

燃煤电厂循环水排水软化处理工艺研究与应用进展

周博健

国能湖南岳阳发电有限公司，湖南 岳阳

收稿日期：2024年6月19日；录用日期：2024年7月21日；发布日期：2024年8月2日

摘要

文章研究了燃煤电厂循环水排水处理工艺及其应用进展，讨论了传统化学沉淀法、离子交换法和电极软化法等预处理软化技术的优缺点，着重介绍了结晶造粒流化床技术机器应用案例。文章指出未来循环水软化技术的发展将更加注重高效、低成本和环保性，技术创新将集中在新材料开发、工艺流程改进和智能化控制系统上，以实现更高的性能和更低的环境影响。

关键词

循环冷却水，燃煤电厂，软化，造粒流化床

Research and Application Progress of Softening Treatment Process for Circulating Water Drainage in Coal-Fired Power Plants

Bojian Zhou

Yueyang Power Generation Co., Ltd., Yueyang Hunan

Received: Jun. 19th, 2024; accepted: Jul. 21st, 2024; published: Aug. 2nd, 2024

Abstract

This article studies the treatment process and application progress of circulating water drainage in coal-fired power plants, discusses the advantages and disadvantages of pretreatment softening technologies such as traditional chemical precipitation, ion exchange, and electrode softening methods, and focuses on the introduction of crystallization granulation fluidized-bed technology

and its application case. The article points out that the development of future circulating water softening technology will focus more on efficiency, low cost, and environmental friendliness. Technological innovation will concentrate on the development of new materials, improvement of process flows, and intelligent control systems to achieve higher performance and lower environmental impact.

Keywords

Circulating Cooling Water, Coal-Fired Power Plant, Soften, Fluidized-Bed Crystallizer

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电厂循环冷却水系统是电力生产中不可或缺的一部分，它负责将发电机组产生的热量传递给冷却介质，以维持设备的正常运行温度。然而，这一系统在实际运行中面临多种问题，这些问题不仅影响电厂的效率和安全性，还可能对环境造成不利影响[1]。

循环冷却水系统在长时间运行过程中，会因为水的蒸发、风吹损失等原因导致水量减少，需要定期补水。这不仅增加了水资源的消耗，还可能因为补充水的水质问题影响整个系统的稳定运行[2]-[4]。冷却水中的溶解盐类、微生物、腐蚀产物等会随着时间的积累，导致水质恶化。这不仅会加速设备的腐蚀和结垢，增加维护成本，还可能因为水质问题导致换热效率下降，影响电厂的热效率。

循环冷却水系统中的结垢问题是一个复杂且普遍存在的挑战，它直接影响到电厂的运行效率和设备的长期稳定性。结垢通常由多种物质组成，包括但不限于碳酸钙、硫酸钙、硅酸盐、镁盐和铁盐等，这些物质在特定的环境条件下，如温度升高、pH 值变化或水流速度减慢时，容易从水中析出并沉积在换热器表面、管道内壁或冷却塔填料上。随着时间的推移，这些沉积物会逐渐增厚，形成难以去除的硬垢，从而降低热交换效率，增加能源消耗，并可能导致设备损坏和维护成本上升[5] [6]。

电厂循环水软化处理工艺在提高电厂运行效率、降低能耗和维护成本方面发挥着重要作用，但同时也面临着环境污染、运行成本高和技术成熟度等挑战。因此，电厂在选择和应用软化工艺时，需要综合考虑其经济性、环保性和技术可行性，以实现电厂的可持续发展。同时，也需要不断探索和开发更高效、更环保的软化技术，以应对日益严峻的环境和资源挑战。

2. 预处理软化技术

电厂循环水软化处理工艺对于确保电厂安全、高效运行具有重要意义。硬水中的钙、镁离子在高温条件下容易形成水垢，这不仅会降低热交换器的效率，增加能源消耗，还可能导致设备损坏和维护成本上升。通过软化处理，可以有效去除或降低水中的硬度成分，从而提高电厂的运行效率，延长设备的使用寿命，减少维护成本。

