

DOI: 10.11779/CJGE201601003

深部隧道框架式真三轴物理试验系统研制与应用

李元海^{1,2}, 靖洪文^{1,2}, 陈坤福², 贾冉旭²

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了研究深部隧(巷)道围岩稳定性机理与支护控制技术, 以千米埋深为基本条件, 考虑三轴六面恒压加载和数字照相量测先进技术的应用, 研制了一套结构紧凑、特色鲜明的真三轴框架式大型物理模拟试验系统。该系统由模型加载反力框架、以扁油缸与真空回油为特色的液压加载控制系统、自行研制的数字照相变形量测与围岩应力测试系统和开挖支护辅助装置4部分组成, 可用于长1000 mm×宽1000 mm×厚1000 mm的深部隧(巷)道大型物理相似模型试验研究。最后给出在深部矿山巷道围岩变形受力观测分析与围岩分区破裂化现象再现试验的应用实例。应用结果表明, 本套试验系统对于研究包括矿山巷道、TBM隧道在内的深部隧(巷)道工程开挖与支护过程中围岩变形与应力分布规律及其稳定控制作用机理都具有重要价值。

关键词: 深部隧道; 试验系统; 数字照相量测; 围岩变形; PhotoInfor

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)01-0043-10

作者简介: 李元海(1969-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程数字照相量测技术与应用以及地下工程安全分析与稳定性控制机理等方面的研究工作。E-mail: lyh@cumt.edu.cn。

Development and applications of physical model test system with true triaxial loading unit for deep tunnels or roadways

LI Yuan-hai^{1,2}, JING Hong-wen^{1,2}, CHEN Kun-fu², JIA Ran-xu²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A large-scale physical model test system with true triaxial loading unit and digital photogrammetry is developed. Using this test system, it is possible to study the stability of rock mass and support control technology for the deep rock tunnel with an overburden of over 1000 m. The test system consists of a reaction frame, a hydraulic control unit with oil-driven actuators and vacuum oil feed-back pump, a deformation and stress measuring unit with self-developed digital photogrammetric technology and stress measuring method, and tunnel excavation and support instruments. Large-scale model with a size of 1000 mm×1000 mm×1000 mm can be used in this test system. Two model tests are presented. One is analyzing the deformation and stress distribution of a deeply buried tunnel. The other is reproducing a local fracture phenomenon. The test results show that the test system is useful for investigating the deformation and fracture laws of deeply buried tunnels such as mining roadways and TBM tunnels during excavation and supporting, and the mechanism of stability control for surrounding rock masses.

Key words: deep tunnel; experimental system; digital photogrammetry; surrounding rock deformation; PhotoInfor

0 引言

深部地下工程围岩稳定性机理与支护控制理论是岩土工程领域研究的一个热点问题, 研制一套深部隧(巷)道物理模拟试验系统, 可为解决复杂条件下的围岩稳定控制理论和技术问题提供一个重要的试验研究平台。

物理相似材料模型试验系统作为研究深部地下工程复杂问题的一条重要手段, 国内外许多单位和学者进行了富有成效的研制、开发与应用。其中, 清华大学研制的离散化三维多主应力面加载试验系统^[1-2], 主

要由高压气囊、反推力板、限位千斤顶、垂直立柱、封闭式钢结构环梁、支撑钢架和空气压缩机组成, 试验架内长×宽×高尺寸为6.2 m×1.02 m×4.7 m, 采用预埋多点位移计、光导纤维、超声波和摄影方式进行模型内外的变形量测, 但该试验系统结构复杂, 模型进深大, 很难实现人工分层开挖, 加载强度也不够。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB046905, 2013CB036003); 国家自然科学基金项目(51174197); 江苏省高校“青蓝工程”中青年学术带头人培养项目

收稿日期: 2014-12-12

中国矿业大学研制的真三轴巷道模型试验台^[3],采用6个液压枕加载,最大施加载荷10 MPa,采用位移和微型应力传感器等常规测量方法,只适合于采矿中软岩巷道矿压显现的模拟试验,属于准平面模型,不能进行高地应力三维模型试验。洛阳总参三所研制有岩土工程多功能模拟试验装置^[4-5],该装置具有双向旋转功能,为复杂地层模型制作、模拟岩土体自重应力及研究边坡坡角影响等提供了方便;最大模型长×宽×高尺寸为1.6 m×1.4 m×0.4 m,模型边界可加均布或阶梯形荷载,最大加载能力1.5~2.0 MPa;采用配套数据采集系统,可进行洞室、洞群、边坡和基坑4类典型工程的地质力学模型试验,但该装置是平面模型试验系统,不能进行三维模型试验。山东大学研制的真三轴加载模型试验系统^[6-7],该系统主要由钢结构台架和液压加载控制系统组成,模型尺寸为2.5 m×2.5 m×0.8 m,最大荷载集度为3 MPa,可对洞室群轴线方向施加自平衡式的分级加载,以模拟平行洞轴向的地应力荷载;应用基于光纤Bragg光栅的棒式位移传感器和微型多点位移计量测系统等量测围岩内部位移,实现了全三维应力状态下二水平方向的梯级加载,但试验完成后,模型难以升降或移入移出,以实现模型体内部变形破坏剖视。山东大学研制的另一组合式三维地质力学模型试验系统^[8-9],额定压力为31.5 MPa,测量采用XL2101G高速静态应变仪系统,系统整体稳定性好、组装灵活方便、尺寸可任意调整并能满足不同规模模型试验要求,但试验系统的强度和刚度或液压加载系统难以实现高地应力及超载破坏模拟试验。中国矿业大学(北京)的大型深部矿山建设模型试验系统^[10],模型长×宽为2.0 m×2.0 m,模型纵深方向深度可变,系统主要由反力架、液压加载系统、测控系统、数据采集系统等组成,采用回字形主框架、可移动式门式反力架和后支撑架,可实现模型厚度的调整,既可进行平面模型试验又可进行三维模型试验,液压加载系统可实现5向主动加载,同时设有恒定荷载保持系统,数据采集系统包括静态和超动态应变采集仪,可进行隧(巷)道机械开挖和爆破开挖模拟试验过程中信息的采集,既可进行平面模型试验又可进行三维模型试验,但是可拓展面比较窄。

