



移动扫码阅读

周保精,梁宁宁.浅埋煤层地下水库流固耦合模型特征参数试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(6):87-92.

doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.06.013

ZHOU Baojing,LIANG Ningning.Experimental study on feature parameters of fluid-solid coupling model of underground reservoir in shallow depth seam[J].Coal Science and Technology,2019,47(6):87-92.doi:10.13199/

j.cnki.cst.2019.06.013

浅埋煤层地下水库流固耦合模型特征参数试验研究

周保精^{1,2},梁宁宁^{2,3}

(1.国家能源投资集团有限责任公司 科技部,北京 100011;2.煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,北京 100011;

3.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:煤层采动引起的岩体运移、裂隙演化与渗流特性对煤矿地下水库的设计建造具有重要影响,为获取地下水库围岩体物理特征参数,开展相似材料流固耦合模型试验研究,结合典型浅埋煤层水文地质及开采条件,建立了立体相似材料流固耦合模型。通过监测煤层开挖过程中顶板下沉量、煤柱应力、含水层渗压等特征参数的变化,研究了煤层采动过程中破断岩体运移、裂隙演化规律及扰动岩层渗流特性变化规律。试验结果表明:煤层开挖后,煤柱上覆岩层形成倒台阶结构,煤柱应力先增大后减小。顶板岩层先后经历“弯曲下沉—裂隙发育—破断垮落”的动态演化过程,岩层裂隙发育程度决定了形成的导水裂隙带数量,可用岩层渗压下降速率表征岩层裂隙发育程度。岩层大面积垮冒滞后于导水裂隙带形成,含水层渗压突变先于岩层突降下沉发生,可将含水层渗压突降作为顶板来压垮冒的预兆之一。

关键词:浅埋煤层;地下水库;流固耦合;导水裂隙;渗流特性

中图分类号:TD745 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2019)06-0087-06

Experimental study on feature parameters of fluid-solid coupling model of underground reservoir in shallow depth seam

ZHOU Baojing^{1,2}, LIANG Ningning^{2,3}

(1. Department of Science and Technology, China Energy Investment Group Corporation Ltd., Beijing 100011, China;

2. State Key Lab of Groundwater Protection and Utilization by Coal Mining, Beijing 100011, China;

3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A rock mass migration, crack evolution and seepage features caused by the seam mining could be highly affected to the design and construction of the underground water reservoir. In order to get the physical features and parameters of the surrounding rock mass in the underground water reservoir, an experiment study was conducted on a fluid-solid coupling model of the similar material. In combination with the hydrogeological and mining conditions of the typical shallow depth seam, the fluid-solid coupling model of the 3D similar material was established. With the monitoring and measuring on the variations of the roof subsidence, coal pillar stress, aquifer seepage pressure and other feature parameters during the mining and excavation process of the seam, a study was conducted on the broken rock mass migration, crack evolution law and the disturbance rock seepage features varied law during the mining process of the seam. The experiment results showed that after the excavation of the seam, the overburden strata above the coal pillar would form an inverted step structure and the coal pillar stress would be firstly increased and then decreased. The rock strata of the roof before and after experienced a dynamic evolution process of “bending subsidence - crack development - broken collapse”. The crack development degree of the rock strata would determine the number of the formed water flowing crack zone. The seepage pressure decreased rate of the rock strata could be applied to characterize the crack development degree of the rock strata. A large area collapsing of the rock strata would lag behind the formation of the water flowing cracks. A sudden changed seepage pressure of the aquifer would be before the sudden subsidence occurred. A sudden reduced seepage pressure of the aquifer could be one of the foretastes to the roof weighting and collapsing.

