

福州中粗砂地层泥水盾构泥浆成膜特性试验研究

叶伟涛¹, 王靖禹¹, 付龙龙¹, 周顺华¹, 宁纪维²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100102)

摘要: 泥水平衡盾构在掘进过程中维持开挖面土体稳定的关键在于泥浆性能与地层相匹配。以福州地铁泥水平衡盾构全断面穿越中粗砂层掘进为工程背景, 首先分析制浆材料对泥浆性质的影响, 并开展泥浆成膜室内试验, 采用析因设计综合分析不同泥浆相对密度和黏度下试验的单位滤水量、成膜时间和泥膜形态, 以及泥仓压力和含砂率对泥浆成膜的影响。结果表明: 在本试验泥浆成膜试验条件下, 最终滤水量随着相对密度的增大先减小后增加, 随着黏度的增大而减小, 同时, 黏度对试验最终滤水量的影响小于相对密度的影响; 随着泥浆中含砂率的增加, 试验最终滤水量先减小后增大; 当含砂率为 10%~16%时, 泥浆成膜最终单位滤水量小, 泥浆成膜效果良好; 就地取材, 将淤泥质土作为泥浆组分之一时, 适应福州中粗砂层的泥浆相对密度为 1.12~1.18, 黏度为 26~30 s。

关键词: 隧道工程; 泥水平衡盾构; 泥浆成膜; 泥浆配比; 单位滤水量; 室内试验

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)05 - 1260 - 10

Laboratory test and characteristic of filter film formation of slurry shield in medium-coarse sand stratum in Fuzhou

YE Weitao¹, WANG Jingyu¹, FU Longlong¹, ZHOU Shunhua¹, NING Jiwei²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: The matching of slurry to stratum is the key factor to maintain the stability of the excavation face in tunnel construction using the slurry balance shield. The tunnel project in Fuzhou, where slurry balance shield was driven in medium-coarse sand, was investigated with the laboratory tests to explore the influence of constituents on slurry property. The influence of slurry properties including slurry relative density, viscosity and sand factor on the forming of filter film under different slurry pressures was analyzed. The final unit water filtration was found to decrease firstly and then increase with the slurry relative density increasing. The final unit water filtration decreases as the slurry viscosity increases. The viscosity has less influence on the final unit water filtration than the slurry relative density does. The final unit water filtration decreases firstly and increases later with increasing the sand content in slurry. When the sand content is between 10% and 16%, the final unit water filtration in the tests is the smallest with a well-formed filter film. When the local mucky soil is taken as a component of slurry, the suitable slurry relative density which matches the medium-coarse sand stratum is in the range 1.12 to 1.18 and the viscosity is in the range 26 to 30 seconds.

Key words: tunnelling engineering; slurry balance shield; filter film formation; proportion of slurry constituents; unit water filtration; laboratory experiment

收稿日期: 2017 - 11 - 09; **修回日期:** 2017 - 12 - 14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708423)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51708423)

作者简介: 叶伟涛(1994 -), 男, 2016年毕业于中南大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程、地下工程方面的研究工作。E-mail: yeweitao@tongji.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1446

1 引言

泥水平衡盾构以其优良的压力控制模式和广泛的土层适应性等特点,大量应用于高渗透性地层和过江隧道中,例如德国易北河第四隧道、荷兰西尔维斯特隧道、上海复兴东路隧道、武汉长江隧道、南京长江隧道、狮子洋隧道、杭州钱江隧道和南京纬三路隧道等工程^[1-3]。相比于土压平衡盾构通过土仓压力直接维持开挖面稳定^[4],泥水平衡盾构通过在开挖面上形成泥膜,产生支护压力来维持开挖面土体的稳定^[5]。其要求泥浆能与地层相匹配,此时泥浆颗粒通过渗透和堆积在开挖面形成泥膜,使泥仓压力迅速转化为有效支护压力,从而维持开挖面土体的稳定。若泥浆性能与地层不匹配,则容易造成泥浆颗粒直接透过地层孔隙渗出而无法及时形成有效的支护压力,进而导致开挖面前方土体失稳,引起地表沉降甚至坍塌。因此,如何制备与地层相匹配的泥浆,从而迅速形成能提供有效支护压力的泥膜,是泥水平衡盾构施工中的关键。

为寻找不同地层条件下泥浆的合理配比,探究泥浆在地层中的成膜效果,国内外学者围绕泥浆性质和成膜效果评价开展了大量研究。在研究泥浆在地层中的成膜效果方面,通常都采用不同的自制泥浆渗透装置进行泥浆成膜试验,以最终滤水量^[3, 6-10]、孔隙水压力^[6]或泥膜形态^[8, 10]来评价泥浆成膜的效果。闵凡路等^[3]通过自行设计的压力泥浆渗透试验装置,研究了不同性质的泥浆在不同高渗透性地层中的渗透规律以及所形成泥膜的特点,分为泥皮型、渗透-泥皮型和渗透型 3 种泥膜形态。魏代伟等^[6]针对不同性质泥浆和地层开展渗透试验,通过测量泥膜形成过程中超静孔隙水压力的增长,分析泥膜形成所需要的时间,揭示泥膜形成过程中有效应力的转化率及泥膜形成过程中的滤水规律。

泥浆性质对泥浆成膜效果影响显著,T. Watanabe 和 H. Yamazaki^[7]在高渗透性地层中开展泥浆成膜试验,发现随着泥浆密度的增大,泥浆滤失量逐渐减小。韩晓瑞等^[8]通过在砾砂层中进行室内试验,发现泥浆黏度越大,泥浆的滤失量越小,越易于形成泥膜。F. L. Min 等^[9-10]在高渗透性地层中进行泥浆成膜试验,发现在一定范围内泥浆中的黏粒含量越高,泥浆成膜试验滤水量越小,形成泥膜效果越好。袁大军等^[11]确定了北京地下直径线盾

构泥浆特性参数,通过砂土悬浮试验研究了不同性质的泥浆对砂土的悬浮能力,并根据盾构进出泥浆输送能力初步确定了泥浆的相对密度和黏度。

由于相同黏度和相对密度下不同材料配比的泥浆的成膜效果也会有较大差异,韦良文等^[12-17]直接分析了不同泥浆材料和配比对于成膜效果的影响。韦良文等^[12]结合上海复兴东路越江隧道泥水盾构,提出了 PMS 泥水体系。P. Fritz 等^[13-14]通过研究砂、蛭石、聚合物等添加剂对泥浆成膜效果的影响,确定了保证苏黎世附近的隧道工程顺利掘进的泥浆配方。吴迪等^[15]通过设计室内试验,对不同制浆材料在砂性土层中的填充效果进行实测与分析,得到在中粗砂地层中由膨润土和黏土颗粒共同填充地层孔隙;在砾砂地层中主要依靠膨润土水化后形成的胶结颗粒集合进行填充。王振飞等^[16]针对北京砂卵石地层,研究了不同添加剂、不同膨润土对泥浆性质和泥浆成膜效果的影响,得到了适用于北京砂卵石地层的泥浆。

