高压喷射灌浆技术在水利地基处理中的参数优化与施工质量提升

王若飞

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘　要】：水利工程复杂地基渗透性强、承载力不足、地层杂乱，高压喷射灌浆施工参数适配不佳，成桩缺陷频发。文章对照三类高喷工艺适用地层，剖析射流扰动、浆土固结、防渗耦合机理，建立钻进、喷射、浆液配比、分层调参四项参数调控体系。结合工前校验、数字化监测、缺陷整改、工序管控落实全过程质控，制定量化验收标准，依托无损、钻芯检测核验施工效果。水库工程实测证明，优化参数可改良地基受力状态，减少渗流，消除地层缩径、桩体渗漏问题，提升地基防渗与承载能力，为水利隧洞、坝基加固施工提供技术参考。

【关键词】：高压喷射灌浆；水利地基；参数优化；防渗加固；质量管控

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.074

引言

我国水库、水工隧洞等水利项目多分布于地质条件复杂区域，软土、砂卵石、风化破碎夹层等不良地基普遍存在渗漏、承载力不足等隐患。传统高压喷射灌浆施工多采用统一固化参数，未结合地层差异动态调整，极易出现桩体搭接不密实、内部空洞、渗流通道等质量问题。基于此，本文区分三类高喷工法适配地层，系统阐述浆土固结与防渗加固耦合作用机制，搭建多维度施工参数调控框架，从前期试验、过程监测、缺陷处理、完工检测全链条建立质量管控体系，并结合实际水库工程开展应用验证，论证分层调参、浆液改性、数字化管控对复杂地基处理的改善效果，为同类水利地基治理工程提供实操依据。

1 高压喷射灌浆技术分类及水利地基作用机理

（1）单/双/三管喷射工艺适用地层特征：单管、双管、三管三类喷射工艺依靠介质供给体系差异适配水利工程不同地层，单管工艺采用 20~30MPa 高压水泥浆液切削扰动土体，射流覆盖范围有限，固结体有效半径 0.6m，适配均质粉质黏土、淤泥质浅层软土等细颗粒地层，多用于小型坝肩防渗加固，地层含砂易产生浆液溢流、桩体缩径问题；双管工艺同步输送高压浆液、压缩空气，气流拓宽浆液扩散范围，成桩半径 1.0m，适配粉细砂层、软硬交替地基，多用于中小型水库浅层防渗帷幕施工；三管工艺搭配高压水、压缩空气、水泥浆液，高压水破碎砂卵石、风化夹泥层，空气阻隔浆液回流，浆液填满土体孔隙，切割性能变强，固结半径超 1.5m，适配深层风化夹层、破碎带地基，多用于高水头大坝、隧洞围岩防渗加固施工。（2）高压射流切割搅拌与浆土固结机理：高压射流切割搅拌顺着浆土固结节奏完成整套作用流程，超高压流体经由喷嘴高速喷射生成冲击动压，动压超越土体固有抗剪强度，地层原生结构受剪切持续破损，钻杆一边旋转一边向上抬升，破碎土粒裹挟水泥浆液相融拌合，生成均质浆土混合物，水泥水化催生硅酸钙凝胶、钙矾石等胶结物质，填补岩土内部空隙，颗粒粘结力稳步上涨，生成整体性密实水泥土固结体。喷嘴孔径、抬升速率、回转速度改动射流拌合路径，施工参数配比失衡，土体切割、浆土拌合效果同步变差，固结体滋生空腔、层状缝隙，削弱结构防渗、承载两类基础性能。（3）水利复杂地基防渗、加固协同作用机制：水利复杂地基环境中，高压喷射灌浆生成的固结体兼顾防渗阻水、土体加固两项工程效能，柱状、板状固结体交错搭接构筑闭环防渗屏障，固结体渗透系数可控在 10^{-7}cm/s 以内，阻隔坝基、岸坡、隧洞围岩内部渗水通路，规避渗流坡降诱发的管涌、流土灾害；网格排布的刚性固结体承担地基承重骨架，分摊上部水工结构荷载并传递至深部稳固岩层，抬升土体抗剪刚度与承载能力，约束软土地基沉降、边坡位移形变。断裂带、泥化夹层这类不良地质，浆液渗入裂隙完成缝隙填塞，同步补强软弱地层力学性能，统筹防渗止水、地基维稳两项治理目标，适配水库、隧洞、挡水岸坡各类水工建筑复杂地基施工场景。

