

泥浆护壁技术在盐渍土和粗粒土层钻孔施工中的应用现状及展望

杨佐怀^{1,2}, 石青^{1,2}, 李俊飞^{1,2}, 李宾洋^{1,2}

(1. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆乌鲁木齐 830057; 2. 中国地质学会中亚造山带成矿预测与找矿示范创新基地, 新疆乌鲁木齐 830057)

摘要: 泥浆护壁技术是钻探工程中确保孔壁稳定、防止坍塌的关键技术之一。在盐渍土和粗粒土等特殊土层的钻孔施工中, 传统泥浆护壁技术面临着诸多挑战。盐渍土因其高盐分和膨胀性, 容易导致泥浆失效, 造成孔壁不稳定; 粗粒土则由于其高渗透性和低粘附性, 使泥浆容易流失, 无法有效支撑孔壁。本文综述了泥浆护壁技术在盐渍土和粗粒土钻孔施工中的应用现状, 分析了当前技术面临的主要难题, 特别是对于泥浆类型的选择与配制、新型泥浆材料的研究, 以及如何解决不同土层特性下泥浆的稳定性和护壁效果等问题, 进行了深入探讨。文章还重点介绍了高盐耐受泥浆、复合型泥浆和环保型泥浆的研究进展, 提出了未来泥浆材料研发的方向。本文为泥浆护壁技术在特殊土层中的优化应用提供了参考。

关键词: 孔壁稳定性; 泥浆护壁; 盐渍土; 粗粒土; 新型泥浆材料; 高盐耐受泥浆; 复合型泥浆; 环保型泥浆

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0041-06

Application status and prospect of drilling fluid wall protection technology in drilling construction of saline soil and coarse-grained soil layer

YANG Zuohuai^{1,2}, SHI Qing^{1,2}, LI Junfei^{1,2}, LI Binyang^{1,2}

(1. Urumqi Comprehensive Survey Center on Natural Resources, China Geological Survey, Urumqi Xinjiang 830057, China; 2. Innovation Base of Metallogenic Prediction and prospecting in Central Asia Orogenic Belt, Geological Society of China, Urumqi Xinjiang 830057, China)

Abstract: Drilling fluid wall protection technology is one of the key technologies to ensure the stability of borehole wall and anti-sloughing in drilling engineering. In drilling operations of saline soils and coarse-grained soils, there are significant challenges in traditional drilling fluid wall protection technologies. Drilling fluid is easy to be failure and instable due to the high salt content and expansiveness of saline soils, and rapid mud loss and poor support for the borehole walls due to the high permeability and low adhesiveness of coarse-grained soils. In this paper, the current status of drilling fluid wall protection technology for saline and coarse-grained soils are reviewed, the main challenges faced by these technologies are analyzed, especially the selection of drilling fluid types and the formulation, the development of new drilling fluid materials, and solutions for enhancing drilling fluid stability and wall protection performance in various soils. Moreover, the recent advances in the development of high-salt-tolerant drilling fluid, compound drilling fluid, and eco-friendly drilling fluid are also emphasized, and the future direction of the material development is posed, which provides a reference for the optimal application of drilling fluid wall protection technology in special soil layers.

收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-02-16 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.007

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“塔里木盆地和田河流域水资源与水生态调查”(编号: DD20220962)

第一作者: 杨佐怀, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 资源勘查专业, 长期从事水文地质、矿产地质钻探技术工作, 新疆乌鲁木齐市新市区西环路555号, yangzuohuai@126.com。

引用格式: 杨佐怀, 石青, 李俊飞, 等. 泥浆护壁技术在盐渍土和粗粒土层钻孔施工中的应用现状及展望[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 41-46.

YANG Zuohuai, SHI Qing, LI Junfei, et al. Application status and prospect of drilling fluid wall protection technology in drilling construction of saline soil and coarse-grained soil layer[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 41-46.

