

厚层硬岩采动斜坡溃屈破坏规律研究

林孟铭, 赵建军, 邓杰, 李清淼

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 厚层硬岩采动斜坡受结构面切割形成的块体高径比控制, 可能发生整体倾倒、剪切滑移或底部溃屈进而产生大规模崩塌。但块体高径比对厚层硬岩采动斜坡破坏规律的影响仍不清楚。本文以贵州省纳雍县张家湾镇普酒村崩塌为原型, 采用离散元方法研究了块体高径比对厚层硬岩采动斜坡变形破坏规律的影响, 结果表明: 岩体高径比为2:1时, 厚层硬岩采动斜坡宏观变形现象以裂缝发育为主; 岩体高径比大于3:1时, 斜坡以坡脚溃屈-坡顶崩塌的模式发生破坏, 高径比大于4:1时崩塌规模明显增大。最后提出了破坏面水平深度与岩体高径比的关系式用于预测破坏面位置。所得结果为柱状岩体发育的厚层硬岩采动斜坡破坏模式分析提供依据, 也可用于该类采动斜坡最大崩塌规模的预测

关键词: 厚层硬岩; 高径比; 离散元法; 采动斜坡; 溃屈

中图分类号: P642.21; P694; X4 **文献标识码:** A

STUDY ON BUCKLING FAILURE LAW OF THICK HARD ROCK MINING SLOPE

LIN Meng-ming, ZHAO Jian-jun, DENG Jie, LI Qing-miao

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: When cutting through structural surfaces during thick hard rock mining, the height-to-diameter ratio of the blocks formed can greatly impact the stability of the slopes. This can result in various types of mass failures such as overturning, shear slip, or bottom failure. However, the effect of block height-to-diameter ratio on the damage pattern of mining slopes in thick hard rock is still unclear. This paper takes the collapse of Pushan Village, Zhangjiawan Town, Nayong County, Guizhou Province as a representative case. The discrete element method has been employed. The investigation focuses on the impact of block height-to-diameter ratio on the deformation and damage law of thick hard rock mining slopes. The results show that the macro deformation phenomenon of thick hard rock mining slopes is influenced by the development of cracks, particularly when the height-to-diameter ratio of the rock body is 2:1. When the height-diameter ratio of rock mass exceeds 3:1, the slope undergoes destruction through the mechanism of slope toe buckling and slope top collapse. When the height-to-diameter ratio exceeds 4:1, there is a noticeable increase in the collapse scale. Lastly, a relationship equation is proposed to predict the location of the damaged surface by taking into account the damaged surface's horizontal depth and the rock mass's height-to-diameter ratio. The findings derived from this study provide a fundamental

foundation for the analysis of damage characteristics in thick-layered hard-rock mining slopes that encompass columnar rock formations. Additionally, the results can be utilized in predicting the maximum collapse size for this type of mining slope.

Key words: thick hard rock; ratio of height to diameter; discrete element method; mining slope; buckling

1 前言

厚层硬岩斜坡岩层厚度一般大于 1 m,在重力、采动等外力作用下发生渐进破坏,斜坡沿岩体内部发育的陡倾节理后续可能发展为崩塌或倾倒破坏,进而形成高陡斜坡或陡崖地形,威胁周围群众的生命财产安全。1980 年湖北宜昌盐池山体崩滑造成 284 人死亡^[1];2013 年贵州省黔东南州凯里市龙场镇崩塌^[2];2017 年纳雍县普洒村“8·28”崩塌^[3]等。受节理裂隙发育情况、岩性组合等因素影响,厚层硬岩斜坡可能以剪切-错断、倾倒-拉裂、劈裂-溃屈等形式破坏^[4]。

国内外诸多专家学者结合大量地质资料,通过模拟实验及理论研究对厚层硬岩斜坡的失稳因素及破坏模式进行了大量研究。厚层硬岩斜坡常表现出高陡、直立陡崖或上陡下缓的地貌结构。当直立陡崖岩性以灰岩、白云岩等硬岩为主时,又可发育高径比大于 3 的塔柱状岩体,这类斜坡上部岩体受节理裂隙控制,通常可能发生整体倾倒、剪切滑移或底部溃屈^[5]。Susan 等在研究硬岩与软岩两种倾倒崩塌模式时,认为控制性节理对大型孤立塔柱状灰岩发生倾倒崩塌起关键作用^[6];R. Poisel 等在研究软岩层上的厚层硬岩边缘的崩滑失稳机理时,对塔柱状岩体及其形成的崩塌灾害做了较详细的论述,认为这类岩体主要发育于下伏软弱层的硬岩地层中,表现为“上硬下软(hard on soft)”以及节理的切割^[7-10];胡厚田等认为在近水平和缓倾红层软岩地区,通常发育两组近相互垂直的陡倾构造节理将巨厚层砂岩切割成板柱状,当这种板柱状岩体高悬于泥岩砂岩互层之上时,常发生各种类型的崩塌落石^[11];李明从岩体质量评价角度入手,认为脆性粗面岩的存在也是易发生崩塌的原因之一,被近直立节理切割的板、柱状岩体在重力作用下发生弯曲,弯曲一定程度后被折断^[12];卢黎通过有限元计算认为墙柱状危岩的破坏模式主要有滑移、倾倒和基座破坏 3 种可能^[13];冯振等总结了近水平厚层高陡斜坡崩塌的 6 种地质力学模型,认为柱状危岩体易发生