2 水利地基工况下高喷施工关键参数体系与优化方法

（1）钻进定位参数精细化优化控制：钻进定位把控高喷施工整体质量，水利深部钻孔施工深度处于 35~48m 区间，钻杆受力形变容易造成钻孔轴线偏移。施工现场搭载自带垂直度校正功能的工程钻机，把控钻孔偏差不超出 1‰，按照钻探深度更换刚性钻杆抵消杆件形变；联动激光、惯性导航完成三维点位校核，把孔位误差控制±30mm，杜绝桩体衔接位置出现渗水隐患。砂卵石地层更换合金材质钻头加快成孔速率，配合泥浆、套管支护孔壁维持 100~160mm 孔径，同步录入钻探实测数据判别地层类型，标定喷射施工高程，匹配后续各项注浆工况参数。

（2）喷射核心工艺参数匹配优化（压力、流量、提升、转速、喷嘴）：喷射五项核心参数贴合地层特质同步调校，喷射压力取值 20~50MPa，软土工况选用低压抑制浆液外溢，坚硬岩层依托高压破开岩土结构；浆液流量维持 30~80L/min，微调流量适配不同颗粒地层，维持桩体充填状态。抬升速率设定 20~60mm/min、回转速率控制 5~15r/min，两项指标协同调校改善浆土拌合状态；2~5mm 规格喷嘴贴合浆液黏度选配安装，减少管路堵浆故障。PLC 电控模块搭建参数调控链路，抵消地层不均衡扰动，平稳现场喷射工况，缩小施工质量波动幅度（见图 1）。

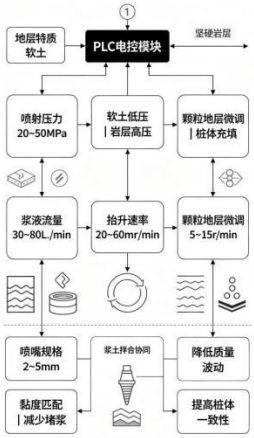

图 1 地层适配型喷射参数调控流程

（3）浆液配比与改性材料参数优化设计：浆液配比、改性材料适配水工浸水、承压环境针对性调试，基础水灰比普遍取用 0.8∶1，高渗裂隙防渗区段调低参数至 0.6∶1，收紧浆体内部结构；淤泥质软弱土层上调水灰比至 1.0∶1，优化浆液流变能力。断裂带、泥化夹层施工场地，掺加 0.5%膨润土锁住浆液水分，弱化水化失水引发的收缩裂隙，掺入 0.3%聚合物助剂加固浆土接触面，抵御高水压造成的土体剥离问题，防渗类注浆材料膨胀倍率不得低于 150%，依托微膨胀特质填补水化收缩缝隙，依托材料属性延长固结体防渗服役年限。

（4）分层分区动态参数调节技术路径：分层分区动态调参技术贴合水利地基纵横双向地质不均特质，钻孔竖向依照土层属性拆分喷射单元，软土夹层下调喷射压力、放慢抬升速率拉长拌合时长，砾石硬质夹层短时增压、扩大输浆流量，强化岩土破碎与浆液填充效果，完成单孔竖向差异化注浆作业；平面结合水工功能拆分施工板块，覆盖坝体防渗、软基处置、岸坡支护、隧洞止水多项工况。防渗帷幕选用三管工法，搭配 1.2~1.5m 窄孔距布设钻孔，地基格构施工下调射流压力、拓宽桩体排布间距，岸坡滑移地层布设斜向钻孔，维持 40MPa 以上注浆压力穿透剪切软弱层，隧洞放射注浆恒定 40L/min 输浆流量，约束浆液扩散边界包裹洞体外 2m 围岩，各个施工板块预设专属基准参数，现场钻探监测数据联动调校施工工况，抹平地质差异带来的加固防渗偏差。

