

李军,褚宏亮,李滨,等.西南煤系地层山区采动型崩滑灾害研究关键问题[J].中国岩溶,2020,39(4):453-466.
DOI:10.11932/karst20200401

西南煤系地层山区采动型崩滑灾害研究关键问题

李军^{1,2},褚宏亮³,李滨¹,贺凯¹,高杨¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;
2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要:文章在分析采矿型崩滑灾害发育特征的基础上,得出西南煤系地层山区地下采动型崩滑灾害常发生在层状碳酸盐岩与碎屑岩地层组成的褶皱翼部和核部的陡崖带上,与地形地貌、地层结构与地下采矿工程活动等因素关系密切,并指出薄矿层开采诱发大型山体崩滑灾害的具体过程:①采空后覆岩顶板塌落—覆岩顶板离层,采空区上覆岩层内部及层间自下而上应力传递;②地下水运移通道形成,并加快更大范围岩体结构破坏及扩展,加速了岩体结构面的松动与破坏;③上覆岩层不均匀沉降导致坡脚压裂,山体大型岩体结构面逐渐拉剪或压剪变形扩展,最终山体发生累积损伤与大规模崩滑灾害。此外,传统经验公式的计算方法对此类采矿型崩滑灾害已不适用,建议开展西南煤系地层山区地质结构与地下采动诱发崩滑灾害的相互作用关系、薄矿层采空区上部山体累积断裂损伤—岩体松动、裂隙扩展—岩溶管道流、裂隙流变化的链式响应机制、地下采动型崩滑灾害评价方法等关键科学问题的研究,以推动采矿型地质灾害防灾减灾工作的发展。

关键词:西南煤系地层;地下采矿;崩滑;关键科学问题

中图分类号:P642.2 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)04-0453-14 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

地下采矿作为最主要的采矿方式之一,在满足人类能源需求的同时,存在的地下采空区也改变了采空区岩层初始应力环境与矿区工程地质条件,这不仅造成地表沉降和建筑物变形破坏,也会导致采空区山体斜坡失稳滑动,引发严重的地质灾害事故。20世纪以来,国内外先后发生了多起重大地下采动型山体滑坡事故,例如,1903年加拿大阿尔伯特发生的Frank滑坡,崩滑体积达 $3\ 000\times 10^4\text{ m}^3$,伤亡人数达106人,掩埋了下方Frank镇的东南区域及铁路^[1];1966年英国南威尔士发生的Aberfan滑坡,崩滑体积约 $10\times 10^4\text{ m}^3$,伤亡人数达144人,掩埋了当地初中校

区^[2]。据统计,2004-2016年全球发生采动型滑坡达299次,死亡人数达1 500余人,其中印度、印度尼西亚、中国、巴基斯坦和菲律宾五个国家占比较高^[3]。中国自20世纪五十年代以来,随着经济的快速发展,地下采矿活动迅速增加,由于有三分之一的煤矿及其他矿种埋藏于山区,经常发生体积为几万方到几千万方不等的山体崩滑灾害,造成多起群死群伤事故,且每年因地下采矿引发崩滑灾害所造成的直接经济损失高达数百亿元^[4-5],中国已成为地下采矿活动触发崩滑灾害事故最严重的国家之一。其中在中国西南煤系地层山区,由于地下采动诱发了多起高位链式崩滑,造成多起灾难性地质灾害,这是目前防灾减灾工作中的难点,例如,湖北宜昌盐池河崩塌^[6]、

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504806);国家自然科学基金(41907257)

第一作者简介:李军(1990—),男,博士研究生,主要从事工程地质和地质灾害研究。E-mail:ljedu@foxmail.com。

通信作者:褚宏亮(1981—),男,高级工程师,主要从事地质灾害防灾减灾研究。E-mail:52572706@qq.com。

收稿日期:2020-05-10

湖北秭归链子崖危岩体^[7]、湖北秭归新滩滑坡^[6]、贵州开阳金中镇磷矿带^[8]、重庆武隆鸡冠岭滑坡^[9]、云南元阳老金山滑坡^[10]、重庆武隆羊角场镇危岩带^[11]、重庆南川甄子岩崩塌^[12]、贵州都匀马达岭滑坡^[13]、重庆武隆鸡尾山滑坡^[14]、重庆巫山望霞危岩^[15]、贵州凯里渔洞村崩塌^[16]、贵州纳雍普洒崩塌^[17]等30余处地下采动型崩滑灾害。

西南煤系地层山区由于特殊的地质结构,主要在较薄的松散黏性土层、软弱岩层和厚层、巨厚层硬岩体之下开采薄矿层,其与平原地区在较厚的松散黏性土层和软弱岩层之下开采中厚矿层所引起的覆岩变形破坏与地表斜坡变形破坏等的灾害发育特征、破坏机制、破坏模式以及评价方法存在很大区别,研究难度大,是国内专家学者探究的热点和难点问题。本文在分析西南煤系地层山区典型地下采动型崩滑灾害特征的基础上,结合国内外关于地下采矿诱发山体崩滑灾害破坏机制、评价方法的研究现状和成果,探讨西南煤系地层山区薄矿层开采所诱发崩滑灾害的破坏机制,指出了目前亟待开展的关键科学问题,以期为西南煤系地层山区采矿型地质灾害防灾减灾研究提供科学参考。

1 西南煤系地层山区采动型崩滑灾害特征

1.1 典型采动型崩滑灾害案例分析

西南煤系地层山区构造上属扬子地台,受长期地质构造运动以及河流侵蚀的影响,中国川渝、滇黔、湘鄂等西南部山区形成了山高坡陡、河谷深切、“V”型峡谷与厚层—巨厚层悬崖陡壁等复杂多样的地形地貌环境,在岩体强度和岩体结构面的双因素控制下,同时在地下采矿等人类工程活动的影响下,该地区地下采动型崩滑灾害表现出隐蔽性高、突发性强、孕灾机理错综复杂、影响范围广、致灾性高等特点^[15,18-20]。选取重庆南川甄子岩崩塌、贵州纳雍普洒崩塌、贵州都匀马达岭滑坡以及重庆武隆鸡冠岭岩崩4处西南煤系地层山区典型的地下采动型崩滑灾害,分析其地质环境条件、坡体地质结构、斜坡失稳控制因素,总结出斜坡不同的破坏机制和失稳模式。

(1)甄子岩崩塌发生于2004年8月12日12:53,位于重庆市南川区金泉铝矿厂东侧,崩塌体形状为塔柱状,崩塌体高度为240 m,体积为 $56 \times 10^4 \text{ m}^3$,崩塌产生的碎屑流最远运动距离达0.8 km,由于提前预警撤离,保证了坡脚下方村镇、厂矿500余人的生命安全。

该坡体处于金佛山向斜二级陡崖带上,单面临

空,主崩方向为 200° ,岩层产状为 $300^\circ \angle 7^\circ$,属于近水平层状斜坡。坡体上部地形相对较陡,顶部近乎直立,而下部地形趋缓,呈现上陡下缓的“靴状”形态,为两级陡崖地貌,崩塌体岩性为二叠系茅口组(P_1m)灰岩,下部软弱基座为二叠系茅口组碳质页岩,属于典型的“上硬下软”的二元山体结构。该坡体采矿活动于1983年开始,所采矿体为铝土矿,采厚为1.15 m,其埋藏于二叠系梁山组(P_1l)黏土层中,采空区距离崩塌体底部损伤位置达120 m,距离坡体后壁达400 m,至2004年,采空区已覆盖甄子岩一级陡崖西北侧以及二级陡崖全区,面积达 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在地下采矿作用影响下,后缘坡肩处发育有2组近直交的陡倾节理裂隙,将上部硬岩切割成“塔柱状”岩体,同时采动作用引起硬岩底部的页岩软弱层发生不均匀沉降,致使其上的硬岩底部区域遭受不同程度的损伤劣化,岩体强度大幅降低,稳定性较差,同时纵向深大裂隙因岩溶作用继续向深部扩展,最大深度达210 m,坡体最终表现为“塔柱状压裂溃屈式”破坏^[21](图1)。

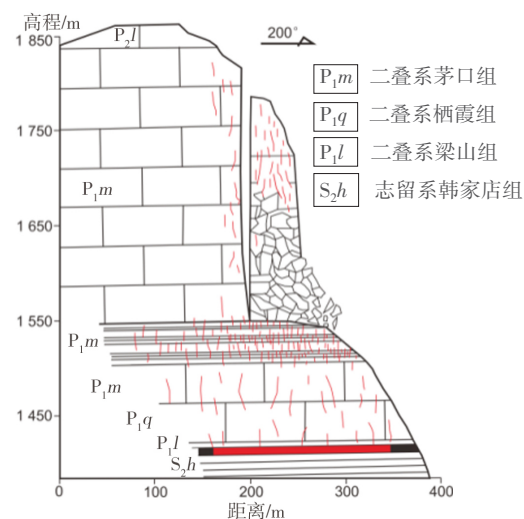


图1 重庆南川甄子岩崩塌失稳模式工程地质示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing failure model of Zengziyan landslide in Nanchuan, Chongqing

