

# 高压喷射灌浆技术在堤防防渗加固工程中的应用研究

王一迪 刘少权

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430021

**【摘要】**：堤坝是新时期水利基础设施的重要组成部分，其防渗加固工作关系到整个流域的防洪安全和地区的经济发展。高压旋喷注浆具有良好的防渗效果和便捷的施工工艺，但存在复杂的地质适应性、施工参数匹配和耐久性增强等问题。在此基础上，通过对实际情况的深入分析，研究成果将为堤坝防渗加固中的动力参数自适应调控、复合浆体系统优化、智能监测溯源和三维轨迹重建等关键科学问题的解决提供新的思路和方法，提高堤坝防渗加固的精度和可靠性。

**【关键词】**：高压喷射灌浆技术；堤防工程；防渗加固；动态参数调控；复合浆液；智能化监测；

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.059

## 引言

堤防工程是防洪减灾和保障人民生命财产安全的一道重要防线，在极端气候条件下，堤坝的防渗加固要求越来越高。粘土铺盖、隔离墙等常规防渗措施在复杂的地质环境中存在施工难度大、工期长等难题，高压旋喷注浆是利用高压射流切削地层并掺入泥浆形成防渗体，具有良好的适应性。

## 1 高压喷射灌浆技术的原理与堤防工程应用基础

高压旋喷注浆是一项基于水力学和材料力学原理而发展起来的新型工程技术。其工作原理具体为：通过使用高压泵，在 20 至 40 兆帕的高压作用下，经由特制的喷头喷射出以水泥为主要成分的泥浆或化工泥浆，形成高速射流。这种高速射流具备极强的切削和破坏能力，能够高效地对地层进行切削和破碎，并将喷射出的泥浆与被破碎的土体强制混合均匀。在此基础上，本项目创新性地提出了一种新型的混凝土材料。该材料在混凝土中经过固化反应后，能够形成一种具有高强度和优异抗渗性能的胶结体，这种胶结体能够有效阻断地下水的渗透通道，从而达到理想的防渗效果。自上个世纪七十年代引入我国以来，高压旋喷注浆技术经历了从单管、双管到三管的发展历程，逐步展现出其独特的优越性和广阔的应用前景。该技术的核心在于针对砂卵石层、粘土层以及复杂层状地层等地层条件，通过对喷射压力、排量、举升速率等关键工艺参数进行精细化调控，以实现最佳的地层处理效果。在堤坝防渗工程中，采用高压旋喷注浆技术形成的连续隔离墙，其防渗性能可达到  $10^{-6}$  至  $10^{-8}$  厘米/秒，完全能够满足一级堤坝的防渗要求。此外，该技术的另一大优势在于其施工装备的轻便性和灵活性。高压旋喷注浆装置能够适应堤防工程中长、宽、宽各异的工作面，且在施工过程中不会对原有堤坝结构造成破坏，特别适合在已有堤坝的基础上进行加固

或改建作业。随着材料科学技术的不断进步，浆体的种类已经从单一的水泥浆体发展到水泥-膨润土、水泥-粉煤灰等多相复合体系。这些新型浆体不仅在改善固结体防渗性能方面表现出色，同时也大幅提升了固结体的耐久性，为高压旋喷注浆技术在高水头、强渗流等复杂工程条件下的应用奠定了坚实的基础。