3 基于参数优化的全过程施工质量管控体系

（1）工前试验段参数标定与质量基准建立：工前试验标定锚定现场质量管控基线，正式注浆作业前选取场区代表性地质断面布设试验钻孔，阶梯式调校喷射压力、输浆流量、浆液水灰比开展对标试喷。静置养护 28d 后依托压水、钻芯两类试验，核验固结体外形尺寸、力学强度、防渗性能，筛选适配场地工况的最优参数组合。依托试验结果划定全域地层合格判定标准，断层、淤泥土等特殊地层增设专项管控要求，整理生成工艺参数台账，规整全域施工执行标准，为现场验收、参数复盘提供量化依据，弱化规模化施工产生的质量波动。（2）信息化实时监测与参数闭环调控施工：工业以太网联动 CAN 总线搭建现场信息化监测框架，布设传感装置抓取喷射压力、回转转速、输浆流量关键工况数据，采样频次维持 10Hz 以上，实时同步至工程管控平台生成动态工况曲线。系统预设±10%参数浮动阈值，工况数据超限即刻触发告警、关停现场作业，联动电控单元自主排查并修正施工参数。作业全程留存运维数据归档电子台账，溯源核查单桩全工序施工行为，打造监测告警、参数纠偏一体化管控链路，规避人工操作带来的参数偏差隐患。（3）成桩成型过程缺陷预判与动态纠偏措施：研判监测参数波动规律预判施工隐患，落地动态调校完成现场处置。喷射压力骤然回落代表地层空腔、钻杆气密失效，停止钻杆抬升开展补浆作业；压力异常抬升指向喷嘴淤堵，下放钻杆疏通孔道释放管路压力；地表冒浆占比突破 20%，更换适配喷嘴、放缓提杆速率稳住浆液外溢。施工停工重启复喷阶段，下放钻杆搭接停喷断面下部 10~20cm，封堵界面防渗薄弱位置；现场出现桩径偏小、桩间搭接缝隙，加密增补注浆孔并微调周边工况参数，提前消解成桩病害，维持防渗帷幕整体完整性。（4）水利地基高喷施工标准化作业流程管控：整合工艺优化细则编制作业规范，划分地质复核、孔位放样、钻进护壁、试喷校验、分层注浆、封孔养护七道工序，各工序增设参数复核点位。钻孔验收通过后方可注浆，开工核对喷嘴、浆液配比贴合试验标准，地层变动同步留存台账，同步制作试块集中养护。每日归档施工异常数据，分项核查单元工程施工参数，不合格工序不予验收，依托作业规范约束现场施工，

