

浅埋沟壑区塌陷灾害评价研究

余学义, 王琦

(西安科技大学能源学院, 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 西安 710054)

摘要: 在分析陕北浅埋沟壑区特殊地形条件下开采塌陷灾害特征的基础上, 将塌陷灾害划分为崩塌、坍塌、滑坡、台阶裂缝 4 种灾害类型。以陕北矿区冯家塔矿为工程背景, 通过分析灾害形成的基本条件, 应用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 结合试验模拟结果, 建立 AHP 评价模型。根据灾害形成的条件, 提出应用协调开采、局部限高开采、局部充填开采的方法减缓开采塌陷灾害的强度, 为该条件下开采塌陷灾害防治提供了依据。

关键词: 采矿工程; 浅埋煤层; 沟壑区; 塌陷灾害; 灾害防治

中图分类号: TD73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2015)10-1081-07

Study on mining collapse disaster evaluation of shallow mining seam gully region

YU Xueyi, WANG Qi

(Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on analyzing the characteristics of mining collapse disaster in the special terrain condition of shallow mining seam gully region in Northern Shaanxi province, slough disaster is divided into avalanche, collapse, landslide and step crack. Taking Fengjiata Coal Mine in Northern Shaanxi province mining area as the engineering background, through analyzing the basic conditions of slough disaster, and combined with the experimental simulation results, related theory of analytic hierarchy process (AHP) is used to establish AHP evaluating model. It proposed that it should use coordinated mining, local limited height mining, partial backfill mining to slowdown the mining collapse disaster strength according to the disaster formation conditions. The results can provide scientific basis of mining collapse disaster prevention for similar mining conditions.

Key words: mining engineering; shallow seam; gully region; collapse disaster; disaster prevention

0 引言

我国陕北地区蕴藏着大量的煤炭资源, 由于其具有煤层赋存条件良好、埋藏浅、瓦斯浓度低等特点, 大量的高产、高效矿井分布于此^[1-2]。然而, 该地区大部分矿区位于黄土残垣沟壑区, 地形条件复杂, 沟谷纵横。在这种特殊的地质条件下, 大规模的煤炭开采会引起地表沟壑区裂缝、坡体崩塌、滑坡泥石流等, 不仅影响矿井安全生产, 而且容易造成矿区土地及水资源的破坏, 导致生态环境的恶化^[3-5]。因此, 对浅埋沟壑区开采塌陷灾害进行综合评价, 对矿井安全生产、灾害防治及矿区生态环境的保护具有重要科学意义和应用价值。这里以陕北矿区研究现状为基础, 在分析该地区灾害特征的基础上, 应用 AHP

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20106121110003); 陕西省自然科学基金 (2011JY005)

作者简介: 余学义 (1955—), 男, 教授, 主要研究方向: 采动损害、环境防护. E-mail: 15802981705@126.com

相关原理，建立矿区开采塌陷灾害评价模型，并以冯家塔煤矿地质地形条件及地表塌陷现状为背景，结合模拟试验对矿区灾害进行评价。根据评价结果，提出减缓灾害强度的开采方法，为矿区灾害治理及生态环境的保护提供了依据。

1 灾害特征分析

陕北地区大部分矿区属于黄土沟壑区，其地表被第四系松散沉积物覆盖，相对高差大，浅部岩石风化破坏严重，在煤层开采扰动过程中，边坡在坡体自身重力作用下会发生崩塌、滑坡及地表裂缝等各种地质灾害^[6-7]。如陕西榆林矿区在煤炭开采过程中发生顶板大面积垮落灾变，导致地表黄土沟壑区发生大面积滑坡坍塌灾害；府谷冯家塔矿区首采工作面开采冒落带高度直达地表，造成河道严重崩塌堵塞等^[8]。通过对陕北浅埋矿区大量灾害调查分析，可将浅埋沟壑区开采塌陷灾害分为崩塌及坍塌、沟坡滑动和台阶裂缝。

崩塌及坍塌：主要分布于矿区黄土沟壑的支沟及残塬边坡。当边坡坡角较大时，在采动过程中，受开采沉陷剧烈的移动变形影响，同时坡体中会产生大量平行于坡面的节理和卸荷裂隙，随着采动的进行，节理及裂隙会继续发育，当达到一定程度时即导致边坡失稳，发生崩塌、坍塌灾害，同时伴有陡坡位置的大裂缝，随着时间的推移，灾害规模进一步扩大。

