

锅炉补给水炉外处理技术的迭代与应用决策

王智华, 蔡畅

国家能源蓬莱发电有限公司, 山东 烟台 265600

DOI:10.61369/ERA.2026050003

摘 要 : 锅炉系统的长效稳定运行, 其根基在于补给水水质的精细管控。作为前置保障环节, 炉外处理综合运用物理、化学及膜分离等技术, 旨在高效去除原水中的悬浮固体、可溶性盐分及溶解性气体等杂质, 从而从根本上遏制结垢、腐蚀及蒸汽携带等问题的发生。本文旨在剖析炉外处理的技术内核, 通过对比离子交换、膜法分离及其组合工艺的技术-经济剖面, 结合工业实例, 提炼不同应用场景下的工艺选型逻辑。面对当前技术存在的能耗、二次污染及效率瓶颈, 本文进一步探讨了以资源回用、智慧化管控和全膜法工艺为代表的转型路径, 以期为工业与电站锅炉水处理系统的升级提供决策参考。

关 键 词 : 锅炉给水; 前置处理; 除盐工艺; 反渗透; 电去离子; 标准体系; 系统能效

Research on Iterative Development and Application Decision-Making of External Treatment Technologies for Boiler Make-Up Water

Wang Zhihua, Cai Chang

State Energy Penglai Power Generation Co., Ltd., Yantai, Shandong 265600

Abstract : The long-term, safe and stable operation of boiler systems fundamentally relies on the precise control of make-up water quality. As a critical pre-treatment safeguard, external water treatment integrates physical, chemical and membrane separation techniques to effectively remove suspended solids, dissolved salts, dissolved gases and other harmful contaminants from raw water, thereby fundamentally mitigating boiler scaling, metallic corrosion and steam carryover issues. This paper systematically investigates the technical fundamentals of external treatment for boiler make-up water, compares the techno-economic characteristics of ion exchange, membrane separation and their integrated processes, and extracts rationales for process selection under diverse application scenarios based on industrial case studies. Aiming at the current bottlenecks including high energy consumption, secondary pollution and limited treatment efficiency, this study further explores the developmental pathways characterized by resource recovery, intelligent operation and control, and all-membrane treatment processes, providing a decision-making basis for the upgrading and optimization of water treatment systems in industrial and utility boilers.

Keywords : boiler make-up water; external water treatment; desalination process; reverse osmosis (RO); electrodeionization (EDI); standard system; system energy efficiency

引言：水质控制与锅炉系统效能的内在关联

作为热能转换的核心装置, 锅炉的可靠性、经济性与使用寿命, 与其补给水水质的管理水平呈强正相关。原水中普遍存在的钙镁离子(构成硬度)、溶解氧、胶体颗粒及硅酸盐等成分, 若处理不当, 将引致严重后果: 传热面结垢会急剧恶化热交换效率(研究证实, 仅1毫米厚水垢即可导致燃料消耗上升约5%-8%), 造成显著的能源损失; 同时, 溶解氧与氯离子等是诱发局部点蚀、应力腐蚀乃至爆管事故的关键因子。行业数据表明, 水质管控失当所引发的结垢与腐蚀, 构成了工业锅炉非计划停机与能效衰退的主要诱因。

炉外水处理, 指向在给水进入锅炉本体前, 采用系列物化手段对其进行深度提纯的工艺过程, 构成了保障锅炉长周期运行的源头性屏障。其核心任务是将成分各异的地表水、地下水或再生水等原水, 处理至满足如《工业锅炉水质》(GB/T 1576-2018)等国家标准的严格要求。伴随“双碳”目标的推进与环保法规的收紧, 炉外处理技术正处于一场深刻的范式转移之中: 从依赖传统化学再生方法, 逐步转向以膜分离为主导、追求化学药剂零添加与资源循环利用的新模式。本文通过梳理技术演进脉络, 对比分析主流工艺, 并结合前沿工程实践, 探讨该领域向绿色化与智能化发展的可行路径。

