

DOI: 10.11779/CJGE202008018

不同阳离子对泥水盾构泥浆稳定性影响试验研究

孙金鑫¹, 钟小春^{*1}, 付伟², 罗近海², 邓有春²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 中国中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 针对泥水盾构在滨海地区或海底掘进时含盐地层侵入会导致泥浆稳定性下降的问题, 通过向泥浆中掺入盐溶液, 测试泥浆泌水率、 ζ 电位、特征粒径、滤失量等参数变化, 利用胶体絮凝机理分析泥浆在不同盐溶液掺入下的稳定性。试验表明: ①相较于掺入淡水, 向膨水比为 1:15 的泥浆中掺入浓度为 1% 的盐溶液时, 泥浆 ζ 电位下降、特征粒径增大、滤失量增加; ②盐溶液通过降低 ζ 电位和稀释作用影响泥浆稳定性。当掺入比超过 5% 后, 继续掺入时, 若盐溶液为 NaCl 则泥浆特征粒径 d_{10} 继续增大而 d_{50} , d_{85} 基本不变, 泥浆颗粒聚集、不泌水; 若盐溶液为 CaCl_2 、 MgCl_2 , 则特征粒径 d_{10} , d_{50} , d_{85} 均基本不变, 泥浆出现絮降、泌水; ③ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 比 Na^+ 对泥浆稳定性影响更大, 故在不同海域采用泥水盾构掘进时, 应根据地下水盐分含量及种类有针对性地考虑其对泥浆稳定性的影响。

关键词: 泥水盾构; 泥浆泌水率; ζ 电位; 盐溶液; 絮凝作用; 泥浆滤失量

中图分类号: TU943.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)08-1525-07

作者简介: 孙金鑫(1994—), 男, 博士, 主要从事岩土工程方面的科研工作。E-mail: sunjinxin@hhu.edu.cn。

Experimental study on effects of different cations on stability of slurry within slurry shield

SUN Jin-xin¹, ZHONG Xiao-chun¹, FU Wei², LUO Jin-hai², DENG You-chun²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: In view of the problem that the high-salinity stratum intrusion during construction of submarine tunnels by the slurry shield will lead to the decrease of the stability of slurry, this study aims to investigate the effects of different salt solutions on the stability of slurry via colloidal flocculation mechanism by adding salt solutions into slurry and testing change of the parameters such as bleeding rate, zeta potential, characteristic particle sizes and seepage discharge of the slurry. The results show that compared with that by adding fresh water, the slurry by adding 1% salt solution in which the quality of water is 15 times that of bentonite, the zeta potential of slurry decreases, and its characteristic particle sizes and seepage discharge increase. The salt solution affects the stability of slurry mainly by decreasing its zeta potential, which promotes slurry particles to flocculate and to dilute the slurry. When the mixing ratio is more than 5% and keeps to increase, if the salt solution is NaCl, the zeta potential changes a little and then keeps steady, and the characteristic particle size d_{10} of the slurry continues to increase, while d_{50} and d_{85} remain basically the same. The particles of slurry coagulate, and the slurry remains stable and does not bleed. If the salt solution is CaCl_2 or MgCl_2 , the zeta potential decreases continuously, the characteristic particle sizes d_{10} , d_{50} and d_{85} remain basically unchanged, resulting in flocculation and bleeding. Ca^{2+} and Mg^{2+} have a greater influence on the stability of slurry than Na^+ . Therefore, when using the slurry shield to excavate the subsea tunnels in different sea areas, the effects of groundwater on the stability of slurry should be considered in accordance with the chemical type of groundwater.

Key words: slurry shield; bleeding rate of slurry; zeta potential; salty solution; flocculation; slurry seepage discharge

0 引言

随着国内越江跨海隧道数量的不断增加, 在高地下水位地层及不稳定软弱地层作业效果好的泥水盾构工法被越来越多的运用。例如, 香港填海地区顶管施工、陆丰核电海底排水隧道建设、厦门市轨道 2 号线、南京纬三路过江通道等工程^[1-4]。泥浆是泥水盾构工法

的关键, 在维持开挖面稳定, 为盾构刀盘润滑降温, 携渣等方面起着重要的作用。泥浆若是稳定性差, 容

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51678217, 51378176); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2015CB057800)

收稿日期: 2019-09-03

***通信作者** (E-mail: xchzhong@hhu.edu.cn)

易产生离析，就无法在开挖面上形成稳定的泥膜，进而无法维持开挖的稳定，极易诱发开挖面失稳等灾难性事故发生^[5]。目前关于泥水盾构泥浆的研究主要集中于陆域环境下泥浆适应性的研究，主要分析了泥浆密度、泥浆颗粒级配、泥浆黏度、地层条件、泥水差条件等因素在带压开舱时泥浆成膜及泥膜闭气问题^[6-9]、掘进时泥浆携渣及成膜问题^[10-12]等关键问题中起到的作用。

