

## 西部生态脆弱区地表开采损害特征

赵兵朝<sup>1,2</sup>, 同超<sup>1,2</sup>, 刘樟荣<sup>1,2</sup>, 刘浪<sup>1,2</sup>, 余学义<sup>1,2</sup>

- (1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安, 710054;  
2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治实验室, 陕西 西安, 710054)

**摘要:** 为进一步揭示西部生态脆弱区地表开采损害特征形成的机理, 在分析影响生态脆弱区地表开采损害特征主要因素(开采深度、开采高度、基岩厚度、载荷层厚度以及坡体自身稳定性)的基础上, 研究生态脆弱区厚松散层薄基岩、黄土沟壑及山区丘陵下煤层开采的地表损害特征, 并以基采比(基岩厚度与开采高度之比,  $J_C$ )和基载比(基岩厚度与载荷层厚度之比,  $J_Z$ )为关键参数, 揭示生态脆弱区煤层开采损害特征形成的机理。研究表明: 以基采比和基载比为基础, 结合坡体稳定性引起的附加量, 能够有效地分析西部生态脆弱区的开采损害特征, 为进一步揭示该区域煤层开采地表损害特征的形成机理提供了依据。

**关键词:** 生态脆弱区; 开采损害; 基采比; 基载比; 坡体稳定性

中图分类号: TD05

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)11-2990-08

## Characteristics of mining-induced surface damage in western ecological fragile region

ZHAO Bingchao<sup>1,2</sup>, TONG Chao<sup>1,2</sup>, LIU Zhangrong<sup>1,2</sup>, LIU Lang<sup>1,2</sup>, YU Xueyi<sup>1,2</sup>

- (1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Shaanxi, Xi'an 710054, China;  
2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Shaanxi, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To reveal the formation mechanism of mining-induced surface damage characteristics in the western ecological fragile region, the characteristics of surface damage under conditions of thick alluvium with thin bedrock, and loess ravine and mountain and hills were studied based on the analysis of affecting factors such as mining depth, mining height, bedrock thickness, overburden thickness and slope stability. The ratio of bedrock thickness and mining height ( $J_C$ ), the ratio of bedrock thickness and overburden thickness ( $J_Z$ ), and the slope stability were employed as key parameters to reveal the formation mechanism. The results show that using  $J_C$  and  $J_Z$ , combined with slip additional amount caused by slope stability, the mining damage characteristics of the western ecological fragile area can be effectively analyzed. This study provides a basis to reveal the formation mechanism of mining-induced surface damage characteristics in the western ecological fragile region.

**Key words:** ecological fragile region; mining-induced surface damage; ratio of bedrock thickness and mining height ( $J_C$ ); ratio of bedrock thickness and overburden thickness ( $J_Z$ ); slope stability

收稿日期: 2016-12-27; 修回日期: 2017-02-04

**基金项目(Foundation item):** 国家自然科学基金资助项目(51504182, 51304156); 陕西省自然科学基金资助项目(2015JQ5187); 陕西省教育厅基金资助项目(15JK1466); 中国博士后科学基金资助项目(2015M582685); 西安科技大学能源学院青年教工创新项目(2014-NY-018) (Projects(51504182,51304156) supported by the National Natural Science Foundation; Project(2015JQ5187) supported by the National Natural Science Foundation of Shaanxi Province; Project(15JK1466) supported by Shaanxi Provincial Department of Education Foundation; Project(2015M582685) supported by China Postdoctoral Science Foundation); Project(2014-NY-018) supported by Innovative Foundation for the Young Scholars of School of Energy, Xi'an University of Science and Technology)

**通信作者:** 赵兵朝, 博士, 教授, 从事开采损害及防护研究; E-mail: zhaobc913@163.com

近年来, 国内煤炭开发布局矛盾加剧: 东部资源日渐枯竭, 煤炭开发加速向生态环境脆弱的西部转移。煤炭资源的大量开发给生态脆弱区的生态环境造成了一系列损害, 引起了人们的极大关注。对于覆岩及地表开采损害特征, 国内外许多研究者开展了大量的工作, 如阿维尔申等<sup>[1]</sup>先后采用弹性力学、塑性力学及地表移动观测等方法研究开采沉陷问题, 建立了典型采场上方岩层移动的“三带理论”: 冒落带、裂隙带和弯曲下沉带。黄庆享<sup>[2]</sup>对浅埋煤层进行了定义, 将浅埋煤层分为 2 种类型: 厚松散层薄基岩类型的浅埋煤层, 老顶为单一关键层结构, 覆岩破坏表现为台阶下沉; 厚基岩薄松散层的浅埋煤层, 工作面上方存在 2 组关键层, 覆岩破坏介于浅埋煤层与普通采场之间, 称为近浅埋煤层。宋世杰<sup>[1]</sup>运用灰色关联分析和逐步回归分析 2 种方法分别对影响开采沉陷的关键地矿因子进行筛选, 最终确定扰动系数( $n$ )、覆岩综合硬度( $Q$ )、深厚比( $R_0$ )、宽深比( $\lambda_1$ )这 4 个影响因子为关键地矿因子, 构建了基于关键地矿因子的下沉系数预计模型; 黄乐亭<sup>[3]</sup>将《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》(以下简称《规程》)中的两带计算公式进一步完善为以煤层采厚和覆岩硬度为变量的计算公式; 于广明等<sup>[4]</sup>基于采动岩体的非线性破坏特征、开采沉陷的 Damage 效应、采动岩体分形裂隙网络及演化规律、开采沉陷的协同效应和自组织过程、采动岩体层裂的突变机理、采动断层活化的分形界面效应、地表下沉的“S”型分形增长规律等内容, 提出了建立基于矿山开采非线性沉陷机理、规律的预测模型和防治对策及非线性沉陷学的理论。《规程》规定, 在近水平煤层开采的条件下, 当开采煤层埋藏深度与采高之比大于 40 时, 地表表现为连续变形。西部生态脆弱区具有可采煤层多、煤层厚度较

