

采动边坡稳定性 评价理论及工程实践

徐杨青 吴西臣 著



科学出版社

采动边坡稳定性评价理论及工程实践

徐杨青 吴西臣 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以一系列采动边坡、滑坡工程项目为背景,运用现场观测、室内外试验、数值模拟计算等方法,系统地探讨了采动边坡变形破坏规律、机理及稳定性评价方法。主要内容包括:从应力场、岩土体强度、地表形态及工程地质与水文地质条件四方面的变化,分析了采动效应对边坡变形及稳定性的影响;探讨了不同开采方向、开采空间对采动边坡变形及稳定性的影响规律及机理;以工程地质学、“三下”采煤、岩土力学等传统理论为基础,建立了系统且行之有效的采动边坡稳定性评价方法与体系;提出了采动边坡变形及稳定性变化的时空效应理论,并开展了采动边坡稳定监控技术研究;从地下采矿、边坡支挡、水处理、采空区治理等多方面提出了采动边坡稳定控制技术;最后,列举了国内代表性的采动边坡及滑坡稳定性分析评价、监测、支护等工程实例,供读者参考借鉴。

本书研究内容对从事工程地质勘察、地质灾害防治及采矿工程等专业技术人员具有一定的参考意义。

图书在版编目(CIP)数据

采动边坡稳定性评价理论及工程实践 / 徐杨青, 吴西臣著. —北京: 科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047287-8

I. ①采… II. ①徐… ②吴… III. ①采动区-边坡稳定性-研究 IV. ①TD824. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 021125 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 14 1/4 插页: 3

字数: 274 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

采动边坡稳定性评价理论和方法本属于工程地质学和采矿工程学相结合的重要课题之一，它引起学界关注并进行初步研究大致始于20世纪80年代。1980年6月，湖北宜昌地区盐池河磷矿由于采矿活动引起地面180余米高陡边坡约100万 m^3 岩体崩塌，崩塌堆积物摧毁并掩埋了整个工业广场及民用建筑物，酿成284人死亡的惨剧；1982年陕西韩城电厂因其紧邻的韩城煤矿采空区塌陷引起电厂地面持续数年隆起变形，使厂房及邻近建筑物产生不同程度损坏，花费近5000万元进行整治；2009年6月，重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山铁矿采空区上方发生大规模山体崩塌，约500万 m^3 山体崩积物掩埋了12户民房和正在开采的铁矿井入口，造成10人死亡，64人失踪和8人受伤的巨大灾难。可见采动边坡一旦失稳，其后果是多么严重！这也充分说明，采动边坡稳定性评价研究应当是工程地质学和采矿工程学的重要课题。但是，直至20世纪90年代，学术界和工程界鲜见有对此类重大课题深入、系统性的研究成果。只是将上述案例当做偶发事件，从不同角度进行分析、处理。

中国煤炭科工集团武汉设计研究院自1986年至今，对采动边坡稳定性课题开展了系统研究，取得了丰硕的成果。这项研究大致分两个阶段，第一阶段是以湖北陈家河煤矿跑马岭采空区上山体开裂事件为研究对象，兼对湖北盐池河磷矿大崩塌、长江三峡链子崖危岩体和陕西韩城电厂地面隆起事件进行调查、分析、对比。这个阶段主要取得以下三个方面成果。

其一，认识到在特定的地下采矿条件下和覆岩地质构造、岩体结构及其地形地貌条件下，采空区上边坡和地面稳定性有三种基本类型：①山体边坡在地下采空后产生崩塌或滑坡（湖北盐池河磷矿）；②山体边坡虽经地下采动，仍可保持长期稳定（三峡链子崖危岩体、湖北陈家河煤矿跑马岭开裂山体）；③在采空区上塌陷体外侧，存在“鼓胀应力区”，可能引起一定周期的地面隆起变形（陕西韩城电厂）。得到以上三种类型的认识，可以防止盲目性，避免一遇到采空区上山体开裂就误以为会发生崩塌或滑坡，或者误将地面隆起当做“滑坡前缘隆起”。

