

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201611100



# 露天转地下开采模型 试验系统及其应用

张定邦<sup>1</sup>, 周传波<sup>2</sup>, 刘杨波<sup>2</sup>, 张志华<sup>2</sup>

(1. 湖北理工学院 土木建筑工程学院, 湖北 黄石 435003;  
2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为研究露天转地下开采条件下,高陡边坡与地下采场围岩的变形和应力变化规律,研制出一种高陡边坡露天转地下开采模型试验系统.该系统由开采模拟方法和开采模拟系统组成,其中,模拟试验方法包含完备的模型制作和开采模拟技术,开采模拟系统包含模型框架、模型制作设备和模型监测系统.以大冶铁矿狮子山矿段为工程背景,运用该系统进行露天转地下开采模型试验研究,得到开采过程中矿区边坡、地下采场围岩的变形规律和破坏特征.研究表明:该系统具有良好的适应性,可满足露天转地下开采及其他大型地下工程物理模型试验研究的需要.

**关键词:** 地下开采; 露天开采; 物理模型; 模拟系统

**中图分类号:** TD 8      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2017)06-0786-06

## Application of Model Experimental System for Open Pit to Underground Mining

ZHANG Dingbang<sup>1</sup>, ZHOU Chuanbo<sup>2</sup>,  
LIU Yangbo<sup>2</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China;  
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to study the stress and deformation features of high-steep slopes and surrounding rocks under the open pit to underground mining, a large-scale geomechanical model experimental system was developed. This system consists of mining model method and mining model system, the mining model method consists of modeling and mining simulation technology, the mining model system consists of model frameworks, block production equipments and monitoring devices. Taking a typical section of Shizishan ore block of Daye iron mine as engineering background, a large-scale model experiment was carried out by this system, the stress and deformation features of high-steep slope and surrounding rock under the open pit to underground were obtained. Results show this system can be preferably used for open pit to underground mining and other large-scale underground engineering model experiments.

**Keywords:** underground mining; open-pit mining; physical model; simulation system

露天转地下开采的过程中,高陡边坡和地下采场稳定性是国内外露天矿山安全生产面临的技术难

**收稿日期:** 2016-11-28

**通信作者:** 周传波(1963-),男,教授,博士,主要从事爆破工程与岩土工程的研究. E-mail:cbzhou@hotmail.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41372312);湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB359);湖北省教育厅中青年人才项目(Q20154403)

题<sup>[1-4]</sup>.物理模型试验技术是目前用于岩土工程技术领域的重要研究手段<sup>[5-10]</sup>,试验模拟的样式和种类是多种多样的,但缺乏全面完整的试验系统,且开采模型的制作、有效监测方法的运用及开挖模拟方案的设计等模型试验中的难点问题,制约着该类模型试验的应用.鉴于此,本文提出一套满足相似条件且能较为真实地实现开采过程的模型试验方法和系统,以满足露天、地下开采或岩体开挖等各类岩土工程研究的需要.

## 1 系统研制

露天转地下开采模型试验系统由模拟方法和开采模拟系统组成.

### 1.1 模拟方法

1) 模型整体制作.模拟矿区矿体原型的复杂地质构造和地下岩层组合关系,制作与矿区开采原型断面相似的弹塑性物理模型.模型研究断面中矿坑两侧边坡岩体及坑底矿体分别由其对应的相似材料砌块堆砌而成;断层破碎带及其填充物由聚丙烯薄膜和高密度粘土模拟.开采模型制作工序如下:a)根据模型研究断面和模拟开采方案,设计出模型砌筑施工图,并在图上标明模型尺寸界限、各类岩体与矿体的位置及断层破碎带位置,同时,对预制砌块进行编号、切割并打磨平整;b)在模型框中,沿尺寸界限固定表面附有薄膜的垫板(薄膜的作用是防止粘模),将岩体、矿体砌块码放到位,将调制后的白乳胶粘结剂均匀灌入相邻砌块之间的接触面,然后将聚丙烯薄膜和填充材料嵌入断层破碎带位置,待粘结剂达到设计凝结强度后拆除垫板;c)在模型南北帮表面均匀涂抹一层不同颜色的乳胶漆,检查模型与原型的相似比是否满足试验要求.

