

DOI: 10.11779/CJGE2017S1005

湖下采煤下渗模型试验与规律研究

杨令强¹, 王 岩², 马 静³

(1. 济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 济南大学, 山东 济南 250022; 3. 济南大学自动化学院, 山东 济南 250022)

摘 要: 根据地质力学模型试验原理和南四湖的工程地质与水文地质条件, 建立了 12 个地质模型。通过模拟湖下煤层的开采过程, 分析了煤层上部的砂岩和灰岩的破坏特征及地面开采盆地的形成过程。通过测量上层滞水位和潜水位随开采的变化和水位的恢复过程分析了湖下采煤对南四湖湖水的影响和湖水下渗的规律。研究发现: 如果湖下存在 2~3 m 左右的黏土层, 地表湖水基本上不会渗透到地下, 也不会造成地表水的大量损失。开采时潜水位会随着开采产生周期性下降, 停采后周围潜水会侧向补给采空区, 潜水位逐渐恢复, 在南四湖的地质条件下, 潜水位恢复到原来的 95%, 大约需要一年的时间。

关键词: 南四湖; 渗流; 采煤

中图分类号: TV62; TD742 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0022-05

作者简介: 杨令强(1972-), 男, 山东聊城, 教授, 博士, 主要从事水工结构研究工作。E-mail: cea_yanglq@ujn.edu.cn。

Model tests on seepage and rules of coal mining under water

YANG Ling-qiang¹, WANG Yan², MA Jing³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. University of Jinan, Jinan 250022, China;

3. School of Automation and Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: Based on the test principles of geological mechanics model and engineering geological and hydrogeological conditions of Nansi Lake, 12 geological mechanics model are established. By simulating the coal mining under the lake, the failure process of sandstone and limestone above the coal and the formation process of ground mining basin are studied. By measuring the change of perched water level and groundwater level with coal mining under the lake, the water level of the lake is studied. The seepage process from the lake to the mining pit is also studied. If there is a clay layer with depth of 2 to 3 m, the amount of leakage will be very small. The water in the lake will not be affected. The perched water level will cyclically decline with coal mining. But when the coal mining stops, the perched water level will gradually recover. For the restoration of the perched water level to its original 95%, it needs about 1 year under the engineering geological and hydrogeological conditions of Nansi Lake.

Key words: Nansi Lake; seepage; coal mining

0 引 言

关于煤矿开采活动对地下水影响的研究始于 20 世纪 80 年代, 前人从不同角度开展过许多研究。韩宝平^[1]、武强^[2]、赫英臣^[3]和韩宝平^[4]等从技术、经济、社会、生态环境、水利技术和安全生产等多方面, 提出了排、供、生态环保三位一体的水资源利用措施。但是对于水下采煤和地表水的损失量的定量关系一直缺乏深入的研究, 矿产部门和水资源管理部门也不断产生矛盾, 为此本文利用物理模型实验研究南四湖湖水由于地下采煤的下渗规律。物理相似模拟的实质是利用与地质原型物理力学、水理性质等相似的各类人工配比的材料按照一定的相似比例缩制成模型, 并依照采矿工程进行开挖模拟, 在模拟过程中观测分析上

覆岩土层的变形、位移、破坏及砂层潜水层的水位动态演化现象, 以分析湖下采煤对南四湖湖水资源的影响。

1 工程概况

南四湖位于沂沭泗流域, 由微山湖、昭阳湖、独山湖和南阳湖组成。湖泊南北狭长约 120 km, 东西宽约 5~25 km, 湖面面积约 1266 km²。南四湖为浅水型平原湖泊, 湖盆浅平, 北高南低。矿区地层由老到新分为奥陶系、石炭系、二叠系、上侏罗一下白垩统和

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2014EL038); 山东省水利科研计划项目(SDSLKY201301)

