

文章编号:1671-251X(2024)S2-0076-04

基于数值模拟的排矸场稳定性评价

高健

(国能神东煤炭集团有限责任公司 保德煤矿, 山西 忻州 036600)

摘要:煤层的连续开采会破坏排矸场的稳定性,对周边居民的生命财产安全造成威胁,因此有必要对排矸场的稳定性进行评价。以国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司保德煤矿排矸场为研究背景,综合采用调查、钻探、试验和计算手段,掌握排土料分层性质、地基岩土性质和地基地形,采用居民访谈、现场踏勘、无人测绘、工程勘察和数值计算等综合方法,明确求解相关物理参数,通过航拍测绘的方式建立排矸场三维地质模型,以定性与定量相结合的方式对排矸场的稳定性进行了分析,并给出了合理化建议,为排矸场安全防护和煤矿安全生产提供了参考。

关键词:排矸场;稳定性评价;地下采动;数值模拟

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Stability evaluation of waste dump based on numerical simulation

GAO Jian

(Baode Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Xinzhou 036600, China)

0 引言

我国煤炭资源丰富,煤炭开采过程产生的巨量矸石排布于城市周边^[1]。煤层的连续开采会破坏排矸场的稳定性,对周边居民的生命财产安全造成威胁^[2]。因此采取必要的手段对排矸场的稳定性进行评价是非常必要的^[3]。本文以国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司保德煤矿排矸场为研究背景,综合采用调查、钻探、试验和计算手段,掌握排土料分层性质、地基岩土性质和地基地形,采用居民访谈、现场踏勘、无人测绘、工程勘察和数值计算等综合方法,以定性与定量相结合的方式开展排矸场稳定性评价。

1 排矸场概况及试验勘测

保德煤矿矿区面积为 55.907 7 km²,生产能力为 1 200 万 t/a。保德煤矿 1 号、2 号排矸场面积分别为 0.28、0.40 km²,钻探堆积高度最高达 62 m。2 个排矸场作业时间已持续 20 余年,局部区域已出现矸石自燃及坡面滑移现象;同时矿井接续工作面的回采将对排矸场造成沉陷破坏,可能影响排矸场整体稳定性,进而威胁周边枣林回风井和朱家川河过流,对矿井生成和区域生态安全造成隐患^[4]。

从安全生产情况考虑,现急需对 1 号、2 号排矸场地质环境、生态环境、水保设施、矸石堆积体垮塌与滑坡、排洪、自燃等稳定性、安全性、合规性进行评价。保德煤矿 1 号、2 号排矸场地处保德县北中部、保德煤矿井田内西南侧,周边当前基本完成人员搬迁,除 1 号排矸场前缘坡脚临近枣林回风井(直线距离 68 m)和朱家川河(距离 82 m),排矸场周边无其他重要构筑物设施,场地地理分布如图 1 所示。



图 1 排矸场地理位置

排矸场区域坡地地层主要为第四系人工堆积层和第四系全新统黄土、粉质黏土层,沟道出露胶结较为松散的砂砾岩层;人工堆积矸石地形起伏一致,厚度由山梁向沟底递增。排矸场以该地层为地基,该层的稳定性对排矸场的稳定性至关重要,需对其勘察和试验测定。1 号排矸场前缘坡脚有水出漏,出流缓慢,经现场测量,流量约为 3 L/s。因水位不

收稿日期:2024-12-02;责任编辑:盛男。

作者简介:高健(1986—),男,蒙古族,内蒙古呼和浩特人,工程师,现主要从事沉陷区治理方面的工作,E-mail:343695606@qq.com。

高、流量小,推测其水源为沟道堆矸形成的上游水塘积水,顺原沟底矸石堆积体内渗流。2 号排矸场坡度较大,不受地下水位涨落的影响。2 个排矸场均高于朱家川河道高程,不受河道洪水及河水下渗影响。