一、关键水质参数及其控制边界

锅炉对补给水的水质需求，随其工作压力、温度及设计型式的不同而存在阶梯式差异。以下核心指标直接决定了处理工艺的设计框架：

- **硬度（以钙、镁离子计）**：是形成锅炉结垢的直接诱因，水中的钙、镁离子会与碳酸根、硫酸根等离子结合，生成碳酸钙、硫酸钙、氢氧化镁等坚硬且导热性极差的垢体，附着在锅炉受热面与管道内壁。这类垢体不仅会大幅降低热交换效率，造成能源浪费，还会因受热面局部受热不均产生热应力，加速管道金属的腐蚀，缩短设备使用寿命。根据国家标准要求，低压工业锅炉给水硬度需严格控制在 $\leq 0.03 \text{ mmol/L}$ ，而中高压及以上锅炉对硬度的要求更为严苛，需将其降至检测限以下，实现近乎无硬度供水。

- **溶解氧**：是导致锅炉金属管道氧腐蚀的首要因素，在锅炉高温高压的运行环境中，溶解氧会与钢铁发生电化学反应，生成铁锈并逐步发展为点蚀、坑蚀，对高参数锅炉的水冷壁、过热器、省煤器等关键部件尤为致命。为遏制氧腐蚀，行业内通常采用热力除氧、真空除氧结合化学除氧的联合手段，将锅炉给水中的溶解氧浓度压制在 0.1 mg/L 以下，而超（超）临界电站锅炉因运行参数更高，对溶解氧的控制要求更为严格，一般要求 $\leq 0.05 \text{ mg/L}$ 。

- **pH 值与碱度**：补给水的 pH 值与碱度需维持在协同稳定的合理区间内，以此营造防腐防垢的适宜化学环境，二者的协同调控是水质管理的重要内容。若 pH 值过低，会加速金属管道的氢腐蚀，导致管道壁厚减薄；若 pH 值过高，则可能产生碱性结垢，并增加蒸汽的杂质携带性，影响蒸汽品质。同时，碱度作为水体的缓冲能力指标，若碱度过低，易导致 pH 值剧烈波动，难以维持稳定的化学环境。例如，工业热水锅炉系统要求给水 pH 控制在 $8.5\sim 10.0$ ，电站锅炉给水 pH 则精准控制在 $9.0\sim 9.6$ ，同时需通过合理调节碱度，确保水体具备足够的缓冲能力，避免 pH 值出现大幅波动。

- **溶解性总固体与电导率**：二者共同表征水中总含盐量。对于高压及以上锅炉，补给水电导率往往要求低于 $0.1 \mu\text{S/cm}$ ，这必须借助深度脱盐技术实现。

- **硅含量**：硅化物是影响高参数锅炉及汽轮机安全运行的关键杂质，在锅炉高温高压的运行条件下，水中的硅化物会形成易挥发的硅酸，随蒸汽进入汽轮机，在汽轮机叶片和通流部分形成难溶于水的二氧化硅沉积。这类沉积会导致汽轮机通流面积减小、效率下降、振动加剧，严重时还会引发设备故障，影响整套机组的安全运行。因此，超（超）临界电站锅炉对补给水的硅含量提出了极致限制，一般要求活性硅含量 $\leq 20 \mu\text{g/L}$ ，总硅含量 $\leq 50 \mu\text{g/L}$ 。

除上述核心指标外，锅炉补给水还需严格控制氯离子、硫酸根离子、油类、有机物及微生物等杂质含量，各类指标的管控边界均需与锅炉的工作参数精准匹配。一套完善的水质管理策略，并非单纯的末端处理达标，更需构建一个“实时监测－数据分析－预警响应－工艺调节”的动态智能闭环，通过在线监测设备实时捕捉水质变化，利用数据分析模型预判水质波动趋势，及时调整处理工艺参数，从而将事后处理转变为事前预防，实现水质的精

细化、动态化管控。

一套完善的水质管理策略，超越了单纯的末端处理，更需构建一个“实时监测－数据分析－预警响应－工艺调节”的动态智能闭环，从而将事后处理转变为事前预防。

二、主流技术路线的比较分析与选型策略

典型的炉外处理流程遵循“预处理→主体脱盐→精制抛光”的阶梯模式。预处理（涵盖混凝、过滤、超滤等）负责去除悬浮物和胶体，保护后续精密单元；主体脱盐则是去除离子化杂质的关键步骤。当前，深度脱盐领域形成了多条特征迥异的技术路径。

