

咸水环境下泥水盾构泥浆配比试验研究

刘 鹏¹, 赵 程^{2,3}

(1. 中铁隧道第六勘察设计院集团有限公司 天津 300308;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;

3. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 在水下盾构掘进过程中出现带压开舱检修情况时, 如何在高渗透性地层形成质量较好的泥膜从而保证开挖面稳定, 是保障工程安全与进度的重要前提。以青岛地铁跨海段隧道掘进工程为依托, 自主设计试验装置开展咸水泥浆配比及渗透成膜试验, 并设置淡水泥浆作为对照组。采用控制变量法和析因分析法研究膨润土、羧甲基纤维素(CMC)、碳酸钠等不同制浆材料引起的泥浆相对密度和黏度变化对泥浆滤水量的影响。试验结果表明: 在咸水泥浆中, 随着膨润土含量的增加, 泥浆相对密度变大, 可以显著降低泥膜的滤水量, 增加 CMC 含量可以提高泥浆黏度从而更易成膜, 对本工程咸水环境高渗透性砂土地层而言, 采用相对密度为 1.18~1.23 g/cm³、黏度 25~30 s 的配制方案, 可取得良好的成膜效果。

关键词: 泥水盾构; 咸水环境; 泥浆配比; 高渗透性; 泥膜; 滤水量

中图分类号: U455

文献标志码: A

Experimental study on slurry mixing proportion in salt water by slurry shield

LIU Peng¹, ZHAO Cheng^{2,3}

(1. China Railway Liuyuan Group Co. Ltd, Tianjin, 300308, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: During the construction of underwater tunnels, the drilling of the shields has often need to be stopped to check and repair the cutting tools under hyperbaric conditions. Moreover, methods of forming a high quality slurry membrane in high permeability stratum for ensuring the stability of the excavation surface greatly restricts the safety and progress of the project. In this paper, based on the cross-sea tunnel excavation project of Qingdao metro, devices for the salt water slurry ratio and permeability membrane forming test was initially designed, independently developed, and fresh water slurry was established as the control group. Afterwards, the effect of the relative density and viscosity of the slurry caused by different pulping materials, such as bentonite, carboxymethyl cellulose(CMC) and sodium carbonate, on the filtration capacity of the slurry was studied by using the control variable method and the factorial analysis method. The test results show that in the salt water slurry, with the increase of bentonite content, the relative density of the mud becomes larger. This can significantly reduce the water filtration of the slurry membrane, and the increase of CMC content can improve the viscosity of the slurry, which makes it easier to form the membrane. In this project, it is found that the preparation scheme with relative density of 1.18~1.23 g/cm³

收稿日期: 2019-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974289)

作者简介: 刘 鹏(1981—), 男, 山东龙口人, 硕士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的设计研究工作。

赵 程(1993—), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 研究方向为地下工程与盾构掘进, 本文通信作者。

E-mail: zhaocheng93@163.com

and the viscosity of 25~30 s can achieve strong membrane-forming effect.

Key words: slurry shield; salt water; slurry mixing proportion; high permeability; slurry membrane; water filtration

近年来,泥水平衡盾构由于具有广泛的地层适应性以及良好的压力控制模式,被广泛应用于水下交通隧道施工^[1-3]。水下隧道掘进距离长,穿越地层条件复杂多变,施工风险高、难度大,且施工过程中经常会遇见刀盘刀具过量磨损、刀盘结饼、遭遇障碍物等问题不得不进行开舱检修。由于水下隧道一般不具备地层加固常压开舱的条件,稍有不慎将会面临巨大的工程风险,如突水涌泥、开挖面坍塌、地表沉降和人员伤亡等^[4-6]。为了能够安全地完成开舱作业以及保持开挖面的稳定性,需要在开挖面上形成质量较好的泥膜,然而盾构停机处多位于江河底部,地层渗透性高、水压力大,如何在开挖面上形成致密的泥膜、保证开挖面稳定成为工程界关注的难题之一。

