

井工煤矿采动影响下的边坡稳定性分析

陈金宏^{1,2}, 胡应全², 袁琴², 王刘文²

(1. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵阳 550025; 2. 贵州煤设地质工程有限责任公司, 贵阳 550025)

摘要: 井工煤矿开采引起的地表移动变形使边坡岩土体结构发生破坏, 进而影响边坡稳定性。以贵州六盘水大湾煤矿东井妈姑底北侧采动边坡为研究对象, 在现场详细勘查的基础上, 分析总结了采动影响下边坡的变形特征及机理, 并通过定性判断、定量计算、数值模拟等方法分析了边坡的稳定性。结果表明: 受煤矿地下采动影响, 妈姑底北侧边坡以开裂下沉为主, 不会发生深层基岩滑坡, 但地形较陡地段发生局部崩(滑)塌的可能性较大。该结论与矿区实际情况基本吻合, 可为类似矿山开采影响下的边坡稳定性分析提供参考。

关键词: 井工煤矿; 采动影响; 边坡; 稳定性分析

中图分类号: TD167 **文献标识码:** A

ANALYSIS OF SLOPE STABILITY UNDER THE INFLUENCE OF UNDERGROUND COAL MINING

CHEN Jin-hong^{1,2}, HU Ying-quan², YUAN Qin², WANG Liu-wen²

(1. Guizhou Coal Mine Design and Research Institute, Ltd., Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Coal Design Geological Engineering Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: The surface movement and deformation caused by the mining of underground coal mines could lead to damage to the rock and soil structure of the slope, which in turn affects the stability of the slope. This paper takes the mining slope on the north side of Magudi in the east well of Dawan Coal Mine in Liupanshui of Guizhou province as the research object. The deformation characteristics and mechanisms of slopes were analyzed and summarized under the influence of coal mining based on a detailed on-site investigation, and the stability of the slope was analyzed through qualitative judgment, quantitative calculation, numerical simulation and other methods. The results showed that the influence of underground coal mining, on the slope of northern in Magudi is mainly cracking and sinking, which had no effect on the deep bedrock landslides. However, a higher possibility of local collapse (or sliding) might happen in steep terrain areas. This conclusion in this paper is basically consistent with the actual situation in the mining area, and can provide reference for slope stability analysis under the influence of similar coal mining operations.

Key words: underground coal mines; mining influence; slope; stability analysis

近年来,随着煤矿井工开采技术的发展,贵州山区深部煤炭资源得到充分开发利用,与此同时,由煤

矿地下开采引发的滑坡、崩塌等地质灾害频繁发生,造成大量人员伤亡和财产损失。因此,在山区地下

收稿日期: 2024-01-19 改回日期: 2024-04-07

基金项目: 贵州省煤矿安全高效开采技术支撑与服务人才基地基金项目(GMY-RD2022. KJ-010)

煤炭资源开采过程中,正确分析采动影响下的边坡稳定性对减少矿山地质灾害发生、保障矿山安全生产具有重要意义。

目前,煤炭行业诸多专家学者对采动边坡变形机理、破坏模式、稳定性评价方法等作了大量研究。丁鑫品等人通过模型实验、数值分析和室内测试相结合的方法研究了露采顺层边坡变形破坏过程和滑动面岩土体性质演化规律^[1];钟祖良等人通过相似模型试验研究了采动作用下坡体的地表沉降、内部位移、层间压力变化规律及采动诱发的地裂缝发育情况等^[2];樊克恭等采用 FLAC^{3D} 模拟采动影响下不同倾角坡体的位移变形情况,详细分析了坡体倾角与其稳定性的关系^[3];王创业等采用数值模拟和相似材料模拟研究了不同井采方向边坡变形破坏特征及稳定性^[4];常远等通过数值分析研究了节理岩体边坡采动损伤的时空变化特征及其对边坡稳定性的影响^[5];徐杨青等通过对边坡进行实时变现监测及数值分析探讨了复合采动边坡的变形机理及其稳定性评价方法^[6]。

