

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 19

# EDTA 与黄原胶复合添加对海水泥浆性能的影响

金宇<sup>1,2</sup>, 杨建祥<sup>1</sup>, 张振<sup>3</sup>, 崔宏志<sup>1</sup>

(1. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 深圳信息职业技术学院, 广东 深圳 518172;  
3. 上海隧道工程有限公司, 上海 200127)

**摘要:** 泥水盾构中泥浆性质的稳定是在开挖面形成微透水泥膜, 有效平衡地层水土压力的关键。海水侵入对泥浆性质的劣化主要是海水的高盐浓度, 特别是其中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等二价阳离子浓度。为解决海水泥浆性能劣化的问题, 研究了膨水比为 3:50 的泥浆在分散剂纯碱、螯合剂乙二胺四乙酸(EDTA)、增稠剂黄原胶作用下, 泥浆密度、马歇尔漏斗粘度、2 h 泌水率的变化规律。结果表明: 纯碱的加入可明显提高泥浆密度, EDTA 与黄原胶单独加入对泥浆性质的影响不大; 当 EDTA 与黄原胶以 10:1 比例复合加入时, 泥浆 2 h 泌水率降幅达 50%; 泥浆颗粒的特征粒径  $d_{85}$  与表面 Zeta 电位值的测试结果表明, 泥浆的稳定性与其胶体性质关联程度较低; EDTA 与黄原胶复合添加时, 泥浆稳定性的提升与 EDTA 螯合二价阳离子后黄原胶增稠能力的恢复有关。研究结果对于开发抗阳离子型增稠剂以提升海水泥浆稳定性具有重要的指导作用。

**关键词:** 泥水盾构; 海域施工; 泥浆稳定性; 胶体性质

中图分类号: U455.43 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2026)02-0576-07

## Influence of Complex Addition of EDTA and Xanthan Gum on the Properties of Seawater Slurry

Jin Yu<sup>1,2</sup>, Yang Jianxiang<sup>1</sup>, Zhang Zhen<sup>3</sup>, Cui Hongzhi<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Transport Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, P. R. China;  
2. Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518172, P. R. China;  
3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200127, P. R. China)

**Abstract:** The stabilization of slurry properties in slurry shield tunneling is the key to form a slightly permeable filter cake on the excavation surface and to effectively balance the soil-water pressure in the ground. The deterioration of slurry properties due to seawater intrusion is mainly caused by the high salt concentration, especially the concentration of divalent cations such as  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc. To address the issue of the deteriorating slurry properties due to seawater, study on the effects of adding sodium carbonate, ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), and xanthan gum were conducted to a slurry with bentonite to seawater ratio of 3:50. Variations in slurry density, Marshall's funnel viscosity and 2 h bleeding rate were measured. The experimental results indicate that: The addition of sodium carbonate increased the slurry density, while EDTA and xanthan gum alone have minimal impact on the slurry properties. However, when EDTA and xanthan gum were added with a ratio of 10:1, the 2 h bleeding rate of the slurry decreased by 50%. The characteristic particle size  $d_{85}$  of the particles in the slurry and their zeta potential test results showed that the stability of the slurry and its colloidal properties were

收稿日期: 2025-04-24(修改稿)

作者简介: 金宇(1983—), 男, 武汉人, 博士, 副教授, 主要从事土木工程材料领域的研究工作。

E-mail: jin\_yu1983@hotmail.com

通讯作者: 崔宏志(1974—), 男, 山西太原人, 博士, 教授, 主要从事地下工程、土木工程等领域的科研与教学工作。

E-mail: h. z. cui@szu.edu.cn

基金项目: 上海隧道工程有限公司专项研究项目(STEC/KJB/XMGL/0090); 国家自然科学基金(52378251)

less relevant. The complex addition of EDTA and xanthan gum significantly improved the stability of the slurry, because EDTA chelated divalent cations in the seawater, which restored the thickening capacity of xanthan gum. The results are important guidelines for the development of cation-resistant thickeners to enhance the stability of seawater slurries.

