

水利水电工程基础灌浆中特殊地层高效处理技术创新与工程实践

姜晶晶

江西通天建设工程有限公司 江西九江 332000

【摘要】水利水电工程在国民经济发展中起着至关重要的作用。而基础灌浆技术是确保水利水电工程稳定性与安全性的关键环节。在特殊地层中进行基础灌浆面临诸多挑战，如大量吸浆、特大漏水通道、冒水、承压水以及岩溶地段等情况。深入研究特殊地层的灌浆方法，对于提高水利水电工程质量、保障工程的顺利运行具有重大意义。

【关键词】水利水电工程；基础灌浆；特殊地层；灌浆方法

【中图分类号】TV543

Innovation and Engineering Practice of Efficient Treatment Technology for Special Strata in Foundation Grouting of Water Conservancy and Hydropower Engineering

Jiang Jingjing

Jiangxi Tongtian Construction Engineering Co., Ltd. Jiangxi Jiujiang 332000

【Abstract】 Water conservancy and hydropower projects play a crucial role in the development of the national economy. The basic grouting technology is a key link in ensuring the stability and safety of water conservancy and hydropower projects. There are many challenges in basic grouting in special geological formations, such as large amounts of grout suction, large leakage channels, water seepage, confined water, and karst areas. In depth research on grouting methods for special geological formations is of great significance for improving the quality of water conservancy and hydropower projects and ensuring their smooth operation.

【Key words】 water conservancy and hydropower engineering; Foundation grouting; Special geological formations; grouting method

1 水利水电工程特殊地层灌浆核心技术瓶颈

1.1 技术发展历程与应用场景拓展

我国水利水电工程基础灌浆技术经历了从“传统水泥灌浆到化学灌浆再到复合灌浆”这三代的发展，应用场景也从常规均质地层慢慢拓展到特殊复杂地层，20世纪80年代的时候主要是以单一水泥浆灌注为主，这种方式仅仅适用于裂隙发育较为缓慢的岩层，21世纪初引入了化学浆液比如环氧树脂、聚氨酯等，实现了对细微裂隙的封堵但存在环保性与耐久性的矛盾，近年来推广了复合灌浆技术也就是水泥-化学浆液协同灌注，在岩溶、承压水地层中已经取得初步应用不过尚未形成标准化技术体系，依据《中国水利统计年鉴2024》的数据，当前我国在建水利水电工程35%以上涉及特殊地层灌浆作业，其中岩溶与高压承压水地层占比达到了62%技术需求十分迫切。

1.2 特殊地层灌浆核心技术瓶颈

特殊地层存在地质异质性以及动态水文条件，这使得传统灌浆技术面临着三大核心瓶颈问题，第一个瓶颈是浆液适配性不足，常规水泥浆在高渗透地层里的流失率超过40%，化学浆液虽流动性良好，但在高压承压水作用下容易被稀释，固化强度会下降30%到50%，第二个瓶颈是工艺可控

性差，传统纯压式灌浆在超大漏失通道地层中，没有办法精准控制浆液的扩散范围，容易出现“灌浆盲区”，第三个瓶颈是效果评估滞后，现有压水试验大多属于事后检测，很难实时反映灌浆过程中地层孔隙的填充动态，导致返工率超过15%，以某大型水电站作为例子，其坝基岩溶地层采用传统循环式灌浆，首次灌浆之后防渗合格率仅有78%，需要进行二次补灌，工期延长了45天，成本增加了220万元。1.3 行业标准与工程需求的差距

特殊地层存在地质异质性和动态水文条件，这让传统灌浆技术面临三大核心瓶颈问题，第一个瓶颈是浆液适配性不足，常规水泥浆在高渗透地层流失率超40%，化学浆液虽流动性好但在高压承压水作用下易被稀释，固化强度下降30%到50%，第二个瓶颈是工艺可控性差，传统纯压式灌浆在超大漏失通道地层无法精准控制浆液扩散范围，易出现“灌浆盲区”，第三个瓶颈是效果评估滞后，现有压水试验大多属于事后检测，难实时反映灌浆过程地层孔隙填充动态，导致返工率超15%，以某大型水电站为例，其坝基岩溶地层采用传统循环式灌浆，首次灌浆后防渗合格率仅78%，需二次补灌，工期延长45天且成本增加220万元。

