



移动阅读

娄金福,高富强,李建忠,等.采场模型试验应力(压力)测量系统研制及应用[J].煤炭学报,2019,44(S1):31-40.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0564

LOU Jinfu,GAO Fuqiang,LI Jianzhong,et al.Research and application of stress (pressure) measurement system for physical modeling[J].Journal of China Coal Society,2019,44(S1):31-40.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0564

## 采场模型试验应力(压力)测量系统研制及应用

娄金福<sup>1,2,3</sup>,高富强<sup>1,2,3</sup>,李建忠<sup>1,2,3</sup>,杨景贺<sup>1,2,3</sup>,王晓卿<sup>1,2,3</sup>,雷顺<sup>1,2,3</sup>

(1.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013; 2.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013; 3.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

**摘要:** 依托自主研发的采场模型试验系统,研制了与之配套的低扰动、高精度、高效率应力(压力)测量系统,包括工作面超前支承压力监测系统、顶板支护模拟系统和等弹模弱扰动模型应力监测系统 3 部分。测量系统标定结果表明,超前支承压力监测系统输出值稳定,受载与输出值线性度高;顶板支护模拟系统基于液压控制原理,具有线性度高、重复性好、力学性能稳定等优点;模型应力测试块体与模型材料力学性能匹配、变形协调性好,防潮绝缘特性适应模型铺设及养护期间的潮湿环境。采场模型试验应用效果表明,整套测量系统采样精度高、测试效率高,具有良好的长时可靠性;能够得到覆岩采动应力场的演化特征,可以开展顶板来压特征、支架与顶板相互作用关系研究,为深入阐释采动应力场与覆岩破断形态的关联性研究提供试验依据。

**关键词:** 模型试验; 应力监测系统; 支承压力监测系统; 顶板支护模拟系统

**中图分类号:** TD326 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2019)S1-0031-10

### Research and application of stress (pressure) measurement system for physical modeling

LOU Jinfu<sup>1,2,3</sup>,GAO Fuqiang<sup>1,2,3</sup>,LI Jianzhong<sup>1,2,3</sup>,YANG Jinghe<sup>1,2,3</sup>,WANG Xiaoqing<sup>1,2,3</sup>,LEI Shun<sup>1,2,3</sup>

(1.Coal Mining and Designing Department,Tiandi Science and Technology Co.,Ltd.,Beijing 100013,China; 2.Coal Mining and Designing Branch,China Coal Research Institute,Beijing 100013,China; 3.State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization,Beijing 100013,China)

**Abstract:** A low-disturbance,high-precision,and high-efficiency measuring system has been developed for a newly-built physical modeling system,and its three component modules have been developed and calibrated on basis of instrumentation data.The calibration results show that the abutment pressure test modulus has stable output.The roof support modeling module is of high linearity,reliability and stable mechanical property.The stress test bricks have good consistency with modeling materials in the aspect of mechanical properties,compatibility of deformation,and its characteristics of moisture-proof and insulation can meet moist model-making condition.The application results indicate that the whole measurement system can provide high precision testing data,efficient sampling works and long-term reliability.The application of this measuring system along with physical modeling system can achieve the evolution of mining-induced stress field and roof weighting prediction,and an enhanced understanding of the interaction between roofs and supports.The key findings could demonstrate the relevance between mining-induced stress and overlying strata breaking.

**Key words:** physical modeling; stress test module; abutment pressure test module; hydraulic support modeling module

相似模型试验是以相似理论、因次分析为理论基础的研究方法。在煤矿开采领域,采场模型试验已成

为覆岩运移破断规律、顶板来压特征、采场支护设计的重要研究手段,“砌体梁”理论、关键层理论、覆岩

“三带”理论、基本顶 O-X 型断裂规律等经典的矿压理论均通过模型试验得以验证<sup>[1-3]</sup>。

多年来采场模型试验技术取得了长足的发展,但由于试验台主体结构的强度、刚度、边界加载和模型测试技术等多种因素制约,目前采场模型试验多采用几何相似比 1:100 以下(最小为 1:600)的中小型试验台<sup>[4-7]</sup>。模型边界的加载方式、加载精度、长时稳压等加载性能不能严格满足应力相似条件。此外,由于几何相似比小,测试误差会被异常放大,降低了测试结果的相似性与可信度。

笔者所在的国家重点实验室结合近年来厚煤层、大采深、大倾角等复杂难采煤层的科研与工程需求,研制了新型采场模型试验系统<sup>[8]</sup>。与中小型试验台相比,模型的几何相似比、应力相似比等关键指标显著提高,导致模型材料的弹性模量、强度、脆性等力学指标相应提高。试验台采用液压伺服控制加载,模型边界条件按照实测地应力的相似换算值进行分级加载。前期方案论证认为,模型体变形、位移、内部应力等指标的测试难度较大,以往基于中小型模型试验积累的测量方法、测量精度及传感器选型经验,不能完全满足大比尺模型试验的测试要求。从测量精度、可靠性、测试效率等方面考虑,急需研发与之相配套的测量系统。

## 1 应力(压力)测量系统的研制思路

### 1.1 采场模型试验系统简介

试验系统主体结构包括组合式承载框架、垂直及水平双向加载系统、高精度伺服控制系统和框架旋转定位系统。模型铺设长度可根据试验需要进行调整,可容纳模型尺寸为 5 m(2.3~4 m)×2 m×0.4 m,模拟采深可达 2 000 m 以深,模拟地层倾角 0°~60°,满足近水平、缓倾斜、急倾斜等煤层条件。试验系统外观结构详见本文的应用案例。

### 1.2 测量系统组成及研制思路

以该采场模型试验系统为依托平台,围绕工作面超前支承压力、顶板压力监测与支护响应、内部应变(应力)监测等方面,研发与模型试验系统相匹配的低扰动、高精度、高效率应力(压力)测量系统,具体组成如图 1 所示。

