

不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律

陈绍杰¹, 刘 瑞¹, 徐贞社², 哈列少科·阿列克谢·阿列克谢耶维奇³, 邵海波², 冯 帆¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛瑞源工程集团有限公司, 山东 青岛 266555;

3. 库兹巴斯国立技术大学 矿业工程学院, 俄罗斯 克麦罗沃市 650000)

摘要:断层破坏覆岩地层的整体性,影响岩土体的强度特性和变形性质,导致开采沉陷规律更为复杂。为研究不同覆岩地层与正断层共同影响下煤层开采地表沉陷规律,构建不同覆岩地层正断层下盘煤层开采覆岩运动与地表变形的理论模型,数值模拟分析不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律与特征,结合实例进行了对比分析。结果表明:地表移动变形范围与松散层厚度密切相关,随松散层厚度的增加,相较于无断层一侧,地表下沉盆地在断层一侧的移动变形范围先减小后扩大再减小,最终与无断层一侧相同;厚基岩地质条件下,随松散层厚度增加,地表产生裂缝的位置由断层露头先向采空区偏移后向断层上盘偏移;厚松散层地质条件下,松散层吸收了断层诱发的非连续变形,随松散层厚度增加,地表由偏态下沉盆地逐渐变为对称的下沉盆地。

关键词:开采沉陷;覆岩地层;正断层;下盘煤层;覆岩破坏;地表移动变形

中图分类号:TD325.2

文献标志码:A

Surface subsidence laws of footwall coal seam mining of normal fault under different overburden strata

CHEN Shaojie¹, LIU Rui¹, XU Zhenshe², KHORESHOK Aleksey A³, SHAO Haibo², FENG Fan¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Qingdao Ruiyuan Engineering Group Co. Ltd, Qingdao 266555, China;

3. College of Mining Engineering, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo 650000, Russia)

Abstract: The fault destroys the integrity of the overburden strata and affects the strength and deformation properties of the rock mass, resulting in more complex mining subsidence laws. To study the surface subsidence law of coal seam mining under the joint influence of different overburden strata and normal faults, a theoretical model of overburden rock movement and surface deformation of coal seam mining under normal faults in different overburden strata was firstly constructed. Then, the mining subsidence laws and characteristics were analyzed by conducting numerical simulation experiments. Lastly, a comparative analysis was carried out with examples. The results show that the range of surface movement and deformation is closely related to the thickness of the unconsolidated layer. Compared with the non-fault side, the movement and deformation range of the subsidence basin on the fault side first decreases, then expands, then decreases again, and finally becomes the same as the non-fault side along with the increase of the thickness of the unconsolidated layer. Under the geological conditions of thick bedrock, the position of the cracks on the surface first migrates from the fault outcrop to the gob and then migrates to the fault hanging wall as the thickness of the unconsolidated layer increases. Under the geological conditions of thick unconsolidated layer, the surface gradually changes from a skewed subsidence basin to a symmetrical subsidence basin with the increase of the thickness of the unconsolidated layer due to its absorption of the discontinuous

收稿日期:2022-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(52174159,52074169,51774194)

作者简介:陈绍杰(1978—),男,河北定州人,教育部长江学者特聘教授,博士生导师,主要从事开采沉陷控制与塌陷地治理研究。

刘 瑞(1998—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事开采损害研究,本文通信作者.E-mail:ryanlr7@yeah.net

deformation induced by the fault.

Key words: mining subsidence; overburden strata; normal fault; footwall coal seam; overburden failure; surface movement and deformation

煤体从地下采出后,采空区周围岩体内原有应力平衡状态破坏,导致围岩移动、变形和破坏,最终影响到地表,形成地表移动盆地^[1]。地层中存在断层时,断层破碎带较周围岩体强度低、易滑移,影响岩体的力学性质和破坏形态,在断层附近会产生应力变化,进而影响开采沉陷规律^[2]。矿区覆岩地层一般可分为基岩和松散层,其中基岩可简单分为坚硬岩层和软弱岩层。坚硬岩层抗压强度高,具有较大的承载能力,顶、底面变形值相差小;软弱岩层强度较低,具有松散、软弱的性质,蠕变变形量大;与基岩相比,松散层是大量颗粒介质的集合,颗粒介质的碎散性、弱胶结特性使松散层压缩性大、拉应力承载能力小^[3-4]。由于松散层和基岩力学性质不同,应力在基岩和松散层内传递差异显著,地表沉陷也表现出差异性。

覆岩的物理力学性质和厚度差异影响地表移动变形的发展过程,同时决定地表移动变形的最终形态^[5],19世纪40年代Buddle^[6]最早提出地表和煤层之间的覆岩性质影响地表下沉规律,随后大量科研人员分析了厚硬覆岩下开采引起的地表非连续变形特征,研究基岩与松散层对开采沉陷规律的影响^[7-9],为揭示不同覆岩地层条件下开采沉陷规律提供了科学依据。Donnelly^[10]通过对比利时列日城的地表沉陷调查,认为地表沉陷主要受断层倾角与工作面位置的影响;Chrzanowski等^[11]通过降低断层带的弹性模量,将断层引入模型,研究了断层影响下的开采沉陷规律;张玉卓等^[12-14]研究了断层倾角与岩层移动角、断层落差等因素对开采沉陷的影响,发现断层倾角与岩层移动角的关系对地表移动范围起到控制作用;尹立明等^[15-17]分析了断层影响下覆岩破坏特征,研究了煤矿开采诱发断层滑移对地表及建筑物的影响。上述研究通过理论分析、模拟实验方法从断层参数等角度分析了煤层开采后断层对覆岩运动及地表沉陷规律的影响。