以上这些研究为井工煤矿采动影响下的边坡稳定性分析提供了较好的工作思路,但是,由于不同矿区地形地质条件存在复杂性和差异性,在不同地质采矿条件下采动边坡变形特征和机理必然不同。因此,深化认识山区地形地质条件下井工煤矿采动边坡的变形特征,进一步完善采动边坡稳定性分析和评价方法具有重要的理论意义和实践价值。

本文以贵州六盘水市大湾煤矿东井妈姑底采动边坡为例,在现场详细勘查的基础上,总结了井工煤矿开采引发的地质灾害发育特征及其变形机制,并结合定性判断、定量计算、数值模拟等方法进一步分析了边坡的稳定性,分析方法可为类似边坡稳定性分析评价提供参考。

1 边坡概况

1.1 边坡概况

贵州六盘水市大湾煤矿东井位于贵州省六盘水市钟山区与贵州省毕节市威宁县东风镇交界。2023年2月8日,在矿区妈姑底北侧坡体中上部发现多条裂缝,长约8.0~20.0 m,宽10.0~30.0 cm,最大可见深度约1.0 m,至2023年5月20日,裂缝最大长度达到71.0 m,最大缝宽约80 cm,初步判断坡体存在发生大面积滑坡的风险。坡体概貌见图1。

为确保妈姑底居民生命财产安全,相关主管部门及时对下部居民(19户81人)采取了避险安置措施。



图1 妈姑底北侧边坡概貌

1.2 工程地质条件

井区出露地层由新至老分别如下:

①第四系(Q):由残坡积、冲积含碎石黏土组成,碎石含量为20%~30%,颜色杂乱,其主要分布于斜坡体中下部缓坡及沟谷地带,厚0~20.0 m;②三叠系下统飞仙关组(T₁f)砂岩、泥岩:以紫色、暗灰紫色薄-中厚层状粉砂岩、细砂岩为主,局部夹浅灰绿色、薄层状的钙质泥岩,该层厚440.0~550.0 m,平均厚504.0 m,主要出露于斜坡体中上部及局部垮塌区域;③二叠系乐平统龙潭组(P₃l):由浅灰至深灰色细砂岩、粉砂岩、黑色泥岩、灰黑色砂质泥岩及煤层组成,底部为暗紫色铁质泥岩及灰绿色角砾状凝灰岩,该层厚180.0~240.0 m,平均厚234.3 m,为区内主要含煤地层,在边坡北部5 km处局部出露。井区典型工程地质剖面见图2。

边坡位于二塘向斜北翼,地层产状平缓,倾向SW170°~210°,倾角为5°~15°,小型断层、褶皱较为发育,受构造影响,岩体较破碎。

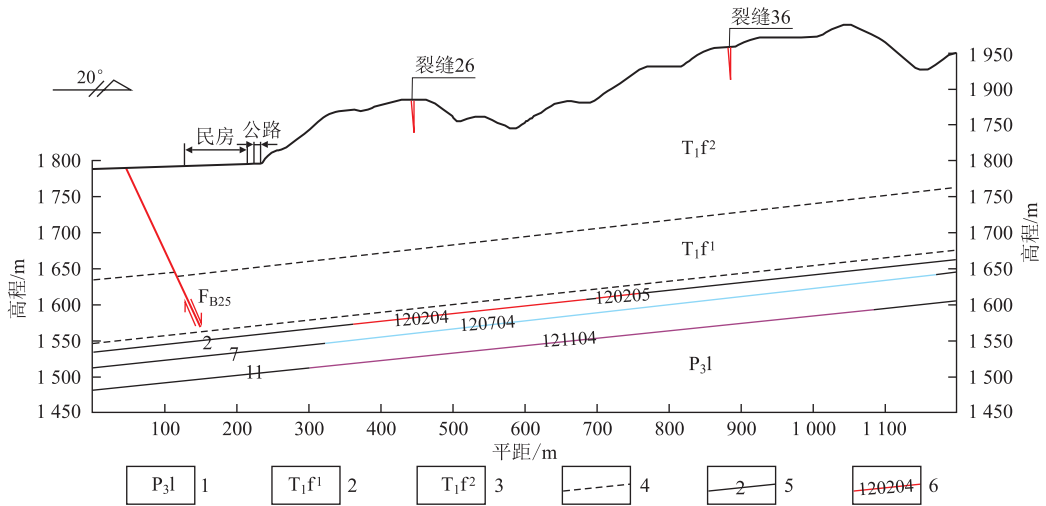
边坡所在区域地震基本烈度为7度,设计分组为第二组,地震加速度为0.1 g,地震动反应谱特征周期为0.40 s。