目前,在深部隧(巷)道工程稳定及控制技术方面,尽管涌现了一些大型试验系统,但由于加载能力、模拟方法和量测技术的局限性,还不能完全满足深部隧(巷)道开挖与支护平衡过程真实再现的要求,使得复杂条件下的围岩破坏机理与支护作用机制等一些关键理论问题的研究仍然受到较大的制约。本文研制的试验系统与已有的模型试验台相比,在框架结构、

加载系统、支护装置、应力与变形量测方法^[11-12]等方面具有比较鲜明的特色,并在实际应用中取得了较为丰富的成果。本文主要介绍该试验系统的关键结构设计、主要功能、性能参数以及相关应用实例,可为今后类似物理模拟试验系统的进一步研制提供借鉴和参考。

1 深部隧(巷)道试验系统研制

1.1 功能需求分析与总体设计

根据试验目的以及制造厂家的技术论证,确定深部隧(巷)道试验系统的总体设计功能需求如下:

- (1) 模型尺寸1 m×1 m×1 m,真三轴六面同时加、卸载,可模拟千米以上埋深隧(巷)道。
- (2) 采用扁油缸加载和真空卸压控制系统。
- (3) 反力架为框架式结构,占用空间要小。
- (4) 可利用气压加卸载来模拟开挖与支护。
- (5) 采用高精度大变形数字照相量测技术。

试验系统由两大部分组成,即试验台架和气压液压加、卸载控制系统。其中,试验台由上下、前后、左右6块反力架及加载板构成一个封闭的立体模型空间。主体试验台为框架式可拆卸结构,框架之间用高强螺栓连接,框架前后加载板上均开有窗口,用以隧(巷)道开挖支护等试验操作和数字照相观测。加载系统对模型的6个端面可施加的最大荷载均为10 MPa;加载方式为柱塞式单向扁油缸加载,根据模型端面压缩量与试验模型隧(巷)道破坏失稳所需的单个油缸最大行程,确定其行程范围为0~5 cm,油缸返回则采用真空回油系统。

1.2 模型加载框架系统

模型加载框架系统有6块分离式框架组成,有3种形式,即上下左右标准框架(图1(a))与有隧(巷)道出入口的前后框架(图1(b)和图1(c))。以模型隧(巷)道纵向为基准按前后划分,后部框架考虑到常用隧(巷)道直径以及进行开挖和支护等操作,该端面框架中间设计有直径为150 mm圆形孔洞;另一个相对的前部框架用来进行数字照相变形观测,开一个230 mm×230 mm矩形窗口;模型其他上下左右4个端面均采用标准框架。综合考虑框架结构强度与重量,采用凹槽栅格式样的结构形式,用35号钢整体浇注而成。框架之间用高强螺栓连接和紧固。为改善水平加载框架的受力状态,在框架底部与地面之间加设一基座,与水平加载板用高强螺栓联结,水平方向力可由螺栓的螺纹与螺杆承受。经数值计算,满足结构的刚度与强度要求。

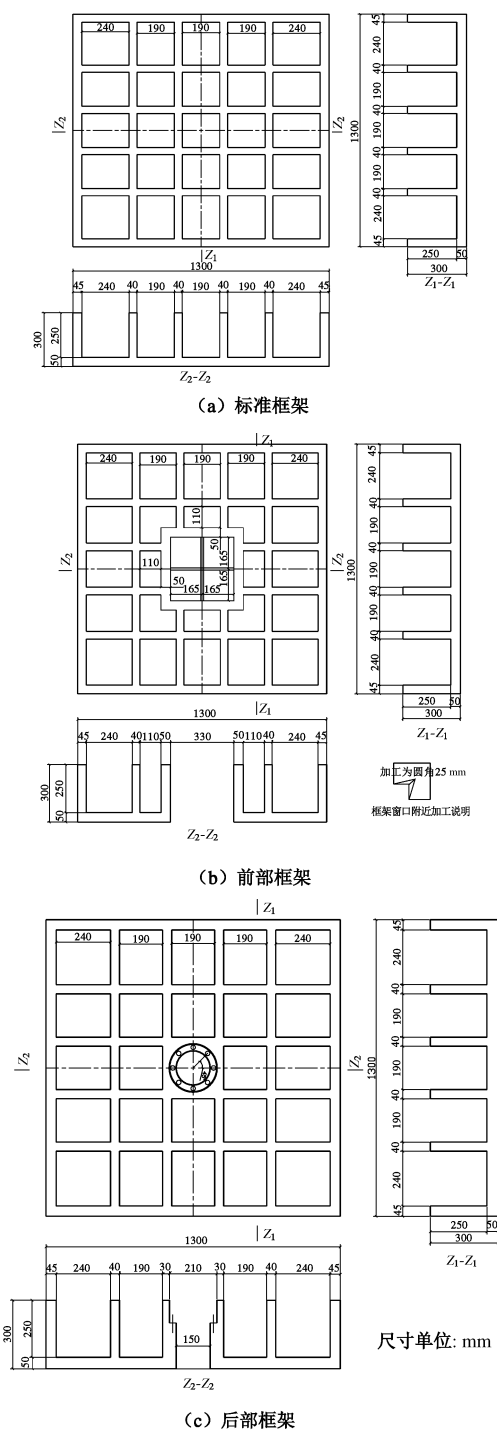


图 1 模型框架结构设计图

Fig. 1 Structural design of model frames

框架连接件结构设计与制造见图 2。连接件也是整体浇注而成, 配六角高强螺母 GB/T1229-1991 M30 的直径最大 60 mm, 厚度为 30 mm。

试验台框架与试验模型剖面见图 3, 整体装配与实物见图 4。装配后的试验台外观总体尺寸为 $2.1\text{ m} \times 2.1\text{ m} \times 2.1\text{ m}$, 荷载板尺寸为 $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m}$, 之所以比模型端面长宽尺寸小 10 cm , 考虑到模型压板随油缸伸出时不至于相互之间接触卡住以及油缸最大 5 cm 的加载行程。