但以上研究均没有考虑含盐地层环境下泥浆的性质变化情况，而泥水盾构在滨海地区或海底掘进时，含盐地层侵入会导致泥浆稳定性下降，对盾构安全施工产生不利影响。针对盐水侵入对泥水盾构泥浆的影响的研究甚少，目前仅有寥寥几位学者开展了相关研究。杜佳芮等^[13]通过测量泥浆泌水率、黏度和电位 ζ 等参数的变化研究海水“侵入”对泥浆及泥膜性能影响，发现泥浆的电位 ζ 降低是导致泥浆快速沉淀的根本原因。吕乾乾等^[14]通过室内试验发现了通过 CMC 等制浆剂改性后可采用纳基膨润土进行海水制浆。Min 等^[15]通过泥浆性能试验、压汞试验和电镜扫描等手段分析了海水“侵入”下泥浆及泥膜性质劣化的原因。但以上研究均存在一个不足：通过采用添加不同比例海水来造浆，与实际工程中先用淡水造浆然后在施工过程中海水侵入的情况有较大差别，因为膨润土在盐溶液中几乎不能膨化，而在淡水中膨化造浆效果好^[16]。

近年来，中国水下隧道工程建设数量和规模不断提高，铁路、公路、市政、供水、供气、防洪、水电等行业领域对跨江越海隧道工程的需求与日俱增，渤海海峡跨海通道、琼州海峡跨海通道等世界级跨海工程也进入加速论证阶段^[17]，泥水盾构在滨海地区或海底等地区掘进时高盐度地层侵入会导致泥浆稳定性下降的问题急需解决。中国地域广阔，不同地区含盐地层中的离子成分含量各有差异。故本文通过盐溶液侵入膨润土泥浆试验和泥浆成膜试验对海域环境中的 3 种主要阳离子 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 影响泥浆稳定性的机理展开研究，以期为进一步分析含盐地层环境下泥水盾构泥浆配比调整提供依据。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验所用膨润土为湖南纳基膨润土，根据《中华人民共和国建材行业标准：JC/T 2059—2011》中的膨润土膨胀指数试验方法测定其在淡水中的膨胀指数为（21 mL/2 g）。试验所用盐为 NaCl 分析纯、 CaCl_2 分析纯及 MgCl_2 分析纯。试验海水采用美国材料与试验协会（ASTM）D1141—98 标准配制，各化学成分含

量如表 1 所示。试验海水中 NaCl 的浓度大于 2%， MgCl_2 的浓度约 0.5%， CaCl_2 的浓度约为 0.1%。

表 1 试验海水的化学成分含量

Table 1 Chemical compositions of test seawater		
化学成分	含量/(g·L ⁻¹)	占比/%
NaCl	24.53	70.1
MgCl ₂	5.20	14.9
Na ₂ SO ₄	4.09	11.7
CaCl ₂	1.16	3.3

注：占比为各化学成分质量占盐类总质量的百分比。

1.2 盐溶液侵入膨润土泥浆试验

将上述分析纯和自来水利用 1000 mL 容量瓶分别配制浓度为 1% 的 NaCl 溶液、 MgCl_2 溶液和 CaCl_2 溶液。

按照膨润土：自来水=1：15 的质量比来配制泥浆，膨化 24 h 作为基浆备用。设置 4 组质量均为 2000 g 的泥浆，每隔 1 h 分别向其中加入淡水、海水、浓度为 1% 的 NaCl 溶液、 MgCl_2 溶液和 CaCl_2 溶液，使加入的溶液的质量达到泥浆质量的 5%，15%，30%，50%。分别采用 1002 型泥浆相对密度计、马氏漏斗黏度计（25℃时测试淡水黏度为 25 s）、100 mL 量筒、MS2000 型激光粒度仪、 ζ 电位仪等测量各组泥浆的密度、漏斗黏度、4 h 泌水率、颗粒级配和泥浆特征粒径、泥浆 ζ 电位等基本性质。试验用基浆的特征粒径 d_{10} 、 d_{50} 、 d_{85} 分别为 2.12，5.53，11.82 μm ，其级配曲线如图 1 所示。

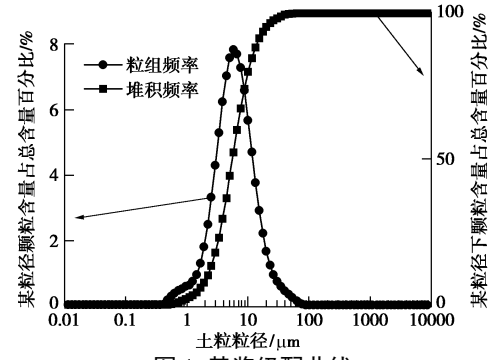


图 1 基浆级配曲线

Fig. 1 Grading curves of initial slurry

1.3 泥浆成膜试验

图 2 为泥浆成膜试验装置示意图，主要由 3 部分组成，加压装置、成膜装置及滤液收集—称重装置。加压装置由空压机、稳压器及储浆容器组成。成膜装置采用的渗透柱高度为 17 cm，装填 10 cm 厚粒径为 0.25~0.5 mm 的砂层作为试验地层（渗透系数为 $5.7 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ）。利用滤液收集—称重装置实时测量泥浆滤失量，天平精度为 0.01 g。