其二，确认了采空区上斜坡山体存在四种应力变形区，即上部拉张变形区、中部挤压下沉区、下部剪切变形区和塌陷体外侧鼓胀隆起区。这四种应力变形区

的存在已不止一次被数值分析和地表变形现象调查所证实,因而具有普遍意义。它可与水平煤层采空区“地表移动盆地”并列成为“采空区上斜坡山体地表移动”的基本特征。

其三,探索并建立了工作方法和工作程序。在充分掌握地下采空区及煤柱分布的基础上,扩大测绘面积,开展大比例尺工程地质调查及进行必要的岩石力学试验;建立以地质构造、岩体结构和地下采空区、煤柱相结合的地质模型(二维)进行数值分析和应力变形分区;以传统的极限平衡验算分析,评价整体稳定性;以结构面组合判断局部稳定性;以长期监测和工程地质类比等方法对评价结论进行验证。应用这套分析方法和工作程序对湖北陈家河煤矿区跑马岭采空区开裂山体作出的“山体变形已趋稳定”的结论,至今已近30年,证明这套方法行之有效。

第一阶段的研究工作初步建立了采空区上边坡稳定性评价理论和工作程序,这在我国应属首次。但是,就采动边坡稳定性评价理论和方法这一重大课题而言,此阶段研究仍停留在将地下采空区作为固定边界条件的静态分析阶段,理论和方法基本上还是属于工程地质学范畴。

第二阶段的研究工作始于2006年,以山西平朔露天煤矿安太堡露井联采对露天矿边帮及排土场稳定性评价项目为依托,全面、深入、系统地对采动边坡稳定性评价理论、方法进行研究。此阶段研究的特点是:①将工程地质学理论、方法与采矿工程学的理论、方法相结合,分析煤层赋存条件、采矿方法与顶板管理方法、工作面推进方向、开采工作面与边坡的相对位置等因素对边坡移动变形及稳定性的影响。同时,充分运用“三下”(建筑物、水体、铁路下)采煤方法、原理并结合采空区顶板及覆岩垮落类型等对采动边坡稳定性进行综合研究;②在三维数值模拟和实时监测的基础上,总结出“逆坡开采”、“顺坡开采”及“切坡开采”三种情况下采动边坡变形规律,并进行采动边坡移动变形分区,针对不同变形区对采矿方法和边坡的保护进行指导;③以工程地质学、“三下”采煤、岩土力学等传统理论为基础,建立了以工程地质调查、测绘、极限平衡分析、结构面组合判断、数值分析模拟和工程地质类比等为主要方法的采动边坡稳定性评价方法体系;④基于采动边坡移动变形及稳定性的时空效应理论,建立了采动边坡稳定性的实时监测及预警、预报系统和预报方法及其判据。

以上四个方面的特点表明,第二阶段研究工作较第一阶段有较大进展。主要体现在:①分析、评价要素由“以地上为主”变为“地上、地下并重”;②将静态的分析、评价推进到考虑时间、空间因素变化的动态分析、评价;③从被动地单一稳定性评价,到主动地预警、预报。总体上可以说,将“采空区上边坡稳定

性评价课题”向“边坡下采煤（四下采煤）”推进了一大步。

“采动边坡稳定性评价”或进一步的“边坡下采矿”作为工程地质和采矿工程的重大课题，受到人们的关注已有 30 余年。此期间虽有关于此课题的论文发表，但是以此作为专项课题进行全面、深入研究，并取得系统性成果的当属中国煤炭科工集团武汉设计研究院。更可贵的是，徐杨青、吴西臣两位教授级高级工程师将该院两阶段成果结合并参考一些学者的相关论述集成编著了《采动边坡稳定性评价理论及工程实践》一书。该书虽然还有许多不足有待深入、完善，但已形成较完整体系。针对此类课题，该书所提供的理论、方法和工作程序会有重要的参考价值和指导作用。可以说，该书的出版对采动边坡稳定性研究具有里程碑式的意义。

采动边坡稳定性评价既是工程地质课题，也是采矿工程课题。该书的完成也是工程地质学和采矿工程学有机结合的范例。作者期望，工程地质学者和采矿工程学者进一步协作，不但可以进一步完善采动边坡稳定性评价理论、方法，还能将“三下采煤”（建筑物、水体、铁路下采煤）的相关研究扩展到“四下采煤”（加上边坡下采煤）的完整理论、方法和工作程序。