目前学者大多分别研究断层或不同地层条件下开采沉陷规律,而对不同覆岩地层和正断层共同影响下开采沉陷规律研究较少。在前人成果基础上研究不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表沉陷规律,为类似条件下地表沉陷分析提供参考,对进一步科学认识开采沉陷规律、保护地表建(构)筑物有重要意义。

1 覆岩地层演化与地表变形理论分析

当工作面上覆岩层存在断层时,上下盘的覆岩运动演化规律不同,为获得不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表沉陷规律,首先构建覆岩破坏与地表变形的理论模型,研究正断层与不同覆岩地层共同影响下的覆岩运动与地表变形特征的关系。

1.1 全基岩覆岩演化与地表变形理论分析

全基岩地质条件下,由于断层破坏了基岩岩层的连续性和完整性,阻隔了应力的传递,断层下盘煤层开采后上覆岩层垮落变形,上盘基岩受开采影响较小覆岩保持稳定,地表移动变形范围减小,断层露头两侧变形差异显著,极易形成下沉台阶。

若上盘覆岩产生拉裂破坏,破断的基岩块体向采空区方向产生移动变形,下沉盆地边缘会出现反向抬高现象,如图1所示。基于弹性力学构建上盘基岩岩层的破坏判据,下部岩体破坏距离 $l \leq L$ 时(L 为悬梁下部岩层极限破坏距离),上盘基岩岩层未达到破坏的临界抗拉强度,悬臂梁未产生破坏,上盘覆岩移动变形小;当下部岩体破坏距离 $l > L$ 时,悬臂梁产生拉裂破坏,上盘覆岩向断层方向产生较大移动变形。基本力学公式:

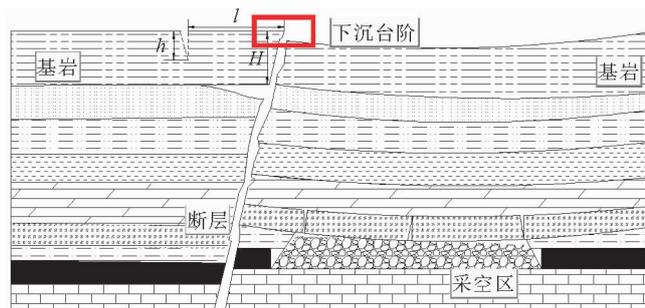


图1 全基岩覆岩岩层移动变形示意图

Fig. 1 Movement and deformation of all-bedrock overburden strata

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W}, \tag{1}$$

$$M = \frac{1}{2}l^2(qh + \gamma bh), \tag{2}$$

$$W = \frac{1}{6}bh^2(1 - \frac{h}{H})^2. \tag{3}$$

式中： σ_{\max} 为最大弯曲应力， M 为弯矩， W 为截面抗弯矩， q 为均布荷载， γ 为岩体容重， b 为岩体宽度， l 为下部岩层破坏距离， h 为裂缝深度， H 为岩体厚度，岩层破坏距离拉裂缝的深度比 h/H 为裂缝深度 h 与岩层厚度 H 的比值 ($0 \leq h/H < 1$)。

由于岩石的抗拉强度远小于抗压强度，当截面的拉应力大于岩石抗拉强度时，悬臂梁顶部出现张拉裂缝，为求下部岩层最大破坏距离的临界值，结合式(1)~(3)，用悬臂梁岩层的抗拉强度 S_t 替换最大弯曲应力 σ_{\max} ，可得出悬臂梁下部岩层极限破坏距离：

$$L = \sqrt{\frac{S_t H (1 - \frac{h}{H})^2}{3\gamma}}. \tag{4}$$

式中， S_t 为岩石抗拉强度。

1.2 薄松散层覆岩地层演化与地表变形理论分析

由于松散层能够吸收基岩岩层破坏产生的非连续变形，因此，地表裂缝与台阶的产生与松散层厚度密切相关。薄松散层地质条件下，下盘煤层开采后采空区上方覆岩下沉，受断层阻隔作用上盘移动变形较小，上下盘产生错距。如图 2 所示，松散层受到自身的重力与上盘基岩岩层的支撑力，在基岩的断层露头位置上覆松散层受剪切力，如支撑力与重力形成的剪切力大于松散层的抗剪强度，则松散层发生剪切破坏，导致地表产生裂缝等非连续变形。式(5)为土体的抗剪强度公式。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi. \tag{5}$$

式中： τ 为土体破坏面上的剪应力， c 为内聚力， σ 为作用在剪切面上的法向应力， φ 为内摩擦角。由于 σ 为 0，故 $\tau = c$ 。

当松散层发生剪切破坏后，依据下盘下沉值大小与松散层的厚度，判断地表产生的非连续变形形式。随松散层厚度的增加，地表非连续变形逐渐由下沉台阶转为裂缝，如图 3 所示。

1.3 厚松散层覆岩地层演化与地表变形理论分析

松散层中主要为土层，抗剪强度低、自稳能力差，厚松散层在受到下盘开采扰动后，松散层下部在采空区边缘容易发生滑移，松散层的中部容易发生剪切破坏。由于厚松散层能够吸收非连续变形，当基岩中的断层上覆厚松散层时，地表不再产生裂缝。如图 4 所示，若无断层时，地表形成对称的下盆地，断层存在时，随着煤层开采逐渐靠近断层，诱发断层活化，以断层上盘露头位置为临界点，上覆厚松散层产生移动变形，松散层滑移的位置靠近采空区，上盘地表盆地的变形范围相对无断层一侧小。随着上覆松散层厚度的增加，松散层以荷载的形式作用于基岩岩

