

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0109

泥水平衡盾构用海水泥浆的改性试验研究

杨振兴¹, 陈 健², 孙振川¹, 游永锋³, 周建军¹, 吕乾乾¹

(1. 中国中铁隧道局集团有限公司 盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430001; 3. 中国中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450001)

摘 要: 由于海水中富集大量可溶性盐类及各种金属离子成分, 利用海水配置的海水泥浆具有相对密度大、胶体率低、稳定性差、失水量高等特点, 不能满足泥水平衡盾构施工要求。为实现对海水泥浆改性以达到利用海水泥浆维持开挖面稳定, 降低穿江越海盾构施工成本, 选用 CMC (羧甲基纤维素钠)、纤维素 PAC (聚阴离子纤维素)、聚丙烯酰胺等 8 种添加剂进行海水泥浆性质变化试验, 优选出对海水泥浆改性明显的添加剂, 并分析优选添加剂掺入量和时间对海水泥浆性质的影响规律。同时, 基于优选的添加剂 CMC, 利用泥膜形成试验平台进行改性海水泥浆地层渗透试验。研究表明: 不同添加剂对海水泥浆性质变化差异较大, 增黏剂 PAC、CMC 对海水泥浆的改性效果稍好, 24 h 离析出现浑浊层、混合层、絮凝沉淀层。海水泥浆对地层渗透的滤水量大于改性海水泥浆, 泥皮也稍厚, 但呈稀疏状态。可以推测, 添加剂中和部分海水成分, 呈絮凝沉淀, 多余添加剂表现出对淡水泥浆的增稠作用。

关 键 词: 海底盾构隧道; 泥浆改性; 泥浆渗入试验; 成膜质量; 胶体率

中图分类号: TU 352.11

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2020) 02 - 0501 - 08

Experimental study on improved seawater slurry for slurry shield

YANG Zhen-xing¹, CHEN Jian², SUN Zhen-chuan¹, YOU Yong-feng³,
ZHOU Jian-jun¹, LÜ Qian-qian¹

(1. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. State Key Laboratory Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430001, China; 3. China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Due to the enrichment of a soluble salts and various metal cation components in seawater, seawater slurry shows large specific gravity, low colloidal rate, poor stability and high water loss, and does not meet the requirements of slurry shield construction. In order to modify the seawater slurry to maintain the stability of the excavation surface and reduce the construction cost of the shield tunnel, eight additives, such as CMC, cellulose PAC, and ammonium polyacrylate, etc., were used to test the properties of seawater slurry. The additives which modified the seawater were selected, and the influence law of the additives amount and time on the properties of the seawater slurry was analyzed. At the same time, the modified seawater slurry formation penetration test was carried out based on the preferred additive CMC using a mud film formation test platform. Results show that different additives have significant differences in the properties of seawater slurry. The cellulose PAC and CMC have better modification effect on seawater slurry. The turbid layer, mixed layer and flocculated sediment layer appear in 24 h. The amount of water filtered by the seawater slurry to the formation is greater than that of the modified seawater slurry, and the slurry skin is slightly thicker, but it is sparse. It can be speculated that the additive neutralizes part of the seawater component and flocculates and precipitates, and the excess additive exhibits a thickening effect on the pale cement slurry.

Keywords: submarine shield tunnel; property change of seawater slurry; infiltration experiment of slurry; slurry film quality; colloidal rate

收稿日期: 2019-01-20 修回日期: 2019-05-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) (No. 2012AA041802); 湖北省技术创新重大项目 (No. 2017ACA186); 中国中铁科技开发计划 (专项类-03), 中隧集团科研创新计划 (隧研合 2017-05)

This work was supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2012AA041802), the Major Projects of Technological Innovation in Hubei (2017ACA186), the China Railway Science and Technology Development Plan (-03) and the Research and Innovation Plan of China Railway Tunnel Group Co., Ltd. (2017-05).

第一作者简介: 杨振兴, 男, 1987 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事盾构开挖面稳定性控制技术研究。E-mail: zxyang1866@163.com

1 引言

泥水平衡盾构以其优越的开挖面压力控制模式及适合大直径盾构隧道的特点,在穿江越海隧道中得到广泛应用^[1]。

泥水盾构通过调节泥浆性质和压力仓内泥浆压力实现对掘进过程中开挖面的稳定控制。因此,泥水仓中的泥浆性质对泥水盾构施工安全与稳定至关重要^[2]。对于不同的开挖面地层,泥浆应具备与之相匹配的工程性质以达到最佳的成膜质量。通常认为,不同泥浆在地层中形成泥膜的类型可以分为3类,即泥皮型泥膜、泥皮+渗透带型泥膜、渗透带型泥膜,其中以泥皮+渗透带型泥膜对开挖面的稳定性最好。同时,同一泥浆对不同地层所形成的泥膜类型不尽相同。许多学者从不同角度阐述地层与泥浆性质关系,魏代伟等^[3]分析3种单粒径砂土与泥浆性质的匹配关系,以泥膜形成时间作为变量分析泥浆渗透与有效应力转换过程。闵凡路等^[4]针对高渗透性地层中泥浆配制及成膜问题开展室内试验,表明泥浆中黏粒含量越高,所需增黏剂越少,泥浆的物理稳定性越好,滤失量越小,并将黏粒含量作为泥水盾构施工中泥浆调整的一个重要指标。