为了探寻不同地层条件下泥浆配比成膜的影响。Fritz^[7]通过添加砂、砾石、高分子聚合物等,研究了不同添加剂对泥浆成膜效果的影响,提出适合盾构施工的添加剂合理配比。Watanabe等^[8]在渗透性较大的地层中开展了泥浆渗透成膜试验,得出泥浆滤失量随着泥浆密度增大而减小的结论。闵凡路等^[9-11]进行了不同压力条件下的泥浆渗透试验,提出泥水盾构开挖面泥膜致密性评价指标。刘成等^[12]通过在不同孔隙特征地层中开展渗透成膜试验,研究了地层孔隙特征对泥浆成膜特征的影响规律。姜腾等^[13]通过对南京纬三路过江通道泥水盾构工程的研究,给出在江底高渗透地层带压开舱的合理泥浆密度范围。吕乾乾等^[14]研究了海水环境下的泥浆性能和配比试验,认为加入 HPMC 可以改善海水环境下的泥浆成膜效果。

但上述研究仅考虑改变制浆材料配比因素研究不同泥浆性质下的成膜效果,或者直接研究材料配比的单因素变化对于成膜效果的影响,对于何种因素改变泥浆性质引起成膜效果的不同缺乏整体的联系和把握。通过因素变化-泥浆性质差异-成膜效果影响的研究思路,研究因素变化下泥浆相对密度和黏度的改变对于泥膜滤水量的影响,可以在探究泥浆性质对滤水量影响的基础之上,针对性改变材料配比从而改善泥浆成膜效果。此外,文献多偏向于淡水环境下泥浆配比的研究,但是在实际盾构掘进过程中,跨海施工段地层中的咸水易从开挖面处进入泥水舱并与泥浆混合,导致泥浆性质发生改变,从而影响开挖面处的稳定。咸水环境下的泥浆配比以及泥浆如何渗透成膜维持开挖面的稳定缺乏相关的研究和探讨。本研究以青岛地铁跨海盾构在咸水环境下的高渗透性砂土地层掘进为背景,着重模拟泥水盾构在开舱检修的高压环境下(约 0.4 MPa)的泥浆配比和渗透成膜,自主设计泥浆渗透成膜试验装置,采用控制变量和析因分析的方法,开展咸水环境下泥浆配比研究,并添加淡水泥浆作为对照组进行分析。

1 工程概况

青岛地铁 8 号线全长约 61.4 km,共设车站 18 座,其中高架站 1 座,地下站 17 座,主线串联了胶州市、红岛高新区、李沧区、市北区、市南区 5 个行政区,是连接青岛新机场、北岸城区、东岸城区的快速骨干线路,设计最高运行速度 120 km/h,总投资约为 321 亿元,预计 2021 年全线通车。8 号线过海段(大洋站—青岛北站区间)全长 7.8 km,其中海域段长度 5.4 km,为 8 号线关键控制性工程,其中要穿越 970 m 长的地质断裂带,断裂带地下水丰富、单点涌水量大且夹带泥渣。为了保证盾构机安全掘进施工和高压下开舱换刀,需要泥浆渗透成膜具有较好的质量和良好的闭气性。

根据青岛海洋地质工程勘察院给出的《青岛市地铁 8 号线工程勘察第一标段大洋站至青岛北站岩土工程勘察报告》(工程编号:YK2016-009-2),该施工段地下水主要为构造基岩裂隙水和岩类孔隙水。地下水总矿化度 7.8~8.6 g/L,属于咸水,与海水水质(海水总矿化度 ≥ 19.5 g/L)对比较为明显,说明该裂隙水非海水补给。查阅相关资料并综合工程地质条件,采用质量比为 3% 的 NaCl 溶液模拟施工段地下水。施工段主要岩性为中粗砂和强风化砂岩,渗透系数较大,主要性质如表 1 所示。本工程过海段最大埋深约为 55 m,其中覆土约 25 m,随着盾构掘进,部分刀具磨损严重,不得不停机进行刀具检修或者更换,在这种高渗透性砂土地层中带压开舱,泥膜的形成对开挖面稳定非常重要。因此,快速在开挖面上形成质量较好的泥膜,将泥水压力转化为有效支护压力从而保持开挖面稳定,具有很高的研究价值和意义。

表1 盾构机穿越主要地层基本性质

Tab. 1 Main formation physical parameters of shield machine

地层名称	渗透系数/ (cm/s)	天然密度/ (g/cm ³)	石英 含量/%	颗粒分布所占比例/%		
				>2 mm	2~0.25 mm	<0.25 mm
砾砂	2×10^{-1}	2.05	74	35.2	58.3	6.5
中粗砂	3×10^{-2}	1.86	59	20.7	63.8	15.5
粉细砂	6×10^{-3}	1.75	31	0	76.6	23.4

