

粗粒土地层加砂泥浆研制与渗透成膜特性研究

何 焯¹, 王 胜^{2*}, 周昌军¹, 唐庆东¹, 潘安邦², 唐方杰², 解程超²

(1. 中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司, 四川 成都 610213; 2. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 防渗墙作为一种常用的垂直防护手段, 在水电建设行业中备受青睐。但在粗粒土地层中进行防渗墙成槽施工时, 因地层渗透性强, 固壁泥浆漏失严重, 导致成膜困难, 槽壁垮塌事故频发。因此, 为改善由泥浆渗透造成的槽壁稳定性问题, 分别对造浆土、pH 改性剂、流变改性剂进行优选得到基础液, 再通过自主设计的泥浆渗透实验仪器优选粗砂为粗粒材料, 构建粗粒土地层的防渗墙固壁泥浆体系, 同时分析了粗砂粒径和加量对泥浆渗透成膜特性的影响。得出结论: 粗粒土地层成槽泥浆体系配方为清水+4% 黏土+4% 钠基膨润土+0.2% 3.4 模硅酸钠+0.18% 羧甲基纤维素钠+2.5% 0.154 mm 砂粒; 加砂泥浆在粗粒土地层中的成膜速度与成膜质量主要取决于粗砂的粒径与加量, 随粗砂的粒径和加量的增大泥浆的成膜速度不断加快, 随粗砂加量的增大, 成膜质量不断降低; 加砂泥浆的渗透成膜机制为: 砂粒对粗粒土地层的初步改良、渗透带在地层中的稳定淤堵、泥皮在地层表面的滤失成膜, 三者协同作用降低浆液的渗漏, 维持粗粒土地层开挖面的稳定。研究成果对粗粒土地层的工程固壁泥浆优化配制具有理论指导作用, 同时对类似工程也具有借鉴与参考价值。

关键词: 粗粒土地层; 强渗透地层; 防渗墙成槽; 开挖面稳定; 加砂泥浆; 渗透成膜特性

中图分类号: TV543; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0137-09

Development of sand-mixed slurry and study of the permeation film-forming characteristics for coarse-grained soil layers

HE Ye¹, WANG Sheng^{2*}, ZHOU Changjun¹, TANG Qingdong¹,
PAN Anbang², TANG Fangjie², XIE Chengchao²

(1. Ghengdu Hydropower Construction Engineering Co., Ltd., Sinohydro Bureau 7, Chengdu Sichuan 610213, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: As a commonly used vertical protection method, the cut-off wall is highly favored in the hydropower construction industry. However, during the trenching construction of cut-off walls in coarse-grained soil strata, because of strong permeability, serious leakage of wall-fixing slurry often occurs, leading to difficulties in film-forming and frequent trench wall collapse accidents. Therefore, to improve the stability of trench walls caused by slurry permeation, the base fluid was optimized by selecting suitable clay, pH modifiers, and rheological modifiers. Subsequently, a self-designed slurry permeation experiment apparatus was used to select coarse sand as the coarse-grained material, forming a wall-fixing slurry system for cut-off walls in coarse-grained strata. The effects of coarse sand particle size and dosage on the slurry's permeation and film-forming characteristics were also analyzed. The study concluded that the slurry system for trenching in coarse-grained strata consists of clean water+4% clay+4% sodium bentonite+0.2%

收稿日期: 2026-01-05; 修回日期: 2026-03-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.05.015

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技项目“复杂地层 2 m 超厚地下连续墙成槽成套关键技术研究”(编号: 80303-AH20240535)

第一作者: 何焯, 男, 汉族, 1986 年生, 工程师, 水利水电工程专业, 长期从事水利水电施工一线生产与管理工作, 四川省成都市温江区花都大道西段 9 号, 112012609@qq.com。

通信作者: 王胜, 男, 汉族, 1982 年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 长期从事钻探新工艺与新材料的科研与教学工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路 1 号, yongyuandewangsheng@sina.com。

引用格式: 何焯, 王胜, 周昌军, 等. 粗粒土地层加砂泥浆研制与渗透成膜特性研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(5): 137-145.

HE Ye, WANG Sheng, ZHOU Changjun, et al. Development of sand-mixed slurry and study of the permeation film-forming characteristics for coarse-grained soil layers[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 137-145.

3.4-modulus sodium silicate+0.18% sodium carboxymethyl cellulose+2.5% 0.154 mm sand particles. The film-forming speed and quality of sand-added slurry in coarse-grained strata primarily depend on the particle size and dosage of coarse sand. As the particle size and dosage of coarse sand increase, the film-forming speed of the slurry accelerates, whereas the film-forming quality decreases with the increasing sand dosage. The permeation and film-forming mechanism of sand-added slurry involves three synergistic effects: the preliminary improvement of the coarse-grained stratum by sand particles, the stable clogging of the permeation zone within the stratum, and the filtration and film-forming of mud cake on the stratum surface. These combined actions reduce slurry leakage and maintain the stability of the excavation face in coarse-grained strata. The research findings provide guidance for optimizing the formulation of engineering wall-fixing slurry in coarse-grained strata and offer valuable references for similar engineering projects.

