

文章编号:1673-9469(2026)03-0095-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.011

松基比对巨厚松散层下开采地表移动影响研究 ——以菏泽矿区为例

聂浩然^{1,3},何春桂^{2*},刘辉^{1,3},苏丽娟⁴,朱晓峻^{1,3},张鹏飞^{1,3}

(1.安徽大学 资源与环境工程学院,安徽 合肥 230601;2.河北工程大学 地球科学与工程学院,河北 邯郸 056038;
3.安徽大学 安徽省矿山生态修复工程研究中心,安徽 合肥 230601;4.安徽大学 数学科学学院,安徽 合肥 230601)

摘要:为深入研究巨厚松散层下开采的地表移动规律,以山东菏泽矿区为例,基于地表变形现场实测数据,采用FLAC3D软件建立了12种不同松基比(0.25~5.00)下的数值计算模型。获取了地表变形参数,分析了覆岩应力与地表变形特征,研究了地表变形参数的变化规律。结果表明:(1)受巨厚松散层和含水层失水沉降的耦合影响,地表下沉系数偏大,地表沉降响应较迅速,起动距为 $0.2H$ (H 为平均深度)。下沉盆地边界区域的衰退特征明显,下沉盆地范围先急剧扩张随后减缓直至最终收敛。(2)在采深不变的情况下,当松基比不断增大时,地表下沉系数先增大后减小,水平移动系数先增大后减小最终趋于稳定,主要影响角正切先增大后减小。松基比为1.50~2.00时,地表变形达最大值。(3)采空区中心上方覆岩破坏以拉破坏为主,随松基比增大拉应力先增大后减小。采空区边界上方由拉应力和压应力共同作用,采空区两侧压应力随松基比增大而减小。

关键词:巨厚松散层;开采沉降;数值模拟;地表变形参数;松基比

中图分类号:TD325

文献标识码:A

Research on the Impact of Loose-to-Base Ratio on Surface Movement of Mining Under the Thick Loose Layer: Taking Heze Mining Area as an Example

NIE Haoran^{1,3}, HE Chungui^{2*}, LIU Hui^{1,3}, SU Lijuan⁴, ZHU Xiaojun^{1,3}, ZHANG Pengfei^{1,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;
2. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
3. Engineering Research Center for Mine Ecological Remediation of Anhui Province, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China; 4. School of Mathematical Sciences, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: In order to deeply study the surface movement law during mining under a thick loose layer, taking the Heze mining area in Shandong Province as an example and based on the field measurements of surface deformation, 12 numerical models were established using FLAC3D at different thickness ratios of the loose layer to the bedrock (hereinafter referred to as the loose-to-base ratios) ranging from 0.25 to 5.00. The surface deformation parameters were obtained, analyses were carried out on the stress of the overlying rock and the characteristics of surface deformation, and studies were conducted on the variation law of the surface deformation parameters. The results are as follows: (1) The surface subsidence coefficient is relatively large and the surface subsidence response is rapid because of the combined influence of the thick loose layer and the aquifer subsidence caused by water loss. The starting distance is $0.2H$ (H represents the average depth). The recession characteristics of the boundary area of the subsidence basin are obvious, and expand rapidly first and then slow down until finally converging. (2) When the mining depth remains constant, as the loose-to-base ratio keeps rising, the subsidence

收稿日期:2025-01-25 修回日期:2025-02-28

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

第一作者:聂浩然(1999—),男,安徽滁州人,硕士研究生,从事矿山开采沉降方面的研究。

*通信作者:何春桂(1978—),女,山东茌平人,硕士,讲师,从事矿山开采沉降与生态修复等方面的研究。

coefficient initially goes up and then declines. The horizontal movement coefficient first increases, subsequently decreases, and ultimately becomes stable. The tangent of the main influence angle also shows an upward-then-downward trend. It is found that when the loose-to-base ratio ranges from 1.50 to 2.00, the surface deformation attains its peak value. (3) Above the center of the goaf, the failure of the overlying rock is mainly tensile failure. As the loose-to-base ratio increases, the tensile stress first increases and then decreases. Above the boundary of the goaf, it is affected by both tensile and compressive stresses. The compressive stresses on both sides of the goaf decrease as the loose-to-base ratio increases.

Key words: thick loose layer; mining subsidence; numerical simulation; surface deformation parameters; loose-to-base ratio

煤炭作为重要的工业原料,是我国能源消费构成的主要支柱^[1]。随着开采活动的进行,岩土体中的力学平衡被打破,使应力重新分布,在此过程中通常会引起地表沉降^[2-3]。近年来,随着我国煤炭开采技术的进步,煤炭资源开采深度不断增加,深部开采导致的顶板垮落、底板突水、岩爆等一系列地质灾害问题变得尤为突出^[4-6]。

为研究巨厚松散层下开采的地表移动规律,众多学者相继展开了大量研究:(1)采用地表实测或实验室模拟等方法研究地表移动规律。如郭玉芳等^[7]以永煤矿区为研究对象,分析了松散层厚度对地表变形的影响,发现地表下沉系数与松散层厚度呈 e 指数函数关系;张广超等^[8]以郭屯矿区为研究对象,分析了巨厚松散层下的覆岩破坏规律,发现覆岩破坏高度与松散层厚度呈指数型增长关系。(2)基于经验参数的预测模型法,通过概率积分法、函数法等对煤层开采活动的地表移动规律进行预测。如 Zhou 等^[9]为提高模型预测精度,以随机介质理论为基础,结合土壤力学理论,根据概率积分法建立了精度更高的组合预测模型,以达到沉降预测的目的;万芳芳等^[10]将 Knothe 时间函数与概率积分法模型进行耦合优化,对各介质动态沉降进行预测,使厚松散层下地表移动动态规律的预测结果更为准确。(3)对煤层开采引起的岩层移动和裂隙发育规律进行研究。如李路^[11]依据正交试验原理进行导水裂隙带影响因素研究,发现导水裂隙带发育高度与采厚、采宽、煤层埋深都呈正相关关系;Liu 等^[12]进行了采矿动态模拟,发现当顶板应力较大时崩落带面积更大,由于巨厚松散层的重力密度较小,煤层开采后的导水裂隙带发育更好。