**Keywords:** slurry shield tunnelling; marine construction; slurry stability; colloidal properties

## 0 引言

泥水盾构工法以其安全、高效,以及优越的压力控制模式在水文地质条件复杂地区的隧道建设中逐渐被采用。泥水盾构工法的核心是配制合适的泥浆在开挖面地层上形成一层微透水的泥膜,使泥水压力能有效平衡地层的水土压力,以保持开挖面的稳定。泥浆是由膨润土、天然黏土、外加剂和水组成的悬浮分散体。对于海底隧道,盾构掘进过程中由于泥膜的微透水性,与海水连通的地下水不可避免会渗入泥水舱。由于海水较高的离子浓度,特别是如 $\text{Ca}^{2+}$ 等二价阳离子的存在会削弱泥浆稳定性,引起分层、絮凝等现象产生,导致泥浆性能劣化。厦门市轨道交通2号线海沧大道站—东渡路站区间隧道施工时,曾出现海水侵入导致泥浆性质劣化的情况<sup>[1]</sup>,严重时甚至无法形成泥膜<sup>[2]</sup>。因此,在海域环境下采用泥水盾构工法施工时,克服海水侵入对泥浆性质的不利影响,对于保持开挖面稳定、保障施工安全、推进工程进度具有重要意义。

我国近海区域海水含盐量一般超过15%,其中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 二价阳离子含量在0.5%~1%左右。海水的加入改变了泥浆的物理性质,包括泥浆的物理稳定性、漏斗粘度、粘度系数等。当海水含量达20%左右时,泥浆会发生明显离析<sup>[3]</sup>。随着泥浆中海水含量的增加,泥浆的Zeta电位逐渐降低,导致颗粒之间的排斥力下降,所形成的泥膜厚度和渗透性增加,含水量和孔隙率下降<sup>[4]</sup>。随着膨润土含量增加,不同海水渗入量对泥浆泌水率的影响降低、对粘度的影响提高<sup>[5]</sup>。向膨水比为1:15的泥浆中掺入浓度为1%的盐溶液时,泥浆的Zeta电位下降、特征粒径增大、滤失量增加。由于加入盐溶液带来的稀释作用,以及溶液离子强度的提高,降低了泥浆的Zeta电位,影响了其稳定性。当掺入比超过5%后,NaCl溶液中泥浆的特征粒径 $d_{10}$ 增大,而 $d_{50}$ 、 $d_{85}$ 基本保持不变,泥浆颗粒絮集但不泌水; $\text{CaCl}_2$ 或 $\text{MgCl}_2$ 盐浓液中泥浆特征粒径 $d_{10}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_{85}$ 均基本不变,但泥浆出现絮降、泌水现象<sup>[6]</sup>。相比 $\text{Na}^+$ ,海水中二价阳离子对泥浆稳定性的影响更大。

瑞士Eppenbergt隧道泥水盾构施工过程中,泥

水压力不足使地下水中 $\text{Ca}^{2+}$ 侵入,削弱了泥浆的触变性并降低了其稳定性。由于泥浆中钠基膨润土被钙基膨润土取代是导致泥浆触变性变化的直接原因,通过在泥浆中添加纯碱引入 $\text{Na}^+$ 作为缓冲,解决了泥浆失稳的问题<sup>[7]</sup>。在膨水比为1:12的泥浆中加入腐殖酸钠、纯碱、烧碱、羧甲基纤维素(CMC),泥浆在高浓度 $\text{CaCl}_2$ 溶液的稳定性测试结果表明:腐殖酸钠、纯碱、烧碱均能降低泥浆的泌水率,而CMC则会使其泌水率提高。纯碱对泥浆漏斗粘度的改性效果最好,腐殖酸钠和烧碱则会提高其漏斗粘度的变化幅度。此外,纯碱能较好地减缓 $\text{Ca}^{2+}$ 侵入导致的泥浆Zeta电位下降,并保持受 $\text{Ca}^{2+}$ 侵入的泥浆特征粒径与基浆一致,CMC的加入会增大泥浆的特征粒径<sup>[8]</sup>。采用羧甲基纤维素CMC、聚阴离子纤维素PAC(Polyanions Cellulose)、聚丙烯酰胺PAM(Polyacrylamide)、羟丙基甲基纤维素HPMC(Hydroxypropyl Methylcellulose)、纯碱、黄原胶、铬木质素磺酸盐等添加剂对海水泥浆改性,试验结果表明:在0.1%添加量条件下,CMC、PAC和黄原胶对泥浆滤失量的改性较明显,而对其泌水率、漏斗粘度的改变较小<sup>[9]</sup>。黄原胶作为抗盐添加剂可解决膨润土不耐海水中阳离子和 $\text{Cl}^-$ 污染的问题,对100%的海水泥浆,黄原胶的含量应控制在0.3%<sup>[10]</sup>。前期研究虽然对各类添加剂的改性效果进行了评估,但对于泥浆在二价阳离子作用下的性能劣化问题仍缺乏有效解决方案,对添加剂的改性机制研究也存在一定的不足,有必要针对上述问题进一步开展研究。