已有大量国内外露天矿山等排矸场的综合调查分析表明,排矸场潜在失稳模式有 3 种:沿排土体-原始山体表面接触带滑坡、排土本体(内部)近程滑动、排土场基础滑坡。

保德煤矿 1 号、2 号排矸场原始地貌为丘陵沟谷,顺沟谷堆排形成的 1 号排矸场大部平坦,前缘整体坡度为 16°,2 号排矸场坡度为 11~15°。根据现场情况,共布置地质调查点 12 个(1 号排矸场 7 个、2 号排矸场 5 个)。针对 1 号、2 号排矸场内及周边的系统调查,未发现 2 个排矸场有明显的沉陷和坍塌,但坡面冲沟普遍,尤其是 2 号排矸场与 1 号排矸场相接段冲沟较深。1 号排矸场纵向原沟道顺沟坡度平缓,横向受两坡约束,对失稳具有限制作用;2 号排矸场所在原地形沟口小,排矸体得以束缚,有益坡体稳定。1 号排矸场后缘形成深 12.5 m 的堰塞水塘,对堆积体有潜在影响。因此稳定性分析重点

表 1 排矸场基本特性

排矸场	最大堆积高度/m	计算排矸量/m ³	坡面坡度/(°)	地形条件	排矸方式	地基土特征	周边环境	场内条件
1	61	6 676 000	16	沟谷型	汽车运输 分层碾压	覆盖层、强风 化砂、泥岩	简单	复杂
2	57	9 094 000	11~15	沟谷型	汽车运输 分层碾压	覆盖层、强风 化砂、泥岩	简单	复杂

对排矸场的自燃性进行分析。经多次孔内测温,可知部分钻孔温度较高,位于 1 号排矸场边坡位置,靠近边坡自燃区域,需要警惕;特别是 1Z5 孔内温度为 82.8℃、1Z4 孔内温度为 52℃,其余钻孔温度均低于 30℃,未发现异常。2 号排矸场南侧有 1 条裸露煤矸石道路,裸露煤矸石面积较大,有自燃风险。

根据勘察成果,场内岩土体种类较为简单,各类土强度变化不大,均匀性一般,土质变化潜在滑面少。2 个排矸场均为素填土和矸石交替堆积,表层覆土厚度为 0.4~1.0 m,少量钻孔中表层覆土厚度大于 1 m。矸石层每层堆积范围在 6~20 m 之间,2 层矸石之间覆土厚度在 0.4~1.5 m 之间。各钻孔均未探到地下水,推断矸石层内底部渗水应为顺沟底的一股流水,过流断面不大。

2 排矸场稳定性分析与评价

2 个排矸场及底部地基岩性简单,未见岩溶、土

为 1 号场的 1Z3—1Z4 段、2 号场的 2Z3—2Z5 段,如图 2 所示。



图 2 稳定性分析重点区域位置

测区采用数字航摄影进行航空摄影,对排矸场进行 1:500 摄影比例尺像控点设计,采用纵横 CW15 固定翼搭载 PPK 模块飞行,像控点在相片上的位置与地面实际位置偏差在 10 cm 以内。飞行时,飞机按照航线自作业区东侧进入航线开始自动飞行,测区纵横 CW15 固定翼无人机水平飞行速度为 20 m/s,飞行高度为 400 m,满足 1:500 比例尺要求,影像重叠度设置航向重叠度为 70%,旁向重叠度为 70%,可以满足航测成图及无人机航拍调查要求。拍摄后,得到 2 个排矸场的基本特性,见表 1。

洞等不良地质因素和作用。但 1 号排矸场底部原地形平缓,后缘已形成水头,根据现场涨落痕迹判断,水位涨落高程范围在 931.0~937.8 m 之间,具有持续性补给排矸体底部水流的特点;同时,2 个排矸场顶部平台平坦,滞流入渗能力强。因而,极端降雨的大量入渗和 1 号场底部水位涨落是潜在的不利因素。