沟坡滑动：主要发生于矿区黄土梁饰沟壑区及黄土源边。开采过程中会引起上覆岩层移动破坏，当其破坏裂隙向上发育与地表风化严重的基岩裂隙沟通时，随着采动的进行，裂隙将会直达地表，在坡体自身重力的作用下，将形成平行于边坡走向的块状物向下滑移而形成滑坡灾害。

台阶裂缝：当开采过程中引起沟坡滑动时，将导致坡体裂缝逐渐扩大，一定程度下形成明显的台阶裂缝，如冯家塔矿区工作面开采引起的台阶裂缝最大宽度达 2 m，最大台阶高差达 1 m，与采空区贯通。

2 浅埋沟壑区开采塌陷灾害评价

引起开采塌陷灾害的因素有很多，如煤层埋藏深度及厚度、开采工艺、地表沟壑岩土层结构及形态、沟壑形态等。为对浅埋沟壑区开采塌陷灾害进行全面评价，研究从系统工程角度出发，综合考虑引发开采塌陷灾害的各种因素，在对陕北地区浅埋黄土沟壑区开采塌陷灾害状况调查分析的基础上，应用 AHP 基本原理^[9-10]，构建开采塌陷灾害评价 AHP 模型，模型中确定塌陷灾害状况为总目标层，导致塌陷灾害的一级评价指标为 4 个，每个一级指标下面又分别设二级指标，如图 1 所示。

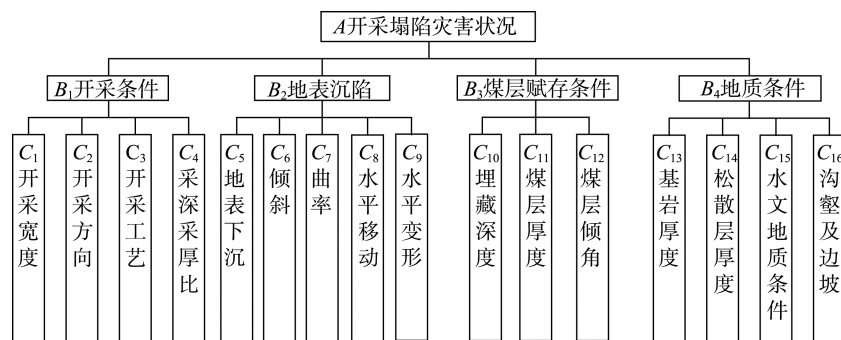


图 1 开采塌陷灾害评价模型

Fig. 1 Mining collapse disaster evaluation model

开采条件：主要指不同矿区具体的开采宽度、开采方向、开采工艺、采深采厚比。

地表沉陷：主要指黄土沟壑区地表移动变形参数，包括地表下沉、倾斜、曲率、水平移动、水平变形。

煤层赋存条件：主要包括煤层埋藏深度、煤层厚度、煤层倾角。

地质条件：主要包括基岩厚度、松散层厚度、水文地质条件、沟壑及边坡。

3 实例分析

根据上述开采灾害评价体系，以陕北神府矿区冯家塔煤矿为评价对象，对该矿开采塌陷灾害进行详细评价。

冯家塔煤矿位于陕北黄土高原北部，所采煤层为近距离煤层群，可采煤层为 2[#]煤层及 4[#]煤层。其中，2[#]煤层平均厚度为 3.08 m，4[#]煤层平均厚度为 4.22 m，2[#]煤层与 4[#]煤层间距约 16 m；2[#]煤层埋深 10~210 m，平均 125 m，对应地表为一条南北走向的冲沟。地表沟壑两侧山坡陡峭，一水平首采面 1201 工作面首先开采浅部的 2[#]煤层，其中距切眼 690 m 处地表为冲沟沟壑，埋深最浅，约 10 m。

