

UDEC 软件对矿山采空区崩塌过程进行应力分布的研究

李小玲¹, 胡才源¹, 孙全福¹, 张忠¹

(贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550081)

[摘要] 为了研究矿山采空区坡体的应力(裂隙)分布情况, 并对崩塌过程分析进行检验, 本文采用离散元数值软件(UDEC)对纳雍县张家湾镇普洒煤矿采煤过程中覆岩裂隙发生、发展及其变化过程进行模拟。结果表明: 随着煤层开采的推进, 覆岩裂隙向上发展且密度逐渐增多; 由于采空区范围过大时, 部分被重新压实, 裂隙发育至地表形成开切眼; 最后在外力作用下整条裂缝垂直贯通, 形成危岩体的发展规律, 可为类似的矿山地质灾害防治提供基础依据。

[关键词] UDEC; 采空区; 应力分布; 发展规律

[中图分类号] P642.26 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2019)-03-0254-06

1 引言

矿山采空区指采矿活动中随矿石开采留下的可能诱发矿石灾害的空间(马海涛等 2014)。20世纪以来, 随着西部经济建设的全面发展, 人们对能源的需求量不断递增, 全国采煤采矿规模和范围不断扩大, 地下采空破坏了原有坡体的地质内部构造体系, 改变了内部应力平衡体系, 致使上覆岩层强烈变形, 大型崩塌地质灾害频发, 给山区居民人身财产安全和国家重大工程安全带来巨大损失(黄润秋 2007; 刘传正 2009)。1980年6月3日, 湖北远安盐池河磷矿崩塌, 致5层大楼倒塌被埋, 284人死亡, 表明地下采矿是该特大事件不可忽视的主要影响因素(连志鹏等 2013); 2004年12月3日3时40分, 贵州纳雍县鬃岭镇左家莹村岩脚寨后山发生崩塌, 造成39人死亡, 5人下落不明, 13人受伤, 除了不利的地质条件、降雨、风化等因素外, 地下深部煤炭开采起到触发作用(刘传正等 2004); 2009年6月5日15时重庆市武隆县铁矿乡鸡冠岭发生崩塌, 造成10人死亡, 64人失踪, 8人受伤, 其主要原因是地下铁矿大面积采空

(刘传正 2010); 2017年8月28日10时30分, 纳雍县张家湾镇普洒煤矿后山发生高位崩塌, 导致35人被埋, 长期的地下采煤活动改变了山体的应力场和形变场, 在降雨作用下整体失稳(郑光等 2018)。由此可见, 采矿活动形成的采空区对孕育地质灾害有相当大的影响。

随着国内外众多学者的深入研究, 物理模型和数值模拟实验研究在地下采矿改变坡体应力分布的研究得到越来越广泛的应用(李腾飞等 2011)。朱要强通过物理模型试验对贵州大方县云龙山煤矿采空区灾害点变形特征及其孕育演化过程进行了研究; Boris Benko 分别采用有限差分软件(FLAC2D)和离散元软件(UDEC)对加拿大Frank滑坡失稳从不同开采深度、开采方式、开采位置及岩层结构等因素进行了模拟和分析(Boris Benko 1997)。两者相比较, 数值模拟的过程中可进行较多的简化, 在一定程度上可反应灾害失稳的趋向性认识。而离散元(UDEC, universal distinct element code)是数值模拟中的一种, 在静载或动载作用下非连续介质的力学变化情况下, 模拟非连续介质的二维数值计算程序, 主要应用于煤层开采后出现的覆岩破碎、断裂、离层等现象

[收稿日期] 2018-09-25 **[修回日期]** 2019-06-20

[基金项目] 《贵州省山地地质灾害防治工程技术研究中心》(黔科合平台人才[2017]5402), 《贵州岩溶山区崩滑灾害成灾机理与早期识别》(黔科合支撑[2017]2814)。

