

上海砂性软土地层水平定向钻进泥浆性能调控技术

朱永刚¹, 郑文龙², 乌效鸣², 张晓静¹, 林朋皓², 朱旭明²

(1.上海佳友市政建筑有限公司,上海 201202; 2.中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074)

摘要:上海地区水平定向钻进铺管(HDD)钻遇不易成孔的砂性软土的概率甚高,这种地层对泥浆性能有特殊要求。但目前普遍使用的复配型增效商品土粉基调相近,难以就大量工程个案恰如其分地发挥关键功效。为此,论述了该类工程环境下泥浆性能设计要点,分析了材料添配的作用机理,重点给出了泥浆密度、粘度、切力以及失水量等参数调控的宜于实用的若干配材技术,以提供相类似工程条件下泥浆运用的可参考方法。

关键词:水平定向钻进铺管;砂性软土层;泥浆;密度控制;钻屑携带;综合性能调控;上海地区

中图分类号:P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)05-0058-05

Drilling Mud Property Control Technology of HDD Construction in Sandy Soft Soil of Shanghai Area/ZHU Yong-gang¹, ZHENG Wen-long², WU Xiao-ming², ZHANG Xiao-jing¹, LIN Peng-hao², ZHU Xu-ming²(1.Shanghai Jiayou City Construction Co., Ltd., Shanghai 201202, China; 2.China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Most of the HDD projects in Shanghai area are conducted in sandy soft soil formations, and different special requirements of mud property should be taken into consideration. However, because of the similar property of the commonly used compound synergistic commercial bentonite, it is difficult to adjust the most favorable property in accordance with every single engineering case. Therefore, the main design points of drilling mud property in such engineering environments are discussed, the mechanism of material addition is analyzed and some useful and practical material technologies for parameters of mud density, viscosity and shear as well as water loss volume are given in order to provide a reference method for mud application under similar engineering conditions.

Key words: HDD; sandy soft soil; drilling mud; density control; drilled cuttings carrying; comprehensive properties adjustment; Shanghai area

0 引言

非开挖水平定向钻进铺管技术始于 20 世纪 70 年代。随着社会的进步和经济的发展以及城市市容的不断改善和交通、建筑保护意识的不断提高,传统的开挖铺设地下管线的施工方式越来越不能适应社会发展和人们对市容市貌的要求,非开挖技术可广泛应用于各种地下管线,如通信、电力、煤气、供水、天然气、排水等地下管道的铺设施工。在大多数情况下,尤其是在繁华市区或地下管线埋设较深时,非开挖方法是一种很好的管道施工方法。但在具体工程实践当中地层问题纷繁复杂,尤其是上海地区常见的砂性软土或淤泥质土层,若泥浆液体系设计与该地层特点不配伍,将难以保证孔壁稳定,导致工程出现不必要的损失和事故。

1 上海地区地层特点及工程难点

上海濒临东海,其浅部地层为较典型的软土、淤泥夹沙、砾分布区域。

长兴岛、崇明及泥城镇地区属砂嘴、砂岛地貌类型。该地区浅层地层主要由于河流淤积、滨海河口形成。表层为人工杂填土和淤泥,其下部土一般呈饱和的流塑状态,含沙量大,地层松散。根据相关工程勘察报告及实验数据,地层中的淤泥质粘土孔隙比在 1.3 左右,易于流散;灰色砂质粉土、灰色砂质粉土夹淤泥质粉质粘土的粘聚力约为 4 kPa,内摩擦角约为 30°,无侧限抗压强度 < 0.5 MPa。部分土层中的颗粒较大(≥ 6 mm),其孔隙比约为 0.9。同时,地层大量砂体的胶结性很弱,属典型的结构极不稳定地层。

收稿日期:2017-11-08; 修回日期:2018-05-01

作者简介:朱永刚,男,汉族,1974 年生,副总监,工程师、经济师、建造师、招标师和电力质量监督师,地质工程专业,硕士,主要从事非开挖电力管线铺设相关工作,上海市浦东新区川六公路 918 弄 28 号。

