

绿色爆破技术在水利水电边坡工程中的安全应用

费晓岭

中电建振冲建设工程股份有限公司 北京 100102

摘要:为解决水利水电边坡工程传统爆破的安全与环保难题,本文探讨绿色爆破技术的安全应用路径。首先概述绿色爆破技术的定义、分类及特点,分析水利水电边坡工程的复杂特点与传统爆破存在的地质、环境及施工安全风险,进而从爆破设计优化、环保器材应用、智能起爆控制、废弃物利用与生态修复四方面阐述应用路径,最后展望全生命周期碳管理与AI驱动优化方向。研究表明,绿色爆破技术可实现工程、安全与生态效益协同,为边坡工程安全高效施工提供技术支持。

关键词:绿色爆破技术;水利水电工程;边坡稳定性

引言:水利水电边坡工程作为工程核心组成部分,地质条件复杂、环境敏感性强,其施工安全与生态保护直接关乎工程整体效益与周边民生安全。传统爆破技术因粗放式作业,易引发边坡失稳、环境污染等安全隐患,难以适配新时代绿色发展要求。绿色爆破技术融合环保理念与精准控制技术,可有效降低爆破污染与安全风险。因此,系统探究绿色爆破技术在水利水电边坡工程中的安全应用路径,对推动工程建设绿色转型升级、保障工程长期稳定运营具有重要现实意义。

1 绿色爆破技术概述

1.1 定义

绿色爆破技术是在传统爆破工艺基础上,融合环保理念、精准控制技术与资源循环利用思想形成的新型爆破技术体系。其核心要义在于通过选用环保型爆破材料、优化爆破参数设计、采用智能起爆控制手段,在实现工程爆破作业目标的同时,最大限度降低爆破过程中产生的粉尘、噪声、振动等环境污染物排放,减少对周边生态环境的破坏,并对爆破产生的废渣等废弃物进行资源化回收利用。该技术打破了传统爆破“重工程效果、轻环境影响”的局限,强调工程效益、安全效益与生态效益的协同统一,是新时代工程建设领域践行绿色发展理念、推动行业转型升级的关键技术支撑,广泛适用于对环境敏感、生态要求高的水利水电、交通基建等工程领域。

1.2 技术分类与特点

1.2.1 环保型爆破器材

环保型爆破器材是绿色爆破技术的基础支撑,指通过材料配方改良、生产工艺优化,降低有毒有害成分含量、减少环境污染物产生的爆破材料总称,主要包括低污染炸药、环保型起爆器材及配套辅助材料^[1]。与传统爆破器材相比,其核心特点体现在三个方面:一是污染

物排放量低,低污染炸药在爆炸过程中可减少NO_x、CO等有毒气体及粉尘的生成量,部分环保炸药还可实现爆炸后残留物的自然降解;二是安全性更高,通过优化药剂稳定性与起爆敏感性,降低运输、储存及使用过程中的安全风险;三是适配性强,可根据不同工程地质条件、爆破作业要求,定制不同威力、不同污染排放等级的器材类型。此类器材的应用从源头遏制了爆破污染,为绿色爆破技术的实施提供了基础保障,是实现爆破作业环保化的关键环节。

1.2.2 精准爆破技术

精准爆破技术是依托先进的勘察测绘技术、数值模拟技术与智能控制技术,实现对爆破过程全流程精准把控的爆破技术类型。其核心特点表现为:爆破设计精准化,通过三维地质勘察建模、爆破数值模拟仿真,精准确定炮孔布置、装药结构、炸药用量等关键参数,避免过量装药导致的资源浪费与过度扰动;起爆过程可控化,采用毫秒延时起爆、电子精准起爆等技术,严格控制各炮孔起爆时序,实现爆破能量的有序释放,减少爆破振动的叠加效应;爆破效果精准达标,可根据工程需求精准控制爆破岩石的块度分布,降低后续清运与破碎成本,同时减少对周边岩体、构筑物的扰动破坏。

1.2.3 废弃物循环利用

废弃物循环利用是绿色爆破技术生态效益实现的重要环节,指对爆破作业产生的废渣、废石等废弃物进行分类回收、加工处理,实现资源再利用的技术模式。其核心特点包括:一是资源化利用率高,通过破碎、筛分等加工工艺,将爆破废渣转化为混凝土骨料、路基填料等再生建筑材料,替代天然砂石资源,减少资源开采与环境破坏;二是处理方式环保,避免了传统爆破废弃物随意堆放导致的占用土地、污染土壤与水体等问题,通

