

露天矿山边坡稳定管控与开挖施工工艺探讨

肖 垚

陕西西北有色地质勘查院有限公司 陕西 汉中 723000

摘 要：露天矿山边坡稳定性直接关系到矿山安全生产与开采效率，是贯穿矿山全生命周期的核心工程问题。本文从边坡失稳的力学机制出发，系统分析了地质构造、水理作用、爆破振动及开挖卸荷对边坡稳定的影响规律，进而探讨了边坡稳定管控的技术体系，涵盖动态勘察与监测预警、防排水综合治理、锚固与支挡结构优化等关键环节。在此基础上，重点剖析了露天矿山开挖施工工艺中台阶划分、穿孔爆破、采掘作业及边坡成型等工序与稳定性的耦合关系，提出了“以控稳导挖、以挖验稳”的工艺协同理念。研究认为，将稳定管控前置并嵌入开挖工艺全流程，构建动态反馈调控机制，是实现边坡长效稳定的有效路径。

关键词：露天矿山；边坡稳定；开挖工艺；动态监测；锚固支护；防排水

引言

露天开采是我国矿产资源开发的主要方式之一，随着开采深度逐年增加，边坡高度与坡度不断增大，边坡稳定性问题日益凸显。据统计，我国大型露天矿山边坡高度已普遍超过 300m，部分深凹露天矿甚至达到 600m 以上，边坡失稳所引发的滑坡、崩塌等灾害不仅造成设备损毁与人员伤亡，更可能导致矿山停产数月，经济损失巨大。与此同时，国家对绿色矿山与安全生产的要求持续提升，边坡稳定管控已从过去的“事后治理”逐步转向“事前预防”和“过程控制”。然而，当前许多露天矿山在施工实践中仍将边坡稳定视为独立的安全问题，与开挖施工工艺之间缺乏系统性衔接，导致稳定措施滞后、工艺参数调整盲目，难以适应复杂地质条件下的动态变化。因此，有必要从工艺源头出发，重新审视边坡稳定与开挖施工的内在联系，构建一体化管控思路。本文拟在分析边坡失稳机理的基础上，梳理稳定管控的主要技术手段，并深入探讨开挖施工各环节对边坡的影响及优化策略，以期为露天矿山安全生产提供理论参考。

1 露天矿山边坡失稳机理与主控因素

1.1 边坡失稳的力学本质

从力学角度看，露天矿山边坡失稳本质上是坡体内应力状态发生变化，当某一潜在滑动面上的剪应力超过岩体抗剪强度时，即产生剪切破坏。这一过程受控于坡体重力引起的下滑力矩与岩体结构面提供的抗滑力矩之间的平衡关系。在开挖过程中，坡脚应力集中区率先发生塑性变形，若未能及时支护，变形将向上

扩展，最终形成贯通性滑面。值得强调的是，露天边坡并非均质体，其内部发育的层理、节理、断层等不连续面往往构成优势滑动通道，使得失稳模式具有明显的结构控制特征。

1.2 地质构造与岩体结构的影响

地质构造是决定边坡稳定性的先天条件。岩层产状与坡面的组合关系至关重要——顺层边坡中，若层理面倾角小于坡角且出露于坡面，则极易发生顺层滑坡；而逆向坡相对稳定，但局部陡倾结构面仍可引发楔形体破坏。此外，断层破碎带、软弱夹层的存在显著降低了局部岩体强度，成为边坡变形的启动点^[1]。因此，开挖施工前必须进行精细的地质编录与结构面统计分析，识别潜在的不利组合，这是制定合理工艺方案的根本依据。

1.3 水对边坡稳定的劣化效应

水是诱发边坡失稳最活跃的外因之一。其作用机理包括：一是软化作用，水渗入岩体结构面后降低充填物黏聚力与摩擦角；二是静水压力，裂隙水压力作用于结构面两侧，有效应力减小，抗滑力降低；三是动水压力，地下水渗流产生拖曳力，增加下滑分量；四是冲刷与侵蚀，地表径流对坡面松散物质进行搬运，改变坡面形态。尤其对于节理发育的岩质边坡，暴雨期间孔隙水压力骤增往往是滑坡的直接触发因素。

1.4 爆破振动与开挖卸荷的动力扰动

爆破作业是露天矿山开挖的核心工序，但其产生的振动波会对边坡岩体造成累积损伤。振动波在岩体中传播时引起拉压和剪切应力交替作用，导致微裂纹萌生、扩展，长期而言劣化岩体完整性。同时，大规模开挖使

坡体侧向约束被快速解除,产生卸荷回弹变形,若卸荷速率过快,坡体内部应力重分布不均,便引发张裂或松弛。这两种动力扰动相互叠加,大幅降低了边坡的安全储备。

2 边坡稳定管控技术体系

2.1 精细化地质勘察与数字建模

鉴于地质条件的隐蔽性和变异性,勘察工作必须从“一次性任务”转变为“伴随式服务”。在前期详勘基础上,随开挖揭露逐台阶进行结构面编录,采用三维激光扫描或近景摄影测量技术获取高精度岩体结构面数字影像,通过专业软件解析产状、迹长及间距。结合随钻参数(钻压、扭矩、进尺速率)实时反演岩体质量分级(RMR或Q系统),动态修正三维地质块体模型。该数字模型不仅服务于当前稳定性验算,更可作为后续采掘计划编制的空间约束底图,有效规避不利结构面组合区域。

