

基于电容去离子技术的甲酸铯泥浆循环利用 实验研究

朱诺¹, 孙平贺¹, 黄小程¹, 冯美贵², 曹 函¹, 邓盈盈¹, 张绍和¹

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:甲酸铯泥浆作为自然增重型泥浆,能够解决高温高压环境下固相增重剂沉降和卡磨钻的问题,在深地钻探中展现出广阔的应用前景。然而,在甲酸铯泥浆的回收过程中,可溶干扰离子的分离难度较大,限制了其循环利用与成本控制。针对这一问题,研究提出了一种基于电容去离子技术(CDI),以去除甲酸铯泥浆中的干扰离子,实现甲酸铯泥浆的循环利用,从而降低使用成本。分析了甲酸铯的理化特性及其在高温高压环境下的稳定性,通过搭建电吸附实验平台,探究了CDI技术对不同价态离子(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+})的去除效率及电极脱附再生性能。实验结果表明,在1.0 V电压条件下,CDI对 Na^+ 和 Mg^{2+} 的去除率最高可达85.2%和67.1%,而 Al^{3+} 去除率低于30%;脱附实验中, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 溶液电导率从2.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 分别恢复至66.2、57.6、32 $\mu\text{S}/\text{cm}$,说明电极能够通过脱附实现再生。研究揭示了电压、浓度与离子电荷数对去除率的影响规律,证实CDI技术对去除泥浆中的干扰离子具有一定潜力。本研究为甲酸铯泥浆的绿色循环利用提供了新思路。

关键词:电容去离子技术;甲酸铯;抗高温泥浆;泥浆循环利用;吸附;脱附

中图分类号:P634.6;TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0144-07

Experimental study on the recycling of cesium formate mud based on capacitive deionization technology

ZHU Nuoyi¹, SUN Pinghe¹, HUANG Xiaocheng¹, FENG Meigui², CAO Han¹, DENG Yingying¹, ZHANG Shaohe¹

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, CGS, Beijing 100083, China)

Abstract: As a natural weight-increasing mud, cesium formate mud can solve the problems of solid phase weighting agent sedimentation and sticking in a high-temperature and high-pressure environment, and shows a broad application prospect in deep drilling. However, in the recovery process of cesium formate mud, the separation of soluble interfering ions is difficult, which limits its recycling and cost control. In order to solve this problem, a treatment method based on capacitive deionization technology (CDI) is proposed to remove the interfering ions in the cesium formate mud, realize the recycling of the cesium formate mud and reduce the cost of use. The physical and chemical properties of cesium formate and its stability in a high-temperature and high-pressure environment were analyzed. The removal efficiency of different valence ions (Na^+ , Mg^{2+} , Al^{3+}) and the desorption and regeneration performance of the electrode were investigated by constructing an electrosorption experimental platform. The experimental results show that the removal rate of Na^+ and Mg^{2+} by CDI can reach 85.2 % and 67.1 %, while the removal rate of Al^{3+} is less than 30 % under 1.0V. In the desorption experiment, the conductivity of Na^+ , Mg^{2+} and Al^{3+} solutions recovered from 2.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 66.2, 57.6, 32 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively, indicating that the electrode could be regenerated by desorption.

收稿日期:2025-05-30; 修回日期:2025-07-17 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.022

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术与装备”(编号:2024ZD1003100);中国地质调查局地质调查项目“绿色勘查钻探应用示范”(编号:DD20243154);中南大学研究生自主探索创新项目(编号:1053320241405)

第一作者:朱诺一,女,汉族,2002年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为甲酸铯废弃泥浆,湖南省长沙市麓山南路932号,245011114@csu.edu.cn。

引用格式:朱诺一,孙平贺,黄小程,等.基于电容去离子技术的甲酸铯泥浆循环利用实验研究[J].钻探工程,2025,52(S1):144-150.

ZHU Nuoyi, SUN Pinghe, HUANG Xiaocheng, et al. Experimental study on the recycling of cesium formate mud based on capacitive deionization technology[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):144-150.