泥水平衡盾构开挖越海隧道过程中,采用海水配制泥浆用于渗透成膜,稳定开挖面,不仅可以大大降低施工成本,而且降低了淡水泥浆对海水地层在开挖面成膜的不可控而带来的施工风险。但是,根据已有研究成果,淡水与海水的组成成分存在巨大差异^[5],海水中含有可溶性盐类物质及固相颗粒,如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Br^- 等,平均盐度达到35‰, $\text{pH}=7.5\sim 8.2$,导致淡水泥浆与海水泥浆的工程性质存在不同。利用海水配置的海水泥浆具有相对密度大、胶体率低、稳定性差、失水量高等特点,不能满足泥水盾构维持开挖面稳定性的要求,必须对海水泥浆进行改性研究。

目前,国内外学者对盾构用泥浆性质与成膜质量的研究仅限于淡水泥浆。如,Fritz^[6]通过在设计的泥浆渗透装置中添加砂、聚合物等添加剂,进行泥浆支护压力试验。韩晓瑞等^[7]开展泥浆性质对泥水盾构开挖面泥膜形成质量的影响试验,表明泥浆黏度越高,物理稳定性越好,则容易形成泥膜,且泥膜薄、致密,滤水量小。姜腾等^[8]通过改变羧甲基纤维素钠(CMC)的添加量配制不同性质的泥浆,研究泥浆性质对泥膜闭气性的影响。王振飞等^[9]针对北京地下直径线砂卵石地层提出泥浆添加剂采用聚丙烯酰胺、正电胶干粉和羧甲基纤维素钠的组合形式改性钠基膨润土泥浆,实践证明对开挖面的稳

定和渣土运输方面的作用效果显著。

关于海水泥浆的性质仅可从海域内钻孔灌注桩等桩基工程中得到部分研究结果。胡建平^[10]分析了海水泥浆成分,从海水分子与其他化学物质起化学反应的角度分析了改善海水泥浆的措施,提出了用于海水泥浆钻孔的聚合物泥浆配比。刘晶晶等^[11]开展了大量海水泥浆室内实验,分析了黄原胶(XC)可作为海水制浆的增黏剂材料。高超^[12]结合港珠澳大桥桩基黏土层、砂层与岩石层给出了海水泥浆配比,满足工程需求。

针对海水泥浆性质不能满足泥水盾构维持开挖面稳定要求以及研究成果匮乏的问题,本文首先阐述海水泥浆的物理性质,然后通过添加添加剂对海水泥浆改性,观察添加剂对海水泥浆的改性影响,其研究成果对泥水盾构采用海水泥浆的配制与改性具有重要的指导意义。

2 海水泥浆物理性质

2.1 海水离子成分测试

相比于淡水组成,海水中含有大量的化学元素,如阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 5种,阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Br^- 、 HCO_3^- 、 F^- 6种以及营养元素、有机物质等,其中离子成分占海水盐分的99.9%。海水整体含盐量一般在35 g/L左右,密度为 1.03 g/cm^3 左右,呈碱性, $\text{pH}=7.8\sim 8.3$ 。根据大量工程实践,由于海水与淡水成分的差异,与淡水泥浆相比,海水泥浆相对密度大、胶体率低、稳定性差。

海水盐分的成因是一个复杂的问题,与地球的起源、海洋的形成及演变过程有关。因此,不同海域的海水成分稍有差异。本文依托汕头市苏埃通道工程,采集汕头苏埃湾海域段水源开展系列相关试验,对其水源的水质检测见表1。

表1 汕头市苏埃湾海域段水质检测
Table 1 Water quality detection in the sea area of Sue Bay, Shantou city

成分	序号	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	pH
自来水	1	25.99	22.8	12.83	8.27	7.16
	2	5 779.21	863.7	89.78	383.77	7.13
海水	3	5 986.14	845.4	94.59	393.50	7.33
	4	6 152.09	868.7	90.58	412.47	7.11