（一）离子交换技术的传承与革新

作为经典方法，离子交换技术依靠树脂功能基团的可交换离子与水中的盐分离子进行置换。传统的“阳床－阴床－混床”三级系统虽能产出极高纯度的水，但其弊端突出：需周期性停机并使用大量酸碱再生树脂，产生高盐度废水，运行维护复杂且环保性欠佳。其进化呈现两个分支：一是将其角色定位为后置“精处理混床”，置于反渗透等主工艺之后进行最终“抛光”，此举大幅削减了再生频率与化学品消耗；二是发展为电去离子（EDI）技术。EDI创新性地将电渗析与离子交换树脂耦合，在直流电场作用下实现连续深度脱盐与树脂的同步电化学再生，完全摒弃了酸碱的使用，产水电阻率可持续达到 $15 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上，代表了高端超纯水制备的方向。

（二）反渗透（RO）膜技术及系统集成

反渗透工艺依靠压力驱动，使水分子选择性透过半透膜，从而高效截留绝大多数溶解盐、有机物及微生物（脱盐率普遍 $\geq 98\%$ ）。其核心优势在于是一个物理分离过程，避免了相变与大量化学药剂的使用。然而，RO系统对进水水质敏感（需严格控制污染指数SDI和氧化剂），且会产生约占进水量20%–30%的浓缩液。因此，RO常作为核心模块与其他技术集成：“RO＋混床”组合利用RO承担绝大部分脱盐负荷，混床进行深度精制，显著降低了酸碱消耗；而“RO＋EDI”的全膜法工艺，则实现了从预处理到深度除盐的全流程无需化学再生，系统自动化程度高、产水水质稳定，已成为新建高端项目的优先选择。

（三）电化学除盐等新兴技术的应用探索

除上述主流技术外，一些基于电化学原理的创新工艺也在特定场景中展现价值。例如，电渗析（ED）利用电场驱动离子透过选择性离子交换膜实现分离，早期多用于苦咸水淡化。近年来，更为高效的电化学除硬技术取得工程化突破。国内某有色金属企业在其循环水系统中，应用自主研发的高效阴极沉淀装置，对钙镁离子的去除率超过85%，同时吨水处理能耗较传统RO工艺降低约三分之二，为高硬度水预处理及废水回用提供了兼具经济性与技术可行性的新方案。

技术选型决策矩阵

技术路线 典型适用场景 核心考量因素

传统离子交换 中小型低压工业锅炉；原水盐含量低、投资预算有限的项目 初始投资低，但运行成本（酸碱耗材、废水处理）高，环保压力大

反渗透（RO）为核心 大多数新建电站及大型工业锅炉；原水

水质复杂、含盐量较高的场景 脱盐效率高，运行相对环保，但对预处理要求严，存在浓水排放问题

全膜法（RO+EDI）超（超）临界发电机组、高端电子、制药等行业；对水质纯度及环保有极致要求 出水水质最优、自动化程度高、基本无化学污染，但综合投资成本最高

电化学除盐 高硬度水的前端软化处理；循环水系统的旁流处理；零排放系统的预处理单元 针对特定离子（如硬度）去除效率高、能耗较低，适用场景相对专一

三、系统优化实践：资源回收与能效提升

现代炉外处理系统的优化焦点，正从“达标排放”转向“资源与能源的内生循环”。领先企业通过技术改造，实现了水、热、物料的多重回收，有效压降了运营成本与环境负荷。

- 水与热资源的梯级回用：将锅炉排污水、工艺蒸汽凝结水等高品质废水资源化，是降本增效的关键。例如，某有色冶金企业实施系统性改造，将余热锅炉排污水及工艺凝结水回收，经在线水质监测分流，合格者直接回用，不合格者经两级 RO 深度脱盐后回用，构建了厂区水循环微网，在节约新水的同时回收了余热。另一家制造企业则将锅炉浓水收集后，作为厂区废水处理站的补充水源，年节约水费逾15万元。

- 过程节能与浓水资源化：通过工艺优化提升水资源利用率并回收能量。EDI 装置自身的浓水回收率可设计超过90%，通常可回流至 RO 前段。在大型 RO 系统中，安装能量回收装置，可利用高压浓水的压力能，降低系统整体电耗20%–30%。

- 智能管控与精准加药：依托在线水质传感器（实时监测 pH、电导率、硬度等）与 PLC/DCS 控制系统，实现混凝剂、阻垢剂等化学药剂的按需精准投加。这不仅确保了处理效果，更从源头减少了药剂消耗与二次污染风险。前述冶金企业通过引入智能加药系统，将循环水 pH 值稳定控制在 7.5 ± 0.2 的窄幅区间，显著提升了缓蚀阻垢效率。