通信作者:乌效鸣,男,汉族,1956 年生,教授,主要从事钻井液等钻探工程方面的教学与研究,湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, xm-wu5610@163.com。

包含市区在内的上海多半地区属滨海平原,该地区浅层地层主要由于河流淤积与滨海浅海形成。地层含水量大,均在 32% 以上,其中大多淤泥质粘土含水量达到 51%。该地层中物质主要为粘土成分,夹有一定量的粉土层、砂层,一般呈流塑状态。淤泥质粘土的塑性指数 >18 ,可流动性十分明显。部分地段土的粘粒或亲水矿物(如蒙脱石)含量较高,水敏性较强。该软土地层蠕变性很强。

青浦区、松江区等中西部的湖沼平原,浅地层主要由于湖沼沉积形成,同样为软土地层,软粘土含量大,夹杂有粉砂层与少量砾石层,部分地区地层中含有铁锰质结核。相比较于上海其它地区地层而言,其含水量较小,土层相对较硬,大部分粉质粘土的塑性指数在 12~16。该地层土中不乏有蒙脱石矿物成分,土的粘粒或亲水矿物含量高,水敏性强,遇水容易吸收、膨胀、水化。

经过十多年的大量工程实践认知,上海地区的含砂砾软土地层对水平定向钻进铺管(HDD)施工十分不利。钻进中遇砂质粉土、粉砂土等含沙量大的地层以及砾石地层时,孔壁松散破碎,不易成孔,会造成塌孔埋钻和抱管事故。在钻进中也会遇到钻屑颗粒较大的情况,携排钻屑困难,重复破碎造成钻进效率低下,管具磨损严重,且极易阻塞回拖管道。钻遇蠕变性强的淤泥质土、软土和水敏性强的地层时,孔壁的变形缩径甚快甚强,换径扩孔往来不及跟进,最终导致孔壁蠕变和坍塌,抱死回拖管道。为此,特别需要对泥浆进行针对性设计与配制,结合该类工程的个案特点进行泥浆性能优化。

2 在用泥浆的性能评价

目前上海地区非开挖施工所用泥浆材料商品多为增效土,即由膨润土通过混配一定量的分散剂、提粘剂、降滤失剂等复配打包而成,可以较便利地与清水搅拌成基调性的钻进泥浆^[1-3]。实验室对比了市场常用的 3 种产品复合土粉的造浆性能,实验结果见表 1。

若单纯视表 1 中的漏斗粘度数据,3 个样品的造浆率指标基本达标(高于 16 m³/t)。但是,若结合上海地层特点较全面、更具体地审视这些泥浆性能参数,并联系到工程中出现的问题,就会发现存在的偏误和不足之处:

(1) 泥浆的密度均较低,多数当土粉加量增大至

表 1 一些不同增效土复合商品的泥浆基本性能

样品 编号	土粉加 量/%	密度 $\rho/$ (g · cm ⁻³)	动切力 YP/Pa	漏斗粘度 /s	失水量 FL/[mL · (30 min) ⁻¹]
A	3.5	1.02	7.0	55	28
	5.0	1.03	12.0	>100	17
B	3.5	1.02	8.0	41	24
	5.0	1.03	10.0	>100	15
C	3.5	1.02	1.0	23	30
	5.0	1.03	4.5	27	26
	7.0	1.05	6.5	45	20

粘度接近上限时,也才仅有 1.03 g/cm³。这对于相当多的蠕变软土,所构成的孔内泥浆静压强是明显不够的,不足以平衡地层压力而会造成孔壁缩径,导致挤钻抱管。

(2) 粘度的变差颇大。样品 C 在土粉加到 7% 时才仅有 45 s,这对于流沙、砾石等松散地层难以遏止垮孔。而样品 A 和样品 B 在土粉加量稍增至 5% 时就过超至 100 s 以上(但动切力却较低),易造成孔内泥浆流动困难、憋压。

