



移动扫码阅读

刘 辉,左建宇,苏丽娟,等.巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(5):49-56.
LIU Hui,ZUO Jianyu,SU Lijuan, et al. Study on surface movement and deformation laws in mining under thick water-bearing loose layer[J].Coal Science and Technology,2022,50(5):49-56.

巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律研究

刘 辉^{1,2},左建宇^{1,2},苏丽娟³,程 桦^{1,2},朱晓峻^{1,2},张鹏飞^{1,2},王保国⁴

(1.安徽大学 资源与环境工程学院,安徽 合肥 230601;2.安徽省矿山生态修复工程实验室,安徽 合肥 230601;
3.安徽大学 数学科学学院,安徽 合肥 230601;4.蚌埠市勘测设计研究院,安徽 蚌埠 233040)

摘 要:巨厚含水松散层复杂地质采矿条件下开采地表移动变形规律存在一定的特殊性。为了研究巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律,明确巨厚含水松散层对地表移动变形影响,以菏泽矿区为研究区域,在分析某矿 1308 工作面地表移动变形实测数据的基础上,采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件,流固耦合计算模拟了巨厚含水松散层下开采地表移动变形,分别制定了动态固结沉降方案、无含水层方案、含水层位置方案,量化计算了巨厚含水松散层渗流固结沉降量占比,总结了巨厚含水松散层渗流固结沉降动态规律,对比分析了有无含水层情况下煤层开采地表移动变形差异,研究了松散层内含水层位置对地表移动变形的影响。研究表明:某矿巨厚含水松散层采矿条件下受采动引起的渗流固结沉降占地表总下沉量的 8.5%;随工作面推进,开挖变形和渗流固结沉降增量的变化可划分为同步增长期、动态变化期、同步减缓期 3 个阶段。巨厚松散层内含水层受采动影响产生的疏水渗流固结现象会导致地表移动变形增大、地表移动影响范围扩大,但最大曲率和最大水平变形的减小说明下沉盆地的整体形状更为平缓。地表变形参数与巨厚松散层内含水层位置之间存在相关性,通过相关性分析,建立了地表移动变形参数与松散层内含水层位置之间的关系模型。

关键词:巨厚含水松散层;含水层;地表移动变形;流固耦合;开采沉降

中图分类号:TD325 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)05-0049-08

Study on surface movement and deformation laws in mining under thick water-bearing loose layer

LIU Hui^{1,2},ZUO Jianyu^{1,2},SU Lijuan³,CHENG Hua^{1,2},ZHU Xiaojun^{1,2},ZHANG Pengfei^{1,2},WANG Baoguo⁴

(1.College of Resources and Environmental Engineering,Anhui University,Hefei 230601,China;2.Anhui Engineering Laboratory of Mine Ecological Remediation,Hefei 230601,China;3.School of Mathematical Sciences,Anhui University,Hefei 230601,China;4.Bengbu Investigation and Design Institute,Bengbu 233040,China)

Abstract: There are certain particularities in the movement and deformation law of the mining surface under the complex geological mining conditions of the extremely thick water-bearing loose layer. In order to study the surface movement and deformation laws of mining under extremely thick water-bearing loose layer, and clarify the influence of the extremely thick water-bearing loose layer on the surface movement and deformation, the Heze mining area was used as the research area, and based on the analysis of the measured data of surface movement and deformation of No.1308 working face in Guotun coal mine, the FLAC^{3D} numerical simulation software was used, and the fluid-solid coupling calculation simulated the surface movement under the thick water-bearing loose layer. The dynamic consolidation settlement scheme, non aquifer scheme and aquifer location scheme were separately formulated. The proportion of seepage consolidation settlement in the thick water-bearing loose layer was calculated quantitatively. The dynamic laws of seepage consolidation settlement of the thick water-bearing loose layer were summarized, comparative analysis of the difference in surface movement and deformation of coal seam mining with

收稿日期:2021-11-26

责任编辑:朱恩光

DOI:10.13199/j.cnki.cst.2021-1343

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174156,51874005);安徽省高校协同创新资助项目(GXXT-2020-055)

作者简介:刘 辉(1982—),男,山东肥城人,教授,硕士生导师,博士。Tel:0551-63861026,E-mail:lhui99@aliyun.com

通讯作者:苏丽娟(1986—),女,山东枣庄人,副教授,硕士生导师,博士。Tel:0551-63861441,E-mail:58160242@qq.com

or without aquifers, the influence of the position of the aquifer in the loose layer on the movement and deformation of the surface was studied. The research results show that the seepage consolidation settlement caused by mining under the mining conditions of the extremely thick water-bearing loose layer in Guotun coal mine accounts for 8.5% of the total surface subsidence; With the advance of the working face, the changes of excavation deformation and seepage consolidation settlement increment can be divided into three stages; synchronous growth period, dynamic change period and synchronous slowdown period. The hydrophobic seepage and consolidation phenomenon of the aquifer in the thick loose layer affected by mining will cause the increase of surface movement deformation and the expansion of the influence range of surface movement, but the reduction of the maximum curvature and the maximum horizontal deformation indicates the overall shape of the subsidence basin more gentle. There is a correlation between the surface deformation parameters and the position of the aquifer in the thick loose layer, through correlation analysis, the relationship model between the surface movement deformation parameters and the position of the aquifer in the loose layer is established.

