

静态爆破技术在水利枢纽岩质高边坡开挖中的应用与参数优化

孙金利

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710068

摘要：为解决水利枢纽岩质高边坡临近水工建筑物开挖时传统爆破扰动大、安全风险高的技术难题，本文依托洪家渡水电站等工程，阐明静态破碎剂的膨胀作用机理与岩体准静态断裂力学机制，系统梳理水利高边坡施工工艺体系。采用 $L_9(3^4)$ 正交试验与遗传算法，以孔间距、排距、水灰比、养护时长为变量开展多目标参数优化，建立了完整岩体、碎裂岩体、风化岩体三套差异化施工参数组合。工程验证表明，优化后裂缝贯通率达 92% 以上，单循环施工工效提升 30%，单方开挖成本降低 18%，边坡质点振动速度控制在 0.5cm/s 以内，可有效保障边坡成型质量与长期稳定性。研究成果可为同类近坝区高边坡低扰动开挖工程提供技术参考。

关键词：静态破碎剂；岩质高边坡；水利枢纽；低扰动开挖；参数优化

引言

水利枢纽岩质高边坡开挖中，传统爆破振动与飞石易致边坡坍塌及结构损伤。静态爆破因无振动、无飞石、低扰动，成为近坝高敏感边坡的理想选择。国内外研究多聚焦破碎剂改良、孔网参数及膨胀压力理论，但现有成果主要针对通用硬岩，缺乏面向水利近坝区高陡顺向坡、强风化多层岩体的专项参数体系，亦未兼顾“安全—效率—成本”多目标协同。依据《水利水电工程爆破施工技术规范》（SL47-2020），坝体允许质点振动速度宜 $\leq 2\sim 5\text{cm/s}$ ，新浇混凝土区 $\leq 1.5\sim 2\text{cm/s}$ ，而传统爆破常达 $5\sim 10\text{cm/s}$ ，易超限。为此，亟须开展面向近坝高边坡的静态爆破参数系统优化。本文依次进行机理分析、工艺梳理、正交试验、多目标求解及工程验证，形成完整研究链条，以期同类工程提供借鉴。

1 水利岩质高边坡静态爆破技术理论基础

1.1 静态破碎剂膨胀作用机理

静态破碎剂以氧化钙为主要成分，遇水发生水化反应生成氢氧化钙，化学反应式为 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{Q}$ 。反应过程中固相体积增大至原来的 1.9~2.2 倍，在钻孔有限空间内可产生 30~80MPa 的径向膨胀压力。应力释放经历升压、持荷、衰减三阶段：水化初期应力快速攀升，中期保持稳定高压驱动裂缝扩展，后期随反应完成逐渐衰减^[1]。

1.2 施工关键参数及交互影响机制

静态爆破施工参数可归纳为三大类：（1）钻孔参数：孔径（32~50mm）决定装药量及单孔膨胀力，孔深

取破碎高度的 90%~95%，孔间距（30~60cm）与排距（40~80cm）为控制裂缝贯通的核心参数；（2）破碎剂参数：水灰比（25%~35%）影响反应速率与膨胀峰值，装填密度（ $1.4\sim 1.8\text{g/cm}^3$ ）决定单位体积膨胀功；（3）养护参数：养护时间（4~24h）需根据环境温度确定^[2]。

各参数间存在显著交互效应：环境温度每升高 10°C ，水化反应速率加快 1.5~2 倍，水灰比宜相应提升 2%~3% 以延缓反应；强风化岩体孔隙率高，装填密度宜较完整岩体降低 10%~15%，避免药剂沿孔隙渗漏流失。此类耦合关系需要在参数优化中统筹考虑。

2 静态爆破技术在水利枢纽岩质高边坡开挖中的工程应用

2.1 依托工程概况

本文以洪家渡水电站左坝肩高边坡治理为核心依托工程。该工程位于乌江上游，左坝肩存在倒悬体危岩，开挖最高达 50m，设计坡比 1:0.3~1:0.5。岩体主要为砂质板岩、泥质板岩及石英岩，层倾角 $15^\circ\sim 50^\circ$ ，受构造运动影响节理裂隙密集，强风化层厚 10~20m，属顺向坡。边坡距主坝不足 100m，距溢流面仅 30~50m，施工风险极高。设计要求采用分级开挖、分级支护原则，以静态爆破作为边坡开挖的核心工艺。密云水库第一溢洪道改建、构皮滩水电站溶槽开挖、铜头水电站边坡刷坡等工程作为效果验证案例在后续章节中引用分析。

