



移动扫码阅读

杨景贺.相似材料模型试验应力测试装置的研制及应用[J].煤炭科学技术,2019,47(4):114-119.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.04.019

YANG Jinghe.Research and application of stress testing apparatus for similar material model test[J].Coal Science and Technology,2019,47(4):114-119.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.04.019

相似材料模型试验应力测试装置的研制及应用

杨景贺^{1,2,3}

(1.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013;2.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,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:针对传统应力指标测试方法在植入体与模型体力学性能匹配性、数据稳定性、试验可操作性等方面的不足,研制了基于相似材料母体的应力测试装置,包括其核心部件应力块,介绍了应力块的制作流程,包括坯体制作、贴片引线、防潮绝缘、裹沙封装等工艺。测试结果表明,该应力块具有良好的防潮绝缘性能,长时零漂占比3.25%~6.78%,零漂对测试结果无显著影响。采场相似模型试验应用效果表明,应力块的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;测试结果能够直观反演覆岩采动应力的演化过程,为深入阐释覆岩运移破断的力学机理提供重要的试验依据。

关键词:相似模拟;应力监测;应力块;防潮绝缘工艺

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)04-0114-06

Research and application of stress testing apparatus for similar material model test

YANG Jinghe^{1,2,3}

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

Abstract: In view of the shortage of previous stress measurement methods, especially in the following aspects: the compatibility of mechanical characteristics, stability of data acquisition, and model operability between embedded block and the model, a new type of stress testing apparatus has been developed, whose core component is the stress testing brick. The brick is made of the same material as the model, and the production process includes block processing, strain-gauge sticking, moisture-proof insulation processing and sand-coated sealing. Physical tests indicate that the stress testing block is of good moisture-proof insulation properties, and the rate of long-time zero-drift is 3.25%~6.78%, which has little impact on experiment results. And its application in physical modeling experiment shows that the compatibility and deformation coordination of the block and model is excellent, and the moisture-proof insulation properties can adapt to the damp environment during model making and maintenance. Test results can intrinsically illustrate the stress evolution process during excavation, and can offer reference for further research on mechanical mechanism of strata movement and breaking.

Key words: similar simulation; stress measurement; stress testing brick; moisture-proof insulation process

0 引言

相似材料模型试验是采场矿压研究的重要方法。在制模阶段,采用不同的相似材料配比方案模拟相应的煤系地层。模拟开挖过程中,实时监测模型体的位移、应力及支护体工况等测试指标,据此研究覆岩运移破断及采动应力演化特征。近年来,随

着三维激光扫描、近景摄影测量、数字散斑等先进测试技术逐渐应用于模型试验,模型表面变形及位移等指标的测试精度、测试效率得到显著提高^[1-3]。但模型试验发展至今,模型体应力监测技术发展相对滞后,已成为制约模型试验精细化发展的短板。

根据植入装置的不同,模型体应力测试方法主要采用压力盒、应变块等测试方法^[4-5]。上述传感

收稿日期:2018-12-22;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874175,51774185)

作者简介:杨景贺(1964—),男,北京人,高级工程师。E-mail:yangjinghe@tdkcsj.com

器外观多采用金属或橡胶材料封装,测试传感器的弹性模量等变形指标与模型材料有显著差异,变形传递的耦合度差,降低了测试数据的准确度,并且传感器只能进行单方向的应变测量。近年来随着光纤光栅测试技术的发展,应力块外贴光纤光栅的方法逐渐应用于模型试验中^[6-8],但该方法涉及调试解调、信号转换、传输等环节,对测试人员的专业性要求很高,特别是大比例尺模型尺寸较大,由于埋设测点数量多,导致测试成本大幅增加,该方法在模型试验中难以广泛普及。

笔者所在的国家重点实验室基于多年的模型测试经验,在借鉴传统应力测试方法的基础上,研制了基于相似材料母体的应力测试块(以下简称应力块),并进行了成套制作工艺优化改进。该应力块的制作过程包括坯体制作、贴片引线、防潮绝缘封装等工艺。测试结果表明,块体与模型材料力学性能匹配、变形协调性好;块体具有良好的防潮绝缘性能和长时间低零漂,长时测试性能稳定;监测数据能够反映覆岩采动应力的演化过程。

