

DOI: 10.11779/CJGE201602006

# 主应力演化影响下的深部巷道围岩变形破坏特征试验研究

王 猛<sup>1,2</sup>, 牛誉贺<sup>1</sup>, 于永江<sup>1</sup>, 孙尚旭<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 山西焦煤集团博士后科研流动站, 山西 太原 030024)

**摘 要:** 研究主应力变化对深部巷道围岩变形破坏特征的影响是巷道支护中非常必要的。以某矿处于深部高水平应力条件下的巷道围岩为工程背景, 以大尺度三维相似材料模拟试验系统和制作的主方向应力传感器量测工具, 采用“先加载后卸载”的开挖方式模拟主应力大小和方向演化影响下的有支护巷道围岩产生剪切滑移的变形破坏特征。研究表明, 在高水平应力环境下巷道在掘进开挖过程中顶底板受挤压剪切作用产生变形破坏, 破坏范围呈现“楔形”渐进发展; 通过模型剖切面发现巷道围岩顶底板产生了不同数量的对称螺旋状剪切滑移裂缝, 并向巷道两帮发展并交叉, 将巷道围岩形成一定范围的剪切破坏区域; 通过分析主应力大小及方向的演化可知, 巷道围岩受高水平应力作用形成的剪切滑移裂缝破坏与主应力大小及方向演化存在必然联系, 认为最小主应力的调整对剪切滑移裂缝的形成起到了重要作用。

**关键词:** 深部开采; 变形破坏; 剪切滑移; 主应力演化

**中图分类号:** TD325

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)02-0237-08

**作者简介:** 王 猛(1978-), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事矿井开采理论与技术、矿山压力与矿井动力灾害控制研究方面的教学与科研工作。E-mail: wangmeng\_fx@163.com。

## Experimental research on characteristics of deformation and failure of surrounding rock of roadway in deep mine under influence of principal stress evolution

WANG Meng<sup>1,2</sup>, NIU Yu-he<sup>1</sup>, YU Yong-jian<sup>1</sup>, SUN Shang-xu<sup>1</sup>

(1. Mining College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Post-doctor Station, Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** It is necessary to study the characteristics of deformation and failure of surrounding rock of roadway under influence of the principal stress for roadway support. Based on the surrounding rock of roadway with high horizontal stress in a deep mine, the characteristics of shear and slip with support method are physically simulated by using a large-scale three-dimension test system and principal direction strain sensors. The simulation method of loading first and then excavation is carried out. At the same time, the influences of degree and direction of the principal direction stress are taken into account. The results indicate that the roof and bottom of roadway fail due to pressing and slipping under the high horizontal stress. The development of failure range exhibits 'wedge' shape. By observing the section of model, there are different shear slip fractures with the form of symmetric helical segments at the roof and bottom during drilling. The fractures expand to the wall and cross at last. The shear failure zone is formed at the surrounding rock. The shear slip fractures formed by the high horizontal stress are linked to the evolution of the principal stress by analyzing the direction and degree of the principal stress. The evolution of the minimum principal stress plays an important role in the formation of shear slip fractures.

**Key words:** deep mining; deformation and failure; shear and slip; principal stress evolution

## 0 引 言

深部矿井巷道处于“三高+一扰动”的地下工程环境中, 是造成巷道大面积破坏失稳, 增加巷道开掘和维护难度的重要原因。据统计分析表明, 中国深部开采矿井一些巷道都需要翻修 2 次, 由于处于深部高应

力场环境下开采引起巷道围岩产生变形破坏等造成的矿山安全生产事故约占矿井建设事故、生产事故总数的 2/5 以上<sup>[1]</sup>。深井高应力环境下巷道正常使用及其

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51174106)

收稿日期: 2015-02-08

变形破坏防治是保证矿井安全生产和提高经济效益的首要问题，也是安全高效开采深部煤炭资源及可持续发展的关键问题。

研究巷道围岩的变形破坏模式，进而确定巷道的支护参数的关键问题是深部开采过程中出现的巷道围岩变形破坏问题。诸多岩石力学工作者均通过理论分析、相似模拟、数值计算和现场实测等多种方法和手段开展系统的研究<sup>[2-12]</sup>。以上文献研究主要是针对深部巷道围岩稳定控制技术方面，但通过主应力大小及方向的演化对巷道围岩变形破坏机制研究并不多见，牛双建等<sup>[13]</sup>采用相似材料模拟方法对深井巷道无支护的巷道松动圈内外围岩主应力差的演化规律进行了分析，并对围岩破坏机制进行了探讨；何富连等<sup>[14]</sup>采用数值模拟研究了不同宽度大断面开切眼的围岩主应力差转移规律，并提出了相应的支护技术，并指出岩体的破坏不是某个力单独作用的结果，而是多个力相互关系变化的结果；李元鑫等<sup>[15]</sup>采用模型试验和数值模拟方法研究了在不同方向的主应力作用下，直墙拱形隧道的围岩损伤破坏规律；彭瑞等<sup>[16]</sup>研究了考虑中间主应力对圆形巷道 Hoek-Brown 准则解的影响；刘立鹏等<sup>[17]</sup>利用数值分析软件，借鉴 Griffith 裂隙优势发育角度理论对锦屏二级水电站施工排水洞 SK11+000 桩号段掌子面推进围岩应力量值、方向及裂隙优势发育规律动态变化过程进行研究。多数集中于主应力差的演化规律研究，未见研究主应力大小和方向演化的影响对深部巷道围岩变形破坏征的研究。

