

# 露天矿高陡边坡稳定性分析及加固措施

薛宾宾

栾川龙宇铝业股份有限公司

**摘要：**露天矿高陡边坡是采矿作业中的核心构筑物，其稳定性直接决定矿山生产安全、开采效率及周边环境安全。随着露天矿开采深度不断增加，高陡边坡失稳引发的滑坡、坍塌等地质灾害频发，严重威胁作业人员及设备安全，制约矿山可持续发展。本文结合露天矿高陡边坡工程实际，系统分析影响边坡稳定性的主要因素，总结常用稳定性分析方法，提出针对性的加固措施，为露天矿高陡边坡的安全管控、设计优化及灾害防治提供理论支撑和工程参考。

**关键词：**露天矿；高陡边坡；稳定性分析；加固措施；边坡治理

## 1 引言

露天开采因效率高、资源回收率高、成本低，成为矿产资源开采的主要方式。随着矿产需求增加，露天矿开采向深部延伸，高陡边坡数量、高度上升且角度变陡，稳定性问题日益突出。高陡边坡失稳会造成设备损毁、人员伤亡、作业中断，增加治理成本并破坏周边环境。因此，开展边坡稳定性分析及加固措施研究，对保障矿山安全生产、降低灾害风险、提高经济效益具有重要意义。目前相关技术不断完善，但因矿山地质条件、开采工艺差异，仍需结合实际开展针对性研究。

## 2 露天矿高陡边坡稳定性影响因素

边坡稳定性分析是治理前提，核心是判断稳定状态、识别失稳风险，为加固措施提供依据，主要分为定性与定量两类分析方法，结合使用可提高结果准确性。

定性分析方法无需复杂计算，操作简便、成本低，适用于初步分析和筛查，常用方法有工程地质类比法、历史分析法和边坡稳定性图解法。工程地质类比法通过对比相似边坡及工程经验判断稳定性；历史分析法通过分析历史失稳数据预测边坡状态；图解法通过绘制地质图表，判断失稳模式和滑动面。

定量分析方法通过建立数学模型、结合岩土体参数计算稳定系数，分析结果更科学准确，适用于深入分析和精准评价，常用方法有刚性块体极限平衡分析法、应力应变分析法和概率分析法。极限平衡分析法计算简便、适用性强，是应用最广泛的方法；应力应变分析法通过数值模拟反映边坡应力和变形规律，适用于复杂地质边坡；概率分析法考虑因素随机性，计算失稳概率，适用于高要求边坡工程。

实际应用中，需结合矿山地质条件、开采工艺和边坡特征选择合适方法，必要时结合定性分析与定量分析，提高结果可靠性。

### 3 露天矿高陡边坡稳定性分析方法

露天矿高陡边坡稳定性分析是边坡治理的前提，其核心是通过科学的分析方法，判断边坡的稳定状态，识别失稳风险，为加固措施的制定提供依据。目前，露天矿高陡边坡稳定性分析方法主要分为定性分析方法和定量分析方法两大类，两类方法相互补充，结合使用可提高分析结果的准确性。

定性分析方法主要通过对边坡的岩土体性质、地质构造、水文条件、采矿扰动等影响因素进行综合分析，判断边坡的稳定状态，无需复杂的计算，操作简便、成本较低，适用于边坡稳定性的初步分析和筛查。常用的定性分析方法包括工程地质类比法、历史分析法和边坡稳定性图解法。工程地质类比法是将研究边坡与已有的、地质条件相似的稳定边坡或失稳边坡进行对比，结合已有工程经验，判断研究边坡的稳定性，该方法适用于地质条件简单、资料齐全的露天矿边坡分析。历史分析法通过收集研究区域内边坡的历史失稳数据、地质灾害记录，分析边坡失稳的规律和诱发因素，预测边坡未来的稳定状态，为边坡稳定性评价提供参考。边坡稳定性图解法通过绘制边坡地质剖面图、结构面投影图等，分析岩土体结构和结构面的分布特征，判断边坡可能的失稳模式和滑动面，直观反映边坡的稳定状态。