大、煤层埋藏较浅(埋深多为 80~150 m)、开采高度大、上覆基岩薄、地表沙土层厚等工程地质特征, 使得已有的采动覆岩破坏及地表沉陷规律(如“三带”规律)在该区域条件下无法普遍适用。西部生态脆弱区开采损害具体表现为: 地表产生沉陷盆地, 地面产生开裂、倾斜和弯曲等变形, 甚至出现阶梯状塌陷坑、塌陷漏斗; 原有的岩石结构被破坏, 甚至引发山体滑坡、地震等衍生地质灾害; 地面村庄等建筑物产生裂缝、倾斜甚至倒塌; 土壤环境受到污染, 有用矿物质、养分和水汽漏失或挥发, 引起地表植被破坏, 土地荒漠化。控制地下采煤引起的地表生态恶化, 促进煤炭资源开发与生态环境改善的协调发展, 是西部生态脆弱区矿区建设的必然之路<sup>[5]</sup>。本文作者以西部生态脆弱区地表开采损害特征为研究对象, 结合生态脆弱区的特殊采矿地质条件, 进一步揭示其开采损害特征形成的机理。

## 1 地表开采损害特征影响因素分析

生态脆弱区现场实测数据表明: 常规条件下按埋深与开采厚度之比判定覆岩的破坏与地表塌陷特征, 在该区域条件下已不具备普遍适用性: 黄陵矿区黄陵 1 号井, 地表属于山区黄土沟壑残原地貌, 沟壑纵横分布, 煤层开采厚度一般为 2.5~3.0 m, 该矿区在工作面达到充分采动条件时地表出现台阶下沉, 台阶最大下沉量为 60 cm; 韩家湾煤矿, 地表为松散层, 开采煤层厚度为 4.5 m, 该矿区在达到充分采动条件时地表虽出现台阶下沉, 但台阶下沉较少, 最大下沉量仅为 13 cm。生态脆弱区各矿井在不同基采比和基载比条件下的开采损害特征如表 1 所示。

表 1 不同基采比( $J_C$ )和基载比( $J_Z$ )条件下的开采损害特征

Table 1 Mining-induced damage characteristics with different ratios of bedrock thickness and mining height ( $J_C$ ) bedrock thickness and overburden thickness ( $J_Z$ )

序号	矿井名称	工作面 编号	基岩厚度/ m	载荷层厚度/ m	开采 高度/m	基采比	基载比	埋深与 开采高度比	台阶下沉/ mm
1	金鸡滩井田	—	130.0	70.0	4.0	32.50	1.85	50.00	无
2	大柳塔煤矿	20601	46.0	38.0	4.0	11.50	1.21	21.00	很少
3	大柳塔煤矿	20604	43.0	62.0	4.0	10.75	0.68	26.25	100
4	榆树湾煤矿	20102 <sup>上</sup>	120.0	110.0	5.0	24.00	1.09	46.00	无
5	大柳塔煤矿	12404	35.0	15.0	4.0	8.75	2.33	10.00	900
6	大柳塔煤矿	1209	23.3	31.5	4.0	5.83	0.74	13.70	1 000
7	韩家湾煤矿	2304	70.0	65.0	4.5	15.80	1.07	30.00	150
8	麻黄梁煤矿	30101	30.0	170.0	3.8	7.89	0.17	52.60	3 600
9	黄陵一号煤矿	1303	140.0	145.0	2.5	56.00	0.96	114.00	600

由表 1 可知按煤层埋深( $H$ )与开采高度( $m$ )之比大于 40 进行判定,西部生态脆弱区部分矿井煤层开采后地表不会出现台阶下沉,但开采实践表明:按  $H/m$  的比值判定生态脆弱区覆岩破坏形态,可能存在较大出入;麻黄梁煤矿和黄陵 1 号煤矿地表均为厚湿陷性黄土层,其他煤矿地表为厚松散层覆盖(实践表明地表为厚湿陷性黄土覆盖的地表损害特征较地表为厚松散层覆盖的地表损害严重)。由于部分矿区位于黄土高原,黄土沟壑区的损害特征较平地的损害特征更为严重,开采沉陷的损害程度与坡体自身的稳定性有必然联系。通过上述分析并结合文献[2]中给出的浅埋煤层的定义与矿压显现特征,可以得出影响生态脆弱区地表开采沉陷损害特征的主要因素为开采深度、开采高度、基岩厚度、载荷层厚度以及坡体自身稳定性。

