

# 露天矿山地质灾害（滑坡、塌陷）成因与防治

邓留心

云南华联锌铟股份有限公司 云南 文山 663701

**【摘要】**：露天金属矿山开采过程中滑坡与塌陷灾害频发，直接影响生产安全与边坡稳定。灾害形成受地质结构条件、岩体力学性质、开采方式及降水渗流等多因素共同作用控制，呈现明显的阶段性与突发性特征。基于典型矿山工程实践，对滑坡与塌陷的形成机制进行系统分析，揭示结构面控制、应力重分布及地下水软化作用对失稳的主导影响。在此基础上提出分区稳定性评价、边坡加固优化、排水减压及动态监测预警等综合防治措施。结果表明，构建成因分析与工程治理协同体系，可显著降低灾害发生概率，提高露天矿山安全生产水平。

**【关键词】**：露天金属矿山；滑坡；塌陷；成因分析；防治措施

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.076

## 引言

露天金属矿山规模不断扩大，开采深度持续增加，边坡结构日趋复杂，地质灾害风险逐步加剧。滑坡与塌陷作为最常见的不稳定现象，不仅威胁作业人员安全，还对采场结构及运输系统造成持续影响。矿区岩体在长期开采扰动下产生应力重分布，叠加降水入渗及结构面发育，极易诱发局部失稳甚至整体破坏。不同矿区地质条件差异显著，灾害表现形式具有明显的区域性特征，传统单一治理方式难以满足实际需求。深入分析灾害形成机理，建立针对性防控体系，成为保障露天矿山安全运行的关键环节。

## 1 露天金属矿山灾害表现特征

### 1.1 滑坡形态及分布特征

露天金属矿山边坡在长期剥离与爆破扰动作用下，滑坡形态呈现多样化特征，主要包括顺层滑移、切层滑动及复合型滑坡。顺层滑坡多沿软弱结构面发育，滑体规模较大且具有整体性；切层滑坡则受节理裂隙控制，表现为块体滑移与局部失稳并存。采场台阶结构对滑坡分布具有明显控制作用，高陡边坡区域滑坡发生频率较高，尤其在断裂带及岩性变化带附近更为集中。边坡坡角、台阶高度及坡面卸荷裂隙发育程度直接影响滑坡空间分布特征，局部区域还会形成多级滑动面叠加的复杂失稳结构，导致滑坡具有突发性与扩展性。

### 1.2 塌陷类型及发生规律

露天金属矿山塌陷主要表现为局部塌落、浅层塌陷及深部结构性塌陷等类型，形成机制与岩体完整性及地下结构条件密切相关。局部塌落多发生于松散堆积体或风化强烈区域，表现为块体剥落与表层坍塌；浅层塌陷通常受爆破震动及卸荷裂隙扩展影响，在台阶边缘及运输道路附近较为常见；深部塌陷则与隐伏破碎带及地下空区有关，具有隐蔽性强、破坏范围大的特点<sup>[1]</sup>。塌陷发展过程常呈现由微裂隙扩展到宏观破坏的渐进特征，在降雨入渗或地下水位变化条件下，岩体强度降低，塌陷发生概率明显增加，且具有一定的周期性与区域集中性。

## 1.3 灾害演化过程特征

露天金属矿山地质灾害演化通常经历初始扰动、变形积累及失稳破坏等阶段，过程具有明显的阶段性与非线性特征。开采过程中边坡应力场不断调整，局部区域形成应力集中区，诱发微裂隙萌生与扩展。裂隙在反复爆破振动及水力作用下逐渐贯通，导致岩体结构完整性下降，进入加速变形阶段。位移监测数据往往呈现缓慢增长向快速突变转化的趋势，反映出灾害由稳定向失稳的演化路径。在复杂地质条件下，多种因素叠加作用使演化过程呈现突发性增强特征，局部失稳可能进一步引发连锁反应，形成区域性边坡破坏。