根据测绘所得当前地形、原沟谷地形及钻探成果,建立含地层属性的排矸场、覆盖层及底部基岩的地质模型,如图 3 所示。

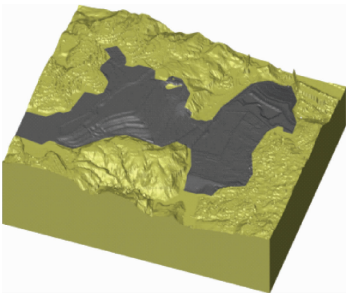


图 3 地质模型

2 个排矸场稳定性涉及的主要岩土材料为原地表以上沟道内的矸石堆积体和原地表的覆盖层及下部强风化砂岩,其覆盖层主要分布于沟坡上部,近沟底砂岩出露。沟坡上部的覆盖层和其上堆排的矸石体可能的滑动,实际受到原沟坡逆向地形的阻碍,即 2 个排矸场均在横向受两岸相夹,仅在纵向前缘形成坡面;横断面上表现为凹形地基,阻止散体指向坡面的水平位移,有利于排矸场的稳定,横向很难发生滑动和失稳。因而,本排矸体可能的失稳为顺沟道向沟口滑动,失稳模式可能为矸石堆积体内的滑动或沟底与堆积体界面处因水的作用形成的滑动,以及后期下部采煤工作可能引发的采动塌陷所致失稳。采用极限平衡法和有限元强度折减法相结合的方法,共同确定排矸场边坡的安全系数,便于将有限元强度折减法和极限平衡法二者的优点相结合,得出的潜在破坏面的位置和安全系数更可靠。

极限平衡分析采用 Morgenstern-Price 法,其考虑了所有的条间力并满足所有的静态平衡条件。

力矩平衡的安全系数方程:

$$F_m = \frac{\sum [c'\beta R + (N - u\beta)R \tan \phi']}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd}$$

力平衡的安全系数方程:

$$F_m = \frac{\sum [c'\beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega}$$

式中: c' 为有效黏聚力; $\beta, R, x, f, d, \omega$ 为几何参数; N 为土条底部的法向力; u 为空隙水压力; ϕ' 为有效摩擦角; W 为土条自重; D 为集中点荷载; α 为土条底部倾角。

选定 2 个剖面——1 号排矸场下段可能滑向沟口的纵剖面 1Z1(1A-1A')和 1 号排矸场上段水塘边可能受塘内水位变动引起失稳的 1Z2(1B-1B')剖面,如图 4 所示。

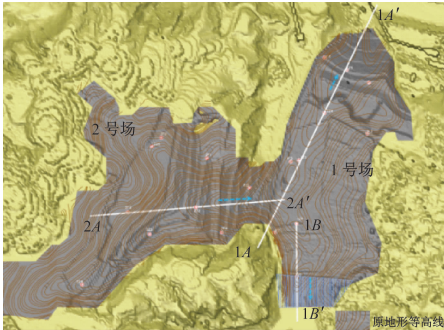


图 4 典型剖面

通过对 1 号排矸场全长纵剖面的计算分析,发现后缘段对前段的推动影响较小,主要原因是后缘原沟底坡度平缓。

纵剖面上的整体稳定性在自然和降雨条件下,

安全性符合规范要求;但降雨条件下 1 号排矸场的稳定性系数接近规范限值,属于基本稳定状态,其可能失稳滑动面在坡底原地形接触面处,坡面稳定性需重点关注。采动对 2 号排矸场的影响较大,其原因是 2 号排矸场原沟道上部坡度大,原地形向下沉陷过程中,2 号场排矸体将产生向 1 号排矸场内方向的滑动。

当前排矸场自然状况下均处于稳定状态,远超规范中安全系数 1.3 的标准值;在强降雨工况下 2 个排矸场仍然整体稳定,但稳定系数接近标准值,尤其是 1 号排矸场前缘边坡中下部稳定性处于基本稳定状态,2 号排矸场边坡中下部场内公路部位可能为潜在滑面剪出口。

排矸场顶部存在大规模的平台区域,具备降雨入渗滞留条件;计算中发现,矸石体内与界面间都将出现塑性区,表明 2 个排矸场内雨季堆积体原沟底界面间的失稳与排矸坡体内的失稳风险同时存在。1 号排矸场的可能失稳,威胁枣林回风井,因坡体距风井广场安全距离不足,应增设相关支挡工程措施。2 号排矸场发生可能滑动后无人员和设施威胁,危险性小。

下部工作面的采动对排矸场稳定性的影响主要表现为:1 号排矸场内排矸体随可能发生的采动沉陷一起下沉,前缘坡面因保安煤柱深入 120 m,而不被采动影响;2 号排矸场受采面的影响,主要以发生张拉沉陷为主,也可能发生失稳侧滑。

3 结果与建议

2 个排矸场顺原沟道堆积,原沟道地形平缓;堆排体顶部水平,未形成地表人为洼地和沟道;也未超过沟坡高程出现高位临空堆排,因而形成了排矸体三侧受限、一侧临空面的堆排状态;潜在滑动方向均为顺沟底纵向滑向沟口,其他三面受沟坡约束,形成指向坡面的滑动面可能性较小。

