

水利水电工程爆破施工参数对岩体破碎效果的影响

屈晶晶

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710086

【摘要】：水利水电工程爆破施工的关键在于合理设置参数，以实现对岩体的有效破碎。爆破参数如药量、孔距、排距、延时和装药结构等，直接决定了能量的传递方式和岩体的破碎程度。参数匹配得当，不仅能提高岩体破碎效率，还能减少飞石、震动等不良影响，保障施工安全与环境稳定。不同地质条件下岩体结构与力学特性差异显著，对爆破参数的敏感性也有所不同，因此参数优化具有明显的针对性。通过分析参数对破碎效果的作用机理，探讨适应复杂地质环境的优化路径，有助于提高工程施工质量与经济性，并为水利水电工程的可持续发展提供技术支撑。

【关键词】：水利水电工程；爆破施工参数；岩体破碎；施工安全；参数优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.02.017

引言

在水利水电工程建设中，岩体开挖是基础性环节，而爆破作为主要手段，对工程进度和质量具有决定性作用。爆破施工的核心在于参数设计，药量分布、孔距排距、起爆延时等要素直接影响能量释放与岩体响应的过程。若参数选择不当，可能导致破碎不足或过度破碎，甚至引发安全隐患与环境问题。近年来，随着工程规模不断扩大，复杂地质条件下的爆破施工对参数优化提出了更高要求。研究爆破参数与岩体破碎效果之间的关系，既能揭示其作用机理，又能为实际施工提供科学依据。如何在保证安全的前提下兼顾施工效率与经济性，已成为水利水电工程施工中亟需解决的重要问题。

1 爆破施工参数设计与岩体结构特性的适配关系

1.1 不同岩体结构对爆破参数的敏感性分析

岩体在结构特征上存在较大差异，坚硬完整的岩体在爆破时需要更大的能量集中才能形成有效裂隙，而节理裂隙发育的岩体在低装药量条件下也能迅速产生贯通裂缝。对致密花岗岩类岩体，孔距和排距的设计需更小，以确保爆炸能量在有限空间内高度集中，从而克服高强度结构的阻力；对于砂岩或片麻岩等软弱岩层，孔距可以适当加大，否则容易形成过度破碎，导致块度失衡。通过对不同结构类型的敏感性分析，可以明确参数在控制破碎范围、裂缝形态以及块度分布中的作用，进而为精准设计提供参考。

1.2 爆破能量分布规律与岩体破碎程度关系

爆破能量在岩体中的分布呈现明显的不均匀性，近区能量密度大，易产生粉碎带；中远区能量逐渐衰减，裂隙扩展效果显著。装药结构和孔径大小直接影响能量的传导路径，药柱集中会形成高能量密度区，

从而增加岩体局部的粉碎程度；而分散装药则更利于能量均匀扩散，促进裂隙网的生成。合理的能量分布能够在保持岩体完整性的前提下实现破碎效率最大化，使块度分布更趋合理，并减少因能量不均造成的施工隐患。

1.3 参数匹配对施工安全与质量的直接影响

在爆破过程中，参数的匹配程度决定了安全与质量的可控性。药量过大易造成飞石外逸和地震效应增强，危及周边结构；装药不足则可能出现岩体松动不彻底，影响开挖断面的平整度与稳定性。孔距、排距和延时组合的合理性，决定了能量释放的连续性与协同性，若控制得当，不仅能有效降低对施工人员与设备的风险，还能显著提升爆破轮廓的成型质量。通过对安全与质量双重因素的考量，确保爆破施工的整体效果达到工程要求。

2 关键爆破参数变化对岩体破碎效果的对比研究

2.1 孔距排距调整对岩体破碎形态的影响

孔距和排距的合理组合决定了岩体在受爆炸荷载时的破裂模式和破碎均匀度。较小的孔距能使爆破能量在相邻炮孔之间形成有效叠加，产生宽而深的破碎带，适合坚硬岩体的强制性破碎，但钻孔数量和炸药消耗也随之增加。较大的孔距则能降低钻孔成本和药量，但能量传递范围有限，常出现裂隙不连贯、残留大块石料的情况，需增加机械二次破碎。排距的调整对块度分布影响更为明显，当排距过大时，能量耦合不足，爆破轮廓线呈现不规则状态，破碎形态难以控制；排距过小时，能量高度集中，可能出现过度粉碎，使块度不均且增加弃渣处理难度。在复杂地质条件下，通过优化孔距排距匹配关系，不仅能显著改善断面轮廓的整齐度，还能实现爆破均匀性与经济性的兼顾。