(3) 泥浆切力相对不够。3 个样品在 5% 加土量时的动切力都在 12 Pa 以下,这对于较常钻遇的大颗粒地层是无法有效悬携钻屑的。积淀的砂砾床极易造成钻杆扭矩与磨耗增大,更会导致拉管被楔卡而遇阻。

(4) 失水量均偏高,即在 5% 加土量时,3 个样品的失水量都高于 15 mL/30 min。这对于水敏土层是极其不利的,会造成土层孔壁的吸水膨胀、缩径抱管、软化蠕散。一般强水敏地层(水敏指数 $I_w \geq 0.66$)要求失水量控制在 5 mL/30 min 以下。

在多变地层环境的现实中,若要求市场提供能针对具体工程个案的复配土粉,是不容易做到的。应该在现有商品泥浆的基础上,根据每个非开挖铺管工程的地层特点和工艺情况对泥浆进行“对症下药”的改造,通过添加适当的处理剂来使泥浆发挥特效的功能。

3 密度的合理控制

钻遇软弱土层时,孔壁发生蠕变、缩径的概率明显加大^[4-6]。地层钻开后近孔壁处的应力重新分布,塑性半径随着泥浆压力的增大而减小,适当提高泥浆密度有助于提高孔壁稳定性^[7]。就多数 HDD 工程而言,以增效土粉来配制泥浆,当土量为 5% 时粘度已足够高,但是密度才仅有 1.03 g/cm³,不利

于孔壁稳定性的提升。

上海地区淤泥质土的重度为 $16.8 \sim 17.8 \text{ kN/m}^3$, 地层侧压力系数为 $0.62 \sim 0.70$ (明显较高), 则为平衡地层侧压力所需的泥浆密度应在 $1.04 \sim 1.25 \text{ g/cm}^3$ 。所以, 多数情况下有必要对现行使用的泥浆进行加重处理。

泥浆加重有 2 类不同的方法, 一类是添加重晶石、碳酸钙等高密度粉剂; 另一类则是利用可溶性盐的水溶液作为基液配浆。可溶盐的品种很多, 各自的饱和密度差别也很大。对浅层水平定向钻来说, 稍高密度的钠盐就能满足需求, 且成本不高。例如 NaCl 饱和溶液的密度可达 1.2 g/cm^3 , 半饱和 (浓度 18%) 时密度也接近于 1.07 g/cm^3 。

然而, 配制盐水泥浆是有技术难度的。主要原因在于普通造浆膨润土及较多处理剂在盐水环境中的“活性”会大大减退, 粘土颗粒朝着聚结沉淀发展, 失水量涨幅较大。为此, 应该采用抗盐能力强的处理剂 (如 CMC-LV, 淀粉等) 并在配浆加料先后顺序上予以科学的安排。因加盐顺序不同而对粘土颗粒水化膜的影响如图 1 所示: 先加盐时, 高浓度电解质直接作用在粘土颗粒上, 导致其扩散双电层受压缩, 水化膜减薄, 后续对 CMC 等护胶剂的吸附能力大幅降低; 而如果配浆过程中先加入 CMC, 则由于 CMC 极强的护胶作用, 首先将粘土胶粒保护起来, 再加入盐时, 则对粘土的抑制作用大幅降低, 从而保证了配浆性能。