研制思路是,首先通过力学计算进行传感器选型,然后通过样机标定检验各系统设计原理与选型的合理性,最后通过采场模型试验进行可靠性验证,确保测量系统满足模型试验要求。

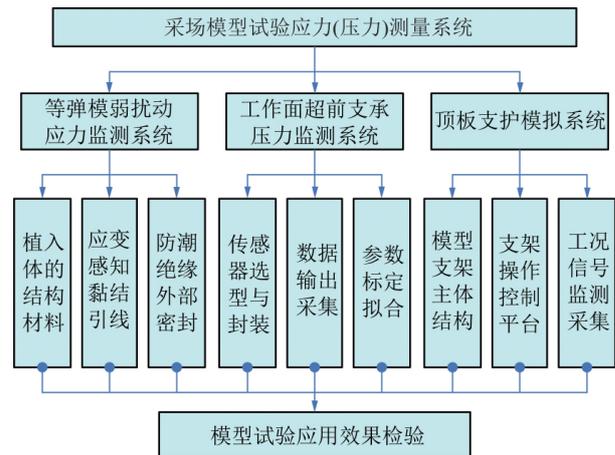


图 1 应力(压力)测量系统组成

Fig. 1 Stress (pressure) measurement system

## 2 工作面超前支承压压力监测系统

国内采场试验台曾在模型底部布置称重传感器,以测定底板压力及超前支承压力的变化规律,取得了较好的测试效果<sup>[9]</sup>。大比尺模型试验对于传感器的量程、线性度、偏载力影响、防潮密封等提出了更高的要求,通过对比各类测力传感器的工作特性与适应条件,确定选用 S 形剪切梁传感器,它主要由承载弹性元件、电阻应变计、密封外壳以及压头组成。其工作原理:当弹性元件在外载荷的作用下产生应变时,应变计电阻发生相应的改变,通过惠斯顿电桥将信号传输至应变仪,通过配套软件直观显示各测力装置的实时承载情况。

### 2.1 测力计布置方案

模型长度 5 m,宽度 400 mm,在模型底部铺设测力计,用于测试工作面超前支承压力及底板压力变化过程。为了尽可能增加测点数量,提高测试结果准确度,测力计宽度取 50 mm 和 100 mm 的 2 种规格。其中:①在两侧边界宽度各 1 m 的预留煤柱区域,安装宽度 100 mm 的测力计,计 20 台;②在中部 3 m 的开采区域内,安装宽度 50 mm 的测力计,计 60 台。如图 2 所示。

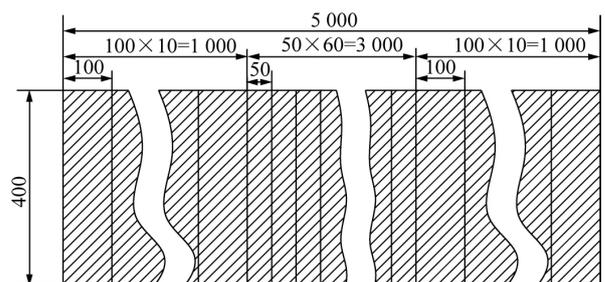


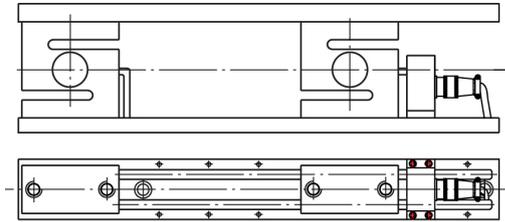
图 2 测力计布置方案示意(总计 80 台)

Fig. 2 Layout scheme of load cells (80 pieces in total)

### 2.2 测力计结构及选型

根据试验台设计方案,模型顶部边界的最大加载面力为 2.1 MPa。在 1/20 的几何相似比条件下,该加载能力满足 2 000 m 以深的深部开采模拟需求。当测力计承载面尺寸为 400 mm×100 mm 时,模型初始平衡后测力计最大初始承载值为 400 mm×100 mm×2.1 MPa=8.4 t。同理,承载面尺寸为 400 mm×50 mm 时,测力计最大初始承载 4.2 t。

根据大采高工作面矿压实测结果,超前支承压力通常为原始应力的 1.5 倍以上。为了使测力计完整记录采动应力的变化过程,其量程须高于超前支承压力峰值,以上测力计量程分别取 12.6 t。测力计结构原理及样机如图 3 所示,技术指标见表 1。



(a) 结构原理



(b) 样机

图 3 测力计结构原理及样机

Fig. 3 Design sketch of the load cell and prototype

表 1 测力计技术指标

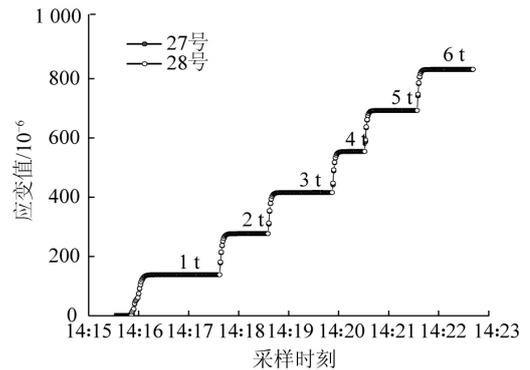
Table 1 Technical parameters of load cell

技术指标	技术参数	技术指标	技术参数
线性度 /%FS	0.1	绝缘电阻 /( $M\Omega \cdot 100 V^{-1}$ )	$\geq 2\ 000$
重复性 /%FS	0.05	工作温度 / $^{\circ}C$	-35~+80
滞后 /%FS	0.1	安全过载 /%FS	120
零点输出 /%FS	0~±1	分辨率 /%FS	0.01

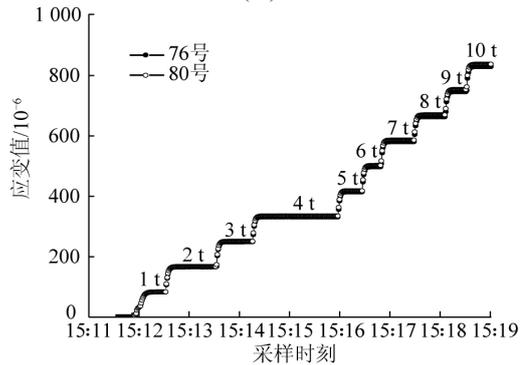
注: %FS 指满量程精度。

### 2.3 测力计标定

采用 BMJ-100 叠加式力标准机进行测力计的承载与输出响应标定。标定采用逐次分级加载方式,加载梯度为 1 t/次,每次加载至目标值后稳定 60~120 s。标定结果表明,测力计各级输出值稳定性好,2 种规格测力计标定时程曲线如图 4 所示。