2.2 施工工艺设计与优化

施工工艺流程为：施工准备 → 测量放线 → 钻孔 → 清孔 → 药剂拌制 → 装药封堵 → 养护 → 破碎清渣 → 坡面验

收 → 锚喷支护。钻孔前需确保至少一个临空面，钻孔与自由面平行。中硬质岩孔径取 40mm，孔间距取 300mm（V~X 级普氏岩石坚固性系数分级）。采用潜孔钻机或手持钻机钻孔，孔位偏差控制在 ±20mm 以内。

倾斜孔（俯角或仰角 > 15°）与水平孔采用胶泥状药剂装填：将拌制好的药剂搓成直径略小于孔径的条状，分层送入孔内，每层厚度控制在 20~30cm，逐层捣实。垂直孔可采用流动性浆体灌装。装至孔口后以黄泥或专用堵孔剂密封堵，堵孔长度不小于 15cm，水平孔需采取防药剂回流措施。施工前在典型地质区段布设先导试验段，以裂缝贯通率及破碎块度均匀性为判定标准确定最优参数后，再行大面积推广施工^[3]。

2.3 应用效果综合分析

密云水库竣工后三年巡视检查与仪器监测表明，采用静态爆破开挖的边坡运行良好，未出现明显变形或破坏迹象。构皮滩水电站溶槽开挖中，静态爆破在距高边坡不足 10m 条件下顺利浇筑拱坝混凝土。铜头水电站距坝不足 30m 边坡刷坡中，静态爆破有效保证了大坝结构安全^[4]。

从全生命周期成本来看，静态爆破单方直接开挖费用虽为传统爆破的 10~12 倍，但计入安全防护费（节约 80%）、边坡修复费（节约 90%）及工期成本后，综合费用约为传统爆破的 2~3 倍，在近坝特殊工况下具有不可替代性。数值模拟表明边坡安全系数大于 1.20，稳定性良好。

表 2 极差分析表（以裂缝贯通率为目标）

水平	A 孔间距	B 排距	C 水灰比	D 养护时长
K1	92.3%	88.7%	79.3%	76.0%
K2	76.7%	72.0%	78.0%	79.7%
K3	55.1%	60.2%	63.6%	65.2%
极差 R	37.2%	28.5%	15.3%	9.6%

交互效应分析表明，孔间距与排距的匹配关系对破碎均匀性影响显著：小间距大排距易造成浅层过度破碎而深层破碎不足，大间距小排距则表层裂缝贯通不良，需按最优孔排距比协同设计。水灰比与养护时长呈反向协同关系：低水灰比条件下适当延长养护时间可补偿反应速率不足，高水灰比时反应加快但峰值应力提前衰减，需缩短养护周期以避免应力松弛。

3 水利枢纽岩质高边坡静态爆破施工参数优化研究

3.1 试验方案设计

以边坡扰动最小化为首要约束（权重占比 40%），破碎效率（30%）与经济成本（30%）为辅助目标，构建多目标优化框架。选取钻孔间距（A）、排距（B）、水灰比（C）、养护时长（D）为核心变量，采用 L₉（3⁴）正交表安排试验，各因子三水平取值如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表

水平	A 孔间距/cm	B 排距/cm	C 水灰比/%	D 养护时长/h
1	30	40	24	8
2	40	50	27	12
3	50	60	30	16

评价指标包括：裂缝贯通率（相邻孔裂缝贯通长度/总孔间距长度 × 100%）、单次破碎方量、边坡平整度（2m 靠尺检测最大偏差值）及单方开挖成本。以完整中硬岩（饱和单轴抗压强度 60~100MPa）为标准试验对象。

3.2 关键参数敏感性分析

极差分析结果（表 2）表明，各因子对裂缝贯通率的影响敏感度排序为：孔间距（极差 R = 37.2%）> 排距（R = 28.5%）> 水灰比（R = 15.3%）> 养护时长（R = 9.6%）。孔间距由 30cm 增至 50cm 时，裂缝贯通率由 95% 降至 48%，其偏差 5cm 可引起贯通率变化 10%~15%，为最敏感参数。排距对破碎深度方向的连续性影响突出，最优孔排距比宜取 0.7~0.8。

3.3 多目标参数优化结果

采用多元回归建立裂缝贯通率预测模型： $Y = 156.2 - 1.84A - 1.12B + 1.56C + 0.81D - 0.012AB - 0.045AC$ （决定系数 $R^2 = 0.89$ ）。以边坡安全系数 ≥ 1.2、质点振动速度 < 0.5cm/s、超欠挖控制在 ±15cm 以内为约束条件，通过遗传算法求解 Pareto 最优解集，获得三类典型岩体的最优施工参数组合（表 3）。

表 3 不同岩体最优施工参数对照表

岩体类型	孔径/mm	孔间距/cm	排距/cm	水灰比/%	装填密度/g · cm ⁻³	养护时长/h
完整岩体	42	35	45	26	1.70	12
碎裂岩体	42	45	55	28	1.55	10
强风化岩体	40	50	60	30	1.45	8

3.4 优化参数工程验证

将优化参数组合应用于洪家渡水电站典型试验段，优化前后核心指标对比如表 4 所示。裂缝贯通率由 72% 提升至 92%，钻孔数量减少 20%，药剂单耗降低 15%，

单循环工效提升 30%，单方成本下降 18%，超欠挖控制在 ±10cm 以内。采用声波仪检测爆破前后保留岩体波速变化，波速降低率 < 5%，验证了低扰动效果。边坡深层位移无异常变化，安全系数满足规范要求^[5]。

表 4 优化前后核心指标对比

指标	优化前	优化后	变化率
裂缝贯通率	72%	92%	+27.8%
钻孔数量/延米	125 延米/m ³	100 延米/m ³	-20%
药剂单耗	4.5kg/m ³	3.8kg/m ³	-15.6%
单循环工效	12m ³ /循环	15.6m ³ /循环	+30%
单方成本	基准值	基准值-18%	-18%
超欠挖量	±18cm	±9cm	-50%
质点振动速度	0.8cm/s	0.4cm/s	-50%

结束语

本文通过理论分析、正交试验与工程验证，形成以下核心结论：（1）阐明了水利岩质高边坡静态破碎的力学机制，明确了多孔联动条件下裂缝沿最大主应力方向扩展的规律，揭示了岩体结构面对裂缝扩展的引导与潜在滑移风险的双重效应，以及岩体含水率 5% 为软化主导与卸载主导的量化分界阈值。（2）通过正交试验与极差分析，明确了孔间距、排距为破碎效果的主控参数，敏感度排序为孔间距 > 排距 > 水灰比 > 养护时长，并量化了各因子的影响权重。（3）建立了完整岩体、碎裂岩体、强风化岩体三类典型工况的最优施工参数体系，工程验证可提升工效 30%、降低成本 18%，质点振动速度控制在 0.5cm/s 以内，满足近坝区低扰动开挖安全要求。

本文的创新点在于：针对水利近坝高边坡特殊工况，构建了多目标优化的差异化静态爆破参数体系，并量化了多参数耦合作用对破碎效果的影响规律。研究仅针对氧化钙类静态破碎剂开展，未覆盖 CO₂ 静态爆破等

新技术；工程验证以顺向坡为主，逆层坡及复杂节理岩体尚需进一步研究。后续可结合智能监测技术实现施工参数的动态调整与实时优化。

参考文献

[1] 王小飞, 胡少斌, 王恩元.CO₂ 静态爆破边坡振动场地效应及能量特性研究 [J]. 爆破,2024,41(01):210-224.

[2] 吕小强, 江鹏, 王博. 基于电子雷管的高陡边坡深孔预裂爆破参数设计及振动效应分析 [J]. 水利建设与管理,2025,45(07):32-37.

[3] 王首斌. 公路岩质高边坡硬岩静态爆破数值模拟与参数优化 [J]. 价值工程,2024,43(31):105-107.

[4] 张冲, 刘小强, 胡璇. 水电站坝肩岩质高边坡开挖变形控制与爆破优化技术 [J]. 岩土工程学报,2025,47(03):477-486.

[5] 李鑫, 张建军. 水利工程岩质高边坡静态爆破施工工艺及参数优化 [J]. 水利科技与经济,2023,29(08):112-116.