

蒋金生, 孙皓, 赵杰, 等. 循环造粒流化床工艺处理循环冷却水中试[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 124-130.

Jiang J S, Sun H, Zhao J, et al. Pilot-scale test of circulating granulation fluidized bed system process for circulating cooling water treatment [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 124-130.

循环造粒流化床工艺处理循环冷却水中试

蒋金生¹, 孙皓², 赵杰², 张杰², 李恺弘³, 黄廷林^{3,*}

(1. 国家石油天然气管网集团有限公司甘肃分公司, 甘肃兰州 730000; 2. 国家管网集团联合管道有限责任公司西部分公司, 新疆乌鲁木齐 830063; 3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安 710055)

摘要 【目的】针对油气输送管网系统中循环冷却水、排污水等水体中普遍存在的硬度高及悬浮物含量高的问题, 传统化学软化工艺存在药耗高、污泥量大、运行管理复杂等不足, 亟需开发高效、稳定、适应性强的处理技术。本文以循环造粒流化床技术为核心, 系统评估其在油气输送管网循环水、排污水软化与除浊处理中的应用效果及工程应用潜力。【方法】采用化学结晶流化床与结团造粒流化床相结合的中试系统, 对典型高硬度循环水、排污水开展连续运行试验。通过调控上升负荷、药剂投加量、反应区与分离区工艺配置以及系统运行流程等关键参数, 系统考察各运行条件对硬度离子去除、颗粒生成与稳定生长、悬浮物去除及系统运行稳定性的影响机制, 并在此基础上优化工艺参数, 构建适用于油气输送管网水质特征的最佳工艺路径。【结果】系统在高镁离子和多变浑浊度水质下运行稳定, 总硬度去除率可达到 82% 以上, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 去除率分别可达到 87%、71% 以上, 出水浑浊度稳定低于 3 NTU, 系统处理成本不高于 1.371 元/ m^3 , 系统连续运行处理效果稳定, 对不同水质、水量的原水具有良好的适应性。【结论】循环造粒流化床系统可实现对循环水、排污水的高效软化与除浊处理, 具有处理效率高、工艺流程简洁、系统占地面积小以及污泥量低等优点, 为油气输送管网系统中循环水短流程、集成化高效处理提供了技术参考。

关键词 油气输送管网压气站 循环冷却水 化学诱导结晶 结团造粒 软化 除浊

中图分类号: X703 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)04-0124-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.014

Pilot-Scale Test of Circulating Granulation Fluidized Bed System Process for Circulating Cooling Water Treatment

Jiang Jinsheng¹, Sun Hao², Zhao Jie², Zhang Jie², Li Kaihong³, Huang Tinglin^{3,*}

(1. National Petroleum and Natural Gas Pipeline Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

2. West Branch of United Pipeline Co., Ltd. of National Pipeline Network Group, Urumqi 830063, China;

3. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract [Objective] High hardness and elevated suspended solids are widely present in circulating cooling water and blowdown wastewater of oil and gas pipeline systems. Conventional chemical softening processes suffer from high chemical consumption, large sludge production, and complex operation and management, highlighting the urgent need for efficient, stable, and adaptable treatment technologies. This paper focuses on a circulating granulation fluidized bed process and systematically evaluates its performance and engineering application potential for softening and turbidity removal of circulating water blowdown in oil and gas pipeline systems.

[Methods] A pilot-scale system integrating a chemical crystallization fluidized bed and an agglomeration granulation fluidized bed

[收稿日期] 2025-11-05

[基金项目] 国家管网集团内部项目(Y120025CB19C79910003)

[作者简介] 蒋金生(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事油气储运、安全生产工作, E-mail: jiangjs@pipechina.com.cn。