(a) 量程6 t

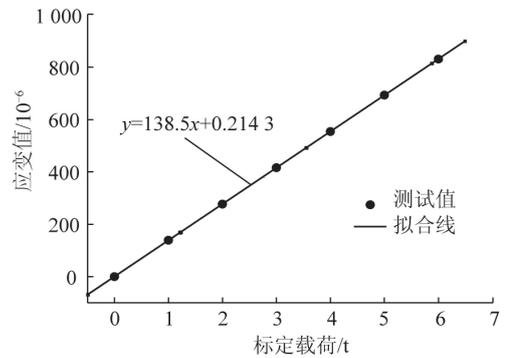


(b) 量程12 t

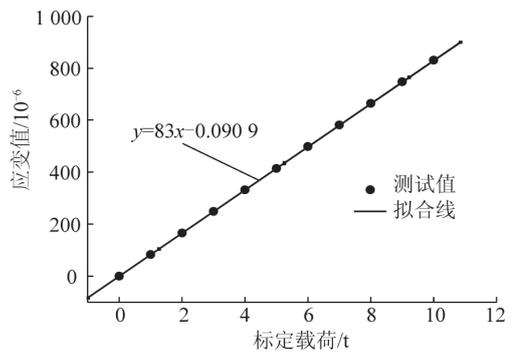
图 4 测力计标定曲线

Fig. 4 Calibration curves of load cells

测力计标定结果及数据拟合曲线如图 5 所示。由图 5 可知,测力计各级输出值与外载具有良好的线性关系,相关系数均大于 0.99。



(a) 量程6 t



(b) 量程12 t

图 5 标定结果拟合分析

Fig. 5 Fitting analysis of calibration data

### 3 顶板支护模拟系统

以模型支架为主体的支护模拟系统是采场模型试验的重要测试装置,其机械结构、力学性能的相似性及可靠性对测试结果有重要影响。目前采场支护模拟系统多采用螺旋调节、手动加载等工作原理<sup>[10-12]</sup>,这与液压支架的机械结构及液压支护原理有显著区别,已成为制约采场模拟试验量化分析的瓶颈。笔者团队充分借鉴支架模拟系统的结构原理,从机械结构、液压控制、信号采集等方面进行优化设计,研制了新型采场支护模拟系统,包括模型支架、泵站动力系统、液压控制装置、支架工况监测装置和信号处理系统。

#### 3.1 系统各组成结构

支架机械部分包括顶梁、立柱和底座,如图 6 所示。工况监测装置包括位移和油压传感器,同步采集顶梁位移、立柱油缸出力等指标,所测信号输入信号处理系统,传感器技术参数见表 2。

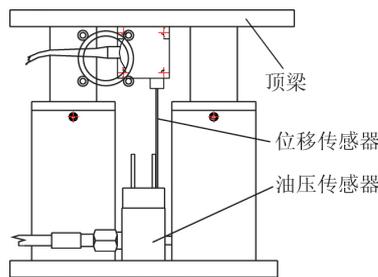


图 6 模拟支架结构与样机

Fig. 6 Design sketch and prototype of support model

表 2 支架传感器参数

Table 2 Sensor parameters of support model

传感器类别	型号	灵敏度 / (mV · V <sup>-1</sup> )	测量范围	线性 度 /%	重复 性 /%
位移传感器	5G201	1.93	0~50 mm	0.14	0.32
油压传感器	AK-1	1.138	0~5 MPa	0.07	0.12

泵站动力系统包括定量泵、先导式溢流阀、液压表和油箱。定量泵入口与油箱连接;出口连接先导式溢流阀和液压表,通过液压控制装置与立柱缸体连接。模拟系统总体结构及应用场景如图 7 所示。

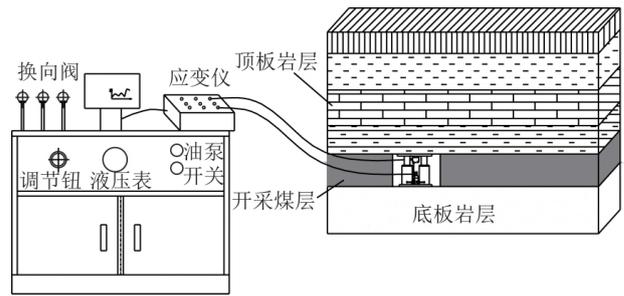


图 7 模拟系统结构和应用示意

Fig. 7 Schematic of roof-supporting modeling system

#### 3.2 系统标定

采用图 8 所示的自研装置标定模拟支架,每个支架采用同样的方法重复标定 3 次。整理数据得到支架的“立柱油压—输出载荷”标定曲线,如图 9 所示。标定结果表明,立柱油压与支架输出载荷保持良好的线性关系,相关系数达 0.99;重复标定表明,各支架力学性能稳定,测试数据重复性好。



图 8 模拟支架标定装置

Fig. 8 Calibration device for support model

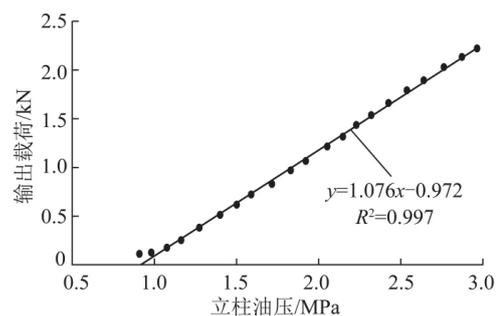


图 9 模拟支架标定曲线

Fig. 9 Calibration curve of support model

### 4 等弹模弱扰动模型应力监测系统

目前模型内部应力多采用压力盒埋入式测量方法,由于传感器偏大、与相似材料弹性模量不匹配等问题,壳体及引线对模型原始应力场扰动大,影响测量精度和稳定性。近年研究结果表明,采用柔性橡胶、相似材料制块等方法<sup>[13-15]</sup>,可减小壳体及引线对模型应力场的扰动,提高两者弹性模量的匹配性。但

由于相似材料湿度大,应变块防潮与封装工艺难度较大,如果处理不当,将影响测试结果的准确性。

鉴于相似材料制块在模型体应力测试中的优势,研制之初确定采用相似材料制块嵌入测试方法。其测试原理:在模型的相应层位埋设尺寸为 40 mm×40 mm×25 mm 的相似材料应变块,由于应变块与所在层位的材料配比完全相同,试验过程中应变块与周边材料会产生同步协调变形,通过应变片的读数可得测点的应力变化情况。相似材料应变块应力测试方法主要工艺流程包括应变块的坯体制作、贴片引线、防潮绝缘、裹沙封装等工艺环节,以下重点阐述贴片