Key words: borehole construction; drilling fluid wall protection; saline soil; coarse-grained soil; new drilling fluid materials; high-salt-tolerant drilling fluid; composite drilling fluid; eco-friendly drilling fluid

0 引言

在钻孔施工过程中,泥浆护壁技术已成为确保施工安全井壁稳定的关键技术之一。尤其在复杂的地质条件下,钻孔施工常面临诸如孔壁坍塌、塌陷、塌坑等风险,这些问题不仅威胁施工安全,还可能造成不可忽视的经济损失^[1-3]。为此,泥浆护壁技术在防止孔壁破裂、控制渗水、提升施工效率方面发挥着至关重要的作用^[4-5]。在盐渍土和粗粒土层中,传统的泥浆护壁技术面临着诸多挑战。盐渍土的盐分含量通常较高,并具有较强的水溶性和腐蚀性^[6-9]。土体中的盐分会与泥浆中的化学药品发生反应,进而影响泥浆的稳定性^[10],甚至可能导致孔壁坍塌等事故^[11-12]。盐渍土中的高盐环境还可能对施工设备产生腐蚀,进一步增加施工的难度和成本。另一方面,粗粒土层的施工特性也对泥浆护壁技术提出了特殊要求。粗粒土层通常由大颗粒的砂砾和石块组成,这些土体的孔隙率较高,且渗透性强。因此,泥浆在粗粒土层中的流动性和稳定性往往不如细颗粒土层。泥浆容易漏失,无法有效阻止孔壁的变形,导致施工过程中的泥浆护壁效果非常差^[13-17]。如何选择合适的泥浆材料并优化施工工艺成为当前亟待解决的技术难题。

国内外在盐渍土和粗粒土地质条件下的泥浆技术方面取得了一定的进展。在盐渍土地区,国内采用的泥浆材料主要为聚丙烯酸盐泥浆、聚丙烯酸盐改性泥浆等;美国采用的KCl盐渍土钻探泥浆体系具有良好的抑制盐电化学反应的能力,欧洲则发展了一些具有环保优势的泥浆材料,如生物降解型泥浆。在粗粒土地区,我国常用的泥浆材料包括普通泥浆、纤维增强泥浆等;国外则利用改性纤维素等作为泥浆的主要成分。

近年来在新疆典型盐渍土和粗粒土中的钻探施工实践表明,这两类土层极具特殊性,现有的泥浆护壁技术在实践中往往难以满足要求,还存在成孔质量不稳定、环保问题突出、复合型泥浆技术研究和应用较少等问题。因此,探索并总结盐渍土和粗粒土层中泥浆护壁技术的应用现状,评估其优缺点,并提出切实可行的解决方案,不仅具有重要的学术价值,也对工程实践具有指导意义。

1 盐渍土和粗粒土特性分析

1.1 盐渍土

盐渍土是指土中可溶盐分的含量较高,并且在潮湿或干燥环境下盐分会释放到表层,形成结晶盐层的土^[18-19]。盐渍土通常分布在干旱或半干旱地区,由于水分蒸发较强,盐分积聚在土壤表层或根层。这类土壤的特性较为特殊,主要表现在以下几个方面:

(1)化学成分极易破坏泥浆性能:盐渍土中的盐分通常包括氯化钠(NaCl)、硫酸钠(Na₂SO₄)、氯化钙(CaCl₂)等,可溶性盐分在土壤溶液中的浓度较高^[20]。盐分的存在不仅影响土体的结构和物理性质,也可能引发一系列化学反应,进而影响泥浆的性能,如泥浆中的胶体物质和粘土颗粒,在盐渍土环境中可能发生脱水和絮凝作用^[7],导致泥浆的粘度和密度发生变化,进而影响护壁效果。盐分浓度较高时,泥浆中的膨润土等粘土矿物会发生盐化反应,导致泥浆的稳定性降低。

(2)遇水易溶蚀崩解:盐渍土的渗透性相对较低,尤其是在潮湿的环境下,土壤中盐分的积聚形成了天然的屏障,降低了水的渗透性。然而,这种低渗透性并不意味着盐渍土的抗剪强度较高。相反,盐渍土在水合作用下往往容易发生崩解,导致土壤的抗剪强度降低^[21-23]。在钻孔施工中,这一特点会使得泥浆护壁更容易受到影响,尤其是在盐分过多的土层中,泥浆失效的风险显著增加。