在既有泥浆性质的研究中,通常仅考虑单一的影响因素,对各因素之间的相互作用考虑不足。因此,本文将泥浆的黏度和相对密度进行综合考虑,通过回归方程定量分析泥浆黏度和相对密度对泥浆成膜效果的影响。同时,分析不同泥浆黏度和相对密度对泥浆成膜试验结束后泥浆成膜形态的影响,这从泥浆性质的角度对泥膜形态研究进行了扩展。在泥水盾构掘进过程中,泥浆中通常会掺杂一定量的粗颗粒。根据现场制浆材料的选择,研究了泥浆含砂率对泥浆成膜试验滤水量的影响。实际上,由于地层性质和泥浆材料配比的不同,现场盾构泥浆仍然需要结合室内试验和现场材料、盾构机选型进行综合确定。基于既有的研究成果,并考虑就地取材的经济性,本文给出了适应福州地铁泥水平衡盾构全断面穿越中粗砂层掘进的泥浆控制方案,可为类似工程提供一定参考。

2 成膜地层特点和泥浆配制

2.1 工程特点

如图 1 所示,福州地铁金祥站—金山站区间右线长约 598.236 m,左线长约 542.273 m。盾构全断面穿越了中粗砂层,上覆土层厚 9.5~11.6 m,潜水水位埋深为 0.85~4.90 m,含水层主要为中粗砂层。同时,该区间上部建筑物密集,上覆荷载大,一旦盾构施工控制不良,中粗砂地层极易发生变形失稳

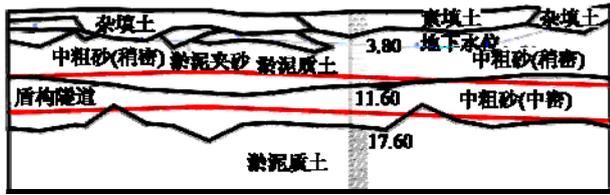


图1 福州地铁泥水盾构穿越地层纵剖面

Fig.1 Strata profile of shield tunneling construction in Fuzhou

的现象，引起施工事故。这对盾构掘进施工控制和泥浆成膜提出了更高的要求，因此，泥浆应与中粗砂地层相匹配，能够在开挖面上快速形成泥膜，将泥仓压力迅速转化为有效支护压力，最终保证开挖面的稳定。

在金祥站—祥坂站区间，盾构主要穿越了中粗砂层和淤泥质土层，其中江下段主要为淤泥质土层。既有研究和工程中，一般将黏土作为制浆材料，而福州过江区间穿越较长的淤泥质土层，考虑对现场材料的应用和处理，可将淤泥质土作为制浆材料。表1为福州中粗砂地层的地质参数。

表1 福州中粗砂地层参数

Table 1 Parameters of medium-coarse sand stratum in Fuzhou

土层名	天然重度/(kN · m ⁻³)	孔隙比	含水量/%	渗透系数/(m · d ⁻¹)
中粗砂地层	19	0.667	26.7	26.6

表2 既有试验和工程泥浆参数表

Table 2 Slurry parameters from existing experiments and engineering

工程/试验	地层	制浆材料	泥浆性质			
			密度/(g · cm ⁻³)	黏度/s	2 h 析水率/%	失水量/(cm · 30 min ⁻¹)
南京长江隧道试验 ^[3]	砾砂层	淤泥质粉质黏土地层储存的泥浆+粉土+CMC(调黏度)	1.18	23	2~58	-
南京长江隧道试验 ^[8]	砾砂层	可循环利用的废浆+NSHS~3(调黏度)	1.21	17.3~24.4	2~16	-
北京地下直径线试验 ^[11]	砂卵石地层	水+自然黏土+制浆剂;	1.005~1.07;	21~33;	-	-
		水+膨润土+聚丙烯酰胺	1.03~1.032	16~25	-	-
日本白幡第二干线 ^[11]	砂砾石层(夹粉砂、黏土)	黏土+怀俄明州产的膨润土+聚合物	1.125	30	-	-
苏黎世 Zimmerberg Base Tunnel ^[13]	富水砂层、黏土层	膨润土+聚合物+细砂+蛭石(50: 0.5: 100: 30)	-	-	-	-
南京地铁越江隧道试验 ^[15]	中粗砂/砾砂	膨润土+黏土+制浆剂	1.05~1.25	-	-	<4
北京地下直径线试验 ^[16]	砂卵石地层	红色改性钠基膨润土+黏土+聚丙烯酰胺	1.08	30	-	-
南京纬三路过江隧道 ^[18]	中粗砂层	黏土浆+膨润土浆	1.14~1.16	20.3~24	-	-
	砾砂层	黏土浆+增黏剂	1.18~1.19	-	-	-

表3 试验泥浆参数初选范围表

Table 3 Preliminary selection of slurry parameters

研究地层	模拟压力/MPa	泥浆配制材料	泥浆参数初选范围		
			相对密度	黏度/s	失水量/(cm · 30 min ⁻¹)
中粗砂层	0.1~0.4	钠基膨润土+区间淤泥质土+CMC	1.05~1.25	18~30	≤4

2.2 泥浆配制

在不同的高渗透性地层中，泥水平衡盾构中泥浆配制情况各有不同。表2为既有研究中泥浆成膜试验所得的泥浆参数和既有工程中泥水平衡盾构实际使用的泥浆参数。由表2可知，盾构泥浆一般由膨润土、地层材料和制浆剂组成，这样的泥浆称为多组分泥浆，简称MIS。其中，膨润土为泥浆主要成份；地层材料主要采用黏土，用于调节泥浆相对密度；制浆剂主要采用各类聚合物，用于调节泥浆黏度，改善泥浆性能。

取用福州现场钠基膨润土，过江区间淤泥质土和CMC。其中，膨润土采用福州某地铁标段的钠基膨润土，其中粒径在0.075 mm以下的颗粒含量大于96%。淤泥质土取自福州地铁区间，含水量为46%，其特点为含砂率较高，粒径在0.075 mm以上的颗粒含量占24.5%。CMC为市面上通用的商品羧甲基纤维素钠，用以改良泥浆黏度、失水量，为使CMC完全溶于水中，可先将其配置为CMC溶液。