(2)普洒崩塌位于贵州省毕节市纳雍县张家湾镇普洒村老鹰岩组,所在坡体于2009–2015年期间出现少量裂缝和小型崩塌,2016年开始加速变形,于2017年8月28日发生大规模崩塌,崩滑体积为 $49 \times 10^4 \text{ m}^3$,崩滑体剪出后,在运移、铲刮坡表松散崩坡积物长达0.8 km后,最终在坡脚处形成体积为 $82 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的堆积体,相对高差达230 m,造成坡脚处普洒村大树脚组和桥边组居民区35人死亡,500余人受灾。

该崩塌所处斜坡整体为单斜构造,两面临空,崩滑方向为 305° ,岩层产状为 $180^\circ\angle 7^\circ$,为近水平层状斜坡。崩滑体主要为三叠系夜郎组(T_1y)灰岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩等,下部软弱基座主要为二叠系龙潭组(P_3l)粉砂质泥岩和泥质粉砂岩及夹在其中的煤层,由于软硬岩体差异性风化作用,表现为典型的“上硬下软,软硬相间,上陡下缓”的二元结构山体。同时,山体顶部发育有3组陡倾优势节理,优势节理与岩层层面将岩体切割成“碎块状”。崩塌体所处区域为普洒煤矿开采范围,该煤矿于1995正式开采,坡体下伏可采煤层共计6层,平均采厚为1.35 m,采空区距离崩滑体剪出口位置达160 m,距离坡体后壁达260 m,地下多层采矿作用导致坡体后缘发育多处平行于坡面的张拉裂缝和大型拉裂槽,最大开裂深度达50 m,由于后缘张拉裂缝和拉裂槽的卸荷作用,造成了上部“碎块状”硬岩向临空侧发生倾倒变形,同时后缘张拉裂缝和拉裂槽的存在也为降雨提供了良好的入渗通道,雨水加剧了上部灰岩强烈的岩溶作用以及其对下部软弱基座的软化作用,促使上部硬岩随下部软岩发生蠕滑变形,在多种因素综合影响下使斜坡岩体强度骤然降低,滑动面由后缘向坡脚处逐步贯通,最终使坡体表现为“上部硬岩倾倒破碎解体一下部软岩滑移失稳”^[17,22](图2)。

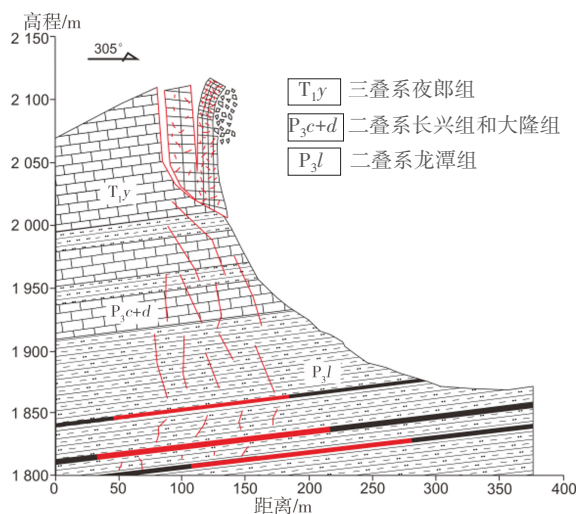


图2 贵州纳雍普洒崩塌失稳模式工程地质示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing failure model of Pusa landslide in Nayong, Guizhou

(3)马达岭滑坡发生于2006年5月18日4:00,位于贵州省黔南州都匀市毛尖镇,滑体深度约50 m,滑体体积为 $190\times 10^4\text{ m}^3$,剪出后在沟谷中不断碰撞、铲刮形成长达1.4 km的远程碎屑流,相对高差达420 m,

冲毁公路和农田。

该坡体双面临空,主滑方向为 172° ,岩层产状为 $286^\circ\angle 16^\circ$,属于缓倾层状逆向斜坡。坡体顶部较陡,主要为石炭系祥摆组(C_1x)砂岩,下部较缓,其软弱基座为石炭系祥摆组石英砂岩夹薄层炭质页岩和煤层,整体为软—中硬岩体,呈现“上陡下缓,软硬相间”的山体结构。坡体下伏4层煤,采用走向长壁采煤法,平均采厚为1.5 m,采空区距离崩滑体剪出口位置达50 m,距坡体后壁约50 m。地下采矿活动首先引起覆岩弯曲—下沉—拉裂,致使坡体后缘出现多条近似正交的陡倾深大裂隙,最大开裂深度达40~50 m;随着采矿活动持续进行,地表开始发生明显沉陷现象,对纵向裂隙外侧岩体形成了一个向临空侧的推力,同时雨水沿深大裂隙的入渗促使坡体内部形成动静水压力,以及雨水对于炭质页岩具有较强的软化作用,在综合作用影响下,坡体发生塑流—拉裂;随着斜坡不断向临空侧变形移动而压碎底部煤柱,斜坡整体处于蠕滑—拉裂阶段,此时裂隙不断向深部扩展,直至与采空区及坡脚处软岩形成贯通的剪切破坏面,而发生整体“剪切—滑移”破坏^[13](图3)。

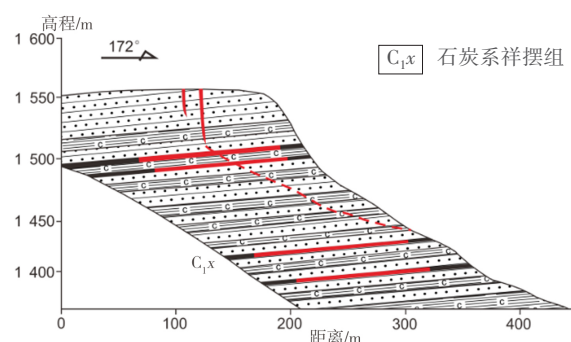


图3 贵州都匀马达岭滑坡失稳模式工程地质示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing failure model of Madaling landslide in Duyun, Guizhou

(4)鸡冠岭滑坡发生于1994年4月30日11:45,位于重庆市涪陵地区武隆县兴顺乡乌江左岸,滑体体积为 $400\times 10^4\text{ m}^3$,崩滑体分别从 $NE122^\circ$ 黄岩沟方向和 $NE45^\circ$ 乌江方向崩落剪出后,沿途不断碰撞、铲刮和破碎解体形成高速碎屑流,最终运动1 km后汇入并堵塞乌江,相对高差达700 m,造成17人死亡,中断水陆运输3个月,直接经济损失近亿元。

该坡体位于桐麻湾背斜西翼,两侧临空,主滑方向为 122° ,岩层产状为 $300^\circ\angle 75^\circ$,属于陡倾层状横向斜坡。其为典型的“上陡下缓”的“靴状”地形,在褶皱构造引起的集中应力影响下深大裂缝较为发育,

崩滑体整体岩性以二叠系吴家坪组(P_2w^2)和坚硬灰岩为主,下部软弱基座为二叠系吴家坪组(P_2w^1)煤层,属于典型的“上硬下软”地层结构。坡体所在区域煤矿采用掩护支架采煤法,平均采厚为0.65 m,采空区距离崩滑体剪出口位置为50 m,距坡体后壁达270 m,后缘最大开裂深度达120 m,岩体层面和地表裂隙组合成优势控制性节理,将岩体切割成碎裂“板状”块体,同时采空区的形成构成了其上覆岩体的卸荷空间,上覆陡倾层状岩体在自重作用下表现为“悬臂梁效应”,逐层发生弯曲变形、错断、倾倒、相互挤压错动,随着采矿活动的不断进行,上覆破断岩体对于采空区下部阻滑岩体的施压作用不断增大,直至采空区下伏阻滑岩体不足以抵抗上覆岩体倾倒挤压产生的下滑力时(即达到其强度极限时),发生剪切破坏,最终坡体整体表现为“倾倒—滑移式”失稳^[9](图4)。

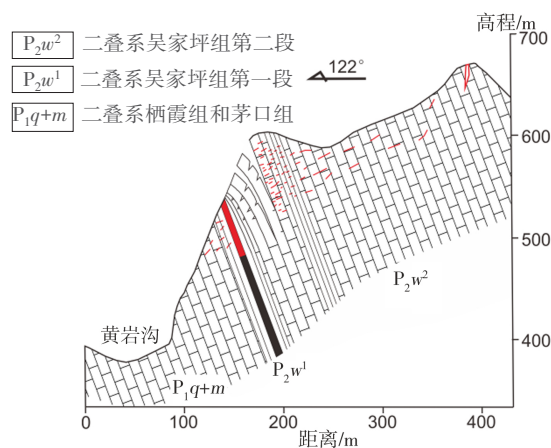


图4 重庆武隆鸡冠岭滑坡失稳模式工程地质示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing failure model of Jiguanling landslide in Wulong, Chongqing

1.2 采动型崩滑灾害地质特征分析

西南煤系地层山区地下采动型崩滑灾害往往发生在层状碳酸盐岩、碎屑岩组成的褶皱构造带的翼部、核部的陡崖带上,与地形地貌、地质构造和岩体结构、地层岩性和斜坡结构、岩溶作用以及地下采矿工程活动等控制因素密切相关,在地下采动作用影响下,具有不同控制因素组合叠加特征的山体将表现出不同的变形破坏特征和失稳模式。