The study reveals the influence of voltage, concentration and ion charge number on the removal rate, and confirms that CDI technology has certain potential for removing interfering ions in mud. This study provides a new idea for the green recycling of cesium formate mud.

Key words: capacitive deionisation technology; cesium formate; high-temperature resistant mud; mud recycling; adsorption; desorption

0 引言

随着深地钻探的不断推进,高温高压井的数量逐渐增多,对泥浆性能的要求也越来越高。泥浆是钻探作业中不可或缺的一环,具有清洗钻孔、携带岩屑、冷却钻头、润滑钻具、稳定井壁和平衡地层压力等多重作用。然而,传统泥浆在高温高压环境下往往会出现一系列问题,如高温导致处理剂失效,钻、完井液的固相承载能力降低,引发重晶石的动态和静态沉降^[1],导致当量循环密度过高、摩擦阻力增大^[2]。这不仅会影响钻探效率,还可能增加井控风险,严重影响钻井作业的安全性和经济效益。1999年9月,壳牌公司为了解决高温高压井遇到的泥浆失效问题,研发了甲酸铯盐水作为射孔液,并在井底温度185℃的Shearwater油田首次使用。甲酸铯盐水因其出色的抗高温性能,在国外的钻、完井工程中迅速得到推广应用。Statoil(挪威石油公司)从2001年开始在北海道的高温高压井中使用甲酸铯钻、完井液进行作业。在Huldra和Kvitebjørn油田进行了长达7年的实地应用后,研究者发现,甲酸铯泥浆能够有效解决高温高压井中由于重晶石沉降引发的井控问题,极大地减少损伤地层和堵塞筛管^[3]。截至2009年10月,甲酸铯钻、完井液已在国内外许多环境敏感地区及高温高压油气钻井、小井眼钻井、软管钻井、完井、修井等作业中成功应用达220井次^[4]。

目前甲酸铯钻、完井液体系在实际应用中的表现优异,已被证实其在提高油气产率、降低卡钻风险等方面具有显著优势。与传统的水基、油基泥浆体系相比,甲酸铯泥浆体系具有热稳定好、腐蚀性低、无储层损害、润滑性好、环境友好和页岩抑制能力强等优点^[5-7],在万米深井的高温高压环境中有着广阔的应用前景^[8]。甲酸铯泥浆体系主要成分是高浓度的甲酸铯盐水,开展对甲酸铯泥浆循环利用的研究,对于降低使用成本、促进推广应用具有重要意义。

电容去离子技术(Capacitive Deionization,

CDI)是一种利用电吸附原理去除水中可溶离子的技术,其原理是基于H.von Helmholtz提出的双电层理论,通过施加外加电场驱动离子吸附与脱附。如图1所示,当溶液流经一对带相反电荷的电极时,阳离子向负极迁移并被吸附,阴离子则被正极捕获,从而降低溶液离子浓度。电极吸附饱和后,通过电极反接或短路使离子脱附,实现电极再生^[9]。与常用的焚烧、机械法、絮凝法^[10]等方法相比,CDI技术具有吸附效率高、能耗低及可再生性强等优势^[11],还能通过优选电极材料和参数吸附有机与无机污染物^[12],目前多运用于海水淡化和污水处理等领域^[13-15]。

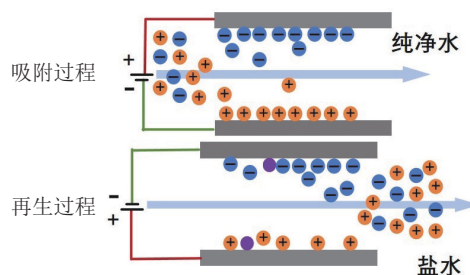


图1 CDI技术原理

将CDI技术引入甲酸铯泥浆的循环利用,有望解决甲酸铯泥浆中重金属离子和盐离子难以去除的难题,能提高甲酸铯泥浆的回收利用率,降低成本,具有重要的理论研究价值和实际应用意义。基于此,本研究搭建室内实验平台,开展了对甲酸铯泥浆中常见杂质离子(如 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Al^{3+})的吸附去除实验,研究结果可以为甲酸铯泥浆的循环利用提供新的思路,有助于推广甲酸铯泥浆的工程应用,符合绿色钻探的要求。

