

露天矿边坡稳定性分析与数值模拟

Analysis and Numerical Simulation of Slope Stability in Open-pit Mines

李山存(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019)

摘要:根据某露天矿的地质背景构建了简化模型,首先采用极限平衡分析法和 SLIDE 软件对采场边坡和排土场边坡的稳定性进行分析,随后分别采用 PFC 离散元软件和 FLAC 有限元软件建立数值模型,模拟分析了排土场以及采场边坡不同剖面边坡的应力分布、位移变化以及发生失稳破坏的过程。两者结果相互对照吻合,得到了排土场与采场边坡变形的内在机理以及失稳破坏规律。最后结合现场工程环境,指出 1# 排土场的边坡基本稳定,而 2# 排土场处于不稳定状态,在不稳定区域应当加强监测,并进行适当的加固措施,以防造成重大损失。

关键词:露天矿; 稳定性; 数值模拟; 变形机理

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)03-0026-08

Abstract: A simplified model was constructed based on the geological background of a certain open-pit mine. First, limit equilibrium analysis method and SLIDE software were used to analyze the stability of the mining and waste dump slopes. Then, PFC discrete element software and FLAC finite element software were used to establish numerical models, simulating and analyzing the stress distribution, displacement changes, and the process of instability and failure of the waste dump and different sections of the mining slope. The two results are consistent with each other, and the internal mechanism of slope deformation and the law of instability and failure in the waste dump and mining area are obtained. Finally, based on the on-site engineering environment, it is pointed out that the slope of the 1# waste dump is basically stable, while the 2# waste dump is in an unstable state. In the unstable area, monitoring should be strengthened and appropriate reinforcement measures should be taken to prevent significant losses.

Key words: open-pit mine; stability; numerical simulation; deformation mechanism

1 前言

我国露天煤矿开采的机械化和智能化程度在不断提高,开采效率得到很大进步,但与此同时对应的露天矿剥离量也更加庞大,大量的剥离物堆积形成的松散岩土体边坡以及采场形成的大面积边坡存在很大的安全隐患^[1-3],边坡的稳定性和治理对策是研究的热点问题,更为松散、面积占比更大的排土场边坡失稳造成的滑坡灾害尤其需要关注。刘福明等^[4]基于相似模拟试验研究了露天排土场降水渗入的规律,提出了提高排土场边坡稳定性的建议。孙叔伟等^[5]通过底摩擦试验方法研究了不同排土工艺对排土场边坡的稳定性的影响。秦驰越等^[6]则采用有限元法结合机器学习的方法对排土场边坡的稳定性进行分析。本文主要以数值模拟的方法,分别研究了露天矿排土场和采场边坡的失稳变形规

律,探究有效的预防护措施。

2 工程地质

2.1 工程地质概况与简化模型

根据某露天矿的矿井资料,其排土场及采场的基底赋存的岩层依次为:物料层、粉土层、黏土层及风化基岩层。结合地质概况和剖面构建排土场边坡地质简化模型如图 1 所示。

2.2 岩土体物理力学参数

通过钻孔取样和室内试验获得采场岩土体的物理力学性质,再通过工程类比法得到露天矿的岩土体物理力学参数见表 1。

3 排土场边坡稳定性分析

国内外主要通过定性和定量分析这两种方法研究边坡的稳定性,定性分析是指通过借助勘察、监测等手段得出定性分析的结论,而定量分析法则是以力学理论计算的方式得到结果,根据计算结果对稳定性进行判断评价,其中极限平衡分析法在判断边坡稳定性方面具有方便、准确等优点,应用非常广泛,该方法又分为 Fellenius 法、简化 Bishop 法、简化

[作者简介]李山存(1981—),青海乐都人,高级工程师,从事矿山采矿工程设计与生产安全方面工作。

[引用格式]李山存. 露天矿边坡稳定性分析与数值模拟[J]. 中国矿山工程,2023,52(3):26-33.