[通信作者] 黄廷林(1962—), 男, 教授, 研究方向为水处理理论与技术, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.com。

was employed to treat typical high-hardness circulating water blowdown under continuous operation. Key operating parameters, including superficial upflow velocity, chemical dosage, configuration of reaction and separation zones, and overall process flow, were systematically regulated. The effects of these parameters on hardness ion removal, particle formation and stable growth, suspended solids removal, and system operational stability were investigated. Based on the experimental result, process parameters were optimized to establish an optimal treatment pathway suitable for the specific water quality characteristics of oil and gas pipeline systems. [Results] The system operated stably under conditions of high magnesium ion concentration and variable turbidity. The total hardness removal efficiency exceeded 82%, while Ca^{2+} and Mg^{2+} removal efficiencies reached 87% and 71%, respectively, the effluent turbidity remained below 3 NTU. The system exhibited stable treatment performance during continuous operation and showed strong adaptability to variations in influent quality and flow rate. In addition, the overall treatment cost was no higher than 1.371 yuan/ m^3 , indicating favorable economic feasibility. [Conclusion] The circulating granulation fluidized bed system achieves efficient softening and turbidity removal for circulating water blowdown, featuring high treatment efficiency, a simple process flow, compact footprint, and low sludge production. It provides a valuable technical reference for short-process, integrated, and high-efficiency treatment of circulating water in oil and gas pipeline systems.

Keywords oil and gas pipeline network compressor station circulating cooling water chemical induced crystallization agglomeration and granulation softening turbidity removal

近年来,随着我国油气消费量的持续增长和能源结构的清洁化转型,国家持续推进油气资源调输体系建设,油气长输管网规模显著扩大^[1-2]。在此背景下,压气站、储气库及计量站等关键设施作为油气输送系统的重要组成部分,其运行安全与能效水平直接关系到管网整体运行的稳定性与经济性。为满足设备散热、换热及工艺补水需求,这类场站普遍配置循环冷却水、锅炉补给水及工艺补水系统^[3-5]。受补给水源类型影响,循环水多取自地下水或污水厂中水,普遍具有高硬度、高碱度等特征。当水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子浓度过高时,极易在换热设备和管道内形成碳酸盐或硫酸盐垢,导致换热效率下降、能耗上升及设备腐蚀,严重影响管网运行的安全与经济性^[6-7]。长期运行过程中,结垢还可能引起阀门失灵、管路堵塞甚至安全事故^[8-9]。油气输送管网系统中水处理单元作为辅助设备,需满足工艺流程短、系统占地小、中间物产少以及运行维护简单等要求,因此开发一种适合油气输送管网系统中循环水水质软化处理工艺系统具有现实意义。

循环造粒流化床技术近年来获得广泛应用,包括以水中离子诱导结晶为原理的化学结晶循环造粒流化床(以下简称“化学结晶流化床”)^[10-11]和以结团絮凝为原理的循环结团造粒流化床(以下简称“结团造粒流化床”)^[12-14]。该工艺系统对高硬度地下水^[15-16]、热电厂循环水补水和排污水^[17-18]等水质起到了良好的处理效果。本文针对油气输送管网系统中循环水典型水质开展中试试验,通过调控

系统上升负荷与药剂投加量等运行参数,系统分析组合工艺的软化与除垢效果,评价中试系统的连续稳定运行性能,为该处理系统在油气管网系统水处理领域的工程化应用提供数据支撑与理论依据。

1 试验材料和方法

1.1 原水水质

原水水质指标如表 1 所示,试验中化学结晶流化床选择氢氧化钠(NaOH)作为软化药剂,结团造粒流化床选择聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM)作为絮凝剂和助凝剂,化学结晶流化床采用天然石榴石晶体颗粒物作为诱导晶种,结团造粒流化床采用石英砂晶体颗粒物作为诱导晶种。

表 1 原水水质指标

指标	数值
pH 值	7~8
$\text{HCO}_3^- / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	4.5~8.0
$\text{CO}_3^{2-} / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	0
总硬度 / $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	3.5~8.8
$\text{Ca}^{2+} / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	1.8~5.1
$\text{Mg}^{2+} / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	1.7~3.7
浑浊度 / NTU	10~70

1.2 中试试验系统

中试试验系统如图 1 所示,其中化学结晶流化床直径 $d_1 = 600 \text{ mm}$,结团造粒流化床直径 $d_2 = 800 \text{ mm}$,系统处理水量为 $15 \sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