1 甲酸铯泥浆特性分析

1.1 甲酸铯物理化学性质

甲酸铯(HCOOCs)外观为白色晶体,其水溶液无色透明,化学结构由铯离子(Cs^+)与甲酸根离子(HCOO^-)通过离子键结合,晶体结构如图2所示。

由于铯离子半径较大,导致甲酸铯的晶格能较低,同时甲酸根离子具有较高水合能,因此甲酸铯极易溶于水。甲酸铯溶解时电离出的甲酸根离子(HCOO^-)会与水中的氢离子(H^+)发生水解反应,生成甲酸(HCOOH)和氢氧根离子(OH^-),使得甲酸铯盐水呈弱碱性。该特性使其与多数pH调节剂(如碳酸盐、氢氧化钠)相容,能有效缓冲 CO_2 、 H_2S 等酸性气体的侵入,维持体系稳定。

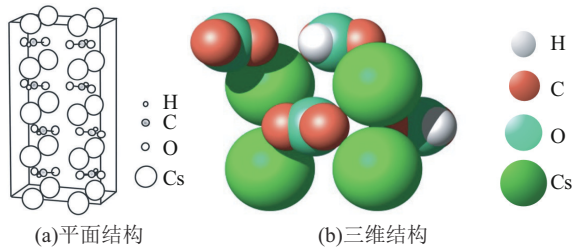


图2 甲酸铯晶体结构

1.2 甲酸铯泥浆性能

自然增重是甲酸盐泥浆的特点之一,图3展示了甲酸铯溶液密度与浓度的关系。当加量达到80%时,溶液密度达到了 2.2 g/cm^3 ,在实际钻井应用中可以通过控制甲酸铯的加量来调配所需密度的泥浆,不需要另外添加加重材料。与含固相增重剂的传统泥浆相比,甲酸铯泥浆显著降低了加重材料在高温高压环境下性能退化或失效的风险,解决了固相增重剂导致的卡磨钻等问题,能够更好地适应深地钻探的需求。同时甲酸铯泥浆还具有较强的热稳定性,已证实其在 $236\text{ }^\circ\text{C}$ 、 96 MPa 下长期稳定,组分与性能无显著变化。室内实验结果也表明,在甲酸铯泥浆体系中,黄原胶、淀粉等添加剂的抗高温性能有明显提升。

图4(a)为饱和甲酸铯与饱和甲酸钾体积比为

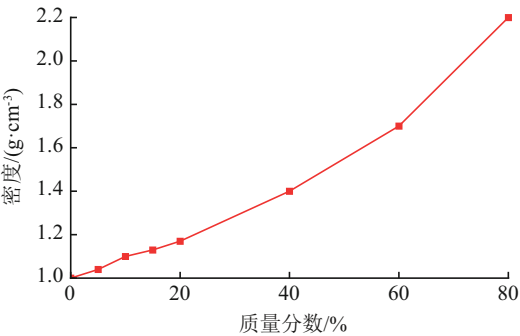


图3 甲酸铯水溶液密度与质量分数关系

1:1的混合溶液,甲酸铯泥浆由该混合溶液与黄原胶、淀粉、pH缓冲液与黏土配置而成。图4(b)为使用过的甲酸铯泥浆,外观为浅褐色浓稠悬浮液。两者的密度、pH、沸点等性质如表1所示。废弃泥浆中含有 Na^+ 、 Li^+ 、 Rb^+ 、 Cl^- 等杂质离子,去除泥浆中的杂质离子,对于实现甲酸铯泥浆的净化与循环利用、发挥其经济效益具有重要意义。



图4 甲酸铯-甲酸钾溶液与甲酸铯废弃泥浆

表1 甲酸铯-甲酸钾溶液与甲酸铯废弃泥浆性能

溶 液	密度/(g·cm ⁻³)	pH	沸点/℃	黏度/(mPa·s)
甲酸铯-甲酸钾溶液	1.92	11	145	15
甲酸铯废弃泥浆	1.96	11	145	300