2 泥浆配比及泥浆渗透成膜试验

2.1 试验装置

自主设计研发了泥浆渗透成膜试验装置,模拟带压开舱环境下(气压约为 0.4 MPa)的泥浆渗透成膜过程,主要包括气压加载系统、泥浆渗透系统、滤液收集及测量系统,具体布置见图 1。气压加载系统空压机出口处有调压阀,用以调节空压机的输出压力,调压精度为 0.01 MPa,最高可提供 0.8 MPa 的稳定工作压力,装置内部的气压则由盖板顶部的压力表实时监测。泥浆渗透试验装置为高 80 cm、内径 90 mm 的有机玻璃筒,壁厚 20 mm,筒壁侧面贴有刻度尺;顶部是一块厚约 20 mm 的铝制盖板,上部开有进气插口与空压机连接,有机玻璃筒和铝制盖板之间安装了 O 型硅胶密封圈用以保证装置气密性;有机玻璃筒底部设有排水阀,泥浆渗透时排出的滤液由量杯收集并通过电子秤实时读数。

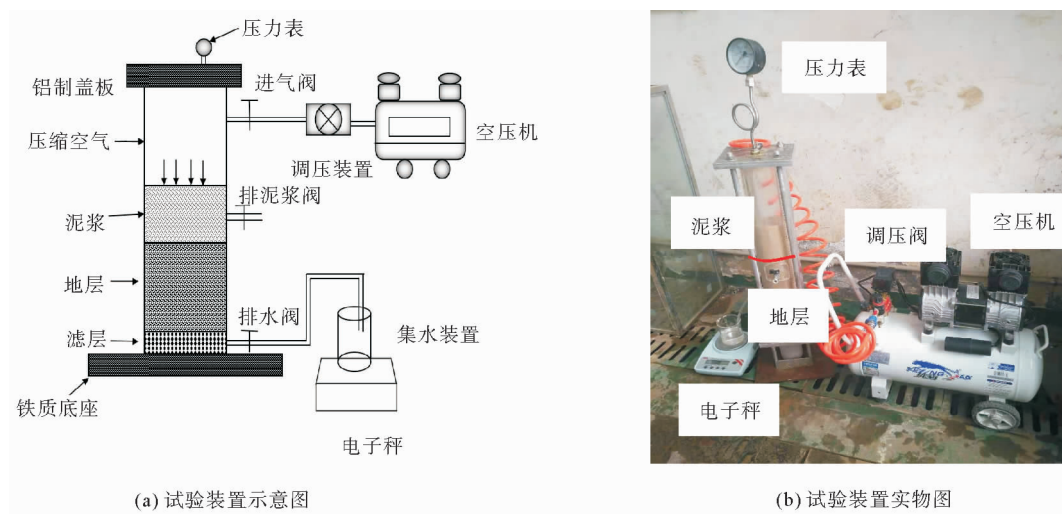


图1 泥浆渗透成膜试验装置

Fig. 1 Test device for slurry infiltration and filter and membrane formation

泥水盾构机掘进过程中,泥浆在泥水舱中泥浆压力作用下渗入地层中,渗透过程中泥浆颗粒逐渐沉积淤堵在地层孔隙或者开挖面表面,形成一层微透水或者不透水的泥膜,泥膜起到了充当泥水舱中泥浆压力和开挖面水土压力的介质作用,当泥浆压力最终与开挖面的水土压力平衡时,开挖面保持稳定。泥浆渗透成膜装置由空压机提供泥浆压力,泥浆自重相对于高压环境可忽略不计,故可以较好地模拟泥水盾构泥浆渗入地层成膜的情况。试验时泥浆在外部施加压力的作用下向地层渗透,随着泥浆的渗透填充以及泥膜的不断形成,地层中的孔隙水会不断排出,测量泥浆渗透成膜过程中的滤水量,渗透稳定时滤水量越少则表明泥膜越容易形成,稳定时的滤水量变化越慢则说明泥膜越致密,分别记录每一组试验滤水量的变化情况。