收稿日期: 2016-11-28

第四纪。奥陶系揭露最大厚度 243.19 m；石炭系一般厚度为 35.55 m，由泥岩、砂质泥岩及砂岩组成，泥岩、砂质泥岩多为杂色、灰绿色，砂岩多为灰绿、灰白色，以粉砂岩和细砂岩为主，局部含少量泥包体。侏罗一下白垩统一般厚度在 40 m 左右，岩性为紫红色中砾岩，上部夹薄层泥岩或砂质泥岩或粉细砂岩；第四系地层厚度 96.30~196.00 m，岩性由黏土、砂质黏土、混粒土及砂层组成。

2 试验方案

2.1 模型材料的选取

利用常规的干细砂作为基岩模拟材料的骨料，以 $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 CaCO_3 为胶结材料，凝结硬化后用来模拟岩石，以弹性模量作为控制指标，基于不同配比下模拟材料变形特征和断裂特征与泥岩、灰岩、砂岩材料相似^[5]进行室内试验。选用黏性土和矿物黄油作为土层材料的胶结剂，以模拟土体的塑性变形和抗渗透能力；以细砂作为骨料进行模拟，根据土体的塑性大小确定砂和黏结材料的混合比，塑性变形越大，胶结材料体所占的比例越大，其比例通过室内试验确定。

2.2 相似条件

基岩部分主要模拟煤层开采后上覆岩层产生的附加应力、应变场，模拟试验比尺为：弹性模量相似比尺 150：1，强度相似比尺 150：1，黏聚力相似比尺 150：1，内摩擦角相似比尺 1：1，应力相似比尺 150：1，应变相似比尺 1：1，泊松比不变。土层部分主要是模拟采空后上覆土层的塑性变形，土层的塑性应变的相似比尺为 150：1，其他参数与基岩部分相同。砂层部分主要作用是模拟地下水的渗流场，渗透系数和给水度相似比尺为 1：1，渗流的时间相似比尺为 150：1。

2.3 湖水压力的模拟

湖水通过供水系统的水箱进行模拟，相应的水位相似比尺为 150：1；渗透变形和渗透量的相似比尺也为 150：1。湖水水量的变化通过水位的变化计算和回水池的测量进行对照确定^[6]。

表 1 原型的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of prototype					
岩性	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	内摩擦 角/($^\circ$)	泊松 比	抗压强 度/ kPa
粉土	15.2	63	28.0	0.3	198
砂土	15.1	59	24.0	0.3	152
黏土	17.2	78	30.8	0.3	210
泥岩	24.4	1456	38.9	0.2	18100
灰岩	21.6	1379	36.2	0.2	23600
砂岩	23.1	2354	35.1	0.2	38100

2.4 模型配比设计

根据地质原型的主要物理力学参数原位测试成果（表 1），依照相似比例和相似原理计算得到的模型的物理力学参数。利用正交试验确定模型材料的配比见表 2，经过室内试验验证，相应配比基本符合相似材料的变形及破坏特征。

表 2 模型材料配比

岩性	Table 2 Mixture ratios of model materials					
	各种材料所占比例					
	中砂	石膏	CaCO_3	水	黏土	黄油
粉土					3.4	1
砂土					3.1	1
黏土					3.5	1
泥岩	6.58	0.32	0.80	1		
灰岩	6.89	0.35	0.75	1		
砂岩	6.23	0.30	0.85	1		

模型黏性土层的三轴应力加卸载应力 - 应变曲线如图 1 所示，可以看出利用黏性土和矿物黄油作为胶结材料，和黄沙在一定配比条件下本构关系和原型的关系基本一致，其应力比值约为 150：1，即模型对土层的模拟效果较好，在初始阶段有一些差别，是试验的测试误差所致。下降段模型的变化比原型要快一些。基岩原型材料和模型材料的应力 - 应变关系基本一致，但断裂韧度原型材料大于模型材料 6%~8% 左右。受水影响后，模型材料的断裂韧度极度下降，结果基本不可用。