中国工程勘察大师

范士凯

2015 年 3 月

前 言

煤炭资源多处山区，因煤矿开采诱发的崩塌、滑坡等次生工程地质环境问题日益突出。在边坡下采矿，由于采空区周围的岩体应力分布发生变化，并出现采空移动变形与边坡变形相互叠加及相互影响问题，采空区上方出现的垮落带、断裂带及弯曲带致使边坡岩土体的完整性遭到破坏，原岩整体强度降低，使得边坡的边界条件更加复杂，边坡稳定性的影响因素更为多样。另外，许多矿区属于地下与露天复合开采情况，或拟由露天转为深部井工开采，亦将面临着采动边坡稳定性问题。

我国煤炭科技界对在建筑物、水体及铁路下压煤开采（即“三下”采煤）进行了几十年的研究，取得了丰硕成果，并颁布了相应的行业规程。但边坡下采煤引起的边坡稳定问题是不同于“三下”采煤的另一类问题，我们称为“四下”采煤问题，对于此类问题，因其复杂性和多样性所限，现有的研究方法及成果远不能满足实际需要。由于对采动边坡的稳定性缺乏研究，致使边坡下采矿曾经酿成巨大的灾难。它一方面涉及大量煤炭资源的回收，另一方面又涉及环境影响评价及保护，集中体现了这两者的矛盾，其重要意义不言而喻。将采动边坡稳定性研究、评价作为重大的专门课题，用科学的理论和正确的方法解决边坡下采矿，既能最大限度地回收资源，又能保护地面环境，是各矿区乃至当今中国既紧迫又重大的课题。

采动边坡的变形破坏规律及其稳定性评价在国内外都属于一个较新的课题，尚没有形成完善的基础理论体系，许多关键技术问题，如采动边坡的移动变形预测、采动坡体内应力分布状态、开采方向对采动边坡变形及稳定性的影响规律及机理、边坡稳定性评价方法、监控技术及防治措施研究等，至今未能得到很好地解决。

本书以作者亲身参与或调研的一系列采动边坡、滑坡工程项目为背景，运用现场观测、室内外试验、数值模拟计算等手段和方法，系统地探讨了采动边坡变形破坏规律、机理及稳定性评价方法。主要内容包括：从应力场、岩土体强度、地表形态及工程地质与水文地质条件四方面的变化，分析了采动效应对边坡变形及稳定性的影响；探讨了不同开采方向、开采空间对采动边坡变形及稳定性的影

响规律及机理；以工程地质学、“三下”采煤、岩土力学等传统理论为基础，建立了系统且行之有效的采动边坡稳定性评价方法与体系；提出了采动边坡变形及稳定性变化的时空效应理论，并开展了采动边坡稳定监控技术研究；从地下采矿、边坡支挡、地下水处理、采空区治理等多方面提出了采动边坡稳定控制技术；最后，列举了国内代表性的采动边坡及滑坡稳定性分析评价、监测、支护等工程实例，供读者参考借鉴。本书提出的研究理论和方法可广泛运用于采动边坡稳定性评价工作中，具有极其重要的理论和实际运用价值。

在本书的编著过程中，得到了范士凯勘察大师的热情帮助和指导，还得到了钟祥君、贺林、余春林等同仁的大力支持和配合，在此向他们表示衷心的感谢。

由于本书作者水平有限，书中疏漏错误之处在所难免，敬请广大读者和同仁批评指正。

作 者

2015 年 1 月

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容	8
第 2 章 地下开采引起的岩层与地表移动	9
2.1 岩层移动及破坏规律	9
2.2 地下开采引起的地表移动	18
2.3 实例分析	24
第 3 章 采动边坡变形规律及稳定性分析	42
3.1 采动效应对边坡稳定性的影响	42
3.2 井工与露天复合采动效应下的边坡岩体变形机制分析	46
3.3 采动边坡稳定性影响因素分析	48
3.4 采动边坡变形破坏模式及形成条件	56
第 4 章 采动边坡稳定性评价和预测预报	64
4.1 采动边坡岩土工程勘察	64
4.2 采动边坡稳定性评价	70
4.3 采动边坡稳定监测技术	80
4.4 采动边坡稳定性预测预报	85
4.5 矿山数据库的设计与开发	90
第 5 章 采动边坡稳定控制技术与治理措施	104
5.1 采矿技术措施	104
5.2 采空区治理措施	107
5.3 边坡支挡措施	112
5.4 水处理措施	113
5.5 其他措施	113

