

The Application of 3D Full-Field Stress-Strain Test System in Mining Subsidence Simulation Experiment

Weijun Wang^{1*}, Liliang Cai^{2#}, Pei Li²

¹Shengtai Qingwa Coal Industry of Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group CO., LTD., Jincheng Shanxi

²Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan
Email: 765513985@qq.com, #95686338@qq.com

Received: Jun. 11th, 2020; accepted: Jun. 26th, 2020; published: Jul. 3rd, 2020

Abstract

The simulation experiment of equivalent materials is an important experimental method to study the rock strata movement. In view of the shortcoming that the single point displacement measurement cannot fully explain the stress and strain above the goaf in the research process, the three-dimensional full-field strain measurement system is adopted to conduct experimental observation. Based on the geological and mining conditions of mountainous area and peaceful terrain, the simulation experiment of similar materials was designed. The stress-strain and displacement cloud maps above the goaf are obtained by experiments. The results show that the 3D full-field strain test system is effective in the simulation experiment of mining subsidence and has important reference significance for similar scientific research.

Keywords

Equivalent Material Experiment, 3D Full-Field Strain Testing System, Mining Subsidence

三维全场应力应变测试系统在开采沉陷模拟实验中的应用

王卫军^{1*}, 蔡来良^{2#}, 李 霁²

¹山西晋煤集团翼城晟泰青洼煤业有限公司, 山西 翼城

²河南理工大学, 河南 焦作
Email: 765513985@qq.com, #95686338@qq.com

*第一作者。
#通讯作者。

收稿日期：2020年6月11日；录用日期：2020年6月26日；发布日期：2020年7月3日

摘要

相似材料模拟实验是矿山岩层移动规律研究的重要实验手段。针对研究过程中采用单点位移测量不能完全反应采空区上方应力应变的缺点，采用三维全场应变测试系统进行实验观测。以山区和平地地形的地质采矿条件为原型，设计相似材料模拟实验。通过实验，获得了采空区上方的应力应变云图以及位移云图。研究表明，三维全场应变测试系统在开采沉陷模拟实验中效果明显，对类似科学研究有重要借鉴意义。

关键词

相似材料模拟，三维全场应变测试系统，开采沉陷

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

相似材料模拟实验属于物理模拟实验，该实验用于模拟岩层移动最早开始于苏联，五十年代引入我国。该实验根据相似性原理把岩层原型按照一定比例缩小利用相似材料做成模型。对模型中的煤层按照时间比例开采，通过变形监测手段获取模型上目标点的位移量，然后将其换算为实际值，通过分析该值的变化规律来分析地表和岩层移动机理。

在山区开采沉陷模拟实验方面主要有以下成果：戴华阳[1]通过相似材料模拟实验和理论建模等方法研究了山区地表移动规律，并提出了基于负指数函数的山区地表移动预计方法。梁明、汤伏全[2]通过相似材料模拟实验和有限元数值分析，对采动诱发山体顺层(面)滑坡的机制和采动滑坡的特点及其地形地质条件进行了分析研究与成因分类。胡友健、戴华阳[3][4]将相似材料模拟试验应用于研究山区地下开采引起的地表移动问题，揭示了山区地表移动与变形的特点和基本规律。龚云、汤伏全[5]以陕西铜川黄土山区的地质采矿条件制作实验模型，研究山区开采沉陷引起的地表滑移变形特征，揭示采动斜坡塑性滑移变形与正常开采沉陷变形的叠加效应，再现黄土斜坡开采裂缝和地表剪切破坏的动态过程。

现有成果表明，相似材料模拟的观测手段主要采用点位测量的方法来完成，对应变信息没有充分采集，平地 and 山地的对比实验方面还有待加强。围绕这些不足开展了基于三维全场应力应变测试系统的相似材料模拟研究。