参考表2中泥浆的配制情况，主要考虑泥浆的相对密度、黏度和保水性能，选取中粗砂地层中泥浆成膜试验泥浆参数的范围，考虑盾构隧道埋深，根据全覆土压力理论计算泥仓压力以设置试验压力范围，如表3所示。

2.3 静置时间对泥浆性质的影响

MIS 的静置时间对泥浆性质有影响，其中对泥浆黏度影响显著。由表 3 配置 MIS 进行泥浆静置试验，其中淤泥质土浓度为 60 g/kg，CMC 浓度为 2 g/kg，膨润土为变量，浓度为 20~100 g/kg。

如图 2 所示，随着静置时间的增加，MIS 黏度增加，在第 3 d 时泥浆黏度达到最大值。泥浆中膨润土含量越高，制浆剂和膨润土共同作用对其黏度随时间增长的促进效果越显著。当泥浆中膨润土浓度为 80~100 g/kg 时，MIS 黏度随静置时间增长迅速。在该浓度下，MIS 黏度过大，可减少 CMC 或膨润土的用量或增大淤泥质土的用量。当泥浆中膨润土浓度为 60 g/kg 时，泥浆黏度随时间上升，第 3 d 后增速逐渐减缓。当泥浆中膨润土浓度在 20~40 g/kg 时，泥浆黏度随时间先上升后略微减小，最后趋于平稳。

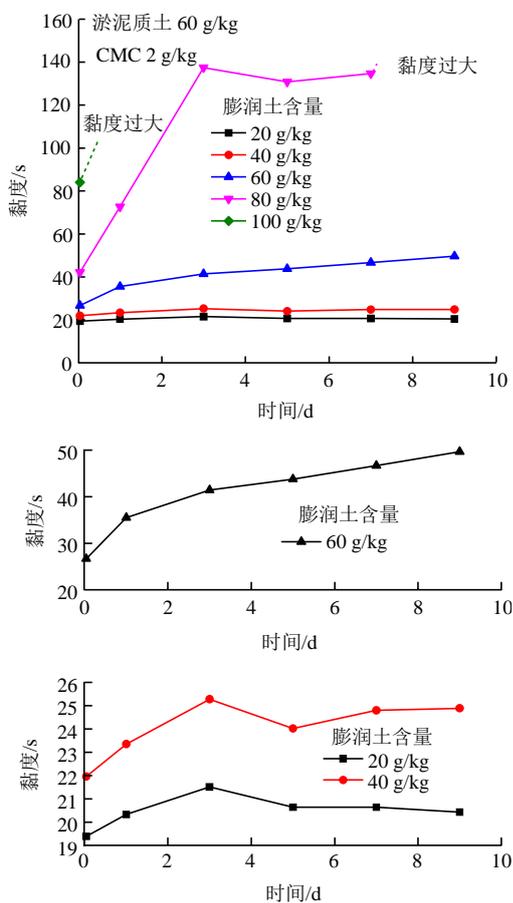


图 2 泥浆黏度和静置时间的关系

Fig.2 Relationships between slurry viscosity and standing time

3 泥浆成膜试验设计

3.1 泥浆成膜试验原理

根据泥水平衡盾构的工作原理可知，开挖面通

过形成稳定的泥膜来维持其支护压力。在泥浆成膜试验中，泥浆在外加压力作用下向试验地层渗透，泥浆颗粒填充地层孔隙，形成渗透型泥膜；当泥浆浓度较大时，泥浆颗粒易在开挖面上快速堆积，累积成一层泥皮，形成泥皮型泥膜^[3, 19]。

泥浆成膜试验中，当滤水量保持恒定增长时，可认为泥膜已经形成，滤水量达到恒定增长的时间即为泥膜形成时间。泥浆成膜时的滤水量可以评价泥浆的质量，泥膜形成后的滤水量可以评价泥浆成膜的质量；而泥浆成膜试验的最终滤水量可以综合评价泥浆成膜的效果。

3.2 泥浆成膜试验装置

试验采用自制的泥浆成膜试验装置，如图 3 所示。其中装置的主体为内径 14 cm、高 30 cm 的有机玻璃圆柱筒，筒上为铝制有机玻璃盖板，盖板与筒之间放置橡胶密封圈保证气密性。上盖板设有进气孔，和外部空气压缩机相连接，通过空气压缩机提供气压，以模拟泥水平衡盾构中的泥仓压力，同时设置压力表控制筒内气压。装置下部设有出水孔，试验中滤水量通过量杯收集，并通过电子秤实时读数。有机玻璃圆柱筒中分为 3 层，从下至上分别为碎石垫层、地层和泥浆。

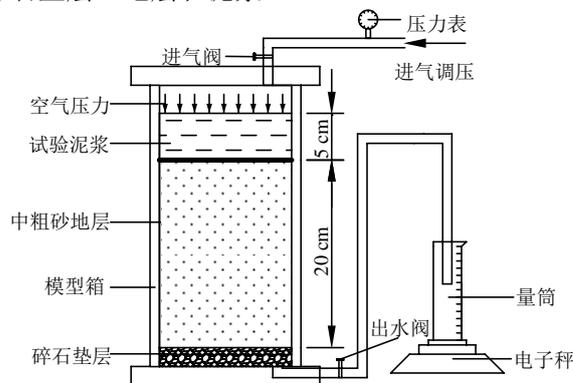


图 3 泥浆成膜试验装置

Fig.3 Test apparatus of slurry infiltration in slurry shield tunneling

3.3 泥浆成膜试验材料

泥浆材料和配比参考表 3。采用 1 kg 水配置泥浆，先添加膨润土制得新浆，然后添加淤泥质土调节泥浆相对密度，添加 CMC 调节泥浆黏度。地层材料采用福州地铁所穿越的中粗砂层，图 4 为福州中粗砂地层颗粒级配。其中，地层材料最大颗粒粒径在 2.5~5 mm 范围，含量为 0.2%，颗粒粒径在 0.315~0.63 mm 范围含量最高，为 71.8%。

