

文章编号: 1673-3363-(2015)03-0407-07

缓倾斜多层矿床充填法开采围岩变形 及回采顺序试验研究

叶义成, 施耀斌, 王其虎, 刘艳章, 姚团, 鲁方

(武汉科技大学湖北省页岩钒资源高效清洁利用工程技术研究中心, 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要 根据缓倾斜多层矿床特征, 构建物理相似材料模型, 采用相似模拟试验方法, 研究前进式和后退式回采顺序开采矿床的围岩应变变化、巷道围岩应变变化和地表沉降及其演变规律, 探讨嗣后充填采矿法回采上横山矿合理的回采顺序。结果表明: 围岩的变形破坏依矿、岩层不同呈现出明显的不连续性和间歇性, 矿、岩层边界附近应变变化梯度较大; 前进式回采较后退式回采拉应变状态区域少 15.28%; 随采场与巷道间距的增加, 巷道顶板和近矿体侧帮应变状态具有压应变向拉应变变化的趋势; 地表沉降范围具有不以采空区为中心对称的特点。前进式回采顺序是较好的回采顺序。

关键词 缓倾斜多层矿床; 围岩; 变形; 回采顺序; 充填采矿法; 相似试验

中图分类号 TD 325 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.03.010

Experimental study of deformation of wall rock and stoping sequence in mining gently inclined and multilayer deposits by backfill mining

YE Yicheng, SHI Yaobin, WANG Qihu, LIU Yanzhang, YAO Nan, LU Fang

(Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of High efficient Clean Utilization Shale Vanadium Resource, School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract Based on the characteristics of gently inclined and multilayer ore body, a similitude material model has been constructed through similar simulation experiment, to analyze its strain variation of stope and roadway surrounding rock, surface subsidence deformation characteristics in advancing and retreating filling stoping mining and discuss the reasonable mining sequence in mining Shanghengshan mine by subsequent filling method. The result shows that the deformation of surrounding rock has obvious characteristics of intermittency and discontinuousness in different strata, and strain near the rock and ore body contact area has greater gradient variation. The tensile strain area in advancing mining is 15.28% less than that of retreating mining. The strain state in tunnel roof and sidewall far from the ore tends to change from compressed to tensed one with the distance between stope and tunnel increasing. In addition, the ground settlement range is not symmetrical centered with the gob. The advancing mining method is one of the better mining sequences.

收稿日期: 2014-01-08

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAB05B03); 国家自然科学基金项目(51074115)

作者简介: 叶义成(1960—), 男, 湖北省汉川市人, 教授, 博士生导师, 从事采矿工程及安全工程方面的研究。

通信作者: 王其虎

E-mail: yyc60@126.com

Tel: 027-68862885

Key words gently inclined and multilayer deposits; wall rock; deformation; mining sequence; backfill mining; similarity simulation

上横山矿是典型的多层排列薄-中厚缓倾斜含钒页岩矿床,复杂的沉积赋存条件和缓倾斜多层矿床开采特征给地下开采工艺的选择和地压管理工作带来不便。在国内外类似的缓倾斜多层矿床地下开采中,由于矿床物理和力学性质受沉积型膨胀性软岩岩性为主的矿岩层影响突出,其采场地压难以控制^[1-2];矿岩的层理结构复杂和弱面发育,造成围岩各方向的强度差异性较大^[3-5],应力分布常随矿、岩层变化呈不连续性^[6]。由于多层排列的缓倾斜矿床赋存和开采的复杂性,许多学者为此做了大量的研究:理论上,探讨了缓倾斜多层矿床地质特征和成矿原因,分析了矿、岩的力学性质,为矿床的安全可靠开采提供了基础^[7-10];技术上,提出了新型开采方案和地压控制管理措施,提供安全、高效开发利用缓倾斜多层矿床的关键技术^[11-13];模拟试验上,研究了矿床开采巷道、顶板、采空区等变形及破坏,探讨了地下工程的稳定性,提高了缓倾斜多层矿床的开采强度^[14-15]。研究初步得出缓倾斜多层矿床矿岩力学特性和回采与围岩变形破坏机理及其规律,对缓倾斜多层矿床安全高效开发利用有着重要的现实意义。在这些研究中,物理相似模拟较其他研究方法能够更直观、形象地反映地下采矿作业岩石的变形破坏规律,是研究岩石地下活动的重要手段之一。但是,在缓倾斜多层矿床相似模拟试验中,由于不连续面相似材料制备、不连续面组合效应和矿床开发现状等方面的影响,以缓倾斜多层矿床整体为研究对象、对不同回采顺序回采矿床围岩变形破坏的试验研究较少,且仍需在相似模拟试验中进一步完善其变形规律等问题的研究。

