

文章编号:1674-2869(2011)04-0046-04

地下开采岩层变形相似材料模拟的数值试验

肖胜祥¹, 陈清运^{2*}

(1. 新疆和合矿业有限责任公司, 新疆 和静 813200;
2. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:在金山店铁矿东区浅部开采岩层变形相似材料物理模拟的基础上, 结合 34[#] 剖面工程地质特征建立了深部开采的 FLAC 数值分析模型. 随后, 依据 -550 m 水平开挖时相似材料物理模拟的地表变形实测值, 采用 BP 神经网络和遗传算法等手段对相似材料力学参数进行了优化, 构建了深部开采相似材料模拟数值试验模型. 以该数值试验模型对金山店铁矿深部开采岩层变形规律进行了研究, 结果表明: 进入深度开采后, 上盘岩层移动角趋于 58°, 下盘岩层移动角趋于 63°. 这种研究方法不仅节省了做相似材料物理模拟试验的费用和时间, 而且误差可以控制在 5% 的允许范围内, 其结果对深部开采地表征地和搬迁具有重要的参考价值.

关键词:深部开采; 岩层变形; 相似材料模拟; 数值试验

中图分类号:TD325 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.04.012

1 工程地质概况

金山店铁矿以中央主井为界将矿区分为东、西两个采区, 东区是目前主要采区. 矿区内地层与岩性较简单, 主要为三迭系中、上统蒲圻群 (T_{2-3pq}) 砂页岩, 三迭系中统 (T_2) 及三迭系下统大冶群第七段 (T_{1dy}^7) 灰岩、白云质灰岩和第四系. 由于受热力变质作用影响, 近矿砂页岩变质为角页岩, 灰岩和白云质灰岩分别变质为大理岩和白云质大理岩. 东区内可见三条相互平行排列的主干断层 (F_1 、 F_3 和 F_4 , 近东西走向), 其次还有层间滑动破碎带和成矿后形成的挤压破碎带. 断裂破碎带宽 15~35 m, 成矿后挤压破碎带宽约 7~15 m, 层间滑动破碎带产状与地层产状相一致. F_1 与 F_4 断层之间所围区域近似纺锤体, 34 线附近最厚, 平均间距 137 m, 最大 192 m, 最小 109 m, I、II 号矿体被包裹其中. 上下盘围岩的表层风化程度大部分在弱风化 (含弱风化) 以下, 矿区围岩的近矿强蚀变与远离矿体的弱蚀变普遍存在且具有多样性.

I、II 号矿体是东区的两个主要矿体, I 号矿体位于 II 号矿体上盘, 两者在剖面上呈叠瓦状排列, 相距 10~120 m, 赋存标高为 +70 m~ -719 m. I 号矿体隐伏于地下, 矿体形态呈似层状, 具有上薄下厚、东厚西薄的变化特征, 其厚度

为 20~80 m, 平均 27.18 m. 在 30~38 线间矿体产状为 $178^\circ \angle 50^\circ \sim 76^\circ$, 平均倾角为 65° , 上陡下缓; 38 线以东为 $203^\circ \angle 48^\circ \sim 75^\circ$, 平均倾角为 55° , 矿体在平面上呈一向南凸出的弧形条带状展布. II 号矿体在 26~34 线间出露地表, 具有上薄下厚, 东厚西薄的变化特征, 矿体厚度 10~150 m, 矿体形态较 I 号矿体复杂: 在剖面上, 30 线以西及 42 线以东为脉状, 32~36 线呈弯弓形, 38~40 线间呈不规则大透镜状, 在平面上, -340 m 标高以上呈条带状, -340 m 标高以下呈半月形或透镜体.

矿区内主要有基岩地表风化裂隙—第四系孔隙含水层 (上层) 与深部闪长岩侵入接触带构造裂隙含水带 (下层) 两个主要含水层, 各具有独立的水位系统, 水力联系较弱. 降水对上层水位影响较大, 对下层水位的影响较小. 地下巷道疏干对下层水位影响较大, 对上层水位影响较小. 矿区水文地质条件一般.