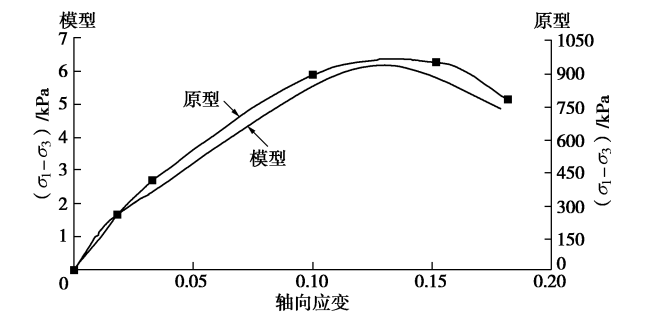


图 1 模型黏性土层加载应力应变曲线

Fig. 1 Loading stress-strain curves of model clay

2.5 模型建立

依据上述模型材料的配比，按照平面应变问题设计模型。确定模型的尺寸为长 250 cm，宽 50 cm，高 120 cm。模型煤层采厚为 3.0 cm，为避免边界效应的影响，在煤层模型的两边各留设 35 cm 的煤柱，模型其他岩土层厚度为粉土 2.5 cm、黏土 10.0 cm、砂土 15.0 cm、细砂层 25 cm、灰岩层 50.0 cm、煤层厚度 7.5 cm。在后续的试验中黏土层和粉土层根据南四湖不同的区域进行变化，以模拟南四湖湖水的下渗情况。

因为基岩是利用石膏作为胶结材料，为防止模型含水层中的水破坏模型基岩部分，对模型含水层采用薄塑料隔水。为保持工作面以外的含水层水位，在模型砂层的边界处连接原始湖水水头的供水系统，模型试验如图 2 所示。

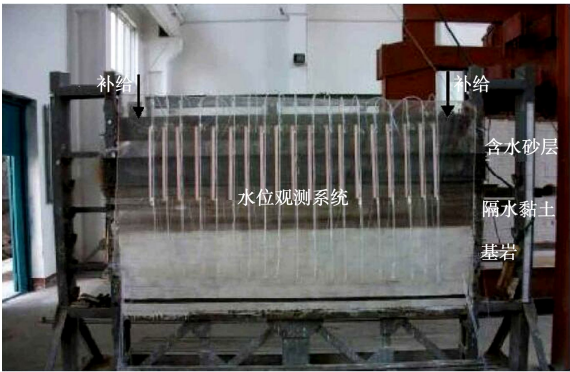


图 2 试验模型

Fig. 2 Model tests

2.6 试验方案

模型煤层从左向右逐步开挖，在开挖的过程中通过钢尺和放大镜对导水裂隙带发育高度、岩层离层发育情况、潜水位下降量进行观测。在隔水土层的顶界面每隔 10 cm 布置一个位移和水位观测点，共计布置 36 个测点，其测点布置如图 3 所示。随着煤层的逐步开采，对每个测点利用放大镜观测土层的下沉量。在每个水位测点内置一个加有滤网的塑料测压管，为便于观测，在每根测管内均加入了不同的离子色，所有测管均穿过包裹透明塑料薄膜含水砂层，并固定在标有刻度的有机玻璃板上，随着煤层的逐步开采对潜水位进行观测。

