

# 软土地基高压旋喷桩创新与施工质量控制措施研究

文 / 汪 洋 佛山市建盈发展有限公司

**摘要：**在软土地基的处理中高压旋喷桩因其设备相对简便、地质条件适用性强、加固效果可靠显著等突出优点被广泛使用，本文通过介绍其技术基础，重点分析了这一技术在施工工艺、设备、浆液配合比等方面的关键技术创新。强调了构建全过程质量控制体系对保障工程安全的重要性。结论指出，该技术效果显著，未来将朝着智能化、绿色化的方向发展。

**关键词：**高压旋喷桩；软土地基；技术创新；质量控制；发展目标

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.014

## 引言

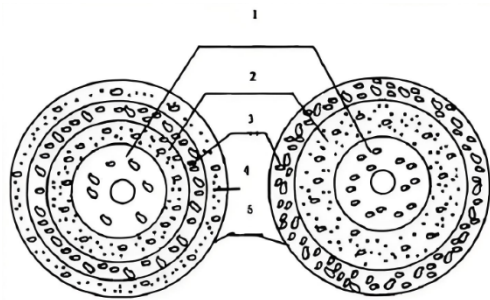
软土地基因承载力低、压缩性高的特点，会严重威胁工程安全，一直是工程建设的关注要点。因此高压旋喷桩技术作为一种较为有效的地基加固方法，其应用日益广泛。另外为应对日益复杂的工程需求，高压旋喷桩技术在工艺、材料与设备等方面不断创新与发展。

### 一、高压旋喷桩技术基础

#### (一) 加固机理

高压旋喷桩的核心加固机理，是一个集流体力学、土力学与化学于一体的复杂过程，主要分三个阶段。首先，高压泵将水泥浆加压至 20MPa 以上，通过特制喷嘴形成高速射流，通过巨大的冲击能瞬间冲切、破坏土体，为后续浆液和土体混合创造条件。其次，在钻杆旋转与提升中，高压射流强制搅拌破碎土体，使浆液与土颗粒充分、均匀地混合。最后，混合物中的水泥发生水化反应并凝固硬化，在原位形成一根连续、致密的圆柱状固体。此过程不仅置换了部分土体，浆液还会渗透到桩周孔隙

中，对地基起到压密、胶结和防渗的综合加固效果。



1- 浆液主体部分；2- 搅拌混合部分；  
3- 压缩部分；4- 渗透部分；5- 硬壳

图 1 高压旋喷桩的加固机理

#### (二) 主要工法分类

根据喷射介质的种类、数量以及组合方式的不同，高压旋喷桩主要有以下几种成熟的工法，以适应不同的工程需求和地质条件。其中单管法、双重管法、三重管法示意图如图 2 所示。

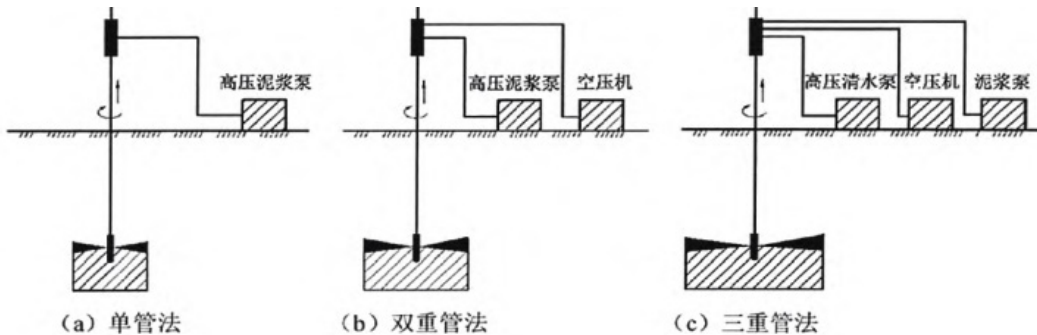


图 2 单管法、双重管法、三重管法示意图

表 1 高压旋喷桩主要工法分类对比表

方法名称	喷射介质	特点	成桩直径	适用范围
单管法	水泥浆	设备简单，操作方便；射流动能衰减快，成桩能力有限。	0.3-0.8m	最基础的方法，适用于对桩径要求不大的常规加固工程。
双重管法	水泥浆、压缩空气	气流包裹浆液，形成同轴射流，减缓喷射流动压衰减，切割能力增强。	0.5-1.9m	成桩直径较单管法大，适用于中等强度的黏性土、粉土。

方法名称	喷射介质	特点	成桩直径	适用范围
三重管法	高压水、压缩空气、水泥浆	高压水、气同轴射流切割土体，另注水泥浆填充，分工明确。	0.8-2.5m	成桩直径大，适用范围广，尤其在砂层、杂填土中优势明显。
RJP 工法	超高压水泥浆等	超高压 (>40MPa) 喷射，能量巨大，可实现二次冲切搅拌。	2.0-4.0m	适用于对加固效果要求极高的特殊工程，如大型深基坑、大坝防渗等。