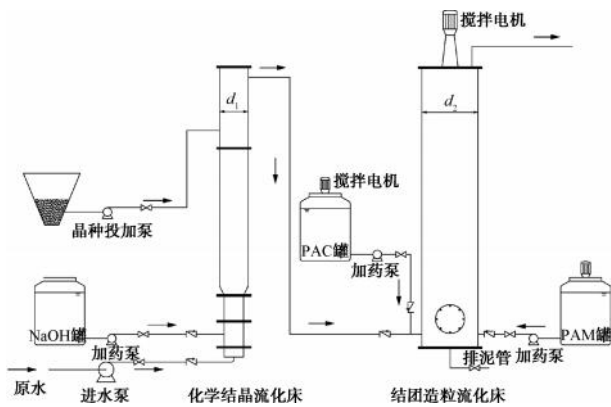


图 1 中试试验系统

Fig. 1 Pilot-Scale Test System

1.3 试验分析仪器及方法

试验时所采用的水质测定仪器如表 2 所示。

表 2 水质指标分析方法及仪器

Tab. 2 Analytical Methods and Instruments for Water

Quality Parameters	
水质指标	分析仪器/方法
pH	哈希便携式 pH 计 HQ40d
硬度	EDTA 滴定法
碱度	酸碱滴定法
浑浊度	哈希便携式浊度仪-2100Q
结晶颗粒物	扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)

2 结果与讨论

2.1 化学结晶流化床药剂控制试验

控制系统进水流量为 20 m³/h, 分别选择不同 NaOH 投加量并测定化学结晶流化床出水水质, 试验结果如图 2 所示。

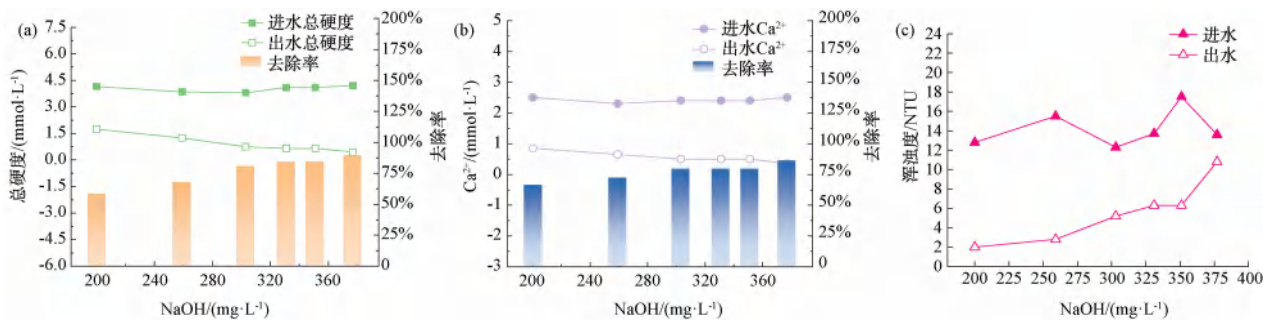


图 2 化学结晶流化床药剂控制试验

Fig. 2 Reagent Control Test of Chemical Crystallization Fluidized Bed

由试验结果可知, NaOH 投加质量浓度为 200 mg/L 时, 总硬度去除率为 57.83%, Ca²⁺ 去除率为 66%; NaOH 投加质量浓度为 313 mg/L 时, 总硬度去除率为 80.26%, Ca²⁺ 浓度为 0.75 mmol/L, 去除率为 80.83%; 当 NaOH 投加质量浓度超过 313 mg/L 时, 总硬度去除率为 82.15%, Ca²⁺ 去除率为 87.32%, 进一步提升 NaOH 质量浓度对总硬度去除率提升效果不明显, 因此选择 313 mg/L 作为控制条件。化学结晶流化床出水浑浊度随 NaOH 投加量增加不断升高, 这是高 pH 条件下水中 Mg²⁺ 形成的氢氧化镁 [Mg(OH)₂] 絮体流出所致。