随着环保法规的日益严格和水资源的日益紧张，传统的化学沉淀法由于其环境污染和水资源消耗问题，正逐渐被其他更环保、更高效的软化技术所取代。离子交换法虽然软化效果好，但树脂的再生过程会产生大量废水，且运行成本较高。电极软化法和造粒流化床软化法作为新兴技术，具有环保和高效的优点，但目前仍处于发展阶段，技术成熟度和经济性有待进一步提高。

2.1. 传统化学沉淀法

传统化学沉淀法是一种常用的水处理方法，用于去除水中的悬浮物、浑浊度和一些溶解性离子。利用添加的化学试剂与水中的杂质发生反应，形成不溶性沉淀物，然后通过沉淀和分离的方式将沉淀物从水中去除。常用的化学试剂包括氢氧化钙、氢氧化铁、氯化铁等，选择合适的试剂取决于水质特点和目标去除物质[7]。传统化学沉淀操作简单，应用广泛，但药剂成本和人力成本较高，占地面积大，且对细小悬浮固体的处理效果不佳，进水水质水量变化易引起出水水质不稳定，同时污泥量较高。

2.2. 离子交换法

离子交换法是一种常见的水处理方法，用于处理水中的硬度和其他离子污染物。该方法通过利用离子交换树脂对水中的离子进行吸附和交换，从而实现去除或减少水中的离子含量[8]。

在离子交换法中，通常会使用离子交换树脂作为吸附剂。这些树脂具有特定的化学结构，能够选择性地吸附水中的特定离子。当水通过含有离子交换树脂的固定床或柱子时，水中的阳离子(比如 Ca^{2+} 和 Mg^{2+})会与树脂中的其他离子(比如 Na^+)发生交换，被树脂吸附下来，而其他离子则被释放到水中。通过这种方式，离子交换树脂可以有效地降低水中的硬度和其他离子含量，达到软化水的效果。一旦离子交换树脂饱和了，可以通过用盐水(如氯化钠)进行再生，将吸附在树脂上的离子释放出来，同时再生树脂以继续使用。

王强等人用离子交换树脂吸附软化模拟废水是可行的，软化后出水水质可达到排放标准[9]。Dong 等人通过实验测的阳离子交换树脂可以去除废水中 99% 的钙离子[10]。

离子交换树脂软化效果好，工艺成熟多样，对水溶液中重金属离子吸附效果较好[11]，但树脂价格较高，抗污染能力较弱，且吸附饱和后效果大大降低，再生操作复杂并伴随再生废液处理问题，适用于目标污染物(如钙离子、氟离子等)浓度相对较低时的深度处理，多用于化学沉淀工艺之后的目标污染物深度去除，同时也可用于回收重金属离子[12]。

2.3. 电极软化法

电极软化水技术是一种利用电解原理来软化硬水的方法。硬水是指含有高浓度的钙、镁离子的水，这些离子会导致水垢和管道堵塞等问题。电极软化水技术通过电解作用将水中的钙、镁离子转化为无机碳酸盐，从而达到软化水的目的。首先将阳极和阴极分别放置在水中，保证二者之间的距离足够短，使电流能够通过水介质。在水中加入电解液，一般使用的电解液是碳酸钠或氢氧化钠。电解液会增强水的导电性，促进电解作用。

将电流通入阳极和阴极，使得水中的钙、镁离子向阳极移动，并与电解液中的负离子结合形成无机碳酸盐。这些无机碳酸盐可以沉淀下来，从而软化水质。沉淀下来的无机碳酸盐需要进一步处理，可以通过滤网或沉淀池等方式去除[13]。

Leong 等人使用氧化碳和胺化碳的不对称组合来选择性去除二价阳离子以实现水软化[14]。Wang 等人通过将不锈钢网与焦炭耦合，构建了三维填充床电极，使钙和镁离子共同存在的循环水中更快地沉淀，使其保持有效的水软化性能[15]。

电极软化法自动化程度高，维护简单，占地面积小，处理效果稳定且不产生二次污染，兼具杀菌功能，适用场景广泛。然而，电极软化投资成本较高，往往伴随电极损耗或钝化，且水中悬浮物浓度高时软化效果较差。

