

露天煤矿地质灾害致灾机理与边坡失稳预测分析

龙勇

贵州图南矿业(集团)有限公司, 贵州 兴仁 562300

摘要 : 该项研究主要针对一个特定的露天煤矿进行分析, 首先阐述了该矿区的概况以及采空区域和断层活化所引起的灾害成因。接着, 利用 FLAC 程序构建了矿区边坡的数理模型, 并挑选了3号与5号两个代表性的剖面进行稳定性预测和解析。研究成果显示, 3号剖面相关区域的边坡存在部分结构破裂风险, 不适合执行开采活动; 而5号剖面区域的边坡, 其第一和第二层段的岩石结构较为稳固, 但第三和第四层段所覆盖的煤层顶部岩石层出现了明显的变形现象。因此, 为了预防边坡的不稳定现象并确保施工安全, 矿藏的开采深度不得超过第二层段, 亦即综合采矿深度应控制在850米以内。

关键词 : 煤矿地质灾害; 边坡失稳; 采空区; FLAC

Analysis of Geological Disaster Causing Mechanism and Slope Instability Prediction in Surface Coal Mines

Long Yong

Guizhou Tunan Mining Industry (Group) Co., Ltd, Xingren, Guizhou 562300

Abstract : This study focuses on the analysis of a specific open-pit coal mine, and firstly, it describes the general situation of the mine, and the causes of the disasters caused by the activation of the mining area and faults. Then, a numerical model of the mine slope was constructed using the FLAC program, and two representative profiles, No. 3 and No. 5, were selected for stability prediction and analysis. The research results show that the slopes in the relevant area of profile No. 3 are at risk of partial structural rupture and are not suitable for the execution of mining activities, while the slopes in the area of profile No. 5 have a relatively stable rock structure in the first and second segments, but the rock layers on top of the coal seams covered by the third and fourth segments have shown obvious deformation phenomena. Therefore, in order to prevent slope instability and ensure construction safety, the mining depth of the deposit should not exceed the second layer section, i.e., the integrated mining depth should be controlled within 850 meters.

Keywords : coal mine geohazard; slope instability; air-mining zone; FLAC

引言:

坡体的安定性是相对性的, 不安定则是绝对性的。哪怕目前稳固的坡体, 在长期遭受地质变动或是人为干预等不良影响之下, 也有可能由原本稳定的状态演变为不稳定, 终至发生崩塌。鉴于此, 探讨坡体失稳崩塌的预测及预警具有极其深远的意义。在进行坡体崩塌的预测及预警时, 空间与时间这两个维度是不可或缺的要害, 二者相辅相成。空间上对滑坡的预测为时间上的预警确定了研究对象; 而时间上的预警点位选择, 必须建立在空间预测的基础之上, 以免因随意定位而导致失误和遗漏。滑坡位置与规模的预估是通过对其潜在发生点和可能性大小的分析来进行的, 目前广泛采用的预估技术包含了传统稳定性系数预估技术、人工神经网络技术、信息理论模型、突变理论预估技术及模糊逻辑评估等; 而对于滑坡发生具体时刻的预测, 即基于现有监测信息, 结合数学建模技术来推算将来某个时间点土坡状态的过程, 现阶段常见的技术有斋藤方法、灰色系统理论预测、非线性动力学预测以及多元参数预测技术和神经网络预测技术等。随着对滑坡原理了解的深入, 现代力学理论和计算技术的飞速进步, 新颖的预测与预报手段正不断涌现, 并已实现较为准确的预测效果。

一、矿区概况

位于高原与平原相接的某露天煤矿, 平均海拔105至148米, 地形呈现南端较高而北端较低的趋势^[1]。该高原区域的坡面倾角为12至16度, 基础岩石受风化作用强烈, 表层覆盖了8.3至

12.6米厚的残留斜坡堆积物。坡下积层及泛洪积扇分布于高原至平原的过渡地带, 主要由含有碎石的黏土构成, 厚度最大可超过10米。而平原区则以黏土和砂土为主, 底层则是砂石。这座露天煤矿在历经多年挖掘后, 已开辟成一个南北长约5.5公里、东西宽1.8公里, 并且深度逾350米的庞大开采场地。该地区所面临的主