2.2 结团造粒流化床药剂控制试验

控制系统进水流量为 20 m³/h, 分别针对化学结晶流化床出水不同浑浊度水质、同一浑浊度水质采用不同 PAC 和 PAM 投加量配比进行试验, 同时开展化学结晶流化床和结团造粒流化床里加药试验, 药剂投加量如表 3 所示, 测定不同药剂投加条件

下结团造粒流化床进出水水质结果如图 3 所示。

表 3 PAC、PAM、NaOH 投加配比

Tab. 3 Dosage Ratios of PAC, PAM, and NaOH

组别	PAC/(mg·L ⁻¹)	PAM/(mg·L ⁻¹)	NaOH/(mg·L ⁻¹)
1	15.0	1.2	373
2	8.6	0.9	440
3	0	0.9	499
4	0	1.1	419
5	0	1.2	434
6	0	1.0	434

由图 3 可知, 针对不同进水浑浊度水质, 结团造粒流化床出水浑浊度始终维持在 3 NTU 以下, 浑浊度 ≤ 40 NTU 原水仅投加 PAM 便可达到去除目标; 针对同一浑浊度水质, PAC 对除浊效果影响作用小, 仅需投加 PAC 即可达到处理要求; PAC、PAM、NaOH 投加配比试验结果表明, 采用先化学结晶后结团造粒的工艺流程不仅可有效去除软化处理中产生的微絮体, 进一步优化处理效果, 同时水中高 pH

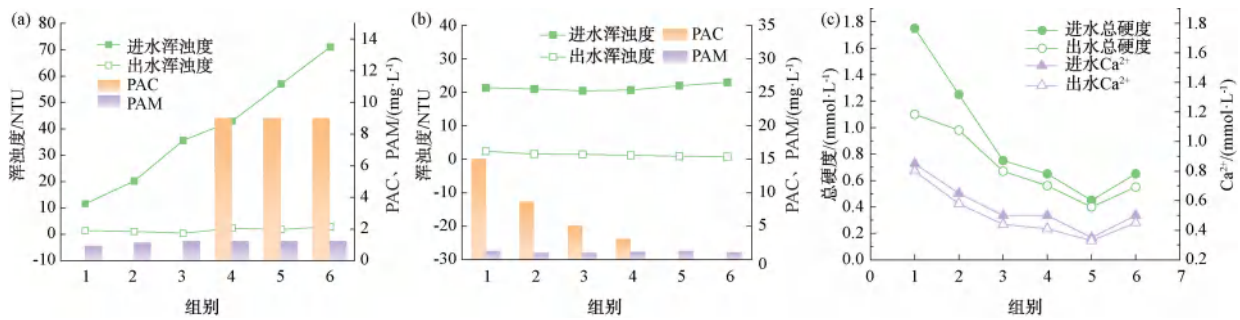


图3 除浊试验结果

Fig. 3 Results of Turbidity Removal Test

条件有利于结团造粒流化床中悬浮层浓度提升,促进悬浮层颗粒的形成从而提高颗粒沉降效率。

2.3 上升负荷控制试验

已有研究表明,化学结晶流化床适宜负荷

为 60~120 m/h^[18],结团造粒流化床适宜负荷为 30~60 m/h。在化学结晶循环造粒流化床出水管设置回用管以控制两系统上升负荷为目标值,测定不同上升负荷时系统处理效果,试验结果如图 4 所示。