2.4. 结晶造粒流化床技术

结晶造粒流化床是一种新型的水处理技术。结晶造粒流化床首先需要在流化床反应器底部填充合适

的载体或晶种。废水以一定的流速从流化床底部引入，使载体种子晶体处于流化状态。加入沉淀剂使溶液达到适度过饱和状态，生成的不溶性物质沉淀在载体上形成非均相晶体。随着结晶过程的进行，载体颗粒不断增大，重量越来越重，并逐渐沉降到反应器底部。此时，颗粒沉淀物被清除一段时间，同时新的载体种子被添加到反应器中，反应器连续运行[16]。这也是一个强化的结晶过程。过程中不需要絮凝、沉淀等操作单元。结晶颗粒含水量低，固液分离容易。

结晶造粒流化床相较于传统化学沉淀，设备占地面积小，处理效率高。最重要的是，该技术可以有效地从水中回收碳酸钙、氟化钙、磷酸盐等物质。它不仅解决了废水的处理和排放问题，而且利用从水中回收的无机盐晶体作为工业原料，适用于循环排污水等废水的处理。

3. 结晶造粒流化床技术的实际应用

3.1. 工艺描述

湖南公司岳阳电厂 2×1000 MW 机组循环水排水处理系统采用了以循环造粒流化床技术为核心的处理工艺。循环水排水处理系统工艺与污泥处理流程如图 1 所示，循环水排水在结晶造粒流化床内在软化药剂和晶种的作用下完成软化处理，晶种颗粒随着软化反应进行尺寸不断增加，当颗粒达到一定尺寸后排出。晶种颗粒通过再生处理回收包裹在晶种表面的无机盐，同时将再生晶种进行回用。结晶造粒流化床处理出水经高速液相分离流化床处理，调节 pH 后回用至冷却系统，排泥则经脱水处理后外运。

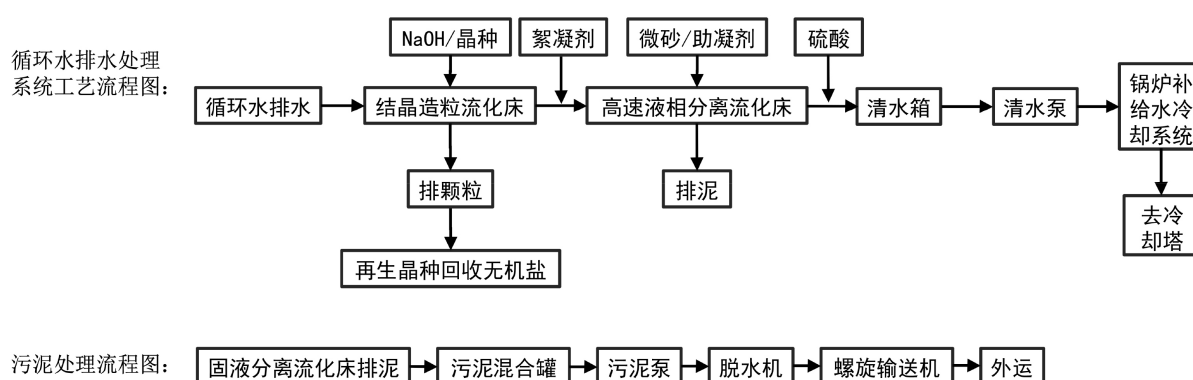


Figure 1. Circulating water drainage treatment system process and sludge treatment flow chart

图 1. 循环水排水处理系统工艺与污泥处理流程图

3.2. 运行参数与结果

本项目循环水排水系统设置结晶造粒流化床设备 2 套，单台设备处理能力不小于 440 t/h，正常工况一运一备，需要改善循环水水质时，可 2 台设备同时运行。造粒流化床投加碱液调节 pH，去除冷却水中的暂时硬度。高速液相分离流化床通过在进水中投加混凝剂(PAC)和絮凝剂(PAM)，对结晶造粒流化床出水细小悬浮颗粒进行絮凝处理，所形成的大尺寸絮体在重力作用下实现固液分离，保证出水浊度满足回用要求。本项目于 2023 年 12 月启动调试工作，期间主要工艺运行参数如表 1 所示。

Table 1. Operation parameters of fluidized bed unit for circulating cooling water treatment in power plant