试验时，先向渗透柱底部放一层滤网，防止细砂堵塞排水通道。向渗透柱中注入清水，再缓缓加入细砂，直至细砂层厚度达到 10 cm。打开排水阀门，使液面与地层表面平齐，关闭排水阀门。将泥浆缓慢注

入渗透柱至充满渗透柱剩余空间。通过稳压器控制气压为 0.05 MPa, 依次打开稳压器与储浆容器间的阀门及加压装置与成膜装置间的阀门。气压稳定后, 打开排水阀门, 泥浆侵入地层, 滤液排出, 由滤液收集-称重装置实时称量。

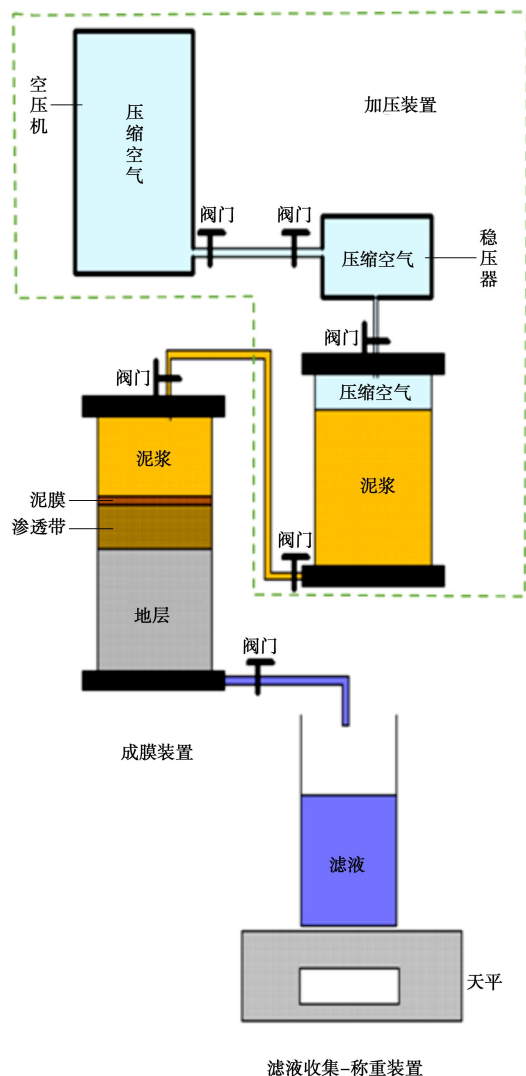


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus

2 试验结果

2.1 盐溶液侵入对泥浆漏斗黏度影响

由图 3 可知,随着盐溶液的掺入,试验泥浆漏斗黏度缓慢下降,当溶液掺入比小于 15% 时,在盐溶液作用下,泥浆漏斗黏度下降幅度比添加同比例淡水时大。当 NaCl 溶液掺入比大于 15% 时,泥浆漏斗黏度将比添加同比例淡水时大 1 s 左右。而当 CaCl_2 溶液或 MgCl_2 溶液掺入比大于 15% 时,泥浆漏斗黏度将比添加同比例淡水时小 1 s 左右。当海水掺入比为 15% 时,泥浆漏斗黏度出现一个峰值。

2.2 盐溶液侵入对泥浆密度的影响

从表 2 可以看出, 基浆初始密度为 1.031 g/cm^3 ,

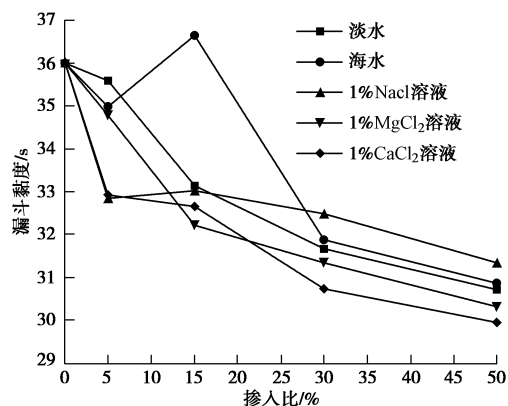


图 3 泥浆漏斗黏度随不同溶液掺入比变化

Fig. 3 Change of funnel viscosity of slurry under intrusion of different solutions

表 2 添加不同溶液后泥浆密度

Table 2 Specific gravities of slurry after adding different solutions
(g/cm³)

掺入比/%	淡水	海水	1%NaCl	1%MgCl ₂	1%CaCl ₂
0	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031
5	1.029	1.029	1.030	1.026	1.026
15	1.029	1.028	1.025	1.024	1.024
30	1.025	1.028	1.022	1.023	1.024
50	1.022	1.028	1.019	1.021	1.020