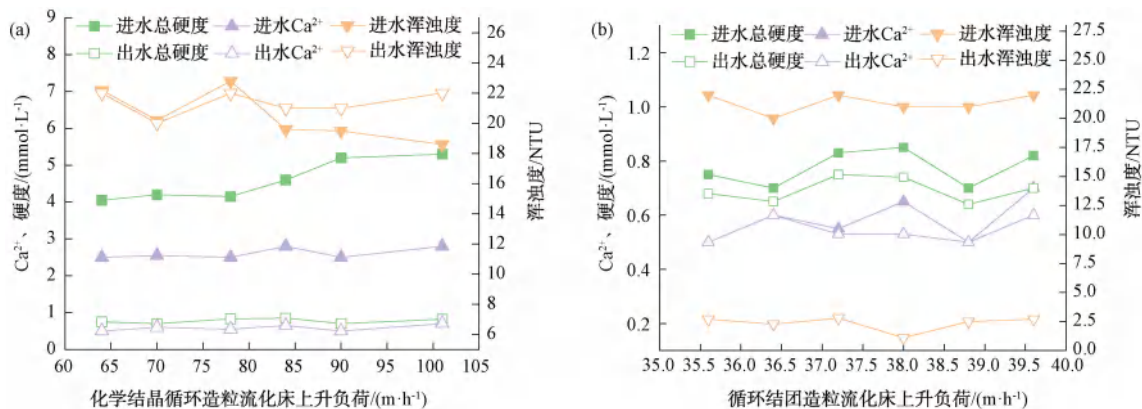


图4 上升负荷控制试验

Fig. 4 Upflow Load Control Test

试验结果表明,化学结晶流化床上升负荷为 90 m/h,结团造粒流化床上升负荷为 38 m/h 时,系统出水浊度为 1.5 NTU,总硬度去除率为 76%, Ca²⁺去除率为 82%,选取该负荷条件为后续连续稳定运行试验控制条件。循环造粒流化床系统均为上流式反应器,同时反应器中填充有一定厚度的床层物质,因此系统上升负荷对流化床反应器的床层膨胀程度、药剂与原水的混合状态等条件均会产生影响。此外过高的上升负荷容易导致床层物质随出水溢出,因此需要对系统上升负荷进行试验研究以确定最佳上升负荷。

2.4 系统连续稳定运行试验

为验证联用系统在连续运行状态下的稳定性,控制化学结晶循环造粒流化床和循环结团造粒流化

床上升负荷分别为 90 m/h 和 38 m/h,连续运行 12 h,每间隔 2 h 测定进出水水质指标,试验结果如图 5 所示。

连续稳定运行试验中系统出水总硬度持续在 1.5 mmol/L 以下, Ca²⁺浓度持续在 1 mmol/L 以下,浊度持续在 3 NTU 以下。连续稳定运行过程中人工干预少,无需投入大量人力进行药剂投加及系统参数控制,该联用系统具有自动化程度高、可靠性强等特点。

