



## 高盐地区地连墙泥浆配比试验研究

宋庆仁<sup>1,2</sup>, 黄威<sup>1</sup>, 王志敏<sup>1</sup>, 赵紫辰<sup>1</sup>

(1. 中交二航局第一工程有限公司, 湖北武汉 430050; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北武汉 430050)

**摘要:** 泥浆性能对保证地连墙施工质量与安全具有重要意义。采用正交试验分析泥浆性能指标与沉渣厚度的关系; 依据泥浆性能与盐浓度的相关性, 探讨高盐条件下泥浆性能的影响因素, 确定施工区不同地质条件的泥浆配比。结果表明: 临海侧施工区的沉渣厚度更大, 沉渣达到稳定的时间也更长; 泥浆密度、黏度及含砂率越大, 最终沉渣厚度也越大, 密度及黏度增大还会延长沉渣到达稳定的时间; 泥浆密度与盐浓度呈正相关, 黏度及 pH 值与盐浓度呈负相关; 通过调节泥浆材料配比可控制泥浆性能, 钠基膨润土会增大泥浆密度、黏度、含砂率及 pH 值, 纯碱会导致泥浆密度和 pH 值增加, 聚合氯化铝可增加泥浆密度并降低泥浆含砂率及 pH 值。临红海地区高盐环境下泥浆材料配比推荐值为钠基膨润土 10%、纯碱掺量 0.2%、聚合氯化铝 0.08%、pH 值为 8 的清水 89.72%。

**关键词:** 地连墙; 护壁泥浆; 质量控制; 沉渣厚度; 配合比

中图分类号: TU476+.3; TV52

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0218-07

### Test of mud mix proportion of underground diaphragm wall in high salt area

SONG Qingren<sup>1,2</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, WANG Zhimin<sup>1</sup>, ZHAO Zichen<sup>1</sup>

(1. The First Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430050, China;

2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

**Abstract:** Mud performance is of great significance to ensure the quality and safety of underground diaphragm wall construction. Orthogonal test is used to analyze the relationship between mud performance index and sediment thickness. Based on the correlation between mud performance and salt concentration, influence factors of mud performance under high salt conditions are discussed, suitable mud mix proportions are determined for different geological conditions in the construction area. The results show that the sediment thickness of the construction area near the sea is thicker and the time for the sediment to reach stability is longer. The greater the density, viscosity and sand content of mud are, the greater the final sediment thickness is, and the increase of density and viscosity will prolong the time for sediment to reach stability. Mud density is positively correlated with salt concentration, while viscosity and pH are negatively correlated with salt concentration. Mud performance can be controlled by adjusting the mix proportion of mud materials. Sodium bentonite will increase the mud density, viscosity, sand content and pH value, soda ash will increase the mud viscosity and pH value, and polyaluminum chloride can increase the mud density and reduce the mud sand content and pH value. In the high salt environment near the Red Sea area, the recommended mud mix proportion is 10% sodium bentonite, 0.2% soda ash content, 0.08% polyaluminum chloride, 89.72% water with pH 8.