2.2 海水泥浆物理性质

泥水平衡盾构开挖隧道对泥浆质量要求较高,泥水仓内泥浆应能在泥浆压力大于地层孔隙水压力情况下细小颗粒向地层中渗透,形成不透水膜,

从而达到稳定地层的作用。不同的地质条件对泥浆性质指标要求有所差异，通常情况下，工程上采用泥浆相对密度、漏斗黏度、胶体率、滤失量等指标表达泥浆性质。

利用苏埃湾海域段采集的淡水与海水配置不同膨润土掺量的淡水泥浆与海水泥浆，以观察其泥浆性质变化。膨润土采用钠基膨润土（灰白色），如图 1 所示，含量占总质量（淡水/海水+膨润土）分别为 8%、12%、16%、18%、20%、22%、26%、30%、35%、40%，测取泥浆物理性质见图 2~4。



图 1 钠基膨润土样
Fig.1 Sodium bentonite

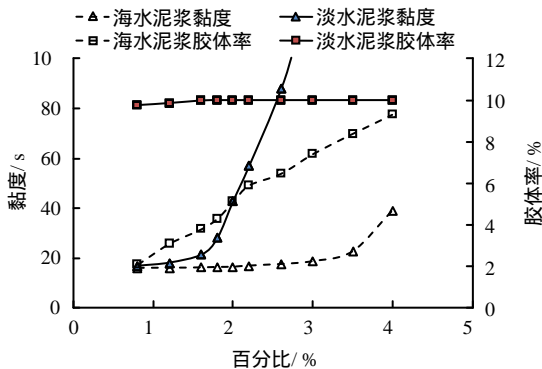


图 2 不同膨润土掺量下淡水泥浆与海水泥浆黏度、胶体率
Fig.2 Viscosity and colloidal rate of freshwater slurry and seawater slurry under different bentonite contents

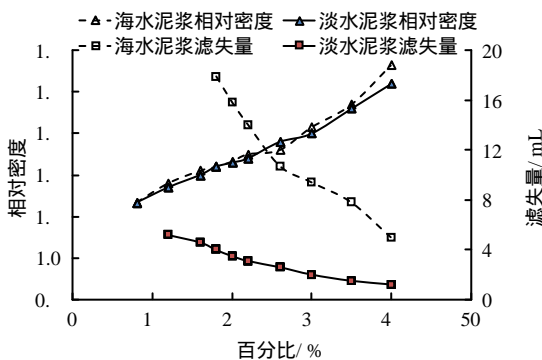


图 3 不同膨润土掺量下淡水泥浆与海水泥浆相对密度、滤失量

Fig.3 Specific gravity and fluid loss of freshwater slurry and seawater slurry under different bentonite contents



图 4 不同膨润土掺量下海水泥浆胶体率
Fig.4 Colloidal rate of seawater slurry under different bentonite contents

比较淡水泥浆和海水泥浆性质参数可以明显看出，随着膨润土掺入量增加，淡水泥浆黏度比海水泥浆黏度更容易增加。淡水泥浆胶体率在膨润土含量 8%时就已满足使用要求，而海水泥浆在膨润土含量 40%时，其胶体率才达到 93%。淡水泥浆与海水泥浆相对密度差别不大，但滤失量差别较大，分析原因认为淡水泥浆中膨润土与淡水反应充分，与泥浆黏度变化规律相符。

可以推测，继续增加膨润土含量，海水泥浆的胶体率可以满足 95%的使用要求，但从经济效益考虑，通过增加膨润土含量来提高海水泥浆胶体率并不经济。因此，必须通过添加剂对海水泥浆改性，以达到工程使用的性能。

3 添加剂对海水泥浆改性试验

根据基桩泥浆护壁钻孔工程案例，使用海水泥浆时需加入添加剂才能达到悬浮钻渣、稳定孔壁和降低摩阻力的作用。

根据已有学者对于钻孔工程中海水泥浆性质研究^[12]，认为：采用改性纤维作为添加剂，能改善海水泥浆性能；在海水泥浆中加入稳定剂，如合成高分子纤维、改性石棉、铬木质素磺酸盐等，具有一定的抗盐、稳定孔壁和使泥浆降黏、降切作用。

为了明确不同添加剂对海水泥浆的改性作用，分别选用羧甲基纤维素钠 CMC（增黏剂）、羟丙基甲基纤维素 HPMC（增黏剂）、聚丙烯酰胺（絮凝剂）、纯碱（分散剂）、黄原胶（稳定剂）、聚阴离子纤维素 PAC（增黏剂）、铬木质素磺酸盐等 8 种添加剂对海水泥浆进行改性试验。

根据《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50 - 2011）^[13]提供的试验方法测定泥浆各项性能指标，包括 pH 值、相对密度、黏度、胶体率、失水量、泥皮厚等。

