

减少微扰动喷搅结合桩的浆液流失率

(浙江鲤航轨道交通产业发展有限公司)

一、背景与挑战

1.1 工程背景与地质概况

随着我国城市轨道交通建设规模的持续扩大，越来越多线路需穿越东部沿海广泛分布的厚软土地区。绍兴地铁 4 号线作为绍兴市轨道交通网络的重要组成部分，其某标段深基坑工程涉及大量地基加固作业。设计采用传统三轴水泥搅拌桩工艺，桩径 0.65m，桩长 30m，水泥掺量 20%，水灰比按 1.0 控制，旨在形成连续可靠的止水帷幕和承载地基。

然而，绍兴地处浙东平原，属典型滨海相软土沉积地层。场地内广泛分布着流塑状淤泥质黏土及粉砂互层，天然含水率高达 70%~95%，灵敏度高、触变性强的特性使得该地层对外部施工扰动极为敏感。同时，软土中常夹有粉土薄层和古土壤裂隙，浆液在地层中的渗透与扩散行为较为复杂，传统的搅拌桩施工工艺面临严峻考验。

1.2 初始试桩暴露的突出问题

2025 年 2 月，选取 12 个代表性桩位试桩，理论浆液用量 5,700kg/桩，实际平均用量 7,970kg/桩，平均浆液流失率高达 39.8%，最高 45.6%，最低亦达 32.6%。大量水泥浆液未有效留存在桩体范围，成桩质量难以保障。

1.3 浆液流失形式的深入剖析

为进一步探明浆液流失的具体路径与机理，小组成员对施工全程录像进行了逐帧回放分析，并对流失至地表的浆液进行取样检测。通过系统梳理，确认浆液流失主要呈现以下三种形式：

- ① 沿钻杆壁环状间隙上窜流失（占比 63.3%）
- ② 向周边土层裂隙及砂层扩散流失（占比 27.1%）
- ③ 地表冒浆流失（占比 9.6%）

1.4 质量安全风险的严峻形势

浆液的大量非正常流失带来了一系列严重的质量安全隐患：

- ①成桩完整性仅约 70%，28d 强度均值仅 1.5MPa（设计 2.0MPa），存在断桩、夹泥；
- ②基坑深>16m，止水帷幕失效将引发涌水、管涌、坍塌等重大事故；
- ③每桩产生约 2.3 吨废浆，环境负担重。

二、解决方案与创新点

2.1 问题定位与攻关路径

通过“人、机、料、法、环”排查，确认四项核心要因：

表 1 要因确认汇总表

序号	末端因素	确认结论	判定依据
1	搅拌叶片设计调 度偏小	要因	30°角度比 15°降低 流失率 5.1%
2	喷浆压力过大	要因	喷浆压力达到 3.0MPa 时流失率 高达 48.6%
3	水灰比偏大	要因	水灰比 1.2 时流失 率 42%，0.6 时 22.5%
4	材料吸水率偏低	要因	更换纳米矿物胶凝 材料后浆液流失率 降低 12-16%

2.2 对策一：更换多层可变角度特型钻头

要因分析：

传统搅拌桩设备标配的搅拌叶片通常采用固定 15°小角度设计，侧重于切割土体与初步拌和，未充分考虑软土地区浆液沿钻杆壁窜流的问题。在绍兴高含水率软土中，搅拌剪切后形成的泥皮润滑效应显著，环状间隙阻力极低，浆液在自重及压力驱动下沿此通道大量上窜。试验数据表明，15°叶片角度工况下沿钻杆壁平均流失率高达 25.1%。

创新方案：

小组与设备厂家联合定制研发了多层可变角度特型钻头，核心技术参数如下：

叶片采用高强度耐磨合金钢锻造，厚度较常规增加 20%，确保 30°大角度工况下的结构强度与耐久性；

叶片角度通过螺栓精确调节固定，可根据不同地质条件在 15°~30°范围内灵活切换，实现了“一机多用”的适应性；

采用多层错位布置（三层叶片呈 120°螺旋交错排列），在提升搅拌匀质性的同时，形成多级“浆液阻隔屏”，逐层削减浆液上窜动能；

在钻头最上方增设反向刮浆环，对沿杆壁上升的浆液实施机械拦截，迫使其回流至桩体区域。

实施过程：

2025 年 4 月 1 日至 4 月 3 日完成定制加工，4 月 4 日至 4 月 6 日在设备车间完成安装调试，4 月 7 日至 4 月 10 日现场试桩验证。叶片角度统一设定为 30°并固定。