边坡中地下水主要以第四系土层中的上层滞水及基岩裂隙水的形式存在,大气降水为地下水的主要补给来源,其通过岩土体内的裂隙向地势低洼处排泄,水量受降雨强度及降雨量控制,由于地层富水性较弱,边坡岩土体在雨后通常处于干涸状态。

2 煤矿开采对边坡的影响

2.1 煤矿开采概况

大湾煤矿东井自2010年开始进行规模化生产,设计生产能力为90×10⁴ t/a,主采M2、M7、M8及



1. 二叠系乐平统龙潭组; 2. 三叠系下统飞仙关组一段; 3. 三叠系下统飞仙关组二段; 4. 地层界线; 5. 煤层及编号; 6. 采空区及编号
图 2 井区典型工程地质剖面图

M11 煤层, 煤层厚度为 1.95~3.68 m, 倾角 7°~15°。采用倾向长壁后退式采煤法, 全部冒落法管理顶板。井区经过多年的采掘活动, 地下形成了大面

积采空区。其中, 位于边坡周边的采空区基本情况见表 1。

表 1 采空区基本情况统计表

序号	采空区编号	主采煤层	开采标高/m	开采深度/m	面积/10 ⁴ m ²	终采时间
1	120204	M2	+1 571.5~+1 647.3	260.0~300.0	11.6	2018.6
1	120205	M2	+1 583.5~+1 627.8	205.0~308.0	5.2	2022.12
2	120704	M7	+1 533.6~+1 643.7	223.0~326.0	16.2	2021.10
3	120803	M8	+1 537.2~+1 594.8	243.0~344.0	8.6	2023.4
4	121104	M11	+1 514.9~+1 602.1	250.0~355.0	15.6	2023.2

2.2 煤矿采动影响范围

由于地下煤层开采形成采空区, 为上覆岩体下沉提供了空间, 当采空区面积足够大时, 覆岩将产生冒落、断裂、弯曲等变形破坏, 反映至地表即表现为地面塌陷、开裂等^[7,8]。

煤矿地下开采的影响范围主要取决于煤层倾角及覆岩特性^[9]。按覆岩性质区分地表移动一般参数的原则^[10], 结合区域工程经验, 飞仙关二段岩体按中硬岩考虑, 煤层倾角 $\alpha=10^\circ$, 重复采动条件下取上山移动角 $\gamma=65^\circ$, 走向移动角 $\delta=65^\circ$, 下山移动角 $\beta=\delta-0.5\alpha$, 再考虑地形影响, 陡坡区取 $\gamma=60^\circ$ 、 $\delta=60^\circ$ 、 $\beta=55^\circ$, 结合妈姑底房屋开裂情况, 圈定边坡周边各工作面综合采动影响范围如图 3 所示。

由图 3 可知, 妈姑底北侧边坡位于煤矿近期采动影响范围内。

2.3 采动边坡变形特征

根据现场调查, 在大湾煤矿东井妈姑底以北共发现 36 条地面裂缝(LF1~LF36)及 4 处小型崩塌(BT1~BT4)。其中, 裂缝 LF1~LF20 及崩塌 BT1~BT4 形成于 2023 年 1 月之前, 在 121104 工作面

