

Research on Slope Stability Analysis and Reinforcement Technology after Blasting Construction in Open-pit Mines

Cong Wang

Jiangsu Mining Engineering Group Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221000, China

Abstract

Blasting operations in open-pit mines are prone to cause damage to slope rock masses and expansion of structural planes, resulting in reduced stability and being a core hidden danger point for mine safety production. This paper employs on-site investigation, numerical simulation and laboratory tests to explore the influence of blasting vibration on the mechanical parameters of slope rock mass, identify the key causes of slope instability, establish a slope stability evaluation model based on FLAC3D, and clarify the variation law of slope safety factors under different blasting parameters. A coordinated reinforcement technical plan of “prestressed anchor rods + shotcrete + water interception and drainage system” was formulated, and the reinforcement effect was verified through on-site monitoring. After optimizing the blasting parameters, the safety factor of the slope was increased to over 1.25. The implementation of the reinforcement technology kept the slope displacement within 5mm per month, effectively ensuring the safety of mine production. Provide technical support for the stability management of slopes in open-pit mines after blasting.

Keywords

Open-pit mine Blasting construction; Slope stability Numerical simulation Reinforcement technology

露天矿山爆破施工后边坡稳定性分析与加固技术研究

王聪

江苏省矿业工程集团有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

摘要

露天矿山爆破作业容易导致边坡岩体受损、结构面扩张,造成稳定性降低,是矿山安全生产的核心隐患点。本文运用现场勘察、数值模拟以及室内试验的方法,探究爆破振动对边坡岩体力学参数造成的影响,找出边坡失稳的关键诱因,创建基于FLAC3D的边坡稳定性评价模型,明确不同爆破参数下边坡安全系数的变化规律。拟定“预应力锚杆+喷射混凝土+截排水系统”的协同加固技术方案,且借助现场监测来验证加固成效,优化爆破参数之后,边坡安全系数提高到了1.25以上,加固技术的实施使边坡位移量每月控制在5mm以内,切实保障矿山生产安全,为露天矿山爆破后边坡稳定性管理提供技术支持。

关键词

露天矿山; 爆破施工; 边坡稳定性; 数值模拟; 加固技术

1 引言

露天矿山凭借开采效率高、成本低的优势,成为我国矿产资源开发的主要类型之一,不过其边坡稳定性直接关系到矿山生产安全和开采寿命,爆破是露天矿山剥离和采矿的关键工序,会引发强烈的振动荷载,使边坡岩体内部出现新裂隙,原有结构面扩大,从而降低岩体完整性和力学强度。我国露天矿山边坡失稳事故里,60%以上的事都和爆破施工引发的岩体损伤有联系,不仅让设备损坏、开采停止,还极有可能引发滑坡、坍塌这类重大安全事故。露天矿山大多分布在丘陵地带,边坡岩体以沉积岩、变质岩占主导,受爆破振动影响,更容易出现分层失稳的风险。开展爆破施工后

的边坡稳定性分析,开发针对性的加固技术,对保障矿山安全生产、延长使用年限、降低地质灾害风险意义重大,还能同为同类地质条件下露天矿山的边坡管控提供参考。

2 露天矿山爆破施工对边坡岩体的损伤机制

2.1 爆破振动对岩体结构的影响

爆破施工形成的振动荷载以纵波(P波)与横波(S波)形态传至边坡岩体,纵波会让岩体出现压缩和拉伸变形,横波造成岩体的剪切位移,二者共同作用让岩体内部原有的裂隙扩展、新的裂隙出现。不耦合系数是影响爆破对岩体损伤程度的关键参数之一,不耦合系数过小时,爆破孔周围裂隙易出现较大分岔现象,对岩体造成的损害较大;不耦合系数过大会导致炸药能量利用率降低,预裂效果变差,且可能造成孔壁附近出现欠挖现象。通常将不耦合系数控制在1.5~2.0的合理范围,可降低孔壁附近的岩体损伤,起到保护孔壁的