2 实验装置以及实验方法

2.1 CDI装置原理与平台搭建

CDI实验装置包括电吸附装置、电源、蠕动泵和电导率仪四部分。电吸附装置为发生离子吸附与脱附的主要场所,是该系统的核心,由亚克力端板、硅胶垫片、集流体、活性炭电极片、亲水隔膜与硅胶水流通道的组成,如图5所示。电源正负极连接电吸附装置的2片集流体钛板,蠕动泵将待处理溶液泵入电吸附装置中并在其中完成离子的吸附过程,随后溶液通过出水管回到容器中。完整装置见图6。

2.2 实验方法

本研究采用不同浓度的氯化钠、氯化镁、氯化铝溶液模拟泥浆体系中的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 杂质离子,以不同目标离子初始浓度(5、10、15、20、25 mg/L)、电压(0.7~1.1 V)为变量,探究处理参数对吸附性能的影响规律。

吸附实验时,将稳压直流电源调节至实验所需电压,打开蠕动泵,液体开始在装置内循环,循环10 min至电极吸附量饱和为一次吸附,一次吸附结束

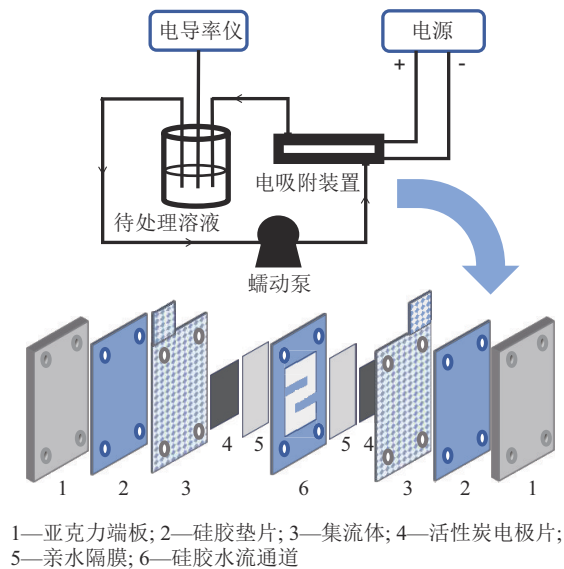


图5 CDI实验装置和电吸附装置配置示意



图6 全套装置实物

后,需短接电极释放盐离子以实现电极再生。每组吸附实验需重复进行三次电极饱和的吸附过程,即称为循环吸附 30 min。

脱附实验中,先让活性炭电极片充分吸附饱和至溶液电导率稳定。电极吸附饱和后,用去离子水清洗实验装置,用装有 15 mL 去离子水的烧杯更换盐溶液,测量记录初始去离子水的电导率。短接 CDI 装置的集流体开始脱附实验,打开蠕动泵并开始计时,使饱和电极上的离子脱附释放至去离子水中,每隔 1 min 记录去离子水的电导率。

2.3 评价指标

由于在同一温度下,离子浓度与其溶液电导率呈线性关系,可由电导率-浓度校准曲线进行推导^[16],因此本研究通过电导率仪的读数表征溶液离子浓度变化。根据吸附前后电导率值,计算 CDI 装置的离子去除率,如式(1)所示:

$$\text{离子去除率} = 1 - \frac{\text{吸附后的电导率}}{\text{吸附前的电导率}} \quad (1)$$

3 实验结果与讨论

3.1 离子浓度对离子去除率的影响

电压恒定为 1.0 V,不同初始浓度循环吸附 30 min 后,3 种离子的去除率见表 2。

表2 浓度为变量的单一离子去除率

浓度/(mg·L ⁻¹)	Na ⁺ 电导率/(μS·cm ⁻¹)			Mg ²⁺ 电导率/(μS·cm ⁻¹)			Al ³⁺ 电导率/(μS·cm ⁻¹)		
	吸附前	吸附后	去除率/%	吸附前	吸附后	去除率/%	吸附前	吸附后	去除率/%
5	19.46	4.60	76.4	26.60	8.74	67.1	24.50	19.93	18.7
10	33.40	4.94	85.2	54.80	19.30	64.8	37.30	28.70	23.1
15	49.10	12.57	74.4	75.20	30.70	59.2	56.90	40.30	29.2
20	61.80	17.30	72.0	97.40	51.60	47.0	75.90	57.90	23.7
25	84.10	18.97	77.4	109.40	74.80	31.6	88.00	68.20	22.5