[作者简介] 李小玲(1986—), 女, 硕士研究生, 工程师, 长期从事地质灾害研究及防治。E-mail: 397470750@qq.com

作为离散单元进行处理,目前,在矿山岩体力学和矿山压力研究中有较广泛的应用(郭春颖等2010)。

因此,本文将采用离散元数值计算程序UDEC4.0,分析纳雍县张家湾镇普洒煤矿采煤过程中坡体的应力分布情况,以及对崩塌过程分析的检验,得出模拟区覆岩裂隙发展规律,为类似的矿山地质灾害防治提供基础依据。

2 地质环境条件及地下开采情况

纳雍张家湾镇普洒崩塌地质灾害上陡下缓,

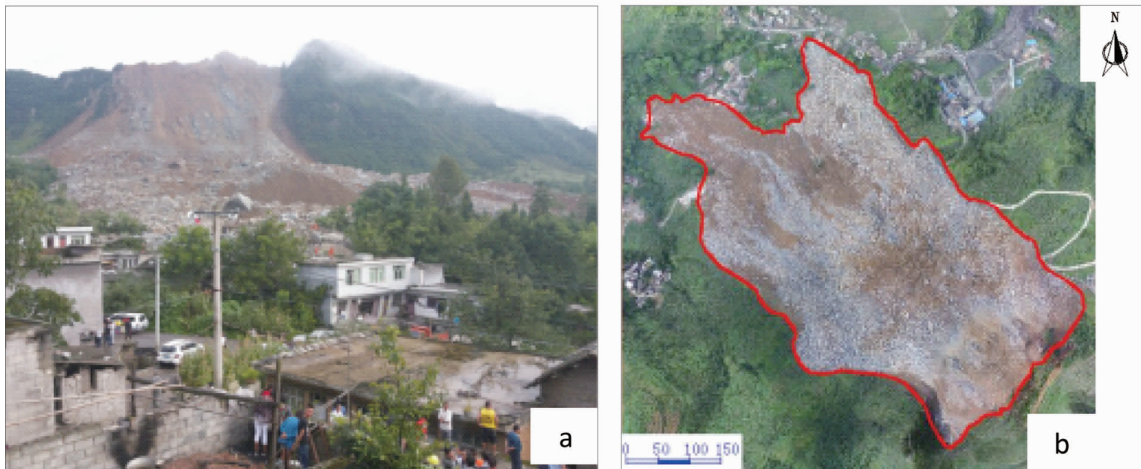


图1 崩塌立面平面影像图

Fig. 1 Flat image of collapsed facade

a—崩塌立面照片;b—崩塌平面影像

根据普洒煤矿2012年7月20日提交的《纳雍县普洒煤矿安全技术发展规划》,该区域含煤层约50层,主要可采煤层6层(M6、M10、M14、M16、M18、M20),局部可采1层,总厚度18.65~41.42 m,平均31.76 m。开采方式为斜井开采,主斜井为皮带运输兼进风,副斜井为辅助提升兼回风,矿井采用走向长壁后退式采煤方法,全部垮落法管理顶板,采煤工作面采用单体液压支柱放顶煤开采工艺。根据《贵州省纳雍县张家湾镇普洒煤矿井上井下对照图》分析M16工作面位于崩塌体下部,见图2,厚0.76~2.04 m,平均厚度1.48 m,该煤层顶板为粉砂岩、细砂岩,底板为泥质粉砂岩,2017年7月30日至8月20日形成采空区。

3 崩塌过程分析

根据欧阳刚等勘查设计资料和国土监测数

据,该危岩带自2009年以来坡面间断出现零星掉块,大规模崩塌发生期间,采用了无人机监测,记录了崩塌发生的完整过程,结合区域地层岩性结构,将本次灾害崩塌过程总结为四个阶段。

据,该危岩带自2009年以来坡面间断出现零星掉块,大规模崩塌发生期间,采用了无人机监测,记录了崩塌发生的完整过程,结合区域地层岩性结构,将本次灾害崩塌过程总结为四个阶段。

3.1 脆弱块体孕育阶段

属造山运动形成高陡斜坡体后,在自身重力、临空卸荷、气候条件、采煤活动、植物根劈作用下,早期完整的岩土结构体被破坏,岩体节理裂隙发育、岩土体破碎、斜坡边缘出现多条拉伸裂缝(郑光等2018)(图3a),此阶段经历时间最长。

