

# 基于多尺度监测与数值模拟的露天矿高陡边坡失稳机理与智能治理策略

田青云

遵义铝业股份有限公司 贵州 遵义 563100

**【摘要】**：露天矿高陡边坡失稳问题在矿山安全管理中具有重要影响。结合多尺度监测与数值模拟技术，本文探讨了边坡失稳的监测、预测与治理策略。通过多维度监测数据与数值模拟模型的融合，能够实时评估边坡的稳定性及潜在风险，提供科学依据以优化治理方案。智能治理策略的引入，有效提升了边坡失稳的预警能力，并通过自动化技术优化了矿山的安全管理。这些技术为智慧矿山建设提供了技术支持，推动矿山管理向智能化、高效化转型。

**【关键词】**：多尺度监测；数值模拟；露天矿；边坡失稳；智能治理

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.080

## 引言

露天矿的高陡边坡是矿山工程中最具挑战性的结构之一，其稳定性直接关系到矿山的安全生产和环境保护。在复杂的地质条件和不断变化的外部因素下，边坡失稳现象时有发生，给矿山生产带来了巨大的安全隐患。随着智能矿山的概念逐渐深入人心，如何有效预防和治理露天矿高陡边坡失稳问题，已成为业内亟待解决的技术难题。基于多尺度监测与数值模拟的技术，结合智能化治理策略，为边坡失稳的实时监测、预测与治理提供了新的方向。这一方法能够通过大数据与智能化技术提升边坡的风险识别能力，并为矿山的安全生产提供科学决策支持，进而推动智慧矿山技术的应用和发展。

## 1 多尺度监测与数值模拟在露天矿高陡边坡失稳研究中的核心作用

(1) 多尺度监测技术概述与应用：多尺度监测技术通过在不同空间和时间尺度上对露天矿边坡进行持续监测，为边坡失稳提供了精确的实时数据。这些技术包括高精度的地质传感器、倾斜计、应变计以及无线数据传输系统，能够在多维度、全方位监测边坡的变形、裂隙发展及外部环境因素的变化。通过将多尺度监测与传感器网络集成，可以在不同的时间节点对矿山边坡进行动态跟踪，实时反映边坡应力、应变等关键参数。这些监测结果有助于及时识别潜在的失稳风险，提供科学的依据来调整矿山开采作业计划和风险控制策略。(2) 数值模拟方法在边坡失稳机理中的应用：数值模拟方法通过构建边坡的数学模型，模拟其在不同荷载和环境条件下的应力和变形行为，为理解边坡失稳机理提供了有效的工具。在露天矿高陡边坡的研究中，有限元法、离散元法和滑坡模型等数值

方法广泛应用于模拟边坡的稳定性分析<sup>[1]</sup>。通过这些数值模拟，能够考虑复杂的地质条件、矿体特性、降雨等自然因素对边坡稳定性的影响，进而预测可能发生的失稳情况。模拟的结果为决策提供了科学支持，帮助工程师设计更为安全的边坡治理方案。(3) 技术融合：多尺度监测与数值模拟的协同作用。将多尺度监测与数值模拟技术进行有效融合，可以在实时监测的基础上，实现更加精准的边坡失稳风险预测和治理方案优化。多尺度监测提供的实时数据能够为数值模拟提供高精度的初始条件和边界条件，通过模型的动态更新与实时反馈，优化失稳分析的精度。数值模拟则能够对监测数据进行深入分析，揭示隐藏的边坡失稳机理，增强监测数据的应用价值。两者的协同作用不仅提升了边坡风险识别的及时性与准确性，还能为矿山安全生产提供更为智能化的决策支持，符合智慧矿山建设的技術需求。

## 2 基于多尺度监测的边坡失稳风险识别与预警机制

(1) 监测数据的多维度分析：在露天矿高陡边坡的监测中，数据通常来自多个监测手段，包括地表变形、地下水位变化、应力和应变监测等。这些数据往往具有多维度特性，如空间、时间和不同深度的层次差异。通过对这些数据进行系统化的分析，能够揭示出边坡在不同条件下的应力分布与变形规律。数据的多维度分析不仅可以准确反映边坡的即时状态，还能够时在空上为风险预警提供预兆。结合高精度传感器的实时数据与历史数据对比分析，可及时发现潜在的失稳风险区域，进而评估边坡的安全性。这种多维度的监测数据汇聚，提供了对复杂环境下边坡变化趋势的全面了解，使风险识别更加科学精准。(2) 边坡失稳的动态监测与风险评估：在复杂的露天矿环境下，