本文基于相似原理开展结合层状矿、岩体不连续面的相似模拟试验研究^[16-18],以上横山缓倾斜多层含钒页岩矿床为研究对象,对前进式和后退式回采顺序矿床围岩应变、巷道围岩应变和地表沉降等变形破坏进行试验研究,探讨适合矿床的合理回采方式,为指导缓倾斜多层矿床的安全开采提供参考,试验结果可为该类矿床开采提供技术支持。

1 相似试验设计

1.1 工程背景

上横山缓倾斜多层矿床赋矿标高+92~+245 m,矿体多呈层状、似层状平行产出。矿段共有矿体 12

个,自下而上依次编号为 V1, V2, ..., V12, 倾角 5°~25°, 厚度 0.75~7.27 m, 倾向延深 103~223 m。矿床围岩和夹石以炭质页岩、硅质页岩为主,矿、岩体物理和力学性质参数如表 1。

表 1 矿、岩体物理和力学参数
Table 1 Mechanics parameter of rock

岩层	密度/ (kg·m ⁻³)	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
硅质页岩	2 564.72	112.63	59.8	0.21
含钒页岩	2 482.53	76.69	58.8	0.21
炭质页岩	2 429.86	49.45	50.8	0.20

试验选择典型的 4[#]勘探线作为模拟原型,沿倾向选取 3289810~3290260 之间 450 m 作为模拟矿段;矿体最大埋深 120 m(赋矿标高+92~+212 m),底层为 60 m 的炭质页岩(老底)。在不影响试验准确性的情况下对勘探线地质图进行了适当简化。简化过程将矿体分支复合部分合并和部分近似直线的曲线矿体简化为直线。模型简化图如图 1。

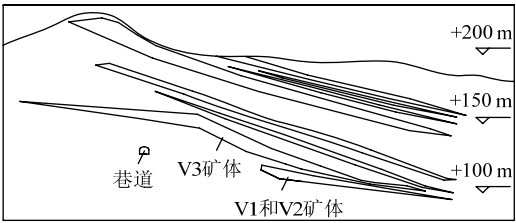


图 1 物理相似模拟模型简化图
Fig.1 Simplified graphic of similar simulation model

采用盘区机械化分层交替回采嗣后充填采矿法对研究对象进行开采,对 V1, V2 和 V3 典型矿体(图 1)的回采过程进行模拟分析,首采中段为+92 m 水平,中段高度 30 m;在开采范围内总体上采用自下向上的开采顺序。分别采用前进式和后退式 2 种回采顺序,研究矿床围岩的变形破坏特征。

根据矿体赋存条件,选择矿体埋深接近、围岩物理和力学性质一致的 V1, V2 和 V3 矿体作为研究对象:将 V1 和 V2 矿体划分为一个盘区,采用前进式回采(从靠近布置在下盘围岩内的主要巷道矿块开始回采,向盘区边界依次推进),矿房沿倾向连续布置,矿房宽度 20 m,连续回采连续充填;矿房回采结束后,实行快速充填,并使其接顶良好(胶结充填体密度 1 890 kg/m³、弹性模量 625 MPa,以满足强度 2~4 MPa 的安全要求);将 V3 矿体划分为