要地质灾害包括山体滑坡、土地裂缝以及地面坍塌等类型。

二、露天煤矿地质灾害致灾机理分析

断层活化同样是露天开采煤矿遇见的主要地质难题之一。就文中分析的这块采矿区域来看，存在着一个类似椭圆状的下沉区和它的外围，即断裂带的活跃范围正在拓宽，这极有可能诱发山体滑坡、裂地缝、地表塌陷等类型的地质灾害。在典型情况下，矿体开采后留下的空洞所处的顶岩层是连续且具有一定弹性的介质环境，在较低的外力作用下，可以通过弹性形变将点状应力向外围扩散，直到该应力在应力场的界限处彻底消散^[9]。然而，在开采空间旁边的岩石层中如果存在着断层，这会造成应力场在局部区域产生分隔，此时应力就无法有效传播，并会在断层的某一边积累起来。随着那一侧的应力持续累积，断层的缝隙也将逐渐扩大，当其扩展到一定宽度时，地面就会出现裂纹。与此同时，裂缝的拓展还可能致使上方疏松或碎裂的岩层开始塌落，造成地表的下降。断层火花破坏机理如图1显示。

此外，依照往常监控资料指出，这座露天煤矿在最近几年内，矿山地震的出现频次持续攀升，而这些地震主要集中在采矿空洞与断层构造相交汇的区域。地震一旦发生，还将促使地面裂痕的扩展和地表下沉现象的恶化，同时对露天开采边坡的稳固性产生负面效应。

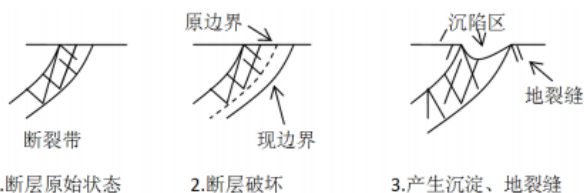


图1断层破坏示意图

三、露天煤矿边坡失稳预测分析

(一) 基于FLAC下的边坡失稳预测分析

1. 岩土工程软件FLAC

Itasca公司在美国研发了FLAC这款土岩工程分析程序，它具备预测达到屈服状态下土质、岩石等构成物的动力效应的功能。通过内置的格点制作工具Gen，该程序能够创造多个局部格点，并将这些格点进行拼接和联结，构建出符合分析需求的三维构造格点网络。利用此三维网络，并依据露天煤矿勘测数据设定界限条件与初始状态，可构造出露天煤矿边坡的三维示意图。FLAC程序还具备地下水动态仿真和孔隙水压力传播仿真的功能，可以在模拟环境中演示多种因素如何影响边坡的稳定性。

2. 数学模型的建立

在FLAC程序中，较为广泛运用的数值模拟方法是莫尔-库伦机制。它能够描述主应力向量空间里由 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 三个分量形成的模式，并且与之相对的主应变变量分别用 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 来标识^[9]。此外，该机制认定了两个破裂标准：一为莫尔库伦判据；二为最大拉伸应力判据。而基于莫尔-库伦判据的破裂视觉

呈现就在图2中展示。

若假定破坏临界面 $f_s(\sigma_1, \sigma_3)$ 为零，那么由莫耳库伦法则 $f_s=0$ 所规定，A点至B点之间的路径描述为：

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta}$$

从B点到C点有拉伸破坏准则定义：

$$f_s = \sigma^t - \sigma^t$$

式中， σ^t 表示抗拉强度， θ 表示摩擦角。

通过所建立的莫尔——库伦理论模型，能够对露天煤矿斜坡的土石材质在抵达屈服极限时，剪切膨胀角、粘合力、抗拉伸能力等特性的演变过程进行探讨，并据此数值的演进对斜坡的稳固性进行预先评估与分析。