2 物理模拟及数值试验模型的建立

2.1 相似材料物理模拟及结果分析

a. 试验剖面选择. 由于东区 34 线附近矿体最厚大、地表分布有一些重要的建 (构) 筑物、基本工程地质条件具有代表性, 因此选用 34[#] 工程地质剖面作为相似材料物理模拟试验剖面. 根据岩性、

收稿日期: 2010-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50974031) 资助

作者简介: 肖胜祥 (1968-), 男, 湖北武汉人, 高级工程师. 研究方向: 矿山工程地质和采矿工程. * 通信联系人

强度、风化、蚀变和结构构造等工程地质特征,在 34[#] 工程地质剖面上进行围岩工程地质分区,如图 1 所示。

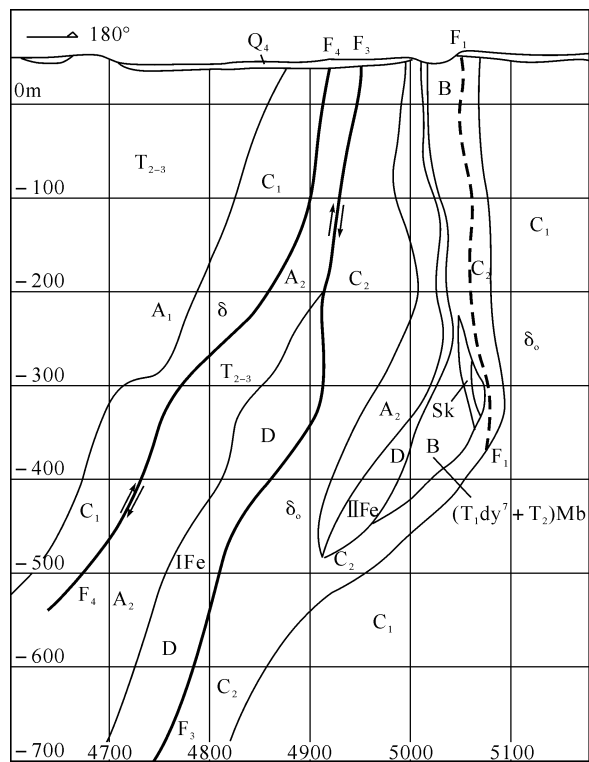


图 1 东区 34[#] 剖面工程地质特征及分区图
Fig. 1 Engineering geological characteristics and zoning map of 34[#] section

b. 模拟范围. 模拟开采深度为-550 m,考虑到边界条件对模拟结果的影响,最后模拟范围几何尺寸定为:长 960 m,高 720 m.

c. 相似比及相似材料力学参数. 为了满足试验的精度和模拟范围的要求,并尽量减少模型制作和相似材料选取的工作量,经多个相似比方案的综合分析比较,最后选定几何相似比 $C_l=400$,容重相似常数 $C_\gamma=1, C_\delta=400, C_\sigma=C_E=C_c=C_\sigma=C_{R^T}=C_{R^C}=C_\tau=400, C_\mu=C_\epsilon=C_f=C_\varphi=C_\epsilon^0=C_\epsilon^c=C_\epsilon^t=1$. 相似材料力学参数及配制见表 1.

d. 模型制作及开采工艺模拟. 依据 34[#] 剖面工程地质特征、模拟范围及几何相似比,最终相似材料平面物理模型的几何尺寸定为:宽 240 cm、高 180 cm、厚 20 cm. 相似材料物理模型是按东区 $F_1、F_3、F_4$ 等三条较大断层的实际产状、位置、断层面力学特性以及矿体的产状进行制作,见图 2 所示. 相似材料物理模拟仅模拟岩体自重应力. 依据无底柱分段崩落法开采工艺要求,采用人工的方法将矿石一层一层采出以模拟放顶和开采过程. 放顶从-270 m 高程开始,分段开采高度 35 m, I 号矿体先采,超前一个分段再采 II 号矿体.

e. 试验结果分析. 在物理模型地表布置有 6 个百分表测点,测点位置见图 2 所示. 为了探讨充分采动条件下岩层移动变形特征,-550 m 水平开采结束后对物理模型的变形进行了长期的观测,46 天后地表变形才基本稳定,沉陷盆地、移动范围十分明显,最大垂直位移达 5.34 mm(相当于工程原型的 2 136 mm),地表最大下沉发生在断层 F_1 上盘 II 号矿体的地表出露处,并且向上盘移动,沉降曲线为非对称的瓢形. 结果见图 3^[1].