1.2.1 地形地貌

斜坡坡度对于坡体稳定性具有重要影响,崩滑灾害往往发生在河谷深切、坡度陡峻的山地地貌,西南煤系地层山区山体上部地形普遍相对较陡,坡体顶部近乎直立,而下部地形趋缓,表现为典型的“上

陡下缓”的“靴状”地形。

1.2.2 地质构造和岩体结构

上扬子地块褶皱叠加和构造组合,促使西南煤系地层山区山体受构造挤压应力、张拉应力或二者叠加作用影响,大型陡倾优势结构面发育,这些结构面与层面互相作用,将岩体切割成“柱状”、“积木块状”或“板状”的岩体结构,同时结构面间隙经常充填大量的软弱碎石类黏土,形成多个临空面,构成崩滑灾害发生的控制性边界,这是灾害发生的主要因素之一。

1.2.3 地层岩性和斜坡结构

西南煤系地层山区崩滑灾害岩体主要以二叠系和三叠系灰岩、白云岩等碳酸盐岩、砂岩等碎屑岩这些厚层、巨厚层硬岩为主,夹带有4~6层中薄层泥页岩等软岩,具有典型的“软硬相间,上硬下软”的地层岩性组合特征,其为崩滑灾害提供了易滑的物质基础,即是灾害发生的前提条件。不同的地层岩性组合及其构成的斜坡结构,势必会影响崩滑灾害的失稳类型,例如,对于以泥页岩和砂岩软硬互层的斜坡结构,因软岩易遇水软化,斜坡易发生剪切滑移失稳;当斜坡上部岩体以灰岩、白云岩等坚硬岩体为主,底部为薄层软岩时,因软硬岩体差异性风化作用,坡体易发生倾倒失稳;当斜坡岩体全部或大部分为灰岩、白云岩等坚硬岩体时,由于底部碳酸盐岩基座易受溶蚀作用影响,坡体可能发生倾倒失稳,而当底部硬岩受地下采矿扰动发生损伤劣化时,坡体更可能发生坐落式失稳;

1.2.4 岩溶作用

由于西南煤系地层山区山体具有“软硬相间、上硬下软”的“二元结构”特征,灰岩和白云岩等碳酸盐岩的溶蚀作用往往造成该类硬质岩体出现大量岩溶裂隙和溶腔,季节性岩溶管道流作用强烈,地下水活动明显,造成岩体结构及软弱夹层强度衰减,同时关键块体的岩体强度出现损伤劣化,从而影响坡体稳定性。

1.2.5 地下采矿作用

西南煤系地层山区矿产资源丰富,已发现的含矿地层达12层,其中二叠系梁山组和龙潭组地层是主要的采矿地层,开采的主要矿产种类为煤矿、铝土矿、铁矿、磷矿等,矿层厚度普遍较薄,多为0.2~1.5 m,多采用直接垮落法采矿。长期的地下采矿活动使该区域山体内部形成大面积的采空区,其中采空区位置、范围和采动顺序、采动方向以及采掘过程中爆破震动作用都会促进山体顶部构造裂隙发育、扩展、贯通以及山体底部岩体损伤劣化、差异沉降,严重影

响山体稳定性,甚至经常诱发大规模的崩滑灾害,且采空区距离滑坡剪出口或崩塌体底部损伤位置超过100 m的现象普遍存在。

2 地下采矿诱发山体崩滑灾害破坏机制

地下采矿诱发的山体崩滑灾害主要由采空区覆岩顶板破坏和山体破坏两部分构成。首先地下采空后覆岩顶板塌落—覆岩顶板离层,采空区上覆岩层内部及层间自下而上应力传递,加速了岩体结构面的松动与破坏,地下水运移通道形成并加快更大范围岩体结构的破坏及扩展,继而逐步影响上覆岩层不均匀沉降,导致坡脚压裂、大型岩体结构面逐渐拉剪或压剪变形扩展,最终山体发生累积损伤和大规模崩滑灾害。

2.1 地下采空区覆岩变形破坏机制

采动的影响主要指采空区上方覆岩的应力场变化、开裂冒落性破坏以及整体性移动^[23]。地下采动作用将引起覆岩弯曲变形、离层破断、塌陷冒落、整

体移动变形,最为典型的是“三带型”变形破坏形式,即采空区覆岩自下而上分为冒落带、导水裂隙带(裂隙带和弯曲下沉带)^[24],其中采矿厚度将决定导水裂隙带的最大高度。采空区上部不同的覆岩规模及其岩性与组合结构会直接影响覆岩变形破坏特征,因此在地质采矿条件下,采空区上覆岩层内还会产生其他类型的变形破坏形式,如“抽冒型”、“拱冒型”、“弯曲型”和“切冒型”等^[25-26]。

欧洲一些采矿发达国家关于采空区上覆岩体移动变形破坏特征和机理的研究开始得较早,19世纪60年代起,提出了许多假说、理论和模型(图5),如悬臂梁假说、压力拱假说、铰接岩块假说、预成裂隙假说。中国研究人员钱鸣高等^[28-30]基于前人研究和大量矿区的现场监测数据,认为开采层状矿体后,覆岩的基本结构形式为“砌体梁”结构力学模型,且此结构基本失稳形式包括滑落(S)失稳和回转(R)失稳两种类型。而之后认为采场岩层移动、变形、破坏以及矿压变化等主要由覆岩中一层或多层坚硬岩层控制,随之又提出了“关键层理论”和关键层的判别准

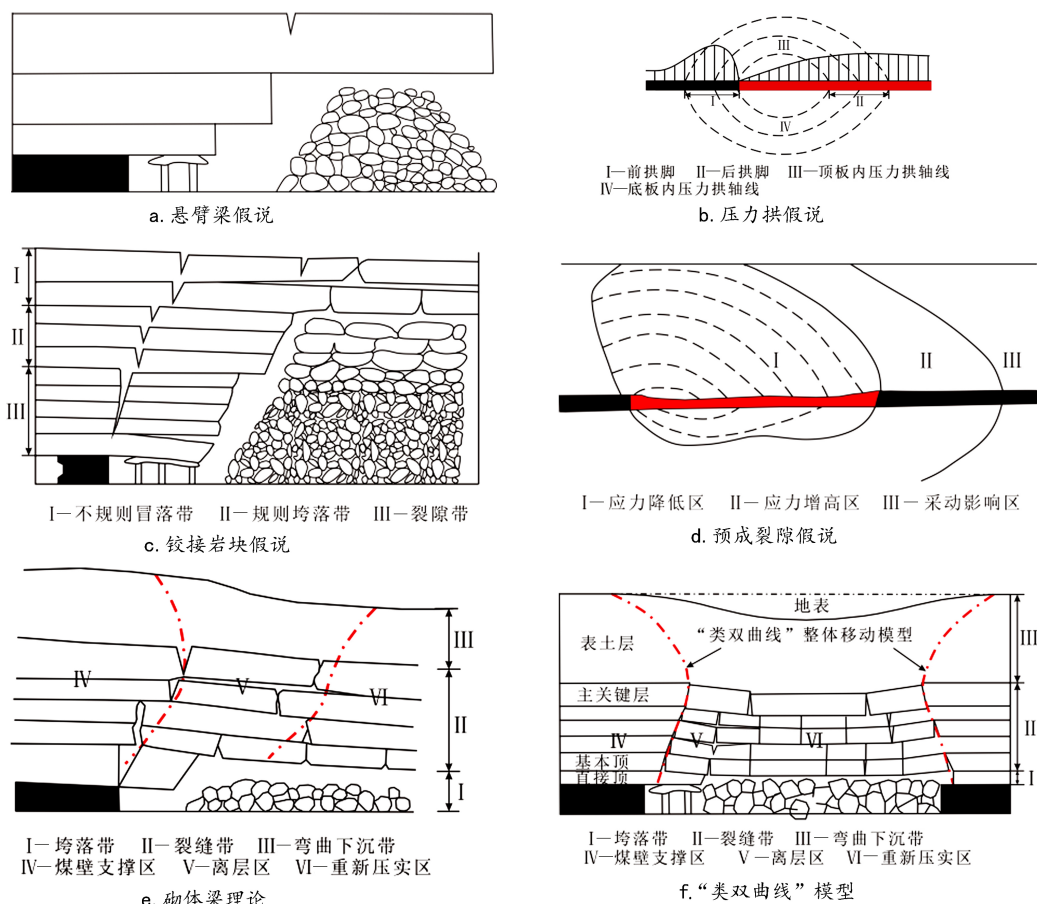


图5 采空区覆岩断裂假说理论模型^[27]

Fig. 5 Theoretical models of overlying strata fracture hypothesis in goaf^[27]

则,此研究促使中国在采场矿压与岩层移动控制领域的研究提升了一个新高度。随着研究人员对于采空区覆岩变形破坏机理认识的逐渐深入,何满潮等^[31]尝试从岩体变形角度解决覆岩失稳问题,认为采场覆岩变形问题属于非线性大变形力学范畴,从而提出利用大变形有限元法来解决采空区顶板梁的弯曲大变形、软弱夹层剪切大变形、岩块转动大变形以及采场顶板垮落大变形等问题,这一新颖的认识对于后期科研人员研究覆岩移动大变形问题具有重要意义。近年来,左建平^[32]提出了“类双曲线”模型,从力学的角度阐述了采空层覆岩变形破坏机理。

随着对机理研究的不断深入,近年来部分研究人员^[33]将在地下开采卸压作用下,最初处于稳定状态下的采空区覆岩由下至上逐层发生弯曲变形、离层破断、塌陷冒落这一过程依次抽象成固支梁、三铰拱力学模型和悬臂梁力学模型(图6,图7,图8),岩层按照不同力学模型的最大暴露长度的破断规律逐层破断冒落,进而对采空区覆岩垮落成因机制进行力学解析,见式(1)、式(2)、式(3)。通过对比地层 $n-1$ 和 n 之间的间隔距离是否为零,得出覆岩破坏转移过程是否继续的判据,见式(4)和式(5)。当覆岩破坏转移过程结束时,此时覆岩导水裂隙带达到最大值,这将引起地面差异性沉降,并多以地表裂缝的形式表现出来(图9)。

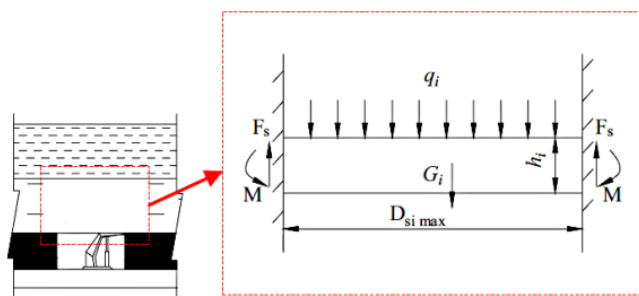


图6 固支梁力学模型

Fig. 6 Mechanical model of fixed beam

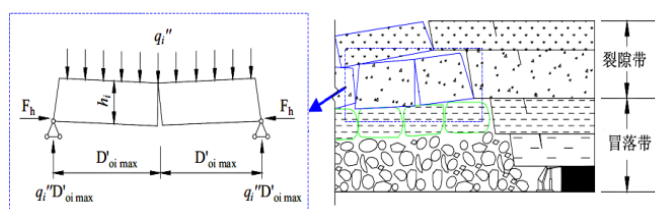


图7 三铰拱力学模型

Fig. 7 Mechanical model of three-hinge arch

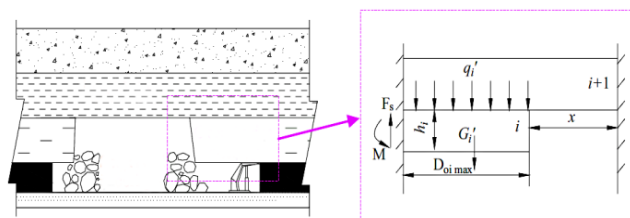


图8 悬臂梁力学模型

Fig. 8 Mechanical model of cantilever beam

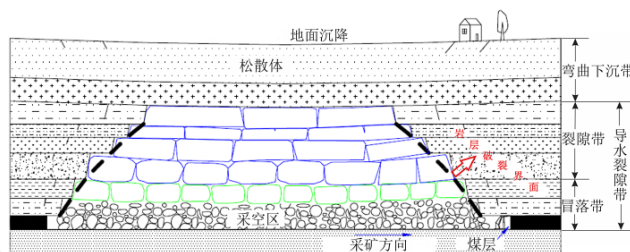


图9 覆岩垮落状态示意图

Fig. 9 Schematic diagram of collapse state of overlying rock mass

$$D_{si \max} = h_i \sqrt{\frac{2R_T}{q_i + k_i}} \quad (1)$$

$$q_i = \frac{E_i h_i^3 (\gamma_i h_i + \gamma_{i+1} h_{i+1} + \dots + \gamma_n h_n)}{E_i h_i^3 + E_{i+1} h_{i+1}^3 + \dots + E_n h_n^3}$$

$$k_i = \gamma_i h_i$$

式中: $D_{si \max}$ 为地层 i 固支梁力学模型最大暴露长度; h_i 为地层 i 厚度; R_T 为地层 i 抗拉强度; k_i 为地层 i 上的重力荷载; q_i 为地层 i 无支撑部分的累积荷载; E_i 为地层 i 的弹性模量; γ_i 为地层 i 的容重。

$$D'_{oi \max} = \sqrt{\frac{2F_h h_i}{q'_i + k_i}} \quad (2)$$

式中: $D'_{oi \max}$ 为地层 i 三铰拱力学模型最大暴露长度; F_h 为地层 i 水平推力; q'_i 为地层 i 相邻块体上的累积荷载。

$$D_{oi \max} = h_i \sqrt{\frac{R_T}{3(q'_i + k_i)}} \quad (3)$$

式中: $D_{oi \max}$ 为地层 i 悬臂梁力学模型最大暴露长度; q'_i 为地层 i 稳定悬伸部分的累积荷载。

地层 $n-1$ 和 n 之间的间隔距离:

$$\Delta_{n-1,n} = m - \sum_{i=1}^{n-1} h_i (K_i - 1) \quad (4)$$

式中: m 为煤层厚度; $\sum_{i=1}^{n-1} h_i$ 为地层1至 $n-1$ 的总厚度; K_i 为岩石的膨胀系数。

覆岩导水裂隙带最大高度判别标准:

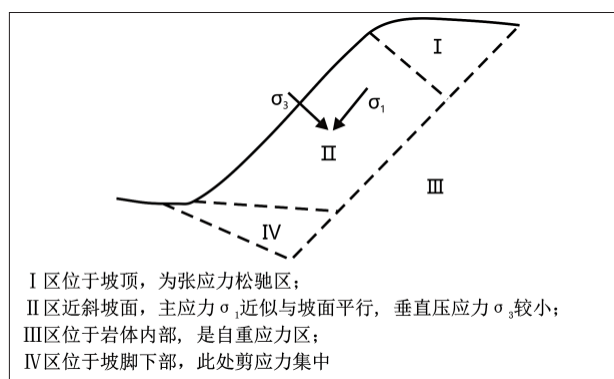
$\Delta_{n-1,n} > 0$ 时,覆岩破坏转移过程继续进行

$\Delta_{n-1,n} \leq 0$ 时,覆岩破坏转移过程结束 (5)

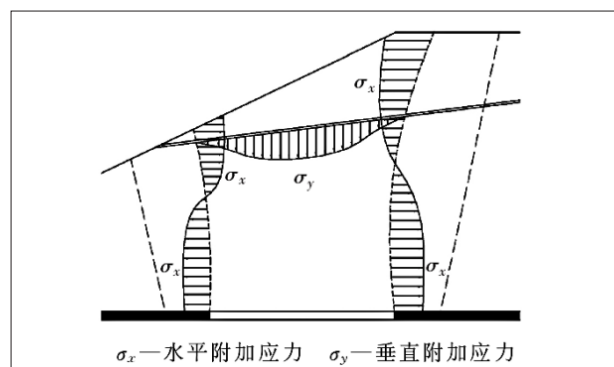
2.2 地下采空区山体变形破坏机制

斜坡体在不同的地下采空环境下,不仅会引起坡体内部多维度应力状态的变化,而且会引起坡体内部和表面多参量的改变,主要包括坡体应力场等地质力学性质、坡体区域的工程地质条件、岩石材料的物理力学性质以及坡体水文地质环境等^[34-35]。由于覆岩移动变形是一个动态变化的过程,采空层上部不同覆岩区域受力有所不同,形成了多个垂直和水平向的拉压变形区域,当采空区位于斜坡坡面下方时,与自然斜坡相比,最大的区别在于由于采空区的形成,在竖直方向上导致覆岩发生弯曲下沉,采空区正上方区域出现明显的垂向拉伸变形,该区域被拉裂而发生离层,与此同时产生层间错动滑移;而在水平方向上,促使采空区边界上方覆岩产生附加剪应力,使得接近地表的区域出现水平压缩变形,由此加剧了斜坡体软弱破裂带的快速发展。而接近采空区的区域出现水平拉伸变形,表现为覆岩水平向产生多处张拉裂纹,最终贯通、错断以及冒落(图10)。如果采空区扩展到坡脚或者坡顶下方时,斜坡应力分布范围和变形分区位置将会随之改变。在地下开采和上覆采场边坡压缩的双重影响下地表坡度、岩体缺陷(如溶洞、节理裂隙等)、地层岩性组合、斜坡结构等都会影响坡体应力应变,进而影响斜坡岩体变形破坏特征^[38-41]。另外,地下采矿活动常常会引起斜坡驱动块体位移增大^[42],且开采方向和开采速度会影响斜坡岩体变形移动方式和地表裂隙发育规律^[43-45]。

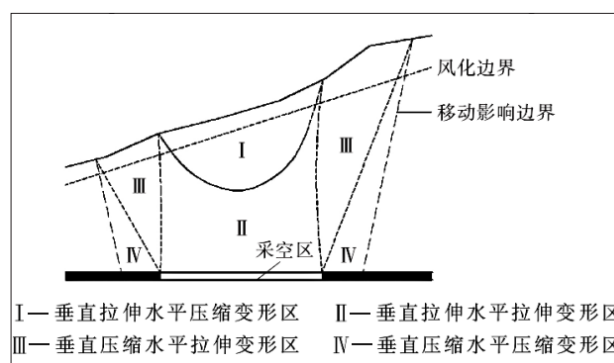
采空层上部斜坡孕灾机理本质上是地下采空塌陷作用和地表边坡岩体固有的“本底稳定性”两者“复合”的结果^[46]。当处于极限平衡状态的斜坡受到地下采动影响时,采空区覆岩的差异沉降极可能引发坡体突发性失稳。早期一些研究人员^[47-48]对英国南威尔士 Aberfan 滑坡研究后认为,采矿通过改变地下水流动路径使坡体发生变形移动;Benko^[49-50]在总结前人研究成果的基础上,认识到龟山斜坡山体内部存在不利背斜构造、逆冲断层以及不连续面,这些因素促使该坡体接近极限平衡状态,此时地下采矿触发已经接近极限平衡的龟山斜坡的最终破坏。近年来,部分学者^[8]认为地下采动首先引起采空区覆岩



a. 自然斜坡应力场分区图



b. 采动山体应力分布图



c. 采动山体变形分区图

图10 采动山体应力和变形分布图^[36-37]

Fig. 10 Stress and deformation distribution diagram of mining mountain^[36-37]

应力的调整,之后采矿活动的持续推进引起覆岩顶板大变形,先在坡体上部或接近坡顶处产生多条纵向张拉裂缝,同时沿坡体内部原生优势节理继续扩展,使坡体处于极限平衡状态,当降雨沿张拉裂隙进入坡体内部后,因岩体强度降低,导致坡体极限平衡状态被打破而发生失稳。因此,目前许多专家学者^[51-54]普遍认为地下采动型斜坡变形失稳主要是由地下采动改变了坡体应力场、工程地质条件以及地下水位置、渗流路径和水压力等因素引起的。

3 西南煤系地层山区采动型崩滑灾害关键问题

3.1 灾变机制认识

3.1.1 破坏机制

西南煤系地层山区地下采动型崩滑灾害受多种控制因素影响,当山体具备地形高陡的斜坡体,崩滑自由空间,用于张开拉裂的软弱夹层和蠕动滑移的竖直裂隙或溶蚀脆弱带,采空区顶板形成的张拉悬臂梁效应4个方面条件时,采动型崩滑灾害就会发生^[55]。因此,中国西南煤系地层山区地下采矿诱发山体崩滑灾害的破坏机制可总结为:在地下开采薄煤层卸压以及爆破震动作用下,采空区覆岩自下而上按照“固支梁力学模型—三铰拱力学模型—悬臂梁力学模型”等力学简化模型破断规律逐层破断冒落,进而引起地面差异性沉降,在上覆采场山体压缩条件下,山体底部关键块体应力集中优先损伤压裂,同时山体顶部形成张拉裂隙甚至贯通形成纵向深大溶蚀裂隙结构面,随着地下采动作用和溶蚀作用等叠加效应的不断增强,山体平衡状态不断发生改变直至极限平衡状态被打破而发生整体失稳。

3.1.2 破坏模式

由于西南煤系地层山区地表起伏高差较大,且煤系地层之上覆盖的松散黏性土层和软弱岩层较薄(主要为二叠系厚层—巨厚层的中硬—坚硬的粉砂岩、白云岩和灰岩),其塑性变形能力相对较低,地表会出现不连续变形特征,在下沉剖面上产生阶梯状变化或不连续间断面^[56],即传统采场覆岩变形形式“三带型”中的弯曲下沉带在中国西南部矿区采空区覆岩中表现是不明显的,也就是地表一般不会出现像平原地区地下采矿所引发的地表移动盆地这样的宏观连续性变形现象,但是相对微小的差异性沉降会使塑性变形低的岩体产生大量拉张裂隙,这些纵向裂隙往往随长期采矿活动的进行而不断扩展贯通成为深大裂隙结构面,此时覆岩可能以“切冒型”破坏为主,从而影响坡体稳定性。因此,中国西南煤系地层山区采空区覆岩变形破坏形式以“三带型”和“切冒型”破坏为主,其中“三带型”中的弯曲下沉带表现并不明显。

针对西南煤系地层山区不同控制因素组合叠加条件下不同的采动型崩滑体所表现出的不同变形破坏模式问题,许多专家学者^[57,9,16,12]提出了锁固段剪切式、倾倒—滑移式、倾倒—坠落式、坐落式以及碎裂崩落式等特定坡体单一或双重复合的变形破坏模

式。除此之外,许多地下采动型崩滑灾害还可能表现为多种基本变形失稳模式的相互组合类型,从而使其变形破坏变得更加复杂。例如,贵州马达岭滑坡属于弯曲—拉裂、塑流—拉裂、蠕滑—拉裂这3种基本变形破坏模式的综合^[13];贵州福泉小坝滑坡属于滑移—张拉—剪切破坏^[58],而贵州普洒崩塌为拉裂—倾倒—滑移复合失稳模式^[22]。另外,许多学者针对某一煤系地层覆盖区多个不同斜坡结构的坡体失稳模式进行统计归类,可更加清晰地对该地区地下采动型崩滑灾害破坏模式有一个系统的认识,以便提出一个有效的综合治理方案。例如,贵州省开阳磷矿带斜坡群存在拉裂—倾倒破坏、拉裂—滑移破坏、拉裂—坐落式破坏这3类变形失稳模式^[8];而重庆市武隆区羊角镇斜坡群存在视向滑动式、滑塌式、倾倒式和落石破坏式这4种失稳破坏模式^[11]。基于以上分析,可总结出中国西南煤系地层山区采动型山体存在蠕滑(滑移)—拉裂、滑移—压致拉裂、弯曲—拉裂、塑流—拉裂、滑移—弯曲、拉裂—倾倒、拉裂—滑移、拉裂—坐落、倾倒—滑移、倾倒—坠落(坐落)、压裂—崩落11种基本变形破坏模式或其相互之间组合的复合模式。

3.2 研究方法

由于地下采矿诱发山体崩滑灾害破坏机制的复杂性,目前针对此类灾害的研究手段呈现多样化、综合化发展,主要包括数学力学分析、试验研究、数值分析等方法。

3.2.1 数学力学分析方法

针对采空区覆岩移动变形领域的研究成果较为丰富,最初只是对覆岩变形破坏特征、岩层移动过程进行定性研究,之后为了满足采矿工程建设的实际需要,逐步过渡到采矿引起覆岩破裂高度的量化研究,早在1965年,刘宝琛和廖国华^[59]基于随机介质理论利用概率积分法对开采沉陷过程中地表移动和变形进行合理预测,此方法在研究地表沉陷领域得到广泛应用。之后有许多专家学者统计分析中国矿井覆岩变形相关监测数据,得出一些普适性的经验公式,其中最为典型的是刘天泉等^[60]通过整理分析中国12个省45个煤矿、130多个工作面关于覆岩裂隙带高度的现场实测数据,采用数理统计相关分析及最小二乘法原理,拟合出了计算煤层开采时,不同软硬程度的覆岩破坏最大高度的一系列经验公式,这些公式和相关参数已编入国家煤矿安监局2017年

版《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中并得到广泛应用(表1)。利用经验公式计算,如果按照采厚为1 m考虑,覆岩为硬岩时,导水裂隙带高度与采矿厚度比值范围为22~40倍,覆岩为中硬岩体时,导水裂隙带高度与采矿厚度比值范围为14~25倍。

表1 厚煤层分层开采的导水裂隙带高度计算公式^[61]

Table 1 Calculating formula for the height of water-conducting fracture zone in layering mining of thick coal seams^[61]

岩性	计算公式之一/m	计算公式之二/m
坚硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2.0} \pm 8.9$	$H_{li} = 30 \sqrt{\sum M} + 10$
中硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6$	$H_{li} = 20 \sqrt{\sum M} + 10$
软弱	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} \pm 4.0$	$H_{li} = 10 \sqrt{\sum M} + 5$
极软弱	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{5.0 \sum M + 8.0} \pm 3.0$	

注:1. $\sum M$ 为累计采厚;2. 公式应用范围:单层采厚1~3 m,累计采厚不超过15 m;3. 计算公式中 $\pm$ 号项为中误差。

针对中国西南煤系地层山区薄矿层(0.2~1.5 m)开采已经造成了许多岩质斜坡失稳破坏,且崩滑体实际剪出口位置距离采空区顶板超过100 m这一类案例,按照传统经验公式给出的裂采比(14~40倍)来计算所影响上覆岩体的高度远远没有达到崩滑体剪出口位置的高度,而且该地区采空层覆岩刚度较大,变形弯曲幅度相对较小,即按照《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中经验公式算出的结果来分析,表明地下采矿对上覆坡体没有任何影响,而事实此类地下开采对覆岩坡体存在巨大影响,这说明传统经验公式已不再适用于在西南煤系地层山区地质环境条件下采矿安全生产的实践。究其原因,主要是由于这些传统经验公式基于的矿山实测数据大部分是来自中国北方煤矿,而中国北方地区主要进行中厚层矿层开采,且采空区覆岩地质结构以松散层结构及厚松散层—基岩结构为主,考虑到中国不同地区矿山具有不同的矿山地质环境,采空区上覆岩层的刚度、地层结构,煤层的赋存状态都存在千差万别,因而在特定地区得出的某类代表性的经验公式在实际应用方面必然会表现

出一定的局限性。

为了弥补传统经验公式的不足,国内外许多专家学者^[62-67]开始尝试利用多种力学理论来对采空区覆岩稳定性进行分析,包括“砌体梁”结构“S-R”失稳判据理论、Winkler 弹性地基梁理论、普氏理论、岩体极限平衡理论、弹性力学板壳理论、关键层理论、三铰拱理论,进而对覆岩破裂高度进行定量化的计算。另外,地质力学分析方法^[68]和能量法^[69]也有所应用。

同时,地下采动型滑坡与一般滑坡的受力分析也有所不同,其稳定性分析方法也有所区别^[37]。二维、三维极限平衡法在地下采动型崩滑灾害稳定性研究中的应用相当广泛,一直以来深受广大专家学者^[7,70-72]的推崇。但是由于极限平衡法属于静力学范畴,加之该方法的提出本身存在许多假设条件,不能很好地诠释地下采动型崩滑灾害动态稳定性问题,其也存在一定的局限性。

基于以上存在的问题,考虑到岩体本身属于一种损伤介质,地质结构缺陷对岩质山体稳定性存在巨大影响,近年来中国一些学者^[73]尝试从损伤力学角度入手,引入损伤变量,结合Mohr-Coulomb 理论的压剪破坏控制方程以及虎克定律中张应变控制方程,利用损伤本构模型建立塔柱状岩体在损伤演化过程中稳定性判别的标准,并从损伤力学角度对地下采动型崩滑灾害失稳机理进行力学解析[图11,式(6)],此应用更加贴合山体底部岩体受地下采动影响所造成一定损伤的实际工况,应用效果较为显著。

塔柱状岩体受地下采动作用后上部山体的破坏判据为:

$$\begin{aligned} &\sigma_{Dt} \geq \sigma_{Dr}, \text{ 则有} \\ &\begin{cases} \sigma_{DL} < \sigma_{Dr} & \text{稳定} \\ \sigma_{Dr} \leq \sigma_{DL} < \sigma_{Dt} & \text{压剪破坏} \\ \sigma_{Dt} \leq \sigma_{DL} & \text{压张破坏} \end{cases} \\ &\sigma_{Dt} < \sigma_{Dr}, \text{ 则有} \\ &\begin{cases} \sigma_{DL} < \sigma_{Dt} & \text{稳定} \\ \sigma_{Dt} \leq \sigma_{DL} < \sigma_{Dr} & \text{压张破坏} \\ \sigma_{Dr} \leq \sigma_{DL} & \text{压剪破坏} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_{DL} 为底部区域岩体受到的等效荷载应力; σ_{Dr} 为岩体发生剪破坏时的临界应力; σ_{Dt} 为岩体发生压张破坏时的临界应力。

3.2.2 试验研究方法

地下采动作用下,采空层顶板覆岩受到不同程度的损伤,同时产生的裂隙改变了地下水运移路径,

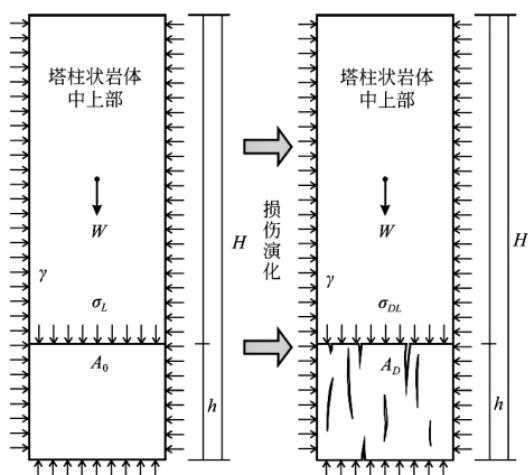


图 11 高陡岩体底部压裂失稳力学概化模型

Fig. 11 Generalized model of fracture failure at the bottom of high steep rock mass

H —塔柱状岩体平均高度 h —底部损伤带岩体平均高度 σ_L —中上部岩体作用在底部岩体的自重应力 A_0 —未受损伤或初始损伤时平均截面积 σ_{DL} —中上部岩体作用在底部岩体的有效自重应力 W —中上部岩体自重荷载 γ —中上部岩体平均重度 A_D —损伤程度为 D 时的有效承载面积

此时地下水与覆岩相互之间发生物理化学反应,覆岩强度劣化。基于此,许多学者^[74-76]采用三轴压缩试验、岩石水敏性试验、巴西圆盘劈裂试验以及岩石单轴压缩试验等室内试验方法对其进行相关研究。另外,由于物理模型试验和离心机试验^[77-79]可还原坡体失稳前的变形破坏过程,验证斜坡变形破坏模式,且可用于揭示其形成演化机制,一直以来都是研究人员所采用的主流研究方法,认可度极高。

3.2.3 数值分析方法

数值模拟作为研究坡体失稳重要的手段和方法,可更加真实直观地还原灾害发生破坏的前后过程,同时可灵活改变所研究的变量参数和设置不同的工况,常作为现场勘测和试验研究的辅助验证方法,近年来越来越多的专家学者利用此类方法进行相关研究。其中SFPA^{2D}、FLAC3D等有限元和有限差分分析方法常用于分析煤层开采过程中覆岩地层的位移、应变、损伤区分布以及斜坡稳定性等问题^{[72][80-83]}。由于岩体中存在微裂隙、微孔洞,本身属于不连续体,因此有限元和有限差分方法不能真实反映岩体真实属性,相反,离散元方法将岩体视为一种由岩块和节理面组成的离散体,此方法允许岩块平移、转动和变形,且节理面或结构面可被压缩和分离,因此近年来许多学者用此方法来解决岩质斜坡非线性大变形问题。研究人员^[84-87]采用UDEC、3DEC

等离散元分析软件模拟地下开挖超前触发的覆岩深大结构面不稳定剪切破坏过程,探讨了地下采矿活动对斜坡稳定性的影响。另有部分研究人员^[88-89]采用基于弹性损伤模型的RFPA^{2D}软件模拟开采过程中上覆岩层移动、变形、离层、破裂、垮落及地表的沉陷全过程。为了提高研究精度,部分学者综合以上部分方法^[90-91]预测、分析和评价了地下采动型斜坡的稳定性。

3.3 关键问题

随着国内外专家学者对于地下采动型崩滑灾害变形破坏机理研究的逐渐深入,相关研究已经逐渐演变为涉及工程地质学、滑坡学、采矿学,矿压管理与控制、测绘科学、岩体力学、岩体结构力学、采动岩体力学、损伤力学、断裂力学以及计算机科学等多个学科交叉的综合性研究,研究难度逐渐加大。虽然前人已经做过大量相关研究并取得了许多建设性成果,但由于西南煤系地层山区地下采动型崩滑灾害自身的特殊性、综合性以及复杂性,目前仍然存在诸多问题,现提出以下亟待研究的关键问题:

3.3.1 西南煤系地层山区地质结构与地下采动诱发崩滑灾害的相互作用关系

西南煤系地层山区的地形地貌、地质构造、地层岩性、岩体结构、斜坡结构、岩溶和风化作用以及采矿工程活动等地质结构和外部因素都会对斜坡发育特征造成一定影响,如软弱地层及软弱结构面特性弱化、深大溶蚀结构面扩展和关键块体损伤等,同时在地下采动作用下,具有不同发育特征的斜坡将会表现出拉裂、滑移、弯曲、塑流、倾倒和坐落等不同的变形破坏模式。而在目前研究中,该地区地下采动条件下山体地质结构和崩滑灾害响应两者之间的相互作用关系并没有一个系统的归纳和总结,这应当作为后期研究的一个重点方向。

3.3.2 采空区上部山体累积断裂损伤—岩体松动、裂隙扩展—岩溶管道流、裂隙流变化的链式响应机制

目前采空区覆岩稳定性计算研究大部分是基于常规弹塑性力学、材料力学以及结构力学,而在地下采动引起山体失稳研究中,主要认为地下采动引起地表差异性沉降,进而改变了滑动面形态,且大部分研究人员通过将滑体视为刚体,利用极限平衡法对斜坡稳定性进行分析评价,此处忽略了岩体自身是一种具有微孔洞、微裂隙的不均质、不连续的天然损伤介质,同时地下采矿扰动也会使这种天然损伤介质内部产生更多的地质结构缺陷,如此多的地质结

构缺陷必然会对岩质斜坡稳定性造成巨大影响。

在地下开采扰动过程中,上覆岩溶山体底部关键块体首先发生损伤劣化,山体内部断裂损伤不断累积、裂隙不断扩展,引起岩溶管道变形破坏,山体内部渗流场、渗透力也随之发生变化。同时,顶部深大岩溶结构面也逐渐扩展、错动直至完全贯通,为降雨提供了优势渗流通道,最终导致硬质结构面发生拉剪断裂、软弱结构面发生压剪滑移。因此,在地下开采扰动作用下,目前存在矿层上覆岩层(顶板)断裂损伤劣化作用演化过程,上覆岩溶山体损伤累积而引起的岩体松动破坏、裂隙扩展机制,岩溶管道变形破坏规律,岩溶管道和岩层裂隙内渗流场、渗透力变化及渗透破坏机制4个方面研究的不足。后期可引入岩石断裂力学和地下水动力学理论进行重点研究,使其更加符合采动条件下斜坡岩体本质和岩体内部地下水实际动态流动特征。

3.3.3 西南煤系地层山区开采薄矿层诱发山体失稳机制

地下采动对地表斜坡的影响包括采空区位置、范围和采动顺序、方向不同的影响以及采掘过程中爆破震动的影响,在过去的研究中,大多是针对地下中厚层矿层采动条件下,单一岩层或夹单层软弱夹层的斜坡体进行应力场的分析,并按照垂向和水平向的拉压变形对采空层不同区域变形位移场进行简要分区,大量简化研究对象。而西南煤系地层中所含矿层较薄,且山区崩滑灾害地层结构相对复杂多样,在地下采动过程中此地区岩溶山体顶板不同岩层应力场将发生动态变化,采矿层覆岩自下而上逐层发生应力传递,同时山体位移场、累积断裂损伤、裂隙扩展、管道流和裂隙流动态流动以及动态崩滑过程等变得更加复杂,因此地下采动条件下山体变形破坏响应特征、演化过程以及山体失稳内在机制也将变得非常复杂,这些都将是未来针对含薄层矿层的西南煤系地层山区崩滑灾害重点解决的科学问题。对于此方面的后续研究,可通过大型物理模型试验、离散元数值分析以及现场监测等方法对坡体不同部位设置监测点,以获取应力、位移等监测数据进行深入分析研究。

3.3.4 西南薄层煤系地下采动型崩滑灾害评价方法

目前地下采矿诱发山体崩滑灾害的研究方法主要包括数学力学分析、试验研究、数值分析等。其中数学分析得出的经验公式和基于静力学原理的极限

平衡法在地下采动型崩滑灾害稳定性研究中存在一定缺陷,引入断裂损伤力学分析方法更为适合,且利用数值分析方法,尤其是二维、三维离散元分析方法,同时配合大型物理模型试验、离心机试验等方法,更加适用于解决西南煤系地层山区薄矿层开采诱发崩滑灾害的非连续非线性大变形问题。另外,考虑到西南煤系地层山区地下采动型崩滑灾害破坏模式的多样性以及失稳机制的复杂性,后期应针对坡体不同的破坏模式提出不同的评价方法,以为深入揭示其变形破坏机制提供参考。

4 结 语

本文结合中国西南煤系地层山区地下采动型的灾难性崩塌、滑坡灾害特征,从地质环境与地下采矿工程活动等方面分析地下采动型崩滑灾害的发育特征和破坏模式,指出西南煤系地层山区薄矿层开采诱发崩滑灾害的灾变机制;通过论述目前的研究方法,得出传统经验公式的计算方法对分析此类采矿型崩滑灾害已不适用,提出西南煤系地层山区地质结构与地下采动诱发崩滑灾害的相互作用关系、薄矿层采空区上部山体累积断裂损伤—岩体松动、裂隙扩展—岩溶管道流、裂隙流变化的链式响应机制、地下采动型崩滑灾害评价方法等亟待解决的关键科学问题。

参考文献

- [1] Krahn J, Morgenstern N R. Mechanics of the Frank slide[C]// Rock Engineering for Foundations & Slopes. ASCE, 1976: 309.
- [2] Bentley S P, Siddle H J. Landslide research in the South Wales coalfield[J]. Engineering Geology, 1996, 43(1): 65-80.
- [3] Froude M J, Petley D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(8): 2161-2181.
- [4] 何万龙. 山区开采沉陷与采动损害[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [5] 黄刚, 郑达. 贵州开阳磷矿山体崩塌形成机理与数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 46-50, 55.
- [6] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [7] 殷跃平, 康宏达, 张颖. 链子崖危岩体稳定性分析及锚固工程优化设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 20(5): 599-603.
- [8] Zheng D, Frost J D, Huang R Q, et al. Failure process and modes of rockfall induced by underground mining: A case study of Kaiyang Phosphorite Mine rockfalls[J]. Engineering geology, 2015, 197(10): 145-157.
- [9] 李滨, 王国章, 冯振, 等. 地下采动诱发陡倾层状岩质斜坡失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1148-1161.

- [10] 黄润秋,许强.中国典型灾难性滑坡[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 王磊,李滨,冯振,等.武隆县羊角场镇厚层灰岩山体大型危岩体破坏模式及成因机制研究[J].地质学报,2015,89(2):461-471.
- [12] He K, Yin Y P, Li B, et al. The mechanism of the bottom-crashing rockfall of a massive layered carbonate rock mass at Zengziyan, Chongqing, China [J]. Journal of Earth System Science, 2019, 128(4): 104.
- [13] 赵建军,马运韬,蔺冰,等.平缓反倾采动滑坡形成的地质力学模式研究:以贵州省马达岭滑坡为例[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2217-2224.
- [14] 殷跃平.斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究:以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):217-226.
- [15] 李滨,冯振,张勤,等.岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别研究[M].北京:科学出版社,2016.
- [16] 董秀军,裴向军,黄润秋.贵州凯里龙场镇山体崩塌基本特征与成因分析[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(3):3-9.
- [17] 郑光,许强,巨袁臻,等.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,2018,26(1):223-240.
- [18] 黄润秋.中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J].地球科学进展,2005,20(3):292-297.
- [19] 李滨,殷跃平,高杨,等.西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J].水文地质工程地质,2020,47(4):5-13.
- [20] 贺凯,陈春利,冯振,等.塔柱状岩体崩塌灾害研究现状[J].地质力学学报,2016,22(3):714-724.
- [21] 贺凯.塔柱状岩体崩塌机理研究[D].西安:长安大学,2015.
- [22] Shi W B, Yu X X, Sherizadeh T, et al. Deformation and Failure Mechanism of a collapse induced by underground mining—A study of the Pusa collapse in Guizhou province of China [C]//53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2019.
- [23] 刘天泉.大面积采场引起的采动影响及其时空分布规律[J].矿山测量,1981(1):70-77.
- [24] 刘天泉.矿山岩体采动响应与控制工程学及其应用[J].科技导报,1994(12):21-23.
- [25] 刘天泉.矿山岩层和地表变形规律及其与地质因素的关系[J].煤田地质与勘探,1985(3):31-35.
- [26] 刘天泉.矿山采动影响工程学及其应用[A].世纪之交的煤炭科学技术学术年会论文集[C].北京:《煤炭学报》编辑部,1997,48-51.
- [27] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [28] 钱鸣高.采场上覆岩层岩体结构模型及其应用[J].中国矿业学院学报,1982(2):6-16.
- [29] 钱鸣高,缪协兴,何富连.采场“砌体梁”结构的关键块分析[J].煤炭学报,1994,19(6):557-563.
- [30] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制中的关键层理论研究[J].煤炭学报,1996,21(3):2-7.
- [31] 何满潮,黄润秋,王金安,等.工程地质数值法[M].北京:科学出版社,2006.
- [32] 左建平,孙运江,钱鸣高.厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J].煤炭学报,2017,42(6):1372-1379.
- [33] Guo W, Zhao G, Lou G, et al. A new method of predicting the height of the fractured water-conducting zone due to high-intensity longwall coal mining in China [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2789-2802.
- [34] Tang F. Research on mechanism of mountain landslide due to underground mining [J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2009, 15(4): 351.
- [35] Marschalko M, Yilmaz I, Bednárík M, et al. Deformation of slopes as a cause of underground mining activities: three case studies from Ostrava-Karviná coal field (Czech Republic) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(11): 6709-6733.
- [36] 汤伏全.采动滑坡的机理分析[J].西安矿业学院学报,1989(3):32-36.
- [37] 龙建辉,李坤,郭晓娟.地下采动影响下滑坡稳定性及推力研究综述[J].太原理工大学学报,2019,50(2):141-152.
- [38] Franks C A M, Geddes J D. Subsidence on steep slopes due to longwall mining [J]. International Journal of Mining and Geological Engineering, 1986, 4(4): 291-301.
- [39] 林锋,孙赤,冯亮.近水平煤层开采诱发崩塌形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(3):8-12.
- [40] Tang J, Dai Z, Wang Y, et al. Fracture failure of consequent bedding rock slopes after underground mining in mountainous area [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2853-2870.
- [41] Tang J, Dai Z, Wang Y, et al. Fracture failure of consequent bedding rock slopes after underground mining in mountainous area [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2853-2870.
- [42] Yin Y P, Sun P, Zhang M, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China [J]. Landslides, 2011, 8(1): 49-65.
- [43] Fan G, Zhang D, Zhai D, et al. Laws and mechanisms of slope movement due to shallowly buried coal seam mining under ground gully [J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2009, 15(4): 346.
- [44] Zhang D, Fan G, Wang X. Characteristics and stability of slope movement response to underground mining of shallow coal seams away from gullies [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(1): 47-50.
- [45] Liu H, Deng K, Zhu X, et al. Effects of mining speed on the developmental features of mining-induced ground fissures [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(8): 6297-6309.
- [46] 范士凯.采空区上边坡稳定问题[J].资源环境与工程,2006,20(S1):617-627.
- [47] Daughton G, Noake J S, Siddle H J. Some hydrogeological aspects of hillsides in South Wales [C]//Proceedings of a Conference Rock Engineering, Newcastle upon Tyne, 1976: 423-439.