2) 模拟开采.模拟开采分为两类情况:a)扩帮式露天开采,采用人工抽去砌块的方式,从开采模型的中间向两边及深度方向扩展形成V字型开采;b)无底柱分段崩落法地下开采,运用人工钻机和土工铲模拟钻进和切削岩、矿体的施工过程,从东至西分层开采.开采过程中,矿体砌块被及时运走,破碎的岩体砌块崩落到模型的采空区,每层开挖完毕待变形稳定后,再进行下一层的开采模拟.

3) 变形监测.在整体开采模型表面布置多组应力监测点和位移监测点,同时,采用接触式测量法和数字照相量测方法<sup>[11-13]</sup>进行位移量测,不同方式的测量结果可以相互验证,提高测试数据的可靠性.

### 1.2 开采模拟系统

开采模拟系统由模型制作系统和模型监测系统组成.

1.2.1 模型制作系统 岩矿体砌块由砌块预制设备压制成型,砌块预制设备由砌块制作模具、反力架及液压千斤顶组成.砌块制作设备结构示意图,如图1所示.根据数值模拟研究模型砌块尺寸效应对模型整体性的影响,结合试验相似比取值范围,确定2套砌块制作模具的内空间尺寸分别为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 和 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ,每套模具由5块用螺栓固定且易于拼装和拆卸的12 mm厚钢板及1块活动顶板组成.

P模型框架为槽钢结构,模型框架的内尺寸为 $2\ 400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 1\ 450\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),模型框架的底部铺设厚钢板并安装脚支撑固定,前侧面安装透明钢化玻璃,后侧面沿水平和垂直方向设置竖向和横向钢支撑,左侧和右侧面均安装钢板.模型框架的结构示意图,如图2所示.

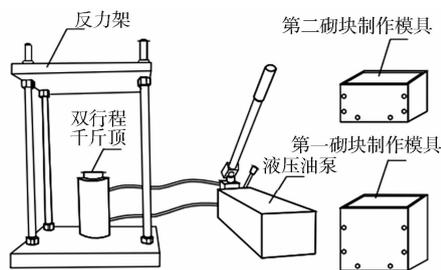
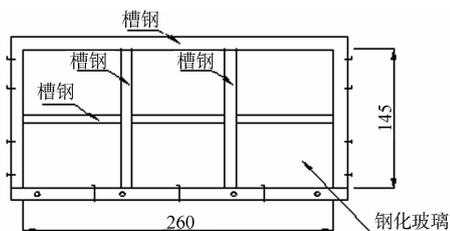
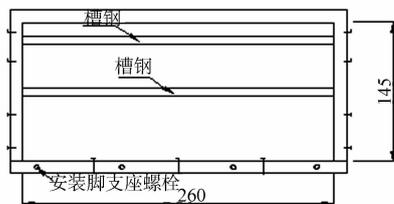


图1 砌块制作设备结构示意图

Fig.1 Structure of block production equipment



(a) 前侧立面图



(b) 后侧立面图

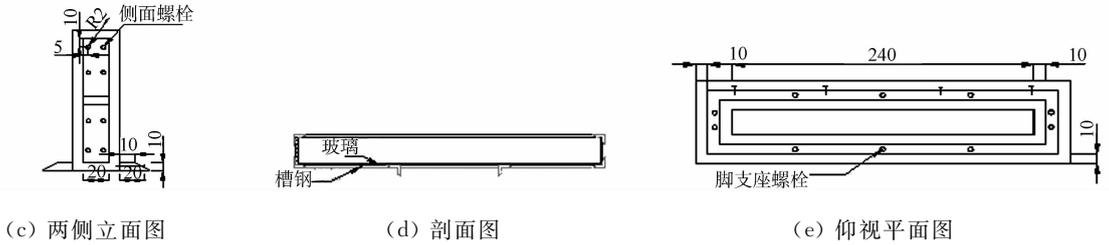


图2 模型框架的结构示意图(单位:cm)

