

# Pipe Jacking in Composite Strata: Thixotropic Slurry Lubrication Mechanism and Frictional Resistance Reduction Study

Juan Chen Zhichao Pan

Wuhan Yucheng Qianli Construction Co. Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

When carrying out pipe jacking operations in composite strata, in order to reduce the frictional resistance generated between the soil mass and the pipeline, the method of injecting thixotropic slurry onto the outer wall of the pipeline is often adopted. After the thixotropic slurry is injected, a layer of slurry jacket will be formed surrounding the pipeline, thereby achieving the purpose of reducing the frictional resistance. In view of the risks of ground uplift or subsidence that may occur during the jacking of rectangular segments, strict requirements are put forward for the performance of the thixotropic slurry during the construction stage. That is, the slurry needs to maintain good stability, avoiding water loss, preventing sedimentation, and eliminating the problem of consolidation, so as to achieve the effect of reducing the total jacking force and ensuring the safety and quality of the construction. In this study, on-site experiments were conducted to analyze the optimized slurry proportioning schemes under different geological conditions, and the optimal slurry proportion suitable for the project was obtained, providing a reference for the proportioning scheme of similar projects.

## Keywords

Pipe jacking construction; Composite strata; Thixotropic slurry; Grouting technology

## 复合地层顶管施工中泥浆减阻研究

陈娟 潘志超

武汉誉城千里建工有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

在复合地层开展顶管作业时,为削减土体与管道之间产生的摩阻力,常通过向管道外壁压注触变泥浆的方式。触变泥浆注入后,会在管道周边环绕形成一层泥浆套,以此实现降低摩阻力的目的。鉴于矩形管片顶进过程中存在引发地面隆起或下沉的风险,施工阶段对触变泥浆性能提出严格要求,即泥浆需维持良好的稳定性,避免出现失水现象,防止发生沉淀,且杜绝固结问题,进而达成减小总顶力的效果,确保施工安全与质量。本研究通过现场实验分析不同地质条件下的优选泥浆配比方案,并得出适合工程的最优泥浆配比,为类似工程提供配比方案参考。

## 关键词

顶管施工; 复合地层; 触变泥浆; 注浆工艺

## 1 引言

在地下工程施工中,复合地层的复杂性给施工带来了诸多挑战。黏土、砂层和岩层的交替分布导致地层力学性质和渗透性差异显著,传统泥浆配比和施工工艺难以适应地层的快速变化,容易引发施工失稳、漏失等问题。因此,深入研究复合地层中泥浆的作用机理,开发动态优化体系,对于提高施工效率和安全性具有重要意义。本文以武汉市某电力隧道工程顶管施工为例,介绍了施工过程中泥浆减阻的工程实践,可供相关工程参考。

【作者简介】陈娟(1980-),女,中国湖北人,研究生,高级工程师,从事岩土工程研究。

## 2 复合地层特性与泥浆作用机理分析

在复合地层顶管施工中,泥浆减阻是通过泥浆与地层相互作用形成润滑层,降低管节与土体间的摩擦阻力。其核心原理可分为以下四方面:

### 2.1 泥膜形成与压力平衡

泥浆注入管节外壁与地层间隙后,通过渗透作用在土体表面形成低渗透性泥膜。该泥膜可封闭地层孔隙,平衡地层压力,防止土体塌陷。在复合地层中,需根据砂层、黏土层等不同渗透性地层调整泥浆黏度,确保泥膜均匀覆盖。

### 2.2 润滑效应与摩擦系数降低

泥浆中的膨润土颗粒形成胶体悬浮液,在管壁与地层间形成流体润滑层,将固体摩擦转化为流体摩擦,使摩擦系数降低 30%~50%。对于含硬岩的复合地层,需添加聚合物

增粘剂增强润滑膜抗剪切能力。

### 2.3 支撑与悬浮作用

泥浆的静切力可支撑开挖面土体，防止地层失稳；同时悬浮携带切削土颗粒，减少管节前进阻力。在软硬交替地层中，需动态调整泥浆比重，软土段采用低比重（ $1.05\sim 1.15\text{g}/\text{cm}^3$ ），硬岩段提升至 $1.2\sim 1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 以增强支撑。

### 2.4 流变特性优化

复合地层施工要求泥浆具有触变性：静止时形成凝胶结构防止渗漏，剪切时恢复流动性。通过控制马氏漏斗粘度在 $35\sim 50\text{s}$ 范围，动塑比 $0.3\sim 0.6\text{Pa}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ ，可适应不同地

层的减阻需求。

实际工程中需结合地质勘探数据，对泥浆配比进行分段设计，并通过实时监测注浆压力、流量等参数动态调整，尤其在土层突变界面处需预注浆加固地层。

## 3 工程实例

拟建工程电力通道全长 $6.289\text{km}$ ，其中A1~A20、A10~A10.1、A20~A20.1井段采用 $\phi 3\text{m}$ 顶管（长度 $5424\text{m}$ ）；A20~A23、A5~A5.1、A13~A13.1、A15~A15.1井段采用 $\phi 2.7\text{m}$ 顶管（长度 $865\text{m}$ ），工作井共计27个。项目平面图见图1。