3.1 数值模拟分析

结合冯家塔煤矿实际工程地质条件，应用 FLAC3D 软件进行数值模拟，模拟 1201 工作面开采过程中地表移动变性规律。模型以该矿地表自然坡体为原型，工作面推进方向沿 y 轴正方向，采用 Mohr-Coulomb 本构模型，x 方向长度 600 m，y 方向长度 400 m。模型两侧限制水平移动，底部限制垂直移动，坡面为自由边界。各岩层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩层物理力学参数表
Tab. 1 Physical and mechanic parameters of stratum

岩石名称	容重/(kg·m ⁻³)	内聚力/MPa	内摩擦角/°	单轴抗拉强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa
黄土	2 310	0.019	14.00	0.018	0.20	0.01
中砂岩	2 510	14.300	35.70	0.640	0.20	10.40
泥质粉砂岩	2 540	16.200	42.00	1.120	0.24	10.95
细砂岩	2 600	15.200	35.00	1.080	0.19	10.90
粗砂岩	2 570	15.300	32.10	1.090	0.19	10.92
煤层	1 310	1.300	28.00	0.800	0.36	0.96
粉砂岩	2 510	14.300	36.00	0.570	0.20	10.41

图 2 和图 3 分别为在一定开采条件下 1102 工作面开采完毕后地表坡体垂直及水平移动云图，可以看出，当工作面开采完毕后，整个坡体出现不同程度的移动变形，坡体破坏比较严重，左侧坡体高于沟壑约 50 m 处垂直下沉值较大，约为 4 m，说明此处坡体严重破坏，极易发生崩塌、坍塌等灾害；右侧坡体高于沟壑约 30 m 处水平移动值高达 1.23 m，说明此处坡体受采动影响严重，坡体稳定结构受到严重破坏，易发生滑坡等地质灾害。

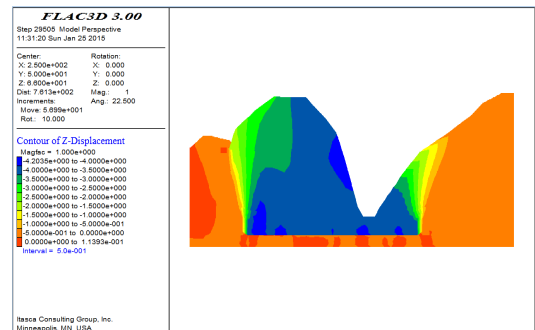


图 2 地表垂直位移云图

Fig. 2 Vertical displacement contour of surface

3.2 构建判断矩阵与一致性检验

利用1~9标度法(如表2所示)进行比较,同时结合专家意见,确定各因素的相对重要性并赋相对数值,在此基础上构造各层次中的判断矩阵,计算权向量,并进行一致性检验。

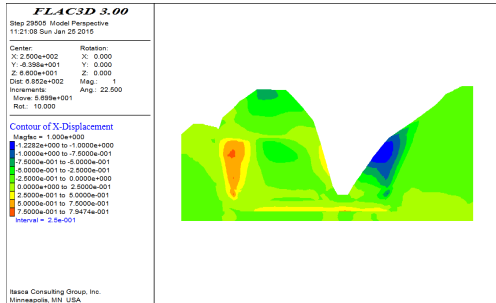


图3 采动地表水平位移云图

Fig. 3 Horizontal displacement contour of surface

表2 1~9 标度含义

Tab. 2 1-9 scale meaning

重要性标度	含义
1	表示2个元素同等重要
3	表示2个元素中前者比后者稍微重要
5	表示2个元素中前者比后者重要
7	表示2个元素中前者比后者明显地重要
9	表示2个元素中前者比后者绝对地重要
2, 4, 6, 8	两判断级之间的中间值
倒数	两判断级重要性之比的倒数

A-B 之间的判断矩阵为

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
B ₁	1	2	3	2
B ₂	1/2	1	2	1
B ₃	1/3	1/2	1	1/2
B ₄	1/2	1	2	1

经计算,其特征向量 $W = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.424, 0.227, 0.122, 0.227)$, $\lambda_{\max} = 4.0104$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.0104 - 4}{4 - 1} = 0.003467$,查表得 $RI = 0.89$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.003895 < 0.1$. 其中, λ_{\max} 为最大特征值; CI 为一致性指标; RI 为平均随机一致性指标; CR 为随机一致性比率。由此可知,该判断矩阵的一致性可以接受。

