

山区地下开采坡体稳定性分析及 滑坡预报系统的设计

胡晋山^{1,2}, 何宗宜², 康建荣¹, 袁西亚³

(1. 徐州师范大学测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

3. 陕西煤业化工集团彬长矿区开发建设有限责任公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 山区地下煤层开采引起的地表移动和变形情况十分复杂, 采动坡体的稳定性不仅跟地质采矿条件及覆盖岩性质有关, 还跟采动程度、地形地貌、坡体形态、岩(土)性质、浅层构造等因素有关, 因而, 山区采动坡体稳定性的预测难度很大。本文在分析山区采动滑坡诱因、现有的山区采动坡体监测技术及坡体稳定性分析的基础上, 提出构建基于 GIS 的山区采动滑坡预报系统, 从而实现矿区绿色开采及灾害及早防治。

关键词: 山区; 地下开采; 坡体稳定性; 地理信息系统; 滑坡预报

中图分类号: TD325⁺.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-4051(2009)11-0112-04

Slope stability analysis and landslide forecasting system design in the mountainous mining area

HU Jin-shan^{1,2}, HE Zong-yi¹, KANG Jian-rong², YUAN Xi-ya³

(1. School of Geodesy and Geomatic, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Shanxi Binchang Mine-Area Group Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

Abstract: Ground movement and deformation caused by underground coal exploitation is very complex in the mountainous area. Slope stability is associated with the geological and mining conditions, the nature of cover rocks, the extent of mining, local terrain and physiognomy, the shape of the slope, the characters of the rock (land), and the shallow structure, etc. Thus the mountainous slope stability prediction is very difficult. The incentives of landside, the existing surveying technique and the analytic method to slope stability of the mountainous mining area are analyzed first, then how to design the landside forecasting system based on GIS is suggested in this paper, this system can advance green mining and prevent mine disasters as soon as possible.

Key words: mountain; underground mining; slope stability; GIS; landslide forecasting

我国大约有 1/3 的煤矿位于山区, 随着山区地下煤层的大面积开采, 地表塌陷、山体滑坡、地下水位下降和水土流失加剧。特别是开采深度较浅、地面松散覆盖层较厚的地区, 地下煤层开采引起的山体采动滑坡现象尤为突出。山区一些煤矿, 如山西的西山、大同、古交、阳泉矿区, 陕

西的铜川、韩城矿区, 四川的芙蓉、攀枝花等矿区以及云贵山区煤矿, 都有过不同程度的采动滑坡, 并在雨季伴有泥石流的发生; 一些高差很大且地面坡度超高 50° 的地区, 常有采动崩塌现象, 给当地的生态环境和人民的生命财产安全造成了严重影响。为了最大限度地减少滑坡引起的灾害发生, 很有必要建立山区采动滑坡预警系统。

1 山区采动滑坡的诱因

由于山区地形条件复杂, 受地形地貌及地质采矿条件的影响, 山区地下采矿引起的地表变形,

收稿日期: 2009-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(50774067); 江苏省高校自然科学基金研究计划基金(07KJD420213)

作者简介: 胡晋山(1973-), 男, 山西人, 讲师, 博士生。

远比平原地区复杂得多，地下开采引起的山体滑坡预测。也要比人工边坡问题复杂。

(1) 采动引起坡体产生附加应力~应变

在开采沉陷过程中，岩体的原有应力状态必然会被破坏，使岩体不同层位和不同位置产生不同程度的附加应力和应变。尽管岩体不同部位发生不同程度的附加应力和应变的时间和大小不相同，但一般都是先产生张应力和张应变，然后又转为压应力和压应变。在上述开采沉陷应力应变过程中，岩层的节理和层理等软弱结构面，将首先受到扰动，特别是接近坡体表面的岩层，由于受风化侵蚀作用的影响，结构面上的粘聚力和摩擦力本来就小，在开采沉陷附加应力和应变，特别是在受拉应力~应变的过程中，结构面上的粘聚力将进一步减弱。同时，在岩土体采动张应变过程中，岩体体内水的渗透作用将大大加强，从而降低层理和节理等结构面上的摩擦力与粘聚力，使原本处于稳定状态的坡体产生滑动^[1]。

(2) 古滑坡的活化

开采沉陷扰动可能引起古滑坡体的活化而产生新的滑动。古滑坡体是由于原有的滑动位能和势能在滑动过程中消耗殆尽，动力和抗滑力趋于平稳而停止滑动。地下煤层开采产生的上覆岩层和地表的移动变形，破坏了原有的应力平衡状态，赋予古滑坡体以新的动能，则古滑坡体就可能发生活化而重新滑动。