图1 项目平面图

### 3.1 地形地貌

拟建施工场区现状主要为城市道路、铁路、拆迁场地及现状房屋。场地现状地形较平坦，地貌单元属长江冲积一级阶地。

### 3.2 场地工程地质条件

场地表层分布有一定厚度的人工填土层和淤泥层；下部为长江I级阶地冲积黏性土及砂土层，呈现出典型的二元结构，颗粒粒径从上至下由细变粗；下伏基岩为志留系（S）泥岩。

### 3.3 水文地质条件

拟建工程沿线场地地下水按其埋藏条件和含水层性质可分为上层滞水、孔隙承压水及基岩裂隙水3种类型：

上层滞水多存于人工填土层间，其水位呈现不连续状态，未形成统一的自由水面。经勘查，该层地下水位埋深处于 $1.0$ 至 $3.4$ 米范围，对应标高在 $21.26$ 米至 $23.99$ 米区间。此部分水源主要依靠大气降水以及周边生活排水予以补给，整体水量有限，通常较易疏干。但在局部填土较厚地段，其水量相对较大，不容忽视。

孔隙承压水赋存于砂土互层及砂层结构中，具备水量充沛的特点。由于其与所在地质区域内的地下水，以及长江、汉江等主要地表水体存在紧密的水力关联，因此其水位和水量会随上述水体情况产生变化。

基岩裂隙水多赋存于志留系泥岩裂隙中，与区域地下水有一定联系，水量不稳定，对工程影响不大。

## 4 泥浆减阻施工工艺要点

在顶进作业进程中，为有效降低土体与管道间的摩阻力，常采用向管道外壁压注触变泥浆的举措。触变泥浆经管道注浆孔注入管道与土体的间隙后，会持续向四周扩散，并在横向与纵向相互连通，最终环绕钢管形成一层泥浆套。这

一泥浆套能够将管壁与土体隔离，极大地削减土体产生的摩擦阻力。鉴于触变泥浆与管壁间的摩擦系数远小于管壁与土体间的数值，故而在施工时，怎样构建并维持泥浆套的有效性，成为实现减阻目标的核心要点。

尤其在矩形管片顶进环节，为预防地面出现隆起或下沉状况，施工人员需着重把控好注浆压力及压浆量。施工期间，对触变泥浆有着严格要求，需确保其不发生失水、沉淀以及固结现象，以此实现减小总顶力的成效。

在设计注浆料时，应满足一系列关键技术要求。首要的是具备足够的黏度，以保证泥浆能有效附着于管壁且维持泥浆套的稳定结构；其次，需拥有良好的化学稳定性，避免在复杂施工环境下发生化学反应而影响性能；再者，水流失量要尽可能小，防止因水分散失导致泥浆性能劣化；最后，触变性良好，能在受到外力作用时改变自身流动性，便于注入操作，且在静置时又可保持一定的形状，维持泥浆套的完整性。

### 4.1 压浆孔及管路布置

孔位确定：注浆孔沿管道按 $120^\circ$ 均匀分布。每节长 $6\text{m}$ 的管道设3个注浆孔，正常情况下纵向间距为 $6\text{m}$ 。但在顶管机尾部 $20\text{m}$ 范围内，为提升注浆效率，需将间距加密至 $3\text{m}$ 。

安装操作：在壁厚 $26\text{mm}$ 的管道上，用成孔工具钻出螺纹后，旋入带有单向阀的 $\text{DN}25\text{mm}$ 短节，接着安装注浆管与阀门。特别注意，每个注浆孔必须单独设置阀门，以此增强注浆效果。

### 4.2 压浆设备及压浆工艺

本工程使用膨润土+纯碱+CMC+黄原胶（XC）进行泥浆减阻工程施工。

### 4.3 压浆施工的关键要点把控

①初次注浆的关键时期：泥浆套形成的关键阶段，是

在管壁与土体之间的间隙刚出现之时。若浆液无法迅速填充该空隙，土体便会快速膨胀，进而包裹管道，这不仅会增大后续注浆压力，还会使浆液与土体混合，降低泥浆套的润滑效果。所以，当顶进距离超过 500m 后，需在机头位置启用中继注浆泵以及临时储存浆液的储浆池。

②适时压注触变泥浆：在顶进过程中，应及时压注触变泥浆，用以填充顶进过程中产生的建筑空隙，在管节四周形成完整的泥浆套，从而降低顶进阻力，减少地表沉降。

③科学规划注浆孔与遵循注浆原则：合理布置注浆孔，在注浆时必须遵循“先压后顶、随顶随压、及时补浆”的原则。

④及时开展二次补浆作业：泥浆套在管节顶进过程中，会因失水、固结以及与周围土体摩擦脱落等原因受到破坏，因此需要及时地进行二次补浆，以保障管节周围泥浆套的完整性。二次补浆按照“由上向下，由中间向两端”的顺序进行，这样有利于补充的浆液能够完整地填充至管节外表面。