2. 实验观测系统

近年来，国内外学者开展了大量对物体三维变形及应变测量的研究，特别是采用数字图像相关技术进行的三维测量[6]-[12]。XTDIC 三维数字散斑全场应变测量系统，是一种光学非接触式三维变形测量系统。该技术综合了数字图像相关技术 DIC (Digital Image Correlation)、双目立体视觉技术(Binocular Stereo Vision)以及近景摄影测量技术(Photogrammetry)。通过观测被测物体表面事先涂好的散斑图像，计算变形过程中物体表面每一个点的位移和应变，具有方便携带，测量速度快、精度高，容易操作等特点。文献表明，该系统应用于相似材料模拟观测研究还不充分，本文拓展了该技术的应用领域。

采用 XTDIC 开展相似材料模拟实验，分为以下五个步骤：第一步，制作相似材料模型；第二步，对

模型表面进行光滑处理；第三步，布设散斑；第四步，开挖模型中的煤层，并采用 XTDIC 对模型变化进行实时监测；第五步，模型变形量解算，分析模型变化规律。

3. 实验过程

3.1. 实验设计

本次试验模型，模拟比例尺为 1:200，工作面的设计长度为 800 m，推进尺度 560 m，煤层采深 100 m，煤层平均厚度 4 m，用全部垮落法管理顶板，煤层一次采煤深度 20 m，模拟地形为平原和山地。煤层以下为基层，基层厚度为 16 m，每层 4 m，共四层。上覆岩层为 110 m，每层 3 m，共 36 层。地表覆土 10 m，每层 3.3 m。山地地区模拟为中间隆起的山包，两侧对称，最高点 160 m。

模拟地形确认后，开始确定岩层属性，根据材料的技术特征以及物理力学性质特征，汲取以往试验经验，选择沙作为此次相似材料仿真试验的骨料，选择石灰、石膏作为胶结材料。试验中以四硼酸钠为缓凝剂，防止材料凝结过快。相似材料仿真模型材料配比见表 1。

Table 1. Material ratio of simulation model of similar materials

表 1. 相似材料仿真模型材料配比

项目	沙	碳酸钙	石膏	总计
比例	0.8	0.2*0.6	0.2*0.4	1
重量	80 kg	12 kg	8 kg	100 kg

注：(1) 每 100 kg 材料加入 10 kg 水；(2) 每千克水加入 10 克硼砂，减缓材料的凝固时间。

相似材料模拟试验台长为 4 m。煤层深 50 cm，煤层平均厚度 2 cm，煤层在按照表 1 相似材料仿真模型材料配比的同时，加入一定量的锯末和墨汁降低抗压强度，并且方便模拟开挖。煤层以下的基层厚度为 8 cm，每层 2 cm，共四层。上覆岩层为 55 cm，每层 1.5 cm，共 36 层。地表覆土 5 m，自下之上层高为 1.5 cm、1.5 cm、2 cm。中间隆起的山包，两侧对称，最高点 80 cm。表土与平地地表土厚度一样，高出部分每层按照 1.5 cm 开展工作。制作模型如图 1。

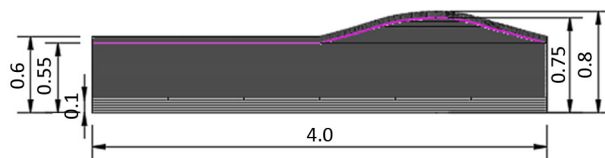


Figure 1. The simulation test model diagram of similar materials (unit: m)

图 1. 相似材料仿真试验模型图(单位: m)

3.2. 模型表面处理

XTDIC 三维光学散斑系统对观测条件要求较高，被测模型的表面特征对测量影响很大。在相似材料模拟试验前，先对模型表面进行必要的平整处理，再用石灰浆把模型粉刷薄薄一层，待表面干燥后待采用在被测试件表面喷涂哑光油漆或者用毛笔进行点点形成随机散斑特征(图 2)。同时满足以下要求：