2 特殊地层地质特征与灌浆技术需求分析

2.1 特殊地层分类与地质力学特性

考虑到地质成因以及工程方面的影响,特殊地层能够分成五类,而且它们的地质力学特性和灌浆技术需求有明显差异,岩溶地层主要特征是有溶洞和溶隙,其孔隙率能达到15%到35%,灌浆时要兼顾大空间回填和细微裂隙封堵,高压承压水地层水头压力普遍大于2.0MPa,水流速度在0.5到2.0m/d,这要求浆液具备抗水稀释和快速固化能力,超大漏失通道地层也就是通道直径大于50mm的,其漏失量超过50L/min,需先快速封堵通道之后再行补强,松散破碎地层比如砂卵石层抗压强度小于1.5MPa,容易出现钻孔坍塌情况,需采用护壁和灌浆协同的工艺,高硫酸盐地层即硫酸盐含量大于1.5%的,会使水泥浆中氢氧化钙反应生成钙矾石,因体积膨胀引发开裂,需要专用抗硫酸盐灌浆材料。

2.2 灌浆技术需求的量化指标

把工程实践和行业标准结合起来看,特殊地层灌浆得满足四项量化指标,第一项是防渗性能方面,要求灌浆后地层渗透系数要小于或等于 1×10^{-5} cm/s,并且连续压水试验30分钟没有明显压力下降,第二项是结构强度方面,规定灌浆体28天抗压强度要大于或等于15MPa,与原地层干结强度要大于或等于2.5MPa,第三项是施工效率方面,限定单位长度灌浆时间要小于或等于4小时每米,二次补灌率要小于5%,第四项是耐久性方面,提出在硫酸盐、承压水等环境下,灌浆体5年强度衰减率要小于或等于10%,然而当前传统技术仅仅能够满足2到3项指标,所以迫切需要通过材料

与工艺创新来实现全指标达标。

2.3 实际案例分析

乌东德水电站是我国大型水利水电工程之一,其右岸灌浆平洞B类角砾岩区域地质条件特别复杂,该区域溶洞最大直径能达到8m,渗透系数高达 5.2×10^{-3} cm/s且孔隙率达28%,完成帷幕灌浆施工后透水率无法达到设计标准 $\leq 1.0Lu$,就算经过双排高抗硫酸盐水泥以及一排磨细水泥补充灌浆处理,还是难以满足防渗要求并严重影响工程安全性与稳定性。针对这一特殊地层难题项目团队采用创新“回填-封堵-补强”一体化技术,对于大直径溶洞先采用“级配砂石+超早强水泥浆”进行分层回填,选用粒径0.5~2mm的级配砂石搭配初凝时间 $\leq 45min$ 的超早强水泥,按每层50cm厚度进行回填作业并通过振捣确保密实,每层回填后静置4h,利用超声波检测技术对回填密实度进行实时检测确保其达到95%以上,有效解决大空间溶洞的初步填充问题,在细微裂隙封堵环节运用高压化学灌浆技术注入环氧树脂浆液,该浆液黏度控制在30~50mPa·s且灌浆压力维持在1.2~1.5MPa,为精准掌握浆液扩散范围采用红外测温仪进行全程监测,确保浆液充分填充细微溶隙不放过任何可能导致渗漏的缝隙。最后要开展整体补强作业,全孔灌注复合浆液(水泥和水玻璃体积比为1:0.3),采用分段分压的工艺来操作,每段的长度设定为5米,灌浆压力从0.6MPa开始逐步提升到1.0MPa,通过这样的方式增强地层整体强度,让灌浆区域形成一个坚固且防渗的整体。

表1 关键技术参数及实施效果对比表

技术环节	关键技术参数	实施前状况	实施后效果
溶洞回填	砂石粒径0.5~2mm,水泥初凝 $\leq 45min$,回填层厚50cm,密实度 $\geq 95%$	溶洞空洞大,无有效填充	回填密实度达98%,超声波检测无明显空洞
裂隙封堵	环氧树脂浆液黏度30~50mPa·s,灌浆压力1.2~1.5MPa	细微裂隙渗水,未封堵	红外检测浆液覆盖所有裂隙,渗水现象消失
整体补强	复合浆液(水泥-水玻璃1:0.3),分段5m,压力0.6~1.0MPa	地层整体强度低,防渗差	灌后压水试验透水率 $\leq 0.8Lu$,强度提升30%