根据表 2 中的数据,绘制离子去除率与浓度关系曲线,如图 7 所示。由图 7 可见,在 3 种离子中,Na⁺的去除率最高,随着溶液浓度上升,Na⁺去除率保持在 70% 以上,在离子浓度为 10 mg/L 时最高,达到了 85.2%,离子去除率总体上较为稳定。而 Mg²⁺的去除率随浓度升高表现出明显的下降趋势,从 67.1% 锐减至 31.6%。Al³⁺的去除率显著低于前两者,在 10%~30% 之间波动,且浓度变化对去除率影响不大,在浓度 15 mg/L 时出现不明显的峰值。

Na⁺、Mg²⁺和 Al³⁺在不同浓度下的去除率呈现出不同的变化规律,反映了离子特性对去除效率的影响。

Na⁺作为单价离子,较易受到电场的驱动,迁移性较强,电极表面吸附效率高,且在不同浓度下,与电极表面的相互作用较弱,离子间的竞争作用相对较小,这使得 Na⁺在较宽的浓度范围内能够较为稳定地被吸附。而 Mg²⁺的去除率显著下降,表明高电荷密度的 Mg²⁺受到较强的电场效应和离子竞争的抑制。尤其在高浓度溶液中,电极表面的吸附能力

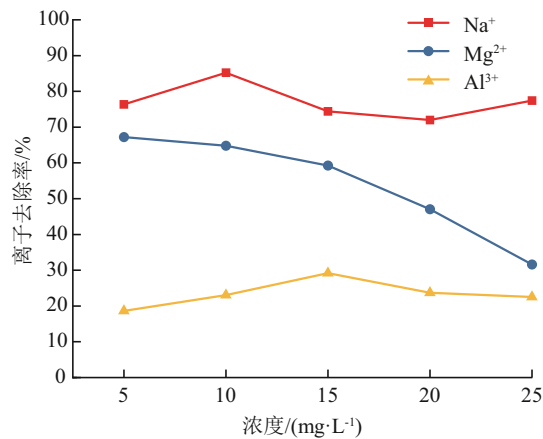


图7 浓度为变量的单一离子去除率

趋于饱和, Mg^{2+} 无法继续有效吸附, 导致其去除率下降。至于 Al^{3+} , 虽然其具有较高的电荷密度和较强的电极相互作用, 但由于其水合能极高 (4665 kJ/mol), 所形成的稳定水合层会抑制其与电极表面的直接吸附; 同时 Al^{3+} 在溶液中易水解生成羟基络合物 (如 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$) 或 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体, 会进一步堵塞孔隙并降低电荷密度。因此调控浓度变化对 Al^{3+} 去除率的影响不大。

3.2 电压对离子去除率的影响

电压是吸附过程中的关键因素, 不同电压下各浓度的3种离子去除率实验数据结果见表3。

表3 不同电压下各浓度的离子去除率

电压/V	离子	5 mg/L 电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)			10mg g/L 电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)			15 mg/L 电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		
		吸附前	吸附后	去除率/%	吸附前	吸附后	去除率/%	吸附前	吸附后	去除率/%
1.1	Na^+	23.60	12.17	48.4	44.80	11.39	74.6	52.70	10.51	80.1
1.0		19.46	4.60	76.4	33.40	4.94	85.2	49.10	12.57	74.4
0.9		20.10	7.94	60.5	42.20	21.10	50.0	49.80	24.10	51.6
0.8		21.00	13.12	37.5	36.30	13.10	63.9	48.30	25.50	47.2
0.7		20.30	13.26	34.7	36.30	18.87	48.0	48.60	28.30	41.8
1.1	Mg^{2+}	31.80	7.18	77.4	60.80	32.80	46.1	74.20	46.80	36.9
1.0		26.60	8.74	67.1	54.80	19.30	64.8	75.20	30.66	59.2
0.9		30.30	9.26	69.4	63.60	27.40	56.9	76.80	41.20	46.4
0.8		30.60	20.90	31.7	62.00	47.00	24.2	81.00	49.80	38.5
0.7		22.10	14.10	36.2	62.40	47.60	23.7	71.60	54.20	24.3
1.1	Al^{3+}	22.90	17.02	25.7	38.20	26.70	30.1	56.60	40.10	29.2
1.0		24.50	19.93	18.7	37.30	28.70	23.1	56.90	40.30	29.2
0.9		22.90	18.23	20.4	38.20	31.20	18.3	52.80	38.90	26.3
0.8		21.40	19.87	7.1	37.60	31.40	16.5	52.60	39.90	24.1
0.7		23.80	21.60	9.2	36.90	32.60	11.7	56.90	43.20	24.1

