

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

# 缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特征研究

赵建军,王子贤,严浩元,赖琪毅,余建乐,李清淼,朱要强,董建辉

Deformation characteristics of a high and steep mining slope with gently-inclined layered structure

ZHAO Jianjun, WANG Zixian, YAN Haoyuan, LAI Qiyi, YU Jianle, LI Qingmiao, ZHU Yaoqiang, and DONG Jianhui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105029

# 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 地下采动下含深大裂隙岩溶山体变形响应特征

Deformation response characteristics of karst mountains with deep and large fissures under the condition of underground mining 钟祖良, 高国富, 刘新荣, 王南云, 李皓 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 97–106

基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141-150

# 基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明,姚鑫,陈剑,李凌婧,任开,刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135-146

# 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用

Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope 黄海宁, 黄健, 周春宏, 潘勇杰 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 149-155

北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究

Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing 张建全,张克利,程贵方 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 131-139

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50



关注微信公众号,获得更多资讯信息

### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105029

赵建军,王子贤,严浩元,等.缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特征研究 [J].水文地质工程地质,2022,49(2):174-183. ZHAO Jianjun, WANG Zixian, YAN Haoyuan, *et al.* Deformation characteristics of a high and steep mining slope with gently-inclined layered structure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 174-183.

# 缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特征研究

赵建军1,王子贤1,严浩元2,赖琪毅1,余建乐3,李清森1,朱要强4,董建辉5

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学),四川 成都 610059;2. 贵州省
 第一测绘院,贵州 贵阳 550025;3. 中国铁道科学研究院集团有限公司,北京 100089;4. 贵州省地质
 环境监测院,贵州 贵阳 550001;5. 成都大学建筑与土木工程学院,四川 成都 610106)

摘要:采空区深度、平面位置等控制缓倾层状结构采动斜坡的变形特征,直接影响采动斜坡整体稳定性。近年来,国内外 学者针对地下采煤引起上覆岩体变形开展了大量研究,但目前采空区特征对斜坡关键位置的影响作用揭示还不够深入。 贵州省发耳煤矿尖山营变形体是典型的缓倾层状结构采动斜坡,具有上陡下缓、上硬下软的特征。文章以发耳尖山营变形 体为例,采用地质过程机制定性分析和数值模拟方法研究了多层开采与不同深度单层开采对斜坡变形的影响,揭示采空区 宽度、深度及深厚比等参数对斜坡变形特征的影响。结果表明:多层开采导致斜坡坡脚破坏和整体塌陷,引起斜坡产生显 著向坡外的水平位移,导致竖向位移远大于煤层开采总厚度;采空区跨越坡脚致使开采深厚比急剧减小,采动裂隙更易扩 展至地表,是坡脚附近岩体产生破坏的重要因素;采空区宽度增大、多层采动会显著加剧斜坡变形,采空区深度增加可减小 斜坡变形量值,但显著增加变形范围。在地形起伏强烈地区采煤,通过优化工作面布置,防止开采深厚比急剧减小、控制采 空区宽度、避免重复采动以及开采更深部煤层对斜坡稳定性有利。

关键词:缓倾层状结构;高陡斜坡;地下采动;采空区;变形特征;数值模拟

中图分类号: TU413.6<sup>+</sup>2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2022)02-0174-10

# Deformation characteristics of a high and steep mining slope with gently-inclined layered structure

ZHAO Jianjun<sup>1</sup>, WANG Zixian<sup>1</sup>, YAN Haoyuan<sup>2</sup>, LAI Qiyi<sup>1</sup>, YU Jianle<sup>3</sup>, LI Qingmiao<sup>1</sup>, ZHU Yaoqiang<sup>4</sup>, DONG Jianhui<sup>5</sup>

 (1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Guizhou Provincial First Institute of Surveying and Mapping, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. China Academy of Railway Sciences Co. Ltd., Beijing 100089, China;

4. *Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*; 5. *School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan* 610106, *China*)