Fig. 2 Structure of model framework (unit: cm)

1.2.2 模型监测系统 模型监测系统包括应力应变监测单元和位移监测单元. 其中,应力应变监测单元采用 DH-3815N 型静态应变测试仪、应变花和土压力盒;应变花设于开采模型的前后两侧的砌块上;土压力盒设于开采模型两侧的高陡边坡坡面上. 位移监测单元由百分表和相机组成;百分表设于开采模型的高陡边坡坡面、坡顶、坡脚和矿体上部 $\pm 0$  cm 处,百分表的磁性表座固定于模型框架中部设置的 2 根竖向钢支撑和 1 根横向钢支撑上;相机设于模型框架的正前方,且相机与模型框架上布设的相机监测点保持视线水平,所述相机监测点布设于开采模型表面弹出的横向间距 10 cm,竖向间距 4 cm 的网格线的多个交点处.

## 2 系统特征分析

露天转地下开采模型试验系统具有以下 3 点技术特征.

1) 该系统配备与模型力学相似性相适应的相似材料,运用该系统可制作出几何相似比较小的物理模型,以便于模拟大型矿区实体. 制作出的模型能较真实地模拟复杂的岩体、矿体、断层破碎带及其组合关系.

2) 模拟开采系统能合理地模拟扩帮式露天开采和无底柱分段崩落法地下开采的施工工艺,提高模拟的有效性.

3) 模型监测系统将传统的接触式量测方法和先进的数字照相测量技术结合起来,不同方式的测量结果可以相互验证,提高了试验监测数据的可靠性.

## 3 工程运用实例

利用文中模型试验系统对矿山开采项目进行的研究已经在大冶铁矿露天转地下开采模型试验中取得了较好的成果.

### 3.1 试验模拟范围

研究区域位于狮子山矿段 26~30# 勘探线之间,露天采坑北帮为闪长岩,南帮为大理岩,边坡高在 230~430 m 范围内,该区域经过了早期的露天开采到 $-48$  m 后,回填到 $\pm 0$  m 的过程. 目前,进入露天转地下向 $-180$  m 的矿底开采阶段. 研究区域内主要包含 2 个主断层,破碎带宽 5~10 m,与边坡走向呈 $60^\circ\sim 80^\circ$ 交角,如图 3 所示. 图 3 中: $l_1$  为水平位置; $l_2$  为高度.

### 3.2 试验流程

模型试验流程,如图 4 所示.

### 3.3 相似比设计

模型几何相似常数为 300,模型尺寸为 2.67 m $\times$ 1.67 m,根据相似理论分析得到模型试验的各类相似条件为

$$C_\sigma = C_E = C_C = 300, \quad C_\mu = C_\epsilon = C_\varphi = 1.$$

上式中: $C_\sigma, C_E, C_C, C_\mu, C_\epsilon, C_\varphi$  分别为应力相似常数、弹性模量相似常数、粘聚力相似常数、泊松比相似常数、应变相似常数、摩擦角相似常数. 根据课题组的相似材料研制成果<sup>[14-15]</sup>,选取铁矿粉、重晶石粉和石英砂为骨料,不饱和树脂和模具石膏为胶结材料,按不同配比制作出 3 种矿岩体的相似材料,如表 1 所示. 表 1 中: $\gamma$  为重度; $E$  为弹性模量; $\sigma$  为抗压强度; $C$  为粘聚力; $\varphi$  为内摩擦角.



析了模型破坏特征,如图 12 所示.