表 1 相似材料力学参数实测值及配制

岩类	容重 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模量 E_S/MPa	单轴抗压强度 σ_c/MPa	断层面		配制
				内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	
$C_1-C_2-A_1$ 岩类(下盘)	26.89	16.56	0.185	0.45	26.51	重晶石粉、铁粉和水
A_2-B 岩类(上盘)	26.13	15.87	0.130			重晶石粉、铁粉、水和甘油
D 矿体	32.00	9.56	0.108			铁粉、水和甘油
$F_1、F_3、F_4$ 断层						绘图纸

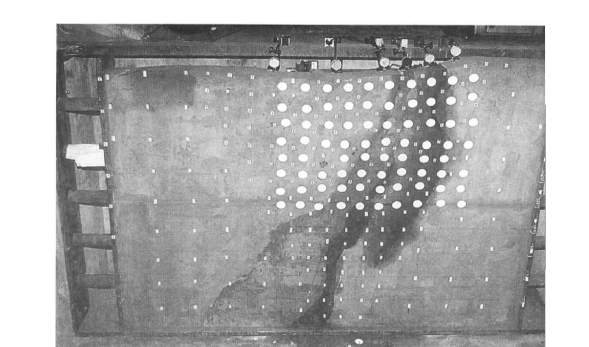


图 2 相似材料物理模拟模型图
Fig. 2 Physical model with similar material

由于地表的百分表布置较少而且过于集中,因此测得的数据有限,地表变形曲线不完整. 为此,采用多项式逼近方法,经试算,当方程的阶数为 10 时拟合曲线和地表下沉曲线误差在 2% 范围内. 然后,以拟合曲线进行多项式预测,结果见图 3 所示,在此基础上计算出测点的倾斜率,见图 4. 据此计算出地表上盘移动角为 58.4° ,下盘移动角为 63.6° ,地表移动范围 2.05 m(相当于工程原型 820 m).

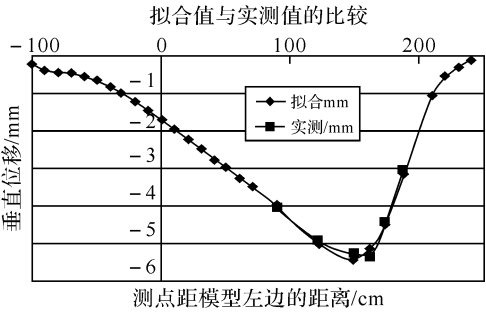


图 3 多项式拟合与实测值的比较

Fig. 3 Comparison of polynomial fit and measured values

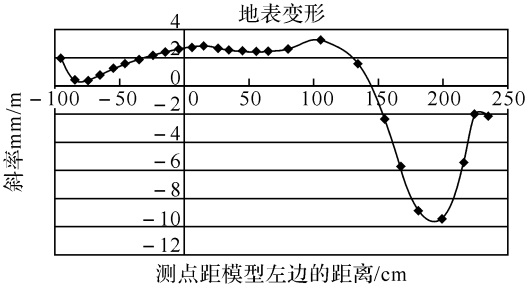


图 4 拟合值的倾斜曲线

Fig. 4 The tilt value of curve fitting

2.2 相似材料模拟数值试验模型的建立

2.2.1 FLAC 数值分析模型的建立 原相似材料物理模型几何尺寸是按开采到-550 m 水平设计的,进入深部开采后物理模型应适当扩大.模拟范围的确定:在 34[#] 工程地质剖面上,从-690 m 水平矿体上下盘边界点出发,分别以初拟的岩层移动角 55°、60°作斜线与地表相交,圈定地表移动范围,考虑边界效应对计算结果的影响,最后确定计算范围为:长 1 300 m、高 950 m,按几何相似常数 400 计,FLAC 数值分析模型几何尺寸为:长 3.25 m、高 2.4 m.