防范人员擅自调整工艺参数。

4 水利地基高喷质量检测与参数优化工程应用验证

（1）固结体几何、强度、防渗性能量化检测标准：固结体检测围绕外形尺寸、结构强度、抗渗能力设立量化质控门槛，外形维度管控成型桩径偏差，浮动范围维持设计值±10%，桩身轴线最大偏移限值 75mm，保障桩间搭接密实不留缝隙。28d 养护无侧限抗压强度判定结构力学性能，普通防渗帷幕固结体强度下限 2.5MPa，承压软基加固工况上调至 4.0MPa，芯样强度离散系数控制 15%以内，规避局部强度缺陷衍生受力隐患；防渗指标划定渗透系数区间 1×10^{-8}~1×10^{-7}cm/s，坝体、隧洞高压渗流区域收紧指标至 1×10^{-8}cm/s，检测查出内部空腔、层间夹层、注浆空缺等病害，直接判定施工不合格，落实二次补喷返修处置。（2）无损检测+取芯联合质量核验技术：无损检测叠加钻芯取样开展联合核验，判别固结体内部成型状态。超声波透射法顺着桩体竖向安放收发探头，依托纵波传输速率判别内部空腔、软弱夹层，波速低于 1800m/s 的部位划为复核点位；500MHz 及以上频段地质雷达全域扫描，捕捉桩体轮廓、岩土介质异变位置，排查桩体搭接缺陷；声波测井比对灌浆前后地层波形振幅，振幅衰减率突破 40%判定固结密实度不满足施工要求；钻芯工序选用金刚石空心钻具，取芯孔径维持 75mm 以上，按照每 500 ㎡灌浆体不少于 1 处布设检测点位，钻取芯样开展抗压、干密度、渗透性室内试验，双向对照无损检测、实体取芯数据，核验施工参数适配水平，依托实测数据微调后续工区喷射工况。（3）典型水利地基工程参数优化应用案例：国内大型水库扩建工程可作为复杂水利地基实操案例，坝基遍布强风化花岗岩夹泥层、断裂构造带、饱和软弱夹层，衍生坝基渗水、岸坡滑移、隧洞围岩失稳多项工程隐患。项目全域应用三管高压喷射灌浆工艺，落实分层分区调参体系，坝体防渗帷幕布设 1.2m 孔距，注浆深度锁定 35~48m，浆液取用 0.8∶1 基础水灰比，掺配 0.5%膨润土搭配 0.3%聚合物改性材料。断裂破碎带上调喷射压力至 45~50MPa，提杆速率降至 25mm/ min；深层软基选用格构式布孔，射流压力下调至 30MPa，回转转速设定 12r/min；岸坡病害地层布设斜向钻孔，恒定 40MPa 注浆压力；隧洞放射注浆恒定 40L/min 输浆流量，约束浆液扩散边界。全套工艺落地完成后，叠加无损扫描、钻芯取样、原位压水试验完成全方位质量核验。（4）参数优化后地基加固防渗效果对比分析：该水库工程优化施工后实测检测数据反馈，软基加固区段固结体 28 天抗压强度均值 3.6MPa，地基剪切模量抬升至原状岩土 2.8 倍，隧洞止水固结体渗透系数稳定 9.7×10^{-9}cm/s，全部取芯试样不存在层间剥离、内部空腔缺陷，超声波检测判定桩体完整性全部合格。调取未采用分层调参、信息化管控的同类水工项目历史数据比对，本工程坝基整体渗流量削减 67%，地基长期沉降速率受控在设计限值以内，岸坡抗滑安全系数升至 1.52，隧洞围岩开挖形变缩减 72%，防渗帷幕压水试验一次合格率，由行业常规 83%上涨至 99%，固结体力学强度波动幅度明显收窄。实测比对印证，贴合地质条件搭建的全流程调参体系，兼顾地基加固强度、防渗耐久两类指标，消解复杂地层高喷施工成型不均、防渗缺陷、承载力偏弱施工难题，给同类水利地基整治工程提供可复用的参数调校、现场质控实施方案。

5 结语

文章厘清三类高喷喷射工艺适用范围，拆解加固防渗内在联动机理，搭建适配非均质地层的完整施工参数调整框架，梳理工前试验、现场监测、缺陷整改、竣工核验串联而成的整套质量管控逻辑。工程项目实操验证，地层针对性调参、浆液组分改良、数字化现场管控，改善桩基成型状态，抬高地基承载水平，强化地层隔水性能，削减渗透破损、边坡滑移隐患。研究划定水利高喷施工关键参数临界数值，填补传统施工参数粗放排布、现场管控缺位的行业漏洞。

参考文献：

[1] 张卫华,王树君.水利工程中高压喷射灌浆施工技术应用研究[J].工程机械与维修,2025,(9):88-90.

[2] 张姝,刘进关.高压喷射灌浆技术在水利工程建设中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(16):137-140.

[3] 刘登锋.基于高压喷射灌浆技术的水库工程大坝防渗漏施工工艺处理方法研究[J].水利科技与经济,2025,31(7):154-158.

[4] 胡静雅.高压喷射灌浆技术在水利工程防渗施工中的应用探讨[J].水上安全,2025,(10):154-156.

[5] 李俊生.高压喷射灌浆技术在水利工程建设中的应用[J].黑龙江水利科技,2024,52(7):115-117+138.