

露天矿山边坡治理与生态修复技术分析

文 / 符策炜 海南省矿产资源勘查院

符广卷 海南省矿产资源勘查院 (通讯作者)

摘要: 边坡是露天矿山的重要组成部分, 边坡稳定是露天矿山开采过程中不可忽视的关键环节, 其稳定性受地质构造、岩体结构、自然环境条件、人为开采等多种因素和条件的共同影响。根据习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”的生态理念, 将绿色发展理念贯穿于矿产资源规划、勘查、开发利用与保护全过程。矿山边坡治理与生态修复根据其实际情况可采用截排水措施、危岩清理、削坡减载、抗滑锚固等工程技术措施开展治理; 可采用种植爬藤、鱼鳞坑种植、植生(条、袋)种植、挂网喷播等生物工程技术措施实现生态修复。本文首先简要概述矿山边坡定义与边坡特点, 进一步分析影响矿山边坡稳定因素, 总结露天矿山边坡治理与生态修复技术措施。

关键词: 露天矿山; 边坡治理; 生态修复; 矿产资源

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.03.119

引言

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础, 为我国社会生产及建设提供了重要保证。在对矿产资源进行开发时, 根据其赋存方式及经济剥采比可采用露天开采和地下开采两种方式。其中, 采用露天开采时对矿区的地形地貌景观、水土环境资源等造成严重破坏, 矿区边界将形成阶梯式边坡。本文对露天矿山边坡治理与生态修复措施进行列举, 以为后续露天矿山边坡治理与生态修复工作提供经验借鉴, 意在实现露天矿山生态修复推动我国绿色矿山工作进一步发展。

一、露天矿山边坡定义

露天矿山边坡又称露天矿边帮, 是露天矿场的构成要素之一。露天矿山边坡指露天矿场四周的倾斜表面, 即由许多已经结束采掘工作的台阶所组成的总斜坡。它与水平面的夹角, 称边坡角或最终边坡角。按边坡与矿体的空间相对位置, 可将边坡分为上盘边坡、下盘边坡和端部边坡。

二、露天矿山边坡特点

(一) 不稳定性

露天矿山边坡的不稳定性来源于多种因素, 包括地质构造、岩性、结构面、水文地质条件、爆破作业以及其他因素等多种因素共同制约。受断层、褶皱等地质构造影响, 岩体结构复杂, 节理裂隙发育; 因风化程度各异, 岩性差异较大, 岩体软硬程度不一, 工程力学性质相差较大; 岩矿体富水性, 地下水动态特征, 地表水活动等均影响边坡稳定。此外, 露天矿山的长期爆破作业也会对岩体造成破坏, 产生新的结构面或扩大原有结构面, 从而影响边坡的稳定。

(二) 阶段性

露天矿山开采周期一般较长, 边坡的形成是一个逐步的过程, 上下部边坡的服务时长不同其稳定性要求不

同。在开采过程中终了边坡逐步形成, 不同阶段边坡稳定性主导影响因素不同, 边坡稳定性也随之而变。

(三) 时效性

随着矿山开采深度和采场面积的不断增加, 露天矿山边坡结构面和边坡高度也相应增加, 开采初期边坡高度较低, 稳定性相对较好, 开采中后期边坡不断加高, 稳定性逐渐变差; 闭坑后受长期风化、降水等影响, 边坡稳定性将进一步恶化。这表明边坡的稳定性问题随着时间和开采活动的进行也随之而变。

三、露天矿山边坡稳定影响因素

(一) 地质构造

地质构造是影响露天矿山边坡稳定性的主要因素之一, 地质构造的复杂性和活动性会增加边坡破坏的可能性。例如, 断裂、褶皱等地质构造的存在, 可能会削弱岩体的完整性, 导致边坡失稳。褶皱构造核部由于受力作用岩石破碎、裂隙发育, 岩石强度低; 断裂构造使岩石所受应力强度超过自身强度而发生破裂, 岩层连续性遭到破坏。如终了边坡至于该处在岩体自重和外力等因素作用下极易引发边坡灾害问题。

