

# 长距离顶管工程中注浆减摩作用机理及效果分析

简崇林, 马孝春

(中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**长距离顶管施工中除了克服迎面阻力外,尚需克服巨大的侧面摩擦阻力,故直接顶进非常困难。探讨了利用膨润土泥浆注浆以减小顶进阻力的技术。对注浆材料的结构、注浆工艺和减摩机理进行了较为系统的阐述,并结合工程实例对长距离顶管中顶进力的理论值与实际值做了比较。结果表明,注浆减摩效果十分明显。该技术值得在实际工程中推广应用。

**关键词:**长距离顶管;阻力;膨润土泥浆;注浆减摩;非开挖

**中图分类号:**TU99 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)12-0065-03

**Analysis on Mechanism and Effects of Slurry Injecting in Reducing Friction in Long Distance Pipe Jacking Project/JIAN Chong-lin, MA Xiao-chun** (China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Long distance pipe jacking is very difficult, as both the soil or rocks in the front of the cutting head and the great side frictional resistance need to be overcome. The article discussed the technique of using bentonite slurry to reduce the jacking resistance; systematically described grouting material structure, grouting technology and the mechanism of friction reduction and make the comparison between theoretical and actual values of jacking force in long distance pipe jacking based on the engineering case. The results showed that the effect of friction reduction by slurry injection was very noticeable, which is worth being applied in the similar projects.

**Key words:** long distance pipe jacking; resistance; bentonite slurry; reducing friction through injecting slurry; trenchless technology

## 0 引言

顶管法是铺设城市地下管道的一种非开挖方法。在顶管施工中,不仅要克服掘进面处的迎面阻力,还要克服顶进距离内管道侧面与土体接触面上的巨大摩擦力。限于顶进设备能力及作业空间的限制,目前市内常用顶管的顶进距离非常有限,通常在120 m以内。因此,如何在不断更新顶进设备的情况下进行长距离顶进,便是许多施工企业极为关注的技术难题。况且在顶进过程中若不采取有效措施降低顶进力,则对管材的抗压强度、顶管工作井形式及顶管后座墙承受推力的能力提出了更高要求,在经济上是不合算的,也增大了施工风险。本文探讨用注浆方法减少侧向摩擦力,从而实现长距离顶进的原理与方法。

## 1 注浆材料及性能

根据国外的施工经验和钻进工艺理论,可用膨润土或人工合成的高分子材料作为润滑剂。从成本与环保角度考虑,应首选膨润土泥浆。它由膨润土、CMC、纯碱和水按一定比例配方组成。

膨润土是以钾、钙、钠蒙脱石为主要成分(含量一般大于65%)的粘土矿物,具有膨胀性和触变性。其微观分子结构如图1所示。主要结构是Si-Al-Si,是由云团状薄层堆叠而成的单体颗粒,颗粒间以钠离子或钙离子连接而成<sup>[1]</sup>。由于晶片层的上下表面均带负电,相互排斥,加之钠离子半径及化学价较低,造成膨润土单位晶片层间的结合键非常弱,水分子极易渗入晶层间隙,使得两个叠层之间的间距扩大到2倍以上,造成晶体内部膨胀。膨润土的膨胀性能取决于薄片蒙脱石微粒的大小和数量。由于钠离子提供的结合能力弱于钙离子,钠蒙脱石比钙蒙脱石易于膨胀,因此,钠膨润土比钙膨润土更适用于顶管施工。

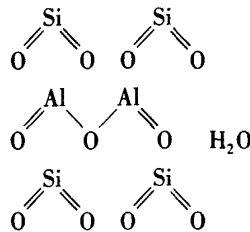


图1 膨润土分子结构式

收稿日期:2010-06-05

作者简介:简崇林(1985-),男(汉族),湖北咸宁人,中国地质大学(北京)硕士研究生,地质工程专业,从事地质工程数值模拟与信息系统以及非开挖技术研究工作,北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)S09工程,465895151@qq.com。

膨润土经加水搅拌后成为悬浮液,当悬浮液静止时,薄片状的蒙脱土微粒会由分散状态经过絮凝,变成凝胶体。当浆液被搅拌、振动时,大多数微粒结构将被破坏、分散,转变成成为具有粘性和流动性的胶状液体。当悬浮液再次处于静止状态时,又会形成凝胶体,这种状态特性称为触变性<sup>[2]</sup>(如图2所示),而且其反复变化是无数次的。膨润土泥浆的触变性,有助于顶进管道时,以粘性液体减少摩阻力,静止时,成为凝胶体起支撑作用,平衡地层压力。