1.2 粗粒土

粗粒土是由粒径较大的土颗粒(如砂、砾石等)组成的土层,其具有以下特性:

(1)粒径与孔隙大:粗粒土主要由砂粒、砾石等大颗粒组成,其粒径通常 >0.075 mm。粗粒土的孔隙结构呈现出较高的孔隙率,这使得其具有较强的渗透性。水分在粗粒土中的流动较为自由,泥浆在这种土层中容易发生渗漏,导致护壁失效^[24-26]。相较于细粒土,粗粒土的摩擦力较大,这对钻孔施工过程中的钻头磨损以及泥浆的黏附性提出了更高要求。

(2)易坍塌:粗粒土的渗透性远高于细粒土,水或泥浆容易迅速渗透到周围环境中。这种高渗透

性意味着泥浆在粗粒土层中易于流失,不能充分覆盖孔壁,导致孔壁失去支撑力,甚至引发坍塌。在高渗透性土层中,泥浆的流变性需要特别优化,以确保其具有足够的稳定性来降低渗水的影响。

2 钻孔泥浆护壁技术的应用现状

在盐渍土和粗粒土层中,土层的不同特性对泥浆的性能提出了严格要求,泥浆的选择和配制至关

重要。为了确保钻孔施工的顺利进行,泥浆不仅需要具备良好的护壁功能,还需具备较高的稳定性、流变性、黏附性等特性,以适应土层的特性。

2.1 泥浆类型

根据不同的土质条件和施工需求,泥浆可采用几种常见类型,主要包括膨润土泥浆、聚合物泥浆、油基泥浆和复合泥浆,各泥浆特征如表 1 所示。

表 1 常见泥浆类型及其适用条件			
泥浆类型	主要成分	适用土层	特 点
膨润土泥浆	水、膨润土	黏土、细砂土层	成本低,操作简单,适用于大多数土层,但对盐渍土效果差
聚合物泥浆	聚合物、水	盐渍土、黏土层	提高化学稳定性,抗盐性强,适用于盐渍土
油基泥浆	油、水、黏土	粗粒土、砂砾土层	高渗透性土层中较为稳定,但环境污染较大
复合泥浆	水、聚合物、添加剂	复杂土层、粗粒土层	结合多种材料,适应性广,适用于复杂地质条件

2.2 泥浆配制原则与方法

在高盐环境下,普通膨润土泥浆容易受到盐分的干扰,导致泥浆的黏附力和稳定性下降。因此,在配制泥浆时,通常需要添加防盐剂、稳定剂等化学添加剂,以增强泥浆的稳定性并防止泥浆中的膨润土或其他胶体物质失效^[27-29]。常见的做法是增加聚合物成分,调整泥浆的 pH 值,或通过化学反应固定盐分。

粗粒土层的泥浆配制要侧重于提高泥浆的流变性和黏附性。粗粒土的高渗透性容易导致泥浆流失。因此,通常需要提高泥浆的黏度,确保泥浆在钻孔过程中能够有效填充土层孔隙,防止孔壁坍塌。复合泥浆或聚合物泥浆常常被用于粗粒土钻孔施工,以增强泥浆的黏附性和抗渗透性。

3 存在的问题与挑战

尽管泥浆护壁技术广泛应用于盐渍土和粗粒土层的钻孔施工中,但在实际操作过程中,仍然面临着一些关键技术问题与挑战。

3.1 盐渍土钻孔施工中的技术难题

盐渍土通常具有较强的膨胀性,这对钻孔施工及泥浆护壁技术提出了很多技术挑战。近年来的钻孔施工实践中,经常遇到缩径甚至塌孔等事故,导致井管无法下放至目标位置;在护壁技术方面,主要挑战是泥浆配方需要根据不同盐度不断调整。

