

采动引发地表下沉盆地边缘隆起效应研究

高玉兵^{1,2} 陈上元^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院 北京 100083)

摘 要: 为了探究地表沉陷盆地边缘隆起现象及其影响因素,采用现场实测和数值模拟等方法,对不同基岩厚度、不同岩性地层进行模拟分析,研究不同采动情况及不同地质条件下地层变形特征。以煤层开采后的覆岩运移结构为基础,建立弹性基础梁力学模型,分析了地表隆起机理及其判据条件。研究表明,采动影响和地质条件是影响地表边缘隆起的重要因素。地表整体下沉量和下沉速度随沙基比增大而增大,随顶板岩性普氏系数增强而减小。当基岩厚度过大或覆岩岩性较软时,难以出现地表隆起现象,只有当基岩厚度和岩层普氏系数达到特定条件时,地表下沉盆地边缘方可出现隆起现象,且隆起量与基岩厚度成反比,与岩层普氏系数成正比。

关键词: 松散层; 基岩; 局部隆起; 弹性基础梁

中图分类号: TD325.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)04-0026-07

Study on local uplifts near border of surface subsidence basin caused by mining excavation

Gao Yubing^{1,2}, Chen Shangyuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To study the uplift phenomenon near the border of surface subsidence Basin and its influencing factors, field measurement and numerical simulation were conducted to study the uplift phenomenon near the border of surface subsidence basin under different bedrock thickness and lithology conditions. On the basis of overburden migration structures after mining excavation, a mechanical model based on the elastic foundation beam had been established to study the deformation characteristics of strata in different mining and geological conditions, the mechanism of uplifts of surface and its judgment basis were also analyzed. The results showed that the most important factors affecting local uplifts near the border of surface subsidence basin were mining influence and geological condition. The amount and rate of integral subsidence increased as the thickness of bed rock or hardness of the roof decreased. It was hard to see the uplift phenomenon as the thickness of the bedrock was too large or the hardness of the roof was too high. Only when the thickness and Protodyakonov coefficient of bed rock were in a certain range, the local uplift phenomenon could appear at the border of basin. In addition, the amount of uplift was inversely proportional to thickness of bed rock and proportional to Protodyakonov coefficient of roof strata.

Key words: surface subsidence; loose strata; thickness of bed rock; local uplifts; elastic foundation beam

0 引 言

煤炭开采过程中,受采动影响的上覆岩层会经历断裂、冒落、下沉等变化过程,波及至地表就会引发开采沉陷^[1]。地表沉陷规律是每个矿井必须进

行的基础技术工作,《煤矿安全规程》中明确规定,“三下”采煤时必须设定地表观测站,以便及时了解地表移动变形规律,指导井下安全生产^[2]。我国学者在地表沉陷预计方面研究较多,提出了许多有价值的预测模型和方法,主要有基于随机介质理论的

收稿日期: 2016-11-11; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.04.005

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB227903)

作者简介: 高玉兵(1989—)男,山东烟台人,博士研究生。Tel: 13126776963 E-mail: yubing_gao@163.com

引用格式: 高玉兵,陈上元.采动引发地表下沉盆地边缘隆起效应研究[J].煤炭科学技术,2017,45(4):26-32.

Gao Yubing, Chen Shangyuan. Study on local uplifts near border of surface subsidence basin caused by mining excavation [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 26-32.

概率积分法^[3-6]、基于经验的剖面函数法^[7-8]以及基于连续介质的力学方法^[9-11]等。此外,有学者以现场实测为主,提出了特定开采条件下的预测模型。例如,高超等^[12]对近浅埋深、中厚基岩、特厚煤层条件下的地表沉陷规律进行实测研究,得到一套完整的地表沉陷预计参数和角量参数;贾新国^[13]分析了非充分采动条件下地表移动实测规律,获得了该条件下的地表移动角量参数和位移参数。以上模型及方法均有其合理性,对地表沉降的总体态势预计也是准确的,但在处理方面尚存在不足之处。笔者在兖州矿区及大屯矿区等多个区域进行地表移动变形监测时发现:随着工作面推进,地表不是完全处于持续下沉状态,当采煤工作面推进至一定位置时,地表部分区域出现先隆起后下沉的现象,且隆起区域位于下沉盆地的边缘。对于此种现象,国内外少有文献进行论述,现有的开采沉陷理论亦不再适用。