倾倒-拉裂式破坏,发育陡倾结构面的厚层硬岩斜坡可能以劈裂-溃屈形式破坏^[4];贺凯以重庆南川甑子岩塔柱状岩体崩塌为例,从损伤力学理论角度进行深入解析,提出了塔柱状岩体稳定性计算分析方法^[14];岑夺丰等通过研究块裂反倾巨厚层状岩质边坡破坏机制发现岩块相邻边长比 l/h 越大,边坡越容易发生倾倒破坏^[15];邓杰等提出“沉陷-溃屈”破坏模式来解释竖向节理发育的柱状岩体的采动破坏机制^[16]。

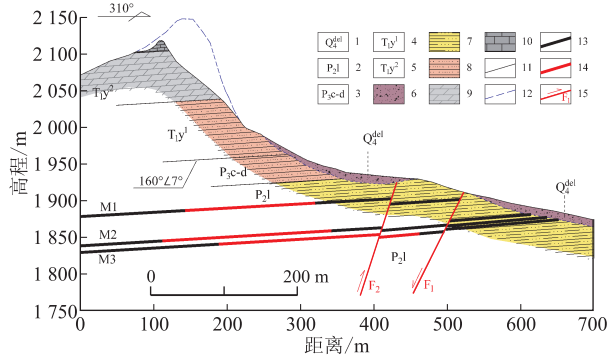
上述研究发现厚层硬岩斜坡中发育的竖向节理将岩层切割成板、柱状岩体,在外力作用下可能以剪切滑移、倾倒崩塌或溃屈等不同形式发生不同规模的破坏。这些研究多以具有明确的岩体高径比的厚层硬岩斜坡为研究对象,进而展开斜坡破坏原因、破坏机制及破坏模式的分析。而关于厚层硬岩斜坡岩体具有不同高径比时,在采动作用下斜坡变形破坏规律的研究还不清晰。本文以贵州省纳雍县张家湾镇普洒村崩塌为原型,通过离散元方法研究岩体具有不同高径比时对厚层硬岩斜坡的变形破坏规律及破坏面位置的影响。

2 普洒村崩塌基本特征

贵州纳雍普洒村崩塌区内地势整体表现为南高北低,斜坡南东侧地势较缓,坡度 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$,以泥岩、粉砂岩、第四系填土为主,北西侧发育陡崖,坡度 $55^{\circ}\sim 75^{\circ}$,以灰岩、泥灰岩为主,表现为西南地区典型的上陡下缓、上硬下软地貌^[17,18]。

崩滑区内出露的地层由老至新主要为:上二叠统龙潭组(P_2l)主要由薄层粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥岩及煤层组成;上二叠统长兴-大龙组(P_2c+d)的主要岩性为泥灰岩、中厚层粉砂岩夹薄层页岩;下三叠统夜郎组(T_1y),主要由中厚层灰岩组成,含少量砂岩及泥岩。总体来说,山体上部的 T_1y 、 P_2c+d 灰岩、泥灰岩、粉砂岩岩石结构致密,力学强度高,抗风化能力强;山体下部的 P_2l 粉砂质泥岩、泥岩强度较低,构成上硬下软工程地质特征^[3,19-21],工程地质剖面图如图 1。据资料显示,斜坡失稳前中

上部岩体主要发育的结构面包括:(1)斜坡的斜向结构面,即坡表结构面($J_1:13^\circ/85^\circ$);(2)陡倾交叉结构面($J_2:80^\circ/80^\circ$),与斜坡方向相同;(3)陡倾侧向结构面($J_3:145^\circ/80^\circ$),与斜坡方向大致垂直,横向结构面与垂直结构面将岩体划分为柱状岩体,竖向节理长度 10~18 m,形成的柱状岩块高径比约为 5:1^[16]。



1. 第四系;2. 上二叠统龙潭组;3. 上二叠统长兴-大隆组;4. 下三叠统夜郎组一段;5. 下三叠统夜郎组二段;6. 崩破积物;7. 粉砂质泥岩;8. 粉砂岩;9. 泥灰岩;10. 灰岩;11. 现在的地形线;12. 原始的地形线;13. 煤层;14. 采空区;15. 断层及编号