Key words: shallow depth seam; underground water reservoir; fluid-solid coupling; water flowing cracks; seepage features

收稿日期:2018-11-22;责任编辑:曾康生

基金项目:煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金资助项目(SHJT-16-30.13);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJCX17-0520)

作者简介:周保精(1976—),男,江苏徐州人,高级工程师,博士。Tel:010-57595901, E-mail:10000718@shenhua.cc

0 引言

煤炭资源的开发与利用给生态环境造成了严重的影响,引发的河川径流量减少、水资源枯竭、土地沙漠化等问题日益突出。我国水资源与煤炭资源呈逆向分布特征,西部富煤地区多处于干旱和半干旱地区,水资源仅占全国的3.9%,且年蒸发量是降雨量的6倍,水资源短缺且生态环境十分脆弱^[1-2]。据统计,我国开采1 t煤约产生2 t矿井水,但矿井水利用率仅25%左右^[1,3]。为实现节能减排、绿色开采和煤炭工业可持续健康发展,水资源保护与利用是当前和相当长时期内面临的重大难题。

采空区空间巨大,孔隙、裂隙极为发育,且残存的大量粒状颗粒具有较大的纳污能力,可将矿井水中的悬浮物和胶体物质等有效去除^[4-5]。利用地下采空区储水将安全煤柱用人工坝体连接形成水库坝体,同时建设矿井水入库设施和取水设施的煤矿地下水工程是水资源保护利用协调的有效技术途径^[6-8]。

煤层采动过程中顶底板岩体破损与裂隙发育演化规律等直接影响了顶底板岩体渗透性能、导水裂隙带和塌落体的渗透系数和储水系数等特征,进而影响了地下水工程的设计和建造^[9-10]。但是在现场条件下,难以直接获取这些物理特征及其参数,开展相似材料流固耦合模型试验研究,模拟典型煤矿区水文地质和开采条件,从而获取煤层采动过程中破断岩体运移、裂隙演化规律及扰动岩层渗流特性变化特征,对浅埋煤层地下水工程建设具有重要意义。

1 工程概况

神东矿区地处陕北黄土高原和毛乌素沙漠东南边缘接壤地带,该矿区煤层埋藏浅、倾角小、地质结构简单,开采条件优良,是我国特大型煤炭生产基地。随着煤炭资源大规模高强度开采,煤炭工业发展与区域水资源供需、采煤活动与生态环境保护等矛盾日渐突出,严重制约神东矿区经济-社会-环境协调发展^[11-12]。

国家能源集团经过近20年技术攻关和工程实践,成功研发煤矿地下水工程,实现矿井水井下储存与利用。煤矿地下水工程涉及采矿工程、岩体力学、水文地质及环境工程等多个学科,是复杂的系统工程,面临众多技术难题^[1,6,8,13]。为研究煤层采动过程中破断岩体运移、裂隙演化规律及扰动岩层渗流特性变化特征,以大柳塔矿地下水工程为背景,开展浅埋煤层地下水工程流固耦合模型试验。

2 相似材料流固耦合模型试验

2.1 试验方案设计

根据大柳塔矿所在地区地质水文地质条件、煤层开采方式,采用相似材料模拟各岩层的物理力学特征及渗流特性,通过预先埋设的位移传感器、渗压计和压力传感器,获取煤层采动过程中上覆岩层位移场、渗流场和压力场的分布特征及演化规律。模型示意图及监测方案设计如图1所示,煤层岩层强度和渗透性指标见表1,试验模型长8.0 m、宽2.0 m、高3.5 m,采用的相似比为1:100。