3.1.1 泥浆失效与稳定性问题

盐渍土的高盐环境会导致水基泥浆中的膨润

土等胶体物质发生絮凝或沉降,从而失去黏附力,泥浆变得不稳定,无法有效支撑孔壁。这种情况在高盐浓度的土壤中更为明显。此外,膨润土和其他泥浆添加剂在盐渍土中与盐分发生反应,导致泥浆的稠度下降,护壁能力大幅减弱。特别是在盐渍土的深层,盐分渗透性较强,泥浆失效速度较快,无法保持钻孔过程中的孔壁稳定。

3.1.2 泥浆与孔壁黏附性差

盐分具有脱水作用,可能导致泥浆中的水分挥发或结晶,使得泥浆无法充分渗透到土层中,导致泥皮变得薄弱,无法有效包裹孔壁,增加了坍塌的风险。盐渍土中的盐分不仅影响泥浆的稳定性,还可能导致钻具和孔壁的腐蚀,进一步加剧了孔壁的不稳定性,尤其在盐渍土层较深或水位较高的区域。

3.1.3 泥浆配制难度大

为了提高泥浆在盐渍土中的稳定性,需要加入各种化学添加剂(如抗盐剂、稳定剂等),但这些添加剂的选择与配比非常复杂。不同盐渍土的盐分种类、浓度以及其他土质成分不同,因此泥浆配制需要根据实际情况精细调整,增加了施工的难度和不确定性。即使添加了抗盐剂,泥浆的稳定性在盐渍土中仍然可能存在较大波动。尤其在长期施工过程中,泥浆的黏附性和流变性可能会出现变化,需要定期监测和调整。

3.1.4 环境影响与可持续性问题

盐渍土的泥浆常常含有高浓度的盐分和其他矿

物质,这对环境产生一定的污染。泥浆的泄漏和流失可能会污染地下水源,造成生态环境污染。盐渍土的泥浆回收和处理问题较为复杂,地层的高盐成分使得泥浆难以循环使用,并且泥浆处理过程可能产生二次污染,增加施工成本和环保压力。

3.2 粗粒土钻孔施工中的技术难题

粗粒土层通常由砂、砾石等颗粒组成,具有较高的渗透性和较低的黏性。钻孔过程中,粗粒土的特性会导致泥浆护壁效果不佳。

3.2.1 泥浆流失严重

粗粒土的土颗粒较大、孔隙较粗,导致泥浆渗透性较强,造成泥浆流失,护壁效果大打折扣。如果泥浆流失过快,孔壁可能会发生坍塌,造成施工安全隐患。在粗粒土层中,由于土层的粗颗粒较大,泥浆的流动性较差,无法有效地填充土层的孔隙,进一步加剧泥浆的流失。此外,泥浆在粗粒土中滞留时间较短,也很难形成稳定的泥皮。

3.2.2 泥浆黏附性不足

粗粒土的颗粒表面不平整且摩擦力较大,导致泥浆难以黏附在孔壁上,无法有效形成稳定的护壁层。泥浆无法在粗粒土孔壁上形成一层均匀的保护膜,从而失去护壁作用。在粗粒土中,孔壁不够致密且稳定,泥浆很难在孔壁上稳定存在,容易被水流和钻进工具的作用所冲刷,导致孔壁的稳定性下降。

3.2.3 泥浆配制难度大

为了在粗粒土层中保持泥浆的稳定性,通常需提高泥浆的黏度和密度,使其具有较强的支撑力和抵抗流失的能力。然而,增加泥浆的黏度可能会导致其流动性变差,影响钻孔的效率;而提高泥浆密度则可能会加重泥浆的自重,增加对孔壁的压力,甚至造成孔壁的破坏。在粗粒土层中,泥浆的流变性需要根据土层的特点进行精确控制。如果泥浆过于稠密,会降低其流动性,导致钻进困难;如果泥浆过于稀薄,则无法有效支撑孔壁,容易引发坍塌。因此,泥浆配制的精准度和调节难度较高。

3.2.4 孔壁坍塌与施工安全及环保问题

由于粗粒土的孔隙大、渗透性强,泥浆难以稳定支撑孔壁。孔壁容易出现坍塌现象,尤其在钻进过程中,当泥浆流失或无法有效支撑时,孔壁可能会因为土体不稳定而发生垮塌。粗粒土层中的水流对泥皮的冲刷作用较大,水流可能导致泥皮从孔壁剥离,进而引发孔壁的坍塌和泥浆的流失。

