

海水淡化技术对不同类型海水适应性研究

王慧, 石茜, 王绍聪

山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013

DOI:10.61369/WCEST.2025060007

摘 要 : 随着全球淡水资源的日趋紧张, 海水淡化作为获得淡水的重要方式之一, 其技术应用范围越来越广泛。然而, 不同海域的水质特征存在显著差异, 这会对淡化技术的选择、运行效果以及成本造成影响。本文系统分析了高盐度、高硬度、高碱度以及高污染、高油度等不同类型的海水的水质特征, 介绍了反渗透、多效蒸馏、多级闪蒸等主流海水淡化技术的原理。在此基础上, 重点探究了不同淡化技术对于不同水质海水的适应状况, 并且有针对性地给出了改良思路, 涵盖预处理工艺优化、关键参数调整, 再到运行维护策略完善等多个层面, 旨在为提高海水淡化技术在不同应用场景里的效能与可靠度供应理论参照。

关 键 词 : 海水淡化; 水质特性; 反渗透; 多效蒸馏; 适应性; 优化策略

Adaptation of Seawater Desalination Technology to Different Types of Seawater

Wang Hui, Shi Qian, Wang Shaocong

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., LTD., Jinan, Shandong 250013

Abstract : With the increasing scarcity of freshwater resources worldwide, seawater desalination has become a crucial method for freshwater acquisition, with its technological applications expanding significantly. However, the water quality characteristics of different marine environments exhibit notable variations, which impact the selection of desalination technologies, operational effectiveness, and cost considerations. This study systematically analyzes the water quality characteristics of seawater with high salinity, hardness, alkalinity, pollution levels, and turbidity. It introduces the principles of mainstream desalination technologies including reverse osmosis, multi-effect distillation, and multi-stage flash evaporation. Building on this foundation, the research focuses on evaluating the adaptability of different desalination technologies to varying seawater conditions, proposing targeted improvement strategies that encompass pretreatment process optimization, parameter adjustments, and operational maintenance enhancements. The study aims to provide theoretical references for improving the efficiency and reliability of seawater desalination technologies across diverse application scenarios.

Keywords : seawater desalination; water quality characteristics; reverse osmosis; multi-effect distillation; adaptability; optimization strategies

引言

水资源的可持续供给是全球发展的严峻挑战, 海水淡化是开拓新的水源渠道的重要手段, 其技术可靠程度直接关系到供水安全^[1]。然而, 自然海水并不是成分均一的介质, 其盐度、硬度、浊度以及污染物含量等因地理环境和人类活动的影响而呈现出显著的地域性差异。这种水质多样性限制了淡化技术的选取、系统运转效能以及全生命时段成本。如果技术应用与具体水品质状况不匹配, 就会导致耗资提升、膜组件或设备结垢侵蚀等一系列问题。因此, 系统研究主流海水淡化技术对不同类型海水的平衡能力, 对于优化不同特性的海水平衡工艺设计、提升运行稳定性、推动该技术科学合理发展具有指导意义^[2]。本文旨在开展此项研究, 为实践提供理论参考。

一、海水的类型及水质特征

(一) 高盐度海水的水质特征

高盐度海水一般是指盐度远高于全球平均海水平均盐度的水

体, 多见于红海、波斯湾等蒸发量远远大于降水量的封闭或半封闭海域。其主要特征是水中溶解性总固体含量很高。

高盐度表示水中钠离子, 氯离子, 硫酸根离子, 钙离子, 镁

离子等主要离子的浓度高。这种高离子强度不仅直接增大了淡化

的难度和能耗，也对材料的耐腐蚀性提出了更高的要求。在高盐度环境里，设备的腐蚀风险显著增加。除此之外，高盐度往往伴随着更高的渗透压，这对于依靠半透膜进行分离的反渗透技术来说是一大难题，因为需要更高的操作压力才能克服渗透压，使水分子透过膜。

（二）高硬度高碱度海水的水质特性

海水的硬度主要是由海水中钙离子和镁离子的浓度构成，而碱度则是由碳酸氢根、碳酸根和氢氧根的浓度构成^[3]。高硬度、高碱度海水具有较大的结垢风险。高硬度意味着钙、镁离子浓度高，它们是碳酸钙、硫酸钙和氢氧化镁等垢体的主要阳离子。高碱度表明水体对pH改变的缓冲能力较强，碳酸根、碳酸氢根离子浓度较高，为碳酸钙垢的产生供应了较多的阴离子。当水温升高或者pH值发生变化的时候，这些微溶盐类易因溶解度降低而析出，从而形成硬质的垢层。