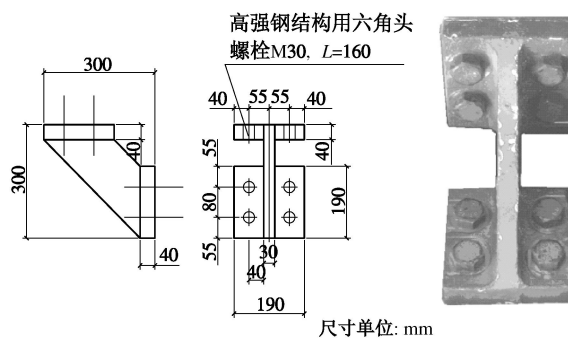


图 2 模型框架的连接件结构

Fig. 2 Structure of connecting piece for model frames

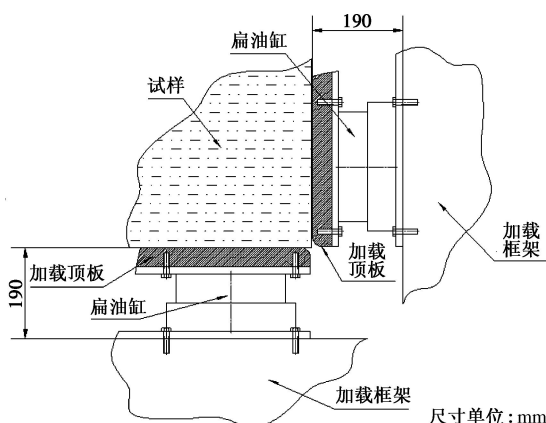


图 3 试验台模型框架结构剖面

Fig. 3 Section of model frame



(a) 外观



(b) 内部

图4 试验台模型框架整体装配

Fig. 4 Assembling of experimental model frame with oil cylinders

1.3 模型加载系统研制

试验模型的加载系统具有 4 通道（含一个备用通道），采用液压加载、稳压和六面油缸组合加载方法，各模型面最大加载能力为 10 MPa。

（1）加载、稳压控制系统

液压加载控制系统如图 5 所示，由气控液压稳压器加载、稳压、控制系统组成，可同时提供 4 个独立控制通道。各通道由气控平衡阀、油滤器、气控减压调节器、气液压转换开关、气囊式蓄能器、气液压力自控平衡装置、保护自卸载电磁阀和数字压力显示仪表等组成。该系统集中安装在操作控制柜内，在面板上可完成加、卸载操作。图 5 所示的液压控制柜红色缸体为真空回油泵，气驱液体增压泵安装在液压控制柜内部。



图 5 试验液压加载控制系统

Fig. 5 Hydraulic control system for model loading

（2）油源、真空回油系统

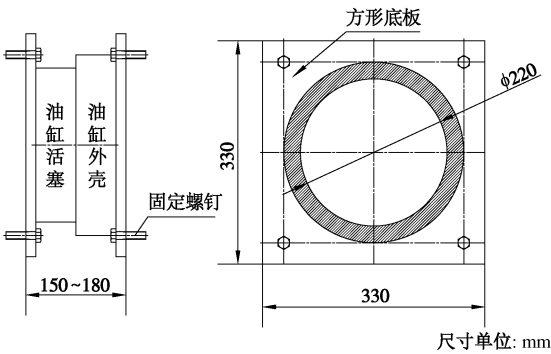
油源、真空回油系统由油泵总成、主油箱组件、密闭式真空回油油箱组件和高压手动变量柱塞泵电机组以及真空泵等组成。在油缸回油时，采用真空泵通过真空回油油箱，抽取液压系统空气，使油缸活塞在大气压力作用下收回。高压手动变量柱塞泵则用以给液压控制系统提供油压和流量。

（3）柱塞式单向油缸系统

之所以采用如图 6 所示的柱塞式单向油缸（扁油缸），主要考虑试验台结构紧凑与占用空间小的设计要求。一种可选方法是采用柔性液压囊（囊由薄钢板片做成），但柔性囊加载行程小且薄钢板片强度很难满足要求。模型加载系统设计为六面加载，控制系统为三千路油路输出，每路又分两支路分别控制对称的两面加载板，靠近每个加载板带有一个压力监控表和控制阀门，试验一般采用分级、缓慢加载方式。

加载系统传力机构采用 300 型扁油缸，油缸活塞直径 $\Phi 244$ mm。上下、左右加载面各安装 9 只油缸，

前、后加载面则为 8 只油缸。各加载面油缸与相对的加载面油缸，公用一个油压控制通道，保证相同油路上的油缸力同步。通过在各加载面安装最大位移的光电开关来保护油缸行程免于超限，在传力板上，对应装有磁性块支架与传力板联动。在任意六个面加载油缸与传力板联动的行程达到 50 mm 时，液压控制系统六面油缸全部同时卸载。



（a）结构尺寸



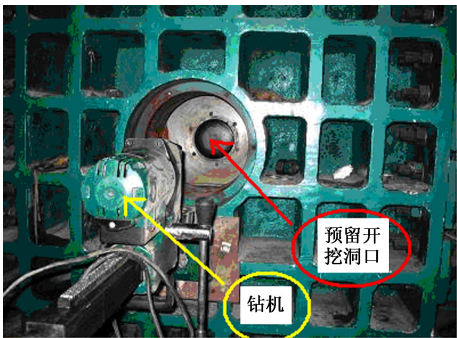
（b）油缸装配

图 6 油缸结构尺寸与实物

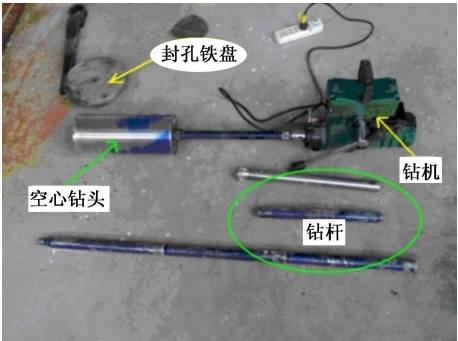
Fig. 6 Structural dimensions and installation of oil cylinders