过集中处理、分级利用实现废弃物的减量化、无害化；三是协同效益显著，在实现资源循环利用的同时，降低了废弃物清运与处置成本，提升工程经济效益，同时减少生态环境压力。

2 水利水电边坡工程特点与安全挑战

2.1 工程特点

水利水电边坡工程是水利水电工程的重要组成部分，主要包括大坝边坡、引水渠道边坡、厂房边坡等，其工程特点具有显著的复杂性与特殊性。一是地质条件复杂多变，边坡工程多位于山区河谷地带，岩体风化程度不均、断层裂隙发育，易出现滑坡、崩塌等地质灾害隐患，且水文地质条件复杂，地下水活动易加剧边坡失稳风险。二是工程规模大、难度高，水利水电工程边坡通常高度大、坡度陡、开挖工程量大，施工空间受限，对施工工艺与技术要求极高^[2]。三是环境敏感性强，边坡工程多临近河流、水库等水域，施工过程易对周边水体、植被、生态系统造成影响，且工程运营期需长期承受水流冲刷、风化侵蚀等自然作用。四是安全要求严格，边坡工程的稳定性直接关系到水利水电工程主体结构安全与周边居民生命财产安全，一旦发生失稳事故，将造成重大损失。

2.2 传统爆破的安全风险

传统爆破技术在水利水电边坡工程应用中存在诸多安全风险，主要体现在地质安全、环境安全与施工安全三个方面。在地质安全方面，传统爆破采用粗放式装药与起爆方式，炸药能量释放无序，易对边坡岩体造成过度扰动，导致岩体裂隙发育加剧，诱发滑坡、崩塌等地质灾害，尤其对于复杂地质条件下的高陡边坡，过度爆破可能破坏边坡整体稳定性，留下长期安全隐患；在环境安全方面，传统爆破产生大量粉尘、噪声与有毒有害气体，粉尘扩散易污染周边空气与水体，噪声干扰周边居民生活与野生动物生存，有毒气体危害施工人员健康与生态环境；在施工安全方面，传统爆破器材安全性较低，运输、储存与使用过程中易发生爆炸事故，同时起爆控制精度低，易出现拒爆、早爆等问题，威胁施工人员生命安全。另外，传统爆破产生的大量废渣随意堆放，易引发泥石流等次生灾害，且资源浪费严重，不符合绿色发展要求，这些安全风险严重制约了水利水电边坡工程的安全高效施工。

3 绿色爆破技术在边坡工程中的安全应用路径

3.1 爆破设计与参数优化

爆破设计与参数优化是绿色爆破技术在水利水电边坡工程安全应用的核心路径，通过科学精准的设计为安全、环保爆破提供基础保障。首先，开展全面细致的地

质勘察，利用三维激光扫描、地质雷达等先进技术，构建精准的边坡地质模型，明确岩体力学参数、断层裂隙分布等关键地质信息；其次，基于地质模型进行爆破数值模拟仿真，采用有限元、离散元等数值方法，模拟不同爆破参数下的爆破效果、振动传播规律与岩体扰动范围，优化确定炮孔布置方式、孔深、间距、装药结构、炸药用量及起爆时序等关键参数；最后，结合工程实际需求与环境要求，制定个性化爆破方案，采用小直径炮孔、分层分段爆破等方式，控制爆破能量释放强度，减少爆破振动与岩体扰动，同时降低粉尘与噪声产生量。通过爆破设计与参数优化，可实现爆破效果与安全环保要求的精准匹配，最大限度降低爆破安全风险，保障边坡工程稳定性^[3]。

3.2 环保型爆破器材应用

环保型爆破器材应用是绿色爆破技术从源头控制污染、提升安全水平的关键路径。在水利水电边坡工程中，应根据工程地质条件、爆破作业要求与环保标准，针对性选用环保型爆破器材：对于水体周边或生态敏感区域的爆破作业，选用水胶炸药、乳化炸药等低污染、低毒性炸药，减少爆炸过程中有毒气体与重金属排放，避免污染水体与土壤；采用电子雷管等环保型起爆器材，替代传统火雷管、导爆索，提升起爆控制精度，减少起爆过程中的粉尘与噪声污染，同时降低早爆、拒爆等安全风险；配套使用环保型炮孔填塞材料，如可降解泡沫、生态型黏土等，提升爆破能量利用率，减少爆破飞石与粉尘扩散。通过环保型爆破器材的全面应用，从源头遏制爆破污染，提升爆破作业的安全性与环保性，契合水利水电工程生态保护要求。