2.5 副产物分析

化学结晶流化床通过将水中的硬度离子转化为结晶物达到水质软化处理目的,对处理过程中产生的结晶颗粒物进行 SEM 和 XRD 分析,分析结果如图 6 所示。

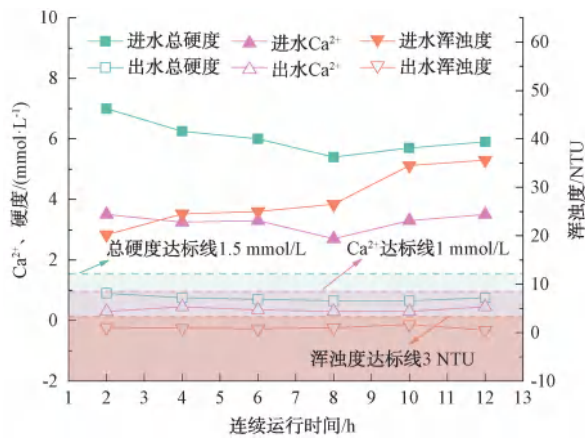


图5 连续稳定运行

Fig. 5 Continuous Stable Operation

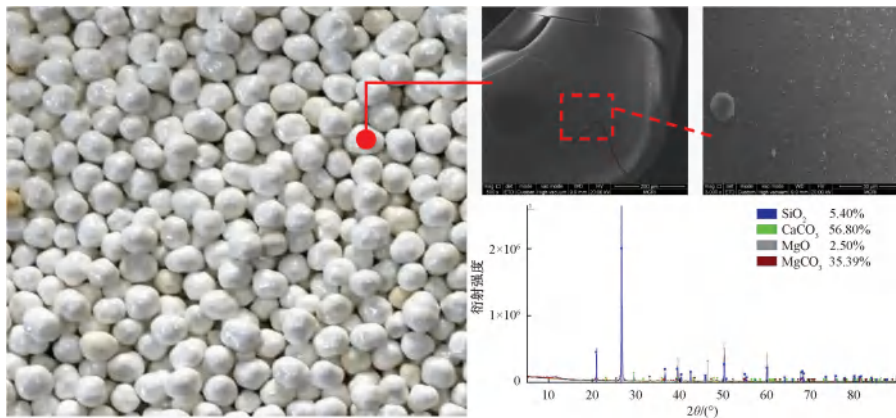


图6 结晶颗粒物表面分析

Fig. 6 Surface Analysis of Crystallized Particles

试验中所使用的 NaOH 溶液、PAM 以及 PAC 溶液为工业产品配制而成的溶液。试验中当总硬度和 Ca^{2+} 去除率均达到 80%~85% 时, NaOH 投加质量浓度为 410 mg/L, 软化药剂成本为 0.74 元/t, 诱导晶种成本为 0.187 元/t, 出水 pH 值为 10.3~10.5, 综合估算采用盐酸 (HCl)/硫酸 (H_2SO_4) 中和处理时的药剂成本为 0.107 元/t^[17]; 当出水浊度 ≤ 3 NTU 时, PAM 投加质量浓度为 1 mg/L, PAC 投加量为 0 时; 药剂成本为 0.007 3 元/t。系统耗电量核算如表 4 所示。

对试验系统进行经济性分析可知, 处理成本分别为: 当出水浊度 ≤ 5 NTU, 硬度去除率达到 80%~85% 时, 运行成本为 1.261 元/t; 当出水浊度 ≤ 5 NTU, 硬度去除率达到 85%~90% 时, 运行成本为 1.291 元/t; 当出水浊度 ≤ 5 NTU, 硬度去除率达到 90%~95% 时, 运行成本为

化学结晶流化床产生的结晶颗粒物多为球状且表面致密光滑, 使用 SEM 放大 500 倍和 3 000 倍时表面平整度同样很高; XRD 结果分析可知, 结晶颗粒物中碳酸钙 (CaCO_3) 质量分数为 56.8%, 碳酸镁 (MgCO_3) 质量分数为 35.3%, 表面多为钙镁化合物且成分单一, 具有资源回收价值。

结晶造粒流化床处理中产生的污泥含水率测定结果为 90%~97%, 相较于传统絮凝沉淀工艺, 污泥含水率高且污泥量大大减少, 因此无需通过污泥浓缩可直接进行脱水处理, 为污泥处理节省大量成本。

2.6 经济性分析

循环造粒流化床系统在对原水进行处理时, 其运行成本主要来源于药剂、电耗等必要因素, 本文中

1.371 元/ m^3 。

表4 系统耗电量核算

Tab. 4 Power Consumption Accounting of the System

用电设备	功率/kW
晶种泵	4
NaOH 泵	0.06
PAM 泵	0.12
PAM 搅拌电机	0.75
进水泵	3
PAC 泵	0.12
PAC 搅拌电机	0.75
循环结晶造粒流化床搅拌电机	1.1

综上所述, 循环造粒流化床系统对油气管网中工业循环水处理成本较低且具有较好的水质、水量抗冲击性, 产生的结晶 (CaCO_3 颗粒) 还可以回用, 具有良好的经济效益和环境效益。

3 结论

(1) 针对油气输送管网循环冷却水中普遍存在的 Mg^{2+} 浓度高与浑浊度多变特征, 本文采用的循环造粒流化床中试系统表现出显著的除浊与软化效果。系统总硬度去除率达 82% 以上, Ca^{2+} 去除率可达 87% 以下, Mg^{2+} 去除率达 71% 以上, 出水浑浊度稳定低于 3 NTU。