根据表3数据, 绘制离子去除率与电压关系曲线, 如图8所示。 Na^+ 在 5、10 mg/L 浓度下, 去除率随电压升高呈先增后降的趋势, 在 1.0 V 时达到最大值; 但在 15 mg/L 浓度下, 去除率随电压上升而持续增长。 Mg^{2+} 与 Na^+ 部分相似: 在 5 mg/L 溶液中, 去除率随电压上升而增大, 而 10、15 mg/L 浓度下, 均在 1.0 V 处出现峰值拐点。 Al^{3+} 的去除率显著低于 Na^+ 、 Mg^{2+} , 且电压调控效果有限, 尽管 3 种不同浓度溶液中的 Al^{3+} 去除率都随电压增大而增大, 但最大值也仅为 30.1% (10 mg/L, 1.1 V)。

3 种实验离子在电压小于 1.0 V 时, 总体都呈现去除率随电压升高而增大的趋势, 这是因为电压增

大, 离子所受电场力增强, 加速离子向电极的迁移, 从而提高了吸附效率。 Na^+ 与 Mg^{2+} 部分曲线在电压 1.0 V 时出现拐点, 是由于电压逐渐接近水电解理论值 1.23 V, 开始产生析氢反应^[17], 干扰了吸附过程, 导致效率下降。而 Al^{3+} 因为受到水合效应和电极孔隙堵塞的限制, 去除率总体较低, 氢副反应影响不明显, 因此未出现类似拐点。 3 种离子的差异揭示了吸附机制中离子特性 (水合能、电荷数、粒径) 与浓度-电压协同作用的关键影响: Na^+ 、 Mg^{2+} 依赖电场驱动与双电层优化, 而 Al^{3+} 受限于强水合作用和高电荷密度, 需针对性优化电极材料与工艺参数以提升去除效率。