3.2 边缘块体掉块阶段

崩塌物源区平面上形成“凸”形斜坡,沿“凸”形斜坡的垂直坡向两侧受两面临空和两组节理裂隙切割,出现掉块(图3b)。这一阶段体现了格里菲斯强度理论,岩体强度受裂纹尖端附近集中

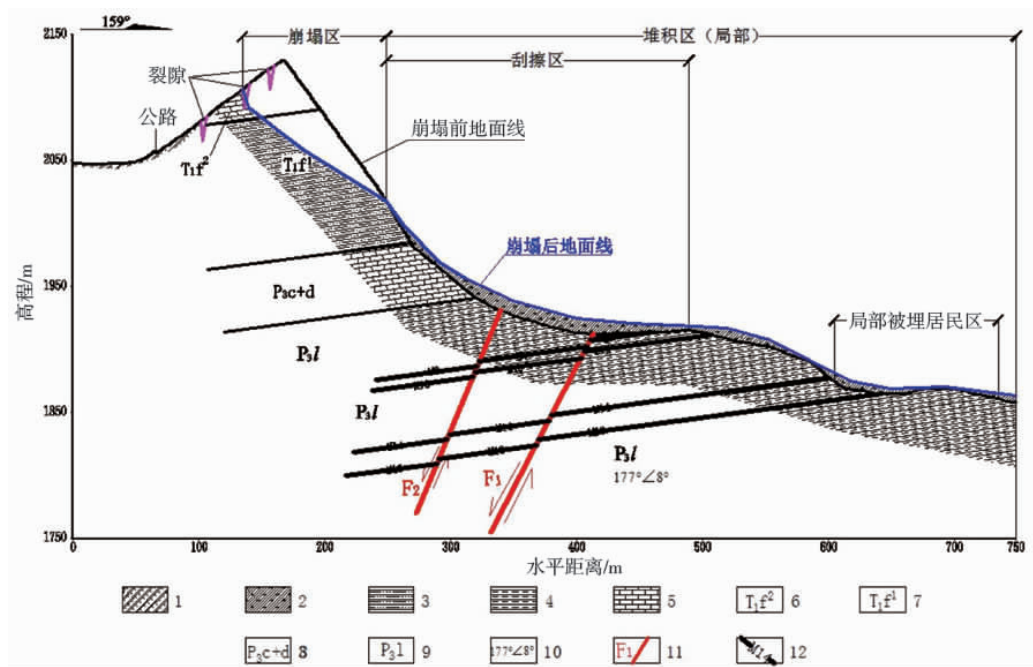


图2 崩塌地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of collapse

1—第四系耕植土;2—第四系堆积土;3—泥质粉砂岩;4—泥岩;5—灰岩;6—三叠系下统飞仙关组第二段;7—三叠系飞仙关组第一段;
8—二叠系上统长兴组、大隆组;9—二叠系上统龙潭组;10—岩层产状;11—断层;12—煤层