**Keywords:** underground diaphragm wall; protection mud; quality control; sediment thickness; mix proportion

某临红海区域地下连续墙(简称“地连墙”)码头开挖深度深, 施工时须对基坑进行强降水, 增大了港池内外水头差, 将对泥浆护壁压力造成直接

收稿日期: 2024-01-08

作者简介: 宋庆仁(1982—), 男, 高级工程师, 从事港口、海岸及近海工程施工。

影响; 该施工区域地质含盐量高会促使泥皮防水性等发生改变。开展该区域施工条件对泥浆性能指标影响的研究对保证施工安全、施工质量、节约工程投资等具有重要意义。

沉渣厚度是判断地连墙成槽质量及泥浆性能的重要依据, 刘美山等<sup>[1]</sup>从地质条件、地基处理、泥浆等方面分析地连墙缺陷集中分布的原因, 提出泥浆指标和沉渣厚度等应是混凝土浇筑期间控制的重要指标; 周曙春等<sup>[2]</sup>采用沉渣厚度等评价正循环钻进、气举反循环清孔工艺的应用效果; 徐志军等<sup>[3]</sup>、Zhang 等<sup>[4]</sup>提出影响现浇混凝土桩冲击成孔泥浆护壁施工工艺灌注桩质量效果的主要因素为桩孔底部的最终沉渣厚度。泥浆性能对地连墙槽壁稳定性的影响方面, 黄茂松等<sup>[5]</sup>基于平面应变模型模拟地下连续墙槽段泥浆渗透过程, 探究泥浆密度和砂土孔隙对泥皮形成质量和泥浆渗透范围的影响; 张太科等<sup>[6]</sup>研究不同配比下的泥皮类型及泥皮效应对复合锚碇承载性能发挥的影响; 朱其敏等<sup>[7]</sup>在超深异型地下连续墙成槽施工时采用泥浆密度、黏度及含砂率对槽壁稳定性进行控制; 杨武厂等<sup>[8]</sup>基于工程实践得到新型复合钠基膨润土泥浆具有固相含量低、化学稳定性和挟砂能力强的特点, 可有效提高泥浆的护壁能力; 路乾等<sup>[9]</sup>基于土体相关联流动法则及塑性极限破坏理论结合极限平衡分析法, 得出槽壁整体失稳的最小泥浆密度及安全系数计算方法; 崔根群等<sup>[10]</sup>建立地连墙成槽施工时槽壁土体整体稳定性和局部稳定性力学模型, 推导出保证槽壁稳定的成槽施工泥浆密度临界值计算公式。盐浓度对于泥浆性能的影响方面, 周千森等<sup>[11]</sup>通过测试盐入侵前后泥浆的黏度、滤失量、抗渗性等指标对高含盐地层泥浆性能进行研究; 王福芝等<sup>[12]</sup>通过正交试验研究泥浆中各组分对泥浆性能的影响, 得出抗盐润滑泥浆配方并成功应用于大直径长距离顶管施工; 杨振兴等<sup>[13]</sup>采用泥膜形成试验平台进行改性海水泥浆地层渗透试验, 得到不同添加剂对于海水泥浆性质的改变; 刘来仓等<sup>[14]</sup>分析不同掺量羧甲基纤维素钠(CMC)对海水泥浆性质

及成膜效果的影响, 得到 CMC 掺量达到 0.16% 时, 可以保证泥浆短期稳定性并形成致密泥膜; 陈思晓等<sup>[15]</sup>采用正交试验对海水泥浆的工程特性进行研究, 并为工程制定了合适的泥浆配比; 杨振兴等<sup>[16]</sup>基于试验发现海水离子对泥浆的黏度和胶体率的影响巨大; 孙金鑫等<sup>[17]</sup>通过测试不同盐浓度下泥浆的泌水率等参数变化, 并根据胶体絮凝机理得出不同阳离子对泥水盾构泥浆稳定性的影响。

纵观上述成果, 尽管沉渣厚度、泥浆性能指标及盐浓度对泥浆性能的影响方面都有一定的研究, 但分析三者内在联系的研究还尚不充分, 高盐条件下的地连墙泥浆性能及其对成槽质量的影响也较为缺乏。本文依托某临红海区域地连墙码头工程, 采用正交试验系统分析泥浆性能指标与沉渣厚度的关系及确定最佳泥浆配比, 在此基础上探讨盐浓度与泥浆性能指标的相关性, 分析高盐条件下泥浆性能变化的关键因素。研究成果可为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