引线及防潮绝缘等优化工艺。

#### 4.1 应变片选型及贴片工艺

应变块的敏感元件选用应变片。其测量原理:当模型内置应变块受到周围模型体的变形作用后,粘贴在块体表面的应变片产生“应变效应”,引起电阻值发生相应的变化。根据前期调研,目前常用的应变片分为丝式、箔式、半导体、薄膜和厚膜等 5 大类。根据相似材料应变块的坯体材质及表现特征,对比不同应变片的适宜工况及性价比,确定选用 BX120-20AA 箔式应变片,其优点是性能稳定,适应温度范围宽,已广泛用于测力、称重传感器。应变片参数见表 3。

表 3 箔式应变片参数

Table 3 Technical parameters of foil strain gauge

型号	电阻/ $\Omega$	灵敏度系数	最大微应变/ $10^{-6}$	基长×基宽/mm	栅长×栅宽/mm	丝栅材料	适应温度/ $^{\circ}\text{C}$
BX120-20AA	120.0±0.3	2.08±0.01	20 000	25.5×5	20×3	康铜	-20~+80

为保证应变片基底与坯体均匀粘结,应选择无色透明、低黏度、快速固化的胶黏剂。通过对比 502, 914 和 495 等多种单(双)组分胶黏剂的黏结机理与固化时效,确定选用 495 胶黏剂,其干燥后弹性模量介于应变片基底材料和相似材料之间,能够准确传递应变块的形变过程。

#### 4.2 应变片引线的选型

模型开挖后上覆岩层会发生破断垮落等岩移过程,应避免应变块的引线对于模型块体回转失稳等位态的干扰。为了获得模型应力场的分布特征,模型内置测点较多,如果导线直径较粗,容易产生“加筋效应”<sup>[16]</sup>,干扰破断块体的运动,甚至影响覆岩破断结构特征。为此,在保证引线信号传输的前提下应尽可能降低导线外径。

设计初期曾经采用漆包线,其优点是外径极细,植入模型体内不会产生“加筋效应”;不足是韧性差,尤其当模型植入导线较多时,引出导线容易弯折、缠绕,且漆皮颜色单一,外观可辨识度差,在前期的模型试验中线路梳理困难,增加了线路故障的排查难度。

综合考虑模型试验对引线线径、抗磨损、耐折性等的要求,调研其他行业的应用效果,确定选用特氟龙导线,其外套采用抗折、耐磨的聚四氟乙烯材料,外径 0.5 mm,标称截面 0.05 mm<sup>2</sup>,采用该导线能尽可能避免“加筋效应”,引线参数见表 4。

#### 4.3 防潮绝缘工艺

在模型铺设期间,相似材料含水率约 8%~10%,为避免浸水软化,块体须具有较好的防潮性能,因此块体表面需进行防潮处理。在借鉴土工模型试验防

潮工艺的基础上,研究团队研制了苯—烯型双组分防潮液。待块体干燥成型后,在块体表面均匀涂刷防潮液,1.5~2 h 后块体外表面形成一层薄膜。如此处理 4~6 次,块体外覆涂层厚度满足防潮要求。应变块的制作与埋设工艺如图 10 所示。

表 4 应变块引线参数

Table 4 Technical parameters of guide wire

型号	标称截面/mm <sup>2</sup>	线套材料	导线外径/mm	直流电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )
AF-250	0.05	聚四氟乙烯	0.5	370

## 5 高精度测量系统的应用案例

为了验证整套测量系统的可靠性,以晋城寺河矿西二盘区 W2302 大采高综采工作面为工程背景,依托大比例尺采场模型试验系统制作了 1 架几何相似比 1/40 的采场相似模型,模型开挖期间采用该测量系统同步跟踪模型各监测指标的实时响应。

### 5.1 模型试验方案

#### 5.1.1 大采高工作面开采地质条件

W2302 工作面开采 3 号煤层,平均厚度 6.2 m,倾角 4°。地应力实测表明,最大水平主应力 13.10~17.89 MPa,基本平行于工作面推进方向;最小水平主应力 6.77~9.45 MPa;垂直主应力 11.55~13.76 MPa。工作面设计采高 6.0 m,顶板支护采用 ZY12000/28/62 型液压支架。

#### 5.1.2 主要相似指标的确定

在确定各相似指标时,首先需结合试验台高度、

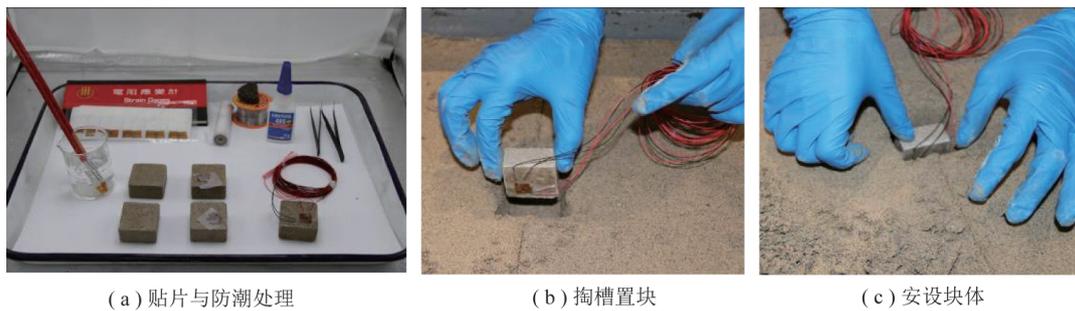


图 10 相似材料应变块制作与埋设工艺

Fig. 10 Making process and burial of strain test block

煤层厚度、裂采比等因素,确定几何相似比。根据现场实测及周边矿井工程类比,裂采比取 1:10。

W2302 工作面割煤高度为 6 m,为保证模拟范围包含覆岩裂隙带,模型几何相似比取 1/40,主要相似指标如下:

几何相似比:  $C_L = 15 \text{ cm}/6 \text{ m} = 1/40$

容重相似比:  $C_\gamma = 1.8 (\text{t}/\text{m}^3) / 2.5 (\text{t}/\text{m}^3) = 0.72$

应力相似比:  $C_\sigma = C_L C_\gamma = 0.018$

时间相似比:  $C_t = (C_L)^{0.5} = 0.158$

### 5.1.3 模型边界加载方案

W2302 工作面最大水平主应力基本平行于推进方向,最大水平应力取 13.10~17.89 MPa 的平均值,即 15 MPa。根据应力相似条件,模型边界水平应力  $\sigma_H = 15 \text{ MPa} \times 0.018 = 0.27 \text{ MPa}$ 。同理,垂直主应力取 11.55~13.76 MPa 的平均值,即 12.5 MPa,模型顶部垂直应力  $\sigma_V = 12.5 \text{ MPa} \times 0.018 = 0.23 \text{ MPa}$ 。