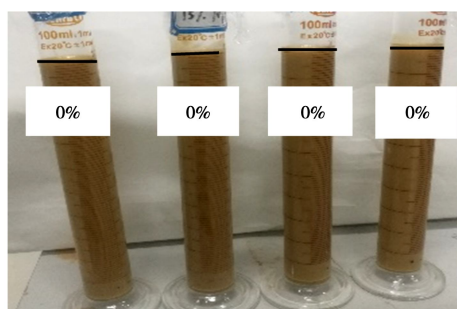
2.3 盐溶液侵入对泥浆稳定性影响

从图 4, 5 可以看出, 即使向基浆中掺入的浓度为 1% 的 NaCl 溶液或淡水的质量达到泥浆质量的 50%, 泥浆仍保持稳定, 4 h 泌水率为 0%, 不出现泌水现象; 而当向基浆中掺入的浓度为 1% 的 CaCl_2 溶液比例达到泥浆质量的 15% 时, 4 h 泌水率为 1.5%, 当掺入比达到 30%, 泥浆不能维持稳定, 出现分层离析, 4 h 泌水率达到 17%; 而当向泥浆中掺入的浓度为 1% 的 MgCl_2 溶液达到泥浆质量的 15% 时, 4 h 泌水率已达 4.5%, 当掺入比达到 30%, 泥浆同样不能维持稳定, 出现分层离析, 4 h 泌水率达到 21.5%; 当向泥浆中掺入海水的比例达到基浆质量的 15% 时, 4 h 泌水率为 0.5%, 当掺入比达到 30% 时, 泥浆泌水率仅为 10.5%。

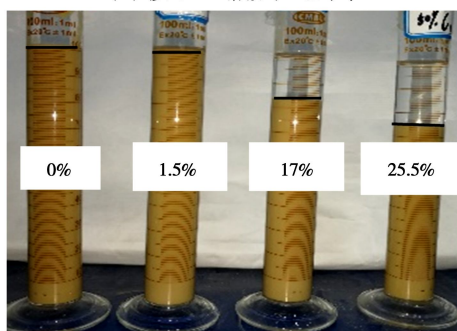
2.4 盐溶液侵入对泥浆 ζ 电位影响

ζ 电位能反映胶体颗粒相互排斥或吸引的能力, 是衡量胶体稳定性的重要指标。从图 6 可以看出, 基浆初始 ζ 电位 (取绝对值) 为 29 mV, NaCl 溶液掺入比为 5% 时, ζ 电位下降到 23.1 mV, 当掺入比为 50%, ζ 电位维持在 23 mV 左右。CaCl₂ 溶液或 MgCl₂ 溶液掺入比为 15% 时, ζ 电位均为 18.2 mV, 且随着溶液的掺入, ζ 电位均不断降低, 当掺入比为 50% 时, ζ 电位均已低于 10 mV, 远小于掺入同质量 NaCl 溶液

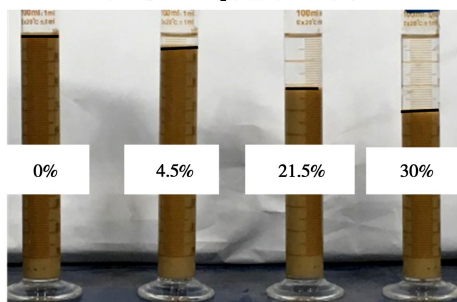
作用下泥浆 ζ 电位值。海水掺入比大于 30% 时, ζ 电位处于掺入同比例 NaCl 溶液时以下, 且在掺入同比例 CaCl_2 溶液或 MgCl_2 溶液时之上。



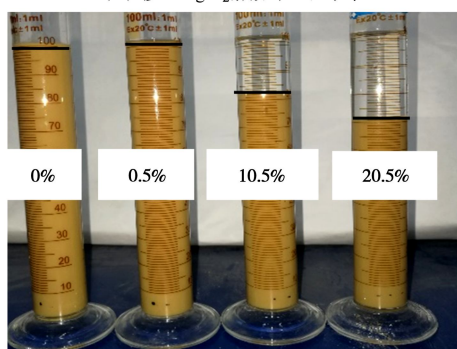
(a) 掺入NaCl溶液时4 h泌水率



(b) 掺入CaCl2溶液时4 h泌水率



(c) 掺入MgCl2溶液时4 h泌水率



(d) 掺入试验海水时4 h泌水率

图4 浓度为1%的不同溶液掺入泥浆后泌水情况

Fig. 4 Bleeding of slurry after intrusion of different solutions with concentration of 1%

2.5 盐溶液侵入对泥浆特征粒径影响

泥浆特征粒径 d_{10} , d_{50} 和 d_{85} 分别对应某粒径下的泥浆颗粒质量占总泥浆颗粒质量的 10%, 50% 和 85%, 可以反映出泥浆颗粒粒径大体分布情况, 其中泥浆特征粒径 d_{85} 与地层平均孔隙 D_0 的比值 d_{85}/D_0 决定泥浆成膜类型^[6]。