Key words: coarse-grained soil stratum; highly permeable stratum; cut-off wall trenching; excavation surface stability; sandy slurry; permeation film-forming characteristics

0 引言

泥浆支护作为维持开挖面稳定的有效手段,在水电站防渗墙、泥水盾构、钻孔灌注桩等各类地下工程施工中得到了广泛应用。研究表明,能否在开挖面快速、高效地形成质量良好的泥膜将直接影响泥浆支护效率^[1-4]。然而,在粗粒土地层中,因地层孔隙大、渗透性强,常规泥浆材料难以快速形成有效泥膜,甚至无法成膜,导致泥浆漏失严重、槽壁失稳风险高,亟待系统研究与有效解决^[5]。

为改善泥浆在粗粒土地层等强渗透地层中漏失严重,成膜困难导致槽壁失稳的问题,一些学者针对泥浆物理性质对成膜质量影响进行了研究。韩晓瑞等^[6]自制试验仪器发现泥浆的黏度越大,越易形成质量更好的泥膜。袁大军等^[7]模拟卵砾石地层开展泥浆渗透试验,发现泥浆滤失量随着泥浆密度的增大而减小。还有学者针对泥浆成膜改性添加剂进行了研究。王廷^[8]以预胶化淀粉、膨润土、黏土和无水碳酸钠按比例配置了多种泥水盾构环保型泥浆,极大降低了滤失量。王媛等^[9]提出了一种以轻质有机材料核桃壳为添加颗粒的新型盾构泥浆,并分析核桃壳颗粒的增稠效果和颗粒间的软接触模式使高渗透地层的泥浆成膜更容易。雷华阳等^[10]探究了瓜尔胶可使泥浆从未成膜转变为形成渗透带型泥膜、促进泥浆在地层中成膜,降低泥浆在地层渗透成膜过程中的前期滤失量和泥膜的渗透系数。徐涛等^[11]利用小麦秸秆作为生物质纤维改善泥浆性能,通过渗透柱入渗试验分析生物质纤维加量对泥浆入渗和泥膜形成的影响机理,研究得到生物质纤维能够减少膨润土加量,大幅提高泥浆的成膜性能。

对于泥浆的成膜改性方法除添加改性剂外,还可以在泥浆中添加适量粗粒材料,增加固相含量促进泥膜形成,在解决粗粒土地层泥浆成膜困难问题的同时具有较好经济效益,是目前工程界高度关注的问题。众多学者就粗粒土地层加砂泥浆及其成膜特性进行了大量研究,取得了不错的成果。在加砂泥浆的渗透过程研究方面,Qin等^[12]、Fritz等^[13]将粉土、砂土等粗颗粒材料加入膨润土泥浆中,有效地减少了泥浆在地层中的渗透距离。在此基础上,闵凡路等^[14]对盾构泥浆泥膜形成条件进行了研究,认为不同的泥浆颗粒粒径与地层的匹配程度将显著地影响着渗透结果。李辉等^[15]通过改变加砂泥浆的砂粒加量,对高渗透性地层中泥浆的成膜条件进行了研究,认为在高渗透性地层中,砂粒加量也是影响泥浆能否形成渗透稳定泥膜的一个关键因素。在加砂泥浆的成膜质量研究方面,吴迪等^[16]就砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能进行研究,发现泥浆相对密度是影响滤失量和填充地层致密程度的首要因素。宋洋等^[17]向改性泥浆中加入适量渣土,认为提高泥浆黏度和含砂率,可以降低泥浆的滤失量。而汝俊起^[18]通过对6种不同含砂量的泥浆进行渗透试验,认为泥浆在粗粒土地层中的滤失量应随泥浆含砂量的增加表现为先增后减。刘成等^[19]进行了砂粒粒径对泥浆成膜效率的试验研究,认为泥浆的成膜速度与成膜质量在一定程度上受到砂粒粒径的影响。

虽然关于泥浆渗透成膜问题已积累了较多的研究成果,但目前针对粗粒材料粒径与加量对泥浆渗透成膜过程的系统性影响,尤其是其协同成膜机制的研究仍相对缺乏。为此,本文从粗粒土地层成槽泥浆基础液制备出发,通过优选造浆土、pH调节

剂与流变改性剂形成性能稳定的基础液,进而以粗砂为成膜颗粒,系统研究其粒径与加量对泥浆渗透成膜特性的影响,并揭示其成膜机制。研究成果旨在为粗粒土地层工程固壁泥浆的优化配制提供理论依据与技术参考,对提升类似地层中开挖面稳定性具有重要工程意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1)为降低工程成本,在泥浆配制过程中采用价格更加低廉的黏土与膨润土复配作为造浆土,选择钠基、钙基膨润土分别与黏土进行复配筛选。pH改性剂组分选择1模、2.8模、3.4模硅酸钠和碳酸钠进行筛选。流变改性剂组分选择羧甲基纤维素钠、瓜尔胶、黄原胶进行筛选。粗粒材料组分选择粒径约0.25 mm、0.154 mm、0.1 mm砂粒进行筛选。

(2)工程现场渗透性较强的粉砂层和砂卵石层孔隙度通常为30%~40%,渗透系数为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ m/s。为在松散状态下较易达到模拟强渗透性地层要求的孔隙度,泥浆渗透试验过程中的粗粒土地层应选用粒径0.425~1 mm左右砂粒,滤水层由粒径1~1.5 cm不等的砾石组成。并加入少量粒径 <0.053 mm的荧光粉末作为示踪剂,用以观察渗透过程。

1.2 试验仪器与方法

(1)基础液研制中所使用的主要仪器为苏式漏斗黏度计、数显六速旋转黏度计、API标准滤失仪、量筒。泥浆流变性能通过苏式漏斗黏度计、数显六速旋转黏度计评价,滤失特性通过API标准滤失仪测定。胶体率测定方法:将100 mL泥浆注入量筒,盖住量筒静置24 h,读取下部悬浮泥浆柱体积刻度为胶体率数值。

