

露天矿山边坡稳定性分析与加固技术优化

王军

马鞍山南方材料有限公司, 安徽 马鞍山 243000

摘要: 露天矿山边坡的稳定性是矿山安全生产的重要保障, 直接关系到矿山的开采效率和环境保护。随着矿山开采深度的增加和地质条件的复杂化, 边坡失稳的风险逐渐加大, 给矿山的安全运营带来了严峻挑战。本文首先分析了影响露天矿山边坡稳定性的主要因素, 包括地质因素和设计因素。接着, 介绍了边坡稳定性分析的两种主要方法: 传统的极限平衡法和现代的数值模拟方法, 探讨了各自的优缺点及适用范围。随后, 针对边坡加固技术进行了详细阐述, 重点介绍了锚杆(索)加固和抗滑桩与挡土墙等常用加固技术。同时, 提出了加固技术的优化方向, 包括基于数值模拟的加固参数优化和智能化监测与动态调整, 以提高加固效果和边坡的稳定性。

关键词: 露天矿山; 边坡稳定性; 加固技术

DOI: 10.63887/jad.2025.1.3.21

1 露天矿山边坡稳定性影响因素分析

1.1 地质因素

地质因素在露天矿山边坡的稳定性中起着至关重要的作用。岩土的性质、结构和分布直接影响边坡的承载能力和变形特性。不同类型的土壤和岩石具有不同的物理和力学特性, 例如, 粘土的塑性和流动性, 以及砂土的排水性和承载力, 都会影响边坡的稳定性。此外, 地层的倾斜角度和层理的存在也会影响边坡的整体稳定。当岩层存在不均匀性或断层时, 可能会导致应力集中, 从而增加滑坡发生的风险。矿山开采过程中, 地质条件的变化会引起边坡的应力重新分布, 进而影响其稳定性。尤其是在岩石风化或水位变化的情况下, 边坡的稳定性可能会受到严重威胁。水的存在不仅会降低土体的摩擦力, 还可能导致孔隙水压力的增加, 这在雨季或其他水源影响下尤为明显。地质因素的复杂性和多变性使得边坡稳定性分析面临诸多挑战, 尤其是在大规模开采和环境变

化的背景下。因此, 深入理解地质因素对于边坡稳定性的影响, 对于制定有效的加固措施和保障矿山安全具有重要意义。

1.2 设计因素

在露天矿山的设计过程中, 边坡的稳定性受到多个因素的影响, 其中设计因素尤为重要。边坡的几何形状、坡度、开采方法以及排水系统的设计都对其稳定性产生直接影响。合理的边坡角度是确保矿山安全的基础, 过陡的坡度容易导致边坡失稳, 进而引发滑坡等地质灾害。此外, 设计时对开采顺序的安排也会影响边坡的受力状态, 科学的开采顺序能够有效降低边坡的变形和破坏风险。排水设计同样不可忽视, 良好的排水系统可以减少水分对边坡土体的影响, 降低水压力, 从而提高边坡的稳定性。设计过程中对材料的选用也具有重要意义, 合适的土壤类型和岩石强度能够增强边坡的承载能力^[1]。虽然现代技术已经在边坡设计中取得了显著进展, 但仍有一些设计不足之

处。比如，在一些情况下，设计师可能未能充分考虑地质条件的复杂性，导致边坡在实际开采过程中出现意想不到的稳定性问题。此外，设计中的安全系数设置有时过于保守或过于宽松，均可能影响边坡的稳定性。因此，深入分析设计因素对于保障露天矿山的边坡安全至关重要。

2 边坡稳定性分析方法

2.1 传统极限平衡法

传统极限平衡法作为边坡稳定性分析的一种经典方法，广泛应用于露天矿山的设计与评估中。这种方法的核心在于通过分析边坡土体的极限状态，来判断其是否处于稳定状态。该方法通过建立边坡的力学模型，考虑土体的重力、摩擦力和抗剪强度等因素，计算出边坡的安全系数。安全系数是反映边坡稳定性的关键指标，通常安全系数大于1.0时认为边坡是稳定的，而小于1.0则表明边坡可能发生滑动。传统极限平衡法的优点在于其计算相对简单，易于理解和实施，使得工程师能够快速获得边坡的稳定性评估结果。此外，该方法适用于各种土壤和岩石类型，并可以结合现场条件进行调整，具有较强的适应性和灵活性。尽管传统极限平衡法在边坡稳定性分析中占据重要地位，但其也存在一定的局限性，主要体现在对复杂地质条件的适应性较差。对于多层土体或非均匀材料，传统方法往往难以准确反映实际情况，可能导致安全系数的计算不够准确。此外，该方法通常假设边坡处于静态平衡状态，忽视了动态荷载和时间效应对边坡稳定性的影响。