3.4 以泥浆相对密度和黏度为变量的成膜试验方案

采用析因设计，研究泥浆相对密度、泥浆密度

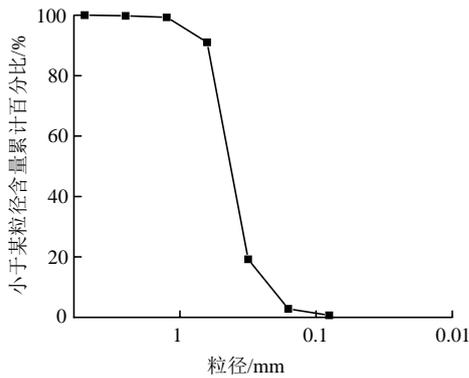


图4 福州中粗砂地层颗粒级配

Fig.4 Grading curve of medium-coarse sand from Fuzhou

和泥仓压力对泥浆成膜性能的影响。将表3中密度和黏度2个因素按4个水平划分为16组试验, 在最后设置1组纯膨润土的泥浆进行试验, 探究其性能与多组分泥浆的差异, 如表4所示。每组试验模拟压力按0.1 MPa为一级, 分为4个水平。同时, 在泥浆配置中, 泥浆相对密度误差控制在±0.01, 泥浆黏度误差控制在±1 s, 控制泥浆失水量≤4 cm/(30 min)。

表4 以泥浆相对密度和黏度为变量的成膜试验方案分组

Table 4 Testing program under different slurry densities and viscosities

组号	泥浆相对密度	泥浆黏度/s	膨润土用量/g	淤泥质土用量/g	CMC用量/g	水/g
1	1.05	18	60	125	0.6	1000
2	1.05	22	60	100	1.0	1000
3	1.05	26	60	120	2.2	1000
4	1.05	30	60	125	3.2	1000
5	1.12	18	80	550	0.3	1000
6	1.12	22	80	450	0.4	1000
7	1.12	26	80	480	2.6	1000
8	1.12	30	80	460	3.0	1000
9	1.18	18	80	700	0.1	1000
10	1.18	22	80	850	0.3	1000
11	1.18	26	80	800	0.8	1000
12	1.18	30	80	700	1.3	1000
13	1.25	18	100	1000	0.0	1000
14	1.25	22	100	1100	0.3	1000
15	1.25	26	100	980	0.8	1000
16	1.25	30	100	1160	1.1	1000
17	1.09	28	200	0	0.0	1000

3.5 以泥浆含砂率为变量的成膜试验方案

考虑泥浆材料中选取的现场淤泥质土中夹细砂, 采用控制变量法, 研究泥浆含砂率对泥浆成膜性能的影响, 含砂率由NA-1型含砂量计测定。按含砂率每5%为一级, 将试验分为6组, 如表5所

示。对于粗中砂地层, 泥浆的含砂率采用粒径在0.25~0.075 mm的细砂颗粒调控, 若调控含砂率颗粒粒径过大, 则相当于在泥浆中加入了粗中砂地层材料。为控制单一变量, 取泥浆相对密度为1.25, 泥浆黏度为30 s, 此时, 泥浆中颗粒含量多, 泥浆成膜试验的滤水量结果差异会更显著。

表5 以泥浆含砂率为变量的成膜试验方案分组

Table 5 Testing program under different sand contents

组号	膨润土用量/g	筛分后黏粒(粒径≤0.075 mm)用量/g	细砂用量/g	CMC用量/g	水用量/g	含砂率/%
18	100	500	0	0.3	1000	0.0
19	100	400	80	0.4	1000	5.3
20	100	360	150	0.6	1000	9.8
21	100	300	260	0.5	1000	16.1
22	100	230	350	0.5	1000	21.8
23	100	200	400	0.6	1000	26.8

3.6 泥浆成膜试验方法

按预设的分组配制泥浆, 静置并使泥浆充分水化。配置试验地层, 根据原状土地勘报告, 通过砂土天然含水量、密度换算试验中20 cm高砂柱应加的砂土质量。然后把应加砂土等分为5份, 逐次往圆柱筒装样, 并进行振捣。对试验地层进行饱和, 从下部出水口缓缓注水, 直至浸没土柱, 然后静置12 h。在试样饱和完成后, 往容器内注入已经配置好的泥浆并密封。

设置4级泥浆压力, 开始正式试验, 每级压力下试验维持3 min。每隔10 s记录下部出水管的排水量, 记录的排水量应减去饱和时透水石中所含的水量。当泥膜形成后, 泥浆渗流量维持稳定。此时, 关闭调压阀, 打开排气阀, 打开试样筒, 将未渗入土体的上部泥浆除去, 然后测试泥膜厚度。

4 泥浆成膜试验结果分析

4.1 以泥浆相对密度和黏度为变量的成膜试验结果分析

4.1.1 相对密度对单位滤水量的影响

图5为1~16组试验单位滤水量结果, 对比图5(a)~(d)可知, 当黏度相同时, 相对密度为1.05的泥浆单位滤水量最大, 滤水量的增加主要发生在泥膜形成前; 相对密度为1.12和1.18的泥浆滤水量较小, 滤水量的增加主要发生在泥膜形成前; 相对密度为1.25的泥浆最终滤水量较大, 滤水量的增加不仅与泥膜形成前相关, 还与泥膜形成后的质量相关。

分析泥膜形成的细观过程，当泥浆中细颗粒浓度低时，如图 5(a)所示，泥浆易渗透进地层，当渗透进地层的泥浆量足够多时，形成渗透型泥膜。这种情况下的泥浆成膜时间较长，但是形成的泥膜质量较好，泥膜形成后滤水量少。当泥浆中细颗粒浓度增多，颗粒填充地层的速度加快，泥膜更易形成，如图 5(b)和(c)所示。同时，部分泥浆渗透到地层，部分泥浆在中粗砂地层表面堆积，形成泥皮 - 渗透型泥膜。这种情况下成膜时间较短，形成泥膜质量好，泥膜形成后滤水量少。当泥浆中细颗粒浓度高时，如图 5(d)所示，这时悬浮的细砂颗粒也较多，形成泥膜的速度快，颗粒易在中粗砂地层表面堆积，形成泥皮型泥膜。这种情况下成膜时间短，但是形成的泥膜质量较差，泥浆只要渗透过泥皮就会产生滤水量，因此泥膜形成后滤水量多，试验成膜后单位滤水量曲线斜率较相对密度小的的大。

4.1.2 黏度对单位滤水量的影响

由图 5 可知，当相对密度相同时，黏度越大，泥浆的最终滤水量就越小；并且，泥仓压力越大，这种效果就越显著。由图 5 中滤水量曲线趋势可知，黏度对于泥浆成膜后的泥膜质量影响不大，但是对成膜的时间与成膜时的滤水量有较大影响，泥浆黏

