

泡沫和膨润土泥浆对改良砂土渗透性的研究<sup>\*</sup>

齐跃军

(中铁十八局集团有限公司, 300222, 天津//工程师)

**摘要** 依托南昌地铁 4 号线民园路西站—火炬路区间富水砂层区段盾构施工,通过沿线地层组成、掌子面砂土颗粒级配分析,采用泡沫、钠基膨润土泥浆作为渣土改良主要材料,开展室内渣土改良试验,研究土压平衡盾构在穿越高渗透性、高水压砂性土地层时改良剂对渣土渗透性的影响,并得出渣土改良综合解决方案。结果表明:①膨润土泥浆对砂土渗透性改善优于泡沫,但泡沫能够较好地改善砂土的流动性;②用单一泡沫改良时,无法达到理想的渣土抗渗参数,当泡沫注入率=10%时砂土流动性得到了较好的改善;③用单一膨润土泥浆改良时,当膨润土泥浆注入率=10%时,可达到理想的渣土抗渗参数,若需要达到流动性指标要求,则膨润土泥浆注入率需大于 20%;④采用泡沫加膨润土泥浆复合改良时(泡沫注入率=10%~15%、膨润土泥浆注入率=10%),渣土抗渗参数和流动性指标均能达到要求。

**关键词** 地铁施工;土压平衡盾构;渣土改良;高渗透性砂层;渗透试验

中图分类号 TU441.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.006

## Influence of Foam and Bentonite Slurry on Conditioning Sand Soil Permeability

QI Yuejun

**Abstract** Based on the shield construction in the water-rich sand layer section of Nanchang Metro Line 4 Minyuan Road West Station-Huoju Road Station interval, through analysis of the formation conditions along the line and the gradation curve of sand soil particles at the tunnel face, foam and bentonite slurry are used as the main material for muck conditioning. Systematic indoor muck conditioning experiment is carried out, and the influence of soil conditioners on the muck permeability while EPB shield tunneling through sandy soils with high permeability and high water pressure is studied. A comprehensive solution of muck conditioning is obtained. Results showed that: 1) bentonite slurry can condition sand soil permeability better than foam can, but foam can improve the sand soil fluidity better. 2) Conditioning with only foam makes it hard to a-

chieve ideal muck anti-permeability parameters, and the fluidity is improved when FIR (foam injection rate) = 10%. 3) If conditioned with only bentonite slurry, ideal muck anti-permeability parameters can be reached with BIR (bentonite injection rate) = 10%, while to achieve fluidity index requires BIR over 20%. 4) If conditioned with composite of foam and bentonite slurry, both muck anti-permeability parameters and fluidity meet the requirements with FIR = 10% ~ 15% and BIR = 10%.

**Key words** metro construction; EPB (earth pressure balance) shield; muck conditioning; high permeability sand layer; permeability test

**Author's address** China Railway 18th Engineering Group Co., Ltd., 300222, Tianjin, China

## 0 引言

土压平衡盾构具有施工效率高、掘进速度快、对周边环境影响小及施工占地少等优点,成为城市地铁隧道施工的主要机械。其根据土舱压力反馈调节螺旋出土和盾构推进速度以维持掌子面水土压力动态平衡。盾构掘进过程中的一个关键施工步骤,即为如何使刀盘切削下来的土体处于一种低渗透性“塑性流动状态”。因此,要对土舱内的渣土采用泡沫、膨润土泥浆等添加剂进行改良<sup>[1]</sup>。

土压平衡盾构在富水砂层中掘进时要求土舱中渣土具有较好的流塑性和均质性,以便能够无损传递盾构千斤顶推力至掌子面,维持水土压力平衡<sup>[2-3]</sup>。除了要求渣土具有较好的流塑性和较小的摩擦角外,低渗透性也是非常重要的。当盾构机埋深在地下水位以下且水压较大时,只有低渗透性的渣土才能均匀地将盾构推力传递至掌子面以维持平衡,同时可阻止掌子面水向土舱发生渗透而引起的喷涌事故发生<sup>[4-5]</sup>。因此,为防止喷涌事故发生,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41972291);江西省交通运输厅重点工程科技项目(2019C0010,2019C0011)