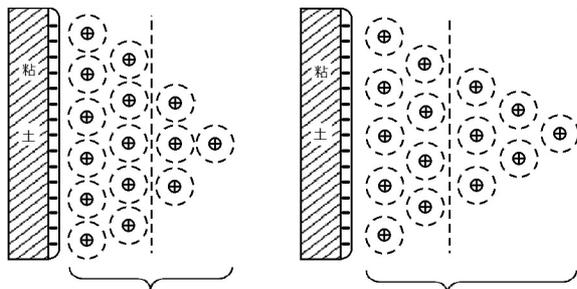


图 1 加盐顺序对粘土水化膜的影响

经实验测试对比和多工程实用验证, 下述配方及加料顺序实现了较高密度盐水泥浆的成功制取与应用: $2\% \sim 4\%$ 膨润土 + $0.5\% \sim 0.8\%$ LV-CMC + $5\% \sim 30\%$ NaCl + $0.2\% \sim 0.4\%$ XC; 泥浆密度 $1.02 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$ 可调, 失水量 $< 10 \text{ mL/30 min}$, 粘度 $30 \sim 120 \text{ s}$ 内可调。该配方满足了密度与粘度调整的需求, 且较大程度抑制了粘土的水化膨胀, 避

免了缩径、钻屑造浆等情况的发生。

4 粘度的高效调节

针对松散的砂性土层, 应将泥浆的粘度和动切力提高, 这样可以有效粘结散状孔壁, 也有利于悬浮较大尺寸的钻屑。泥浆粘度提升范围应根据地层松散程度确定, 而对地层松散程度有抗压抗剪强度法、结构完整性 F 系数法等来测试。它们可以从不同角度反映出土的内摩擦角和粘聚力的大小。若按无侧限单轴抗压强度 σ_s 衡量, 根据实际经验数据归纳, 岩土体可以分为极破碎 ($\sigma_s < 0.3 \text{ MPa}$)、强破碎 ($0.3 \text{ MPa} < \sigma_s < 0.5 \text{ MPa}$)、中度破碎 ($0.5 \text{ MPa} < \sigma_s < 1.5 \text{ MPa}$) 和较完整 ($\sigma_s > 1.5 \text{ MPa}$) 4 个等级, 所需泥浆粘度与抗压强度经验关系^[8]为:

$$\eta_A = 0.5\sigma_s^2 - 12\sigma_s + 55 \quad (1)$$

式中: η_A ——泥浆的表观粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; σ_s ——岩石的抗压强度, MPa 。

按此关系式, 对上海弱胶结散沙地层 ($\sigma_s < 0.5 \text{ MPa}$), 泥浆的表观粘度应增大到 $51 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以上, 对应的马氏漏斗粘度 $< 105 \text{ s}$ 。

可溶性大分子聚合物是泥浆高效提粘的最主要处理剂, 像合成高聚物 (Rel-Pac、HPAM、HPAN 等), 大分子纤维素 (HV-CMC、HEC、HV-PAC 等), 长链植物胶 (蒟蒻、田菁、瓜尔胶等), 生物聚合物 (XC 等), 它们的分子量通常在 1000 万以上, 0.4% 加量左右即可使水溶液粘度大增, 而其在泥浆中加量一般只需 1% 以内, 即可显著提高泥浆粘度。

例如 2017 年在“东煦站到凌迁站 110 kV 电缆排管”工程中 (总长度 2041.95 m、孔径 1100 mm), 针对其严重松散的砂性地层, 笔者采用的泥浆配方为复合商品土粉 + 0.6% 的 Rel-Pac, 再补充部分降失水剂和润滑剂。泥浆性能达到漏斗粘度 115 s, 表观粘度 $55 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 动切力 18 Pa, 失水量 5 mL/30 min , 润滑系数 0.13。该泥浆体系确保了钻、扩孔时未发生孔壁蠕变和坍塌, 回拉管道顺利通过。

5 动切力的稳妥提升

对于长兴岛、崇明及泥城镇等地层存在的大颗粒砂砾 (粒径可达 6 mm 以上) 情况, 除了适当提高排量 (增加流速) 并适当提高粘度外, 保持泥浆的高动切力成为悬浮携带钻屑的关键。对此, 首先要从机理上澄清所需动切力与钻屑粒径的关系。