2.2 数值模拟方法

数值模拟方法在露天矿山边坡稳定性分析中发挥着重要作用。随着计算机技术的进步，

数值模拟成为一种有效的工具，能够帮助工程师更直观地理解边坡的力学行为。这种方法通过建立边坡的数值模型，结合实际的地质条件和边坡特征，进行多种工况下的模拟计算。有限元法和离散元法是应用较广泛的数值模拟技术，它们能够考虑材料非线性、复杂边界条件以及动态加载等因素，从而提供更为准确的稳定性评估^[2]。

在数值模拟过程中，边坡材料的本构模型选择十分关键，不同的本构模型会直接影响模拟结果的准确性。因此，研究人员通常会根据实际情况，选择合适的模型来反映土体或岩体的力学特性。同时，数值模拟还可以通过参数敏感性分析，识别出影响边坡稳定性的关键因素，为后续的设计和加固提供参考。此外，数值模拟可以实现不同设计方案的比较，帮助工程师优化边坡设计，降低潜在风险。

通过可视化的结果，数值模拟让工程师能够更清晰地识别出边坡失稳的潜在区域，进而制定相应的加固措施。这样的分析方法不仅提高了边坡稳定性评估的科学性，也提升了工程决策的效率。数值模拟的灵活性和适应性，使其在边坡稳定性分析中成为不可或缺的工具。

3 边坡加固技术与优化

3.1 常用加固技术

3.1.1 锚杆（索）加固

锚杆（索）加固是一种有效的边坡加固技术，广泛应用于露天矿山的边坡稳定性提升中。锚杆通过将钢筋或钢索植入边坡的土体或岩体中，形成一个整体的支撑系统，能够有效抵抗土体的滑动和变形。其工作原理是利用锚杆的抗拉和抗剪能力，将边坡的应力转移至更稳定的土层或岩层，从而提高边坡的稳定性。锚杆加固的实施过程相对简单，可以根据现场地质条件进行灵活调整，适应性强。此外，锚

杆的施工速度较快，常常能够在短时间内实现边坡的加固，这对于露天矿山的生产进度具有积极影响。随着技术的发展，锚杆的设计和材料也不断优化，使用高强度材料的锚杆不仅增强了支撑能力，还减少了施工过程中的材料成本。越来越多的矿山企业开始认识到锚杆加固技术的重要性，并在实际应用中取得了良好的效果。然而，锚杆加固在实施过程中也面临一些挑战。不同地质条件下，锚杆的锚固深度和角度需要精确计算，稍有偏差可能导致加固效果不佳。此外，施工质量的控制也至关重要，如果锚杆的安装不当，可能会导致其失效，从而影响边坡的稳定性。虽然锚杆加固技术在许多方面表现出色，但在实际应用中仍需关注这些潜在问题，以确保边坡的长期稳定性。

3.1.2 抗滑桩与挡土墙

抗滑桩和挡土墙是露天矿山边坡加固中常用的技术手段。抗滑桩通过在边坡内部或边缘打入钢筋混凝土桩，形成一组支撑结构，从而有效抵抗滑坡力的作用。这种方法能够大幅度提高边坡的稳定性，尤其是在地质条件复杂或降雨频繁的地区。抗滑桩的设计和施工相对灵活，可以根据现场实际情况进行调整，因此在不同矿山的应用中取得了良好的效果。挡土墙则通过构筑坚固的墙体，阻挡土体滑动，确保边坡的稳定。挡土墙的高度和厚度可以根据实际需求进行设计，其结构形式多样，包括重力式、悬臂式和锚固式等。这些结构在土壤的重力和水压力作用下，能够有效防止土体的流失和滑动，保障露天矿山的安全生产。随着技术的发展，抗滑桩和挡土墙的材料和施工工艺不断改进，施工效率和经济性也有了显著提升，许多矿山已经开始采用新型材料和智能化施工技术，以提高加固效果和延长使用寿命。尽管这些加固技术在实践中表现出色，但在实施过程中仍然面临一些挑战，例如施工质量控制、

长期耐久性和环境适应性问题，这些都需要在未来的研究和实践中进一步探讨和解决。

3.2 加固技术优化方向

3.2.1 基于数值模拟的加固参数优化

基于数值模拟的加固参数优化在露天矿山边坡的稳定性分析中具有重要意义。通过数值模拟，可以对边坡的地质条件、土体特性以及外部环境因素进行全面的分析与预测。在这一过程中，研究人员能够准确掌握不同加固方案对边坡稳定性的影响，从而实现更为合理的加固设计。现有的研究显示，数值模拟不仅能够帮助识别潜在的失稳区域，还能通过调整加固参数，如锚杆的长度、间距和材料强度，来优化加固效果^[3]。模拟结果提供了一个直观的视角，使得工程师能够对比不同加固方案的优劣，进而选择最适合特定边坡条件的加固措施。在实际应用中，数值模拟的灵活性使得多种变量的变化能够被实时跟踪，从而为制定科学合理的加固策略提供了坚实的基础。此外，随着计算技术的进步，数值模拟的精度和效率不断提升，为复杂边坡的分析提供了新的可能。这一技术的应用不仅提高了边坡加固设计的科学性，也为矿山安全管理提供了可靠的数据支持。通过对加固参数的优化，能够有效降低边坡失稳的风险，保障矿山的安全生产。