1.4 开挖工具系统

如图 7 所示，为便于模型隧（巷）道的开挖操作，在试验台框架的后加载板设计预留开挖洞口，模型预加载时，用封孔铁盘封住，待模型加载到设计载荷后，卸下封孔铁盘并用钻机或 TBM 掘进装置进行隧（巷）道的开挖操作。



（a）模型开挖机具装配



(b) 开挖机具结构组成



(c) TBM 掘进装置

图 7 模型隧（巷）道开挖机具与 TBM 掘进装置

Fig. 7 Excavating machine and devices for tunneling

1.5 支护装置系统

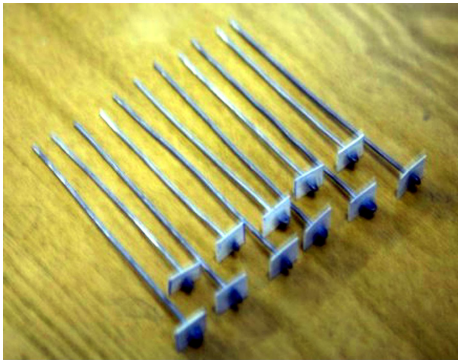
在深部隧（巷）道中，常用的支护形式主要有锚杆、锚索和拱架等，二次衬砌则多用于普通钻爆法隧道和 TBM 隧道中^[13]。在试验中可考虑支护力的等效施加来制作支护模拟装置。锚杆模拟在选择相似材料时一般以锚杆破断载荷和锚杆长度、延伸率作为主要控制参数，而实际完全相似比较困难。作为一种尝试，可根据抗拉刚度（ EA ）相似比来近似选用弹模为 517 MPa 和 $\phi 1.5\text{ mm}$ 的焊锡丝作为模型锚杆，锚杆托盘用边长 8 mm 的方形硬纸板，并用环氧树脂胶水将其固定在焊锡丝端部模拟成套锚杆（图 8（a））。钢筋梯子梁采用两根 $\phi 0.4\text{ mm}$ 细钢丝制作，金属网采用塑料窗纱代替。模型锚索可使用 $\phi 0.8\text{ mm}$ 铁丝作成，锚索初始预紧力通过调节托盘与螺母之间的弹簧压缩程度来进行模拟。

对于诸如 U 型钢的拱架模拟则可采用#16 铁丝来模拟制作（图 8（b）），钢筋网采用细铁丝网模拟。如按等效荷载考虑，同时考虑柔性密贴的主动支护要求，亦可采用气囊支护形式（图 8（c）），在隧（巷）道开挖成型后立即在洞内装上气囊，并施加一定气压来模拟实际支护阻力。柔性气囊更适合于模拟软岩工况。此外，隧道工程中的二次衬砌一般可采用石膏制作模拟（图 8（d））。

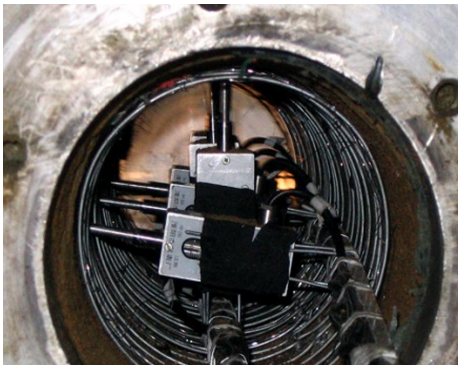
（1）自制应力测试单元

试验数据测试与采集系统主要包括自制应变与应

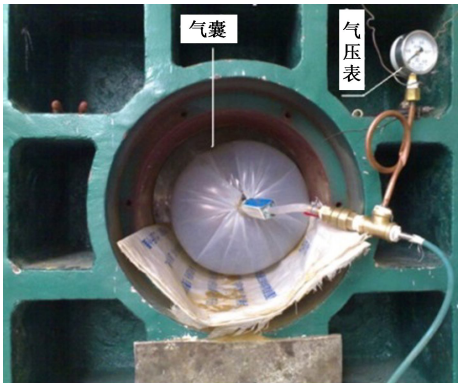
力传感器、DateTaker515 通用数据采集仪、计算机等组成，主要功能是记录模型内部三维应力、围岩表面位移和变形数据，并监控加载系统的工作状态。



