

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0106

超深地连墙护壁泥浆的聚合物改性试验研究

王 艳, 丁永浩, 黄添之

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为解决地下连续墙随开挖深度增加过程中引起的槽壁失稳和槽底沉渣清理困难等问题, 采用羧甲基纤维素钠、黄原胶、硅丙乳液、海藻酸钠和部分水解聚丙烯酰胺 5 种聚合物对膨润土泥浆进行改性研究, 并通过砂质地层渗透试验和携渣循环试验评估其工程特性。结果表明, 合理配比的聚合物改性能有效控制泥浆的黏度, 降低滤失量, 并在护壁渗透过程中快速形成薄而致密的泥皮。在砂质地层中, 聚合物改性膨润土泥浆的滤失量相较于未改性泥浆有着显著的降低, 滤失量下降 20.5%~35.5%, 改性后的泥浆滤失液 Zeta 电位值上升 12.1%~27.6%, 泥浆体系稳定性随聚合物改性有了明显改善。同时, 改性后泥浆在携带槽底沉渣后的二次循环使用中仍能保持表观工程性质的稳定; 聚合物可增大膨润土颗粒表面积, 形成共聚物或水凝胶, 提高膨润土的吸水性和膨胀性, 进而提高改性膨润土泥浆的护壁性能。

关键词: 地下连续墙; 聚合物改性; 护壁泥浆; 泥浆渗透; 携渣循环

中图分类号: TU442; TU93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5132 (2025) 04-0001-10

地下连续墙具有刚度大、整体性好、防渗性强等特性, 已成为基坑工程中一种重要的施工手段, 被广泛应用于高层与超高层建筑、轨道交通建设的防水与围护结构^[1-3]。在地下连续墙建造过程中, 成槽施工是关键环节, 其耗时往往占据施工工期的一半以上^[4]。成槽过程中, 槽段开挖常采用泥浆护壁技术^[5]。该技术通过泥浆在地层中的渗透, 在槽壁上形成低渗透区, 利用泥浆静液压的面力形式来平衡槽壁前方的水土压力, 从而保证槽壁的稳定, 避免了过大的水平位移甚至塌孔。随着开挖槽深的增加, 槽壁会承受过大的侧向土压力, 在粉砂、细砂等地层中易发生失稳和塌孔。普通泥浆在此工况下可能会大量滤失, 无法形成薄而致密的泥皮, 从而导致槽壁的局部变形和坍塌^[6]。同时, 超深地连墙的槽底沉渣不易清除, 普通泥浆会因携渣污染导致性质迅速劣化, 使地下连续墙槽壁稳定性受到影响, 甚至产生塌孔。因此, 对膨润土泥浆进行聚合物改性, 使其在粉细砂地层中能够快速形成薄而致密的泥皮, 避免泥浆大量滤失, 并使其具备一定的

携渣循环性能, 从而控制槽壁的稳定^[7], 确保超深地连墙的施工安全和工程质量。

学者们对膨润土泥浆改性开展了多方面的研究。Zhang 等^[8]采用植物胶、磺酸盐共聚物和聚丙烯酸钾等物质对膨润土泥浆进行改良, 改良后的泥浆呈现出均匀性好、滤失量小、回用性能良好等特点。Ouaer 等^[9]研究发现, 羟乙基纤维素加入膨润土泥浆后, 其屈服应力、表观黏度和弹性模量等表征性质有了明显提高, 泥浆流变性得到优化。雷华阳等^[10]通过渗透试验得出琼脂、瓜尔胶能够使泥浆从未成膜转变为渗透带型泥膜, 同时还能降低泥浆在成膜前期的滤失量和渗透系数。此外在超深地下连续墙的施工过程中, 泥浆可能携带的岩渣和砂土对实际工程性能产生的影响常常被忽略, 并且泥浆循环使用的效果研究也相对较少。

为解决上述问题, 本文以加入无水碳酸钠的钠基膨润土 (NaB) 作为研究基础, 选用羧甲基纤维素钠 (CMC)、黄原胶 (XG)、硅丙乳液 (CAS)、海藻酸钠 (SA)、部分水解聚丙烯酰胺 (PHP) 5

收稿日期: 2025-01-06

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目 (Z25E080010)

第一作者: 王 艳, 博士/教授, 主要研究方向为基础工程、环境岩土工程。E-mail: wangyan@nbu.edu.cn

种材料作为聚合物添加剂,研究它们对膨润土泥浆黏度、API 滤失量和泥皮厚度的表观性质影响,并在此基础上通过砂质地层渗透成膜试验和泥浆携渣循环试验来进一步研究改性膨润土泥浆的成膜特性和携渣回用能力。此外,结合扫描电子显微镜 (SEM) 进行泥浆的微观机理探讨,为超深地连墙成槽护壁泥浆的聚合物改性提供理论参考依据。

1 试验材料及方法

1.1 聚合物改性泥浆表观性质

制备的泥浆成分包括钠基膨润土、纯碱、水、聚合物,每组泥浆总质量 1 000 g,各成分添加量以占泥浆总质量百分比表示。将添加质量分数 8.0% 钠基膨润土和质量分数 0.3% 纯碱设置为基浆,再设置不添加聚合物的泥浆作为对照组。鉴于纯碱可提高膨润土的分散性,因此可通过其与膨润土发生水化作用来提高泥浆的黏度。

复配膨润土泥浆的试验具体分组见表 1~3。在泥浆中分别单独添加羧甲基纤维素钠、黄原胶、硅丙乳液、海藻酸钠和部分水解聚丙烯酰胺 5 种聚合物,并改变其添加量,研究单一聚合物改性膨润土泥浆的表观性质。根据单一聚合物改性膨润土泥浆试验结果,选取 CMC 与 XG、SA、PHP 进行复配,

表 1 CMC-XG 复配泥浆试验分组 (质量分数)

单位: %			
组别	CMC	CAS	XG
CMC1-XG1	0.1	0	0.05
	0.1	0.5	0.05
	0.1	1	0.05
	0.1	2	0.05
CMC2-XG1	0.3	0	0.05
	0.3	0.5	0.05
	0.3	1	0.05
	0.3	2	0.05
CMC1-XG2	0.1	0	0.1
	0.1	0.5	0.1
	0.1	1	0.1
	0.1	2	0.1
CMC2-XG2	0.3	0	0.1
	0.3	0.5	0.1
	0.3	1	0.1
	0.3	2	0.1

并将 CAS 作为复配试验中的因变量对膨润土泥浆进行进一步改性,从而得到最优配比的改性膨润土泥浆。

表 2 CMC-SA 复配泥浆试验分组 (质量分数)

单位: %			
组别	CMC	CAS	SA
CMC1-SA1	0.1	0	0.1
	0.1	0.5	0.1
	0.1	1	0.1
	0.1	2	0.1
CMC2-SA1	0.3	0	0.1
	0.3	0.5	0.1
	0.3	1	0.1
	0.3	2	0.1
CMC1-SA2	0.1	0	0.2
	0.1	0.5	0.2
	0.1	1	0.2
	0.1	2	0.2

表 3 CMC-PHP 复配泥浆试验分组 (质量分数)

单位: %			
组别	CMC	CAS	PHP
CMC1-PHP1	0.1	0	0.01
	0.1	0.5	0.01
	0.1	1	0.01
	0.1	2	0.01
CMC2-PHP1	0.3	0	0.01
	0.3	0.5	0.01
	0.3	1	0.01
	0.3	2	0.01
CMC1-PHP2	0.1	0	0.02
	0.1	0.5	0.02
	0.1	1	0.02
	0.1	2	0.02

配置泥浆后,在 20 ℃ 室温条件下,搅拌机以 1 000 r/min 速度搅拌 30 min,静置 24 h 后,对泥浆相关性质进行测定^[11],探究聚合物添加量对膨润土泥浆黏度、API 滤失量及泥皮厚度的影响。膨润土泥浆黏度测量采用马氏 500/700 漏斗黏度计,根据相关研究和实际工程要求^[12],预期取值范围为 25~45 s。API 滤失量采用中压滤失仪进行测量,在 0.69 MPa 压力下记录 30 min 后通过滤纸渗出的液体量,通常滤失量不宜超过 25 mL^[13]。泥皮厚度同样采用

中压滤失仪来测定,通过测量滤纸上滤饼厚度来模拟护壁泥浆的泥皮厚度,泥皮厚度一般需要控制在2 mm 以内^[13]。

1.2 聚合物改性泥浆地层渗透试验

渗透试验装置由空气压缩机、调压装置以及模拟地层三部分组成,相关试验装置如图1所示。调压装置连接空气压缩机和渗透装置,通过调节左侧旋钮可有效控制输入渗透装置的压力大小,实现单一加压过程的压力恒定。

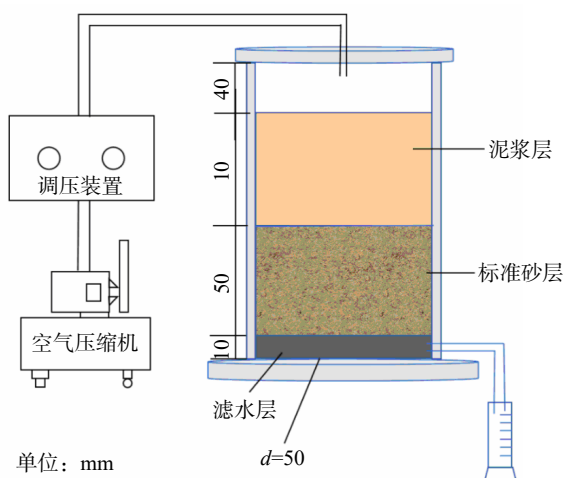


图1 地层泥浆渗透试验装置图

具体试验步骤如下:(1)固定装置,放置透水石作为滤水层;(2)采用干密度为 1.4 g/cm^3 的标准砂来模拟砂质地层,使用击实锤敲击30次进行击实;(3)向砂层中加水进行饱和,再加入泥浆;(4)密封法兰盘,连接空气压缩机和调压装置开始试验。实际测试装置如图2所示。



图2 实际测试装置

渗透试验过程采用逐级加压方式,总共加载4级压力,分别为50、100、150、200 kPa^[14]。为了让泥浆渗透可以在每级加载的压力作用下充分进行,并在最初加压形成泥皮后减少加压时间,各级压力作用时长分别为5、5、4、4 min。同时,每隔10 s

记录失水量的变化,直到4级压力加载完成^[15]。

在试验完成后,对渗透产生的滤失液进行Zeta电位分析,进一步评价泥浆中的胶体稳定性。Zeta电位是浆料胶体颗粒上净电荷的间接量度,能反映颗粒彼此排斥或吸引能力,是胶体稳定性的重要指标。Zeta电位绝对值越大,表示浆料越稳定。一般认为,当Zeta电位绝对值大于30 mV时,浆料能形成稳定胶体结构,可作为均匀的分散体^[16-17]。

1.3 泥浆携渣能力及循环回用效果

在超深地下连续墙的成槽过程中,未能及时清除的沉渣可能会与泥浆混合,对泥浆密度和黏度等性质造成影响,从而降低泥浆的护壁效果,增加槽壁坍塌风险。此时,配置携渣能力较强、受沉渣影响较小的泥浆便显得十分重要。此外在泥浆循环过程中,部分泥浆会因循环效率不足和黏附损失等方式仍留在施工槽段中,此时性质有所劣化的泥浆与进入循环的新泥浆和沉渣混合可能会进一步影响护壁泥浆的性质。因此,须对改性泥浆的携渣能力和循环回用效果进行试验,研究其相关性质。

试验选用宁波地区粉砂层地连墙开挖产生的废弃砂土模拟槽底沉渣。试验方法如下:在4种聚合物改性泥浆和对照组泥浆1 000 g中加入模拟槽底沉渣50 g,在20℃室温条件下,搅拌机以1 000 r/min速度搅拌10 min,静置10 min。对泥浆黏度、API滤失量、含砂率以及相对密度进行测试与研究。新配制的1 000 g泥浆静置1 d后,加入模拟钻屑50 g,450 r/min搅拌1 min,静置5 min。然后依次同样测试上述4种数据。重复上述步骤3次,上述重复试验次数即为循环次数^[8]。

2 试验结果与分析

2.1 单一聚合物对泥浆表观性质的影响

从图3(a)可知,未改性膨润土泥浆黏度为34.6 s,基本能满足工程要求。在用PHP、XG、SA改性膨润土泥浆过程中,随着聚合物添加量的增加,泥浆黏度也同步增加,并在此过程中逐渐超出工程的适用范围。主要原因是SA在水中形成凝胶状结构,增加了泥浆黏度,并且其分子链上的羧基与泥浆颗粒表面的阳离子发生作用,进一步增强了泥浆稳定性;XG分子链在水中形成三维网络结构,显著提高了泥浆黏度;PHP则通过其长链分子吸附

在泥浆颗粒表面,形成空间位阻效应,从而增加了泥浆黏度。因此,为确保改性后的膨润土泥浆不会因黏度过大而影响泵送,须严格控制聚合物添加量,如 PHP 控制在 0.02%以内, XG 控制在 0.1%以内, SA 控制在 0.2%以内。相对而言,不同添加量的 CMC 和 CAS 加入对泥浆黏度的影响类似,均能使泥浆的黏度相比未改性泥浆有所降低,且同时在工程要求的合理范围内^[12]。

从图 3 (b) 可知, 5 种聚合物的加入均能不同程度地降低膨润土泥浆的 API 滤失量。相比对照组, PHP 和 CAS 改性后的泥浆滤失量下降明显。相对而言, CMC、XG、SA 对泥浆滤失量的改性效果更好,随着添加量增加,滤失量迅速下降,能够将泥浆滤失量控制在 25 mL,甚至 20 mL 以内。原因主要是 CMC 分子链上的羧基与泥浆颗粒表面的阳离子发生作用,促使滤饼结构更加致密; XG 通过其三维网络结构在泥浆中形成一层高黏度的滤饼,在提高泥浆黏度的同时也减少了滤液的渗透; SA 在泥浆中形成凝胶状滤饼,减少了滤液的渗透,并且其分子链上的羧基与泥浆颗粒表面的阳离子发生作用,从而进一步增强了滤饼的致密性。

从图 3 (c) 可知, 泥皮厚度随着聚合物的改性有着不同程度的降低。5 种聚合物中,当 PHP 添加量为 0.05%时,泥浆滤失后形成的泥皮达到最薄(2.5 mm)。其余 4 种聚合物改性后泥浆的泥皮厚度也均随着添加量的增加而变小。其中, CMC、XG、SA 的改性对泥皮厚度的影响较大,能够使形成泥皮的厚度明显降低;并且以添加量 0.5% CMC 的泥皮厚度最薄,达到 0.8 mm 左右。

综上所述, XG、PHP、SA 的适量添加能够提高膨润土泥浆黏度,并一定程度降低 API 滤失量和形成的泥皮厚度; CMC 主要通过降低 API 滤失量和泥皮厚度来影响膨润土泥浆的性质,但同时单独添加 CMC 所配置的膨润土泥浆的黏度相对较小; CAS 对膨润土泥浆的性能影响在黏度、API 滤失量和泥皮厚度三方面均有所体现,但 CAS 影响下的膨润土泥浆的泥皮厚度无法满足要求,需要通过复配试验进一步探究其应用可行性。因此,设置 CMC 与 XG、CMC 与 PHP、CMC 与 SA 复配方式作为复配试验的 3 个不同分组,并将 CAS 作为复配试验中的因变量进行进一步的研究。

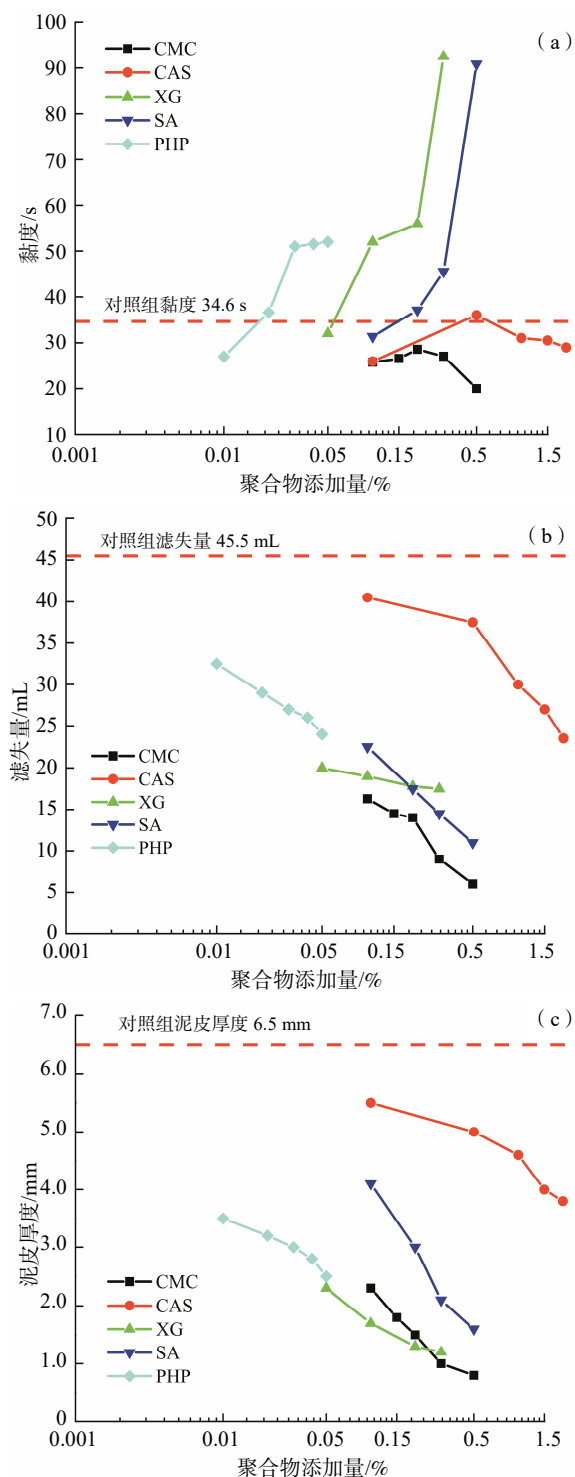


图3 膨润土泥浆表现性质随单一聚合物添加量的变化

2.2 复配聚合物对泥浆表现性质的影响

复配的试验方法与单因素试验类似,采用黏度、API 滤失量、泥皮厚度 3 个指标对 3 个复配组不同配合比的膨润土泥浆进行筛选。复配膨润土泥浆分组具体筛选结果见表 4。

表 4 复配试验筛选结果

组别	XG/%	PHP/%	CMC/%	SA/%	CAS/%	黏度/s	API 滤失量/mL	泥皮厚度/mm
泥浆 1	0.05	0	0.1	0	1	26.5	13.5	2.0
泥浆 2	0.05	0	0.1	0	2	25.0	11.0	1.5
泥浆 3	0	0.02	0.1	0	0	34.0	13.5	1.5
泥浆 4	0	0	0.1	0.1	1	34.0	11.0	2.1

如图 4 (a) 所示, 相比对照组, 泥浆改性效果明显, 膨润土泥浆的黏度在复配后都有了明显增大。然而部分组别聚合物对黏度的增强效果叠加明显, 过大黏度不适合用于地下连续墙护壁。CMC1-XG1、CMC1-XG2、CMC1-SA1、CMC2-XG1 组的改性效果较好, 复配泥浆随着 CAS 不同添加量的加入, 基本符合 25~45 s 的黏度预期取值范围。从图 4 (b) 中可知, 经过复配改性后的膨润土泥浆滤失量基本控制在 15 mL 以内, 并且经过复配后的膨润土泥浆滤失量改性效果明显, 均能够满足实际工程对 API 滤失量的要求。如图 4 (c) 所示, 随着硅丙乳液的添加量增加, 除 CMC1-XG2 组泥皮厚度相对较大以外 (最薄处达到 4.9 mm), 多数组别的改性膨润土泥浆泥皮厚度均大致能够控制在 2 mm 以内, 各组泥皮厚度均能满足相关研究和实际工程的需求^[12]。此外, CMC1-XG1 组在 2.0% 硅丙乳液添加量和 CMC1-SA1 组在 0.5% 硅丙乳液添加量时, 泥皮厚度也会过厚, 影响了成槽质量。综合上述结果可知, 对不同组别中具有较好表现性质的改性泥浆进行筛选。由表 4 同样可见, 这些改性泥浆能够在大部分普通地下连续墙的成槽过程中起到护壁作用。

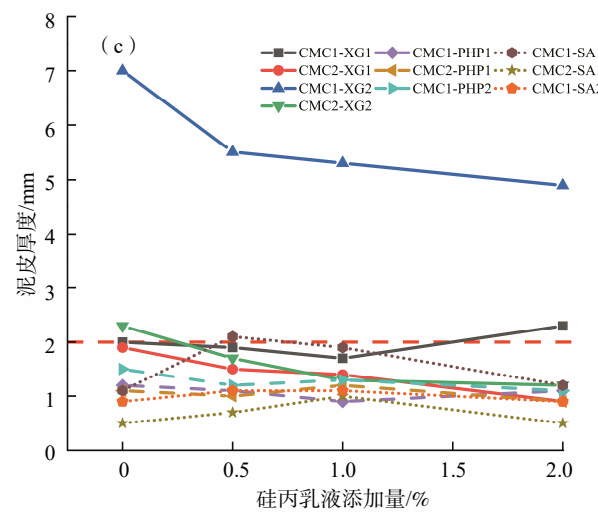
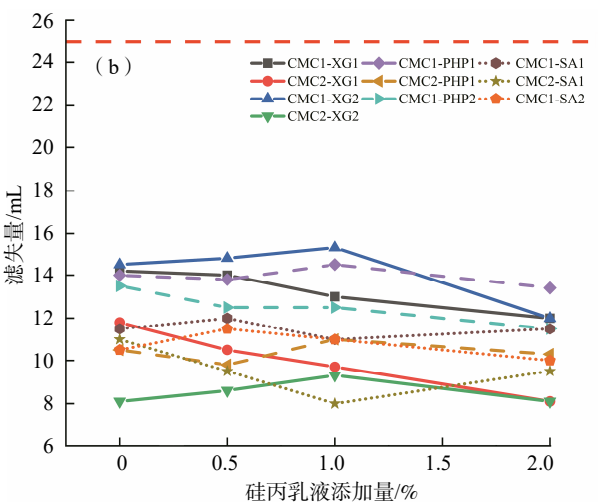
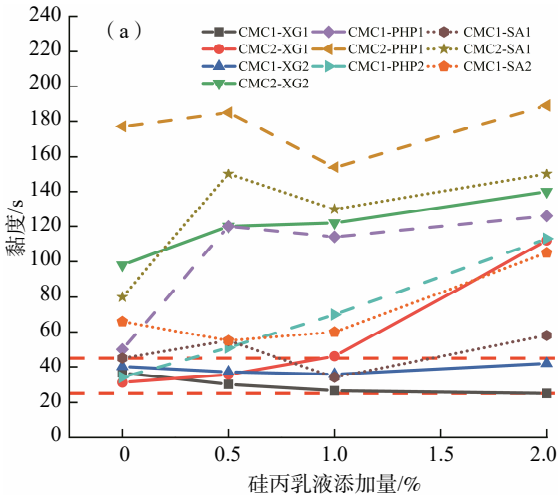


图 4 膨润土泥浆表现性质随复配聚合物质量添加量变化

然而, 须考虑到超深地下连续墙存在砂质地层泥皮形成受限和槽底沉渣不易清除等问题, 因此, 将针对这 4 组泥浆进行砂质地层泥浆成膜试验和泥浆携渣循环试验, 从而进一步明确改性膨润土泥浆在超深地连墙工程中的适用性。

2.3 改性膨润土泥浆在地层中的渗透特性

泥浆渗透试验的结果如图 5 所示。从图中可以明显看出, 对照组泥浆在加压后失水量迅速增加,

且随着加载压力的增大, 泥浆流失速度进一步增加。当对照组泥浆的整个加压过程结束后, 虽然形成了泥皮, 但是厚度较厚, 且在不断加压的过程中均未呈现出渗透量变化较低的情况, 泥皮抗滤失护壁性能较差。由此可见试验中未改性泥浆性质不稳定, 容易在地层中大量滤失, 护壁效果很差。

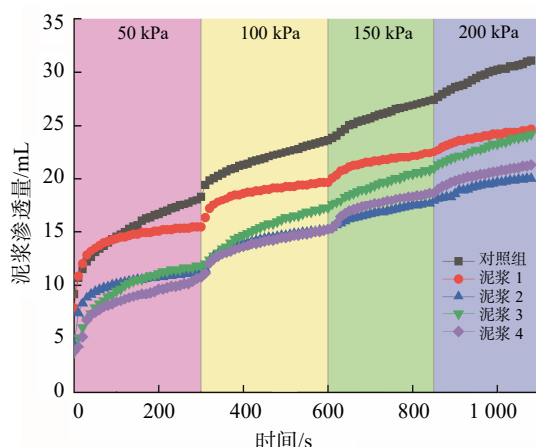


图5 砂质地层泥浆渗透试验结果

此外从图5可见, 当50 kPa压力加载结束后, 4组改性泥浆相比对照组泥浆渗透量均有明显下降。同时, 各组改性泥浆在200 s之后渗透量逐渐趋于稳定, 说明致密稳定且不透水的泥皮已经形成。在后续3个加压阶段中, 泥浆渗透量都会因施加压力的增加而有明显增长, 随后趋于稳定, 意味着加压会突然破坏原本的泥皮抗渗体系, 而后又重新在更大压力体系下形成新的泥皮抗渗体系。在整个渗透过程结束后, 相对于未经过改性的对照组泥浆, 4组改性膨润土泥浆滤失量分别下降了20.5%、35.5%、22.0%、31.4%。相比之下, 泥浆2(基浆+0.05%XG+0.1%CMC+2%CAS)滤失量相对更低, 同时泥皮形成速度更快, 有着更好的抗滤失性和护壁性能。

试验后的泥皮试样如图6所示, 结合Min等^[18]的研究可以看出, 在试验中形成的泥皮均属于第二类泥皮, 即泥浆-渗透带型泥皮, 泥浆中的一些细颗粒渗入土壤中, 并且从图中可以识别出细颗粒的渗透带, 但同时一些粗颗粒也堵塞在土壤表面, 形成了一层薄薄的泥皮。

Zeta电位是表示胶体稳定性的重要指标, Zeta电位绝对值增大时, 颗粒间静电排斥力得到增强, 有助于防止颗粒聚集和沉降, 从而提高泥浆稳定



图6 泥浆2的泥皮形态

性。高Zeta电位有利于分散颗粒, 减少颗粒间范德瓦耳斯力, 降低泥浆屈服应力, 从而降低泥浆的絮凝倾向, 使其在静止状态下更稳定, 在剪切作用下更易流动, 从而在保证泥浆稳定性的同时, 满足施工中流动性和泵送性要求。因此, Zeta电位绝对值越大, 浆料越稳定。一般认为, 当Zeta电位绝对值大于30 mV时, 能形成稳定胶体结构^[16-17]。

为进一步探究几种改性泥浆的胶态分散稳定性, 将针对经过泥浆渗透试验后的滤失液进行Zeta电位分析, 评价泥浆中胶体的稳定性。Zeta电位试验结果如图7所示。从图中可见, 泥浆在改性前, Zeta电位在-22.1 mV处浮动, 体系稳定性较差, 膨润土泥浆体系较为分散, 容易发生凝结或凝聚, 不利于形成均匀稳定的泥皮。经改性后的4组泥浆Zeta电位绝对值分别上升了18.4%、21.2%、12.1%、27.6%。泥浆2和泥浆4总体提升幅度最大, 主要是CAS与CMC的共同作用使颗粒的分散性提高, 降低了泥浆黏度, 提高了流动性, 但同时XG、SA

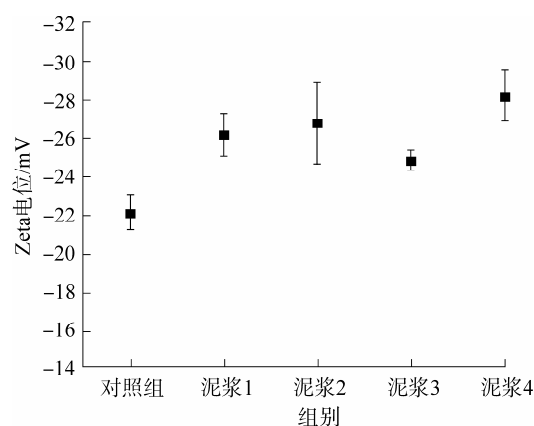


图7 泥浆滤失液Zeta电位试验结果

自身的增稠作用抵消了 Zeta 电位变化,致使黏度降低。因此,改性后的膨润土颗粒间排斥力增大,泥浆体系稳定性因聚合物的改性有了明显提升,泥浆黏聚性也因此提高。Zeta 电位的变化规律在一定程度上反映了 CMC、CAS、SA 等聚合物添加剂对泥浆胶体的稳定作用。

2.4 改性泥浆携渣及循环回用效果

从图 8(a)中可以看出,随着循环次数的增加,各组泥浆的黏度均有所上升,未经过改性的膨润土泥浆仅 1 次循环后便因黏度过大而无法满护壁泥浆的需求。循环后的泥浆 1 和泥浆 2 黏度上升幅度较小,在 2 次循环后仍能保持黏度的稳定,说明在循环过程中保持了较好稳定性。泥浆 3 和泥浆 4 在经过 2 次循环后黏度增长较快,逐渐无法保持稳定的护壁性能。如图 8(b)所示,各组泥浆的滤失量在循环过程中均有所下降。其中,对照组泥浆下降幅度最大,主要原因是槽底沉渣的加入提高了泥浆中的固相含量,当固相颗粒中小颗粒填充于大颗粒时,泥饼中孔隙变小,从而导致对照组泥浆的滤失量急剧减小;而改性后的泥浆由于固相颗

粒充足,受到槽底沉渣加入对固相颗粒的影响较小,因此滤失量变化较小。如图 8(c)所示,各组泥浆在携渣循环后的相对密度均有所上升,但都能够满足工程中相对密度 ≤ 1.15 的要求。泥浆的携渣循环次数直接呈现在含砂率的提升上,由图 8(d)可见,较好的稳定性使泥浆 1 和泥浆 2 的含砂率上升幅度相对较小,而泥浆 3 和泥浆 4 上升幅度则相对较大,说明其在循环过程中护壁性能有所下降。与既有文献[8]对比可以看出,本研究的改性膨润土泥浆黏度较高,且增长相对较快,但对滤失量在携渣循环过程中的影响基本不大。同时,4 种泥浆随着循环次数的增加,相对密度的增加速度则比较平缓,说明改性后的泥浆既能形成足够的压力支撑孔壁,又能避免孔壁的失稳坍塌和混凝土置换困难。综上所述,XG、CMC、CAS 的复配改性能够提高膨润土泥浆的携渣能力和循环回用的效果[8]。总体来看,筛选出的复配聚合物改性膨润土泥浆均具有一定程度的携渣能力,同时相比未改性的膨润土泥浆有着优异的循环回收性能,能够一定程度上解决超深地下连续墙可能存在的槽底沉渣难以清

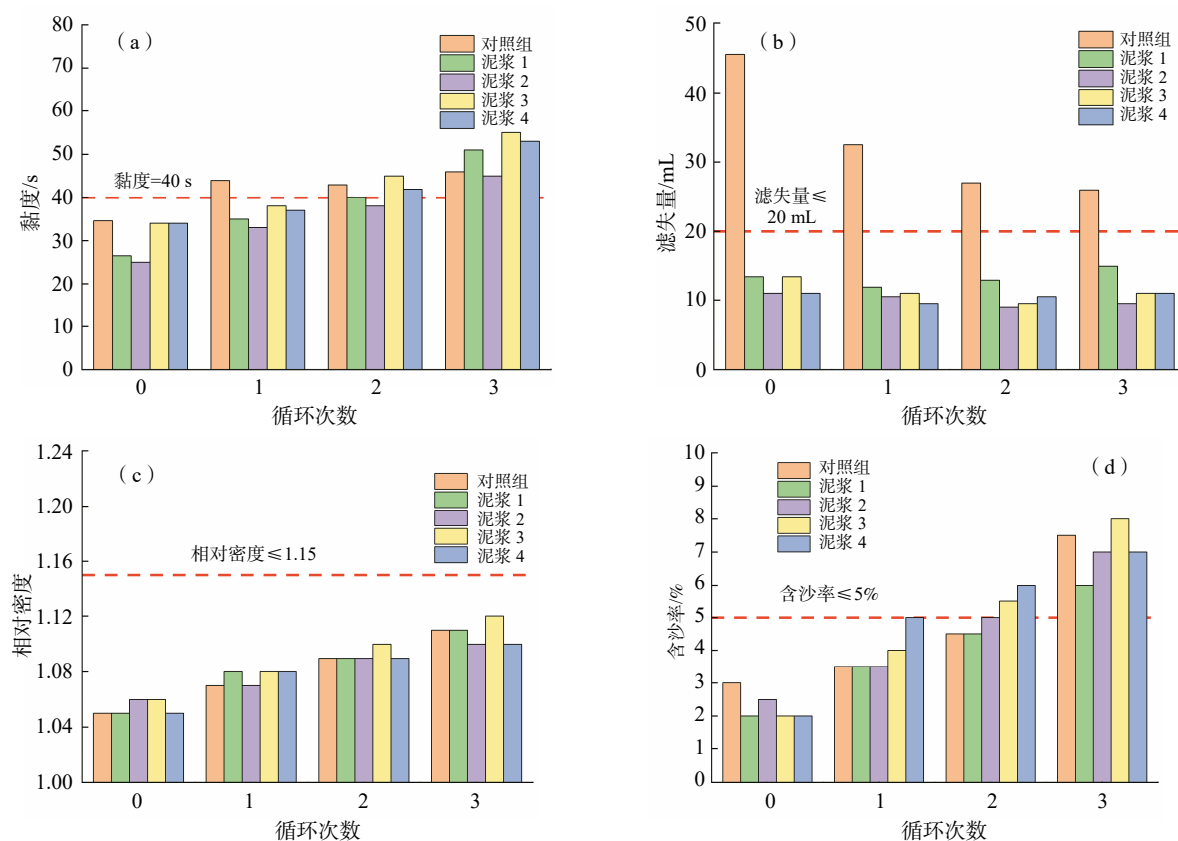


图 8 泥浆携渣及循环回用效果试验结果

除等问题。

3 聚合物改性膨润土泥浆微观结构分析

经过聚合物改性和配比优化后,膨润土泥浆的各项表现性质得到了提升,砂质地层渗透成膜性能和携渣及循环回用效果也得到了一定程度的提高。然而各种聚合物对膨润土泥浆的改性机理尚未明确,因此,采用高分辨率电子显微镜,通过对比不同聚合物改性前后膨润土泥浆 24 h 水化后烘干样品的微观结构变化,来分析改性膨润土泥浆性能提升的结构原因^[19]。

3.1 单一聚合物改性泥浆微观结构分析

如图 9(a)所示,膨润土泥浆烘干样在改性前主要呈紊流结构单元,以片状和扁平状颗粒为主,含有粒状颗粒,这些颗粒有一定的定向趋势^[20]。同时,外部有少数粒状颗粒镶嵌其中,整体上呈现波状和褶皱状。此时的膨润土泥浆孔隙大而少,表面积较小,吸水性和膨胀性还相对较差。经 CMC 改性后,具体表现如图 9(b)所示,膨润土表面出现小而分布较多的孔隙,同时,连续的层状结构变成一些不连续的片状分布。从图 9(c)中可以看出,经过 CAS 改性后,膨润土泥浆颗粒的微观特征并没有明显变化,可见 CAS 对膨润土颗粒改性效果相对其他聚合物较平缓,并且在试验中测得的泥皮厚度也是最大的,说明单独添加硅丙乳液对 CAS 改性后的泥浆性质影响有限,只能对泥浆表面活性进行一些改善。因此, CAS 对膨润土泥浆的改性需要与其他聚合物复配形成新的产物才有更好的效果。此外,在图 9(d)~(e)中不难发现在 XG、SA 改性之后,膨润土表面的小颗粒附着明显减少,呈现的是相对较大且形状较一致的改性产物,这些产物增大了膨润土颗粒表面积,进而提高了膨润土的吸水性和膨胀性,使得膨润土泥浆能够更快地形成泥皮,并稳固槽壁。还可以看到图 9(d)中的膨润土在原有层状堆叠结构外,还产生了许多隔离的小腔室,主要原因是黄原胶分子链在膨润土颗粒间形成三维凝胶网络,这种网络结构进一步增加了泥浆的黏度和稳定性^[21],从而大大加强了泥浆的吸水性,同时也降低了泥浆的 API 滤失量。从图 9(f)中可以发现,在 PHP 改性泥浆后,大量酰胺吸附基团中的氢原子和膨润土颗粒表面

的氧原子相互吸附,PHP 分子链在膨润土颗粒间架桥,使得原本细小的膨润土颗粒聚集成较大的凝胶状颗粒^[22],因此这些大颗粒大幅度提高了膨润土的吸水性和膨胀性,使颗粒间的水合层减少了泥浆在地层中的渗透,增加了颗粒间摩擦力,从而提高了泥浆黏度,降低了滤失量。

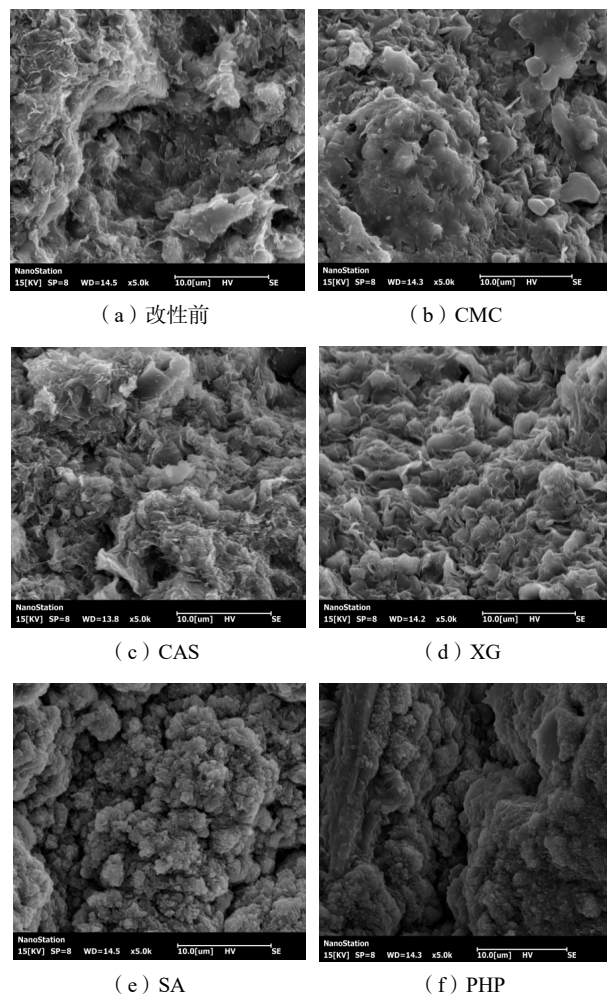
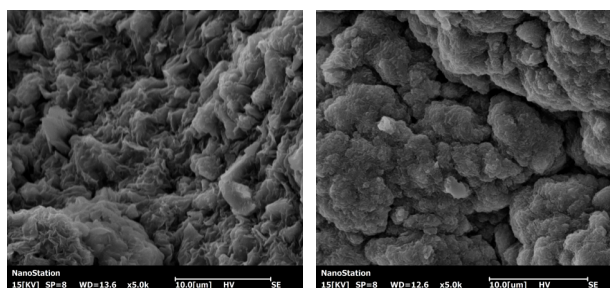


图 9 不同聚合物添加泥浆电镜扫描图($\times 5\,000$)

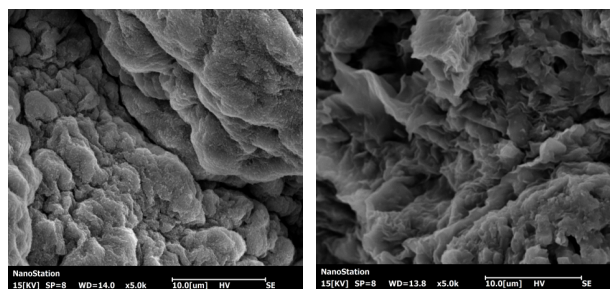
3.2 复配聚合物改性泥浆微观结构分析

如图 10(a)所示,电镜扫描结果没有明显变化,主要不同发生在原有 XG 与膨润土的聚合产物层状堆叠结构基础上,仅产生了一些小颗粒产物。从图 10(b)中可以看出, XG、CMC 及 CAS 复配形成了复合水凝胶(图中显示为许多大颗粒),使膨润土颗粒表面形成一层水合膜,大大提高了膨润土泥浆的吸水性和膨胀性,增强了膨润土泥浆的润滑性和悬浮性。图 10(c)中也同样出现许多大颗粒分散情况,主要原因在于 PHP 可以与 CMC 进行

接枝共聚反应形成共聚物^[23],进一步结合并提高CMC的抗滤失性和PHP的增黏性,膨润土泥浆的黏度因此得到提高,失水量也因此降低,使膨润土泥浆能够有更好的护壁性能。图10(d)表现形式和内在机理也较为类似。



(a) XG、CMC 与 1%CAS 复配 (b) XG、CMC 与 2%CAS 复配



(c) PHP 与 CMC 复配 (d) SA、CMC 与 CAS 复配

图10 复配聚合物添加泥浆电镜扫描图(×5000)

4 结论

(1) 通过对5种聚合物改性膨润土的试验及特性分析,确定了4种具有优良护壁效果的泥浆,其中最优泥浆配方为基浆(8.0%膨润土+0.3%无水碳酸钠)+0.05%黄原胶+0.1%羧甲基纤维素钠+2%硅丙乳液。

(2) 在砂质地层泥浆渗透试验中,形成的泥皮均为泥皮-渗透带型,经过改性后的泥浆形成的泥皮薄而致密,厚度均在2mm左右。经聚合物改性的4种泥浆能快速形成薄而致密的泥皮。滤失量可下降20.5%~35.5%,具有更好的泥浆护壁效果。Zeta电位试验显示,改性后的泥浆Zeta电位值可上升12.1%~27.6%,泥浆体系稳定性随着聚合物改性有了明显的改善。

(3) 经聚合物改性后的泥浆携渣能力均有明显提升,同时相比未改性的膨润土泥浆有着优异的循环回收性能。其中,以CMC、XG、CAS复配改性的膨润土泥浆性能更好,能够一定程度上解决超

深地下连续墙槽底沉渣难以清除的问题。

(4) 改性后的膨润土泥浆由连续的层状结构变为不连续的片状结构,膨润土颗粒表面积均有不同程度的增加。PHP与CMC复配后能够形成共聚物;XG、CMC与2%CAS复配后能够形成水凝胶,提高膨润土泥浆的黏度,降低其失水量。

参考文献:

- [1] 周昌军,何焯,解程超,等.砂卵砾石层地下连续墙成槽护壁泥浆的研制[J].钻探工程,2023,50(2):91-98.
- [2] 邵晨晨.复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践及关键技术[J].钻探工程,2021,48(6):102-108.
- [3] 王明胜,刘大刚.顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J].现代隧道技术,2016,53(6):182-189.
- [4] 王银献,刘军.地下连续墙设计施工与案例[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [5] LIU X X. Study on application of construction technology for diaphragm in underground building [C]// 2nd International Workshop on Renewable Energy and Development (IWRED). Guilin, China, 2018.
- [6] 向斌.大尺度地下连续墙在深基坑中的应用[D].北京:北京建筑大学,2017.
- [7] 李建高,王长虹.超深地下连续墙槽壁稳定性分析与施工措施[J].隧道建设,2011,31(1):57-63.
- [8] ZHANG F J, KONG C, CHEN Q B. Factors affecting the compactness of filter cake for diaphragm wall slurry[J]. Pigment & resin technology, 2021, 50(3):194-203.
- [9] OUAER H, GARECHE M. Hydroxyethyl cellulose as a rheology modifier for water-based drilling fluids formulated with Algerian bentonite[J]. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2019, 41(3):123.
- [10] 雷华阳,施福硕,刘旭,等.砂性地层中植物胶改性泥浆性质及渗透成膜试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(2):394-401.
- [11] 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(增刊1):291-295,301.
- [12] 杨焯旻.顶管施工注浆作用及环境效应研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [13] 周载延.大断面矩形顶管摩阻力计算方法与顶力预测[D].绵阳:西南科技大学,2022.
- [14] 李辉,刘泓志,王诗雨,等.卵砾石地层泥水盾构不同性质泥浆成膜试验研究[J].现代隧道技术,2023,60(3):175-181.
- [15] 刘成,寇伟,陆杨.加砂泥浆在砂性地层中成膜效率试验[J].林业工程学报,2017,2(6):121-126.

- [16] MIN F L, DU J R, 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.
- [17] KMEID M, CASAUX-GINESTET G, ESCADEILLAS G, et al. Numerical modelling of diaphragm wall construction[J]. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2024, 48(9):2356-2380.
- [18] MIN F L, ZHU W, HAN X R. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2013, 38:423-430.
- [19] 廖饶平. 基于防渗性能的膨润土有机改性制备方法及应用[D]. 温州: 温州大学, 2017.
- [20] 陈宇龙. 云南膨胀土的微观结构特征[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊 1):334-339.
- [21] SINGH S P. Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer[J]. *Geomechanics and geoengineering*, 2020, 15(2): 107-122.
- [22] 靳彦欣, 汪庐山, 王涛, 等. 无机盐对部分水解聚丙烯酰胺溶液黏度影响的实验与理论研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(4):165-170.
- [23] JEONG D, KIM C, KIM Y, et al. Dual crosslinked carboxymethyl cellulose/polyacrylamide interpenetrating hydrogels with highly enhanced mechanical strength and superabsorbent properties[J]. *European polymer journal*, 2020, 127:109586.

Experimental study on ultra-deep diaphragm wall bentonite slurry modified by polymers

WANG Yan, DING Yonghao, HUANG Tianzhi

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to solve the problems such as the instability of the trench wall and the difficulty in cleaning the sediment at the bottom of the trench caused by the increase of the excavation depth of the underground continuous wall, five polymers were used to modify the bentonite slurry, including sodium carboxymethyl cellulose, xanthan gum, silicone-acrylic emulsion, sodium alginate and partially hydrolyzed polyacrylamide. The engineering characteristics of the modified bentonite slurry were evaluated by permeability test and slag carrying cycle test in sandy strata. The results show that a reasonable ratio of polymer modification can effectively control the viscosity of the mud, reduce the filter loss, and quickly form a thin and dense mud skin in the process of wall protection penetration. In sandy strata, the filtration loss of polymer modified bentonite slurry is significantly lower than that of unmodified slurry, and the filtration loss can be reduced by 20.5%–35.5%. The Zeta potential value of the modified mud filtrate can increase by 12.1%–27.6%, and the stability of the mud system has been significantly improved with the modification of the polymer. At the same time, the modified slurry can still maintain the stability of the apparent engineering properties in the secondary recycling after carrying the bottom sediment. Polymers can increase the surface area of bentonite particles, form copolymers or hydrogels, improve the water absorption and expansion of bentonite, and thus improve the wall protection performance of the modified bentonite slurry.

Keywords: diaphragm wall; polymer modification; wall protection slurry; slurry permeability; silt carrying circulation

(责任编辑 章践立)