度越大，颗粒间的黏聚效果越好，越容易形成泥膜，成膜时间越短。在图 5(a)中，黏度为 30 s 时滤水量大于黏度为 26 s 时，其原因为试验整体单位滤水量较大，单组泥浆制备和土样饱和的误差被放大。

4.1.3 泥仓压力对单位滤水量的影响

由图 5 可知，对于同一种泥浆，泥浆的最终滤水量随泥仓压力的增大而增大。对于每一级气压，泥浆的滤水量都经历了迅速增大到平稳的过程，这对应泥水盾构中泥膜的形成和稳定。当泥仓压力越大，泥浆中的细颗粒向地层中渗透以及粗细颗粒在地层表面堆积的速度越快，成膜时间就越短。相对而言，泥浆的滤水量就会增大。

4.1.4 泥浆成膜时间

目前泥浆成膜时间还没有明确的定义，魏代伟等^[6]以孔压转化达最大值的时间为泥浆成膜时间，吴迪等^[20]以孔隙填充率达 80%作为泥浆成膜时间。在本研究中，根据试验中滤水量随时间的变化，当滤水量趋于稳定或当其曲线斜率不超过 $6.5 \times 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，视为泥膜形成，此时的时间为泥浆成膜时间。

根据节 3.4 的试验结果，可得不同泥浆相对密度、黏度和压力下 16 组试验的泥浆成膜时间，如图 6

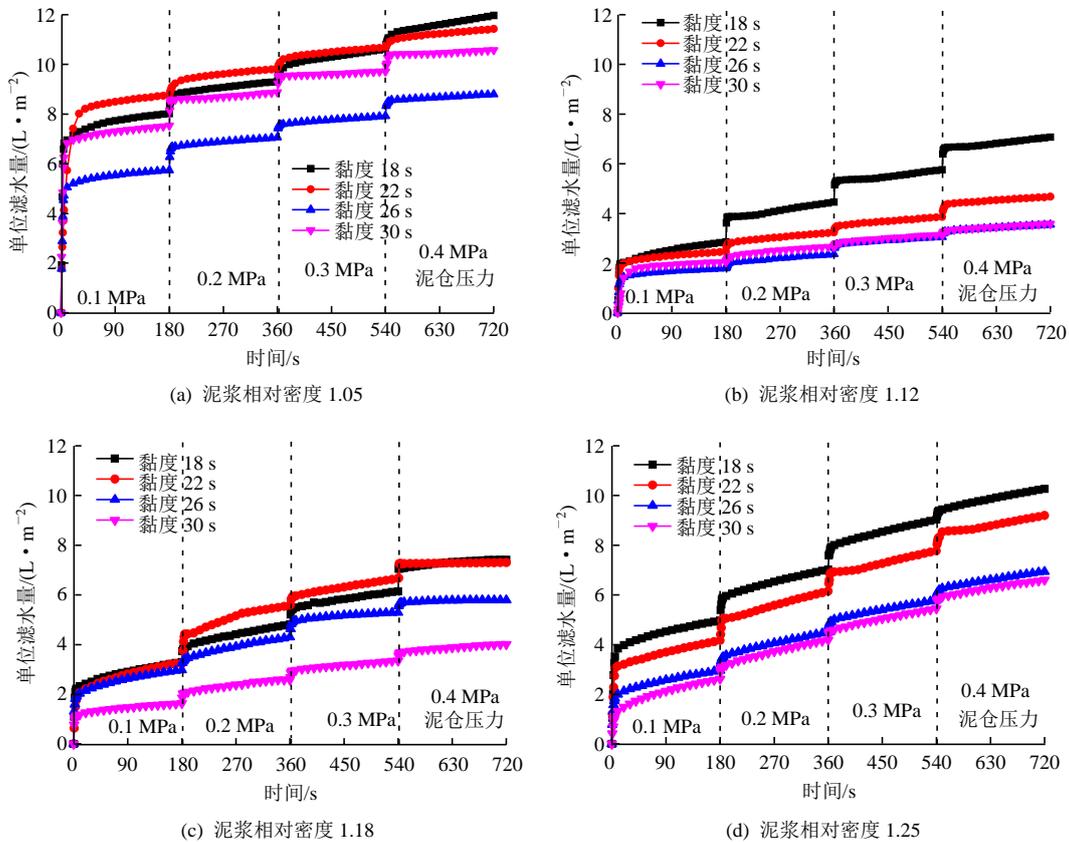


图 5 以泥浆相对密度和黏度为变量的成膜试验单位滤水量随时间的变化关系

Fig.5 Time curves of unit water filtration under different slurry densities and viscosities

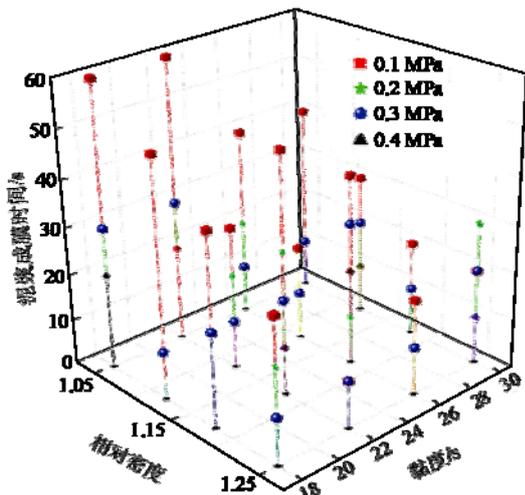


图6 1~16组试验的泥浆成膜时间

Fig.6 Filter film formation time of group 1 - 16 in laboratory experiments

所示。由图6可知，第一级泥仓压力(0.1 MPa)下泥膜形成时间较大，后三级泥仓压力下泥膜形成时间偏小。其主要原因是，在0.1 MPa泥仓压力下，泥膜已经形成和稳定，在此条件下施加下一级泥仓压力，是在前面的基础上形成新的泥膜，所得泥浆成膜时间偏短，这可以对应于泥水盾构施工中泥膜破坏再形成泥膜的时间。

同时，根据图6的总体趋势可知，泥膜形成时间随泥浆相对密度的增大而减小。其原因为泥浆相对密度越大，其中的泥浆颗粒数量就越多，相同时间内能够更快地渗透、填充地层或是在地层表面堆积，因此成膜的时间短。泥膜形成时间随泥浆黏度的增大而减小。其原因为泥浆黏度越大，泥浆中颗粒之间的黏结性更好。在泥浆颗粒填充地层的过程中，能更快形成空间网状结构，因此成膜的时间短。