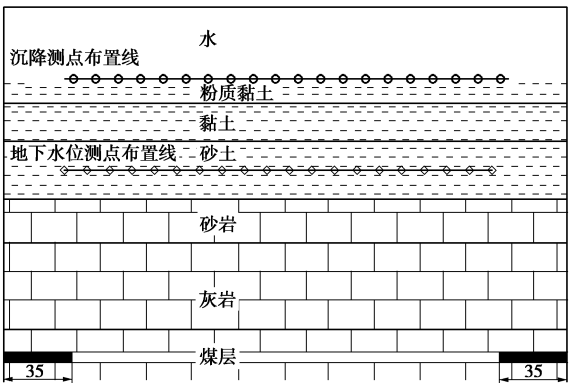


图 3 模型试验测点布置图

Fig. 3 Layout of monitoring points of model tests

2.7 试验结果及分析

(1) 模型荷载及塌落特征

模型开采采用自左端向右进行的方式进行，当开采到 7.0 cm 时煤层上层的砂岩层和灰岩层开始发生离

析，并出现轻微的响声；随着开采的进行，砂岩层和灰岩层开始出现裂缝，裂缝逐渐扩展；当开采到 9.7 cm 时，砂岩层发生明显的向下弯曲，砂岩层下部开始出现横向裂缝和层间裂缝，并出现明显的响声；当推进至 12.0 cm 时，煤层上部砂岩层开始第一次垮落，伴随着巨大的声响，各层位移突然增大；当继续推进至 30.0 cm 时，上部的砂岩层发生二次垮落，伴随着巨大的声响；当继续推进至 42.0 cm 时，塌落段长度达到 27.6 cm，如图 4 所示；当继续推进至 51.5 cm 时，上部第二层即灰岩层塌落长度也达到 11.7 cm，灰岩层从产生裂缝至塌落的时间明显比砂岩短，落块小；当继续推进至 67.0 cm 时，灰岩层塌落为 16.9 cm，如图 5 所示；此后随着工作面的继续推进，发生了多次塌落，采空区的上方和前方各层的位移明显增加。最终情况如图 6 所示。



图 4 模型初次塌落

Fig. 4 First failure of model



图 5 模型塌落过程

Fig. 5 Failure process of model

该模型试验岩层的破坏过程可总结为：①随着开采的进行岩层之间先发生岩层离析，然后下部的岩层弯曲，出现横向裂缝，裂缝扩展、连通，出现下块塌落；更上部的岩层再发生弯曲、裂缝和塌落。②砂岩是该矿区的关键层，砂岩层破坏后，灰岩和泥岩很快发生破坏，灰岩和泥岩的破坏时间短，变形小。③裂缝（破碎带）一直向上发展，裂隙带一直向上发育，直到开采到 175.0 cm 时，即接近结束时，导水裂隙带发育高度才趋于平稳，此时的导水裂隙高度为 44.62 cm，可以看出裂隙随着开采的推进一直增加（如图 7

所示)。



图 6 最终模型破坏情况

Fig. 6 Final failure of model

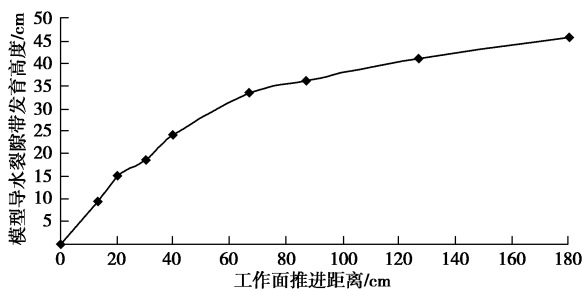


图 7 模型工作面推进过程中导水裂隙带发育高度

Fig. 7 Development of height of water-flowing fractured zone

因为岩层和含水层之间有一层透明塑料, 岩层离析现象要比实际工程明显, 但断裂破坏、岩层塌落和土层的下沉基本上反映出了工程的实际破坏情况, 从兖州矿务局废弃的巷道中也看到多处类图 6 的塌落现象; 试验所得结果与实际裂隙的统计结果^[7]也基本一致。这足以证明本模拟试验基本上是可信的。

(2) 模型土层沉降特征

随着开采工作的推进, 开采区上方的黏性土层及粉土随着基岩产生竖向沉降, 布置在土层顶部 18 个测点位移的变化如图 8 所示, 不难看出沉降大小和范围随开采范围的增大而增大。