第6章	平朔安太堡矿露井联采边坡稳定性评价及变形监测	115
6.1	矿区基本情况	115
6.2	工程地质与水文地质条件	117
6.3	采空区移动变形预计	123
6.4	采动边坡复合应力场及位移场数值模拟分析	125
6.5	采动边坡稳定性评价及预测预报	141
6.6	地表边坡移动变形监测及分析	148
6.7	小结	171
第7章	湖北陈家河煤矿跑马岭山体稳定性评价	173
7.1	工程概况	173
7.2	工程地质与水文地质条件	173
7.3	山体裂缝分布及形成机理分析	176
7.4	数值模拟分析	180
7.5	山体稳定性分析评价	182
7.6	变形观测资料分析	185
7.7	确保山体长期稳定和局部岩体防护措施	189
7.8	小结	189
第8章	山西西山官地矿风峪沟滑坡治理工程	191
8.1	工程概况	191
8.2	工程地质与水文地质条件	191
8.3	滑坡基本特征	194
8.4	滑坡的变形特征	201
8.5	滑坡稳定性分析	204
8.6	滑坡的成因机理	206
8.7	滑坡治理方案及效果	207
8.8	小结	212
第9章	主要研究结论	213
参考文献		216
彩版		

第1章 概述

1.1 研究意义

我国矿产资源多处于山区,大量山体和既有边坡下贮藏了大量煤炭等矿产资源。这些资源能否用井工开采加以回收以及井巷如何布置、煤柱如何留设才能不影响上覆边坡稳定是边坡下采矿设计的重点。另外,当矿层倾斜,矿体埋藏由浅入深,根据矿山开采的经济技术要求,露天矿的开采范围仅限于整个矿体的上部,而深部不适于露天开采的部分矿体则要由地下开采来完成。在此,我们将受采空区采动、变形影响控制的边坡定义为采动影响边坡,或简称采动边坡。

在边坡下采矿,由于采空区周围的岩体应力分布发生变化,并出现采空移动变形与边坡变形相互叠加及相互影响问题,采空区上方出现的垮落带、断裂带及弯曲带致使边坡岩土体的完整性遭到破坏,原岩整体强度降低,使得边坡的边界条件更加复杂,边坡稳定性的影响因素更为多样。它一方面涉及大量煤炭资源回收和井下安全生产,另一方面又涉及地面环境影响的评价及保护,集中体现了这两者的相互影响和矛盾,其重要意义不言而喻,这是矿区乃至当今中国亟待解决的问题,也是工程地质和采矿工程所面临的重大课题。

我国煤炭科技界对在建筑物、水体及铁路下压煤开采(即“三下”采煤)进行了几十年的研究,取得了丰硕成果,并颁布了相应的行业规程。但边坡下采煤引起的边坡稳定问题是不同于“三下”采煤的另一类问题,可称为“四下”采煤问题,对于此类问题,虽在《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》(2000年版)附录十一中作了简单规定,但因其复杂性和多样性所限,远不能满足实际需要。

由于对井工开采影响下地表边坡的稳定性缺乏研究,致使边坡下采矿曾经酿成巨大的灾难。1980年6月3日凌晨,宜昌地区盐池河磷矿区发生灾难性山体崩塌,崩坍山体的体积约 10万 m^3 ,崩坍堆积物摧毁及埋没该矿整个工业广场及民用建筑物,死亡284人;1982年,陕西韩城电厂因邻近的韩城煤矿采空区塌陷,引起电厂地面持续数年隆起变形,使电厂厂房及邻近建筑物产生不同程度破坏;

2009年6月5日,重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山山体因采矿活动发生大规模崩塌,约500万 m^3 山体沿软弱夹层发生整体滑动,掩埋了12户民房和正在开采铁矿的矿井入口,造成10人死亡,64人失踪,8人受伤的灾难性事件。