矿山开采沉陷受采动情况、岩层组合、岩层节理裂隙形态、地应力等多种因素影响,其中采动程度和顶板岩性分布对开采沉陷影响尤为明显。为了解释此现象,笔者以大屯矿区某矿为工程背景,在工作面附近施工沉降孔,运用现场实测及数值模拟等方法,探究了不同条件下地表下沉盆地的边缘隆起效应,并通过建立力学模型理论解释了此种现象,以期完善现有的开采沉陷理论提供补充参考。

1 工程概况

大屯矿区某矿位于微山湖西畔的沛县境内,主采山西组的7、8号煤层。为了了解地表及第四系松散层内部地层变形规律,在7267工作面走向方向上施工沉降孔,其中孔1距开切眼750 m,该孔位于工作面倾向的中央位置,孔2距开切眼754 m,该孔距7267工作面运输巷120 m,孔3、孔4与孔1、孔2关于已开采区域基本对称分布,如图1所示。

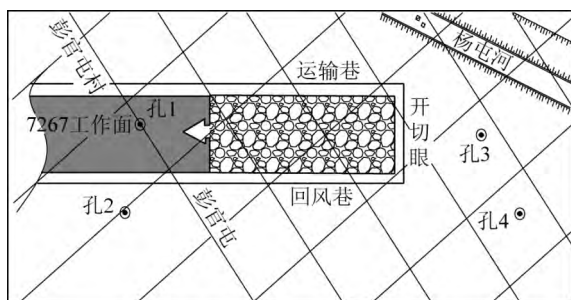


图1 沉降孔位置

Fig. 1 Location of subsidence holes

地层变形监测采用沉降仪,该仪器利用电磁感应原理设计而成。测量前将磁感应沉降环埋入待测地位,测量过程中当传感器通过磁感应环时,产生电磁感应信号传至地面仪表,同时发出声光警报,读取孔口标记点上对应的刻度值,即为沉降环的深度,2次测量间的刻度差值即为地层位移变化量,接近地表的地层垂直位移监测结果如图2所示。

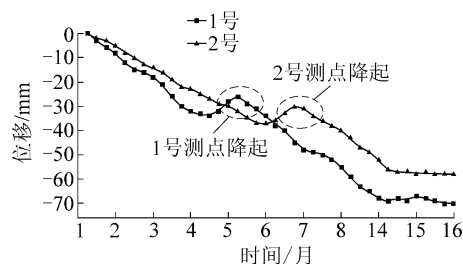


图2 地层沉降实测曲线

Fig. 2 Subsidence value of strata with regard to time

从图2可以发现,沉降孔所在位置的地层并不是一直处于下沉状态,随着工作面推进,各个钻孔所在的地表均出现地层轻微上升现象。其中孔1所在的地层地表隆起现象出现较早,地表沉降位移相似,且孔1和孔2所在的地层地表沉降规律相似,此种现象明显与沉陷理论相悖,有必要探究此种现象出现的原因及其影响因素。

2 地表隆起效应的影响因素分析

地表下沉是多种因素共同作用的结果,其中基岩厚度和顶板岩性对地表下沉影响明显^[14-15]。我国微山湖区下有多处矿井开采,从湖区内向湖区外基岩厚度、顶板岩性等均在不断变化,有些区域的地表变形很难用实测方法确定。为进一步探究地表下沉盆地边缘隆起效应,运用FLAC^{3D}数值模拟软件对不同条件下地表变形规律进行研究。

2.1 数值计算模型

FLAC^{3D}是一种三维显式有限差分软件,可以模拟三维岩石、土壤及其他材料所发生的运动及力学行为。本次模拟以实测矿区的地质条件为工程背景,该工作面面长177 m,采高5 m,为近水平煤层,岩层力学参数见表1和开采模型如图3所示。其中模型侧面限制水平移动,底部固定约束,表面为自由面。

2.2 基岩厚度对地表下沉盆地边缘隆起效应影响

基岩厚度对上覆岩层的运动规律有重要影响,为了探究其影响效果,模拟不同基岩厚度条件下地表下沉情况。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

岩性	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
覆盖土	1 750	1.50	1.23	27	2.15	1.00
粗粒砂岩	1 840	2.32	1.62	18	3.20	2.20
砂质黏土	1 810	2.10	2.34	28	1.80	0.90
细粒砂岩	1 880	2.82	2.25	19	3.15	2.10
泥岩	2 500	2.31	0.84	35	6.20	5.50
7 号煤	1 450	0.79	0.71	25	0.90	0.50
细粒砂岩	2 350	1.35	1.31	29	3.50	2.50
粉砂岩	2 200	2.57	2.31	30	4.50	2.50