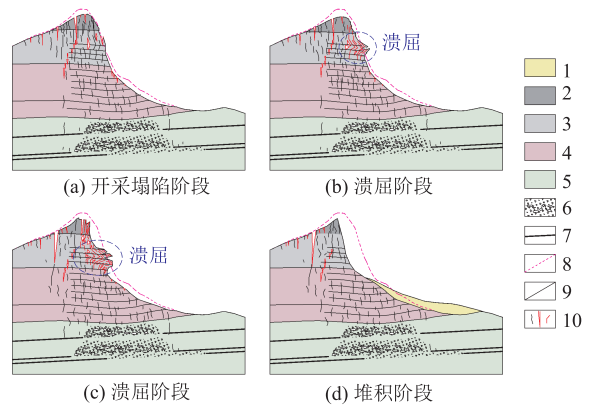
图 1 普洒村崩塌工程地质剖面图

普洒斜坡采动作用下最终以沉陷-溃屈的模式发生破坏,如图 2 所示。煤层开采后在斜坡下部形成采空区,采空区逐渐弯曲破坏,斜坡中上部岩体发育多组竖向裂隙,采空区上覆岩体向下塌陷不断压实下部破碎块体。斜坡后缘拉裂缝变大变深,柱状结构岩体偏转后推动外侧岩体向临空面扩容鼓胀,坡表岩体破碎剥落。在自重及降雨等因素作用下,岩体强度不断降低。当中部柱状岩体结构的应力大于自身的长期强度时,在竖向和横向力的作用下产生溃屈破坏,折断剪出,最终导致斜坡整体失稳破坏^[16]。

3 厚层硬岩采动斜坡破坏规律研究

3.1 地质模型概化

为研究厚层硬岩采动斜坡的破坏规律,本文以纳雍普洒村崩塌为原型对山体进行合理概化,通过离散元方法模拟不同高径比(高度:直径)对厚层硬岩采动斜坡破坏规律的影响,如图 3 所示。平行于剖面的节理不能用倾角来表示^[22],因此概化后的模型主要考虑层面和向外倾斜节理,没有考虑交叉节理。煤层和岩体选用 Mohr-Coulomb 模型,节理采用摩尔-库伦面接触滑动模型。对模型的左、右边界的水平位移和底边界的竖向位移进行约束,上边界为自由边界。



1. 崩塌积物;2. 灰岩;3. 泥灰岩;4. 粉砂岩;5. 粉砂质泥岩;6. 采空区覆岩;7. 煤层;8. 原始地形线;9. 现在地形线;10. 裂缝
图 2 普洒村崩塌溃屈破坏模式图(引自 Mechanism of subsidence-buckling and instability of slopes in thick-layered rigid rock under mining, Deng, 2023)

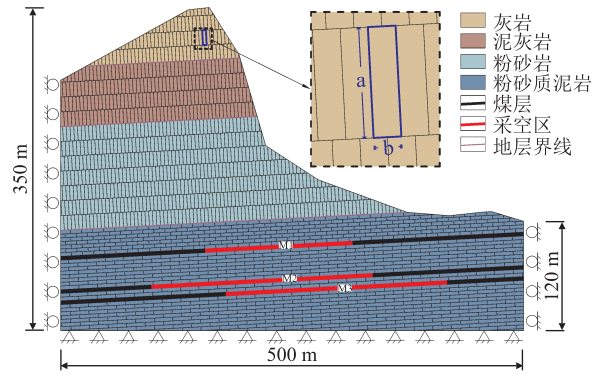


图 3 计算模型及边界固定

为研究岩体高径比对厚层硬岩采动斜坡的破坏影响,因此设模型上部灰岩、泥灰岩、粉砂岩岩层中岩块的高径比为 $a:b$,分别设置同一直径、不同高度的岩体,共计 6 种方案,具体方案如表 1,其中 5:1 的高径比模拟方案原型为普洒村崩塌。模型中煤层开采 M1、M2、M3,煤层厚度 4 m,采空区宽度分别为 160 m、240 m、240 m。依次开采 M1、M2、M3,每层煤层一次采完,计算 10^5 步后进行下一次开采,3 层煤采完后计算至模型应力、变形稳定。

表 1 模拟方案

		不同高径比(a:b)				
高度 a/m	6	9	12	15	18	21
直径 b/m	3	3	3	3	3	3
高径比(a:b)	2:1	3:1	4:1	5:1	6:1	7:1

3.2 数值模拟参数

岩体、层面及节理的物理力学参数主要参考文献^[3,19,23,24],根据工程类比与经验取得,具体参数取值如表 2、表 3。

表 2 岩体物理力学参数表

岩性	密度 /kg·m ⁻³	体积 模量 /GPa	剪切 模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩 擦角 /°	抗拉 强度 /MPa
灰岩	2.70	32.73	21.72	17.52	43.02	9.90
泥灰岩	2.65	25.45	19.55	15.53	41.07	8.60
粉砂岩	2.60	22.35	17.13	11.51	35.75	6.40
粉砂质泥岩	2.56	15.13	13.23	5.24	30.11	2.50
煤层	1.35	4.00	2.50	0.52	27.98	0.31

表 3 结构面物理力学参数表

结构面类型	法向刚 度系数 /GPa	切向刚 度系数 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩 擦角 /°	抗拉 强度 /MPa
煤层交界面	2.8	2.9	0.80	15	0.10
其他岩层交界面	16.0	16.0	1.60	22	0.15
灰岩节理	28.0	26.0	3.50	32	0.05
泥灰岩节理	27.0	25.0	2.50	29	0.08
粉砂岩节理	16.0	14.0	1.60	23	0.06
粉砂质泥岩节理	10.0	8.0	1.32	17	0.03