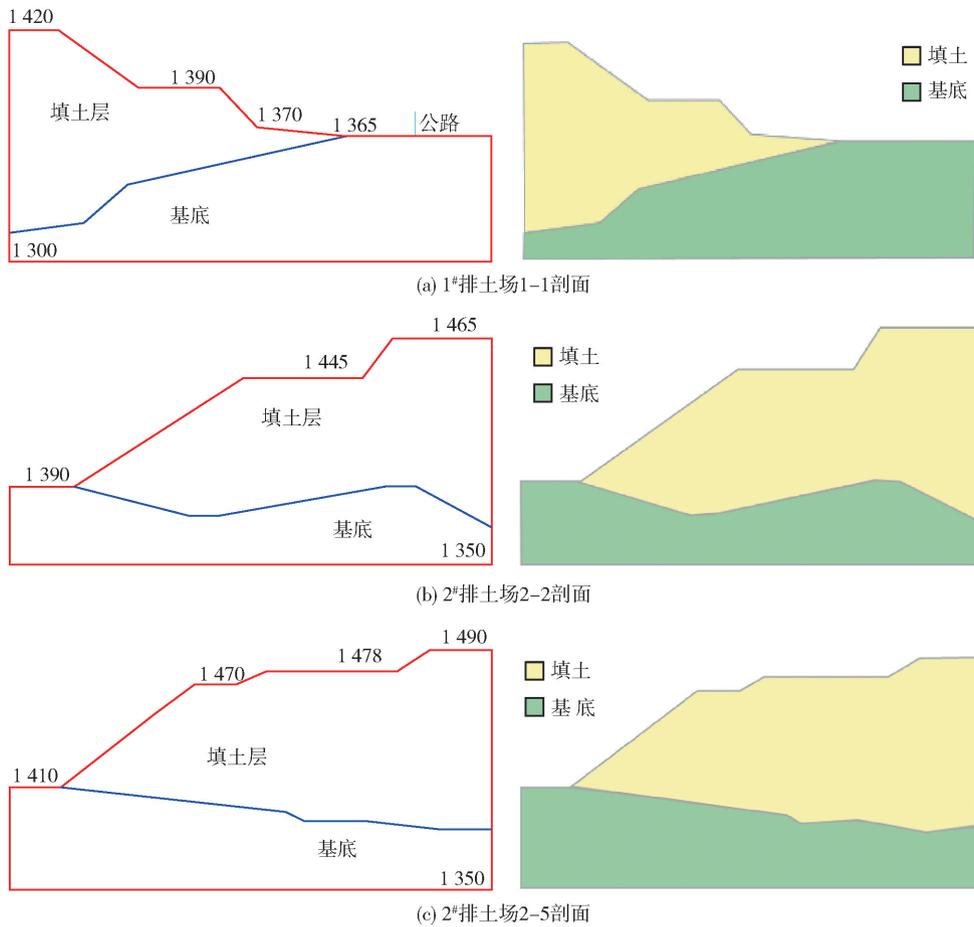


图1 排土地层剖面与模型

表1 岩土体物理力学参数

岩土层	重力密度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\circ)$
基底层	16	27	21
填土层	18	13	29

Spencer 法、简化 Janbu 法、Morgenstern-Price 法等。

根据《煤炭工业露天矿设计规范》(GB 50197—2005)第6章关于露天煤矿边坡安全系数的规定,以简化 Bishop 法安全系数为基础,边坡稳定性初步判别标准为:①边坡安全系数大于 1.20,边坡稳定;②边坡安全系数在 1.10 ~ 1.20,边坡基本稳定;③边坡安全系数小于 1.10,边坡不稳定。在此基础上,利用 SLIDE 软件中的简化 Bishop 极限平衡分析法对三个边坡剖面进行计算。

图2所示为1#和2#排土场各剖面的稳定性分析结果,1#排土场 1-1 剖面边坡圆弧式滑动分析如图2(a)所示,分析结果显示边坡上部最小安全系数为 1.137,基本稳定;边坡下部最小安全系数为 1.024,边坡不稳定。2#排土场 2-2 剖面边坡圆弧

式滑动分析如图2(b)所示,分析结果显示边坡上部最小安全系数为 0.925,不稳定,边坡下部最小安全系数为 1.041,不稳定。结合现场实际情况,该处边坡顶端局部仍存在裂缝,边坡整体过高,单台阶过陡,因此可以认为该区域不稳定。2#排土场 2-5 剖面边坡圆弧式滑动分析如图2(c)所示,结果显示边坡上部较缓,边坡稳定;下部台阶过高、过陡,最小安全系数为 0.996,边坡不稳定,存在滑坡危险。

图3所示为采场 1-1 和 1-3 剖面的稳定性分析结果,1-1 剖面边坡上部以粉土和粉质黏土为主,计算采用圆弧滑动面分析,结果表明:最小安全系数为 0.829,边坡最不稳定区域主要位于 1380 m 平台以上,局部单台阶坡角达 70°,台阶过陡,这是边坡的主要危险因素。此外,下方的 1410 ~ 1430 m 台阶安全系数为 0.938,边坡也不稳定。1-3 剖面圆弧滑动面分析如图3(b)所示,边坡上部最小安全系数为 1.048;排土场堆载后,采场边坡上部的最小安全系数有所降低,为 1.041,不满足边坡设计规范要求。