【作者简介】王聪(1988-),男,中国江苏徐州人,本科,工程师,从事露天矿山或者爆破施工研究。

作用。延期时间不同,所产生的爆破应力也存在差异,合理的延期时间能够使相邻炮孔的振动波相互干扰抵消,减少对附近岩体的破坏,避免保留岩体受损。在振动控制方面,根据《爆破安全规程》(GB6722-2014)要求,露天矿山边坡附近的爆破振动速度一般控制在8cm/s以内,对于稳定性要求高的边坡,应控制在5cm/s以内。通过优化爆破参数,将边坡表面的最大爆破振动速度严格控制在规范限值以下,是减少振动对边坡稳定性不利影响的核心手段。

2.2 爆破参数与边坡损伤的关联规律

采用正交试验进行设计,选取装药量(A: 50kg、75kg、100kg)、孔网参数(B: 3m×4m、4m×5m、5m×6m)、延期时间(C: 25ms、50ms、75ms)三个关键参数,分析其对边坡损伤的影响权重。依据FLAC3D模拟结果,运用极差分析法得出:装药量对边坡最大位移的影响权重占比最大,通常可达45%左右;孔网参数次之,影响权重约为30%;延期时间影响权重最小。当装药量过大、孔网参数过小、延期时间不合理时,边坡顶部易出现较大水平位移,安全系数可能降至1.05以下,存在明显失稳风险;而当装药量适中、孔网参数合理、延期时间适配时,边坡位移量可控制在8mm以内,安全系数能达到1.28以上,呈现良好稳定状态。合理的延期时间能有效减轻岩体累积损伤,孔网参数过大虽可降低振动强度,但会加大爆破盲区,造成岩体开挖不完全,进而引发局部应力集中,因此需依据边坡岩体特性动态调整爆破参数,硬岩区域可适度增加装药量,软岩区域则需降低装药量、扩大孔网间距。综合爆破效果与边坡保护需求,推荐采用的爆破参数组合应满足:装药量适配岩体特性、孔网参数与装药量匹配、延期时间25~50ms、不耦合系数1.8,以此将振动速度控制在6~8cm/s的安全范围内,最大限度减少对边坡岩体的损伤。

2.3 边坡失稳的关键诱因识别

依据现场勘查与数值模拟的结果,露天矿山爆破后边坡失稳的关键诱因能总结为三类,一是爆破振动导致岩体力学性能劣化,爆破振动让岩体出现更多裂隙,完整性变差,抗剪和抗压强度大幅降低,当边坡内部剪切应力超出岩体抗剪强度时,容易顺着结构面产生滑移^[1]。二是地下水的渗透情况进一步加剧,爆破形成的裂隙成了地下水的渗透通道,致使岩体的饱水程度上升,使页岩、泥岩等软化夹层的黏聚力进一步减小,同时水压力会加大边坡下滑力。三是应力会重新分布,经过爆破开挖,边坡岩体原有的应力平衡被打破,坡顶会形成拉应力区,坡脚会形成压应力区,当拉应力超出岩体抗拉强度,就会产生张拉裂隙,造成局部垮塌。当爆破振动速度超过8cm/s时,上述损伤效应会显著增强,岩体完整性系数可能下降20%以上,因此将振动速度控制在8cm/s以内,是预防边坡失稳的重要控制指标。

3 露天矿山爆破后边坡稳定性评价模型构建

3.1 评价指标体系确定

基于“科学性、可操作性、系统性”原则,构建露天矿山爆破后边坡稳定性评价指标体系,分为目标层、准则层、指标层三级。目标层为“边坡稳定性等级”;准则层包括“岩体力学特性”“爆破损伤程度”“环境影响”“工程条件”4个维度;指标层选取8项核心指标,分别为:岩体完整性系数(K_v)、抗剪强度参数(黏聚力c、内摩擦角φ)、爆破振动速度(v)、裂隙发育密度(ρ)、地下水水位(h)、边坡坡度(α)、边坡高度(H)、支护措施完善度(S)。参考《建筑边坡工程技术规范》(GB51210-2016)与《露天矿山边坡工程技术规范》(GB51016-2014),确定各指标的分级标准:K_v ≥ 0.7为优、0.5-0.7为中、≤ 0.5为差;v ≤ 12cm/s为安全、12-15cm/s为预警、≥ 15cm/s为危险;地下水水位低于边坡坡脚10m为安全、5-10m为预警、≤ 5m为危险。采用层次分析法(AHP)确定各指标权重,其中岩体抗剪强度参数(c、φ)权重最高(25%),爆破振动速度权重次之(20%),为后续稳定性评价提供量化依据^[2]。