(二) 岩体结构

岩体结构有多种形式, 其中岩体结构面对露天矿山边坡的稳定性具有显著影响。例如裂隙和节理为地表水和地下水的渗入提供了通道, 水体不仅增加了岩体的重量, 还可能与岩体中的矿物成分发生化学作用导致岩体破坏; 另外节理裂隙面易风化被次生矿物充填, 直接影响岩体的整体强度和稳定性; 岩体节理裂隙的产状直接影响边坡坡面角, 坡面角大于倾角降低边坡稳定性。

(三) 自然环境条件

露天矿山边坡的稳固性往往受到水文地质条件、工程地质条件和人类活动等因素影响。例如, 地下水能改变岩石的物理力学性质, 在岩体的裂隙中产生静压力和

浮力作用，影响边坡的稳定性。地下水在破碎岩体中的裂隙内流动时，会产生水的动压力作用，从而使边坡的稳定性降低。降雨或积雪融化会导致地表水快速积聚，增加边坡岩土的水分含量，进而削弱其抗剪能力，更容易引发边坡表面的滑动；另外，干燥与湿润交替、以及冰冻与解冻的反复作用，会加速岩石的风化，差异风化降低了岩石的工程力学性质导致边坡的岩石结构变得松散，进一步减少其抗剪力；同时，人为开采爆破产生的动态载荷也会扰动边坡，引起位移和形变，从而削弱边坡的整体稳定性。

四、露天矿山边坡治理与生态修复技术措施

(一) 露天矿山边坡治理措施

1. 截排水措施

截排水措施是露天矿山治理与生态修复工程的重要组成部分，其设计与施工质量决定整个治理与生态修复工程的成败。水是促使滑坡的一个主要因素，它能降低岩体的内摩擦角和黏聚力等物理性能指标，从而削弱边坡岩体的抗剪强度，增加边坡失稳的风险。特别是在露天矿山边坡治理与生态修复工程中，由于大气降水、地表径流和地下涌水等因素，容易引发终了坡面侵蚀，造成水土流失和局部坍塌、滑坡等风险，易给矿山财产安全造成重大损失。露天矿山截排水措施的实施需要综合考虑多种因素。如气候条件、地表水体、地形条件、岩石结构、地质构造以及矿山生产对地下水的影响等。

2. 危岩清理措施

危岩清理是露天矿山边坡治理与生态修复工程中的一项目标措施。危岩清理措施的实施，可有效减少坡面浮石、滚石、伞岩等坠落、滑塌对矿山安全构成威胁，从而保障矿山作业人员、设备及周边环境的安全。另外，危岩清理是其他治理措施的基础，只有在危岩清理之后保障坡面安全才能开展生态修复工作，进一步改善矿区的生态环境，恢复矿区的景观，减少地质灾害的发生，使矿山山体稳定，生态环境得以恢复，减少矿山对周边环境的负面影响，促进矿区的可持续发展。

3. 削坡减载措施

削坡减载工程在露天矿山边坡治理与生态修复工程中起到关键性作用，能提高边坡稳定性、消除地质灾害隐患、促进生态修复工程的实施。针对坡度较大、高度较高的露天边坡，实施削坡卸载工程能够显著降低边坡失稳的可能性。这一工程主要是通过对边坡顶部的岩土进行挖掘和移除，从而降低边坡的角度，减少边坡上的载重，优化其受力状况，进而增强斜坡的整体稳固性。削坡减载工程主要采取多阶削坡方式，但具体采取何种削坡方式还需依据斜坡的具体状况和整治目的来选取适当的方法。在进行削坡设计时，需要综合考虑多种因