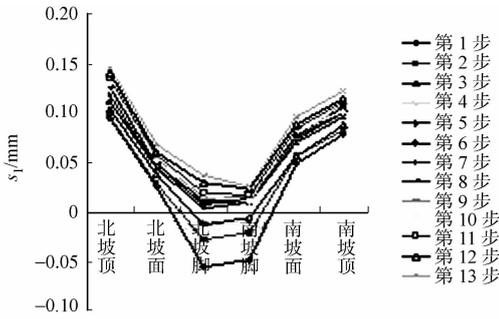


图 8 边坡测点变形曲线

Fig. 8 Displacement curves of slope points

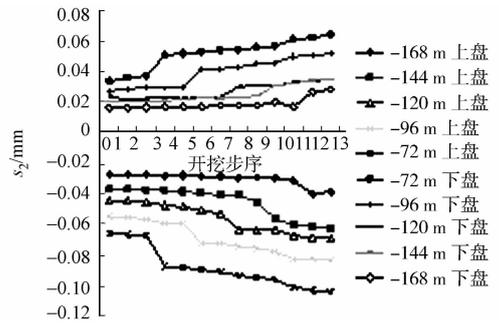


图 9 采场围岩典型测点位移曲线

Fig. 9 Displacement curves of surrounding rock points

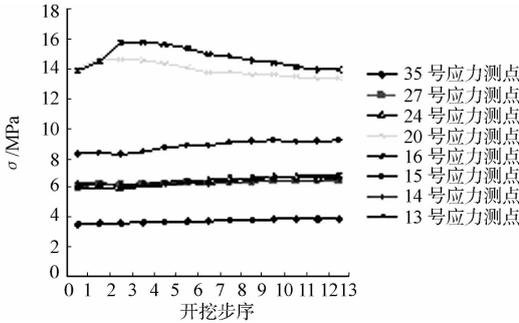


图 10 边坡典型测点的最大主应力曲线

Fig. 10 Maximum principal stress curves of slope points

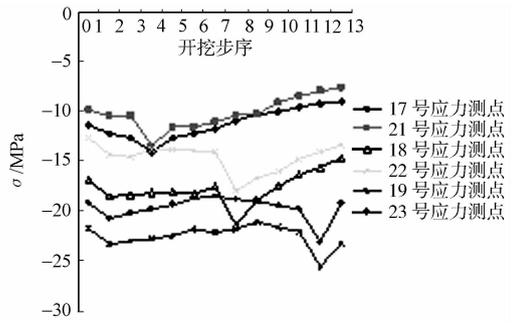
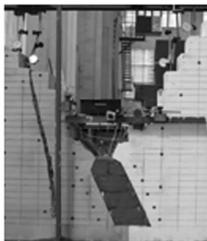
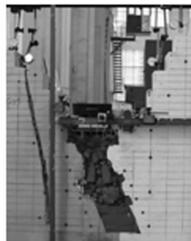


图 11 矿体围岩典型测点的最大主应力曲线

Fig. 11 Maximum principal stress curves of surrounding rock points



(a) -48 m 开采水平



(b) -120 m 开采水平



(c) -180 m 开采水平

图 12 模型破坏特征

Fig. 12 Characteristics of model failure

由图 7 可知:上下盘围岩的位移矢量倾斜向下指向地下采空区;模型断面的主要变形以垂直位移为主,水平位移较小,仅边坡坡脚及采空区量测围岩处的水平位移相对较大;模型断面位移呈现出从上到下逐渐减小的趋势.

图 8 中:正值代表沉降;负值代表回弹变形.由图 8 可知:随着露天转地下开采的逐步进行,露天边坡的沉降( $s_1$ )越来越大;在开挖到第 4 步以前,边坡坡脚处存在回弹变形,北帮边坡坡脚回弹变形大于南帮边坡坡脚,最大回弹变形发生在北帮边坡坡脚,量值约为 17.8 mm(相似比换算后);开挖第 4 步以后,边坡各测点沉降不断增大,最大沉降发生在北帮边坡坡顶,量值约为 42.3 mm(相似比换算后),整个边坡坡面的沉降曲线近似呈 V 形.

因矿体上下盘围岩的水平向位移( $s_2$ )是导致采空区破坏的主要因素之一,因此,针对上下盘围岩的水平向位移展开分析.由图 9 可知:在露天开采阶段,上下盘围岩的水平位移增长速度较慢;转入地下开采后,-60 m 水平以下的围岩水平位移值变化呈现出短时间的突变特征,如在开采至 -72 m 水平时,位于该水平的围岩变形速率增长迅速;当开采到 -84 m 水平后,-72 m 水平的围岩变形速率增长区域平缓;地下开采完毕后,采场围岩的最大变形发生在上盘,量值约为 31.6 mm(相似比换算后),上下盘围岩水平向位移值均随围岩埋深的增加而减小.