3.2.2 智能化监测与动态调整

智能化监测与动态调整在露天矿山边坡加固技术中扮演着越来越重要的角色。随着科技的进步，传感器、无人机、地质雷达等先进设备被广泛应用于边坡监测。这些技术能够实时收集边坡的位移、应力、渗透水位等数据，从而为边坡稳定性提供科学依据。通过数据分析，可以及时发现边坡的潜在风险，减少事故发生的可能性。动态调整则是指在监测过程中，根据实时数据对加固措施进行灵活调整。

例如，当监测到边坡出现异常位移时，可以迅速采取相应的加固措施，如增加锚杆的数量或调整抗滑桩的布置。这种灵活性使得边坡加固工作能够更加高效，最大限度地提高安全性。智能化监测不仅提高了边坡管理的精准度，还为矿山的可持续发展提供了技术支持。通过持续的监测与调整，矿山管理者能够更好地应对复杂的地质环境和动态变化。面对不断变化的外部条件，智能化监测与动态调整的结合显得尤为重要，它使得边坡加固工作不仅仅依赖于传统的经验和方法，而是向数据驱动的科学决策转变^[4]。这样的转变为露天矿山的安全运营提供了新的保障。

3.2.2 智能化监测与动态调整

智能化监测与动态调整在露天矿山边坡加固技术中扮演着越来越重要的角色。随着科技的进步，传感器、无人机、地质雷达等先进设备被广泛应用于边坡监测。这些技术能够实时收集边坡的位移、应力、渗透水位等数据，从而为边坡稳定性提供科学依据。通过数据分析，可以及时发现边坡的潜在风险，减少事故发生的可能性。动态调整则是指在监测过程中，根据实时数据对加固措施进行灵活调整。例如，当监测到边坡出现异常位移时，可以迅速采取相应的加固措施，如增加锚杆的数量或调整抗滑桩的布置。这种灵活性使得边坡加固工作能够更加高效，最大限度地提高安全性。智能化监测不仅提高了边坡管理的精准度，还

为矿山的可持续发展提供了技术支持。通过持续的监测与调整，矿山管理者能够更好地应对复杂的地质环境和动态变化。面对不断变化的外部条件，智能化监测与动态调整的结合显得尤为重要，它使得边坡加固工作不仅仅依赖于传统的经验和方法，而是向数据驱动的科学决策转变^[5]。

4 总结

在露天矿山的开发过程中，边坡稳定性是确保安全和经济效益的关键因素。通过对影响边坡稳定性的地质因素和设计因素的深入分析，我们可以更全面地了解边坡失稳的潜在风险。同时，传统的极限平衡法和现代的数值模拟方法为边坡稳定性分析提供了不同的视角和工具，使得工程师能够更准确地评估边坡的安全性。在边坡加固技术方面，锚杆（索）加固和抗滑桩与挡土墙等常用技术在实践中取得了良好的效果。然而，随着技术的发展，优化加固方案已成为提升边坡稳定性的重要方向。基于数值模拟的加固参数优化能够为加固设计提供科学依据，而智能化监测与动态调整则为边坡的实时安全管理提供了新的思路。露天矿山边坡的稳定性分析与加固技术的优化是一个复杂而重要的研究领域。未来的研究应更加注重多学科交叉与融合，利用先进的技术手段和数据分析方法，为边坡稳定性提供更加有效的解决方案，以保障矿山的安全与可持续发展。

参考文献

- [1] 喻曦. 某砂卡岩型矿山边坡岩体稳定性分析与加固研究[D]. 武汉工程大学, 2020.
- [2] 林威. 冶金设计院公司勘察服务质量提升研究[J]. 福建冶金, 2025, 54(02): 72-74.
- [3] 宋幸福. 乌努格吐山铜钼矿含空区边坡稳定性分析及评价[J]. 露天采矿技术, 2025, 40(01): 52-56.
- [4] 李鑫亮. 抗滑桩支护加固技术在岩土工程施工中的应用[J]. 石材, 2025, (01): 73-75+115.
- [5] 代红旭. 关于露天矿山边坡灾害及防治技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019, (15): 156+158.