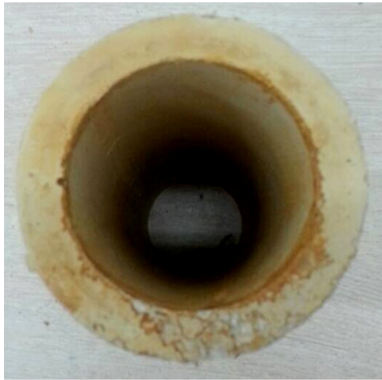
(a) 锚杆套件



(b) 圆形拱架



(c) 柔性气囊

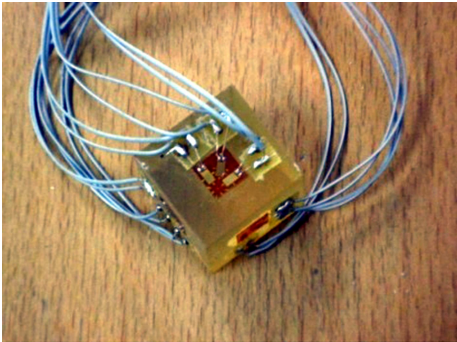


(d) 二次衬砌

图 8 隧（巷）道支护模拟装置

Fig. 8 Simulation devices for tunnel or roadway support
为监控和测试模型内部的应力状态，尤其是开挖

过程中围岩内部的应力变化情况, 根据相似材料的力学特性及匹配要求, 自行设计、制作了内部应力量测的单元应变计和应变砖。聚氨酯虽然与模型材料力学性质并不完全相同, 但其弹性模量和模型材料的弹性模量相当 (22~30 MPa), 且弹性好、不易破坏、应变片易于粘贴, 单元计尺寸可以做得尽量小, 故单元应变计采用聚氨酯板切割制作, 其结构如图 9 (a) 所示。考虑应变计的贴片要求, 设计成大小为 3 cm×3 cm×3 cm 的立方单元。为了更进一步使得应变计的材料与模型材料完全一致, 还可以采用模型同质材料来制作立方体, 粘贴应变片后制成应变砖, 但尺寸相对较大。应变砖大小为 10 cm×10 cm×10 cm, 在正交的 3 个面上都贴有 1, 2, 5 cm 长的应变片, 在制作模型时预先埋置其中, 如图 9 (b) 所示。利用“单元”应变计, 除了采集 3 个加载方向的应变以外, 还通过采集 3 个加载平面 45° 方向的应变来获取剪应变的大小, 从而获得完整的应变分量或应力分量, 最终确定模型内部的应力状态。



(a) 应变计



(b) 应变砖

图 9 自制应力测试单元

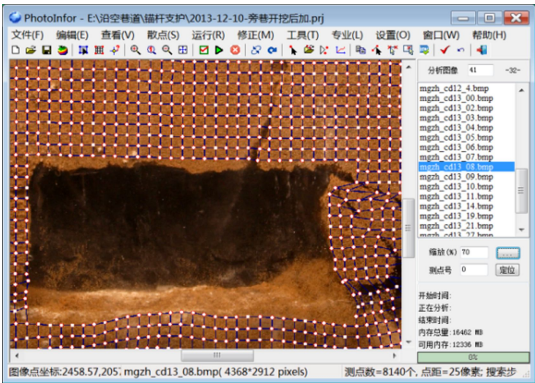
Fig. 9 Self-developed test unit for measuring rock stress

(2) 高精度数字照相变形量测技术

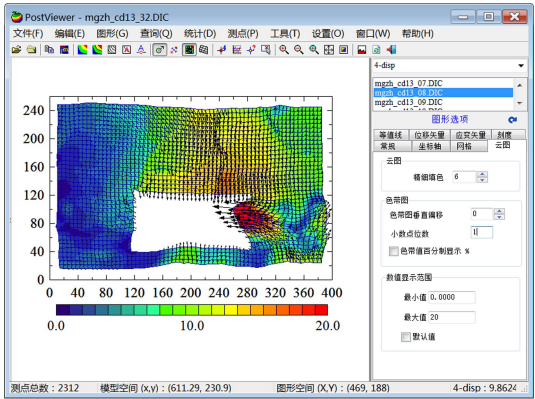
数字照相量测相对于传统位移计、应变片方法, 由于仅仅采用数码相机等图像采集设备, 不需要在模型上安装或粘贴测量标志点, 并可以进行观测目标全域变形分析, 因此, 具有非接触和全场量测等突出优点, 特别适合岩土模型材料的细观与全场变形特性的定性与定量精细观测的要求。

试验系统配备笔者自行研制的岩土工程高精度大变形数字照相量测技术^[11]。该技术由普通数码相机或摄像机、照明系统和软件分析系统组成, 软件系统则有图像分析程序 PhotoInfor 和结果后处理程序 PostViewer 两部分组成 (图 10)。部分应用结果表明, 对于一般岩土模型试验和采用普通数码相机, 量测精度实际可达 0.02 mm^[14], 完全满足常规岩土物理模型试验变形量测的精度要求。当然, 如需更高的变形量测精度, 则可考虑采用更大分辨率的数码相机或者采用显微照相等方法来获取观测目标更高比例 (mm/pixels) 的数字图像。

在模型试验中, 模型观测窗口内的隧道围岩表面位移可直接通过数字照相获取图像后进行变形分析。而对于隧道洞壁的位移观测, 一种方法是在靠近隧道洞口、沿隧道洞壁四周嵌入或粘贴人工标志点^[14], 可实现对隧道内部净空变形的数字照相量测与分析。



(a) 图像分析系统 PhotoInfor



(b) 后处理系统 PostViewer

图 10 数字照相变形量测软件系统

Fig. 10 Digital photogrammetric software package for deformation measurements

2 模型制作及加载特性

2.1 模型制作

由于以细河砂为骨料, 石蜡为黏结剂的相似模拟材料与通常选用的砂子、水泥、石膏胶结的相似材料

相比, 具有模型制作试验周期短、材料的力学性能稳定、材料可以复用等优点, 而且, 材料具有良好的弹性, 更适用于模拟深埋高应力隧(巷)道的压力显现等变形特征^[15]。在试验前, 通常要进行不同配比的基本力学实验, 获得不同配比的砂和石蜡混合物的基本力学参数(见表 1)。相似材料的重度随配比变化不大, 在 1.75~1.81 kN/m³。

表 1 砂和石蜡混合物的组分和属性^[15]

| Table 1 Mixture ratios and properties of admixture of sand and olefin | | | | | |
|---|-----------------------|------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|
| 配比号 | 单轴抗压强度值 | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 ν | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ |
| | σ_c/MPa | | | | |
| 100:2.0 | 0.18 | 32.0 | 0.29 | 13.91 | 40.25 |
| 100:2.5 | 0.31 | 35.8 | 0.35 | 23.48 | 49.30 |
| 100:3.0 | 0.53 | 43.7 | 0.41 | 39.94 | 46.13 |
| 100:3.5 | 0.77 | 63.2 | 0.37 | 41.16 | 45.26 |
| 100:4.0 | 1.09 | 137.2 | 0.32 | 45.57 | 50.02 |