B₁-C 之间的判断矩阵为

B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	1	2/3	1/3	1/2
C ₂	3/2	1	1/2	3/4
C ₃	3	2	1	3/2
C ₄	2	4/3	2/3	1

经计算,其特征向量 $W = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.133, 0.200, 0.400, 0.267)$, $\lambda_{\max} = 4.0000$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.0000 - 4}{4 - 1} = 0$,查表得 $RI = 0.89$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0 < 0.1$,由此可知,该判断矩阵的一致性可以接受。

B₃-C 之间的判断矩阵为

B_3	C_{10}	C_{11}	C_{12}
C_{10}	1	2/3	2
C_{11}	3/2	1	3
C_{12}	1/2	1/3	1

该矩阵的特征向量 $W=(w_1, w_2, w_3)=(0.333, 0.500, 0.167)$, $\lambda_{max}=3$, $CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}=\frac{3-3}{3-1}=0$, 查表得 $RI=$

0.58 , $CR=\frac{CI}{RI}=0 < 0.1$, 由此可知, 该判断矩阵的一致性可以接受。

B_4 - C 之间的判断矩阵为

B_4	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
C_{13}	1	3/2	2	1/2
C_{14}	2/3	1	4/3	1/3
C_{15}	1/2	3/4	1	1/3
C_{16}	2	3	3	1

经计算, 该矩阵特征向量为 $W=(w_1, w_2, w_3, w_4)=(0.243, 0.173, 0.131, 0.453)$, $\lambda_{max}=4.010 2$, $CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}=\frac{4.010 2-4}{4-1}=0.003 400$, 查表得 $RI=0.89$, $CR=\frac{CI}{RI}=0.003 820 < 0.1$, 由此可知, 该判断矩阵的一致性可以接受。

对影响开采的塌陷灾害进一步总体排序, 如表 3 所示。

进一步对总排序结果进行一致性检验, 可得

$$CR = \frac{0.424 \times 0 + 0.227 \times 0.002 55 + 0.122 \times 0 + 0.003 4 \times 0.227}{0.424 \times 0.89 + 0.227 \times 1.12 + 0.122 \times 0.58 + 0.227 \times 0.89} = 0.001 431 < 0.1$$

总排序的一致性可以接受, 因此用 AHP 评价影响浅埋黄土沟壑区开采塌陷灾害的各因素, 进而确定各影响因素的相对重要程度是可行的。

3.3 结果分析

由上述分析可知, 影响浅埋沟壑区开采塌陷灾害的首要因素是开采条件, 其次是地表沉陷及地质条件, 煤层赋存条件影响最小。此外, 通过各项指标权重可以看出, 开采工艺、采深采厚比、地表黄土沟壑及边坡是影响浅埋沟壑区开采塌陷灾害的主要因素(如表 3 所示)。开采方向、煤层厚度及地表水平移动等因素对塌陷灾害也有较大影响, 由于地表倾斜、曲率等因素主要受开采工艺及采高等因素的影响, 因此对地表塌陷灾害影响较小。

3.4 减灾措施

由上述分析可知, 为有效减缓浅埋沟壑区开采塌陷灾害情况, 应从有效改变开采工艺、采深采厚比和改善沟壑及边坡条件等方面入手, 工程实例和试验研究表明, 在一定条件下, 有效改变开采工艺和采深采厚比对减缓开采塌陷灾害有很大作用, 具体包括以下措施。

1) 协调开采。根据沟壑区域的地表地质特性,在开采过程中通过合理布置开采方向、开采高度、开采顺序、开切眼的位置及开采时间间隔等,有效降低上位岩层导水裂隙带发育高度及地表裂缝的破坏程度,同时通过协调开采可有效减小地表沟壑及边坡的拉伸破坏,降低开采塌陷灾害的严重程度。冯家塔矿采用调整各工作面开采时间,避开开采后2~3个月的塌陷剧烈期,使上覆岩层及坡体充分移动,进而进行坡体及沟壑治理,有效降低了相邻工作面开采对坡体及沟道的破坏程度。