为了克服泥浆流失和孔壁坍塌的问题,需要使用更高黏度、更高密度的泥浆,这样会显著增加泥浆的配制成本。同时,由于泥浆需要频繁调整和更换,施工成本也随之上升。粗粒土钻孔施工中使用的泥浆往往包含大量的化学添加剂,这些化学成分可能对环境造成污染。在施工过程中,泥浆可能会流入周围水体或渗透到地下水层,造成水源污染。因此,泥浆的回收和环保处理成为粗粒土钻孔施工中的一个重要挑战。

4 泥浆护壁技术展望

4.1 新型泥浆材料

随着钻探施工技术的不断发展,对泥浆材料的性能要求也逐渐提高。新型泥浆材料的研究不仅关注其护壁效果,还着眼于泥浆的稳定性、环保性及其与不同土层的适配性。未来的泥浆材料研究将主要集中在以下几个方面:

(1)高性能复合泥浆材料:复合泥浆材料通过将多种添加剂或基础材料结合使用,能够在不同土层中实现更好的护壁效果。在传统泥浆的基础上添加特定功能材料,如增稠剂、促凝剂、防腐剂等,可以使泥浆具备更多的特性,更好地适应不同的钻探需求。例如,加入抗盐腐蚀剂的泥浆可以在盐渍土中减小套管的腐蚀速率。未来的研究重点将是开发集多种高性能材料于一体的复合泥浆,这类泥浆材料可以根据不同土层特性进行定制,提供更加灵活和高效的护壁解决方案。

(2)环保型泥浆材料:随着环保要求越来越高,未来的泥浆材料将更加注重环境友好性。采用天然植物纤维、微生物发酵产物、有机物质、生物塑料、生物降解纤维等环保原料制成环保型泥浆^[30-31],可减少对环境的污染。此外,研发可以多次循环使用的环保泥浆,将大大减少泥浆的浪费和污染。自愈性泥浆材料的研发也成为一个重要方向,这类材料在遇到孔壁裂缝时,能够自我修复,延长泥浆的有效期,减少施工过程中的环境影响。

(3)高盐耐受泥浆材料:针对盐渍土层的特殊性,未来的泥浆材料研究将侧重于开发高盐耐受性泥浆。通过加入抗盐剂或优化泥浆配方,使其能在高盐环境下保持良好的稳定性和护壁效果。探索适用于盐渍土中的新型聚合物、胶体材料以及改性泥浆,如聚丙烯酸盐与其他高性能材料(如玻璃纤

维、碳纤维等)进行混合的改性泥浆,以克服盐分对泥浆结构和性能的破坏。

(4)纳米技术在泥浆中的应用:纳米材料具有独特的物理化学性质,如高比表面积、较强的黏附性和稳定性。纳米技术用于泥浆材料中,可增强泥浆的黏附性、提高其流变性和耐久性^[32-33]。例如,纳米级膨润土、纳米纤维素等可成为提高泥浆性能的关键成分。这些纳米材料不仅能够增强泥浆的护壁效果,还可以提升泥浆的抗污染能力和抗渗透性。

4.2 智能化技术应用

智能化技术的发展为泥浆护壁技术的创新提供了新的机遇。随着传感器技术、物联网、人工智能等领域的发展,智能化技术在钻孔泥浆护壁中的应用前景广阔,主要包括:采用传感器、物联网技术实时监测泥浆的性质(如黏度、密度、pH值、温度等),并结合施工现场的实时数据,对泥浆性能进行动态调整。通过智能监测系统,能够及时发现泥浆性能的变化,预测并防止泥浆失效或孔壁坍塌等问题,从而提高施工的安全性和效率。智能控制系统可以根据实时数据自动调节泥浆的配方,优化泥浆的性能^[34-35]。通过人工智能算法分析施工过程中的数据,系统能够自动调整泥浆的密度、流变性和化学稳定性,确保泥浆始终维持最佳状态。这种智能化配方优化技术不仅能提高施工效率,还能降低人工干预和误差,确保施工的连续性和稳定性。在泥浆使用过程中,泥浆的回收和再生是一个重要的环保问题。利用智能化的泥浆回收系统,可以通过传感器检测泥浆的污染程度和剩余可用性,自动启动回收与再生处理流程。通过物联网技术,系统能够实时监测回收泥浆的质量,并自动调整再生流程,实现泥浆的循环利用和绿色施工。