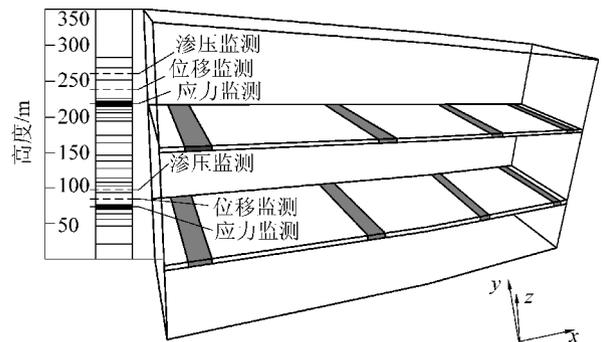


图1 相似模型、监测方案

Fig.1 Similar model and monitoring scheme

表1 主要岩层物理特性参数

Table 1 Physical parameters of major strata

岩性	厚度/m	渗透系数/ ($m \cdot d^{-1}$)	强度/ MPa	备注
松散层	68	>0.040 0	—	透水层
粉砂岩	15	0.004 0	40.86	弱透水层
泥岩	15	0.000 2	25.22	隔水层
细砂-粉砂岩	28	0.004 0	5.26	基本顶
泥岩	3	0.000 2	25.22	隔水层
2-2 煤	5	0.000 1	20.07	地下水层
泥岩	5	0.000 2	34.22	隔水层
细砂-粉砂岩	12	0.004 0	5.26	透水层
泥岩	5	0.000 2	34.22	隔水层

2.2 试验模型制作

选用细中砂(粒径<2 mm)、重晶石粉(粒径<2 mm)和滑石粉作为相似材料的骨料,选用325标号水泥、凡士林和硅油作为胶结剂,通过大量配比试验,确定材料配比参数,如:重度、吸水率、抗压强度、渗透参数等。

试验模型架架设完成后,根据模拟岩层的物理参数、渗透性特征进行相似材料配置,根据每层浇筑厚度在模型内部进行测量放线和模板架设,将配置好的相似材料均匀倒入模型架,然后耙平、振捣压实,压实程度按所需的视密度的要求。相似材料铺筑时应分层装填,层间用云母粉隔离,装料前必须计

算好每层的质量及分配比例。

严格控制每层浇筑厚度及平整度,找平后按要求预制裂隙并根据设计方案在含水岩层设置渗压计、在关键岩层设置位移传感器、在煤层煤柱内设置压力传感器,并在模型正立面均匀布置位移观测控制点。模型架两侧面设置有供排水孔、流量控制表和变频供水系统。通过数据采集处理系统将传感器信号实时反馈