Key words: thick water-bearing loose layer; aquifers; surface movement and deformation; fluid solid coupling; mining subsidence

0 引言

储量丰富的煤炭资源作为我国最重要的基础能源,一直占据我国能源消费总量一半以上,担负着为经济发展提供主动力的责任^[1-4]。我国煤炭资源赋存状态具有一定的地域特色,东部矿区较西部矿区普遍具有煤层埋藏深、松散层厚且潜水位高等地质结构特点,其复杂的地质结构下开采地表移动变形较常规地质条件更为剧烈,主要表现为:下沉量增大、下沉系数接近甚至超过1.0、下沉盆地影响范围扩大、沉陷后易形成积水区。因此对矿区地表生态环境和群众居住生活产生了严重影响^[5-8]。

针对巨厚松散层条件下开采的特殊地表移动变形规律,国内外学者从现场分析、理论分析和实验模拟等多角度对其机理进行了大量研究。研究表明巨厚松散层下开采地表移动变形的特殊性不仅仅是由上覆岩层综合岩性较软所导致的,其不可忽略的因素是煤层开采引起上覆岩层内含水层疏水渗流固结所带来的附加沉降^[9-12]。对于上覆岩层内含水层疏水渗流固结引起的附加沉降,我国学者实验模拟证明了含水层失水固结机理,量化分析了含水层固结沉降量,建立了松散层底部含水层失水固结模型,取得了一定的成果^[13-18]。但是以往的研究手段主要为理论分析和相似材料模拟,难以全面考虑到应力场和渗流场的耦合作用对巨厚含水松散层下开采地表移动变形的影响,从而导致结果的偏差。

以菏泽矿区某矿典型的巨厚含水松散层地质采矿条件为原型,在分析工作面实测数据的基础上,采用FLAC^{3D}数值模拟软件,充分考虑应力场和渗流场耦合作用的影响,对巨厚含水松散层下煤层开采地表移动变形进行了流固耦合模拟,总结了采动过程中渗流固结沉降动态规律,对比分析了有无含水层情况下煤层开采地表移动变形差异,研究了松散层内含水层位置对地表移动变形的影响,为更准确预

测及控制巨厚含水松散层下煤层开采引起的地表移动变形,提供一定的理论依据和技术参考。

1 研究区概况

菏泽矿区某矿位于山东省菏泽地区郓城县城南约10 km处,处于巨野煤田的中北部,其范围东起田桥断层及田桥支断层,西至煤系地层底界露头,南起3925000纬线,北至25勘探线,南北长约14 km,东西宽约11 km,地表总面积达到了222 km²。矿区地面标高+41.60~+45.38 m,浅层地下水埋深2~7 m,上覆新近系和第四系松散层平均厚度达到了590 m,局部超过700 m,属于典型的巨厚含水松散层地质条件,矿区综合柱状如图1所示。

地层		厚度/m	柱状	岩性描述
系统	组段			
第四系		100.70~156.49 133.27		黄色黏土、砂质黏土夹粉细砂等
	新近系	上段	91.80~385.20 285.97	
下段		85.80~229.50 157.77		棕色、灰绿色厚层黏土,粉砂质黏土
二叠系上统	上石盒子	最大残厚 445.50		杂色泥岩、粉砂岩及中、细砂岩
二叠系下统	下石盒子	33.00~87.00 53.08		灰绿色泥岩、粉砂岩夹砂岩
		0~8.18 4.91		3煤
	山西组	44.30~85.25 66.66		灰白色砂岩、灰黑色泥岩、粉砂岩
		石炭系上统	太原组	158.31~185.66 171.09