上述研究采用现场实测、实验室模拟、经验参数预测等方法,在巨厚松散层下煤炭开采的地表变形特征、开采沉陷预测和影响因素等方面取得了一定成果。研究表明,巨厚松散层下开采的地

表下沉系数偏大、水平移动系数偏大、下沉盆地边界范围更广,采动应力的传播受到抑制,地表变形参数一般受采深、松散层厚度、岩土体不同介质等因素的影响。然而,采动引起的覆岩和地表变形规律较为复杂,采动过程中下沉盆地边界的动态变化仍待进一步研究。工程实践表明,由于基岩和松散层两种介质的物理力学性质差异较大,即使在采深相同的情况下,覆岩应力场和地表变形在不同松基比下仍呈现明显差异。即便在同一矿区,采用经验参数也无法精准预测地表变形,给开采沉陷预测和矿区生态环境治理带来困扰。

本文以山东菏泽矿区为例,根据现场实测数据,采用 FLAC3D 软件建立了不同松基比下的数值计算模型,研究了巨厚松散层下开采的地表动态变形特征,分析了地表变形参数及覆岩应力的变化规律。研究成果可为厚松散层矿区地表沉陷预测、建(构)筑物保护与安全高效开采提供依据与技术支撑。

1 研究区域概况

山东菏泽矿区某矿位于菏泽地区东部、巨野煤田中北部,西与定陶区相接,北与鄄城县交界。该煤矿南北长度约为 14 km,东西宽达 13 km。此区域被新生界第三纪和第四纪层系覆盖,新生界地层层厚一般在 530 m 至 650 m 之间,平均层厚为 590 m,属于典型巨厚松散层。新生界松散层被划分为 3 个含水层,其中第四系上段主要为黄褐色、棕黄色黏土,砂质黏土夹粉细砂及中砂薄层,为第一含水层;上第三系上段主要为棕黄、红色厚层黏土,砂质黏土为主夹粉细砂及黏土质砂,为第二含水层;上第三系下段主要为棕色、灰绿色厚层黏土,砂质、粉砂质黏土,为第三含水层。

3301 工作面平均采深为 730 m,煤层厚度为 6.3 m,煤层倾角为 3°,松散层厚度约为 500 m,基岩厚度约为 230 m,覆岩结构剖面如图 1 所示。

界	系	组	厚度/m	深度/m	岩性	柱状 (1:500)	岩性描述
新生界	第四系(Q)		572.10	572.10	松散层		黄色黏土、砂质黏土夹粉细砂等
	上三系(N)						
古生界	二叠系(P)	上石盒子组	25.05	597.15	中砂岩		杂色泥岩, 粉砂岩及中、细砂岩
			24.35	621.50	细砂岩		
			32.95	654.45	泥岩		
			24.45	678.90	细砂岩		
		下石盒子组	10.15	689.05	泥岩		
			25.50	714.55	细砂岩		
			60.25	774.80	泥岩		
			14.90	789.70	细砂岩		
	山西组	17.05	806.75	粉砂岩	3煤		
		3.25	810.00	3煤层			
	石炭系(C)	太原组	36.20	846.20	泥岩		灰白色砂岩、灰黑色泥岩、粉砂岩

图 1 工作面覆岩结构剖面图

Fig. 1 Stratigraphic column of the overlying rock for the workface

工作面走向长度为 942 m,倾向长度为 240 m,工作面采用综合机械化采煤方法,自 2018 年 12 月开采,至 2020 年 9 月结束。

2 地表移动观测

为全面监测开采引起的地表变形,在 3301 工作面上方地表布设 3 条观测线,共布设 99 个监测点。其中沿工作面走向布设 1 条观测线 A 线,布设 38 个监测点;沿工作面倾向布设 2 条观测线 B 线和 C 线,其中 B 线布设 28 个监测点,C 线布设 33 个监测点^[13]。监测点平均间距为 25 m,具体如图 2 所示。

自 2018 年 12 月至 2021 年 5 月,总共进行了 19 期地表变形监测。按照《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》要求,平面测量采用 I 级导线+D 级 GNSS 测量,高程测量采用高精度电子水准仪进行四等水准测量。根据实测数据计算地表变形参数,如表 1 所示。以实测数据为基础,绘制了工作面走向线动态下沉曲线(图 3)。

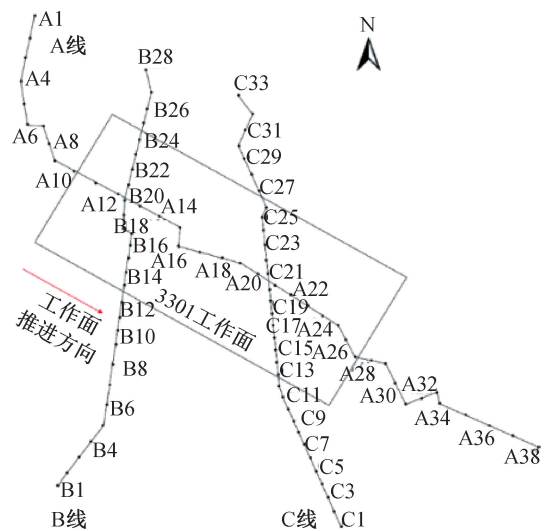


图 2 监测点布设图

Fig. 2 Layout diagram of monitoring points

为直观反映巨厚松散层条件下地表变形参数相较于常规地质采矿条件的差异性,本文搜集并整理了林西矿等 4 个一般松散层厚度(48~90 m)条件下的地表变形参数作为对比(表 2)。可以看出,在采深较小或松散层厚度不大的情况下,地表