(2)泥浆渗透试验采用了自主研制的渗透仪,其主要包括加压系统、泥浆渗透系统和渗透收集系统,如图1所示。加压系统由氮气瓶,压力调节阀门,送气管组成。其中,氮气瓶提供压力,模拟泥浆与开挖面地层之间的压力差。泥浆渗透系统采用内径为48 mm,外径为60 mm,长为600 mm的有机玻璃管,管身带有刻度,其上为连接加压系统的盖子,其下为带有球阀的出水管。渗透收集系统主要由水管、量筒以及外部框架上的粘钩组成。其中,量筒用于收集渗透水并实时观测滤失量。粘钩保证水管最高点高于滤水层,避免回水干扰试验结果。

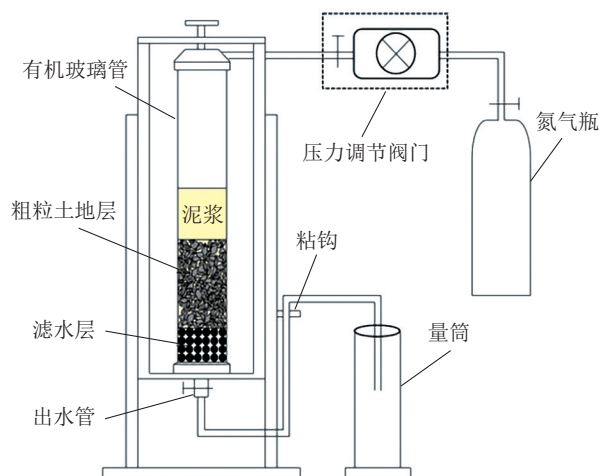


图1 渗透成膜试验装置

Fig.1 Permeation film-forming testing device

泥浆渗透实验设计如下:材料准备完成后将砾石填充至有机玻璃管250 mL刻度线处,然后将砂粒填充并击实至有机玻璃管550 mL刻度线处。水管连接漏斗与有机玻璃管下方出水管,利用连通器原理地对地层反向饱和后,注入泥浆至750 mL刻度线处。泥浆注入完成后,封闭系统并加压至0.3 MPa,打开球阀开关,开始试验。待渗透水量稳定后静置,关闭球阀开关,释放气压,在紫外线的照射下测取渗透距离和瞬间滤失量作为渗透过程指标,测取泥皮厚度并计算泥皮渗透系数作为成膜质量指标。达西定律揭示了渗流速度与水力梯度之间的线性关系,而渗透系数量化了这种关系在特定介质和流体下的具体比例。因此泥皮渗透系数按达西定律计算:

$$k = qL / (A\Delta h) \quad (1)$$

式中: k ——渗透系数, m/s; q ——单位时间内的稳定滤失量, m^3/s ; L ——渗径长度, 实验中取地层中泥皮厚度, m; A ——泥皮的横截面积, 实验中取 $18.09 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; Δh ——试样两端水位差, m(通过氮气瓶气压进行换算, 实验中取40 m)。

2 粗粒土地层成槽泥浆基础液制备

2.1 造浆土复配优选

选取200目钠基膨润土、200目钙基膨润土分别与200目黏土进行两两复配,总质量浓度80 g/L。复配比例为1:7、2:6、3:5、4:4、5:3、6:2、7:1,根据复配体系漏斗黏度和胶体率优选出造浆土。松散

的粗粒土地层宜采用较高的泥浆黏度以维持槽壁的稳定。试验结果如图2所示。

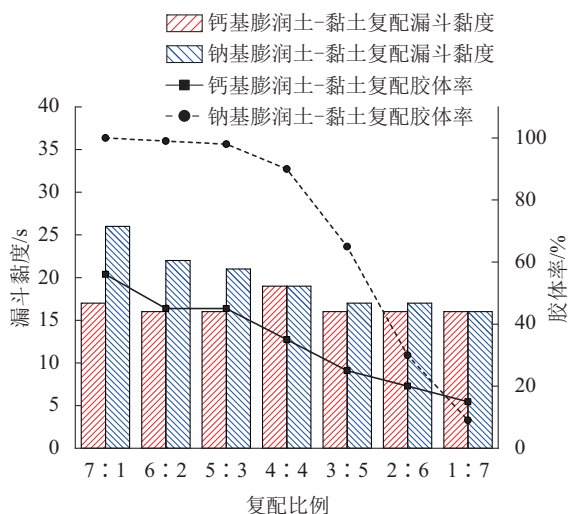


图2 膨润土与黏土复配基础液性能变化趋势

Fig.2 Performance variation trend of sodium bentonite-clay composite base slurry

分析图2可知,钙基膨润土-黏土复配基础液漏斗黏度在16~19 s内波动,整体胶体率偏低,均未超60%,胶体稳定性与成胶状态均匀性差。表明二者同属低效造浆材料,比例变化对整体黏度影响有限,且二者协同效应弱、配伍性差。相反,钠基膨润土-黏土复配基础液随着膨润土占比的减少,基础液的漏斗黏度与胶体率呈现明显下降趋势,其中胶体率在钠基膨润土占比高时保持极高水平,漏斗黏度整体优于钙基膨润土-黏土复配基础液。这表明钠基膨润土是提供黏度和胶体稳定性的有效成分,主导了体系性能。因此确定采用钠基膨润土-黏土复配方案。