一个盘区，采用后退式回采，其他工艺与 V1-V2 盘区回采一致。在矿体下盘硅质页岩内掘进 1 条阶段巷道，巷道标高+122 m，巷道尺寸 4.0 m×3.2 m，研究不同回采方式巷道的收敛变形。

1.2 试验设备及监测手段

试验设备采用自行研制的可调节相似模拟实验装置^[19]，利用 XL2101G 型多点高速全程控静态应变采集仪和千分表实时监测各测点应变量及地表沉陷位移量。

由于试验的不可重复性，因此在同一相似模型试验中，矿床开采的每一时步围岩变形数据监测之前，对应变采集仪和千分表进行清零，研究不同同时步相同开采条件围岩的变形破坏特征。

1.3 相似条件

根据矿床特征、模型设计和研究问题性质，按相似理论确定模型的几何相似常数 $C_l=100$ ，应力相似常数 $C_\sigma=150$ ，密度相似常数 $C_\rho=1.5$ ，时间相似常数 $C_t=10$ 。同时，根据实验室相似材料配比试验和物理试验确定相似模型矿、岩层的物理和力学参数。

2 缓倾斜多层矿床开采相似试验

2.1 相似材料配比试验

模型相似材料选用普通河沙作为充填材料，硅酸盐水泥和石膏作为胶结材料，并采用甘油作为胶结剂。其中石膏过 120 目标准筛筛余≤0.2%，水泥选用 C32.5 硅酸盐水泥，河沙粒径≤10 目；水和甘油用量分别为胶结材料与充填材料之和的 8%和 1%。充填体材料选择河沙粒径 20 目，水占胶结材料与充填材料之和的 15%，其余材料与模型相似材料一致。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)进行试样制备、养护，其中养护时间 28 d。相似材料试样养护后通过称量质量、测定体积，并计算密度，随后在 SAJS-2000 型三轴试验机上测试试样的材料力学性能。由于相似材料配比较多，图 2 仅列出部分相似材料的单轴抗压强度。

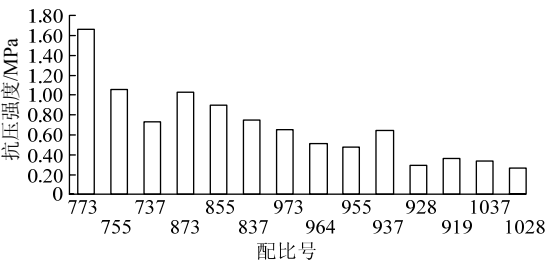


图 2 相似材料的单轴抗压强度

Fig.2 Compressive strength of similar materials

最终确定各矿、岩层相似材料的相似常数如表 2，相似材料的配比及其物理力学参数如表 3。

表 2 相似材料的相似常数
Table 2 Similar constants of similar materials

岩层	密度	抗压强度	弹性模量	泊松比	$C_\sigma/(C_\rho C_l)$
硅质页岩	1.504 8	150.173 3	149.837	0.984 5	0.9979≈1
含钒页岩	1.493 9	150.372 5	149.087	1.000 0	1.0067≈1
炭质页岩	1.499 0	149.848 5	150.831	0.988 6	0.9997≈1
充填体	1.497 2	—	—	—	—

表 3 相似材料选择结果
Table 3 The result of similar materials ratio test

岩层	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	孔隙率/ %	弹性模量/ GPa	泊松比	配比号
硅质页岩	1 704.41	0.75	16.21	0.399 1	0.213 3	837
含钒页岩	1 661.74	0.51	14.46	0.394 4	0.210 0	964
炭质页岩	1 620.98	0.33	18.56	0.336 8	0.202 3	1037
充填体	1 262.39	0.24	10.45	—	—	1019