至控制终端,得到试验全过程渗压、位移、应力实时动态曲线,数据采集流程如图2所示。

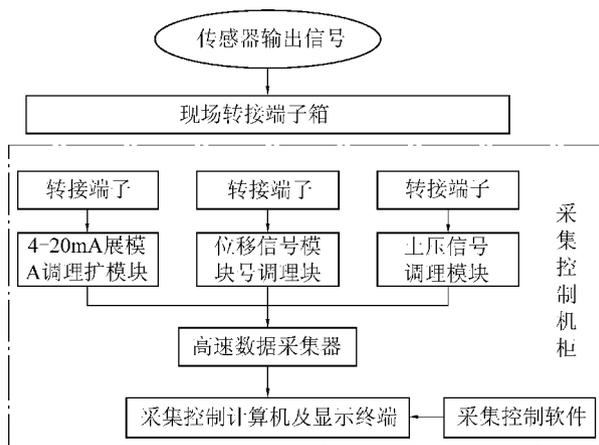


图2 数据采集流程

Fig.2 Flow chart of data acquisition

为了防止含水层中水从模板处渗漏,在含水层人工裂隙四周用速凝防水堵漏材料砌筑防水圈。防水圈平面呈封闭状态,厚度不小于2 cm。

2.3 试验模型开挖及数据采集

模型按照大柳塔矿地层分布布置,模拟 2^{-2} 煤层

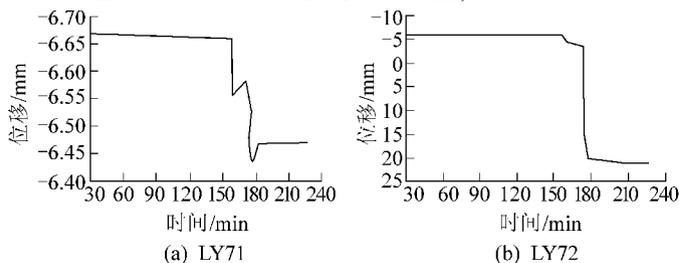


图4 1区开挖后位移变化

Fig.4 Displacement variation after Zone 1 excavation

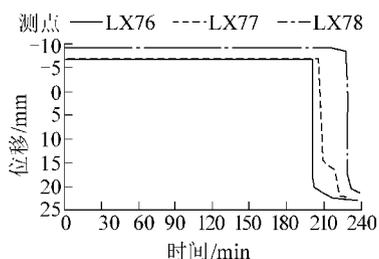


图5 2区开挖后位移变化

Fig.5 Displacement variation after Zone 2 excavation

步开挖时上覆岩层垮塌、裂隙发育以及地下水渗流过程,研究不同开采条件(一次性采空和逐步采空)、工作面布局、开采参数、地质条件与采空区面积、采空区冒落岩石空隙率的关系等关键问题。

3 试验结果分析

3.1 位移变化规律

测点 LY71 位于煤柱正上方,测点 LY74 和 LY77 分别位于开挖区 1 区和 2 区的中间正上方,1 区开挖自右向左后,位移测点布置如图3所示。

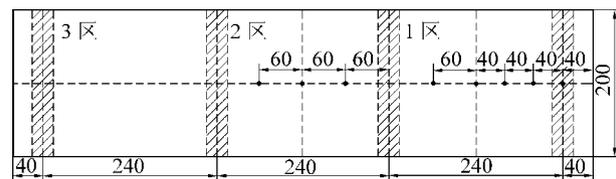


图3 位移监测方案平面布置

Fig.3 Arrangement of monitoring for displacement

1 区开挖后,LY71 至 LY75 测点均开始下沉,开挖 30 min 后,LY72 至 LY75 测点出现下沉量激增现象,其中 LY72 至 LY74 测点下沉量大于 25 mm,LY75 测点下沉量约为 10 mm,之后各测点位移虽有波动,但总体表现出稳定趋势,开挖后测点位移曲线如图4所示。

1 区覆岩运移稳定后进行 2 区开挖,LY76 至 LY78 测点均在开挖 20 min 后出现突降下沉现象,其中 LY76、LY77 测点下沉量大于 25 mm,而 LY78 测点下沉量较小,约为 12 mm,随后各测点位移逐渐平衡,开挖后测点位移曲线如图5所示。

煤层开挖后,顶板首先开始弯曲下沉,故各测点在开挖后立即表现出下沉趋势。当岩层内裂隙扩展演化到一定程度后,岩层整体强度降低,难以维持自身的稳定,开始垮冒,在位移变化规律上表现为 LY72 至 LY74 及 LY76、LY77 测点开挖一段时间后垂向位移断崖式下降式现象;上覆岩层持续弯曲、垮冒直至顶板垮落体充满采空区,覆岩运移基本稳定,顶板下沉量逐渐平衡。受实体煤壁和煤柱的侧向支撑作用影响,采区两侧顶板多出现回转下沉,因此

LY75 和 LY78 测点下沉量较小。

3.2 应力变化规律

1号煤柱右侧和4号煤柱左侧为采空区,为监测开挖过程中煤柱受力情况,共布设了22组应力计,本文仅选取部分可反映煤柱受力情况的有效数据进行分析。应力测点布置如图6所示。