模型初始平衡采用分级加载,待前一级加载稳定后再开始下一级加载,直至满足上述应力边界条件,形成模型初始应力场。模型开挖期间采用伺服控制系统保持上述边界条件,整套试验系统及模型开挖场景如图 11 所示。

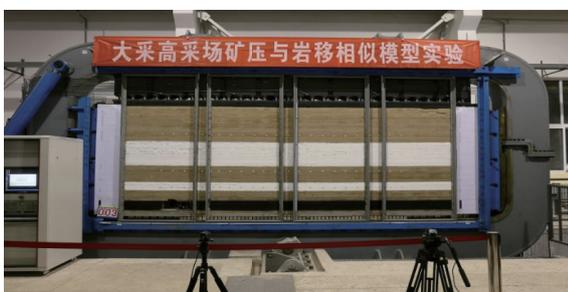


图 11 测量系统应用案例

Fig. 11 An application case of measurement system

### 5.1.4 模型监测方案

制定试验方案之初,基于岩层控制的关键层理论,判定厚度 6 m 和 17 m 的细砂岩分别为亚关键层 1 和亚关键层 2,亚关键层 2 破断后将引起覆岩大范

围垮断<sup>[17]</sup>。监测方案重点关注亚关键层 2 的应力与运移特征,并从模型体内部应力、支承压力、模拟支架工况等 3 个方面全程跟踪覆岩响应特征。

在上述关键层中共布置 2 条应力测线,每条测线包含 9 个内置应变块,应变块间距 500 mm,应变块结构与埋设工艺如前文所述。在支架承载方面,采用 4 个模型支架组成的顶板支护模拟系统,监测指标包括支架工作阻力、活柱下缩量等。模型底部由左向右依次安装 80 台测力计实时采集支承压力。模型边界条件及监测方案如图 12 所示。

## 5.2 测试结果分析

### 5.2.1 模型覆岩破断特征

模型开挖实验持续约 44 h,完成开挖循环 59 次,累计开挖 3 100 mm,观测到初次来压和 3 次周期来压。模拟结果表明,由于距离煤层较近,亚关键层 1 及下部岩层周期性折断,以悬臂梁结构形态冒落于垮落带中。随着破断回转量的逐渐减小,亚关键层 1 上部岩层破断后形成铰接结构,其与亚关键层 1 的区别在于,前者在水平约束力的作用下能够形成砌体梁传力结构,而后者及其附加层失去了后方破断块体的约束力,以悬臂梁形式周期性破断。采场覆岩破断后呈现“悬臂梁-层间岩层-砌体梁”结构。覆岩垮落终态如图 13 所示。

### 5.2.2 模型内部应力分布特征

模型内置应变块的应变增量反映测点处的应力变化情况。为便于数据对比分析,采用无量纲化处理方法,分别将测点在不同开挖时步的应变值与其初始应变值对比,将二者的比值定义为应变集中系数。鉴于各测点的弹性模量为常量,因此,各测点的应变集中系数能够反映其应力集中系数。

各测线不同开挖时步的垂直与水平应变值如图 14 所示。由图 14 可知,开挖过程中覆岩垂直、水平应变集中系数整体呈现递增趋势。上部测线 B 垂直应变的 3 个峰值递增幅度尤为明显,在其接近极限跨距即将破断时,测线的垂直应变峰值集中系数分别增