当然,采矿对地表边坡还有其他形式的影响,如三峡水库库首段的链子崖危岩体,因明清年间在边坡下采煤引起高陡边坡岩体多处拉裂,形成著名的危岩体,虽历经400余年山体仍保持稳定。考虑到蓄水对库岸边坡的影响和再造,在三峡蓄水前还是对其进行了加固处理;湖北陈家河煤矿跑马岭山体下采矿引起山顶产生350m长的大裂缝,山体虽未发生崩塌或滑坡,但也造成了井下停产和当地居民的恐慌。

上述实例表明,我们把采动边坡的稳定性研究、评价作为重大的专门课题,用科学的理论和正确的方法解决边坡下采矿已成为客观的紧迫需要,这样既能最大限度地回收资源,又能保护地面环境。

1.2 国内外研究现状

采动边坡的变形和破坏规律、机理及稳定性评价在国内外尚属于一个较新的课题。目前对在建筑物、水体及铁路下压煤开采引起的岩层移动、地表沉陷及其对建筑物的破坏方面已经做了大量的研究,但在采动边坡移动变形预计、稳定性评价等方面的研究成果甚少。

1.2.1 地表移动变形预计

国内外对地下采矿引起的地表移动、变形问题的研究由来已久。由于我国的特定条件,对建筑物下、水体下及铁路下采煤的研究已有50余年的历史。自1955年颁发《地面建筑物及主要井巷保护暂行规程》以后,1985年颁发了《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》,之后于2000年进行了修订,至今对“三下(建筑物、水体、铁路下)”采煤已取得了大量的研究成果和丰富的经验。《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中推荐的三种预计地表移动变形值的科学计算方法(典型曲线法、负指数函数法和概率积分法)和参数的求取方法等开采沉陷的理论和方法在生产实践中发挥了重要作用。

然而,现有的开采沉陷理论基本上都是以均匀连续介质假设作为理论研究前提,而对于断层、褶曲、山区等特殊地质采矿条件下地表移动规律和预测方法的研究虽取得了一些进展,但尚不能形成完整成熟的研究体系。

屠尔昌宁诺夫在1977年指出,在断层露头处变形集中,而其他地方则显著减

小。英国的 A. J. Lee 等学者在 20 世纪 60 年代通过统计分析认为, 断层有时能吸收变形, 断层滑移与开采深度无关, 重复采动时沿断层面往往产生与采厚不成比例的更大滑移量 (张玉卓等, 1989); 张玉卓等 (1989) 通过实测资料分析、理论分析和边界元计算, 研究了平面问题的断层滑移问题, 给出了过断层的剖面下沉方程和边界元计算程序; 张华兴和仲惟林 (1995) 提出了适合断层影响的计算方法——断层影响计算函数。彼图霍夫 (1980) 对褶曲条件下地表移动规律进行了专门研究, 提出了开采向斜煤层时岩层及地表移动的类型, 并按褶曲两翼矿层倾角部分分为三种类型, 研究了各种类型的变形特点及地面出现台阶的条件; 李永树等 (1996) 将褶曲构造矿层按轴线划分为单斜构造矿层和对开采区域实现曲面积分的方法, 给出了曲面分布矿层和任意形状工作面开采条件下地表移动的预测方法。在山区开采地表移动变形预计方面, 颜荣贵和李文秀 (1981) 运用开采影响理论中直线传播原理导出了山区地面下沉的剖面方程; 1981 年, 伍俊鸣和田家崎根据监测资料假设山区地表移动是单纯开采作用和采动影响下的滑坡作用两因素的综合影响, 并将实测曲线分解为两种因素的单独影响曲线; 何万龙 (1981, 1983) 将山区地表移动分为开采影响下平地移动和滑移影响下的移动, 给出了不同影响条件下的影响函数。

20 世纪 60 年代后期, 随着计算机的广泛应用, 数值计算在岩土力学中得到广泛应用, 并开始应用于开采沉陷计算和机理分析, 取得了可喜的成绩。近年来, 随着离散单元法的兴起, 采用离散单元考虑下部垮落带岩体, 以及有限单元或边界元模拟弯曲部分岩体已成为研究的重点。数值方法以岩石力学理论为基础, 以煤岩物理力学参数和地层构造特性为计算依据, 由于单元的灵活性, 数值计算方法对于任意形状的工作面都能计算, 从而在一定程度上克服了经典预计方法的不足, 是一种很有发展前途的方法, 关键是要建立符合实际的介质模型和选取恰当的预测参数。