综上所述，针对典型深部巷道围岩的变形破坏问题，采用大尺度真三轴相似模拟试验系统，采用“先加载后卸载”的模拟方式，结合笔者<sup>[19]</sup>博士论文多次试验后模型沿巷道轴向剖切面结果，研究主应力大小及方向演化影响下的深部巷道围岩有支护时的变形破坏特征，分析深部巷道支护的重点部位，为类似条件下的巷道围岩控制提供参考。

1 试验原型条件

以某煤矿-860 m 水平井底车场附近半圆拱形断面（巷道墙净高 1500 mm，半圆拱半径 2000 mm，巷道净宽 4000 mm）的石门及电机车修理间绕道段为工程背景，巷道埋深 1000 m。由于对深部开采环境认识不足，支护设计欠佳，致使巷道和硐室的产生了较大变形，支护结构严重破坏，给矿井带了巨大的经济损失。采用应力解除法对矿井地应力进行了测量，其中最大主应力为 31.9 MPa，倾角为 16.5°，呈近水平，表明该矿井地应力场以水平构造应力为主，垂直应力为 22.5 MPa，侧压系数为 1.42。

巷道所处地层为一单斜构造，东高西低，局部有起伏。地层走向 NNE、倾向 NNW、倾角 11°～16°，位于粉砂岩层中。岩层硬度总体较大，两侧岩性硬度较小，裂隙发育，主要岩层物理力学特性如表 1。

表 1 主要岩层岩石物理力学特性表  
Table 1 Physical and mechanical properties of rock strata

类别	重度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /MPa	泊松比
中砂岩	2513	75.90	5.55	34	6.70	0.14
粉砂岩	2582	66.40	3.37	29	4.20	0.14
细砂岩	2548	77.10	4.35	39	2.90	0.19
泥 岩	2560	21.20	1.26	42	0.60	0.23

2 模拟试验设备及条件

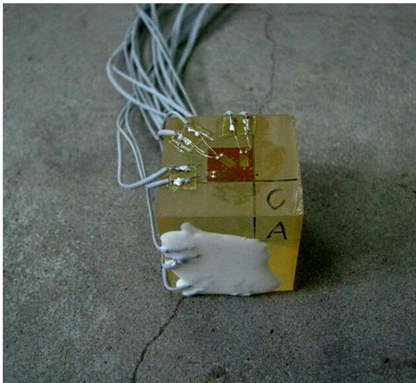
2.1 试验平台选择

试验平台采用 WYQ1000-1 型地下工程综合相似材料模拟试验系统，符合矿山工程的先加载后开挖的“先对模型加载至原岩应力状态后再开挖”试验条件，具体试验台特征参数见文献[2，18，19]。

2.2 试验数据采集

试验数据采集系统主要由计算机、DataTaker515 数据采集仪、单元应力计等组成。模型内围岩主应力的量测是通过主方向传感器而获取，该传感器为 30 mm×30 mm×30 mm 聚氨酯材料立方体制作而成，3 个 45° 电阻应变花分别贴在对角相邻的 3 个面上（如图 1 所示）。该主方向传感器<sup>[18]</sup>经过多次试验表明，具有很好弹性变形，在巷道变形及内部应力调整过程中可随围岩变形而产生相应的弹性变形。根据弹性力学空间问题的基本理论而计算得出主应力大小及其方向的余弦，进而分析在主应力大小及方向演化过程中围岩变形破坏特征。

根据试验设计，主方向传感器在围岩中的布置如图 2 所示。在顶、底板每隔 5 cm 分别布置 3 个，在左、右帮每隔 5 cm 分别布置，沿巷道轴向布置 2 个，间距为 30 cm。其中左、右帮沿巷道轴向的间距为 15 cm。在试验中共布置 16 个主方向应变传感器。



(a)

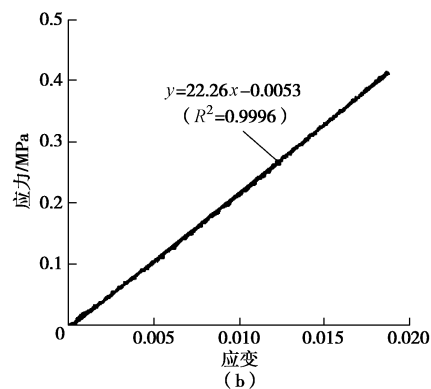


图 1 主方向传感器及应力 - 应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of principal direction strain sensor

2.3 模型制作过程

综合考虑试验目的、模型尺寸大小和边界效应的影响，结合文献[18]相似材料模拟试验几何相似比为 30，重度相似比为 1.44。模拟实际围岩为 30 m×30 m×30 m 的范围，模型中巷道的净高为 117 mm，净宽为 133 mm。为了满足模型开挖窗口的形状要求，将巷道断面简化为圆形断面，直径为 130 mm，等同于原型为直径 4000 mm 的圆形巷道。

试验采用砂与石蜡的混合物做相似材料来模拟巷道围岩，用厚度为 1.4~5 mm 的云母碎片模拟岩层层理，试验以砂子作为骨料与石蜡胶结作为相似材料，具有模型成型周期短、相似材料的力学性能稳定、且

可复用等优点。由于材料具有良好的弹塑性，适于模拟深部开采巷道围岩变形特征。相似材料模型中各岩层物理力学特性如表 2 所示。模型制作采用分层铺设，按模拟岩层配比进行称重配料、恒温加热、均匀搅拌、减摩处理、摊铺、振动压实、铺设层理、布设传感装置等环节。鉴于模型尺寸大，铺设材料温度高，为了保持模型内外温度均衡，模型制作完后，需冷却 2~3 d，而后进行加载、开挖、支护等环节。

表 2 相似材料模型各岩层物理力学特性表

Table 2 Physical and mechanical properties of physical model

岩石名称	重度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	泊松比
中砂岩	1745	1.08	0.08	34	0.10	0.14
粉砂岩	1793	0.95	0.05	29	0.06	0.14
细砂岩	1769	77.10	0.06	39	0.04	0.19
泥 岩	1778	1.10	0.02	42	0.01	0.23

2.4 试验方案设计

模拟试验中巷道的开挖方向为 X 轴方向，即试验台前后加载面，左右方向为 Y 轴方向，即试验台左右加载面，上下方向为 Z 轴方向，即试验台上下加载面。试验采用可缩 U 型钢+金属网支护形式对深部开采巷道施加支护（见图 3），观测巷道围岩的破坏特征及主应力演化规律。可缩 U 型钢+金属网支护试验模型的

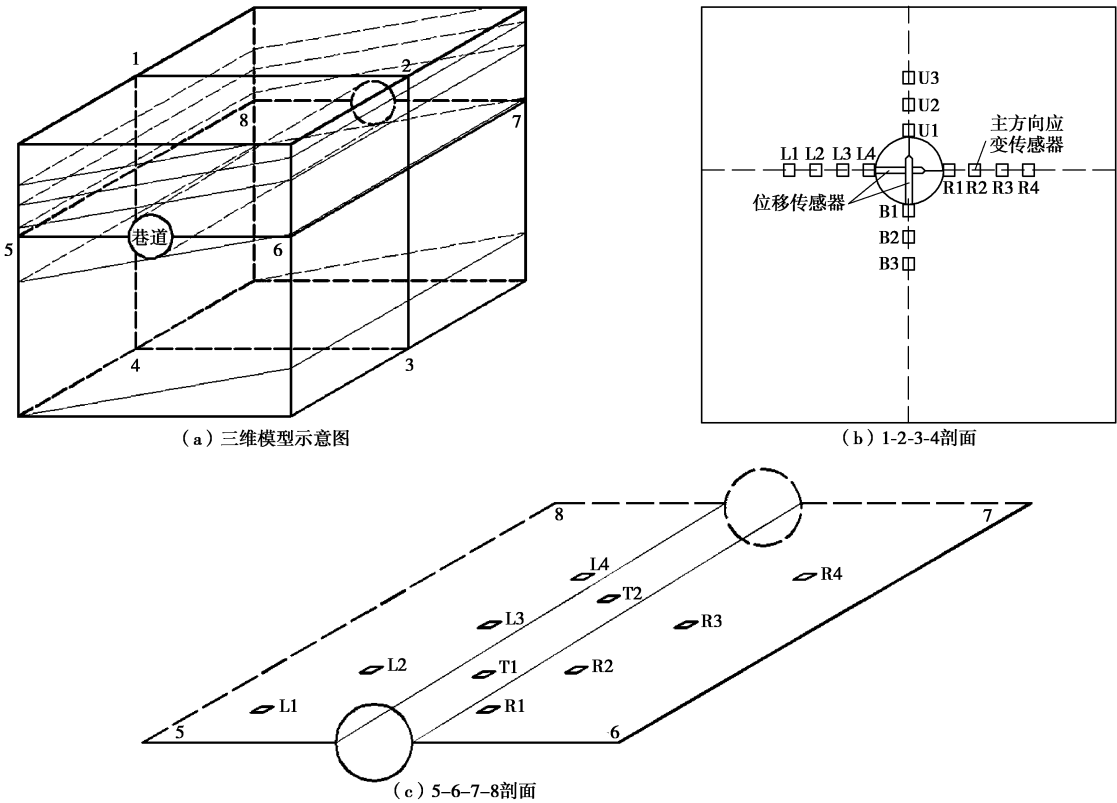


图 2 主方向应变传感器布置图

Fig. 2 Layout of principal direction strain sensors

巷道开挖是从 2009 年 6 月 18 日 01:28 开始,开挖时间步距为每 30 min 开挖一次,每次开挖尽量在 2 min 内完成,减少裸巷无支护的时间,开挖进尺步距为每次 6 cm,每次巷道开挖后用气压芯模对裸巷施加临时支护,提供的支护阻力为 0.3 MPa。整个开挖过程描述如表 3 所示。

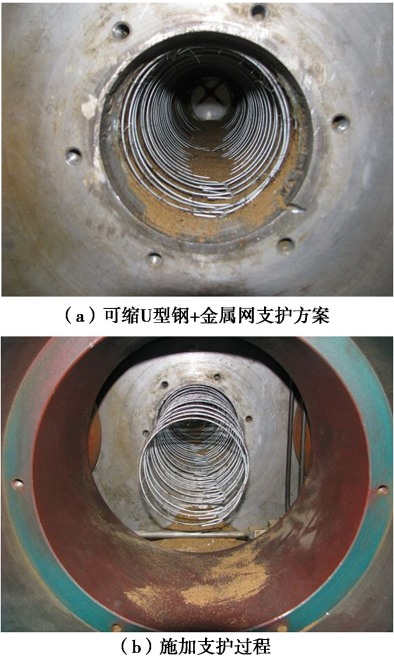


图 3 可缩 U 型钢+金属网支护形式  
Fig. 3 Compressible U-type steel support and wire netting

表 3 巷道开挖过程描述

Table 3 Description of excavation process					
开挖时间	开挖距离/cm	开挖时间	开挖距离/cm	开挖时间	开挖距离/cm
01:28	0	04:00	36	07:00	72
01:30	6	04:30	42	07:30	78
02:00	12	05:00	48	08:00	84
02:30	18	05:30	54	08:30	90
03:00	24	06:00	60	09:00	96
03:30	30	06:30	66	09:30	100

3 主应力演化规律影响下变形破坏

3.1 模型初始地应力场构建

试验采用“先加载后卸载”的试验方法,同时考虑相似材料的压实压密需要一定的时间过程以及加载板的受力状态,以免出现测试元件及导线损坏,采用分级加载达到设计载荷,故对分级加载过程进行实时采集,分析加载特征。通过加载过程曲线(图 4)可以看出,对模型中不同位置布设的主方向应力传感器获得的主方向应力进行分析、比较,得到了三维模拟试验加载过程中 3 个加载方向应力在模型中的变化规

律如下:  
(1) 以巷道左帮 3 个加载方向的应力为例, y 方向的加载载荷在加载过程中均高于其它两个方向,说明试验模型经加载后得到的初始应力场是符合高水平应力场设计要求的,即应力场为  $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_z$ 。  
(2) 加载的初始相似材料存在压密过程,由于主方向应变传感器与模拟材料间有空隙,加载过程中逐渐压实,从而加载初期应力值存在从零突增的现象,甚至出现负值(拉应力)的情况,如左帮 L4 加载曲线。说明在模型加载过程中要控制加载速度,分级进行加载。

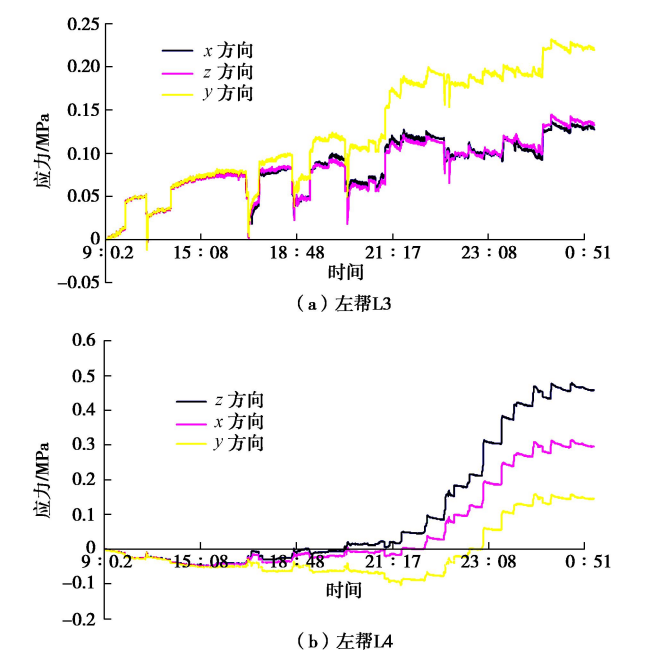


图 4 主方向应力加载曲线

Fig. 4 Loading curves of principal direction stress

(3) 加载过程中,围岩内部的应力变化调整在时间和空间上存在过渡过程。不同位置的应力变化调整存在不断波动变化的趋势,模型内部逐渐向模型外部靠近加载板,同一时刻的应力是不同的,即模型内部的应力值要小于靠近加载板的应力值,说明模型内部应力的传递存在时间滞后的现象。故模型的开挖需在分级加载一段时间后再进行,稳定 2~4 h 为宜,以实现加载板的荷载向模型内部的均匀传递。

3.2 巷道变形破坏细部特征分析

(1) 开挖过程  
加载至初始应力场后实施分布开挖,开挖过程中巷道顶底板出现变形破坏,围岩裂隙发育及破坏过程如图 5 所示。  
在巷道开挖初始,由于受模型边界效应的影响,未观察到明显的变形破坏特征,如图 5 (a) 所示。巷道不断向前掘进,巷道顶底板处出现了明显的变形破坏特征,特别是巷道顶板处有块状岩体剥落,如图 5



(b)所示。在岩体剥落的过程中,巷道围岩顺序发生了膨胀、局部掉落和垮落等特征。

随着围岩应力不断向深部转移,破坏范围逐渐加深。顶板冒落块体加大,顶板位置浅层围岩完全受压剪而破碎,宏观破坏范围呈现“楔形”状渐进发展,即巷道围岩破坏是从顶板的破裂点渐进发展至深部围岩,使巷道顶板破坏范围加大,诱发围岩二次破坏直至失稳。由于底板在开挖过程中,产生的破坏裂缝被破碎岩块充填,宏观上未观察到,但在模型剖面中产生的剪转移裂缝与顶板是一致的。

由图5可以看出,在巷道开挖过程中,巷道顶板位置处出现了块状垮落现象。由图5(c)、(d)对比可知,处于开挖口附近的巷道顶板破坏最为明显,这是由于可缩U型的支护只安装在了靠近模型后加载板位置(长度为0.7 m),而在巷道开挖口为无支护(长度为0.3 m),可以明显地对比有支护与无支护时巷道初始破坏特征。可以看到,施加支护对巷道的变形破坏产生了明显的抵抗作用,在短时间内有效地控制了巷道的变形,而无支护段的巷道顶板发了冒顶破坏,且冒落的岩块多呈块状。

以上特征表明在巷道掘进中,巷道围岩卸载,围岩由三向受力改变为二向受力,在水平应力的作用下,顶板受挤压破坏,且围岩内部主应力出现了不同程度的变化,特别是在顶板位置应力变化明显,从而使得顶板围岩块状垮落。

## (2) 模型剖面分析

为探查研究巷道围岩内部破坏特征及破坏模式分析,便于对巷道开挖后围岩松动范围进行量测,试验完成后将模型沿巷道轴向每隔10 cm做剖切面并用喷吹工具对剖面上的细砂清理,发现如图6所示的变形破坏特征。特别说明的是剖切面中的试验特征贯穿于整个模型,并非局部现象。由图6可知,深部高水平应力环境下的巷道掘进后,巷道表面卸载,应力重新分布调整,在水平应力挤压和竖向应力张拉的组合作用下,导致在顶底板及两帮位置出现了不同程度的破坏。在有支护情况下顶板和底板位置最大破坏深度分别为11 cm和8 cm,相当于实际工程的3.3 m和2.4 m,左帮和右帮最大破坏深度分别为5 cm和7 cm,相当于实际工程的1.5 m和2.1 m;而无支护情况下顶板和底位置最大破坏深度分别为16 cm和14 cm,相当于实际工程的4.8 m和4.2 m,左帮和右帮最大破坏深度分别为10 cm和13 cm,相当于实际工程的3 m和3.9 m。限于篇幅,无支护模型剖面未给出。由于底板岩层强度稍高于顶板,故出现顶板破坏深度大于顶板的现象,其中左帮所处层位高于右帮,故左帮破坏位置高于右帮。

通过模型剖切面可以看出,深部高水平应力环境下巷道掘出后,在有支护情况下,巷道周围会呈现一定范围的变形破坏。围岩的破坏主要表现为剪切滑移,在顶底板产生了不同数量的类似对称螺旋曲线剪切滑移裂缝,其中顶板位置出现了4组对称的剪切滑移裂缝,底板位置出现了2组对称的剪切滑移裂缝,且裂

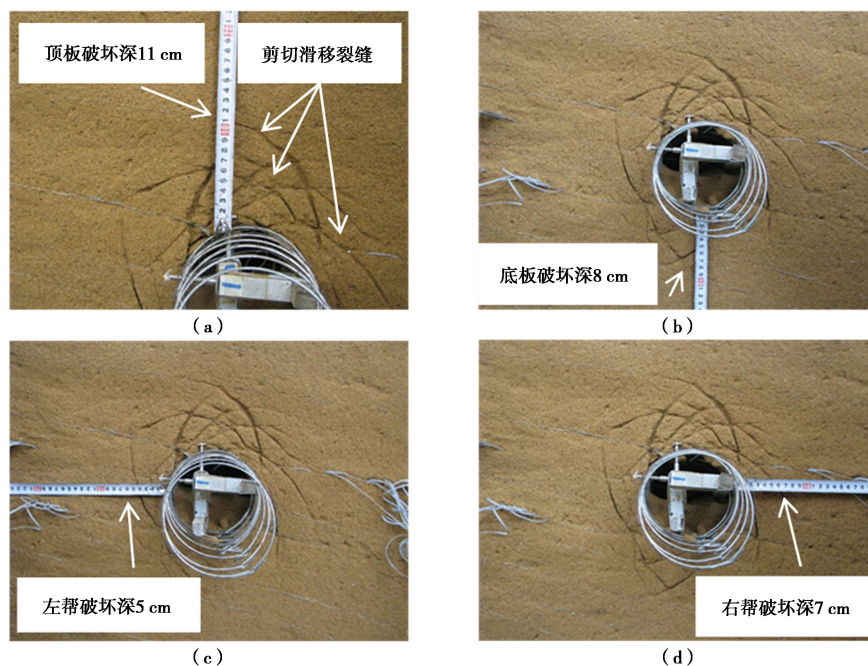


图5 可缩U型钢+金属网支护下模型剖面图

Fig. 5 Sectional view of model with compressible U-type steel support

表 4 顶板及左帮测点主应力变化特征表

Table 4 Characteristics of principal stress diversification at measuring points of roof and left rib							
项目		波动区域 1	波动区域 2	波动区域 3	波动区域 4	波动区域 5	波动区域 6
顶板 U1	时间	02:21~02:25	03:00~03:01	03:30~03:32	04:00~04:02	04:31~04:32	05:29~05:30
	趋势	降低	升高	降低	升高	升高	升高
	$\Delta\sigma_1/\text{MPa}$	0.003	0.060	0.010	0.002	0.014	0.015
	$\Delta\sigma_3/\text{MPa}$	0.100	0.047	0.010	0.003	0.015	0.017
左帮 L4	时间	02:51~02:54	03:23~03:32	04:00~04:02	04:31~04:32	05:29~05:30	08:45~08:46
	趋势	升高	降低	升高	升高	升高	升高
	$\Delta\sigma_1/\text{MPa}$	0.006	0.011	0.048	0.062	0.058	0.022
	$\Delta\sigma_3/\text{MPa}$	0.006	0.020	0.045	0.054	0.086	0.035

缝均向两帮位置发展，甚至发生交叉。顶底板位置的剪切滑移裂缝成组出现并发生交叉，使围岩的破坏后形态为“楔形”块状，支护体的作用使其不至冒落坍塌。

3.3 围岩内部主应力大小演化规律分析

巷道不同位置的主方向应变传感器所测得数据经过 Matlab 软件计算后得到，限于篇幅，只分析顶板和左帮主应力变化曲线，分别如图 6 所示，相应测点的主应力变化特征见表 4。

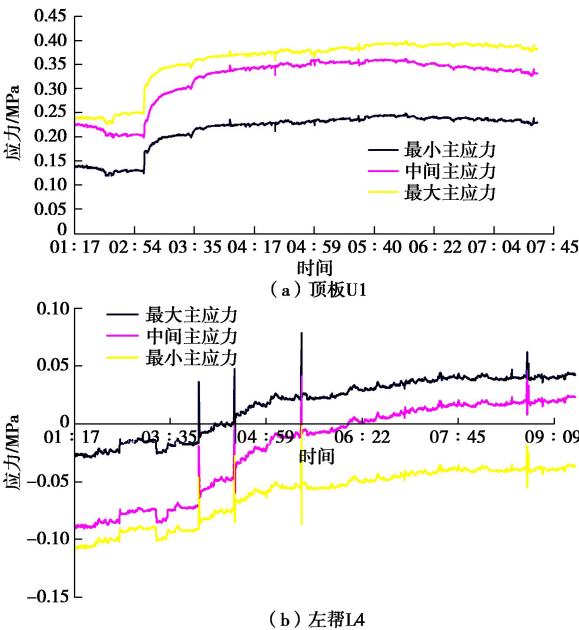


图 6 顶板及左帮主应力变化曲线

Fig. 6 Curves of principal stress diversification at roof and left rib

由以上巷道顶板和左帮处的主应力变化曲线及其变化特征表分析可得，巷道在开挖以后，其围岩内部应力大小变化具有如下规律：

顶板受挤压而帮部受拉作用出现 6 处应力剧烈波动区，并存在多个微小波动区域。模型剖切面表明巷道围岩顶板内有 4 组对称的剪切滑移裂缝，左帮处产生的应力变化在时间上延迟于顶板，说明剪切滑移裂缝是从顶板向帮部延伸扩展的。

巷道围岩不同深度内的主应力大小存在明显的变化趋势，且靠近巷道表面的变化幅度比深部围岩明显

要大。其中最小主应力变化强度高于最大主应力的变化强度。其中顶板 U1 传感器主要受以挤压作用为主，而左帮 L4 传感器主要受以张拉为主的作用力。同时主应力的变化都有升高和降低的变化过程，且以最小主应力为主导。分析开挖及稳定调整过程可知，围岩内部的应力状态是动态调整的。据耿乃光等<sup>[20]</sup>研究，一定条件下最小主应力的减小，是相邻块体挤压力的松弛，可以导致岩石破坏。巷道开挖过程使处于巷道轴向方向的最小主应力减小，施加支护后围岩应力进行了重新调整，在开挖和支护的过程中，卸载和支护造成最小主应力的减小和调整，对巷道破坏起到了重要作用。

3.4 围岩内部主应力方向演化规律分析

根据测试结果的整理分析，对应力方向的变化进行了研究，得出在巷道开挖过程中，掘进面附近初始应力失去平衡，围岩应力重新调整，主应力大小和方向同时产生剧烈变化。

在主应力方向（角度-时间）变化曲线中，对任一时间点，某个主应力方向对应的 3 个角度的余弦  $l, m, n$  满足  $l^2 + m^2 + n^2 = 1$ 。开挖过程底板及左帮位置主应力方向转动轨迹如图 7 所示。图例中 1 和 3 分别代表最大主应力和最小主应力， $x, y, z$  分别表示主应力相对  $x, y, z$  方向的角度变化。