(2) 该中试系统水处理成本为 1.371 元/t 左右, 系统运行期间化学结晶流化床产生的结晶物表面致密且成分单一, 均为钙镁化合物, 具有资源化价值, 结团造粒流化床产生的污泥含水率高、易脱水, 污泥量显著降低同时节省处理成本。

(3) 循环造粒流化床系统具有处理效率高、抗水质波动能力强、占地面积小、操作简便及自动化程度高等优点, 特别适用于油气管网系统中循环冷却水、排污水等污水中高硬度、高 Mg^{2+} 及高浑浊度处理, 是一种高效可靠的技术装备。

参考文献

- [1] 戴家权, 马美艳. 国内外油气行业发展现状与趋势及人才培养[J]. 中国大学生就业, 2025(8): 23-29.
Dai J Q, Ma M Y. Development status and trends of the domestic and international oil and gas industry and talent cultivation[J]. China University Students Career Guide, 2025(8): 23-29.
- [2] 钱兴坤, 陆如泉, 罗良才, 等. “稳中有变”下探寻能源均衡之道——国内外油气行业 2024 年回顾与 2025 年展望[J]. 国际石油经济, 2025, 33(2): 1-6, 24.
Qian X K, Lu R Q, Luo L C, et al. Exploring the path to energy equilibrium development amid stability with changes—Review of the domestic and global oil and gas industry in 2024 and outlook for 2025[J]. International Petroleum Economics, 2025, 33(2): 1-6, 24.
- [3] Saidur R, Ahamed J U, Masjuki H H. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers, Energy Policy[J]. 2010, 38(5): 2188-2197.
- [4] Cui P F, Zhang E L, Wang Z Y, et al. Application and analysis of new pro-environment and water-saving composite water cooling system in natural gas long distance pipeline[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2468(1): 012144.
- [5] 苏艳艳, 丁昀, 任柯宣, 等. 循环冷却水中阻垢技术的研究进展: 挑战与机遇[J]. 水处理技术, 2025, 51(10): 158-164.
Su Y Y, Ding Y, Ren K X, et al. Research progress on scale inhibition technologies in circulating cooling water: Challenges and opportunities[J]. Technology of Water Treatment, 2025, 51(10): 158-164.
- [6] 卢小方. 工业循环冷却水处理技术优化及运行管理分析[J]. 石化技术, 2025, 32(7): 45-47.
Lu X F. Optimization of industrial circulating cooling water treatment technology and operation management analysis[J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32(7): 45-47.
- [7] 袁亮, 韩会亮, 米精宏, 等. 循环冷却水系统多水源补水的可行性研究与应用[J]. 工业用水与废水, 2025, 56(2): 56-60.
Yuan L, Han H L, Mi J H, et al. Feasibility research and application of multi-source make-up water in circulating cooling water system[J]. Industrial Water & Wastewater, 2025, 56(2): 56-60.
- [8] 韩建新. 锅炉除渣水系统的治理[J]. 中国新技术新产品, 2010(6): 145.
Han J X. Treatment of boiler slag removal water system[J]. China New Technologies and Products, 2010(6): 145.
- [9] 李鑫. 油田注水管网的维护要点探讨[J]. 石化技术, 2025, 32(10): 240-242.
Li X. Discussion on maintenance points of oil field water injection pipe network[J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32(10): 240-242.
- [10] Nayunigari M K, Maity A, Agarwal S, et al. Curcumin-malic acid based green copolymers for control of scale and microbiological growth applications in industrial cooling water treatment[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 214: 400-410. DOI: 10.1016/j.molliq.2015.11.034.
- [11] Othmani M, Aissa A, Bachoua H, et al. Surface modification of calcium-copper hydroxyapatites using polyaspartic acid[J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 886-891. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.10.182.
- [12] 赵楠, 黄廷林, 胡瑞柱, 等. 造粒流化床处理反冲洗废水的生产性试验研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(13): 6-10.
Zhao N, Huang T L, Hu R Z, et al. Full-scale experimental research on pelleting fluidized bed for treatment of backwashing wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(13): 6-10.
- [13] 孙书博. 循环造粒流化床处理水厂排泥水和电厂循环冷却水的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
Sun S B. Experimental research on circulating granulation fluidized bed for treatment of sludge water in water plant and circulating cooling water in power plant[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [14] 薛章哲, 胡瑞柱, 李凯, 等. 斜管强化循环结团造粒流化床处理水质多变地表水中试研究[J]. 水处理技术, 2025, 51(7): 113-117, 124.
Xue Z Z, Hu R Z, Li K, et al. Pilot study on the treatment of surface water with varying water quality using an inclined tube reinforced circulating agglomerated granulation fluidized bed[J]. Technology of Water Treatment, 2025, 51(7): 113-117, 124.