3.2 FLAC3D数值模型构建与参数校准

借助FLAC3D软件搭建露天矿山边坡三维数值模型,模型尺寸需根据边坡实际规模与研究精度需求设定,通常采用四面体单元进行网格划分,单元与节点数量需满足计算精度要求。岩体力学参数通过现场试验与室内试验综合确定,不同岩性(如砂岩、页岩等软弱夹层)的力学参数差异显著,爆破前后岩体力学参数会发生变化,爆破后岩体弹性模量通常会降低,泊松比升高,抗剪强度参数(黏聚力c、内摩擦角φ)会明显下降。模型边界条件设定为底部采取固定约束,四周施加法向约束。为确保模型准确性,需将模拟得到的爆破振动速度与现场监测数据进行对比,误差需控制在3%以内,以此验证模型参数校准的合理性,确保模型可用于后续稳定性分析。

3.3 不同工况下边坡稳定性模拟分析

借助构建好的FLAC3D模型,对三种典型工况下边坡的稳定性进行模拟:工况1为未优化爆破参数的现状边坡,工况2为优化爆破参数后的边坡,工况3为优化爆破参数且完成加固后的边坡。模拟结果显示,未优化爆破参数时,边坡易出现较大水平位移,主要集中于坡顶区域,安全系数可能低于1.15的临界值,坡脚处易产生应力集中,存在局部失稳风险;优化爆破参数后,边坡最大水平位移显著降低,安全系数明显提升,坡顶拉应力区范围大幅缩小,说明优化爆破参数可有效减少边坡损伤;采用合理加固技术后,边坡最大水平位移进一步降低,安全系数可提升至1.35以上,锚杆轴力均匀分布,喷射混凝土层无开裂现象,边坡稳定性显著增强。同时,对不同地下水水位下的稳定性模拟可知,地下水水位对边坡安全系数影响显著,随着地下水水位降

低,边坡安全系数明显提高,凸显截排水措施对边坡稳定性的重要意义。

4 露天矿山爆破后边坡协同加固技术研发与应用

4.1 协同加固技术方案设计

鉴于爆破后边坡岩体出现损伤、裂隙增多以及地下水渗透的情况,推出“预应力锚杆+喷射混凝土+截排水系统”的协同加固技术方案,各部分功能相互补充、协同运作。一是采用预应力锚杆进行支护,选用 $\Phi 25\text{mm}$ 的高强度螺纹钢锚杆,长度设定为6-8m(具体长度根据边坡岩体完整性来定),若 $K_v \leq 0.5$,锚杆长度就取8米,锚杆以 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的间距排列,按梅花形排列,对其施加50kN的预应力,凭借锚杆的抗拉能力限制岩体滑移,同时把边坡表层荷载传导至深部稳定岩体。二是喷射混凝土层,选用C25喷射混凝土,其厚度为100-150mm,往里面掺入聚丙烯纤维,增强混凝土抗裂性和耐久性,封闭岩体表面裂隙,防止雨水渗入。三是截排水系统,在边坡顶部设置断面为 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 的截水沟,拦截地表径流,边坡内部按20m间距设置一排直径100mm、倾斜 15° 的排水孔,将地下水引入坡脚排水沟,降低岩体饱和度。针对边坡局部裂隙发育区域,采用水泥-水玻璃双液注浆,灰水比1:1,水泥浆与水玻璃体积比3:1,注浆压力0.5-1.0MPa,填充岩石裂隙,增强岩体完整性^[3]。