- ①表面特征必须能够随着被测物体一起变形且不会过早损坏；
- ②理想的被测物体表面是平面，过于复杂的表面结构会使面片识别和三维重建困难；
- ③被测物体表面特征需要有一个很好的对比度，否则图像匹配的精度将很难保证；
- ④要保证被测物体表面光照均匀，使左右相机采集图像中对比度和亮度尽量相同；

⑤被测物体表面的散斑特征应足够精细，以获得良好的计算面片，表面应该足够大使相机能够完全分辨出来。

⑥最好选用随机散斑特征，它能同时适应测量范围、相机分辨率和面片大小。



(a) 未经处理的模型



(b) 平整处理后的模型



(c) 布满散斑的模型

Figure 2. Experimental model of similar materials
图 2. 相似材料实验模型

4. 实验分析

4.1. 实验过程

对于煤层开采，采用全部垮落法进行开采。两边预留 60 cm，从两侧向中点同时开挖，每次开挖 10 cm。示意图见图 3。

采动 10 cm 后，打开 XTDIC 系统，开始记录数据。考虑到后期数据处理，以及前期采动模型形变不大，设置每 3 s 采集一次数据。在第六次采动时，可以清晰看到上覆岩层出现裂纹。XTDIC 调节采集数据频率，每 1 s 采集一张。在开挖第 80 cm 过程中，开挖后上面的岩层开始出现分层现象，并且伴随着岩层的断裂。继续采动，在采动第 90 cm 的过程中，分层更加明显，采空区顶板中间向下弯曲，且逐渐明显，最终模型垮落。当煤层从两侧开挖至中心，采动贯通后，煤层上覆岩层完全垮落，上覆岩层分层明显，纹路较为清晰，观测效果较佳。

本次采集数据共 136.8 G，一共 6999 组照片，共 13,998 张照片。为处理方便，选择性能较好的计算机进行数据处理。在保证不影响研究目的的情况下，对数据进行剔除。每隔 10 张抽取一张照片，相当于采挖初期，采用 30 s 采集一次方法进行采集。在采挖后期，采用 10 s 采集一次方法进行采集。数据缩小为数据共 13.7 G，一共 700 组照片，共 1400 张照片。将其进行处理。

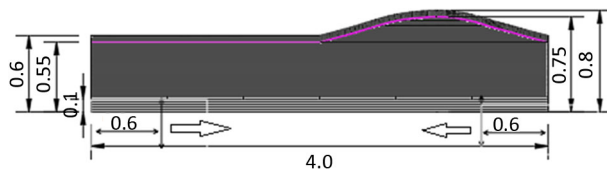


Figure 3. The advancing direction of model excavation (unit: m)
 图 3. 模型开挖的推进方向(单位: m)

4.2. 数据分析

4.2.1. 应力分析

开挖之前,“采空区”上覆岩层的应力的分布主要是由于模型自身重力引起,应力值均在 1.0% 以下。随着采动的进行,应力分布不断变化,模型两侧应力变化较大。在模拟山地与平原交界以下、煤层上侧出现全场最大应力点。在开挖第 86 cm 时,顶层垮落的一瞬间,能够清晰看到在“采空区”上侧应力变化最为激烈,呈现“拱桥”状。垮落后,应力形成“拱桥”状,“桥顶”应力最大,其他部分应力改变方向。随着煤层的继续开挖,拱形逐渐向上移动,且范围也不断扩大。当煤层采通后,形成一个极大的半椭圆,椭圆边线位于开切眼处。各阶段应力分布如图 4 所示。