素，包括岩石强度、岩体结构、水文地质条件等。必须先对斜坡的稳定性进行评估，计算出削坡后的稳定安全率，再根据这个数据来调整斜坡的倾斜度、高度和台阶的各项参数。通过科学的削坡减载设计，可以有效地提高边坡的稳定性。削坡施工要严格控制开挖面位置和开挖进度，分层开挖，及时清运，避免局部卸荷引发边坡失稳。开挖后及时采取支护、防护措施，防止坡面风化和水土流失。削坡虽减缓了边坡失稳风险，但因边坡形态改变，仍需实施长期监测，及时发现稳定性变化，采取相应的补强加固措施。

4. 抗滑锚固措施

抗滑锚固措施在露天矿山边坡治理工程中作为一种有效的技术手段，通过增强边坡的稳定性，减少滑坡等地质灾害的发生，从而保障矿山生产和人员安全。抗滑锚固措施通过抗滑桩、锚索等工程技术，增强边坡的抗滑能力，防止边坡滑动。抗滑锚固体系主要以排水系统、承力系统组成，通过将钢筋网设置在混凝土中，在具体压力下将整个土层与钢筋混凝土牢固附在一起，以此对变形进行控制。较比传统边坡支护技术而言，抗滑锚固将锚杆固定在岩层中，可在支柱和土层的双重保护下提高整体边坡稳定性。并且在整体支护体系下，锚杆与岩层具有十分密切的联系，且在土层承载力不断增加的趋势下，造成荷载变形问题的压力会大幅度降低，以此增加土层之间的摩擦力，增强锚杆整体承载力及抵抗力。抗滑锚固施工技术如下：

表1 抗滑锚固施工技术

工序	具体内容
施工准备	熟悉施工图纸和地质勘察报告，了解边坡周边环境和地质情况。 准备施工所需的材料、设备和工具，如锚杆、钢筋网、喷射混凝土设备等。 进行场地平整和测量放线，确定边坡开挖边界和支护结构的位置。
边坡开挖	按照设计要求分层分段进行边坡开挖，控制每次开挖的深度和长度。 及时清理开挖面的浮土和松石，保证坡面的平整度和稳定性。
锚杆施工	采用钻孔机在坡面上钻孔，钻孔的直径、深度和角度应符合设计要求。 插入锚杆，锚杆通常采用钢筋或钢绞线，并用水泥砂浆或专用锚固剂进行锚固。
钢筋网铺设	在坡面上铺设钢筋网，钢筋网的间距和规格应符合设计要求。 钢筋网之间采用焊接或绑扎连接，形成整体。
喷射混凝土	采用喷射混凝土设备将混凝土喷射到坡面上，喷射顺序应自下而上，分层喷射。喷射混凝土的厚度和强度应符合设计要求，确保支护结构的稳定性。
养护	喷射混凝土完成后，应进行养护，保持混凝土表面湿润，养护时间不少于7天。

（二）生态修复技术

1. 种植爬藤

在露天矿山边坡生态修复过程中，种植爬藤技术应用作为重要的施工流程，爬藤植物的种植成本低，施工方便，这对于资金有限的矿山生态修复项目来说极其重要，爬藤能够迅速覆盖裸露的坡面，减少水土流失，同时为其他植物的生长提供良好的环境。在实施过程中爬藤种类的选择极为关键，不同爬藤生长对气候条件有着较大的差异，通过合理选择爬藤可有效打造美观适宜的爬藤景观，对于改善边坡生态环境及减少后续养护、修复工作量具有促进意义。在爬藤选择上，以当地具有抗逆性、适应性强的爬藤为主，综合考虑地方气候条件、边坡生态环境等根据爬藤生长规律，选取的爬藤具有较强的适应性，可适应边坡环境的同时，保障所选爬藤根系发达，对于保持水土、净化空气具有促进意义。此外，为确保边坡生态系统的生物多样化，生态修复工程在爬藤选择上以多元性为原则，将混合花草籽播撒到土壤中，有助于恢复生态系统的平衡，促进生态系统的自然恢复和发展。