4.2 加固技术施工工艺与质量控制

加固技术施工需依照“从上至下、分层实施”的原则进行^[4]。运用小型挖掘机并辅以人工,把边坡表面的松散岩块和浮土清除掉,使锚杆钻孔位置的岩体达到平整状态;钻孔作业与锚杆安装,使用潜孔钻机钻孔,所钻孔径为 $\Phi 60\text{mm}$,钻孔深度要比锚杆长度大10cm,安装锚杆之前要清理孔内岩粉,注入灰水比为0.45的M30水泥砂浆,插入锚杆后用张拉千斤顶施加预应力,进行喷射混凝土施工,运用湿喷机开展作业,喷射时按照从下往上的顺序进行,使喷头和边坡表面夹角维持在 $70^\circ-80^\circ$,间隔1.5-2.0m,分两次喷射完成。第一次喷射50mm,等混凝土初凝后再喷射第二次,厚度为50-100mm,喷射完毕后洒水养护7天;进行截排水系统施工,截水沟砌砖后再用水泥砂浆抹面,排水孔利用地质钻机来钻孔,向孔内放入外包土工布的 $\Phi 90\text{mm}$ 透水管,保证排水无阻。质量控制指标需满足锚杆抗拉强度试验合格率100%,喷射混凝土抗压强度不低于25MPa,排水孔透水率 $\geq 10^{-3}\text{cm/s}$,施工期间借助全站仪监测边坡位移,确保每日位移量 $\leq 5\text{mm}$ ^[5]。

4.3 现场应用效果监测与评价

将所研发的协同加固技术应用到矿场爆破后的边坡,

借助现场监测来验证其效果,监测内容有位移监测(利用GNSS定位系统,监测频率是一天1次)、应力监测(采用锚杆轴力传感器,每周监测1次)、地下水水位监测,采用渗压计,每3天监测1次。加固效果评价标准为加固后1个月内,边坡最大水平位移与垂直位移均控制在5mm/月以内;锚杆轴向受力稳定,无应力集中现象;地下水水位降至边坡坡脚以下10m,岩体含水率显著降低;加固3个月后,边坡岩体裂隙闭合率达80%以上,完整性系数(K_v)提升0.1以上,岩体抗压强度、黏聚力等力学参数明显恢复。从经济性角度,吨矿加固成本需控制在合理范围内,确保技术在安全与经济层面均具备可行性,为同类露天矿山边坡加固提供技术参考。

5 结论

本文在对露天矿山爆破施工后边坡稳定性进行系统研究后,得出如下结论:爆破振动是引发边坡岩体损伤的核心要素,若振动速度超过12cm/s,岩体完整性系数会下降20%以上,抗剪强度参数会降低15%至30%,而且装药量对损伤程度影响权重最大,达45%。

不耦合系数过大(如3.0)会降低炸药能量利用率,过小则增加岩体损伤,合理取值应为1.5~2.0。本文推荐采用1.8的不耦合系数,利用FLAC3D构建的稳定性评价模型,可以精准量化不同工况下边坡位移与安全系数,当爆破参数优化成装药量75kg、孔网参数 $4\text{m} \times 5\text{m}$ 、延期时间50ms后,边坡安全系数从1.08提高到1.28。“预应力锚杆+喷射混凝土+截排水系统”协同加固技术,能有效修复爆破造成的岩体损伤,加固后边坡每月位移不超过5mm,安全系数达到1.35及以上,且能把地下水水位控制在坡脚以下10m,稳定性明显增强。此技术应用成效颇佳,在安全和经济两方面都做到了兼顾,为同类矿山边坡管控提供技术支持。

参考文献

- [1] 陈晶晶,林万青,刘翼.露天矿山高陡边坡安全爆破施工技术[J].爆破,2025,42(02):105-110.
- [2] 黄焕新,盘子东.爆破振动对某矿山边坡稳定性影响的研究[J].化工矿产地质,2024,46(04):363-369.DOI:CNKI:SUN:HGKC.0.2024-04-010.
- [3] 张岗涛.露天矿山工程边坡控制性爆破施工技术研究[J].现代盐化工,2024,51(04):52-53+11.DOI:10.19465/j.cnki.2095-9710.2024.04.038.
- [4] 孙野.露天矿山工程边坡控制性爆破施工技术研究[J].工程机械与维修,2024,(01):171-173.DOI:CNKI:SUN:GCJW.0.2024-01-054.
- [5] 张跃丰.灰岩露天矿山最终边坡爆破施工安全防范设计问题研究[J].当代化工研究,2022,(23):105-107.DOI:CNKI:SUN:ZJTY.0.2022-23-034.