4.1.5 最终滤水量分析

图7为16组试验的最终单位滤水量，对比16组试验，在相同相对密度下，对于每一级泥仓压力，泥浆成膜后不同黏度的泥浆最终滤水量的最大差值为3 L/m²；相同黏度下，对于每一级泥仓压力，泥浆成膜后不同相对密度的泥浆最终滤水量的最大差值为5 L/m²，可知黏度对泥浆成膜的影响小于相对密度的影响。

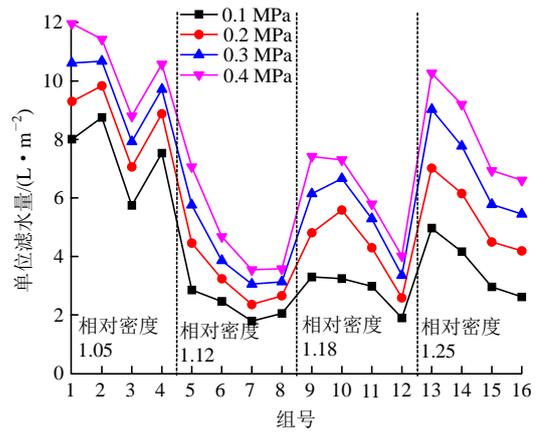


图7 1~16组试验最终单位滤水量

Fig.7 Final unit water filtration of group 1 - 16 after laboratory experiments

对图7中不同压力下的单位滤水量结果以泥浆相对密度和黏度为自变量进行回归分析，采用如下方程拟合：

$$Z = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}x \cdot y + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 \quad (1)$$

式中： $p_{00}, p_{01}, \dots, p_{12}$ 为拟合参数，代表泥浆相对密度和黏度的影响程度， x 为泥浆相对密度， y 为泥浆黏度， z 为单位滤水量。4级压力下的拟合参数如表6所示，压力为0.1 MPa下单位滤水量三维拟合图如图8所示，其他压力下的滤水量规律类似。由拟合方程和图8，可直观得出泥浆相对密度对泥浆成膜试验最终滤水量的影响大于泥浆黏度的影响。

回归分析中方程的拟合度由方程确定系数 R^2 评价，当 R^2 越接近1，说明方程拟合度越高，4级压力下，拟合方程中 R^2 都大于0.93，拟合效果较好。

4.1.6 纯膨润土泥浆和多组分泥浆滤水量结果对比

图9为纯膨润土泥浆组(第17组试验)和4组多组分泥浆试验的滤水量结果，可知纯膨润土泥浆无论相对密度和黏度大于还是小于多组分泥浆，其最终单位滤水量都远大于多组分泥浆的滤水量。究其原因，纯膨润土泥浆中的颗粒粒径小于0.075 mm，级配单一，当浓度较小时，颗粒易穿透中粗砂地层。而多组分泥浆中含有一部分粒径大于0.075 mm的粗颗粒，在一定范围内能更快地堵塞地层，形成泥膜，同时最终滤水量较小。

表6 不同压力下泥浆最终滤水量拟合参数

Table 6 Fitting parameters of final unit water filtration under different pressures

压力/MPa	p_{00}	p_{10}	p_{01}	p_{20}	p_{11}	p_{02}	p_{30}	p_{21}	p_{12}	R^2
0.1	5 471	-13 640	-13.4	11 340	19.52	0.094 4	-314 2	-7.062 0	-0.078 2	0.943 9
0.2	6 483	-16 390	-7.026	13 850	5.761	0.162 1	-3 908	0.044 6	-0.137 9	0.934 9
0.3	6 795	-17 160	-7.591	14 490	5.631	0.184 2	-4 083	0.362 1	-0.152 8	0.941 8
0.4	6 520	-16 440	-5.279	13 900	-1.432	0.244 9	-3 930	4.474 0	-0.200 0	0.959 4

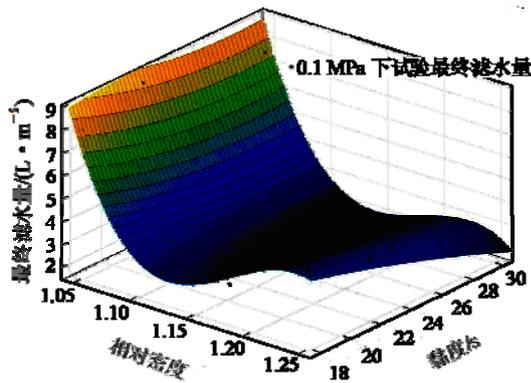


图 8 不同泥浆相对密度和黏度下成膜试验最终滤水量回归分析

Fig.8 Regression analysis curves of final unit water filtration under different slurry densities and viscosities

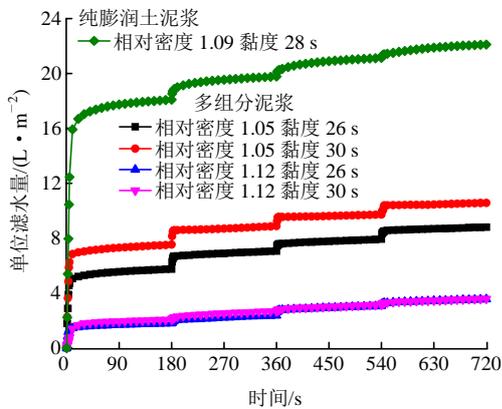


图 9 纯膨润土泥浆和多组分泥浆试验组单位滤水量对比
Fig.9 Comparison of unit water filtrations of bentonite slurry group and multiple ingredients slurry groups

4.1.7 试验后泥膜形态分析

由 16 组泥浆成膜试验后泥浆成膜的形态可知，相对密度对泥膜形态影响大，黏度对泥膜形态影响小。图 10 为 4 种相对密度下泥浆成膜试验结束后的泥膜典型形态，在这 4 组试验中，泥浆相对密度为变量，黏度为恒量(26 s)。

表 7 为测量所得不同相对密度下泥浆成膜形态。当相对密度越大时，泥膜试验成膜渗透带距离越小，泥皮厚度越大。这表明泥浆相对密度增大，泥膜形态从渗透带型泥膜向泥皮型泥膜转化，这是由于泥浆中颗粒浓度增大，导致泥浆颗粒迅速在地层表面沉积，没有足够的时间渗透到中粗砂地层中，直接在地层表面形成了泥皮。