本研究结合妈湾跨海通道的工程背景,针对海水中二价阳离子导致泥浆性能劣化的问题,研究螯合剂乙二胺四乙酸(EDTA)、分散剂纯碱、增稠剂黄原胶的复合作用下,海水泥浆性质的变化规律及添加剂的改性机理,以期为海域环境下泥浆改性及稳定性提升提供依据。

## 1 工程概况

妈湾跨海通道工程位于深圳市西部,途径前海妈湾及宝安大铲湾两区域,其海域段为1.1 km。工程线路范围的地表水主要为海水,分布在妈湾港与大铲湾码头之间,该部分海水位于珠江入海口,

与外海联通。海水中  $\text{Cl}^-$  含量较高,常年大部分时段  $\text{Cl}^-$  浓度大于 3 000 mg/L。妈湾跨海隧道盾构法隧道工程穿越海域“上软下硬、全断面硬岩”复杂地层、穿越高透水性断裂带及软基处理区域,具有较高的技术难度与施工风险。隧道断面内上部为黏土、全~强风化岩,下部为中~微风化岩。由于强风化岩及中风化岩中存在大量的风化裂隙及构造裂隙,成为地下水良好的富水及渗水通道,使得强风化岩及中风化岩透水性增强,岩体破碎带及附近含水量相对较丰富。

妈湾海域地下水的化学组成见表 1。从含盐量及  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量看,该地下水属于典型的近海区域海水。由于地下水中二价阳离子含量较高,会极大削弱泥浆的稳定性。

表 1 妈湾海域地下水的化学组成

Table 1 Chemical composition of the seawater from Mawan Bay

离子	含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )	离子	含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )
$\text{Na}^+$	4 268.89	$\text{Cl}^-$	8 038.79
$\text{K}^+$	135.73	$\text{SO}_4^{2-}$	674.73
$\text{Ca}^{2+}$	764.28	$\text{Br}^-$	79.75
$\text{Mg}^{2+}$	290.04		

## 2 试验方案

试验用土为钠基膨润土,用水取自工程现场的地下水,按膨润土与地下水 3:50 的比例配制泥浆。泥浆配方参考类似工程地质环境下的海水泥浆<sup>[11]</sup>,以纯碱(无水碳酸钠)作为分散剂。外加剂无水碳酸钠、乙二胺四乙酸(EDTA)、黄原胶采购自上海麦克林公司,均为分析纯。泥浆配比如表 2 所示。

采用 NB-1 型泥浆比重计、1006 型泥浆漏斗粘度计(25 °C 时测试自来水粘度为 18 s)、500 mL 量筒分别测量泥浆的比重、粘度、2 h 泌水率等性质。采用 Sympatec Helos 激光粒度仪分析泥浆的特征粒径,ELSZ-2000ZS 纳米粒度电位仪测定泥浆的 Zeta 电位。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 外加剂对泥浆性质的影响

地下水泥浆的性质见表 3。随着分散剂纯碱添加量的提升,泥浆密度先降低,后逐步提高。当分散剂掺量一定时,随着螯合剂 EDTA 掺量的提升,泥浆密度先升高,后逐步降低;随着抗盐增稠剂黄原胶掺量的提升,泥浆密度在 1.08~1.09 g/cm<sup>3</sup>

之间波动。然而,当 EDTA 与黄原胶复合添加时,泥浆密度由 1.09 g/cm<sup>3</sup> 降低至 1.06~1.07 g/cm<sup>3</sup>(纯碱掺量相当),表明不少土颗粒以絮凝团聚状态沉淀在底部,未能较好地分散在泥浆中。