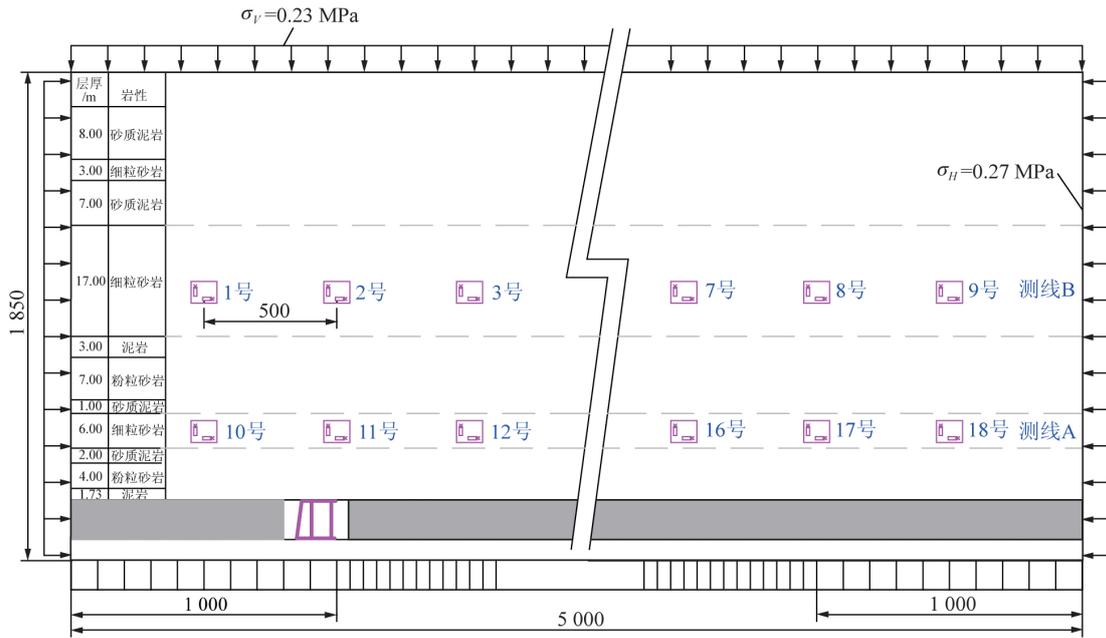


图 12 模型试验监测方案

Fig. 12 Monitoring scheme of experimental physical model

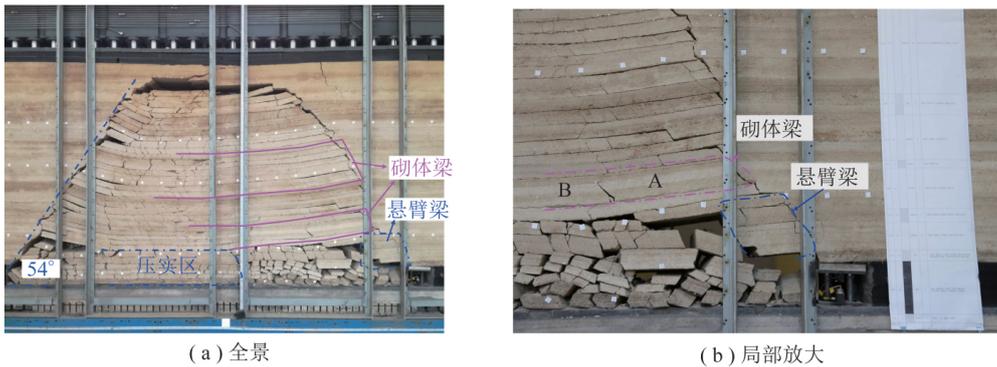


图 13 模型垮落终态

Fig. 13 Final caving morphological characteristics of the model

至 3.93 2.59 和 3.97,水平应变峰值集中系数增至 3.52 和 7.12。下排测线 A 变化趋势与之类似。

### 5.2.3 超前支承压力分布特征

在数据分析时,仍采用无量纲化的处理方法。模型底部 80 个测力计的压力变化如图 15 所示。由图 15 可知,煤体支承压力呈双峰状分布,峰值分别位于采空区后方及煤壁前方。超前支承压力峰值、影响范围随模型开挖而不断前移,应力峰值呈递增趋势,覆岩即将大范围垮断时,峰值应力集中系数为 3.03。

### 5.2.4 采动应力场演化特征

测试过程中,模型顶部及两侧等外部边界条件为常量,前面分别研究了模型内部及支承压力分布特征,综合边界条件及内部应力分布特征,可得到覆岩采动应力场的演化特征。模型不同步的垂直、水平应力场分布特征如图 16 所示。

由图 16 可知,开采初期覆岩垂直应力集中系数约 1.0~1.3,垂直应力场分布较为均匀。随着下部顶板运移破断,采空区上方应力降低区范围不断增大,垂直应力逐渐向两侧实体煤区转移,应力集中系数逐渐升高。第 39 开挖时步,6 m 细砂岩(不含)以下层位第 1 次大面积垮落,基本顶发生初次来压,两侧应力集中系数急剧升高至 3.0。此时,上排测线 B 所在的厚度 17 m 细粒砂岩成为覆岩承载主体,其两侧与中部应力集中系数达到 3.0 以上。覆岩即将大范围垮断之前,该层位应力峰值区转移至两侧,应力集中系数达到 4.0 以上。

覆岩水平应力分析表明,开采初期覆岩水平应力场分布较为均匀,水平应力峰值区主要位于开切眼上方,应力集中系数约 1.5~2.0。开挖过程中覆岩弯曲下沉、回转、水平挤压,直至形成暂时的平衡结构,该