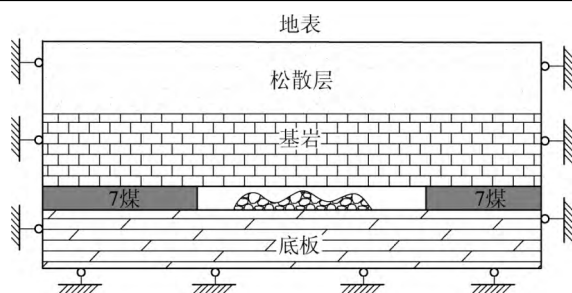


图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical simulation model

模拟过程中保持松散层厚度不变,通过改变基岩厚度构造出 6 个具有不同沙基比(即松散层厚度和基岩厚度之比)的数值模型,其中松散层厚取为 50 m,基岩厚度分别取 600、300、100、50、20 m 及无基岩 6 种情况。为了保持一定的宽深比,根据需要适当调整模型大小,开采过程中使每个模型的开采均达到充分采动,不同基岩厚度条件下地表下沉监测曲线,如图 4 所示。

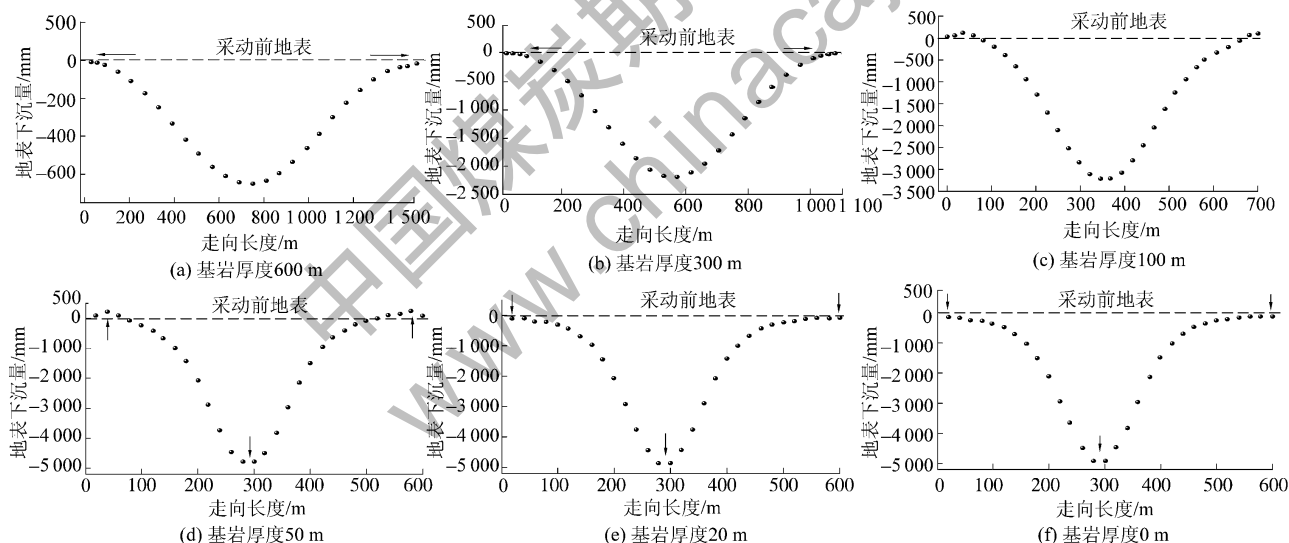


图 4 不同基岩厚度地表下沉监测曲线

Fig. 4 Surface subsidence of different rock bed thickness

由图 4 可知:

1) 当基岩厚度为 600 m 时,地表最大下沉量为 610.2 mm,而当基岩厚度减少到 50 m 时,地表最大下沉量达到 4 780 mm。极限情况下,煤层顶板无基岩时,下沉高度已经接近煤层采厚,说明顶板岩层出现了整体切落。可见,基岩厚度对地表下沉影响明显,当松散层厚度不变时,随着基岩厚度减小,地表最大下沉值逐渐增大。