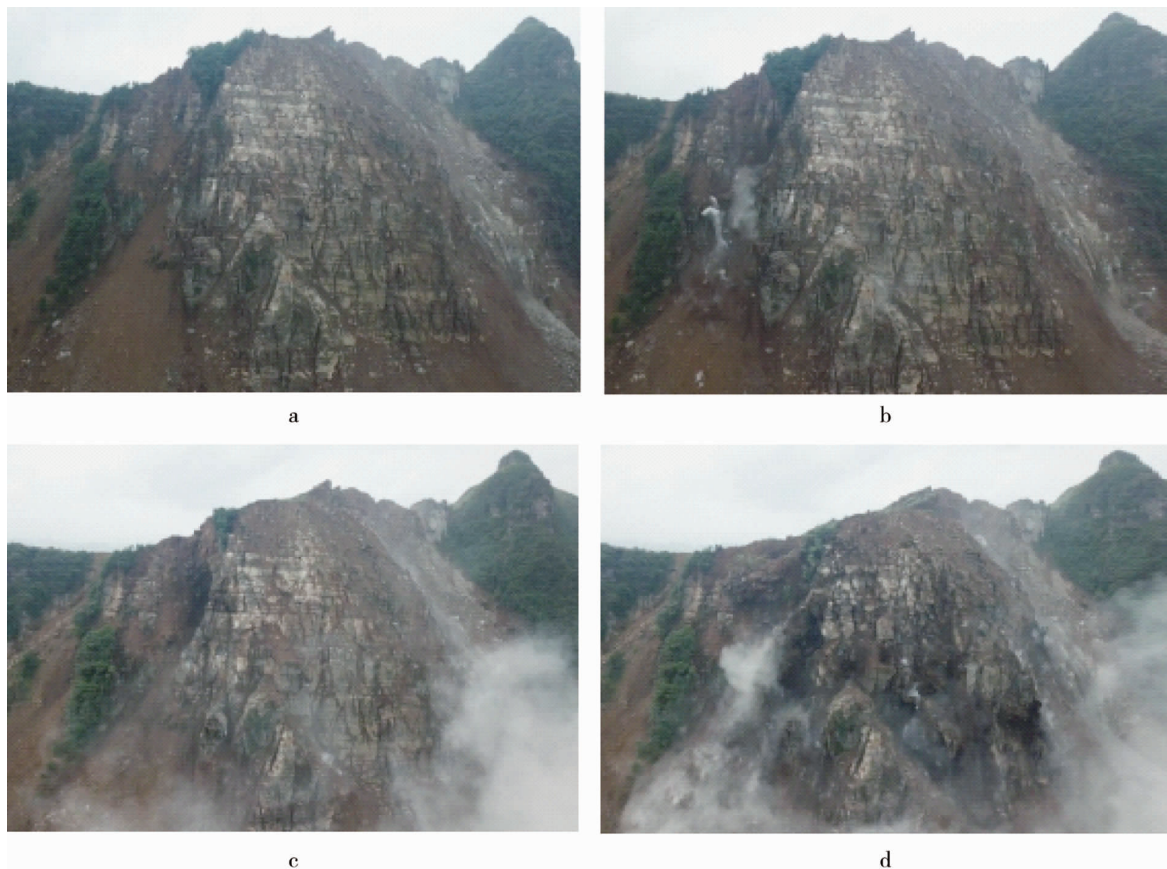


图3 无人机拍摄崩塌失稳过程影像截图

Fig. 3 Screenshot of collapse instability process shot by unmanned aerial vehicle

a—基准0s;b—24秒;c—4分57秒;d—5分6秒

后的应力大小控制,超出抗拉强度即引起拉裂破坏(肖庆生等 1981;侯忠杰等 1987)。由于经常性的发生零星掉块,坡脚下的当地居民对地质灾害意识淡薄,监测人员监测不到位,预报不及时,导致重大地质灾害的发生。

3.3 裂缝贯通应力集中阶段

随着两侧掉块的加剧,逐步向腹部移动,与早期形成的裂缝相连接,致使在“凸”形斜坡体发生卸荷破坏,此阶段持续约 4 分 33 秒(图 3c),可为受威胁人员的撤离提供充足的时间。采空区的形成导致山体原岩应力平衡状态受到破坏,山体内部应力重新分布,以致山体顶部早期出现相当长的裂缝,为后期与山体腹部的贯通提供条件。

3.4 倾倒入崩塌阶段

据现场调查核实,由于普洒煤矿的采煤活动,裂缝贯通后,顶部至腹部岩土体垂直应力卸荷,挤压“凸”形山体快速溃崩而下,而此阶段只经历约 9 秒(图 3d)。

4 离散元 UDEC 数值模型

4.1 概念模型

离散元 UDEC 是由美国学者 Cundall P. A (Cundall P. A 等 1971;沈宝堂等 1989;郝志勇等 2007)于 1971 年提出的一种专门应用于解决非连续介质问题的有效方法,主要模拟如岩体中节理裂隙等非连续介质在静载或动载作用下的力学特征,节理作为边界条件,允许块体在不连续面发生位移和转动,块体可以是刚体也可以是变形体。变形块体再被细分为有限单元网格,且每一单元根据给定的“应力-应变”准则,表现为线性或非线性特性。在离散元中有丰富的材料特性模型,用来模拟不连续地质界面可能显现的典型特性,在矿山岩体力学研究中已有广泛应用,因此,模拟煤层开采过程覆岩应力分布情况是适用的。