2.2 单孔装药量变化对破碎范围与均匀度的作用

单孔装药量直接决定爆破能量释放的强度与破碎范围。装药量增加时,岩体内部裂隙延伸更深,爆破影响半径扩大,可在坚硬完整岩体中形成有效贯通裂缝,但若超过岩体极限承载力,会导致爆破区瞬时冲击过强,引发飞石和高强度振动,对施工环境构成风险。装药量减小时,虽然能有效降低震动与飞散物,但破碎程度不足,常产生大块石,降低运输与清渣效率。研究表明,最佳装药量应与岩体的密度、层理及抗拉强度相匹配,确保能量释放既能形成连续裂隙网,又不会造成能量浪费或安全隐患。合理调控装药量,使爆破在破碎范围和均匀度之间取得平衡,是提高施工质量和效率的重要环节。

2.3 起爆延时设计对能量耦合及震动控制的效果

起爆延时控制的是不同炮孔爆炸能量的时间差,其设计直接影响能量的空间耦合和震动效应。较短延时能够在相邻炮孔间形成叠加效应,使能量集中释放,裂缝快速贯通,适合大规模坚硬岩体的高效破碎,但同时伴随高强度振动和飞石风险。较长延时则能减缓能量释放过程,使爆破作用逐步传递,降低瞬时振动峰值和气浪冲击,更利于保护邻近建筑或水工结构。通过对比试验发现,合理的延时方案不仅能提高能量利用率,还能控制震动传播方向和衰减速度,使爆破在安全与效率之间达到平衡。不同地质条件下选择适宜的延时时间,是确保破碎效果与环境安全的重要手段。

3 复杂地质条件下爆破参数优化方法的技术探讨

3.1 软硬互层岩体环境下参数优化的适应性分析

在软硬互层的地质条件下,硬质岩层因抗拉强度高,需要爆炸能量集中作用才能形成有效的贯通裂隙,而软质岩层在相同能量条件下则容易发生过度破碎甚至剥落,造成块度失衡和施工表面不规则。为适应这种差异,参数设计应区分对待:在硬质层中适度缩小孔距并提高单孔装药量,以增强能量集中作用,保证破碎深度和范围;在软质层中则需降低装药强度和能量输入,避免出现粉化或大量碎石堆积。通过这种差异化控制,可有效平衡不同岩层的破碎效果,使整体开挖断面保持均匀性与稳定性,既提高了爆破效率,又减少了因局部破碎过度或不足带来的二次处理工作量。

3.2 断层破碎带条件下爆破能量控制的措施研究

断层破碎带通常表现为岩体松散、结构错动频繁及应力分布不均,爆破过程中能量极易沿断裂面泄散,

导致有效破碎不足,同时还可能引发大范围震动与失稳风险。为实现能量的有效控制,可以采用分段装药方式,使能量分散释放,避免单点集中引发失稳;同时结合预裂爆破技术,在断层带两侧形成控制裂缝,以减弱爆炸能量的无效扩散。合理布置孔深与起爆顺序,能够改变能量传导路径,使爆炸效应更可控。通过以上措施,不仅能减少断层区域的施工隐患,还能显著提高能量利用率,保证破碎效果的均匀性。

3.3 高应力环境中爆破参数稳定性的评估

高应力岩体往往处于临界稳定状态,爆破作用极易诱发能量瞬时释放,出现冲击地压或大面积坍塌。为了确保施工安全,需要对岩体应力场进行实时监测,并结合监测结果优化爆破参数。装药量的大小、延时的长短及孔距排距的设置都必须经过严格计算与试爆验证。通过小规模的试爆实验,可以提前观察应力释放的反应模式,从而确定最优的参数组合,使能量释放速率处于可控范围。延时的合理设计不仅能减缓应力突释,还能促进能量逐级传导,降低突发破坏的风险。这种针对高应力环境的稳定性评估,为复杂地质条件下的安全施工提供了重要保障。

4 爆破参数对环境影响与控制措施的综合研究

4.1 爆破振动参数调整对周边结构稳定性的影响

爆破振动往往对水坝、隧洞等重要结构产生潜在威胁。振动峰值与装药量、孔距以及延时密切相关。通过减小单孔装药量并合理延长延时时间,可以降低振动峰值,使振动波在传播过程中迅速衰减,从而减少对周边结构的干扰。监测数据表明,经过优化的爆破参数能使振速下降曲线更平缓,显著降低了地震效应强度。尤其在靠近已建成或正在运行的水利设施区域,振动控制对结构安全至关重要。通过对比实验与实测分析发现,优化后的参数不仅控制了振动影响范围,还增强了爆破能量的利用效率,使破碎效果与安全需求得到统一。

4.2 爆破飞石风险降低的参数控制策略

飞石问题是爆破施工中最常见且危害性较大的安全隐患之一,其产生机理与装药量、封孔条件及气体泄放路径密切相关。当装药量偏大或封孔不严时,爆炸气体会迅速逸散,推动岩块高速飞出,形成不可控风险。通过缩短装药段并增加封孔材料的密实度,可以延长气体的作用时间,使能量逐渐传递至岩体内部,从而降低瞬间冲击力。优化孔距和排距设计,使能量在岩体中均匀扩散,避免局部能量集中导致单点抛射。在复杂地质条件下,采用分段装药和顺序起爆的方式,