注: ①骨料选用级配良好的河砂, 平均粒径为 0.5 mm, 石蜡为固体工业石蜡; ②配比号为模型材料中砂和石蜡的重量比。

模型的制作过程根据原型岩体的分层情况, 不同模拟岩层采用不同的配比, 采用分层多次碾压成型。模型制作工艺具体包括组分材料称重、混合配料、混合料加热与搅拌、模型容器的边界减摩处理、相似材料摊铺与碾压、层理设置、埋设传感器、框架封闭等过程。其中, 为了减小模型与试验框架之间的摩擦力, 使边界效应降至最小, 需预先在荷载板内部铺设一层减摩用的青稞纸, 另外青稞纸还可以起到封闭模型间隙, 有利模型成型的作用, 如图 11 所示。由于模型尺寸较大, 加热混合料浇筑时温度较高, 模型制作完后, 需放置 2~3 d 冷却, 而后进行后继加载及开挖等工作。



图 11 模型边界青稞纸减摩处理法

Fig. 11 Friction reducing between model and loading plate using barley paper

2.2 加载特性

试验中采用分级加载方式进行初始应力场的施加, 即施加一定量的荷载后, 锁死加载板油阀, 待应力在模型内部完全传递调整平衡后再进行下一级荷载

的施加。根据初始地应力场施加过程中模型内部部分测点典型分级加载曲线(靠近模型隧道中心 9 cm 处的一处测点单元测试结果, 图 12)得知, 在加载的过程中, 加载的初期, 模型材料本身有一个压密过程, 围岩内部的应力传递在时间和空间上也有一个调整过程, 荷载施加后若均匀传递至整个模型内部, 需要大约 1~2 h, 这也是采用分级加载的主要依据, 此外, 3 个方向的加载板按比例、分级轮流加载, 有利于准确控制加载至设计应力水平, 也可以避免由于某一方向发生较大的变形导致测试元件的损坏失效。

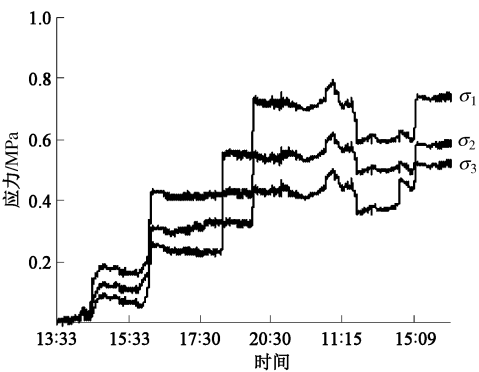


图 12 模型典型加载特性曲线

Fig. 12 Characteristic curves of loading on model

3 应用实例

3.1 围岩变形与应力观测试验概况

试验目的之一是通过三维物理模拟试验, 获得柔性支护条件深部软岩巷道围岩变形与应力演化规律。模拟对象为平顶山煤业集团四矿某轨道下山, 巷道埋深为 800~1050 m。断面为直墙半圆拱形, 宽 4.2 m, 高 3.0 m。巷道沿煤层顶板掘进, 顶、底板及两帮围岩主要为泥岩、砂质泥岩和煤。

包含数字照相变形量测的物理模型试验系统布置如图 13 所示。模型铺设尺寸为 1.0 m×1.0 m×1.0 m, 几何相似比取 $C_L=30$ 。根据模型强度的相似要求和砂子和石蜡质量配比试验, 选用 100:2.5 (单轴抗压强度 0.33 kPa) 和 100:3 (0.62 kPa) 的配比来分别模拟煤层和顶底板泥岩, 采用气囊模拟巷道柔性支护, 施加气压 $p=10\text{ kPa}$ 模拟实际 0.4 MPa 的支护阻力。模型采用分层多次碾压成型, 巷道开挖采用小型自制电动钻机, 按 800 m 埋深进行加载计算, 将顶部荷载和侧压分成均等六级, 逐步加载。量测内容包括围岩内部应力和巷道周边位移, 内部应力采用自制应变砖量测, 表面围岩位移采用数字照相量测技术, 数码相机为佳能 5D, 图像分辨率为 1280 万像素, 图像变形分析采用 PhotoInfor 软件系统。