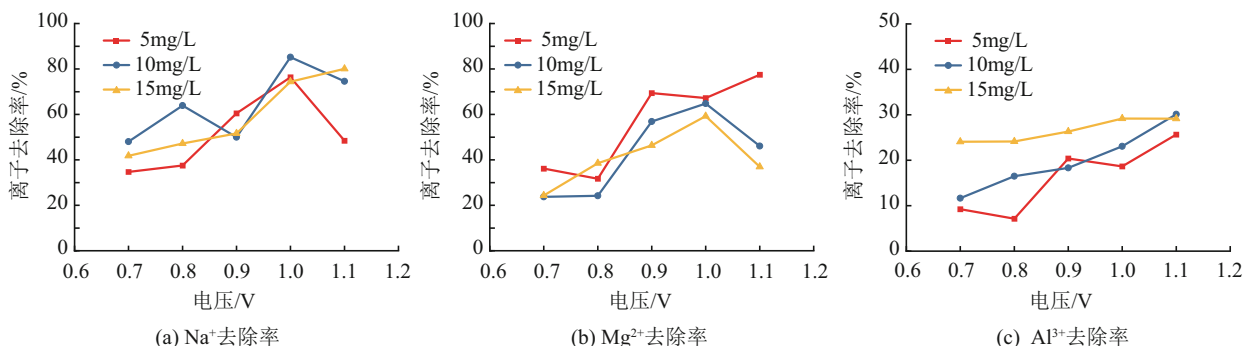


图8 以电压为变量的不同浓度离子去除率

3.3 吸附-脱附过程研究

在1.0 V、室温条件下,将3种不同离子的吸附-脱附实验数据结果按时间-电导率绘图,如图9所示。

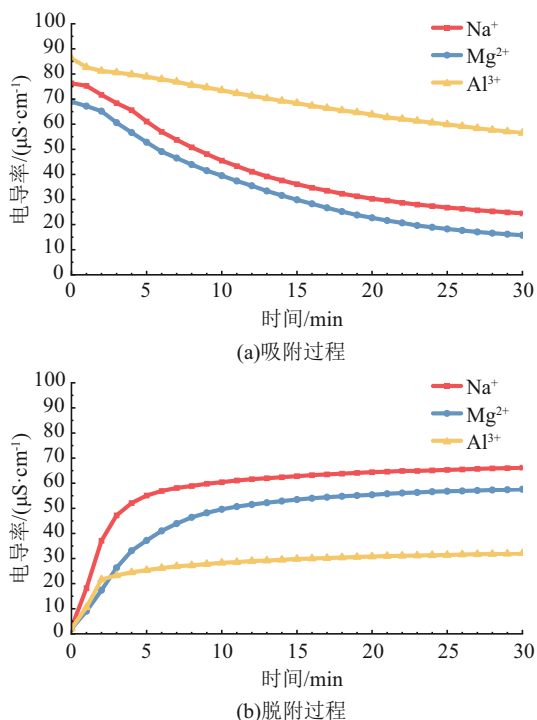


图9 3种价电离子吸附与脱附过程电导率随时间变化

从分图9(a)可看出,在吸附阶段,3种离子的电导率均随时间变化呈现单调下降的趋势,但由于离子性质的不同,每条曲线的下降速率和幅度有所不同。 Na^+ 电导率从 $73.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 降至 $24.5 \mu\text{S}/\text{cm}$,初期吸附平缓,后期因微孔内扩散阻力增大趋于稳定,其单价电荷导致双电层吸附主导作用较弱; Mg^{2+} 电导率降幅最大($69 \rightarrow 15.77 \mu\text{S}/\text{cm}$),前10 min下降50%,得益于其二价电荷增强静电吸附及

较小水合半径(0.43 nm)促进微孔扩散; Al^{3+} 降幅最小($86.2 \rightarrow 56.5 \mu\text{S}/\text{cm}$),因其易水解生成大体积羟基络合物(如 $[\text{Al}(\text{OH})]^{2+}$),堵塞微孔并引发电荷排斥,导致吸附效率低下。

由分图9(b)可见,脱附阶段电导率呈现快速上升后趋缓的特征。 Na^+ 脱附速率最快,0到3 min电导率从 $2.47 \mu\text{S}/\text{cm}$ 飙升至 $47.2 \mu\text{S}/\text{cm}$,源于弱静电力吸附及微孔扩散阻力小; Mg^{2+} 脱附初期略慢于 Na^+ (5 min达 $37.2 \mu\text{S}/\text{cm}$),但强静电作用使其后期释放趋缓; Al^{3+} 脱附初期增速最快(2 min达 $21.6 \mu\text{S}/\text{cm}$),因其主要吸附于电极表面或介孔入口,无需克服微孔阻力,但水解产物的孔道堵塞导致后期停滞。3类离子的行为差异揭示了电荷数、水合半径及水解特性对吸附动力学与脱附效率的协同调控:高电荷增强吸附但抑制脱附,低水合半径促进微孔扩散,水解反应则通过产物形态改变限制整体效能。

4 结论与展望

本研究分析了甲酸铈泥浆在高温高压环境下的性能优势,探讨了CDI技术对甲酸铈泥浆中常见干扰离子的去除效率,得到了以下几点结论:

(1)本研究将CDI技术引入甲酸铈泥浆的循环利用中,搭建了CDI室内研究平台,并研究了离子浓度和电压对离子去除率的影响规律,以及电极脱附再生的规律。

(2)基于本平台的研究,溶液中 Na^+ 的最优去除条件为初始浓度 $10 \text{ mg}/\text{L}$ 、工作电压 1.0 V , Mg^{2+} 最优条件为初始浓度 $5 \text{ mg}/\text{L}$ 、工作电压 1.1 V , Al^{3+} 最优条件为初始浓度 $10 \text{ mg}/\text{L}$ 、工作电压 1.1 V 。在最优条件下,单价离子(Na^+)去除率最高达85.2%,双价离子(Mg^{2+})可达77.4%,三价离子(Al^{3+})吸附效

率为30.1%。

(3)脱附阶段 Na^+ 与 Mg^{2+} 脱附率较高,在1.0 V工作电压下脱附30 min后, Na^+ 溶液电导率恢复至 $66.2\ \mu\text{S}/\text{cm}$, Mg^{2+} 恢复至 $57.6\ \mu\text{S}/\text{cm}$, Al^{3+} 恢复至 $32\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

(4)未来研究将进一步开展CDI对铯离子(Cs^+)的吸附-脱附实验,研究CDI对铯离子的吸附规律;通过添加膨润土、钻屑等材料来模拟污染泥浆环境,探讨多离子竞争下的吸附机制。此外,还需评估CDI技术规模化应用的经济性及与现有泥浆处理工艺的兼容性,推动其从实验室向工程化过渡。

参考文献:

- [1] 王元庆,许明标,周明明,等.高温无固相甲酸铯钻井液室内研究[J].河南科技,2013(2):86-87.
- [2] 邢世宽,孙平贺,朱俊毅,等.固相含量对盾构泥浆性能的影响研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1537-1543.
- [3] 刘红梅,徐超山.应用甲酸铯钻井完井液成功攻克北海高温高压井施工难题[J].国外油田工程,2009,25(3):26-27.
- [4] 夏建国,严新新.用高密度甲酸铯盐水完成大斜度井钻井、完井作业及其裸眼地层的评价——2004—2006年Kvitebjørn气田的实践[J].国外油田工程,2008(1):30-40.
- [5] 史凯娇,徐同台.甲酸铯/钾无固相钻井液和完井液研究[J].石油钻探技术,2011,39(2):73-76.
- [6] 彭芳芳,魏安超,徐同台,等.甲酸铯钻、完井液的特性与应用[J].油田化学,2010,27(2):233-238.
- [7] 易绍金,向兴金,曾繁涤.环境可接受的甲酸盐钻井完井液性能探讨[J].油气田环境保护,2000(3):40-43.
- [8] 高元,李小江,刘仍光.超高温井固井水泥浆体系研究与应用[J].钻探工程,2025,52(1):109-114.
- [9] Lin S, Yang X, Liu L, et al. Electrosorption of cadmium and arsenic from wastewaters using nitrogen-doped biochar: Mechanism and application [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301:113921.
- [10] 王心龙,孙平贺,赵明哲,等.不同固结因素对废弃泥浆含水率及渗透性的影响[J].环境工程,2022,40(8):84-89.
- [11] 张可佳,李俊峰,冯雪婷,等. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXenes}$ 电容去离子体系对化工废水中 Cu^{2+} 的去除性能研究[C]//2023年水环境污染防治技术研讨会论文集.2023:61-68.
- [12] 彭博一,李晓东,王康,等.废弃无固相钻井液无害化处理技术研究与应用[J].钻探工程,2025,52(2):45-50.
- [13] Dahiya S, Singh A, Mishra B K. Capacitive deionized hybrid systems for wastewater treatment and desalination: A review on synergistic effects, mechanisms and challenges [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 417:128129.
- [14] 严国泽,左彬,刘少卿,等.电容去离子海水提铀的机遇与挑战[J].物理化学学报,2025,41(4):28-45.
- [15] 贺子烜,王继雪,宋春玲,等.电容去离子技术分离氯和硝酸根离子的研究进展[J].山东化工,2025,54(1):89-94.
- [16] 邢文乐.多孔炭电极的制备及其电容去离子性能与机理研究[D].长沙:湖南大学,2021.
- [17] 闫芳,王涛,张超群,等.水电解制氢技术的工业应用[J].现代化工,2025,45(S1):366-369.

(编辑 王跃伟)