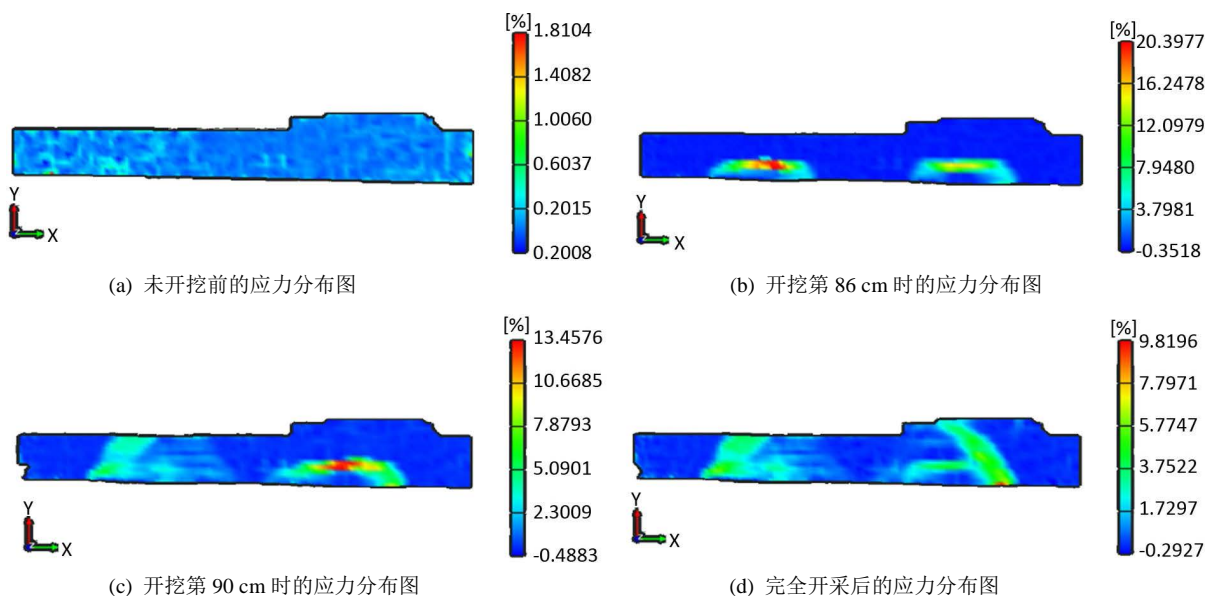


Figure 4. Stress distribution at each stage
 图 4. 各阶段应力分布图

开采扰动会引发上覆岩层应力分布改变,应力场呈现半椭圆。随着采煤工作面的推进,垂直方向的应力慢慢增大。在推进一定距离后,应力在水平方向逐渐扩大,而垂直方向应力基本保持不变。开采初期,采空区上方直接顶类似于“关键层”作用,直接顶的不连续块体之间的相互咬合作用阻止了块体的跨落。随开采进度增加,采空区上覆岩层不同位置处的块体发生持续破裂,破裂块体的数量持续增加,起承重作用的关键层随半椭圆应力场变化向上移动。本实验较好的反演了岩层应力场的发育过程。

4.2.2. 位移分析

在开挖之前,模型剖面位移均为 0 mm。随着采动的进行,在模拟平原处,“采空区”上侧发生位移;在模拟山地与平原交界以下、煤层上侧也发生位移,其他地方均未发生位移。在开挖第 86 cm 时,顶层

垮落的一瞬间，能够清晰看到在“采空区”直接顶位移最大，位移分布呈现半椭圆状，向外递减。垮落后，应力形成半椭圆状，直接顶位移最大，其他部分位移为 0 mm。随着煤层的继续开挖，半椭圆范围不断扩大。当煤层采通后，形成一个极大的半椭圆，椭圆边线即为与煤层的交界即煤层起始开挖处。位移变化最大的两点位于椭圆的两个焦点处。各阶段位移分布如图 5 所示。