表 2 泥浆配比

Table 2 Formulations of the slurries

	膨润土/g	地下水/mL	纯碱/g	EDTA/g	黄原胶/g
N0	30	500	-	-	-
N1	30	500	2.5	-	-
N2	30	500	5	-	-
N3	30	500	7.5	-	-
E1	30	500	7.5	1	-
E2	30	500	7.5	2	-
E3	30	500	7.5	3	-
E4	30	500	7.5	4	-
X1	30	500	7.5	-	0.1
X2	30	500	7.5	-	0.2
X3	30	500	7.5	-	0.3
X4	30	500	7.5	-	0.4
EX1	30	500	7.5	1	0.1
EX2	30	500	7.5	2	0.2
EX3	30	500	7.5	3	0.3

随纯碱掺量的变化,泥浆的漏斗粘度变化较小。EDTA 的加入略微提升了泥浆的漏斗粘度。与预期不同,黄原胶的掺量提升并未显著改变泥浆的漏斗粘度。当 EDTA 与黄原胶复合添加时,泥浆的漏斗粘度提升反而较为明显。由于黄原胶与二价阳离子结合会影响其基团水化,导致水溶液粘度降低<sup>[12]</sup>。因此,EDTA 与黄原胶的复合使用恢复了黄原胶在海水中的增稠作用。对于泥浆成膜来说,泥浆粘度越高,越容易形成厚度较薄、滤水量低的泥膜<sup>[13]</sup>。因此,粘度的小幅增加有效改善了海水泥浆的性能。

地下水泥浆泌水明显,未加入添加剂的泌水率在 60% 以上。泌水的泥浆上层为较浑浊的液体(图 1),下层为絮状沉淀,上下层间具有较明显的分界。

由于上层液体难以形成泥膜,因此仍将其定义为泌水<sup>[14]</sup>。由表 2 可知,纯碱的加入基本未改善泥浆的泌水。单独加入 EDTA 或黄原胶时,泥浆的泌水率有一定程度的降低。当 EDTA 与黄原胶复合添加时,泥浆的泌水率有了较为显著的改善。特别是当 EDTA 与黄原胶的掺量同比成倍提高时,泥浆的泌水率有较大降幅。为进一步优化 EDTA 与

黄原胶的添加比例,在配方 EX1 的基础上进行了调整,如表 4 所示。

表 3 泥浆性质

Table 3 Properties of the slurries

	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘度/s	2 h 泌水率/%
N0	1.065	24.7	60.4
N1	1.050	24.9	57.0
N2	1.070	24.5	58.2
N3	1.090	24.1	59.2
E1	1.096	25.4	52.0
E2	1.090	24.8	48.0
E3	1.082	25.2	44.2
E4	1.080	25.5	48.2
X1	1.085	24.0	55.2
X2	1.081	24.1	54.2
X3	1.090	24.9	50.2
X4	1.082	25.5	48.6
EX1	1.073	24.8	48.2
EX2	1.060	26.4	39.0
EX3	1.061	26.0	30.4



图 1 泌水的泥浆

Fig. 1 Bleeding of a slurry

当固定 EDTA 掺量时,泥浆的密度、漏斗粘度及 2 h 泌水率随着黄原胶掺量的增加变化幅度均不大。当固定黄原胶掺量时,随着 EDTA 掺量的增加,泥浆的 2 h 泌水率还产生了一定幅度的增加。以上结果表明,泥浆配方中 EDTA 与黄原胶 10:1 应为一个较优的比例。

### 3.2 外加剂对泥浆胶体特性的影响

由自来水与试验用膨润土配制的泥浆,其特征粒径  $d_{85}$  为 9.76  $\mu\text{m}$ , Zeta 电位为 -34.36 mV。对于泥浆体系,可由静电相互作用稳定的胶体颗粒的 Zeta 电位绝对值一般应大于 30 mV<sup>[1]</sup>。由图 2 可知,地下水的高盐浓度,特别是其中存在的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 二价阳离子,压缩了悬浮液中膨润土颗