1 应力块的制作工艺

应力块的制作工艺流程分为坯体制作、贴片引线、封装裹沙3个阶段,如图1所示。坯体制作包括

坯体材料、坯体规格、坯体成型等环节。贴片引线包括防潮绝缘、贴片等工艺。

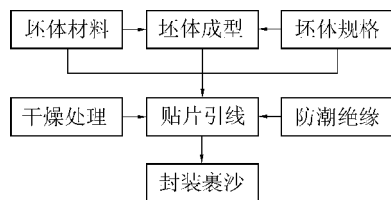


图1 应力块制作流程

Fig. 1 Process flow diagram of stress testing brick

1.1 坯体制作

1) 坯体材料。应力测试块体与模型材料的力学性能应具有良好的匹配性,这样才能保证应力块与模型产生同步协调变形,进而通过块体表面的应变片读数反映测点的应力变化。为此,坯体材料选用与埋设层位相同的相似材料配比方案。笔者所在团队通过多年的相似材料配比试验,研制了以河砂、石膏、碳酸钙(简称SGC)为原材料的相似材料,该类相似材料的密度为 $1\ 800\sim 1\ 900\text{ kg/m}^3$,单轴抗压强度 $348\sim 1\ 100\text{ kPa}$,弹性模量 $0.110\sim 0.725\text{ GPa}$,泊松比 $0.028\sim 0.404$,黏聚力 $0.13\sim 0.33\text{ MPa}$ 。近年来的模型试验应用表明,SGC相似材料基本满足煤矿开采模型试验的力学性能要求,部分配比方案的力学指标,见表1。

表1 SGC配比方案力学参数汇总

Table 1 List of mechanical parameters of samples with different SGC matching schemes

配比方案	单轴抗压强度/kPa	抗拉强度/kPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
A	492	65.29	0.224 0	0.156	0.155 0	33.62
B	461	93.52	0.723 0	0.139	0.138 8	34.93
C	348	49.70	0.148 0	0.139	0.141 7	29.50
D	598	88.89	0.450 0	0.276	0.205 7	31.49
E	462	106.00	0.110 7	0.111	0.248 8	26.65
F	643	93.41	0.487 0	0.160	0.244 3	30.98
G	832	132.48	0.419 0	0.404	0.283 1	31.09
H	580	115.90	0.276 7	0.068	0.132 8	34.06
I	1 100	230.69	0.725 0	0.219	0.328 4	34.32

2) 坯体规格与成型。应力块反映某一点的应力状态,相当于力学分析中的微元体,外形尺寸应远小于模型体三维尺寸中的最小值,才能尽量降低块体对模型应力场的干扰。块体拟植入采场平面应力模型和巷道支护平面应变模型的中部垂直剖面内,模型厚度分别为 400 mm 和 300 mm ,借鉴煤矿井巷开挖扰动范围为 $3\sim 5$ 倍跨度的工程经验^[9],则块体边长以分别小于 $40/30\text{ mm}$ 为宜。虽然可以进一步减小块体尺寸,但考虑到相似材料制块、脱模、应变

片尺寸及后续粘贴应变片等工序的可操作性,确定坯体规格为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的长方体,采用自主设计的模具手工制作而成。

坯体脱模后修平棱角,刷去表面粘着物,清除易掉落碎屑。将块体置于温度 $25\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱内烘干,每隔 24 h 取出一次,放在干燥器内冷却至室温,记录每次的称重值,直至恒重后完成坯体干燥^[10]。

1.2 贴片引线

1) 应变片及胶黏剂选型。目前应变片的种类

很多,包含丝式、箔式、半导体、薄膜和厚膜5类。根据坯体的材质及表观特征,对比5类应变片的适宜工况及模型试验大量使用的性价比,选择金属箔式应变片。该类应变片的特点是性能稳定,适应温度范围广,在测力、称重传感器领域,有80%~90%采用金属箔式应变片^[11],与块体尺寸相匹配的箔式应变片规格参数如下:

型号 BX120-20AA,电阻 $120.0 \pm 0.3 \Omega$,灵敏度系数 2.08 ± 0.01 ,最大微应变 2×10^{-2} ,基长×基宽为 $25.5 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$,栅长×栅宽为 $20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,丝栅材料为康铜,适应温度 $-20 \sim 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为保证应变片基底与坯体均匀粘结,应选择低粘度、快速固化、无刺激气味的胶黏剂。对比502、495、914等多种胶黏剂的黏结机理与初固时间等指标,确定采用495瞬干胶黏剂。该胶黏剂材料黏度为 $20 \sim 60 \text{ MPa} \cdot \text{s}$,初固时间20 s,应变片贴片平均用时 $10 \sim 15 \text{ s}$,因此初固时间满足贴片操作要求。