(3) 地表水渗入地表裂缝

受开采沉陷附加应力及山体沉陷侧向应力的影响，使凸形坡体顶部及其边坡部位表层岩土体受水平拉伸变形，可能产生平行于坡体走向等高线方向的张性裂缝，这种裂缝不同程度地破坏了坡体与山体的力学联系，同时为地表水的渗入提供了通道，是造成采动滑坡的主要原因之一。

2 山区采动坡体稳定性分析

由于受山区地形的影响，山区采动滑坡不仅与该矿区地质采矿条件、开采深度、开采厚度、采区工作面尺寸、工作面推进方向、采动程度、覆岩性质有关，还跟山区地形地貌（包括地表倾角、倾向、微地貌特征）、坡体形态、地表岩（土）层结构与特性、浅层构造等因素相关。

(1) 现有的边坡稳定性分析评价方法

目前，国内外对于采矿引起的边坡稳定性评价的研究多集中于露天矿^[2-4]，主要应用极限平衡法^[4,5]、数值分析法（离散元^[6]、有限元^[7]）、模糊数学^[8]、神经网络^[9]等方法，对露天矿边坡稳定性

进行分析，而对于山区地下开采引起的坡体稳定性问题，在国内外研究都相对较少。

(2) 山区采动坡体稳定性分析

在国外，有关山区采动坡体稳定性研究的有关文献很少，S. S. Peng 主要是从力学模型分析了长壁采煤地表沉陷对坡体稳定性的影响，其采用简化的连续变形模型^[10]。在国内以何万龙教授、康建荣教授为首的学者们与一些山区煤矿合作，开创性地总结了山区地表移动规律，对实测地表移动观测站资料综合分析，建立了山区地表移动变形预计数学模型。在山区采动坡体稳定性分析方面，应用坡体采动附加力经验公式，在自然坡体和人工坡体稳定性预测公式的基础上，建立了基于各种滑动面的采动坡体稳定性预测经验公式^[11]，并得到了实例验证。山区采动坡体稳定性的数值模拟、统计分析 & 非线性分析方法，可以借鉴人工坡体和自然坡体稳定性分析的评价算法。

3 山区采矿坡体监测的新技术

当今，随着 3S（指 GPS、RS、GIS）技术的日益成熟以及在各领域的广泛应用，应用 GPS、RS 对山区煤矿坡体进行监测。在 GIS 环境下，可以实现对外界数据加工后进行空间分析、坡体稳定性预测、采动坡体变形动态模拟、坡体三维景观显示等等。可以说，3S 技术为当今山区采动坡体稳定性分析及预报的自动化、可视化提供了契机。

(1) GPS 用于矿区滑坡监测

近年来，随着 GPS 定位技术及其数据处理模型、软件的不断发展，GPS 定位精度不断提高。它具有速度快、精度高、全天候和不受通视条件限制等优点。因此，在矿区坡体的变形监测中，我们可以用 GPS 技术来替代传统的变形监测手段，建立高精度的变形监测三维网。

(2) 多时相、高分辨率遥感监测

目前，遥感技术在滑坡灾害研究中的应用，逐渐从单一的遥感资料向多时相、多数据源的复合分析，从静态滑坡识别、形态分析向滑坡变形动态监测过渡，从对滑坡的定性调查向计算机辅助的定量分析过渡。现阶段，国内在滑坡遥感的理论和实践中，由于受交叉学科、新技术方法的快速发展和滑坡遥感的从业人员专业背景差异等因素影响，存在一些问题和不足，如遥感在滑坡调查中的作用在被过度夸大的同时，其应用潜力和功能没有得到充分发挥。因此，进行对地下采矿山体的滑坡解译，应该充分考虑山区地表采动

移动变形规律及影响因素,还应该着重考虑将 GIS 空间分析与影像的复合分析、三维可视化等新的技术方法结合起来,进行坡体稳定动态分析与预测。

(3) 数字近景摄影测量系统用于滑坡监测

近景摄影测量,尤其是数字近景摄影测量系统 Lensphoto 的出现,给滑坡监测带来了广阔的应用前景。lensphoto 应用最新研发的、可靠的多基线立体匹配算法获取大量同名点,然后通过近景空中三角测量,完成模型自动连接并获取像片外方位元素和相机参数,最终通过多光线前方交会及区域网平差,自动生成物方区域三维坐标点的点云,建立高精度的数字表面模型,由此可以构建坡体高精度的三维模型。