粒表面的扩散双电层,使得泥浆的 Zeta 电位绝对值大幅降低,并增大了泥浆颗粒的特征粒径  $d_{85}$ 。因此,由于颗粒间的静电相互作用被弱化,地下水泥浆的稳定性较低。

表 4 配方调整后的泥浆性质

Table 4 Properties of slurries with the adjusted formulations

	EDTA /g	黄原胶 /g	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘 度/s	2 h 泌水 率/%
1	1	0.08	1.061	22.7	48.0
2(EX1)	1	0.1	1.062	24.5	50.5
3	1	0.12	1.065	24.5	53.0
4	1.5	0.08	1.065	23.8	55.0
5	2	0.08	1.065	23.8	56.0

氢氧化钠、六偏磷酸钠、硅酸钠等分散剂通过改变水溶液 pH、促进阴离子在黏土颗粒表面的吸附,可有效改变黏土颗粒表面的带电,进而起到去絮凝的效果<sup>[15]</sup>。然而,随着纯碱掺量的提升,带负电的膨润土颗粒的 Zeta 电位逐步趋向等电点(如图 2(a)所示),表明体系处于不稳定状态,胶体颗粒极易发生絮凝沉降。对于高盐的地下水体系,纯碱的加入反而削弱了泥浆颗粒表面的静电斥力作用。尽管如此,纯碱的加入仍然降低了颗粒的特征粒径  $d_{85}$ ,表明纯碱作为分散剂仍起到了一定的分散效果。

EDTA 作为螯合剂,对地下水中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 等二价阳离子具有选择性作用。随着 EDTA 的加入,泥浆的 Zeta 电位迅速降低,但与 EDTA 掺量无明显关联(如图 2(b)所示)。EDTA 与地下水中二价阳离子的快速结合,使得土颗粒表面被二价阳离子压缩的扩散双电层得以恢复,提高了土颗粒表面的电负性,相对增强了颗粒间的静电斥力。不仅如此,泥浆颗粒的特征粒径  $d_{85}$  也有进一步降低,尽管随着 EDTA 掺量的提升,特征粒径有变大的趋势,但总体仍小于未加入 EDTA 的泥浆。因此,相比于 N0~N4 系列泥浆,E1~E4 系列泥浆的 2 h 泌水率有所降低。

黄原胶作为增稠剂,一般认为可通过提升泥浆粘度从而起到稳定泥浆的作用。与黄原胶具有类似增稠作用的 CMC,加入海水泥浆后会降低泥浆颗粒的 Zeta 电位绝对值<sup>[13]</sup>。然而,在含高浓度二价阳离子的地下水中,由于黄原胶与二价阳离子的结合,其增稠作用较低,但由于水溶液中二价阳离子的浓度降低,反而提升了泥浆颗粒的 Zeta 电位绝对值。如图 2(c)所示,随着黄原胶掺量的提升,泥浆颗粒的 Zeta 电位缓慢降低,但特征粒径的波

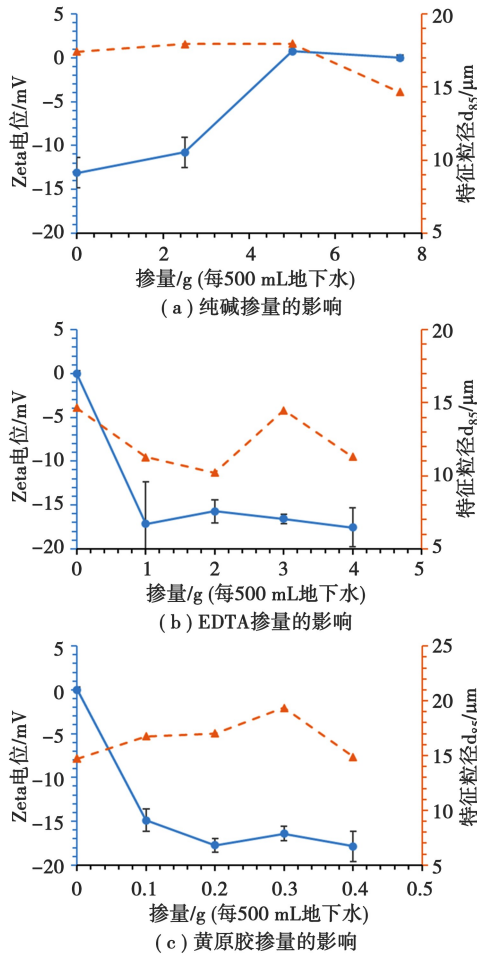


图 2 不同外加剂掺量对泥浆胶体特性的影响  
Fig. 2 Influence of the chemical additives on the colloidal properties of the slurries