钠基膨润土-黏土复配基础液在黏土占比高后胶体率骤降,漏斗黏度持续降低,表明黏土虽然成本低,但属于低胶体活性的惰性固相,水化能力弱,引起性能恶化,不能在复配体系中占据主体成分。当钠基膨润土:黏土=4:4时,胶体率保持在90%,漏斗黏度从26 s小幅降至19 s,性能可满足工程要求。因此综合考虑成本与性能,确定钠基膨润土:黏土=4:4作为复配比例,后续添加改性剂调控基础液性能。

2.2 pH调节改性

地下连续墙成槽泥浆指标要求pH值控制在

8~11范围区间,能够提升泥浆性能,维持槽壁的稳定。按pH调节剂常用加量,向复配基础液中分别加入2 g碳酸钠、1模、2.8模、3.4模硅酸钠作为pH调节剂,测试对各性能影响,实验结果如表1所示。

表1 pH调节剂对基础液性能影响
Table 1 Effect of pH modifiers on the properties of the base slurry

pH调节剂	pH值	胶体率/%	漏斗黏度/s
无	8	90	19
碳酸钠	9	97	19
1模硅酸钠	11	97	19
2.8模硅酸钠	9	99	19
3.4模硅酸钠	9	100	20

分析表1可知,加入pH调节剂后,基础液pH值、胶体率都得到了提升,其中3.4模硅酸钠对胶体率提升最显著,悬浮性与稳定性最好,且小幅增黏。因此选用质量浓度0.2%的3.4模硅酸钠作为无机改性剂调节基础液pH值。

2.3 流变改性

对于松散的强渗透性地层来说,较高的泥浆黏度可以维持槽壁的稳定。向基础液中分别加入羧甲基纤维素钠、瓜尔胶、黄原胶,以质量浓度2~4%造浆土加量(即1.6~3.2 g)进行试验。利用漏斗黏度对不同流变改性剂的合理加量范围进行初步筛选,测试结果如表2所示。

由表2可见:当羧甲基纤维素钠的加量提升至3.2 g时,漏斗黏度过大,合理区间为1.6~2.4 g;瓜尔胶和黄原胶加量在1.6~3.2 g时,漏斗黏度均处

表2 流变改性剂对基础液漏斗黏度的影响

Table 2 Effect of rheological modifier on the funnel viscosity of the base slurry

流变改性剂	加量/g	漏斗黏度/s
羧甲基纤维素钠	1.6	28
	2.4	32
	3.2	52
瓜尔胶	1.6	28
	2.4	31
	3.2	38
黄原胶	1.6	29
	2.4	35
	3.2	40

在一个合理的范围内,且加量 2.4~3.2 g 的提黏效果更好,因此选择 2.4~3.2 g 作为瓜尔胶和黄原胶加量区间。3 种流变改性剂均以 0.2 g 为梯度配制泥浆,性能测试结果见表 3。

分析表 3 可知,随着流变改性剂加量的提高,基础液黏度增大。羧甲基纤维素钠加量为 1.8 g 和 2.2 g 时,动塑比为 0.36~0.48,且两者静切力相对值相较于其他加量为最高,泥浆稀释性和触变性最优,同时考虑工程泥浆的成本问题,优选 1.8 g 加量羧甲基纤维素钠。黄原胶会使基础液动塑比过大,从而导致机械钻速降低、抽吸作用和压力波动引起井壁失稳。当以瓜尔胶为流变改性剂时,基础液静切力相对值急速降低,甚至出现负值,这表明瓜尔胶与基础液配伍性差,所制泥浆的悬浮稳定性弱,固体颗粒在静止期间快速沉淀导致泥浆稀释。综上,优选 1.8 g 加量羧甲基纤维素钠用于提黏改性。

2.4 基础液性能

综上所述,粗粒土地层成槽泥浆基础液配方为:清水+4%黏土+4%钠基膨润土+0.2% 3.4 模硅酸钠+0.18% 羧甲基纤维素钠(以上百分比均是材料与清水的质量之比),为后续采用荧光示踪法观测泥浆渗透过程,将相当于清水质量 0.5% 的粒

表 3 流变改性剂加量对泥浆性能的影响				
Table 3 Effect of rheological modifier dosage on slurry performance				
流变改性剂	加量/g	$\mu_a/$ (mPa·s)	τ_0/μ_p	静切力相对 值/Pa
羧甲基纤维素钠	1.6	16.7	0.30	1.6
	1.8	18.5	0.53	4.1
	2	20.25	0.31	1.5
	2.2	22	0.51	4.2
	2.4	24.3	0.37	2.4
黄原胶	2.4	17.35	0.67	4.2
	2.6	18.25	0.92	4.4
	2.8	18.8	0.73	4.7
	3	18.2	0.94	3.1
	3.2	20	1.00	3.9
瓜尔胶	2.4	20	0.35	0.46
	2.6	19.35	0.48	-1.64
	2.8	20.5	0.67	-1.53
	3	16.7	0.81	-1.74
	3.2	23.3	0.59	-1.12

径 0.053 mm 粉状荧光示踪剂加入基础液中,基础液加入荧光示踪剂前后性能测试结果如表 4 所示。

表 4 基础液性能							
Table 4 Properties of the base slurry							
材料	漏斗黏度/s	$\mu_a/$ (mPa·s)	τ_0/μ_p	滤失量/mL	pH	泥皮厚度/mm	泥皮重量/g
不加荧光剂	31	18.5	0.53	12	9	0.98	4.95
加入荧光剂	30	18.5	0.54	12	9	0.99	4.96