2.2 相似模型制作及监测点布置

根据实验室条件和相似材料配比，在室内相似模拟实验装置内进行试验模型制作。模型从下至上连续、矿岩层分层浇筑，每次装填料 3~5 mm 厚度；矿、岩层间采用云母粉分层(压实厚度 1~2 mm，成型压力 6 MPa)；为便于区别矿岩层，在筑模用水中加入少量水溶性染料(染料质量占用水总质量≤1.5%)。模型建造完毕 7 d 后进行拆模，养护 28 d 后进行开采试验。模型长×宽×高为 4500 mm×40 mm×2000 mm，形成的相似模拟模型如图 3 所示。



图 3 相似模拟模型

Fig.3 Similar simulation model

由于矿体埋藏较浅，相似模型模拟至地表，只考虑自重力的影响，垂直方向不设置加载系统，左右两侧采用全约束，背面为水平约束，正面为自由约束。

同时，按图 4 布置模型监测点：共布置测点 50 个，测点间距 20 cm×15 cm，标号 1~50，用以观测矿床整体及布置在下盘围岩巷道的应变变化；在开挖区域上方地表布置千分表 5 个，测点水平间距 25 cm，标号 A~E，监测模型地表沉降位移。

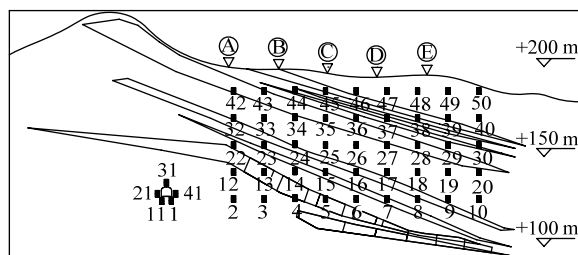


图 4 模型测点布置

Fig.4 Model monitoring points arrangement

3 试验结果分析

模拟从+92 m 水平开始对 V1, V2 矿体开采, 每次沿工作面方向推进 20 cm(实际值 20 m), 回采充填后再开挖下一采场, 直至将 V1, V2 组成的盘区回采结束, 共布置 6 个矿房; 将 V3 矿体划分为 9 个矿房; 相邻采场回采间隔时间 12 h(实际为 5 d)。考虑矿体赋存条件及回采造成的应力分布特征, 2 种回采顺序均选择具有典型变化的前 4 个时步进行研究, 则共计研究 8 个回采时步; 每开挖完 1 个时步后, 清零应变仪、千分表数据后, 重新监测测点的应变量和沉降值, 并绘制各时步应变云图和监测曲线。

3.1 矿床开采围岩变形分析

图 5 表示采用前进式回采 V1 和 V2 矿体典型的 4 个回采时步矿床围岩应变变化。拉应变和压应变区域交互影响矿床整体; 应变分布随矿、岩层边界呈现断层分布, 具有不连续性、间歇性的特征。随回采推进, 矿床压应变区域增多(压应变为“-”), 且多出现在回采采场前方上覆岩层中, 并具有典型的分层效应; 拉应变区域随采场推进延伸, 其测点数量随回采进行呈先增后减的趋势, 分别占总测点数量的 31.12%, 40.00%, 52.27%, 38.00%; 岩层间变形破坏出现明显的不连续性, 集中表现在岩层接触面附近应变突变现象明显, 以第 2 时步为例, 采场上方处于 V1 矿体内的 5[#]测点为拉应变, 而布置在炭质页岩和硅质页岩内的 4[#], 6[#]和 15[#]测点呈现不同的压应变状态(图 5b); 近地表围岩整体上呈拉应变状态, 但在第 3, 4 时步出现较小的压应变状态, 推测其原因是由于应变硬化过程造成; 矿体和岩层交错排列密集区域具有较频繁的应变变化, 说明矿岩层密集程度是影响开采扰动的主要因素之一。

可以发现, 前进式回采过程中上覆围岩在不同回采阶段, 形成的分层间应变大小和影响范围不

同, 围岩的应变特征随回采进行具有先增加后降低的整体趋势; 已回采矿房上覆围岩内拉应变比较明显; 矿体边界和岩层边界应变变化梯度较大, 矿岩层越薄, 应变变化越突出。