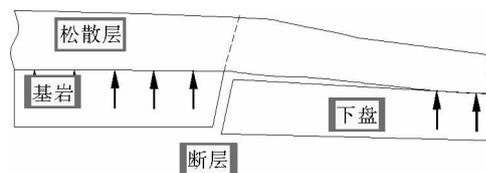


图 2 松散层受力分析图

Fig. 2 Force analysis of the unconsolidated layer

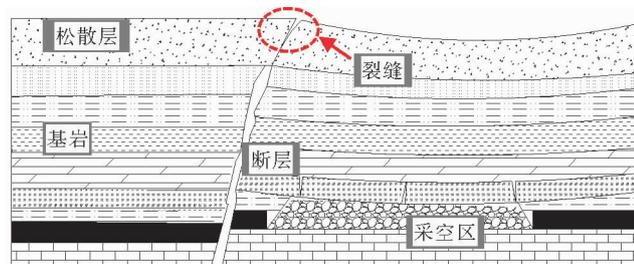


图 3 薄松散层岩土层移动变形示意图

Fig. 3 Movement and deformation of the thin unconsolidated layer

层,导致断层上盘基岩岩层以下盘开采扰动区域为底部临界点形成三角形破坏区域,松散层滑移破坏的位置远离采空区,使地表移动变形范围与移动变形值增加。

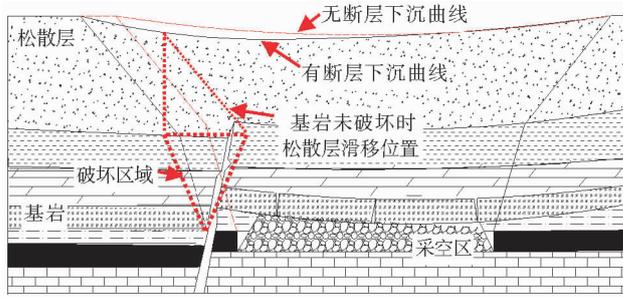


图4 厚松散层岩土层移动变形示意图

Fig. 4 Movement and deformation of the thick unconsolidated layer

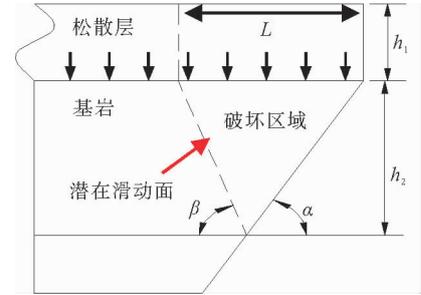


图5 破坏区域力学分析

Fig. 5 Mechanical analysis of failure area

如图5所示,通过对破坏区域的受力分析,可知滑动抵抗力为岩体内聚力和重力,驱动力为上覆松散层重力及破坏区域岩体重力,破坏区域的稳定性可通过作用在潜在滑动面的岩体抗滑阻力与滑动驱动力的比值判断:

$$F_s = \frac{F_k}{F}, \quad (6)$$

$$L = \frac{h_2}{\tan\alpha} + \frac{h_2}{\tan\beta}, \quad (7)$$

$$F = \frac{\gamma h_1 L + \frac{\gamma h_2 L}{2}}{\tan\beta} \sin\beta, \quad (8)$$

$$F_k = c \frac{h_2}{\sin\beta} + \frac{\gamma h_1 L + \frac{\gamma h_2 L}{2}}{\tan\beta} \cos\beta \tan\varphi. \quad (9)$$

结合式(6)~(9)可得:

$$F_s = \frac{2c \tan\alpha}{(\tan\alpha + \tan\beta)(2h_1 + h_2)\gamma \cos^2\beta}. \quad (10)$$

式中: F_s 为稳定系数, F_k 为岩体抗滑阻力, F 为岩体滑动驱动力, h_1 为上覆松散层厚度, h_2 为破坏区域岩层厚度, β 为岩体潜在滑动面与水平面夹角, α 为断层倾角。

式(10)可作为破坏区域岩体潜在在滑动面的力学判据,若 $F_s > 1$, 岩体抗滑阻力大于滑动驱动力,岩体不会产生滑移破坏;若 $0 < F_s \leq 1$, 则岩体产生滑移破坏,上覆松散层移动范围增加,变形范围扩大。

2 数值计算模型的建立

通过理论分析可以判断正断层下盘煤层开采后覆岩地层的运动演化形式与临界破坏值,为获得不同覆岩地层正断层下盘煤层开采后的地表沉陷规律,通过数值模拟手段开展研究。

2.1 数值模型与实验方案

1) 模型建立

为便于研究,建立的模型从地表向下依次是松散层、泥岩与中砂岩互层、细砂岩、粉砂岩、煤层、底板粗砂岩。松散层与断层采用 VORONOI 的随机节理划分^[4]。煤层层倾角 0° , 模型沿 Y 方向垂高为 300 m, 沿 X 方向为 1 000 m, 平均采深约 275 m, 平均采厚 5 m, 图 6 为数值模型简图。

2) 实验方案

建立了特定断层条件下,按基岩与松散层厚度的梯度设置 7 种不同覆岩地层厚度的数值模型方案,具体实验方案见表 1。位移边界条件施加于模型左、右和底面,上表面为自由面,模型顶部为自由边界,将重力作用于模型整体。

2.2 物理力学参数选取

由于本研究揭示不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉的规律,不针对特定矿区,笔者通过分析文献中矿区的地质资料,选取了各岩层力学参数的近似值,松散层的力学参数以文献中整理的现场实测数据获取^[4],断层节理及力学参数采用弱化赋值法赋值^[18],模型及节理参数赋值见表 2 与表 3。

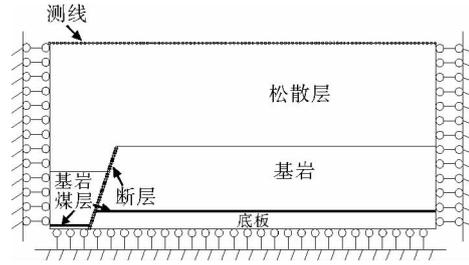


图 6 数值模型简图

Fig. 6 Numerical model

表 1 实验方案设计

Table 1 Experimental design

岩层	A	B	C	D	E	F	G
松散层/m	0	35	65	125	185	245	275
基岩/m	275	240	210	150	90	30	0
煤层/m	5	5	5	5	5	5	5
底板/m	20	20	20	20	20	20	20
松散层占比/%	0	13	24	45	67	89	100
断层	断层带宽度 2 m、落差 10 m、倾角 70°						

表 2 数值模拟模型岩性参数

Table 2 Lithology parameters of the numerical simulation model

岩层	密度/(kg · m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
松散层	2 000	1.00	0.80	0.50	10	0.50
泥 岩	2 400	4.29	2.95	1.10	33	2.19
中砂岩	2 500	16.20	13.80	5.30	35	2.35
细砂岩	2 600	6.41	4.65	1.00	32	2.56
粉砂岩	2 500	4.10	3.20	1.80	28	2.56
煤 层	1 400	0.54	0.37	0.90	29	1.50
粗砂岩	2 500	11.90	9.75	3.10	30	3.15
断 层	1 500	0.50	0.40	0.25	10	0.25

表 3 松散层及断层节理参数

Table 3 Parameters of unconsolidated layers and fault joints

岩层节理参数	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
松散层	1.67	0.455	2	0.050	0.010
断 层	0.84	0.225	2	0.025	0.005

3 数值模拟计算结果分析

3.1 断层影响下地表下沉特征分析

不同方案覆岩下地表下沉曲线如图 7 所示。可知,方案 A(松散层与基岩厚度比值为 0/275)与方案 G(275/0)的最大下沉量分别为 3.2 和 4.2 m,地表最大下沉量随松散层厚度增加而变大,这是因为松散层厚度的增加使煤层上覆基岩的荷载加大,同时松散层土体的软弱特性和自身压缩共同导致了地表下沉量增大。厚基岩地质条件下沉曲线在断层一侧产生突变,方案 A(0/275)中模型边界下沉量较无断层一侧减小,下沉盆地外边界出现了反弹抬高现象;厚松散层地质条件下沉曲线是连续的,方案 D(125/150)中断层存在的一侧地表下沉值较无断层一侧增大,地表盆地出现偏态下沉的特征;方案 G(275/0)中受断层影响小,地表形成对称的下沉盆地。以下具体分析不同覆岩地层正断层下盘开采地表沉陷规律。

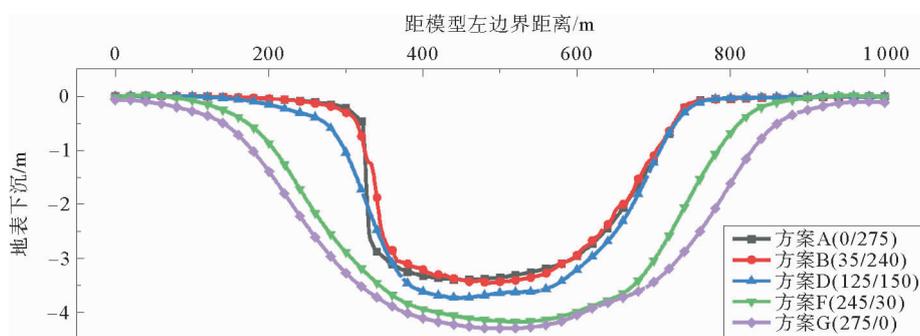


图 7 典型地层条件下工作面开采后地表下沉值

Fig. 7 Surface subsidence value of working face after mining under typical stratum conditions

3.2 厚基岩薄松散层条件开采沉陷规律分析

如图 8 所示,厚基岩薄松散层地质条件下,受断层的阻隔作用,上下盘覆岩及地表变形差异显著,断层下盘移动变形值大于上盘,地表产生下沉台阶或裂缝。方案 A(0/275)地表断层露头处上、下盘下沉差值为 1.06 m,方案 B(35/240)中裂缝沿断层向地表发育,断层露头下沉差值为 0.11 m,靠近采空区附近地表下沉差值增加,下沉差值约 0.43 m,表明土体断裂线偏离断层露头向采空区方向扩展,并且由于松散层吸收了断层诱发的非连续变形,台阶下沉值随着松散层厚度的增加而减小。

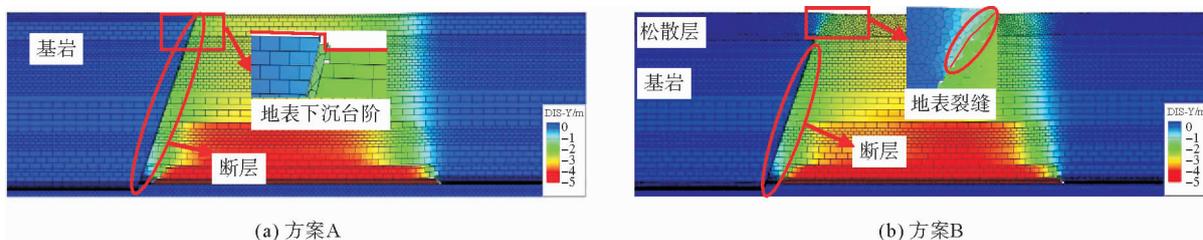


图 8 方案 A、B 竖直位移云图

Fig. 8 Vertical displacement cloud diagram of scheme A and B

3.3 厚基岩厚松散层条件开采沉陷规律

如图 9 所示,由模型左右两侧位移云图对比可知,断层影响覆岩及地表变形程度显著不同,基岩岩层中受断层影响,上下盘覆岩变形差异明显,而松散层的移动变形较平缓。松散层较薄时,上盘基岩受影响程度较小,松散层以断层露头为临界点产生滑移破坏,地表移动范围较无断层一侧小。

由式(10)计算,方案 C 中 $0 < F_s \leq 1$,基岩岩层产生了滑移破坏,依据数值模型中 0.1 m 下沉等值线范围,可以看出方案 C(65/210)、D(125/150)中基岩受断层与厚松散层的影响产生破坏区域,断层一侧的基岩与松散层移动变形范围明显大于无断层一侧。这是由于随着松散层厚度的增加,松散层作为上部荷载对断层上盘基岩施加的应力增大,导致断层上盘接触松散层的基岩岩层产生变形,上盘基岩出现破坏区域,移动变形范围大于无断层一侧,松散层以基岩滑动面产生滑移,变形范围进一步扩大,使地表移动变形范围与下沉值增加,形成偏态下沉盆地。由于方案 C(65/210)中松散层厚度不足以完全吸收断层诱发的非连续变形,地表仍产生了裂缝,其位置向上盘偏移。

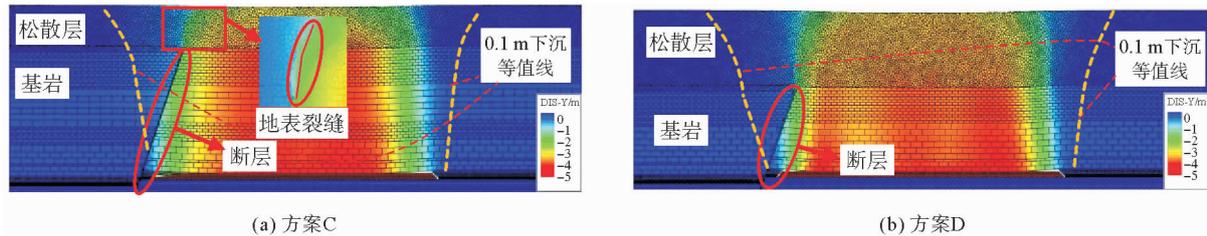


图 9 方案 C、D 竖直位移云图

Fig. 9 Vertical displacement cloud diagram of scheme C and D

3.4 巨厚松散层条件开采沉陷规律

如图 10 所示,方案 E(185/90)、F(245/30)、G(275/0)巨厚松散层地质条件下,地表最大下沉值明显大于前述方案,方案 E(185/90)中巨厚松散层完全吸收了断层诱发的非连续变形,方案 F(245/30)、G(275/0)中煤层开采未对断层造成影响,地表移动变形值与无断层一侧相同,地表形成对称的下沉盆地。