假设钻屑颗粒为直立圆柱状,则钻屑在泥浆中的垂向受力状态如图 2 所示^[8]。

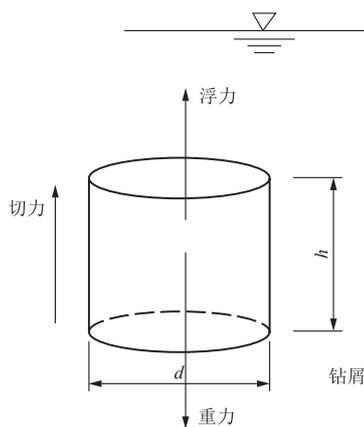


图 2 临界动切力分析

要使柱状钻屑刚好被悬浮住,浮力加侧壁总切力应等于重力。其中总切力为泥浆动切力 τ_d (即 YP, 单位面积上的剪切应力) 乘以柱体侧面积。据此,联立阿基米德浮力公式可得:

$$\tau_d = d(\rho_1 - \rho_2)g/4 \quad (2)$$

式中: ρ_1 ——泥浆的密度, g/cm^3 ; ρ_2 ——钻屑的密度, g/cm^3 ; d ——钻屑底面直径, mm; g ——重力加速度, $9.8 m/s^2$ 。

若将上海地区粗粒地层的钻屑粒度视为 8 mm, 则按该式计算的动切力为 21.56 Pa (钻屑密度取值为 $2.2 g/cm^3$, 泥浆密度设为 $1.1 g/cm^3$)。此算例也证明上述商品土粉所配泥浆的动切力明显偏低。

提高泥浆的动切力, 可通过若干种方式实现, 如适当提高膨润土的加量、对高聚物交联、使粘土适度絮凝等。根据现场实际材料情况, 笔者较多采用使粘土适度絮凝的方法, 即通过增加烧碱 (NaOH) 量 (提高 pH 值) 来实现。其原理是当 pH 值适度升高时, 电离出的过量 Na^+ 离子附着于粘土晶层表面, 降低了电动电位, 引起水化膜有控制地变薄, 使粘土颗粒端部裸露, 相互搭接, 形成网架结构。

添加 NaOH 来达到适度絮凝以提高泥浆动切力时, 要严格控制 NaOH 的加量, 一般以 pH 值提高到 9.5 左右为稳妥。过量的烧碱添加会导致粘土颗粒的聚沉或泥浆严重稠化。用某种商品复合土粉配出的基浆, 在其中添加 NaOH 时的动切力变化实验曲线如图 3 所示。实际工程中采用的加量依此取值为 $0.7\% \sim 1.2\%$, 泥浆动切力可以达到 20 Pa 以

上。该配方在上述提到的许多粗粒地层穿越铺管工程中应用, 携屑彻底, 孔内清洁, 为成功铺管提供了有力的保障。

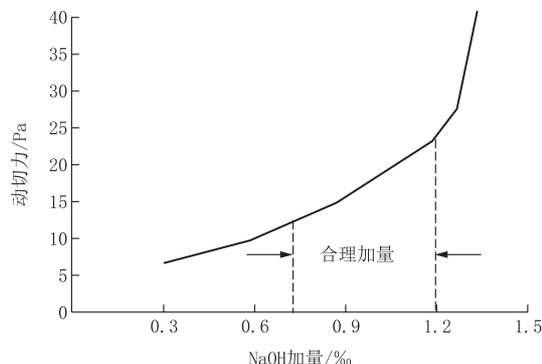


图 3 NaOH 加量对动切力的影响

6 其他功用的协同发挥

除携带钻屑、粘护孔壁、平衡地层压力外, HDD 泥浆还需要兼顾降失水、抑制、减阻、润滑等功能。针对上海地区 HDD 施工, 如何在确保泥浆满足基本性能的前提下兼顾其它性能, 也是不可忽视的泥浆技术问题。