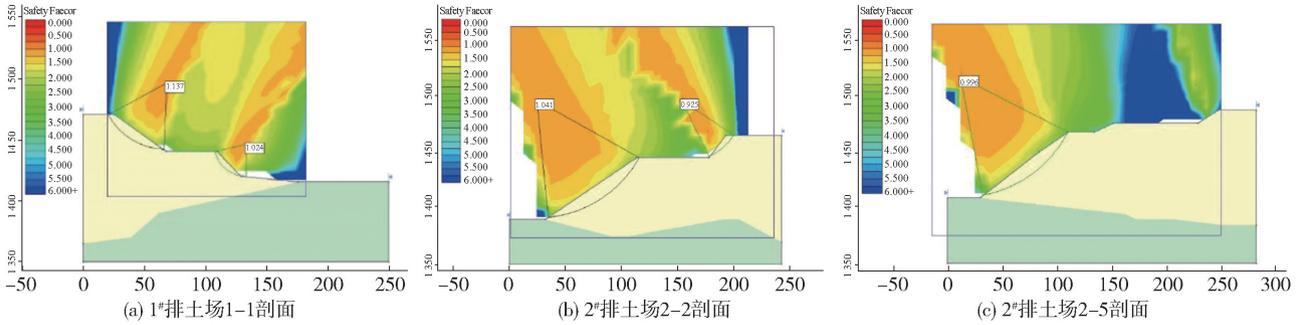


图2 各排土场剖面边坡稳定性分析结果

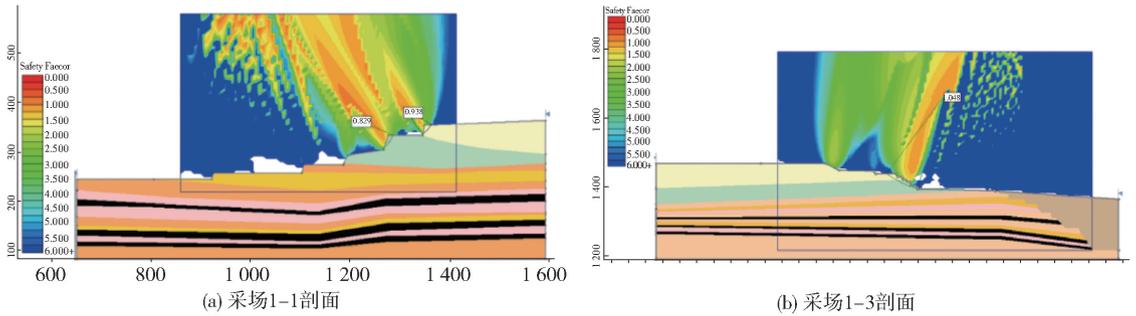


图3 采场剖面边坡稳定性分析结果

因此,应加强对上部土坡的实时监测,必要时采取相应处治措施,以提高边坡的稳定性,从而保证其下方半连续运输机道能正常作业。

排土场三个剖面的稳定性结果见表2,稳定性综合分析可知,2#排土场总体稳定性较差,在坡顶出现大量裂纹,土体松散,且填土强度较低,遇水更易弱化,诱发地质灾害。因此,需加强该区域边坡的监测,必要时采取治理措施,以保障排土场安全运行。

表2 1#、2#排土场和采场稳定性分析结果

位置	剖面	最小安全系数	初步判断	建议
1#	1-1	1.137	基本稳定	加强监测
2#	2-2	0.925	不稳定	
	2-5	0.996	不稳定	
采场	1-1	0.829	不稳定	加强监测
采场	1-3	1.048	不稳定	

4 边坡数值模拟与变形机理

以排土场地层剖面模型为基础,采用 PFC 离散元数值模拟软件建立研究模型,模拟两处排土场边坡发生失稳滑坡时的应力分布情况,分析其发生失稳破坏的内在原因以及岩土体变形规律。

构建 1#排土场和 2#排土场边坡的 PFC 数值模

型时,尽可能的贴近实际情况,模型两端施加 X 方向的约束边界,底部施加 X 方向的约束边界。模型主要分为上下两部分,黄色为上部填土,绿色为下部基底。

PFC 数值模拟分析包括 1#H 剖面及内排土场 2-5 和 2-2 剖面共计 3 个剖面。排土场边坡的 PFC 数值模型如图 4(a) ~ (c) 所示,3 个模型所包含的颗粒总数分别为:7 280 个、11 022 个和 8 845 个。

另外,对于采场边坡,由于地层结构复杂,采用 FLAC 有限元数值模拟软件建立三维模型,采场边坡模型如图 4(d) ~ (e) 所示:边坡岩土体主要包括粉土、粉质黏土、砂岩、泥岩、泥砂岩互层及煤层,两模型尺寸分别为 940 m × 150 m × 280 m 和 1 350 m × 300 m × 280 m,模型底部均为固定约束,左右边界施加沿 X 方向固定约束,前后边界施加沿 Y 方向的固定约束。