- [48] Gostelow T P. The development of complex landslides in the Upper Measures of Blaina, South Wales [C]//Proc. Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations. Capri., 1977: 225-268.
- [49] Benko B. Numerical modelling of complex slope deformations [D]. Saskatoon :University of Saskatchewan, 1997.
- [50] Benko B, Stead D. The Frank slide: a reexamination of the failure mechanism [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(2):299-311.
- [51] Marschalko M, Fuka M, Treslin L. Influence of mining activity on selected landslide in the Ostrava—Karvina coalfield [J]. Acta Montanistica Slovaca, 2008, 13(1): 58-65.
- [52] Marschalko M, Yilmaz I, Bednárík M, et al. Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic [J]. Engineering Geology, 2012, 147(10): 37-51.
- [53] Grenon M, Caudal P, Amoushahi S, et al. Analysis of a large rock slope failure on the east wall of the LAB chrysotile mine in Canada: back analysis, impact of water infilling and mining activity [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(2): 403-418.
- [54] Wagner E H R. Surface effects of total coal-seam extraction by underground mining methods [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1991, 91(7): 221-231.
- [55] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型 [J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858-868.
- [56] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics: for underground mining [M]. Springer science & business media, 1993.
- [57] Huang R Q, Chan L S. Human-induced landslides China: Mechanism study and its implications on slope management [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2766-2777.
- [58] Lin F, Wu L Z, Huang R Q, et al. Formation and characteristics of the Xiaoba landslide in Fuquan, Guizhou, China [J]. Landslides, 2018, 15(4): 669-681.
- [59] 刘宝琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [60] 刘天泉, 仲帷林, 焦传武, 等. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [61] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [62] 黄庆享. 采场老顶初次来压的结构分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 521-526.
- [63] Wang H, Zhang D, Wang X, et al. Visual exploration of the spatiotemporal evolution law of overburden failure and mining-induced fractures: a case study of the Wangjialing coal mine in China [J]. Minerals, 2017, 7(3): 35.
- [64] Liu S, Li W, Wang Q, et al. Investigation on mining-induced fractured zone height developed in different layers above Jurassic coal seam in western China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(2): 30.
- [65] Liu S, Li W, Wang Q. Height of the water-flowing fractured zone of the Jurassic coal seam in northwestern China [J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(2): 312-321.
- [66] Chen Y, Zhao G, Wang S, et al. Investigations of the height of fractured zones in overburden induced by undersea mining [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(20): 618.
- [67] Li L, Li F, Zhang Y, et al. Formation mechanism and height calculation of the caved zone and water-conducting fracture zone in solid backfill mining [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2020, 7(1): 208-215.
- [68] Cheng G, Chen C, Ma T, et al. A case study on the strata movement mechanism and surface deformation regulation in Chengchao underground iron mine [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(4): 1011-1032.
- [69] Rezaei M, Hossaini M F, Majidi A. Determination of longwall mining-induced stress using the strain energy method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2421-2433.
- [70] 徐廷甫, 尹志明, 邓月华. 地下采动条件下顺层岩质边坡稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1241-1245, 1262.
- [71] 李滨, 王国章, 冯振, 等. 陡倾层状岩质斜坡极限平衡稳定分析 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 839-846.
- [72] Li B, Feng Z, Wang G, et al. Processes and behaviors of block topple avalanches resulting from carbonate slope failures due to underground mining [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 694.
- [73] 贺凯, 高杨, 殷跃平, 等. 基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 82-89.
- [74] Tian C, Liu Y, Yang X, et al. Development characteristics and field detection of overburden fracture zone in multiseam mining: A case study [J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(3): 602-615.
- [75] Murphy M M. Shale failure mechanics and intervention measures in underground coal mines: Results from 50 years of ground control safety research [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2016, 49(2): 661-671.
- [76] Wang C, Lu Y, Qin C, et al. Ground Disturbance of Different Building Locations in Old Goaf Area: A Case Study in China [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(5): 4311-4325.
- [77] 赵建军, 蔺冰, 马运韬, 等. 缓倾煤层采空区上覆岩体变形特征物理模拟研究 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1369-1374.
- [78] 邓茂林, 许强, 郑光, 等. 基于离心模型试验的武隆鸡尾山滑坡形成机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3024-3035.
- [79] 贺凯, 高杨, 王文沛, 等. 陡倾煤层开采条件下上覆山体变形破坏物理模型试验研究 [J]. 地质力学学报, 2018, 24(3): 399-406.
- [80] 刘红元, 唐春安, 芮勇勤. 多煤层开采时岩层垮落过程的数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 190-196.
- [81] 王玉川, 巨能攀, 赵建军, 等. 缓倾煤层采空区上覆山体滑坡形成机制分析 [J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 61-68.

- [82] Porathur J L, Srikrishnan S, Verma C P, et al. Slope stability assessment approach for multiple seams highwall mining extractions[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2014, 70(9): 444-449.
- [83] Liu C, Li H, Mitri H. Effect of Strata Conditions on Shield Pressure and Surface Subsidence at a Longwall Top Coal Caving Working Face[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(5): 1523-1537.
- [84] Wang X, Zhang D, Zhang C, et al. Mechanism of mining-induced slope movement for gullies overlaying shallow coal seams[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(3): 388-397.
- [85] Feng Z, Li B, Yin Y P, et al. Rockslides on limestone cliffs with subhorizontal bedding in the southwestern calcareous area of China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(9): 2627-2635.
- [86] Gu R, Ozbay U. Distinct element analysis of unstable shear failure of rock discontinuities in underground mining conditions [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 68(6): 44-54.
- [87] Kulatilake P H S W, Ge Y. Investigation of stability of the critical rock blocks that initiated the Jiweishan landslide in China [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(5): 1291-1315.
- [88] 唐春安, 徐曾和, 徐小荷. 岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统在采场上覆岩层移动规律研究中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, 18(5): 456-458.
- [89] 陈峰. 基于数值模拟的采动影响下覆岩裂隙演化过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 60-64.
- [90] 胡海峰, 康建荣. 基于有限元法的采动坡体稳定性计算[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(4): 343-345, 353.
- [91] 李腾飞, 李晓, 王瑞青. 地下采矿诱发斜坡移动变形分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 64-70.

Key scientific issues in research on landslide hazard induced by underground mining in mountainous areas with coal-bearing strata of southwestern China

LI Jun^{1,2}, CHU Hongliang³, LI Bin¹, HE Kai¹, GAO Yang¹

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement Geohazard, Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract Underground mining activities often trigger large-scale landslide on mountain slopes, causing casualties and property losses. Based on the analysis of the development characteristics of landslide hazard induced by underground mining, this paper considers that such landslide hazard often occur in the cliff belts of fold wings and core composed of layered carbonate rock and clastic rock strata in mountainous area with coal-bearing strata of southwestern China, which is closely related to factors such as topography, stratum structure and underground mining engineering activities. It is pointed out the following processes that large-scale landslide hazard induced by thin seam mining, (1) The overlying rock roof collapses and the overburden rock roof separates, and the stress transfer from the bottom to the top in and between the overburden rock in the goaf after the mined-out; (2) The formation of underground water migration channels accelerates the failure and expansion of rock mass structures on a larger scale, accelerating the loosening and failure of rock mass structural planes; (3) The uneven settlement of the overburden rock strata leads to fractures at the foot of the slope, and the large-scale rock mass structural surface of the mountain body gradually deforms under tension shear or compression shear, eventually resulting cumulative damage and large-scale landslide hazard. At the same time, this study suggests that the calculation method of traditional empirical formula is no longer applicable to this type of landslide hazard induced by underground mining. It is recommended to develop the research on following key scientific issues, including the interaction relationship between the geological structure and the landslide hazard induced by underground mining of the karst mountainous area with coal-bearing strata of southwestern China, the cumulative fracture damage and rock mass loosening in the upper part of thin seam goaf, fracture expansion and karst conduit flow, the chain response mechanism of fracture flow change of upper mountain in the mined area of thin ore bed, and the evaluation method of landslide hazard induced by underground mining, etc. The purpose is to promote the the development of prevention and mitigation work of geological hazard induced by underground mining.

Key words coal-bearing strata of southwestern China, underground mining, landslide, key scientific issues

(编辑 黄晨晖)