

基于水影响作用下的露天煤矿边坡稳定性研究

王明¹, 孟祥春², 王京伟¹, 徐勇超¹, 赵立春¹

1. 扎鲁特旗扎哈淖尔煤业公司, 内蒙古 扎鲁特旗 029100

2. 内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 029200

摘要： 随着煤炭科技的发展，如何适应当今科学技术的发展，成为众多煤矿工作者关注的问题。目前，我国的自主采煤技术水平仍然较低，为提升露天煤矿边坡稳定性，科学应对滑坡、泥石流、水土流失等问题，营造安全平稳生产环境，增强煤炭资源开发、存储与运输能力。文章以水影响作为框架，科学运用理论成果，分析露天煤矿边坡稳定性影响因素，掌握边坡治理底层逻辑，健全评估标准，创新分析路径，完善处置策略。

关键词： 水影响作用；露天煤矿；边坡稳定；提升策略

Study on the slope stability of open-pit coal mine under the influence of water

Wang Ming¹, Meng Xiangchun², Wang Jingwei¹, Xu Yongchao¹, Zhao Lichun¹

1. Zaharur Coal Company, Zhalut Banner, Inner Mongolia 029100

2. Inner Mongolia Energy Co., Ltd, Tongliao, Inner Mongolia 029200

Abstract： With the development of coal science and technology, how to adapt to the development of current science and technology, has become a concern of many coal mining workers. At present, the level of China's independent coal mining technology is still low. In order to improve the slope stability of open-pit coal mine, scientifically deal with landslide, debris flow, soil erosion and other problems, create a safe and stable production environment, and enhance the capacity of coal resources development, storage and transportation. The paper takes the water influence as the framework, and uses the theoretical results scientifically, analyzes the influencing factors of the slope stability of the open pit coal mine slope, grasps the underlying logic of the slope treatment, improves the evaluation standard, innovates the analysis path, and improves the disposal strategy.

Keywords： water influence; open pit coal mine; slope stability and lifting strategy

前言

根据相关机构公布的数据，2022年国内共有露天煤矿357处，产能达到11.62亿吨，约占全国煤炭总产量的23%。着眼露天煤矿开采的总体要求，开采企业在组织生产的同时，还需要加强边坡治理，立足水影响作用，探讨露天煤矿边坡稳定性影响因素，借助归因分析，廓清思路，把握关键，推动露天煤矿边坡治理活动高质量开展。

一、水影响作用对露天煤矿边坡稳定性产生的影响

系统分析水影响作用对露天煤矿边坡稳定性产生的影响，实现思路认知的有效扭转，廓清水体因素作用边坡稳定的主要形式，为后续数理研究与分析提供便利。

（一）水影响对边坡稳定性的作用方式

近些年来，随着露天煤矿开采规模的增加，深度的增大，边坡高度和扰动面积发生明显变化，影响开采活动正常开展。具体来看，露天煤矿边坡稳定性受到水体因素的影响较大，雨水渗透到土壤后，土体含水量增加，孔隙压力上升，基质吸引力降低，胶结结构受到侵蚀，使得边坡结构的抗剪强度持续下降，出现失

稳的概率大大增加^[1]。从实际情况来看，水影响对边坡稳定性的作用有着多样性，根据作用方式，可以划分为静水压力、动水压力两大类，在静水压力下，水体缓慢向下渗透，逐步侵入岩体空隙与裂缝中，使得边坡土体容量与孔隙水压持续增加，改变了边坡结构的力学属性，出现土体抗剪能力下降、剪应力增加等问题。水体在边坡流动中，对边坡结构产生冲击，导致边坡稳定性降低。水影响对边坡稳定性作用的复杂性，增加了露天煤矿边坡治理难度和治理成本。

（二）水影响对边坡稳定性的分析模型

为实现露天煤矿边坡的科学治理，应对静水压力、动水压力产生的影响，部分研究团队，尝试使用 Morgenstern-Price 分析

作者简介：王明，（1981.01），男，汉族，江苏东海人，现就职于扎鲁特旗扎哈淖尔煤业公司，高级工程师，硕士，现研究方向露天矿地质测量无人机航测、数据模型建立，以及采矿边坡工程等方面的工作。邮箱：wm613@126.com

模型，测算边坡安全系数，实现边坡稳定性的量化分析；部分研究团队利用有限元分析软件，综合评估边坡内部应力、位移等参数，建立边坡破坏预警机制，推动边坡治理的针对性和有效性；部分研究团队借助有限元法和极限平衡法，测算降水对边坡稳定性的临界值；部分研究团队使用强度折减法模型，分析不同工况环境下，边坡结构的安全系数，预测潜在失稳区域。现有的分析模型和分析方法，操作难度较大，实用性不高，对核心参数和关键数据的获取、分析、应用能力不高，使得分析模型在很大程度上，无法达到使用预期，无助于露天煤矿边坡失稳治理活动的有序开展^[2]。