3.1 不同添加剂对海水泥浆性质影响

分别选用 CMC、HPMC、纤维素 PAC、铬木质

素磺酸铵、纯碱、烧碱、聚丙烯酸铵、黄原胶作为添加剂，与无添加剂的海水泥浆性质对比。其中，膨润土质量占泥浆总质量（膨润土+海水+添加剂）为 12.25%，每组试样取 1 000 g 海水泥浆中加入 1.05 g 添加剂。搅拌 30 min 后静置，泥浆胶体率随时间的变化如图 5 所示。

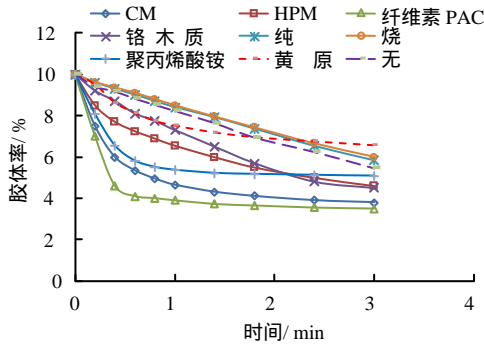


图 5 单一添加剂对海水泥浆胶体率随时间的变化影响
Fig.5 Effect of single additive on the change of colloidal rate of seawater slurry with time

由图 5 可以看出，对海水泥浆添加相同质量的单一添加剂，不同添加剂会使得海水泥浆离析速率产生较大差异。增黏剂纤维素 PAC 和 CMC 使得海水泥浆在前 5 min 内快速离析，HPMC 对海水泥浆胶体率离析相对缓慢，但 24 h 胶体率基本相同，见表 2。絮凝剂聚丙烯酸铵在前 5 min 对海水泥浆离析速度影响明显，但 24 h 胶体率高于添加增黏剂的海水泥浆。铬木质素和黄原胶对海水泥浆前 5 min 也会加速泥浆离析。纯碱和烧碱对海水泥浆离析速度影响不大。

表 2 单一添加剂的海水泥浆 24 h 胶体率
Table 2 24 h colloidal rate of seawater slurry under single additive

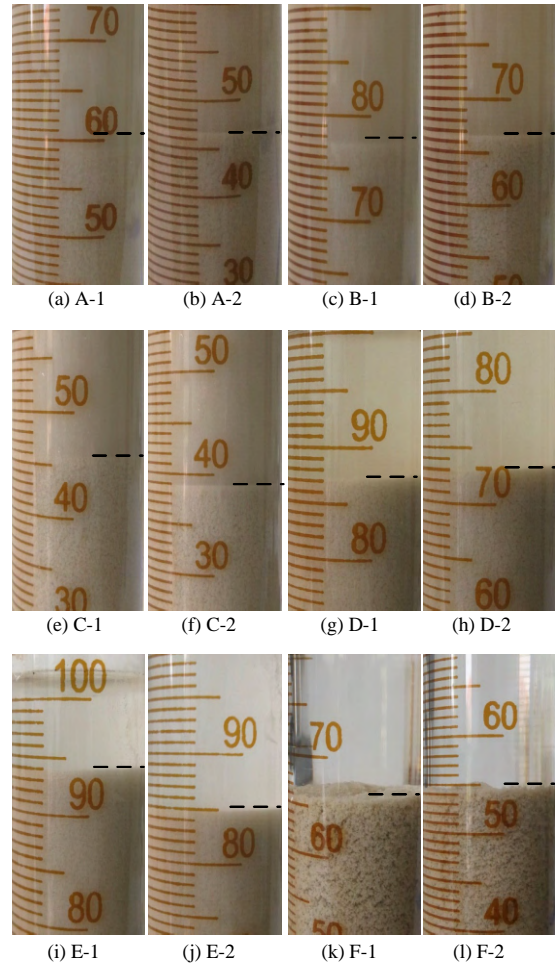
序号	添加剂	胶体率 / %	序号	添加剂	胶体率 / %
1	CMC	33.0	6	烧碱	33.0
2	HPMC	34.0	7	聚丙烯酸铵	36.4
3	纤维素 PAC	32.5	8	黄原胶	32.5
4	铬木质素	30.0	9	无添加剂	30.5
5	纯碱	29.0			

除了不同添加剂对海水泥浆离析的速率具有明显差异外，海水泥浆离析状态也具有明显差异。取 4、10 min 时海水泥浆离析情况，如图 6 所示。

从图 6 可以看出，添加了纤维素 PAC、CMC、HPMC 海水泥浆虽然在前 5 min 离析速率较快，但上层水浑浊。按浑浊程度，铬木质素海水泥浆次之；

纯碱海水泥浆在前 5 分钟离析速度慢，但上层水相对清澈。聚丙烯酸铵海水泥浆呈絮凝状，离析速度快，且上层水清澈。

测取不同添加剂的海水泥浆的黏度、相对密度、滤失量、pH 值，如表 3 所示。



注：A 代表 CMC；B 代表 HPMC；C 代表纤维素 PAC；D 代表铬木质素；E 代表纯碱；F 代表聚丙烯酸铵。

图 6 不同添加剂的 4、10 min 时海水泥浆离析状态
Fig.6 4 min and 10 min segregation situation of seawater slurry under different additives