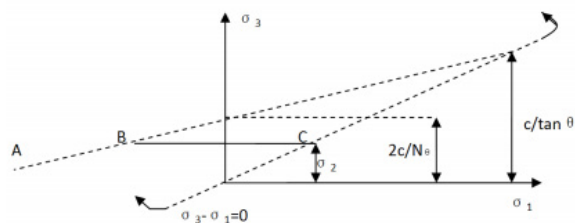


图2FLAC莫尔-库伦破坏准则

3. 边坡失稳预测结果

此露天采矿区存在两类易发生滑坡的岩体，其中之一分布于南边煤层基部的柔软凝灰石之上，另一类则为所监测绿色泥质岩。这两个区域的岩石强度因气候侵蚀、地下水流等多重因素有所削弱，结构稳定性不佳。遇到地震或大雨导致水分渗透时，这些弱质结构面极易产生层间滑动。实施斜坡稳定性预测并根据预测决定防治措施，是确保矿区安全生产的关键。本研究挑选了矿区内标志性的3号与5号边坡剖面，应用前文提及的FLAC软件进行数值分析，进而执行斜坡稳固性的预判工作。

(1)3#剖面数值分析

采用FLAC程序对3号剖面进行的数值模拟步骤包括：

建立数学模型，并设定其边界条件。模型计算所界定的范围顶部为地面，底部则定在海拔负650米，并锁定这些位置的垂直移动；北边界定于矿区北端的N1900坐标位置，而南边界选择在矿区南端的S440坐标，同时锁定这些边界的水平位移。模型南北方向总距离为2668米，垂直深度达到720米，从露天矿坑向东方延伸至邻近的花岗片麻岩区，选取了13个用于参考的点。

3号剖面的当前状态经分析。该剖面邻近的斜坡，受连年露天挖掘的影响，其坡面植物生长稀疏，进而造成基座岩石遭受严重风化，斜坡形成了广阔的塑性区域，且已出现了显著的位移与变化。特别是在S1断层沿线的裂口部分，最大位移已超过2.1米，断层之下的盘层岩石（斜坡中的软岩层）发生了张拉式的形变。该剖面的13处测量点的垂直移位情况见附图3。

依照图3的数据可得出，地表垂向移动量以S1构造为分界线，在其北侧的含花岗岩性质的片麻岩地带（参照点9至13）的变形程度较轻微，而在边缘处（即参照点13）的垂向位移甚微，仅-0.02米。反观S1断裂线南侧的第三纪煤系地质结构（参照点1至6），却出现了相对显著的地表下沉现象，最大下沉量达到

了-0.6米。

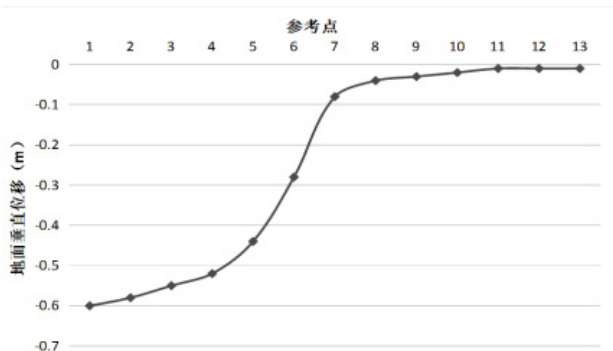


图3参考点地面垂直位移

采掘预估中，本次将所研究的煤层区域分割为四个部分，分别由南至北划分为 N660至 N760、N760至 N860、N860至 N960 以及 N960至 N1060。在各分段施行井下采掘作业时，相关检测点的垂向位移变化量可参考图4。

观察图4可见，进行井下开采将引起边坡及采空区地表发生程度不一的竖直移动。其成因分析揭示，采空区面积扩大伴随着岩土上层的应力集中，这将引发局部区域的剪切破坏并最终导致地面沉降变形。从纵向比较视角来看，随着逐段开采深度的加深，地面竖直位移的增幅也展现出上升的趋势。在采矿过程的第四阶段，已测得地面竖直移动量为 -0.162m。然而，随着监测点和开挖煤层之间的横向距离延伸，地面垂直位移逐渐趋于减少，例如在最远的第13个监测点，所有采矿阶段地面竖直位移均维持在 -0.01米以内。

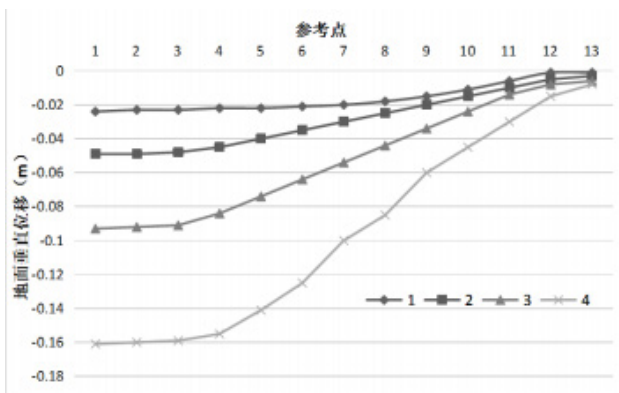


图4四个分段参考点位移增量

经预测分析得出，位于3#剖面的边坡，在南侧因软质岩石的分布形成了延展区域，再加之该处采空作业区域广阔，应力过于集中导致边坡局部结构发生了瓦解。鉴于此，建议停止在此区域进行任何新的矿产资源开采工作，否则可能引发边坡崩塌、地表下沉等一系列地质灾害。

(2)5# 剖面数值分析

采用 FLAC 程序对5号剖面进行的数值分析步骤如下所示：

搭建模型框架，并设立边界参数。计算得出模型上方限定在海拔98米，而下方则至海拔负1255米，且其垂直移动受到限制。模型的北面边缘以矿区的北部界线 N1900作为分界，而南面则采用矿区的南部界线 S440作为划界依据，并限定其横向位移。整体南北方向跨度为2850米，纵深达到1477米，在朝北的采矿口区域顺序选取了15个测量基准点。

针对5号剖面的现行情况进行剖析，在此坡体出现了广阔的塑变区域，尤其聚集在 S1与 S4断层的下层岩石区。其形成主要是由于持续的露天挖掘作业，以及与之关联的矿山地震活动。关于各测点的垂向移位情况，详见图5所展示的数据。

从图5分析得出，观测点5与观测点11均位于两条不同的断层线之上，在这两处观测点出现了显著的地表竖直移动变化。而位于 S4断层上盘边界的观测点12至观测点15，此区域由花岗质的片麻岩所构成，结构较为稳定，其地面竖直位移量保持在负0.2米范围以内。

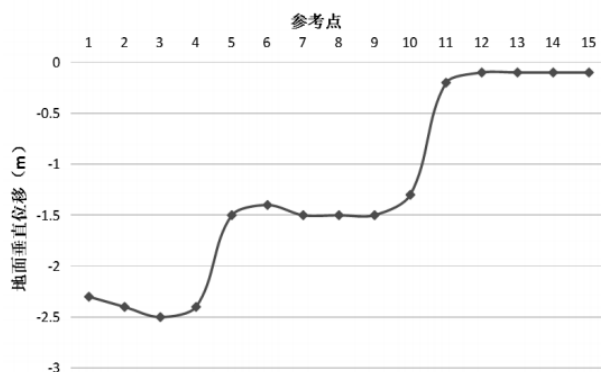


图5参考点地面垂直位移

地下采矿预期分析。遵循相同工艺流程，本次将所述斜坡的质煤矿脉依据水准线依次切割成四等份，具体分段为 N1250至 N1300、N1300至 N1305、N1350至 N1400以及 N1400至 N1450^[4]。这四个区段进行井采作业时，相关测点垂直方向的位移增幅分别在图示6中标明。

依据图6可见，在三、四段地底的开掘作业中，由于受到矿井采掘扰动的作用，上方的煤岩层体现出较为显著的变形状况，其导致的地表直降位移分别为 -0.143米及 -0.164米，容易造成地面下沉现象。而相较而言，一、二段地质结构则显得更为稳固，地表竖直下移的幅度尚未超过 -0.1米。

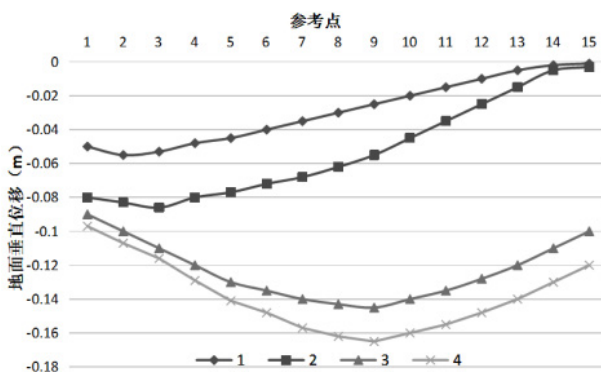


图6四个分段参考点位移增量

测算展望显示，在观念层面判断，第一，二采区施工期间虽然可见到塑性带有一些变形，总体上构筑稳固，不易导致斜坡塌陷或地表下沉等地质事故；但进行第三，四采区作业时，将面临显著拉伸变形，存在斜坡稳定性的威胁。

