

深厚高含巨粒砂砾石地层中防渗墙造孔工艺优化研究

文 / 王晓亮 中国水电建设集团十五工程局有限公司

摘要：深厚高含巨粒砂砾石地层防渗墙造孔面临塌孔、卡钻、偏孔等难题。研究通过主副孔“小高差”平行钻劈工艺优化，结合黏土垫层与泥浆调控提升造孔稳定性；引入定向聚能药包爆破技术应对硬岩障碍，明确药包构造、参数匹配及安全控制要点；建立卡钻与偏孔“预防-处置”体系，开发修边铲、震杠-套筒等专用工装。该优化工艺为类似地层防渗墙施工提供技术支撑。

关键词：防渗墙；造孔工艺；聚能爆破；卡钻处理；偏孔控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.019

引言

深厚高含巨粒砂砾石地层以漂石含量高、粒径大、结构松散为显著特征，给防渗墙造孔带来诸多挑战，如塌孔风险高、硬岩破碎难、孔斜控制复杂等。如何提升该类地层造孔效率与质量成为工程焦点。造孔工艺优化通过分层施工增强稳定性，聚能爆破技术针对性解决硬岩障碍，卡钻偏孔处理体系保障施工连续性，系列技术为防渗墙施工提供关键支撑。

一、造孔工艺优化与分层施工技术

(一) 槽段精细化分层与钻劈顺序优化

在槽段划分层面，依据防渗墙厚度（1.0m）及地层特征，将单个槽段划分为主孔、副孔及小墙结构，采用“小梯段”分层成槽工艺，单循环施工深度控制在6~10m，

以规避因一次性钻进深度过大导致的孔壁稳定性劣化问题。以6m槽段为例，具体孔位布置为3个主孔（孔径与墙厚一致）、2个副孔，孔间距遵循“主孔间距≤3m、副孔居中布置”原则（见图1）。施工过程中采用2台乌卡斯冲击钻（BZCZ-6A）实施平行作业：1号钻机首先对1#主孔实施钻劈，至10m深度后移位至2#主孔的5~10m段；与此同时，2号钻机同步完成2#主孔0~10m段及3#主孔全深的钻劈作业。此工艺通过控制同深度段主孔同步完成，将单孔暴露时间缩短40%以上，显著降低了因长时间停滞导致的孔壁坍塌概率^[1]。在小墙施工环节，采用“低高差跟进”策略，即小墙钻劈深度较主副孔当前循环深度低2~3m，形成阶梯状施工界面，进一步减小孔壁侧向应力集中。

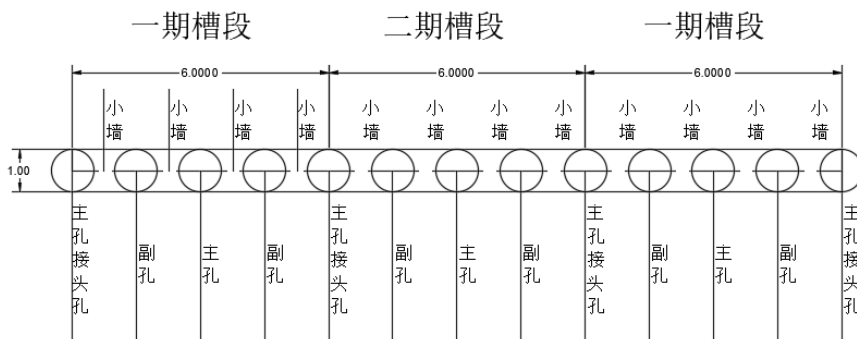


图1 槽孔划分示意图

(二) 黏土垫层设置与泥浆性能协同调控

主副孔钻劈完成后，于孔底铺设1~2m厚黏土垫层，利用黏土的高黏性特征提升孔底泥浆浓度（密度可提升至1.35~1.40g/cm³），加速小墙劈打过程中掉落渣料的沉淀效率。该垫层可使沉渣粒径≥5mm的颗粒在30min内沉淀至孔底，较传统工艺缩短清渣时间50%以上。泥浆性能控制方面，严格执行漏斗黏度≤35s、密度≤1.3g/cm³、含砂量≤8%的指标体系；通过在泥浆站配置4台ZJ-1500型高速搅拌机，实现黏土与水的高效混合；采用三级沉淀池（单池尺寸10m×3m×3m）进行泥浆净化，一级沉淀池停留时间≥2h，二级沉淀池≥1.5h，三级沉淀池≥1h，确保泥浆含砂量稳定控制

在标准范围内。此外，沿防渗墙轴线铺设Φ110mm输浆管路，其中供浆管流速控制在1.5~2.0m/s，回浆管流速≥1.2m/s，形成稳定的泥浆循环系统，有效抑制孔壁坍塌。

(三) 设备配置升级与钻具组合创新

针对1.0m厚防渗墙的成槽需求，核心设备采用9台乌卡斯冲击钻（BZCZ-6A），其最大冲击荷载达600kN，适配深度≤50m的造孔作业。钻具系统采用加重平底十字钻头，通过增设两层配重块（每层配重200kg），使钻头总质量提升至3.5t，配合1000mm高冲程、40次/min冲击频率，可有效破碎粒径≤2m的漂石^[2]。在砂卵砾石层占比>60%的地段，引入管钻工艺：钻具采

用 $\phi 200\text{mm}$ 实心钢棒作为配重杆，底部焊接弧形耐磨齿（材质为高锰钢，硬度 $\geq \text{HB}500$ ），通过钻头挤压地层与配重扩孔的协同作用，使造孔效率提升 20% ~ 30%。设备运行参数方面，泥浆泵（TBW 型）排量控制在 80 ~ 100m³/h，确保钻渣及时排出；钻机轨道采用 20kg/m 钢轨铺设，轨距 1.2m，轨道基础采用碎石垫层（厚度 30cm）+C30 混凝土硬化（厚度 20cm），保证钻机作业时的垂直度偏差 $\leq 0.3\%$ 。

（四）施工过程动态监测与参数调整

建立“深度-参数联动”调控机制，依钻进深度调整施工参数： $< 20\text{m}$ 时，“轻打勤放”，冲程 500-800mm，频率 45 次/min，泥浆密度 1.15-1.20g/cm³；20-40m 重打，冲程 1000mm，频率 40 次/min，泥浆密度 1.25-1.30g/cm³； $> 40\text{m}$ 采用“低频率、大冲击”，频率 35 次/min，泥浆泵排量 120m³/h 防沉渣。用 TS06 全站仪（精度 $\pm 2''$ ）放样，每 5m 以测斜仪（精度 $\pm 0.2^\circ$ ）检孔斜率，超 4% 即回填碎石与黏土（3:1）纠偏。实时记录数据建库，动态优化钻劈参数。

二、定向聚能药包爆破技术在硬岩造孔中的应用

（一）聚能药包的精细化构造与制备工艺

聚能药包以 $\phi 108\text{mm}$ 无缝钢管为外壳，抗压强度 $\geq 200\text{MPa}$ 、抗弯折变形量 $\leq 1.5^\circ/\text{m}$ 。底部浇筑黏土形成 $60^\circ - 90^\circ$ 聚能槽，深 8-10cm，内涂 2-3mm 黄油防水。中部用 $\phi 80\text{mm}$ 乳化炸药连续耦合装填，密度 1.0-1.2g/cm³，装药长为药包总长 60%-70%。上部以黏土分层夯实封堵，长 $\geq 20\text{cm}$ ，每层 5-8cm，密度 $\geq 1.8\text{g/cm}^3$ 。制备时用电子秤控药量（误差 $\leq \pm 1\%$ ），万用表测起爆网络电阻（5-10 Ω ），保障药包性能稳定。

（二）基于孔深的爆破参数动态匹配机制

爆破参数需依据孔深、障碍物性质及周边环境动态调整^[3]。浅孔段（5-10m），针对 3-5m 粒径漂石，单孔药量 3-4kg，单药包爆破，药包距孔底 0.5-1.0m，用单段 50ms 毫秒雷管起爆，使漂石破碎至 $\leq 1.5\text{m}$ 。中深孔段（10-30m），遇多层漂石或基岩凸起，药量 5-6kg，

采用“分段装药+间隔器”工艺，双回路并联起爆，雷管延期 100ms，控制破碎块度 $\leq 1.0\text{m}$ 。深孔段（ $> 30\text{m}$ ），针对巨型漂石或坚硬基岩，药量 8-10kg，用“聚能药包+扩大头”技术，装密 1.5g/cm³，起爆前按需排水。

（三）药包定位与起爆网络的可靠性控制

药包吊放过程中，将药包固定在竹杆上，利用竹杆将其缓慢放入孔内。当药包接近孔底（距孔底 1 ~ 2m）时，及时改用人工辅助对位，确保聚能槽轴线与漂石中心偏差 $\leq 10\text{cm}$ ，实现药包精准定位。起爆网络采用“复式闭合回路”创新设计，每个药包配备 2 发起爆雷管（型号为 MS3），通过 $\phi 1.5\text{mm}$ 铜芯导线并联接入主回路，主回路电阻值严格控制在 8 ~ 12 Ω 。网络连接完成后，采用柔性材料（如橡胶帘布）对孔口段导线进行覆盖绑扎，覆盖长度 $\geq 2.0\text{m}$ ，有效防范泥浆冲击或钻具碰撞导致的线路破损风险^[4]。爆破前需全面进行全线路导通测试，确保电压稳定在 220V $\pm 10\%$ ，电流强度 $\geq 2.5\text{A}$ ，为起爆提供充足能量保障。

（四）爆破后处理工艺与质量控制

爆破完成后，需使孔内泥浆静置 30 ~ 60min，待渣料初步沉淀后，采用容积 1.0m³ 的抽砂桶开展清渣作业。清渣过程中，借助测绳实时检测孔底沉渣厚度，若厚度 $> 50\text{cm}$ ，需采用“泵吸反循环法”进一步清理（泥浆泵排量 $\geq 150\text{m}^3/\text{h}$ ，抽吸压力 0.3 ~ 0.5MPa）。对于爆破后残留的大块渣料（粒径 $> 1.5\text{m}$ ），可实施“二次补爆”工艺：首先精准测量残留渣料位置，然后下放小型聚能药包（装药量 1 ~ 2kg， $\phi 150\text{mm}$ 钢管制作）至渣料顶部 0.5m 处，实施定向破碎。清渣完成后，运用超声波孔壁检测仪对槽孔垂直度、孔径进行严格检测，要求孔斜率 $\leq 6\%$ ，孔径误差 $\pm 5\text{cm}$ 。若检测发现孔壁存在局部塌落，需及时回填塑性指数 $I_p \geq 17$ 的黏土至塌落段以上 2.0m，静置 24h 待孔壁稳定后，重新开展钻劈作业，确保槽孔质量符合施工标准。以下是定向聚能药包爆破技术关键数据参数：

表：定向聚能药包爆破技术数据参数表

序号	项目分类	关键数据参数
1	药包外壳	$\Phi 108\text{mm}$ 无缝钢管，抗压强度 $\geq 200\text{MPa}$ ，抗弯折变形量 $\leq 1.5^\circ/\text{m}$
2	聚能槽	角度 $60^\circ \sim 90^\circ$ ，槽深 8 ~ 10cm，黄油防水层厚度 2 ~ 3mm
3	装药参数	$\Phi 80\text{mm}$ 乳化炸药，装药密度 1.0 ~ 1.2g/cm ³ ，装药长度为药包总长 60% ~ 70%
4	封堵要求	黏土封堵长度 $\geq 20\text{cm}$ ，分层夯实每层 5 ~ 8cm，夯实密度 $\geq 1.8\text{g/cm}^3$
5	装药量	5 ~ 10m 段 3 ~ 4kg，10 ~ 30m 段 5 ~ 6kg，30m 以下 8 ~ 10kg
6	药包定位	吊放速度 0.3 ~ 0.5m/s，聚能槽轴线偏差 $\leq 10\text{cm}$
7	起爆网络	主回路电阻 8 ~ 12 Ω ，电压 220V $\pm 10\%$ ，电流 $\geq 2.5\text{A}$
8	清渣标准	沉渣厚度 $> 50\text{cm}$ 时处理，泥浆泵排量 $\geq 150\text{m}^3/\text{h}$ ，抽吸压力 0.3 ~ 0.5MPa
9	质量检测	孔斜率 $\leq 6\%$ ，孔径误差 $\pm 5\text{cm}$ ，回填黏土塑性指数 $I_p \geq 17$ ，静置时间 $\geq 24\text{h}$
10	二次补爆	小型药包 $\phi 150\text{mm}$ ，装药量 1 ~ 2kg，吊放至渣料顶部 0.5m 处

三、卡钻与偏孔问题的预防及处理措施

(一) 上卡钻预防与修边铲处置技术

上卡钻的核心诱因因为孔壁暴露时间过长或施工高差控制不足,导致漂石塌落侵入槽孔。预防阶段需严格执行“小高差同步施工”原则,主副孔与小墙的垂直施工高差控制在 $\leq 2\text{m}$,单孔暴露时间不超过24h。钻机作业时,采用TS06全站仪实时监测孔口位移(精度 $\pm 2\text{mm}$),当位移速率 $> 3\text{mm/h}$ 时,立即暂停施工并回填黏土至孔口以下5m,待孔壁稳定后再继续钻进。

一旦发生上卡钻(钻头提升阻力 $>$ 钻机额定荷载的1.2倍),采用修边铲实施处置。修边铲由 $\phi 200\text{mm}$ 实心钢棒(长5m,配重2.5t)、弧形铲头(钢板厚度20mm,弧度与槽孔曲率一致)、主副吊环组成。操作时,通过钻机副绳(破断拉力 $\geq 200\text{kN}$)将修边铲下放至卡钻位置,以 0.5m/s 速度提升至孔内漂石顶部,然后以 $30\sim 40$ 次/min频率循环重击,每次冲击冲程 $800\sim 1000\text{mm}$ 。重击过程中,同步向孔内注入高密度泥浆(密度 1.35g/cm^3),利用泥浆悬浮力携带破碎渣料排出^[5]。当钻头提升阻力下降至额定荷载的1.0倍以下时,停止作业并缓慢提钻,提钻速度控制在 $0.2\sim 0.3\text{m/s}$,避免二次卡钻。

(二) 下卡钻预防与“震杠-套筒”联合处置工艺

下卡钻主要发生在孔底漂石架空或基岩面不规则区域,预防措施包括:①钻至基岩面以上5m时,将冲击冲程降至 $500\sim 800\text{mm}$,频率提升至 45 次/min,采用“轻击慢进”模式试探性钻进;②利用超前钻(孔深超出设计底线2m)探明基岩面起伏形态,对凸起高度 $> 1.5\text{m}$ 的区域预先标记,采用聚能药包爆破削平。

若发生下卡钻(钻头嵌入深度 $> 1.0\text{m}$),首先采用震杠松动岩体。震杠为 $\phi 250\text{mm}$ 实心钢棒(长4m,配重3.0t),下部2m范围内对称焊接3组 $\phi 70\text{mm}$ 钢棒(每组间距50cm),总重量增加至4.2t。通过副绳将震杠提升至距钻头顶端1.0m处,以自由落体方式震击钻头,单次震击能量 $\geq 200\text{kJ}$,震击频率 $10\sim 15$ 次/min。若连续震击30min后钻头仍无法移动,则启用套筒工艺:套筒采用 $\delta=16\text{mm}$ 钢板卷制(直径大于槽孔20cm,长5m),下部2m范围内等距焊接 $\phi 70\text{mm}$ 钢棒(间距30cm),总重量5.5t。通过另一台钻机主绳将套筒下放至卡钻位置,套住钻头外圈后,以500mm冲程、20次/min频率冲击,利用套筒的扩孔作用解除卡钻。处置过程中需实时监测孔内泥浆压力,当压力 $> 0.2\text{MPa}$ 时,开启泥浆循环系统泄压,防止孔壁坍塌。

(三) 偏孔预防的全过程控制体系

偏孔预防需贯穿造孔全流程,核心措施包括:

地质勘察深化:采用孔内CT扫描技术(分辨率 0.1m)对槽孔下方5m范围内地层进行三维成像,识别漂石分布密度 $> 40\%$ 或粒径 $> 2\text{m}$ 的高风险区域,针对性调整钻劈顺序。

钻机基础强化:轨道基础采用级配碎石(粒径 $20\sim 40\text{mm}$)分层填筑,每层厚度30cm,振动碾碾压 $6\sim 8$ 遍(压实度 $\geq 95\%$),上铺20cm厚C30混凝土,平整度误差 $\leq 3\text{mm/m}$ 。

动态垂直度监测:每钻进5m采用JJX-3型测斜仪(精度 $\pm 0.1^\circ$)检测孔斜率,当偏差 $> 2\%$ 时,立即调整钻机位置(平移量 $\leq 5\text{cm}$)并更换导向钻头(直径大于槽孔5cm)进行修孔。

(四) 偏孔修正的复合工艺应用

对于孔斜率 $> 4\%$ 的偏孔段,采用“回填修孔+纠偏器定向”复合工艺进行修正:

回填修孔:向偏孔段回填碎石(粒径 $40\sim 80\text{mm}$)与黏土(塑性指数 $I_p=18$)混合物,回填高度超出偏斜点顶部 $2\sim 3\text{m}$,静置 $12\sim 24\text{h}$ 使填料固结。采用冲击钻低冲程(500mm)、高频率(50次/min)重新钻进,每进尺1m检测孔斜率,直至满足 $\leq 4\%$ 要求。

纠偏器定向修孔:纠偏器由 0.7m 宽支撑板($\delta=20\text{mm}$ 钢板)、5根 $\phi 70\text{mm}$ 加强肋(间距 1.0m)、三角形支座(底宽 0.6m ,高 2m)组成,总重量4.8t。通过测绳确定偏孔位置后,利用副绳将纠偏器下放至偏斜段顶部,调整其支撑板贴合偏孔侧孔壁,然后下放钻头至同一高程,以 800mm 冲程、 35 次/min频率冲击,利用纠偏器的导向作用强制修正孔斜率。修孔过程中,每2m取芯检测孔壁平整度(误差 $\leq 5\text{cm}$),直至全孔斜率达标。

结语

深厚高含巨粒砂砾石地层防渗墙造孔工艺优化,通过主副孔“小高差”分层钻劈、黏土垫层与泥浆协同调控,提升了造孔稳定性与效率;定向聚能药包爆破技术解决了硬岩破碎难题,明确了药包设计、参数匹配及安全控制要点;卡钻与偏孔预防处理体系,依托专用工装与复合工艺确保了成孔质量。系列技术形成系统性解决方案,为类似复杂地层防渗墙施工提供了可借鉴的技术路径与实践经验。

参考文献

- [1] 于耀龙,刘霞,姜旭.防渗墙造孔施工中泥浆质量控制[J].中国水能及电气化,2024,(05):13-16+26.
- [2] 武奇维,韩用伟,连常成,等.防渗墙成套造孔挖槽工法技术体系分析[J].工程建设与设计,2021,(19):164-166.
- [3] 刘朕,杨仁树,左进京,等.新型双聚能药包裂纹扩展规律及周边控制爆破试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(06):1171-1184+1197.
- [4] 方程.破碎围岩切缝聚能水压光面爆破技术应用研究[D].昆明理工大学,2023.
- [5] 陈志超,段斌,王海胜,等.QC小组活动在金川水电站混凝土防渗墙施工中的应用[J].工程质量,2024,42(07):76-79.

作者简介:王晓亮(1992年-),男,汉族,大学本科,工程师,主要从事水利水电工程施工技术研究与管理。