表 3 单一添加剂对海水泥浆性质影响
Table 3 Effect of single additive on the properties of seawater slurry

序号	添加剂	黏度 / s	相对密度	滤失量 / mL	pH
1	CMC	16.62	1.180	135.0	7.5
2	HPMC	17.00	1.155	170.0	7.4
3	纤维素 PAC	17.41	1.156	49.0	7.6
4	铬木质素	16.93	1.183	完全失水	7.6
5	纯碱	16.78	1.165	完全失水	8.0
6	烧碱	16.87	<u>1.210</u>	完全失水	<u>9.1</u>
7	聚丙烯酸铵	<u>28.75</u>	1.180	完全失水	7.7
8	黄原胶	17.69	1.165	54.5	7.6
9	无添加剂	16.72	1.160	完全失水	7.4

注：具有下划线的数值为相同参数的极值。

与无添加剂的海水泥浆相比，添加剂对海水水泥浆相对密度影响变化不大。对黏度影响，除聚丙烯酸铵外，相差不大；絮凝剂聚丙烯酸铵使得海水水泥浆呈棉絮状，黏度增大。

观察加入纤维素 PAC 的海水泥浆经过失水测定后的泥皮，泥皮强度很低，黏度较高，厚度达到 13.38 mm，如图 7 所示。



图 7 纤维素 PAC 的海水泥浆泥皮
Fig.7 Filter loss of seawater slurry under cellulose PAC

3.2 CMC 添加剂掺入量对海水水泥浆性质影响

配置钠基膨润土同上的海水水泥浆，每 1 000 g 海水水泥浆中分别加入 1.05、2.10、3.15、4.20 g 的 CMC，测试添加剂的添加量对海水水泥浆性质影响，如图 8 所示。

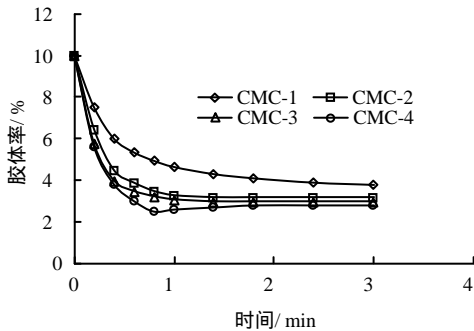


图 8 不同 CMC 添加量的海水水泥浆胶体率随时间的变化
Fig.8 Variation of colloidal rate of seawater slurry with time under different CMC additions

逐渐增加 CMC 添加量，絮凝沉淀层与上层浑浊层的分层需要更长时间，且分界线越来越模糊。向海水水泥浆中加入 2.10 g CMC 时，海水水泥浆静置 8 min 才可以明显看出分界面；当加入 3.15 g CMC 时，海水水泥浆静置 14 min 才可以明显看出分界面；当加入 4.20 g CMC 时，24 min 时海水水泥浆分界面才可以辨认出，且出现中间混合层。分别加入 2.10、3.15、4.20 g CMC 的海水泥浆分层状态，如图 9 所示。

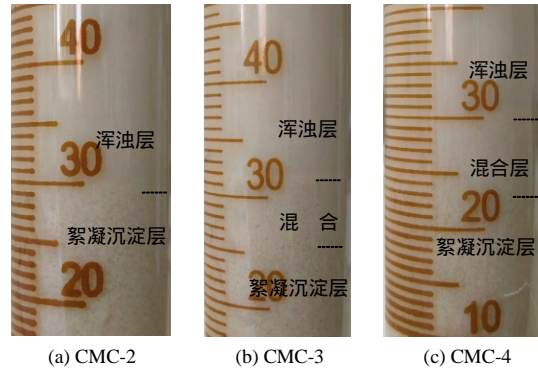


图 9 不同 CMC 添加量的海水水泥浆 24 min 离析分层
Fig.9 24 min segregation layering of seawater slurry under different CMC additions

不同 CMC 添加量下海水水泥浆的黏度、滤失量、泥皮厚变化如表 4 所示。随着不断增加 CMC 添加量，海水水泥浆黏度逐渐增大，滤失量减小，但泥皮厚度差别不大。

表 4 不同 CMC 添加量的海水水泥浆性质
Table 4 Property of seawater slurry under different CMC additions