3.3 厚层硬岩采动斜坡变形破坏规律分析

3.3.1 厚层硬岩采动斜坡变形演化过程

M1 开采后,随岩体高径比的增加,采空区上方覆岩中软硬岩交界处离层现象逐渐明显,地表离层现象逐渐减弱,高径比为 2:1 时地表发育宏观裂缝,如图 4(1)~图 4(6)。当高径比为 2:1 时,M1 开采后计算 10⁵ 时步后采空区上覆岩层整体下沉 4.38 m,距坡顶垂直距离 120 m 处地表出现压致拉裂缝;采空区正上方柱状岩层下沉弯曲形成纵向裂隙。高径比大于 3:1 时,采空区正上方未见明显弯曲拉裂缝发育;采空区上方覆岩中软硬岩交界处出现离层现象,离层距离随高径比的增加而增大。当高径比大于 4:1 时斜坡内部下错裂缝及地表离层现象发育不明显,裂缝逐渐向坡顶及斜坡后部发育。随着高径比的增大斜坡中部裂缝发育程度减弱,覆岩离层距离逐渐增大。

M2 开采后,裂缝发育情况随岩体高径比的增加而变化,采空区上方覆岩中软硬岩交界处离层距离与岩体高径比表现出正相关性,高径比介于 2:1~3:1 时地表均发育宏观裂缝,如图 4(7)~图 4(12)。继续开采 M2 后计算 10⁵ 时步发现覆岩二次采动后沉降更为充分,高径比介于 2:1~3:1 时,斜坡中部拉裂缝距坡顶的垂直距离由 80 m 变为 60 m。随高径比的增加,裂缝发育高度及倾角明显增大,并逐渐向坡顶及斜坡后部发育,采空区上方覆岩弯曲拉裂形成的纵向裂隙发育范围逐渐减小。当高径比大于 4:1 时,柱状岩层弯曲下沉度减小,未见明显纵向裂隙发育,采空区上方覆岩中软硬岩交界

处出现离层现象,且离层距离随高径比的增加而增大。

开采 M3 后,地表离层现象明显但与岩体高径比呈负相关性,采空区上方覆岩中软硬岩交界处离层距离依旧与岩体高径比呈正相关性,当覆岩高径比介于 2:1~4:1 时,斜坡中部均发育拉裂缝,如图 4(13)~图 4(18)。M3 进一步开采计算 10⁵ 时步后,不同高径比覆岩的采动斜坡变形有所加剧,重复采动后,覆岩进一步沉降变形。当覆岩高径比介于 2:1~4:1 时,斜坡中部均发育拉裂缝,到坡顶的垂直距离有所不同。高径比 4:1 时,地表宏观裂缝发育位置较靠近坡脚,且发育程度有所减弱,由于柱状岩层弯曲下沉度减小,采空区上方覆岩中软硬岩交界处开始出现离层现象,离层距离随高径比的增加而增大。

煤层 M1、M2、M3 相继开采后,随计算时步的增加,斜坡顶部发育的深大裂隙持续扩展,继而坡脚可能出现溃屈现象,表现为岩体向临空面倾倒或挤出,如图 5。高径比为 2:1 时,斜坡发育多条裂缝,未见溃屈现象。高径比小于 3:1 时,斜坡宏观变形现象主要表现为坡顶深大裂隙的扩展。高径比大于 3:1 时,斜坡除在坡顶发育深大裂隙外,还表现出斜坡中部溃屈最终上部岩体崩落解体。斜坡发育的多组陡倾节理将岩体切割为柱状块体,以弯曲沉降特征不断变形,破坏过程中节理张开、斜坡内部裂隙不断发育,顶部裂缝不断扩张形成深大裂隙,外侧岩体不断向临空面倾倒,对下部岩体产生挤压。斜坡中部岩体在内部水平推力作用下发生偏转,不断向外侧挤出或向临空面倾倒,表现出侧向扩容鼓胀特征,斜坡进入临界失稳状态。变形继续发展斜坡中部岩体碎裂挤出或倾倒而脱离母岩,对上部岩体的支撑力下降,斜坡内部裂隙不断扩展,在内侧岩体水平推挤力的持续作用下,上部岩体向临空侧倾倒或沿斜坡中部溃屈处剪出,最终斜坡失稳解体形成碎屑流。溃屈现象出现时间随高径比的增加而延后,但溃屈位置大致相同,均位于坡脚处。

计算至平衡状态,斜坡整体破坏情况如图 6。采动作用下斜坡顶部深大裂隙持续扩张,上部岩体在内侧岩体水平推力作用下表现出侧向扩容特征,当岩体高径比大于 3:1 时,斜坡中部岩体受压鼓胀挤出或向临空侧倾倒,上部岩体失去支撑沿陡倾节理崩落解体,后缘形成陡立后壁。高径比大于 4:1 时,岩体崩滑规模明显增大,破坏面形态均呈现出上陡下缓,后缘边界随高径比的增大逐渐向斜坡后部移动,高径比大于 6:1 后,后缘边界向临空侧移动,