可实现能量逐级释放，减少爆炸瞬间的强烈反应。工程实践表明，结合参数优化与防护措施，飞石抛掷距离明显缩短，施工安全水平得到有效提升。

4.3 噪声与粉尘控制中参数优化的实际效果

爆破作业过程中产生的噪声与粉尘往往伴随能量瞬时释放而出现，其影响范围不仅局限于施工现场，还会扩散至周边区域，对环境和健康带来双重压力。噪声主要源于爆炸气体的急剧膨胀与冲击波作用，过高的声压级容易引发听力损伤与心理不适；粉尘则因岩体的高速破碎与气体喷射而大量弥散，可能对呼吸系统造成负担。通过采用小药量多孔的起爆方式，能量被分散到多个孔内释放，爆炸冲击被分解，从而显著降低瞬时噪声峰值。延时合理设计则避免了多个炮孔同时起爆的情况，使爆炸声源错开，进一步削弱叠加效应。粉尘方面，控制炸药使用量并改善封孔密实度，能够减少气体携带粉尘的外逸量，使粉尘扩散速度降低。经过优化的爆破参数能有效减轻噪声和粉尘的危害，使施工过程更符合绿色环保和可持续发展的要求。

5 爆破施工参数优化对水利水电工程经济效益提升作用

5.1 爆破效率提高带来的工程工期缩短效果

在大型水利水电工程施工中，工期长短直接影响整体投资回报。参数优化能够提升一次爆破成功率，使岩体破碎更均匀，减少二次破碎与机械补充作业。破碎效率的提高，使钻孔数量和重复作业大幅减少，整体施工节奏加快。以水库基坑开挖为例，通过调整孔距、排距和装药结构，爆破后岩块块度均匀，装运和清渣效率明显提升。工期缩短不仅减少了人员和设备的长期占用，还能降低间接管理成本，推动工程快速进入下道工序，对大规模建设项目的整体进度具有积极意义。

5.2 参数优化对施工成本控制的经济意义

在水利水电工程爆破施工中，成本控制始终是影

响项目经济效益的重要环节，其中钻孔与炸药费用往往占据总成本的较大比例。若孔距和排距设计不合理，往往会导致钻孔数量过多，不仅增加人工和机械作业量，还会带来炸药使用量的过度消耗。通过科学优化孔距与排距，使钻孔分布与能量释放更为均衡，可以在保证岩体充分破碎的同时减少无效作业，从源头上降低材料和人工投入。装药量的精准控制可避免炸药浪费，并有效减少二次爆破与机械破碎作业的发生，从而节省燃油消耗和设备磨损成本。随着参数优化逐渐应用于不同规模工程，其带来的经济效益逐渐凸显，单位体积岩体的开挖成本明显下降，资源利用率也得以提升，为施工企业实现低投入高回报提供了可靠路径。

5.3 优化参数对长期运行稳定性与维护成本的价值

爆破参数设计对工程长期稳定性有着深远影响。破碎效果均匀能够保证开挖边坡平整，减少潜在的滑坡和塌落隐患，为后续结构施工创造良好条件。若爆破过程中岩体出现过度破碎或裂隙扩展，将增加边坡治理与支护的工作量，带来长期维护成本。而经过优化后的参数能有效控制裂缝范围，使开挖面保持稳定性，降低运行阶段加固与修复的频率。长期来看，优化参数不仅在施工阶段节约费用，更能工程运行周期中减少维护投入，提高整体经济效益和工程可靠性。

6 结语

本文围绕水利水电工程爆破施工参数展开系统探讨，分析了孔距排距、单孔装药量和起爆延时等关键因素对岩体破碎效果的影响，并结合复杂地质条件下的优化方法进行了阐述。研究表明，科学的参数设计不仅能改善岩体破碎均匀性，还能有效降低振动、飞石及粉尘等不利影响。参数优化对施工成本控制与经济效益提升具有显著作用，为保障水利水电工程的安全、高效与可持续发展提供了有益借鉴。

参考文献：

- [1] 刘志宏,陈立伟.爆破施工参数对水利工程岩体破碎效果的影响[J].水利科技与工程,2023,41(6):85-92.
- [2] 周建伟,孙晓晨.不同地质条件下爆破参数优化与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(4):721-730.
- [3] 黄志峰,高丽娜.起爆延时设计对水电工程施工安全的作用机理[J].水电能源科学,2022,40(10):112-118.
- [4] 赵成伟,吕敏华.爆破振动控制与环境保护措施探讨[J].爆破,2023,40(5):55-62.
- [5] 蒋凯文,邵玉梅.水电工程复杂地质条件下爆破参数优化技术分析[J].水利与建筑工程学报,2024,22(3):134-141.