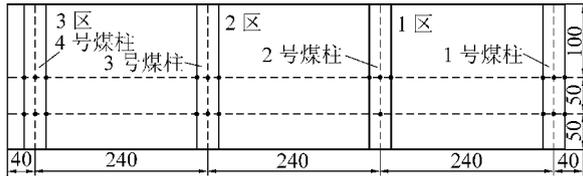


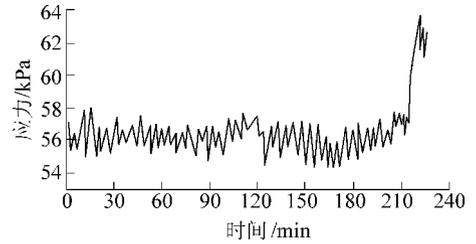
图6 煤柱应力监测方案布置

Fig.6 Arrangement of monitoring scheme for pillar stress

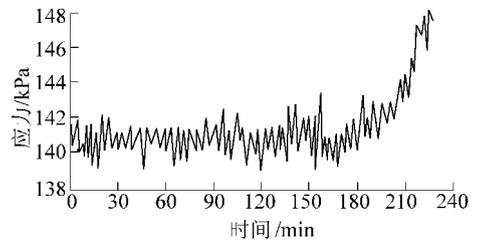
1区开挖过程中,508测点和510测点应力稳定上升,持续30 min后,应力增加分别为初始应力的104%和102%,随后应力开始急剧增高,最高应力可达初始应力的114%和105%,应力达到最高峰后,出现波动,之后逐渐平稳,测点应力曲线如图7所示。

煤柱应力逐渐稳定后进行2区开挖,508测点和510测点应力出现台阶上升现象,应力最大上升

到稳定应力的125%和110%,随后应力在缓慢下沉之后突降;566测点和569测点应力先平稳上升至初始应力的104%和102%,而后急剧增加至初始应力的118%和105%,测点应力变化曲线如图8所示。



(a) 508测点



(b) 510测点

图7 1区开挖后2号煤柱应力变化

Fig.7 Stress variation of No.2 coal pillar after Zone 1 excavation

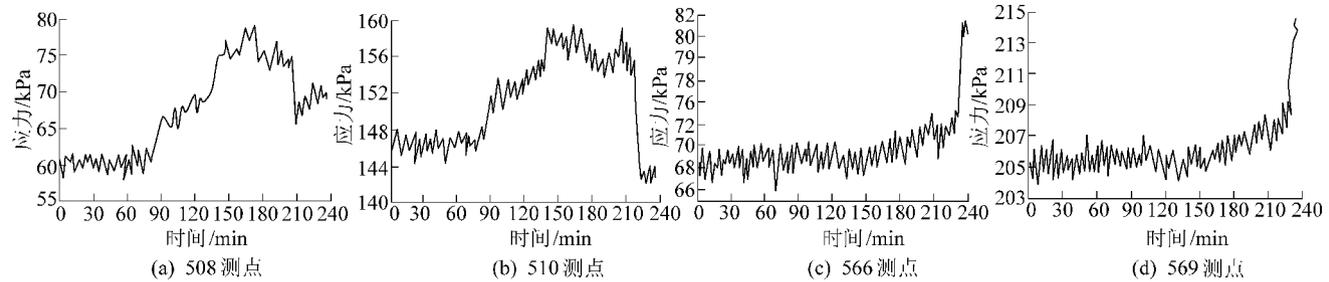


图8 2区开挖后3号煤柱应力变化

Fig.8 Stress variation of No.3 coal pillar after Zone 2 excavation

2-2煤层3区开挖后,566测点和569测点应力开始升高,持续110 min后应力达到最大值,分别为稳定应力的125%和105%,经短暂平衡后应力开始下降至稳定应力的73%和94%,应力曲线如图9所示。

煤层开采时,采空区顶板暴露,岩层重力转移至实体煤和煤柱,随裂隙发育岩层开始破断,在煤柱临空侧顶板形成倒台阶结构,如图10所示,切断了煤柱上覆岩层与采空区顶板的应力传递,此时煤柱额外承载的应力为倒台阶结构体应力,煤柱应力表现为先上升而后稳定的变化规律。

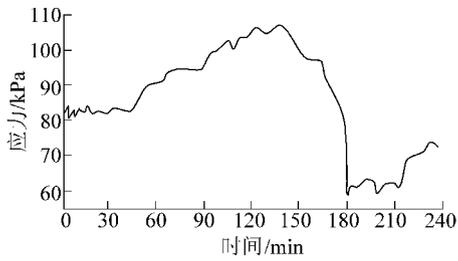
煤柱实体煤侧开挖后,新形成的采空区顶板岩层载荷转移至煤柱和下一实体煤侧,此时煤柱承受倒台阶结构体和暴露顶板的共同载荷,覆岩破断运移稳定后在煤柱两侧顶板均形成倒台阶结构,煤柱