建议开展水保措施专项普查和专项设计,完善截排水明渠盲沟等相关水保措施,避免场内冲沟、剥落、垮塌等。开展 1 号排矸场坡前缘顶部平台围埂内积水的引排,避免近坡面在雨季的持续性下渗。

为防止工作面采动可能对 1 号排矸场场坡面造成失稳影响,建议在其坡面一定范围内提前注浆,以将矸石堆积体固结成大块状,使其提前丧失溃散特性,进而从根本上避免采动可能造成的堆积体失稳滑塌。

1 号排矸场场上游堰塞水塘的持续性汇流和向

表 2 反滤层结构参数

材料	粒径/mm	厚度/m	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	渗透 水头/m	渗透坡降/ (cm·m ⁻¹)
粗砂	0.5~2	1	0.5	24	24
砾石	3~10	1	3	4	6
碎石	20~50	1	10	1.2	1.2
块石	100~300	20	40	6	0.3
土工布	—	10 ⁻³	10 ⁻²	5	—

表 3 常见的尾矿库排洪系统封堵体类型、结构、适用场景

类型	封堵体名称	特点	适用场景
按封堵材料分类	刚性封堵体	采用刚性材料(如浆砌石、混凝土或钢筋混凝土等),结构坚固	需要长期稳定封堵的场景
	柔性封堵体	采用反滤材料(如土工布包裹碎石),施工便捷,效果理想	渗水量不大的情况
按结构类型分类	梁板型封堵体	应用整板现浇或预制块安装	井座顶部的封堵
	重力型封堵体	依靠自身质量抵抗水压力	需要长期稳定封堵的场景
	反滤型封堵体	采用反滤材料,施工便捷,封堵效果良好	
	框架式封堵体	由框架结构和填充材料组成	
其他类型	抗剪型封堵体	设计时需考虑抗剪强度和水压力的作用	适用于排洪井井径较大或在排洪支洞(管)内施工时
	高水材料封堵体	新型封堵材料,具有快速凝固、强度高、施工便捷等优点	适用于尾矿库加高扩容时

4 结语

对尾矿库和灰场排洪系统的监控和封堵技术进行了系统阐述,重点讨论了监控系统的子系统组成和封堵体长度、位置的计算方法,设计了某尾矿库排洪系统。

参考文献:

[1] 陈宜楷,莫勇. 基于调洪演算的尾矿库安全监测预警阈值设置方法[J]. 现代矿业, 2023, 39(8): 212-

(上接第 78 页)

下游的持续性渗透,对底部矸石的弱化当前无法估量,建议将水塘下半周进行帷幕注浆处理,尽可能减少渗流通道,减小矸石体底部水量和水位,进一步保障 1 号排矸场的长期稳定性。

4 结语

针对排矸场区域地下采动沉陷可能会产生地表贯通性裂缝而影响安全生产的问题,对 2 个排矸场地形特征的稳定性进行了数值模拟,并给出了排矸场安全防护的建议。下一步将研究排矸场拉裂过程

3.3 封堵体结构类型

尾矿库排洪系统封堵体的类型多样,主要依据不同的封堵需求和工程条件进行选择。常见的尾矿库排洪系统封堵体类型、特点、适用场景见表 3。

尾矿库排洪系统封堵体的选择应根据具体需求和条件综合考虑,确保封堵效果、施工便捷性和经济性的平衡。

215,219.

[2] 李爽,孙圣添,刘津源. 马粪沟尾矿库智能监测系统优化升级与应用[J]. 矿业工程, 2024, 22(1): 21-23, 27.
[3] 刘斌,王迅,曾霄祥,等. 某多雨地区尾矿库防洪安全及排洪能力研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(4): 206-209.
[4] 李道明,王明文,吴国高,等. 新型排洪方式在尾矿库扩容工程中的应用分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(5): 86-89.
[5] 毛辉,候鹏博,李嘉伟. 研究尾矿库排洪系统的封堵方法[J]. 工程建设与设计, 2020(16): 109-110.

动态量化、裂隙通道不良气体运移测定等。

参考文献:

[1] 李雅阁,章力. 基于有效降雨量的排矸场边坡稳定性分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(9): 67-72.
[2] 刘祥. 煤矿排矸场地下盲沟疏排效果物理模型试验研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
[3] 高雅,陆兆华,魏振宽,等. 露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2844-2854.
[4] 池君洲. 排矸场边坡 GPS 变形监测系统[J]. 煤炭工程, 2010(9): 116-118.