编号	CMC 加入量 / g	黏度 / s	失水量 / mL	泥皮厚度 / mm
CMC-1	1.05	16.62	42	11.5
CMC-2	2.10	17.38	37	11.0
CMC-3	3.15	18.47	32	10.1
CMC-4	4.20	19.00	27	9.0

3.3 纤维素 PAC 添加剂量对海水水泥浆性质影响

配置钠基膨润土同上的海水水泥浆，每 1 000 g 海水水泥浆中分别加入 1.05、2.10、3.15、4.20 g 的纤维素 PAC，测试添加剂的添加量对海水水泥浆性质影响，如图 10 所示。

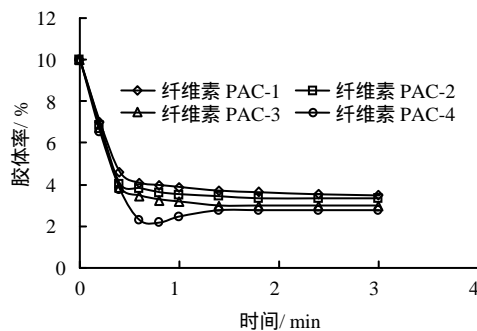


图 10 不同纤维素 PAC 添加量的海水水泥浆胶体率随时间的变化
Fig.10 Variation of colloidal rate of seawater slurry with time under different cellulose PAC additions

通过向海水水泥浆中添加纤维素 PAC，发现具有

与 CMC 相同的现象, 纤维素 PAC 添加量越大, 能够明显看出分层所需的时间越长。与此同时, 添加纤维素 PAC 的海水泥浆静置超过 24 min 后絮凝沉淀层下也出现了浑浊层, 如图 11 所示。当静置 24 h 后, 浑浊层越来越清晰, 混合层、絮凝沉淀层厚度变薄, 黏结强度变高。

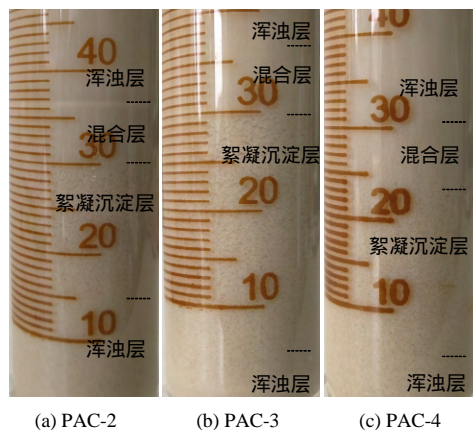


图 11 不同纤维素 PAC 添加量的海水泥浆 24 min 离析分层
Fig.11 24 min segregation layering of seawater slurry under different cellulose PAC additions

分析认为, 海水中加入的添加剂 CMC 和纤维素 PAC 与海水反应, 形成絮凝状沉淀。在 877.5 g 海水中单独加入 CMC 和纤维素 PAC 各 3.15 g, 如图 12。海水下层由无色变为黄色, 即为添加剂与海水化学元素反应产物。

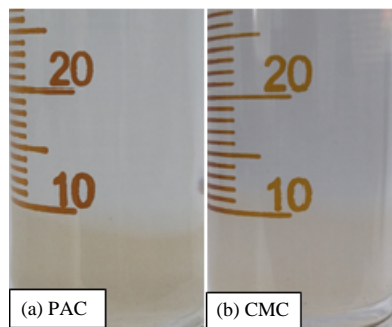


图 12 纤维素 PAC、CMC 与海水反应产生沉淀
Fig.12 Precipitation due to the reaction of cellulose PAC and CMC with seawater

不同纤维素 PAC 添加量下海水泥浆的黏度、滤失量、泥皮厚变化见表 5。

4 改性泥浆地层渗透对比试验

4.1 泥浆配置与地层夯实

为对比海水泥浆改性前后对地层的渗透特征, 利用泥膜形成试验平台开展海水泥浆改性前后的渗

透试验。配置添加 CMC、PAC 的改性海水泥浆, 其中, 膨润土质量占泥浆总质量 (膨润土+海水+添加剂) 为 12.25%, 每 1 000 g 海水泥浆中加入 1.05 g 添加剂。

表 5 不同纤维素 PAC 添加量的海水泥浆性质
Table 5 Change of property of seawater slurry under different cellulose PAC additions

编号	PAC 加入量 / g	黏度 / s	失水量 / mL	泥皮厚度 / mm
PAC-1	1.05	17.41	49	11.00
PAC-2	2.10	18.22	45	8.66
PAC-3	3.15	18.81	28	8.51
PAC-4	4.20	20.28	19	8.00