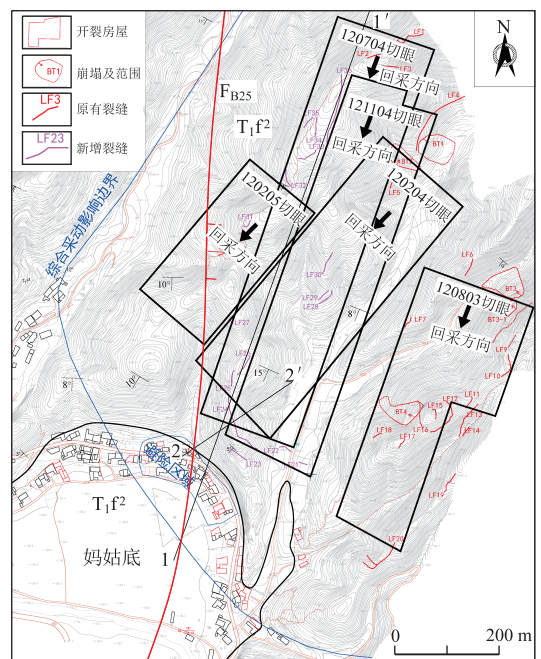


图 3 煤矿采动影响范围

回采即将结束时(2023 年 2 月)发现了裂缝 LF21~LF36, 至 2023 年 5 月 20 日, 裂缝 LF21~LF36 长

度、宽度均有所增加,表明边坡变形具有突发性、持续性,即:采动影响下边坡面在较短时间(约为数 d)发生大面积开裂,且裂缝的变形会持续较长时间。

裂缝主要分布在坡体中上部,在坡体中下部及沟谷少见裂缝发育,而坡体中上部裂缝变形最为剧烈。裂缝主要以张拉变形为主,缝宽度 10~100 cm,靠近采空区一侧下挫明显,与采空区边界的最大水平距离约 30.0 m,延展方向总体上与坡面走向近似平行,最大长度约 71.0 m。裂缝分布及变形特征见图 4。



图 4 裂缝分布及变形示意图

从 BT1~BT4 发育情况看,其仅为坡体中上部地形较陡地段的破碎岩体局部崩落,未见坡体有发生大面积滑坡和崩塌的迹象,如图 5 所示。

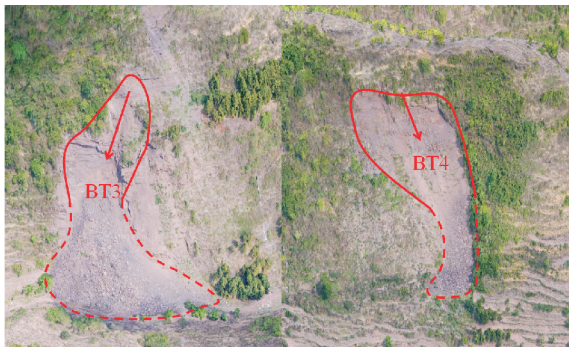


图 5 BT3、BT4 照片

3 采动边坡变形过程模拟

由于下伏采空区的存在,采动边坡变形及应力分布状态与一般边坡存在较大差异^[11]。图 6 给出采空区上部边坡变形示意图。

由图 6 可以看出,采动边坡存在两个临空面,边坡岩土体在向坡脚移动的同时还存在向采空区方向的位移,边坡变形即为二者叠加的结果。

为进一步探究妈姑底北侧边坡在采动影响下的变形过程,选取 1-1' 剖面对不同工作面采动影响下

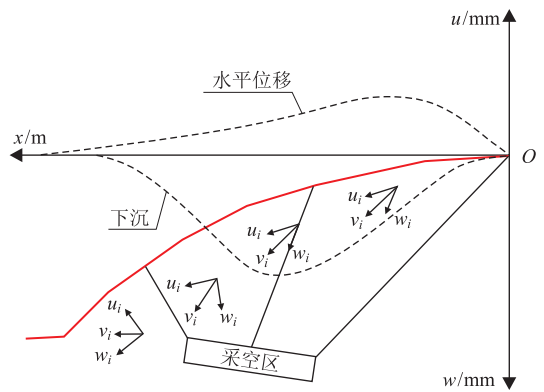


图 6 采动边坡变形示意图

的坡体位移变化情况进行模拟,模型初始条件及边界条件如下:

(1) 初始应力按岩体自重应力考虑,忽略地震波、构造应力等因素,仅考虑煤层采空后的覆岩移动;取重力加速度大小为 10.0 m/s^2 ,方向垂直向下。

(2) 模型顶部地表为自由面,底部采用固定约束,两侧采用水平位移约束,固定轴向位移。

(3) 工作面开采顺序为 120204 → 120704 → 121104。

本构模型采用德鲁克-普拉格模型,岩体物理学指标见表 2。

表 2 岩体物理力学指标

岩性	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E_s/GPa	μ	C/MPa	$\varphi/^\circ$
煤	17.0	0.7	0.28	0.3	33
飞仙关组砂岩	27.0	25	0.35	0.8	40
龙潭组砂岩	27.0	32	0.38	0.5	38
飞仙关组二段岩层面	18.0	0.05	0.25	0	33.6

模拟结果如图 7 所示。

由图 7 可知:①边坡变形随采空区面积增大而加剧,但受地形坡度影响,不同位置的变形量增大幅度存在差异;②121104 采空区形成后,妈姑底北侧边坡坡面最大竖向位移为 196 mm,最大水平位移为 233 mm,在采空区边缘的坡脚,存在局部鼓胀变形,边坡合位移方向总体指向采空区一侧;③受采动影响,地表变形不均,坡体中上部较坡体中下部及沟谷变形强烈。

根据上述模拟结果,结合现场地表开裂情况综合分析表明,边坡在采动影响下主要发生向采空区方向的移动变形,且由于坡体中上部变形强烈,因此,在边坡岩土体移动过程中,这些位置最先出现裂缝,使边坡结构遭到破坏;同时,裂缝的形成也为地表水下渗提供了通道,地表水渗入使边坡岩土体含

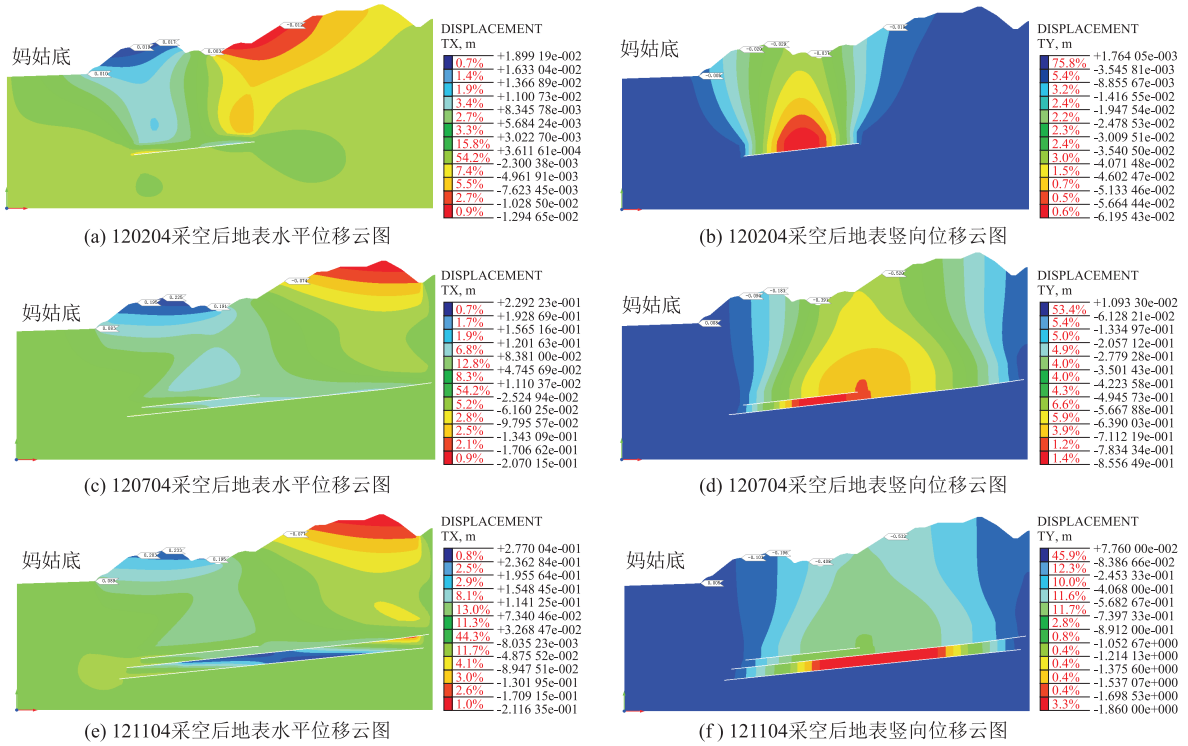


图 7 采动影响下地表位移云图

水量增加,下滑力增大,一定程度上将会降低边坡的整体稳定性。

4 采动边坡稳定性分析

采动边坡稳定性影响因素很多,主要包括边坡自身岩土体物理力学性质、软弱结构面发育程度及其与临空面的组合关系、工作面终采时间及空间形态等,这使采动边坡应力应变条件较一般边坡更为复杂,因此,采动边坡稳定性分析应综合考虑各因素,采用不同的方法进行综合判断。