2.2 试验材料和方案

该工程地层主要为中粗砂和强风化岩层,渗透系数较大。试验地层选用福建标准砂、粗砂、碎石子等材料模拟,经筛分获得与工程地层颗粒级配相近的试验材料(如表 1),渗透系数约为 $3.8 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,干密度为 1.8 g/cm^3 ,孔隙率为 0.53。试验泥浆由膨润土、羧甲基纤维(carboxymethyl cellulose,CMC)、无水碳酸钠(Na_2CO_3)、3%的 NaCl 溶液以及少许轻质砂按照不同配比制备而成。蒙脱石是膨润土的主要矿物成分,膨润土溶于水成悬浮状或胶凝状,具有较好的吸湿性和膨胀性;CMC 溶于水时具有极高的黏性,因此多用作增黏剂使用;纯碱可以有效增加膨润土溶液悬浮颗粒之间的静电排斥力,从而降低基浆的密度和黏性;每组试验均添加少许轻质砂以增加泥浆中的粗粒含量,轻质砂对泥浆的黏度和相对密度改变不大,因此不作为控制变量。本试验采用 NB-1 型泥浆比重计、1006 型泥浆黏度计和 100 mL 量筒分别测量泥浆的相对密度、黏度和胶体率。根据工程地质地层相关参数,为了较好与地层匹配从而使泥浆更易渗透成膜,预先进行了大量试验,确定该地层条件下泥浆可以渗透成膜的大致比例范围,以 $m(\text{膨润土}) : m(\text{CMC}) : m(\text{Na}_2\text{CO}_3) : m(\text{水}) = 250 : 10 : 8 : 1\ 500$ 配制基准浆液,控制单一变量,试验不同制浆材料下的泥浆性质,泥浆性质参数如表 2。

表 2 试验泥浆性质参数
Tab. 2 Property parameters of test mud

编号	膨润土/g	CMC/g	$\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{g}$	密度/(g/cm^3)	漏斗黏度/s	胶体率/%
B1	200	10	8	1.05	19.66	96
B2	225	10	8	1.07	20.28	96
B3	250	10	8	1.10	21.17	97
B4	300	10	8	1.15	25.46	100
B5	325	10	8	1.19	29.89	100
C1	250	0	8	1.05	19.93	96
C2	250	5	8	1.06	20.43	97
C3	250	10	8	1.10	21.17	97
C4	250	20	8	1.17	27.12	99
C5	250	30	8	1.21	40.83	100
D1	250	10	0	1.06	24.06	99
D2	250	10	4	1.07	22.32	99
D3	250	10	8	1.09	21.17	97
D4	250	10	16	1.15	19.38	95
D5	250	10	32	1.18	17.74	94

2.3 试验步骤

1) 制备滤水层:在有机玻璃筒中装入 10 cm 厚的粒径 5~10 mm 的碎石子作为滤水层(渗透系数约为 1.5 cm/s),压平击实,用以保证制备地层底部集水面均匀;

2) 制备试验地层:试验地层总高度约 25 cm,分 5 层制备,每层 5 cm,分层装入并击实(注意控制每次试验地层的物理参数保持一致);

3) 试样饱和:试验开始前采用由下向上的方式从底部导水管缓慢注入淡水对地层进行饱和,直至水位刚刚没过地层表面,静置一段时间使试样充分饱和(注意注水速度防止扰动地层,试样饱和采用毛细管饱和法,当静置时间在 10 h 以上时,满足饱和度大于 95%的要求);

4) 注浆:关闭排浆阀,将预先制备好的泥浆浆液注入有机玻璃筒内约 20 cm,盖上铝制盖板并用螺纹拧紧,保证气密性完好;

5) 打开空压机开关,通过调节调压阀将压力缓慢传递到泥浆液面上,加载速率为 0.05 MPa/min ,达到 0.4 MPa 后提供稳定恒压,以模拟带压开舱环境;

6) 最后打开有机玻璃筒底部的排水阀门,待 20 min 后记录泥浆的滤水量。

3 试验结果分析

3.1 制浆材料对泥浆性质的影响

根据试验结果,膨润土的含量对于泥浆的相对密度和黏度都有较大影响(图 2(a)),随着膨润土含量的增加,泥浆的相对密度几乎呈线性增加,泥浆的漏斗黏度先缓慢增加,当膨润土含量超过 15% 后迅速增大,这是因为膨润土易溶于水中成悬浮状或胶凝状;当膨润土含量较高时,就会引起泥浆黏度迅速增加,泥浆的胶体率变化较为平稳,随着膨润土含量增加,胶体率从 95% 缓慢增至 100%。