数据格式: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$

图1 矿区综合柱状

Fig.1 Stratigraphic column of mining area

通过对钻孔柱状图以及水文地质报告分析可将上覆巨厚松散层概括划分为5层含水、隔水层,见表1。巨厚松散层内第四系含水的砂层与隔水的黏土

层相间沉积,属于富水性中等的松散孔隙含水层,新近系含水的砂层单层呈犬牙交错状相连,属于富水性强的松散孔隙承压含水层。

表 1 矿区含水、隔水层划分

Table 1 Division of aquifers and aquiclude in mining area

地层	含水、隔水层	深度/m	厚度/m
第四系	含水层(一含)	85.20~86.30	37.30~45.75
	隔水层(一隔)	136.30~138.30	44.80~48.20
新近系	含水层(二含)	332.20~334.30	73.00~78.10
	隔水层(二隔)	542.00~546.60	144.00~159.70
上石 盒子组	含水层(三含)	583.10~587.40	25.50~37.00
	风氧化带上隔	591.80~613.10	8.57~26.47
	风氧化带含	660.20~666.20	36.35~50.73
	风氧化带下隔	668.90~680.39	8.46~13.88

某矿 1308 工作面走向长度约 630 m,倾向长度约 230 m,主采煤层为山西组 3 煤层,煤层平均厚度为 3 m,平均倾角为 3°,为近水平煤层,煤层采用长壁垮落法开采,采深为 765 m,工作面上覆松散层平均厚度为 582 m,煤层顶板主要由粗砂岩、中细砂岩、砂质泥岩等组成,具有开采深度大、倾角小、松散层厚、松散层内含有多层含水层的特点。1308 工作面移动盆地主断面上方采用十字线布设了地表移动观测线,走向观测线全长约 1 550 m,累计布设 47 个观测点,倾向观测线全长约 1 800 m,累计布设 53 个观测点,采动期间以平均 35 d 一次的频率进行观测,至停采后共观测 12 次。根据地表移动观测数据绘制了地表动态下沉曲线(图 2),地表移动变形参数如下:

工作面	1308
下沉系数 q	1.092
水平移动系数 b	0.25
主要影响角正切 $\tan \beta$	1.60
边界角 δ_0	56.90°

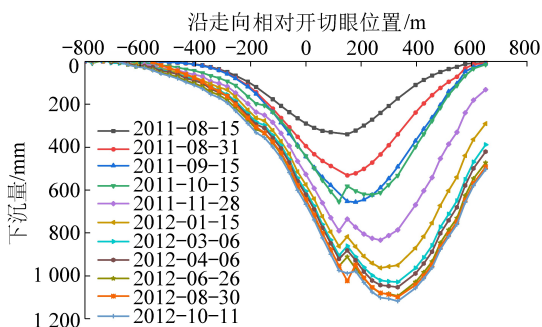


图 2 工作面走向线动态下沉曲线

Fig.2 Dynamic sink curve of strike line of working face

可以看出,巨厚含水松散层下开采地表移动变形与常规地质条件下采动存在一定的特殊性。相比较之下,巨厚含水松散层下开采具有移动变形初期时间短、启动距短、初始期和活跃期下沉速度快、下沉系数大于 1、主要影响角正切和边界角小、下沉盆地影响范围大、下沉盆地边界处水平位移大于下沉量且下沉盆地衰退期长、边缘收敛缓慢的特点。

2 模型设计与方案

2.1 模型设计

为研究巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律,以菏泽矿区某矿 1308 工作面地质采矿条件为原型,采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件建立了模型尺寸为 3 000 m×1 500 m×824 m(长×宽×高)的三维数值模拟模型。模型单元尺寸在水平方向为 25 m,垂直方向按照岩层厚度不同进行合理设置。模型采高为 3 m,煤层设计为水平煤层,设计的工作面长度为 1 200 m,宽度为 400 m,工作面沿走向方向分为 12 次开采,开挖步长均为 100 m,开采深度为 765 m,其上覆岩层内松散层厚度为 582 m。为避免模型过小所导致的边界应力效应,在工作面走向和倾向两侧各留 900 m 和 550 m 的边界保护煤柱,三维数值模拟模型如图 3 所示。

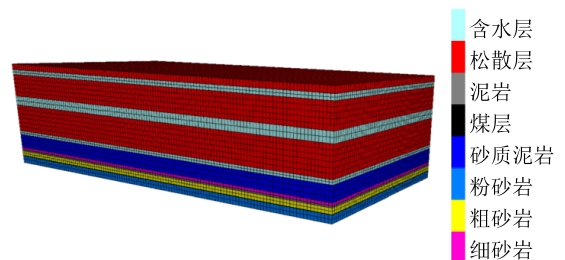


图 3 数值模拟模型

Fig.3 Numerical simulation model

模型的位移边界条件设置为:约束模型底面各个方向的位移,模型顶面为自由面,前后左右四面约束 x 、 y 水平方向的位移,但可以发生 z 方向的移动。渗流模型设置为各岩层均为各向同性且均匀等效的连续孔隙介质,力学模型采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,数值模拟岩层参数根据地质资料进行概化合并见表 2。