性能测试结果表明,基础液具有较好的流变特性与降滤失性能。形成泥皮较薄,表明成膜质量较好。同时加入荧光剂后性能无明显变化,不会影响泥浆渗透实验。

3 粗粒材料优选

针对粗粒土地层孔隙度较高、级配较差的特点,分别采用粒径 0.25、0.154、0.1 mm 砂粒作为粗粒材料加入基础液进行实验,评价砂粒对泥浆渗透过程与成膜质量的影响,选取合理粒径与加量的砂粒作为粗粒材料。

设置 10 g 与 20 g 两个加量,3 种不同粒径砂粒对泥浆渗透过程的影响如图 3 所示。

由图 3 可知,加 0.1 mm 砂粒泥浆和基础液均无法在粗粒土地层中顺利成膜,泥浆漏失严重,予以剔除。0.25 mm 砂粒较 0.154 mm 砂粒的泥浆渗透距离和瞬间滤失量更小,降滤失效果明显,说明 10~20 g 对于粒径 0.25 mm 砂粒砂粒是一个合理加量区间,0.154 mm 砂粒则需更高加量才能提升降滤失潜力。这表明在一定加量范围内,成膜效果主要取决于颗粒粒径与地层的匹配程度。

设计粒径 0.25 mm 砂粒加量范围 10~20 g、粒径 0.154 mm 砂粒加量范围 20~30 g,以 2.5 g 为梯度进行泥浆渗透过程与泥皮质量测试。实验结果分别如图 4 和图 5 所示。