动相对较大,整体未呈现明显规律。相比 EDTA,黄原胶的加入提升了泥浆颗粒的特征粒径,以上现象应与增稠剂保障了膨润土的膨胀有关<sup>[16]</sup>。

当 EDTA 与黄原胶复合添加时,随着掺量提升,泥浆颗粒的 Zeta 电位绝对值经历了先减小后增大的过程(图 3)。相对地,泥浆颗粒的特征粒径也存在类似过程,但粒径的变化幅度相对较低,其尺度相比仅加入纯碱的泥浆 N4 仍有进一步的减小。

### 3.3 泥浆胶体特性与泥浆性质的关联

既有研究<sup>[5-6]</sup>表明,泥浆的特性与其胶体性质,包括泥浆颗粒的 Zeta 电位与特征粒径关系较为紧密。因此,有必要以泥浆颗粒的特征粒径与 Zeta 电位为基础,探究其与泥浆基本性质的关联,结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4(a)可知,特征粒径  $d_{85}$  与泥浆密度并无直接关联。泥浆中颗粒特征粒径较小时,也会存在较多絮凝沉淀,从而影响泥浆密度。同样地,泥浆粘度的影响因素与添加剂的种类、掺量、以及添加

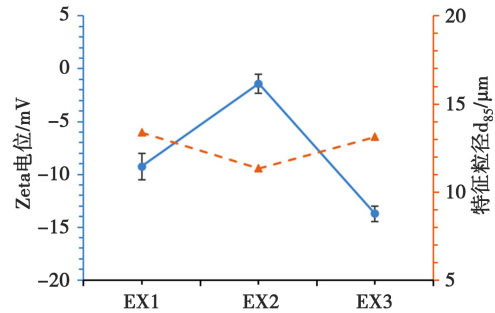


图 3 EDTA 与黄原胶复合对泥浆胶体特性的影响

Fig. 3 Influence of the combined use of EDTA and xanthan gum on the colloidal properties of the slurries

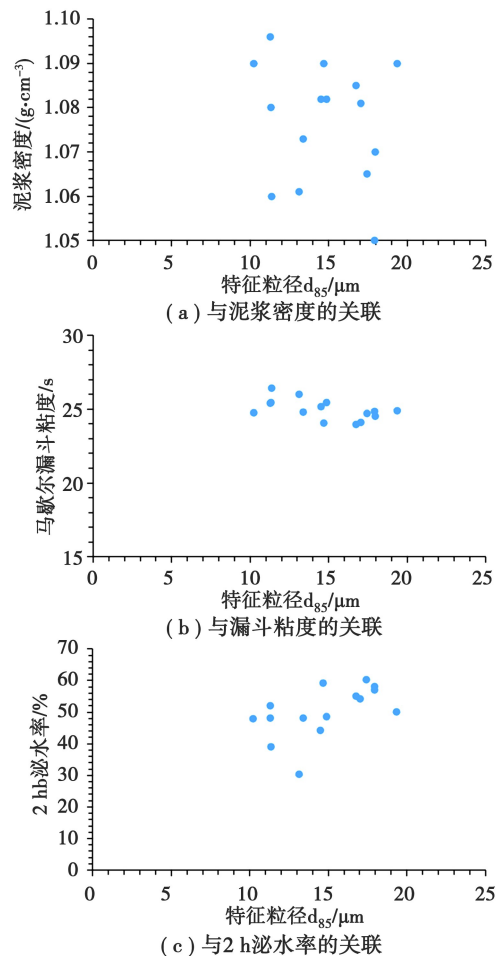


图 4 悬浮液颗粒特征粒径与泥浆性质的关联  
Fig. 4 Relationship between characterized size of the suspensions and the slurries' properties