3 基础灌浆技术在特殊地层中的灌浆方法

3.1 基于大量吸浆情况的灌注方法

在水利水电工程基础灌浆作业中,面对特殊地层所呈现的大量吸浆现象,需采用定制化灌注策略以保障灌浆成效,必须实施限流,通过调控灌浆注入速率,确保浆液在裂隙与孔隙间拥有充足的固化与胶结时间,从而避免浆液因过度扩散而造成浪费,根据地层的具体吸浆表现,动态调整灌浆压力与流量,力求在保障灌浆效率的同时,有效控制吸浆量,达到最佳平衡点。当地层表现出强烈吸浆特性时,适时暂停灌浆作业,给予浆液在裂隙与孔隙内初步固化的时间,随后再恢复灌浆,减少连续灌浆过程中的浆液流失,并增强浆液的胶结效能。间歇时长需依据地层特性及浆液固化速率具体确定,通常可在数小时至数十小时范围内灵活调整,考虑在浆液中掺入外加剂,如速凝剂、减水剂等外加剂,可调整浆

液特性,增强其在大量吸浆地层中的灌注效能。速凝剂加速浆液凝固进程,降低流失风险;减水剂则通过优化水灰比,提升浆液强度与稳定性。通过实时监测灌浆压力、流量、浆液密度等关键参数,并据此灵活调整灌浆工艺参数,确保灌浆作业的科学性与有效性,同时,建立完善的记录与分析机制,为后续灌浆实践提供宝贵的数据支持与经验借鉴。

3.2 基于特大漏水通道情况的灌注方法

在水利水电工程基础灌浆作业中,遭遇特殊地层内含特大漏水通道时,会提升施工难度,需采用专项灌注做以应对。模袋灌浆技术是将特制模袋精准放在漏水通道处向模袋内灌注浆液,有效约束浆液流动,促使浆液在模袋内部迅速固化,进而形成坚固的堵塞体,彻底阻断漏水通道。双液灌浆技术采用两条独立管道,同步将两种不同性质的浆液注入漏水通道内。两种浆液在通道内迅速混合并凝固,形成致密的堵塞体,但是该技术的关键是要精确调控两种浆液的比例及

注入时机,以确保浆液在理想位置实现有效固化。化学灌浆技术能够高效封堵特大漏水通道,在选择化学浆液时,应当依据漏水通道的具体特征及工程实际需求进行慎重考量,同时,化学浆液的环保性与潜在毒性也很重要,应当确保符合相关安全及环保标准。针对特大漏水通道的灌注作业,在前期必须深入的地质勘查与分析,了解漏水通道的形态、规模、位置等关键信息,为灌注方案的制定提供科学依据。同时,施工过程中需强化监测与控制力度,确保灌注效果符合预期,并全面保障工程安全。

3.3 基于冒水情况的灌注方法

在特殊地层环境中,冒水现象将加剧基础灌浆作业的复杂性,需采取针对性的灌注策略,首先要深入剖析冒水成因,检查是否地层内承压水的存在、裂缝与地下水系统的相互连通等因素。针对承压水诱发的冒水问题,可实施降压灌浆技术,通过调控灌浆压力至较低水平,使浆液在温和条件下缓缓渗透地层,有效避免浆液被承压水反向挤出。同时,在灌浆进程中逐步增加压力,确保浆液充分渗透并填充裂缝与孔隙结构。若冒水由裂缝与地下水连通所致,采用先封堵后灌浆的策略,运用速凝性材料迅速封闭冒水点,切断地下水与裂缝的直接联系。封堵材料的选择应依据冒水严重程度及裂缝尺寸综合分析,如水泥、水玻璃等均为常用选项。引流灌浆法是在冒水点周边设置引流管,引导冒水流出,随后围绕引流管区域实施灌浆,等待浆液固化后,关闭引流管,完成灌浆流程。在整个处理过程中,需持续监测冒水点的动态变化,灵活调整灌浆工艺参数,以保障灌浆效果的最优化,强化安全防护措施,确保施工人员与设备免受冒水现象的不利影响,维护作业现场的安全与稳定。

