

# 深部软岩巷道围岩变形破坏的相似模拟试验

赵志伟<sup>1</sup>, 王卫军<sup>1,2,3</sup>, 袁越<sup>2,3\*</sup>, 肖宇<sup>1</sup>, 黄聪<sup>1</sup>, 王小康<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为模拟深部强度低, 变形大的软岩巷道, 运用地质力学模拟原理和以往相似模拟材料特点, 针对曲江矿-850 m 东大巷巷道围岩表现出来的两帮和顶底板实测不对称大变形特征, 研制一种水泥为胶结材料, 土和河砂为骨料的深部软岩相似材料. 采用该相似材料进行大型深部软岩巷道模拟试验. 结果表明: 模拟的深部软岩巷道在开挖后因原岩应力解除具有一定的变形, 而模型巷道底鼓和顶板下沉现象除受预加高应力和连续载荷影响外, 巷道的左右边墙破坏对巷道顶底板结构稳定性也有影响; 且巷道四周围岩变形破坏呈现非对称性特征. 此研究成果可为进一步分析巷道围岩损伤及破裂演化规律奠定基础, 也可为巷道支护设计, 围岩控制等工程实践提供依据.

**关键词:** 深部软岩; 围岩变形破坏; 相似材料; 模拟试验

中图分类号: TD322 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2018)02-0001-06

## Similar Material Simulation Test Study of Deep Soft Rock Roadway Deformation and Failure

Zhao Zhiwei<sup>1</sup>, Wang Weijun<sup>1,2,3</sup>, Yuan Yue<sup>2,3</sup>, Xiao Yu<sup>1</sup>, Huang Cong<sup>1</sup>, Wang Xiaokang<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to simulate the deep low strength, large deformation soft rock roadway, this paper uses the principle of physical simulation and the characteristics of similar simulation materials in the past. Aiming at the large and unsymmetrical deformation characteristics of roof and floor of the -850 m roadway, this paper develops a cementitious cementing material, deep soft rock similar simulating material with river sand and soil as the aggregation. The similar simulation material is used to simulate the surrounding rock of large deep soft rock roadway. Results show that after simulation of roadway excavation in the case of stress relief has a certain deformation, roadway roof subsidence and bottom drum phenomenon pre-stressed and under continuous load impact, the deformation and destruction of the roadway around the film to help affect the stability of roadway roof and floor. In addition, the deformation and failure of surrounding rock around laneway shows the asymmetrical characteristics. The research results can be used to further analyze the damage and fracture evolution of roadway surrounding rock, which provides the basis for the design of roadway support and the practice of surrounding rock control engineering.

**Keywords:** deep soft rock; deformation and failure of surrounding rock; similar materials; simulation test

收稿日期: 2018-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51434006); 湖南省教育厅科研资助项目(15C0551); 湖南省研究生科研创新项目(CX2017B648); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2018JJ1366)

\* 通信作者, E-mail: yuanyuefu@163.com

随着我国科学技术提高及人们对物资的不断需求,更多的矿井将列为深部开采.在我国埋深 1 000 m 以下煤炭资源占据煤炭总量的半数以上<sup>[1]</sup>.因深部巷道围岩受“四高一扰动”的影响及软岩巷道围岩塑性区裂隙复杂扩展过程,使矿井在深部开采问题重重.因而,深部软岩巷道围岩的变形破坏相关课题的深入研究对现场工程的展开具有一定现实意义.大型物理模拟试验可以对深部开采中诸多工程开展的整个动态过程实现室内再现,在进行物理模拟前,首要工作就是选择与模拟对应的相似模拟材料,能否正确选择相似材料,将会决定大型模拟试验能否继续进行<sup>[2,3]</sup>.相似材料种类很多,其中杨旭等<sup>[4]</sup>选取了铁粉与钡粉为骨料,石膏与石灰为胶凝材料;张强勇等<sup>[5]</sup>选取铁矿粉,重晶石粉及石英砂为骨料,石膏粉和松香酒精溶液为胶凝材料.针对相似材料间的配比方法也有很多,其中董金玉等<sup>[6]</sup>基于正交设计方法确定了以重晶石粉,铁粉,石英砂,石膏,松香为相似材料的配比关系,并达到原岩岩性效果;史小萌等<sup>[7]</sup>借用 MATLAB 程序中多元线性回归分析试验数据,确定了相似材料配比经验方程,此配比的良好效果在工程实践中得到了证明.但是,部分相似材料的特性在有限的试验条件中暴露了很多缺点:像石蜡这种相似材料只能在规定的温度范围内才能制作试件,操作极其不便,石膏这种材料具有遇水融化的特性,其受湿度和温度影响很大<sup>[8]</sup>.通过不断深入探究物理模拟实验,也出现很多有创新型的相似模拟材料,如马芳平等<sup>[9]</sup>对 NIOS 相似材料的研制,韩伯鲤等<sup>[10]</sup>对 MIB 相似材料的研制,王汉鹏等<sup>[11]</sup>对 IBSCM 混合相似材料的研制,这些相似材料都有各自的特点与应用,但是成分组成太过复杂,配比过程太过繁琐,造价高且对大型深部软岩变形模拟存在一定的差异,满足不了大型物理模拟试验要求.有关深部采动软岩巷道围岩的变形扩展破坏近年来研究颇多,卢兴利等<sup>[13]</sup>对深部高应力岩体进行峰值前卸围压试验,得出岩体试件峰前损伤扩容,峰后碎胀扩容的相关参数及特性;贺永年等<sup>[14]</sup>对深部巷道采用非关联法进行围岩受力变形条件下研究其弹性,获得了应力和变形的完整解.以上研究巷道围岩变形破坏采用理论和数值模拟方法较多,而采用大型物理模拟方法较少.