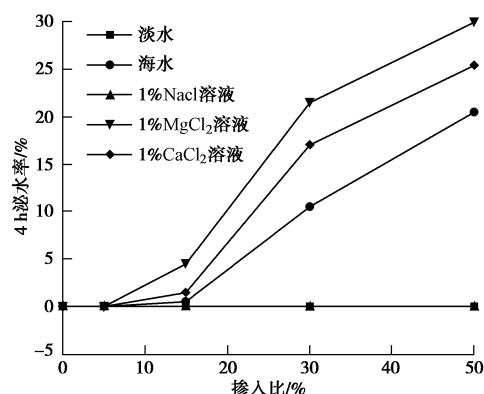


图5 掺入不同溶液后泥浆泌水率变化曲线

Fig. 5 Curves of bleeding rate of slurry under intrusion of different solutions

solutions

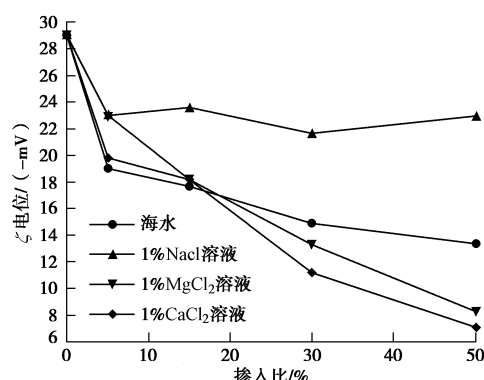


图6 泥浆 ζ 电位随不同溶液掺入比变化曲线

Fig. 6 Curves of zeta potential of slurry under intrusion of different solutions

从图 7~9 可以看出, 不同盐溶液溶液逐渐掺入到基浆中对泥浆颗粒特征粒径 d_{10} , d_{50} 和 d_{85} 的影响。当 CaCl_2 溶液或 MgCl_2 溶液掺入比大于 15% 后, 泥浆特征粒径均相近, 且随着盐溶液掺入比逐渐增加至 50%, 特征粒径值均有所降低但特征粒径 d_{50} 和 d_{85} 仍远大于泥浆初始特征粒径, 而 d_{10} 先增大, 然后随着溶液增加逐渐降低, 最后回到初始值附近。向泥浆中不断掺入 NaCl 溶液时, d_{10} 会随之增大, 而 d_{50} 和 d_{85} 在溶液加入后便分别提高至在 17, 39 μm 附近, 然后基本保持不变。

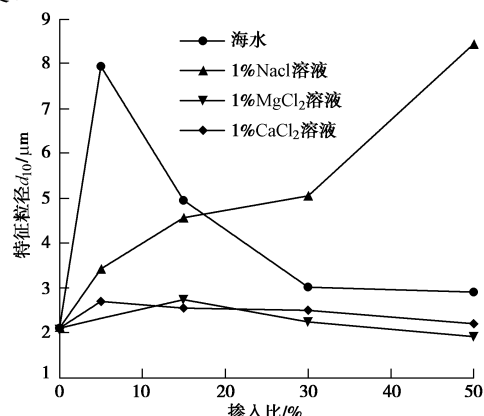
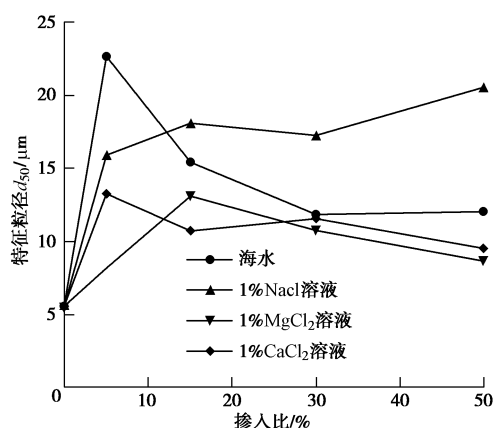
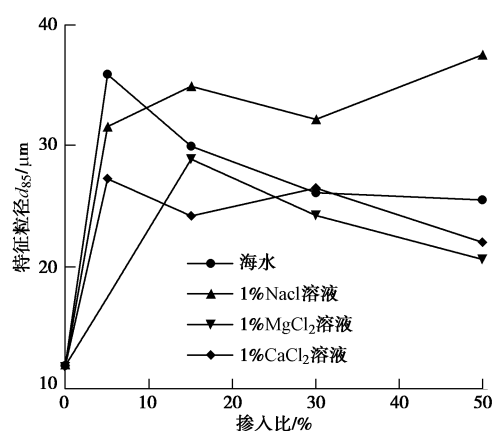


图7 泥浆特征粒径 d_{10} 随溶液掺入比变化曲线

Fig. 7 Curves of characteristic particle size d_{10} of slurry under intrusion of different solutions

图8 泥浆特征粒径 d_{50} 随溶液掺入比变化曲线Fig. 8 Curves of characteristic particle size d_{50} of slurry under intrusion of different solutions图9 泥浆特征粒径 d_{85} 随溶液掺入比变化曲线Fig. 9 Curves of characteristic particle size d_{85} of slurry under intrusion of different solutions