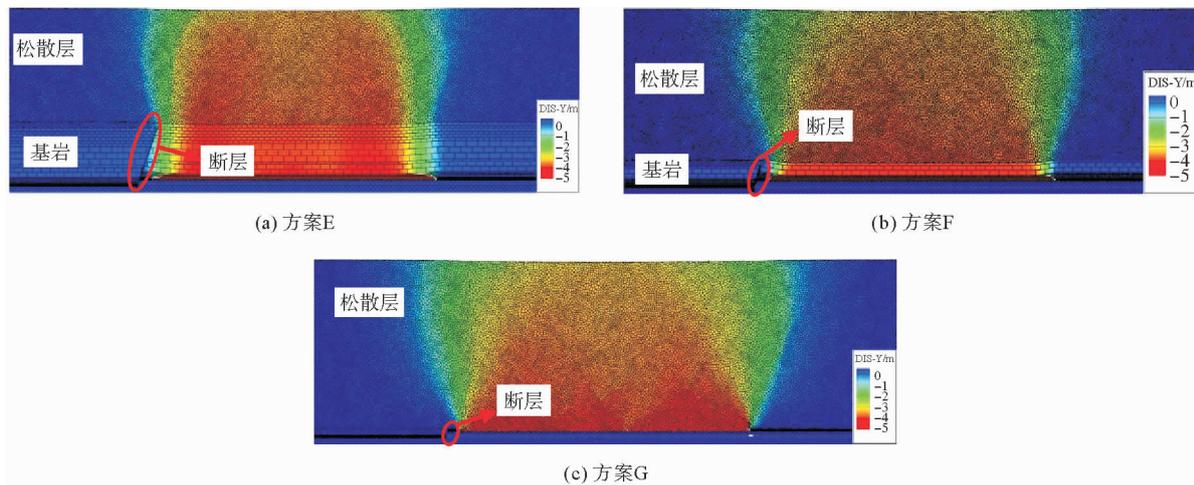


图 10 方案 E、F、G 竖直位移云图

Fig. 10 Vertical displacement cloud diagram of scheme E, F and G

3.5 讨论

依据上述方案中松散层与上覆地层比例分析,采深为 275 m 时,当松散层占上覆地层比例小于 13% 时,上覆薄松散层受基岩中断层影响显著,由于松散层无法形成稳定的结构,随着煤层开采,断层露头位置地表出现下沉台阶;松散层占比 13%~24% 时,上覆松散层受基岩中断层影响较为明显,地表出现不同程度的裂缝,上盘地表受影响较小,松散层以基岩断层露头为临界点产生滑移破坏,土体断裂线偏离断层露头向采空区方向扩展,地表移动变形较无断层一侧小;松散层占比 24%~45% 时,由于松散层厚度增加,松散层作为

上部荷载对断层上盘的基岩施加的应力增大,导致断层上盘接触松散层的基岩岩层变形破坏,上盘松散层的滑移破坏位置向左移动,地表变形范围明显扩大,但松散层不能吸收断层诱发的非连续变形,地表仍出现裂缝等非连续变形;松散层占比 45%~67%时,上盘受影响范围增加,地表形成连续的偏态下沉盆地;松散层占比 67%~89%时,巨厚松散层吸收了断层诱发的非连续变形;松散层占比大于 89%时,断层对岩层厚松散层地表移动变形不受底部基岩中断层的影响,地表形成对称的下沉盆地。如图 11 所示,存在断层的一侧,随着松散层厚度的增加,地表移动范围先减小后增大再减小,移动角先增大再减小后增大。

不同覆岩地层条件下,地表移动变形可以依据空间守恒原理进行分析,煤层采出空间为地表移动变形空间、岩层离层空间、断层区域空间和破裂垮落岩石之间的空隙之和^[19]。厚基岩地质条件下,上盘基岩完整性好、抗拉强度较大,煤层开采后下盘基岩向采空区垮落下沉而上盘基岩保持稳定,断层带位置形成未填充的空间,下盘覆岩产生向断层方向的水平位移,上盘地表移动变形范围减小。厚松散层地质条件下,下盘煤层开采后上覆岩层向采空区垮落填充,地表形成下沉盆地,地层底部基岩中由于断层存在,岩层变形破坏向上覆松散层中传播,使上盘松散层向采空区方向产生较大的水平位移,地表移动变形范围扩大。

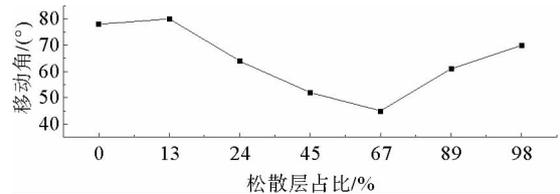


图 11 不同松散层占比条件下移动角变化示意曲线
Fig. 11 Variation curve of the displacement angle under different proportions of the unconsolidated layer

4 案例分析

理论分析与数值模拟结果揭示了正断层影响下的地表沉陷规律,通过工程实例及相关研究进一步对地表沉陷规律进行对比分析。

4.1 厚基岩条件下正断层对开采沉陷规律影响

1) 阜新清河门矿北翼南二采区为中生代晚侏罗世纪地层,上覆岩层为页岩、砂岩、砂质页岩和松散层,上覆岩层内存在正断层,断层倾角 53° ,断层露头方向 $NE30^\circ$,煤层厚度 1.9 m,倾角 22° ,平均采深 305 m,断层下盘开采,属厚基岩地质条件^[12]。如图 12 所示,该区域最大下沉量为 1.2 m,下沉系数约为 0.63,下沉曲线显示断层露头右侧下沉量为 0.2 m,左侧下沉量为 1 m,地表出现下沉台阶,与本研究厚基岩薄松散层中的变形规律一致。

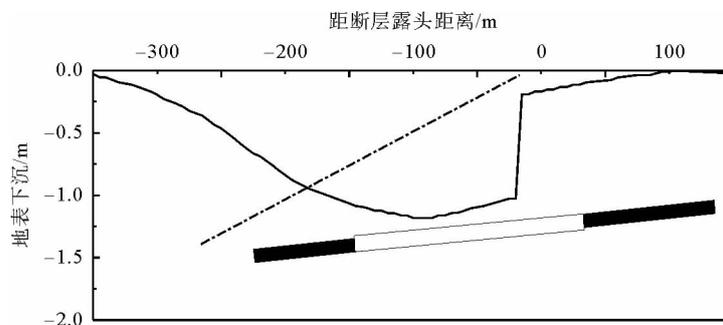


图 12 阜新清河门矿北翼南二采区地表下沉曲线^[12]

Fig. 12 Surface subsidence of No.2 mining section in the south of the north wing of Qinghemen Mine, Fuxin

2) 云盖山煤矿某工作面煤层厚度为 6.8 m,煤层倾角 17° ,煤层埋藏深度约 163 m,表土层为 3 m,基岩层为 160 m,断层 F4、F5 倾角均为 50° ,断层落差分别为 10 和 40 m,断层倾角与岩层移动角倾向相反,属

