

文章编号: 1673-9469 (2017) 04-0027-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.007

深部巷道围岩变形试验与数值模拟研究

张成辉¹, 石崇¹, 查文华², 陈登红²

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽淮南 232001)

摘要: 为了研究深部软岩巷道的变形破坏特性, 以淮南矿区某煤矿 13-1 煤回采巷道为例, 在现场调查回采巷道工程概况的基础上, 开展了室内深部回采巷道围岩变形特性相似模拟试验, 并基于块体离散元法, 建立了深部回采巷道围岩的数值模型, 模拟了开挖过程中围岩的变形特性。相似模拟试验和数值模拟试验结果表明, 深部巷道围岩的典型特征为: 巷道底臃量 > 两帮移近量 > 顶板下沉量, 巷道不同围岩受开挖扰动的位移影响范围不同, 底板为 3.5 m, 顶板为 2.45 m, 两帮为 5.5 m。

关键词: 深部巷道; 相似模拟试验; 块体离散元; 数值模拟; 变形特性

中图分类号: TD 313

文献标识码: A

Test and numerical simulation study of deformation of surrounding rock in deep roadway

ZHANG Chenghui¹, SHI Chong¹, ZHA Wenhua², CHEN Denghong²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. OE Key Laboratory of Coal Mine Safety and High Efficiency Mining, Anhui University of Science and Technology, Anhui, Huainan 232001 China)

Abstract: In order to study the deformation and failure characteristics of deep soft rock roadway, taking the 13-1 coal mining roadway in some coal mine in Huainan mining area as an example, the similar simulation experiment of the deformation behavior of surrounding rock of deep excavation roadway is carried out. Based on the Block discrete element method, the numerical model of the surrounding rock of the deep mining roadway is established, and the deformation characteristics of the surrounding rock during the excavation are simulated. The results of the similar simulation experiment and numerical simulation show that the typical characteristics of the surrounding rock are as follows: opening floor heave > two sides move quantity > roof convergence. The influence of displacement of the surrounding rock under excavation disturbance is different, and the bottom plate is 3.5m, the roof is 2.45m, the two are 5.5m. The results of deformation control of deep roadway surrounding rock have important reference meaning.

Key words: deep roadway; surrounding rock; similar simulation experiment; block discrete element; numerical simulation; deformation characteristics.

深部岩体在特有的“三高一扰动”赋存环境下, 岩体的稳定性差, 巷道围岩变形异常严重, 巷道支护难度大, 支护成本高, 深部巷道围岩变形控制已成为我国煤炭资源向深部开采的关键性问题之一。近年来, 国内外许多学者对深部巷道围岩的变形与控制进行了大量的研究。刘泉生等^[1-7]分析了

深部围岩的变形机理, 得出深部围岩的稳定性受高地应力、高渗透压力和温度梯度的影响; 康红普等^[8-10]开发出特有的锚杆支护系统, 并在深井巷道中得到成功应用; 常聚才等^[11-13]通过有限差分软件 FLAC, 模拟了深部巷道开挖前后, 围岩的应力位移变化特征, 提出了围岩支护加固措施; 李为腾等^[14]

收稿日期: 2017-07-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51679071); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057903); 国家自然科学基金青年基金(51309089); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20130846)

作者简介: 张成辉(1993-), 男, 安徽阜阳人, 硕士, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。

^{16]} 采用室内相似模型试验, 分析了深部巷道围岩变形破坏机制及巷道稳定性影响因素; Gao^[8, 17-19] 等采用二维离散元程序 UDEC 分析了巷道掘进过程中开挖扰动对巷道围岩稳定性的影响。由于深部巷道地质赋存条件的复杂性, 上述研究方法中, 现场试验实施比较困难, 未知因素多, 危险性高。目前的数值模拟手段多限于有限元及二维离散元, 很难真实地模拟深部巷道围岩的变形破坏过程。针对以上问题, 本文以淮南矿区某煤矿 13-1 煤回采巷道为工程实例, 在现场调研工程概况的基础上, 开展了室内深部回采巷道围岩变形特性相似模拟试验, 并基于块体离散元法, 建立了深部回采巷道围岩的数值模型, 模拟了开挖过程中围岩的变形特性。