(c) 相对密度 1.18 (d) 相对密度 1.25

图 10 不同相对密度下泥浆成膜试验泥膜厚度

Fig.10 Thickness of filter film in experiments under different slurry densities

表 7 不同相对密度下泥浆成膜形态

Table 7 Filter film formation under different slurry densities

泥浆相对密度	成膜形态	泥皮厚度/mm	渗透距离/mm
1.05	泥皮~渗透带	1	15
1.12	泥皮~渗透带	2	5
1.18	泥皮~渗透带	4	3
1.25	泥皮	6	0

4.2 以泥浆含砂率为变量的成膜试验结果分析

图 11 为不同含砂率的 18~23 组泥浆的泥浆成膜试验结果，由图可知，含砂率在一定的范围内，泥浆中的细砂粒对泥浆成膜起促进作用。当含砂率大于 16% 时，泥浆中细砂粒对泥浆成膜起负面作用。含砂率 9.8%~16.1% 时泥浆泥膜形成时间短，试验结束后最终滤水量小，泥膜形成后质量高。

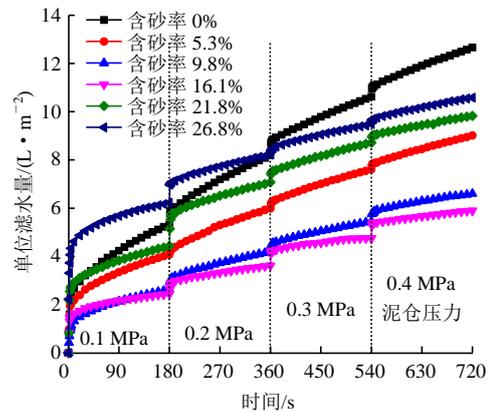


图 11 不同含砂率成膜试验单位滤水量随时间的变化关系
Fig.11 Time curves of unit water filtration under different sand contents

从微观上探究，中粗砂地层中孔隙的填充材料需要有良好的级配。当泥浆中细颗粒较多时，颗粒被孔隙俘获，但是也容易再脱离；当泥浆中粗颗粒增多时，颗粒在压力的作用下，泥浆中质量大的粗颗粒更易迅速填充地层，同时，剩余的空隙由细颗粒填充，不仅能更快地形成泥膜，而且形成的泥膜



(a) 相对密度 1.05 (b) 相对密度 1.12

质量较好；但是当泥浆含砂率大于 16%时，泥浆中的粗颗粒含量高，细颗粒含量相对减少。此时细颗粒不足以填充地层，粗细颗粒直接在开挖面堆积，形成的泥膜质量下降，不够致密，渗透性较强。

5 泥浆制备及掘进方案设计

5.1 泥浆静置时间

由节 2.3 中泥浆静置时间的分析和施工现场泥浆池的配置，根据配制泥浆所需的不同材料，尤其考虑膨润土充分水化所需要的时间，给出泥浆静置时间的方案，如表 8 所示。

表 8 泥浆静置时间

Table 8 Standing time of slurry

泥浆类型	静置时间/d
新配泥浆	2~3
循环泥浆(添加膨润土)	1~2
循环泥浆(添加 CMC/淤泥质土)	直接使用

5.2 考虑刀盘转速的福州中粗砂层泥浆配制方案

福州地铁泥水盾构采用面板辐条式刀盘，共 6 个辐条，刀盘空隙率为 27.8%，其转速为 0.30~3.05 rpm。相邻 2 个辐条到达同一位置所需的时间是泥膜从破坏到形成到下一次破坏需要的时间，刀盘转动一周，开挖面上的泥膜将会破坏 6 次。因此，刀盘的转速决定了泥膜从破坏 - 形成 - 下一次破坏的时间间隔。表 9 为泥膜前、后 2 次破坏时间间隔的估算。

表 9 泥水盾构泥膜 2 次破坏之间的时间间隔

Table 9 Time interval between two times of destruction of filter film

盾构机刀盘形式	刀盘转速/ rpm	刀盘转动一周 时间/s	泥膜 2 次破坏之间 的时间间隔/s
辐条面板式， 6 个辐条均匀布置， 相邻辐条间隔 60°	0.3	200	33.3
	0.5	120	20.0
	0.8	75	12.5
	1.0	60	10.0
	1.5	40	6.7
	2.0	30	5.0
	2.5	24	4.0
	3.0	20	3.3

掘进速度越快，盾构机刀盘转速也越大。此时，要求泥膜形成的速度更快，泥膜形成的时间更短。由表 9 可知，当转速为 0.5, 1.0 rpm 时，泥膜形成时间要求在 20 和 10 s 以内；根据试验结果可知泥

浆成膜时间一般至少需要 10 s，为保证泥浆在相邻两辐条的时间间隔之间能够形成稳定的泥膜，刀盘转速可控制在 0.5~1.0 rpm 范围。

根据盾构建议刀盘转速、泥浆成膜时间(见图 6)以及最终滤水量(见图 7 和 11)的分析，可以给出福州中粗砂地层的泥浆配制控制方案，如表 10 所示。

表 10 中粗砂地层泥浆配制建议方案

Table 10 Proposed slurry for medium-coarse sand stratum

地层	泥浆相对 密度	泥浆 黏度/s	泥浆 含砂 率/%	泥浆失 水量/(cm· (30 min) ⁻¹)	泥浆材料
粗中砂	1.15±0.02	26~30	5~ 10	≤4	膨润土、淤泥质土、CMC

5.3 现场泥浆使用情况

在福州地铁中粗砂层泥水盾构掘进过程中，利用江下段淤泥质土配制泥浆，按表 10 控制泥浆性质，配比为膨润土：淤泥质土：CMC：水= 80：600：2：1 000。泥水盾构在中粗砂地层掘进过程中，刀盘转速控制在 0.5~1.0 rpm 范围，推进速度控制在 20~30 mm/min 范围。根据现场施工反馈可知，在盾构掘进过程中，泥浆送泥密度控制在 1.12~1.18 范围，出泥密度则在 1.17~1.25 范围，泥水盾构掘进平稳，开挖面稳定，盾构推进后地表沉降小，泥浆效果良好。

6 结 论

(1) 就地取材，将淤泥质土作为泥浆组分之一方案可行，试验中，泥浆成膜试验最终滤水量随着相对密度的增大呈现先下降后上升的趋势；随着黏度的增大呈现下降的趋势。泥浆相对密度越大，黏度越高，则泥膜形成时间越短，泥浆成膜时的单位滤水量越小。当泥浆相对密度超过 1.15 时，泥浆成膜后的单位滤水量增大，说明所得泥膜保水性能较差，其主要原因在于泥浆材料中淤泥质土比例的增加。