试验采用一定粒径的河砂, 经烘干, 筛分后称量不同粒组的混合均匀, 如表 6 所示。

表 6 海水泥浆渗透地层参数

Table 6 Formation parameters of seawater slurry penetration

粒组 / mm	重量 / g	比例	渗透系数 / (cm·s ⁻¹)
0.315 ~ 0.630	7 000	1:1	0.043 1
0.630 ~ 1.250	7 000	1:1	0.043 1

泥浆渗透层下分别铺设厚 48 mm、粒径 2.50 ~ 5.00 mm 的粒组 1[#], 厚 35 mm、粒径 5.00 ~ 10.00 mm 的粒组 2[#], 如图 13 所示。

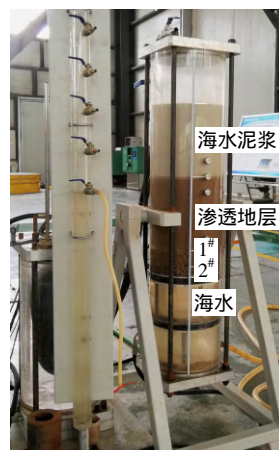


图 13 地层铺设与夯实
Fig.13 Stratum laying and compaction

依次对泥浆施加空气压力, 实现泥浆压力与地层孔隙水压力差分别为 0.02、0.04、0.06 MPa。

4.2 泥浆地层渗透对比试验结果

测取海水泥浆与改性海水泥浆渗透地层的滤水

量随时间的变化，如图 14 所示。

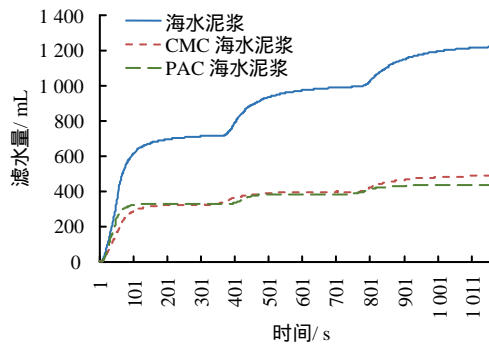
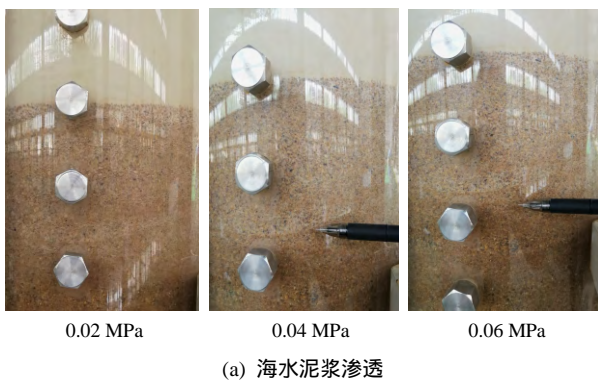


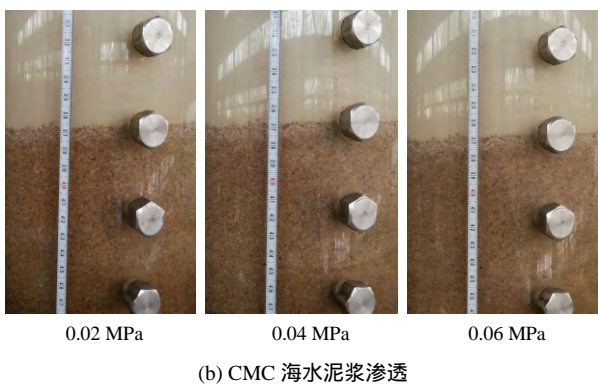
图 14 3 种海水泥浆的地层渗透的滤水量变化曲线
Fig.14 Variation of filter loss caused by formation penetration of three kinds of seawater slurry

添加 CMC、PAC 海水泥浆的滤水量要明显小于海水泥浆的滤水量，表明添加剂对海水具有增加黏稠度的作用，有利于形成泥皮型泥膜。

海水泥浆与 CMC 海水泥浆对地层的渗透状态如图 15 所示。对比可见，海水泥浆对地层渗透明显，相同压力差下渗透厚度远大于改性海水泥浆。



(a) 海水泥浆渗透



(b) CMC 海水泥浆渗透

图 15 海水泥浆与 CMC 海水泥浆的地层渗透情况
Fig.15 Formation penetration of seawater slurry and CMC seawater slurry