4.1 按终采时间判断^[12]

地下采动引起的地表变形延续时间可分为初始期、活跃期及衰退期 3 个阶段,一般初始期约占总延续时间的 1%~2%,活跃期约占总延续时间的 30%~40%,衰退期时间约占总延续时间的 50%~70%。而采动引起的地表移动主要发生于变形初始期及活跃期,约占总变形量的 95%~98%。

采动引起的地表移动变形持续时间(T)可根据开采深度(H)按下式估算:

$$T = 2.5H \quad (1)$$

取 $H = 250.0 \sim 355.0$ m,计算得到 $T = 625 \sim 887.5$ d,即截止调查之日(2023 年 5 月 20 日),妈姑底北侧边坡受采动影响仍处于变形活跃阶段。

4.2 按结构面组合关系判断

妈姑底北侧坡体主要出露三叠系下统飞仙关组

二段(T_1f^2)紫、紫灰色夹黄绿色薄-中厚层状粉砂岩、细砂岩,产状为 $190^\circ \angle 10^\circ (C)$;两组节理产状分别为 $300^\circ \angle 85^\circ (J1)$ 、 $125^\circ \angle 69^\circ (J2)$;坡面产状为 $225^\circ \angle 70^\circ (P)$ 。岩层面、节理面及坡面的组合关系(上半球投影)见图 8。

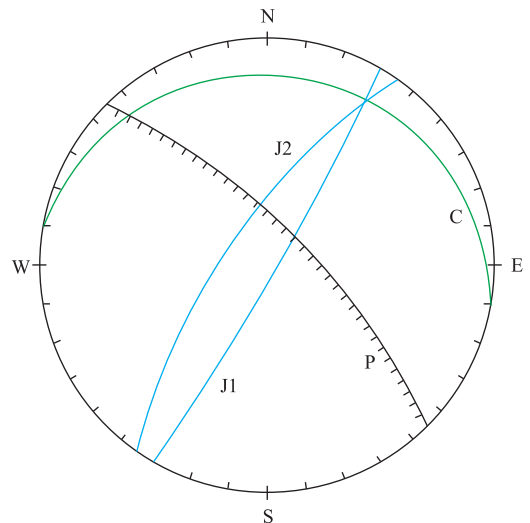


图 8 节理面赤平投影

由图 8 可知, $J1$ 、 $J2$ 与坡面近似正交,岩层面与坡面组合交棱线的倾向与坡面倾向的夹角大于 45° ,且岩层倾角平缓,边坡整体稳定性良好。但由于边坡岩体破碎,且在采动效应作用下其仍处于变形活跃阶段,因此,坡面地形较陡地段发生局部崩塌

的可能性较大。

4.3 极限平衡验算

根据 4.2 分析结果,岩层面为边坡整体滑动的主控结构面,选取 2-2' 剖面计算坡体在裂缝切割作用下沿不同深度层面滑动的稳定性系数,裂缝深度分别取 15 m、30 m、45 m 及 55 m,计算模型见图 9。

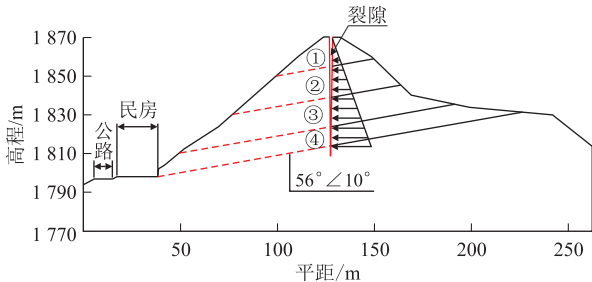


图9 稳定性计算简图

计算公式如下:

$$F_s = \frac{(W \times \cos\theta - Q \sin\theta \times V \times \sin\theta) \times \tan\varphi}{W \times \sin\theta + Q \cos\theta + V \times \cos\theta} \quad (2)$$