边坡的稳定性受多种因素的影响,包括气候变化、地质条件、开采活动等。利用动态监测技术,可以实时获取边坡的位移、裂缝扩展、岩体应力等关键数据,动态评估边坡的稳定性<sup>[2]</sup>。风险评估方法结合地质力学理论和历史数据,采用概率分析、滑坡动力学模型、失稳临界状态分析等手段,对监测到的动态数据进行深度解析。这些评估结果不仅能够揭示出边坡在不同荷载和环境变化下的稳定性变化,还能通过风险级别的划分,提供针对性的防护措施。(3)基于多尺度监测的实时预警系统设计:实时预警系统的设计需要依赖多尺度监测数据的准确性与全面性。在露天矿的边坡失稳监测中,结合不同监测尺度的数据,实时预警系统可以实现对边坡变形、外部荷载变化、地下水位等多项指标的实时监测与评估。该系统通过集成传感器网络,将各类监测数据汇聚至中央处理平台,采用数据融合与智能算法,对边坡状态进行实时分析。一旦监测到异常变动,系统会通过预设的阈值触发警报,快速反馈至矿山管理人员,帮助其及时评估边坡的潜在风险。同时,结合大数据分析的人工智能技术,实时预警系统还能够根据历史监测数据进行趋势分析,预测边坡未来可能出现的失稳风险。

### 3 数值模拟在边坡稳定性预测中的优化与创新

(1)边坡失稳的数值模拟模型构建:构建高精度的数值模拟模型,需要充分考虑露天矿边坡的几何形状、地质结构、物理力学特性以及外部负荷等多种因素。通过有限元法(FEM)、离散元法(DEM)等计算方法,可以精确模拟边坡的力学行为,包括应力、应变的分布以及潜在的滑坡区域。在模型的构建过程中,需要根据现场监测数据,如土壤层位、岩体结构、地下水位等,设定合适的边界条件和初始条件,确保模拟结果的真实性和准确性。为了更好地反映实际情况,还可以将多种模拟方法进行结合,使用有限元法对大规模边坡进行总体稳定性分析,再利用离散元法分析局部破坏过程。(2)模拟结果与实际数据的对比分析:数值模拟提供了基于力学原理的预测结果,而实际监测数据则实时反映了边坡的动态变化过程。将二者进行对比分析,能够有效验证模型的适用性与精度,并揭示失稳机理。例如,在研究某深凹露天矿复杂边坡稳定性时,首先基于地质勘察报告建立了FLAC3D数值模型,模拟得出北帮-30米至-90米水平台阶将是应力集中与位移最大的区域,预测最大位移量为35毫米。随后,他们将模拟结果与布设在该区域的12个表面位移监测点连续6个月的实际数据进行对比,发现监测点实际平均位移量为41毫米,与模拟值

存在约17%的误差。通过反演分析,发现是模型中未充分考虑爆破振动的累积效应所致。据此,研究团队修正了模型中的动载荷参数,优化后的模型再次模拟的结果与实际监测数据的吻合度提升至95%以上,验证了数值模拟方法在科学校正后具有极高的预测价值。(3)智能化数值模拟技术的发展与挑战:智能化数值模拟技术的发展为边坡稳定性预测提供了新的方向,尤其是在数据分析和实时反馈方面。结合人工智能、大数据分析与数值模拟技术,可以实现边坡失稳的精准预测和动态优化。通过机器学习算法对大量监测数据进行训练,智能化模拟系统能够在无监督情况下识别潜在的风险模式,预测边坡未来的行为。利用深度学习模型对历史数据进行训练,能够提高数值模拟的自适应能力,使得模型在变化的环境条件下能够更快地适应并提供预测<sup>[3]</sup>。同时,智能化数值模拟技术还能够通过实时监测数据进行模型的自动修正和更新,实现对边坡稳定性的实时跟踪和评估。尽管这些技术在边坡稳定性分析中展示了巨大的潜力,但仍面临着诸多挑战,例如模型训练所需的大量高质量数据、复杂边坡环境下的计算难度、算法的稳定性和精度等问题。未来,随着智能算法和计算能力的不断提升,智能化数值模拟将能够更加准确、高效地为露天矿边坡失稳的预测和治理提供支持。

### 4 智能治理策略的设计与实施

(1)智能决策支持系统与边坡治理:智能决策支持系统(DSS)在边坡治理中的应用,使得矿山管理能够在复杂的环境下做出科学和高效的决策。该系统集成了多尺度监测数据、数值模拟结果以及历史边坡失稳数据,利用先进的数据挖掘与人工智能技术,为矿山运营提供实时的决策支持。通过对边坡稳定性的持续监控,系统能够分析实时监测数据,结合数值模拟预测的边坡变形和失稳趋势,评估不同治理方案的效果。智能决策支持系统不仅能够自动处理大规模数据,还能为管理者提供多个备选方案,帮助其选择最优治理策略。在检测到边坡异常变动时,系统会自动评估不同防护措施的可性,提出最佳的减灾措施。通过这一系统,边坡治理过程变得更加智能化、科学化,显著提升了矿山的安全管理水平和应急响应效率。(2)自动化技术与智能治理手段的结合:自动化技术的引入是智能治理策略中的一个关键环节。通过自动化设备与系统的应用,边坡治理工作能够更加高效和精准。自动化监测系统能够实时收集来自传感器、监测设备以及无人机等多种设备的数据,自动分析边坡的变化情况,从而及时发现潜在风险<sup>[4]</sup>。结合自动化