4.2 建立 UDEC 模型

4.2.1 模型建立

为了全面掌握工作面开采条件下采场周围的活动变形情况,模拟剖面采用图 3 地质剖面建立

二维的 UDEC 数值模型。X 轴方向上的总长度为 400 m(崩塌区和刮擦区),Y 轴方向上的总高程为 352 m,建立 1:20 模型,岩层倾角按 8° 设置,模拟节理裂隙间距 2 m,煤层厚度设为 4 m。

4.2.2 边界条件确定

初步建立模型后,确定计算模型的边界条件:上部边界条件为自由边界,为方便研究,上部边界在自重条件下简化为均布载荷,整体呈弧形分布见(图 4),水平应力斜坡临空面沿着 37° 方向分布,在坡脚以下应力集中(图 5);下部边界条件为 M16 底板,在 X 轴上可以发生位移,Y 轴上为固定铰支座;左侧边界条件至坡顶延伸 50 m,右侧边界条件至居民区,两侧在 Y 轴上可以发生移动,X 轴上为铰支座。为了初步分析煤层开采过程中山

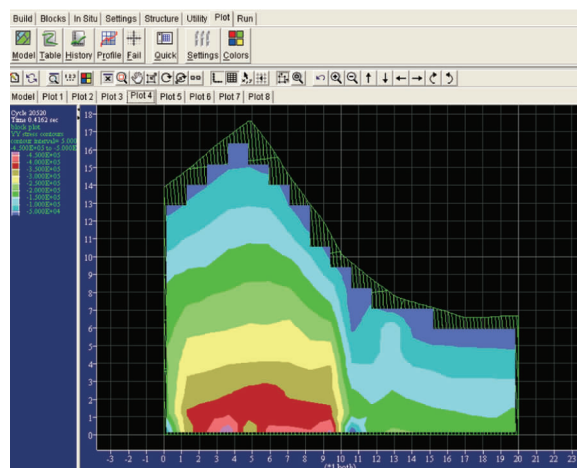


图 4 自重条件下垂直应力分布

Fig. 4 Vertical stress distribution under self-weighting conditions

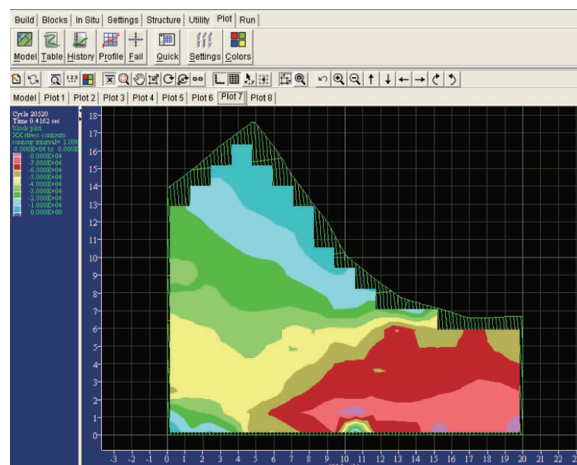


图 5 自重条件下水平应力分布

Fig. 5 Horizontal stress distribution under self-weight conditions

体的应力分布情况,根据问题的需要,简化模型,考虑岩体内部存在天然自重应力、岩层结构的影响,其它因素不考虑。

4.2.3 模型参数的选取

岩体模型采用摩尔-库仑屈服准则(郑颖人等 2002):

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}}$$

式中:σ₂、σ₃—最大和最小主应力(MPa);

C—材料的黏结力(MPa);

