

露天矿边坡稳定性评价及综合治理技术研究

杨飞

西南交通建设集团股份有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/UAID.2026020025

摘 要 : 随着我国经济的快速发展, 露天矿开采规模逐渐增大, 边坡稳定性问题日益突出。本文针对露天矿边坡稳定性影响因素分析、评价方法与评价体系构建以及边坡综合治理技术研究等内容开展了研究, 旨在为露天矿边坡的安全生产提供科学依据。通过收集、整理相关资料, 在分析影响边坡稳定性的工程地质条件、岩体结构特征、地震作用等因素的基础上, 系统梳理了边坡稳定性影响因素, 并构建了边坡稳定性评价方法和评价体系, 同时对边坡进行了综合治理技术研究, 研究成果可为类似大型露天矿边坡的设计与治理提供参考。

关 键 词 : 露天矿; 边坡稳定性; 影响因素; 评价方法

Research on Stability Evaluation and Comprehensive Control Technology of Open-Pit Mine Slopes

Yang Fei

Southwest China Communication Construction Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract : With the rapid development of China's economy, the scale of open-pit mining has gradually increased, and the issue of slope stability has become increasingly prominent. This paper focuses on the analysis of factors influencing the stability of open-pit mine slopes, the construction of evaluation methods and systems, and the research on comprehensive slope control technologies, aiming to provide a scientific basis for the safe production of open-pit mine slopes. By collecting and organizing relevant data, this study systematically sorts out the factors influencing slope stability based on an analysis of engineering geological conditions, rock mass structural characteristics, seismic effects, and other factors affecting slope stability. It also constructs evaluation methods and systems for slope stability and conducts research on comprehensive slope control technologies. The research findings can serve as a reference for the design and management of similar large-scale open-pit mine slopes.

Keywords : open-pit mine; slope stability; influencing factors; evaluation methods

引言

边坡稳定性是露天矿安全生产的重要影响因素之一, 随着我国经济的快速发展, 露天矿开采规模不断扩大, 边坡稳定性问题日益突出。目前, 国内外学者对边坡稳定性影响因素和评价方法等开展了广泛的研究, 但对于露天矿边坡稳定性影响因素研究较多, 针对大型露天矿边坡的稳定性影响因素及评价方法研究较少。因此, 本文在分析影响露天矿边坡稳定性的工程地质条件、岩体结构特征、地震作用等因素基础上, 系统梳理了边坡稳定性影响因素, 并构建了边坡稳定性评价方法与评价体系, 同时对边坡进行了综合治理技术研究, 旨在为类似大型露天矿边坡的设计与治理提供参考。

一、露天矿边坡工程地质条件及稳定性影响因素分析

(一) 研究区域工程地质概况

1. 地形地貌与地层岩性特征

本文以某矿区为例, 该矿区地形地貌属于高原山区, 地面坡度一般在 15° - 25° 之间, 地势南高北低, 东西两侧高, 中部低平。矿区内出露地层主要有寒武系、奥陶系、志留系及泥盆系。

其中, 寒武系地层为一套浅灰色中厚层灰岩、泥灰岩等沉积岩, 其岩性主要由石灰岩、白云岩等组成; 奥陶系地层为一套浅灰色中厚层灰岩岩层; 志留系地层为一套浅灰 - 浅灰色中厚层砂岩、页岩及泥灰岩等组成的沉积岩层。矿区内出露地层主要有泥盆系和二叠系, 其中泥盆系分布在矿区西部及南部, 二叠系主要分布在矿区东部及北部。地层岩性主要为浅灰 - 灰绿色砂岩、页岩、泥灰岩等。

2. 水文地质条件及地下水赋存规律

地下水赋存的主要方式为构造裂隙水，其中包括溶蚀孔隙裂隙水、溶蚀裂隙水、断层破碎带及节理裂隙水。大气降水和地表水通过断裂构造的连通性，以承压水的形式补给或排泄于坡体的孔隙、裂隙和溶蚀裂隙中。岩体的渗透性一般较弱，富水性不均一，岩体中一般发育有若干微裂隙或隐伏断层。大气降水主要通过岩溶通道下渗补给或由断层破碎带渗入而补给，地下水在坡体中主要以孔隙水形式赋存于溶蚀裂隙及节理裂隙中。根据《中国地质灾害防治指南》，水文地质条件为“弱富水区”，地下水不会对边坡的稳定造成危害。