本文依托某临红海区域地连墙码头工程, 该工程码头港池长 1 350 m、底宽 250 m、顶宽 325 m, 港池开挖深度为 20.5 m, 开挖总工程量约 698 万  $\text{m}^3$ , 地层以粉细砂、中砂及卵石为主, 本工程区域土体含盐量大于 0.3%, 根据 GB 50021—2009《岩土工程勘察规范》<sup>[18]</sup>及 GB/T 50942—2014《盐渍土地区建筑技术规范》<sup>[19]</sup>, 本工程所在地属高盐区, 目前常规挖入式港池深度大部分在 15 m 以内, 临红海地区地层含盐量大都在 0.3% 以上, 如相近地区的阿布基尔集装箱码头工程, 施工区域含盐量为 0.305%, 该工程具有开挖深度大、地层含盐量高的特点。根据施工条件, 沿码头岸线将港池分为 A、B 两个试验区域, A 试验区为临海区, 地层为密实砂卵石地层; B 试验区为陆域侧, 地层土质较软。工程区域土体离子含量见表 1, 工程布置见图 1。地连墙施工采用干开挖方式, 开挖深度较大; 为保证干施工环境须对基坑进行强降

水，造成基坑内外水头差较大、水头压力较高，对泥浆护壁压力提出更高要求，施工工艺见图2。A试验区位于临海侧，其泥浆循环系统运输距离较远；B试验区位于陆侧，其距泥浆循环系统运输距离较近。对于试验A区来说，一方面潮汐作用使得其地下水位升高，内外水头差更大，对泥浆有效护壁压力的要求也随之升高；另一方面海

水在压力水头的作用下容易入侵泥浆，造成泥浆的劣化。由此A、B试验区地质及施工条件的差异对泥浆性能提出了不同的要求，需要分别制定适宜的泥浆配比，两试验区地连墙均由临海侧向陆侧施工且施工方式为跳仓施工，分别选择两试验区最先施工的9副槽段进行试验，槽段布置见图1。

表1 工程区域土体离子含量

区域	含盐量/ %	离子含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )							
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
A区	0.330	1 089	41	45	32	279	8	1 574	208
B区	0.313	1 052	42	39	31	231	11	1544	185

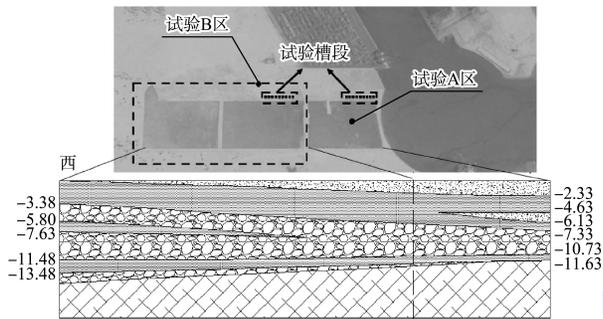


图1 工程布置 (单位: m)

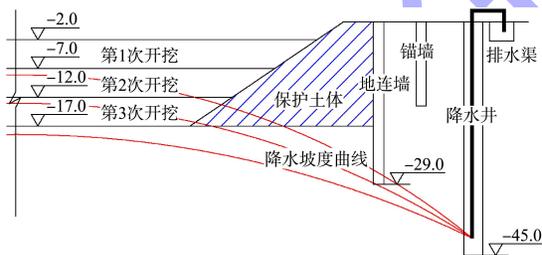


图2 施工工艺 (单位: m)

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

本工程用于护壁的泥浆制备主要材料包括：钠基膨润土、纯碱、聚合氯化铝、水。其中钠基膨润土通常为颗粒状、遇水显著膨胀，主要用于调节泥浆密度；纯碱用于调节泥浆的酸碱性，保证泥浆呈弱碱性，pH值一般为8~9，可防止泥浆分层从而失去护壁效果；聚合氯化铝用于增加钠基膨润土的胶凝功能；水作为泥浆的溶剂，主要发挥载体作用。

### 2.2 试验方法

泥浆用水为3家自来水厂提供的清水，pH值分别为7.0、7.5、8.0，并采用四因素三水平L9(3<sup>4</sup>)的正交试验确定泥浆配合比，见表2、3；在A、B两试验区各选取9副槽段进行测试，槽段号与试验编号对应，为减少其他人为因素的干扰及提高泥浆质量，采用自动拌浆装置对泥浆进行制备，泥浆制备完成后静置24h进行充分膨化后投入使用，依据试验结果分析不同配比下泥浆性能指标与沉渣厚度的关系，根据本工程地质条件，泥浆指标按砂土类型控制，遇黏性土按黏性土控制标准成槽，泥浆性能指标控制标准见表4。