2) 引线选型。由于应力块内置于模型中,应尽可能降低引线对于模型体垮落运移的影响,更不能干涉破断块体之间的自然回转变形,否则将影响其他测试指标的准确度,为此对于引线的外径、抗磨损、耐折性等3个方面有严格的要求。应力块为单点测试,为了获得模型内部应力场的分布特征,一般内置很多测点,当引线数量较多时,如果引线直径较粗,容易产生“加筋效应”^[12],干扰模型块体的正常运动,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,应该尽可能降低外径。

试验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”。其缺点是韧性较差,当模型试验植入引线数量较多时,引出引线容易弯折、缠绕,且漆皮颜色单一,视觉可辨识性差,在早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。经过调研,确定选用应用广泛的特氟龙引线,其外套材料为耐磨、抗折的聚四氟乙烯(Teflon)材料,引线最小标称截面 0.05 mm^2 ,外径 0.5 mm ,该引线植入模型体内,可最大限度降低植入引线的“加筋效应”,引线参数:

型号 AF-250,标称截面积 0.05 mm^2 ,线套材料聚四氟乙烯(Teflon),引线外径 0.5 mm ,直流电阻 $370 \Omega \cdot \text{km}$ 。

1.3 防潮绝缘及封装工艺

1) 防潮绝缘处理。在制模阶段,相似材料湿式搅匀后含水率约10%,为避免浸水影响,应力块需具备良好的防潮、绝缘性能,为此坯体需做防潮处理。经过反复配比测试,自主研制了苯—烯复合型

防潮液。防潮绝缘操作工艺为:防潮液摇匀后用毛刷均匀涂刷在坯体的表面,置于室内 $1.5 \sim 2.0 \text{ h}$ 自然风干,在坯体表面便均匀裹覆一层薄膜。涂刷4~6次后,薄膜层厚度满足防潮要求。由于外覆涂层的弹性模量介于应变片基底和相似材料之间,因此能够将块体形变准确传递给应变片,保证二者之间具有良好的变形协调性。

2) 块体封装。为保证应力块整体的防潮性能,完成贴片、引线环节后,在块体外部重复涂刷2~3次防潮液,完成应力块的制作流程。此时,外覆涂层的应力块表面较为光滑,为保证模型试验期间块体与周围模型材料保持同步变形,需在其外部裹覆一薄层细沙颗粒,提高块体与周围材料的黏聚力,提高测试数据的准确度。

2 防潮绝缘与零漂测试

应力块内置于相似材料模型中,在模型铺设、干燥养护阶段,周围为潮湿的相似材料,为此块体需具备良好的防潮绝缘性能。此外,由于大比例尺模型试验测试周期较长,应力块需保持较低的长时零漂,以保证测试数据的准确性。根据上述性能要求,应力块样品需进行防潮绝缘与长时零漂测试。

2.1 防潮绝缘性能测试

参照《煤和岩石块体密度测定方法》进行块体防潮性能测试。测试过程:首先用干毛巾清洁块体表面的浮尘,在天平上称重得 M_0 ;然后将块体置于盛水的烧杯中浸泡24 h,取出后擦去表面水分,用热风机烘干表面可能残存的水分,重新在天平上称重得 M_1 。若 M_1 与 M_0 之差小于 0.5 g ,防潮性能视为合格,否则视为防潮失效。防潮性能测试合格后,同步测试块体的电阻值,进行绝缘性能测试。

2.2 零漂测试

应力块的敏感元件为应变片,在进行电阻应变测试时,由于外界环境变化,如时间、温度和电磁场等干扰会产生测量值变化的现象,应变片通常会发生零点漂移,简称零漂现象^[13]。

根据大比例尺采场模型试验的测试方案,试验周期长达48 h以上。考虑到夏季、冬季昼夜温差较大,应变片与应变仪之间的接线方式已采取温度补偿措施,可以排除昼夜温差对测试数据的干扰;但由于测试周期较长,应力块势必发生零漂现象,因此必须测试应力块在真实试验期间的零漂特性,将零漂与应力块的测试数据对比,只有零漂远低于测试数据,才能保证测试结果的可靠性。

应力块零漂测试方案为,首先根据采场模型实

验方案,铺设与正式实验相同的大比例尺模型。模型顶部为自由面,由于模型自重远低于正式试验期间顶部油缸施加的载荷,因此近似认为应力块处于零点状态。模型内埋设 5 排应力块,共计 42 块。每个应力块包含垂直和水平应变片各 1 片,共计 84 片。