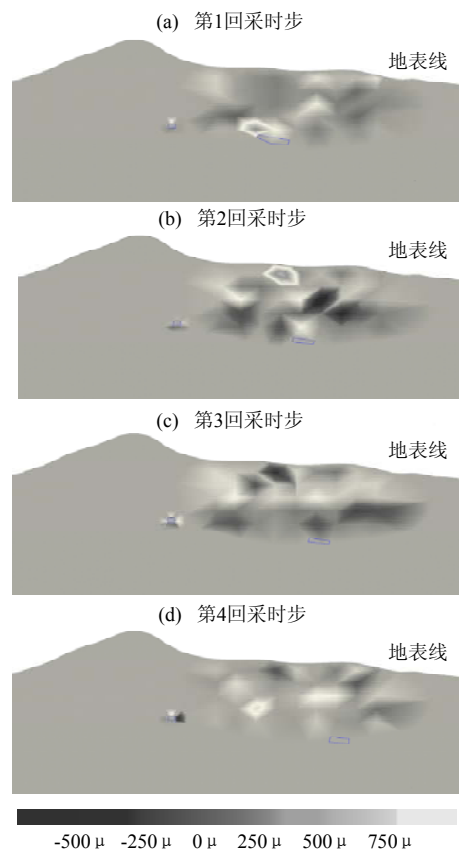


图 5 前进式回采矿床应变变化云图

Fig.5 Deposit strain variation in advance mining

后退式回采 V3 矿体, 矿床应变变化如图 6 所示。当且仅当考虑围岩的应变变化, 采场上覆围岩中形成的拉应变较前进式回采普遍偏大, 且拉应变区域也随回采推进方向延伸; 采场围岩拉应力造成顶、底板的弯曲变形, 顶板(5[#]测点)变形较底板(14[#]测点)普遍偏大, 采场下部(间距>5 m)岩层呈现较小的受压状态; 随着回采进行和采空区的不断增大, 上一时步采场顶板的拉应变集中状态向新采空区顶板转移, 这一现象与实际情况符合; 积聚在围岩中的应力, 随着回采进行具有更明显的增高趋势, 且影响范围扩大。

较前进式回采顺序, 后退式回采对矿床围岩更具有破坏性作用, 拉应变变化数值和范围均增大; 同时, 回采结束矿房(已充填)上覆围岩内的拉应变具有持续积聚并影响后续矿房上覆围岩应变状态的趋势。