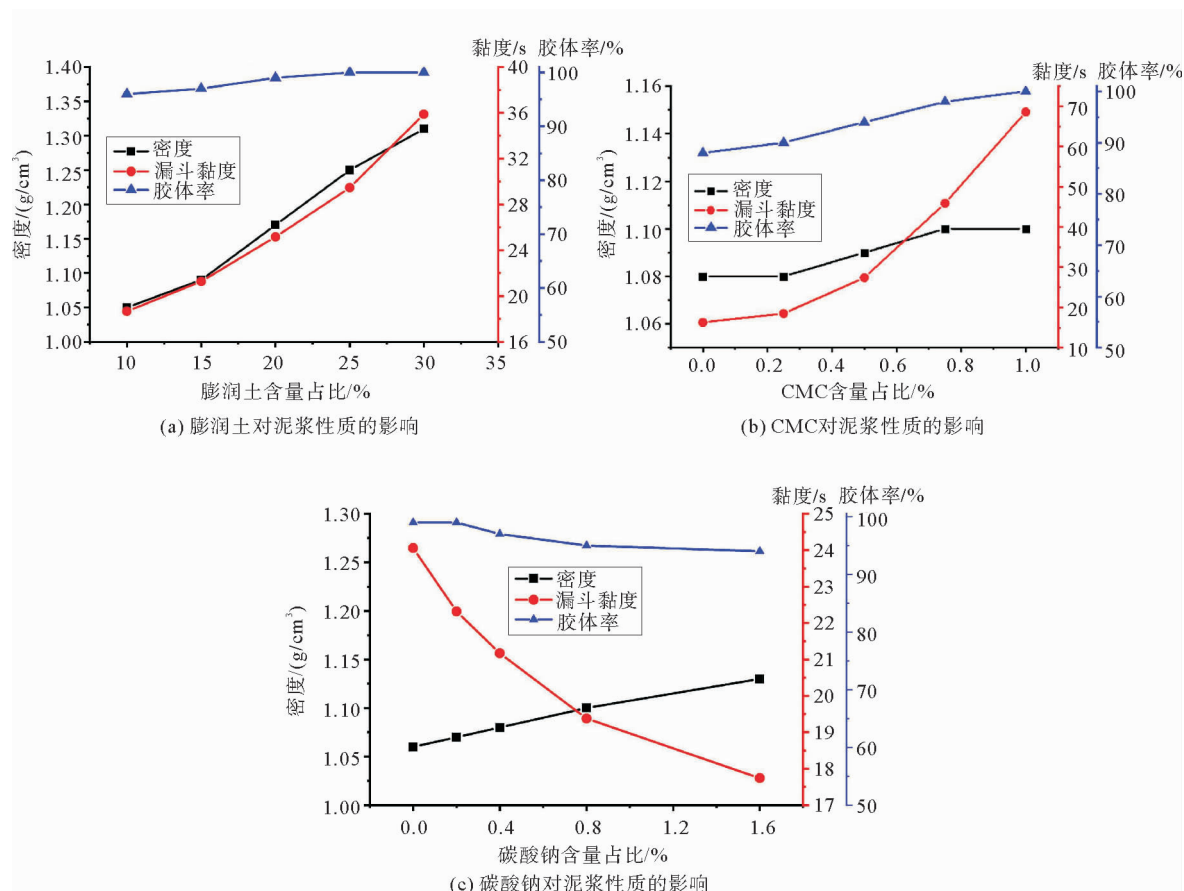


图 2 制浆材料与泥浆性质的关系

Fig. 2 Slurring material and mud properties

CMC 能够提高泥浆的黏度,由图 2(b)可以看出,当 CMC 含量超过 0.5% 时,泥浆黏度快速增加,试验过程表明,当 CMC 含量超过 1% 时,泥浆由于呈胶凝状无法使用。由于 CMC 含量在整个泥浆浆液中占比较低,因此 CMC 含量对于泥浆密度影响较小,在 0~1% 的含量占比范围内,泥浆密度随着 CMC 含量的缓慢增加,增加幅度约为 1.8%;CMC 含量对于泥浆胶体率影响较大,随着 CMC 含量逐渐增加,胶体率近似线性增加。

Na_2CO_3 作为一种分散剂,对泥浆的漏斗黏度影响最为显著。随着 Na_2CO_3 含量的增加,泥浆黏度迅速下降(图 2(c)),当 Na_2CO_3 含量超过 1.6% 时,泥浆黏度变化趋于平缓。 Na_2CO_3 作为电解质能够与膨润土相互作用,膨润土表面带负电荷,与阳离子相吸附,阴离子被排斥。当 Na_2CO_3 含量进一步增加时,溶液中的阳离子含量增大,由于静电斥力的作用,扩散层中的自由阳离子进入束缚反离子层,双电层被压缩,Zeta 电位下降,电荷排斥力减小^[18],胶体率降低。