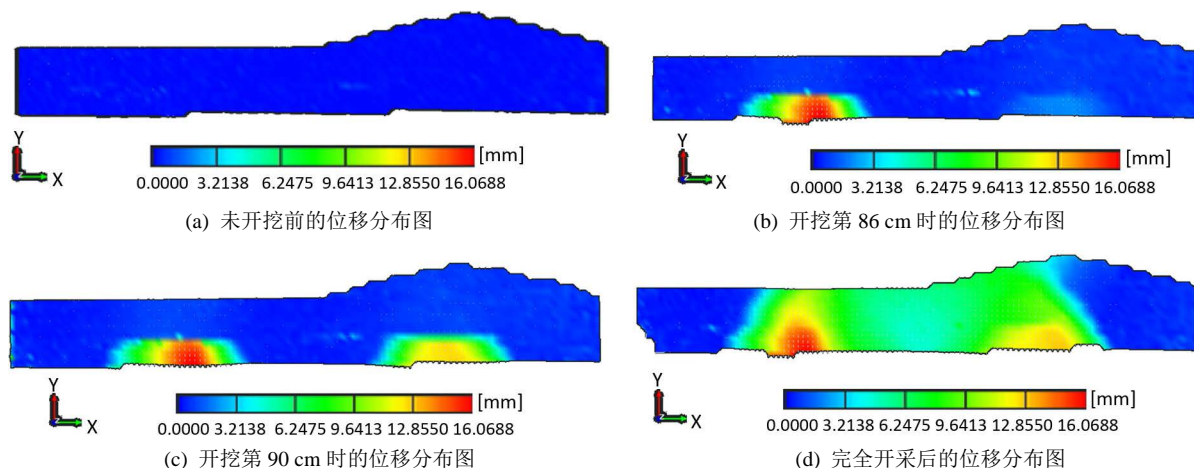


Figure 5. The distribution map of each stage
图 5. 各阶段位移分布图

5. 主要结论

通过对基于三维全场应变测试系统的相似材料模拟实验分析，在以下三点取得了较好的实验效果：

- 1) 三维全场应变测试系统获取的岩层移动实验数据，清晰地反演了岩层移动过程的应力平衡被打破到平衡的基本过程，和传统观测方式相比更能从内因上反应岩层移动发生的过程和特征。
- 2) 三维全场应变测试系统获取的岩层位移数据能和应变进行相互印证，通过位移云图直观表达了岩层移动的发育程度。
- 3) 本实验对类似的科学研究有较强的借鉴意义。

基金项目

国家自然科学基金(41701597, U1810203), 中国博士后科学基金(2018M642746)。

参考文献

- [1] 戴华阳. 开采影响下山区地表移动规律的研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 阜新矿业学院, 1989.
- [2] 梁明, 汤伏全. 地下采矿诱发山体滑坡的规律研究[J]. 西安矿业学院学报, 1995, 15(4): 331-335.
- [3] 胡友健, 吴北平, 戴华阳, 等. 山区地下开采影响下地表移动规律[J]. 焦作工学院学报, 1999, 18(4): 242-247.
- [4] 戴华阳, 翟厥成, 胡友健. 山区地表移动的相似模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 501-504.
- [5] 龚云, 汤伏全, 张健. 黄土山区采煤地表滑移变形模拟实验研究[J]. 矿山测量, 2013(3): 9-11.
- [6] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 郭成. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2244-2252.
- [7] 陶雪娇. 基于机器视觉的外形状况及变形应变测量[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [8] Pan, B., Wu, D.F. and Xia, Y. (2012) An Active Imaging Digital Image Correlation Method for Deformation Measurement Insensitive to Ambient Light. *Optics & Laser Technology*, **44**, 204-209.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.06.019>
- [9] Shi, H.J., Ji, H.W., Yang, G.B. and He, X.Y. (2013) Shape and Deformation Measurement System by Combining

Fringe Projection and Digital Image Correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, **51**, 47-53.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.07.020>

- [10] Orteu, J.-J., Bugarin, F., Harvent, J., *et al.* (2011) Multiple-Camera Instrumentation of a Single Point Incremental Forming Process Pilot for Shape and 3D Displacement Measurements: Methodology and Results. *Experimental Mechanics*, **51**, 625-639. <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9436-1>
- [11] Michael, A. (2000) Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision. *Photomechanics (Topics in Applied Physics)*, **77**, 325-326.
- [12] 曾祥福, 刘程林, 马少鹏. 高速三维数字图像相关系统及其动载三维变形测量[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(4): 364-369.