2) 局部限高开采。根据浅埋沟壑区开采地表沉陷规律,同时结合矿区地质条件,在开采过程中通过地表主要沟壑区域时,通过有效控制采高及推进速度,最大程度降低导水裂隙带发育高度及地表裂缝宽度,以防止雨水及河流等地表水贯通工作面及边坡发生崩塌、滑坡现象。

3) 局部充填开采。当采高较小,或覆岩中具有含水层时,可采用局部充填的方法进行开采,根据煤层上覆岩层的结构和地表沟壑及边坡结构对采空区的局部或冒落区及离层区进行充填,通过充填物和上覆关键层共同控制地表开采沉陷,以有效减小导水裂隙带发育高度和地表移动变形,同时达到保水开采的目的。

表 3 开采塌陷灾害评价指标体系及权重
Tab. 3 Evaluation index system and weight of mining collapse disaster

一级指标	二级指标	指标权重	
		二级	一级
开采条件	开采宽度	0.056 4	0.424
	开采方向	0.084 8	
	开采工艺	0.169 6	
	采深采厚比	0.113 2	
	地表沉陷	0.037 0	
地表下沉	0.025 2		
倾斜	0.025 2		
煤层赋存条件	曲率	0.036 3	0.122
	水平移动	0.073 8	
	水平变形	0.054 7	
	埋藏深度	0.040 6	
	埋藏厚度	0.061 0	
地质条件	煤层倾角	0.020 4	0.227
	基岩厚度	0.055 2	
	松散层厚度	0.030 2	
	水文地质条件	0.030 2	
	沟壑及边坡	0.102 8	

4 结论

1) 陕北浅埋黄土沟壑区开采塌陷灾害主要分为崩塌及坍塌、沟坡滑动和台阶裂缝。

2) 应用 AHP 相关理论建立了浅埋沟壑区开采塌陷灾害评价体系,以冯家塔矿为评价对象,得出开采工艺、采深采厚比、地表黄土沟壑及边坡是影响浅埋沟壑区开采塌陷灾害的主要因素。

3) 通过分析地表塌陷灾害的影响因素,提出了应用协调开采、局部限高开采、局部充填开采的方法,可有效减缓开采塌陷灾害的强度。

[参考文献] (References)

- [1] 朱训. 中国能源资源形势与战略对策[J]. 中国矿业, 2005, 14 (1): 1-6.
ZHU X. The resource situation and strategical countermeasures of China's energy resources[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 钱鸣高, 许家林. 煤炭工业发展面临几个问题的讨论[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23 (2): 127-132.
QIAN M G, XU J L. Discussion of several issues concerning the development of coal industry in China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 127-132. (in Chinese)
- [3] 余学义, 邱有鑫. 沟壑切割浅埋区塌陷灾害形成机理分析[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32 (3): 269-274.
YU X Y, QIU Y X. Analysis of subsidence status formation mechanisms in shallow mining seam of ravine cutting area[J].

- Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2012, 32(3): 269-274. (in Chinese)
- [4] 吕义清. 煤矿开采诱发的地质灾害特征分析——以太原西山矿区为例[J]. 地球科学进展, 2004, 19(增): 254-257.
LÜ Y Q. The geo-hazard feature analysis caused by coalmining: taking the mining area of Xishan in Taiyuan as an example[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(Suppl.): 254-257. (in Chinese)
- [5] 余学义, 张恩强. 开采损害学[M]. 2版. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
YU X Y, ZHANG E Q. Mining damage[M]. 2nd ed. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [6] 邱有鑫. 沟壑切割浅埋开采塌陷灾害形成机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
QIU Y X. Research of disaster formation mechanism caused by mining subsidence in shallow mining seam of gully cutting area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] 张平. 黄土沟壑区采动地表沉降破坏规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
ZHANG P. Research on rules of mining surface subsidence and damage in loess gully region[D]. Xi'an: Xi'an University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
GUO J Y, ZHANG Z B, SUN Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153. (in Chinese)
- [9] CELIK M, ER I D, OZOK A F. Application of fuzzy extended AHP methodology on shipping registry selection: the case of Turkish maritime industry[J]. Expert Systems with Application, 2009, 36(1): 190-198.
- [10] 叶珍. 基于 AHP 的模糊综合评价方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
YE Z. Study and application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)