综上,几种制浆材料中,膨润土对泥浆的相对密度影响最大,基本呈线性变化,当膨润土含量超过 15% 时,其对泥浆的漏斗黏度也有较大影响。CMC 和 Na_2CO_3 的含量对于泥浆黏度的影响显著而对泥浆的相对密度影响较小,但过多的碳酸钠含量可以迅速降低泥浆胶体率。

3.2 泥浆渗透成膜效果的分析与评价

滤水量是泥浆在地层渗透成膜过程中的滤液质量,试验时由烧杯收集并称量得到(图 1)。滤水量是评价泥膜成膜效果的重要指标,滤水量越小,表明成膜时间越短、效果越好。图 3 是加压后泥浆渗透成膜 600 s 时的滤水量曲线图,试验分为两组,淡水配制的泥浆浆液作为对照组,这样可以更加清楚地探究咸水环境下影响泥浆渗透成膜效果的因素。在泥浆压力作用下,泥浆慢慢地向地层渗透,随着渗透过程的不断进行,泥浆颗粒在地层微小孔隙处沉积,在地层表面形成一层微透水或不透水的泥膜(图 4)。当泥膜形成后,泥浆中的细颗粒由于“架桥”效应无法再穿透泥膜,从而保持泥舱压力,同时能够将部分泥浆压力转化为有效应力作用在开挖面上,支护开挖面土体,为带压开舱刀具检修、泥水盾构的安全掘进提供必要保证。

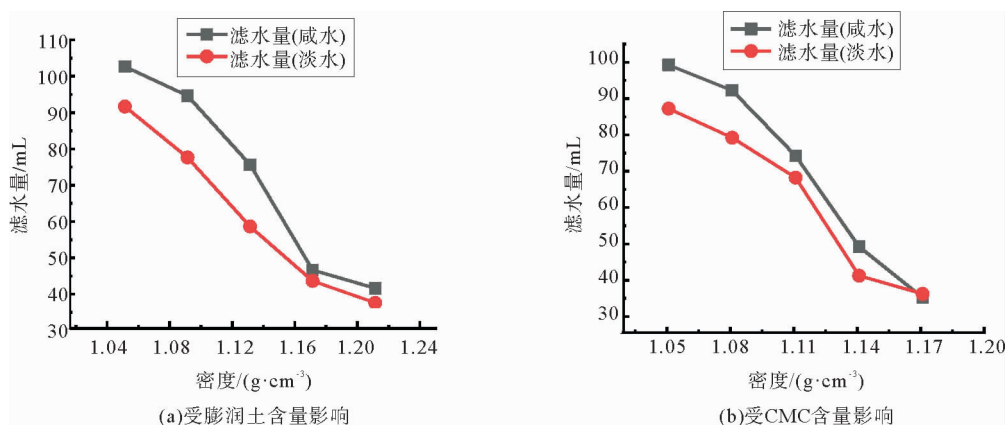


图 3 泥浆相对密度对滤水量的影响

Fig. 3 Effect of relative density of mud on water filtration

3.3 泥浆相对密度对滤水量的影响

采用析因分析的方法,控制单一变量,分别观察膨润土、CMC 含量单独变化时(Na_2CO_3 对泥浆密度影响很小,故不讨论)泥浆相对密度对泥膜滤水量的影响。通过图 3 可知,随着泥浆相对密度的增加,咸水和淡水的滤水量都逐渐减小,表明成膜质量在逐步提高,在泥浆相对密度较小时,淡水泥浆比咸水泥浆滤水量更小,泥浆相对密度较大时,滤水量随之减小并有稳定趋势,这是因为咸水中的阳离子较多,有效增加了泥浆颗粒之间的排斥力从而使泥浆颗粒无法在地层孔隙处凝聚沉淀形成泥膜。可以看出,当泥浆相对密度在 1.13~1.18 g/cm³ 时,咸水泥浆膨润土含量对于密度的改变对滤水量有较大影响,而 CMC 含量对于密度的改变使滤水量呈近似线性变化趋势。泥浆密度大于 1.18 g/cm³ 时,随着膨润土含量和 CMC 含量的增加,咸水和淡水泥浆的滤水量减少都趋于平缓,表明较高密度下的泥浆易于快速形成泥膜,咸水中阳离子的影响大大降低。