2) 在现有的参数条件下,当基岩厚度为 600 m

时,地表下沉盆地边缘没有出现隆起效应,而是出现整体下沉现象;当基岩厚度为 300 m 时,亦没有出现隆起效应,但已处于隆起过渡阶段;当基岩厚度继续减少到 100 m 时,地表下沉盆地出现隆起现象,最大隆起量达到 90 mm;基岩厚度继续减少到 50 m 时,下沉盆地隆起效应更为明显,最大隆起量达到 160 mm;但当基岩厚度继续减小,下沉盆地边缘隆起现象消失。可见,只有当基岩厚度在一定范围内变化时,地表下沉盆地边缘才会出现局部隆起现象。

3) 不同位置处地表下沉值不同。采空区正上方下沉值最大, 越远离采空区, 岩层下沉值越小, 即在采空区上方形成一个凹陷区; 基岩越薄, 采空区中央向外下沉梯度越大, 即下沉越快。

2.3 岩性对下沉盆地边缘隆起效应的影响

实际地质条件中, 岩层分布非常复杂, 这里将地层进行简化, 将基岩岩体抽象为理想的软硬2层进行模拟, 研究不同岩性条件下地表下沉盆地的边缘隆起效应。不同岩性条件下的模拟如图5所示。

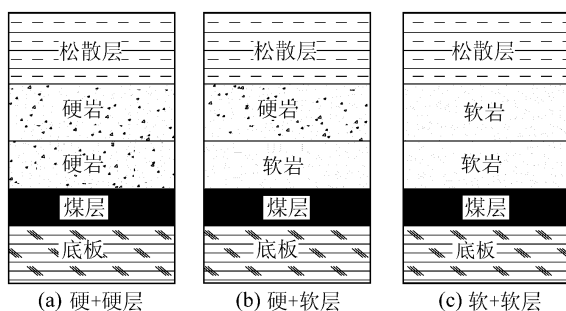


图5 不同岩性岩层模拟示意

Fig. 5 Schematic diagram of rock stratum with different lithology

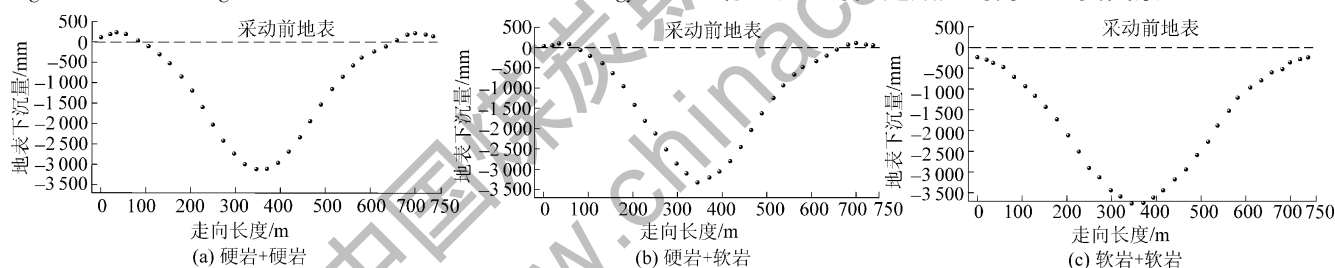


图6 不同岩性条件下地表下沉曲线

Fig. 6 Surface subsidence under conditions of rock stratum with different lithology

2.4 综合影响分析

由以上分析可知, 基岩厚度变化间接反映了上覆岩层受采动情况, 不同基岩厚度表明地表受采动影响程度不同。基岩越薄, 地层受采动影响越剧烈, 地表竖直位移变化越明显。不同基岩厚度地表边缘盆地隆起效应不同, 当基岩厚度增大到一定程度, 地表下沉盆地不会有隆起效应, 这时虽然顶板岩层会形成梁结构, 但由于基岩太厚, 基岩顶部会形成稳定岩体结构, 阻止了梁对地面的影响, 因此不会引发边缘隆起现象; 当基岩厚度减少到一定程度, 地表边缘盆地出现隆起现象, 采动引起的岩梁掀起效应会波及到地表, 且随着基岩厚度减小, 这种效应影响越明显; 但当基岩厚度减小到一定程度后, 基岩带会全部垮落, 松散岩层不会形成梁结构, 亦不会引起地表隆起。根据模拟结果统计, 地表下沉盆地边缘区域随