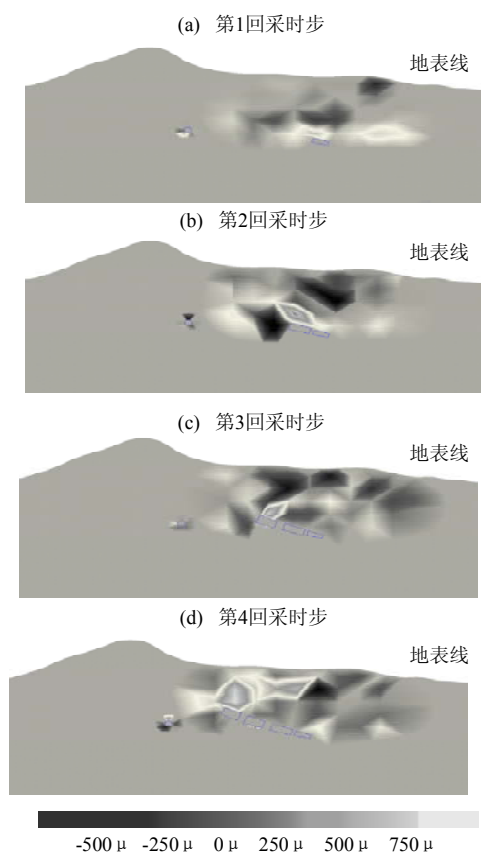


图6 后退式回采矿床应变变化云图

Fig.6 Deposit strain variation in retreating mining

图7为前进式回采V1, V2盘区的1个时步(第4时步结束)相似模型开挖的状况。



图7 模型开采状况

Fig.7 Exploitation status of model

经过分析2种回采顺序开采矿床围岩的变形可以看出矿床围岩应变变化与采场回采方向有关,软弱处为矿体边界(矿岩交汇处)。同时,受开挖和矿岩接触面影响,矿床围岩变形破坏呈现不连续性和间歇性,突出表现在矿岩层密集交错排列区域,形成明显的应变突变现象;矿床围岩应变具有积聚和传递现象,即在围岩中的应变状态随着回采进行持续影响新的回采空间。但是,前进式回采矿床的围岩受拉应变状态范围较后退式回采方式减少15.28%:当采用前进式回采时,矿床围岩受拉区域分别为31.12%, 40.00%, 52.27%, 38.00%(平均

40.35%);采用后退式回采时,矿床围岩受拉区域分别为58.54%, 45.24%, 42.86%和43.90%(平均47.63%)。分析其原因是由于前进式回采矿房充填后的充填体,使采场浅部围岩处于应力降低区,岩体中积聚的弹性能得到释放,回采前进方向持续处于卸压范围内;同时,前进式回采卸载围岩压力是一渐进式的过程,较后退式回采变化梯度小。

3.2 巷道应变特征分析

由布置在研究巷道围岩上的监测点得到研究巷道不同部位的围岩应变特征,如图8。巷道侧帮和底板呈现受压状态,顶板拉应变现象较显著。随着前进式回采(采场距离巷道越来越远),侧帮、顶板拉应变和底板压应变均出现小幅度降低趋势;但在后退式回采第5时步始,顶板及侧帮应变状态发生突变。巷道的收敛偏移分布不完全呈对称分布,近矿体侧帮较远矿体侧帮对回采扰动更加敏感;顶板受回采影响的应变较其他部位敏感,拉应变现象显著,侧帮和底板多呈现受压状态。前进式回采顺序最大拉应变和压应变分别为785.22 μ 和-362.46 μ ,巷道与矿房实际距离分别为102.18 m和191.24 m;后退式回采顺序最大拉应变和压应变分别为658.53 μ 和-554.25 μ ,巷道与矿房实际距离分别为59.03 m和117.62 m;前进式回采方式较后退式回采方式能更有效地减少巷道整体的收敛偏移。

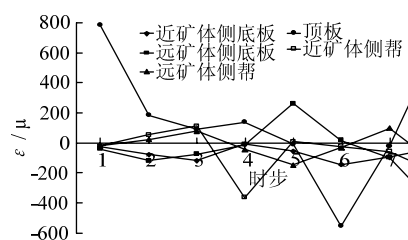


图8 巷道围岩应变特征

Fig.8 Strain characteristics of roadway wall rock

2种回采顺序巷道变形特征说明了巷道的应变状态与采场推进方向有直接关系,顶板和近矿体侧帮受回采影响最明显,其变化梯度较大,且随矿房与巷道间距的增加,应变向受拉变化,而底板正好相反。与后退式回采顺序相比,在相同的回采工艺下,前进式回采顺序收敛变形较小,底鼓不明显,顶板和侧帮偏移明显较小。分析其原因是由于随着前进式回采推进,巷道受回采扰动和残余支撑压力的作用范围和效果是渐进式减小的过程,采场作为巷道的卸压硐室,对巷道围岩具有卸压的效果;而后退式回采时,巷道持续处于采场的深部围岩内,

作为采场的卸压硐室。因此,考虑巷道受长期强度影响和应变特征,前进式回采顺序能更有效地控制布置在矿体下盘围岩内的巷道的收敛变形。

3.3 地表沉陷位移分析

模型的地表监测数据显示(图 9),沉降曲线呈现不以采空区中心对称的特点,随着回采时步进行这一趋势更明显,较大沉降量偏向地表斜坡(A, B 点),最终形成的下沉曲线呈“U”字形;其变化趋势与矿床应变变化和巷道应变变化相似。后退式回采开始,各监测点数据发生较大程度的变化,其中,采场中部位置(B, C 点)偏移量增幅达 100%~325%,直至第 7 时步才出现一定幅度的降低。