对于地质力学大型模拟试验需要一种组分简单,模型制作便捷,成型容易,价格低廉的深部软岩相似模拟材料,在牛双建等<sup>[15]</sup>研制的由河砂和松香酒精溶液拌合而成的混合相似材料的基础上,研制出以河砂、土及水泥为主的相似材料.采用其室内确定好配比的相似材料,根据相似原理运用到大型相似模型中,然后对模型上应力,应变的监测数据来分析与推测原型上所发生的巷道围岩变形破坏规律,以此作为深部软岩巷道支护和设计的依据.

## 1 工程概况

根据工程地质力学相似原理,我们定义原型物理量,用字母 P 表示,模型物理量,用字母 M 表示,而原型和模型之间量纲相同的物理量比值称为相似常数,用字母 C 表示,定义 L 为长度,各相似物理量的相似常数则在 C 的右下角标注即可,如  $C_l$  为几何相似比尺.本文工程背景为江西省曲江矿业有限公司,埋深 -850 m 的东大巷延伸段位于煤层底板中,其走向与煤层相同.巷道宽 0.44 m,高 0.35 m 的半圆拱形为全岩石巷道,岩性为粉砂岩.模型几何相似比尺为

$$C_l = \frac{C_p}{C_m} = 15. \quad (1)$$

模拟的深部巷道主要原岩以粉砂岩为主,原岩的相关物理力学参数如下:原岩为粉砂岩,抗压强度为 40~48 MPa,抗拉强度为 2.8~3.5 MPa,弹性模量为 12 GPa,粘聚力为 2.1 MPa,内摩擦角( $\varphi$ )为 32.6°,容重为 22 kN/m<sup>3</sup>,泊松比( $\nu$ )为 0.2~0.3.

## 2 相似材料选择与试件制备

### 2.1 相似材料选择

根据相关文献资料<sup>[5-15]</sup>综合分析比较后,决定选用河砂和土作为骨料,水泥(图 1)作胶结剂为研制的相似模拟材料,通过对表 1 中相似材料配比方案的试验和分析,最终选择第八组配比方案作为粉砂岩的相似模拟,即组分中的土,砂子,水泥配比为 6 : 3 : 1,并加总质量为 6%的水搅拌均匀做成标准试样并充

分干燥.

表1 相似材料配比方案

试验组数	砂胶比	土占总质量/%	试验组数	砂胶比	土占总质量/%
1	2 : 1	40	11	4 : 1	40
2	2 : 1	50	12	4 : 1	50
3	2 : 1	60	13	4 : 1	60
4	2 : 1	70	14	4 : 1	70
5	2 : 1	80	15	4 : 1	80
6	3 : 1	40	16	5 : 1	40
7	3 : 1	50	17	5 : 1	50
8	3 : 1	60	18	5 : 1	60
9	3 : 1	70	19	5 : 1	70
10	3 : 1	80	20	5 : 1	80

注:每组试验设定水和相似材料质量恒定,分别取25和400g

## 2.2 试件制备

将土,砂子和水泥选定的质量比例关系作为制作试件的配比指标,共做了18个试件,其中6个试件用于单轴压缩测定抗压强度,6个试件用于三轴压缩试验,最后6个试件用于劈裂试验,前两项所用模具型号为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 标准圆柱型,后一项所用模具型号为 $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 标准圆柱型.

模型材料试件的制作工艺过程是:先把土、砂子、水泥按选定比例称量后倒入小型搅拌机内充分搅拌后,加入适量的水进一步拌合均匀,将拌合均匀的混合相似材料分3次倒入模具(图1)中,并在每次倒入混合相似材料后用适度力去压实后,将试件取出,在试件外表面贴上便于识别和做试验的标签(图2),对做好的试件放置室内常温下干燥3~5d,待试件质量不再变化,完全干燥后,即可进行常规力学参数试验.



图1 相似材料和模具



图2 试件

## 3 相似材料的力学性能试验

### 3.1 单轴压缩试验

制备了同一种配比试样.试验使用RMT-150岩石力学试验系统设备.试验进行时,采用力控制,电脑自动记录应力、应变等参数,直到试样破坏.本次测试试件6个,对试验结果采用去离散化处理原则,将剩余4个强度值相近的试验数据求平均值作为单轴抗压强度值,相似材料力学参数如下:抗压强度为2.81 MPa,抗拉强度为0.32 MPa,弹性模量为0.8 GPa,粘聚力为0.12 MPa,内摩擦角为 $34^\circ$ ,容重为 $20\text{ kN/m}^3$ ,泊松比为0.28.试验中试件的破坏现象和试验结束后对试验数据分析结果见图3和图4.

### 3.2 巴西劈裂试验

试件抗拉强度的测定采用劈裂试验法,试件高度50 mm,直径也为50 mm圆柱体.

按照式(2)计算试样的抗拉强度:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dh} \quad (2)$$

式中： $\sigma_1$  为试样抗拉强度，MPa； $P$  为试样破坏时所加荷载，N； $D, h$  为试样直径和高度，mm。



图3 单轴压塑破坏试件

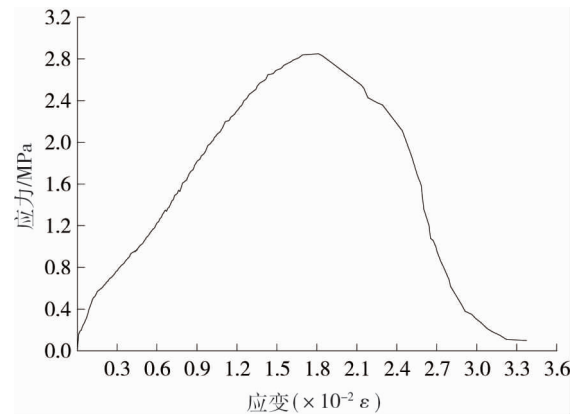


图4 单轴压缩应力应变曲线

试件求得平均值作为相似材料抗拉强度值。试件的破坏模式见图5。

### 3.3 三轴压缩试验

试验设备采用 RMT-150 岩石力学试验设备(图6),试验过程可有电脑全程控制。测试的6个试件平均分成3组,每组的围压分别定为0.1,0.2,0.4 MPa,不同围压下,试件在数据分析后得出的全应力-应变曲线及莫尔强度包络线见图7和图8。由莫尔圆计算出相似试件粘聚力为0.12 MPa,内摩擦角为 $34^\circ$ 。



图5 试样劈裂试验



图6 试样三轴试验设备

从图7可看出,三轴压缩试验条件下,试件在围压不断增大的同时该相似材料峰后应变变化趋势变化显著,此变化规律和曲江公司大巷软岩变形特征相一致。证明该混合相似材料具有一定的复合胶结性能,进一步满足了深部软岩模拟的条件。

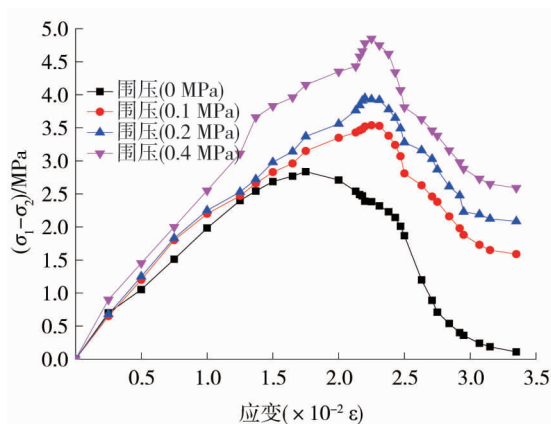


图7 三轴压缩全应力-应变曲线

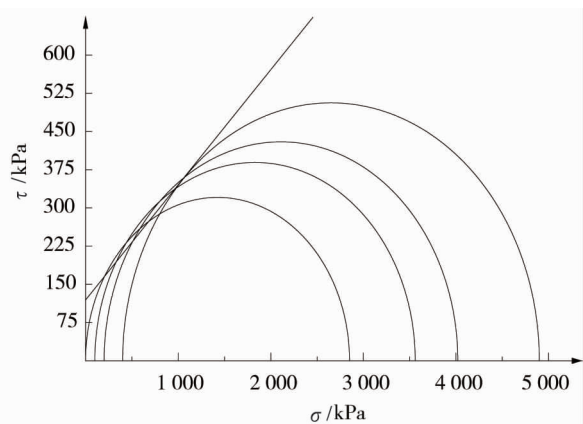


图8 莫尔强度包络线

## 4 模拟深部软岩巷道的大型相似试验

### 4.1 模型试验系统组成

为有效模拟深部软岩巷道围岩在加载下的变形破坏,图9为湖南科技大学与山东大学联合研制的大

型深部矿井巷道模拟试验系统(DMRST-16),加载结构模型试验系统主要由模型反力台架装置,高压注水系统,SD-5型高精度静态8路液压加载系统和数据收集装置组成。作为模型加载主要依靠反力台架装置;数据收集上位机主要由智能液压控制装置,光栅微型多点位移采集分析系统,应力应变数据收集软件—DHDAS2013软件配合完成,其中试验模型上下、左右、前后的制动加压和安全稳定方面由智能液压装置来完成。

## 4.2 模型制作,巷道开挖加载及试验结果分析

### 4.2.1 模型制作

模型尺寸为1700 mm×1900 mm×1100 mm,巷道直径为300 mm的圆形巷道。模型内部填料采用分层摊铺并风干的方法来完成,具体操作步骤:按上述确定的相似材料配比进行分层称量→将称量好的相似材料由搅拌机搅拌均匀→在模型内部空间由下向上分层摊铺并夯实材料→在模拟的巷道标高及距模型洞口200 mm处的断面四周埋设测试元件,包含压力盒和应变砖。

### 4.2.2 模型巷道开挖与加载

将深部软岩的高地应力通过式(1)及地质力学模型原理转化模型体的受压应力,模拟地应力加载顶部和底部为1.0 MPa,左右和前后为0.4 MPa。当荷载压力完成后,保持加载不变,按照全断面方式进行模型巷道的开挖。沿巷道轴线方向循环开挖。每次开挖长度50 mm,模型长度1100 mm,计算开挖共有22步完成。每开挖一步后暂停开挖,记录稳定后的数据,直到巷道开挖完毕,使其水平压力不变,逐步对垂直方向加载至2.4 MPa,巷道变形破坏与加载过程见图10和图11。



图9 巷道模拟试验系统

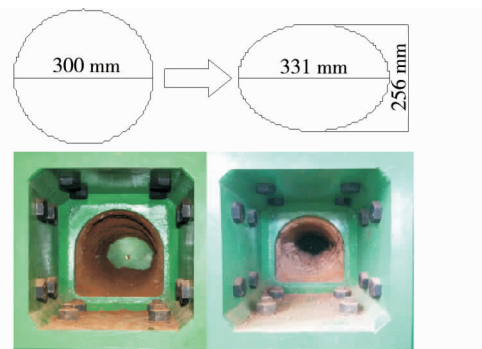


图10 模拟巷道断面变化及破坏现象

### 4.2.3 模型试验结果分析

通过记录和分析模型巷道加载的过程,得出巷道断面围岩变形随时间的变化关系和模型断面巷道由开挖时圆形变为加载破坏后的椭圆形分别见图12和图10。由图12可知,模拟巷道顶板位移量(21 mm)小于底板位移量(23 mm);右边墙位移量(16 mm)小于左边墙位移量(17.2 mm),以上变形量说明模拟的巷道围岩位移量在加载应力的不断增大条件下出现非对称性变形。

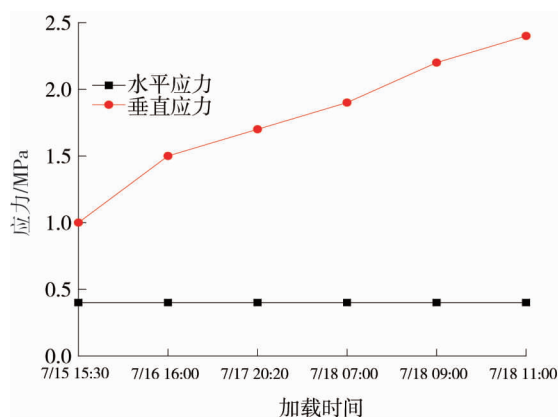


图11 模型加载过程

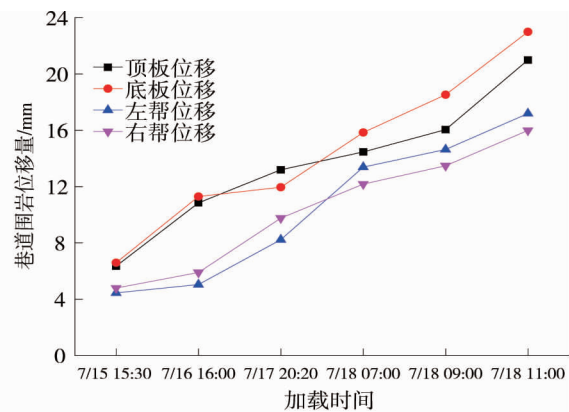


图12 巷道围岩位移变化曲线

由图 10 可知,由于模型巷道开挖后应力的解除,此时模型巷道围岩产生一定变形量,其中顶板,底板,左帮,右帮变形量分别为 6.35,6.59,4.45,4.79 mm.模拟巷道两侧的边墙局部块体在加载应力增大条件下,首先出现滑移和脱落,分析得知破坏区的形成以张拉破坏为主,是巷道最不利部位,其次出现的底鼓,顶板下沉现象也受到巷道围岩左右帮变形和破坏的影响,最终模拟的全断面巷道变形呈现出椭圆形形状.以上结果与曲江公司东大巷围岩监测结果图 13 对比后,进一步说明相似材料满足软岩材料模型试验.



图 13 曲江公司大巷围岩监测照片

## 5 结论

1) 研制的相似材料具有组分简单、成型容易、力学性能稳定、较好的复合胶结性能,峰后延性变形明显,能够较好的模拟深部软岩特性.

2) 巷道在开挖后随着高地应力的解除围岩具有一定变形,随着加载力不断增大,巷道围岩顶底板,左右边墙呈现非对称性变形破坏.

3) 深部巷道在预加载高应力开挖后,巷道围岩的左右边墙首先产生滑移和垮落,是巷道最不利部位,且随着不断施加载荷,巷道围岩左右帮的变形和破坏对巷道底鼓,顶板下沉具有一定的加速作用,因此,在深部软岩工程实践中,应重视巷道围岩两帮的加固与控制.

### 参考文献:

- [1] 赵生才.深部高应力下的资源开采与地下工程——香山会议第 175 次综述[J].地球科学进展,2002,17(2):295-298.
- [2] 张强勇,李术才,李勇.地下工程模型试验新方法,新技术及工程应用[M].北京:科学出版社,2012.
- [3] 王卫军,郭罡业,朱永建,等.高应力软岩巷道围岩塑性区恶性扩展过程及其控制[J].煤炭学报,2015,40(12):2747-2754.
- [4] 杨旭,苏定立,周斌,等.红层软岩模型试验相似材料的配比试验研究[J].岩土力学,2016,37(8):2231-2237.
- [5] 张强勇,李术才,郭小红,等.铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J].岩土力学,2008,29(8):2126-2130.
- [6] 董金玉,杨继红,杨国香,等.基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):44-49.
- [7] 史小萌,刘保国,肖杰.水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J].岩土力学,2015,36(5):1357-1362.
- [8] 张宁,李术才,李明田,等.新型岩石相似材料的研制[J].山东大学学报(工学版),2009,39(4):149-154.
- [9] 马芳平,李仲奎,罗光福.NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J].水力发电学报,2004,23(1):48-51.
- [10] 韩伯鲤,张文昌,杨存奋.地质力学模型材料(MIB)的研究[J].西北水电技术,1983(3):49-54.
- [11] 王汉鹏,李术才,张强勇,等.新型地质力学模型试验相似材料的研制[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1842-1847.
- [12] 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.
- [13] 贺永年,韩立军,邵鹏,等.深部巷道稳定的若干岩石力学问题[J].中国矿业大学学报,2006,35(3):288-295.
- [14] 卢兴利.深部巷道破裂岩体块系介质模型及工程应用研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2010.
- [15] 牛双建,党元恒,杨大方.深部软岩新型相似模拟材料的研制[J].实验力学,2015,30(3):388-394.