Abstract: The depth and plane position of the goaf control the deformation characteristics of the mining slope with gently inclined layered structure and directly affect the overall stability of the mining slope. In recent years, scholars have carried out a large number of studies on the deformation of the overlying rock mass caused by underground coal mining, but the influence of goaf characteristics on the key positions of slopes has not been

revealed deeply enough. The Jianshanying deformation body in the Faer Coal Mine in Guizhou Province is a typical gently-inclined layered mining slope, which has the steep upward and gentle downward, and hard upward and soft downward characteristics. The Jianshanying Deformation Body is chosen as the subject of the study in this paper. The effects of multi-layer mining and single-layer mining at different depths on the slope deformation are studied by qualitative analyses of the geological process mechanism and numerical simulation method. The width, depth and depth ratio of goaf have an important influence on the slope deformation characteristics. The results show that the multi-layer mining leads to the destruction of the slope toe and the overall collapse, which will cause the slope to produce a significant horizontal displacement, resulting in the vertical displacement of the multi-layer mining being much greater than the total thickness of the coal seam mining. The goaf crossing the slope toe, which makes the depth-to-thickness ratio decrease sharply and the mining cracks are more likely to extend to the surface, is an important factor for the destruction of the rock mass near the slope toe. When the width of the goaf increases or the multi-layer mining operation is carried out, the slope deformation increases significantly. When the depth of the goaf increases, the slope deformation value decreases, but the deformation range increases. It is beneficial to slope stability by optimizing the layout of the working face to prevent the sharp decrease of the depth-to-thickness ratio, controlling the width of the goaf, avoiding repeated mining and increasing the depth of mining, when mining in the strong terrain areas.

**Keywords**: gently inclined layered structure; high and steep slope; underground mining; goaf; deformation characteristics; numerical simulation

地下采煤活动会改变斜坡原有平衡状态,斜坡应 力调整过程中易引起采空区覆岩产生不同程度的破 坏<sup>[1-3]</sup>。在我国西南贵州山区存在大量缓倾层状结构 斜坡,这类斜坡上陡下缓、上硬下软。下部煤层开采 后,易引起斜坡变形,近年来已发生多起损失惨重、社 会影响大的矿山地质灾害<sup>[4-7]</sup>,更为紧迫的是贵州还 现存大量已变形的缓倾层状结构采动斜坡,后期也会 因煤层开采形成更多此类斜坡<sup>[8]</sup>。因此,针对缓倾层 状结构斜坡下煤层开采进行变形特征研究,对于保 障斜坡附近群众生命财产安全和安全采煤具有重要 意义<sup>[9-10]</sup>。

国内外学者采用物理模拟和数值模拟方法开展 了大量地下采煤引起上覆岩体变形研究,数值模拟针 对复杂采矿条件表现出灵活、高效的优势<sup>[11-12]</sup>。崔杰 等<sup>[13]</sup>通过研究川东华蓥山开采对斜坡的变形影响,认 为地下开采可引起斜坡产生倾倒变形并最终引起滑 坡;Fathi等<sup>[14]</sup>采用离散元数值模型,以澳大利亚一煤 矿开采引发高陡斜坡失稳为例,提出坡脚破坏可引起 斜坡向前发生滑动和倾覆。Zhao等<sup>[15]</sup>基于 PFC 模型 对马达岭滑坡形成机理进行了详细研究,提出了斜坡 岩体变形特征与过程。史文兵<sup>[16]</sup>基于 m型模拟试验 和数值模拟试验,提出了山区采动斜坡失稳判别的几 个重要特征;赵建军等<sup>[1,17-19]</sup>以马达岭滑坡为例采用 物理模拟、数值模拟等多种手段,对其成因机理开展 了研究,揭示采矿作用对高陡斜坡变形破坏的作用机 理;严浩元<sup>[20]</sup>采用数值模拟方法研究不同开采条件下 采动斜坡变形特征与规律,指出采空区位置、重复采 动等对高陡采动斜坡变形具有影响作用。郑达等<sup>[21]</sup> 基于物理模拟提出上软下硬反倾边坡开挖变形响应 特点。Regassa等<sup>[22]</sup>以Yanqianshan Iron Mine 高陡边 坡为地质原型,运用数值模拟手段探究了顶板塌陷与 开采深度的关系。Trong等<sup>[23]</sup>对澳大利亚纳塔伊北部 某处采动斜坡进行探究,使用不连续变形分析(DDA) 方法,揭示了采动斜坡的关键在于坡脚处岩体的破裂。 文献 [24]以Fengmaoding 斜坡为原型,从位移、应力、应 变等方面分析了断层对采动斜坡变形特征的控制作用。 但以上研究对采空区特征对缓倾层状结构斜坡坡脚、 临空面等关键位置的影响作用还不够深入,采动作用 下山区斜坡整体特征和机理还需要进一步探讨。