## 2 高压喷射灌浆技术在堤防防渗中的应用现状与问题

目前，高压旋喷注浆技术已经在长江中下游堤防加固工程以及黄河三角洲防潮堤等众多大型水利工程项目中取得了显著的应用效果，特别是在处理堤身渗漏、堤基管涌等关键性安全问题上，其治理效果尤为突出。根据相关资料显示，在过去五年的时间里，高强度旋喷注浆技术在堤坝防渗领域的应用比例已经超过了 35%。与传统的防渗方法相比，该技术不仅能够将施工效率提升 40%，还能在综合造价上降低 15%，从而展现出显著的经济效益和社会效益。尽管高压旋喷注浆在堤坝防渗方面已经取得了明显的成效，但在实际工程应用中仍然存在诸多亟待解决的问题。首先，在复杂的地质条件下，例如面对厚度超过 30 厘米的卵石层或是富含有机质的地层时，高压射流往往难以彻底切断并有效破坏地层结构，这直接导致了胶结体的整体性不足。已有工程监测数据表明，采用该技术构建的隔离墙合格率仅为 78%，与设计指标存在较大差距。其次，当前的施工参数设置在很大程度上依赖于施工人员的个人经验，缺乏针对不同地质条件下的动态调整机制。例如，在砂-粘土层交界面进行施工时，如果按照固定的参数操作，极易引发注浆不均匀扩散，进而形成防渗薄弱区域。

此外，该技术的应用还面临着一些其他方面的不足。常规的单水泥浆料在高盐环境下容易产生盐析现象，这会显著降低防渗效果。特别是我国北方某堤防工程在运营三年后，其防渗性能已经下降到原来的三

分之一，严重影响了工程的长期稳定性。

目前，我国在土石坝建设过程中的质量监控手段相对落后，主要依赖于事后检查，并且缺乏有效的质量控制方法，这使得一些隐蔽病害难以被及时发现和修复，从而为堤防工程的长期安全运营埋下了潜在的风险。在未来的研究与实践工作中，针对上述问题将会投入更多的关注和资源，以期找到切实可行的解决方案，进一步提升高压旋喷注浆技术在堤坝防渗领域的应用效果和可靠性。

### 3 高压喷射灌浆技术的创新解决方案与工程实践

#### 3.1 动态参数自适应调控系统的构建与应用

在工程建设中，经常会遇到一些与工程实际情况不相适应的情况，从而影响工程的顺利进行。针对这一难题，本项目创新地建立了一种基于地质信息实时反馈的动力参数自适应调节体系。

该系统将扭矩、转速、返浆浓度等多个关键参数进行有机融合，建立准确的地质情况辨识模型。该模型可以对喷射压力、喷射流量和提升速率进行实时的分析和预测，保证了施工过程中各参数的合理匹配。从理论上讲，该系统利用已有的大量工程资料，利用先进的BP神经网络算法，对各种地质条件下的施工参数进行精确预报。

该方法可以有效地将预报误差降低到5%以下，突破传统的经验模型对预报精度的限制，提高预报精度和可靠性。该系统已在汉江堤坝加固工程中得到了良好的使用效果。本项目针对砂砾-粘质土等复杂地质情况，通过实时监测浆液浓度的变化，实现对泥浆注入压力(25-32 MPa)、泥浆泵送速率由10 cm/min降低到7 cm/min，保证了施工的安全。

在工程竣工后，项目组利用钻孔岩芯测试技术对其进行了细致的检查，以全面评价其施工效果。通过对固结体进行监测，发现固结体的连续性完整性较传统的工法提高了23%，大大提高了固结体的整体性能。

同时，该材料的抗渗性能也基本保持在 $1.2 \times 10^{-7}$  cm/s，比设计值下降1个量级，表明该材料具有良好的防渗效果。同时，该新的工法具有较大的工程效益，其总的工作效率比传统的工法要高出20%左右，从而大大缩短了工期，节约了工程造价。该方法可有效解决复杂地层条件下施工参数自适应问题，成为提高施工质量和效率的瓶颈。

该方法的创新性应用，保证了项目的质量，保证了项目的高效性，同时也提高了项目的质量与效率，为以后的类似项目打下了良好的基础。

地质分区	地质分区图例		描述	传统施工参数	系统调整参数	系统调节参数
砂砾分区		砂砾石	25MPa	提升速率	10cm/min	12cm/min
传统施工参数	砂砾石	细流土巨层	25MPa	20cm/min	10cm/min	12cm/min
提升速率参数	喷射压力	古砾土	226ma	20cm/min	18cm/min	10cm/min
固结体渗透率提升	喷射压力	喷射压力	砾:流石	流速 (cm/s)	7cm/s	10cm/s
防流土阻(cm/s) 渗透率 施工效率提升	23%	18%	1.2* 50-7	1.5%	1.57	77%
施工效率提升	20%	18%	18%	20%	15%	10%