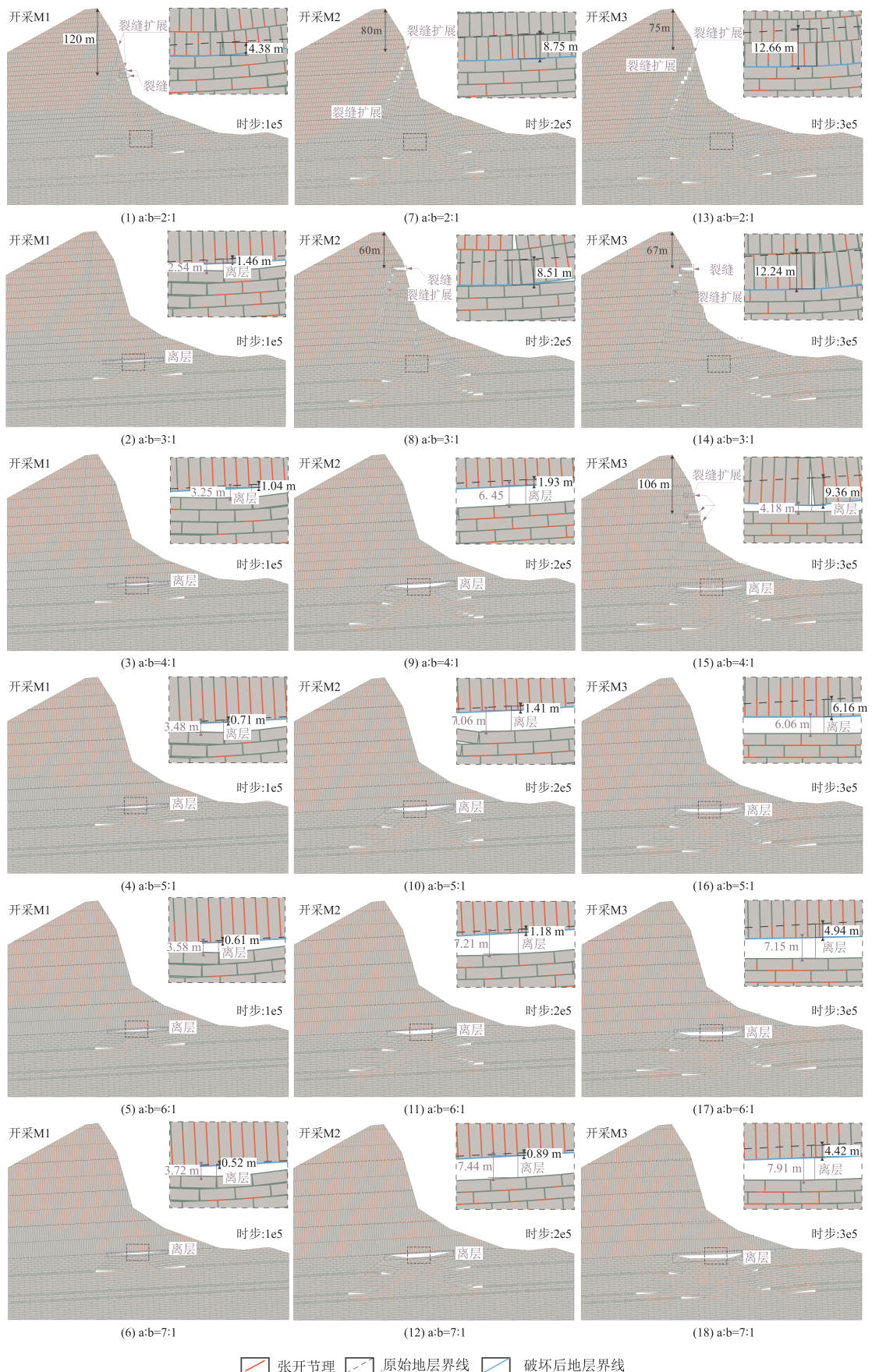


图 4 M1、M2、M3 相继开采后覆岩变形情况

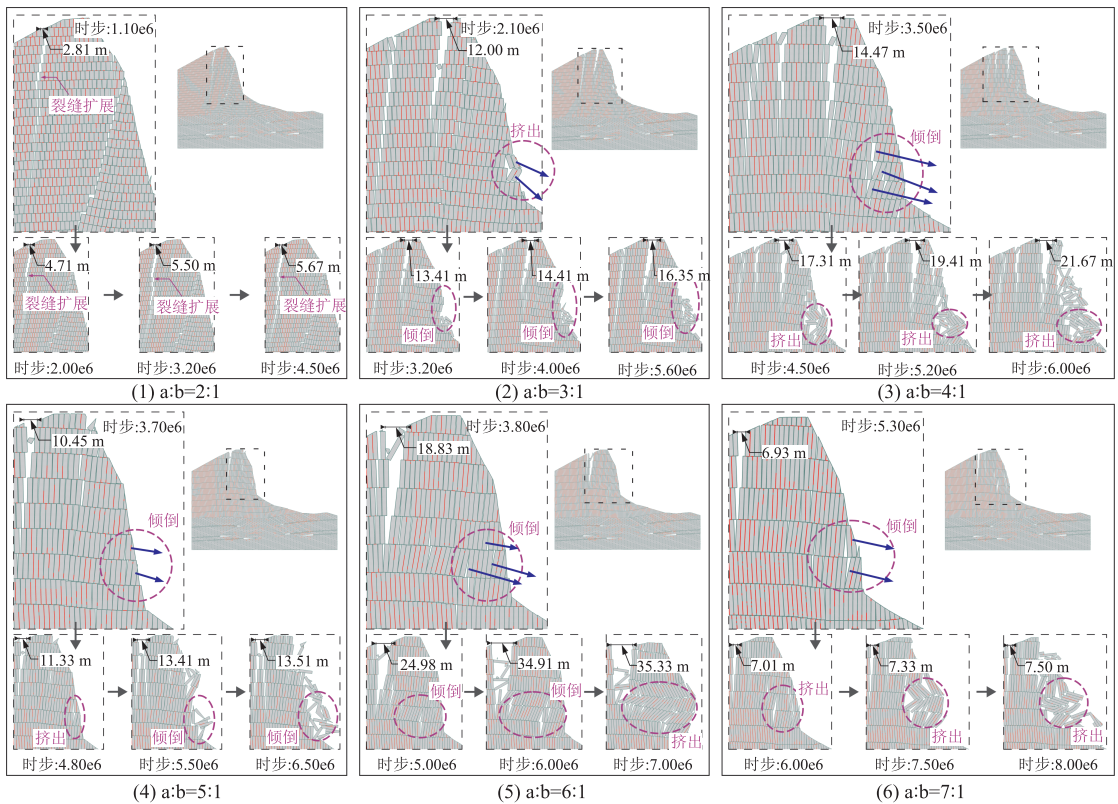


图5 斜坡中上部破坏过程(部分)

不同高径比斜坡发生溃屈破坏时剪出口基本一致,均位于斜坡中部。崩塌后破坏面水平深度 D 与高径比呈非线性抛物线关系,后缘依旧发育深大裂隙,再次受扰可能继续发生崩塌,其中高径比为 6:1 时,斜坡沿后缘深大裂隙发生崩落,崩塌范围达到最大值。

3.3.2 高径比对厚层硬岩采动斜坡破坏的影响

结果表明,岩体高径比影响厚层硬岩采动斜坡的破坏模式及规模。高径比越大意味着竖向节理越发育,煤层开采后上覆岩体弯曲下沉,岩体竖向节理被不断拉开后,在水平力作用下,岩块脱离母岩发生偏转,与周围的岩块形成三铰拱式结构^[16,25],如图 7。柱状岩体将上部岩体的重力,转变为竖向作用的压力和水平向作用的推力,挤压外侧坡体向临空侧发生运动,同时岩块也积聚大量的能量,当岩体强度降低后会突然发生破坏。高径比越大的岩块,质心高差 Δh 也随之增大,岩块将具有更大的重力势能进而产生更大的水平推力作用于外侧岩块,岩块偏转角 β 不断增大,不断向外侧挤出或向临空面倾倒,最终产生不同规模的崩塌。