发耳煤矿尖山营变形体是贵州山区缓倾层状结 构采动斜坡的典型代表,坡顶形成与采空区边界平行 的地裂缝和塌陷坑,坡肩产生大量崩塌,引发当地政 府和居民关注。本文基于大量现场调查,采用颗粒流 方法对比分析了多层开采和单层开采条件下斜坡变 形特征,提出了采空区参数对缓倾层状结构采动斜坡 变形的影响作用,对于正确认识这类斜坡在开采条件 下的稳定性具有重要意义,可为地下开采诱发的地质 灾害防治提供理论支撑。 · 176 ·

# 1 研究区地质环境条件

尖山营变形体位于我国贵州省水城县发耳镇,变 形体斜坡平面呈"V"字形,总体倾向北西,坡顶平面 10°~30°,北东和南西侧为高200~300m的崖壁,上 部坡度55°~63°,下部坡度10°~22°(图1)。



(b) 三维影像 (镜向: 315°)
 图 1 研究区工程地质平面图和三维影像图
 Fig. 1 Engineering geological plan and 3D image of the study area

研究区共出露3套地层5种岩土体,斜坡上部主 要为飞仙关组砂泥岩,岩性较硬;下部为龙潭组煤系 地层和泥质软岩;斜坡总体上陡下缓、上硬下软;调查 中未见明显构造痕迹,岩层产状为N10°E/NW∠15° (图2)。通过现场对岩体结构面进行测量,在飞仙关 组和龙潭组共测得53条结构面,统计分析表明研究 区岩体共发育4组优势结构面,产状分别为:J1,N65°E/ SW∠65°;J2,N17°E/SW∠67°;J3,N38°W/NE∠72°;J4, N∠21°E/NW∠42°。

# 2 煤层开采情况

据现场调查访问,该变形体最初变形时间可追溯



到约十年前,现今主要变形破坏迹象为坡顶平台产生 大量裂缝,北东侧崖壁产生崩塌和滑坡,南西侧崖壁 产生浅表层滑坡(图1)。坡顶平台裂缝走向92°~ 164°,裂缝数量约35条,裂缝两侧高差0.05~20m,裂 缝张开宽度0.01~1.0m。在坡顶平台南西侧区域存 在两个"V"字形塌陷区域,边界与采空区近平行,塌陷 区域1"V"字形开口朝向南东,塌陷区域2"V"字形开 口朝向近正南方向。塌陷区域1宽10~85m,塌陷深 0.5~21m;塌陷区域2宽5~90m,塌陷深0.1~17.5m。 北东侧崖壁产生的崩塌和滑坡使斜坡原有形态改变, 在坡脚形成大范围的堆积体,部分岩体产生向坡外倾 倒(图2);同时,坡脚前部陡坎堆积体产生溜滑,并伴 有渗水现象。北东侧崖壁是尖山营变形体目前破坏 最严重、威胁人数最多及危害性最大的区域。

尖山营斜坡下部含煤层 50 层左右,其中大部可采 和局部可采煤层 19 层,平均总厚 26.82 m。发耳煤矿 目前共开采了 6 层煤,在地下形成了错综复杂的采空 区(表1和图 2)。

表1 煤层开采参数及采空区特征对比

Table 1 Coal seam mining parameters and goaf characteristic

comparison							
煤层序号	开采深度/m	开采长度/m	采空区是否	采空区是否			
		-	百月床住				
第一层(M1)	272.89	444.95	否	否			
第二层(M3)	301.10	420.88	是	否			
第三层(M5-2)	303.18	295.43	是	是			
第四层(M5-3)	345.25	285.31	是	否			
第五层(M7)	390.26	542.29	是	是			
第六层(M10)	512.38	397.00	是	是			

# 3 数值模拟模型

# 3.1 模型参数

室内物理力学试验获取的岩土体宏观参数不能

直接用于 PFC 数值模拟计算, 需利用 PFC 内置的 FishTank 对宏观岩土体参数进行标定, 得到计算使用 的微观参数。

研究区粉砂岩和泥质粉砂岩室内单轴试验中试 样围压为0 MPa,因此参数标定实验中围压也设置为 0 MPa,黏结模型为平行黏结模型。通过多次微观参 数标定试验,直至数值模拟试样的应力应变曲线与宏 观岩体单轴试验应力应变曲线一致。通过反复参数 标定,最终采用的参数如表2所示。