实施效果：

在未改变其他施工参数的前提下，沿钻杆壁平均流失率由活动前的 25.2%降至 18.3%，下降 6.9 个百分点，降幅达 27.4%，超过预期≥6 个百分点的目标。5 根验证桩数据如

下：

表 3 叶片角度优化后流失率记录

试桩编号	叶片角度	沿 钻 杆 壁 流 失率(%)	较 活 动 前 下 降(%)
SZ-17	30°	18.5	-6.7
SZ-18	30°	18.2	-7.0
SZ-19	30°	18.8	-6.4
SZ-20	30°	17.9	-7.3
SZ-21	30°	18.3	-6.9
平均	-	18.3	-6.9

创新点总结：本对策打破了传统搅拌桩叶片仅用于“搅拌”的功能局限，赋予其“搅拌+阻浆”的双重功能，是国内软土地区首次将叶片角度主动调控作为浆液流失控制手段的系统性应用。

2.3 对策二：集成数字化施工控制系统，智能优化喷浆压力 要因分析：

现场调查显示，传统操作习惯下喷浆压力普遍维持在 2.0~2.5MPa 区间，部分时段甚至高达 3.0MPa。试验数据表明，当喷浆压力从 1.5MPa 提升至 2.5MPa 时，沿钻杆壁流失率从 18.8%骤升至 26.8%，增幅达 8 个百分点。过高的喷浆压力在切割土体的同时，将浆液强行“推挤”至环状间隙及土体裂隙中，是造成大量非正常流失的直接驱动力。

创新方案：

小组自主研发了数字化喷浆压力智能控制系统，实现了喷浆压力的实时监测-智能决策-自动调控闭环管理：

高精度感知层：在喷浆泵出口处安装量程 0~5MPa、精度 0.2%级压力传感器，同时在钻杆近地表处增设第二道压

力监测点，形成双点冗余校验，确保数据准确可靠；

智能决策层：配置工业级 PLC 控制器及工控机，编写嵌入式压力优化算法。核心控制逻辑为——以地内压力实时反馈为输入变量，通过 PID（比例-积分-微分）算法自动调节变频电机转速，从而精准控制喷浆泵输出压力；

安全监控层：通过钻杆内置通道实时监测孔底压力，当检测值超过设定阈值（1.6MPa）时，系统在 0.5 秒内自动降低输出压力并报警，防止压力突增导致的劈裂事故；

数据管理层：建立施工参数数据库，自动记录每根桩的压力-深度-流量-时间曲线，实现全过程质量可追溯。

实施过程：

2025 年 4 月 5 日至 4 月 8 日完成压力传感器安装及布线，4 月 9 日至 4 月 14 日完成 PLC 程序编写及人机交互界面开发，4 月 15 日至 4 月 18 日集成地内压力监控模块，4 月 19 日至 4 月 20 日完成系统联调。系统调试关键数据如下：

表 4 数字化控制系统调试结果

测试次数	传统方式压力(MPa)	数字化控制后压力(MPa)	地内压力监测	沿钻杆壁流失率(%)
调试前	2.0-2.8 (波动大)	-	无	18.3 (上阶段末值)
第 1 次	-	1.8-2.2	有	16.2
第 2 次	-	1.5-1.9	有	14.5
第 3 次	-	1.3-1.6	有	13.0

最终稳定	-	1.2-1.5	正常	12.5
------	---	---------	----	------

实施效果:

在已更换 30°特型钻头的基础上，增加数字化压力控制系统后，沿钻杆壁流失率由 18.3%进一步降至 12.3%，再下降 6.0 个百分点。从原始 25.2%累计下降 12.9 个百分点，超额完成阶段性目标。

表 4 数字化控制后流失率记录表

试桩编号	压力控制方式	控制压力范围(MPa)	沿钻杆壁流失率(%)	较上一阶段下降
SZ-22	数字化控制	1.2-1.5	12.8	-5.5
SZ-23	数字化控制	1.2-1.5	12.2	-6.1
SZ-24	数字化控制	1.2-1.6	12.5	-5.8
SZ-25	数字化控制	1.2-1.5	11.8	-6.5
SZ-26	数字化控制	1.2-1.5	12.3	-6.0
平均	-	-	12.3	-6.0