## 2 开采损害的特征分析

### 2.1 厚松散层薄基岩浅埋煤层矿区

该区域煤层赋存特征具有埋深浅、松散层厚和基岩薄的特点,煤层大规模开采,导致覆岩整体易发生切冒、地表易形成塌陷坑和台阶裂缝。范钢伟等<sup>[6]</sup>以神东矿区为研究对象,按基岩厚度不同划分为 3 种典型的煤层赋存条件:基岩厚度小于 30 m 为 I 类,基岩厚度大于 30 m 且小于 60 m 为 II 类,基岩厚度大于等于 60 m 为 III 类。在该条件下进行煤层开采,覆岩与地表会出现同步垮落现象,但不同典型覆岩类型,其出现的时间不同: I 类煤层垮落发生在初次来压时, II 类煤层垮落发生在第 2 次周期来压时, III 类煤层发生在主关键层破断时。

余学义等<sup>[7-8]</sup>认为关键层对地表切落裂缝破坏起控制作用,基于固支梁和悬臂梁力学模型,提出关键层破断距的简化公式。

$$\begin{cases} L_c = 2l_c + 2x_\beta \\ L_z = 2l_z + 0.5x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L_c$  为关键层初次破断距, m;  $l_c$  为未考虑垫层作用的初次破断距, m;  $x_\beta$  为煤壁与最大弯矩处的距离, m;  $L_z$  为关键层周期破断距, m;  $l_z$  为未考虑垫层作用的周期破断距, m;  $x_1$  为煤壁与最大弯矩处的距离, m。

老顶关键块不出现滑落失稳的最大下沉量的近似表达式为

$$\Delta = l_z \sin \theta_1 \quad (2)$$

式中:  $\theta_1$  为老顶关键块的初始回转角( $\theta_1 < 4^\circ$ ), ( $^\circ$ )。

不同开采条件下允许老顶关键块的下沉量为

$$w = m - [m_f + (K_p - 1)\Sigma h] \quad (3)$$

式中:  $m$  为开采高度;  $m_f$  为采空区有效充填厚度;  $K_p$  为直接顶碎胀系数;  $\Sigma h$  为直接顶厚度。

根据式(3)推导出不同开采条件下不同关键层岩块不产生滑落失稳的极限开采厚度。

### 2.2 黄土沟壑区

黄土沟壑区位于黄土高原,在雨水的冲刷下地表沟壑到处可见。在黄土沟壑区下煤层开采,由于地表植被较差、水土流失严重,易造成坡体发生滑坡、坍塌等灾害。YI 等<sup>[9-11]</sup>认为黄土沟壑区下煤层开采地表损害特征不仅涉及黄土层下煤层开采的地表损害特征,而且需要考虑在沟壑区条件下地表移动变形的附加变形量(即采动引起的滑移量)。沟壑区采动引起的滑移与沟壑区坡体自身的稳定性有着密切联系。刘新喜等<sup>[12]</sup>从开采沉陷滑坡体渗透性、后缘裂缝分布特征等角度对开采沉陷引发黄土层滑坡的影响进行了分析,认为滑坡体稳定性对降雨强度最为敏感,渗透系数次之;同时滑坡体的稳定性与裂缝位置、深度有关。综上所述,坡体的稳定性对研究黄土沟壑区下煤层开采引起的地表损害特征具有重要意义。

黄土沟壑区坡体自身的稳定性系数  $G$  可通过下式进行计算分析:

$$G = \frac{T}{S} = \frac{hr \sin(2\delta_p)}{2[C + hr \cos^2(\delta) \tan \phi]} \quad (4)$$

式中:  $\delta_p$  为坡体的角度, ( $^\circ$ );  $h$  为表土层的厚度, m;  $r$  为土体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $C$  为土体的内聚力, Pa;  $\phi$  为土体的内摩擦角, ( $^\circ$ )。

当  $G \geq 1$  时,坡体自身就不稳定,且  $G$  越大,坡体稳定性越差;当  $0.83 \leq G < 1$  时,坡体自身存在滑坡的可能;当  $G < 0.83$  时,滑坡可能性较小。

与平地相比,采动引起沟壑地表移动变形并增加了由滑动引起的附加量,由此可得沟壑地表条件下地表移动变形的预测公式:

$$\begin{cases} w'(x) = w(x) + \Delta w(x) \\ u'(x) = u(x) + \Delta u(x) \\ \varepsilon'(x) = \varepsilon(x) + \Delta \varepsilon(x) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $w'(x)$ ,  $u'(x)$  和  $\varepsilon'(x)$  分别表示在黄土沟壑地表条件下开采引起的地表下沉、水平移动和水平变形。

影响黄土沟壑区地表移动变形的因素主要通过  $\Delta w(x)$ ,  $\Delta u(x)$  和  $\Delta \varepsilon(x)$  这 3 个指标进行评价,其指标的具体表达式如下:

$$\Delta w(x) = G \times \sin \delta [w(x) \times \sin \delta + u(x) \times \cos \delta_p] \quad (6)$$

$$\Delta u(x) = G \times \cos \delta [w(x) \times \sin \delta + u(x) \times \cos \delta_p] \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon(x) = \varepsilon(x) \times G \times \cos 2\delta + G \cos \delta \times \sin \delta_p \times i(x) \quad (8)$$