CMC 海水泥浆与 PAC 海水泥浆渗透情况类似。相同压力差下，PAC 海水泥浆对地层的渗透厚度明

显小于海水泥浆。

倒置试验筒，将未渗透泥浆清理后，测量泥皮厚度，如图 16 所示。测量海水泥浆、CMC 海水泥浆、PAC 海水泥浆的泥皮厚度见表 7。



图 16 测量泥皮厚度
Fig.16 Measuring slurry thickness

表 7 3 类泥浆泥皮厚度
Table 7 Slurry thickness of three types of slurry

泥浆类型	海水泥浆	CMC 海水泥浆	PAC 海水泥浆
泥皮厚度/mm	13	10	9

5 结 论

为改变海水泥浆特性以达到充分利用海水资源来配置泥水盾构用泥浆的目的，选用 CMC、纤维素 PAC、聚丙烯酸铵等 8 种添加剂进行海水泥浆性质变化试验，优选出对海水泥浆改性明显的添加剂，进行掺入量和时间对海水泥浆性质的影响规律试验。进一步，利用泥膜形成试验平台对优选的 CMC、纤维素 PAC 海水泥浆进行地层渗透试验。结论如下：

(1) 相比于淡水泥浆，海水泥浆可以通过增加膨润土掺入量提高黏度和胶体率，如膨润土含量 40% 时，胶体率达到 93%。但从经济性而言，通过增大膨润土掺入量改善海水泥浆性质，消耗巨大。

(2) 对比 CMC、纤维素 PAC、聚丙烯酸铵等 8 种添加剂对海水泥浆的改性作用，CMC 和纤维素 PAC 能较快提高泥浆黏度，且与海水反应优于其他添加剂。

(3) 添加 CMC 和纤维素 PAC 后，改性海水泥浆的分层明显，出现絮凝沉淀层、混合层、浑浊层。

(4) 相比于海水泥浆，添加 CMC 和纤维素 PAC 的改性海水泥浆对相同地层的滤水量变小，渗透厚度变小。说明采用 CMC 和纤维素 PAC 可以改善海水泥浆性质，用于穿江越海泥水平衡盾构用海水泥浆的改性作用。

参 考 文 献

- [1] 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 technology advantages and problems in construction of tunnels crossing rivers and seas[J]. **Tunnel Construction**, 2013, 33(5): 337-342.
- [2] 郭信君, 闵凡路, 钟小春, 等. 南京长江隧道工程难度分析及关键技术总结[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31(10): 2154-2160.
GUO Xin-jun, MIN Fan-lu, ZHONG Xiao-chun, 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.
- [3] 魏代伟, 朱伟, 闵凡路. 砂土地层泥水盾构泥膜形成时间及泥水转化率的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 423-428.
WEI Dai-wei, ZHU Wei, MIN Fan-lu. 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.
- [4] 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 Fan-lu, XU Jing-bo, DU Jia-rui, 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.
- [5] 孙晓娜, 李勇萍, 罗敏. 浅谈海水泥浆及其与淡水泥浆的区别[J]. 江西建材, 2014(13): 68.
SUN Xiao-na, LI Yong-ping, LUO Min. The difference between sea cement slurry and the rest of the dry cement slurry[J]. **Jiangxi Building Materials**, 2014(13): 68.
- [6] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable ground[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2007, 40(1): 81-95.
- [7] 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(增刊 1): 288-292.
HAN Xiao-rui, ZHU Wei, LIU Quan-wei, et al. Influence of slurry property on filter cake quality on working face of slurry shield[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Suppl.1): 288-292.
- [8] 姜腾, 夏鹏举, 闵凡路. 泥浆性质对泥水盾构泥膜闭气性影响试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(2): 134-140.
JIANG Teng, XIA Peng-ju, MIN Fan-lu. Experimental study on the influence of slurry properties on the airtightness of the filter cakes of slurry shields[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2016, 53(2): 134-140.
- [9] 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(1): 112-117.
WANG Zhen-fei, ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li. Mud preparation and seepage test for slurry shields driving in sandy cobble ground[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2017(1): 112-117.
- [10] 胡建平, 董教社, 冯蓓蕾. 聚合物海水水泥浆的研制[J]. 探矿工程(岩钻掘工程), 2012, 39(12): 29-31.
HU Jian-ping, DONG Jiao-she, FENG Bei-lei. Development of polymer seawater drilling fluid[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2012, 39(12): 29-31.
- [11] 刘晶晶, 李天生, 王伟. 钻孔灌注桩海水水泥浆材料的试验研究[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(4): 163-166.
LIU Jing-jing, LI Tian-sheng, WANG Wei. The experimental study on materials of sea water slurry for bored pile[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2016, 30(4): 163-166.
- [12] 高超. 港珠澳大桥桩基工程海水泥浆配制技术[J]. 中国市政工程, 2015(5): 47-50.
GAO Chao. The preparation technology of sea mud about pile project in the Hong Kong-Zhuhai-Macau[J]. **China Municipal Engineering**, 2015(5): 47-50.
- [13] 中交第一公路工程有限公司. JTG/T F50 - 2011 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
CCCC First Highway Engineering Co., Ltd. JTG/T F50 - 2011 technical specification for construction of highway bridge and culvert[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.