1 工程概况

淮南矿区某煤矿 13-1 煤回采巷道煤层赋存较稳定, 主采煤层为 13-1 煤, 煤层平均厚度为 4.0 m, 属于近水平煤层。13-1 煤层上方伪顶缺失, 直接顶由泥岩、砂质泥岩和 13-2 煤组成, 老顶为砂质泥岩, 平均厚度 12.0 m; 直接底为砂质泥岩, 平均厚度 2.5 m, 如图 1 所示。

该煤矿 13-1 煤层巷道断面形状为矩形, 几何尺寸为: 5.5 m (长) × 3.5 m (宽), 采用锚梁网支护, 帮部选用 φ 22 mm、长度为 2.5 m 的 IV 级左旋螺纹钢超高强预拉力锚杆, 顶板选用 φ 22 mm、长度为 2.8 m 的 IV 级左旋螺纹钢超高强预拉力锚杆, 锚索规格和长度为: φ 17.8 mm × 6.3 m。

2 巷道围岩变形特性的相似模拟试验

为研究深部回采巷道围岩的变形特性及破坏机理, 特开展深部回采巷道围岩变形特性的相似模拟试验研究, 本相似模拟试验是在煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室进行。

层位	围岩岩性	厚度/m	层位	容重(kg· ⁻³)	弹性模量(GPa)	泊松比
老顶	砂质泥岩	12.0		2 120~2 334	14.3~23.2	0.08~0.10
直接顶	泥岩	2.0		1 660~2 000	2.6~12.2	0.10~0.20
煤层	13-1煤	4.0		1 280~1 350	1.25~2.8	0.16~0.25
直接底	砂质泥岩	3.0		2 240~2 280	3.5~5.7	0.12~0.15
老底	中砂岩	11.0		2 621~2 790	77~115	0.08~0.10

图 1 煤层柱状图

Fig.1 The coal seam columnar section

2.1 相似模拟试验概况

根据淮南矿区 13-1 煤的地质赋存条件, 取巷道围岩的实际尺寸为: 50 m × 35 m × 20 m, 设计模型的尺寸为 2 m × 1.4 m × 0.8 m, 模型几何相似比 C_l 为 1: 25, 容重相似比 C_r 为 1.67, 应力相似比为: $C_\sigma = C_l \times C_r = 41.75$, 相似模拟试验的模型图见图 2(a)。

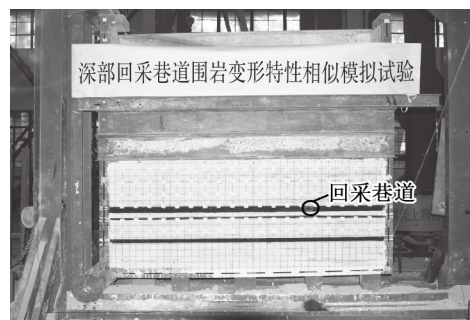
2.2 相似模拟试验过程

根据相似模拟试验的相似比及地质柱状图, 计算模型中各岩层所需材料的配比及重量。铺设好相似模型架后, 按顺序依次将称重后的材料加进搅拌机进行充分搅拌, 搅拌均匀后分层平铺到模型架中, 并进行压实。试验中, 各岩层的骨料选用砂子, 胶结材料选用石灰、石膏和水泥, 岩层分层材料选用云母粉。模型制作结束后, 需要在模型上方增加补偿荷载, 以等效于实际上覆岩层的重量, 此试验中以加压板形式加载。

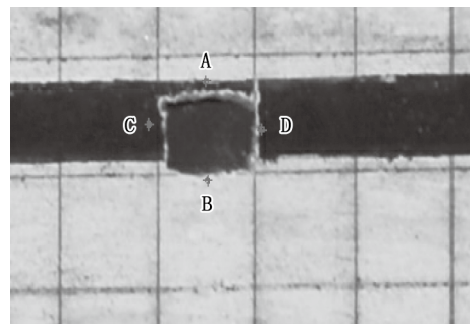
模拟试验中, 巷道的断面设计为矩形, 采用锚索支护, 锚索选用 φ 0.9 mm 长度 250 mm 的铝丝三股绕制而成, 尾部用 φ 1.6 mm 的垫片、螺母固定, 巷道的开挖采用电钻开挖。

2.3 试验结果处理与分析

模拟试验中围岩的变形检测系统采用 XL2010G-80



2(a)



2(b)

图 2 相似模拟试验的模型图及监测点布局图

Fig.2 The model graph and monitoring point layout of similar simulation experiment

系列静态应变仪，应变片型号为：BA120-5AA，沿着巷道掘进方向，每0.4 m（实际10 m）布置1组围岩位移监测点，第一组布置在巷道支护前，其后两组布置在巷道支护后，共布置3组，每组采用1/4桥路连接的应变片布置于回采巷道顶板、两帮、和底板，如图2(b)所示。

从图3监测结果可以看出，三组监测点均呈现出一致的结果，即：巷道底脚量>两帮变形量>顶板下沉量，巷道底脚量和两帮变形量是巷道围岩变形的主要部分。巷道围岩的变形量与时间的关系曲线，大致可以分为三个阶段：变形滞后、变形剧烈和变形平稳阶段。在变形滞后阶段，巷道开始掘进时，围岩并没有产生变形，而是滞后巷道掘进一段时间才产生明显的变形；在变形剧烈阶段，巷道围岩的移近量随着时间的增加而不断增加，并且巷道底板的变形速率明显高于巷道两帮及顶板；在变形平稳阶段，巷道围岩的变形量趋于平稳，底板的底脚量稳定于215 mm左右，两帮的变形量稳定于106 mm左右，顶板的下沉量稳定于89 mm左右。

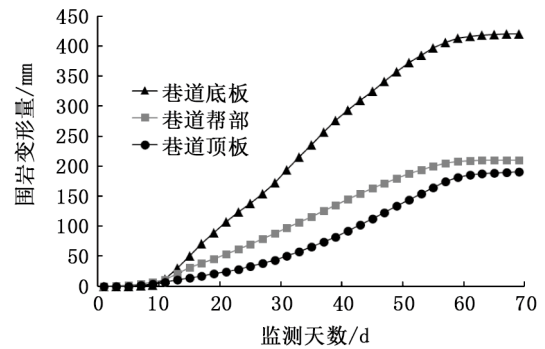
3 基于块体离散元的数值模拟研究

3.1 数值模型参数的选取

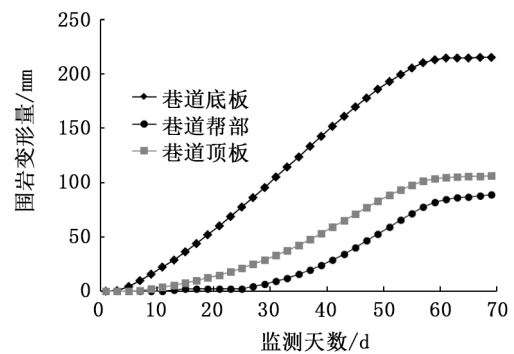
数值模型中，各岩层的物理力学参数可以通过现场对巷道围岩钻孔取芯得到，巷道围岩的物理力学参数如表1所示，巷道支护结构锚索单元的材料属性如表2所示。