图 4 和图 5 试验结果显示,随着泥浆中粗粒材

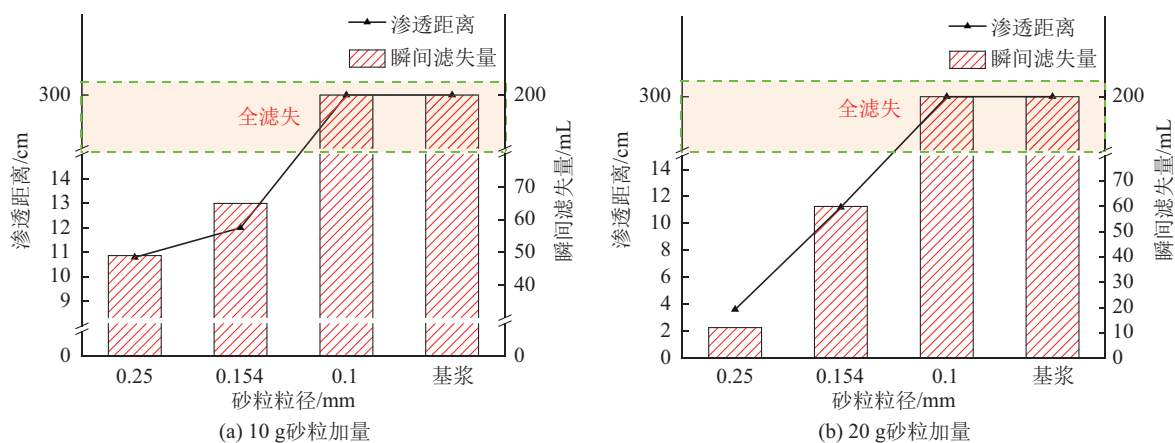


图3 粒径对泥浆渗透过程的影响

Fig.3 Effects of particle size on slurry permeation process

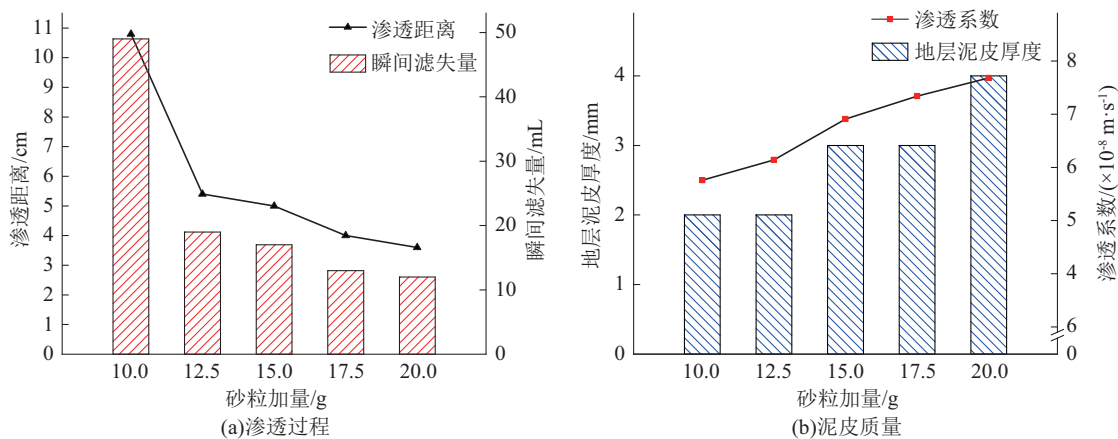


图4 粒径 0.25 mm 砂粒加量对泥浆性能的影响

Fig.4 Effect of the content of 0.25 mm sand particles on slurry properties

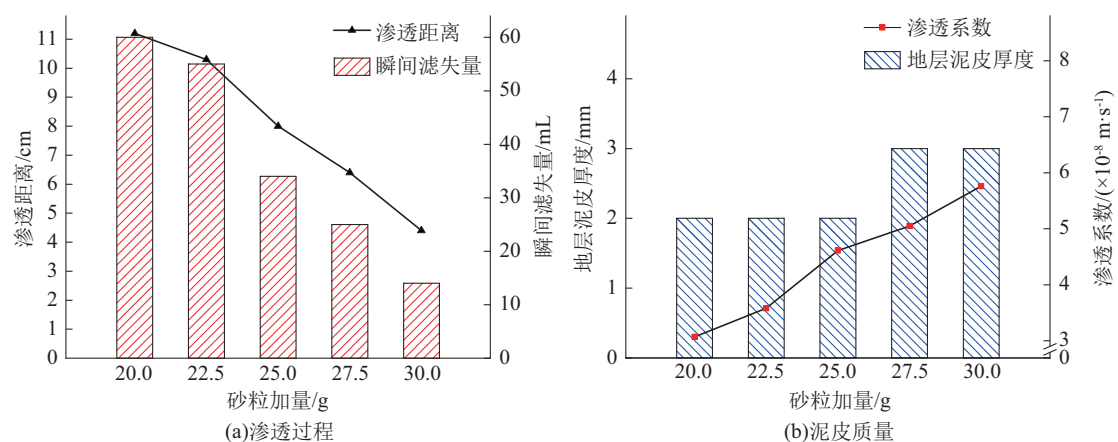


图5 0.154 mm 砂粒加量对泥浆性能的影响

Fig.5 Effect of the dosage of 0.154 mm sand particles on slurry performance

料加量增大,泥饼质量逐渐劣化,泥浆降滤失性能却逐渐提高,这表明泥饼质量和封堵效率有时并不完全同步。初期封堵效率取决于能否快速架桥,长

期封堵质量则取决于泥饼的致密性。砂粒的加入显著改善了初期的架桥封堵,从而降低了渗透距离和滤失量。但若继续进行加压或延长时间,这种松

散泥饼可能会被压溃或冲蚀,导致后期滤失量反而上升;且过厚泥皮容易造成槽壁失稳。因此需平衡泥饼质量与泥浆封堵能力,选取合适粗粒材料加量。

对比图4(a)和图5(a),在粒径相同情况下泥浆中砂粒加量越大,泥浆的渗透距离与瞬间滤失量越小,成膜速度越快。证明泥浆中砂粒加量越多,单位时间内进入地层的砂粒越多,堵塞地层孔隙的频率增大。当0.25 mm砂粒加量12.5 g、0.154 mm砂粒加量25 g时,泥浆渗透距离与瞬间滤失量迅速下降,表明该加量为一临界值。当砂粒加量较低时,其粒径与地层孔隙匹配程度差,部分孔隙未能被有效填充。当加量增至临界值时,砂粒与孔隙之间形成更优的级配关系,实现级配优化封堵;且加量到达临界值后,砂粒在地层浅表形成颗粒层,可能增加了渗透路径的迂曲度,使流体流动阻力增大,滤失量降低。2种粗粒材料加量越大,其地层泥皮厚度与渗透系数越大,即泥皮质量更差。厚泥皮通常结构强度低,较为松散。高渗透系数代表泥皮密封性能差,内部孔隙多。这表明相同粒径下砂粒加量的增大会降低泥浆成膜质量。这是由于砂粒较膨润土属于粗颗粒,其数量增多将在泥皮产生较多孔隙。同时砂粒属于惰性非胶结性固相颗粒,过多加量将削弱泥饼连续性与黏结强度。0.154 mm与0.25 mm砂粒临界加量泥皮厚度相同,但渗透系数更低,密封性更好。因此确定粒径0.154 mm、加量25 g砂粒为最优粗粒材料。

4 泥浆渗透机制分析

4.1 开挖面稳定体系清水渗透试验

利用研制得到的粗粒土地层成槽泥浆进行渗透试验(图6)。紫外线照射下,观察渗透试验结果,如图6(a)所示;倒走泥浆,观察地层表面泥皮状态,如图6(b)所示。由图6(a)和图6(b)可知:开挖面稳定体系由泥皮与渗透带^[20]复合组成。其中,泥皮是图6(a)中明亮的分界线,渗透带是图6(a)中泥皮下方紧贴泥皮的具有一定层状结构的发光区域。但不论是泥皮还是渗透带,其都没有与粗粒土地层直接接触。在它们与粗粒土地层之间,存在着一层极薄的由加砂泥浆中砂粒形成的粗砂层。

渗透试验结束,倒走多数泥浆,保留少量剩余,重新注入清水至750 mL刻度线处,如图6(c)所示,

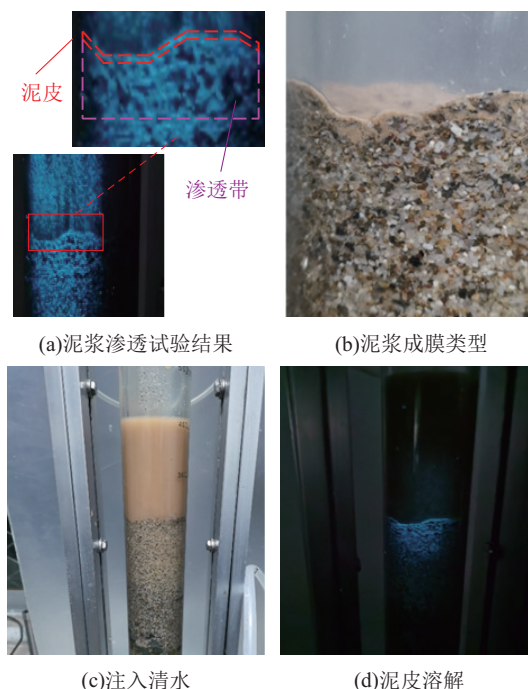


图6 清水渗透试验

Fig.6 Clear water permeation test

其在紫外线照射如图6(d)所示。可以发现:图6(d)中的泥皮亮度降低,但渗透带的结构与亮度几乎没有变化。这是由于加入清水后泥浆的浓度降低,泥皮成分溶于泥浆中导致的。使用这种方式破坏泥皮可以尽量减少因试验操作因素造成的对渗透带的损害。