同时考虑管片拼装盾构停机时间损耗,改良后砂土理想渗透系数至少在 90 min 内应维持小于  $10^{-5}$  m/s<sup>[6]</sup>。在隧道掘进前可通过试验段或室内改良试验确定合理的改良剂配比以实现最佳渣土改良效果,同时可量化渣土改良参数降低砂土渗透性,用于指导现场盾构施工。

目前,国内外众多学者针对改良后土体渗透性进行了探究。文献[2]对 9 种土在不同泡沫注入率(0~65%)下开展渗透试验,试验结果表明泡沫对砂性土渗透性改良效果较好,对卵石土和粉土改良效果较差。文献[4]设计变水头渗流试验装置,研究了改良后渣土渗透系数的时变效应。文献[5-6]通过常水头渗透试验,以泡沫改良土渗水量达到 2 L 所耗时间来表征泡沫改良土的渗透性,试验结果表明土体中细颗粒含量越多,改良土的抗渗性越好。文献[7]提出泡沫能否有效降低渣土的渗透系数,取决于渣土的级配特性,通过改变土的有效粒径、曲率系数和不均匀系数,对泡沫改良后的渣土进行渗透试验得出有效粒径对渣土渗透系数的影响较大,曲率系数和不均匀系数对渣土渗透系数的影响较小。文献[8]通过常水头渗透试验,从砂土级配、泡沫体积分数及泡沫注入率 3 个方面研究盾构砂性渣土-泡沫混合物渗透系数的变化规律。文献[9]通过自行设计的可调压大型常水头渗透仪对现场改良渣土进行渗透性评价,结果表明其渗透系数随着测试时间的增加而降低,在 2 h 后减为 0,原因在于渣土中的细颗粒逐渐被渗流水携带至土样底部而形成完全不透水土体。文献[10]针对富水圆砾地层,采用 CMC(羧甲基纤维素)、膨润土泥浆和 PAM(聚丙烯酰胺溶液)均可有效改善渣土渗透性,且渗透性随着注入比的增大而增大,泡沫的掺入对泥浆和 PAM 共同改良渣土的渗透性无影响。文献[11]推导了盾构机喷涌时掌子面水压力和渗流量的理论公式,提出了不同城市土层掘进过程中发生喷涌的临界条件。

综上所述,目前许多学者分别对不同地层采用泡沫改良后的土体渗透性进行了大量的试验研究,但尚未进行不同改良剂对高渗透性、高水压砂层渗透性影响的试验研究。本文以南昌地铁 4 号线民园路西站—火炬路站区间为例,对掌子面砂土进行颗粒级配分析,采用泡沫和膨润土进行改良试验,通过坍落度试验、渗透试验及渣土表观状态,综合判断渣土改良效果、抗渗性和量化砂土改良参数的控

制指标。

# 1 工程概况

根据隧道地质纵剖面图,民园路西站—火炬路站区间盾构穿越地层为由粗砂和砾砂组成的富水砂层区,其地层纵剖面图如图 1 所示,砂土物理力学参数如表 1 所示。隧道埋深 5.6~16.2 m,地下水位埋深约 4.0~6.0 m,静水压力约 140~220 kPa。七里站—民园路西站区间隧道为高渗透性、高水压砂层,渗透系数约为  $10^{-4}$ ~ $10^{-3}$  m/s,盾构穿越时,螺旋输送机无法保持正常的压力梯降,易产生螺旋机出土口喷水、喷砂、喷泥的现象<sup>[11]</sup>。

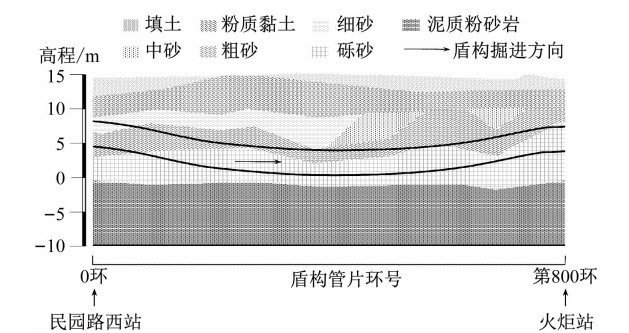


图 1 民园路西站—火炬路站区间地质剖面图  
Fig. 1 Geological section of Minyuan Road West Station—Huoju Road Station interval