式中:  $\Delta w(x)$ ,  $\Delta u(x)$ 和 $\Delta \varepsilon(x)$ 分别为黄土沟壑地表条件下开采引起的地表下沉、水平移动和水平变形引起的附加量。

### 2.3 山区丘陵

山区丘陵地表若沿顺层覆盖黄土, 则基岩的岩面与土层的交界处为一弱面, 该条件下进行煤层开采, 易引起地表山体顶部产生大裂缝。由于土体与岩体的渗透系数存在极大差别, 若遇雨水冲刷, 诱发山体滑坡和坍塌, 易发生泥石流、滑坡等灾害。同时, 当开采强度较大时, 山区岩体也可能产生滑落或崩塌。山区丘陵下煤层开采虽然也涉及坡体自身的稳定性, 但计算分析其稳定性时, 两者存在区别: 前者涉及黄土坡体内部受采动影响产生裂缝的弱面; 后者涉及倾斜岩层与土体交界处的弱面<sup>[13]</sup>。

山区及丘陵地表条件下的采动地表移动变形同样可由水平矿层水平地表的数学模型来预测<sup>[14]</sup>。但当地表坡角较大时, 会引起计算参数的变化。地表坡角的变化等同于开采深度的变化。在近水平地层及近水平矿层条件下, 采动主要影响范围角( $\beta$ )近似于不变, 而随地表坡角的变化会引起主要影响半径的变化, 如图 1~2 所示。开采实践表明: 倾斜地表的水平移动系数  $b_s$  除与覆岩岩性有关外, 还与地表倾角  $\delta$  ( $\varphi$ )及移动方向有关。因此, 当应用概率积分法预计的水平数学模型时, 首先应确定此条件下的主要影响半径  $r(x, y, z)$  和水平移动系数  $b_s$  这 2 个参数。

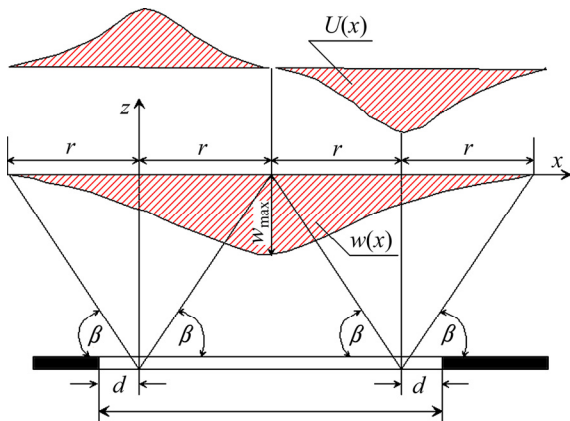


图 1 水平矿层开采引起水平地表移动分布形式  
Fig. 1 Distribution patterns of surface horizontal displacement for horizontal coal seam mining

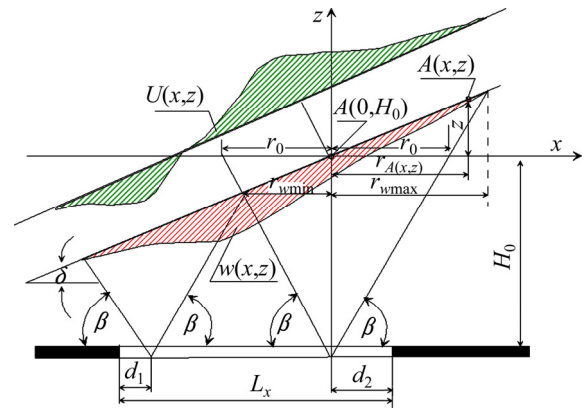
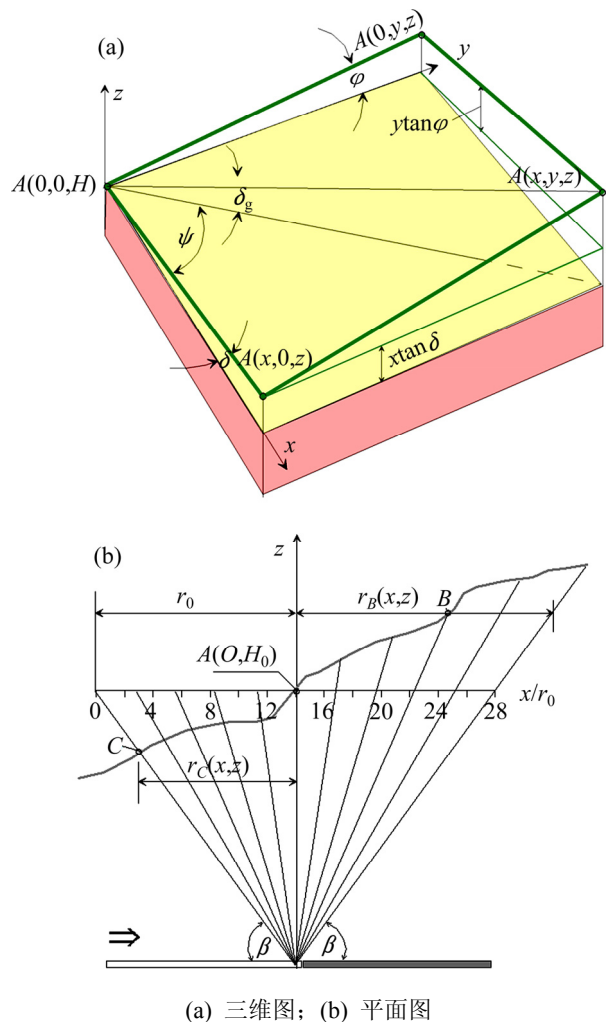