## 2 滑坡塌陷形成机理分析

### 2.1 地质结构控制因素

露天金属矿山边坡稳定性受地质结构条件的主导控制，岩体内部节理、层理及断裂构造的空间展布直接决定潜在滑动面的形成方式。软弱夹层及破碎带区域抗剪强度较低，在重力及外界扰动作用下易形成连续滑移界面。结构面倾角与边坡坡向之间的组合关系对滑动模式具有决定性影响，当结构面倾向与坡面一致且倾角接近坡角时，极易形成顺层滑移条件。岩性差异导致不同岩层之间变形协调性降低，界面处易产生应力集中现象，促使裂隙扩展并贯通。构造活动遗留的断裂带通常充填松散物质，力学性能弱化，成为塌陷及滑坡的优先发育区，控制灾害发生的空间位置与规模等级。

### 2.2 开采扰动影响机制

露天金属矿山开采过程中持续的爆破作业与剥离活动改变原有应力平衡状态，导致边坡内部应力场重新分布。爆破震动使岩体产生累积损伤，微裂隙逐步扩展并相互连接，降低整体结构强度。台阶开挖引起的卸荷效应使浅部岩体处于拉应力状态，诱发张裂缝发育并向深部延伸<sup>[2]</sup>。运输荷载及机械振动进一步加剧岩体疲劳破坏，使边坡局部区域进入临界失稳状态。开采参数不合理时，坡角过陡或台阶高度过大，将显著提升剪应力水平，削弱安全储备系数。多阶段开采叠加效应使扰

动影响具有持续性和累积性,促使滑坡及塌陷在特定区域集中发生。

### 2.3 水文条件作用路径

露天金属矿山水文条件对边坡稳定性具有显著影响,降雨入渗及地下水活动通过改变岩体物理力学性质参与灾害形成过程。降水沿裂隙与结构面渗入岩体内部,增加孔隙水压力,削弱有效应力,降低抗剪强度。含水软弱层在饱和状态下易发生强度衰减,形成潜在滑动带。地下水位波动引起渗流场变化,促使细粒物质迁移,导致结构松散化及局部空隙形成。排水条件不良时,坡体内部水压持续累积,诱发剪切破坏或塌陷失稳。水力作用与开采扰动叠加,使裂隙扩展速率加快,形成贯通性破坏通道,显著增强灾害发生的敏感性与复杂性。

## 3 边坡稳定性影响关键因素

### 3.1 岩体力学性质变化

露天金属矿山边坡岩体在长期开采环境下,其力学性质呈现出明显的时空演化特征。原生岩体在爆破振动与机械扰动反复作用下产生损伤累积,弹性模量逐渐降低,抗压强度与抗剪强度同步衰减,导致整体承载能力减弱。风化作用对浅表岩体影响显著,矿区常见的氧化带及强风化带中,矿物成分发生改变,结构疏松化程度加剧,使岩体由完整状态向破碎状态转变。岩体各向异性特征在开采过程中进一步增强,不同方向上的力学响应差异明显,易在应力集中区域形成局部破坏带。应力释放引起的卸荷裂隙扩展,使原本致密的岩体产生张拉破坏,降低整体稳定性。时间效应同样不可忽视,岩体在长期荷载作用下出现蠕变变形,位移逐渐累积并向深部传递,最终导致潜在滑动面贯通。不同岩性组合条件下,软硬互层结构容易产生界面错动,进一步削弱边坡整体稳定性。

### 3.2 结构面发育程度

露天金属矿山岩体内部广泛发育的结构面体系对边坡稳定性具有决定性影响。节理、裂隙及断层等结构面的密度、延伸性及连通性直接控制潜在破坏模式。结构面发育密集区域,岩体完整性指数明显降低,形成块体化特征,使边坡更易发生块体滑移或崩塌。结构面倾向与坡面组合关系复杂时,可能形成楔形体或多面体失稳结构,增加破坏形式的不确定性。结构面粗糙度及充填物性质对抗剪强度具有重要影响,光滑面及泥质充填物界面摩擦系数较低,在外力作用下易发生滑动<sup>[1]</sup>。构造应力历史对结构面发育具有长期影响,断裂带附近结构面呈现集中分布,且延伸范围大,成为边坡失稳的关键控制区域。结构面之间的交切关系形成复杂网络,在开采扰动作用下,这些结构面逐渐贯通,形成连续滑移路径,使局部不稳定向整体失稳转化。

### 3.3 降水及地下水作用

露天金属矿山边坡在降水及地下水共同作用下,其稳定性

表现出明显的动态变化特征。降雨过程使地表水通过裂隙系统迅速入渗,导致坡体内部孔隙水压力上升,有效应力降低,从而削弱岩体抗剪能力。降水持续时间与强度直接影响渗流场分布,短时强降雨可引起浅层失稳,而长时间降水则促使深部水位抬升,诱发深层滑动。地下水在坡体内部沿结构面及裂隙流动,产生渗透力,对岩体产生附加剪切作用,改变原有受力状态。水的软化效应使含水岩层强度降低,尤其在黏土矿物含量较高区域,吸水膨胀现象明显,进一步削弱结构稳定性。排水条件不畅时,地下水滞留于坡体内部,形成局部高压区,易诱发塌陷及滑坡。季节性水位波动使边坡处于反复加载与卸载状态,加剧裂隙扩展与结构劣化,增强边坡失稳的敏感性。

## 4 工程防治技术体系构建

### 4.1 边坡加固与支护措施

露天金属矿山边坡加固需依据岩体结构特征与失稳模式进行针对性设计,形成以“主动加固+被动防护”为核心的综合支护体系。针对结构面控制明显的边坡,可采用预应力锚索与系统锚杆联合支护方式,通过施加主动应力提高潜在滑动面的抗剪强度,增强岩体整体性。锚固参数需结合岩体分级结果确定,确保锚固段有效进入稳定岩层,形成可靠受力体系。对于破碎岩体区域,喷射混凝土与钢筋网构成的表层封闭体系能够有效抑制风化剥落与裂隙扩展,降低表层失稳风险。高陡边坡部位可布设抗滑桩或重力式挡墙,通过提供附加抗滑力抵抗滑移趋势。局部块体不稳定区可采用挂网防护及柔性防护系统控制落石运动路径。加固措施实施过程中需结合监测数据动态调整支护参数,实现支护结构与边坡变形协调发展,避免刚性约束引发新的应力集中问题。

### 4.2 排水与减压技术应用

露天金属矿山边坡稳定性与水文条件密切相关,排水与减压技术在防治体系中占据重要地位。坡面排水系统通过设置截水沟、平台排水沟及坡面导流设施,有效控制地表径流入渗路径,减少降水对坡体内部的影响。针对地下水发育区域,可采用水平排水孔、斜向排水孔等方式降低孔隙水压力,改善岩体有效应力状态。排水孔布置需结合渗流场分布及含水层位置,形成连续的排水网络,提高排水效率。对于深部高压区,可布设减压井或疏干井,通过抽排地下水降低水位,从源头削弱渗流作用<sup>[4]</sup>。防渗措施同样关键,在裂隙发育区采用注浆加固技术封堵渗流通道,减少水体进入坡体内部。排水系统运行过程中需定期清理与维护,防止淤堵影响排水能力,同时结合实时水位监测数据调整排水策略,确保边坡长期处于低水压稳定状态。

### 4.3 开采参数优化控制

露天金属矿山开采过程中,合理控制开采参数对边坡稳定性具有直接影响。台阶高度与宽度需依据岩体稳定性条件进行分

级设计,控制单级坡高在安全范围内,避免形成高陡不稳定结构。边坡角度应结合岩体力学参数与结构面倾向进行优化,降低潜在滑动面剪应力水平。爆破参数设计需重点控制单孔装药量及起爆方式,通过采用微差爆破技术降低振动效应,减少对边坡岩体的扰动损伤。开采顺序安排应遵循由上至下、分区推进的原则,避免局部超前开挖引起应力集中。采场内运输道路及堆载位置需合理布置,防止附加荷载叠加在不稳定区域。对于存在潜在失稳风险的区域,可实施减缓开采节奏或局部留矿措施,以维持边坡稳定状态。开采过程中应结合数值模拟与现场监测结果,对参数进行动态调整,实现开采活动与边坡稳定之间的协调控制。