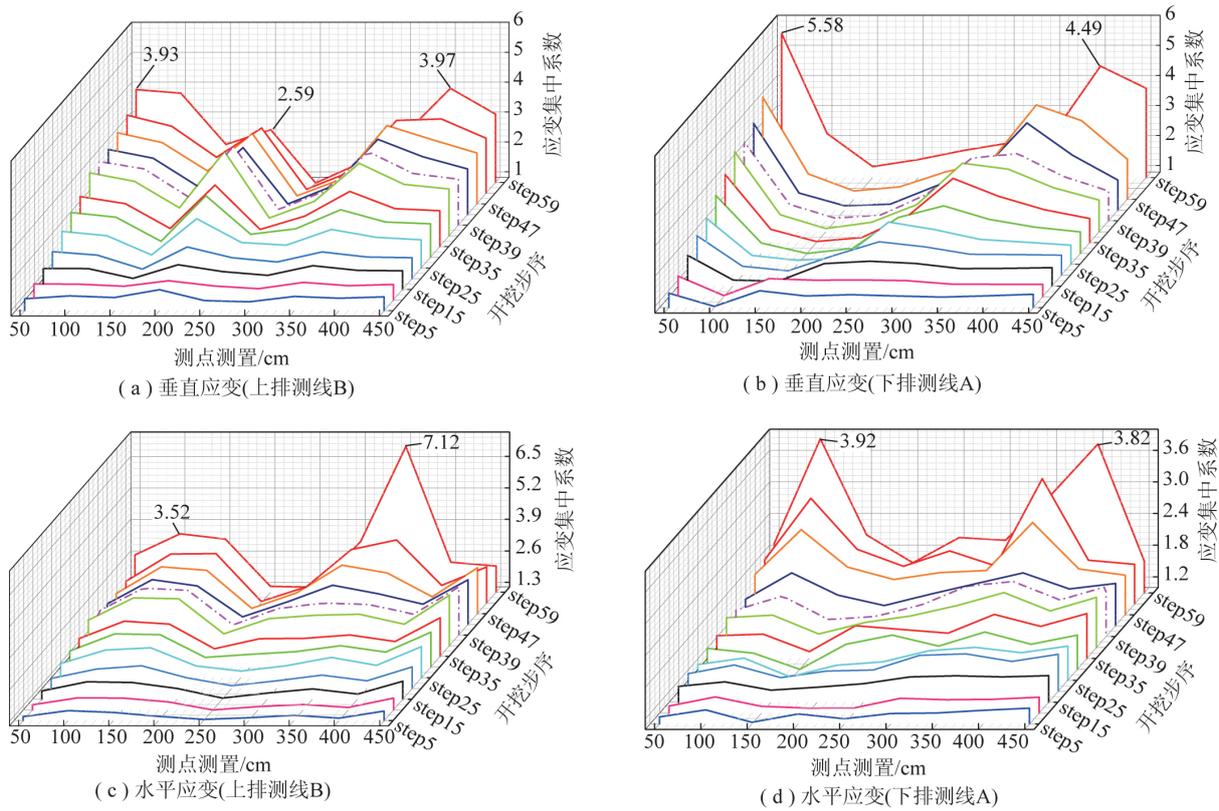


图 14 模型内部应变(力)集中系数变化过程

Fig. 14 Evolution of stress concentration factor in the physical model

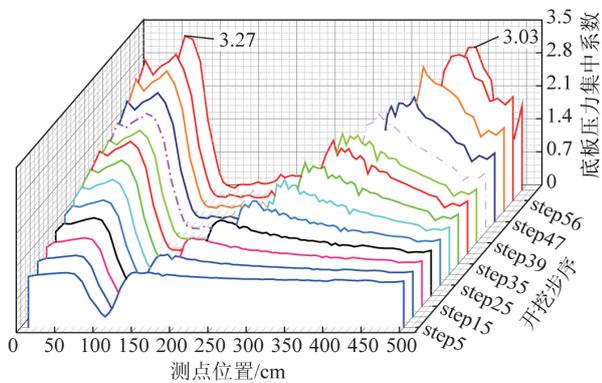


图 15 支承压力分布特征

Fig. 15 Evolution characteristics of abutment pressure

过程中覆岩水平应力重新分布,应力集中系数由局部集中变为整体均衡。后续开挖过程中伴随着下部弯曲下沉、离层等因素影响,上部关键承载岩层逐步接近极限跨距,呈两侧固支撑承载模式,顶板下沉趋势加剧,岩层中部下沉量高于两侧,岩层的倾斜角度由中间向两侧逐渐增加,水平挤压应力呈现中间趋缓、两侧集中的分布形式。两侧固支区垂直、水平应力峰值达到 4.0 以上,较高的弯曲拉应力导致岩梁中间底部、固支端顶部首先开裂,进而引发厚硬岩层的弯拉断裂。由于断前岩层中部下沉量较大,断后岩层中部首先触矸接底,岩层由中间向两侧断裂为块体,块体下沉回转过程中传递较高的水平挤压力,特别是处于

断裂边界线附近的块体,应力集中系数异常升高。其中上排测线位于断裂线附近 7 号测点,实测水平应变值  $661.74 \times 10^{-6}$ ,应变集中系数达到 28.4。

由于应力测线处于厚硬细砂岩中,因此厚硬关键层的上述应力演化过程可以概括为“端部应力集中→应力均衡→下部离层→两侧固支撑承载→弯曲下沉→回转挤压→固支端传力”。

### 5.2.5 模拟支架运转工况

模型开挖期间,顶部边界面力保持恒定值为 0.23 MPa,支架支护强度实测值为 9.0~18.9 kPa,相当于边界面力的 3.9%~8.2%,如图 17 所示。

根据相似理论换算关系,将模拟支架护顶强度折算为原型支架的工作阻力,即

$$P = pBl_k = p'/C_\sigma Bl_k = 517.8 p'$$

式中  $P$  为支架的等效工作阻力, kN;  $p$  为支架的支护强度, kPa;  $B$  为支架的中心距, 1.75m;  $l_k$  为支架的控顶距, 5.32 m;  $p'$  为模型支架护顶强度值, kPa;  $C_\sigma$  为应力相似比, 0.018。

通过上述换算,基于相似模型试验折算原型支架的工作阻力为 4 660~9 786 kN。

为了验证模拟系统与原型支架的相似性及测试结果的可靠性,取工况相似性、加权阻力、循环末阻力等作为对比指标,将模拟结果与现场支架统计数据进

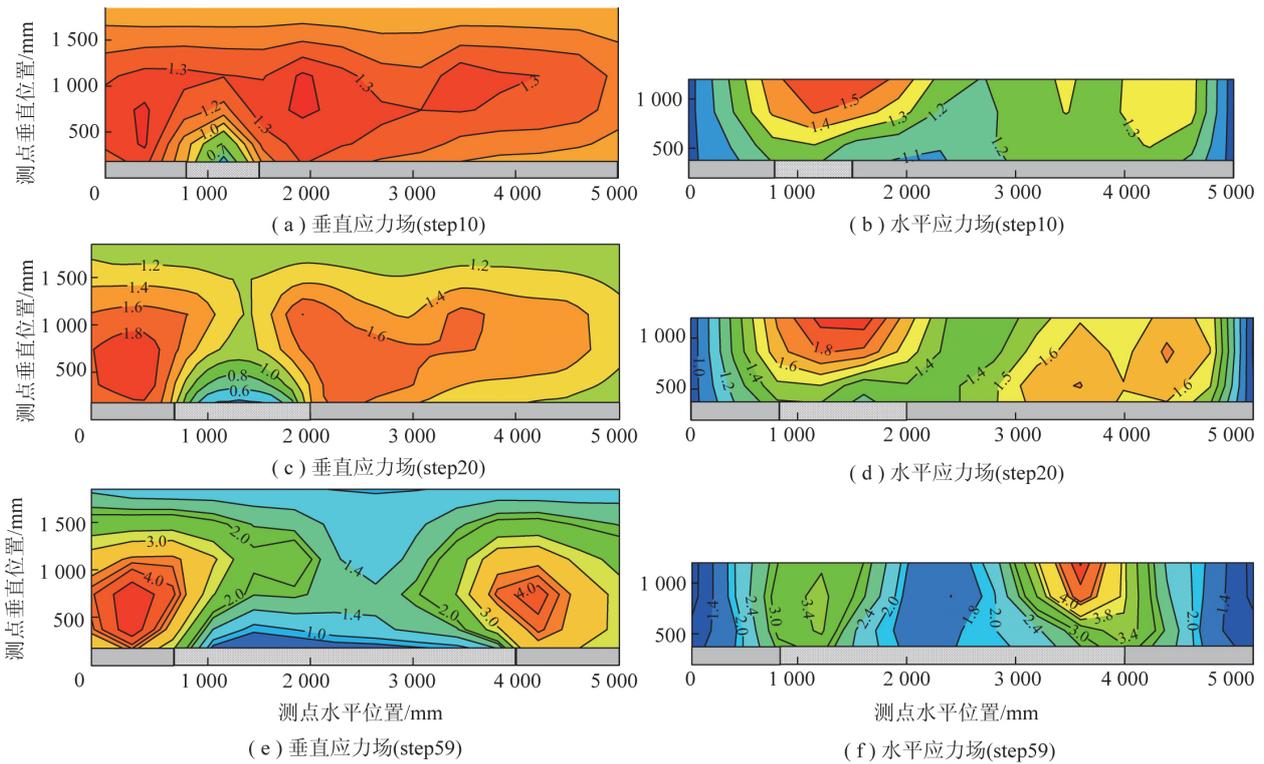


图 16 采动应力场演化特征

Fig. 16 Evolution characteristics of mining-induced stress field

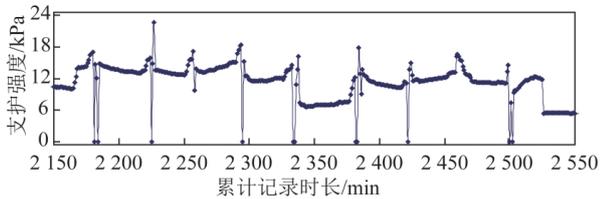


图 17 支架护顶强度

Fig. 17 Supporting intensity of support model

行对比,见表 5。两者对比发现,模拟支架与原型支架均呈现明显的增阻过程,工况曲线具有良好的相似性。模拟结果能够直观体现顶板压力的变化过程,但工作阻力、动载系数与现场数据存在误差。加权阻力上限误差 16.61%,下限误差 25.80%;循环末阻力上限误差 5.61%,下限误差 22.67%;动载系数上限误差 17.86%,下限误差 18.46%。