2.2 模拟方案

为研究巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律,明确巨厚含水松散层在下沉盆地形成中的作用以及含水层位置对地表移动变形的影响,分别制定了动态固结沉降、无含水层、含水层位置 3 种数值模拟方案。

表2 数值模拟岩层参数
Table 2 Numerical simulation of rock parameters

岩层	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	内摩擦角/ (°)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
松散层	0.51	0.47	0.51	0.45	25	1 800	8.82×10^{-6}
含水层	0.51	0.47	0.51	0.45	25	1 700	2.94×10^{-4}
砂质泥岩	6.89	1.95	3.96	3.73	35	2 415	6.86×10^{-8}
细砂岩	5.14	1.43	3.23	3.13	34	2 480	7.84×10^{-7}
泥岩	6.34	5.05	2.82	2.96	36	2 470	4.90×10^{-8}
粗砂岩	8.32	1.12	3.68	3.29	39	2 590	6.86×10^{-6}
煤层	0.37	0.19	0.81	1.16	21	1 500	8.82×10^{-6}
粉砂岩	7.67	4.35	4.62	4.25	41	2 550	3.92×10^{-7}

1) 动态固结沉降方案。根据矿区含水、隔水层划分表(表1)在松散层内设置含水、隔水层,进行流固耦合模拟,研究巨厚含水松散层下采动过程中渗流固结沉降动态规律。

2) 无含水层方案。不考虑巨厚含水松散层在采动中产生的流固耦合影响,进行纯力学开挖模拟,通过对比分析,研究有无含水层情况下煤层开采地表移动变形差异。

3) 含水层位置方案。在松散层内设置厚度为40 m的单层含水层,通过调整含水层位置标高,分别模拟含水层底部与基岩的距离为0、100、200、300、400 m的5种情况,研究巨厚松散层内含水层位置标高对地表移动变形的影响。

3 巨厚含水松散层对下沉盆地影响

为明确巨厚含水松散层内的多层含水层在煤层开采下沉盆地形成过程中的作用及影响,对动态固结沉降方案模拟结果进行归纳总结分析,并与无含水层方案模拟结果进行对比分析,研究了巨厚含水松散层渗流固结沉降动态规律,并对比分析了有无含水层情况下煤层开采地表移动变形差异。

3.1 巨厚含水松散层渗流固结沉降动态规律

动态固结沉降方案通过循环开关流体渗流模块从而实现流固耦合模拟:在煤层开挖后,先关闭FLAC^{3D}中的流体渗流分析模块,迭代计算至平衡,得到模型在单力学场中的土体不排水变形量(开挖变形沉降量),然后开启流体渗流模块,流固耦合计算土体在该开挖阶段内的排水变形量(渗流固结沉降量),流固耦合计算完成后再进行下一步开挖,并如此往复循环计算,直至工作面开挖结束。

根据FLAC^{3D}流固耦合模拟机制,对动态固结沉

降方案模拟计算结果进行分析,绘制了随工作面推进受开挖变形和渗流固结耦合作用影响的地表最大下沉发展曲线图,如图4所示。从图4可看出,当工作面推进至1 200 m开挖结束时,地表最大下沉为1.988 m,其中开挖变形沉降在地表总沉降中占主导地位,由开挖变形引起的沉降量为1.820 m,而渗流固结引起的沉降量为0.168 m,结合地表总沉降量可得出巨厚含水松散层渗流固结引起的沉降量占最终地表总沉降的8.5%。

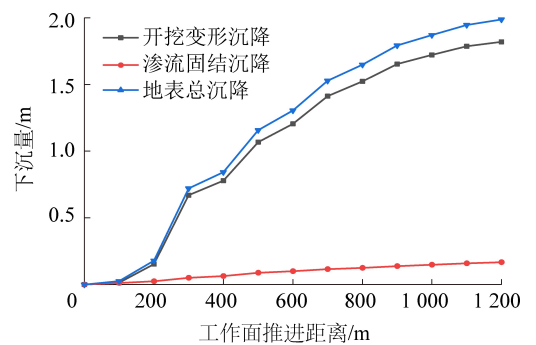


图4 地表最大下沉发展曲线

Fig.4 Maximum surface subsidence development curve

为研究巨厚含水松散层渗流固结沉降动态规律,通过计算得到了每一步开挖过程中开挖变形沉降增量和渗流固结沉降增量,并绘制了随工作面推进的地表沉降增量变化曲线,如图5所示。通过对地表沉降增量变化曲线进行分析可将开挖变形和渗流固结沉降增量的变化随工作面推进划分为同步增长期、动态变化期、同步减缓期3个阶段。