图 2 水平矿层开采引起倾斜地表移动分布形式  
Fig. 2 Distribution patterns of surface inclined displacement for horizontal coal seam mining



(a) 三维图; (b) 平面图  
图 3 山区地表条件下主要影响半径的确定方法  
Fig. 3 Methods to determine the major influencing radius under mountain hills condition

#### 2.3.1 主要影响半径

由图 3(a)可知: 对于倾斜地表任意一点的主要影

响半径  $r(x, y, z)$  为

$$r(x, y, z) = r_0 + \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \tan \delta_g}{\tan \beta} \quad (9)$$

式中:  $r_0$  为主要影响半径, m,  $r_0 = H_0 / \tan \beta$ ;  $\delta_g$  为地表任意点  $A(x, y, z)$  和计算坐标原点连线方向的地表坡角, ( $^\circ$ );  $\beta$  为主要影响范围角, ( $^\circ$ );  $H_0$  为计算坐标原点的埋深, m。

对于平面半无限开采问题, 由解析法分析可得在  $x-z$  平面内的主要影响半径  $r(x, z)$  为

$$r(x, z) = r_0 + x \cdot \frac{\tan \delta}{\tan \beta} \quad (10)$$

式中:  $\delta$  为地表沿  $x$  方向的坡角, ( $^\circ$ )。

同样, 可得在  $y-z$  平面内的主要影响半径  $r(y, z)$  为:

$$r(y, z) = r_0 + y \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad (11)$$

式中:  $\varphi$  为地表沿  $y$  方向的坡角, ( $^\circ$ )。

### 2.3.2 水平移动系数

当地表坡角较大时, 顺坡方向的水平移动量总是大于逆坡方向的水平移动量。有研究表明, 倾斜地表观测成果给出水平移动系数  $b_s$  与地表坡角  $\delta(\varphi)$  间的关系式为

$$b_s = (1 \pm 0.26 \tan \beta / \tan \delta) b \quad (12)$$

或

$$b_s = (1 \pm 0.26 \tan \beta / \tan \varphi) b \quad (13)$$

式中:  $b$  为在水平地表条件下的地表水平移动系数; 顺坡移动时取正值, 逆坡移动时取负值。

由上述分析可知: 倾斜地表下的地表移动变形与水平地表下的地表移动变形相比, 主要是改变了主要影响半径  $r(x, z)$  及水平移动系数  $b_s$ , 因此, 以  $r(x, z)$  代替  $r$ , 由  $b_s$  代替  $b$ , 即可得倾斜地表近水平矿层开采条件下地表移动变形半无限下沉盆地平面问题的预测公式。

## 3 地表开采损害特征形成机理

在生态脆弱区厚松散层(或粉细砂)覆盖下进行煤层开采, 地表裂缝主要产生于由开采作用引起的基岩移动变形<sup>[11, 13]</sup>。由于黄土(或粉细砂)与基岩的力学特性不同, 黄土(或粉细砂)与基岩的交接面在摩擦力的作用下产生集中应力, 进而形成破裂面并沿黄土(或粉细砂)层的垂直裂隙方向发展, 形成地表裂缝。

### 3.1 基采比和基载比与地表裂缝形成的关系

1) 按基载比进行分类。当基载比  $J_z > 0.8$  时, 若  $J_c < 10$ , 则顶板基岩沿全厚切冒, 基岩的破断角较大, 覆岩破断直接波及地表, 地表和顶板有台阶下沉现象, 工作面上方不存在“三带”, 覆岩表现出“三带合一”现象; 若  $10 \leq J_c \leq 25$ , 其矿压显现特征介于浅埋煤层和普通采场之间, 覆岩出现冒落带、裂缝带; 若  $J_c > 25$ , 随着基采比的增加, 覆岩破坏形态由“三带合一”现象逐渐向“三带”(冒落带、裂缝带和弯曲下沉带)型转变。

当基载比  $J_z \leq 0.8$  时, 若  $J_c < 15$ , 覆岩表现出“三带合一”现象; 若  $15 < J_c < 30$ , 则覆岩出现冒落带、裂缝带; 若  $J_c > 30$ , 则工作面开采地表表现为连续变形, 随着基采比的增加, 覆岩破坏形态逐渐转变为“三带”型;

2) 按基采比  $J_c$  进行分类。若基岩较薄、松散层厚度较大, 则当  $J_c < 10$  时覆岩表现出“三带合一”现象; 若覆岩埋深较小, 但基岩厚度较大, 则当  $10 \leq J_c \leq 25$  时覆岩出现冒落带、裂缝带; 当  $J_c > 25$  时, 随着基采比的增加, 覆岩破坏形态表现为“三带”型。 $J_c$  的具体取值取决于  $J_z$  的大小。

### 3.2 采动地表裂缝形成机理

生态脆弱区煤层开采矿压显现的基本特征决定了其覆岩的破坏形态, 以基采比和基载比为关键参数虽然可以判定覆岩破坏形态, 但很难解释在该条件下覆岩破坏形态由“三带合一”逐渐向“三带”型过渡的机理与现象, 因此, 从能量释放的角度来进一步分析其形态转变的机理<sup>[14]</sup>。

1) 当基载比  $J_z$  较小( $J_z < 0.8$ )且  $J_c < 15$  时, 产生“三带合一”现象。从能量释放角度解释该现象: 当基岩厚度较小且开采高度较大时, 覆岩产生的移动变形相对较大, 此时覆岩将积蓄很多能量, 积蓄的能量主要通过覆岩产生的垂直裂缝进行释放。由于覆岩基采比  $J_c$  较小, 在覆岩积蓄的能量没有完全释放之前, 覆岩已被垂直裂缝完全贯穿并发生切冒。由于覆岩发生切冒的时间较短, 且覆岩存在动载现象, 覆岩中积蓄的能量来不及通过岩层间的粘聚力和各岩层的破断逐渐释放, 最终以垂直裂缝的方式直接通过覆岩两端向上发展。

2) 当基载比  $J_z \approx 0.8$  且  $15 \leq J_c \leq 30$  时, 覆岩虽产生“三带合一”现象但未贯穿整个岩体, 可能是因为: 基岩厚度较大, 开采高度相对较小, 覆岩产生的移动变形也相对较小, 在覆岩内部积蓄的能量释放与出现

动载现象时, 垂直裂缝并未完全贯穿岩体, 部分能量通过岩层间的粘聚力和各岩层的水平和垂直裂缝逐渐释放。当其剩余的能量小于覆岩产生破断所需的应变能时, 覆岩中岩层破断停止, 覆岩并未完全切冒, 形成裂缝带。

3) 当基载比  $J_z$  较大 ( $J_z > 0.8$ ) 且  $J_c > 25$  时, 覆岩破坏形态表现为“三带”型。也就是说, 覆岩在移动变形过程中积蓄的能量一部分通过覆岩切冒进行释放, 还有一部分能量经岩层间的粘聚力和各岩层的破断逐渐释放, 当覆岩积蓄的能量释放到一定程度时, 覆岩还存在一部分岩层并未发生破坏, 该部分岩层仅在其剩余能量作用下, 产生一定的位移和形变。覆岩在连续变形带内的移动变形进一步证实了上述观点。

## 4 工程实例

以黄土沟壑区西气东输天然气管道 DD245—DD246 段穿越煤矿采空区<sup>[15]</sup>为例, 该煤矿煤层埋深为 194 m, 土层厚度约为 150 m, 开采高度为 1.4 m, 工作面走向长约为 800 m, 倾斜长为 200 m, 倾角为  $1^\circ \sim 3^\circ$ , 采用全部垮落法管理顶板。工作面推进方向与管线延伸方向基本平行, 且管线距开采边界向外约 45 m。

覆岩岩性类型为中硬偏软型。本矿区水平地表的概率积分参数的经验值为: 拐点偏移距  $d=0.05H$ , 下沉系数  $\eta$  为 0.8,  $\tan \beta$  为 2.0,  $b$  为 0.25。

### 4.1 坡体稳定性分析

根据该煤矿相关地质资料, 土层的密度为  $1\ 600\ \text{kg/m}^3$ ; 坡体的角度为  $30^\circ$ , 土体内摩擦角约为  $20^\circ$ , 内聚力为 10 kPa, 代入式(4)可得该区域  $G$  的取值为 1.224(略大于 1.000), 说明该区域坡体自身存在滑坡的可能。现场观测时发现该煤矿曾经发生多次滑坡的迹象, 充分验证了式(4)的可靠性。

### 4.2 覆岩破坏特征分析

基载比  $J_z$  为 0.3, 其值小于 0.8; 基采比  $J_c$  为 31.4, 其值大于 30。按照基采比  $J_c > 30$  判定, 覆岩破坏特征应以典型“三带”特征进行分布, 但由于该处  $J_z$  仅为 0.3, 远小于 0.8, 故覆岩破坏为“三带合一”型。该煤矿煤层开采, 地表出现约 50 cm 的台阶下沉, 水平裂缝最大宽度约为 40 cm。

### 4.3 坡体移动变形计算分析

黄土沟壑区地表移动变形极值的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} w_{\max} &= m\eta \cos a \\ u_{\max} &= b w_{\max} \\ r &= H / \tan \beta \\ i_{\max} &= w_{\max} / r \\ K_{\max} &= \pm 1.52 w_{\max} / r^2 \\ \varepsilon_{\max} &= \pm 1.52 b w_{\max} / r \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中:  $w_{\max}$  为最大下沉值, mm;  $a$  为煤层倾角, ( $^\circ$ );  $u_{\max}$  为最大水平移动值, mm;  $b$  为水平移动系数;  $H$  为平均埋度, m;  $\tan \beta$  为主要影响正切值,  $r$  为主要影响半径, m;  $i_{\max}$  为最大倾斜值, mm/m;  $K_{\max}$  为最大曲率变形,  $10^{-3}/\text{m}$ ;  $\varepsilon_{\max}$  为最大水平变形, mm/m。

将该区域概率积分参数代入式(14)可得黄土沟壑区地表移动变形极值:  $w_{\max}$  为 1 120 mm,  $u_{\max}$  为 280 mm,  $r$  为 97 m,  $i_{\max}$  为 11.55 mm/m,  $K_{\max}$  为  $(\pm)0.181 \times 10^{-3}/\text{m}$ ,  $\varepsilon_{\max}$  为  $(\pm)4.39\ \text{mm/m}$ 。

结合式(6), 可计算出黄土沟壑地表下开采引起的地表移动变形附加量为:  $\Delta w(x)$  为 491 mm,  $\Delta u(x)$  为 851 mm,  $\Delta \varepsilon(x)$  为 8.78 mm/m。

将所得结果代入式(5), 可得沟壑条件下地表移动变形量:  $w'(x)$  为 1 161 mm,  $u'(x)$  为 1 131 mm,  $\varepsilon'(x)$  为 13.17 mm/m。

在倾斜地表移动变形预测<sup>[15]</sup>过程中, 倾斜地表水平移动系数  $b_s$  可按式(12)或式(13)进行求解。由于本坡体为顺坡, 计算时应采用正值, 结合  $\delta=30^\circ$ ,  $\varphi=20^\circ$  和  $b=0.25$ , 可求得顺坡方向最大的水平移动系数  $b_s$  为 0.475, 则地表的水平变形量极值  $\varepsilon_{D\max}$  为 11.99 mm/m。山区地表水平变形计算结果为  $\pm 13.17\ \text{mm/m}$ , 2 个计算结果基本吻合。而且按照沟壑区坡体稳定性计算结果进行预测安全系数较大, 验证了以坡体稳定性计算地表移动变形的可靠性。

图 4~6 所示为研究区域工作面垂直管道 DD245—DD246 段及伴行段的下沉曲线、水平移动曲线和水平变形曲线<sup>[16]</sup>, 其中横坐标 1 000~1 200 m 区域为工作面所处的位置。由图 4~6 可知: 工作面开采造成地表最大下沉量为 1 161 mm, 地表水平移动量为 1 131 mm, 地表水平变形量为 13.17 mm/m。管道附近地表的最大下沉量为 600 mm, 现场实测为 443 mm。由于管道处出现裂缝前地表也产生了一定下沉, 且地表下沉仍在继续, 故预计的下沉量比较可靠。水平移动量为 700 mm, 在进行现场观测前, 管道处附近已产生的最大裂缝宽度为 200~400 mm, 现场监测地表最大的水平移动量为 146 mm, 且地表产生裂缝前也产生了一定的水平移动量, 地表水平移动仍在继续, 故预计的水平移动量相对可靠。地表水平变形量为 13.17 mm/m, 在岬岬部位的地表水平变形量为 6 mm/m。

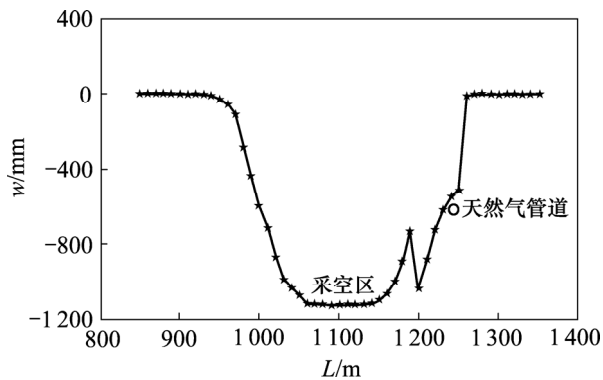


图 4 工作面垂直管道段及伴行段的下沉曲线

Fig. 4 Subsidence isoline of workface along vertical piping section and concomitant section

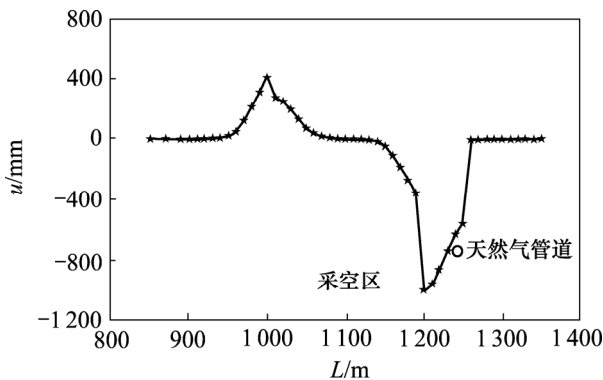


图 5 工作面垂直管道段及伴行段的水平移动曲线

Fig. 5 Horizontal movement isoline of workface along vertical piping section and concomitant section

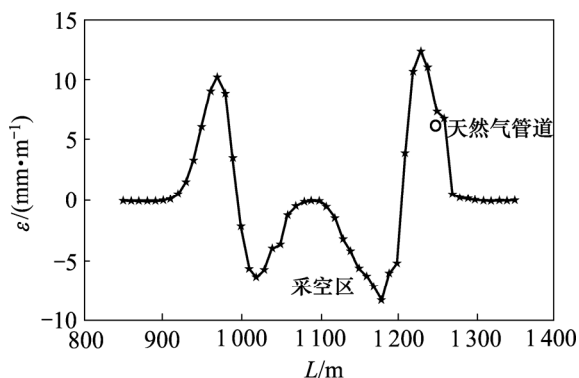


图 6 工作面垂直管道段及伴行段的水平变形曲线

Fig. 6 Horizontal deformation isoline of workface along vertical piping section and concomitant section