试验前将各应力块分别与应变仪连接,各通道数据清零后,启动定时自动采样模式,应变数据定时采样周期 10 s。测试持续 48 h,采集数据 17 280 组。

列举 1、2 排应力块的测试数据,各应变片 48 h 内最大零漂见表 2。由表 2 得,垂直、水平应变片的最大零漂的平均值分别为 7.8×10^{-6} 和 8.5×10^{-6} 。模型开挖过程中各应变片应变为 $(1.15\sim2.40)\times10^{-4}$,零漂占比 3.25%~6.78%,对测试结果无显著影响。

表 2 各应变片 48 h 内零漂统计
Table 2 Zero-drifts values of selected strain-gauge in 48 h

垂直应变片	最大零漂/ 10^{-6}	水平应变片	最大零漂/ 10^{-6}
1-1	9	1-1	9
1-2	10	1-2	10
1-3	8	1-3	9
1-4	8	1-4	9
1-5	1	1-5	1
1-6	7	1-6	9
1-7	3	1-7	6
1-8	2	1-8	3
1-9	3	1-9	3
2-1	11	2-1	12
2-2	12	2-2	13
2-3	10	2-3	11
2-4	10	2-4	11
2-5	8	2-5	8
2-6	13	2-6	11
2-7	10	2-7	12
2-8	9	2-8	9
2-9	7	2-9	7
平均值	7.8	平均值	8.5

3 应力块在模型试验中的应用

为检验应力块在模型试验中的测试效果,大比例尺模型铺设期间在模型内部埋设应力块,用于监测开挖期间模型体内部的应力分布特征。模型以晋城矿区大采高综采工作面为工程原型,试验目的是研究大采高综采采场矿山压力与岩层移动特征。

首先,基于岩层控制的关键层理论,判定厚度

17.0 m 和 6.0 m 的细砂岩分别为亚关键层 2 和亚关键层 1,亚关键层 2 破断后将引起覆岩大范围垮断^[14]。为此,在模型内相应的层位分别布置 1 排测线,重点关注这 2 层亚关键层的应力分布特征,如图 2 所示。煤层上方岩层依次为厚 1.73 m 泥岩,厚 4 m 粉砂岩,厚 2 m 砂质泥岩,厚 6 m 细粒砂岩,厚 1 m 砂质泥岩,厚 7 m 粉砂岩,厚 3 m 泥岩,厚 17 m 细粒砂岩,厚 7 m 砂质泥岩,厚 3 m 细粒砂岩和厚 8 m 砂质泥岩。模型开挖过程中,通过内置应力块的应变增量来反演测点的应力变化情况。

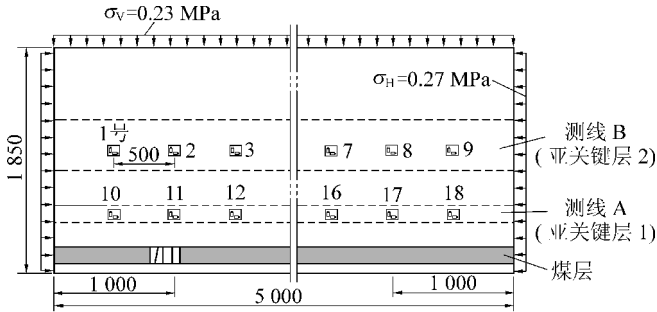


图 2 模型监测方案

Fig. 2 Monitoring scheme of physical model

为便于数据对比分析,采用无量纲化处理方法,分别将测点在不同时步的应变与其初始应变对比,将二者的比值定义为测点的应变集中系数。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,据此得到应力指标的变化特征。

开挖过程中各测线的垂直与水平方向的应力变化特征如图 3 所示。由图 3 可知,覆岩应力呈递增趋势。测线 B 垂直应力的 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,测线的垂直应力峰值集中系数分别升至 3.93、2.59 和 3.97,水平应力峰值集中系数升至 3.52 和 7.12。测线 A 的变化趋势与之类似。

模型开挖至 39、51、57 步时,下位岩层先后发生初次来压及第 1、2 次周期来压;第 59 步时覆岩自下而上先后分 3 次冒落,覆岩冒落终态如图 4 所示。

覆岩大范围垮落后,2 条测线的应力分布特征如图 5 所示。由图 5 可知,在覆岩破断线附近的 3、7 号测点,测点位置如图 2 所示,其水平应力集中系数高达 9.10 和 28.06。位于破断线附近的 16 号测点水平应力集中系数达到 7.20。在水平挤压作用下,块体之间紧密有序排列,铰接形成砌体梁结构。根据测试结果可知,砌体梁结构的水平挤压力峰值出现在覆岩前、后破断边界线附近,特别是前部边界线,峰值远高于同一层位的其他测点。