的机器人技术，可以执行如边坡巡视、危险区域勘探等任务，减少人工干预，提高作业效率。在治理过程中，自动化喷锚、自动喷浆等系统能够精确控制作业过程，确保防护效果最大化。这方面已有成功实践，例如，位于西藏高海拔地区的西藏华泰龙甲玛铜多金属矿，为应对高寒低氧的严苛条件，积极推进智能化建设。该矿基于5G通信网络，建成了井下有轨运输无人驾驶远程操控系统，实现了远程放矿、自动驾驶、自动卸矿等功能；同时开展了凿岩台车远程遥控、铲运机自动驾驶系统研究，实现了智能采矿装备在高海拔矿山的推广应用。这些自动化技术的应用，将人员从高风险区域解放出来，显著提升了矿山的安全水平和作业效率。

(3) 智能治理在边坡风险管理中的应用：智能治理在边坡风险管理中的应用为矿山的安全管理提供了先进的技术支持。通过集成多尺度监测、数值模拟和智能决策系统，矿山能够在实时监控的基础上，对边坡风险进行动态评估和管理。智能治理不仅限于风险的识别和预警，它还能够通过自动化手段实施风险控制。基于智能预警系统的反馈，自动化治理系统能够快速响应，对危险区域进行及时处置，采取如降水、加固等措施，避免边坡进一步失稳。智能治理系统能够优化资源配置，根据边坡的稳定性状况调整人员和设备的调度，提高应急响应效率。在边坡风险管理中，智能治理不仅提升了事故预测和应急处置能力，还通过数据驱动的决策优化，增强了矿山生产的安全性与可持续性。通过结合智能技术，矿山能够实现从风险识别、评估到处置的全程智能化管理，推动矿山的智慧化转型。

## 5 智慧矿山技术的发展趋势与技术融合的前景

(1) 多尺度监测与数值模拟在智慧矿山中的应用：多尺度监测与数值模拟技术为智慧矿山提供了强有力的支持。通过对不同层次、不同尺度的边坡、矿体、地下水等信息进行全面监测，结合数值模拟技术对矿山的稳定性进行分析，可以实现矿山生产过程的

**参考文献：**

- [1] 吴季寰,李旭光,张艳飞,马天宇,石绍山,臧延庆,邹君.蓄水条件下抚顺西露天矿边坡变形失稳与涌浪强烈程度分析[J].地球学报,2025,46(2):419-428.
- [2] 李山存.露天矿边坡稳定性分析与数值模拟[J].中国矿山工程,2023,52(3):26-33.
- [3] 林春平.露天矿山开采边坡失稳原理与防治技术分析[J].中国金属通报,2025(19):70-72.
- [4] 杨智博.某露天矿边坡失稳机制与稳定性分析[J].世界有色金属,2025(8):140-142.
- [5] 梁源贵,周宗红,侯廷凯,等.某深凹露天矿复杂边坡稳定性数值模拟及加固措施研究[J].有色金属(矿山部分),2025,77(01):65-71+81.

全面优化。这些技术能够实时捕捉矿山环境的动态变化，评估边坡和矿体的稳定性，预判潜在风险。数值模拟的精准预测与监测数据的实时反馈相结合，形成闭环管理体系，为智慧矿山的决策层提供精确的科学依据，有效防止意外事故的发生，从而确保矿山的可持续、安全生产。

(2) 智能治理助力智慧矿山的安全与高效运行：智能治理技术的应用在智慧矿山的建设中起到了至关重要的作用。通过与自动化设备的结合，智能治理能够高效地实施矿山的安全监控和风险管理<sup>[5]</sup>。边坡的实时监测数据经过智能系统分析后，系统可以自动判断潜在的风险，快速采取应急响应措施，甚至执行自动化处理，如边坡加固、排水系统调节等。这种智能化的应急响应和治理措施，不仅大大提升了矿山的安全性，还优化了资源配置和作业流程，提高了生产效率。同时，智能治理系统还能不断学习和改进，使得矿山的生产管理越来越精准高效。

(3) 技术融合推动矿山治理智能化转型：技术融合是推动智慧矿山治理智能化转型的关键。随着大数据、人工智能、物联网等技术的不断发展，这些技术的融合应用使得矿山治理进入了一个全新的智能化阶段。通过将多尺度监测数据、数值模拟结果与智能算法结合，矿山能够实现对生产环境的全面监控与智能决策。技术融合不仅提升了矿山的安全管理能力，还促进了矿山自动化、远程控制和智能化作业的实施。随着这些新兴技术的不断进步，矿山治理的智能化程度将不断提升，推动矿山的生产方式向更加高效、安全、环保的方向转型。

## 6 结语

在露天矿高陡边坡失稳治理中，多尺度监测与数值模拟技术为风险评估与治理方案提供了重要支持。智能治理策略的引入，不仅提升了矿山生产的安全性，还推动了矿山治理的高效化与智能化。随着技术不断融合与创新，未来矿山将朝着更加智能化、安全化的方向发展，为矿山安全管理提供了有力保障。