4.1 细观力学参数

根据已经完成的地质勘查资料以及室内力学试验获取的基本力学参数,通过 PFC 程序的多次调试,得到排土场边坡的细观力学参数取值,具体参数见表 3。

而采场的数值模型中岩土体均采用 Mohr-Coulomb 本构模型,根据工程地质勘察报告及室内试验结果,岩土材料的计算参数选取见表 4。

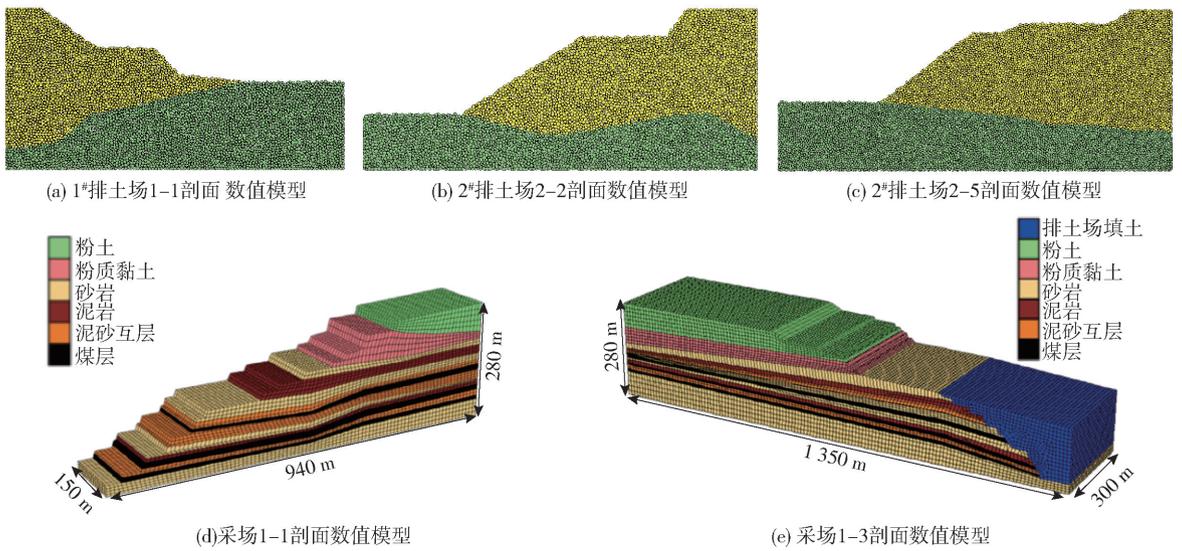


图4 排土场与采场边坡剖面 PFC 2D 数值模型

表3 排土场边坡各层细观力学参数

岩土层	填土层	基底
颗粒密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 800	1 600
颗粒接触弹性模量 E_c/Pa	4×10^7	4×10^7
颗粒间摩擦系数 μ	0.5	0.5
平行黏结半径 $\bar{\lambda}$	1.0	1.0
平行黏结弹性模量 \bar{E}_c/Pa	4×10^7	4×10^7
平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c/\text{Pa}$	4.5×10^5	6×10^5
平行黏结切向强度 $\bar{\tau}_c/\text{Pa}$	2×10^5	3×10^5

表4 采场边坡岩土体参数数值模拟取值表

岩土层	密度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
粉土	14.30	46	0.25	21	19
粉质黏土	15.90	65	0.36	20	18
砂岩	22.52	1 284	0.26	305	29
泥岩	22.00	1 103	0.15	242	28.4
泥砂互层	20.20	4 317	0.19	273	28.4
煤层	16.00	1 421	0.18	28.5	30
回填土	18	23	0.32	13	29

4.2 排土场边坡变形机理分析

1) 1#1-1 剖面分析

1#排土场 1-1 剖面处边坡应力分布如图 5 所示,图中黑色线条表示压应力。在水平方向,应力从坡外到坡内稍有增大;在垂直方向,应力从坡顶到坡底逐渐增加。排土场该处最大压应力出现在模型底

部,为 7.155 MPa,从图中可以看出,模型左下角处存在压应力集中现象。1#排土场 1-1 剖面处边坡位移情况如图 6 所示,图中箭头方向表示位移方向,箭头长短表示位移大小,边坡上部较陡台阶局部出现较大位移,模型颗粒的最大水平位移值为 18.36 m,下部台阶位移较上部要大,根据位移矢量图可以看出发生较大位移的颗粒主要集中在两单台阶处。边坡内部平行黏结破坏情况如图 7 所示,上部单台阶表层颗粒间黏结发生破坏,下部单台阶平行黏结破坏较多,表明上部土体表层发生滑动,下部台阶发生整体滑动,台阶不稳定。左下角较多黏结键发生破坏,主要是由于应力集中导致的。为预测排土场 1-1 剖面处可能出现滑坡的范围,现圈定出模型颗粒水平位移大于 0.8 m 的区域,如图 8 中深黑色区域所示,滑坡颗粒相对集中连在一起与下未发生滑动的土体有明显界线,但发生滑坡的土体比较少。这与极限平衡分析方法 (Slide) 计算结果相吻合,但填土遇降水强度降低,易诱发滑坡地质灾害,且该排土场下方有一乡村公路。因此,需加强该区域边坡的监测,以保障排土场稳定及下方乡村公路的顺畅通行。



