some flow process of caving ore-rock by Numerical Simulation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(10): 2438-2441.
(朱华碧, 陶干强. 崩落放矿散体流动过程数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(10): 2438-2441.)

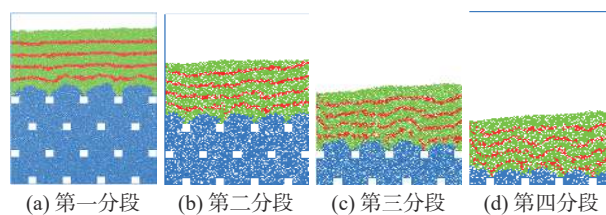


图 7 各分段放矿结束后 40 m 覆盖层变化过程

Fig. 7 The change process of 40 m overburden layer after completion of each sublevel ore drawing

3 结论

1) 通过相似材料试验和数值模拟, 对 30、35 m 以及 40 m 覆盖层放矿结束后覆盖层的变化情况进行分析, 结果表明, 30 m 覆盖层在放矿过程中部分区域表面起伏度较大, 整体结构产生变化, 证明覆盖层过薄; 而在 35 m 及 40 m 两次试验中覆盖层厚度虽然有所减少, 但整体结构都保持较为完整, 可起到良好的滞水、防风和缓冲冲击地压的效果, 均能满足要求。

2) 结合矿山相关安全规程, 从更安全、合理的角度出发, 推荐攀西某铁矿露天转地下崩落法开采覆盖层厚度为 40 m。