表 2 数值模拟计算参数 Table 2 Numerical simulation calculation parameters

微观参数	粉砂岩	泥质粉砂岩	泥岩	煤层
线性接触模量/GPa	7	6	2	2
线性接触刚度比	1.8	2	2.2	2.4
黏结模量/GPa	7	6	2	2
黏结刚度比	1.8	2	2.2	2.4
法向黏结强度/MPa	35	30	10	9
切向黏结强度/MPa	35	30	10	9
摩擦角/(°)	23	20	15	10
节理刚度比		1		
节理摩擦系数		0.3		

# 3.2 数值模拟模型建立

1-1'剖面线(图 1 和图 2)在坡表跨越最典型破坏 区域,且地下 6 层开采煤层采空区均有分布,是本文 研究的理想剖面。剖面长 1 761.6 m,高 603.2 m,根据 数值模拟建模经验和案例参考<sup>[11,15]</sup>,考虑数值模拟可 行性和计算效率,如果数值模拟中煤层厚度为实际煤 层厚度即 1~2 m,则煤层的颗粒球直径将会非常小, 考虑模型材料的协调性,相邻材料颗粒球直径不能相 差过大,否则会导致与煤层相邻的材料颗粒直径同样 减小,使得模型总体颗粒数超过 10 万个。通过多次 试验发现,煤层厚度对斜坡变形量值有影响,但对斜 坡的变形破坏特征影响极小。因此,模型中将煤层厚 度设置为 6 m,煤层颗粒球直径为 0.8 m,其他岩层颗 粒球直径 1~2 m,可在模拟效率和模拟结果两方面取 得良好的平衡,数值模拟模型见图 3。



通过统计分析现场测得的 53 条节理面的倾向、 倾角和迹长,结果表明上述指标服从高斯分布。因 此,在 PFC 模型中添加的节理面分布形式也采用高斯 分布。现场泥岩和煤结构面发育十分密集,岩体被切 割为1~10 cm 的块状,在数值模拟中按照泥岩和煤的 实际结构面发育特征添加裂隙网络将导致海量节理 面数据,使建模工作量和计算时间陡增,数值模拟难 以顺利完成。经多次试验,泥岩和煤层中不加入裂隙 网络,而是通过岩体参数折减的方式实现与添加结构 面类似的效果。模型中仅在粉砂岩和泥质粉砂岩中 按照上述方法添加裂隙网络(图 4),考虑到岩体分层 特性,在数值模拟中各岩层根据实际厚度适当放大, 考虑粉砂岩 15 m — 层,泥岩、泥质粉砂岩 5 m — 层, 通过指定节理添加至模型中。



尖山营变形体地下已开采6层煤,数值模拟试验 共设计7个模型,第一个模型为按照现今斜坡实际情 况自上而下逐层分步开采(简称:全开采模型),每步 一次性开采,待模型变形趋于稳定后再开采下一步, 其余6个模型每个模型单独开采一层(单层开采模 型),分别为:开采M1、M3、M5-2、M5-3、M7、M10,采 空区参数与1-1'剖面采空区参数一致,每层开采步骤 详见图5。计算时先形成初始应力场,再按照煤层实 际工作面数量进行分步开采。

为对比分析不同开采模型计算结果,各模型结束 计算的条件均为变形基本趋于稳定。在地表共设置 11个监测点以监测地表位移特征(图 3)。

# 4 数值模拟结果分析

# 4.1 斜坡全开采变形特征分析

尖山营变形体地下采煤历史久远,且为一般地下 采煤,地表移动观测数据缺失。为验证数值模拟参数 和模型的有效性、合理性,在单层开采模型前,利用全 开采模型(开采6层)数值模拟模型变形破坏特征与 斜坡现场变形破坏特征进行对比分析。

全开采模型位移特征、裂隙扩展特征以及位移矢 量特征见图 6。6 煤层全开采后斜坡变形强烈,斜坡





出现了显著的向坡外运动,斜坡后部出现"V"字形裂缝,如图 6(a)所示。此外,斜坡产生了显著的塌陷,塌陷最大位移超过 80 m,坡脚是塌陷最强烈的部位之一,如图 6(b)所示。斜坡在全开采后,斜坡中整体是以向下塌陷运动为主,并伴有向坡外水平运动,坡脚前部平台被向坡外推挤,如图 6(c)(e)所示。