图5 1#1-1 剖面原状边坡应力分布图

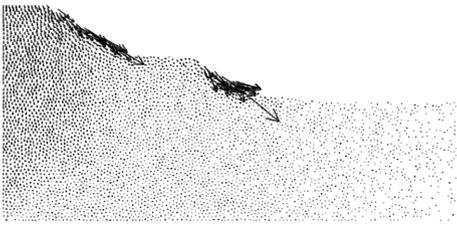


图6 1#排土场 1-1 剖面边坡位移矢量图

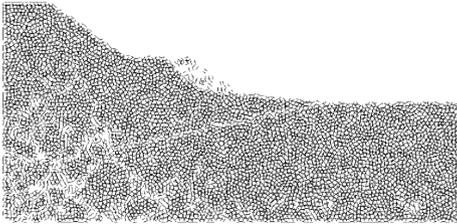


图7 1#排土场 1-1 剖面边坡平行黏结破坏图

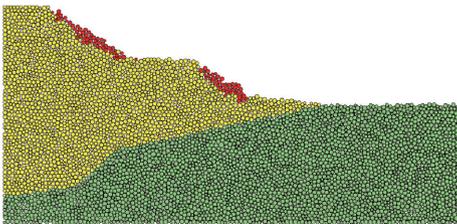


图8 1#排土场 1-1 剖面边坡滑移区域

2) 2#排土场 2-2、2-5 剖面分析

2#排土场 2-2、2-5 剖面边坡应力分布如图 9 所示,2-2 剖面的水平方向,应力从坡外到坡内稍有增大;在垂直方向,应力从坡顶到坡底逐渐增加。排土场该处最大压应力出现在模型底部,为 7.816 MPa,从图中可以看出,2-2 剖面模型右下角存在压应力集中现象。而 2-5 剖面在水平方向,应力从坡外到坡内稍有增大,在垂直方向,应力从坡顶到坡底逐渐增加。排土场该处最大压应力出现在模型底部,为 9.901 MPa。1#排土场 2-2 和 2-5 剖面处边坡位移情况如图 10 所示,2-2 剖面的边坡上部较陡台阶出现较大位移,模型颗粒的最大水平位移值为 20.18 m;2-5 剖面则在边坡上部较陡台阶处出现较大位移,模型颗粒的最大水平位移值为 20.18 m。图 11 所示为边坡内部平行黏结破坏情况,两处剖面对应颗粒位移较大的部分黏结键基本发生了破坏,模型台阶坡面处发生了显著地破坏,边坡内部结构破坏情况与对应的边坡位移图情况基本一致。