典型厚基岩地质条件^[13]。如图 13 所示,地表断层露头处移动和变形超过正常值,并出现裂缝、台阶下沉等非连续变形,符合厚基岩地质条件下的地表移动变形特征。

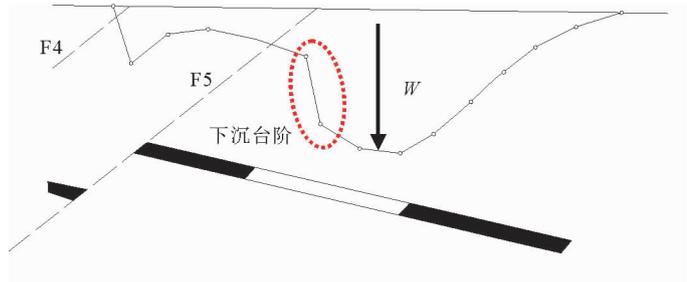


图 13 云盖山煤矿某工作面下沉特征示意图^[13]

Fig. 13 Subsidence characteristics of a working face in Yungaishan Coal Mine

3) 峰峰矿区某工作面走向长度 600 m,煤层厚度 5 m,埋深 770 m,煤层倾角 0°,松散层厚度 20 m,基岩层厚 750 m,典型厚基岩薄松散层地质条件,工作面西北部揭露正断层,断层落差 15 m,倾角 70°,断层带宽度 5.6 m^[20]。如图 14 所示,下盘煤层开采后断层露头两侧地表下沉值分别为 0.6 和 3.9 m,地表产生下沉台阶。

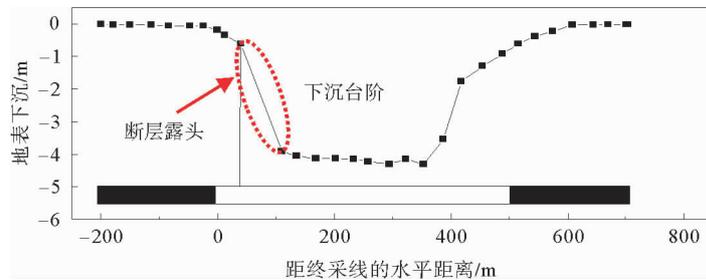


图 14 峰峰矿区某工作面下盘开采地表下沉曲线^[20]

Fig. 14 Surface subsidence of the footwall of a certain working face in Fengfeng Coal Mine

4.2 厚松散层条件下正断层对开采沉陷规律影响

某矿井田南翼八采区,采区上覆松散层厚度为 56.3~221 m,采深变化 400~900 m,平均采高 3.48 m,平均煤层倾角为 17°,存在正断层 F26,倾角 76°,落差 50~225 m,断层剖面如图 15 所示。工作面开采后村庄受开采沉陷影响范围大于预计值,即厚松散层地质条件下,受断层影响上盘开采沉陷范围增大^[17]。

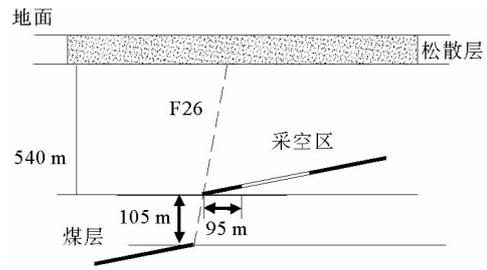


图 15 断层剖面示意图^[17]

Fig. 15 Schematic diagram of fault section

5 结论

通过理论分析与数值模拟结合的方法,对不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表沉陷规律进行了研究,结合实例对比分析了厚基岩、厚松散层地质条件的矿区开采沉陷特征,得出不同覆岩正断层下盘煤层开采沉陷的规律。

1) 正断层影响下覆岩地层破坏与地表变形理论模型分析显示,厚基岩地质条件下,断层的阻隔作用使基岩上下盘覆岩变形差异显著,基岩厚度的增加会导致地表下沉台阶增大,下沉盆地边缘易出现反弹抬高现象。厚松散层地质条件下,松散层吸收了由断层引起的上盘基岩滑移破坏,地表下沉值大于无断层一侧,地表形成偏态下沉盆地,松散层厚度的增加使地表下沉盆地更为平缓。

2) 研究了正断层影响下不同松散层与基岩比例对开采沉陷规律影响。采深 275 m 时,当松散层占上覆地层比例小于 13%,断层露头位置地表出现下沉台阶;松散层占比 13%~24%,地表出现不同程度的裂缝,土体断裂线偏离断层露头向采空区方向扩展;松散层占比 24%~45%,上盘地表变形范围明显扩大,随松散

层厚度增加,地表裂缝位置向上盘方向移动;松散层占比 45%~67%,上盘受影响的范围增加,地表形成连续的偏态下沉盆地;松散层占比大于 67%,巨厚松散层完全吸收了断层诱发的非连续变形,地表形成对称的下沉盆地。

3) 通过空间守恒原理,揭示了断层影响下不同覆岩条件地表水平移动变形规律。全基岩地质条件下,上盘覆岩抗拉强度高、移动变形小,主要为下盘向断层的水平移动,上盘地表移动变形范围减小;松散层存在的地质条件下,受断层与厚松散层的影响,上盘基岩滑移破坏传递至松散层使上盘松散层向采空区方向产生较大的水平位移,地表移动范围增大。

参考文献:

- [1] 陈绍杰,江宁,常西坤,等.采煤塌陷地建设利用关键技术与实践[M].北京:科学出版社,2019.
CHEN Shaojie,JIANG Ning,CHANG Xikun,et al.Key technology and practice on construction utilization of coal subsidence area[M].Beijing:Science Press,2019.
- [2] 陈绍杰,夏治国,郭惟嘉,等.断层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望[J].煤炭科学技术,2018,46(1):20-27.
CHEN Shaojie,XIA Zhiguo,GUO Weijia,et al.Research status and prospect of mining catastrophic response of rock mass under the influence of fault[J].Coal Science and Technology,2018,46(1):20-27.
- [3] 郭惟嘉.覆岩沉降离层发育的解析特征[J].煤炭学报,2000,25(增1):49-53.
GUO Weijia.Analytic method of overburden subsidence bed-separation[J].Journal of China Coal Society,2000,25(S1):49-53.
- [4] 汪锋.采动覆岩结构的“关键层-松散层拱”理论及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
WANG Feng.Structure of “key strata and arch structure in unconsolidated layers” and its application[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2016.
- [5] 宋世杰,王双明,赵晓光,等.基于覆岩层状结构特征的开采沉降分层传递预计方法[J].煤炭学报,2018,43(增1):87-95.
SONG Shijie,WANG Shuangming,ZHAO Xiaoguang,et al.Stratification transfer method of the mining subsidence based on the characteristics of layered structure in coal overburden[J].Journal of China Coal Society,2018,43(S1):87-95.
- [6] BUDDLE J.On subsidences produced by working beds of coal[J].Transactions of the Geological Society of London,1841, s2-6(1):165-168.
- [7] 王利,张修峰.巨厚覆岩下开采地表沉降特征及其与采矿灾害的相关性[J].煤炭学报,2009,34(8):1048-1051.
WANG Li,ZHANG Xiufeng.Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata[J].Journal of China Coal Society,2009,34(8):1048-1051.
- [8] 汪锋,陈绍杰,任梦梓,等.松散层拱结构及其对采动覆岩稳定性的影响[J].中国矿业大学学报,2019,48(5):975-983.
WANG Feng,CHEN Shaojie,REN Mengzi,et al.Effect of arch structure in unconsolidated layers on failure of the overlying strata[J].Journal of China University of Mining & Technology,2019,48(5):975-983.
- [9] 张文泉,刘海林,赵凯.厚松散层薄基岩条带开采地表沉降影响因素研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):1065-1071.
ZHANG Wenquan,LIU Hailin,ZHAO Kai.Influential factors on surface subsidence in stripe mining under thick unconsolidated layers and thin bedrock[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(6):1065-1071.
- [10] DONNELLY L J.Reactivation of geological faults during mining subsidence from 1859 to 2000 and beyond[J].Mining Technology,2000,109(3):179-190.
- [11] CHRZANOWSKI A,SZOSTK-CHRZANOWSKI A.Finite element modelling of ground movements over a steeply inclined coal seam[C]//6th ISM Conference on Developing Science and Art of Minerals Surveying.Harrogate,1985:709-718.
- [12] 张玉卓,仲惟林,姚建国.断层影响下地表移动规律的统计和数值模拟研究[J].煤炭学报,1989(1):23-31.
ZHANG Yuzhuo,ZHONG Weilin,YAO Jianguo.Study on surface movement influenced by faults using methods of statistics and numerical simulation[J].Journal of China Coal Society,1989(1):23-31.
- [13] 郭文兵,邓喀中,白云峰.受断层影响地表移动规律的研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2002,21(6):713-715.
GUO Wenbing,DENG Kazhong,BAI Yunfeng.Study on laws of ground surface movements influenced by faults[J].Jour-

- nal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2002, 21(6): 713-715.
- [14] 崔希民, 李春意, 袁德宝, 等. 弱面对地表移动范围和不连续变形的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2009, 24(2): 1-4.
CUI Ximin, LI Chunyi, YUAN Debao, et al. The impacts of weak plane to the surface movement and discontinuous deformation[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 24(2): 1-4.
- [15] 尹立明, 郭惟嘉, 尹增德. 断层影响下覆岩破坏规律研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(4): 59-63.
YIN Liming, GUO Weijia, YIN Zengde. Study on failure law of overlaying strata under influence of faults[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 28(4): 59-63.
- [16] 于秋鸽. 上下盘开采断层滑移失稳诱发地表异常沉陷机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 41-50.
YU Qiuge. Mechanism of abnormal subsidence induced by fault slipping instability during mining on hanging-wall and foot-wall[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 41-50.
- [17] 孔宪森, 吴侃, 陈朋. 煤矿开采诱发断层滑移对村庄建筑物影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 46-50.
KONG Xiansen, WU Kan, CHEN Peng. Study on fault sliding induced by coal mining affected to village buildings[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 46-50.
- [18] 罗锦, 郭庆彪, 陈红凯, 等. 逆断层下盘开采地表沉陷异常响应实验模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1280-1291.
LUO Jin, GUO Qingbiao, CHEN Hongkai, et al. Experimental simulation study on abnormal response of surface subsidence caused by mining in footwall of reverse fault[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(3): 1280-1291.
- [19] 于秋鸽, 张华兴, 邓伟男, 等. 采动影响下断层面离层空间产生及其对开采空间传递作用分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3286-3292.
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, DENG Weinan, et al. Analysis of fault separation generation and its increasing effect on mining zone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3286-3292.
- [20] 韩科明, 于秋鸽, 张华兴, 等. 上下盘开采影响下断层滑移失稳力学机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1327-1335.
HAN Keming, YU Qiuge, ZHANG Huaxing, et al. Mechanism of fault activation when mining on hanging-wall and foot-wall[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1327-1335.

(责任编辑: 吕海亮)