1) 同步增长期。在工作面开采初期,工作面推进至200 m阶段内,开挖变形和渗流固结沉降增量呈现出同步增长的趋势,地表开始出现明显下沉,起距约为1/4煤层埋深。

2) 动态变化期。工作面推进至 200~600 m, 开挖变形和渗流固结沉降增量在整体上共同出现明显的增大和减小波动, 其中渗流固结沉降增量随工作面推进的变化波动更为剧烈, 与此同时地表出现剧烈下沉变形。

3) 同步减缓期。随着工作面的继续推进至终采线 1 200 m 处, 逐步接近走向充分采动时, 开挖变形和渗流固结沉降增量呈现出同步减缓的趋势, 但其整体上仍存在较小的变化波动。

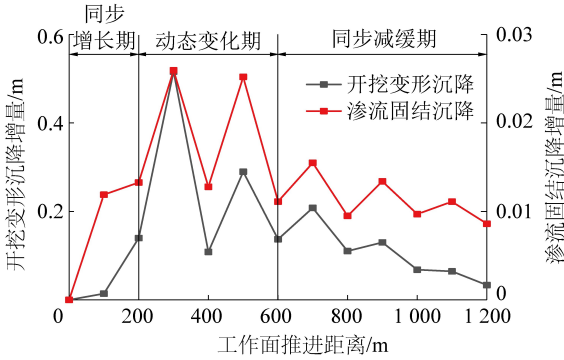


图5 地表沉降增量变化曲线

Fig.5 Incremental change curve of surface subsidence

3.2 地表移动变形差异对比分析

为更好地研究巨厚含水松散层的多层含水层对下沉盆地的影响, 对比分析了动态固结沉降方案与无含水层方案的模拟结果, 并绘制了工作面推进至 1 200 m 时动态固结沉降方案与无含水层方案的工作面走向下沉曲线, 如图 6 所示。下沉曲线整体关于采空区中心对称且曲线保持连续渐变, 由于工作面已推进至 1 200 m, 走向达到充分采动, 下沉曲线底部呈现平底状, 两者均符合厚松散层条件下采动引起的地表下沉曲线分布, 但仍存在一定的差异性。

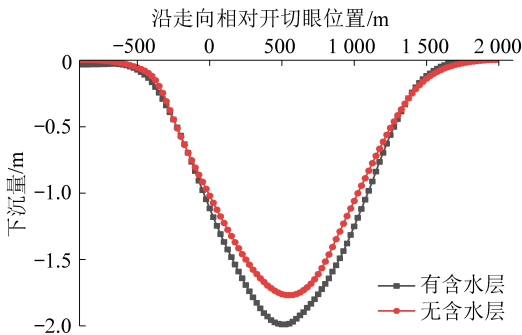


图6 工作面走向下沉曲线

Fig.6 Strike subsidence curve of working face

通过对模拟结果进一步对比分析, 得到了地表最大变形, 见表 3。由表 3 可看出: 考虑松散层内含水层影响进行流固耦合计算后, 动态固结沉降方案

相较于无含水层方案, 最大下沉值增大了 0.220 m、最大倾斜增大了 0.178 mm/m、最大水平移动增大了 0.063 m, 而最大曲率和最大水平变形分别减小了 0.003 mm/m² 和 0.587 mm/m。

表 3 地表最大变形

Table 3 Numerical simulation of rock mechanics parameters

方案	最大下沉量/ mm	最大倾斜/ (mm · m ⁻¹)	最大曲率/ (mm · m ⁻²)	最大水平移动/ mm	最大水平变形/ (mm · m ⁻¹)
有含水层	-1 988	2.936	0.013	610	1.590
无含水层	-1 768	2.758	0.016	548	2.177

表 4 给出了动态固结沉降方案与无含水层方案的地表移动变形参数, 通过对比分析可得:

1) 考虑松散层内含水层影响进行流固耦合计算后, 动态固结沉降方案的下沉系数达到了 1.096, 相较于无含水层方案的 0.974, 下沉系数增大了 12.5%; 相比较之下, 水平移动系数变化极小, 动态固结沉降方案的水平移动系数仅比无含水层方案减小了 1.0%。

2) 对 2 种情况的工作面主断面走向线下沉数据分析计算可得出, 动态固结沉降方案和无含水层方案的主要影响半径分别为 677、641 m, 相比较之下考虑含水层影响进行流固耦合计算后, 主要影响半径增大了 5.62%。因 2 种模拟计算方案的工作面平均采深不变, 动态固结沉降方案的主要影响角正切比无含水层方案减小了 5.28%。