φ——材料的内摩擦角(°)。

节理材料模型采用面接触库伦滑移模型。

岩体和结构面参数采用经验值设定,见下表 1 和表 2。

4.3 模拟结果与分析

通过 UDEC 数值模拟软件对普洒煤矿采动中坡体的应力分布情况,以及对崩塌过程分析的检验,选取了有代表性的三处作为说明,如图 6-8,图中覆岩单元呈离散状代表裂隙发育情况。

表 1 岩体特征参数

Table 1 Rock mass characteristic parameters

岩性	质量密度(kg/m ³)	体积模量(Gpa)	剪切模量(Gpa)	内摩擦角(°)	内聚力(Mpa)	张力(Mpa)
灰岩	2 700	6.50	2.76	60	6.72	15.80
泥质粉砂岩	2 510	3.47	2.08	38	2.40	30.00
泥岩	2 461	1.72	1.45	35	1.80	14.40

表 2 结构面特征参数

Table 2 Feature parameters of structural surface

切向强度 (Gpa/m)	剪切刚度 (Gpa/m)	粘结强度 (Mpa)	内摩擦角 (°)
5	5	0.009	10

如图 6,随着煤层由右向左下进行推进,形成采空区的周围岩体在重力作用下发生弯曲,次生裂隙在一定时间内慢慢发展,逐步扩张,即应力发生变化,且由采空区边界向上移动的趋势,应力集中区(红色区域)逐渐释放,直至消失。由于采空区距坡顶较远,从图 7 看出,当煤层向前推进至形成 1/2 的采空区时,受采动的影响,上部边界坡顶处出现开切眼,顶板岩层暴露,高程 2 000 m 以上开始出现离层裂隙和垂直裂隙,且明显看出裂隙多集中在开切眼周围,岩体内部尚未贯通,而斜坡体表面同时存在裂隙,在风化、降雨作用下发生卸荷破坏,此时模型正好说明了研究区坡顶时常发生零星块体掉落的现象。在煤层工作面继续推进过程中,受煤层开采的影响,煤层顶板在主应力和剪应力作用下,不断发生由下而上移动的破坏运动,最后在形成 3/4 采空区的位置与坡顶开切眼形成贯通,如图 8 所示,贯通后的部位形成危岩体,在外力作用下(如降雨、继续采动等)向右水平移动和向下垂直移动,支承压力逐渐减少,直至降为零,最终快速溃崩而下,与实际崩塌灾害发生情况相符。