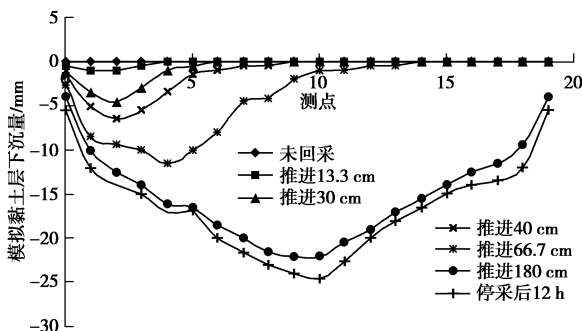


图 8 模型黏性土层下沉量与工作面推进关系

Fig. 8 Relationship between clay layer subsidence and caving distance

由模型导水裂隙带高度(图 7)及沉降的观测结果(图 8)可见, 随着煤层开采面积的增大, 每层顶

部的岩层的依次发生弯曲, 然后离层, 并最终断裂、塌落, 而隔水土层也伴随着基岩的断裂塌落而断裂塌落, 开采到 60.0 cm 左右时基本形成明显的下沉盆地。

(3) 模型潜水位变化特征

模型砂层潜水位动态变化可分为开采过程和停采后恢复两个过程, 对这两个过程分别进行了观测和分析如下。

a) 煤层开采过程中潜水位变化特征

随开采工作面的推进, 各测压管获取的水位数据如图 9 所示, 可以看出伴随着开采面的逐步推进, 砂层潜水位在每次来压后均发生不同程度的下降, 每次水位降深最大的点是在开采区域的中心位置, 而越远离开采位置的水位降深越小, 甚至水位没有变化。这说明开采过程中, 潜水位的变化发生在开采影响范围内, 而不会形成大面积的水位变化区。这与土层的渗透能力有关。

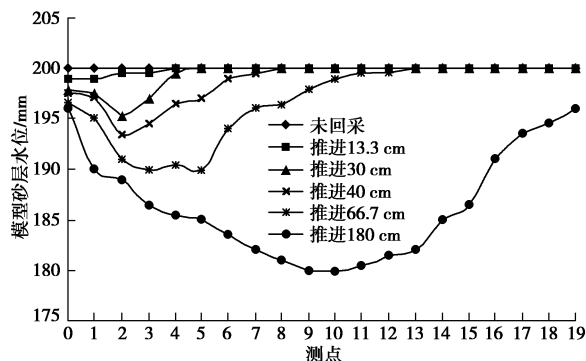


图 9 煤层回采过程中砂层水位动态曲线

Fig. 9 Water level curves of sand with caving distances

b) 停采后潜水位恢复特征

考虑水位滞后的影响, 煤层停采后继续对砂层潜水位观测 48 h, 各测点水位恢复情况如图 10 所示。图中可以看出在煤层停采后, 起初 1 h 内潜水位恢复很快, 水位大约恢复 30%~40%, 2 h 水位恢复约 50%。以后水位恢复逐渐变慢, 最终 48 h 时间水位恢复了停采时水位降深的 95%, 按照水位的比尺 1:150 推算, 实际工程中水位恢复大约需要 300 多天, 即 1 年的时间左右。

对比图 8 和图 9 可以得出, 由于土层下沉盆地的产生, 含水层底板边界发生不均匀连续沉降使得潜水位发生先下降再上升的周期性变化。由图 9 和图 10 可知, 开采完成后土层下沉盆地进一步缓慢发育, 但周围尚未开采区域潜水位基本上保持天然水位, 两者水位落差的存在使得采空区上覆砂层潜水位逐渐恢复, 恢复时间与砂层的渗透系数有关, 在本试验条件下潜水位恢复降深 95% 需要 1 年左右的时间。

(4) 自由水量的观测

煤层开采是否会造成地表水资源的大量损失,是水利部门极为关心的问题。在试验过程中,去除薄塑料隔水层。通过改变粉土和黏土层厚度分别作下列 12 组试验得到自由水量的变化如表 3、4 所示,可以看出黏土对水量变化的影响比粉土大得多,如果湖下有 2~3 m 以上的黏土存在,开采基本不会造成湖水的渗漏。按照文献[8]的计算方法,渗漏量的大小与试验结果基本一致。