4.3 未来发展方向

未来泥浆护壁技术的研究将朝着更加高效、智能和环保的方向发展,将主要包括:

(1)多功能复合泥浆的研发。随着施工需求的不断变化,未来的泥浆将不仅仅是单一功能的护壁材料,还将具有更多的功能。例如,未来的泥浆可能同时具备防渗、抗盐、降噪、降振等多重功能。复合泥浆的研发将从材料选择、配方设计和施工方案优化等方面进行全面升级,提供更加灵活和高效的护壁解决方案。

(2)绿色环保材料的推广。随着环境保护要求的提高,未来泥浆材料的研发将注重环保和可持续性。除了使用可降解材料外,还需要采用低碳技术、减少泥浆的生产和使用过程中的能耗与排放。泥浆材料的绿色环保性将成为今后研究的一个重要方向。

(3)智能化施工与无人化作业。未来的钻孔施工会进一步向智能化和自动化发展。智能化施工不仅包括泥浆的智能配制与优化,还可能包括无人化的钻孔作业。随着人工智能与机器人技术的进步,未来泥浆护壁技术将实现无人化、远程化的施工管理,大大提高施工效率并减少人为失误。

(4)基于大数据的精准施工管理。大数据分析技术能够对泥浆护壁施工中的各类数据进行深度挖掘,识别潜在的施工风险,并进行精准预测。未来,基于大数据的精准施工管理系统将能够帮助工程师从施工前期开始,根据具体土层特性、施工进度、泥浆性能等多个维度制定最优的施工方案,确保施工过程中的每一步都在可控范围内。

(5)新型泥浆循环利用技术。当前,泥浆的回收和再生技术仍存在一定的技术瓶颈,未来的研究将注重泥浆的高效循环利用,不仅能减少泥浆对环境的污染,还能降低施工成本。通过先进的过滤、分离和化学处理技术,泥浆将能够在不影响性能的情况下循环使用,成为环保和节能的典范。

5 结论

本文总结了盐渍土和粗粒土钻孔施工中的泥浆护壁技术现状,分析了当前面临的主要技术难题,并展望了未来技术创新的方向,得出如下主要结论:

(1)盐渍土和粗粒土分别具有不同的土特性,给泥浆护壁技术带来了不同的技术难题。盐渍土中的高盐浓度和膨胀性容易导致泥浆失效,尤其是在深层盐渍土中,泥浆稳定性和护壁效果难以维持。而粗粒土的高渗透性和低黏附性使得泥浆易于流失,孔壁难以稳定。因此,针对这些特殊土层的泥浆材料和施工方法的研究至关重要。

(2)在盐渍土和粗粒土层中,泥浆的稳定性、流变性以及对孔壁的支持作用还存在较大不足。随着科技的发展,新型复合泥浆材料、智能化监测与调节系统的引入,将显著提升泥浆护壁技术的稳定性和效率。未来,泥浆材料将更加环保、多功能化,