应力先增大后减小的变化规律表征了覆岩破断运动的动态过程。

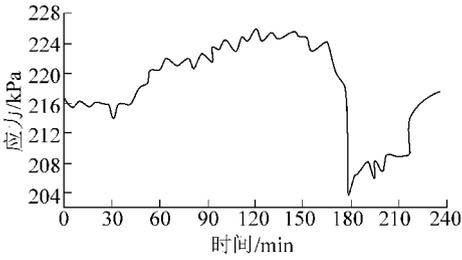
3.3 渗压变化规律

在模型2-2煤层上方的细砂-粉砂岩(渗透系数0.004 m/d,含水层)中布置14组渗压计,该层上下均为泥岩(渗透系数0.000 2 m/d,隔水层),含水层两侧为中砂过滤层,用以模拟开挖后含水层渗压变化规律如图11所示。进行开挖试验前,打开供排水系统,对含水层进行水量补给。

SY31测点和SY32测点据水量补给口较近,受水量补给影响较大,渗压出现突跳上升现象,如图12所示,1区开挖后,各测点渗压均有不同程度的下降,但SY31和SY32测点受上方含水层和中砂过滤层含水影响,渗压出现回涨,失去补水作用后,渗压开始下降。



(a) 568测点



(b) 569测点

图9 3区开挖后3号煤柱应力变化

Fig.9 Stress variation of No.3 coal pillar after Zone 3 excavation

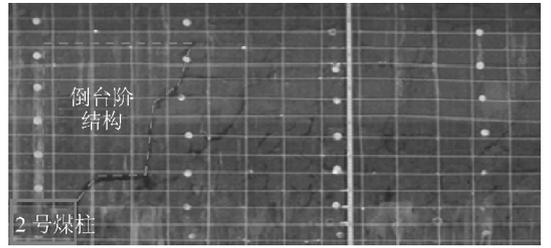


图10 开挖后覆岩破断示意图

Fig.10 Schematic diagram of overburden rock fracture

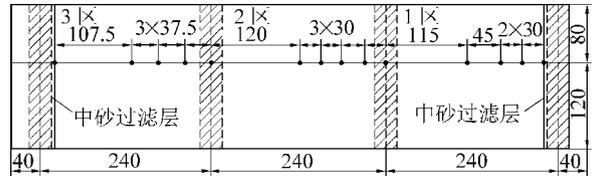
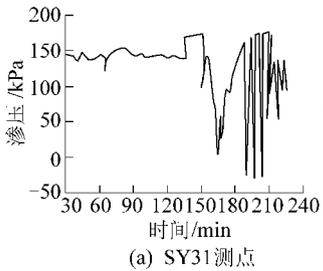
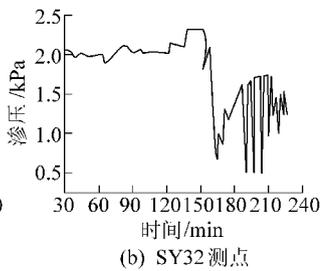


图11 渗压监测方案平面布置

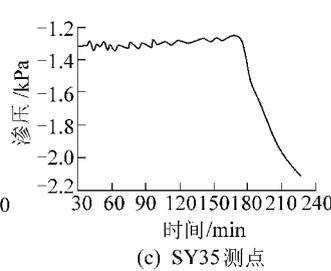
Fig.11 Arrangement of monitoring for seepage pressure