剂与海水中离子的相互作用相关,特征粒径无法与泥浆的粘度产生直接关联(图 4(b))。泥浆颗粒越小,其表面间产生的静电斥力越能抵抗重力作用,从而使得颗粒悬浮于水溶液中。因此,泥浆颗粒的特征粒径越小,表明其稳定性相对更高,特征粒径与 2 h 泌水率因而呈现一定的弱相关性(图 4(c))。

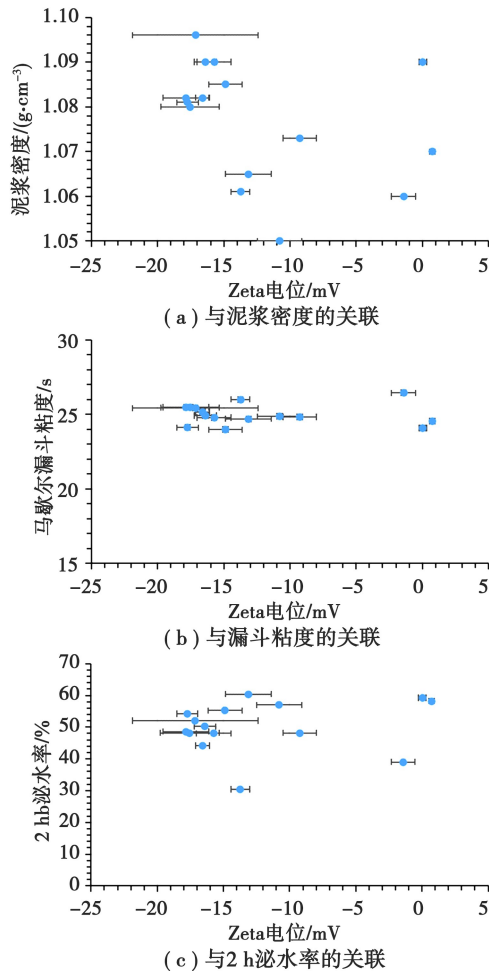


图5 悬浮液颗粒 Zeta 电位与泥浆性质的关联

Fig. 5 Relationship between Zeta potential of the suspensions and the slurries' properties

如图 5(a) 所示,若排除掉 Zeta 电位值靠近等电点(0 mV)的泥浆,剩余泥浆的密度与 Zeta 电位绝对值呈现一定的相关性,即随着 Zeta 电位绝对值的降低,泥浆的密度也随之减小。上述现象与 Zeta 电位作为表征胶体系统稳定状态的参数有关。Zeta 电位绝对值越低,体系越不稳定,发生沉降的颗粒较多,进而降低了泥浆的密度。粘度尽管与胶体性质有关,但其影响因素较为复杂,无法直接由 Zeta 电位值进行推断,结果也显示泥浆的粘度与 Zeta 电位值无相关性(图 5(b))。理论上,泥浆颗粒的 Zeta 电位反映了泥浆体系的稳定性,其 Zeta 电位绝对值应与泥浆的泌水率直接相关。然而,由于试验测试的泥浆,其 Zeta 电位绝对值均小于 20 mV,胶体本身处于一个较不稳定的状态,因而根据 Zeta 电位绝对值的小幅度变化无法直接判断泥浆泌水率的高低。从结果上看,泥浆的 Zeta 电位值与 2 h 泌水率无直接关联(图 5(c))。

## 4 结论

(1) 地下水中二价阳离子的存在极大削弱了泥浆稳定性。EDTA 与黄原胶的加入,在提高泥浆颗粒表面电负性的同时,降低了泥浆颗粒的特征粒径。然而,泥浆颗粒表面的 Zeta 电位值较低,不足以保持泥浆的稳定。因此,泥浆的胶体特性与泥浆性质,特别是泥浆 2 h 泌水率之间的关联程度较低。

(2) 当复合加入 EDTA 与黄原胶时,由于 EDTA 对二价阳离子的螯合,使得黄原胶的增稠作用恢复,提升了泥浆粘度,从而降低了泥浆泌水率。需要注意的是,EDTA 与黄原胶复合加入时,对泥浆性质的改变有协同效果,特别是复合比例的改变对泥浆泌水率有较大影响。