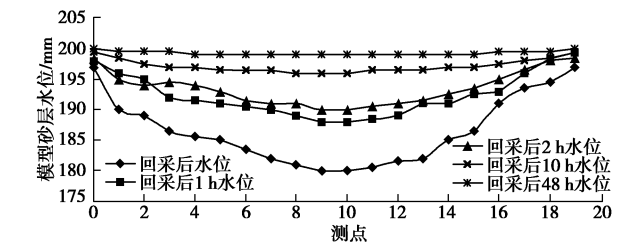


图 10 模型砂层水位恢复动态曲线

Fig. 10 Curves of water level recovery of sand

表 3 渗水量变化与黏土层厚度关系

Table 3 Relationship between change of seepage water and thickness of clay layer

黏土厚度/cm	10	8	6	4	2	1
水量变化/%	0.12	0.24	0.78	1.28	2.68	3.47

注:粉土层厚度为 2.5 cm。

表 4 渗水量变化与粉土层厚度关系

Table 4 Relationship between change of seepage water and thickness of silt layer

粉土厚度/cm	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	2.5
水量变化/%	2.68	3.23	3.93	4.17	4.75	2.68

注:黏土层厚度为 2.0 cm。

3 结论与讨论

(1) 在黏土层厚度超过 2~3 m 的情况下,潜水位基本不受湖水的影响;地表湖水基本上不能渗透到地下。根据南四湖的地质条件,大部分地区不会因为煤层的开采而产生地表水的大量损失。

(2) 随着煤层的开采黏性土层下沉盆地的形成,含水层底板边界发生不均匀连续沉降使得潜水位随着开采产生的压力发生周期性下降,停采后在周围潜水侧向补给下,潜水位逐渐恢复,在南四湖的地质条件下,潜水位恢复到降深 95%,大约需要 1 年。

(3) 利用石膏作为胶结材料模拟基岩,在受水影响前,结果和实际基本相符;在受水影响后,其破坏过程要比实际快,结果基本上不能采用。因此本文所得渗水量的结果是基本可信的,但渗水过程要比实际快。为了改善试验的效果,曾利用硅酸盐水泥代替石

膏做了试验,但其破坏特征与基岩的破坏特征不符,因此这是一个需进一步研究的问题。

参考文献:

[1] 韩宝平, 郑世书. 煤矿开采诱发的水文地质效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(3): 70 - 77. (HAN Bao-ping, ZHENG Shi-shu. Hydrogeological effects induced by coal mining[J]. China University of Mining Technology, 1994, 23(3): 70 - 77. (in Chinese))

[2] 武 强, 董东林, 石占华, 等. 华北型煤田排、供、生态环保三位一体优化结合研究[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(6): 567 - 573. (WU Qiang, DONG Dong-lin, SHI Zhan-hua, et al. North China coal row, supply, combined with eco-friendly trinity optimization[J]. Chinese Science (D series), 1999, 29(6): 567 - 573. (in Chinese))

[3] 赫英臣, 龚 斌, 郝爱民, 等. 矿区浅层地下水污染机理探讨[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(5): 5 - 8. (HE Ying-chen, GONG Bin, HAO Ai-min, et al. To investigate the mechanism of mining pollution of shallow groundwater[J]. China Safety Science, 2007, 17(5): 5 - 8. (in Chinese))

[4] 韩宝平. 矿区环境污染与防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008. (HAN Bao-ping. Mining pollution and prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008. (in Chinese))

[5] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用. 南京: 河海大学出版社, 1990. (WU Zhong-ru. Safety monitoring theory and its application of hydraulic structures[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1990. (in Chinese))

[6] 杨令强, 马 静, 高 蕊. 土石坝加固前后的监测分析及监控模型[J]. 水利学报, 2015, 43(增刊): 70 - 73. (YANG Ling-qiang, MA Jing, GAO Rui. Monitoring analysis and monitoring model of earth rock dam before and after reinforcement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 43(S0): 70 - 73. (in Chinese))

[7] 李宏艳, 王维华. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1023 - 1030. (LI Hong-yan, WANG Wei-hua. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1023 - 1030. (in Chinese))

[8] 王玉涛. 煤炭采空区对水库渗漏影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(4): 27 - 32. (WANG Yu-tao. Research on impact of coal goaf on reservoir leakage[J]. Yangtze River, 2016, 47(4): 27 - 32. (in Chinese))