3) 动态固结沉降方案和无含水层方案的边界角分别为 48.86° 和 50.22°, 相比较之下动态固结沉降方案考虑含水层影响进行流固耦合计算后, 边界角减小了 2.71%。

表 4 地表移动变形参数对比

Table 4 Comparison table of surface movement deformation parameters

方案	下沉系数 q	水平移动系数 b	主要影响角 正切 $\tan \beta$	边界角 δ_0
有含水层	1.096	0.307	1.130	48.86
无含水层	0.974	0.310	1.193	50.22

综上所述, 巨厚松散层内含水层受采动影响导致松散层内孔隙水压力消散, 有效应力增大, 产生渗流固结沉降, 引发下沉盆地在开挖变形沉降的基础上再平衡^[19-20]。从而导致地表下沉和水平移动变形增大, 主要影响半径增大, 主要影响角正切和边界角减小, 下沉盆地的地表移动影响范围扩大, 但最大曲率和最大水平变形的减小说明下沉盆地的整体形状在巨厚松散层内含水层疏水渗流固结沉降的作用

下更为平缓^[21-22]。

4 地表变形参数与含水层位置的关系

上文中对巨厚含水松散层内的多层含水层在下沉盆地形成过程中所产生的影响进行了研究,得知巨厚松散层内含水层受采动影响产生的疏水渗流固结现象会导致地表移动变形增大、地表移动影响范围扩大。为进一步探索巨厚松散层内不同位置标高的含水层对地表移动变形的影响,通过对含水层位置方案模拟数据结果进行分析,研究了地表移动变形参数与巨厚松散层内含水层位置之间的关系。

为方便表述含水层位置方案中所设置的含水层在松散层内所处的位置,定义含水层位置 s 为含水层底部距基岩的距离与松散层厚度的比值。

4.1 下沉系数变化规律

根据模拟结果,绘制了下沉系数 q 与含水层位置 s 之间的关系,如图 7 所示。

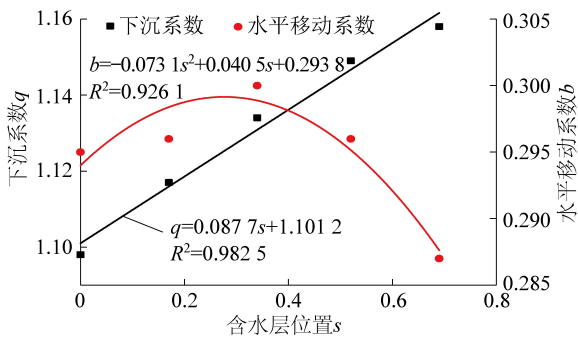


图 7 下沉系数和水平移动系数与含水层位置关系

Fig.7 Correlation curve of subsidence factor and displacement factor with aquifer location

从图 7 中可得:含水层底部与基岩之间的距离为 0 时,下沉系数为 1.098。随着含水层底部与基岩之间距离的增加,下沉系数呈现出线性增长趋势,当含水层底部与基岩之间的距离增加至 400 m 时,下沉系数达到最大值 1.158。对含水层底部与基岩间距为 0~400 m 的 5 种模拟结果的下沉系数与含水层位置进行相关性分析,得出下沉系数 q 与含水层位置 s 之间的相关性公式为:

$$q = 0.0877s + 1.1012 \quad (1)$$

综上所述,下沉系数与松散层内含水层位置之间存在正线性关系。

4.2 水平移动系数变化规律

根据模拟结果,绘制了水平移动系数 b 与含水层位置 s 之间的关系图,如图 7 所示。

从图 7 中可得:5 种模拟结果的水平移动系数为 0.287~0.300,数值波动较小。当含水层底部与

基岩之间的距离为 0 时,水平移动系数为 0.295,随着含水层与基岩之间距离的增加,水平移动系数呈现出先增大后减小的变化规律,在含水层底部与基岩间距为 200 m 时达到 0.300 的最大值。对含水层底部与基岩间距为 0~400 m 的 5 种模拟结果的水平移动系数与含水层位置进行相关性分析,得出水平移动系数 b 与含水层位置 s 之间的相关性公式为:

$$b = -0.0731s^2 + 0.0405s + 0.2938 \quad (2)$$

综上所述,水平移动系数与松散层内含水层位置之间存在先增大后减小的二次函数关系。

4.3 主要影响角正切变化规律

根据模拟结果,绘制了主要影响角正切 $\tan \beta$ 与含水层位置 s 之间的关系,如图 8 所示。

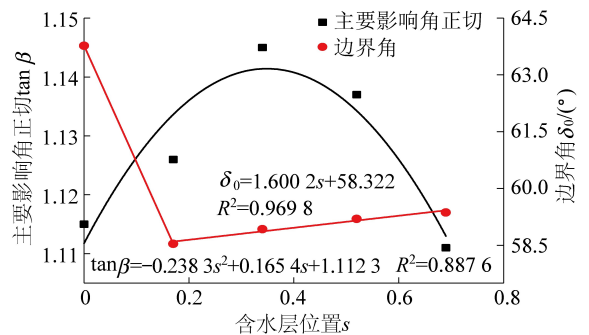


图 8 主要影响角正切和边界角与含水层位置关系

Fig.8 Correlation curve of tangent of major influence angle $\tan \beta$ and limit angle δ_0 with aquifer location

由图 8 可得:含水层底部与基岩之间的距离为 0 时,主要影响角正切为 1.115。随着含水层底部与基岩之间距离的增加,主要影响角正切呈现出先增大后减小的变化规律,在含水层底部与基岩间距为 300 m 时达到 1.145 的最大值。对含水层底部与基岩间距为 0~400 m 的 5 种模拟结果的主要影响角正切与含水层位置进行相关性分析,得出主要影响角正切 $\tan \beta$ 与含水层位置 s 之间的相关性公式为:

$$\tan \beta = -0.2383s^2 + 0.1654s + 1.1123 \quad (3)$$

综上所述,主要影响角正切与松散层内含水层位置之间存在先增大后减小的二次函数关系。

4.4 边界角变化规律

根据模拟结果,绘制了边界角 δ_0 与含水层位置 s 之间的关系图,如图 8 所示。

从图 8 可得:含水层底部与基岩之间的距离为 0 时,边界角为 63.77°。当含水层位置与基岩不再相邻时,边界角急剧减小至 58.54°,并随着含水层与基岩之间距离的增加,呈现出明显的线性增长趋势,增大至 59.37°。对含水层底部与基岩间距为 100~

400 m 的 4 种模拟结果的边界角与含水层位置进行相关性分析,得出边界角 δ_0 与含水层位置 s 之间的相关性公式为:

$$\delta_0 = 1.600 2s + 58.322 \quad (4)$$

综上可得,边界角与松散层内含水层位置之间存在先减小后增大的关系。

5 结 论

1) 某矿巨厚含水松散层采矿条件下受采动引起的渗流固结沉降占地表总下沉量的 8.5%;随工作面推进,开挖变形和渗流固结沉降增量的变化可划分为同步增长期、动态变化期、同步减缓期 3 个阶段。

2) 巨厚含水松散层采矿条件下,松散层内含水层受采动影响产生的疏水渗流固结现象会导致地表移动变形增大、地表移动影响范围扩大,但最大曲率和最大水平变形的减小说明下沉盆地的整体形状更为平缓。

3) 地表变形参数与巨厚松散层内含水层位置之间存在相关性:随着松散层内含水层位置的上移,下沉系数线性增大,水平移动系数和主要影响角正切先增大后减小,而边界角先减小后增大。

参考文献 (References):

- [1] 国家统计局,中国能源统计年鉴 2020[EB/OL]. (2020-12-10)[2021-4-9].http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjcbw/201806/t20180612_1604117.html.
- [2] 袁 亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1):1-7.
YUAN liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(1):1-7.
- [3] 周少统.我国煤炭供需趋势及开发强度研究[J].煤炭科学技术,2020,48(S1):85-88.
ZHOU Shaotong. Research on coal supply and demand trend and development intensity of China[J]. Coal Science and Technology, 2020,48(S1):85-88.
- [4] 杨昊睿,宁树正,丁 恋,等.新时期我国煤炭产业现状及对策研究[J].中国煤炭地质,2021,33(S1):44-48.
YANG Haorui, NING Shuzheng, DING Lian, et al. Chinese coal industry status quo in new period and countermeasures study[J]. Coal Geology of China,2021,33(S1):44-48.
- [5] 王金庄,李永树,周 雄,等.巨厚松散层下采煤地表移动规律的研究[J].煤炭学报,1997,22(1):20-23.
WANG Jinzhuang, LI Yongshu, ZHOU Xiong, et al. Ground movement caused by mining under thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society,1997,22(1):20-23.
- [6] 刘 辉,刘小阳,邓喀中,等.基于 UDEC 数值模拟的滑动型地裂缝发育规律[J].煤炭学报,2016,41(3):625-632.
LIU Hui, LIU Xiaoyang, DENG Kazhong, et al. Developing law of