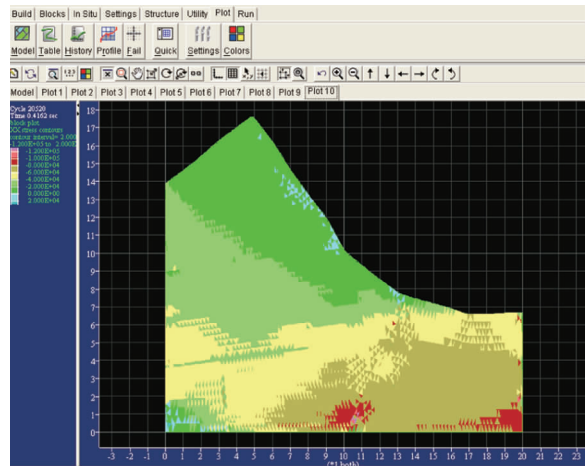


图 6 自然条件下前推应力分布

Fig. 6 Forward stress distribution under natural conditions

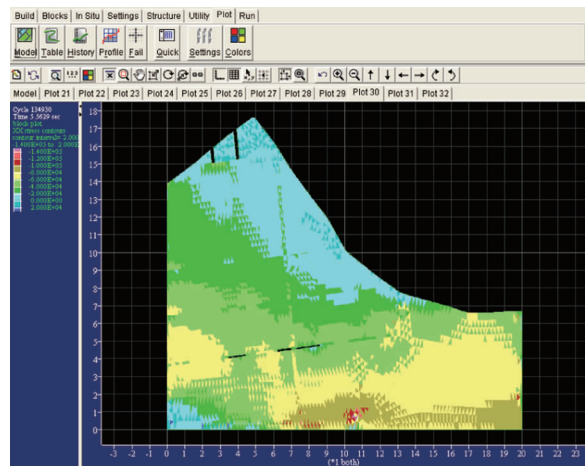


图 7 1/2 采空区前推应力分布

Fig. 7 Forward thrust stress distribution of in the 1/2 goaf area

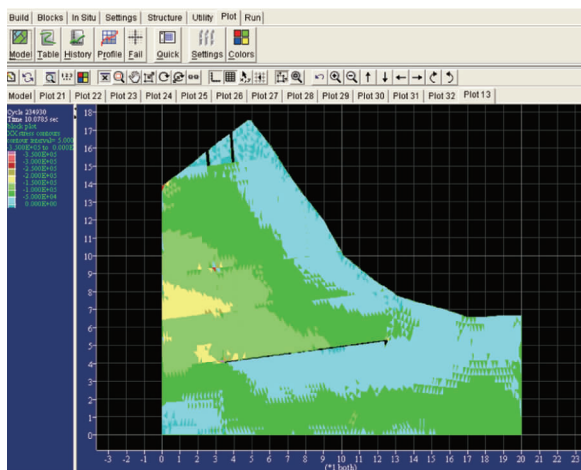


图8 3/4采空区前推应力分布

Fig. 8 Forward thrust stress distribution of in the 3/4 goaf area

在整个数值模拟过程中,可以看出煤层顶板应力分布情况主要体现在裂隙的发生、发展及其变化情况,该过程可分为三个阶段:第一个阶段随着煤层开采的推进,上覆岩层出现次生裂隙,裂隙向上发展且密度不断增加;第二阶段由于采空区范围过大时,部分被重新压实,裂隙发育至地表形成开切眼,此时岩体内部未完全破碎,裂缝未贯通;第三阶段在外力作用下覆岩裂隙进一步发展并开切眼贯通,形成危岩体。

5 结论与认识

(1)通过应用 UDEC 软件对纳雍张家湾镇普洒煤矿开采过程上覆岩层裂隙的发生、发展及其变化情况,可以清楚看到,上覆岩层裂隙发育随开采位置(采空区)的变化而呈阶段性变化。

(2)根据数值模拟结果,结合煤矿开采调绘,分析出上覆岩层裂隙发展规律,为类似的矿山地质灾害防治提供基础依据。

(3)由于采煤形成的采空区是纳雍张家湾镇普洒发生地表开裂直至崩塌的重要原因。此次模型仅考虑了采空区位置与岩层结构的相互作用关系,简化了模型,得出的结论具有一定的趋向性基本认识,存在局限性,因而,在类似方面的研究增加不同的地下开采因素如开采强度、顶板加固措施等因素综合考虑。

[参考文献]

郭春颖,李云龙,刘军柱. 2010. UDEC 在急倾斜特厚煤层开采沉降数值模拟中的应用[J]. 中国矿业,19(4):71-74.

郝志勇,林柏泉,张家山,朱传杰. 2007. 基于 UDEC 的保护层开采中覆岩移动规律的数值模拟与分析[J]. 中国矿业,(07):81-84.

黄润秋. 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,26(3):433-454.

侯忠杰. 1987. 关于格里菲斯强度理论应用中的几个问题的探讨[J]. 阜新矿业学院学报,(03):115-123.

刘传正. 2009. 重大地质灾害防治理论与实践[M]. 北京:科学出版社,287-493.

刘传正. 2010. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J]. 工程地质学报,18(03):297-304.

刘传正,郭强,陈红旗. 2004. 贵州省纳雍县岩脚寨危岩崩塌灾害成因初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,(04):123+144.

李腾飞,李晓,苑伟娜,李守定,赫建明,马超锋,陈雨,王刚. 2011. 地下采矿诱发山体崩滑地质灾害研究现状与展望[J]. 工程地质学报,19(06):831-838.

连志鹏,谭建民,李景富. 2013. 湖北远安盐池河磷矿开采区稳定性评价[J]. 华南地质与矿产,29(01):60-65.

马海涛,刘宁武,王云海,李全东,陈善刚. 2014. 金属矿山采空区灾害防治技术研究综述[J]. 中国安全生产科学技术,10(10):75-80.