(3) 对于海域环境泥水盾构施工,在泥浆中加入 EDTA 或其它能结合二价阳离子的添加剂,保障增稠剂的作用效果,是获得稳定泥浆的重要技术手段。

## 参考文献(References)

- [1] 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. (in Chinese))
- [2] 丁万涛, 郭文静, 曹凯, 等. 泥水盾构抗海水劣化泥浆流变性能及成膜机制分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(12): 2484-2491. (Ding wantao, Guo Wenjing, Cao Kai, et al. Rheological properties and film-forming mechanism of anti-seawater deterioration slurry for slurry shield [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(12): 2484-2491. (in Chinese))
- [3] 杨振兴, 孙振川, 游永锋, 等. 泥水平衡盾构中海水泥浆性质试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 359-365. (Yang Zhenxing, Sun Zhenchuan, You Yongfeng, et al. Experimental study on properties of seawater slurry for mud-balanced shield construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 359-365. (in Chinese))
- [4] Min F, Du J, Zhang N, 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.
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 孙金鑫, 钟小春, 付伟, 等. 不同阳离子对泥水盾构泥浆稳定性影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(8): 1525-1531. (Sun Jinxin, Zhong Xiaochun, Fu Wei, et al. Experimental study on effects of different cations on stability of slurry within slurry shield [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(8): 1525-1531. (in Chinese))
- [7] Gilgen S, Weh M. Eppenbergtunnel: Hydroshield TBM drive in highly permeable soils above the groundwater table-Unexpected problems and their solution [J]. *Geomechanics and Tunnelling*, 2020, 13(4): 382-398.
- [8] 张洋, 钟小春, 孙金鑫, 等. 海域  $\text{Ca}^{2+}$  侵入环境下泥水盾构泥浆性能改性研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(增2): 1-8. (Zhang Yang, Zhong Xiaochun, Sun Jinxin, et al. Experimental study on effects of different cations on stability of slurry within slurry shield [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Supp. 2): 1-8. (in Chinese))
- [9] 杨振兴, 陈健, 孙振川, 等. 泥水平衡盾构用海水泥浆的改性试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(2): 501-508. (Yang Zhenxing, Chen Jian, Sun Zhenchuan, et al. Experimental study on improved seawater slurry for slurry shield [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 501-508. (in Chinese))
- [10] Cui W, Liu D, Song H, et al. Experimental study of salt-resisting slurry for undersea shield tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 98: 103322.
- [11] 吕锦, 范杰, 黄凯. 海相复合地层泥水盾构施工泥水材料试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(1): 76-83, 107. (Lü Jin, Fan Jie, Huang Kai, et al. Experimental study on slurry materials for slurry shield construction in marine composite strata [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(1): 76-83, 107. (in Chinese))
- [12] Bergmann D, Furth G, Mayer C. Binding of bivalent cations by xanthan in aqueous solution [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2008, 43(3): 245-251.
- [13] 李国敏, 朱训国, 夏洪春, 等. 跨海区域砾砂地层泥水盾构泥浆成膜效果试验研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(2): 171-178. (Li Guomin, Zhu Xunguo, Xia Hongchun, et al. Experimental study on the film-forming effect of shield mud in gravel formation in cross-sea area [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2024, 43(2): 171-178. (in Chinese))
- [14] 刘来仓, 夏鹏举, 吕焕杰, 等. CMC 改性海水泥浆性质变化及砂地层成膜试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(1): 249-255. (Liu Laicang, Xia Pengju, Lv Huanjie, et al. Experimental study on the property change of CMC-modified seawater slurry and filter cake formation in sand strata [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(1): 249-255. (in Chinese))
- [15] Landrou G, Brumaud C, Plötze M L, et al. A fresh look at dense clay paste: Deflocculation and thixotropy mechanisms [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 539: 252-260.
- [16] 王承震, 丁万涛, 于文端, 等. 越海泥水盾构隧道泥浆流变特征试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(6): 237-245. (Wang Chenzhen, Ding Wantao, Yu Wenduan, et al. Experimental study on rheological properties of slurry in slurry shield tunnelling crossing sea [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(6): 237-245. (in Chinese))