为预测排土场 2-2、2-5 剖面处可能出现滑坡的范围,现圈定出模型颗粒水平位移大于 0.8 m 的区域,如图 12 中深黑色区域所示,该范围较大,且可形

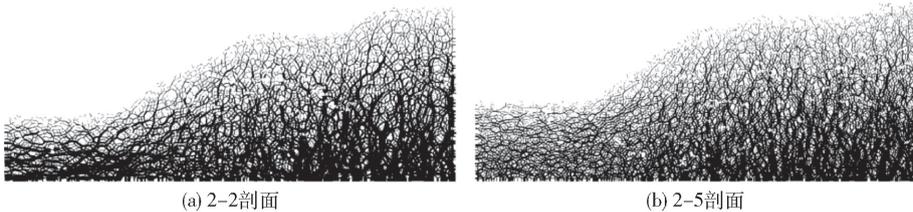


图9 2#排土场边坡应力分布图

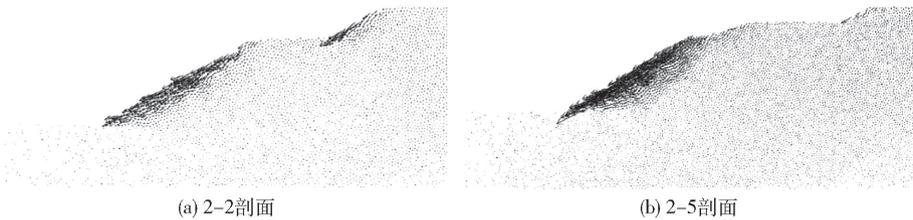


图10 2#排土场边坡水平位移矢量图

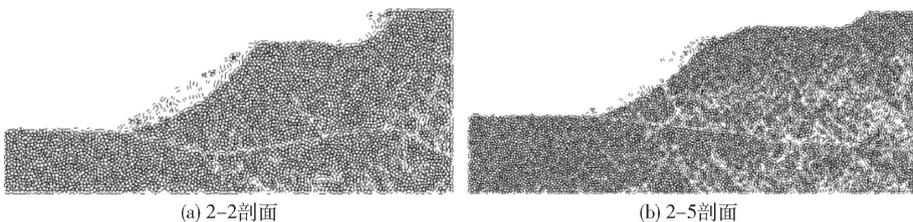


图11 2#排土场边坡剖面平行黏结破坏示意图

成连通的滑移面。这与极限平衡分析方法 (slide) 计算结果相吻合,再次表明剖面边坡整体不稳定,其上部为易滑坡区域,因此,需对剖面处边坡进一步进行变形机理分析。在不采取任何治理措施情况下,预测排土场剖面处边坡的滑移情况。边坡产生裂隙、错动后,不稳定区域内岩土体强度会有所降低,现将图 12

中深黑色不稳定区域模型颗粒的强度进行适当折减,再次让系统达到平衡,得到图 13,深黑色不稳定区域产生进一步滑移,模型颗粒的水平位移值为 5 ~ 40 m。若雨季集中降水,滑体内填土的强度大幅下降,极易诱发泥石流二次地质灾害。因此,必需加强该区域边坡的监测,必要时采取治理措施。

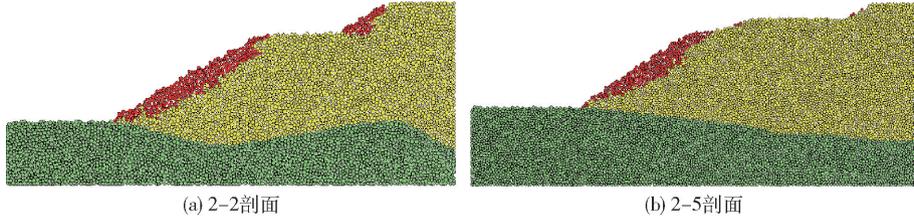


图 12 2#排土场剖面边坡滑移区域

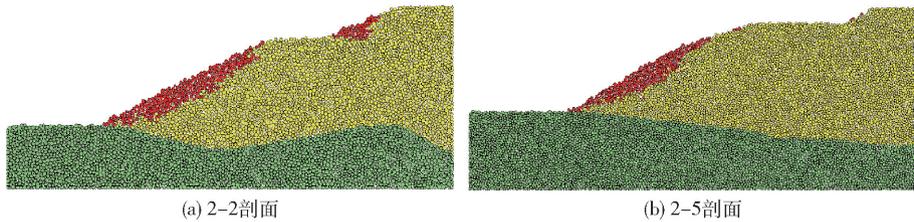


图 13 2#排土场剖面滑移后的边坡区域

4.3 采场边坡变形机理分析

1) 采场 1-1 剖面分析

①初始地应力

采场 1-1 剖面在开采之前,先由重力生成初始地应力场,具体如图 14 所示。初始竖向地应力成层状分布,压应力与深度成正比,最大值在底部为 5.445 MPa。

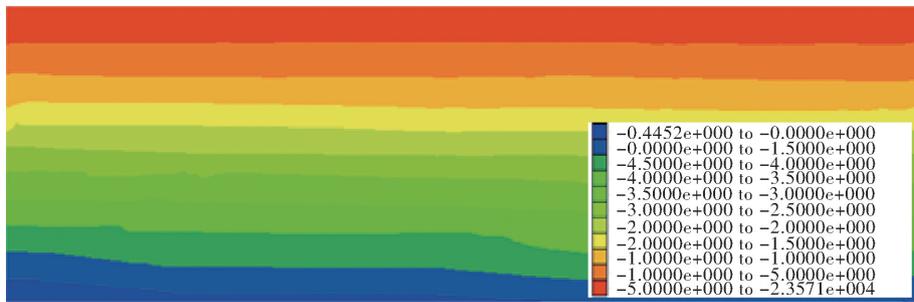


图 14 采场 1-1 剖面初始地应力场

②现状边坡

生成初始地应力场后,经开采形成现状边坡,然后计算至平衡。由于边坡开采、卸荷效应引发了位移、塑性区状态和最大剪应变等变化。采场 1-1 剖面开采到现状后计算收敛,其水平位移云图如图 15 所示:边坡最大水平位移发生在粉质黏土层区域,约 42 cm,明显大于边坡其他区域,表明上部土层边坡稳定性较差,需加强监测,必要时需采取一定处治措施。

布较多,很少部分存在于采场深部,表明边坡局部稳定性状况较差,建议将上部台阶削坡放缓,以免发生滑坡灾害。

其最大剪应变增量如图 17 所示,该量反映了边坡变形的快慢;由图可知仅上部粉质黏土层出露地表局部存在较大剪应变增量,表明该处相对变形较大,而其他区域相对变形都较小。