为检验应力块的防潮性能及可重复使用性,在模型后续拆除过程中同步开展应力块的挖掘与回收,揭露的应力块外观完整,应力块裹覆标准砂后能够与周围模型体保持紧密粘结,应力块能够完整回收,回收后的应力块已经用于后续模型试验中,具有良好的可重复使用性。

够与周围模型体保持紧密粘结,应力块能够完整回收,回收后的应力块已经用于后续模型试验中,具有良好的可重复使用性。

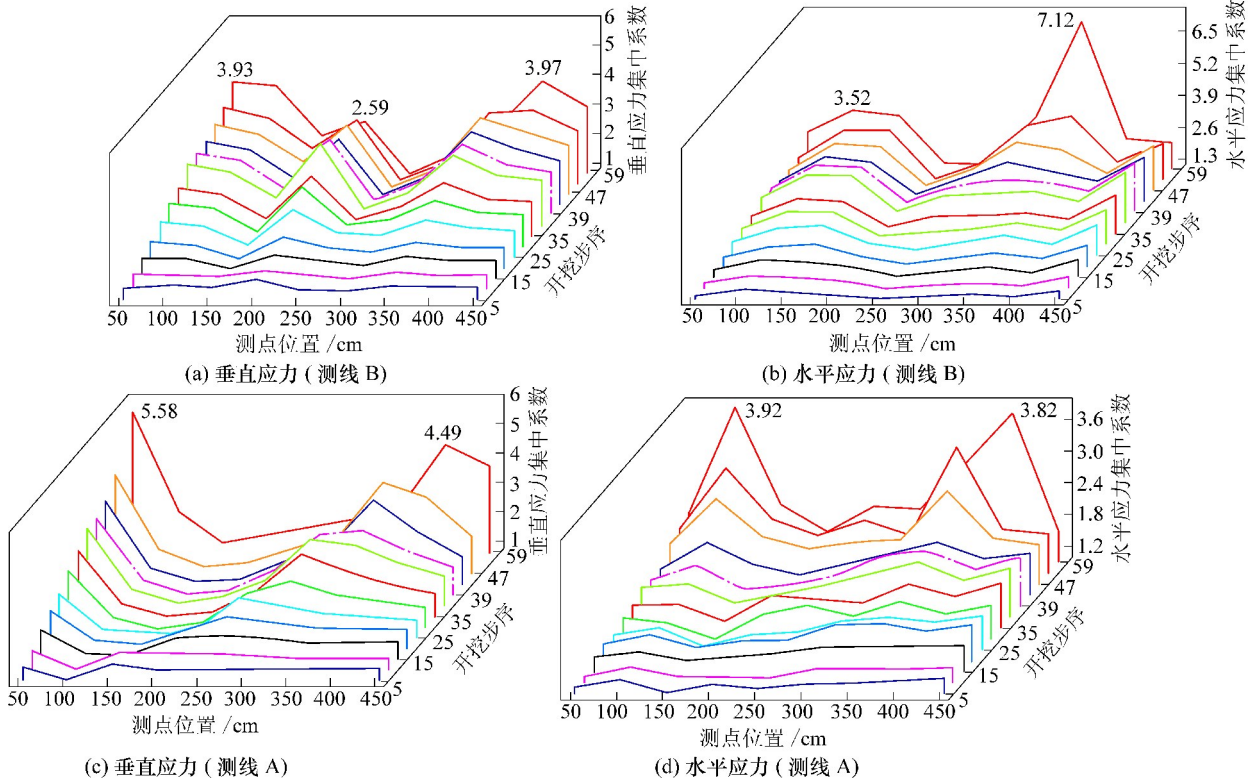
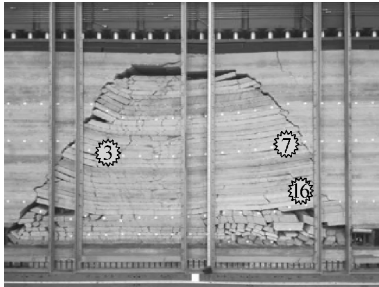