四、结论与前瞻

锅炉补给水炉外处理是一项融合物理、化学、膜分离、电化学等多学科技术的复杂系统工程，其工艺选择并非单一的技术选择，而是需要基于原水水质、锅炉运行参数、项目投资预算、长

期运行成本、地方法规要求及企业绿色发展战略进行的多目标综合决策，核心是实现技术先进性、经济合理性与环境友好性的有机统一，确保处理系统与项目实际需求高度适配。

从技术发展与应用实践来看，以反渗透（RO）作为主力除盐单元，并以电去离子（EDI）作为终极抛光手段的全膜法工艺，凭借其卓越的产水品质、近乎零的化学污染、高度的自动化特性以及良好的资源循环性，正成为超（超）临界发电机组、高端工业锅炉等高参数、严要求应用场景下的技术标杆，也是未来锅炉补给水炉外处理技术的主流发展方向；传统离子交换技术虽逐步退出主体脱盐环节，但作为深度精制单元仍具有不可替代的价值，在中高压锅炉补给水处理中仍有广泛应用；电化学除盐等新兴技术则在特定场景中成为主流技术的重要补充，与膜法工艺形成协同搭配，进一步提升了处理系统的针对性与效率，丰富了炉外处理的技术体系。

展望未来，在我国“双碳”目标与工业绿色转型的双重驱动下，锅炉补给水炉外处理领域的技术发展将围绕工艺绿色化、运维智能化、系统零废化三大主轴持续深化，不断突破现有技术瓶颈，实现更高水平的节能降耗、减污增效，为工业企业的绿色发展提供坚实支撑。

1. 工艺绿色化：以 EDI、特种分离膜为代表的近零化学药剂工艺将加速普及。同时，抗污染、低能耗的新型膜材料（如石墨烯改性膜、生物仿生膜）的研发有望突破现有性能瓶颈。

2. 运维智能化：深度融合物联网、大数据与机器学习算法，构建具备自适应优化、故障预警与远程诊断能力的“智慧水厂”系统，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的运维模式变革。

3. 系统零废化：通过集成高级氧化、膜蒸馏、蒸发结晶等先进技术，对 RO 浓水及残余废水进行深度处理和有价值组分提取，最终趋近“零液体排放”，使水处理系统成为企业循环经济的关键环节。

锅炉补给水炉外处理作为锅炉系统安全稳定运行的前置保障，其技术与系统优化始终与工业装备升级、绿色发展需求同频共振。通过持续的技术迭代、工艺集成与系统优化，锅炉补给水处理将不再仅仅是为核心动力设备“保驾护航”的辅助环节，更将演变为工业企业践行节能降耗、减污增效和可持续发展战略的重要支柱，为我国工业绿色转型与“双碳”目标的实现提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] GB/T 1576–2018，工业锅炉水质 [S]. 北京：中国标准出版社，2018.
- [2] GB/T 12145–2016，火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量 [S]. 北京：中国标准出版社，2016.
- [3] HJ 2009–2011，燃煤电厂锅炉补给水处理系统技术规范 [S]. 北京：中国环境科学出版社，2011.
- [4] GB 50050–2017，工业循环冷却水处理设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2017.
- [5] 李本高，王建军. 工业水处理技术与应用 [M]. 北京：中国石化出版社，2020.
- [6] 丁桓如，黄霞. 水处理工程 [M]. 北京：化学工业出版社，2019.
- [7] 高乃云，范瑾初. 饮用水深度处理技术 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.
- [8] 任建新. 膜分离技术及其应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2021.
- [9] 沈光范. 电厂化学水处理技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2017.
- [10] 中国电力企业联合会. 中国火电行业水处理技术发展白皮书（2021）[R]. 北京：中国电力企业联合会，2021.
- [11] 膜工业协会. 中国膜分离技术应用现状与发展趋势（2020–2025）[R]. 北京：中国膜工业协会，2020.
- [12] 某有色冶金企业. 锅炉补给水处理系统资源化改造工程技术报告 [R]. 企业内部报告，2022.
- [13] 电站锅炉补给水有机物处理方法研究进展 [J]. 刘荣. 广东化工，2014(16): 126–127