二、水影响作用下露天煤矿边坡稳定性分析

运用现有理论成果和研究架构，客观、全面分析水影响作用下露天煤矿边坡稳定性的主要表现形态，通过定量分析和定性评估相结合，形成规律性认知，推动边坡治理工作稳妥有序开展。

（一）基于极限平衡理论的稳定性分析

1. 含水边坡滑移分析模型

利用极限平衡理论分析水体对露天煤矿边坡稳定性，可以搭建含水边坡滑移理论模型。结合以往经验，露天煤矿沉积岩层中，部分岩层中存在渗透性较差的泥岩，这种岩层特性使得降水后形成的浸润线始终保持在泥岩上方区域，特殊的分布规律，对滑动条块产生一定程度的弱化作用^[3]。为提升分析精度，可以引入岩土体物理力学性质试验，运用地质勘察、滑坡反分析等方式，精准获取测算密度、黏聚力、内摩擦角、渗透系数、弹性模量和泊松比，掌握边坡岩性。通过数据的整合、分析，掌握露天煤矿边坡在不同含水高度条件下边坡渗流量，掌握渗流场分布规律。同时，计算孔隙水压力对露天煤矿边坡稳定性的影响，实现含水边坡滑移的科学分析，确保稳定性分析的精准性和科学性。

2. 含水边坡稳定性分析模型

露天煤矿边坡稳定性分析中，为明确水体与边坡结构之间的相互联系，完善分析方法，形成静态稳定分析、动力稳定分析和水力稳定分析的分析模型。在静态稳定性分析中，运用切片法、广义平衡法等成熟的分析方法，建立露天煤矿边坡力学模型，计算剪切力的平衡关系，将其作为判定边坡稳定性的基础性前提，为后续分析研究奠定坚实基础。在完成静态稳定性分析后，综合考量水体等动力荷载对边坡稳定性的影响，采取时程分析法、频率分析法等多种方式，动态获取力学特征，依据动态力学特征，使用渗流有效应力法、Darcy 定律法以及杨-阿基米德稳定理论，开展水力稳定分析，逐步排除干扰因素影响，确保含水边坡稳定性分析结果的精准度，实现露天煤矿含水边坡稳定性规律的完整呈现，提升边坡失稳治理的针对性，准确预警滑坡、泥石流、水土流失等地质灾害^[4]。

（二）基于 FLAC 模型的稳定性分析

应用 FLAC 模型分析露天煤矿边坡稳定性的过程中，根据操作规范，率先做好模型建立与网格划分，三维计算模型，对建立起的三维计算模型进行网格划分，确保分析结果的有效性，实现

模型动态调整。模型创设完成后，输入岩土密度、弹性模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力等，设定模型的边界条件，考虑自重应力产生的初始应力场，以及地下水位和静水压力的影响，准确模拟地下水面和静水压力分布^[5]。利用 FLAC3D 进行数值模拟，评估露天煤矿边坡在天然状态下的应力分布和变形特征，在此基础上，模拟边坡开挖、降雨等工况对边坡稳定性的影响。运用迭代求解的方式，获得每一次迭代时的应力和应变值，进而评估边坡的稳定性^[5]。

三、露天煤矿边坡稳定性提升策略

完善露天煤矿边坡稳定性提升策略，实现边坡治理的体系化、科学化和高效性，形成最优化的露天煤矿边坡治理方案，营造良好条件。

（一）提升分析结果应用能力

露天煤矿边坡治理周期长、要求高，为应对失稳问题，坚持问题导向，坚持目标导向，坚持方法导向，充分运用分析模型，获取分析数据，将分析数据作为基础，完善边坡监测机制，创新边坡治理方案，推动露天煤矿边坡失稳问题的高效处置。具体来看，深刻把握水体因素与露天煤矿边坡稳定性之间的相互关系，明确水位变化与边坡结构稳定性、浸润线、安全系数之间的内在关系，通过数据分析，细化露天煤矿边坡治理的基本要求，实现边坡治理举措的科学设置，推动边坡治理工作稳步开展。为保证分析结果的应用效果，借鉴过往成功经验，把握分析结果应用的基本脉络，将数据分析和数据应用等环节串联起来，确保露天煤矿边坡治理方案契合治理总体要求，为边坡监测、生态治理提供数据支持^[6]。