### (三) 标准化施工工艺与关键参数

高压旋喷桩的标准化施工工艺流程如图 3。

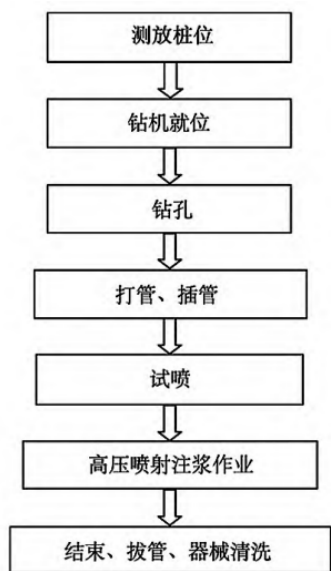


图 3 高压旋喷桩基本施工流程

在施工过程中严格控制关键技术参数是保证成桩质量的核心。其中水灰比(通常 1:1)、喷射压力(20-40MPa)、提升速度(5-25cm/min)、旋转速度(5-25r/min)和水泥掺入量(通常 180-220kg/m)等参数,必须在施工中严格执行。

### 二、技术优化创新

如今随着要求的不断提高,传统的高压旋喷桩技术在应用中逐渐暴露出其施工效率偏低、成本偏高、搅拌均匀性不足等诸多缺陷。近年来通过工程实践和专业科研提出了多项关键技术创新与优化措施,旨在解决特定工况和更高要求下的施工缺陷,提升成桩质量与综合效益。

#### (一) 施工工艺革新

传统技术主要依赖射流能量进行破土搅拌,在复杂地层中易出现搅拌不均、桩身强度离散性大的问题。为解决这一核心痛点,特发展了复合搅拌技术与针对性施工工艺。

(1) 三向搅拌式复合钻头<sup>[1]</sup>是复合搅拌技术的重大突破,该技术实现了“高压射流+机械切削”的双重、立体搅拌作用,从根本上增强了搅拌的均匀性。工程实践表明,该技术能显著提高桩体的均质性和整体强度,

在相同注浆压力下可有效扩大桩径,工作效率提高约 30%,同时因搅拌更充分,水泥用量可减少约三分之一。

(2) 针对地层不均一的问题,应根据土层性质动态调整喷射参数。在钻进或提升过程中,当遇到较硬土层时,应适当降低提升速度、增大喷射压力或进行重复喷射。重复喷射能够对土体进行二次甚至三次冲切搅拌,显著增大固结体的直径和强度,实践表明在粘性土中重复喷射可使桩径增大达 36%。

#### (二) 浆液配比优化

现在通用浆液配方越来越难以适应流塑、流沙等特殊地质,易导致桩体强度不足、不成桩或材料浪费。因此,针对特定地层的浆液配比优化成为提升成桩质量的关键。

(1) 通过添加早强剂应对流塑黏土。可在水泥浆中掺加 3% 的氯化钙作为早强剂<sup>[2]</sup>,通过加速水泥的水化反应,使桩体能迅速形成早期强度,以便更快的克服流塑状态下土体的扰动影响。最终在较低的水泥用量下,保证设计桩径和强度要求。

(2) 通过添加固化剂应对流沙层。针对土体深处流沙层导致浆的液流失、断桩和不成桩等问题,可通过在水泥浆中添加特定类型的固化剂,使浆液在流沙层中快速凝固。研究表明,桩体 28 天无侧限抗压强度与固化剂掺量近似呈指数关系,当固化剂掺量超过 41.8% 时,桩体强度即可满足设计要求,有效解决了流沙层的成桩难题。

(3) 研发绿色环保型浆液。为响应绿色环保要求,可以在施工中利用粉煤灰、矿渣等工业固废部分替代水泥,这不仅能降低碳排放,火山灰效应还能改善桩体的长期性能和耐久性。

#### (三) 施工设备升级与智能化改造

传统设备在复杂地层(如深厚软土、含砂层)中故障率高,施工连续性差,成桩合格率低,且参数控制依赖人工经验,因此设备的升级换代已迫不及待。

(1) 采用新型超长桩一次成型设备,该设备整机高度更大,通孔直径更大,在施工超长桩时,可不用拆接钻杆,实现一次性钻进和喷注成型。这彻底避免了传统设备因频繁接杆而导致的施工中断、压力损失和桩身质量缺陷等问题,应用结果表明,该设备使复杂地层下的成桩合格率从 75% 大幅提升至 95% 以上。