图 7 表明全开采模型斜坡变形特征与现场实际变 形特征具有很好的对应关系,包括斜坡后部和顶部的 "V"字形拉裂,斜坡坡肩和坡脚附近塌陷强烈,坡脚前 部出现推挤溜滑现象。同时,斜坡开采前后地表轮廓 线对比表明,斜坡变形的主要特征是塌陷、水平挤出 变形。虽然模拟结果显示最大塌陷深度与实际监测 到的最大塌陷深度 21 m 有一定差异,但两者具有一定 的相似性。综上认为全开采模型显示出数值模拟参 数、模型的有效性。



Fig. 6 Features of slope displacement, crack development and resultant displacement displacement vector of full mining model (displacemnt unit: m)



图 7 全开采模型斜坡变形特征

Fig. 7 Slope deformation characteristics of full mining model mining

2022年

# 4.2 单层开采数值模拟结果

基于各单层开采模型中采空区参数不同,利用数 值模拟结果对斜坡整体变形特征、裂隙扩展特征和坡 表位移监测结果进行对比、统计分析,揭示缓倾层状 结构斜坡变形特征,以及采空区跨越坡脚、采空区宽 度、采空区深度、采空区含有煤柱以及重复采动对斜 坡变形的影响作用。

4.2.1 斜坡整体变形特征及分析

图 8 和图 9 为单层开采模型合位移特征和裂隙扩展特征,其中由于煤层质软,在上部斜坡变形过程中 也会引起煤层产生微裂隙,分析中可忽略。







Fig. 9 Fracture development characteristics of each model under different depth in single layer mining

图 8(a)和(b)对比发现, M1 和 M3 采空区宽度相 近, M3 采空区埋深增加, 但 M3 模型总体位移增大, 且 坡脚破坏更加严重, M1 和 M3 模型最显著的区别是 M3 采空区含有煤柱, 这可能表明采空区中存在煤柱 会加剧斜坡变形。开采 M1 模型裂隙主要集中在采空 区两侧边界位置, M3 模型显示坡脚和煤柱位置是裂 隙集中区域。

图 8(a)(b)和(c)对比发现, M5-2 模型变形程度 与 M1 模型接近, M5-2 模型显示出大变形区域明显小 于 M1 和 M3 模型, 但临空面变形值明显增大。M5-2 采空区与 M1 和 M3 采空区相比, 其宽度明显减小, 但采空区外边界跨越了坡脚, 表明采空区宽度增大和 采空区跨越坡脚对斜坡变形具有极不利作用。对比 图 9(c)与图 9(a)(b), 显示采空区跨越坡脚的 M5-2 模 型坡脚裂隙明显多于 M1、M3, 且 M5-2 采空区上覆岩体裂隙贯通量显著增大。

图 8(c)(d)表明, M5-3 与 M5-2 采空区参数除深 度外, 其他参数均十分接近, 但 M5-3 比 M5-2 模型整 体位移明显减小, 且最大位移主要集中在斜坡内部靠 近煤柱部位。这表明, 采空区跨越坡脚对斜坡存在极 不利作用, 采空区存在煤柱可能会增加斜坡变形程度。

图 8(e)显示开采 M7模型位移在所有模型中最 大,且坡脚出现了显著破坏。分析发现, M7模型不但 采空区宽度最大、含有多个煤柱,且采空区外边界也 跨越了坡脚,采空区对斜坡变形的上述不利因素均有 出现,尽管 M7煤层埋深显著大于前四个模型。开采 M7煤层斜坡变形特征再次表明,采空区宽度增大、采 空区跨越坡脚以及采空区中含有煤柱对斜坡变形有 显著不利影响,采空区深度增加不能弥补上述因素引 起的斜坡变形程度。M7煤层开采后裂隙特征主要表 现为坡脚损伤加剧、裂隙贯通量大、裂隙分布范围广。

图 8(f)显示 M10 模型变形为单层开采模型最小, 但范围最大,坡脚和煤柱部位出现较大的位移。 M10 模型采空区特征主要为埋深最大,且采空区外边 界跨越了坡脚。图 9(f)表现出坡脚裂隙发育集中,但 自采空区向上斜坡内部裂隙贯通量显著减小,这表明 尽管采空区埋深增加可减小斜坡变形,采空区跨越坡 脚仍然会导致坡脚产生强烈破坏。