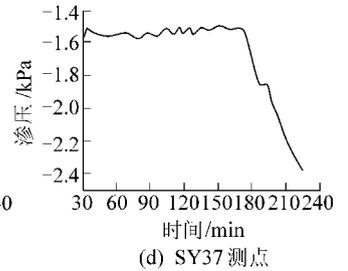
(a) SY31测点



(b) SY32测点



(c) SY35测点



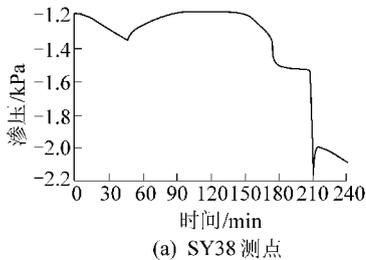
(d) SY37测点

图12 1区开挖后含水层渗压变化

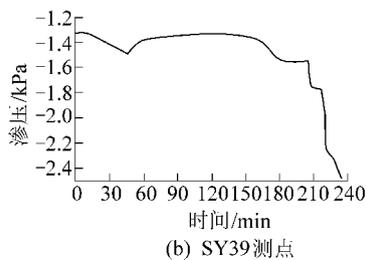
Fig.12 Seepage pressure variation after Zone 1 excavation

岩层破断运移稳定的过程中,含水层渗压虽有波动但总体趋势平稳,随着2区的开挖,SY38至SY310测点渗压均大幅度下降,因1区开挖后

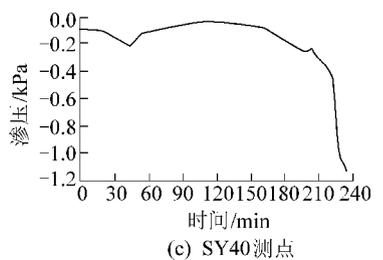
已将上方隔水层导通,故2区开挖后各测点渗压均为发生回涨现象,测点渗压变化曲线如图13所示。



(a) SY38测点



(b) SY39测点



(c) SY40测点

图13 2区开挖后含水层渗压变化

Fig.13 Seepage pressure variation after Zone 2 excavation

煤层开挖后,采空区上覆岩层先后经历了“弯曲下沉—裂隙发育—破断垮落”的动态演化过程,且裂隙发育至含水层上方隔水层,实体煤侧同样受采动影响出现大量裂隙,但裂隙发育程度较低,未及上方含水层,形成的导水通道较少,因此各测点渗压均有所降低,但位于实体煤上方的各测点渗压下降速率较为缓和。

3.4 岩层位移与裂隙水压变化关系

在1区和2区开挖后,上覆岩层裂隙发育,形成大量导水通道,造成含水层渗压降低,因岩层大面积垮冒滞后于导水裂隙带形成,故含水层渗压突变总是先于岩层突降下沉发生,岩层位移与裂隙水压变化曲线如图14所示。

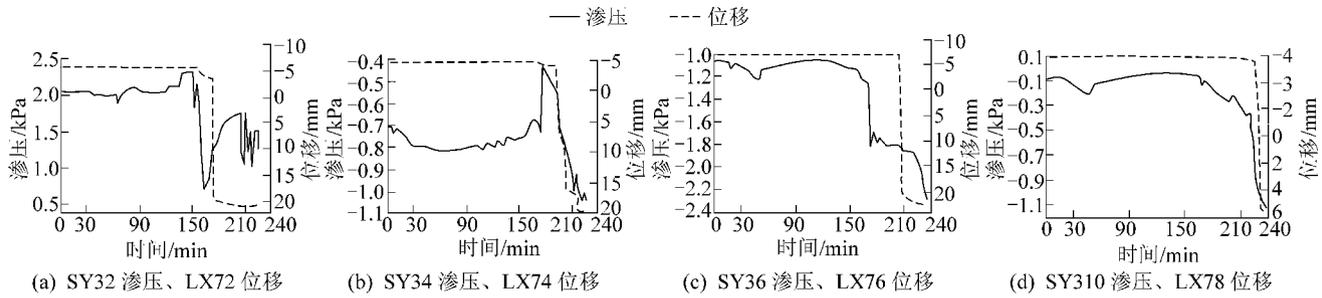


图14 岩层位移与裂隙水压变化

Fig.14 Variation of strata displacement and seepage pressure

4 结 论

1) 结合典型浅埋煤层地下水库地质生产条件,通过大量配比试验确定了相似材料配比,采用相似材料流固耦合模拟试验方法,建立了浅埋煤层地下水库流固耦合大尺寸立体模型。

2) 顶板破断运移稳定过程中,顶板暴露后破断,在实体煤临空侧形成倒台阶结构,煤柱应力呈现“先增大后降低”的演化特征。

3) 导水裂隙带越多则岩层渗压下降速率越大,而岩层裂隙发育程度决定了形成的导水裂隙带数量,岩层渗压下降速率与裂隙发育程度呈正相关,表明可通过岩层渗压下降速率表征岩层裂隙发育程度。