2.2 空-天-地一体化监测预警

现代监测体系已突破单点位移测量的局限,构建了多维度、多频次的信息获取网络。空间层面,合成孔径雷达干涉测量(InSAR)及高分光学遥感可实现矿山全域地表沉降与形变场的周期性普查,识别异常变形区。地面层面,边坡雷达(地基干涉雷达)能够对指定坡面进行每分钟一次的亚毫米级位移扫描,实时捕捉临滑前的加速蠕变特征^[2]。点位层面,深部钻孔测斜仪与多点位移计感知滑面位置及变形速率,锚索测力计监测锚固荷载损失情况,渗压计及雨量站同步记录水文气象数据。预警机制需采用“速率-加速度-累积位移”三级综合判据,并配套红橙黄三色预警响应程序,确保现场在临界失稳前有充足的处置窗口期。

2.3 立体防排水系统优化设计

防排水应遵循“截、排、堵、护”相结合的原则。地表截水系统包括最终境界外的环形截洪沟及各台阶平台的横向排水沟,断面尺寸需按当地暴雨强度公式计算汇水流量确定,确保50年一遇洪水不漫溢。地下排水系统以仰斜排水孔为核心手段,钻孔仰角一般设为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,孔深需穿过潜在滑面进入稳定岩层,孔径约90~110mm,内设PVC花管及土工滤布防止细颗粒流失。对于极破碎含水层,可布置垂直排水天井或水平集水巷道进行重力疏干。在坡面防护方面,喷射混凝土或挂网锚喷可有效封闭浅层裂隙,减少大气降水入渗,同时兼顾坡面抗风化能力。

2.4 主动锚固与柔性支挡参数优化

锚固工程的核心在于预应力传递机制与群锚效应。预应力锚索通常采用高强度低松弛钢绞线,设计锚固力根据极限平衡反算所需增加的下滑力确定,一般取800~3000kN。锚固段应设置于滑面以深5~8m的稳定岩层中,自由段须采用波纹管进行双重防腐。锚索间排距的确定需考虑岩体承压能力,避免相邻锚索挤压锥体重叠导致锚固效率下降,常见间距为3~5m。对于局部不稳定块体,可采用全长黏结型锚杆进行随机支护,其黏结长度需根据锚杆体与砂浆、砂浆与孔壁之间的界面剪应力验算。近年来推广的压力分散型锚索,通过将总荷载分散至多个承压单元,有效解决了岩体蠕变引起的预应力损失问题,特别适用于软硬互层边坡。

3 开挖施工工艺对边坡稳定的影响机理与调控

3.1 台阶几何参数的合理匹配

台阶高度与坡面角的选取绝非孤立的地质决定,而是设备能力、爆破效果与稳定要求博弈的结果。大型电铲或液压挖掘机经济采掘高度一般为10~15m,但高边坡条件下宜适当降低单级台阶高度(如12m以内),以减小单级坡体的重力荷载与坡脚应力集中。最终并段台阶的设置需经专项论证,并段后虽减少了平台数量,但增大了单级坡高,对岩体质量要求大幅提升^[3]。平台宽度设计中,清扫平台(主要供推土机作业)宽度应不小于6~8m,运输平台依据运输车辆转弯半径确定,一般不低于15~20m。必须强调,靠帮台阶(即最终边坡台阶)的坡面角应比工作台阶放缓 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$,为后期应力松弛预留安全裕度。

3.2 控制爆破技术的深度应用

实现边坡轮廓面精准成型且最大限度减少损伤,是爆破工艺的首要目标。预裂爆破是在主爆区起爆前,沿最终边坡轮廓线首先起爆一排间距小、线装药密度低的炮孔,形成一条宽约1~2cm的预裂缝。该裂缝能有效反射和截断主爆区传来的应力波,大幅降低爆破振动对保留岩体的破坏。光面爆破则是在主爆区之后起爆轮廓孔,利用相邻炮孔爆炸应力波叠加产生的拉应力沿孔连线形成平整破裂面。装药结构上,应采用不耦合空气间隔装药,不耦合系数(炮孔直径与药卷直径之比)一般取1.5~2.5,以降低爆轰压力峰值对孔壁的压碎作用。起爆网络方面,采用高精度电子雷管逐孔或逐排微差起爆,将单段最大药量控制在允许振速计算公式确定的范围内,并确保爆破振动主频避开边坡固有频率,防止发生共振危害。

3.3 采掘推进方向与卸荷时序

采掘作业的空间走向对边坡稳定性具有宏观导向作用。理想的推进方向应使工作线大致平行于最终边坡走向,或与主结构面走向呈大角度相交,严禁沿主要软弱结构面走向方向单向推进,以免形成“顺层掏心”的不利工况。在竖向开采顺序上,必须严格执行自上而下的逐台阶开采,禁止在坡脚处进行掏底式挖掘,避免上部岩体突然丧失支撑而产生剧烈卸荷崩落。当开采凹陷露天矿时,随着深度增大,应适当控制年度下降速度,避免卸荷速率超过坡体应力调整的适应能力,一般建议软弱岩层条件下的年下降速度控制在10~15m以内^[4]。临时堆置的剥离物排土场,应远离最终边坡顶部至少50m,并计算其附加应力在坡体内部产生的侧向挤压效应。

3.4 靠帮坡面的精细修整与保护

靠帮(即到达最终境界)阶段的坡面成型质量,直接决定了防排水及锚固工程的实施效果。修整应采用液压破碎锤或人工风镐配合,对爆破造成的不规则超欠挖部位进行精细处理,清除所有悬挂的危石、浮石,使坡面起伏度控制在 $\pm 15\text{cm}$ 以内。对于坡面发育的张开节理或裂隙,必须进行注浆封闭处理,注浆材料可采用水泥-水玻璃双液浆,注浆压力控制在0.5~1.0MPa,直至裂隙饱满泛浆为止。成型后的坡面应立即实施第一道喷射混凝土护面(厚度5~8cm),随后按设计布设锚索或锚杆,再进行第二道钢筋混凝土框架梁或格构梁浇筑,将锚固力通过框架均匀传递至坡面。这一系列工序必须在暴露后两周内完成,最大限度压缩岩体风化及干湿循环的劣化时间。

4 稳定管控与开挖工艺的协同策略

4.1 “以控稳导挖”的设计前置

传统“先挖后治”模式易造成事后补救困难。本文提出“以控稳导挖”理念,即在采掘计划编制阶段就将边坡稳定目标作为约束条件,指导台阶参数、爆破方案和采掘顺序的制定。具体做法包括:依据初勘及动态补勘数据,建立边坡稳定性分区图,对不同风险等级区域分别制定差异化的开挖强度与支护标准;将锚固、排水等稳定工程纳入采掘进度计划,使其与开挖形成紧密配合的流水作业,而非割裂的附加工序。

4.2 “以挖验稳”的动态反馈机制

开挖过程实际上是边坡稳定性的“实尺模型试验”。随着开挖推进,坡体实际变形响应可验证前期设

计假设的准确性。应构建“开挖-监测-分析-调整”的动态反馈回路:监测数据实时上传至分析平台,经反分析计算得到更新后的岩体力学参数,据此重新校核当前及下一台阶的稳定性,并调整后续工艺参数(如坡面角调缓、增加锚索密度、减小爆破药量等)。这种机制使得稳定管控不再是静态指标,而是随施工进展自适应演化的活体系。

4.3 全生命周期管理理念

边坡稳定管控不应止于开采结束,而应延伸至闭坑后的长期维护。全生命周期管理要求建立完整的边坡健康档案,包括地质资料、施工记录、监测数据及维护历史。闭坑后仍需定期巡视和监测,特别是对于服务年限长、高度大的永久性边坡,应制定长期的排水系统维护和锚固结构检测计划。这一理念要求开挖施工阶段就为后期维护预留条件,如设置永久监测点、布设可检修的排水设施等,从源头上降低全生命周期风险。

5 结语

露天矿山边坡稳定管控是一项涉及地质力学、施工技术与信息管理的复杂系统工程。本文通过分析边坡失稳的力学机理与主控因素,明确了地质、水、爆破和卸荷等多因素耦合作用机制;在管控技术层面,强调了动态勘察、综合监测、防排水和锚固支挡的系统整合;在开挖工艺方面,揭示了台阶划分、爆破损伤、采掘时序和成型修整对边坡稳定的深层影响。在此基础上,提出了“以控稳导挖、以挖验稳”的协同策略,倡导将稳定管控嵌入开挖工艺全流程,并通过动态反馈机制实现两者的自适应匹配。未来,随着智能传感、数字孪生与人工智能技术的深入应用,露天矿山边坡稳定管控有望迈向实时化、精细化与智能化,进一步推动矿山开采的安全与高效发展。

参考文献

- [1] 张玉军,李兆平,王树仁.露天矿高陡边坡稳定性评价方法研究进展[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增2):3125-3138.
- [2] 刘才华,陈从新,肖国峰.基于结构面控制的岩质边坡失稳模式判据研究[J].岩土力学,2021,42(9):2457-2468.
- [3] 王旭春,李振宇,张洪波.爆破振动对露天矿边坡累积损伤效应的试验研究[J].振动与冲击,2023,42(4):132-140.
- [4] 陈卫忠,谭贤君,伍国军.深凹露天矿边坡防排水技术体系与工程应用[J].煤炭学报,2022,47(5):1889-1900.