⑤实时调整注浆参数：在穿越湖塘地段时，提升泥浆套的质量有助于降低管周摩擦

力，减少钢管的背土效应，但注浆量过多又会加剧施工完成后的沉降。因此，在此部位需严格控制注浆量。靠近工作井的部位应适当减少注浆，防止浆液沿管壁外流，从止水部位溢出。长时间停工后再次启动前，必须先行补浆，防止重启时顶力过大。

⑥管道顶进完成后的处理措施：管道顶进完成后，必须注入适量的水泥浆置换泥浆套。由于机头无法取出，压注水泥浆可有效预防后期出现渗漏问题。

⑦压浆量的精准计算方法：为确保注浆效果，每节管节的压浆量设定为理论值的 2-3 倍，具体数值需根据现场实际情况及时进行调整。

#### 4.4 不同地质条件下的泥浆配比优化

工程现场实验发现在常见泥浆减阻方案中加入黄原胶能有效改善浆液的虑失性能，能够有效降低失水量，尤其在松散土层顶进施工时，黄原胶能进一步提高其抗虑失性能。

故本工程利用膨润土+碳酸钠+高粘度羧甲基纤维素钠+黄原胶作为泥浆减阻所使用的触变泥浆，总结出针对不同复杂地层条件的最优新型泥浆减阻配比如下表所示：

地层类型	膨润土 (%)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (%)	CMC (%)	XC (%)	粘度 (s)	滤失量 (ml/30min)
松散层	6	0.1	0.1	0.4	150-197	9.8
砂层	8	0.2	0.2	0.4	130-145	8.9
岩石层	8	0.2	0.1	0.25	120-150	9.6
卵石层	10	0.2	0.2	0.3	160-180	9.5

## 5 应用结果评价

本工程自首根管节启动顶进，到完成顶管机出洞接收，历时约 35 天。在顶管顶进的全程中，总顶进力始终稳定在 10000~14000kN 范围之内，最大顶进力未突破 15000kN，相较于理论计算的 15429.8~22563.9kN，实际数值明显更低。这一优异成果带来了多方面的积极影响：不仅显著削减了工程中中继间的使用数量，有效降低了工程成本投入，还减小了所需顶进力，大幅缓解工程施工难度，增强了施工过程的安全性。

在顶进过程中开展了细致的对比研究。顶进初期，当顶进距离处于 0~15m 时，顶管穿越土体加固区，因未运用触变泥浆减阻，顶管外壁与周边土体直接接触，摩擦系数颇高，导致摩阻力急剧增大。当顶进至 15~30m 时，开始引入触变泥浆，此时单位面积摩阻力迅速下降，稳定在 8kN/m<sup>2</sup> 左右。不过，此阶段管道周边尚未构建起稳定的泥浆套，触变泥浆的减阻效能未能充分释放。随着顶进距离持续增加，泥浆套初步成型，摩阻力进一步降低，减阻效果显著。当顶进距离达到 60~70m 时，顶管临近出洞，再次穿越土体加固区，尽管单位面积摩阻力有所回升，但相较于初始未注浆穿越该区域时的数值，仍低很多。在平稳顶进阶段，单位面积摩阻力稳定维持在 5kN/m<sup>2</sup>，这充分证明了本工法采用的优选减阻配比成效显著。

## 6 结论和展望

通过本次工程实践，充分证明了不同地质情况的优选泥浆配比的先进性和实用性。它不仅确保了施工的安全性和

精确性，还极大地提高了工作效率和成果质量。我们相信，随着技术的进一步发展和完善，研究更加智能化的泥浆管理系统、研究针对不同的工况条件下，如高湿、高盐、高酸碱性等环境下的泥浆稳定性、研究更加环保和可持续的减阻技术等，以实现顶管施工中泥浆减阻技术的全面优化，提高施工的安全性、经济性和环境友好性。

### 参考文献

- [1] 罗云峰.长距离大直径混凝土顶管中的减阻泥浆研究与应用[J]. 建筑施工.2014.v.36;No.272:111-113
- [2] 李刚.超大断面矩形顶管新型泥浆的开发应用[J].绿色建筑.2016.v.8;No.41(04):87-91
- [3] 钟晓晖.长距离管道顶进注浆减阻施工技术应用[J].建筑施工.2010.v.32;No.233:64-66
- [4] 王春婷,隆威.大口径长距离顶管工程泥浆配方试验研究[J].铁道科学与工程学报.2014.v.11;No.57(01):110-115
- [5] 王梓任,夏意峻,姚永宽,赵恺宁.富水砂层长距离顶管减阻泥浆性能研究[J].辽宁工业大学学报(自然科学版).2024.v.44;No.215(01):47-50+56
- [6] 王福芝,曾聪,孔耀祖.大直径长距离顶管润滑泥浆方案研究[J].地质科技情报.2016.v.35;No.167(02):54-57
- [7] 熊亮.高水压复合地层顶管工程触变泥浆配比研究[J].四川水利.2024.v.45;No.265:43-46
- [8] 张雪,万中正,王传银,刘杨,刘硕,王汉勋,张彬.无水砂层中矩形顶管施工用触变泥浆配比优化及减阻性能试验[J].工程地质学报.2021.v.29;No.145(05):367-376