3.2 围岩变形数字照相量测

图 14 为两张破坏前后的试验图像, 图像比例约为

0.17 mm / pixel。在序列图像分析中,利用 PhotoInfor 的散点功能来计算分析巷道顶、底板及帮部不同深度测点在开挖过程中的位移变化规律。



图 13 巷道模型试验系统布置图

Fig. 13 Experimental configurations of roadway model tests



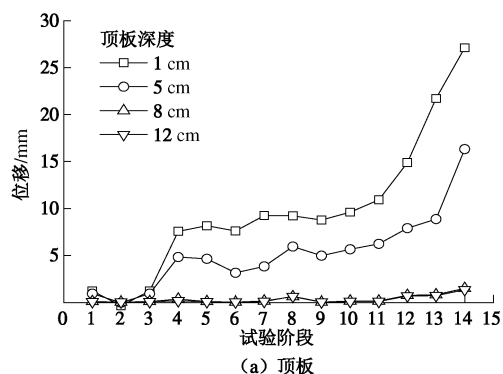
(a) 变形前

(b) 变形后

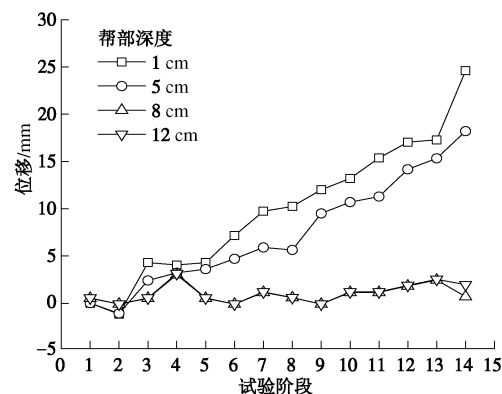
图 14 模型变形前后的两幅照片

Fig. 14 Photos before and after roadway deformation

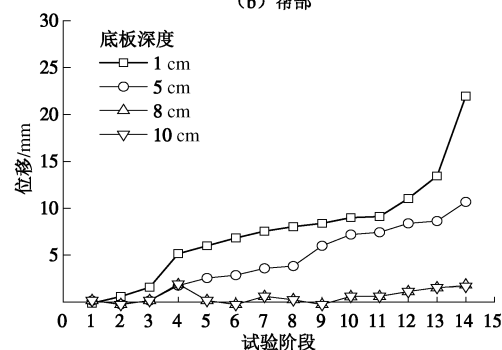
开挖支护过程中围岩不同深度的位移曲线如图 15 所示,可以看出:①开挖过程中,巷道表面位移增长较快,约 4~6 mm;②施加支护后,由于开挖过程中浅部围岩的松动,围岩位移继续平稳增长,但速率减缓,围岩周边集中应力向深部迁移,支护承受的压力有所降低;但随着支护后的继续加载,巷道表层围岩位移有继续增长趋势;③深部围岩因集中应力的迁移而发生位移,在 5 cm 深度处的围岩位移约为 10~18 mm;围岩变形范围主要集中在离巷道周边 8 cm(相当于实际 2.4 m,与巷道一测站帮拱底部的实测最大值 2.4~2.5 m 基本吻合)范围内,因为浅部围岩因支护施加得到加固,巷道周边破裂岩体承载结构进一步形成,从而控制了深部围岩的变形及其稳定性。



(a) 顶板



(b) 帮部



(c) 底板

图 15 不同深度的围岩位移曲线

Fig. 15 Curves of displacements of surrounding rock at different depths

3.3 围岩应力量测分析

从模型加载到巷道破坏的围岩全程应力变化曲线如图 16 所示,应变砖测点位于距巷道表面 3.0 cm 处的围岩内部。总体而言,在加载及开挖过程中,围岩最大与最小主应力有着基本一致的变化趋势:①加载开始期间,因应变片贴片过程中存在应力集中或贴片密实性使得应力量测结果有所不同,但在模型材料压实后表现出变化趋势一致的特点;②在开挖阶段,由围岩应力的下降可以看出相应部位出现卸荷区,其中,顶板与两帮下降约 0.3~0.6 MPa,巷道附近围岩表现出典型的开挖卸荷特征;③巷道支护后,巷道周边围岩的应力升高,通过围岩与支护的相互作用,围岩应力进行重新分布,其中底板和两帮表现最为明显,较小的支护力 (0.01 MPa) 提升了较大的围岩应力 (0.4 MPa)。巷道围岩表现出由于支护的及时作用和破裂围岩二次稳定结构形成,出现应力升高现象,显示出及时支护对于改善围岩应力状态和围岩稳定性控制的显著作用。

3.4 围岩分区破裂现象再现^[15]

利用本试验系统还多次观测到具有类似围岩分区破坏特征和剪切滑移的现象。如图 17 所示,试验结束后的模型切片显示,围岩出现多条环形破裂缝,且自里向外呈层状递增,巷道左、右帮分层数目不完全相同,但破坏范围大致相同,另外,底板具有明显的剪切滑移

痕迹。无支护情况下, 巷道四周均出现了较大范围的破坏。通过分析发现, 高应力条件下开挖引起的偏应力和能量急剧释放是引起深部巷道变形破坏的基本原因。在无支护或支护力较小时, 深部巷道围岩破坏表现出特有的分区破裂的现象(张应力为主的混合控制破坏机制), 而在较强的外部支护作用下, 围岩内部剪切滑移变形则占主导地位。因此, 可认为深部隧(巷)道分区破裂主要是剪切和张拉破坏共同作用的结果。