在注入清水5 min后,重新进行渗透试验。在试验过程中发现,泥浆在13 s内稳定渗漏200 mL(全滤失),相较于优选泥浆渗透试验来说渗透速度显著提高。因此粗粒土地层表面泥皮可以被视为已破坏,但此时的泥浆渗透速度相较于泥浆基础液来说,又有一定的降低。因此认为渗透带也有着一定减少泥浆渗漏的作用,但远比不上地层表面的泥皮。

由此得出结论:在开挖面稳定体系中,泥皮与渗透带都能在一定程度上减少泥浆的漏失,但起到主要作用的是地层表面的泥皮。二者复合作用减少了浆液漏失,传递了液柱压力,维持了开挖面稳定。

4.2 渗透成膜机制

加砂泥浆渗透成膜机制如图7所示,具体作用过程分析如下:

(1)砂粒对粗粒土地层的初步改良。在地层浅部与地层表面发生堆积,初步改良了粗粒土地层浅

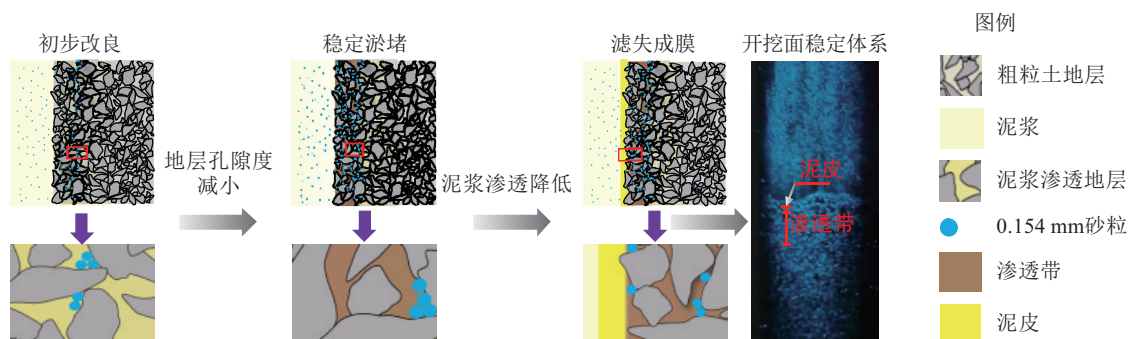


图7 加砂泥浆渗透成膜机制

Fig.7 Permeation film-forming mechanism of the sandy slurry

表部的级配关系,减小了地层的孔隙度,稍微地降低了泥浆渗透,为泥浆中的造浆土颗粒滞留在地层中创造了条件。

(2)渗透带在地层中的稳定淤堵。在砂粒对粗粒土地层的初步改良进行至一定程度后,地层浅部的孔隙缩小到了渗透带足以形成的大小。此时,泥浆中的造浆土颗粒不再随自由水渗入地层更深处,而是在改良后的地层中滞留^[21],与砂粒一起形成渗透带,实现对地层浅部的稳定淤堵。其更进一步地减小了地层的孔隙度,轻微地降低了泥浆渗透。

(3)泥浆在地层表面的滤失成膜。在砂粒对粗粒土地层的初步改良与渗透带在地层中的稳定淤堵完成的基础上,泥浆在渗透带上方滤失造壁,形成泥皮。优良的泥浆性能使得形成的泥皮致密,浆液渗透漏大幅降低,液柱压力有效传递,开挖面得以稳定。

5 结论

(1)优选钠基膨润土:黏土=4:4作为造浆土,3.4模硅酸钠作为pH调节剂,羧甲基纤维素钠作为流变改性剂,0.154 mm砂粒作为粗粒材料。最优配方为:清水+4%黏土+4%钠基膨润土+0.2% 3.4模硅酸钠+0.18% 羧甲基纤维素钠+2.5% 0.154 mm砂粒,该泥浆流变性能优良、滤失量低。

(2)分析了粗砂粒径和加量对泥浆渗透成膜特性的影响:加砂泥浆在粗粒土地层的渗透过程与成膜质量主要取决于砂粒的粒径与加量。渗透距离、瞬间滤失量等渗透过程指标随着砂粒的粒径、加量的增大不断减小,泥浆的成膜速度不断加快;泥皮厚度,渗透系数等成膜质量指标随着砂粒加量的增大不断增大,泥浆的成膜质量不断降低。

(3)揭示了加砂泥浆渗透成膜机制:砂粒对粗

粒土地层的初步改良、渗透带在地层中的稳定淤堵、泥皮在地层表面的滤失成膜三者协同作用,减少了泥浆在地层中的渗透,维持了开挖面的稳定。压强作用下,砂粒渗入地层,降低了地层浅表部的孔隙度,初步改良了粗粒土地层的级配。在此基础上,渗入地层的泥浆与地层中的砂粒形成渗透带,实现稳定淤堵,使得泥浆渗透轻微下降。最后,地层表面泥皮形成,大幅降低了泥浆的渗透。

参考文献(References):