2) 采场 1-3 剖面分析

①初始地应力

采场 1-3 剖面在开采之前,首先由重力生成初

其塑性区分布如图 16 所示,坡面部分塑性区分

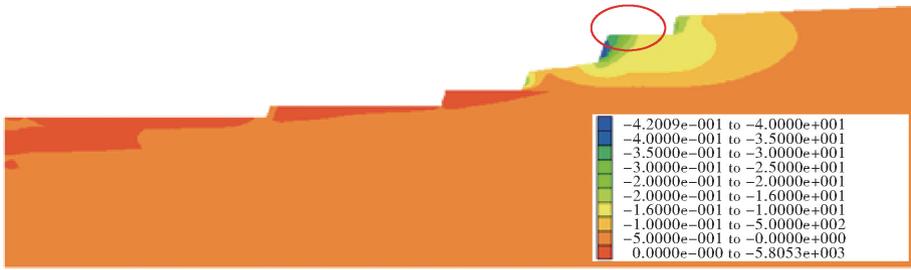


图 15 采场 1-1 剖面现状水平位移云图

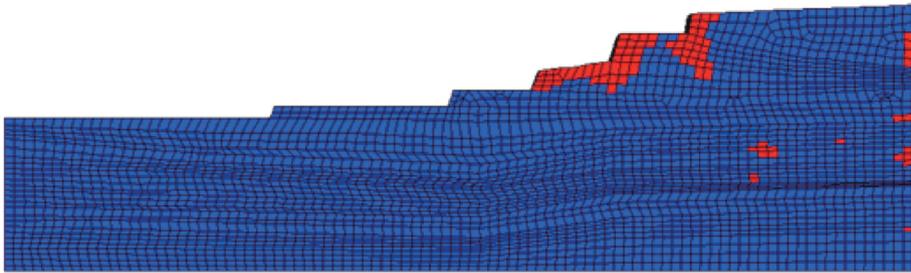


图 16 采场 1-1 剖面开采到现状塑性区分布图

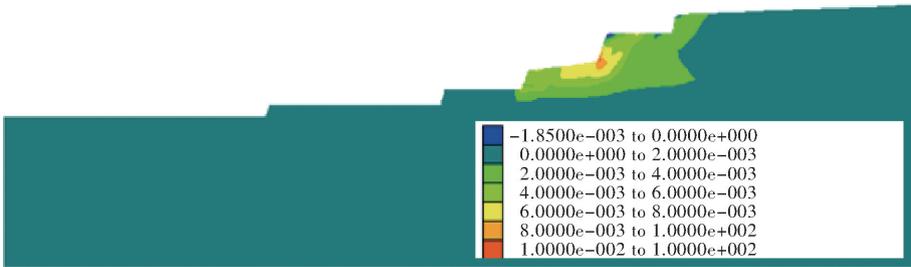


图 17 采场 1-1 剖面开采到现状最大剪应变增量云图

始地应力场,具体如图 18 所示。初始竖向地应力成层状分布,压应力与深度成正比,最大值在底部为 5.394 MPa。

②现状边坡

生成初始地应力场后,经开采形成现状边坡,然后计算至平衡。采场 1-3 剖面开采到现状计算收敛,水平位移云图如图 19 所示:边坡最大水平位移发生在粉质黏土层区域:约 36 cm,明显大于边坡其他区域,表明上部的土层边坡稳定性较差,需加强监测,必要时需采取一定处治措施,以提高边坡的稳定性,从而保证下方的半连续运输机道

能正常作业。

边坡塑性区分布如图 20 所示,采场上部土坡坡面部分塑性区分布较多,表明边坡局部稳定性状况较差,建议削坡放缓,降低局部滑坡可能性。边坡最大剪应变增量如图 21 所示,仅上部粉质黏土层局部存在较大剪应变增量,表明该处相对变形较大,而其他区域相对变形都较小。

综合上述计算结果,并结合现场实际,当前状态下采场 1-1 和 1-3 剖面采场处边坡整体是稳定的,但粉质黏土层边坡较陡、变形过大,有局部失稳可能,边坡的不稳定区域主要位于采场上部,该