- [15] 李恺弘, 赵承东, 张久志, 等. 化学结晶造粒流化床系统软化城市中的水的实验研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(12): 119-123, 137.
Li K H, Zhao C D, Zhang J Z, et al. Experimental study on softening urban reclaimed water by chemical crystallization granulation fluidized bed system [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(12): 119-123, 137.
- [16] 胡瑞柱, 黄廷林, 文刚, 等. 造粒流化床反应器去除地下水中硬度试验研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 39-44.
Hu R Z, Huang T L, Wen G, et al. Hardness removal of underground water in fluidized pellet bed reactor [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21): 39-44.
- [17] 智奥帆. 化学结晶循环造粒法去除水中硬度的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
Zhi A F. Experimental study on the removal of hardness in water by chemical crystallization cycle granulation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [18] 唐章程, 黄廷林, 胡瑞柱, 等. 诱导结晶法软化热电厂高永久性硬度水实验研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(1): 28-32, 41.
Tang Z C, Huang T L, Hu R Z, et al. Experimental study on softening the high permanent hardness wastewater from thermal power plant by induced crystallization process[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(1): 28-32, 41.

(上接第 103 页)

- [4] Shen J, Huang G H, An C J, et al. Biophysiological and factorial analyses in the treatment of rural domestic wastewater using multi-soil-layering systems [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 226: 83-94. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.001.
- [5] Cheng P P, Jin Q, Jiang H, et al. Efficiency assessment of rural domestic sewage treatment facilities by a slacked-based DEA model [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: 122111. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122111.
- [6] 李世峰, 黄开, 赵荣, 等. 青岛市某新区农村生活污水系统化治理模式和技术研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 15-21.
Li S F, Huang K, Zhao R, et al. Research on the systematic treatment mode and technology of rural domestic sewage in a new area of Qingdao [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 15-21.
- [7] 张静, 于金宝, 卢金锁, 等. 中国村镇水源突发污染事故特征分析[J]. 给水排水, 2022, 48(11): 22-27.
Zhang J, Yu J B, Lu J S, et al. Analysis of water pollution accidents in villages of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(11): 22-27.
- [8] 李骏飞, 王悦. 农村生活污水治理工程新型建设模式探索与实践[J]. 给水排水, 2023, 59(1): 30-35.
Li J F, Wang Y. Novel construction mode of the rural domestic sewage treatment project: Exploration and application [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(1): 30-35.
- [9] 李轶霄, 郑天龙, 杨晓霞, 等. 西北地区农村生活污水排放标准对比及分析[J]. 工业水处理, 2024, 44(1): 13-21.
Li Y X, Zheng T L, Yang X X, et al. Comparison and analysis of rural domestic sewage discharge standard in northwest China [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(1): 13-21.
- [10] 黄天寅, 马奕, 吴玮, 等. 苏州地区农村生活污水治理长效管理机制与对策[J]. 中国给水排水, 2012, 28(12): 9-14.
Huang T Y, Ma Y, Wu W, et al. Mechanism and countermeasure on long-term effective management for rural sewage treatment in Suzhou [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(12): 9-14.
- [11] 卢贤飞, 林常春, 陈刚亮. 浙江省农村生活污水治理工程现状调研及症结剖析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 6-9.
Lu X F, Lin C C, Chen G L. Investigation on current situation of rural domestic sewage treatment projects in Zhejiang Province and analysis of its main crux [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 6-9.