4.2.2 斜坡坡表位移监测数据特征分析

图 10(a)显示了不同煤层开采各监测点水平方向的位移, M5-2 模型斜坡总体水平位移最大, M3 和

M7模型、M1和M10模型水平位移总体较为接近,开 采M5-3总体水平位移最小。各开采煤层模型监测点 位移结果显示,斜坡的主要变形区域为3~8号监测 点,其中8号监测点变形最为显著。除开采M5-3模 型外,其他各开采模型均表现出从坡脚至斜坡后部水 平位移逐渐减小的规律;8号监测点位于坡脚,在除 M5-3模型之外的其他模型中均表现出较大甚至最大 的水平位移值,这表明在斜坡开采过程中,除了采空 区上方区域外,坡脚是最容易产生变形的部位,且斜 坡表现出向坡前运动。当采空区跨越坡脚、含有煤柱 和采空区宽度过大(M7模型)时,坡脚破坏会更加剧 烈,即使采空区埋深增加,斜坡开采后坡脚的破坏同 样也不可避免。





图 10(b)显示了不同煤层开采各监测点在水平方向的位移,结果表明,竖向位移从7号监测点开始,越向坡内,沉降越小;除开采 M5-3和 M10 模型竖向位移较小外,其余模型竖向位移总体比较接近开采煤层厚度(6m),竖向位移最大值位于7号监测点附近。此外, M5-2和 M7模型坡脚外侧9号和10号监测点还出现了竖直向上的位移特征, M5-3模型竖向最大位移(-4.3m)出现了小于煤层厚度(6m)的情形。

上述结果表明,单层开采条件下斜坡竖向位移接 近煤层开采厚度,斜坡总体位移增大主要由水平位移 增大引起,斜坡临空面变形越严重水平位移增大越 显著。

4.3 斜坡变形特征影响因素分析

全开采模型结果表明,缓倾层状结构斜坡全开采 模型煤层采空区厚 36 m,但斜坡塌陷程度远大于此。 分析认为,斜坡全开采后,斜坡产生显著塌陷,坡脚和 临空面破坏是关键因素,引起斜坡产生向坡前较大的 水平位移,越靠近临空面水平位移越大,这为其后部 岩体变形提供更多空间,导致斜坡整体位移远大于煤 层开采总厚度。此外,临空面附近岩体由于长期强烈 风化卸荷作用更容易因采动作用产生碎裂性破坏,易 产生局部崩塌和滑坡现象<sup>[25]</sup>。

单层开采模型结果表明,对于缓倾层状结构采动 斜坡,一方面,坡脚极易因采动作用和上部岩体挤压 产生破坏,而坡脚对斜坡稳定起着关键作用<sup>[26]</sup>;另一 方面,由于这种斜坡地形起伏较大,当采空区外边界 跨越坡脚时,坡脚处采空区顶板到地面距离急剧减 小,导致斜坡开采深厚比(煤层埋深与开采厚度比值) 也急剧减小,地表移动变形加剧,岩体损伤更为严重, 地表产生大量裂缝,甚至出现强烈塌陷<sup>[27-28]</sup>。尖山营 变形体坡肩至坡脚平均高差约 200 m,开采厚度不变, 从坡肩至坡脚深厚比降低均大于 30;按实际采空区外 边界计深厚比(采空区外边界顶板至坡表距离与开采 厚度比值),开采后变形严重的 M5-2、M7 模型均出现 深厚比显著减小,接近坡脚计深厚比(采空区顶板至 坡脚距离与开采厚度比值);而开采后变形较小的 M5-3 模型,由于采空区未跨越坡脚,其采空区外边界计深 厚比与坡顶计深厚比(采空区顶板至坡顶距离与开采 厚度比值)一致; M1、M3 采空区外边界计深厚比介于 坡顶计深厚比与坡脚计深厚比之间,即采空区外边界 位于坡肩与坡脚之间,其变形程度也介于 M5-2 与 M5-3 之间; M10 开采模型具有最大的深厚比,虽然采空区 也跨越了坡脚,但其变形总体是最小的。这表明,在 地面起伏较大的山区采煤时,控制采空区布置特征进 而控制深厚比有利于斜坡稳定(图 11)。



in each coal seam

对比分析结果还表明,采空区宽度对斜坡变形具 有显著控制作用,主要表现为,采空区宽度越大斜坡 变形程度越大;采空区深度增加对减小斜坡变形有 利,但同时会使斜坡的变形范围增大;多层开采即重 复采动会显著加剧斜坡的变形程度,且远大于各单层 开采模型竖向和水平位移之和,重复多层采动不利于 斜坡稳定。此外,数值模拟结果显示,采空区存在煤 柱似乎会加剧斜坡变形,但采空区中煤柱对斜坡变形 的影响、降雨对斜坡稳定性影响还需要进一步研究。