并且智能化技术的应用将进一步推动施工管理的自动化和精准化。

(3)未来的泥浆护壁技术应朝着高性能、多功能、绿色环保的方向发展。新型泥浆材料,特别是高盐耐受和复合型泥浆,将成为解决盐渍土和粗粒土施工难题的有效手段。智能化技术的应用,将使泥浆护壁技术更加高效、环保和可持续。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Qin S, Cheng Y, Huang H, et al. Pressure infiltration behavior and fluid loss of bentonite slurry: A comparative study of two bentonite slurries[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024, 61(5): 945-958.
- [3] 庞少聪, 安玉秀, 田野. 抗高温钻井液体系国内外研究进展与发展建议[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 82-92.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郭东悦, 刘浩, 杨庆港, 等. 固化细粒氯盐盐渍土工程特性研究[J]. 施工技术, 2023, 52(22): 20-25, 31.
- [7] Qin S, Zhou W H, Xu T. Effects of seawater on the infiltration behavior of bentonite slurry into sand[J]. Construction and Building Materials, 2023, 371: 130759.
- [8] Cui W, Liu D, Song H F, et al. Experimental study of salt-resisting slurry for undersea shield tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 98: 103322.
- [9] Wang Z R, Ding W T, Zhu Z J, et al. Experimental study on rheological behaviors of Na-bentonite slurries under seawater intrusion[J]. Construction and Building Materials, 2022, 357: 129369.
- [10] 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, 2022, 42(4): 658-663.
- [11] 夏凯, 吴仲岩, 王松, 等. 高含盐量高密度钻井泥浆降粘剂的合成及其降粘性能研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 465-470.
- [12] 庞少聪, 安玉秀, 马京缘. 近十年国内钻井液降粘剂研究进展[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 96-103.
- [13] 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.
- [14] 刘晋余, 丁建文, 刘慧刚, 等. 泥水盾构施工循环掘进泥浆制备试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(3): 929-938, 958.
- [15] 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.
- [16] Xu T, Bezuijen A. Experimental study on the mechanisms of bentonite slurry penetration in front of a slurry TBM[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103052.
- [17] Xu T, Bezuijen A. Bentonite slurry infiltration into sand: filter cake formation under various conditions[J]. Geotechnique, 2019, 69(12): 1095-1106.
- [18] 马欢欢, 常立君. 水盐含量对寒旱区黄土状盐渍土强度特性和渗透特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12193-12203.
- [19] 齐添, 赵川, 刘飞禹, 等. 硫酸盐渍土-混凝土界面循环剪切特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(S2): 4280-4288.
- [20] 张红军, 王强, 许艳, 等. 黄河三角洲盐渍化土壤改良脱盐规律及效果评价[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 683-686.
- [21] 赵辉伟, 邵慧. 基于超声波速的冻融盐渍土强度预测模型构建[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2): 612-624.
- [22] 丁士君, 李绍民, 孔森, 等. 淡水诱因干湿循环下超氯盐渍土强度演变[J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 785-799.
- [23] 李生伟. 冻融循环下盐渍土力学特性及本构模型研究综述[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 177-182.
- [24] 卜建清, 王天亮. 冻融及细粒含量对粗粒土力学性质影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 608-614.
- [25] 王志兵, 翁峻择, 孙广, 等. 三维重构下整体形状参数的砂土渗透性分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 417-424.
- [26] 许兆栋, 李鸣, 洪昌伟, 等. 含黏粒砂土颗粒级配对比渗透性的影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 179-182.
- [27] Yang Y L, Reddy K R, Zhang T, et al. Enhanced contaminant retardation by novel modified calcium bentonite backfill in slurry trench cutoff walls[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126285.
- [28] Sreedharan V, Puvvadi S. Compressibility behaviour of bentonite and organically modified bentonite slurry[J]. Géotechnique, 2013, 63(10): 876-879.
- [29] Shi F J, Feng S J, Zheng Q T, et al. Effect of polyanionic cellulose modification on properties and microstructure of Calcium bentonite[J]. Applied Clay Science, 2022, 228: 106633.
- [30] 王梦园, 薛曼, 梁梦佳, 等. 改性柚子皮降滤失剂的合成与评价研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 84-93.
- [31] 李冰乐, 王胜, 袁长金, 等. 复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇绿色防塌冲洗液研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 85-91.
- [32] 刘徐三. 纳米材料对低固相冲洗液性能影响的研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 61-67.
- [33] 安莹慧, 汪伟, 张毅, 等. 硅基材料在钻井液中的应用及研究进展[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 64-73.
- [34] 李根生, 宋先知, 田守增. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 1-8.
- [35] Bello O, Holzmann J, Yaqoob T, et al. Application of artificial intelligence methods in drilling system design and operations: A review of the state of the art[J]. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, 2015, 5(2): 121-139.

(编辑 王文)