表 1 3301 工作面地表变形参数

Tab. 1 Surface deformation parameters for Workface 3301

最大下沉值/mm	地表下沉系数 q	主要影响角正切 $\tan\beta$	水平移动系数 b	开采影响传播角/ $^\circ$	走向综合边界角/ $^\circ$	走向综合移动角/ $^\circ$
3 230	1.093	1.24	0.36	88	58.5	55

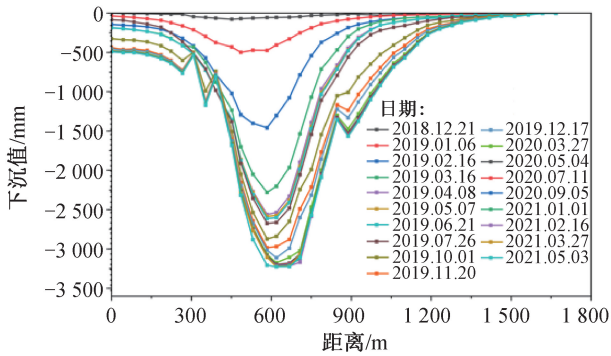


图 3 工作面走向线动态下沉曲线

Fig. 3 Dynamic subsidence curves along the workface orientation

下沉系数一般不超过 1, 水平移动系数平均值为 0.30, 主要影响角正切平均值为 1.54, 开采影响传播角平均值为 79° 。

由表 1、表 2 及图 3 可以看出:

(1) 与一般松散层厚度条件相比, 巨厚松散层条件下开采的地表下沉系数更大 (1.093), 水平移动系数更大 (0.36), 主要影响角正切更小 (1.24), 开采影响范围更大。根据现场水文监测结果, 工作面开采期间矿井涌水量达 $500 \sim 600 \text{ m}^3/\text{h}^{[14]}$ 。大量研究表明, 含水层疏水必然导致松散层土体进一步压实, 受厚松散层变形和疏水附加沉降的耦合影响, 地表下沉系数大于 1^[15]。

(2) 一般情况下, 在首次开采活动中, 起动距通常设定为 $0.25H \sim 0.50H$ (H 为平均深度)^[16]。当工作面推进至 160 m 时, 地表沉降量达到 10 mm。该工作面平均采深为 730 m, 地表移动起动距仅为 $0.20H$, 小于常规条件下的起动距, 故巨厚松散层下开采的地表沉陷响应更迅速。

(3) 2018 年 12 月 21 日至 2019 年 4 月 8 日为下沉活跃阶段, 此时地表下沉速度较快, 工作面走向最大下沉值由 77 mm 增大至 2 562 mm。由 2021

年 5 月 3 日最后一次观测结果可知, 工作面走向最大下沉值为 3 230 mm。

3 下沉盆地边界动态变化

通常采用边界角表示下沉盆地的分布范围, 随着工作面推进, 下沉盆地边界 (即下沉 10 mm 各点的连线) 逐渐扩大。为准确表述下沉盆地的动态变化过程, 以开切眼处的下沉值为参考基准, 计算各开采时期的下沉衰退效应系数 S_i , 分析下沉盆地边界区域的收敛过程, 如式 (1) 所示:

$$S_i = \frac{W_i}{W_k} \quad (1)$$

式中: S_i 表示边界区域内任意点 i 的下沉衰退效应系数; W_i 表示边界区域内任意点 i 的下沉值, mm; W_k 表示开切眼处的下沉值, mm。

根据地表动态下沉监测数据, 通过式 (1) 计算得出相对应的下沉衰退效应系数, 绘制了边界区域下沉衰退效应系数的动态变化曲线 (图 4)。

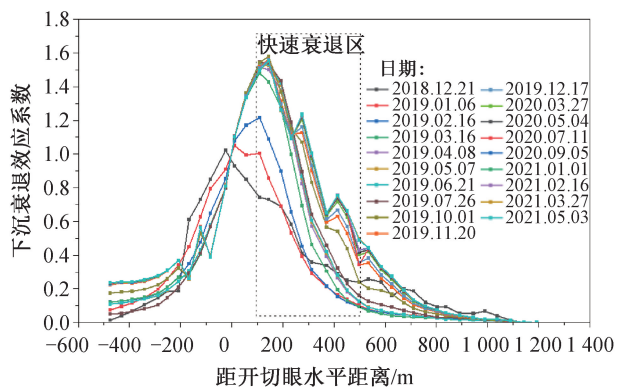


图 4 下沉衰退效应系数动态变化曲线

Fig. 4 Dynamic curves of decline effect coefficient of surface subsidence

表 2 一般松散层厚度条件下开采地表变形参数

Tab. 2 Surface deformation parameters under general loose layer thickness conditions during mining

工作面	采深/m	松散层厚度/m	地表下沉系数 q	水平移动系数 b	主要影响角正切 $\tan\beta$	开采影响传播角/ $^\circ$
林西矿 2331	280	55	0.61	0.30	1.51	82
张庄矿 3313	116	48	0.77	0.28	1.54	78
石台矿 325	186	90	0.93	0.32	1.60	76
朔里矿 3213	120	76	0.87	0.29	1.50	81

由图 4 可以看出:(1)随着距开切眼的距离逐渐增大,下沉衰退效应系数先增大后急速下降再缓慢下降最后逐渐趋于稳定。(2)当距离开切眼 100 m 左右时,下沉衰退效应系数急速下降,出现快速衰退区;当距离开切眼 500 m 左右时,下沉衰退效应系数下降趋势减缓。(3)自 2018 年 12 月 21 日至 2019 年 3 月 16 日,随工作面推进,达到下沉衰退效应系数 1.0 的点距开切眼的距离显著增大,此时下沉盆地范围急剧扩张;自 2019 年 3 月 16 日至 2020 年 9 月 5 日,随工作面推进,达到下沉衰退效应系数 1.0 的点距开切眼的距离缓慢增大,此时下沉盆地范围缓慢扩张;自 2020 年 9 月 5 日至 2021 年 5 月 3 日,达到下沉衰退效应系数 1.0 的点距开切眼的距离略有减小,此时下沉盆地范围出现小幅收敛。

随工作面推进,采动影响逐渐变大,出现下沉快速衰退区,在靠近开切眼的区域,采动影响最为强烈。在采煤活动中,原本支撑上覆岩层的煤层不再存在,松散层介质自身岩性较软,因而对煤层开采的反应迅速,导致下沉衰退效应系数急剧下降^[17]。随着距开切眼的距离增加,采动影响逐渐减弱,此时地表下沉主要受采动引起的应力重新分布的影响,在这一阶段,下沉衰退效应系数下降减缓。由于研究区域为高潜水位地区,松散层内水位上升,在浅层地质结构中,孔隙水压力增加会导致有效应力减小,进而使得土壤受到一种弹性回复作用,造成下沉盆地出现小幅收敛^[18]。

4 巨厚松散层下开采数值模拟

4.1 模型设计

基于该矿地质采矿条件,采用 FLAC3D 软件建立了 4 000 m×4 000 m×846 m 的三维计算模型(图 5)。工作面采深为 800 m,采厚为 6.0 m,开采尺寸为 1 000 m×200 m,覆岩结构及物理力学参数见表 3,计算法则采用摩尔-库仑屈服准则。

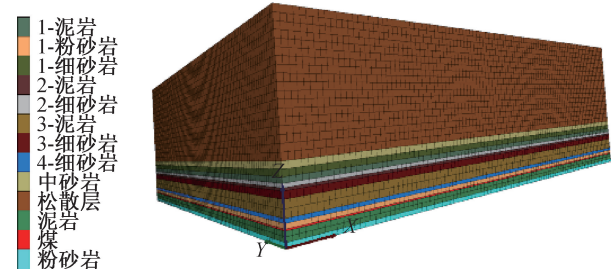


图 5 数值模拟模型

Fig. 5 Numerical simulation model

为研究不同松基比对地表移动规律的影响,本实验设置采深不变,通过改变松散层厚度和基岩厚度,建立了松基比分别为 0.25、0.50、0.75、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00、3.50、4.00、4.50、5.00 的 12 个数值模拟模型。

4.2 模拟结果分析

4.2.1 地表动态变形

通过对上述 12 个模型进行模拟计算,根据模拟结果,绘制出不同松基比的下沉曲线、水平移动曲线(图 6、图 7)。

表 3 煤岩体物理力学参数

Tab. 3 Mechanical and physical properties of coal and rock formations

岩层	厚度 /m	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
松散层	500	0.057	0.65	0.12	0.02	18	2 000
中砂岩	28	9.350	2.30	3.52	2.60	30	2 750
4-细砂岩	26	9.260	2.25	3.50	2.50	28	2 250
泥岩	36	9.480	1.10	3.50	3.10	38	2 500
3-细砂岩	26	9.420	2.23	2.25	2.00	30	2 250
3-泥岩	15	9.200	1.60	2.60	3.30	30	2 450
2-细砂岩	29	9.580	2.50	2.50	2.20	32	2 270
2-泥岩	56	9.400	1.00	1.20	3.50	36	2 400
1-细砂岩	17	9.240	2.23	2.13	8.00	30	2 300
1-粉砂岩	19	9.120	2.30	2.25	9.10	30	2 300
煤	6	0.460	0.87	2.00	2.00	25	1 500
1-泥岩	36	9.160	2.12	1.25	2.50	37	2 400
粉砂岩	17	9.320	2.10	2.60	2.40	32	2 300

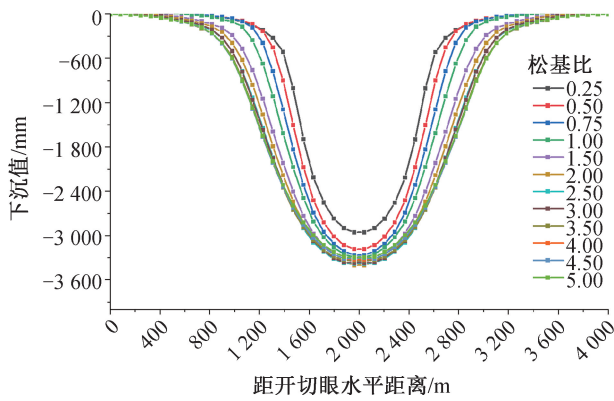


图6 不同松基比下沉曲线

Fig. 6 Surface subsidence curves at different loose-to-base ratios

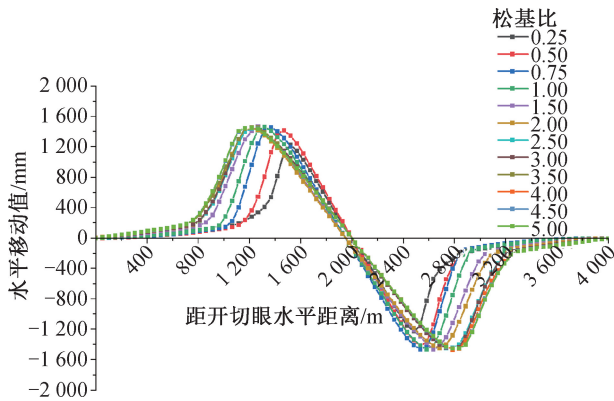


图7 不同松基比水平移动曲线

Fig. 7 Horizontal movement curves at different loose-to-base ratios

从图中可以看出:(1)从盆地边界点向盆地中心下沉逐渐增大,地表移动盆地处于采空区上方,其最大下沉点所在位置和采空区中心一致。随着松基比的增加,下沉值先增大后减小,当松基比由0.25增大至2.00时,最大下沉值由2955 mm增大至3400 mm;当松基比由2.00增大至5.00时,最大下沉值由3400 mm减小至3294 mm。(2)地表水平移动曲线在最大下沉点上显示出反对称特性,该曲线呈现出两个绝对值相等、方向相反的极值点。当松基比由0.25增大至1.50时,最大水平移动值由1211 mm增大至1550 mm;当松基比由1.50增大至4.00时,最大水平移动值由1550 mm减小至1420 mm;当松基比大于4.00时,水平移

动值逐渐稳定,为1388 mm。

4.2.2 地表变形参数

根据不同方案的数值模拟结果,计算不同松基比下的地表变形参数值(表4)。为验证模拟结果的准确性,从菏泽矿区及与菏泽矿区地理位置相近的济宁、枣庄矿区中选取3个不同松基比的工作面,对比实测参数与模拟结果,从而验证数值模拟可靠性(表5)。

表4 不同松基比地表变形参数模拟结果

Tab. 4 Simulated parameters of surface deformation at different loose-to-base ratios

方案	松基比	地表下沉系数 q	水平移动系数 b	主要影响角正切 $\tan\beta$
1	0.25	0.985	0.41	1.19
2	0.50	1.061	0.44	1.38
3	0.75	1.086	0.45	1.42
4	1.00	1.096	0.47	1.45
5	1.50	1.116	0.48	1.49
6	2.00	1.133	0.45	1.32
7	2.50	1.126	0.45	1.28
8	3.00	1.123	0.44	1.26
9	3.50	1.113	0.44	1.22
10	4.00	1.106	0.43	1.19
11	4.50	1.101	0.43	1.16
12	5.00	1.096	0.43	1.12

由表5可以看出,地表下沉系数实测值与模拟结果的最大相对误差为+8.82%,最小为-2.50%;水平移动系数实测值与模拟结果的最大相对误差为+12.50%,最小为+9.76%;主要影响角正切实测值与模拟结果的最大相对误差为-6.67%,最小为-2.94%。表明该实验方案可行,结果可靠。

分析不同松基比与地表移动参数的关系,如图8—图10所示:

(1)随松基比不断增大,地表下沉系数 q 呈先增大后减小的二次多项式趋势。当松基比小于2.00时,地表下沉系数线性增大,由0.985增大至1.133,平均增长率为0.071;当松基比大于2.00时,地表下沉系数线性减小,由1.133减小至1.096,平均减少率为0.013。

表5 不同工作面实测地表变形参数

Tab. 5 Measured surface deformation parameters at different workfaces

工作面	松基比	煤层厚度/m	采深/m	地表下沉系数 q	水平移动系数 b	主要影响角正切 $\tan\beta$
菏泽某矿 1308	3.00	3.0	765	1.032	0.40	1.35
枣庄某矿 2301	2.50	3.1	780	1.081	0.41	1.32
济宁某矿 4305	2.00	2.8	775	1.162	0.40	1.36

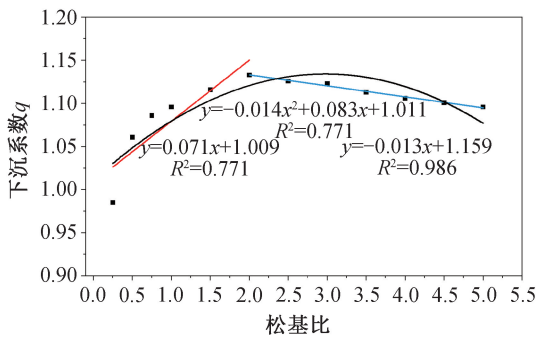


图 8 松基比与地表下沉系数关系图

Fig. 8 Relationship between the loose-to-base ratio and the subsidence coefficient

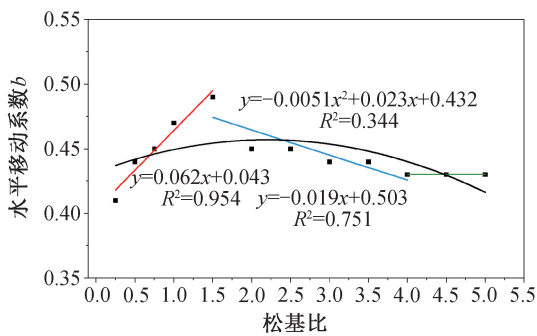


图 9 松基比与水平移动系数关系图

Fig. 9 Relationship between the loose-to-basic ratio and the horizontal movement coefficient

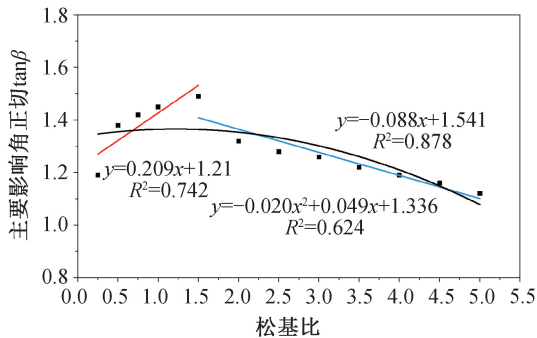


图 10 松基比与主要影响角正切关系图

Fig. 10 Relationship between the loose-to-base ratio and the tangent of the main influence angle

(2) 随松基比不断增加,水平移动系数 b 先增大后减小最后趋于稳定。当松基比小于 1.50 时,水平移动系数线性增大,由 0.41 增大至 0.49,平均增长率为 0.062;当松基比为 1.50~4.00 时,水平移动系数随松基比增大而线性减小,由 0.49 减小至 0.43,平均减少率为 0.019;当松基比大于 4.00 时,水平移动系数逐渐趋于稳定,为 0.43。

(3) 随松基比不断增加,主要影响角正切 $\tan\beta$ 先增大后减小。当松基比小于 1.50 时,主

要影响角正切线性增大且增大速度较快,由 1.19 增大至 1.49,平均增长率为 0.209;当松基比大于 1.50 时,主要影响角正切随松基比增大而线性减小,由 1.49 减小至 1.12,平均减少率为 0.088。

4.2.3 覆岩应力变化

在开采活动开始之前,岩土体没有外力介入,仅受自身重力与支撑力以及两侧水平应力这两组平衡力作用,使得岩土体内部达到力学平衡,维护了其内部结构的稳定^[19]。在开采活动开始之后,岩土体内部原有的力学平衡被打破,使采空区上方岩层内的应力重新分布,直至达到新的平衡,从而使地表发生移动变形^[20]。

根据弹性有限元法分析可知,随着开采活动的进行,在采空区中心上方及采空区两侧上方靠近地表位置的岩土体主要受到拉破坏,形成拉应力区。采空区两侧为支撑压力区,出现应力集中现象;采空区边界及其上方受拉、压应力共同作用,岩体以剪切破坏为主。岩土体内部的应力分布情况如图 11 所示。

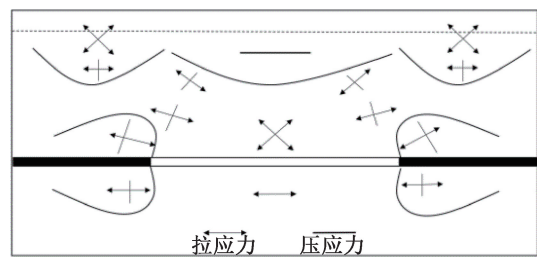


图 11 岩土体应力分布图

Fig. 11 Stress distribution in the rock and soil formations

为研究不同松基比对覆岩及地表变形的影响机理,提取了岩土体内部垂直应力分布(图 12)。从图中可以看出:(1) 随松基比逐渐增大,采空区中心上方覆岩破坏以拉破坏为主,主要受到拉应力作用,形成拉应力区。当松基比由 0.25 增大至 2.00 时,最大下沉值由 2 955 mm 增大至 3 400 mm,覆岩拉应力由 0.38 MPa 增大至 0.95 MPa;当松基比由 2.00 增大至 5.00 时,最大下沉值由 3 400 mm 减小至 3 294 mm,覆岩拉应力由 0.95 MPa 减小至 0.15 MPa。(2) 采空区边界及其上方受拉、压应力共同作用,采空区两侧及底部主要受到压应力作用,采空区两侧支撑压力区出现应力集中现象,形成应力集中区。随着松基比增大,采空区两侧压应力值逐渐减小,当松基比由 0.25 增大至 5.00 时,采空区两侧应力集中区压应力值由 37.18 MPa 减小至 27.08 MPa。