(4) GIS 应用于滑坡信息的管理与分析

在区域滑坡调查的基础上,建立基于 GIS 技术的滑坡信息可视化空间数据库。采用 GIS 作为滑坡防灾减灾数据集成的平台,在关系数据库的基础上,建立图形数据库,将各种矿区井下、地面各种地理、地质要素叠置于电子地图上,实现关系数据库中的属性数据、与遥感影像数据、摄影测量数据、矿井数字化的井上下对照图相联系,将数据、文本、多媒体信息、图像图形集成于统一平台上,进行空间定位与属性一体化管理,使信息可视化。此外,还要利用 GIS 强大的空间分析功能,进一步对滑坡空间分布规律与成因规律进行研究,为评价因子选择及其量化作准备。

4 基于 GIS 的山区地下采动滑坡预报系统的建立

滑坡预报模型和预报判据是滑坡预报的核心,模型的建立和判据的选取,是滑坡成功预报的重要因素。但由于山区采动坡体变形破坏的复杂性、随机性和不确定性,给滑坡预报带来了极大的困难。因此,应该以监测数据和当地的采矿地质资料为依据,遵循科学性、综合性、易操作的原则,将理论模型预报、滑坡预报判据以及坡体的宏观变形迹象和前兆信息等有机地结合起来,运用综合信息预报方法,全面地对滑坡进行预测预报。

基于 GIS 的山区地下采动滑坡预报系统的构建框架(由文献 [11] 改编)所示,主要从如下几个方面着手考虑。

(1) 整理山区采动地表移动观测及地质采矿资料。搜集山区地下采矿引起的滑坡记录资料,获取矿区地表移动观测的历史数据,以及相应矿区的地质采矿资料(诸如开采厚度、开采深度、工作面尺寸及推进方向、采动程度、覆岩性质和

地形地貌等),还可以获取高分辨率多时相矿区遥感影像。对这些资料分析处理的基础上,结合典型滑坡的现场调查和室内研究资料,建立滑坡预报数据库,即滑坡基础信息数据库和滑坡预报综合信息库。

(2) 山体的滑坡的定性预报分析。系统分析山体滑坡的宏观变形迹象和宏观前兆异常现象,结合山区地形、地貌特征及地质采矿相关资料,研究山体滑坡预报判据以及影响坡体变形的破坏机制、稳定性状态和变形阶段等因素,实现对滑坡的变形破坏机制、稳定性状态、变形演化阶段、破坏概率以及滑动时间的预测预报。

(3) 山体滑坡的定量预报研究。结合山区地表移动与变形规律、引起坡体滑动的诱发因素,分析研究山区采矿滑坡预报的机理,筛选现有的人工边坡与自然边坡的滑坡预测模型,寻求适合山区地下采矿的滑坡预测预报模型;还可以构建新的模型,并对滑坡体监测信息的提取和预处理以及多模型预报结果进行判别等。根据山区地表移动预计及地下采矿进度,对滑坡发生滑动的具体时间进行预报。

(4) 滑坡的数值预报。通过建立坡体的地质-力学-变形模型(GMD 模型),运用有限元和离散元等数值模拟手段,对滑坡的变形场和应力场以及随时间的变化效应进行分析,进而预测坡体的稳定性、破坏方式和滑动时间。

(5) 滑坡的综合预测预报研究。在上述研究的基础上,运用智能决策支持系统的思想和方法,将理论模型的定量预报、利用专家系统的定性预报以及数值模拟预报三者有机地结合起来,实现理论预报与现象预报、定量预报与定性预报相结合的滑坡综合预测预报。

(6) 滑坡综合预测预报信息系统的设计。选择 GIS 软件平台,如 ArcGIS、MapGIS 等基础 GIS 软件,应用其二次开发工具或者是选择面向对象的编程语言,将坡体基础信息数据库中的图形图像数据、DEM 数据跟水文、地质采矿属性数据相链接,扩充 GIS 基础软件的空间分析功能,载入山区地下采动滑坡定性预报、定量预报及数值模拟数学模型。利用搜集的滑坡实例,对上述预报数学模型的参数进行调整,使计算结果逼近实际情况。在对新的滑动坡体分析时,利用上述几个模型进行预报,必然产生多个结果,需要对多模型结果进行综合评判,得出坡体稳定性的预测结果。并将预测结果与滑坡原型进行反馈对照和

检验，逐步提高滑坡的预报精度，最后得出预报结论。

此外，应用 GIS 还可以将采矿区的井上下对照图、历次坡体监测数据及图形进行叠加分析，动态获取井下采矿进度及地面坡体的变化特征，并对坡体及矿体进行三维可视化模拟，设计滑坡影响缓冲区及灾害损失评估模型。