3.4 泥浆黏度对滤水量的影响

泥浆的黏度是泥浆性质的重要指标,从总体上来看不论是咸水泥浆还是淡水泥浆,随着泥浆黏度的增

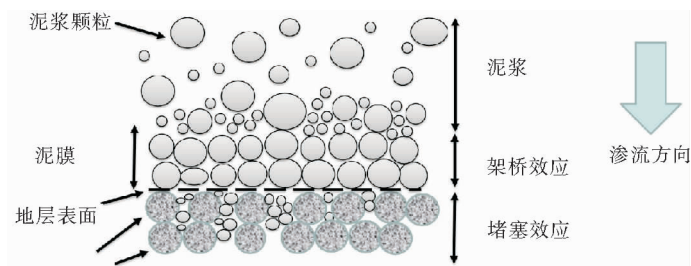


图 4 泥浆渗透成膜机理示意图

Fig. 4 Slurry infiltration film-forming mechanism

大,滤水量都逐渐减小,当黏度大于 28 s 时,咸水泥浆和淡水泥浆都具有较小的滤水量和较好的成膜效果。膨润土带负电荷,在水中分散成悬浮状或胶凝状,与咸水中的阳离子有较强的交换能力,这就导致了当膨润土含量较少(黏度 <26 s)条件下,淡水泥浆比咸水泥浆能更快形成泥膜从而有较小的滤水量(图 5(a))。CMC 是一种亲水高分子化合物,通过氢键与水分子结合,减少泥浆颗粒自由活动的空间,从而提高体系的黏度,因此 CMC 含量的改变引起泥浆黏度的变化对于咸水和淡水具有相似的影响(图 5(b)),当黏度小于 22 s 时,随着 CMC 含量的增加,滤水量缓慢减少,当黏度大于 25 s 时,滤水量迅速减少。 Na_2CO_3 作为分散剂,可以显著降低泥浆浆液的黏度,不利于泥浆颗粒的淤积和沉淀,泥浆不易成膜,其对于咸水与淡水泥浆的滤水量有着相似的影响(图 5c),当黏度大于 23 s,随着碳酸钠含量的减少,咸水和淡水泥浆的滤水量缓慢降低并趋于稳定。

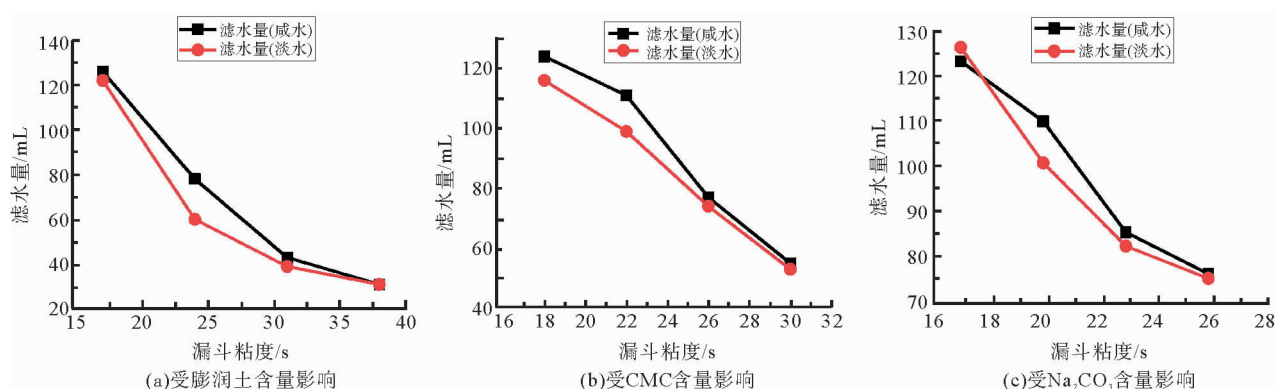


图 5 泥浆黏度对滤水量影响

Fig. 5 Effect of mud viscosity on water filtration

4 结论

针对泥水平衡盾构在高渗透性砂土地层掘进过程中泥浆渗透成膜问题,设计室内试验研究了不同制浆材料下泥浆相对密度和黏度的变化对泥膜滤水量的影响,采用单因素变化-泥浆性质差异-成膜效果影响的技术路线,分析了咸水环境下影响泥浆成膜质量的因素,得出以下结论:

1) 泥浆的相对密度反映了单位体积内泥浆的颗粒数量,是影响滤水量的主要因素。咸水泥浆膨润土含量变化导致泥浆密度的不同对滤水量影响显著,在高渗透性砂土地层中,泥浆相对密度 $1.18 \sim 1.23 \text{ g/cm}^3$ 时成膜效果较好;