(2) 采用集成智能监控与调节系统<sup>[3]</sup>，在喷嘴附近设置了压力传感器，可通过监测孔内压力与地压变化自动调整喷射参数，科学的精准控制施工过程。这标志着高压旋喷桩施工正从依赖人工经验，向数据驱动的自动化、智能化方向迈进，为未来实现“无人化”施工奠定了基础。

#### 四、施工质量控制与常见问题防治

先进的技术和设备是提升成桩质量的硬件基础，而严格的质量控制则是确保这些优势最终转化为可靠工程成果的软件保障。无论技术如何更新换代，施工过程中因人为操作、地质条件变化等因素的差异，仍会出现各类质量问题。因此，建立全过程系统性的质量控制体系，以便对常见问题进行有效防治。

##### (一) 全过程质量控制体系

质量控制应贯穿于施工的全过程，从事前预防、事中控制到事后检验，形成一个闭环管理体系。

##### 1. 施工前质量控制

(1) 在施工前，必须进行详细的现场勘探，查明地质条件、地下管线及周边环境。在此基础上，开展工艺性试桩试验，以验证并确定水泥浆配合比、喷射压力、提升速度等关键施工参数，确保其满足设计要求。

(2) 严格控制水泥、外加剂等原材料质量，严禁使用受潮、结块或变质材料<sup>[4]</sup>。水泥浆的配制必须严格按照试验确定的配合比进行，水灰比需精确控制，搅拌时间不少于3分钟，且浆液应在规定时间内（通常不超过

4小时）使用完毕，防止沉淀或离析。

(3) 施工前需对钻机、高压泵、管路系统等设备进行全面检查，确保其性能稳定、管路通畅、密封良好，喷嘴无堵塞。

##### 2. 施工过程中动态控制

(1) 参数监控与记录：施工过程中，必须对喷射压力、浆液流量、钻杆提升和旋转速度等关键参数进行实时监控和记录。推荐采用自动记录装置，以保证数据的准确性和可追溯性。

(2) 垂直度与桩位控制：钻机就位必须平稳、准确，桩位水平偏差应小于50mm，钻杆垂直度偏差不大于1%。在钻进和旋喷过程中，应定期校核，防止偏差过大。

(3) 连续性控制：旋喷注浆过程应连续进行。若因故中断，应立即停止提升，及时查明原因并排除故障。恢复施工时，必须将喷管下沉至中断点以下至少0.5m处进行搭接喷射，以防桩体出现软弱夹层或断桩<sup>[5]</sup>。

##### 3. 施工后质量检验

成桩28天后，应按规定进行质量检验，常用方法包括开挖检查、钻孔取芯、低应变动力测试和静载荷试验等，以综合评价桩身的完整性、均匀性、强度及承载力。

##### (二) 常见质量问题成因与防治

尽管采取了严格的控制措施，但在复杂地质条件下，仍可能出现一些典型质量问题。针对这些问题，需建立快速响应机制，采取有效防治措施。

表2 常见质量问题成因与防治措施

问题名称	原因	防治措施
缩径	提升速度过快、喷浆压力不足或土层过于密实	通过试桩确定最佳参数，利用监控设备实时调整。
断桩	喷射中断、桩间搭接长度不足或故障处理不当	合理安排施工顺序，中断后重新施工时搭接长度不小于0.5m。
冒浆异常	孔口不冒浆（地层漏浆）；冒浆量过大（>20%）	对漏浆地层添加速凝剂；对冒浆过大则调整压力或复喷。
桩顶凹陷	水泥浆凝固收缩导致桩顶标高低于设计值	桩顶以下1m范围内慢速提升并复喷，结束后及时回灌。

#### 结语

高压旋喷桩技术通过施工工艺革新、浆液材料优化及设备智能化升级，显著突破了传统软土地基处理的局限。同时，文章强调了从施工前准备、过程中动态监控到施工后检验的全过程质量控制体系，以及对断桩、缩径等常见问题的系统性防治措施，是保障工程成功的关键。随着技术的不断创新和研究的持续深入，高压旋喷桩技术必将朝着更智能、更绿色、更高效的方向发展，为解决日益复杂的岩土工程问题提供更加强大和可靠的技术保障。

#### 参考文献

[1] 赵晓舒. 软土地基三向搅拌式复合高压旋喷桩施工技术应用[J]. 安徽建筑, 2025(2): 31-33.  
 [2] 孙龙宽. 氯化钙早强剂在塑性黏土旋喷桩中的应用[J]. 施工技术, 2019, 50(10): 106-108.  
 [3] 杨乐. 高压旋喷桩技术在市政工程中的应用[J]. 中国高新科技, 2022, (11): 139-141  
 [4] 许丽忠. 浅谈市政工程基坑施工中高压旋喷桩的应用[J]. 散装水泥, 2022(4): 117-119.  
 [5] 史恒飞. 沿海沉积软弱地层高压旋喷桩施工技术研究[J]. 科技资讯, 2023(15): 113-116.