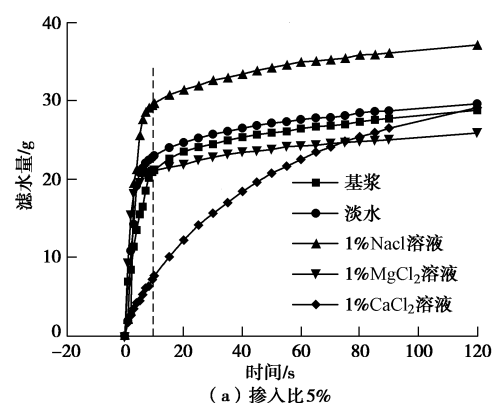
当海水掺入比为 5% 时, 泥浆特征粒径 d_{10} , d_{50} 和 d_{85} 均达到峰值, 然后逐渐降低, 最终稍大于添加同比例 CaCl_2 溶液或 MgCl_2 溶液时泥浆对应特征粒径。

2.6 盐溶液侵入对泥浆成膜的影响

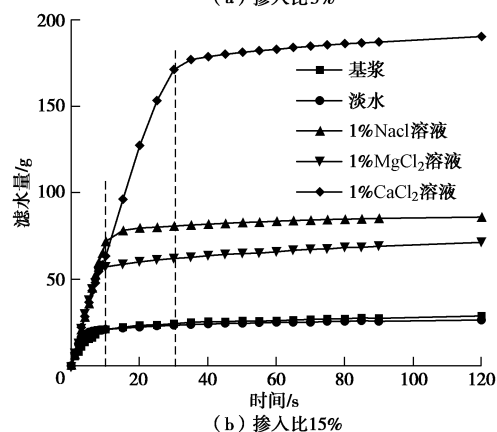
泥浆侵入地层成膜可分为两个阶段: 泥浆快速进入地层的泥浆喷失阶段, 泥浆颗粒在地层中汇集, 与地层颗粒发生作用, 泥膜结构强度从无到有; 泥膜形成阶段, 对应泥水压差下泥膜结构基本形成, 泥膜强度达到稳定^[12]。

从图 10 可以看出, 在 0.05 MPa 的泥水压差下, 10 s 左右, 基浆侵入地层成膜过程进入泥膜形成阶段, 120 s 时泥浆滤失量仅为 28.8 g。除添加 CaCl_2 溶液外, 随着溶液掺入比的增加, 泥浆滤失量均逐渐增加。当溶液掺入比不小于 15% 时, 相较于添加淡水, 向泥浆中添加盐溶液, 泥浆在喷失阶段滤失量显著增加。同时可以发现, 泥浆成膜阶段, 当溶液掺入比大于 30%, 在 CaCl_2 溶液或 MgCl_2 溶液作用下, 泥浆滤失量曲线斜率较大, 而在淡水或者 NaCl 溶液作用下, 泥浆滤失量曲线接近水平。

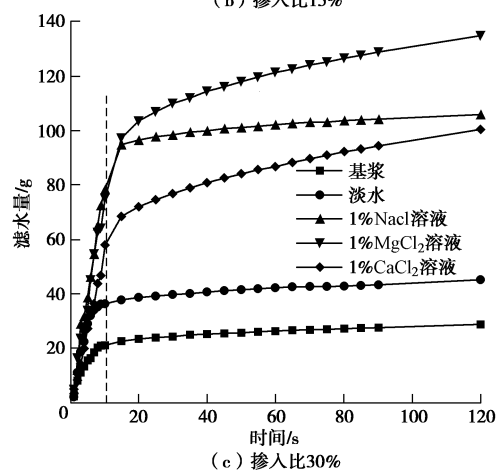
当 CaCl_2 溶液掺入比达到 15% 时, 30 s 左右才进



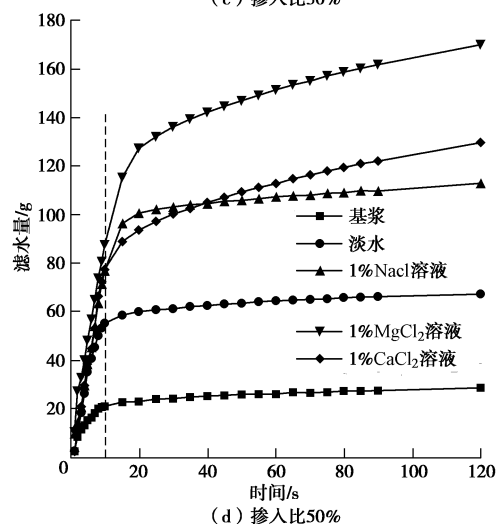
(a) 掺入比 5%



(b) 掺入比 15%



(c) 掺入比 30%



(d) 掺入比 50%

注: 基浆为原泥浆, 未添加其他溶液

图10 泥浆滤失量曲线

Fig. 10 Curves of seepage discharge of slurry

入泥浆成膜阶段, 泥浆 120 s 时滤失量达到峰值 190.3 g, 原因可能是所用试验砂层孔隙体积差异小, 而地层制备难以做到绝对均匀所造成的泥膜形成时间的波动。

3 盐溶液影响泥浆稳定性机理讨论分析

通过 Stern 双电层模型^[18]和黏土颗粒胶体絮凝机理^[19-20]可以很好地解释试验中加入盐溶液后泥浆絮凝泌水的现象。结合卢廷浩^[21]所编《土力学》中土的结构类型一节的内容可知, 向泥浆中掺入盐溶液后, 水中阳离子含量增高, 黏土表面的吸着水层厚度减小, 土粒间作用力由净斥力转为净吸力, 黏粒互相吸引, 粒间接触由面面接触为主变为以面边接触和面角接触为主, 形成絮凝结构。