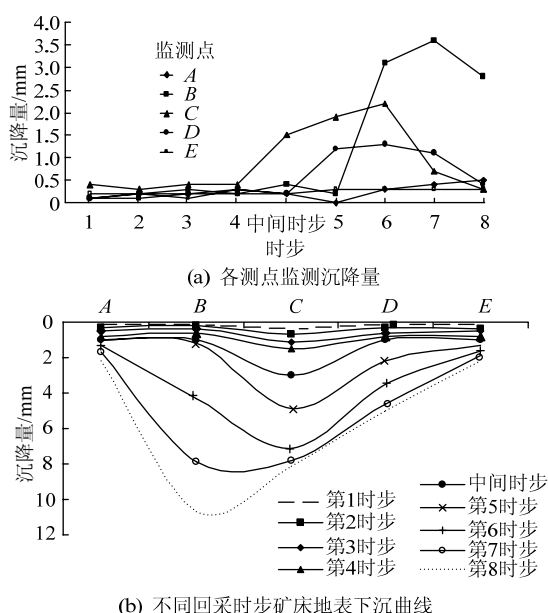


图 9 地表沉降位移状态

Fig.9 The surface subsidence displacement

前进式回采时,地表沉陷曲线呈对称分布(如图 9b),地下回采扰动对地表沉陷影响呈现线性破坏影响,此时,地下开采对地表沉降影响较小;后退式回采,地表下沉曲线出现明显偏向空区下沉(与回采顺序方向一致),沉降曲线呈明显的非对称性;在第 8 时步回采结束,地表监测点沉陷量分别为 2.2, 10.7, 8.1, 5.0, 2.2 mm(实际值)。

4 结 论

1) 相似试验模拟揭示出上横山缓倾斜多层矿床盘区机械化分层交替回采嗣后充填采矿法回采中,前进式和后退式回采矿床围岩的应变分布具有明显的不连续性和间歇性,集中表现在岩层接触面附近的测点应变突变。前进式回采方式较后退式回

采方式矿床围岩拉应变状态范围减少 15.28%,能更有效地控制围岩拉应变状态,减少矿床围岩受拉影响。其中,前进式回采矿体时,矿床围岩受拉状态范围为 40.35%(平均);后退式回采时,受拉状态围岩范围达 47.63%,且拉应变影响采场上覆岩层,形成较大的拉应变区,造成顶、底板的弯曲变形。

2) 布置在矿床下盘围岩内的巷道随巷道与矿房距离缩小应变状态从压应变向拉应变变化,巷道顶板和近矿体侧帮受回采影响明显;较后退式回采方式,前进式回采方式能更有效地减少巷道收敛偏移。其中,前进式回采顺序最大拉应变和压应变分别为 785.22 μ (巷道与矿房实际距离 102.18 m)和 -362.46 μ (巷道与矿房实际距离 191.24 m);后退式回采顺序最大拉应变和压应变分别为 658.53 μ (巷道与矿房实际距离 59.03 m)和 -554.25 μ (巷道与矿房实际距离 117.62 m)。

3) 前进式回采矿体时,地下开采对地表沉降影响较小,地表沉降曲线呈正态分布;而在后退式回采中,模拟地下开采对地表沉降影响较大,地表垂直沉降的对称中心沿采场推进方向偏移;最终形成的沉降曲线具有不以采空区中心为对称的特点,地表最大沉降量达 10.7 mm(实际值)。

参考文献:

- [1] LEWIS S E, HENDERSON R A, DICKENS G R, et al. The geochemistry of primary and weathered oil shale and coquina across the Julia Creek vanadium deposit (Queensland, Australia)[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(6): 599-620.
- [2] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升. 层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 22-27.
LIANG Weiguo, YANG Chunhe, ZHAO Yangsheng. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 22-27.
- [3] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(3): 283-353.
- [4] SINGH M, RAO K S, RAMAMURTHY T. Strength and deformational behaviour of a jointed rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(1): 45-64.
- [5] 谢承煜, 罗周全, 贾楠, 等. 缓斜极厚矿体开采安全切顶厚度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2):