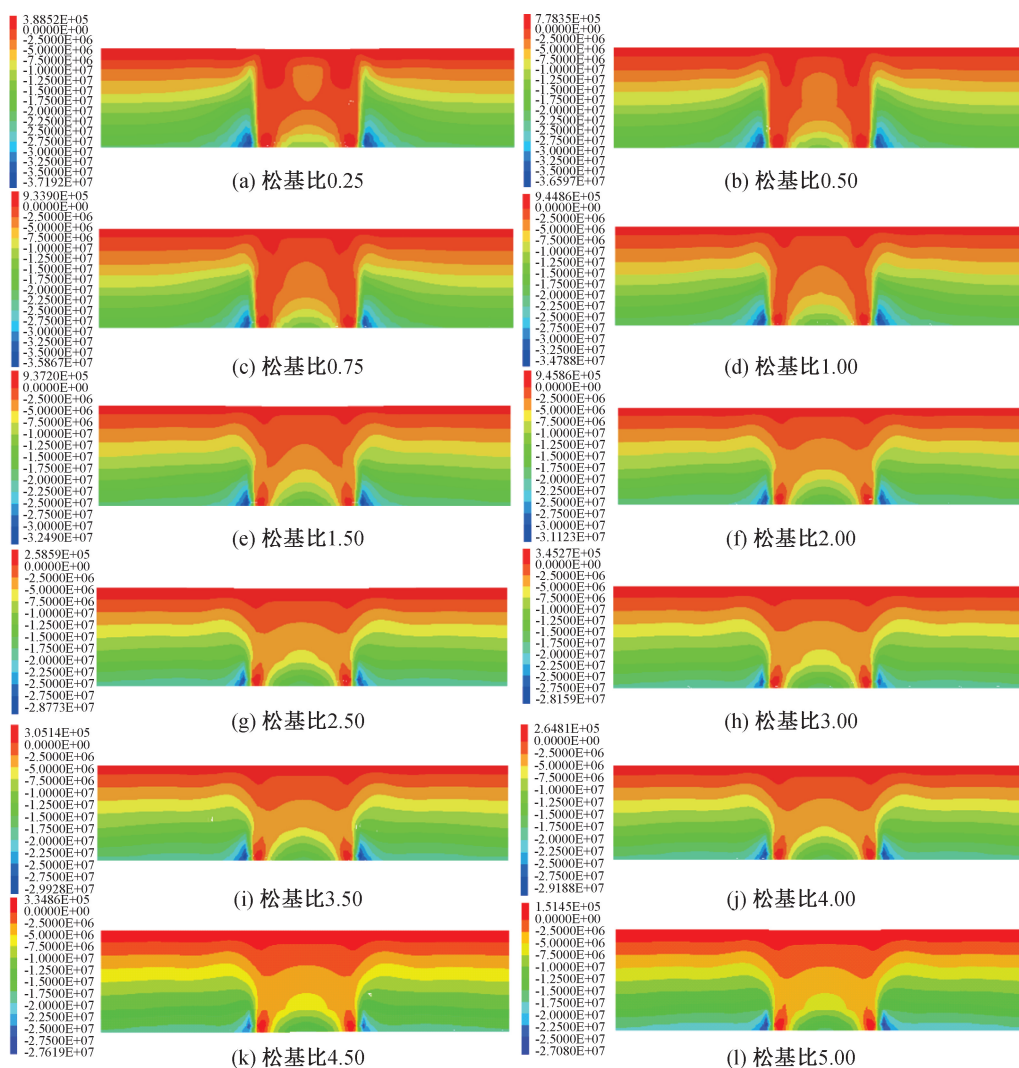


图 12 覆岩垂直应力分布情况

Fig. 12 Distribution of strata vertical stress

5 影响因素分析

上述研究表明,当其他地质采矿条件不变时,随着松基比增大,地表变形呈现以下特征:地表下沉系数及主要影响角正切先增大后减小,水平移动系数先增大后减小最终趋于稳定,下沉盆地边界区域的下沉衰减效应逐渐缓和,下沉盆地范围扩张。主要原因可从以下几点分析。

5.1 采空区上方荷载的影响

当松基比较小(0.25~2.00)时,松散层在覆岩中的占比为20%~68%,松散层提供较少的缓冲和分散作用,因此采空区上方的荷载直接传递到较浅的地层,导致下沉值、水平移动值增大,主要影响半径减小。当松基比大于2.00时,岩土体所受应力随松散层占比的增加而发生分散,使其能在

更大的体积内分散来自上部的荷载。这意味着在任何给定深度的点上,由于荷载被更大厚度的松散层所承担,该点的应力会相应减小,荷载在更大体积的松散层内分散,造成更大的压实和下沉。但随着松基比持续增大,这种效应开始减弱,底部岩石层逐渐变得相对坚硬和稳定,导致下沉值、水平移动值减小,主要影响半径增大^[21]。

5.2 岩土体自身性质的影响

松散层介质强度较低,结构性较弱,具有较强的可压缩性和抗变形能力。因此,在整体岩土体变形中,更容易造成自身压缩形变。而基岩作为松散层下方的支撑层,在松散层较薄时,基岩更接近地表,其支撑作用更为明显,故地表下沉系数减小、下沉盆地范围减小。随着松散层增厚,基岩对地表下沉的直接影响有所减弱^[22]。

5.3 含水层失水沉降的耦合影响

一般而言,我国东部厚松散层矿区具有丰富的地下含水层,上覆岩层在采动沉降的同时,覆岩导水裂隙带若发育至含水层会形成导水通道,含水层向下渗流进一步导致失水沉降,故地表下沉进一步增大^[23-24]。本文所建立的数值模拟模型未涉及含水层影响,故实际地表变形可能会更大。

6 结论

1)巨厚松散层下开采较一般地质采矿条件的地表沉陷响应时间更短,起动距更小,最大下沉值、地表下沉系数、水平移动系数皆更大,且地表下沉系数接近或略大于1,主要影响角正切更小;下沉盆地边界区域的衰退特征明显,下沉盆地范围先急剧扩张随后减缓直至最终收敛。

2)根据数值模拟结果计算地表变形参数,通过回归分析可知:当采深不变时,随松基比不断增大,最大下沉值和主要影响角正切先增大后减小,水平移动系数先增大后减小再稳定;松基比为1.50~2.00时,地表变形最大。

3)采空区中心上方覆岩破坏以拉破坏为主,随松基比增大拉应力先增大后减小,采空区边界上方由拉应力和压应力共同作用;采空区两侧出现应力集中现象,主要受压应力作用,压应力随松基比增大而减小。

参考文献:

- [1] BEHERA S K, MISHRA D P, GHOSH C N, et al. Characterization of lead-zinc mill tailings, fly ash and their mixtures for paste backfilling in underground metalliferous mines [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(14): 394.
- [2] 李飞,周家兴,王金安. 深部多场耦合作用的非线性地应力构建方法[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S1): 116-129.
LI F, ZHOU J X, WANG J A. Method of nonlinear in-situ stress construction with deep multi-field coupling [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 116-129.
- [3] 王家臣,唐岳松,王兆会,等. 千米深井综采工作面覆岩微震显现特征与损伤度计算方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(3): 417-431.
WANG J C, TANG Y S, WANG Z H, et al. Characteristics of microseismic events and damage degree calculation method in kilometer deep fully mechanical longwall panel [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(3): 417-431.
- [4] YANG S Q, CHEN M, JING H W, et al. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China [J]. *Engineering Geology*, 2017, 217: 89-101.
- [5] 余华婷,秦续峰,李云昊,等. 深部开采条件下地表沉陷规律研究[J]. *科技风*, 2023(27): 74-77+129.
YU H T, QIN X F, LI Y H, et al. Study on surface subsidence law under deep mining conditions [J]. *Technology Wind*, 2023(27): 74-77+129.
- [6] 王永华,张旺,张代军,等. 东部矿区开采深度对地表移动参数的影响规律研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(8): 133-137.
WANG Y H, ZHANG W, ZHANG D J, et al. Influences of surface movement parameters due to mining depth in eastern mining area [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(8): 133-137.
- [7] 郭玉芳,孟凡迪,陈俊杰. 厚松散层开采条件下地表沉陷数值模拟分析[J]. *煤炭工程*, 2014, 46(6): 103-105.
GUO Y F, MENG F D, CHEN J J. Numerical simulation analysis on surface subsidence mining under thick alluvial [J]. *Coal Engineering*, 2014, 46(6): 103-105.
- [8] 张广超,陶广哲,孟祥军,等. 巨厚松散层下软弱覆岩破坏规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(11): 3998-4010.
ZHANG G C, TAO G Z, MENG X J, et al. Failure law of weak overburden stratum underlying extra-thick alluvium [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 3998-4010.
- [9] ZHOU D W, WU K, MIAO X X, et al. Combined prediction model for mining subsidence in coal mining areas covered with thick alluvial soil layer [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(1): 283-304.
- [10] 万芳芳,罗文柯,李树清,等. 厚松散层矿区地表动态移动预计研究[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(4): 105-109.
WAN F F, LUO W K, LI S Q, et al. Study on prediction of surface dynamic movement in thick unconsolidated mining area [J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(4): 105-109.
- [11] 李路. 招贤矿侏罗系软弱覆岩导水裂缝带时空演化研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
LI L. Spatiotemporal evolution of water flowing fractured zone in Jurassic weak overburden in Zhaoxian mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [12] LIU W T, PANG L F, XU B C, et al. Study on overburden failure characteristics in deep thick loose seam and thick coal seam mining [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 632-653.
- [13] 刘辉,李玉,苏丽娟,等. 厚松散层薄基岩下开采地表变形规律——以鲁南矿区为例[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(9): 11-23.

- LIU H, LI Y, SU L J, et al. Surface deformation law of mining under thick loose layer and thin bedrock: taking the southern Shandong Mining Area as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(9): 11-23.
- [14] 程桦, 彭世龙, 姚直书, 等. 厚松散层薄基岩地层井筒偏斜综合治理技术[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 260-271.
- CHENG H, PENG S L, YAO Z S, et al. Comprehensive treatment technology for wellbore deflection in thick loose bed and thin bedrock formation[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 260-271.
- [15] 程桦, 张亮亮, 姚直书, 等. 厚松散层薄基岩非对称开采井筒偏斜机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 102-114.
- CHENG H, ZHANG L L, YAO Z S, et al. Mechanism of shaft deflection caused by asymmetric mining in thin bedrock and deep loose strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 102-114.
- [16] 彭世龙, 程桦, 姚直书, 等. 厚松散层底含直覆薄基岩开采地表沉陷预计及特征研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4417-4430.
- PENG S L, CHENG H, YAO Z S, et al. Study on prediction and characteristics of surface subsidence in mining when the bottom aquifer of thick loose layer directly covers thin bedrock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4417-4430.
- [17] 徐祝贺, 朱润生, 何文瑞, 等. 厚松散层浅埋煤层大工作面开采沉陷模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(2): 264-271.
- XU Z H, ZHU R S, HE W R, et al. Subsidence model of large working face in shallow buried coal seam with thick loose layer[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2): 264-271.
- [18] 隋旺华, 陈奇. 简论煤层开采沉陷土体变形的研究意义、现状、机理及预测方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1995, 6(1): 1-7.
- SUI W H, CHEN Q. Simple comment on research meaning, present situation, mechanism of soil mass settlement deformation caused by coal bed mining and the way of forecast [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1995, 6(1): 1-7.
- [19] 袁勋. 巨厚松散层下深部开采地表沉陷规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- YUAN X. Study on law of ground subsidence in deep mining under extremely thick unconsolidated formation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [20] 张杰, 王斌. 浅埋间隔采空区隔离煤柱稳定性及覆岩失稳特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(5): 936-942.
- ZHANG J, WANG B. Stability of isolated coal pillar and overburden instability in shallow-buried interval gob[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2020, 37(5): 936-942.
- [21] 李树刚, 刘李东, 赵鹏翔, 等. 综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 95-104.
- LI S G, LIU L D, ZHAO P X, et al. Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 95-104.
- [22] 王永辉, 冯园, 李兰兰. 巨厚松散层下开采沉陷岩土体移动变形规律[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(6): 733-741.
- WANG Y H, FENG Y, LI L L. Regularity of movement and deformation of rock and soil mass in mining subsidence under giant thick loose layer[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2020, 47(6): 733-741.
- [23] 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 H, ZUO J Y, SU L J, 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.
- [24] 来兴平, 张旭东, 单鹏飞, 等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1739-1750.
- LAI X P, ZHANG X D, SHAN P F, et al. Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1739-1750.

(责任编辑 王利君)