同相似材料物理模型建立一样,在 FLAC 数值分析模型中,依据 34[#] 剖面工程地质条件,模拟了 F₁、F₃、F₄ 断层的性状.原岩应力采用自重应力.采矿过程模拟及计算方案:放顶工程为-255~-270 m 分段,爆破后只出 30% 的矿石,然后按 35 m 高为一个分段往下开采,一直到-690 m 水平为止.由于顶板冒落是间断的,放矿过程是连续的,因此崩落围岩并没有接顶,而是存在一定的空顶距,在数值模拟过程中主要是通过开挖一定数量的单元且不回填方式进行模拟.冒落拱通达地表后,对回填的散体进行一定数量的开挖,以此模拟地表岩石的崩落.采用 FLAC 数值分析软件进行分析,矿体及围岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型,散体采用弹性模型.网格划分:单元采用四边形单元,尺寸为 3 cm×3 cm,相当于工程原型的 12 m×12 m,单元数为 108×82=8 856 个.

2.2.2 相似材料数值试验模型的建立 相似材料力学参数的实测值是小尺寸的岩石力学性质,由于模型中增加了断层和矿岩交界面等弱面,因此宏观岩体力学参数会有所减弱.根据文献[2-3]研究的结果,深部开采影响地表岩层变形的敏感力学参数主要有变形模量 E 和结构面 C 、 ϕ 值等.以实测的力学参数为初值,采用正交试验方法构造参数体系,进行 FLAC 数值模拟研究,共得到 25 个试验样本,其中以前 20 个样本建立神经网络模型,然后以后 5 个样本进行检验.最后,根据-550 m 水平开采相似材料物理模拟地表移动变形实测值为目标,采用 BP 神经网络和遗传算法进行寻优,得到岩层综合岩体力学参数最优解,结果见表 2.

表 2 相似材料力学参数优化结果

Table 2 Optimized mechanical parameters of similar materials

岩类	容重 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模量 E_s /MPa	单轴抗压强度 σ_c /MPa	断层面		配制
				内聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	
C ₁ -C ₂ -A ₁ 岩类(下盘)	26.39	11.55	0.170			
A ₂ -B 岩类(上盘)	26.13	11.87	0.114			
D 矿体	33.00	5.56	0.096			
F ₁ 、F ₃ 、F ₄ 断层				0.31	27.57	

2.2.3 相似材料物理模拟与相似材料模拟数值试验的比较 将表 2 相似材料力学参数赋到 FLAC 数值分析模型中,构建相似材料数值试验模型.当开采到-550 m 水平时,物理模拟与数值试验计算的地表垂直位移结果见表 3.由于数值试验模型在建立过程中,地表测点不是正好落在网格的节点上,因此进行了插值.

由表 3 可见,物理模拟与 FLAC 数值模拟地表测点的垂直位移相对误差在 5% 范围内,从采矿

表 3 物理模拟与数值试验比较

Table 3 Comparison of physical simulation and numerical test

测点	物理模型实测 垂直位移/mm	数值试验计算 垂直位移/mm	相对误差/%
①	-4.05	-3.91	3.5
②	-4.97	-5.13	3.2
③	-5.30	-5.52	4.2
④	-5.34	-5.61	5.0
⑤	-4.44	-4.53	2.0
⑥	-3.04	-3.14	3.3

工程的角度来说,这个精度是可行的,因此采用该模型进行深部开采岩层变形预测,其精度将能够得到保障.

3 深部开采岩层变形数值试验

3.1 地表变形随开采深度的关系

根据数值试验每一开挖步计算的结果,分别绘制出地表垂直位移与采深的变化曲线,见图 5.

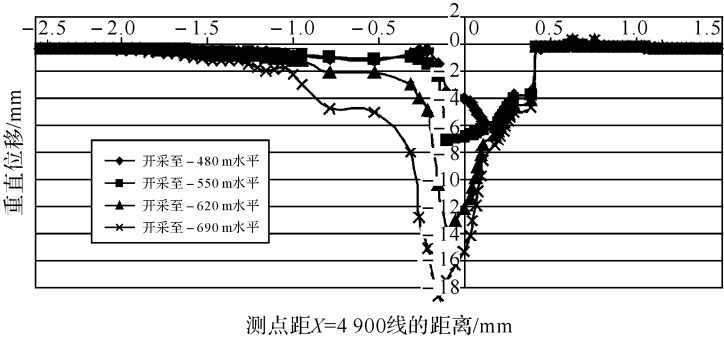


图 5 地表垂直位移与采深的关系曲线

Fig. 5 Vertical surface displacement and mining depth

据此计算出各测点的垂直变形,以倾斜率为判据确定每一个开挖步的地表移动临界点,计算上下盘移动角,结果见图 6.