（三）高污染高浊度海水的水质特征

高污染、高浊度的海水常见于近岸及河口或受工业、农业、生活污水排放等影响的区域。此类水质特征复杂，含大量悬浮固体和胶体，导致水体浑浊，并富有有机物、油、藻类及其产物，甚至包括细菌、病毒等微生物。高浊度主要是由于泥沙、黏土、藻类等悬浮颗粒物含量高引起的，高浊度海水会直接导致膜污染或者热交换器表面堵塞从而影响传热效率^[4]。溶解性有机物、胶体物质等则会在膜面或设备内壁上形成难以清除的凝胶层或者滤饼层，造成不可逆污染。生物污染是此类水质的另一大难题，微生物在系统里滋生会形成生物膜，既阻碍水流又影响传质，也许还会引发微生物腐蚀。

二、主流海水淡化技术原理探析

（一）反渗透技术原理

反渗透技术是一种压力驱动膜分离过程，利用只允许水分子透过而截留溶解盐类、有机物、细菌等杂质的半透膜实现分离。在自然渗透现象里，水分子会自发由低浓度溶液侧透过半透膜向高浓度溶液侧迁移，直至两侧化学势平衡。反渗透过程则是通过向高浓度盐侧施加高于本身渗透压的外界压力，迫使水分子反方向迁移，从而实现盐分和水的分离。其中渗透的水称作渗透液，被浓缩成的盐水称为浓盐水。反渗透装置的性能主要取决于所选半透膜的选择性、透水性及操作压力、温度、回收率等因素^[5]。

（二）多效蒸馏与多级闪蒸技术原理

多效蒸馏和多级闪蒸都属于热法淡化，其本质就是通过加热海水使其蒸发，再把产生的水蒸气冷凝成淡水。多效蒸馏系统由若干个蒸发器串接而成，上一级蒸发产生的蒸汽成为下一级蒸发的热源，下一级的蒸发室压力较低，所以海水可以在较低温度下沸腾。如此，输入系统的热能可以在多个效体当中重复利用，从而显著提高热效率。整个蒸发和冷凝过程都是在比较稳定的状态下展开的。多级闪蒸则是把海水先加热到一定的温度，再将其送入一系列压力逐级降低的闪蒸室中。由于每一个闪蒸室的压力都低于被加热后的饱和蒸汽压，因此将有一部分海水平稳地汽化（也

称“闪蒸”）。产生的蒸汽在各级的冷凝管上冷凝为淡水，剩余的海水温度逐级降低。多级闪蒸主要是靠压力的分段下降来实现多次蒸发。

（三）其他淡化技术原理概述

除了反渗透以及主流热法以外，还有其它一些淡化技术存在。电渗析利用选择性离子交换膜，在直流电场影响下，使海水中各种带不同电荷的离子产生定向移动现象以达到分离淡室和浓室的目的，但该种技术对非带电物质去除效果差。膜蒸馏是一种利用膜的热驱动蒸发过程将膜技术与蒸发结合的技术。膜蒸馏中使用一种疏水微孔膜，仅允许水蒸汽穿过而阻隔液态水，在膜两侧蒸汽压力差的推动下进行传质并实现冷凝。正渗透技术则是利用汲取液和海水的渗透压差做为动力源使水分子自发由海水侧透过半透膜进入汲取液中，然后在稀释后的汲取液中析出淡水^[6]。

三、淡化技术的水质适应性分析

（一）反渗透技术在不同海水类型中的适用性

反渗透技术处理高盐度海水时面临很多问题，盐度过高会直接导致渗透压提高，为维持所需的产水量需要提高操作压力，导致能耗增加，而对高压泵以及膜壳、管道等的压力承受能力要求更高^[7]。膜元件的盐透过率也会随着盐浓度的增加而略微上升，影响产水水质。对于高硬度、高碱度海水，反渗透膜易发生严重结垢，特别是碳酸钙垢和硫酸钙垢，所以必须依靠有效的预处理和严格投加阻垢剂来控制结垢，否则会造成膜污染、清洗频繁和使用寿命缩短。但是反渗透膜对离子型杂质具有很强的截留能力，其产水水质一般都非常好。面对高污染、高浊度的海水，反渗透系统的前置预处理十分重要。悬浮物、胶体以及有机物极易对膜表面造成不可逆的污染，使通量大幅度下降、压差上升及清洗频率提高。

（二）热法技术对不同海水类型的适应性研究

热法技术对于进水盐度变化的敏感性相对较低，其主要依靠相变过程来进行处理，可以处理各种不同盐度的海水，甚至适用于浓缩高盐废水。高盐度对蒸发效率影响有限，却会加剧设备的腐蚀。高硬度、高碱度是热法技术的主要制约因素，加热表面易结垢，特别是硫酸钙等硬垢一旦生成就很难去除，会显著影响传热效果，增加能量损耗，甚至造成设备毁坏。因此，严格的水质软化预处理以及不间断的防垢措施是热法技术应用的必要条件。

高污染、高浊度海水中悬浮固体与胶体会沉积于热交换器表面，干扰传热过程，但对比反渗透膜而言，热法设备对进水水质波动的耐受性通常更强，其预处理较为简化，主要目的在于除浊与防垢。但有机物热分解或藻类的问题可能会造成新的运行问题。