1.2.2 采动边坡岩土体变形规律研究及稳定性评价

目前, 国内外关于井工开采对边坡岩土体变形规律及稳定性影响规律的分析研究相对较多, 而对于采动边坡稳定性的分析评价方法则相对较为欠缺。

孙世国等 (2000) 通过对多个矿区监测资料及数值分析, 提出采动效应具有“空间”属性及“记忆”属性, 其中, “空间”属性是指开挖对围岩的作用大小, 与距离和方位相关, 开挖效应对不同范围岩体作用是不一样的; “记忆”属性是指矿山岩体工程开挖过程中岩体内的力学效应变化与其应力状态之间的函数关系, 边坡岩体内部的现时应力状态取决于变形的整个以往历史, 也就是与开挖方式和

开挖步骤相关。他认为边坡岩体的稳定程度与地下采区之间的相对空间位置直接相关,边坡的稳定系数是下沉、水平移动、水平变形、倾斜和曲率的函数,不同空间位置上的变形参量大小值不一致,并取决于采煤方法、顶板管理方法、地质构造的分布情况、岩性强弱等多种因素的共同作用。采动边坡稳定性评价应考虑地下采动的影响因素,并通过理论推导出采动边坡稳定性系数计算公式。

西安建筑科技大学的侯殿昆(2005)根据底摩擦实验和相似材料模拟实验,并结合有限元模拟及现场实测分析认为:由于边坡的存在,造成了采空区上方地表、岩层几何上的不对称性,采空区上覆岩土体在发生跨落时易形成偏压,对边坡坡脚岩体产生较大的推动作用,边坡岩体由于这一推动而产生移动,边坡岩体下部进行井采时边坡岩体总的位移趋势是岩体的下沉和向露天矿场方向的运动;井工开采后采空区上方形成“三带”,使岩体破裂,强度降低,在一定的外力作用下产生变形、破坏的可能性增大,边坡的稳定系数有所降低;井工开采后,出露于边坡面的弱面承受的顺层剪应力增大,顺倾斜部分弱面易于发生剪坏,边坡整体的滑落模式为上方沿追踪滑面,下方沿弱层面及跨落破碎带滑动,同时存在出现局部滑动的可能。

徐杨青和吴西臣(2010)以山西平朔安太堡矿露井联合开采为依托,通过数值模拟及现场位移监测资料对比分析,探讨了露天矿高边坡在顺坡、逆坡及侧向切坡开采三种情况下的复合应力场和位移场的分布特征及规律。研究认为,边坡内井工开采不利于边坡稳定性,但由于工作面推进方向不同,边坡受采动影响部位的顺序不同,因而对边坡稳定性的影响存在一定的差异。逆坡开采时,随着工作面向坡内推进,边坡前、后期表现出两种完全不同类型的变形位移,前期以倾倒型崩塌破坏为主,后期稳定性有所增强;顺坡开采时,边坡保安煤柱宽度不断减小,在侧向偏压作用下,边坡将产生沿软弱结构面的推动式剪切滑动;边坡下切坡开采时,边坡除发生沿软弱结构面的推动式剪切滑动外,还可能发生后缘沿采空裂隙、下部沿软弱层面的张拉滑动变形。

边坡稳定性受多种因素的影响,主要有岩性、岩体结构及地质构造、水文地质条件、地形地貌、地震及人类工程活动等。边坡的破坏形式主要表现为滑坡和崩塌。滑坡是边坡部分岩土体在重力作用下,沿一定的软弱面,缓慢地整体向下移动,具有蠕变变形、滑动破坏和渐趋稳定三个阶段,有时也具有高速急剧移动现象;崩塌是整个岩土块体脱离母体,突然从较陡的边坡上崩落、翻转、跳跃、堆落在坡脚,规模巨大的称为山崩,规模较小的称为塌方。