表 5 模型支架与原型支架的相似性分析

Table 5 Contrast analysis of prototype support vs model

对比指标	模拟支架	原型支架	相似性(误差)
工况曲线	增阻过程明显	增阻过程明显	良好
加权阻力/kN	5 542~7 887	7 468~9 458	16.61%~25.80%
循环末阻力/kN	6 450~10 856	8 340~10 247	5.61%~22.67%
动载系数	1.06~1.15	1.30~1.40	17.86%~18.46%

尽管模拟指标不同程度地低于现场实测值,但考虑到模拟结果指导现场工程应用时,出于安全考虑一

般取测试指标的最大值(上限值)作为装备选型参考值,而模拟试验中各指标的上限误差分别为 16.61%、5.61%、17.86%,均处于工程误差的可接受范围。现场支架选型设计时,可参照工程力学及机械装备选型中“安全系数”的做法<sup>[18]</sup>,在参考模拟结果的同时选取安全系数,再辅以理论计算、数值模拟等研究方法予以校核,确定合理的装备参数。

## 6 结 论

(1) 研制了以 S 形剪切梁传感器为主体的超前支承压压力监测系统。标定测试表明,该测试系统各级应变输出值稳定性较好,应变输出值与外载保持较好的线性关系。综合模型边界条件及内部应力分布特征,可得到覆岩采动应力场的演化特征。

(2) 以应变测试块为测试主体,研制了模型体应力监测系统。测试块体与模型体力学性能匹配、变形相容性好,敏感元件选用箔式应变片,引线线径小、抗磨损、耐折性好,对破断块体的干扰度小,能够精准捕捉测点的应力动态。块体表面采用特殊的防潮工艺,涂层密封性好,能够适应制模、模型养护期间的潮湿环境。根据测试需要,可在模型内布置多个测点,反演模型应力场的动态演化特征。

(3) 基于液压控制原理研制了顶板支护模拟系统,包括模型支架、液压控制装置、泵站系统、工况监

测装置和信号处理系统。模型试验结果表明,系统采样精度高,支架工况曲线相似度高,测试指标均处于工程误差的可接受范围。

(4) 采用该套测量系统开展了大比尺采场模型试验。应用结果表明,该系统能够直观反映采场矿压与岩层移动的动态演化过程,深入阐释采动应力场与覆岩结构形态之间的关系。顶板支护模拟系统的阻力变化特征能够反映顶板来压过程,并与覆岩破断宏观现象相吻合。

#### 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 97-106.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 97-106.
- [2] 朱德仁. 长壁工作面老顶的破断规律及其应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1987.  
ZHU Deren. Fracturing law and its application of the main roof of long wall working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1987.
- [3] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [4] 刘长武, 郭永峰, 姚精明. 采矿相似模拟试验技术的发展与问题—论发展三维采矿物理模拟试验的意义[J]. 中国矿业, 2003, 12(8): 6-8.  
LIU Changwu, GUO Yongfeng, YAO Jingming. The development and problems of mining similar simulation experiment technique—Meaning of developing three dimensional mining physical simulation experiment[J]. China Mining Magazine, 2003, 12(8): 6-8.
- [5] 左建平, 孙运江, 钱鸣高. 厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1372-1379.  
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, QIAN Minggao. Movement mechanism and analogous hyperbola model of overlying strata with thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1372-1379.
- [6] 刘义新, 戴华阳, 姜耀东. 厚松散层矿区采动岩土体移动规律模拟试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 700-706.  
LIU Yixin, DAI Huayang, JIANG Yaodong. Model test for mining-induced movement law of rock and soil mass under thick unconsolidated layers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 700-706.
- [7] 许家林, 钱鸣高, 马文顶, 等. 岩层移动模拟研究中加载问题的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(3): 252-255.  
XU Jialin, QIAN Minggao, MA Wending, et al. Discussion on loading problem in physical and numerical simulation of strata movement[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(3): 252-255.
- [8] 康红普, 顾金才, 娄金福, 等. 尺寸与倾角可调节式煤矿采场相似模型试验系统: 中国 ZL201520878243.5[P]. 2016-04-06.
- [9] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [10] 伍永平, 解盘石, 张艳丽, 等. 一种用于物理相似模拟实验的测力支架模型: 中国 ZL201220013359.9[P]. 2012-09-05.
- [11] 杨培举. 两柱掩护式放顶煤支架与围岩关系及适应性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.  
YANG Peiju. Research on the relationship between two-leg sublevel caving shield support and surrounding rocks and adaptability[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [12] 贾立锋, 裴伯康, 梁冰, 等. 相似模拟实验支架阻力监测装置的研制及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(4): 433-437.  
JIA Lifeng, PEI Bokang, LIANG Bing, et al. Development and application of support resistance monitoring device in similar simulation experiment[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2015, 34(4): 433-437.
- [13] 王静, 李术才, 隋青美, 等. 基于相似材料的光纤应变传感器在分区破裂模型试验中的研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1570-1575.  
WANG Jing, LI Shucai, SUI Qingmei, et al. Study of FBG strain sensors based on similar materiel in zonal disintegration model test[J]. Journal of China coal society, 2012, 37(9): 1570-1575.
- [14] 魏世明, 柴敬. 岩石变形光栅检测的表面粘贴法及应变传递分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 587-592.  
WEI Shiming, CHAI Jing. Surface pasting methods and analyses of strain transfer in rock deformation tests using FBG[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 587-592.
- [15] 张强勇, 李术才, 焦玉勇. 岩体数值分析方法与地质力学模型试验原理及工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [16] 余芹芹, 乔娜, 卢海静, 等. 植物根系对土体加筋效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3216-3223.  
YU Qinqin, QIAO Na, LU Haijing, et al. Effect study of plant roots reinforcement on soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3216-3223.
- [17] 娄金福, 康红普, 高富强, 等. 基于“顶板-煤壁-支架”综合评价的大采高支架工作阻力研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2808-2816.  
LOU Jinfu, KANG Hongpu, GAO Fuqiang, et al. Determination of large-height support resistance based on multi-factor analysis.[J]. Journal of China coal society, 2017, 42(11): 2808-2816.
- [18] 王国法. 液压支架技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.