- sliding ground fissures based on numerical simulation using UDEC [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(3):625-632.
- [7] 高旭光,刘 辉.高潜水位多煤层开采地表沉陷积水区动态演变预测[J].金属矿山,2017(10):39-42.
GAO Xuguang, LIU Hui. Dynamic evolution prediction of surface subsidence ponding caused by multi-layers coal mining in the high groundwater level area[J]. Metal Mine,2017(10):39-42.
- [8] 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. Overburden movement mechanism and “hyperbolic-like” model of thick loose layer [J]. Journal of China Coal Society,2017,42(6):1372-1379.
- [9] 杨 逾,刘文生,冯国才.地下水下降对采矿覆岩下沉影响探析[J].中国地质灾害与防治学报,2004(2):70-73.
YANG Yu, LIU Wensheng, FENG Guocai. Study on the influence of ground-water lowering to the subsidence of overlying strata in mining area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2004(2):70-73.
- [10] 蒯 洋,刘 辉,朱晓峻,等.厚松散层下多煤层重复开采地表移动规律[J].煤田地质与勘探,2018,46(2):130-136.
KUAI Yang, LIU Hui, ZHU Xiaojun, et al. Surface movement law of repeated mining multiple coal seams under thick loose layers [J]. Coalfield Geology and Exploration,2018,46(2):130-136.
- [11] 张彦宾,许国胜,王四海,等.巨厚松散层下大采高开采覆岩移动变形规律研究[J].煤炭工程,2017,49(3):75-78.
ZHANG Yanbin, XU Guosheng, WANG Sihai, et al. Research on movement and deformation law of overlying strata under heavy mining under huge thick loose layer[J]. Coal Engineering,2017,49(3):75-78.
- [12] 靳德武,刘英锋,王甜甜.巨厚砂岩含水层下厚煤层综放减水开采技术[J].煤炭科学技术,2020,48(9):88-95.
JIN Dewu, LIU Yingfeng, WANG Tiantian. Water-reducing mining technology for fully-mechanized top-coal caving mining in thick coal seams under ultra-thick sandstone aquifer[J]. Coal Science and Technology,2020,48(9):88-95.
- [13] 鞠金峰,李全生,许家林,等.采动含水层生态功能修复研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(9):102-108.
JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Progress of ecological remediation technology of mining-damaged aquifer[J]. Coal Science and Technology,2020,48(9):102-108.
- [14] 徐良骥,朱 楠,马荣振,等.厚松散承压含水层失水沉降模拟实验研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(5):821-826.
XU Liangji, ZHU Nan, MA Rongzhen, et al. Water loss settlement simulation of thick unconsolidated confined aquifer layer [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2015,32(5):821-826.
- [15] 彭 捷,李 成,向茂西,等.榆神府区采动对潜水含水层的影响及其环境效应[J].煤炭科学技术,2018,46(2):156-162.
PENG Jie, LI Cheng, XIANG Maoxi, et al. Influence of coal mining on phreatic aquifer and its environment effects in Yulin-Shenmu-Fugu Area [J]. Coal Science and Technology,2018,46(2):156-162.
- [16] 崔希民,方志海,左红飞,等.开采引起的含水层失水对地表下沉的影响[J].煤田地质与勘探,2000,28(5):47-48,52.

- CUI Ximin, FANG Zhihai, ZUO Hongfei, *et al.* De-watering effect of aquifer to surface subsidence[J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 2000, 28(5):47-48, 52.
- [17] 梁庆华, 温兴林, 何刚, 等. 黏土体失水引起的地表下沉计算方法研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 14(1):105-108.
LIANG Qinghua, WEN Xinglin, HE Gang, *et al.* Study on Calculation Methods for Surface Subsidence Caused by Water Loss of Clay[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 14(1):105-108.
- [18] LIU Hui, ZHANG Ming, SU Lijuan, *et al.* A boundary model of terrain reconstruction in a coal-mining subsidence waterlogged area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(5):187.
- [19] REN He, XIAO Wu, ZHAO Yanling, *et al.* Land damage assessment using maize aboveground biomass estimated from unmanned aerial vehicle in high groundwater level regions affected by underground coal mining[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27, (17):21666-21679.
- [20] 陈晓谢, 张文涛, 朱晓峻, 等. 高潜水位采煤沉陷区积水范围动态演化规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(2):126-133.
CHEN Xiaoxie, ZHANG Wentao, ZHU Xiaojun, *et al.* Dynamic evolution law of sediment concentration range in coal mining subsidence area with high-level groundwater[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2020, 48(2):126-133.
- [21] 何国清, 杨伦, 凌赉娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991:38-42.
- [22] LIU Hui, DENG Kazhong, ZHU Xiaojun, *et al.* Effects of mining speed on the developmental features of mining-induced ground fissures [J]. *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 2019, 78(8):6297-6309.