边坡稳定性评价方法也从单一向多元化发展,常用的有:自然历史分析法、力学算法、图解法、工程地质类比法、数值分析法和模型试验法。上述边坡稳

定性分析评价方法总体上可分为定性和定量评价两大类。由于影响边坡稳定的不确定因素很多,往往需要采用多种方法进行综合评价。

极限平衡法作为最基本、最简单的方法得到广泛应用,其分析结果通常作为设计依据。最早是1915年瑞典人 K. Petterson 提出的瑞典条分法;1927年 Fellennius 等在此基础上提出了普通条分法,该方法将边坡滑面假定为圆弧形,满足力矩平衡条件,但不满足力平衡条件;1955年 Bishop 提出了修正的条分法,该方法也假定边坡滑面为圆弧形,它满足力矩平衡条件和垂直方向的力平衡条件,但不满足水平方向的力平衡条件;1957年 Junbu 提出了更精细的条分法,适应于任意形状的滑动面,并在1968年和1973年进行了改进;1974年 Hoek 提出了进行边坡楔形体分析的方法,假定各滑动面均为平面,以各滑动面总抗滑力与楔体总下滑力来确定安全系数;Revilla 和 Castillo 在1977年提出了剩余推力法;Sarma 在1979年提出了“非垂直条分法”,他认为除平面和圆弧面外,滑动体必须先破裂成相互滑动的块体后才能滑动。剩余推力法和 Sarma 法在岩质边坡的稳定性分析中得到了广泛的应用。

数值模拟方法将岩土体看成变形体,可以有效地模拟材料的应力和应变关系,还可以处理复杂的边界条件以及材料的非均匀性和各向异性,可以有效地模拟边坡内的应力分布、塑性区的范围和位移场分布等。数值模拟技术为定量评价边坡稳定性问题创造了条件。有限单元法开始应用于研究边坡稳定问题始于20世纪60年代。随后发展了边界元、离散元、不连续变形分析、数值流形方法、运动单元法、快速拉格朗日法等数值方法。

模型试验法,按试验方法可分为块体结构模型试验、底面摩擦试验和离心模型试验。这类试验最大优点是可以比较直观定性地显现边坡稳定条件和变形破坏发展过程,但由于模型材料的各种力学参数很难严格地满足相似条件,同时岩体结构及其力学参数具有随机性、模糊性,故该类试验难以定量化分析。

对于采空区上边坡稳定性分析评价主要有三种:一是仅按单一露天开采问题来考虑,不考虑井采对边坡岩土体强度、应力分布状态、变形等相关影响,致使其结论往往失真;二是采用数值方法模拟井工开采条件下边坡中应力重新分布状态及变形规律,进而评价其稳定性,目前也逐渐被应用到采动边坡的稳定性评价中,但由于数值模拟时所选用的参数、本构方程、模型等均存在一定的假设,致使其结果与实际情况存在一定的差异;三是如《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》附录十一中介绍的采动坡体稳定性预测计算公式,其是在传统的条分法的基础上叠加了地表移动参数而推导出的,因其计算参数较多且必须通过现场监测资料获取,实际操作中存在较大困难。

中国煤炭集团武汉设计研究院在自 20 世纪 80 年代中期至今近 30 年的时间里,陆续深入研究了湖北陈家河煤矿、湖北远安盐池河磷矿、陕西韩城电厂、三峡链子崖危岩体、平朔煤炭工业公司安太堡矿露井联合开采边坡稳定性监测、山西西山煤电集团官地矿风峪沟滑坡等采空区上边坡的稳定性问题,取得了较全面、系统的研究成果,总结出了一套比较系统的研究内容、步骤和方法,即基础工作(工程地质调查、测绘、分区,三下采煤分析及预测,岩土体工程地质力学研究)→采空区与边坡复合应力场的数值计算(不同性质应力区的分布及动态变化)→采空地表移动变形对各工程地质区段的影响分析(结构面产状及闭张状态、岩体强度及地下水的变化)→边坡稳定性分析判断(结构面组合稳定性判据、极限平衡验算、工程地质比拟判断)→采动边坡的稳定状态及加固处理措施(边坡仍保持稳定;或边坡将产生整体滑移、局部倾倒或崩塌;或在地表移动区外侧产生鼓胀、隆起)。与此同时,建立了精准的地面观测网和重点地段的地下观测点,进行适时监测(验证和预报)。这是国内外迄今为止所见最系统且行之有效的研究体系,可作为“三下采煤”之外的“四下采煤”——边坡下采煤问题研究的工作指南。