创新点总结：本对策将传统依赖人工经验的喷浆压力控制升级为基于地内压力实时反馈的智能闭环调控，实现了“压力不超、浆液不窜、数据可查”的精准施工，填补了行业内搅拌桩压力智能控制领域的空白。

2.4 对策三：优化浆液配比，降低水灰比

要因分析：

现场原采用水灰比 1.0 的浆液配比，流动性过强（流动度达 270mm），粘度仅 75mPa·s。在软土高含水环境中，低粘度的水泥浆液在重力及压力作用下极易沿钻杆壁和土体裂隙流动，难以在搅拌区域内有效驻留。试验数据显示，水灰比从 0.6 提高到 1.2 时，沿钻杆壁流失率由 22.5% 剧增至 42.0%，水灰比与流失率呈明显正相关。

创新方案：

室内配比优化试验：小组在实验室内系统测试了水灰比 0.55~0.75 区间的浆液性能，综合考虑流动度、粘度、可泵送性及抗流失性，择优确定最优配比；

减水剂应用：为弥补低水灰比导致的流动性下降，在浆液中添加 0.5% 聚羧酸高效减水剂，在不增加用水量的前提下，将浆液流动度提升至满足泵送施工要求的 210mm，同时保持低水灰比的优势；

现场工艺调整：根据室内验证结果，将搅拌站配比参数由水灰比 1.0 调整为 0.65，并建立每盘浆液的粘度与密度快速检测制度，确保配比精度。

实施效果：

在前两项对策（30° 钻头+数字化控压）基础上，采用优化后浆液配比（水灰比 0.65+0.5%减水剂）施工 5 根验证桩，沿钻杆壁流失率由 12.3%再降至 9.1%，再下降 3.2 个百分点。

表 5 配比优化后流失率记录表

试桩编号	水灰比	减水剂	沿 钻 杆 壁 流失率(%)	较 上 一 阶 段下降
SZ-27	0.65	0.5%	9.5	-2.8

SZ-28	0.65	0.5%	9.0	-3.3
SZ-29	0.65	0.5%	9.2	-3.1
SZ-30	0.65	0.5%	8.8	-3.5
SZ-31	0.65	0.5%	9.1	-3.2
平均	-		9.1	-3.2

创新点总结：本对策突破了软土搅拌桩“大水灰比易施工”的传统认知，通过减水剂技术弥补低水灰比的流动性缺陷，在保证可施工性的前提下实现了浆液粘度的优化提升，为浆液在桩体区域的有效驻留提供了材料基础。

2.5 对策四：采用纳米矿物胶凝材料替代水泥

要因分析：

普通 P.O42.5 水泥的吸水能力有限，在绍兴软土高达 70%~95% 的含水率环境中，水泥浆液中的自由水无法被有效束缚，浆液稳定性差，极易在搅拌过程中与土体孔隙水混合稀释，进而流失。试验表明，在相同水灰比 0.7 条件下，普通水泥的沿钻杆壁流失率为 18.5%，改善空间显著。

创新方案：

小组引入了一种新型纳米矿物胶凝材料，其核心性能指标如下：

比表面积 $\geq 600\text{m}^2/\text{kg}$ （普通水泥约 $350\text{m}^2/\text{kg}$ ），超细颗粒可更好填充土体孔隙；

28d 活性指数 $\geq 110\%$ ，胶凝活性优于普通水泥；

吸水性为普通水泥的 5 倍以上，能快速吸收浆液及周围土体中的自由水，极大增强浆液粘附性；

对软土中有机质具有强化固化作用，克服了传统水泥在有机质软土中强度发展慢的缺陷。

配合比研发过程：

小组系统开展了多组配合比对比试验，考察不同替代率、掺量和水灰比组合下的流失率及强度表现：

表 6 纳米材料配合比试验结果

编号	替代率	掺量	水灰比	沿 钻 杆 壁 流 失 率(%)	28d 强 度(MPa)
N-1	100%	15%	0.65	6.2	2.3
N-2	100%	15%	0.70	6.2	2.0
N-3	100%	18%	0.65	5.5	2.8
N-4	100%	12%	0.65	7.8	1.8