2. 鱼鳞坑种植

鱼鳞坑的设计和 implementation 对于露天矿山边坡的生态修复至关重要，鱼鳞坑种植在露天矿山边坡生态修复中能有效减少水土流失，促进植被恢复，从而改善生态环境。鱼鳞坑是一种水土保持造林整地方法，在边坡生态修复中主要用于较陡的边坡。通过在较陡的山坡上采用人工直接挖掘类似鱼鳞状的半圆型或月牙型岩、土坑，然后表土回填生土培埂坑内植树。这些坑穴呈品字形交错排列，具有蓄水、保土、保水、保肥的功能。鱼鳞坑能够有效地拦截地表径流，减少径流对土壤的侵蚀，同时增加降雨下渗率，涵养水源，起到保水的作用。此外，鱼鳞坑通过减少水土流失，为植物的生长提供了有利条件，促进了植被的恢复，从而有助于改善矿区生态环境。鱼鳞坑种植技术可对贫瘠、重金属土壤进行有效改造，同时较其他恢复技术而言，鱼鳞坑种植技术具有成本低的优势，目前广泛应用于经济条件相对落后的区域。

3. 植生（条、袋）种植

植生（条、袋）通过科学的方法融合了多种生物材料和工程技术，旨在为土壤的恢复提供一个理想的生长环境。在矿山生态修复过程中，植生（条、袋）可以有效地改善土壤结构，增加土壤保水能力，同时提高土壤的肥力，为植物的生长提供必要的养分。此外，植生（条、袋）能够迅速覆盖裸露的土地，有效

防止水土流失，并逐步引导植被的自然恢复。这种技术不仅有助于改善土壤质量，还能促进植被的快速生长，从而加速矿区的绿化进程。在具体实施中，植生（条、袋）通常采用无纺布和遮阳网制作，具有良好的透水性与透气性。内部装有土壤、草籽、肥料、保水剂等，通过特定的方式沿山体安装，形成一个稳固的护坡植生绿化系统。这种系统不仅能够有效防止水土流失，还能通过植物的根系进一步稳固土壤，形成稳定的生态系统。

4. 挂网喷播

挂网喷播在露天矿山边坡生态修复中起到了关键的作用。这种技术通过结合土壤、种子和肥料，通过专门的设备喷播到已铺设网格的坡面上，利用植物的根系固定边坡土壤，防止水土流失，从而达到边坡绿化和生态恢复的目的。不仅解决了高陡边坡未能退坡情况下施工难度大、投入成本高的问题，还能快速显示修复效果，显著提高了植被覆盖率。在施工时，为了固定网格，使用锚杆或者小段钢筋，锚定的深度和距离要根据承重要求来设定，以保证网格系统的稳固性。喷播后及时养护，待植被根系伸展缠绕于网格内后，可明显增强边坡整体稳定性。挂网喷播技术的应用，不仅有助于提高矿区的生态质量，还能有效防止水土流失，促进生物多样性的恢复。在高陡边坡、风化边坡生态修复中得到广泛应用。

结束语

综上所述，文章以露天矿山边坡生态环境的保护和恢复治理研究进行整理与分析，通过进一步研究加强露天矿山边坡生态环境保护与恢复治理措施，有效解决当前矿产资源利用与自然生态环境存在的不协调问题，提高露天矿山边坡治理与生态修复质量促进绿色矿山发展。

参考文献

- [1] 谢天. 露天矿山边坡稳定治理与生态修复技术分析[J]. 世界有色金属, 2024, (11): 133-135.
- [2] 谭兴元. 露天矿山边坡稳定化治理与生态修复技术分析[J]. 世界有色金属, 2023, (12): 213-215.
- [3] 张琳. 露天矿山边坡稳定治理与生态修复技术分析[J]. 中国金属通报, 2023, (04): 147-149.
- [4] 郭海建, 成功. 别斯库都克露天矿采-排复合边坡稳定性分析[J]. 露天采矿技术, 2024, 39(04): 42-45.
- [5] 蓝龙飞. 在冻融条件下某露天矿山边坡变形特征研究[J]. 矿产勘查, 2024, 15(S1): 43-46.