2) 泥浆黏度反映了泥浆颗粒与水的结合程度。CMC 可以提高泥浆体系的黏度,泥浆黏度大,泥浆颗粒与水的结合力强,成膜时一旦淤堵地层孔隙可以很好地阻止水的进一步渗透,泥膜容易形成且滤水量较小,控制泥浆黏度在 25~30 s 左右可以获得良好的成膜效果;

3) 在实际工程应用中,可以根据出浆相对密度的反馈调节膨润土加入量,并通过 CMC 和 Na_2CO_3 的用量调节泥浆的黏度,从而在开挖面上形成质量较好的泥膜,增加开挖面的稳定性,以确保带压开舱有一个稳定的开舱环境,保证作业人员安全。

参考文献:

- [1] 杨文武.盾构法水下隧道工程技术的发展[J].隧道建设,2009,29(2):145-151.
YANG Wenwu. Development of underwater shield-bored tunnels[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(2): 145-151.
- [2] 张士龙.南京纬三路过江通道工程技术难点分析[J].隧道建设,2013,33(3):147-150.
ZHANG Shilong. Analysis on technical difficulties in construction of Yangtze river-crossing tunnel on Weisan Road in Nanjing[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(3): 147-150.
- [3] 孙钧.论跨江越海建设隧道的技术优势与问题[J].隧道建设,2013,33(5):337-342.
SUN Jun. Study on technological advantages and problems in construction of tunnels crossing rivers and seas[J]. Tunnel

- Construction, 2013, 33(5): 337-342.
- [4] 郭信君, 闵凡路, 钟小春, 等. 南京长江隧道工程难点分析及关键技术总结[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2154-2160.
- GUO Xinjun, MIN Fanlu, ZHONG Xiaochun, et al. Summaries of key technologies and difficulties in Nanjing Yangtze river tunnel project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2154-2160.
- [5] 孙善辉, 陈馈, 王振飞. 压缩空气条件下盾构刀盘特种焊接修复技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(3): 413-420.
- SUN Shanhui, CHEN Kui, WANG Zhenfei. Technology for welding repair of cutter heads of shield machine under compressed air[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(3): 413-420.
- [6] 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.
- [7] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable soils[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(1): 81.
- [8] WATANABE T, YAMAZAKI H. Giant size slurry shield is a success in Tokyo[J]. Tunnels and Tunnelling, 1981, 13(1): 13-17.
- [9] 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 gravel and sand stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(6): 141-146.
- [10] 闵凡路, 朱伟, 魏代伟, 等. 泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 722-727.
- MIN Fanlu, ZHU Wei, WEI Daiwei, et al. Change of pore water pressure in soil as filter cakes formed on excavation face in slurry shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 722-727.
- [11] 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): 3460-3467.
- WU Di, ZHOU Shunhua, WEN Xin. Sandy soil slurry shield is mud film-forming performance test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3460-3467.
- [12] 刘成, 汤昕怡, 高玉峰. 砂性地层孔隙特征对泥水盾构泥浆成膜的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2002-2008.
- LIU Cheng, TANG Xinyi, GAO Yufeng. Influence of pore characteristics of sand strata on filter-cake formation under slurry shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 39(11): 2002-2008.
- [13] 姜腾, 朱伟, 闵凡路, 等. 泥水盾构开仓时的泥膜闭气性能及改性方法[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 504-509.
- JIANG Teng, ZHU Wei, MIN Fanlu, et al. Airproof capability and modification of the filter cake in slurry shield[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 504-509.
- [14] 吕乾乾, 孙振川, 杨振兴, 等. 海水环境下盾构泥浆性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 211-218.
- LYU Qianqian, SUN Zhenchuan, YANG Zhenxing, et al. Experimental study of shield slurry property under seawater environment[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 211-218.
- [15] ALEM A, ELKAWAFI A, AHFIR N D, et al. Filtration of kaolinite particles in a saturated porous medium: Hydrodynamic effects[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(3): 573-586.
- [16] 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(S1): 288-292.
- [17] 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.
- [18] 杜佳芮, 闵凡路, 姚占虎, 等. 海水侵入条件下泥水盾构泥浆及泥膜性质变化试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1182-1188.
- DU Jiarui, MIN Fanlu, YAO Zhanhu, et al. Experimental study of property change of slurry and filter cake of slurry shield under seawater intrusion[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(7): 1182-1188.

(责任编辑: 吕海亮)