(二) 基于监测信息得到边坡失稳预测分析

1. 边坡失稳时间的预测

在露天矿场北侧边坡的1502作业平台，我们利用 GPS 测量

技术沿坡向横向设立了三列观测点，每列包含15个，共计45个点位。在这些点位中，18个成对的用于监测边坡的收敛移动，另外30个点用于水准测量，共同构成了监测网。此后，对该监测网实施了为期半年的持续追踪观测，其间我们成功记录了北侧1502作业平台可能发生滑移的13对观测点的水平位移数据，以及全部39个观测点的沉降数据。

在对监控数据进行分析之后，观察结果表明，在边坡的位移速度提升至2毫米每天时，该边坡便步入了一个加速变形的新阶段。数据记录显示滑坡体在110天之后会开始这一形变过程，并在接下来的两个月里呈现出速度缓慢上升的状态；一旦边坡的形变速度上升至每天10毫米，此时边坡便处于形变失稳的演进期，数据同样标明滑坡体在120天后将会走到这一节点；边坡的位移速度在每天14.4毫米、24毫米或28毫米的时候，边坡将面临关键的失稳状况，而达到哪一个精确的形变速率则根据不同岩石结构体的具体条件而有所不同。

2. 预测结果

基于水平位移测点S-N9与S-N12所描绘出的时序位移变化图谱可知，监测周期过百天时，边坡的移动速度明显提升。采用斋藤方法所建立的边坡稳定性预测模型指出，该边坡滑块可能会在观测起始后的第340至360天进入不稳定状态，随后滑落；对滑块移动速率的回归分析与速率失稳预测显示，东侧滑块呈现出近

圆滑面的形态，其关键变形速率介于25至28毫米每日之间，若按此预测速率变化，边坡可能会在开展监测后的第365天发生塌陷。

通过观察时间与位移（速度）的关系图表，可以看出，降雨对边坡的变形速度有着明显的促进作用，这种情形是高陡边坡稳定性的一个显著特征。观测到的滑坡体主要表现出圆弧形的滑动面，而其时间和变形的关系图中表现为层叠的阶梯形态^[5]。具体表现为，在降雨期，边坡的变形速度会明显增加，从而使得变形图线的斜率变得更加陡峭。反之，当降雨停止时，边坡的变化速度放缓，图线斜率变得较为平滑，形成了所谓的“台阶”。每当降雨再度来临，这一过程便会重复出现。因此，在滑坡发生前的时间-位移（速率）曲线上，可能会呈现出一个或是多个的台阶状结构。

结语

本篇论文借助FLAC程序及借鉴实时监测数据，对特定露天矿的边坡稳定情况进行了详细考察。研究成果揭示出所观察矿井的边坡存在着不一样程度的稳定性风险。根据这些分析预测数据，矿场负责人需要适时地修改开采方案，并且对那些倾向于发生边坡滑脱的区域，实行必要的防治措施，这样才能防范可能出现的地质灾害，确保从业工人的生命安全。

参考文献

- [1] 姚世来. 露天煤矿地质灾害致灾机理与边坡失稳预测分析[J]. 科学技术创新, 2023,(09):196-199.
- [2] 金爱兵, 张静辉, 孙浩, 等. 基于SSA-SVM的边坡失稳智能预测及预警模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022,50(11):142-148.221118.
- [3] 任刚, 邢民, 荆艳会, 等. 受控于结构面的岩质高边坡失稳预测技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015,13(06):48-53.
- [4] 李文秀, 齐栋梁. 露天矿爆破振动影响下边坡失稳预测的综合方法[J]. 化工矿物与加工, 2015,44(06):24-26+40.2015.06.008.
- [5] 胡恩聪, 赖应良, 艾凤. 露天煤矿超高边坡稳定性预测分析[J]. 低温建筑技术, 2013,35(04):117-120.