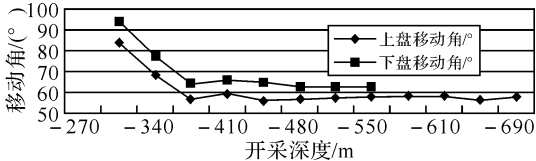


图 6 地表移动角与开采深度的关系曲线

Fig. 6 Surface movement angle and mining depth

在放顶过程中,地表垂直位移和水平位移都很小.地表变形主要发生在 F_1 和 F_4 断层之间,最大水平位移为 0.019 95 mm(相当工程原型 7.98 mm),发生在 F_4 断层的下边界,最大垂直位移为 0.007 1 mm(相当工程原型 2.84 mm),发生在 F_1 断层的上盘 II 矿体出露处.在此范围之外,地表变形很小,不会对地表建(构)筑物的安全构成威胁,这阶段的地表变形以断层面移动为主.

开采到 -550 m 水平时,地表移动变形和破坏已经很剧烈,最大垂直位移为 5.61 mm(相当工程原型 2 244 mm).上盘移动角为 58.14° ,下盘移动角超过了 63° .

进入 -550 m 以下水平开采时,随着开采深度增加,上盘岩层移动角趋于 58° ,下盘岩层移动角趋于 63° .由于 -550 m 以下 II 号矿体逐渐变窄而尖灭,且矿体进入深部后倾角变缓,因此,进入深部开采后下盘地表移动将逐渐减弱.进入深部开采后,地表最大下沉点向上盘移动,地表最大垂直位移发生在三个断层附近.

3.2 围岩变形随开采深度的关系

浅部开采时,围岩中的水平位移主要集中在采空区周围,比地表水平位移大,垂直位移主要集中在 F_1 断层的上盘,采空区周围的垂直位移比地表大.进入深部开采后,冒落拱到达地表后,水平和垂直位移表现出类似边坡的破坏形式,下盘的变形不大.

3.3 地压随开采深度的关系

进入深部开采后,随着开采深度的增加,地压影响范围明显增大,上盘的地压影响区域比下盘要大,冒落拱通达地表后,在采区周围出现一定范围的应力降低区,随后过渡到应力增高区.

开采到 -340 m 水平时,围岩塑性变形区一般,破坏主要发生在 I 号矿体的上盘和 F_4 断层处;开采到 -550 m 水平时,围岩塑性变形区进一步加大,在地表和围岩中可以看到明显的破坏带,下盘的破坏主要向 II 矿体的倾斜方向发展,上盘地表已经发生严重的崩落破坏;开采到 -690 m 水平时,上盘的破坏范围加大,上盘地表崩落加剧.

4 结 语

通过对金山店铁矿东区深部开采典型剖面的数值试验研究,得到如下结论:

- a. 基于 34[#] 剖面浅部开采岩层变形的相似材料物理模型,而建立的深部开采岩层变形相似材料数值试验模型,解决了重新建立相似材料物理模型研究深部开采岩层变形问题.
- b. 基于相似材料模拟数值试验模型,对金山店铁矿东区深部开采岩层变形规律的研究结果表明,进入 -550 m 以下水平开采时,随着开采深度增加,上盘岩层移动角趋于 58° ,下盘岩层移动角趋于 63° ,下盘地表移动变形将逐渐减弱.

参考文献:

[1] 中科院武汉岩土力学研究所,金山店铁矿.金山店铁矿东区地下开采地表变形规律及控制对策研究报告[R].武汉:中科院武汉岩土力学研究所,2000:263-317.

[2] 陈清运,杨从兵,王水平,等.无底柱分段崩落法开采上覆岩层力学参数研究[J].武汉工程大学学报,2010,32(7):65-70.

[3] 陈清运,杨从兵,王水平,等.金山店铁矿东区崩落法开采岩层移动变形规律研究[J].金属矿山,2010(7):1-4,70.