巷道不同位置主应力方向变化特征如表 5，通过对巷道围岩主应力方向及变化特征表进行分析发现：主应力方向的变化幅度在  $0\sim180^\circ$  之间，最小主应力与最大主应力的方向均有剧烈变化。如：巷道左帮 L4 处在开挖过程中最小主应力与  $Y$  轴的夹角变化幅度最大，说明在垂直于巷道的开挖方向上产生了剧烈的主应力方向转动；巷道顶板的位置 U1 主应力在 3 个方向都产生了强烈的变化与转动，说明巷道顶板在开挖过程中不断冒落，破坏与主应力的方向和大小变化有直接相关；巷道开挖和应力平衡过程中，不同部位的监测结果表明均有多个主应力方向发生明显变化的时间段，主应力方向的变化表明该时段内有较强的应力调整过程，且方向转动幅度较大，是巷道内部发生变形破坏的表现特征；从变化特征表中可以看出，巷道



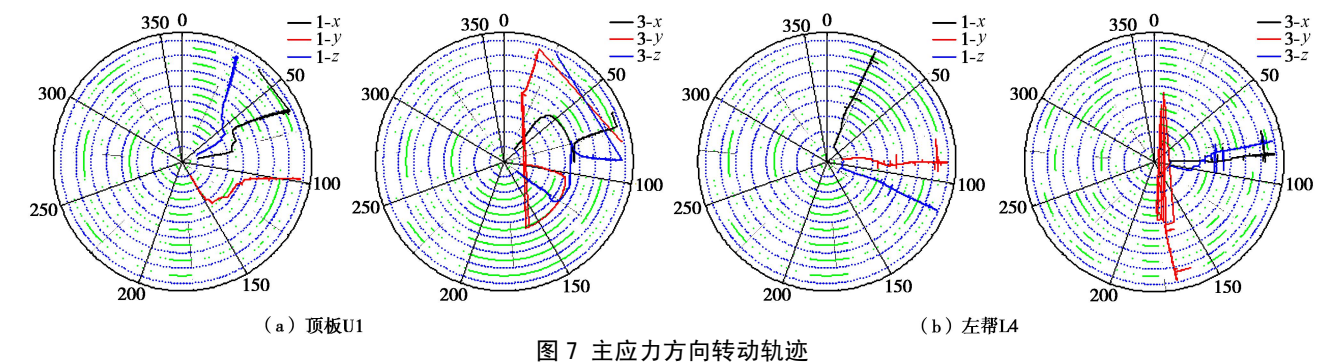


图 7 主应力方向转动轨迹

不同位置的最小主应力变化最为强烈,说明最小主应力的方向和方向的变化对巷道变形破坏起到了重要作用。

表 5 巷道不同位置主应力方向变化特征表

Table 5 Properties of principal stress diversification at different positions of roadway

位置	主应力	相对 $x$ 方向	相对 $y$ 方向	相对 $z$ 方向
顶板 U1	最大主应力	明显变化	明显变化	明显变化
	最小主应力	剧烈变化	剧烈变化	剧烈变化
左帮 L4	最大主应力	微小变化	明显变化	微小变化
	最小主应力	剧烈变化	剧烈变化	剧烈变化

4 结 论

以深部高应力巷道为实际工程背景,利用大尺度三维物理模拟试验系统和制作的主方向应力传感器量测工具,采用“先加载后开挖”的方式模拟主应力大小和方向演化影响下的有支护巷道围岩变形破坏特征,得出以下结论:

- (1)高水平应力环境下的巷道在掘进开挖过程中顶底板受挤压剪切作用产生变形破坏,破坏范围呈现“楔形”渐进发展。
- (2)通过模型剖切面发现巷道围岩顶底板产生了不同数量的对称螺旋状剪切滑移裂缝,并向巷道两帮发展并交叉,将巷道围岩形成一定范围的剪切破坏区域,即松动圈范围。
- (3)主应力方向的变化是与其大小变化同步的,最小主应力的方向变化比最大主应力的方向变化剧烈,是引起巷道变形破坏的重要原因,而巷道顶、底板是产生变形破坏的源点,是重点支护部位。

参考文献:

[1] 钱七虎. 非线性岩石力学新进展—深部岩体力学的若干问题[C]// 中国岩石力学与工程学会编.第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京: 科学出版社, 2004: 10 - 17. (QIAN Qi-hu. The current development of nonlinear rock mechanics: the mechanics problems of deep rock mass[C]// Proceedings of the 8th Conference on Rock Mechanics and

Engineering. Beijing: Science Press, 2004: 10 - 17. (in Chinese))

[2] 孟 波, 靖洪文, 陈坤福, 等. 软岩巷道围岩剪切滑移破坏机理及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2255 - 2263. (MENG Bo, JING Hong-wen, CHEN Kun-fu, et al. Shear and slip failure mechanism and control of tunnels with weak surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2255 - 2263. (in Chinese))

[3] 陈卫忠, 谭贤君, 吕森鹏, 等. 深部软岩大型三轴压缩流变试验及本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1735 - 1744. (CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, LÜ Sen-peng, et al. Research on large-scale triaxial compressive rheological test of soft rock in depth and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1735 - 1744. (in Chinese))