将泥浆絮凝过程分为絮凝和絮降过程: 掺入盐溶液时, 阳离子侵入, ζ 电位降低, 泥浆颗粒絮凝; 若同时泥浆被充分稀释, 大粒团与小粒团间斥力克服重力后不足以维持体系稳定, 泥浆即发生絮降, 分层、泌水。

(1) 掺入浓度为 1% 的 NaCl 溶液时, 泥浆内部阳离子浓度增大, 部分阳离子进入 Stern 层, 导致泥浆 ζ 电位从 29 mV 降至 23 mV 左右。泥浆颗粒之间的平衡被破坏, 泥浆颗粒间接触以面面接触为主转为面边接触和面角接触为主, 泥浆颗粒絮凝。随着 NaCl 溶液掺入, 小粒径的泥浆颗粒受到 Na^+ 影响聚集成团, d_{10} 随之变大, 而 d_{50} , d_{85} 变化不大, 故在逐渐被稀释的情况下, 泥浆中的大粒团与逐渐增大的小粒团间的斥力克服重力后仍能维持稳定, 当掺入比达到 50%, 泥浆泌水率才 1%。泥浆不会出现明显分层、絮降、泌水现象。

(2) 掺入浓度为 1% 的 CaCl_2 溶液或 MgCl_2 溶液时, 同样的, 泥浆内部阳离子浓度增大, 部分阳离子进入 Stern 层, 但由于离子价态高, 当掺入比达到 5% 时, 泥浆中小颗粒絮凝成为大颗粒的过程便已基本完成。故随着溶液的继续掺入, ζ 电位不断降低, 而泥浆特征粒径 d_{10} 没有随之变大。当溶液的掺入比达 50% 时, ζ 电位从 29 mV 降至 10 mV 以下。在泥浆不断被稀释的情况下, 泥浆中的小粒团与大粒团间斥力已不足以平衡颗粒所受重力, 泥浆颗粒便由絮凝开始转向絮降, 泥浆开始出现分层、泌水现象。

4 存在的问题

本研究中只记录 120 s 内泥浆滤失量随时间变化情况, 并通过泥浆滤失量分析泥浆成膜质量。但实际工程中, 泥水平衡盾构掘进时, 刀盘转动, 切削土体, 开挖面上泥膜处于破坏与形成的过程中。

向基浆中掺入试验海水, 当掺入比为 5% 时, 泥浆特征粒径均达到峰值; 当掺入比为 15% 时, 泥浆漏

斗黏度达到峰值。试验海水中 Na^+ 浓度高达 2% 以上, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 浓度均小于 0.5%。可见, 多种阳离子混合情况下, 各种阳离子对泥浆稳定性影响不是简单的叠加, 具体研究有待进一步开展。

5 结论与建议

本文通过将不同盐溶液掺入膨水比为 1:15 的纳基膨润土泥浆中, 测量泥浆泌水率、 ζ 电位、特征粒径、滤失量等参数变化, 结合胶体絮凝机理及压缩双电层进行分析, 可以得到以下 4 点结论。

(1) 相较于掺入同比例的淡水, 向膨水比为 1:15 的泥浆中掺入浓度为 1% 的盐溶液时, 泥浆 ζ 电位下降、特征粒径增大、滤失量增加。

(2) 当盐溶液掺入比为 5% 时, 泥浆中部分颗粒即会发生絮凝。

(3) 当盐溶液掺入比超过 5% 后, 继续掺入时, 若盐溶液为 NaCl, 则特征粒径 d_{10} 增大、 d_{50} , d_{85} 基本不变, 泥浆颗粒只絮凝, 不泌水; 若盐溶液为 CaCl_2 、 MgCl_2 , 则特征粒径 d_{10} , d_{50} , d_{85} 均基本不变, 泥浆颗粒开始絮降, 泌水。

(4) 盐溶液主要通过降低泥浆 ζ 电位和稀释泥浆来影响泥浆稳定性, 其中泥浆大、小粒团的大小变化情况是决定泥浆是否絮降、泌水的关键。

总之, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 比 Na^+ 对泥浆稳定性影响更大, 在不同海域采用泥水盾构掘进时, 应根据地下水盐分含量及种类有针对性地考虑其对泥浆稳定性的影响。接下来应侧重开展针对不同阳离子作用下泥浆的改性优化研究。

参考文献:

- [1] YING H M, POON S W. Use of full face slurry for pipe jacking in Hong Kong's reclaimed land[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S1): 2438 - 2442.
- [2] 崔 激, 黄小龙, 李永杰, 陆丰核. 海底排水隧道泥水盾构泥浆配比试验研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 125 - 128, 87. (CUI Wei, HUANG Xiao-long, LI Yong-jie. Experimental study on preparation of slurry for slurry shields about the bottom of sea drainage tunnel in Lufeng[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 125 - 128, 87. (in Chinese))
- [3] 陈 辰. 跨海地铁隧道泥水平衡盾构复杂地层泥浆配制技术分析[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(3): 88 - 90. (CHEN Chen. Analysis of cross sea subway tunnel formulate slurry in complex formation[J]. Building Technique Development, 2017, 44(3): 88 - 90. (in Chinese))
- [4] 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): 1022 - 1027. (ZHANG Ning, ZHU Wei, MIN Fan-lu. Experimental

- study on preparation of slurry for slurry shields: case study on Weisanlu Yangtze River Tunnel in Nanjing[J]. Tunnel Construction, 2015, **35**(10): 1022 - 1027. (in Chinese))
- [5] 王 廷. 强渗透地层泥水盾构绿色泥浆配制及其适应性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015. (WANG Ting. A study on preparation of environment friendly slurry and its adaptation during slurry shield tunneling in high permeability stratum[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [6] MIN Fan-lu, ZHU Wei, HAN Xiao-rui. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **38**: 423 - 430.
- [7] 闵凡路, 赵小鹏, 朱 伟, 等. 不同泥浆渗透模式下形成泥膜的闭气效果探讨[J]. 现代隧道技术, 2015, **52**(4): 68 - 73. (MIN Fan-lu, ZHAO Xiao-peng, ZHU Wei, et al. Airtightness of filter cakes formed under different slurry infiltration modes[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, **52**(4): 68 - 73. (in Chinese))
- [8] MIN Fan-lu, ZHU Wei, LIN Cheng, et al. Opening the excavation chamber of the large-diameter size slurry shield: a case study in Nanjing Yangtze River Tunnel in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **46**: 18 - 27.
- [9] 姜 腾, 夏鹏举, 闵凡璐. 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. (in Chinese))
- [10] 邓亨义, 徐雪莹, 陈明娟. 富水砂卵石地层盾构隧道施工泥浆的研究与应用[J]. 中国工程科学, 2010, **12**(12): 79 - 82. (DENG Heng-yi, XU Xue-ying, CHEN Ming-juan. Research and application of construction slurry of shield tunnel under water-rich sandy gravel stratum[J]. Engineering Sciences, 2010, **12**(12): 79 - 82. (in Chinese))
- [11] 加 瑞, 朱 伟, 闵凡路. 泥浆颗粒级配和地层孔径对泥水盾构泥膜形成的影响[J]. 中国公路学报, 2017, **30**(8): 100 - 108. (JIA Rui, ZHU Wei, MIN Fan-lu. Effect of particle size distribution of slurry and pore size of stratum on formation of filter cake in slurry shield[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(8): 100 - 108. (in Chinese))
- [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 Chen, TANG Xin-yi, GAO Yu-feng. Influence of pore characteristics of sand strata on filter-cake formation under slurry shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 2002 - 2008. (in Chinese))
- [13] 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 Jia-rui, MIN Fan-lu, YAO Zhan-hu, 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. (in Chinese))
- [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. (LÜ Qian-qian, SUN Zhen-chuan, YANG Zhen-xing, et al. Experimental study of shield slurry property under seawater environment[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(2): 211 - 218. (in Chinese))
- [15] MIN Fan-lu, DU Jia-rui, ZHANG Nan, et al. Experimental study on property change of slurry and filter cake of slurry shield under seawater intrusion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **88**: 290 - 299.
- [16] 程 莹. 溶液环境及水生植物根系作用下 GCL 抗渗性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019. (CHENG Ying. Impermeability of GCL under the Action of Solution Environment and Aquatic Plant Root System[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [17] 我国建立首个水下隧道技术创新平台[J]. 隧道建设(中英文), 2019, **39**(8): 1246. (Establish of the first underwater tunnel technology innovation platform in China[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(8): 1246. (in Chinese))
- [18] 林 捷, 谢当汉, 陆天琳, 等. 含盐度对蒙脱土矿物絮凝影响的研究[J]. 中国水运(下半月), 2013, **13**(10): 121 - 123, 226. (LIN Jie, XIE Dang-han, LU Tian-lin, et al. Study on the influence of salinity on flocculation of montmorillonite minerals[J]. China Water Transport, 2013, **13**(10): 121 - 123, 226. (in Chinese))
- [19] 黄文孝. 凝聚、絮凝及其应用[J]. 云南冶金, 1982(5): 22 - 27, 21. (HUANG Wen-xiao. Coagulation, flocculation and application[J]. Yunnan Metallurgy, 1982(5): 22 - 27, 21. (in Chinese))
- [20] 谷建晓. 阳离子对蒙脱石胶体絮凝的影响[C]// 中国地质学会、中国地质学会工程地质专业委员会. 2017 年全国工程地质学术年会论文集, 2017, 桂林: 191 - 196. (GU Jian-xiao. Effects of interlayer cations on its geo performances of montmorillonite[C]// Geological Society of China, China Geology Society IAEG China National Group, 2017, Guilin: 191 - 196. (in Chinese))
- [21] 卢廷浩. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. (LU Ting-hao. Soil Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese))