

露天矿边坡爆破对岩体稳定性的影响及控制措施研究

徐 伟

易普力股份有限公司, 湖南 长沙 410221

[摘要]露天矿开采时, 边坡爆破作业会显著影响岩体结构稳定性并与矿山安全和经济效益直接相关, 此文依据岩体力学理论剖析在爆破荷载下岩体破裂与裂隙扩展机制、探究爆破参数设计给边坡稳定性带来的影响, 经数值模拟和工程实例对比之后提出有效的控制爆破扰动技术措施, 研究结果能给露天矿爆破作业提供理论支持与实践指导以提高边坡稳定性和作业安全程度。

[关键词]露天矿; 边坡爆破; 岩体稳定性; 爆破参数; 控制技术

DOI: 10.33142/ect.v3i8.17494

中图分类号: TD824

文献标识码: A

Research on the Influence and Control Measures of Slope Blasting in Open-pit Mining on Rock Stability

XU Wei

Explosives Corporation Limited, Changsha, Hunan, 410221, China

Abstract: During open-pit mining, slope blasting operations significantly affect the stability of rock mass structure and are directly related to mining safety and economic benefits. Based on the theory of rock mechanics, this article analyzes the mechanism of rock mass fracture and crack propagation under blasting loads, explores the impact of blasting parameter design on slope stability, and proposes effective control blasting disturbance technical measures after numerical simulation and engineering case comparison. The research results can provide theoretical support and practical guidance for open-pit mining blasting operations to improve slope stability and operational safety.

Keywords: open-pit mining; slope blasting; rock mass stability; blasting parameters; control technology

引言

矿产资源开发规模不断扩大使得露天矿边坡安全性愈受关注, 边坡稳不稳定不但关联着矿山能否正常生产和经济效益好不好, 更与人员安全、生态保护有关, 开采初期爆破是必不可少的工序且会扰动岩体结构引发滑坡、塌方之类的地质灾害, 本文想从力学角度研究爆破影响边坡岩体稳定性的机制并提出有效的控制办法以构建安全、高效、绿色的露天开采技术体系。

1 边坡岩体结构与稳定性基础

1.1 岩体结构分类与特征

边坡稳定性的关键因素之一是岩体结构, 人们通常按岩体完整性和节理发育程度把岩体分成完整岩体、节理岩体、破碎岩体这三类, 其中完整岩体内部缺陷很少, 整体力学强度高, 边坡稳定性强, 在工程里适合当作主要承载体; 露天矿里大量存在节理岩体, 其节理、裂隙、断层这些结构面发育得很广泛, 容易出现剪切破坏、滑移破坏这类失稳模式, 结构面的空间组合关系、几何特征和强度参数对边坡稳定性起决定性作用, 特别是节理面的倾向、倾角和间距等掌控着潜在滑移面的形成与发展; 岩体的风化程度、岩性类型(像花岗岩、砂岩、片麻岩之类)以及岩层分布状况, 对岩体结构稳定性也有重要影响, 而且岩体中结构面的闭合程度、充填物性质还有地下水作用, 会使摩擦系数和抗剪强度改变, 进而影响岩体整体稳定性。

1.2 边坡稳定性评价理论

露天矿安全作业的基础环节是边坡稳定性评价, 人们主要用极限平衡分析法、岩体力学法和数值模拟方法对其进行系统研究, 极限平衡法把坡体结构简化, 假设出潜在滑面, 算出剪应力与抗剪强度的比值借此确定边坡安全系数, 瑞典条分法、摩尔-库仑法、简化毕肖普法等都是常见的极限平衡方法且不同的边坡条件适用不同的方法, 岩体力学法以岩石物理力学性质和本构关系为依据, 分析边坡受力状态和变形破坏过程从而揭示出边坡稳定的内在机制, 计算机技术发展起来之后, FLAC3D、UDEC、ANSYS 等数值模拟方法在复杂地质条件下的边坡稳定性分析中被广泛应用, 能模拟不同工况和爆破扰动条件下的变形、位移和破坏过程, 为边坡设计和优化提供重要依据, 边坡安全系数、变形趋势和破坏概率是评价结果的主要参考指标, 为工程风险的控制提供技术支撑。

1.3 外部扰动因素对稳定性的影响

在自然条件与工程活动的双重作用下, 边坡岩体的稳定性极易被外部扰动因素(如水文地质条件改变、地震振动、工程爆破扰动等)影响, 地下水的浸润不但会让岩体结构面摩阻力下降, 还会增加岩体自重、产生渗透压力, 引发滑移或者软化破坏且在雨季或者排水不好的时候这种情况更明显, 地震荷载通过周期性振动改变岩体应力状态, 促使结构面裂隙扩展和接触损伤, 造成坡体失稳滑动,

爆破扰动在露天矿里是最常见、最强烈的人为干扰,其爆破产生的应力波对岩体有短时强冲击作用,破坏岩体结构的完整,让节理扩展和剪切变形更严重,使本来就处于临界状态的边坡快速失稳,边坡开采的时候,边界条件不断变化(台阶高度、坡角调整等),力学环境也会因此改变,这对边坡长期稳定性有影响。

2 边坡爆破对岩体稳定性的作用机制

2.1 爆破荷载传播特性

爆破荷载属于一种高强度、短时间且瞬态释放的能量载荷,主要靠冲击波与应力波在岩体里传播,炸药爆轰瞬间产生的高温高压气体在爆破孔中产生强烈冲击波,冲击波沿岩体孔壁朝外传播,先使近场区域的岩体被压碎破裂,变成反射波和剪切波继续往远场传播,应力波在岩体里传播时,虽然岩石介质不连续、结构面的散射、吸收和反射作用会使应力波能量不断削减,但它对边坡稳定仍有很深的影响,应力波传播速度一般在 $2000 \sim 6000 \text{ m/s}$,其强度与炸药类型、装药结构、爆破参数等密切相关,在节理发育或者结构疏松的岩体里,爆破荷载容易顺着结构面传播,造成局部应力集中,使微裂隙扩展,而起爆顺序和延时设计也会影响波形叠加,让边坡局部区域遭受多重冲击,增加失稳风险。

2.2 岩体损伤演化规律

爆破荷载作用下,岩体的损伤演化是从微裂隙萌生、扩展到宏观裂缝贯通的非线性破坏过程,高应力冲击时爆心区形成压碎圈,裂缝接着向外扩展,破裂带和振动区随之形成,应力波传播还会让岩体出现剪切滑移、张拉破坏等多种结构损伤。节理岩体里天然裂隙众多,爆破对微观结构的扰动会使节理面错动与扩展加剧,进而使岩体整体剪切强度降低。爆破循环不断进行,累积损伤让岩体结构逐渐变弱,破坏原有完整性,诱发局部塑性区朝着临界破坏区发展、滑动面形成或者扩展。爆破扰动过程中,岩体的动力学特性、弹性模量、泊松比等一直在变,损伤演化具有空间不均匀性与时间耦合性,并且如果爆破设计不合理,容易产生多次加载叠加效应,边坡频繁被扰动难以恢复初始强度,从而加快边坡失稳的累积过程。

2.3 爆破诱发边坡失稳类型

边坡受爆破扰动时,常见失稳类型有局部崩塌、层间滑动、结构面剪切滑移和整体滑坡等,边坡顶部或自由面附近,爆破应力波反射产生拉应力区,岩块易脱落崩塌,岩体节理发育或有松动带处更显著,并且爆破扰动沿倾斜节理面传播,剪应力超抗剪强度时会引发层间滑移破坏,产生小规模塌落或剪切滑移,大型边坡频繁受爆破振动,结构面连接强度会退化,滑面剪切破坏逐渐发展,可能最终整体滑坡,爆破也许诱发“临界状态转移”,稳定边坡受扰动后进入临界不稳定状态,遇降雨、卸荷或持续爆破就迅速失稳,还有爆破时序设计不合理时,局部荷载可能重复叠加,产生振动放大效应,使局部边坡强烈响应甚至

失控滑移。

3 爆破参数设计对边坡稳定性的影响分析

3.1 爆破孔距与装药结构

爆破能量释放方式和岩体扰动范围受爆破孔距与装药结构这两个关键因素影响且边坡稳定性也直接受其影响,露天矿爆破时合理设计孔距能有效管控爆破能量集中与扩散避免能量过度集中使岩体破坏过度或能量过于分散让爆破效果不好,孔距设计得综合考虑岩性强度、节理裂隙发育程度和开采工艺要求一般按最小抵抗线原则布孔网还得考虑台阶高度和孔径匹配,孔距太小爆破重叠效应也许会增强边坡区域岩体反复被破坏结构完整性就下降而孔距太大爆破连续性会降低残留大块岩石产生施工难度增加,装药结构合理安排药卷长度、间隔和装药方式(像柱状装药、分段装药、定向装药)对爆破效果调节作用明显,边坡控制性爆破常采用分段装药与缓冲装药结构,这样能量在不同深度梯次释放对岩体冲击力减缓主爆区能量向坡面过度传递得以避免边坡扰动和裂隙扩展减少稳定性得到保障。

3.2 爆破顺序与起爆方式

爆破过程中应力波的传播路径与时序直接被爆破顺序与起爆方式决定,这对边坡结构的扰动程度有着关键影响,合理的爆破顺序能引导应力波定向释放,降低关键结构面所受作用强度并避免波峰叠加导致局部应力集中的情况,采用由内向外、由深至浅的爆破顺序,岩体就会朝着自由面塌落,减少边坡背部的反向破坏作用,而延时爆破是控制波峰重叠和振动响应的有效方式,精准控制起爆时间间隔可使应力波传播错开,减弱叠加效应,降低爆破振动对边坡的整体扰动,又因电雷管、毫秒雷管、导爆索等起爆方式不同,延时精度与能量释放方式也不一样,高精度电子雷管技术在现代露天矿控制爆破里被广泛应用,实现了毫秒级精准控制,优化了爆破振动波形,保护了边坡安全。

3.3 药量控制与爆破能量管理

炸药用量是决定爆破能量释放总量和作用强度的关键参数,边坡的扰动程度和岩体稳定性与药量控制的科学性直接相关,实际工程里,单孔装药量和单位炸药消耗量得依据岩石硬度、断裂发育程度、台阶尺寸等因素精确计算,药量过大时,应力波容易超限传播,边坡结构面会松动、滑动或者崩塌,严重的话大规模边坡失稳都可能发生,药量不足,爆破效率就降低了,会产生很多孤石和残块,后续机械剥离难度和安全隐患就增加了,要在保证爆破效果的基础上,用限药爆破、柔性装药、空腔装药这些技术手段,把能量集中释放和作用范围控制住,爆破能量管理也包含起爆效率、能量利用率、能量方向调控这些内容,靠能量导向装置、炮孔衬垫这些辅助手段能提高爆破能量定向传递的效果,减少无效破坏,建立爆破参数和边坡响应的关系模型,结合监测数据动态调整,让爆破扰动最小

化,这是现代矿山边坡安全控制和绿色开采的重要方向。

4 爆破扰动控制技术与工程实践

4.1 预裂爆破与光面爆破技术

预裂爆破和光面爆破这两种重要技术手段能控制爆破扰动,保持边坡的完整性与美观性,主爆孔外缘布置预裂孔且预裂孔提前或同步起爆是预裂爆破的操作方式,这样爆破应力波会先沿预定裂缝路径传播以形成连续的裂缝带,隔断主爆产生的应力波向边坡方向的扩散从而减少边坡扰动,这是预裂爆破的目的,这种方法常被用于保护边坡边界以防止超挖和岩体结构松动,预裂孔参数设计为小直径、间距密集、装药集中度低来实现连续裂缝和均匀破坏。光面爆破在预裂爆破的基础上对孔距、装药量与起爆顺序进一步优化,使得边坡成型面整齐平滑且裂隙和剥落很少,最终边坡的成型和稳定控制常用这种爆破方式,这两种爆破都属于控爆技术体系中的精细化爆破措施,坡面质量、岩体完整性、开采安全性提升效果都很显著,在实际工程当中要综合考虑岩体条件、边坡角度与台阶高度等因素来合理选择预裂和光面爆破方式,这是实现边坡稳定与控制爆破能量传递的核心手段。

4.2 实时监测与反馈调控系统

智能矿山和数字化开采不断发展,在爆破扰动控制里实时监测与反馈调控系统成了重要部分,布设振速监测仪、裂缝计、测斜仪等传感设备就能实时采集分析爆破引发的地震波振速、岩体变形、裂缝扩展等参数,监测数据经无线传输系统传至控制中心从而实现远程分析预警,在边坡区域设多点监测网络可及时捕捉爆破后岩体微变形和位移趋势以识别潜在失稳风险,监测结果还能评估爆破设计效果、验证药量控制、起爆顺序等参数设置是否合理进而为后续爆破方案优化提供数据支持,现代反馈系统与大数据、人工智能技术相结合实现边坡响应模式的预测和趋势研判并形成“爆前预测—爆中监测—爆后反馈”闭环控制体系,动态调整爆破参数和施工策略就能有效避免高风险区域爆破诱发失稳,提升边坡管理智能化精细化水平从而为矿山作业安全提供强有力技术保障。

4.3 控爆设计优化与绿色矿山建设

实现绿色矿山建设与可持续发展,控爆设计优化是关

键路径之一,其旨在保障安全和开采效率的最大程度减少对边坡、生态和环境的负面影响。从爆破方案源头开始进行优化设计,药量、孔距、装药结构和起爆时序应合理匹配以减少爆破能耗以及粉尘、振动、噪声等有害效应。新型环保炸药、低毒起爆器材和智能爆破控制系统的推广使用进一步提升能量利用率,减少无效破坏和资源浪费。边坡控爆时结合地质模型和数值模拟技术做爆破效果预测和动态仿真选出最优参数组合以实现精准爆破。控爆设计要考虑生态保护要求,避开重要植被、地表水体或者生态敏感区域,保证边坡稳定且不影响周边环境和基础设施。典型工程实践显示,采用多参数耦合优化和全过程动态监控相结合的控爆策略后,边坡稳定性提高且后续支护和修复成本降低,这是现代绿色矿山建设的重要方向。

5 结语

露天矿边坡岩体稳定性受爆破影响,本研究对其影响机制加以系统分析并深入探讨了从爆破荷载传播、岩体损伤演化到失稳类型这些方面,基于此将爆破参数优化和扰动控制技术相结合提出不少可行的控爆措施,使边坡安全和作业质量得以提升,数字化、智能化技术在发展,实时监测与反馈系统于边坡稳定控制中会起更大作用,研究成果对矿山安全、高效、绿色开采的实现有着重要现实意义和应用价值。

【参考文献】

- [1]闫广柱.露天矿山边坡稳定性分析及预警预报[D].安徽:安徽理工大学,2024.
- [2]武文雍.越南生权露天矿爆破振动对边坡稳定性影响研究[D].江苏:中国矿业大学,2023.
- [3]于金江.齐大山露天铁矿东帮边坡稳定性研究[D].辽宁:辽宁工程技术大学,2023.
- [4]李青霖.多工况下马脑壳露天金矿高陡边坡稳定性研究[D].重庆:重庆大学,2022.
- [5]俞志斌.深凹露天矿山高陡边坡稳定性浅谈[J].福建建材,2022(5):41-43.

作者简介:徐伟(1983.10—),武汉科技大学,采矿工程,就职单位:易普力股份有限公司,担任部门副职,职称级别:爆破工程中级工程师。