- 278-284.
- XIE Chengyu, LUO Zhouquan, JIA Nan, et al. Safety roof cutting thickness in mining gently inclined and extremely thick ore body[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(2): 278-284.
- [6] 宋卫东, 赵树果, 徐文彬, 等. 液压支护长壁法开采缓倾斜薄铁矿体围岩变形与破坏规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(5): 707-713.
- SONG Weidong, ZHAO Shuguo, XU Wenbin, et al. Research on deformation and failure regularity of surrounding rock of gentle dip thin iron ore body in longwall mining with hydraulic support[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(5): 707-713.
- [7] 刘树根, 马文辛, JANSAL, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2239-2252.
- LIU Shugen, MA Wenxin, JANSAL, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [8] 邓军, 杨立强, 孙忠实, 等. 构造体制转换与流体多层循环成矿动力学[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2000, 25(4): 398-403.
- DENG Jun, YANG Liqiang, SUN Zhongshi, et al. Structural transition and multi-layer fluid circulation metallogenetic dynamics[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(4): 398-403.
- [9] 庞艳春, 林丽, 马叶情, 等. 川东南北江震旦系-寒武系界线岩层含矿性分析[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 37(6): 599-603.
- PANG Yanchun, LIN Li, MA Yeqing, et al. Analysis of ore-bearing potential in the boundary line of Sinian-Cambrian system in the Nanjiang area of Northeast Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2010, 37(6): 599-603.
- [10] 李俊平. 缓倾斜采空场处理新方法 & 采场地压控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [11] KANG Qinrong, TANG Jianxin, HU Hai, et al. Stress distribution rule of roadway affected by overhead mining in gently inclined coal seams group[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: 529-535.
- [12] 余健, 黄兴益, 吴东旭, 等. 缓倾斜中厚矿体机械化采矿理论与技术[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2005, 36(6): 1107-1111.
- YU Jian, HUANG Xingyi, WU Dongxu, et al. Theory and technology on trackless mining of gentle dip multi-strata ores of medium size[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2005, 36(6): 1107-1111.
- [13] 罗周全, 周科平, 古德生, 等. 一种新型的缓倾斜多层矿体采矿技术[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(6): 760-762.
- LUO Zhouquan, ZHOU Keping, GU Desheng, et al. A new mining technology for slightly inclined multi-layer ore bodies[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(6): 760-762.
- [14] 张耀平, 曹平, 袁海平, 等. 复杂采空区稳定性数值模拟分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(2): 233-238.
- ZHANG Yaoping, CAO Ping, YUAN Haiping, et al. Numerical simulation on stability of complicated goaf[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(2): 233-238.
- [15] 宋卫东, 徐文彬, 杜建华, 等. 长壁法开采缓倾斜极薄铁矿体围岩变形破坏机理[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(3): 264-269.
- SONG Weidong, XU Wenbin, DU Jianhua, et al. Deformation and failure mechanism of cap rock in mining a gently inclined and extremely thin iron mine by the long-wall method[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(3): 264-269.
- [16] KIM N S, LEE J H, CHANG S P. Equivalent multi-phase similitude law for pseudo dynamic test on small scale reinforced concrete models[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(4): 834-846.
- [17] BOGRAD S, REUSS P, SCHMIDT A, et al. Modeling the dynamics of mechanical joints[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(8): 2801-2826.
- [18] CHEN Xin, LIAO Zhihong, PENG Xi. Deformability characteristics of jointed rock masses under uniaxial compression[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22(2): 213-221.
- [19] 柯丽华, 林坤峰, 叶义成, 等. 一种可调节相似模拟实验装置: 中国, 201220301725.0[P]. 2013-02-27.