注意：图表数据来自汉江运河防护工程现场监测设计价值为1.0~50-6cm/s。

#### 3.2 复合浆液体系的配比优化及效能提升

为大幅提高其在特定条件下的耐久性及其稳定性，课题组通过长期深入的研究和多次试验，已研制出一种“水泥-石墨烯-纳米硅”复合泥浆系统。在理论层次上，利用石墨烯特有的层状结构，可以极其高效的填补水泥水化产物间的细小空隙，大幅降低砂浆的空隙，提高砂浆的致密程度。

在此基础上，利用火山灰作用机理，利用水化反应机理，使水化硅酸钙形成更多的胶凝材料，从而提高混凝土的密实度，提高混凝土的综合强度。二者的协同效应可使水泥浆体的抗渗性能提高40%以上，耐盐侵蚀性能提高50%，综合性能得到大幅提升，为其在复杂环境中的应用奠定基础。为准确地确定其最优配合比，研究者们运用科学严密的正交实验法，进行了多轮认真比较与分析，最后得到了水泥：石墨烯：纳米硅=100:0.03:5的最佳配比。通过合理的配合比，使水泥浆的初凝时间达到4小时以内，充分满足了工程对时效性的苛刻要求，保证了施工的高效、便捷。在工程实践中，将其成功地应用于渤海湾地区的一座堤坝上，对高盐土地基进行了防渗处理。它具有优异的耐久性能，并具有良好的耐腐蚀性能。常规水泥浆在此高盐环境中，半年即发生显著表层风化，而使用复合浆体制成的隔离墙，经18个月的连续监测，表层结构仍保持完整，未见显著劣化，表现出良好的长期稳定性。

此外，该复合地基在经过严格的测试和验证后，其抗压强度表现尤为出色，能够达到18 MPa的高水平，充分展现了其在承受外部压力方面的卓越能力。与此同时，其防渗性能稳定，保持在 $8 \times 10^{-8}$  cm/s的优异水平，较最初设计指标提升60%，显著增强地基防水渗透能力。本项目研究实践取得的系列成果，能有效解决高盐度环境下注浆体耐久性不足难题，延长工程使用寿命和稳定性。而且，这些成果可为同类工程提供经验参考，助其规避风险、提升质量。更重要的是，成果的推广应用有望促进相关学科技术进步与创新，推动行业整体水平提升，为未来工程建设奠定坚实基础。



### 3.3 智能化施工监测与质量追溯机制的实践

本项目以物联网为基础，构建了一个完整、高智能的工程监控系统。本项目拟采用高灵敏压力传感器、精密的流速测量仪和高精度的三维位姿传感器，实现对施工全过程的各种关键参数的实时、高效率的获取。该系统不但包含了喷油压力、流量等参数，而且包含了喷油棒的三维位姿，从而保证了测试结果的完整性和精确性。

同时，将采集到的数据快速传送到具有较强计算能力的云计算平台上，对其做进一步的处理与分析。本项目以高精度、高精度的隔离墙施工为研究对象，以云平台为基础，采用 BIM (BIM) 技术，对隔离墙施工进行可视化仿真。