欧阳刚,兰中孝. 2009. 纳雍县张家湾镇普洒煤矿崩塌地质灾害治理工程施工图设计[R]. 贵阳:贵州地矿工程勘察总公司.

欧阳刚,王江. 2010. 纳雍县张家湾镇普洒煤矿矿山地质环境保护与治理恢复方案[R]. 贵阳:贵州地矿工程勘察总公司.

彭双麒,许强,郑光,巨袁臻,周小棚. 2018. 碎屑流堆积物粒度分布与运动特性的关系——以贵州纳雍普洒村崩塌为例[J]. 水文地质工程地质,45(04):129-136.

沈宝堂,王泳嘉. 1989. 边坡破坏机制的离散单元法研究[J]. 东北工学院学报,10(4):349-354.

索永录,刘建都,周麟晨,等. 2014. 极近距离煤层群开采区段煤柱合理宽度的研究[J]. 煤炭工程,46(11):8-10+14.

沈华章,郭明伟,王水林,等. 2016. 基于离散元的边坡矢量和稳定分析方法研究[J]. 岩土力学,37(02):592-600.

肖庆生,张汉兴. 1981. 格里菲斯强度理论在岩体力学中的应用[J]. 阜新矿业学院学报,(01):16-31.

肖锐铨,陈红旗,冷洋洋,等. 2018. 贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探[J]. 中国地质灾害与防治学报,29(01):3-9.

赵坚,陈寿根,蔡军刚,等. 2002. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报,(02):4-8.

郑颖人,沈珠江,龚晓南. 2002. 岩土塑性力学原理,北京:中国建筑工业出版社.

郑光,许强,巨袁臻,等. 2018. 2017 年 8 月 28 日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报,26(01):223-240.

朱要强. 2014. 煤矿采空区不稳定斜坡变形机理研究[J]. 工程勘察,42(10):9-14.

Boris Benko. 1997. Numerical Modelling of Complex Slope Deformations. The Doctor Degree Dissertation of Department of Geological Science, University of Saskatchewan.

Cundall P A, et. 1971. Proc Symp Rock Fracture (ISRM). Nancy, II-8.

Research on Stress Distribution in Collapse Process of Mine Goaf by UDEC Software

LI Xiao-ling, HU Cai-yuan, SUN Quan-fu, ZHANG Zhong

(College of Environmental Monitoring of Guizhou Province, Guiyang 550004, Guizhou, China)

[**Abstract**] In order to study the distribution of stress (cracks) in the slope of mined-out area and test the analysis of collapse process, discrete element numerical software (UDEC) is used to simulate the occurrence, development and change of overburden cracks in Pusha Coal Mine, Zhangjiawan Town, Nayong County. The results show that with the advance of coal seam mining, overburden fissures develop upward and the density increases gradually; because the goaf area is too large, some of them are re-compacted, and the fissures develop to the surface to form open holes; finally, under the action of external forces, the whole fissure is perpendicularly penetrated, forming the development law of dangerous rock mass, which can provide basic accordance for similar mine geological disaster prevention.

[**Key Words**] UDEC; Goaf; Stress distribution; Development law

(上接第 253 页)

Application Research of Three Lateral Current Curves in the Determination of Coal Seam Thickness

SONG Qi-wen

(Guizhou Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Guiyang 550018, Guizhou, China)

[**Abstract**] Coalfield geophysical logging is an important technical means in coalfield exploration. In order to achieve the best exploration effect, it is necessary to fully integrate the local coal seam geophysical characteristics. In this paper, the previous use of resistivity of electrode system and the current use of trilateral resistivity are reviewed to explain the thickness of coal seam, the shortages of its influence on the accuracy of coal seam thickness determination are summarized. Therefore, a trilateral current curve is proposed to replace the trilateral resistivity curve in the interpretation of coal seam thickness. This curve inherits the advantages of the trilateral resistivity curve and overcomes its shortages. It's hoped to attract the attention of the industry.

[**Key Words**] Coal field logging; Three lateral resistivity curve; Three lateral current curve