由图10可知:由于坡脚存在应力集中现象,故北帮边坡和南帮边坡上主应力( $\sigma$ )最大的点分别为位于北帮坡脚的16号和南帮坡脚的20号监测点,开挖第3步前,这两个测点的应力值逐渐增大;开挖第4步至第13步,即 $-72\sim-180$  m时,最大主应力值逐渐恢复到初始水平并趋于稳定;边坡上其他监测点的最大主应力增长速率均较小。

由图11可知:在露天开采完毕转入地下开采前,矿体上下盘围岩的最大主应力均呈现减小趋势,表明开挖卸荷会对矿体上下盘围岩的应力分布产生直接影响;转入地下开采后,位于 $-60$  m及以下水平矿体上下盘围岩的最大主应力值呈现出短时间突变的特点,如当开挖第8步(即 $-120$  m水平)前,位于 $-120$  m水平的上盘围岩18号测点和下盘围岩22号测点的主应力值呈现出缓慢减小的趋势,当开挖进行到第8步时,这2个应力监测点的主应力值大小均显著变大;当开采第9~13步时,主应力值的变化又逐渐表现为近似线性减少的趋势。

由图12可知:当开挖进行到地下 $-120$  m水平时,临近矿体边界的下盘围岩在 $-84\sim-108$  m水平附近出现小范围破坏,且上下盘围岩破坏区域均随着地下开采的进行逐渐增大;开挖 $-180$  m水平完毕后,矿体上下盘围岩破坏区域最终形成,破坏区域未对地下采场的稳定性造成破坏性影响。

## 4 结束语

露天转地下开采模型试验系统由开采模型试验模拟方法和开采模拟系统组成,该系统可以满足不同尺寸模型试验的需求,能够模拟较复杂地质条件下大规模地下工程的施工进度。运用该试验系统完成了大冶铁矿露天转地下开采物理模型试验。试验结果为露天转地下开采的安全生产提供了参考,并对露天边坡和地下采场岩体的施工力学变化规律研究打下了基础。

## 参考文献:

- [1] 卢世宗. 我国矿山边坡研究的基本情况和展望[J]. 金属矿山, 1999(9): 6-10.
- [2] 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.
- [3] ZHOU Chuanbo, WANG Peng, LEI Yongjian. Optimization study on cuthole of mining tunnel excavation[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, 19(1): 70-73.
- [4] 王其虎. 地下开采中接触带复合岩体非协调变形及控制研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- [5] 唐辉明, 晏鄂川, 胡新丽. 工程地质数值模拟的理论和方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
- [6] 朱建明, 冯锦艳, 彭新坡, 等. 露井联采下采动边坡移动规律及开采参数优化[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 1089-1094.
- [7] 李斌, 许梦国, 王明旭, 等. 无底柱分段崩落法落矿大块产生相似模拟研究[J]. 金属矿山, 2013, 440(2): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1250.2013.02.001.
- [8] 尹光志, 李小双, 魏作安, 等. 边坡和采场围岩变形破裂响应特征的相似模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 2913-2923.
- [9] 袁亮, 顾金才, 薛俊华, 等. 深部围岩分区破裂化模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 987-993.
- [10] 安建永. 浅埋隧道开挖与既有建筑基础荷载相互影响的模型试验和理论计算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [11] 李元海, 靖洪文. 基于数字散斑相关法的变形量测软件研制及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(9): 635-640.
- [12] 张乾兵, 朱维申, 孙林锋, 等. 数字照相量测在大型洞群模型试验中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 447-452.
- [13] 杨立云, 杨仁树, 马佳辉, 等. 大型深部矿井建设模型试验系统研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1425-1431.
- [14] 张定邦, 周传波, 贺丹, 等. 超高陡边坡与崩落法地下开采物理模型相似材料研制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4221-4227.
- [15] 周传波, 张定邦, 孙金山, 等. 一种露天转地下开采模型试验矿岩相似材料: 201210189082X[P]. 2013-04-24.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)