- [1] 安辰亮,吴文亮,赵小鹏,等.跨软弱夹层地下连续墙槽壁局部稳定性分析[J].铁道工程学报,2022,39(3):7-12,39.
AN Chenliang, WU Wenliang, ZHAO Xiaopeng, et al. Local stability analysis of diaphragm wall trench wall crossing weak interlayer[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3):7-12,39.
- [2] 祝强,沈伟梁.深层高承压水粉砂地层超深地下连续墙成槽坍塌机理分析[J].施工技术,2021,50(7):49-53.
ZHU Qiang, SHEN Weiliang. Mechanism analysis of trench collapse of ultra-deep diaphragm wall in deep and high-pressure water silt stratum[J]. Construction Technology, 2021, 50(7):49-53.
- [3] 王虎,陈怡,段德培,等.低渗透成膜钻井液在贵州深部地热井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):13-15,20.
WANG Hu, CHEN Yi, DUAN Depei, et al. Application of low permeability film forming drilling fluid in deep geothermal well in Guizhou Province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(4):13-15,20.
- [4] 李田周,陶士先,熊正强.磷石膏地层用钙基成膜环保冲洗液研究与应用[J].钻探工程,2023,50(1):49-54.
LI Tianzhou, TAO Shixian, XIONG Zhengqiang. Development and application of calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid for phosphogypsum formation[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1):49-54.
- [5] 尹鑫晟,朱彦华,魏纲,等.泥水盾构开挖面前泥浆渗透距离预测算法[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(12):2234-2242.
YIN Xinsheng, ZHU Yanhua, WEI Gang, et al. Algorithm for predicting slurry penetration distance in front of slurry shield tunnel face[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Sci-

- ence), 2021, 55(12):2234-2242.
- [6] 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(S1):288-292.
- HAN Xiaorui, ZHU Wei, LIU Quanwei, et al. Influence of slurry property on filter-cake quality on working face of slurry shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1):288-292.
- [7] 袁大军,李兴高,李建华,等. 砂卵石地层泥水盾构泥浆渗透试验分析[J]. 都市轨道交通, 2009, 22(3):32-35.
- YUAN Dajun, LI Xinggao, LI Jianhua, et al. Mud seepage tests for slurry shields driving in sandy cobble ground[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2009, 22(3):32-35.
- [8] 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 tunnelling in high permeability stratum [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [9] 王媛,刘韬,刘四进,等. 高渗透砂层含核桃壳泥浆特性及渗透成膜试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(11):2256-2264.
- WANG Yuan, LIU Tao, LIU Sijin, et al. Rheological properties and filter-cake formation performances of slurry containing walnut shell in high-permeability sand stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(11):2256-2264.
- [10] 雷华阳,施福硕,刘旭,等. 砂性土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.
- LEI Huayang, SHI Fushuo, LIU Xu, et al. Experimental study on properties of vegetable gum-modified mud and filter cake forming in sandy stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2):394-401.
- [11] 徐涛,史金权,丁智,等. 生物质纤维对饱和砂土地层泥水盾构泥浆成膜性能的增强机制[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025: 1-8 (2025-03-05) [2025-12-29]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.tu.20250304.1047.004>.
- XU Tao, SHI Jinquan, DING Zhi, et al. Enhancement mechanism of biomass fibre on filter cakeformation for slurry shield tunnelling in sandy ground[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025: 1-8 (2025-03-05) [2025-12-29]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.tu.20250304.1047.004>.
- [12] Qin S, Xu T, Zhou W H, et al. Infiltration behaviour and microstructure of filter cake from sand-modified bentonite slurry [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 40:100963.
- [13] Fritz P. Additives for slurry shields in highly permeable ground [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(1): 81-95.
- [14] 闵凡路,吕焕杰,宋帮红,等. 砂地层孔径分析及其对泥浆在地层中渗透性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3):144-151.
- MIN Fanlu, LÜ Huanjie, SONG Banghong, et al. Pore size analysis and its influence on slurry infiltration in sandy layers [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 144-151.
- [15] 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.
- LI Hui, LIU Hongzhi, WANG Shiyu, et al. Experimental study on filter cake formation in slurry shield tunnelling in cobble-gravel stratum using slurries with various properties[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3):175-181.
- [16] 吴迪,周顺华,温馨. 砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(S1):3460-3467.
- WU Di, ZHOU Shunhua, WEN Xin. Laboratory test and application of filter cake formation in sand during slurry shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(S1):3460-3467.
- [17] 宋洋,李昂,王韦颐,等. 泥岩圆砾复合地层泥水平衡盾构泥浆配比优化研究与应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(12):4054-4062, 4072.
- SONG Yang, LI Ang, WANG Weiyi, et al. Research and application of mud proportioning optimization of slurry balance shield in mudstone and gravel composite stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12):4054-4062, 4072.
- [18] 汝俊起. 泥浆含砂量对泥水盾构泥浆成膜性能影响的试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2):191-197.
- RU Junqi. Experimental study on influence of sand content of slurry on filter-cake formation performance of slurry shield[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(2): 191-197.
- [19] 刘成,寇伟,陆杨. 加砂泥浆在砂性土层中成膜效率试验[J]. 林业工程学报, 2017, 2(6):121-126.
- LIU Cheng, KOU Wei, LU Yang. Experimental study on efficiency of filter cake formation in sandy strata for slurry with coarse particles[J]. China Forestry Science and Technology, 2017, 2(6):121-126.
- [20] 徐涛,史庆锋,章定文,等. 泥水盾构开挖面泥膜渗透特性与压力传递机制[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9):1878-1887.
- XU Tao, SHI Qingfeng, ZHANG Dingwen, et al. Permeability characteristics of filter cake and pressure transfer on face during slurry shield tunnelling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(9):1878-1887.
- [21] 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 Fanlu, ZHAO Xiaopeng, ZHU Wei, et al. Airtightness of filter cakes formed under different slurry infiltration modes [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(4):68-73.

(编辑 王文)