表2 试验因素水平

水平	钠基膨润土/%	纯碱/%	聚合氯化铝/%	水(pH值)
1	8	0.20	0.06	7.0
2	10	0.15	0.08	7.5
3	12	0.10	0.05	8.0

表3 正交试验组合

试验 编号	因素				试验 组合
	钠基膨润土 A	纯碱 B	聚合氯化铝 C	水 D	
1	1	1	1	1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>
2	1	2	2	2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>
3	1	3	3	3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>
4	2	1	2	3	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub>
5	2	2	3	1	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>
6	2	3	1	2	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
7	3	1	3	2	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>
8	3	2	1	3	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>
9	3	3	2	1	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>

表 4 泥浆性能指标控制标准

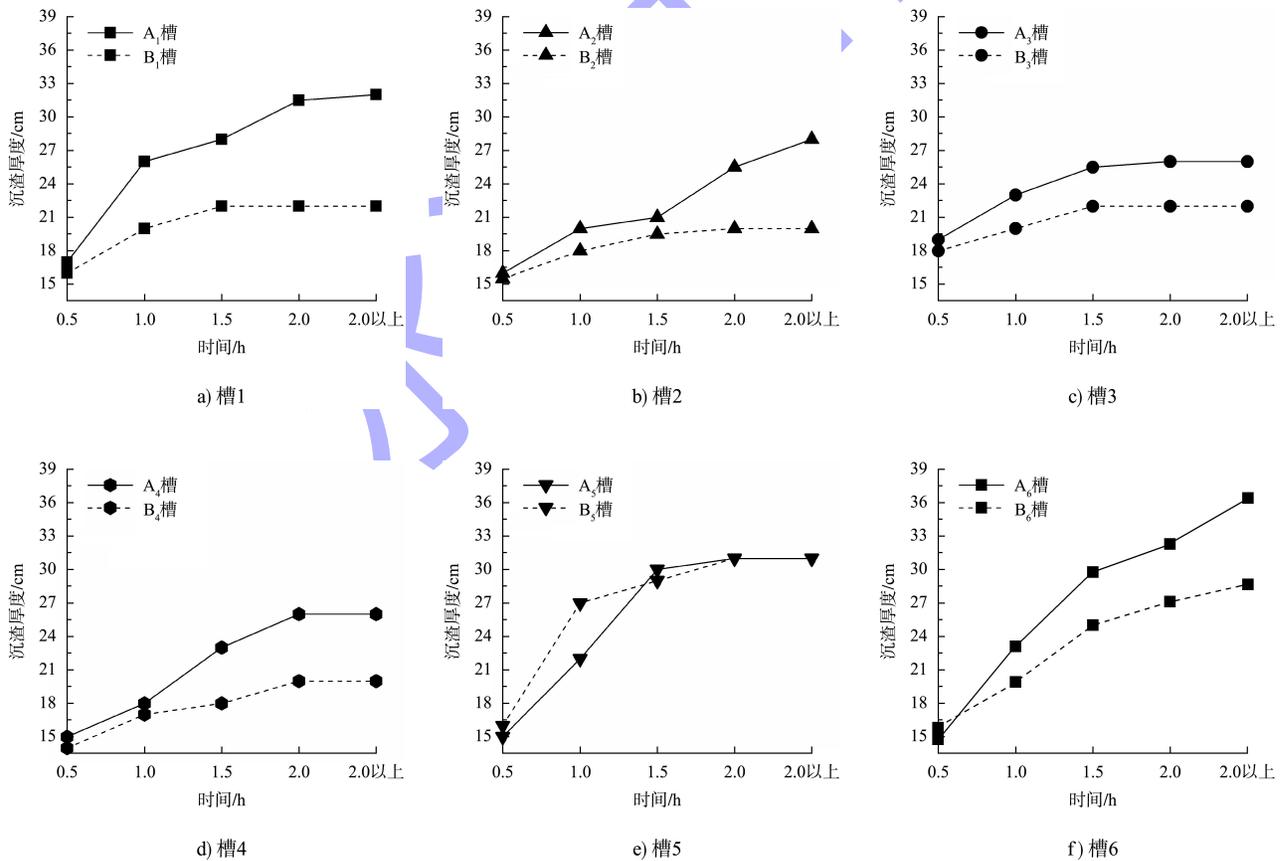
泥浆类型	砂土类型	密度(密度计法)/(g · cm <sup>-3</sup> )	黏度(漏斗计法)/s	含砂率(洗砂瓶法)/%	pH 值(酸度计法)
新制泥浆	砂性土	1.06~1.16	22~35	<6	8~9
	黏性土	1.04~1.11	20~26	<4	8~9
循环泥浆	砂性土	<1.20	<35	<7	>8
	黏性土	<1.16	<25	<5	>8

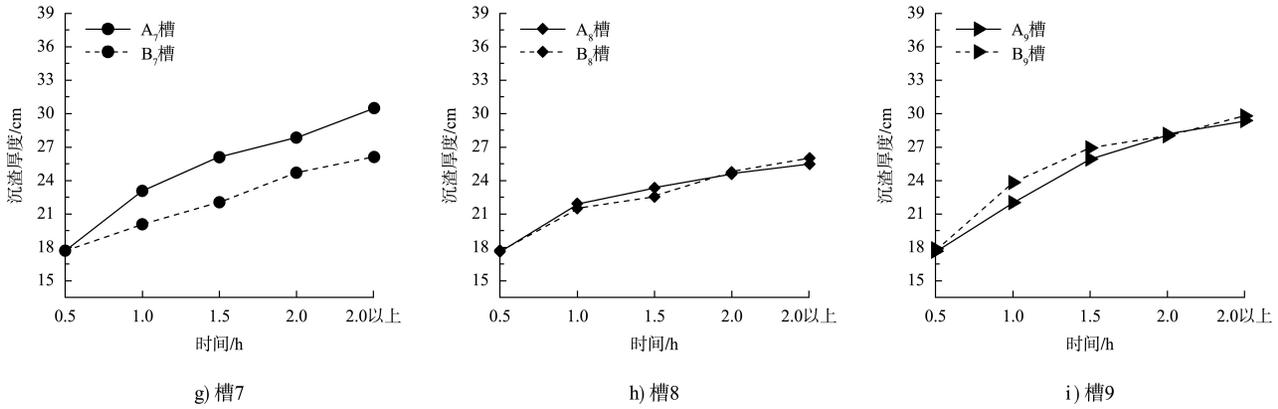
### 3 结果与分析

#### 3.1 泥浆性能指标对沉渣厚度的影响

沉渣厚度与时间的关系见图 3, 分析正交试验各泥浆配合比下沉渣厚度与沉渣时间及沉渣厚度与泥浆性能指标的关系, 结果显示: 1) 相同泥浆配比下, A 试验区沉渣厚度总体大于 B 试验区; 2) A、B 试验区的沉渣厚度随时间增长呈增大趋势, 其中, A 试验区沉渣厚度达到稳定的用时更

长, 沉渣厚度随时间变化的波动幅度也更大, B 试验区沉渣厚度总体在 2 h 可达到稳定。A 试验区临海, 且该试验区为砂卵石地层, 透水性能更好, 含盐量高的海水更易入侵 A 试验区, 对泥浆的抗渗性和黏度造成较大影响; 同时在开挖条件下, A 试验区槽壁内外侧水头差比 B 试验区大, 受到的水头压力更大, 导致 A 试验区泥浆沉渣厚度与沉渣达到稳定的时间均大于 B 试验区。





注：图 a) 为第 1 类正交试验的泥浆配比在 A、B 两个试验区 1 号槽段的应用，以此类推。

图 3 试验槽段沉渣厚度与时间关系

泥浆性能指标与沉渣厚度关系见表 5。可以看出：1) 泥浆密度增大对沉渣厚度的影响主要体现在其会使沉渣稳定的时间变长，沉渣厚度增大；2) 泥浆黏度对沉渣厚度的影响与泥浆密度类似，黏度增大沉渣厚度及达到稳定的时间均增大；3) 地连

墙成槽后泥浆的含砂率是影响沉渣厚度及地连墙成槽质量的关键性因素，含砂率增大则沉渣厚度随之增大；4) pH 值在 8~9 区间内浮动，沉渣厚度与稳定时间并无明显关联性。

表 5 泥浆性能指标与沉渣厚度关系

槽段	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	黏度/s	含砂率/%	pH 值	沉渣厚度/cm				
					0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2 h 以上
A <sub>1</sub>	1.07	19.8	3.8	8.3	17.0	26.0	28.0	31.5	32.0
B <sub>1</sub>	1.07	20.0	3.3	8.2	16.0	20.0	22.0	22.0	22.0
A <sub>2</sub>	1.10	17.5	3.7	8.6	16.0	20.0	21.0	25.5	28.0
B <sub>2</sub>	1.09	18.0	3.5	8.4	15.5	18.0	19.5	20.0	20.2
A <sub>3</sub>	1.08	17.8	3.4	8.2	19.0	23.0	25.5	26.0	26.1
B <sub>3</sub>	1.06	18.2	3.0	8.0	18.0	20.0	22.0	22.0	22.0
A <sub>4</sub>	1.15	20.0	4.5	8.9	15.0	18.0	23.0	26.0	26.0
B <sub>4</sub>	1.13	21.0	4.2	8.6	14.0	17.0	18.0	20.0	20.0
A <sub>5</sub>	1.16	19.3	4.0	8.5	15.0	22.0	30.0	31.0	31.0
B <sub>5</sub>	1.15	19.8	3.8	8.3	16.0	27.0	29.0	31.0	31.0
A <sub>6</sub>	1.16	18.9	4.1	8.4	16.2	24.0	30.3	32.7	36.6
B <sub>6</sub>	1.14	19.2	4.0	8.3	17.2	21.0	25.8	27.8	29.3
A <sub>7</sub>	1.17	22.8	5.6	8.7	18.9	24.0	26.9	28.5	31.0
B <sub>7</sub>	1.15	24.0	5.2	8.2	18.9	21.2	23.0	25.5	26.9
A <sub>8</sub>	1.18	22.9	5.7	8.8	18.8	22.8	24.2	25.5	26.3
B <sub>8</sub>	1.16	23.2	5.5	8.6	18.9	22.5	23.6	25.6	26.9
A <sub>9</sub>	1.19	22.3	6.1	9.0	18.8	23.0	26.7	28.8	29.9
B <sub>9</sub>	1.18	22.5	6.0	8.8	19.0	24.7	27.7	28.7	30.4

### 3.2 盐浓度对泥浆性能指标的影响

根据试验结果得出，A<sub>4</sub> 槽与 B<sub>4</sub> 槽稳定沉渣后的沉渣厚度最小，分别以 A<sub>4</sub> 槽和 B<sub>4</sub> 槽的泥浆配

比作为代表配比，为：钠基膨润土 10%、纯碱掺量 0.2%、聚合氯化铝掺量 0.08%、pH 值为 8 的清水 89.72%，在此配比条件下，通过调整氯化钠

含量, 探讨高盐条件下泥浆性能的影响因素。盐浓度与泥浆性能指标的相关性见图 4。可以看出: 1) 泥浆密度与盐浓度表现出显著正相关性, 由于氯化钠浓度增加, 会增加泥浆的离子浓度, 泥浆中的水分子与离子产生更多的相互作用, 从而降低了水分子的自由程度和活性, 导致泥浆失水量上升, 进而造成泥浆密度增大; 2) 泥浆黏度与盐浓度呈现出较强负相关性, 氯化钠的存在会破坏泥浆中高分子链间形成网状结构, 导致泥浆黏度的降低, 伴随泥浆黏度降低常会导致泥浆形成的泥浆膜厚度小、质量差, 无法有效阻止地下水的渗透, 且泥浆黏度低时, 悬浮负荷能力差, 易导致固相颗粒的沉淀和泥浆分层; 3) 含砂率与盐浓度的相关性较弱, 这是因为泥浆含砂量总体较小, 随盐浓度变化其整体波动较小; 4) 泥浆 pH 值与盐浓度呈现一定的负相关性, 由于氯化钠在水中会电离分解成钠离子和氯离子, 钠离子和氯离子会与水分子发生相互作用, 形成水合离子, 在这个过程中, 一些氢离子会从水中脱离, 与氯离子形成盐酸, 表现为泥浆 pH 值降低; 若 pH 值过低, 泥浆中的钙离子、铁离子等会发生沉淀, 泥浆稳定性将会变差, 因此泥浆在拌制时和循环使用过程中, 均应进行监测, 控制其 pH 值。

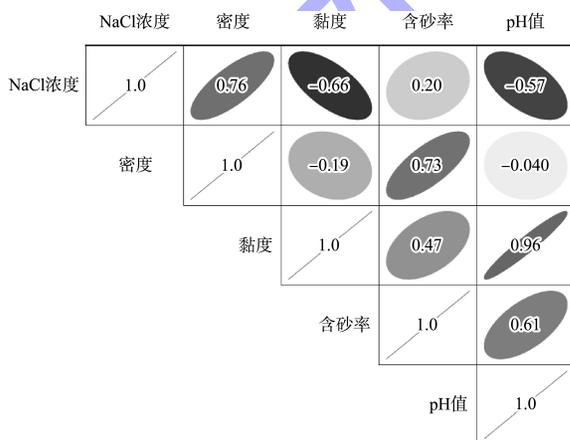


图 4 盐浓度与泥浆性能指标的相关性

### 3.3 材料对比对泥浆性能指标的影响分析

根据试验材料性质及试验结果, 对材料配比如何影响泥浆性能指标进行分析, 可得出以下结果。

1) 泥浆密度随钠基膨润土及聚合氯化铝含量的增加而增大, 主要原因为: 随钠基膨润土含量增加, 泥浆中固相颗粒的含量增大, 密度随之增大; 聚合氯化铝在水中溶解后, 会释放出带电的铝离子和氯离子, 这些离子会与水分子发生相互作用形成一种凝胶物质, 从而增加泥浆的密度。

2) 泥浆黏度随纯碱及钠基膨润土含量升高而增大, 主要原因为: 加入纯碱后, 在离子交换作用下, 低价离子  $\text{Na}^+$  将海水中的  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等高价离子交换出, 从而导致黏土颗粒分散, 颗粒被水包围, 形成了外包水化膜的胶体颗粒, 表现为泥浆黏度增加; 钠基膨润土含量增加, 单位体积泥浆中土量的增加, 形成空间网架结构的作用增强, 单位体积泥浆中结构链环数目增多, 导致泥浆流动阻力增大, 泥浆的黏度也增大<sup>[20]</sup>。

3) 泥浆含砂率随钠基膨润土含量增大而升高, 随聚合氯化铝含量增大而降低, 主要原因为: 伴随钠基膨润土含量的增加, 泥浆的黏度和密度也会相应增加, 这会导致固体颗粒在泥浆中的悬浮能力减弱, 从而使含砂率变高, 此外, 钠基膨润土也会增加泥浆中固体颗粒的黏附性, 导致砂等颗粒容易附着在管壁和钻头上, 从而增加泥浆含砂率; 聚合氯化铝是一种高效的絮凝剂, 能够有效地将泥浆中的悬浮颗粒聚集成较大的团块, 并沉降到底部, 因此添加聚合氯化铝能够明显降低泥浆的含砂率。

4) 泥浆 pH 值随纯碱及钠基膨润土含量增大而升高, 随聚合氯化铝含量增大而降低, 主要原因为: 纯碱含量增大, 在水中电离水解产生的钠离子和碳酸根离子增多, 泥浆的 pH 值增大; 钠基膨润土是碱性物质, 掺入泥浆中会使 pH 值升高<sup>[21]</sup>; 聚合氯化铝分子中含有大量氯离子, 与水中的氢离子反应形成盐酸, 导致泥浆 pH 值降低。