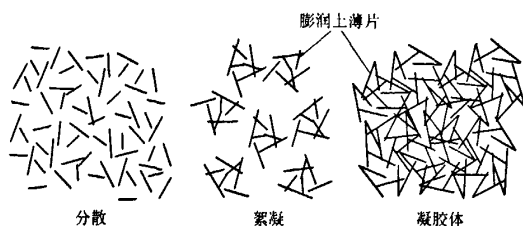


图2 膨润土泥浆触变性示意图

## 2 顶管施工的摩擦阻力及注浆减摩机理

### 2.1 顶管的摩擦阻力

顶管时的顶进阻力主要有2部分:一部分是工具管的迎面阻力,由工具管外壁阻力和支撑工作面前壁阻力组成;另一部分是管外壁阻力,即在土压力和顶进管节自重作用下,顶进管节与周围土层产生的摩擦阻力。通常前壁阻力很难通过技术手段降低,甚至对土压或泥水平衡顶管来讲,前壁阻力是必须的,它能有效地防止塌方和地面沉降。故只有通过最大限度地减少管外壁摩擦阻力,才能有效地减少顶进阻力。

### 2.2 注浆减摩机理

在顶管施工中注浆作用机理主要为:一是起润滑作用,二是起填充和支撑作用。泥浆能将管道与土体之间的干摩擦变为湿摩擦,从而减小顶进时的摩擦阻力。浆液在填充于管道与土体之间空隙的同时,还可在注浆压力下减小土体变形,使土体稳定。

泥浆与土体接触后,在注浆压力的作用下,泥浆中的自由水向孔壁的裂隙或孔隙中渗透,使泥浆失水。泥浆在渗透过程中会变成凝胶体而充满土体的空隙,进而与土体形成混合体。随着浆液渗透越来越多,会在泥浆与混合土体之间形成致密的渗透层,泥浆中的固相颗粒便附着在致密的渗透层上形成渗透性减小的泥皮(图3),降低泥浆的失水性。泥皮和致密的渗透层称为泥浆套<sup>[3]</sup>(图4)。

在注浆压力作用下,泥浆套能够把超过地下水压力的液体压力传递到土体颗粒之间,成为有效应

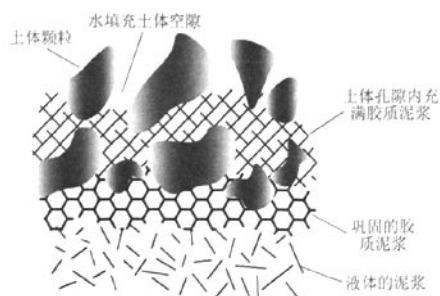


图3 泥皮的形成

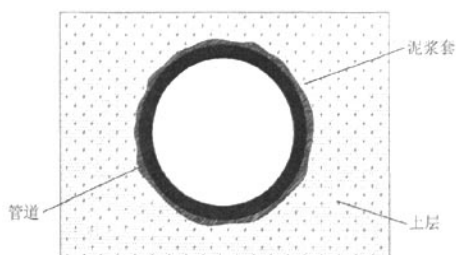


图4 泥浆与土体形成泥浆套

力压实土体。同时,泥浆的液压能够起到支撑孔壁的作用,使其保持稳定。

当注入的膨润土泥浆各参数比较理想时,在土层中围绕管道会形成一个支承环并保持悬浮液压力等于土压力,顶进管节就会在泥浆中悬浮起来,浮力可使管外壁摩擦阻力减小,管底部由于自重产生的法向力也就减少了。这一效果会对长距离管道的顶进十分有利。

实际施工中,由于受管道外围环向空腔不连续、不均匀、泥浆流失、地下水影响以及压力注浆工艺等因素影响,可能会对减摩效果产生影响。但大幅度地降低摩擦阻力是毋庸置疑的,一般注浆后管道顶进时产生的摩擦阻力可以降低到未注浆前的1/3~1/4<sup>[4]</sup>。

## 3 注浆工艺及注浆减摩效果分析

### 3.1 注浆工艺流程

在长距离顶管施工中常用的注浆方法是管内注浆法。即将注浆管引入顶管内部,在管材内壁开注浆孔注浆的方法。注浆孔一般沿环向按90°或120°设计成4个或3个孔,采取点式注浆。注浆系统见图5。

### 3.2 泥浆配比

常用的膨润土泥浆配比<sup>[5]</sup>见表1。

在泥浆制作过程中,为了使膨润土充分分散,搅拌应充分均匀,泥浆拌和后的停滞时间应在12 h以

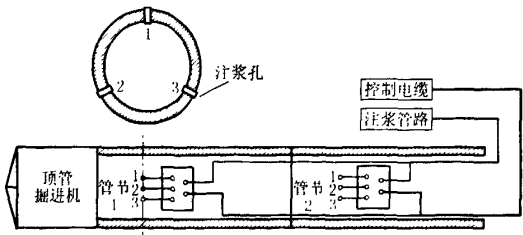


图 5 注浆系统示意图

表 1 膨润土泥浆常用配比表

| 膨润土胶体率/% | 膨润土/kg | 水/kg | 纯碱/kg |
|----------|--------|------|-------|
| 60~70    | 100    | 524  | 2~3   |
| 70~80    | 100    | 524  | 1.5~2 |
| 80~90    | 100    | 614  | 2~3   |
| 90~100   | 100    | 614  | 1.5~2 |

上。

3.3 注浆主要技术参数及其控制

注浆原则:先压后顶,随顶随压,及时补浆。

3.3.1 注浆量

注浆量是注浆减摩中重要的技术指标,它反映的是顶管的长度和浆膜厚度的量化关系。顶管过程中可根据注浆量及顶进长度、浆膜厚度对减摩效果进行动态分析。

3.3.2 注浆压力

注浆压力应平稳均匀,开始注浆时压力不宜过高,压力过高不仅不易形成泥浆套,还会产生冒浆现象,影响减摩效果。

3.3.3 注浆速度

注浆速度受很多因素影响和制约,如注浆孔的设置、浆套形成快慢及效果、顶进速度等。可根据实际工程中减摩效果及注浆压力对注浆速度进行调节,以适应工程需要。

3.4 注浆减摩效果分析

某软土地区一污水处理厂管道工程采用顶管施工,设计管道为 DN2000 混凝土管,壁厚 22 mm,顶进长度为 1100 m,管道埋深 8.0 m,管顶覆土 4~5 m。顶进管道所处土层(淤泥质粉砂土)的性质为:含水率  $w=28.7\%$ ,密度  $G_s=2.70\text{ g/cm}^3$ ,容重  $\gamma=18.8\text{ kN/m}^3$ ,孔隙比  $e=0.81$ ,饱和度  $S_r=0.95$ ,粘聚力  $c=3.0\text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi=30.8^\circ$ 。

工程中采用膨润土泥浆作为注浆液,其配比为:膨润土 100 kg,CMC 1.2 kg,纯碱 5 kg,水 600 kg。

注浆减摩效果的好坏主要是通过实际顶管过程中顶力的大小来检验。本文将通过理论计算、经验计算和实测数据的对比来检验注浆在长距离顶管施

工中的注浆减摩效果。

3.4.1 不考虑注浆减摩的顶力计算

根据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268-97)中推荐公式,顶管阻力可按式计算:

$$P = f\gamma D_1 [2H + (2H + D_1) \tan^2(45^\circ - \varphi/2) + \omega/(\gamma D_1)] L + P_s \quad (1)$$

$$P_s = \gamma(H + D_1/2) K_0 \pi D_1^2/4 \quad (2)$$

式中: $P$ ——计算的总顶进力,kN; $\gamma$ ——管道所处土层的容重,kN/m<sup>3</sup>; $D_1$ ——管道的外径,m; $H$ ——管道顶部以上覆盖土层的厚度,m; $\varphi$ ——管道所处土层的内摩擦角; $\omega$ ——管道单位长度的自重,kN/m; $L$ ——管道的计算顶进长度,m; $f$ ——顶进时管道表面与其周围土层之间的摩擦系数,可按表 2 选取; $P_s$ ——顶进时顶管掘进机的迎面阻力,kN; $K_0$ ——静止土压力系数,可按公式  $K_0 = 1 - \sin\varphi$  计算。

表 2 顶进管道与其周围土层的摩擦系数

| 土层类型   | 湿       | 干       |
|--------|---------|---------|
| 粘土、亚粘土 | 0.2~0.3 | 0.4~0.5 |
| 砂土、亚砂土 | 0.3~0.4 | 0.5~0.6 |

3.4.2 经验计算法

在考虑注浆减摩作用后的经验计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$F = \pi D L f \quad (3)$$

式中: $F$ ——顶进管道摩阻力,kN; $D$ ——管道外径,m; $L$ ——顶管管道长度,m; $f$ ——单位面积管壁与土的平均摩阻力,kN/m<sup>2</sup>,对于软土地区当  $L \leq 100\text{ m}$  时, $f=50L^{-0.5}\text{ kN/m}^2$ ;  $L > 100\text{ m}$  时, $f=2\sim 5\text{ kN/m}^2$ 。

3.4.3 计算值与实测值比较分析

根据该工程实测的顶力值和理论经验计算值绘制了顶力与顶进距离关系图(图 6)和注浆后单位面积平均摩阻力与顶进距离关系图(图 7)。

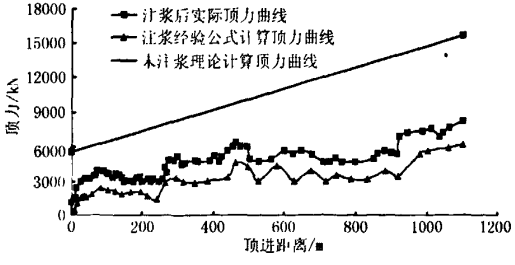


图 6 顶力与顶进距离关系图

根据图 6、图 7 可得,在该工程顶进施工中,注浆后的减摩效果明显,平均减摩到理论顶力的 40% 左右。注浆后单位面积平均摩阻力随顶进距离大幅

(下转第 73 页)

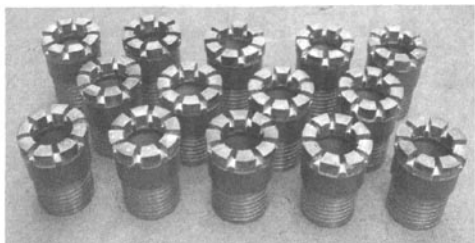


图4 高胎体金刚石钻头

在山东乳山和招远金矿深孔(孔深 1500 ~ 2000 m)粗粒花岗岩、片麻岩等地层中钻进,钻头机械钻速 2 ~ 3 m/h,钻头平均寿命超过 90 m(最高寿命 198 m),是普通钻头寿命的 2 ~ 3 倍,极大地缩短了地质工作周期,达到了快速钻探取样的目的,满足了深孔、绳索取心钻进的要求,取得了良好的效果(图 5)。

#### 4 结论

(1) 新型长寿命金刚石钻头(金刚石工作层高 14 ~ 22 mm)在深孔钻探提高钻探效率、降低钻探成本中能发挥至关重要的作用。

(2) 对于坚硬弱研磨性地层,宜选用单水口高胎体金刚石钻头;对于坚硬强研磨性地层,宜选用双

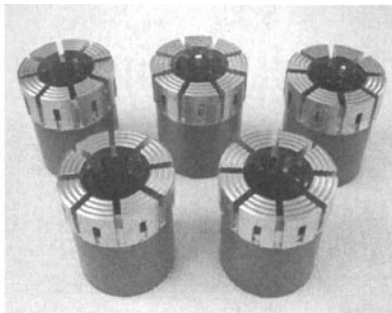


图5 双水口高胎体金刚石钻头

水口高胎体金刚石钻头。

(3) 未来几年,随着钻孔深度的不断加深,金刚石钻头使用者将更加注重钻头的使用寿命和钻速,迫使研究者开发出新的更有效的方法来优化钻头设计,延长钻头的工作寿命和提高钻速,随着粉末冶金技术的发展和新材料的应用,金刚石钻头的工作层高度有望比常规高出 1 倍甚至数倍,以获得更高的钻头使用寿命。

#### 参考文献:

- [1] 王达. 深孔岩心钻探的技术关键[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1).

(上接第 67 页)

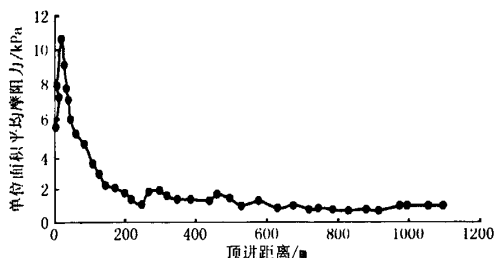


图7 注浆后单位面积平均摩阻力与顶进距离关系图

下降,稳定后维持在最初的 20% 左右,使顶管能顺利顶进。

#### 4 结论

注浆减摩是顶管施工中非常重要的一个环节,尤其是在长距离顶管中,注浆效果的好坏,直接关系

到顶管施工的成败。

在顶管施工中采用注浆减摩技术,可使顶进力减少到原来的 1/4 ~ 1/3,也可在同样顶进设备时,延长顶进距离。

#### 参考文献:

- [1] 李万才. 大口径长距离顶管工程注浆减摩技术[J]. 管道技术与设备, 2000, (6): 11-18.
- [2] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [3] 魏纲, 徐日庆, 邵剑明, 等. 顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J]. 岩土力学, 2004, (6).
- [4] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [5] 张龙. 大口径钢管顶管注浆减阻技术的改进[J]. 市政技术, 2006, (2).
- [6] 何莲, 刘灿生, 帅华国. 顶管施工的顶力设计计算研究[J]. 给水排水, 2001, (7): 87-89.