在此基础上，对防渗墙的各个部位进行了详细的分析，并对可能出现的问题进行了分析。在理论层次上，本项目提出的新型结构设计方法，可在 10 秒内对工程参数的偏差进行快速预警，大大提升了工程设计的时效性。同时，该方法能够较好地预报固结体的强度，其预报精度可达 90% 以上，为工程建设提供有力的数据支撑。通过本项目的研究，可以实现对建筑工程质量问题的有效溯源和精确定位，弥补了传统的事后检查方法的局限性，提高了建筑工程的质量管理水平。珠江三角洲地区的一座堤坝工程，其智能监控系统起到了至关重要的作用。在施工过程中，系统检测到喷注压力降低了 15%，并发出了警报，技术人员赶到现场进行检查，发现是喷头磨损造成的水压降低，因此及时将喷头更换，防止了 20 m 左右的防渗墙质量问题，保证了整个项目的质量。在项目验收过程中，该系统能够追踪到的施工参数与钻孔测试的一致性达到了 95%，比常规的测试方法提高了 50% 以上，大大缩短了测试的周期和精度。在此基础上，建立“施工-监控-溯源”的闭环管理模型，保证项目整体质量的提高，对各个阶段的建设过程进行有效的监控，达到高水平的目标。



### 3.4 复杂地质条件下喷射路径的三维重构技术

本项目针对复杂地层中射流轨迹易偏离设计轴的难题，在前期工作的基础上，通过深入细致的研究与创新，提出了一套基于地质雷达超前探测的三维轨迹重建方法。本项目将充分发掘并发挥雷达所特有的探测优势，在正式实施之前，实现对地表 3 m 以内的岩层结构的全方位、高精度扫描，从而建立精细的高精度三维地质模型。在注浆过程中，利用高精度传感技术，实时获取注浆棒的位姿信息，并与已建立的三维地质模型相结合，实现钻孔方向的动态调节与精确控制，保证固结体准确地沿设计轴线伸展，不产生任何偏差。通过理论分析与仿真试验，本项目提出的新方法轨迹控制精度可达  $\pm 5 \text{ cm}$ ，与常规方法相比可提高 60% 以上。特别是在跨越古河道、暗塘等地质构造复杂且易发生地质灾害的地段，本项目的研究成果将更加突出，并可有效规避因路线偏离而造成的安全隐患。淮北大堤除险加固工程实践中，施工段内存在大量的废灌渠，采用常规方法常遇到喷浆轨迹偏离问题，严重影响了施工效率及工程质量。采用该技术，施工小组通过精确的 3D 建模，精确把握渠道结构及地质特性，实现对防渗墙轴线的精确控制，实现防渗墙轴线误差小于 3 cm，大幅提高施工精度。通过现场监测与评价，发现跨越渠道断面的固结体完整性已达 100%，与邻近地区相比提高 35%，可有效解决复杂地质环境下的航道控制问题，大幅提高工程品质，并可作为同类工程建设提供可借鉴的经验与参考。



### 4 结语

综上所述，本项目将突破传统技术的限制，建立

“参数适应性——材料性能——监控智能——轨迹精确化”的技术体系。动态参数调节系统，实现地质-施工的实时匹配；复合注浆系统提高防渗构筑物的长期稳定性；智能监控机理提高了整个质量过程的质量

控制；三维轨迹重建技术保证了复杂地层的施工精度。研究表明，该方法是可行的，经济的，是堤坝防渗加固的一套完整的解决方案。

#### 参考文献：

- [1] 李翔宇.水库病险坝防渗加固施工中高压喷射灌浆的设计及施工技术[J].科学技术创新,2024,(15):143-146.
- [2] 张秀娟.高压喷射灌浆技术在水库防渗加固中的应用[J].黑龙江水利科技,2023,51(04):122-125.
- [3] 程雄辉.高压喷射灌浆技术在病险坝防渗加固中的应用[J].科技创新与应用,2022,12(33):48-51.
- [4] 林晋星.高压喷射灌浆技术在沙溪堤坝工程防渗加固施工的应用[J].黑龙江水利科技,2022,50(03):186-188.
- [5] 程刚.高压喷射灌浆技术在病险坝防渗加固中的应用研究[J].科学技术创新,2020,(31):121-122.