图3 模型内部应力集中系数变化过程

Fig. 3 Evolution of stress concentration factor in physical model



3、7、16为测点号

图4 采场覆岩破断终态实拍

Fig. 4 Block structure after overlying strata breaking

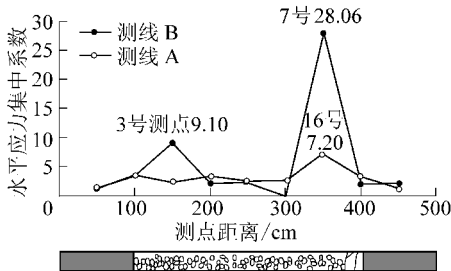


图5 覆岩大范围垮落后水平应变分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of horizontal strain after widespread collapse of model

4 结 论

1) 根据模型试验应力测试的需求,研制了基于相似材料的应力测试装置。其特点之一在于应力块选用与所在层相同的相似材料,两者之间的力学性能匹配、变形相容性好,能够精准捕捉测点的应力动态;特点之二在于应力块的封装采用自主研发的苯—烯复合型防潮液,涂层密封性好,块体防潮绝缘性能够适应模型铺设、干燥养护期间的潮湿环境;特点之三在于外部贴片采用性价比高的箔式应变片,测试精度高(分辨率 1×10^{-6})、贴片工艺成熟,可根据测试需要在模型内一次布置多个测点,据此反演模型应力场的动态变化特征。

2) 此外,应力块的引线采用抗磨损、耐折性的新型材料,引线外径小,便于降低植入引线的“加筋效应”。

3) 基于坯体制作、贴片引线、封装裹沙等工艺环节的优化研究,研制的应力块对模型应力场扰动小、相容性好、可重复使用、制备方便,能够监测开挖期间模型体内部的应力分布特征,已在采场与巷道支护等模型试验中得到验证。根据测试需要,可以

选择不同规格的应变片对横向、纵向和切向 3 个方向的应力进行实时监测。

参考文献(References):

- [1] 李元海,林志斌,靖洪文,等.含动态裂隙岩体的高精度数字散斑相关量测方法[J].岩土工程学报,2012,34(6):1060-1068.
LI Yuanhai, LIN Zhibin, JING Hongwen, *et al.* High-accuracy digital speckle correlation method for rock with dynamic fractures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1060-1068.
- [2] 朱庆伟,信泰琦,孙学阳.近景摄影测量系统在相似模型位移监测中精度分析[J].煤矿开采,2016,21(2):106-108,113.
ZHU Qingwei, XIN Taiqi, SUN Xueyang. Displacement monitoring precision of similarly model with close-range photogrammetry system[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(2): 106-108, 113.
- [3] 杨化超,邓喀中,郭广礼.相似材料模型变形测量中的数字近景摄影测量监测技术[J].煤炭学报,2006,31(3):292-295.
YANG Huachao, DENG Kazhong, GUO Guangli. Monitoring technique for deformation measurement of similar material model with digital close-range photogrammetry[J]. Journal of China coal society, 2006, 31(3): 292-295.
- [4] 李文阳,潘春娟,刘洪佳.土压力盒在混凝土结构模型试验中的应用[J].山西建筑,2007,33(32):83-84.
LI Wenyang, PAN Chunjuan, LIU Hongjia. The application of earth-pressure cell in concrete structural model test [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(32): 83-84.
- [5] WANG Hongwei, JIANG Yaodong, XUE Sheng, *et al.* Influence of fault slip on mining-induced pressure and optimization of roadway support design in fault-influenced zone[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5): 660-671.
- [6] 柴敬,邱标,刘金瑄,等.基于光纤光栅监测的松散地层深部注水试验[J].煤炭学报,2012,37(2):200-205.
CHAI Jing, QIU Biao, LIU Jinxuan, *et al.* Water injection test in unconsolidated strata through deep borehole based on fiber Bragg grating monitoring[J]. Journal of China coal society, 2012, 37(2): 200-205.
- [7] 魏世明,马智勇,李宝富,等.围岩三维应力光栅监测方法及相似模拟实验研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):138-143.
WEI Shiming, MA Zhiyong, LI Baofu, *et al.* Study on the monitoring method of three-dimensional stress with FBG in surrounding rock and the simulation experiment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 138-143.
- [8] 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.
- [9] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [10] GB/T 23561.3—2009,《煤和岩石物理力学性质测定方法第3部分:煤和岩石块体密度测定方法》.
- [11] 尹福炎.金属箔式应变片制作工艺原理[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [12] 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.
- [13] 戴福隆,沈观林,谢惠民.实验力学[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [14] 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.