表 1 砂土物理力学参数			
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of sand soil			
地层	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	体积质量/(g/cm <sup>3</sup> )
粗砂	1	33	1.98
砾砂	1	35	2.00

# 2 渣土改良降低渗透性的机理分析

## 2.1 改良目的

目前,南昌地铁车站大部分建设在沿赣江两岸的Ⅰ级和Ⅱ级河流阶地中。其中大量区间隧道穿越富水砂层,使盾构掘进开挖后的渣土具有高透水性,由此容易导致螺旋机喷涌;同时砂土内摩擦角大,容易在土舱顶部形成土拱效应<sup>[12]</sup>,导致出渣困难、掌子面压力施加不均匀,因而诱发地表沉降过大。文献[13]总结了采用土压平衡盾构掘进时理想渣土条件(见表 2),渣土改良的主要目的如下:①降低砂土渗透系数;②改善砂土流动性;③降低砂土内摩擦角;④获得均质流塑性渣土。

表 2 土压平衡盾构理想渣土参数

Tab.2 Ideal muck parameters of EPB shield	
参数	要求
理想渣土渗透系数/(m/s)	$<10^{-5}$ [6]
渣土流动性	坍落度 = 150 ~ 200 mm [14], 液性指数 = 0.40 ~ 0.75 [13]
摩擦角/(°)	12 ~ 16
黏聚力/kPa	8 ~ 20
螺旋机出渣的液性指数 $I_L$	0.60 ~ 0.75 [13]

2.2 微观机理分析

1) 泡沫改良砂土的微观机理分析:砂土的渗透系数与颗粒级配、颗粒大小及孔隙率密切相关,砂土中细颗粒含量多,相应的渗透性就会低。文献[15]把泡沫看成一种土颗粒,在砂土中添加泡沫相当于增加了砂土细颗粒含量,由于泡沫 90% 是由空气组成,使砂土孔隙中增加了大量的封闭气体,这些封闭气体以泡沫的形式存在,阻断了砂土孔隙水的渗流通道,达到降低渣土渗透性的目的。泡沫改良砂土后渗透性降低主要原因就是微小泡沫对砂土孔隙的封堵作用。

2) 膨润土改良砂土的微观机理分析:膨润土按交换的阳离子不同分为钠基和钙基两种,目前盾构施工时常使用钠基膨润土进行渣土改良,其颗粒晶胞间靠微弱的分子间作用力连接,当与水接触时,由于晶胞间连接不紧密,水分子可快速进入膨润土颗粒晶胞之间,促使晶格发生膨胀,一般膨胀倍数为 10 ~ 40 倍,形成膏脂状膨润土泥浆后渗透系数小于  $10^{-7}$  m/s,几乎不透水 [16]。在与砂土相互搅拌混合后,可使砂土渗流通道变窄,极大地降低了砂土的渗透系数。

通过泡沫、膨润土泥浆等不同改良剂组合配比对渣土进行改良,最终可在盾构土舱内形成均质、不透水的流塑性材料,如图 2 所示。

3 试验材料及方法

3.1 砂土配置

本文改良后渣土的渗透性试验采用的设备是 TST-55 型渗透仪,土样尺寸为  $\phi$  61.8 mm  $\times$  40 mm。试验所用砂土取至民园路车站基坑中,深度同盾构掘进掌子面深度,测试土的主要参数包括砂土颗粒级配、含水率及渗透系数。根据《铁路工程土工试验规程》,分别采用震动式筛分机和 TST-70 型常水头渗透仪测定砂土颗粒级配及砂土渗透系

数。砂土颗粒级配曲线如图 3 所示。

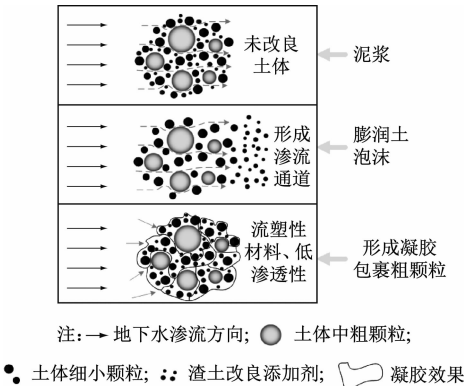


图 2 土舱内渣土形成不透水性材料过程  
Fig.2 Process of impermeable material formed from muck in soil chamber

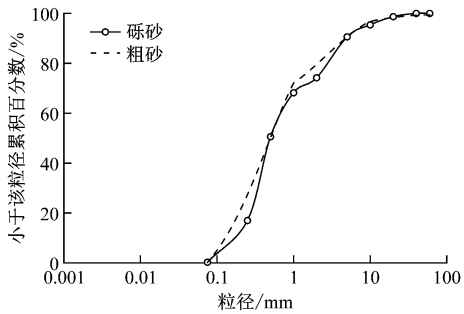


图 3 砂土颗粒级配曲线  
Fig.3 Grading curve of sand soil

通过图 3 颗粒级配曲线分析可知,该砂土缺失细颗粒组(粒径  $<0.075$  mm),在富水砂层中盾构掘进时极易因渣土渗透系数过大而发生喷涌现象,严重时甚至诱发地表沉降过大。经 6 次常水头渗透试验测得未改良砂土的平均渗透系数为  $1.143 \times 10^{-4}$  m/s。

3.2 膨润土泥浆配置

结合现场调研资料、地层参数及膨润土本身特性,选择土与水的质量比为 1:6、1:7、1:8、1:9、1:10 共 5 种膨润土泥浆进行泥浆黏度测试及改良试验。具有一定黏度的膨润土泥浆可以有效地包裹住大粒径土颗粒及填充颗粒之间的孔隙,以增强砂土的流动性,减少砂颗粒与刀盘之间的摩擦。但泥浆黏度过大可能会造成泥浆输送系统的压力过大,不利于流畅地泵送。对于富水砂层改良,膨润土泥浆黏度在 20 ~ 30 mPa  $\cdot$  s 之间的改良效果较好 [17]。为获得理想黏度对应的膨润土泥浆土与水的质量比,实验室采用六度旋转黏度计进行了 5 种不同土与水

质量比的膨润土泥浆黏度测试,如图4所示。

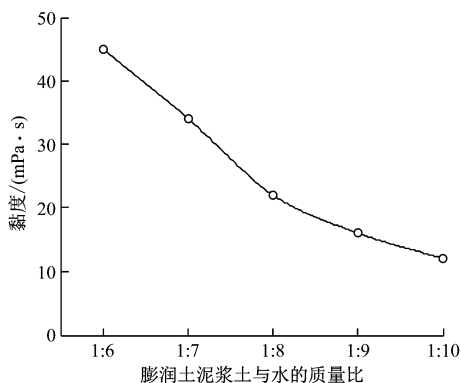


图4 不同土、水质量比的膨润土泥浆黏度测试

Fig.4 Performance testing of bentonite slurry with different soil-water mass ratio

通过膨润土泥浆黏度试验分析得出,膨润土泥浆土与水的质量比为1:8时,符合盾构施工用膨润土泥浆黏度要求。

### 3.3 泡沫制备

根据文献[18]研究,采用泡沫剂溶液浓度为3%发出的泡沫改良渣土效果理想。实验室采用的泡沫剂取于施工现场,以确保试验结果对施工的指导性。将泡沫剂溶液通过发泡设备制备泡沫。

## 4 富水砂层改良渗透性试验

为了测定改良后的砂土是否满足渗透性及盾构机掘进要求,需要开展不同改良剂对砂土渗透性影响的试验研究。分别进行单一泡沫改良、单一膨润土改良、泡沫+膨润土复合改良及添加聚合物改良等4种试验,最终确定土压平衡盾构在富水砂层中掘进的最佳改良剂配比。

### 4.1 单一泡沫改良渗透性试验

图5给出了单一泡沫改良后砂土渗透系数 $k$ 和坍落度 $S$ 随泡沫注入率的变化情况,泡沫注入率区间为5%~20%,梯度为5%。在泡沫注入率达到15%~20%后, $S$ 达到225 mm,此时流动性较大,渣土状态接近流态,不利于螺旋出土器排渣。因此,对于单一泡沫改良富水砂层的渗透性试验,不研究注入率大于20%。由图5可见,砂土渗透系数随着泡沫注入率的增加先急剧下降,之后缓慢下降; $S$ 随着泡沫注入率的增加而增加,在注入率达到15%后, $S$ 变化趋于平缓。

综上所述,泡沫对砂土流动性能起到明显的改善作用,泡沫注入率为10%时 $S$ 已达到盾构掘进

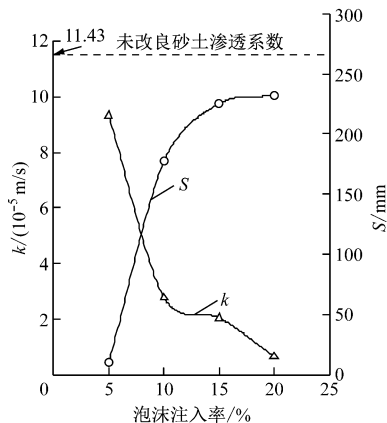


图5 渣土 $k$ 和 $S$ 随泡沫注入率的变化曲线

Fig.5 Curve of permeability coefficient ( $k$ ) and slump ( $S$ ) varying with FIR of muck

要求; $k$ 虽随着泡沫注入率的增加逐渐减小,但未达到盾构排渣过程中防喷涌要求( $k < 10^{-5} \text{ m/s}$ )。所以,对于富水砂层单一泡沫改良可达到渣土流动性指标,但无法达到渣土抗渗要求。

### 4.2 单一膨润土改良渗透性试验

图6给出了单一膨润土改良后砂土的 $k$ 、 $S$ 随膨润土注入率的变化情况,注入率区间为5%~30%,梯度为5%。由图6可见,砂土 $k$ 在膨润土注入率为10%~15%范围内急剧下降,在15%~30%范围内缓慢下降; $S$ 随着膨润土注入率的增加而增加, $S$ 在膨润土注入率为5%~15%内缓慢增加,在15%~25%内急剧增加,在25%~30%内又趋于平缓。当膨润土注入率达到10%时, $k$ 为 $2.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,达到渣土抗渗、防喷涌要求;当膨润土注入率为20%~25%时,渣土 $S$ 在150~200 mm,砂土才具有较好的流动性。

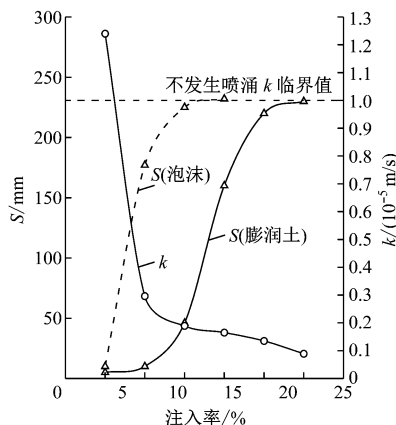


图6 渣土 $k$ 和 $S$ 随注入率的变化曲线

Fig.6 Curve of permeability coefficient ( $k$ ) and slump ( $S$ ) varying with BIR/FIR of muck

综上所述,对砂土采用单一膨润土泥浆改良可达到渣土抗渗要求,也可达到流动性要求,但需要较大的注入率,对现场施工配置泥浆而言工作量较大且不经济。膨润土泥浆能够明显降低砂土渗透系数并达到抗渗要求,对砂土的流动性改善作用不如泡沫,即泡沫对砂土流动性改善起主导作用,膨润土泥浆对砂土渗透系数改善起主导作用,两种改良剂之间又存在相互促进作用,因此可考虑两种改良剂对砂土进行复合改良,在满足流动性和渗透性基础上确定复合改良配比。

4.3 复合改良渗透性试验

通过单一泡沫改良砂土试验分析可知,当泡沫注入率在 10%~15% 时,渣土对应的  $S$  为 170~220 mm,满足盾构掘进中螺旋排渣要求。通过单一膨润土泥浆改良试验,当膨润土泥浆注入率达到 10% 时已满足渣土抗渗要求。因此,考虑到两种改良剂的各自特性及各自单一改良砂土试验结果,分别对砂土进行了泡沫注入率为 10%、膨润土注入率为 10%,泡沫注入率为 15%、膨润土注入率为 10% 两组复合改良试验。2 种改良剂配比条件下砂土  $S$  及  $k$  值如表 3 所示。

表 3 砂土复合改良试验结果

改良剂注入率/%		$S/\text{mm}$	$k/(10^{-6} \text{ m/s})$
泡沫	膨润土		
10	10	185	2.40
15	10	210	2.08

5 结语

本文主要通过改良后砂土的变水头渗透试验及坍落度试验,探讨了泡沫和膨润土泥浆对砂土渗透性的影响规律,得出以下结论:

1) 单一泡沫改良时,随着泡沫注入率的增加,砂土的  $k$  值虽有所降低,但达不到盾构掘进时螺旋机渣土抗渗要求;砂土的流动性可得到明显的改善,在泡沫注入率为 10% 时,已达到盾构要求的渣土流动性指标。

2) 单一膨润土泥浆改良时,随着膨润土泥浆注入率的增加,砂土的  $k$  值明显降低,在  $k < 10^{-5} \text{ m/s}$  时已达到盾构要求的渣土抗渗性指标;当膨润土注入率为 20%~25% 时,才能达到渣土流动性要求。

3) 通过单一泡沫和单一膨润土泥浆改良试验可知:仅使用泡沫改良可达到流动性指标但无法达到渣土抗渗指标;仅使用膨润土泥浆改良可达到渣土抗渗指标,也可达到流动性指标,但需要膨润土泥浆注入率大于 20%。因此,泡沫主要用来改善砂土流动性,膨润土泥浆主要用来改善砂土的抗渗性。采用泡沫+膨润土泥浆复合改良时,合理的改良剂配方为:泡沫注入率=10%~15%、膨润土注入率=10%。此时,在优化泡沫和膨润土泥浆注入率的基础上既能够达到渣土抗渗要求,也能够达到流动性要求。

参考文献

[1] 马建,孙守增,芮海田,等. 中国筑路机械学术研究综述·2018 [J]. 中国公路学报,2018(6):1.  
MA Jian, SUN Shouzeng, RUI Haitian, et al. Review on China's road construction machinery research progress;2018 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018(6):1.  
[2] BUDACH C, THEWES M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015(8):296.  
[3] 王树英,刘朋飞,胡钦鑫,等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述 [J]. 中国公路学报,2020(5):12.  
WANG Shuying, LIU Pengfei, HU Qinxin, et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunneling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020(5):12.  
[4] 王树英,胡钦鑫,王海波,等. 盾构泡沫改良砂性渣土渗透性及其受流塑性和水压力影响特征研究 [J]. 中国公路学报,2020(2):94.  
WANG Shuying, HU Qinxin, WANG Haibo, et al. Study on permeability characteristics of the shield foam conditioned sand under influences of flow plasticity and water pressure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020(2):94.  
[5] PEILA D. Soil conditioning for EPB shield tunneling [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014(3):831.  
[6] BORIO L, PEILA D. Study of the permeability of foam conditioned soils with laboratory tests [J]. American Journal of Environmental Sciences, 2010(4):365.  
[7] HUANG S, WANG S, XU C, et al. Effect of grain gradation on the permeability characteristics of coarse-grained soil conditioned with foam for EPB shield tunneling [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019(11):4662.  
[8] 王海波,王树英,胡钦鑫,等. 盾构砂性渣土-泡沫混合物渗透性影响因素研究 [J]. 隧道建设,2018(5):833.  
WANG Haibo, WANG Shuying, HU Qinxin, et al. Study of influencing factors of permeability of sand-foam mixture for shield tunneling [J]. Tunnel Construction, 2018(5):833.

(下转第 35 页)