通过最小二乘法对高径比与柱状岩体溃屈破坏后破坏面水平深度 D 之间关系曲线进行拟合,如图 8,得到破坏面水平深度 D 与高径比之间的拟合曲

线。

根据拟合曲线,建议的经验公式如下:

$$D = 62.8e^{-e^{-(\frac{3-\alpha}{2})-\frac{\alpha}{2}+1}} + 3.3 \quad (1)$$

其中, α 为高径比 $a:b$, 满足 $\alpha > 3$; D 为破坏面水平深度, 单位 m 。

对拟合公式(1)的有效性分析,得到其拟合优度为 0.90, 拟合度较高。为了验证所得公式可靠性,公式(1)计算岩体高径比为 8.3 的甑子岩^[5,26-29]崩塌后破坏面的水平深度为 43 m, 与实际值 38 m 相差 5 m, 误差约 13.15%, 表明该经验公式可用于厚层硬岩斜坡发生溃屈式破坏后破坏面位置的初步预测。需要注意的是, 岩体高径比只是可能影响采动斜坡破坏的众多因素之一(即边坡坡度、岩性、采空区位置、采空区厚度等), 需要更多模拟研究才能在高径比和采动斜坡破坏面发育位置之间建立更全面的关系。

4 结论

本文通过离散元法研究了以贵州省纳雍县张家湾镇普洒村崩塌为原型的厚层硬岩采动斜坡在上覆岩体具有不同高径比时的变形破坏规律及破坏面位置发育情况。通过对数值模拟结果进行分析, 得到以下结论:

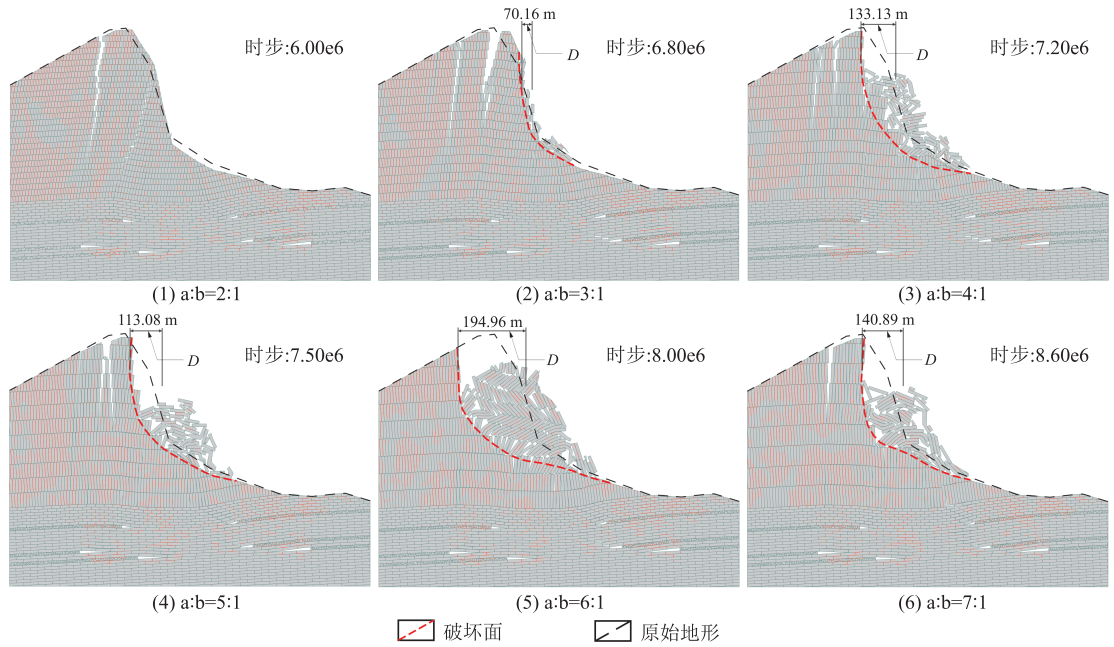


图 6 斜坡最终破坏形态

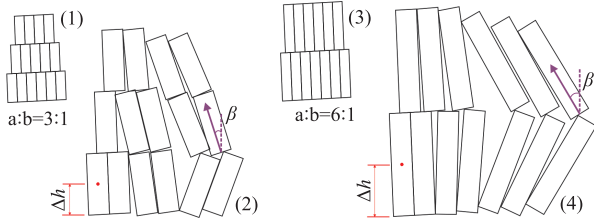


图 7 不同高径比岩体三铰拱式结构图

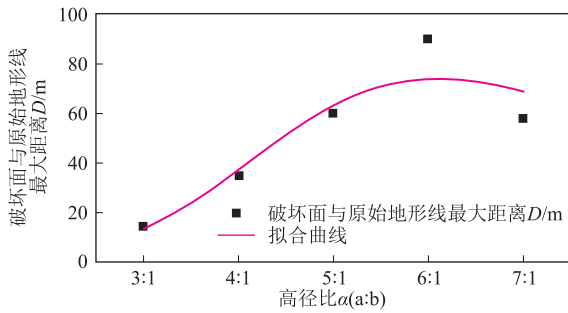


图 8 破坏面水平深度 D 与高径比关系

(1) 煤层 M1~M3 依次开采过程中,厚层硬岩采动斜坡在高径比介于 2 : 1~4 : 1 时,随煤层的开采斜坡裂隙从采空区上方逐步向上延伸至地表,形成拉裂缝。采空区上方软硬岩交界处的离层现象在高径比 2 : 1 时不明显,高径比大于 4 : 1 时,离层距离明显增大。

(2) 厚层硬岩采动斜坡宏观变形发育过程中,岩体高径比为 2 : 1 时,斜坡发育多条裂缝,未出现溃屈现象。岩体高径比大于 3 : 1 时,斜坡后缘发育的深大裂隙持续扩展,外侧岩体不断向临空侧扩容,

最终斜坡以坡脚溃屈-坡顶崩滑的模式发生破坏,并在后缘形成陡壁,在外力作用下仍有继续变形的可能。

(3) 厚层硬岩采动斜坡以溃屈-崩滑的模式发生破坏后,崩滑规模在岩体高径比大于 4 : 1 时明显增大,但岩体溃屈现象发育位置基本一致,破坏面水平深度与岩体高径比呈非线性抛物线关系。

本文通过离散元方法研究了岩体不同高径比对厚层硬岩采动斜坡破坏规律的影响,研究结论可以为柱状岩体发育的厚层硬岩采动斜坡破坏模式分析提供依据,同时也可用于该类采动斜坡破坏面水平深度的预测。