（三）其他技术对海水类型的适应性研究

电渗析技术去除非带电物质的能力较弱，适合用于处理含盐量不高的苦咸水淡化过程，用于高盐度海水的能耗比较高，且对硬度结垢比较敏感，膜污染的情况不同于反渗透^[8]。膜蒸馏理论上可以接近100%的截留非挥发性物质，适合高盐度水处理，可利

用低品位热源，但是膜润湿和污染问题仍需要解决。正渗透技术驱动压力需求低、膜污染倾向较轻、对高污染水质可能具一定适应性，但其高性能汲取液的开发与回收仍是技术难点。这些技术目前应用的规模不大，其适应性仍在探索中。

四、技术适应性优化方向

（一）预处理工艺的针对性优化

针对高盐度海水，预处理应着重控制微生物和胶体污染，保护反渗透膜，并选用耐腐蚀、耐污染的预处理材料^[9]。对于高硬度、高碱度海水，预处理重点在于软化除硬，可以使用化学软化、离子交换或者纳滤预处理等办法降低钙、镁等离子的浓度，并精确控制阻垢剂投放量。面对高污染、高浊度海水，应构建多层屏障式的预处理流程，以混凝、沉淀、介质过滤等常规手段为基础，加强超滤、微滤等膜法预处理技术的应用，有效地清除悬浮物、胶体以及部分大分子有机物质。对特定的污染物如藻类、油类，需要加入气浮、高级氧化等特殊的预处理单元。

（二）核心工艺参数的适应性优化

针对反渗透系统而言，处理高盐度海水时要改善操作压力和回收率，在能耗和产水率之间达成平衡。对于高结垢倾向的水质来说，应选择更加保守的系统回收率，以防止膜表面浓度过高，并且要改善阻垢剂的品种及投加量。清洗周期以及清洗配方也需根据实际污染情况进行调整。热法技术则须按照水质来调整顶值温度、流量等参数以减轻结垢现象，例如多级闪蒸就可以控制最高加热温度低于硫酸钙的结垢温度。各级操作压力及温度分布的优化也属于提升适应性及能效的内容之一。

（三）系统运维策略的优化

建立基于实时水质监测的预警系统十分重要，通过监测浊度、盐度、硬度、污染指数等参数的变化情况来动态调整预处理及主工艺运行参数，实现超前控制。推行预测性维护，定期开展膜性能检测、设备状况评价工作，避免被动处理故障。制定科学、高效的清洗规程是保障长期稳定运行的基础，需针对不同类型的垢质及污染物开发不同的化学清洗剂与物理清洗方法。加强运行人员培训，提升其对不同水质条件下系统运行特性的理解和应急处置能力，也是优化适应性的重要环节。

五、结语

海水淡化技术的有效利用，依赖对原水水质特点的深入认知和针对性应对策略^[10]。高盐度、高硬度碱度以及高污染浊度等不同类型的海水对反渗透以及热法蒸馏等主流技术带来不一样的挑战和要求。反渗透技术对盐度、污染比较敏感，但是产水水质较好；热法技术对于盐度的容忍度较高，但是容易结垢、腐蚀。未来的海水淡化技术的发展，会愈发重视工艺的精细程度和适应性。在不断更新预处理技术创新、智能优化核心工艺参数、完善运行维护策略的基础上，有望发明更经济、更高效且可靠的海水淡化技术，能够更好地应对不同复杂海水水质带来的挑战，为全球的水资源安全提供强有力的支持。

参考文献

- [1] 陈周蕾, 陈亦云. 海水淡化产品水的水质特性及用途分析 [J]. 门窗, 2019, (09): 168-169.
- [2] 何雁鸣, 江洁颖. 海水淡化反渗透膜化学清洗技术分析 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(06): 47-49.
- [3] 吴水波. 海水淡化厂水质管理方法研究 [J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(05): 49-53+84.
- [4] 张胜梅. 海水淡化技术的分类及成本分析 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(06): 57-59.
- [5] 杨华, 韩韵佳, 杜聪. 海水淡化技术的应用 [J]. 科技与创新, 2024, (08): 175-177+181.
- [6] 丁旭东. 反渗透海水淡化技术的现状与发展 [J]. 自动化应用, 2023, 64(S1): 29-31+47.
- [7] 江润霞. 海水淡化反渗透膜法工艺的应用 [J]. 山东工业技术, 2019, (02): 48.
- [8] 马朝勤, 李玉磊. 海水淡化联合处理技术 [J]. 科技创新导报, 2017, 14(26): 84+89.
- [9] 郑高, 吴旭. 船用海水淡化技术发展现状和趋势 [J]. 机电工程技术, 2022, 51(09): 43-47.
- [10] 邱明英. 浅析我国海水淡化技术 [J]. 中国环保产业, 2018, (03): 58-60.