综合平衡流失率、强度和经济性，选定 N-1 配方作为最优方案：纳米材料 100%替代水泥，掺量 15%，水灰比 0.65。

实施效果：

在前三项对策全部实施的基础上，采用纳米矿物胶凝材料施工 10 根验证桩，沿钻杆壁流失率由 9.1%大幅降至 5.1%，再下降 4.0 个百分点。28d 强度达 2.5MPa，取芯完整率 100%。

表 7 纳米材料应用后流失率记录表

桩号	沿 钻 杆 壁 流 失率(%)	28d 强 度 (MPa)	取芯完整性
SZ-32	5.2	2.5	完整
SZ-33	5.5	2.4	完整
SZ-34	4.8	2.6	完整
SZ-35	5.6	2.3	完整
SZ-36	5.0	2.5	完整

SZ-37	4.9	2.6	完整
SZ-38	5.3	2.4	完整
SZ-39	5.1	2.5	完整
SZ-40	4.7	2.7	完整
SZ-41	5.0	2.4	完整
平均	5.1	2.5	100%

创新点总结：本对策首次在绍兴软土地区实现了纳米矿物胶凝材料 100%替代水泥的大规模工程应用，不仅大幅降低了浆液流失率，更同步提升了成桩强度，为软土固化材料的发展提供了新的技术路径。

三、成果与效益

3.1 质量安全效益

总流失率：由活动前 39.8%降至 13.5%（目标 $\leq 15\%$ ），核心症结解决 79.8%。

成桩质量：取芯完整率从 70%提升至 100%；28d 强度从 1.5MPa 提升至 2.5MPa（增幅 67%），强度标准差由 0.45 缩至 0.18MPa，均匀性显著提高。

基坑安全：止水帷幕无渗漏，地基承载力从 120kPa 提升至 220kPa 以上；周边道路、管线、居民区零事故、零投诉。

过程可追溯：数字化系统全程记录施工参数，实现质量管理从“结果检测”向“过程控制”升级。

3.2 经济效益

单桩实际水泥用量由 3,985kg 降至 3,270kg，单桩节约水泥 715kg，按水泥单价 0.5 元/kg 计算，1,000 根桩累计节约直接材料成本约 35.75 万元；同时，废浆外运处置费、地

表人工清理费、机械台班与人工工时费以及质量缺陷处置费等间接费用亦大幅降低，合计节约约 21.5 万元；直接与间接效益叠加，本项目累计创造经济效益约 57.25 万元，在保障质量安全的前提下实现了显著的降本增效。

3.3 社会效益

碳减排：累计节约水泥 715 吨，减少 CO₂ 排放约 600~650 吨（相当于 260~280 辆乘用车停驶一年），节电约 5.2 万 kWh。

环保：地表冒浆减少 70%，废浆减量 1,500 吨，噪音从 85dB 降至 78dB，水土污染风险大幅降低。

行业进步：形成“智能压控+纳米材料+特型钻具”集成技术，申报实用新型及发明专利各 1 项，培养复合型人才。

四、可复制性与展望

本案例形成的 DBR 数字化微扰动喷搅结合工艺及纳米胶凝材料应用技术，在绍兴地铁 4 号线软土地区取得了圆满成功。其技术体系成熟，核心设备改造成本可控，数字化系统操作界面友好，具有较强的可复制性和广泛的推广价值。

该技术可推广应用至以下领域：

城市轨道交通：车站基坑、区间端头井加固。

市政工程：深基坑止水帷幕、综合管廊地基处理。

水利工程：堤防基础防渗、水闸地基加固。

高速公路：软土路基处理、桥头跳车病害防治。

下一步，我司将继续深化研究，针对超深软土（>30m）桩身均匀性课题，探索多通道分层喷浆、纳米材料复配及智能化垂直度纠偏系统，持续提升技术竞争力。

五、项目团队

单位：浙江鲤航轨道交通产业发展有限公司

姓名	性别	学历	职称	组内分工
邹红湘	女	研究生	高级工程师	全面组织
吴祥泰	男	研究生	工程师	组织协调
孙哲	男	本科	高级工程师	技术方案
林颖典	男	博士	教授	机理研究
张水兵	男	本科	工程师	质量验证
陈浩	男	本科	工程师	现场实施
许康	男	本科	工程师	数据统计
蔡京谕	男	本科	高级工程师	现场实施
陈思好	女	本科	助理工程师	数据统计