3.2 巷道围岩数值模型的建立

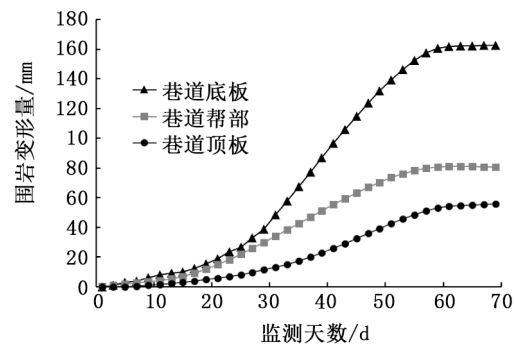
采用三维块体离散元程序3DEC模拟深部巷道



(a) 第一组监测点（支护前）



(b) 第二组监测点（支护前）



(c) 第三组监测点（支护前）

图3 巷道围岩变形监测图

Fig.3 The monitoring graph of deformation of the surrounding rock in roadway

表1 巷道围岩物理力学参数表

Tab.1 The physical and mechanical parameters of surrounding rock

围岩岩性	厚度 /m	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa	内聚力 /MPa	摩擦角 /°	抗拉强度 /MPa
砂质泥岩	12.0	2 250	1.34	2.30	1.87	34	1.83
泥岩	2.0	1 690	1.19	2.08	2.11	32	1.76
煤层	4.0	1 330	0.25	0.36	1.22	30	1.14
砂质泥岩	3.0	2 260	1.63	2.27	1.92	32	1.75
中砂岩	11.0	2 750	3.53	3.39	3.16	36	3.77

表2 锚索单元材料属性

Tab.2 The material property of plain strand cable

横截面积 / m^2	杨氏模量 /Pa	抗拉屈服强度 N	灌浆滑移强度	灌浆粘结强度
3.8×10^{-4}	100×10^9	3.10×10^5	1×10^5	1×10^5

围岩变形破坏特征。根据淮南矿区某煤矿 13-1 煤回采巷道的地质赋存条件，模型的几何尺寸设计为：50 m (长) × 40 m (宽) × 32 m (高)，即在厚度为 32 m 的覆岩结构中掘进 40 m 的煤巷进行数值模拟，并在巷道开挖后进行锚索支护。如图 4 所示，模型自上而下共分为 5 层，为了提高计算效率，对模型进行网格划分。模型采用 Mohr-Coulomb 屈服准则来判断岩体的破坏程度。模型的约束条件为：模型左右两侧边界限制水平移动，底部边界设置为全约束，顶部边界为自由面，并施加竖直向下的均布载荷来模拟模型范围之外的上覆岩层重量，大小为 18.1 MPa。

3.3 围岩位移变化特征数值分析

图 5 为巷道围岩变形量随巷道掘进距离的变化曲线。可见，巷道掘进工作面后方 1 m 处，巷道围岩开始发生变形，之后，巷道围岩的变形量随着掘进工作面的推进不断增加，巷道底臃量明显大于两帮移近量和顶板下沉量，达到 376 mm，说明该煤层巷道的主要破坏形式是巷道底臃，在施工过程中应该注意加强巷道底板的支护与加固；顶板下沉量最大为 31 mm，属于可控范围；巷道左帮移近量和右