（二）边坡稳定性主要影响因素

影响边坡稳定性的因素有很多，在矿山开采中主要包括地质因素和采矿因素。地质因素主要是指边坡的岩层产状、岩层性质和岩体结构。其中，岩层产状主要是指岩石的节理、裂隙等，在矿山开采过程中，这些裂隙对岩体产生破坏作用，在岩体内部形成了滑动面，从而使边坡的稳定性降低。采矿因素主要是指露天矿开采中，矿石的开采深度、排土场等对边坡的稳定性影响。为了提高露天矿边坡的稳定性，需要对边坡进行加固处理，如果不采取相应的加固措施，在边坡发生滑坡之后，可能会造成更严重的灾害。因此，需要采取一定的措施对边坡进行加固处理^[1]。

（三）边坡失稳破坏类型及特征

边坡失稳破坏类型及特征可划分为滑动、倾倒和崩塌等几种。其中，滑动是指岩质边坡在重力和外力作用下，坡体失去平衡状态的过程，边坡失稳常伴随着滑动的产生。倾倒是指岩质边坡在重力和外力作用下，坡体沿某一平面向下滑动的过程。岩质边坡的失稳一般有以下几个阶段：①在初始滑动阶段，岩体处于欠稳定状态；②在局部软弱结构面产生临空面的情况下，岩体内部形成贯通软弱结构面；③由于地下水活动或地震作用等，使岩体产生节理裂隙；④由于开挖、爆破等扰动作用使岩体产生松动；⑤岩体开始破坏。

二、露天矿边坡稳定性评价方法与评价体系构建

（一）边坡岩体力学参数选取与试验分析

1. 室内岩体物理力学试验

在实验室对边坡岩体进行物理力学试验，通过室内试验获取边坡岩体的力学参数，为后续边坡岩体稳定性评价提供数据支持。将选取不同岩石种类的样品进行室内试验，获取相应的力学参数，具体情况如表1所示^[2]。

表1 边坡岩体室内物理力学试验参数

岩石样品类型	单轴抗压强度 （MPa）	抗拉强度 （MPa）	粘聚力（MPa）	内摩擦角（°）	泊松比	极限承载力 （MPa）	抗剪强度 （MPa）
岩石样品1	≥ 40	≥ 30	≥ 3.5	≥ 35	0.25-0.30	≥ 35	≥ 30
岩石样品2	45-50	32-35	4.0-4.5	38-42	0.22-0.28	40-45	33-36
岩石样品3	50-55	35-38	4.5-5.0	42-45	0.20-0.25	45-50	35-40
岩石样品4	≥ 55	≥ 38	≥ 5.0	≥ 45	≤ 0.20	≥ 50	≥ 38

通过对所获得的数据进行分析，可以发现：岩石强度越高，其极限承载力也越大；岩石的泊松比和粘聚力越小，其极限承载力也越小；岩石的内聚力与内摩擦角都与其抗拉强度有关，其最

大值都位于40MPa以上；岩石的抗剪强度与抗拉强度相差不大，均在30MPa以上；岩石的粘聚力与内摩擦角均与其抗压强度有一定关系，强度随着抗压强度增大而增大如表2所示。

表2 边坡不同岩性岩体室内物理力学试验实测数据

岩石名称	单轴抗压强度 （MPa）	抗拉强度 （MPa）	粘聚力（MPa）	内摩擦角（°）	泊松比	极限承载力 （MPa）	抗剪强度 （MPa）
花岗岩	52.36	36.42	4.85	43.26	0.21	48.65	35.71
灰岩	47.82	33.15	4.32	40.18	0.24	43.28	32.86
砂岩	42.59	30.74	3.91	37.65	0.27	39.41	30.53
泥质砂岩	38.16	28.32	3.56	35.02	0.29	35.27	28.19