4) 煤层开挖后,顶板岩层先后经历“弯曲下沉—裂隙发育—破断垮落”的动态演化过程,岩层大面积垮冒滞后于导水裂隙带形成,可将顶板渗压突降作为顶板来压垮冒的预兆之一。

参考文献 (References) :

[1] 顾大钊,张勇,曹志国.我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):1-7.
GU Dazhao,ZHANG Yong,CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology,2016,44(1):1-7.

[2] 师修昌.煤炭开采上覆岩层变形破坏及其渗透性评价研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.

[3] 何绪文,杨静,邵立南,等.我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J].煤炭学报,2008,33(1):63-66.
HE Xuwen,YANG Jing,SHAO Linan, et al. Problem and countermeasure of mine water resource regeneration in China[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(1):66-69.

[4] 周如禄,高亮,郭中权,等.煤矿矿井水井下直接处理及循环利用[J].中国给水排水,2013,29(4):71-74.
ZHOU Rulu,GAO Liang,GUO Zhongquan, et al. Underground direct treatment and recycle of coal mine water[J]. China Water and Wastewater,2013,29(4):71-75.

[5] 何绪文,张晓航,李福勤,等.煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新[J].煤炭科学技术,2018,46(9):4-11.
HE Xuwen,ZHANG Xiaohang,LI Fuqin, et al. Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources[J]. Coal Science and Technology,2018,46(9):4-11.

[6] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coalmine underground reservoir [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(2):239-246.

[7] 顾大钊.“能源金三角”地区煤炭开采水资源保护与利用工程技术[J].煤炭工程,2014,46(10):34-37.
Gu Dazhao. Water resource protection and utilization engineering technology of coal mining in “Energy Golden Triangle” region [J]. Coal Engineering,2014,46(10):33-37.

[8] 李庭,顾大钊,李井峰,等.基于废弃煤矿采空区的矿井水抽水蓄能调峰系统构建[J].煤炭科学技术,2018,46(9):93-98.
LI Ting, GU Dazhao, LI Jingfeng, et al. Construction of pumped storage peak shaving system for mine water based on abandoned coal mine goaf [J]. Coal Science and Technology,2018,46(9):93-98.

[9] 刘晓丽,王恩志,董斌琦,等.一种用于模拟煤层开采的模拟系统及模拟试验方法[P].北京:CN105181372A,2015-12-23.

[10] 鞠金峰,许家林,朱卫兵.西部缺水矿区地下水库保水的库容研究[J].煤炭学报,2017,42(2):381-387.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Storage capacity of underground reservoir in the Chinese western water short coal field [J]. Journal of China Coal Society,2017,42(2):381-387.

[11] 董书宁.干旱、半干旱复杂矿区水资源系统优化配置及综合利用[D].西安:长安大学,2010.

[12] 范立民,冀瑞君.论榆神府矿区煤炭资源的适度开发问题[J].中国煤炭,2015,41(2):40-44.
FAN Limin,JI Ruijun. Discussion on the problem of moderate coal mining intensity in Yu-Shen-Fu Mining Area [J]. China Coal,2015,41(2):40-44.

[13] 曹志国,李全生,董斌琦,等.煤矿地下水库技术标准体系构建与制定[J].煤矿安全,2016,47(10):242-245.
CAO ZHiguo, LI Quansheng, DONG Binqi, et al. Construction and formulation of technical standard system for underground reservoirs in coal mines [J]. Safety in Coal Mines,2016,47(10):242-245.