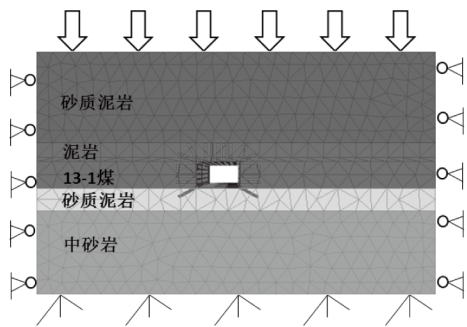


图 4 巷道围岩数值模型图

Fig.4 The numerical model graph of surrounding rock

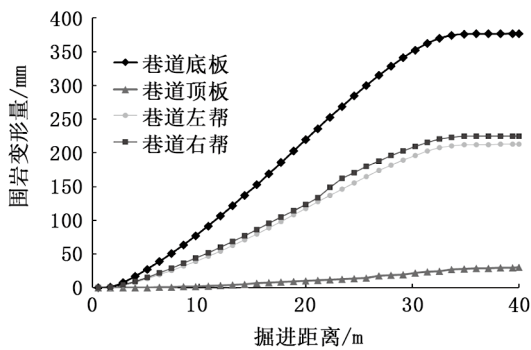


图 5 围岩变形随掘进距离的变化曲线

Fig.5 The variation curve of surrounding rock deformation with digging distance

帮移近量，变化趋势及范围基本一致，图 6 亦可得到验证。最后移近量稳定于 225 mm 左右。

比较图 3 和图 5，模型试验和数值模拟结果中巷道围岩的变形规律基本一致，具体表现为巷道开挖后，巷道围岩的变形随着巷道掘进距离或者开挖时间的增加而不断增加。对比发现，巷道变形稳定后，对于巷道底臃量和两帮移近量，模型试验结果明显小于数值模拟结果，其原因是模型试验，模型上方增加补偿载荷时，是以铁质承压板形式加载的，存在较大的误差，不能精确满足巷道实际上覆岩层的重量；而对于顶板下沉量，模型试验的结果却大于数值模拟结果，这是由于模型试验时，巷道开挖后，巷道顶板支护比较困难，支护效果不理想造成的。

图 7 为巷道围岩不同深部位移变化曲线。可知，围岩变形量与 R/D 表现出明显的非线性， R/D 越大，围岩变形量 S 越小，即距离巷道壁越近，围岩变形量越大；距离巷道壁越远，围岩变形量越小。以巷道两帮围岩水平向变形为例，在巷道两帮处，围岩

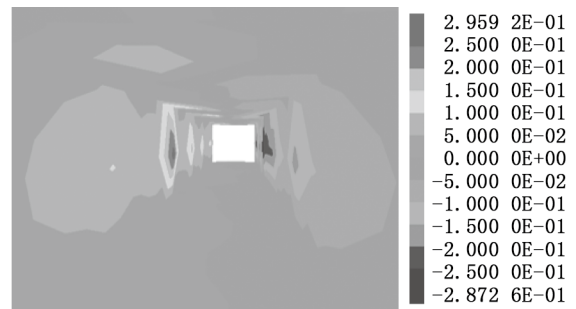


图 6 巷道两帮水平位移云图

Fig.6 The cloud picture of horizontal displacement of two sides of roadway

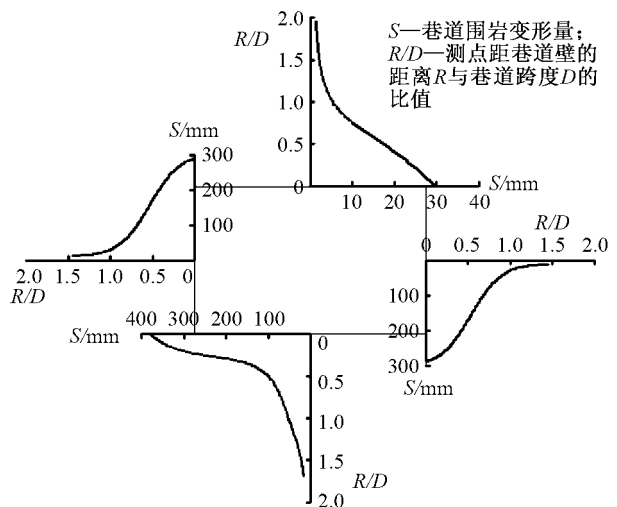


图 7 围岩不同深度位移变化曲线

Fig.7 The displacement curves of different depth of surrounding rock

变形量达到 280 mm, 随着距离巷道壁 R 的增大, 巷道围岩变形量越来越小, 当 $R/D=1.5$ 时, 巷道围岩的变形量已经很小, 仅为 10 mm, 之后, 围岩变形量更小, 直至围岩未收巷道掘进扰动影响, 处于原岩应力状态。

巷道底板围岩变形主要发生在 R/D 为 0 ~ 0.8 之间, 即距离底板 2.8 m 范围内, 当 R/D 为 1.0 时, 即距离底板 3.5 m 时, 巷道底臃量很小, 仅为 50 mm; 巷道顶板围岩位移主要发生在 R/D 为 0 ~ 0.7 之间, 即距离顶板 2.45 m 范围内, 当 R/D 为 1.0 时, 即距离顶板 3.5 m 时, 巷道顶板下沉量仅为 9 mm。究其原因, 巷道所处岩层为 13-1 煤层, 其直接底厚度为 3.0 m 的泥岩, 变形较大, 间接底为砂岩, 变形较小; 巷道直接顶为部分煤层和泥岩, 总厚度为 2.5 m, 变形较大, 间接顶为砂质泥岩, 变形较小, 在岩性交界面产生离层破坏分界面。

4 结论

1) 在深部巷道开挖过程中, 巷道围岩变形随着开挖时间或掘进距离的增加而不断增加, 最后趋于变形稳定状态。在巷道围岩的变形过程中, 巷道底板变形速率高于巷道顶板和两帮的变形速率, 开挖对巷道底板的变形影响剧烈。

2) 深部巷道围岩的变形破坏主要有 2 个特征: 巷道底板变形最为严重, 表现出“底臃”; 巷道顶底板离层变形破坏严重。其产生机制在于: 巷道直接顶和直接底为泥岩或者砂质泥岩, 变形模量小, 自稳能力差, 造成直接顶(底)和老顶(底)之间产生离层, 支护困难。

3) 数值模拟计算了深部巷道开挖过程中围岩的变形规律, 与模型试验结果基本吻合, 作为相似模拟试验的有益补充, 验证了模型试验的可靠性。

参考文献:

[1] 刘泉生, 张华, 林涛. 煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3732-3727.

[2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.

[3] 宋宏伟, 贾颖绚, 段艳燕. 开挖中的围岩破裂性质与支护对象研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2):

192-196.

[4] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 赵楼矿深部软岩巷道变形机制及控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 165-72.

[5] 刘泉声, 卢兴利. 煤矿深部巷道破裂围岩非线性大变形及支护对策研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3273-3279.

[6] 王金, 王卫军, 彭文庆, 等. 大断面硐室底鼓分步控制研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(4): 78-83.

[7] 黄兴, 刘泉声, 乔正. 朱集矿深井软岩巷道大变形机制及其控制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 827-834.

[8] 康红普, 范明建, 高富强, 等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2227-2241.

[9] 袁亮. 深部巷道围岩控制理论及淮南矿区工程实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.

[10] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233-1238.

[11] 常聚才, 谢广祥. 深部巷道围岩力学特征及其稳定性控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 881-886.

[12] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 535-543.

[13] 谢广祥, 常聚才. 超挖锚注回填控制深部巷道底臃研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1242-1246.

[14] 李为腾, 李术才, 王琦, 等. 深部厚顶煤巷道围岩变形破坏机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2847-2856.

[15] 陈登红. 深部典型回采巷道围岩变形破坏特征及控制机理研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.

[16] 肖同强, 李怀珍, 支光辉, 等. 深部厚顶煤巷道围岩稳定性相似模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1016-1022.

[17] GAO F, STEAD D, KANG H. Numerical Simulation of Squeezing Failure in a Coal Mine Roadway due to Mining-Induced Stresses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(4): 1635-1645.

[18] GAO F. Simulation of failure mechanisms around underground coal mine openings using discrete element modeling[D]. Canada Simon Fraser University, 2013.

[19] 方刚, 杨圣奇, 孙建中, 等. 深部厚煤层巷道失稳破裂演化过程离散元模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(4): 676-683.