对于强水敏并伴有渗透的砂性土层, 需进一步降低失水量。该类地层在压差作用下渗透半径增大, 泥皮虚厚, 易引发缩径。通过改善泥浆中的固相级配 (如添加超细 $CaCO_3$) 并增加降失水剂 (LV-CMC 等), 可形成薄而坚韧的泥皮, 减小渗透, 降低孔壁失稳的风险^[9]。

对于强水敏造浆地层, 还应当考虑提高泥浆对孔壁土的抑制性。适当选用具备抑制能力的处理剂如 KAPM、FA-367 等可起到良好的防分散作用; 石灰、可溶性钾盐 (如 KCl) 等也有助于抑制孔壁土的水化, 从而减轻孔壁因水敏而引发的缩径等问题。

长距离非开挖施工过程中还应注重解决循环阻力问题。随着穿越长度不断增加, 泥浆循环时产生的沿程阻力损失越来越大。应选择剪切稀释性较强的材料如 XC、酰胺类线型大分子等用以调节流型, 降低循环阻力的同时也延长了泵的使用寿命、减小了动力消耗。

为提高 HDD 铺管的成功率, 增强泥浆的润滑性对于降低拖管阻力是至关重要的。普通矿物油类润滑剂虽然润滑能力强, 但对环境影响较大; 而满足环保要求的植物油类高效润滑剂应是今后 HDD 施工重点研究与使用的对象^[10]。

7 结论

在上海较多区域实施定向钻铺管,对一般复合型钻进土粉产品应根据具体地层及土性特点做出如下改进完善:

(1)在软土与淤泥质土地层中,泥浆密度均应适度提高,由现有的约 1.03 g/cm^3 调大到 1.10 g/cm^3 左右,以平衡钻孔蠕变缩径压力。如果以可溶盐作为加重基液,则应注意配制加料的顺序。

(2)在上海地区松散、破碎程度较高的地层中,必须加大现有泥浆的粘度以满足粘结孔壁的需求,此时漏斗粘度应达到 100 s 以上,表观粘度 $48 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以上。

(3)对钻孔中钻屑颗粒较大的状况,泥浆动切力必须进一步提高,二者对应关系可以用 $\tau_d = d(\rho_1 - \rho_2)g/4$ 来计算确定。加入 NaOH 是易行高效的方法,但加量须准确控制。

(4)失水量、抑制性、润滑性与减阻效能也是水平定向铺管泥浆的重要兼顾性能。应在满足基本性能要求的前提下,通过优选“一专多能”的处理剂或者复配以功能型处理剂对泥浆性能进行优化。

参考文献:

- [1] 李志康.浅谈非开挖工程施工中钻孔泥浆的几个问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):62-65.
- [2] 张志刚.非开挖定向钻进铺设大直径燃气钢管工程实例[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(12):33-34.
- [3] 钟红光.水平定向钻在短距离大口径钢管施工中的运用——真南路定向钻施工的经验与教训[J].上海煤气,2005,(5):5-7,37.
- [4] 张丕国.非开挖穿越麒麟立交桥全风化花岗岩地层铺设石油管道施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(6):24-26.
- [5] 张跃武.非开挖穿越工程中泥浆的选用与优化设计[J].非开挖技术,2009,26(6):27-31.
- [6] 王果.非开挖施工中的泥浆问题分析[J].非开挖技术,2011,28(4):32-34.
- [7] 李斌,李巨龙,周玲玲.水平定向钻进铺管水平孔段软土孔壁稳定性分析[J].岩土工程技术,2005,(2):84-86.
- [8] 乌效鸣,蔡记华,胡郁乐.钻井液与岩土工程浆材[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2013:133-135.
- [9] 黄汉仁.液体聚合物在非开挖穿越工程中的应用[J].地质装备,2001,(2):16-18.
- [10] 乌效鸣,胡郁乐,李粮纲,等.导向钻进与非开挖铺管技术[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2004:7-13.