基岩总厚度为 50 m, 将其分为 3 种类型: 硬+硬、硬+软、软+软, 具体物理力学参数见表 2。

表2 硬岩与软岩力学参数

Table 2 Physicochemical parameters of hard and soft rock strata

岩石类型	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
硬岩	10.0	0.21	800	53.2	6.3	2 970
软岩	1.21	0.28	520	30.9	1.3	2 550

对图5所示的3个模型进行模拟开挖, 开挖后地表最终下沉曲线如图6所示。

由图6可以发现, 当基岩段全为硬岩层时, 地表隆起效应最明显, 但整体下沉值最小; 当基岩段为硬岩和软岩组合时, 地表亦有隆起现象, 但隆起值有所减小, 地表最大下沉值有所增大; 当基岩段为全软覆岩时, 不再有地表隆起现象, 但地表下沉值最大。可见, 基岩段硬岩层对地表隆起现象有重要影响, 岩性反映的是覆岩地质条件。可见, 覆岩地质条件是影响地表边缘隆起效应的另一重要因素。

基岩厚度变化趋势示意如图7a所示, 其中负号表示下降, 正号表示上升。由以上分析可知, 采动影响是地表边缘隆起效应的一个重要因素。

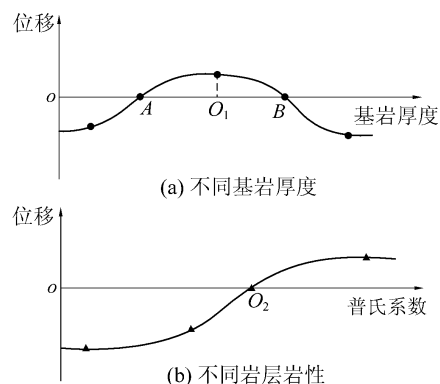


图7 不同条件下地表下沉盆地边缘位移变化

Fig. 7 Displacement changes near border of surface subsidence basin under different conditions

不同的岩性组合反映了不同的地质条件,当基岩厚度所在的范围满足地表边缘盆地隆起条件时,隆起明显程度会随着基岩岩性发生变化。当基岩顶部岩梁能够达到断裂条件时,隆起效应整体趋势是随着岩性硬度的增大变得明显,当岩性硬度增大到一定程度时,即采动不足以引发顶板破断时,不会发生隆起,如图 7b 所示。可见,地质条件是影响地表隆起效应的又一重要因素。

3 地表隆起效应的力学分析及判据条件

由上述分析可知,基岩中的硬岩层对下沉盆地的边缘隆起效应起至关重要的作用。相似模拟过程中煤层开采后上覆岩层结构如图 8 所示。可以发现,煤层开采后,上覆岩层的破裂线是沿着一条从工作面端部眼至裂隙带顶端的倾斜直线,破坏区的左翼及右翼形成一个倒三角形式的岩梁结构,采高较大时采空区正上方的岩梁会处于悬空状态。

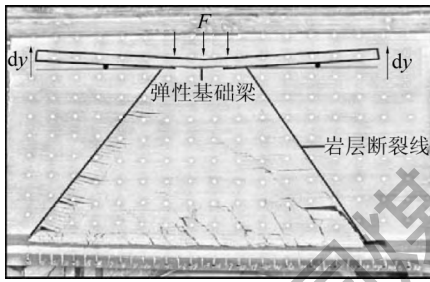
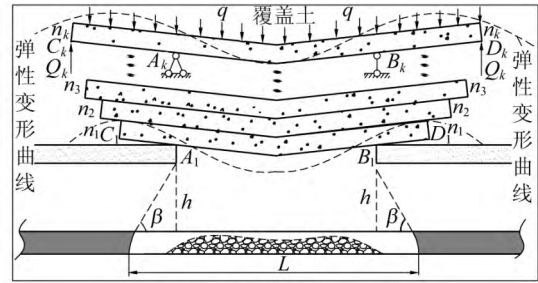


图 8 煤层开采后上覆岩层结构

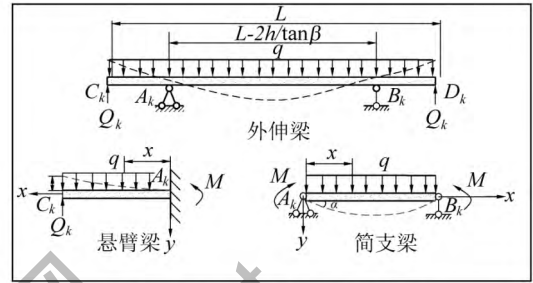
Fig. 8 Diagram of stratum movement after the coal mining operation