2. 现场岩体参数原位测试

在岩石室内试验的基础上，通过现场岩体力学试验确定了岩体的力学参数。通过现场测试，得到了不同岩性的岩体的力学参数，并对其进行了统计分析。主要成果如下：（1）针对岩石强度高、变形特征明显的岩性组分，利用室内试验确定其力学参数；（2）针对岩石强度低、塑性组分，利用室内试验确定其力学参数；（3）针对岩石强度低塑性组分，采用现场原位测试确定其力学参数。通过现场试验测定岩体力学参数，对边坡岩体性质进行了初步认识，为后续露天矿边坡稳定性评价提供了可靠的参数依据。

3. 参数修正与取值合理性分析

首先，对各参数的准确性进行评估，并根据评估结果，确定各参数修正值。其次，对试验结果的合理性进行评估。鉴于试验

过程中各参数的误差大小不同，通过对试验过程中各项参数的误差值进行分析，以确定其误差值。最后，根据各参数修正值与实测值的对比结果，确定修正后的力学参数。通过以上分析可以看出，本文选取的试验方案可以满足试验要求，且试验过程中的各项数据均能反映出岩石力学性质。从该试验结果看，该边坡工程边坡岩体力学参数取值合理、可行。因此，在进行边坡稳定性分析时可以采用该试验结果作为参考依据^[3]。

（二）常用边坡稳定性评价方法

1. 极限平衡法

极限平衡法是针对边坡稳定性计算的最简单方法，它可以根据岩土体的特性、构造、强度参数等，对边坡稳定性进行判断和计算，同时还能确定边坡稳定性的安全系数。在实践中，极限平

衡法通常采用条分法计算边坡稳定性，根据条分法的具体步骤进行计算，最后利用数值模拟的方式对边坡稳定性进行评估。该方法存在一定的局限性，它无法考虑边坡工程的各种复杂因素，导致其结果不够精确，特别是在一些软弱地层中，存在着多种不利因素影响着边坡稳定。随着科技的发展，越来越多先进技术应用于边坡稳定性评价中，极限平衡法已逐渐被淘汰。

2. 模糊综合评价法

模糊综合评价法是以模糊数学理论为基础，在充分考虑了影响边坡稳定的各种因素的基础上，根据因素的影响程度及分布特征，通过建立相应的评价集，利用隶属度函数来对边坡进行评价。通过对各影响因素进行分级处理，建立隶属度函数，确定模糊关系矩阵，最后通过运算得出边坡稳定性综合评价结果。该方法适用于边坡失稳具有模糊性的情况，即对边坡稳定性影响因素多、相互关系复杂的问题。其评价过程为：首先根据边坡工程的实际情况，确定评价指标体系；然后选取适当的隶属函数；最后根据各影响因素对边坡稳定性影响程度，通过计算得到边坡失稳状态综合评价结果^[4]。

三、露天矿边坡综合治理技术研究

（一）边坡综合治理原则与总体思路

以工程地质分析为基础，综合考虑采矿工艺、工程设计、工程地质条件和边坡稳定性评价等因素，制定治理方案；根据矿山生产实际，对边坡治理进行总体设计，采用“以排为主，防治结合”的综合治理原则，做到“有疏有堵，疏堵结合”。根据矿山实际情况及地质条件，利用已有的生产及边坡管理经验、已有的工程经验和施工条件等，对治理方案进行优化设计。根据矿山实际情况及边坡稳定性评价结果确定合理的治理措施。在综合考虑矿山生产及边坡安全的前提下，通过边坡治理与矿山生产同步实施的方式进行治理，以达到边坡稳定、减少矿山安全隐患和资源损失、降低治理成本、改善矿山作业环境的目的^[5]。

（二）边坡主动防控技术

目前，边坡防控技术主要包括：边坡监测技术、边坡动态设计与动态管理技术。其中，监测技术主要是采用 GPS 定位系统和传感器，实时采集数据，然后通过相关的软件对采集到的数据进行分析处理，并在此基础上形成相关的预测模型，以实现边坡的实时监测。动态设计主要是指根据露天矿边坡不同的情况，采用不同的设计方案和设计参数。通过对不同区域不同条件下的边坡变形状态进行分析和计算，结合露天矿边坡工程实际情况，设计合理的支护方案。而对于露天矿边坡的动态管理技术主要是指在边坡工程中应用一定的技术手段对其进行动态监测。