定量分析方法通过建立数学模型，结合岩土体物理力学参数，计算边坡的稳定系数，量化判断边坡的稳定状态，分析结果更具科学性和准确性，适用于边坡稳定性的深入分析和精准评价。常用的定量分析方法包括刚性块体极限平衡分析法、应力应变分析法和概率分析法。刚性块体极限平衡分析法假设边坡岩土体为刚性块体，通过分析块体的受力平衡，计算边坡的稳定系数，该方法计算简便、适用性强，是目前露天矿边坡稳定性分析中应用最广泛的方法，能够有效分析边坡沿软弱结构面的滑动失稳问题。应力应变分析法通过数值模拟技术，模拟边坡岩土体的应力分布和变形特征，分析边坡在不同荷载和工况下的稳定性，能够直观反映边坡内部的应力状态和变形规律，适用于复杂地质条件下的高陡边坡分析。概率分析法考虑影响边坡稳定性因素的随机性和不确定性，通过统计分析各影响因素的概率分布，计算边坡失稳的概率，为边坡风险评估提供依据，适用于对边坡稳定性要求较高的露天矿工程。

#### **4 露天矿高陡边坡加固措施**

坡面防护措施主要用于防止坡面岩土体风化、冲刷，保护边坡坡面完整性，减少坡面侵蚀，适用于边坡坡面较完整、无明显滑动面的高陡边坡。常用的坡面防护措施包括喷锚网支护、格构防护和植被防护。喷锚网支护通过向边坡坡面喷射混凝土，结合锚杆固定，形成防护层，提高坡面岩土体的整体性和抗风化能力，防止坡面坍塌，适用于岩石边坡和破碎岩土体边坡。格构防护通过在边坡坡面设置混凝土格构，将坡面岩土体分割成小块，限制岩土体的变形，同时可在格构内种植植被，实现工程防护与生态防护结合，适用于土质边坡和风化岩石边坡。植被防护通过在边坡坡面种植耐旱、耐贫瘠的植被，利用植被的根系固定坡面岩土体，减少水土流失，改善边坡生态环境，适用于坡度较缓、稳定性较好的高陡边坡，也可作为辅助防护措施配合其他加固措施使用。

支挡加固措施是通过设置支挡结构，承受边坡下滑力，阻止边坡岩土体滑动，提高边坡稳定性，适用于存在明显滑动面、下滑力较大的高陡边坡。常用的支挡加固措施包括抗滑桩、挡土墙和预应力锚索。抗滑桩是通过在边坡滑动面下方施工钢筋混凝土桩，深入稳定岩土体，利用桩体的抗剪能力和抗弯能

力，阻挡边坡滑动，适用于滑动面较深、下滑力较大的边坡，加固效果显著。挡土墙通过在边坡坡脚设置混凝土挡土墙，承受边坡下滑力，限制边坡岩土体变形，适用于坡脚软弱、易发生坍塌的边坡，能够有效增强坡脚的支撑能力。预应力锚索通过将锚索一端固定在稳定岩土体中，另一端施加预应力，拉紧锚索，对边坡岩土体产生预压应力，提高岩土体的抗剪强度，限制边坡变形，适用于高陡岩石边坡和破碎岩土体边坡，能够有效控制边坡的位移和变形。

## 5 结论与展望

露天矿高陡边坡稳定性是矿山安全生产的核心问题，受岩土体性质、地质构造、水文条件、采矿扰动等多种因素共同影响，失稳风险较高。通过定性分析与定量分析相结合的方法，能够准确判断边坡的稳定状态，识别失稳诱发因素，为加固措施的制定提供科学依据。坡面防护、支挡加固、排水治理和岩体改良等加固措施，能够有效提高边坡的稳定性，预防和控制边坡失稳灾害，不同加固措施的适用场景不同，实际工程中应结合边坡特征和地质条件，选择合适的加固方案，形成综合加固体系，提高加固效果。

## 参考文献

[1]高大伟.露天矿山高陡边坡爆破开挖影响运输道路稳定性分析及其防控措施[J].资源信息与工程,2025,40(6):62-6571