1.2.3 边坡监测及稳定性预警预报

目前,国内外边坡监测的技术已经从人工皮尺简易工具的监测手段过渡到仪器监测,正向着自动化、高精度及远程监测系统方向发展。

地表位移监测是边坡监测的重要组成部分之一,可以准确掌握边坡整体的变形特征,圈定滑坡破坏的范围,具有测程远、操作简便、可及时直观反映坡体变形规律的特点。目前地表监测仪器可分为两类,一类是控制测量中采用的经纬仪、水准仪、红外测距仪、全站仪及 GPS 等;另一类是用于地表位移监测的专用仪器,如裂缝计等。由于露天矿特殊的使用条件,对固定的测量设备的量程、测距、通视条件提出了高要求,加之防护困难,易于受到损害。综合考虑各方面因素,对研究区地表变形监测采用 GPS 快速静态法进行测量。GPS(全球卫星定位)测量技术与传统的测量技术相比,具有全球范围、全天候、全时域、连续快速、高精度、能同时测定测点的三维位移以及易于实现全系统的自动化等优点。而且该法可以同时测定测点的三维坐标,对于运动的观测点还能精确测出其运动的速度。因此,GPS 测量技术在露天矿测量工作中精确定位和实时监控的控制测量、边坡监测等方面具有广泛的应用前景,对露天矿传统测量工作方式将产生巨大的革命性转变,以及良好的经济效益和社会效益。

按照时空关系,滑坡灾害预测预报可分为空间和时间两大类。空间预测是时

间预测预报的先决条件,只有在明确了预测的对象之后,方可有目的地开展滑坡灾害的时间预测预报。因而,一般地讲,滑坡灾害空间和时间预测具有先后次序关系,但从减灾的角度考虑,两者又具有相对的独立性,即可以在时间预测之外进行空间预测。空间预测能够为人类活动选择稳定性较好的地段,以保障生命和财产尽可能免遭滑坡的袭击。

依据研究区范围和目的不同,滑坡预测大致可分为三类,即区域性预测、地区性预测和场地预测。空间预测的基础是边坡破坏形成条件的分析,通过工程地质调查,具体分析各种因素在边坡破坏中所起的作用,然后将各因素按一定的原则和方法进行组合来预测不同地段发生失稳的可能性。场地性的滑坡灾害空间预测是以详细的工程地质勘察资料为基础,确定滑坡发生的地质结构类型,调查和预测滑动面的位置及侧向边界,分析可能影响滑坡稳定性的主要因素,并对滑动面和滑坡体进行取样与强度参数的测试。通过相适应的稳定性计算模型预测计算滑坡或边坡在可能的自然和人工因素作用下的稳定性系数,或采用可靠性分析模型预测分析滑坡或边坡的破坏概率,为滑坡整治工程提供定量的依据。场地性预测结果的可靠度是以详细的工程地质勘察资料和严格的数学力学模型分析来保证的。

滑坡灾害发生时间的预测预报是要确定滑坡在未来可能发生的时间区段或确切时间,为提前采取必要的预防措施提供科学依据。按照预测预报时间的长短,时间预测预报可分为长期预测、短期预测和临滑预报。根据预测模型数学表达式的特点,可分为确定性数学模型、非确定性模型、类比分析及半定量模型、宏观变形破坏迹象定性分析等几类。

确定性模型具有显式的数学方程,包括斋藤迪孝模型、边坡失稳前的总变形量位移速率的综合预报法(王思敬等,1984)、黄金分割模型(张倬元等,1988)、梯度-时间正弦法(崔政权,1992)、曲线拟合模型、蠕变-样条联合模型、Verhulst模型、Pearl模型、灰色GM(1,1)模型等;非确定性模型包括时间序列分析模型、非线性动力学模型、灾变模型、神经网络模型等,这类模型可能无确定的数学表达式;类比分析及半定量分析方法通常考虑多种因素对滑坡稳定性的影响,包括类比分析预测方法、模糊数学模型、专家系统等;宏观上往往均有一定的变形破坏迹象,如监测的变形速率明显加大,宏观调查可发现裂缝明显加大、地下水与声发射监测异常、动物活动异常等,这些宏观变形迹象预示滑坡即将发生,可作为临滑预报的重要依据。

1.2.4 存在的主要问题

由于技术条件等方面的限制,目前在采动边坡的稳定性分析及预警预报系统