表 1. 电厂循环冷却水处理流化床装置调试运行参数

工艺参数	设计值
处理量	300~400 m ³ /h

续表

原水总硬度	4~9 mM
原水总碱度	0~6 mM
结晶造粒流化床 pH	10.5~11.5
PAC 加药量	5~6 ppm
PAM 加药量	1.5~2 ppm

调试期间流化床进水与出水总硬度变化趋势如图 2 所示，固液分离流化床进出水浊度变化趋势如图 3 所示。经过结晶造粒流化床处理，总硬度降至 2.5 mM 以下，有效的去除了原水中的暂时硬度。经固液分离流化床处理后出水浊度小于 3 NTU，满足电厂的回用需求。

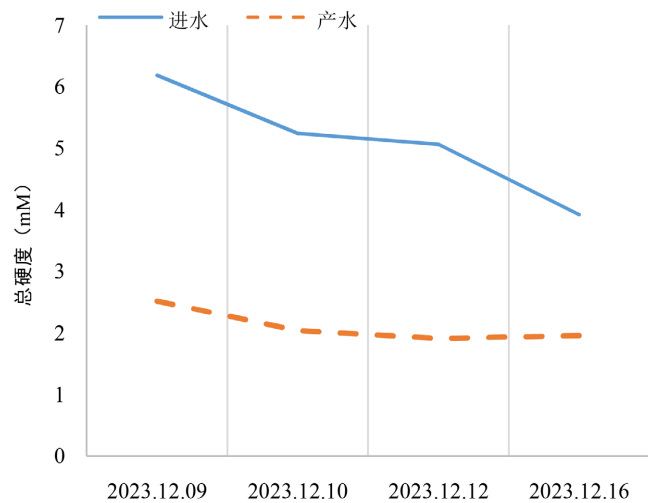


Figure 2. Variation trend of total hardness of water in and out of the fluidized bed for crystallization pelletizing
图 2. 结晶造粒流化床进出水总硬度变化趋势

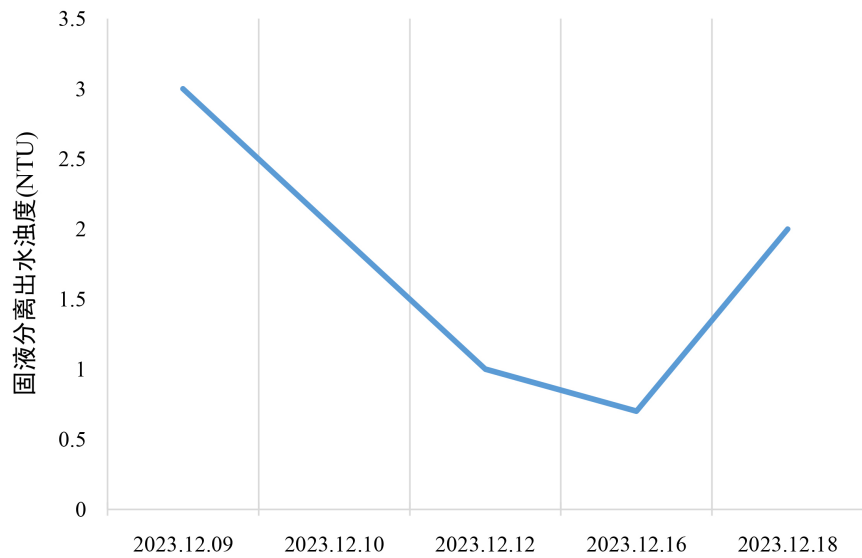


Figure 3. Variation trend of turbidity in and out of fluidized bed for solid-liquid separation
图 3. 固液分离流化床进出水浊度变化趋势

4. 总结

电厂循环水软化处理工艺在提高电厂运行效率、降低能耗和维护成本方面发挥着重要作用,但同时也面临着环境污染、运行成本高和技术成熟度等挑战。因此,电厂在选择和应用软化工艺时,需要综合考虑其经济性、环保性和技术可行性,以实现电厂的可持续发展。同时,也需要不断探索和开发更高效、更环保的软化技术,以应对日益严峻的环境和资源挑战。本文总结了循环冷却水预处理软化技术,着重介绍了新兴造粒流化床处理技术在燃煤电厂循环冷却水处理中的应用案例。