[4] 许国安. 深部巷道围岩变形损伤机理及破裂演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011. (XU Guo-an. Research on the mechanism and evolution law of rock deformation and cracking around deep tunnels[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011. (in Chinese))

[5] 张明建, 镐 振, 郜进海, 等. 不同水平应力作用下巷道围岩破坏特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 4 - 8. (ZHANG Ming-jian, HAO Zhen, GAO Jin-hai, et al. Study on failure features of surrounding rock in mine gateway under different horizontal stress[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(3): 4 - 8. (in Chinese))

[6] 康红普, 司林坡. 深部矿区煤岩体强度测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1312 - 1320. (KANG Hong-pu, SI Lin-po. Test and analysis of coal and rock mass strength in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1312 - 1320. (in Chinese))

[7] 杨旭旭, 靖洪文, 陈坤福, 等. 深部原岩应力对巷道围岩破裂范围的影响规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 495 - 501. (YANG Xu-xu, JING Hong-wen, CHEN Kun, et al. Study on influence law of in-situ stress in deep underground rocks on the size of failure zone in roadway[J].

- Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, **30**(4): 495 - 501. (in Chinese))
- [8] 周小平, 徐小敏, 卢萍, 等. 深埋巷道的选型分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 1): 2700 - 2706. (ZHOU Xiao-ping, XU Xiao-min, LU Ping, et al. Analysis of shape selection for deep roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S1): 2700 - 2706. (in Chinese))
- [9] 张强勇, 陈旭光, 林波, 等. 深部巷道围岩分区破裂三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(9): 1757 - 1766. (ZHANG Qiang-yong, CHEN Xu-guang, LIN Bo, et al. Study of 3D geomechanical model test of zonal disintegration of surrounding rock of deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(9): 1757 - 1766. (in Chinese))
- [10] 李德忠, 李冰冰, 檀远远. 矿井深部巷道围岩变形浅析及控制[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 109 - 112. (LI De-zhong, LI Bing-bing, TAI Yuan-yuan. Analysis and control of distortion of surrounding rock of roadway at deep ground of mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(1): 109 - 112. (in Chinese))
- [11] 方新秋, 何杰, 何加省. 深部高应力软岩动压巷道加固技术研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1693 - 1698. (FANG Xin-qiu, HE Jie, HE Jia-sheng. Research on reinforced technology for deep soft rock dynamic pressurized roadway under high stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1693 - 1698. (in Chinese))
- [12] 许国安, 靖洪文, 张茂林, 等. 支护阻力与深部巷道围岩稳定关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 2): 4032 - 4036. (XU Guo-an, JING Hong-wen, ZHANG Mao-lin, et al. Experimental study on relations of support pressure and stability of surrounding rock mass in deep tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 4032 - 4036. (in Chinese))
- [13] 牛双建, 靖洪文, 杨大方. 深井巷道围岩主应力差演化规律物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(增刊 2): 3811 - 3820. (NIU Shuang-jian, JING Hong-wen, YANG Da-fang. Physical simulation study of principal stress difference evolution law of surrounding rock of deep mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(S2): 3811 - 3820. (in Chinese))
- [14] 何富连, 王晓明, 许磊, 等. 大断面切眼主应力差转移规律及支护技术[J]. 岩土力学, 2014, **35**(6): 1703 - 1711. (HE Fu-lian, WANG Xiao-ming, XU Lei, et al. Principal stress difference transfer law and support in large-section open-off cut[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(6): 1703 - 1711. (in Chinese))
- [15] 李元鑫, 朱哲明, 范君黎. 主应力方向对围岩稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1908 - 1915. (LI Yuan-xin, ZHU Zhe-ming, FAN Jun-li. Effect of principal stress orientation on stability of surrounding rock of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1908 - 1915. (in Chinese))
- [16] 彭瑞, 孟祥瑞, 赵光明. 考虑中间主应力对圆形巷道 Hoek-Brown 准则解的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, **10**(1): 11 - 18. (PENG Rui, MENG Xiang-rui, ZHAO Guang-ming. Hoek-Brown criterion solution of circular roadway with considering intermediate principal stress[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, **10**(1): 11 - 18. (in Chinese))
- [17] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 掌子面推进过程围岩应力及裂隙发育规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, **44**(2): 764 - 772. (LIU Li-peng, WANG Xiao-gang, JIA Zhi-xin, et al. Tunnel face advancing on development of stress and microfracture around excavation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, **44**(2): 764 - 772. (in Chinese))
- [18] 陈坤福. 深部巷道围岩破裂演化过程及其控制机制研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (CHEN Kun-fu. Research on failure evolution and control mechanism of surrounding rock of deep roadways and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese))
- [19] 王猛. 煤矿深部开采巷道围岩变形破坏特征试验研究及其控制技术[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010. (WANG Meng. Experiment study on characteristic of deformation and failure of roadway's surrounding rock and its controlling technique in deep mine[D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2010. (in Chinese))
- [20] 耿乃光, 许东俊. 最小主应力减小引起岩石破坏时中间主应力的影响[J]. 地球物理学报, 1985, **28**(2): 191 - 197. (GENG Nai-guang, XU Dong-jun. Rock rupture caused by decreasing the minimum principal stress[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1985, **28**(2): 191 - 197. (in Chinese))