5 结语

由于山区地形起伏，地下采矿引起滑坡的成因机制、诱发因素等具有复杂性，加之目前的滑坡灾害预测预报理论研究还存在局限性，增加了滑坡预报的难度。本文在分析山区采动坡体滑动诱因和现有的山区采动坡体稳定性分析方法的基础上，提出基于 GIS 建立山区地下采矿滑坡的预报系统，以 GIS 基础软件为平台，利用 GIS 本身所具有的属性数据和图形数据处理功能，实现采动滑坡图形数据和属性数据链接，并进行动态三维显示。依据山区采动坡体变形规律及滑坡预报模型，应用可视化编程语言扩充 GIS 的空间分析功能，实现山区地下采矿坡体稳定性预测，推进矿区绿色开采。

参考文献

[1] 康建荣, 何万龙, 胡海峰, 著. 山区采动坡体地表变形及坡体稳定性分析 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.

[2] William G. Pariseau, Saurabh Purib, Steve C. Schmelt-erc. A new model for effects of impersistent joint sets on rock slope stability [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45 (1): 122-131.
[3] V. K. SINGH and D. P. SINGH. Controlled blasting in an open-pit mine for improved slope stability [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1995, 13 (1): 51-57.
[4] 孙玉科, 姚宝魁, 许兵. 矿山边坡稳定性研究的回顾与展望 [J]. 工程地质学报, 1998, 6 (4): 305-311.
[5] ATA EI M, BODAGHABADI S. Comprehensive analysis of slope stability and determination of stable slopes in the Chador-Malu iron ore mine using numerical and limit equilibrium methods [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18 (4): 488-493.
[6] 郑文棠, 徐卫亚, 童富果, 等. 复杂边坡三维地质可视化和数值模型构建 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (8): 1633-1643.
[7] 谷栓成, 徐学文. 高边坡加固工程有限元稳定性分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23 (2): 201-205.
[8] 夏元友, 朱瑞庚. 岩质边坡稳定性多层次模糊综合评价系统研究 [J]. 工程地质学报, 1999, 7 (1): 46-53.
[9] 白润才, 张普利, 刘景凡. 露天矿边坡稳定性预测的人工神经网络模型 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2000, 19 (4): 337-339.
[10] S. S. Peng. 长壁采煤地表沉降对坡体稳定性的影响 [J]. 矿业译丛, 1990, (2). (原载《Mining Science and Technology》, 1989, (8).)
[11] 李秀珍, 许强, 刘希林. 基于 GIS 的滑坡综合预测预报信息系统 [J]. 工程地质学报, 2005, 13 (3): 398-403.

(上接第 111 页)

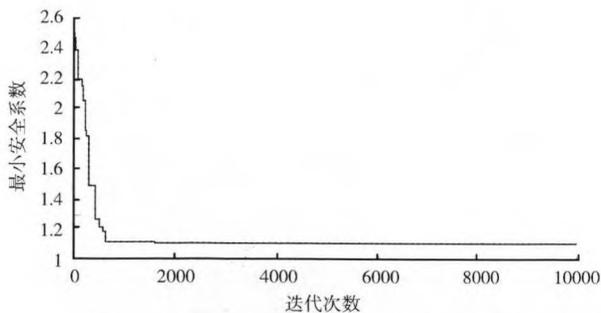


图 3 基于进化策略的和声算法迭代结果

参考文献

[1] 陈祖煜, 邵长明. 最优化方法在确定边坡最小安全系数方面的应用 [J]. 岩土工程学报, 1988, 10 (4): 1-13.
[2] 王成华, 夏绪勇, 李广信. 基于应力场的土坡临界滑动面的遗传算法搜索 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 44 (3): 425-428.
[3] 陈云敏, 魏新江, 李育超. 边坡非圆弧临界滑动面的粒子群优化算法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (7):

1443-1449.
[4] 陈昌富, 龚晓南, 王贻荪. 自适应蚁群算法及其在边坡工程中的应用 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2003, 37 (5): 566-569.
[5] 李亮, 迟世春, 林皋. 基于蚁群算法的复合形法及其在边坡稳定分析中应用 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (5): 691-696.
[6] 李亮, 迟世春, 林皋. 禁忌鱼群算法及其在边坡稳定分析中的应用 [J]. 工程力学, 2006, 23 (3): 6-10.
[7] Cheng Y. M. Location of Critical Failure Surface and some Further Studies on Slope Stability Analysis [J], Computers and Geotechnics, 2003, 30 (2): 255-267.
[8] Geem Z W, Kim J H, Loganathan G V. Harmony search [J]. Simulation, 2001, 76 (2): 60-68.
[9] 曲良东, 何登旭. 新的混合优化算法及其应用 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (15): 51-53.
[10] Zolfaghari A. R., Heath A. C. and McCombie P. F. Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32: 139-152.