5. 展望

未来循环水软化技术的发展将更加注重高效、低成本和环保性。技术创新将集中在开发新材料、改进工艺流程和智能化控制系统上,以实现实时监控和自动调节,提高系统效率。推动循环经济和废弃物资源化利用,减少环境影响,将成为技术发展的重要方向。

参考文献

- [1] Serrano, M.I.R., Knobloch, K., Giuliano, S., Engelbrecht, K. and Hirsch, T. (2024) Retrofit of a Coal-Fired Power Plant with a Rock Bed Thermal Energy Storage. *Journal of Energy Storage*, **75**, Article ID: 109238. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109238>
- [2] Wang, H., Qiu, B., Zhao, F. and Yan, T. (2023) Method for Increasing Net Power of Power Plant Based on Operation Optimization of Circulating Cooling Water System. *Energy*, **282**, Article ID: 128392. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128392>
- [3] Gao, W. and Feng, X. (2017) The Power Target of a Fluid Machinery Network in a Circulating Water System. *Applied Energy*, **205**, 847-854. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.024>
- [4] Chen, L., Chen, Z., Liu, Y., et al. (2024) Benefits and Limitations of Recycled Water Systems in the Building Sector: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **22**, 785-814.
- [5] Zhu, X., Wang, F., Niu, D., Guo, Y. and Jia, M. (2019) An Energy-Saving Bottleneck Diagnosis Method for Industrial System Applied to Circulating Cooling Water System. *Journal of Cleaner Production*, **232**, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.322>
- [6] Fu, Y., Wang, L., Liu, M., Wang, J. and Yan, J. (2023) Performance Analysis of Coal-Fired Power Plants Integrated with Carbon Capture System under Load-Cycling Operation Conditions. *Energy*, **276**, Article ID: 127532. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127532>
- [7] Kang, Y., Lu, J. and Guo, J. (2017) Treatment of Wet FGD Wastewater by a Modified Chemical Precipitation Method Using a Solid Powder Reagent. *Transactions of Tianjin University*, **23**, 110-121. <https://doi.org/10.1007/s12209-017-0027-4>
- [8] Felipe, E.C.B., Batista, K.A. and Ladeira, A.C.Q. (2020) Recovery of Rare Earth Elements from Acid Mine Drainage by Ion Exchange. *Environmental Technology*, **42**, 2721-2732. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1713219>
- [9] 王强, 王靖宇. 用离子交换树脂软化含盐废水试验研究[J]. 湿法冶金, 2020, 39(1): 69-73.
- [10] Dong, B., Xu, Y., Shen, D., Dai, X. and Lin, S. (2016) Characterizing the Interactions between Humic Matter and Calcium Ions during Water Softening by Cation-Exchange Resins. *RSC Advances*, **6**, 93947-93955. <https://doi.org/10.1039/c6ra22113k>
- [11] 张帆, 李菁, 谭建华, 王波, 黄福, 等. 吸附法处理重金属废水的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(11): 2749-2756.
- [12] 吕后鲁, 刘德启. 工业废水处理技术综述[J]. 石油化工环境保护, 2006, 29(4): 15-19.
- [13] Gabrielli, C., Maurin, G., Francy-Chausson, H., Thery, P., Tran, T.T.M. and Tlili, M. (2006) Electrochemical Water Softening: Principle and Application. *Desalination*, **201**, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.012>
- [14] Leong, Z.Y. and Yang, H.Y. (2020) Capacitive Deionization of Divalent Cations for Water Softening Using Functionalized Carbon Electrodes. *ACS Omega*, **5**, 2097-2106. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02330>
- [15] Wang, J., Yang, Z., Chen, X., Zhang, P., Zhao, J., Gong, A., et al. (2024) Coke Filled Bed Electrode Coupled with Vibration Regeneration for Efficient Electrochemical Water Softening. *Separation and Purification Technology*, **330**, Article ID: 125328. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125328>

- [16] Gui, L., Yang, H., Huang, H., Hu, C., Feng, Y. and Wang, X. (2022) Liquid Solid Fluidized Bed Crystallization Granulation Technology: Development, Applications, Properties, and Prospects. *Journal of Water Process Engineering*, **45**, Article ID: 102513. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102513>