应用上述方法研究生态脆弱区黄土沟壑区采动地表损害特征, 所得结果与现场实测结果基本吻合, 为进一步揭示西部生态脆弱区地表开采损害特征提供了依据。

## 5 结论

1) 影响西部生态脆弱区地表开采损害特征的主要因素为基采比、基载比以及坡体自身稳定性。

2) 在分析生态脆弱区地表开采损害特征主要因素的基础上, 分别分析生态脆弱区厚松散层薄基岩、黄土沟壑及山区丘陵下煤层开采地表的损害特征。

3) 以基采比和基载比为关键参数, 揭示生态脆弱区煤层开采损害特征形成的机理, 并通过工程实例验证了以基采比、基载比和坡体稳定性为关键参数进行分析的黄土沟壑区煤层开采损害特征的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 宋世杰. 基于关键地矿因子的开采沉陷分层传递预计方法研究[D]. 西安: 西安科技大学地质与环境学院, 2013: 28-41.  
SONG Shijie. Study on the stratification transfer prediction method of the mining subsidence based on the key geological and mining factors[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology. College of Geology and Environment, 2013: 28-41.
- [2] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1174-1177.  
HUANG Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1174-1177.
- [3] 黄乐亭. 采场覆岩两带高度与覆岩硬度的函数关系[J]. 矿山测量, 1999(1): 20-22.  
HUANG Leting. The functional relationship of two-zones height of overlying strata and hardness of overlying strata[J]. Mine Surveying, 1999(1): 20-22.
- [4] 于广明, 裴亮, 赵广东. 矿山开采非线性沉陷学说初论[J]. 中国安全科学学报, 1998, 5(8): 6-9.  
YU Guangming, PEI Liang, ZHAO Guangdong. Preliminary discussion on non-linear subsidence in mining[J]. China Safety Science Journal, 1998, 5(8): 6-9.
- [5] 李伟. 神府矿区开采损害分析及生态重建模式研究[D]. 西安: 西安科技大学能源学院, 2008: 1-8.  
LI Wei. Study on mining damage analysis and ecological reconstruction mode in Shenfu Mining Area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology. School of Energy, 2008: 1-8.
- [6] 范钢伟, 张东升, 马立强. 神东矿区浅埋煤层开采覆岩移动与裂隙分布特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 196-201.

- FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, MA Liqiang. Overburden movement and fracture distribution induced by longwall mining of the shallow coal seam in the Shendong coalfield[J]. Journal China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 196-201.
- [7] 余学义, 黄森林. 浅埋煤层覆岩切落裂缝破坏及控制方法分析[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(2): 18-21.
- YU Xueyi, HUANG Senlin. Analyzing falling crack failure of overburden strata of shallow coal seam and its control method[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(2): 18-21.
- [8] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 28-31.
- HUANG Qingxiang. Research of roof structure and strata control of longwall mining in shallow buried coal seam[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2000: 28-31.
- [9] YI Luo. US Longwall Mining and subsidence research[R]. Morgantown: West Virginia University, 2011: 106-125.
- [10] 赵兵朝, 余学义, 温强, 等. 油气管道穿越黄土沟壑采空区风险性评价分析[J]. 煤矿安全, 2013, 44(9): 211-213.
- ZHAO Bingchao, YU Xueyi, WEN Qiang, et al. Risk assessment analysis of oil and gas pipelines traversing gob in loess gully region[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(9): 211-213.
- [11] 余学义, 李邦邦, 李瑞斌, 等. 西部巨厚湿陷性黄土层开采损害程度分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 43-47.
- YU Xueyi, LI Bangbang, LI Ruibin, et al. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 43-47.
- [12] 刘新喜, 陈向阳. 地下开采沉陷对滑坡灾害的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(12): 3-7.
- LIU Xinxi, CHEN Xiangyang. Effect analysis of underground mining subsidence on landside disasters[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(12): 3-7.
- [13] 周德辉. 山区开采滑坡的成因、机理分析及防治措施[J]. 贵州科学, 1999, 19(3): 208-214.
- ZHOU Dehui. Cause and mechanical analysis of mining landslide in mountain area and its prevention measures[J]. Guizhou Science, 1999, 19(3): 208-214.
- [14] 余学义, 张恩强. 开采损害学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- YU Xueyi, ZHANG Enqiang. Mining damage[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010.
- [15] 赵兵朝. 浅埋煤层条件下基于概率积分法的保水开采识别模式研究[D]. 西安: 西安科技大学能源学院, 2009: 25-28.
- ZHAO Bingchao. Study on discriminating model of water-preserved-mining base on the method of probability and integral on the condition shallow coal seam[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology. School of Energy, 2009: 25-28.
- [16] 赵兵朝. 开采损害预计评价系统[D]. 西安: 西安科技大学能源学院, 2005: 55-62.
- ZHAO Bingchao. The system of prediction evaluation on mining damage[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology. School of Energy, 2005: 55-62.

(编辑 伍锦花)