由于岩石是弹脆性体,可将其看成是线弹性体+弱面的结构体,煤层开采后,上覆岩层的移动可以看成是由层面分割而成的层状弹性复合岩梁,如图 9a 所示。从靠近采空区的第一层 n_1 具有掀起效应的岩梁开始,岩梁的运动均会对上覆邻近岩梁产生反力作用,而对地表隆起效应起决定作用的为靠近松散土层且具有掀起效应的关键岩梁,假设该关键岩梁为第 k 层,该层岩梁与第 1 层岩梁(n_1)有相似的受力形态,实质上可看作由铰点 A_k 、 B_k 支撑的外伸梁,力学模型如图 9 所示。

在上覆岩土层重力及下覆岩梁掀起力共同作用下,关键岩梁会发生回转,假设上覆松散土层在关键岩梁上作用有均衡载荷 q ,考虑到地基作用及应力折减,设外伸梁端点 C_k 处受到下覆岩梁的有效作用力大小为 Q_k ,工作面走向推进距离为 L ,关键岩梁长度为 l ,导水断裂带发育高度为 h ,岩梁刚度为 EI 。



(a) 顶板层状复合岩梁模型



(b) 地表隆起关键岩梁力学模型

图 9 弹性基础梁力学模型

Fig. 9 Mechanical model of elastic foundation beam

取第 k 层的关键岩梁为研究对象,该岩梁为复合受力梁,计算过程可采用拆分法,假想将该外伸岩梁沿 A 截面截开,视作受力等效的简支岩梁和悬臂岩梁^[16-17](图 9b),则隆起位移为等效简支岩梁和悬臂岩梁上的力共同作用下引起的,求得 C_k 点处的最大位移即为隆起位移。以 C_k 端为例,首先对简支岩梁进行力学分析,采用局部坐标系形式,设坐标原点为 A_k , $A_k B_k$ 方向为 x 轴正方向,垂直 x 轴向下为 y 轴正方向,则岩梁挠曲线方程 $w(x)$ 可设为

$$EIw(x) = \int M(x) dx + C \quad (1)$$

边界条件为: $w_{A_k} = 0$, $\mu_{B_k} = 0$,则可得出简支梁在均布载荷 q 和力偶 M 共同作用下转角方程和挠曲线方程分别为

$$\begin{cases} \theta_1(x) = \frac{q}{24EI} \left[\left(L - \frac{2h}{\tan \beta} \right)^3 - 6 \left(L - \frac{2h}{\tan \beta} \right) x^2 + 4x^3 \right] + \frac{M}{3EI} (l^2 - 3x^2) \\ w_1(x) = \frac{qx}{24EI} \left[\left(L - \frac{2h}{\tan \beta} \right)^3 - 2 \left(L - \frac{2h}{\tan \beta} \right) x^2 + x^3 \right] + \frac{M}{3EI} (xl^2 - x^3) \end{cases} \quad (2)$$

其中,力偶 M 可通过平衡条件求出: $M = \frac{Q_k(l-L+2h/\tan \beta)}{2} - \frac{q(l-L+2h/\tan \beta)^2}{8}$ 。

由此可求出岩梁在均衡载荷 q 和力偶 M 的共同作用下在端点 A_k 处的转角($x=0$ 时)为

$$\theta_{A_k} = \theta_1(0) = \frac{q}{24EI} \left(L - \frac{2h}{\tan \beta} \right)^3 + \frac{M}{3EI} l \quad (3)$$

则由于简支岩梁转动作用引起 C_k 点的隆起位移为

$$y_1 = \left(\frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta} \right) \sin \theta_{Ak} = \left(\frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta} \right) \times \sin \left[\frac{q}{24EI} \left(L - \frac{2h}{\tan \beta} \right)^3 + \frac{M}{3EI} l \right] \quad (4)$$