（二）健全完善边坡监测机制

为确保露天煤矿边坡治理工作高质量开展，科学应对水体影响，准确运用稳定性分析结果，健全完善边坡监测体系，实时掌握边坡动态，获取水文、地质、植被等序列数据，搭建露天煤矿边坡治理大模型，确保边坡治理的科学性与合理性。具体来看，应积极与自然资源、环保、林业等政府部门对接，通过数据信息共享等方式，掌握土壤、地下水等地质环境修复指标，同时结合矿有关职能部门提供的评估结果，科学修正地质环境边坡治理方案，确保修复方案的实时性与有效性。使用 RS 技术、无人机勘察技术，定向获取露天煤矿边坡区域植被、水文等基础数据，准确评估生态状况，对可能出现的滑坡、泥石流等地质灾害做好提前预警，降低地质环境问题产生的威胁程度。综合运用大数据技术、云计算技术，组建露天煤矿边坡三维模型，获取各类数据，直观掌握区域实际以及修复情况，切实增强露天煤矿地质环境边坡治理工作的指向性，避免出现盲目修复等问题，减少不必要费用支出，确保资源利用的集约化水平^[7]。

（三）不断强化边坡加固效果

在边坡加固中，可以选用锚固方案，实现边坡结构合理调整，确保总体加固效果。据图来看，按照测量放线、外层钢板桩施工、内层钢板桩施工、基槽开挖、集水沟与集水坑开挖的施工

流程，增强边坡锚固结构稳定性。对于土钉墙锚固技术、排桩锚固技术以及地下连续桩技术的应用，调整举措，完善技术参数，确保锚固施工技术应用水平。利用 FLAC3D 模拟加固后的边坡应力、应变状态，验证加固效果^[8]。通过调整加固方案的参数，确保抗滑桩的桩长、桩间距等加固技术参数符合预期，提升总体加固能力。优化加固设计在锚固施工过程中，还需要严格按照技术规范，科学合理使用施工机械和施工工艺，以保证施工的安全和质量。在边坡锚固方案交底和施工方案制定时，仔细评估其合理性和符合性，确保其与相关规范、标准和设计要求相符。对锚固结构使用的材料进行审查和质量检查，确保其符合规定要求，并通过必要的测试和检验来验证其稳定性和可靠性。

（四）持续创新边坡治理举措

具体来看，综合考量露天煤矿边坡失稳治理的经济性、生态性等要求，选用绿色环保 GLD 生态袋，这种生态袋适用范围较广，能够满足不同工况环境下的边坡治理要求，降低水体因素对边坡结构产生的影响。对于生态袋内使用的填充物质，结合含水

边坡滑移分析模型，合理选择填充物质种类，保证对水体的吸收、处置能力^[9]。结合过往经验，技术团队将植生土、中粗砂、有机肥作为主要填充物，按照 7:2:1 的制备比例，兼顾填充物制备成本和制备效果。为最大程度地发挥生态袋的边坡治理优势，在填充物中，添加一定量的草灌木种子，充分运用灌木的水土保持能力，吸收多余水分，改变边坡土壤属性，确保边坡修复能力。生态袋封袋阶段，科学控制封装量，将封装量控制在 90% 左右，封装袋与封装袋之间，使用生态袋粘合剂进行加固，确保露天煤矿边坡生态治理的整体质效。

四、结语

边坡治理对于露天煤矿开发有着深远影响，文章着眼水体因素对边坡结构的作用方式，引入全新的研究模型^[10]，归纳规律，总结经验，采取有效举措，创新治理路径，完善治理举措，切实提升边坡稳定性。

参考文献

[1] 吴榕真, 舒应秋, 李志强等. 基于水影响作用下的露天煤矿边坡稳定性研究 [J]. 露天采矿技术, 2021 (3): 26-29.

[2] 王旭, 吴婷婷. 基于蠕变特性的露天煤矿外排土场边坡稳定性研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023 (11): 193-198.

[3] 马瑞东. 露天煤矿边坡稳定关键影响因素及边坡治理 [J]. 能源与节能, 2015(10):47-48.DOI:10.16643/j.cnki.14-1360/td.2015.10.022.

[4] 李志国, 徐涛, 刘永杰. 露天矿边坡稳定性的层次分析-模糊综合评价耦合分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024 (1): 116-123.

[5] 王凯, 那恩航, 张亮等. 阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征 [J]. 干旱区研究, 2021 (2): 402-410.

[6] 李文国. 边坡稳定监测技术在露天煤矿中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2015(10):133-134.DOI:10.13487/j.cnki.imce.007216.

[7] 谷浩源, 韩流, 张健. 水-热耦合下露天矿冻结期靠帮开采边坡稳定性研究 [J]. 煤矿安全, 2023 (12): 159-166.

[8] 杨天鸿, 王赫, 董鑫, 刘飞跃, 张鹏海, 邓文学. 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 (6): 45-48.

[9] 田树昆, 马洪伟, 吴迪. 露天矿陡帮回采端帮压煤边坡稳定性研究 [J]. 现代矿业, 2012,27(08):139-140+157.

[10] 王禹. 露天煤矿边坡稳定监测分析及治理研究 [J]. 科技创新与生产力, 2014(12):44-47.