式中, F_s 为稳定性系数; W 为块体重量; V 为裂缝沿走向单位宽度的静水压力; θ 为滑面倾角, 取 $\theta = 10^\circ$; φ 为滑面等效内摩擦角, 取 $\varphi = 33.6^\circ$; Q 为地震力, 取 $Q = 0.025 \times W$ 。计算结果见表 3。

表3 边坡稳定性计算结果

滑体	裂缝深度 /m	滑块体积 /m ³	W/kN	Q/kN	V/kN	F_s
①	15	214	5 778	145	1 125	1.612
②	30	879	23 733	594	4 500	1.635
③	45	1 842	49 734	1 244	10 125	1.575
④	55	2 707	73 089	1 828	15 125	1.561

由表 3 计算结果可知,坡体沿层面滑动的稳定性系数均 > 1 , 可认为即使在地震及裂缝充水等不利条件下坡体整体仍处于稳定状态, 不会沿层面整体滑动。

5 结论与认识

(1) 采动边坡同时存在向倾向和采空区方向的移动变形, 坡体变形为二者的位移叠加。

(2) 受地形影响, 采动边坡地表变形不连续, 坡体中上部较坡体中下部变形剧烈。

(3) 井工煤矿采动影响下, 边坡变形及稳定性与采空区推进表现出明显的时空对应关系。

(4) 妈姑底北侧边坡中上部虽然出现多条裂缝, 但由于坡体在采动影响下整体向采空区一侧移动, 且边坡岩土体无不利外倾结构面, 其不会发生大面积深层基岩滑坡, 但地形较陡部位发生局部崩塌的可能性较大, 需要采取一定的安全防护措施, 确保下部居民的生命财产安全。

(5) 采动边坡稳定性分析应充分考虑边坡自身的岩土结构特征及采动效应的影响。截止 2023 年 12 月底, 坡面部分裂缝宽度不再增加, 甚至呈逐渐闭合趋势, 说明边坡变形已趋于稳定, 坡体不会发生大面积滑动, 这与分析结论基本一致, 表明所采用的分析方法可行, 可为类似边坡稳定性分析提供参考。

参考文献

- [1] 丁鑫品, 李凤明, 李宏艳, 等. 顺层采动边坡滑动面形成机制与演化模式研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 1019-1026.
- [2] 钟祖良, 王南云, 李滨, 等. 采动作用下上硬下软型缓倾岩质高边坡变形机理试验研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 509-517.
- [3] 樊克恭, 景春元, 牛盛名, 等. 不同倾角采动边坡移动变形特征及稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 231-234.
- [4] 王创业, 李俊鹏, 刘伟, 等. 不同井下开采方向下采动边坡稳定性的研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(05): 61-64.
- [5] 常远, 常来山, 任富强, 等. 节理岩体边坡采动损伤与可靠性分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1305-1311.
- [6] 徐杨青, 吴西臣. 复合采动边坡变形机理及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 594-600.
- [7] 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.
- [8] 范士凯, 栗怡然, 蔡伟英, 等. 湖北省陈家河煤矿跑马岭山体稳定性工程地质研究[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(S1): 628-644.
- [9] 王彤标. 贵州山区煤矿开采对地表影响范围探究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(8): 141-144.
- [10] 王彤标, 宋少飞, 王刘文, 等. 山区煤矿可研阶段地质灾害危险性评估的重要性[J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(3): 97-104.
- [11] 吴西臣. 露井联合采动边坡位移监测与预警技术研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(8): 99-102.
- [12] 刘明江, 陈金宏. 复杂地质条件下小煤窑采空区场地稳定性评价[J]. 土工基础, 2023, 37(3): 426-429.

作者简介: 陈金宏(1986—), 男, 汉族, 贵州毕节人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治相关工作。

E-mail: 704031412@qq.com