同理,对假想悬臂岩梁进行力学分析,采用局部坐标形式,设坐标原点为 A_k ,沿 $A_k C_k$ 向为 x 轴正向,垂直 x 轴向下为 y 轴正向,悬臂岩梁在反力 Q_k 、均衡载荷 q 及力偶 M 的作用下,岩梁转角方程和挠曲线方程分别为

$$\begin{cases} \theta_2(x) = \frac{qx}{6EI} (x^2 - 3lx + 3l^2) - \left(\frac{Q_k l' x}{EI} - \frac{\theta_k x^2}{2EI} \right) \\ w_2(x) = \frac{qx^2}{24EI} (x^2 - 4lx + 6l^2) - \left(\frac{Q_k l' x^2}{2EI} - \frac{Q_k x^3}{6EI} \right) \end{cases} \quad (5)$$

其中 l' 为点 A_k 和 C_k 间的距离 $l' = \frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta}$,则在悬臂岩梁上力及力偶作用下 C_k 点的隆起位移 y_2 ($x=l'$) 为

$$y_2 = w_2(l') = \frac{ql'^4}{8EI} - \frac{Q_k l'^3}{3EI} = \frac{q}{8EI} \left(\frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta} \right)^4 - \frac{Q_k}{3EI} \left(\frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta} \right)^3 \quad (6)$$

考虑到基岩带岩体岩性、岩层地质条件及应力转移,引入岩性系数 γ ,则煤层开采后,地表下沉盆地边缘隆起位移可表示为

$$\Delta y = \gamma y_1 - y_2 = \gamma \left(\frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta} \right) \sin \left[\frac{q}{24EI} \left(L - \frac{2h}{\tan \beta} \right)^3 + \frac{M}{3EI} l \right] - \frac{q}{8EI} \left(\frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta} \right)^4 + \frac{Q_k}{3EI} \left(\frac{l-L}{2} + \frac{h}{\tan \beta} \right)^3 \quad (7)$$

其中 γ 与关键岩梁底覆岩层软硬程度及受扰动情况有关。当基岩岩层为软岩时 ($\gamma \leq 0$),岩层难以形成弹性基础梁,不会产生隆起;当基岩岩层为硬岩时 ($\gamma > 0$),则需考虑煤体开挖扰动后关键岩梁的受力情况,若 $\gamma \leq y_2/y_1$,例如基岩太厚时,基岩带顶部会形成稳定的支撑结构,同样不会引发隆起现象。只有当开采扰动,岩层硬度和厚度均达到一定条件, $\gamma \geq y_2/y_1$ 时,下沉盆地才会产生边缘隆起现象。

4 结 论

1) 运用地层沉降仪对多个矿区采煤工作面地

层变形进行实测发现,随着煤层开采,地层并不是一直处于下沉状态,在地表下沉盆地边缘出现了地层轻微隆起现象。

2) 运用有限差分法软件对不同条件下的煤层开采进行模拟分析发现,基岩厚度和顶板岩层性质是影响地表下沉盆地边缘隆起效应的重要因素,进一步从本质分析得知,采动影响和地质条件是影响地表边缘隆起效应的最重要因素。

3) 基岩厚度及顶板岩性对地表下沉影响明显,整体趋势是随着基岩厚度减小、岩性普氏系数减弱,地表整体下沉值逐渐增大;只有当采动条件和地质条件均达到一定条件时,才会出现边缘隆起现象,且隆起效应会随着基岩厚度减小、岩性普氏系数增大而变得明显。

4) 将顶板岩层看作由层面分割而成的弹性复合岩梁,对地表下沉盆地边缘隆起效应有直接影响的为靠近松散土层且具有掀起效应的关键岩梁。在硬岩顶板条件下建立弹性基础梁力学模型,引入岩性系数并推导出边缘盆地隆起位移计算公式,得出隆起效应的判别条件:只有当开采扰动和地质条件达到特定条件时 ($\gamma \geq y_2/y_1$),地表下沉盆地才会出现边缘隆起现象。

参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,缪协兴.采动岩体力学基础研究与展望[J].岩土力学,1997,18(8):14-18.
Qian Minggao, Miao Xiexing. Mining rock mechanics basic research and prospects[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(8): 14-18.
- [2] 徐乃忠,葛少华,林英良,等.山东黄河北煤田地表沉陷规律研究[J].煤炭科学技术,2011,39(6):97-101.
Xu Naizhong, Ge Shaohua, Lin Yingliang, et al. Study on surface subsidence law in north Yellow River of Shandong Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6): 97-101.
- [3] 任松,姜德义,杨春和.复杂开采沉陷分层传递预测模型[J].重庆大学学报,2009,32(7):823-828.
Ren Song, Jiang Deyi, Yang Chunhe. Stratification transfer model for predicting complex mining subsidence[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(7): 823-828.
- [4] 余学义,郭文彬,赵兵朝,等.厚黄土层煤层开采沉陷规律研究[J].煤炭科学技术,2015,43(7):6-10,24.
Yu Xueyi, Guo Wenbin, Zhao Bingchao, et al. Study on mining subsidence law of coal seam with thick overlying loess stratum[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 6-10, 24.
- [5] 汤伏全.西部厚黄土层矿区开采沉陷预计模型[J].煤炭学报,2011,36(S1):74-78.
Tang Fuquan. Mining subsidence prediction model in western thick