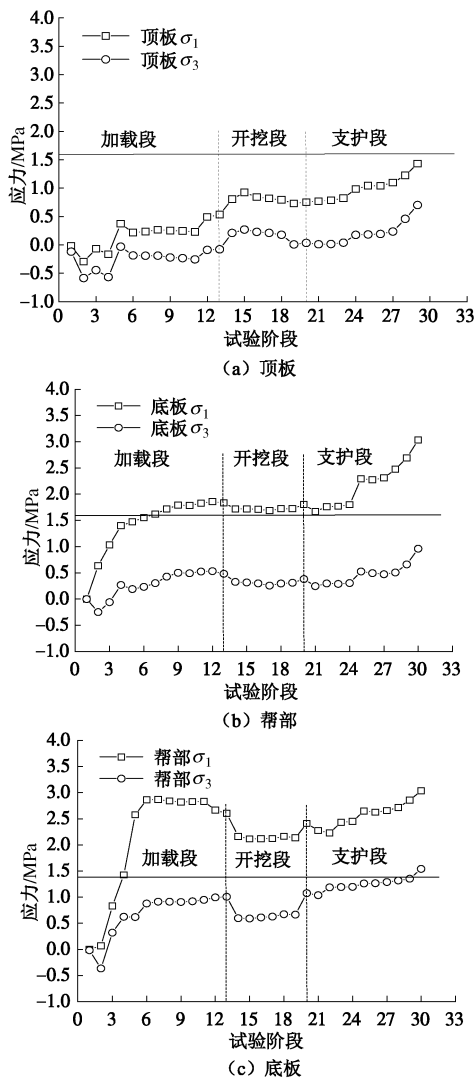


图 16 巷道围岩应力 - 时间变化曲线

Fig. 16 Curves of rock stresses at different test time

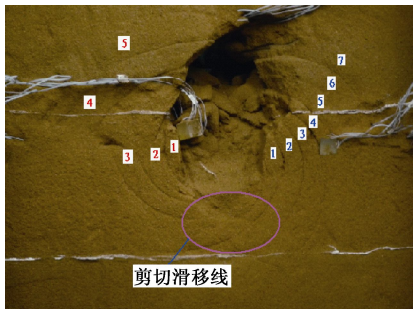


图 17 深部巷道围岩分区破裂与剪切滑移现象

Fig. 17 Zonal failure phenomenon of deep surrounding rock mass

国内外学者在有关分区破裂方面取得了许多研究成果, 但目前对分区破裂形成的充要条件、变形特征及演化机制的实验研究仍然较少, 岩体强度峰值后的破裂模式、分区破裂化条件以及变形、应力演化过程等问题值得深入研究。当围岩出现分区破裂时, 现有的支护形式、支护范围、支护时机与支护材料特性等都需要重新审视, 例如: 锚索的长度是不是仅需控制浅部 2~3 层破裂范围, 注浆位置是不是应在分区破裂环形缝处, 且为多层多次注浆, 深部破裂缝是不是不应控制以便于应力转移等。本文研制的试验系统可以用于进一步研究深部巷道围岩的破坏机制、力学行为和不同支护在巷道开挖过程中的平衡协调作用, 同时, 对形成深部巷道的支护设计理论具有重要的理论和现实意义。

4 结 论

针对深部隧(巷)道大型真三轴模拟试验需求, 自行研制了框架式物理模拟试验系统。该系统由反力框架、加卸载系统、受力变形测试系统和辅助开挖支护装置系统构成。

(1) 试验系统实现了三向大范围加载, 可模拟千米以上埋深隧(巷)道; 根据工程情况分别调控各向加载应力, 有效解决了地质力学模型试验中要求应力场变化范围大的技术难题, 能较好地模拟地下工程的复杂受力环境。

(2) 试验系统为结构紧凑、占用空间小的框架式结构, 加载装置采用了活塞式均布液压扁油缸压力加载器, 较好地解决了柔性囊加载行程偏小、强度偏低的技术难题。

(3) 研制了用于测量模型围岩应力的应变单元计和应变砖, 结合采用自行研制的大变形数字照相量测技术, 很好地解决了模型内部的应力量测与表面位移的高精度测量难题。

(4) 试验应用结果表明, 采用本套配备自行研制的应力与变形量测技术以及开挖支护装置的试验系统, 可为研究包括 TBM 隧道在内的深部隧(巷)道的围岩变形与应力分布规律及其支护控制作用机理等提供重要的研究平台。

参考文献:

[1] 李仲奎, 徐千军, 罗光福, 等. 大型地下水电站厂房洞群三维地质力学模型实验[J]. 水利学报, 2002(5): 31 - 36. (LI Zhong-kui, XU Qian-jun, LUO Guang-fu, et al. 3-D geo-mechanical model test for large scaled underground hydropower station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(5): 31 - 36. (in Chinese))

- [2] 李仲奎, 卢达溶, 中山元, 等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(9): 1430 - 1436. (LI Zhong-kui, LU Da-rong, NAKAYAMA H, et al. Development and application of new technology for 3d geo-mechanics model test of large underground houses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(9): 1430 - 1436. (in Chinese))
- [3] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型实验台的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3727 - 3731. (JIANG Yao-dong, LIU Wen-gang, ZHAO Yi-xin. Design and development of a new type of triaxial system for roadway model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3727 - 3731. (in Chinese))
- [4] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 岩土工程多功能模拟试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 372 - 378. (CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Development and application of multifunctional apparatus for geotechnical engineering model tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 372 - 378. (in Chinese))
- [5] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(22): 3785 - 3789. (CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Application study on the geomechanical model experiment techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(22): 3785 - 3789. (in Chinese))
- [6] 朱维申, 李勇, 张磊, 等. 高地应力条件下洞群稳定性的地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(7): 1308 - 1314. (ZHU Wei-shen, LI Yong, ZHANG Lei, et al. Geomechanical model test on stability of cavern group under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1308 - 1314. (in Chinese))
- [7] 朱维申, 张乾兵, 李勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1): 1 - 7. (ZHU Wei-shen, ZHANG Qian-bing, LI Yong, et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true 3D loading condition and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [8] 张强勇, 李术才, 尤春安, 等. 新型组合式三维地质力学模型试验台架装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 143 - 148. (ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, YOU Chun-an, et al. Development and application of new type combination 3D geomechanical model test rack apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 143 - 148. (in Chinese))
- [9] 张强勇, 李术才, 郭晓红. 组合式地质力学模型试验系统及其在分岔隧道工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(9): 1337 - 1343. (ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, GUO Xiao-hong. A combined geomechanical model test system and its application in a bifurcation tunnel project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(9): 1337 - 1343. (in Chinese))
- [10] 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. (YANG Li-yun, YANG Ren-shu, MA Jia-hui, et al. Development of a model test system for deep mine construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1425 - 1431. (in Chinese))
- [11] 李元海, 靖洪文, 曾庆友. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(2): 3859 - 3866. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZENG Qing-you. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3859 - 3866. (in Chinese))
- [12] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道相似模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1684 - 1690. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, LIU Gang, et al. Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1684 - 1690. (in Chinese))
- [13] 龚秋明, 余祺锐, 侯哲生. 高地应力作用下大理岩岩体的TBM掘进试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12): 2522 - 2532. (GONG Qiu-ming, SHE Qi-rui, HOU Zhe-shen. Experimental study of TBM penetration in marble rock mass under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(12): 2522 - 2532. (in Chinese))
- [14] 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. (ZHANG Qian-bing, ZHU Wei-shen, SUN Lin-feng, et al. Application of digital photogrammetric techniques in 3D model tests on large caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 447 - 452. (in Chinese))
- [15] 陈坤福. 深部巷道围岩破裂演化过程及其控制机理研究与应用[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))