## 5 监测预警与综合治理策略

### 5.1 变形监测方法布设

露天金属矿山边坡变形监测需构建多手段协同的监测体系,以获取不同尺度下的位移与形变信息。表层位移监测可采用GNSS测量与全站仪监测相结合的方式,实现对关键控制点的高精度位移跟踪,掌握边坡整体变形趋势。针对局部变形敏感区域,可布设测斜仪与裂缝计,对深部位移与裂隙扩展进行连续观测,识别潜在滑动面活动特征。地表雷达干涉技术在大范围边坡监测中具有优势,能够实现毫米级精度的面状变形监测,适用于高陡边坡的动态监控。微震监测系统通过捕捉岩体内部破裂信号,可反映应力释放过程及裂隙扩展状态,为失稳判别提供重要依据。监测点位布设需结合地质结构分区与历史变形数据,形成重点区域密集布设与一般区域控制布设相结合的空间格局,确保监测数据具有代表性与连续性。

### 5.2 风险分级与预警机制

露天金属矿山地质灾害风险分级需基于监测数据、地质条件及开采活动综合评定,通过建立多指标评价体系对边坡稳定状态进行量化分析。位移速率、加速度变化及裂隙扩展速率等参数作为核心判据,用于划分不同风险等级区间。结合历史数

据建立阈值模型,当监测指标接近或超过临界值时,触发相应等级的预警响应。预警机制需实现自动化与信息化,通过数据采集系统与分析平台联动,实现实时数据处理与异常识别<sup>[5]</sup>。不同风险等级对应差异化管控措施,高风险区域需实施作业限制与人员撤离,中低风险区域加强巡查与监测频率。信息发布流程需规范化,确保预警信息能够快速传递至生产管理与现场作业环节。预警系统还须具备自适应调整能力,依据监测数据变化对阈值进行动态修正,提高预警准确性与可靠性。

### 5.3 综合治理效果评估

露天金属矿山边坡治理效果评估需建立以监测数据为核心的多维度评价体系,对工程措施实施后的稳定性变化进行定量分析。位移变化趋势作为主要评价指标,通过对比治理前后的变形速率及累计位移量,判断加固措施的有效性。应力监测与微震活动水平可反映岩体内部结构调整情况,评估潜在破坏风险的变化程度。水文监测数据用于分析排水措施实施后的孔隙水压力变化,验证减压效果。数值模拟结果与现场实测数据的对比,可进一步检验设计参数的合理性。评价过程需结合不同时间尺度进行分析,短期关注变形控制效果,长期侧重稳定性维持能力。对评估结果进行分区分析,识别治理薄弱环节,为后续优化措施提供依据。通过持续数据积累与反馈机制,不断完善治理方案,提高边坡稳定控制的精细化水平。

## 6 结语

露天金属矿山滑坡与塌陷灾害受多因素耦合作用控制,表现出明显的复杂性与阶段性特征。地质结构、开采扰动及水文条件相互影响,决定边坡稳定状态的动态演变。结合工程实践构建加固支护、排水减压及参数优化等技术体系,可有效改善边坡受力环境。依托多源监测手段与风险分级机制,实现对变形过程的动态识别与预警响应,有助于降低灾害发生概率。治理措施与监测评估协同推进,可持续提升露天金属矿山安全控制水平。

## 参考文献:

- [1] 罗光治.露天矿山开采及地质灾害防治技术分析[J].中国资源综合利用,2025,43(2):67-69.
- [2] 白晓军.露天矿山地质灾害成因及主要治理措施探讨[J].绿色中国,2025(9):88-90.
- [3] 杨再慧.探讨深凹露天矿山边坡中地质灾害的监测及防治[J].石油石化物资采购,2025(7):169-171.
- [4] 刘光伟,涂俊雄,马显帅,姚勇,王亮,赵美玲.相邻露天矿端帮断层带地质灾害隐患体治理方案[J].煤炭科学技术,2025,53(2):314-328.
- [5] 周亦,高树志,张守林,孙紫坚,陈自然,戚麒.InSAR技术在辽宁某露天矿山地质灾害监测中应用研究[J].矿产勘查,2025,16(5):1155-1161.