3.4 基于承压水条件下的灌注方法

在水利水电工程的基础灌浆作业中,面对承压水环境下的特殊地层挑战,可应用高压灌浆技术提升灌浆压力,穿透承压水的阻碍,确保浆液顺利渗透地层。在应用的过程中要调控灌浆压力及其增速,以防对地层结构造成不利影响,灌浆设备与管线的全面检查与维护要做好,确保其耐压性能达标。分段灌浆法是将灌浆作业划分为多个独立段落逐一进行灌注,每段落灌浆完毕后,等待浆液适度凝固后再推进至下一段落,以此有效控制浆液扩散范围,防止其被承压水排挤。

分段长度的设定需综合考量地层承压水压力、裂缝发育特征等因素。此外,浆液性能的优化是通过向浆液中掺入适当的外加剂,如抗分散剂、速凝剂等提升其抗水侵蚀能力与快速凝固特性,进而在承压水条件下发挥更佳作用。在承压水条件下实施基础灌浆前,应当进行水文地质勘察工作,全面掌握承压水的压力状态、流动方向、空间分布等信息,为后续制定科学、合理的灌注方案提供坚实依据,灌浆过程中的严密监测与灵活调控应当根据实时反馈及时调整灌浆工艺参数,以保障灌浆效果与工程整体安全。

3.5 基于岩溶地段的灌注方法

岩溶地层作为一类特殊地质条件,灌浆策略需紧密依据岩溶的发育程度与具体形态来定制。针对浅层岩溶区域,回填灌浆技术能彻底清除溶洞内部填充物,选用适宜的水泥浆、水泥砂浆等材料进行精准回填执行灌浆作业。回填材料的选择需严格依据溶洞尺寸与几何形态,以确保回填作业的紧密性与有效性。对于深层岩溶区域,常采用高压灌浆与化学灌浆相结合的综合技术,高压灌浆技术利用强大的压力驱使浆液深入岩溶通道,有效填充岩溶空间;而化学灌浆技术的注入性能强及凝固时间较短,专门针对细微岩溶裂隙实施封堵。在实施此两项技术时要精细调控灌浆压力与浆液性能参数,以防对地层结构造成不利影响,针对岩溶地段的灌浆作业,要事先开展地质勘探与地球物理探测工作,全面揭示岩溶的分布界限、发育状态、几何特征等关键信息,为后续制定科学、合理的灌浆方案奠定坚实基础,灌浆作业期间需强化过程监控与动态调整机制,根据实时反馈灵活调整灌浆工艺参数,以保障灌浆效果并维护工程整体安全。

4 结束语

综上所述,水利水电工程基础灌浆中特殊地层的灌浆方法对于稳定工程安全而言具有十分重要的意义,本文通过对不同特殊地层情况的针对性处理分析发现,能够有效提高工程的稳定性和安全性。在未来的水利水电工程建设中,还应当不断探索创新,进一步优化特殊地层的灌浆技术,以适应更加复杂的地质条件,为水利水电事业的持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]廖兴智.水利水电工程基础灌浆中特殊地层的灌浆方法[J].水上安全, 2023(05): 19-21.
 - [2]薛界民.水利水电工程基础灌浆中特殊地层的灌浆方法[J].农业灾害研究, 2023, 13(04): 154-156.
 - [3]潘文.水利水电工程基础灌浆中特殊地层的灌浆技术应用[J].价值工程, 2022, 41(29): 124-126.
 - [4]姚忠慧.水利水电工程基础灌浆中特殊地层的灌浆方法[J].中国住宅设施, 2022(09): 37-39.
 - [5]廖东权.水利水电工程基础灌浆中特殊地层的灌浆方法[J].黑龙江水利科技, 2022, 50(05): 205-207.
- 作者简介:姜晶晶,(出生年月):1987.03.23,男,汉族,籍贯(省市):湖北省浠水县,职称:工程师,学历:本科,研究方向:水利水电工程。