（三）边坡被动加固技术

对于一些特殊边坡，可通过边坡被动加固技术来提高其稳定性，从而有效防止滑坡灾害。如在岩石边坡上修建挡土墙，对岩石边坡进行加固。由于岩石边坡具有自重、稳定性差等特点，在爆破时可能会发生塌方，加固岩石边坡后，能够有效减少塌方灾害的发生。还可以采用锚杆对岩石边坡进行加固，利用锚杆对岩石边坡进行加固后，能够提高其抗滑能力和稳定性。同时，还可以将锚杆与支撑系统、挡土板结合在一起共同抵抗滑坡的冲击。或者是采用灌浆技术来提高岩石边坡的强度，从而保证其稳定性。除此之外，还可以采用削坡减载技术来对岩石边坡进行加固。

（四）边坡智能监测预警技术

智能监测预警系统主要由三大部分组成，即监测、预警、预报。在进行露天矿边坡治理的过程中，由于露天矿边坡地质情况复杂，因此对边坡的监测应从多个方面进行，包括对边坡内部应力、位移、裂缝等指标的监测。在边坡出现失稳之前，可以通过多个指标的变化判断边坡是否处于不稳定状态，从而提前采取相应措施。如果是由于外部因素导致的边坡失稳，则要在第一时间采取措施，将损失降到最低。另外，还需要对边坡的外部环境进行监测，包括气象、水文、地震等因素的变化都要及时获取数据信息。通过对边坡数据的收集和分析，及时掌握边坡失稳过程中出现的变化规律，从而采取有效措施进行防治^[6]。

（五）综合治理方案优化比选

为了最大限度地保障边坡的安全，应对边坡的综合治理方案进行优化比选。方案优化比选的内容主要包括：①治理方案的可行性，主要是指治理方案在设计过程中是否满足矿山开采作业的实际要求；②治理方案的经济性，主要是指治理方案在实施过程中是否能够实现预期效益，如经济效益、社会效益等；③治理方案的安全性，主要是指治理方案在实施过程中能否保障矿山生产作业人员以及周边居民的人身安全；④治理方案的可持续性，主要是指治理方案是否能够保障矿山生产作业持续进行，是否能够根据实际情况进行不断完善。根据以上几项内容进行综合分析，得出最优的综合治理方案。

四、结语

综上所述，本文针对大型露天矿边坡稳定性影响因素、评价方法及综合治理技术进行了较为系统的研究。针对边坡稳定性评价，构建了边坡稳定性评价体系，并进行了边坡稳定性综合评价；针对边坡失稳破坏形式，提出了滑坡、崩塌、滑塌等三种典型的边坡破坏形式及相应的治理措施。通过对露天矿边坡稳定性综合评价与治理措施研究，可为类似大型露天矿边坡设计与治理提供参考，提高大型露天矿边坡的安全水平和生产效率。

参考文献

- [1]任赢,沈国卓,张良喜,等.基于CRITIC法-可拓云模型的露天矿高陡边坡稳定性动态评价[J].矿冶工程,2026,46(01):23-29.
- [2]陈永吉,鄢廷可,刘聪.基于三维地质建模和DFN的露天矿边坡稳定性评价[J].水文地质工程地质,2025,52(04):181-191.
- [3]王海龙.露天矿边坡安全稳定性评价研究——以昔阳县砂岩矿为例[J].华北自然资源,2025,(01):121-125.
- [4]马富国,马明康.山西某露天矿边坡稳定性分析与评价[J].露天采矿技术,2024,39(03):71-74.
- [5]杨一豪,李学锋,黄绪兴,等.某露天矿边坡稳定性及优化研究[J].价值工程,2024,43(16):97-100.
- [6]张志辉,康景宇,庞鑫,等.露天矿高陡边坡岩体参数获取与稳定性评价方法研究[J].科学技术与工程,2024,24(12):4916-4924.