# 5 结论

(1)发耳煤矿尖山营变形体是典型的缓倾层状结构斜坡,具有上陡下缓、上硬下软的特征。6层煤开 采后,斜坡出现了较大的整体变形,坡脚破坏引起斜 坡产生塌陷和水平推挤是斜坡竖向变形远大于开采 煤层总厚度的关键因素。 (2)斜坡全开采模拟结果与斜坡实际变形特征相符合,缓倾层状结构高陡采动斜坡多层开采后变形特征主要表现为:坡顶产生塌陷,斜坡向坡外运动,坡脚处臌胀,后缘拉裂形成"V"字形裂缝等,多层开采会显著加剧斜坡变形,且变形程度远大于各煤层单独开采之和。

(3)斜坡单层开采模拟结果表明,当采空区深厚 比降低时,斜坡变形量显著增加,两者呈负相关;采空 区跨越坡脚、采空区宽度增加等降低采空区深厚比的 工程措施会加剧斜坡变形;当采空区埋深增加时,斜 坡总体位移趋于减小,但变形范围会显著增加。

(4)在地形起伏大的条件下采煤,优化采空区布置、防止深厚比急剧减小、控制采空区宽度对减小斜坡变形具有重要作用;避免重复采动,开采更深部煤层对斜坡稳定性有利。

# 参考文献(References):

- [1] 赵建军,肖建国,向喜琼,等.缓倾煤层采空区滑坡形成机制数值模拟研究[J].煤炭学报,2014,39(3):424-429.
  [ZHAO Jianjun, XIAO Jianguo, XIANG Xiqiong, et al. Failure mechanism numerical simulation of mining landslide with gentle bedding coal strata[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 424 429. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 汤伏全.采动滑坡的机理分析[J].西安矿业学院学报,1989,9(3):32-36. [TANG Fuquan. Mechanism analysis of landslide by mining[J]. Journal of Xi 'an Mining Institute, 1989, 9(3):32-36. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄庆享,夏小刚.采动岩层与地表移动的"四带"划分研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(3):393-397.
  [HUANG Qingxiang, XIA Xiaogang. Division of "four zones" in mining strata and surface movement[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(3):393-397. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴彩燕,乔建平,王成华,等.贵州省纳雍县鬃岭镇 "12·3"大型崩塌灾害分析[J].水土保持研究,2006, 13(6):100 - 102. [WU Caiyan, QIAO Jianping, WANG Chenghua, et al. Analysis on "12·3" super largescaled landslide in Zongling, Nayong, Guizhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6): 100-102. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 曾辉.贵州凯里市龙场镇崩塌形成机制研究[D].成 都:成都理工大学,2014. [ZENG Hui. Research on the formation mechanism of Longchang town collapse in

Kaili, Guizhou[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract) ]

- [6] 肖建国.缓倾采空区斜坡变形破坏及运动特征研究
   —— 以贵州省青山煤矿为例[D]. 成都: 成都理工大 学, 2014. [XIAO Jianguo. Study on the deformation and failure and movement characteristics of slope in gently inclined goaf areas: Taking Peak Mine in Guizhou Province as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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. [ZHENG Guang, XU Qiang, JU Yuanzhen, et al. The Pusacun rockavalanche on August 28, 2017 in Zhangjiawan, Nayongxian, Guizhou: Characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 223 240. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 易同生.贵州省煤炭资源勘查与开发的现状、问题与 对策[J].中国煤炭,2010,36(6):32-36.[YITongsheng. Status-quo and issues of exploration and development of coal resources in Guizhou Province and solutions[J]. China Coal, 2010, 36(6): 32 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘传正,郭强,陈红旗.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, 2004, 15(4): 123 - 144. [LIU Chuanzheng, GUO Qiang, CHEN Hongqi. Preliminary analysis on the cause of dangerous rock collapse disaster in Yanjiaozhai, Nayong County, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(4): 123 - 144. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郑达,黄润秋,黄刚.地下开采作用下"反倾上硬下软"型斜坡崩塌形成机制研究——以贵州开阳磷矿崩塌为例[J].工程地质学报,2014,22(3):464-473.[ZHENG Da, HUANG Runqiu, HUANG Gang. Mechanism of rockfall with anti-dip and top hard-bottom soft rock by underground mining: A case study of rockfall in Kaiyang phosphorite, Guizhou[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 464 473. (in Chinese with English abstract)]
- [11] SCARINGI G, FAN X M, XU Q, et al. Some considerations on the use of numerical methods to simulate past landslides and possible new failures: the case of the recent Xinmo landslide (Sichuan, China)[J]. Landslides, 2018, 15(7): 1359 – 1375.
- [12] ALEJANO L R, FERRERO A M, RAMÍREZ-

OYANGUREN P, et al. Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(1): 16 – 26.

- [13] 崔杰,王兰生,王卫,等.采空区边坡变形破裂演化机制研究[J].采矿与安全工程学报,2008,25(4):409-414. [CUI Jie, WANG Lansheng, WANG Wei, et al. Deformation and fracturing mechanism of goaf slope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4):409-414. (in Chinese with English abstract)]
- [14] FATHI SALMI E, NAZEM M, KARAKUS M. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence[J]. Engineering Geology, 2017, 217: 141 – 152.
- ZHAO J J, XIAO J G, LEE M L, et al. Discrete element modeling of a mining-induced rock slide[J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 1633 – 1651.
- [16] 史文兵.山区缓倾煤层地下开采诱发斜坡变形破坏 机理研究——以贵州煤洞坡变形体为例[D].成都:成都 理工大学,2016. [SHI Wenbing. Research on deformation and failure mechanism of slope induced by underground mining in mountainous gently inclined coal strata: A case study of Meidongpo deformable rock mass of Guizhou Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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.
  [ZHAO Jianjun, MA Yuntao, LIN Bing, et al. Geomechanical mode of mining landslides with gently counter-inclined bedding: A case study of Madaling landslide in Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2217 -2224. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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. [ZHAO Jianjun, LIN Bing, MA Yuntao, et al. Physical modeling on deformation characteristics of overlying rock mass above mined-out area in gently inclined coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1369 1374. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 赵建军,李金锁,马运韬,等.降雨诱发采动滑坡物理 模拟试验研究[J].煤炭学报,2020,45(2):760-769.
   [ZHAO Jianjun, LI Jinsuo, MA Yuntao, et al. Experimental study on failure process of mining landslide

induced by rainfall[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 760 - 769. (in Chinese with English abstract)]

- [20] 严浩元.贵州省发耳煤矿尖山营变形体形成机制研究[D].成都:成都理工大学,2019.[YAN Haoyuan. Study on formation mechanism of Jianshanying deformation body in Fa'er minging area of Guizhou Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 郑达, 毛峰, 王沁沅, 等. 上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 89-95. [ZHENG Da, MAO Feng, WANG Qinyuan, et al. Physical simulation of the excavation deformation response of counter-tilt slope with rigid layers on the soft[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 89-95. (in Chinese with English abstract)]
- [22] REGASSA B, XU N X, MEI G. An equivalent discontinuous modeling method of jointed rock masses for DEM simulation of mining-induced rock movements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 108: 1 – 14.
- [23] DO TRONG N, WU J H. Simulating a mining-triggered rock avalanche using DDA: A case study in Nattai North, Australia[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105386.
- [24] LV Y Q. Numerical simulation and model of deformation features of destabilized mining slope under fault-controlled conditions[J]. Earth Sciences Research Journal, 2020, 24(1): 61 – 69.
- [25] 马文著,徐衍,李晓雷,等.基于黏聚力裂缝模型的反

倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟[J].水文地质工程地 质, 2020, 47(5): 150 – 160. [MA Wenzhu, XU Yan, LI Xiaolei, et al. A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 150 – 160. (in Chinese with English abstract)]

- [26] 泮晓华,秦四清,薛雷. 岩质斜坡锁固段破坏模式的物 理模型试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科 学版), 2018, 39(6): 13 - 18. [PAN Xiaohua, QIN Siqing, XUE Lei. Study on failure modes of various locked segments in rock slopes based on physical model tests[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 13 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. [ZOU Youfeng, DENG Kazhong, MA Weimin. Mining subsidence engineering [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003. (in Chinese)]
- [28] 刘博,姚腾飞,皮建高,等.基于RS和GIS的临武县矿山地质环境调查评价[J].中国地质灾害与防治学报,2020,125(1):135-142. [LIU Bo, YAO Tengfei, PI Jiangao, et al. Survey and evaluation of mine geological environment in Linwu County based on RS and GIS[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2020,125(1):135-142. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华