参考文献

[1] 刘传正,肖锐铨. 湖北远安盐池河 1980 年“6.3”山崩灾难成因分析[J]. 灾害学,2021,36(2):130-133+150.
 [2] 李俊. 平缓倾内上硬下软型崩塌形成机制及识别研究[D]. 成都理工大学,2016.
 [3] 肖锐铨,陈红旗,冷洋洋,等. 贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):3-9.
 [4] 冯振,李滨,贺凯. 近水平厚层高陡斜坡崩塌机制研究[J]. 地质力学学报,2014,20(2):123-131.
 [5] 贺凯. 塔柱状岩体崩塌机理研究[D]. 长安大学,2015.
 [6] NICHOL S L, HUNGR O, EVANS S G. Large-scale brittle and ductile toppling of rock slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal,2002,39(4):773-788.
 [7] PREH A, POISEL R, KRASTANOV J. Investigation of the

- failure mechanisms of hard, competent rock lying on a soft, incompetent base by PFC~(2D)[C]. 1st International PFC Symposium on Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, Nov 6-8, 2002, Gelsenkirchen, Germany. Gelsenkirchen, 2002.
- [8] POISEL RAINER, BEDNARIK MARTIN, HOLZER RUDOLF, et al. Geomechanics of Hazardous Landslides[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 2(3): 211-217.
- [9] POISEL R R, ANGERER H, PÖLLINGER M, et al. Mechanics and velocity of the Lärchberg - Galgenwald landslide (Austria)[J]. Engineering Geology, 2009, 109(1-2): 57-66.
- [10] POISEL R, STEGER W, ZEITLER A. Stability Investigations of Competent Rock Masses Lying On an Incompetent Base [C]. 7th ISRM Congress, OnePetro, 1991.
- [11] 胡厚田, 赵晓彦. 中国红层边坡岩体结构类型的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, (6): 689-694.
- [12] 李明. 长白山龙门峰高陡边坡岩体质量评价[D]. 吉林大学, 2012.
- [13] 卢黎. 重庆洪崖洞危岩边坡破坏和加固机理研究[D]. 重庆大学, 2003.
- [14] 贺凯, 殷跃平, 冯振, 等. 重庆南川甄子岩-二垭岩危岩带特征及其稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 16-22.
- [15] 岑夺丰, 黄达, 黄润秋. 块裂反倾巨厚层状岩质边坡变形破坏颗粒流模拟及稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 984-993.
- [16] DENG J, ZHAO J jun, LAI Q yi, et al. Mechanism of subsidence-buckling and instability of slopes in thick-layered rigid rock under mining[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(8): 2370-2387.
- [17] XIONG S, SHI W, WANG Y, et al. Deformation and Failure Process of Slope Caused by Underground Mining: A Case Study of Pusa Collapse in Nayong County, Guizhou Province, China[J]. GEOFLUIDS, 2022.
- [18] CUI F, LI B, XIONG C, et al. Dynamic triggering mechanism of the Pusa mining-induced landslide in Nayong County, Guizhou Province, China [J]. GEOMATICS NATURAL HAZARDS & RISK, 2022, 13(1): 123-147.
- [19] 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.
- [20] FAN X, XU Q, SCARINGI G, et al. The "long" runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: a preliminary report[J]. LANDSLIDES, 2019, 16(1): 139-154.
- [21] ZHANG S, SHI W, YANG C, et al. Experimental evaluation of gentle anti-dip slope deformation and fracture network under the action of underground mining[J]. Landslides, 2023, 20(2): 381-408.
- [22] RAJINDER B, AMIR M K. Static and dynamic simulation of a 700-m high rock slope in western Norway[J]. Engineering Geology, 2004, 71(3-4): 213-226.
- [23] 杨忠平, 蒋源文, 李滨, 等. 采动作用下岩溶山体深大裂隙扩展贯通机理研究[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 459-470.
- [24] 钟祖良, 高国富, 刘新荣, 等. 地下采动下含深大裂隙岩溶山体变形响应特征[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 97-106.
- [25] 李艾浓. 缓倾厚层岩质采动斜坡沉降-溃屈失稳机理研究[D]. 成都理工大学, 2021.
- [26] 黄波林, 殷跃平, 李滨, 等. 库区城镇滑坡涌浪风险评价与减灾研究[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1949-1961.
- [27] 孔祥器, 李滨, 贺凯, 等. 柱状岩体崩塌动力特征与破碎规律——以重庆甄子岩崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 1-10.
- [28] 贺凯, 殷跃平, 冯振, 等. 重庆南川甄子岩-二垭岩危岩带特征及其稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 16-22.
- [29] 贺凯, 殷跃平, 李滨, 等. 塔柱状岩体崩塌运动特征分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 86-92.

作者简介: 林孟铭(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事矿山灾害研究工作: 矿山灾害。E-mail: 2323094867@qq.com

通讯作者: 赵建军(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程高边坡稳定性、矿山地质灾害等研究工作。E-mail: j.j.zhao@qq.com