- loess layer mining areas[J]. Journal of China Coal Society 2011, 36(S1): 74-78.
- [6] 吴侃, 靳建明, 戴仔强. 概率积分法预计下沉量的改进[J]. 辽宁工程技术大学学报 2003 22(1): 19-22.
Wu Kan, Jing Jianming, Dai Zaiqiang. Improvement on probability integral method prediction come down quantity [J]. Journal of Liaoning Technical University 2003 22(1): 19-22.
- [7] 刘辉, 邓喀中, 何春桂, 等. 超高水材料跳采充填采煤法地表沉陷规律[J]. 煤炭学报 2013 38(S2): 272-276.
Liu Hui, Deng Kazhong, He Chungui et al. Surface subsidence law of filling with super-high water material and skip mining[J]. Journal of China Coal Society 2013 38(S2): 272-276.
- [8] 邓清海, 马凤山, 徐嘉谟, 等. 地下开挖引起地表局部上升的弹性地基梁效应[J]. 煤炭学报 2011 36(S2): 365-368.
Deng Qinghai, Ma Fengshan, Xu Jiamo et al. Uplift phenomenon in local ground surface induced by elastic foundation beam effects of underground excavation[J]. Journal of China Coal Society 2011, 36(S2): 365-368.
- [9] 顾伟, 谭志祥, 邓喀中. 基于双重介质力学耦合相关的沉陷模型研究[J]. 煤炭学报 2013 30(4): 589-594.
Gu Wei, Tan Zhixiang, Deng Kazhong. Study on subsidence model based on double-medium mechanics coupling[J]. Journal of China Coal Society 2013 30(4): 589-594.
- [10] 彭林军, 赵晓东, 李术才, 等. 深部开采地表沉陷规律模拟研究[J]. 岩土力学 2011 32(6): 1910-1914.
Peng Linjun, Zhao Xiaodong, Li Shucai et al. Simulating research on rules of surface subsidence due to deep mining[J]. Rock and Soil Mechanics 2011 32(6): 1910-1914.
- [11] 任伟中, 白世伟, 葛修润. 厚覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004 23(10): 1715-1719.
Ren Weizhong, Bai Shiwei, Ge Xiurun. Modeling test study on deformation and subsidence of ground surface induced by underground mining with thick overburden[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004 23(10): 1715-1719.
- [12] 高超, 徐乃忠, 刘贵, 等. 特厚煤层综放开采地表沉陷规律实测研究[J]. 煤炭科学技术 2014 42(12): 106-109.
Gao Chao, Xu Naizhong, Liu Gui et al. Research on actual measurement of surface subsidence law for fully-mechanized top coal caving in extra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2014 42(12): 106-109.
- [13] 贾新果. 大采深非充分开采地表沉陷规律实测分析[J]. 煤矿开采 2015 20(5): 53-56.
Jia Xinguo. Observation and analysis of surface subsidence rule of large-mining-depth non-full mining[J]. Coal Mining Technology 2015 20(5): 53-56.
- [14] 刘玉成, 曹树刚. 基于关键层理论的地表下沉盆地模型初探[J]. 岩土力学 2012 33(3): 719-724.
Liu Yucheng, Cao Shugang. Preliminary study of surface subsidence model based on theory of key rock stratum[J]. Rock and Soil Mechanics 2012 33(3): 719-724.
- [15] 刘玉成, 庄艳华. 地下采矿引起的地表下沉的动态过程模型[J]. 岩土力学 2009 30(11): 3406-3416.
Liu Yucheng, Zhuang Yanhua. Model for dynamic process of ground surface subsidence due to underground mining[J]. Rock and Soil Mechanics 2009 30(11): 3406-3416.
- [16] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2003: 31-40.
- [17] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(上)[M]. 北京: 高等教育出版社 2009: 97-180.