## 4 结论

1) 相同配比的泥浆在盐浓度较高的区域泥浆沉渣厚度更大, 沉渣达到稳定的时间也更长; 分析地连墙成槽后的泥浆性能指标及沉渣厚度的关

系得出, 泥浆密度、黏度及含砂率增大, 最终沉渣厚度也增大, 其中泥浆密度及黏度增大会延长沉渣达到稳定的时间。

2) 盐浓度对泥浆性能的影响表现在: 泥浆密度随盐浓度增大而增大, 泥浆黏度及 pH 值随盐浓度增大而降低, 盐浓度对含砂率影响较小。

3) 可通过调节泥浆配合材料比例控制泥浆性能以达到施工要求, 其中钠基膨润土会增大泥浆密度、黏度、含砂率及 pH 值, 纯碱会导致泥浆黏度和 pH 值增加, 聚合氯化铝可增加泥浆密度并降低泥浆含砂率及 pH 值; 临红海地区高盐环境下泥浆材料配合比推荐值为钠基膨润土 10%、纯碱掺量 0.2%、聚合氯化铝 0.08%、pH 值为 8 的清水 89.72%。

#### 参考文献:

- [1] 刘美山. 地连墙质量优化措施[J]. 水运工程, 2020(8): 213-216.
- [2] 周曙春, 杜坤乾, 谢军. 正循环钻进、气举反循环清孔施工工艺施工应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 166-168.
- [3] 徐志军, 李志谦, 原方, 等. 考虑桩底沉渣的基桩竖向承载力目标可靠度[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(3): 189-195.
- [4] ZHANG L M, WONG E Y. Centrifuge modeling of large-diameter bored pile groups with defects [J]. Journal of geotechnical and geo-environmental engineering, 2007, 133(9): 1091-1101.
- [5] 黄茂松, 宁剑新, 俞剑, 等. 砂土地层中泥浆护壁地连墙成槽稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1767-1777.
- [6] 张太科, 石海洋, 张鑫敏, 等. 泥皮对地连墙复合式锚碇基础承载性能影响的研究[J]. 公路, 2022, 67(3): 99-107.
- [7] 朱其敏, 朱俊涛, 夏欢, 等. 超深异型地下连续墙成槽施工关键技术研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 107-114.
- [8] 杨武厂. 天津地区超深地下连续墙成槽关键技术[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 291-295, 301.
- [9] 路乾, 胡长明, 王晓华, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁整体稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 864-871.
- [10] 崔根群, 刘瑶. 基于槽壁稳定性的地下连续墙成槽施工泥浆重度计算方法[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 178-183.
- [11] 周千森, 张涛, 肖岸峰, 等. 含盐地层顶管润滑泥浆抗盐及抗渗性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(4): 658-663.
- [12] 王福芝, 曾聪, 孔耀祖. 大直径长距离顶管润滑泥浆方案研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(2): 49-52.
- [13] 杨振兴, 陈健, 孙振川, 等. 泥水平衡盾构用海水水泥浆的改性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 501-508.
- [14] 刘来仓, 夏鹏举, 吕焕杰, 等. CMC 改性海水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.
- [15] 陈思晓, 冯忠居, 何静斌. 海洋环境基桩海水水泥浆工程特性试验研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(6): 70-74.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 建设综合勘察设计院. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001(2009年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [19] 合肥工业大学, 中建三局第三建筑工程有限责任公司. 盐渍土地区建筑技术规范: GB/T 50942—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [20] 杨振兴, 陈健, 孙振川, 等. 泥水平衡盾构用海水水泥浆的改性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 501-508.
- [21] 周新淘, 曾序. 深中通道伶仃洋大桥大直径钻孔灌注桩海水水泥浆配制研究与应用[J]. 施工技术, 2019, 48(S1): 1059-1063.