(2) 在中粗砂地层中，泥浆成膜形态一般为渗透 - 泥皮型。泥浆相对密度增加，泥膜的厚度随之增加，泥浆的渗透距离随之减少，泥浆成膜的形态也由渗透 - 泥皮型逐渐过渡到泥皮型。另外，在本文试验条件下，泥浆的黏度增加对泥膜的厚度改变不大。

(3) 泥浆含砂率对泥浆成膜有影响。本文试验条件下，含砂率在 10%~16%时泥浆泥膜形成时间短，泥膜质量高。当含砂率大于 16%时，泥浆中细

砂粒对泥浆成膜起负面作用。但是, 关于含砂率影响的机制还有待后续研究。

(4) 结合泥浆成膜试验结果、福州中粗砂地层特点及泥水盾构现场情况, 给出利用现场淤泥质土作为制浆材料的泥浆制备方案, 泥浆最优相对密度在 1.15 左右, 黏度在 26~30 s, 现场施工表明所配泥浆效果良好。

参考文献(References):

- [1] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97 - 109.(HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunneling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97 - 109.(in Chinese))
- [2] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179 - 187.(WANG Mengshu. Tunneling by TBM/shield in china: state-of-art problems and proposals[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179 - 187.(in Chinese))
- [3] 闵凡路, 徐静波, 杜佳芮, 等. 大直径泥水盾构砾砂地层泥浆配制及成膜试验研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(6): 141 - 146.(MIN Fanlu, XU Jingbo, DU Jiarui, et al. Experimental study on the slurry preparation and filter cake formation for a large-diameter slurry shield in gravel and sand stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(6): 141 - 146.(in Chinese))
- [4] 许恺, 季昌, 周顺华. 砂性土层盾构掘进面前土体改良现场试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 147 - 155.(XU Kai, JI Chang, ZHOU Shunhua. Soil conditioning field test before heading face of EPB shield in sandy soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 147 - 155.(in Chinese))
- [5] LI Y, EMERIAULT F, KASTNER R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2009, 24(4): 472 - 481.
- [6] 魏代伟, 朱伟, 闵凡路. 砂土地层泥水盾构泥膜形成时间及泥浆压力转化率的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 423 - 428.(WEI Daiwei, ZHU Wei, Min Fanlu. Experimental study of forming time of filter cake and conversion rate of slurry pressure in slurry shield in sand stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 423 - 428.(in Chinese))
- [7] WATANABE T, YAMAZAKI H. Giant size slurry shield is a success in Tokyo[J]. Tunnels and Tunnelling, 1981, 13(1): 13 - 17.
- [8] 韩晓瑞, 朱伟, 刘泉维, 等. 泥浆性质对泥水盾构开挖面泥膜形成质量影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(增 1): 288 - 292.(HAN Xiaorui, ZHU Wei, LIU Quanwei, et al. Influence of slurry property on filter-cake quality on working face of slurry shield[J]. Rock and Mechanics, 2008, 29(Supp.1): 288 - 292.(in Chinese))
- [9] MIN F L, ZHU W, HAN X R, et al. The effect of clay content on filter-cake formation in highly permeable gravel[C]// Geoshanghai International Conference. [S.l.]: [s.n.], 2010: 210 - 215.
- [10] 闵凡路, 魏代伟, 姜腾, 等. 泥浆在地层中的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2 801 - 2 806.(MIN Fanlu, WEI Daiwei, JIANG Teng, et al. Experimental study of law of slurry infiltration in strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2 801 - 2 806.(in Chinese))
- [11] 袁大军, 李兴高, 李建华, 等. 北京地下直径线泥水盾构泥浆特性参数确定[J]. 建筑技术, 2009, 40(3): 279 - 282.(YUAN Dajun, LI Xinggao, LI Jianhua, et al. Determination of mud and water characteristic parameters of slurry shield of Beijing underground straight rail transit line[J]. Architecture Technology, 2009, 40(3): 279 - 282.(in Chinese))
- [12] 韦良文, 张庆贺, 邓忠义. 大型泥水盾构隧道开挖面稳定机制与应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 87 - 91.(WEI Liangwen, ZHANG Qinghe, DENG Zhongyi. Research on mechanism and application of face stability in large slurry shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 87 - 91.(in Chinese))
- [13] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(1): 81 - 95.
- [14] FRITZ P, STENGELE R H, HEINZ A. Modified bentonite slurry for slurry shields in highly permeable soils[C]// The 4th International Symposium Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground. Toulouse, France: [s. n.], 2002.
- [15] 吴迪, 周顺华, 温馨. 砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1): 3 460 - 3 467.(WU Di, ZHOU Shunhua, WEN Xin. Laboratory test and application of filter cake formation in sand during slurry shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.1): 3 460 - 3 467.(in Chinese))
- [16] 王振飞, 张成平, 张顶立. 砂卵石地层泥水盾构泥浆配制及渗透试验研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1): 112 - 117.(WANG Zhenfei, ZHANG Chengping, ZHANG Dingli. Mud preparation and seepage test for slurry shields driving in sandy cobble ground[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(1): 112 - 117.(in Chinese))
- [17] 蒋龙. 砂卵石地层泥水盾构泥浆材料选择及配比优化分析[博士学位论文][D]. 北京交通大学, 2014.(JIANG Long. Mud materials selection in slurry shield and ratio optimization analysis used for sandy cobble ground[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.(in Chinese))
- [18] 张宁, 朱伟, 闵凡路. 南京纬三路过江通道泥水盾构泥浆配制试验研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 1 022 - 1 027.(ZHANG Ning, ZHU Wei, MIN Fanlu. Experimental study on preparation of slurry for slurry shields: case study on Weisanlu Yangtze river tunnel in Nanjing[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(10): 1 022 - 1 027.(in Chinese))
- [19] 刘成, 孙钧, 杨平, 等. 泥膜形成与状态划分细观分析及模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 435 - 442.(LIU Cheng, SUN Jun, YANG Ping, et al. Mesoscopic analysis and model test on formation process and state division of slurry membrane[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 435 - 442.(in Chinese))
- [20] 吴迪, 周顺华, 李尧臣. 饱和砂土中泥浆渗透的变形-渗流-扩散耦合计算模型[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 1 026 - 1 036.(WU Di, ZHOU Shunhua, LI Yaochen. A deformation-infiltration- dispersion coupling model for the slurry infiltration computation in saturated sand[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 1 026 - 1 036.(in Chinese))