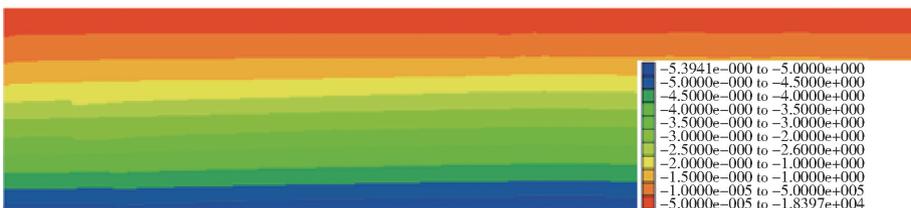


图 18 采场 1-3 剖面初始地应力场

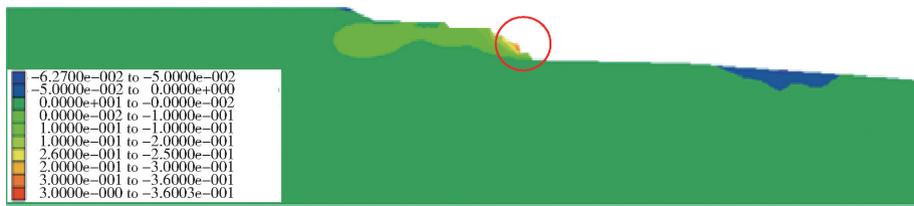


图19 采场1-3剖面现状水平位移云图

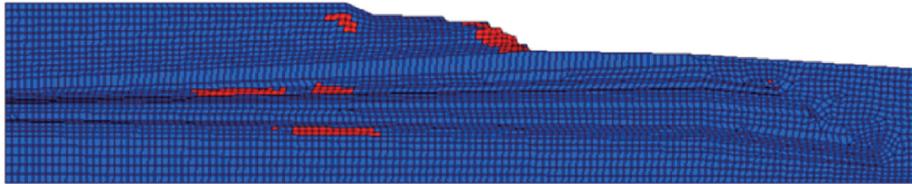


图20 采场1-3剖面开采到现状塑性区分布图

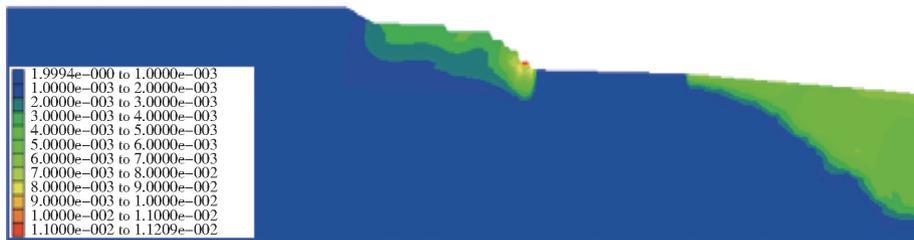


图21 采场1-3剖面开采到现状最大剪应变增量云图

处的土质边坡高近60 m,且局部过陡,建议对1380平台以上区域有针对性地加强对土层的监测,必要时可采取一定处治措施,如放缓上部土坡的单台阶坡面角。另外,为保证采场1-3剖面处边坡半连续运输机道的正常作业,建议对上部土坡加强监测。

5 结论

(1)基于极限平衡分析法和SLIDE软件,计算两处区域三个排土场剖面的边坡稳定性,参考《煤炭工业露天矿设计规范》,计算结果表明,露天矿1[#]排土场1-1剖面的安全系数大于1.1,边坡处于基本稳定状态,而2[#]排土场两个剖面边坡的安全系数均小于1,处于不稳定的状态,两个采场边坡也均处于不稳定状态。

(2)在露天矿地质资料的基础上,分别利用离散元PFC和有限元FLAC构建了数值模型,研究分析了各区域边坡的应力分布与变形破坏的过程,模拟得到的结果与前文的极限分析结果吻合,从细观的角度分析了边坡发生失稳滑坡的内在机理。

(3)前期地质调查表明,1[#]排土场下方有乡村公路,而2[#]排土场下方仍有未完成搬迁工作的村名

房屋,一旦发生失稳滑坡,会造成巨大的社会影响,排土场朝着矿坑方向不易过排,建议排土场与采场的安全距离(排土场距采场1380平台水平距离)取值为200 m或以上。因此本文的研究结论为这两处排土场附近的监测方案设计以及公路、建筑物规划提供了理论参考,避免出现不必要的损失。

[参考文献]

- [1] 杨天鸿,王赫,董鑫,等.露天矿边坡稳定性智能评价研究现状、存在问题及对策[J].煤炭学报,2020,45(6):2277-2295.
- [2] 马明.宝日希勒露天矿南帮边坡稳定分析与治理方案[J].煤矿安全,2017,48(3):219-222.
- [3] 韩晓极,李惠发,郭霖,等.抚顺西露天矿南帮边坡变形机制与稳定性分析[J].煤矿安全,2017,48(7):242-245.
- [4] 刘福明,才庆祥,周伟,等.露天矿排土场边坡降水入渗规律试验研究[J].煤炭学报,2015,40(7):1534-1540.
- [5] 孙书伟,庞博,刘流.露天排土场不同排土工艺失稳机制对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(8):1713-1726.
- [6] 秦驰越,张文兴.基于机器学习的露天矿排土场边坡稳定性预测[J].金属矿山,2021(8):164-169.