3.3 智能起爆与动态控制

智能起爆与动态控制是提升绿色爆破技术应用水平的核心技术路径，通过智能化、自动化技术实现对爆破过程的实时监控与精准调控。在水利水电边坡工程爆破作业中，采用智能起爆系统，结合卫星定位、无线通信等技术，实现对起爆时序、起爆能量的精准控制，确保各炮孔按设计方案有序起爆，避免爆破能量叠加导致的振动超标；部署爆破振动监测、粉尘监测、噪声监测等实时监测设备，对爆破过程中的关键安全环保指标进行动态监测，数据实时传输至控制中心，一旦发现指标超标，立即启动应急调控措施；利用大数据、人工智能技术对监测数据进行实时分析，预测爆破效果与安全风险，为爆破参数的动态调整提供数据支撑。另外，通过远程操控起爆技术，实现爆破作业的无人化操作，避免施工人员直接暴露在爆破危险区域，大幅提升施工安全

水平,确保爆破作业安全、可控、环保。

3.4 废弃物资源化与生态修复

废弃物资源化与生态修复是绿色爆破技术实现生态效益、保障边坡工程长期安全稳定的重要应用路径。在水利水电边坡工程爆破作业后,首先对爆破产生的废渣、废石进行分类回收,通过破碎、筛分等加工工艺,将合格废渣转化为混凝土骨料、路基填料等再生建筑材料,用于工程主体结构施工或周边基础设施建设,实现资源循环利用,减少废渣堆放占用土地与环境污染;对于无法资源化利用的废渣,进行规范化处置,采用挡渣墙、护坡等防护措施,避免引发泥石流等次生灾害。结合边坡工程实际开展生态修复工作,在爆破后边坡区域种植乡土植被,构建生态防护体系,提升边坡抗风化、抗冲刷能力,恢复周边生态环境;对爆破扰动区域的土壤进行改良,采用生态固坡技术,增强边坡稳定性,实现工程建设与生态保护的协同发展,保障水利水电边坡工程的长期安全运营。

4 未来展望

4.1 全生命周期碳管理

全生命周期碳管理将成为绿色爆破技术未来发展的重要方向,助力水利水电边坡工程实现“双碳”目标。未来,绿色爆破技术将构建覆盖爆破材料生产、运输、施工、废弃物处理及工程运营全生命周期的碳管理体系。在材料环节,研发低碳环保型爆破材料,优化生产工艺,降低材料生产过程中的碳排放;在运输环节,采用新能源运输设备,优化运输路线,减少运输过程中的碳足迹;在施工环节,通过参数优化、智能控制等技术,提升爆破效率,减少能源消耗与碳排放;在废弃物处理环节,进一步提升资源化利用率,减少废弃物处置过程中的碳排放;建立全生命周期碳核算模型,利用大数据技术对各环节碳排放进行精准计量与监控,制定针对性减排措施^[4]。通过全生命周期碳管理,推动绿色爆破技术从“环保型”向“低碳型”升级,实现水利水电边坡工程的绿色低碳发展,为行业双碳目标实现提供技术支撑。

4.2 AI驱动的绿色优化

未来,人工智能技术将深度融合于绿色爆破的全流程:在爆破设计阶段,利用AI算法对海量地质勘察数据、工程案例数据进行深度学习,自动生成最优爆破设计方案,精准匹配地质条件与工程需求;在施工阶段,通过AI驱动的实时监测与动态调控系统,实现对爆破振动、粉尘、噪声等指标的精准预测与自适应调控,确保施工安全与环保;在废弃物处理阶段,利用AI技术优化资源化利用方案,提升废弃物回收利用率;AI技术还将用于绿色爆破技术的全生命周期评估与优化,实现技术效益、安全效益、环保效益与经济效益的最优平衡。AI驱动的绿色优化将彻底改变传统爆破技术的粗放式发展模式,推动绿色爆破技术进入智能化、精准化发展新阶段。

结束语

绿色爆破技术凭借环保、精准、安全的核心优势,为水利水电边坡工程破解传统爆破难题提供了有效解决方案。通过科学的爆破设计优化、环保器材应用、智能动态控制及生态修复措施,可实现工程建设与生态保护的协同发展。未来随着全生命周期碳管理与AI技术的深度融合,绿色爆破技术将迈向更智能、低碳的发展阶段。期待相关技术研究与实践不断深化,为水利水电工程高质量、绿色化发展注入更强劲动力,助力行业双碳目标顺利实现。

参考文献

- [1]杨庆红.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J].价值工程,2025,44(22):134-137.
- [2]宋海超.水利水电工程中高边坡开挖及锚喷支护的应用[J].四川建材,2025,51(2):166-169.
- [3]杨洪才.水利水电工程中边坡支护工程施工设计[J].建筑与装饰,2025(14):22-24.
- [4]龙潜,杨佳鑫.高寒高海拔地区水利水电工程高陡边坡生态修复措施研究[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(2):130-132.