

# 分级式海水淡化与采暖系统联动设计的能源效率分析

● 周 磊



**[摘要]** 随着全球能源需求不断增加和环境问题日益严峻,海水淡化和采暖系统的能源效率优化逐渐成为重要课题。传统的海水淡化技术在能源消耗方面存在较大瓶颈,而采暖系统与海水淡化系统的联动设计则能够实现热能回收和有效利用,显著提高系统整体的能源效率。本文针对分级式海水淡化与采暖系统联动设计的能源效率进行了深入探讨,并提出了系统设计优化方案,通过案例分析验证了联动设计的可行性和实际应用效果。

**[关键词]** 分级式海水淡化;能源效率;采暖系统;联动设计;热能回收

## Q 分级式海水淡化技术的能源效率分析

### (一) 分级式海水淡化原理与工艺

分级式海水淡化技术,是利用不同的热力学过程分阶段逐步提取水中的盐分,并进行淡化处理。其基本原理是利用海水不同温度下的蒸发潜热差异,通过多级蒸发或热交换过程,逐步降低海水的盐浓度,达到淡化海水的目的。分级式海水淡化能够逐步提取和利用蒸发潜热,提高整体能源利用率,降低整体能源消耗。其关键在于合理设计各个阶段的热能传递与回收机制,减少热能浪费并提高热能利用率。分级式海水淡化工艺的选择受海水的温度、盐度以及所能提供的能源形式等多个因素的影响。

### (二) 系统设计与节能优化方法

分级式海水淡化系统的设计需兼顾其处理能力与能源效率,如何合理配置各级蒸发器和热交换器以确保能源的最优传递和最大利用,成为亟须解决的重点问题。设计者常会采取三种优化策略:一是优化系统的热交换器布置,提升热能的回收效率,以减少外部能源的需求;二是增加海水的预热环节,以提高进入蒸发器的海水温度并减少热能输入的要求;三是精确调控系统的每个蒸发层级的温度、压力和流量,以保证每一级的蒸发和冷凝过程处于最佳状态。以多效蒸馏(MED)技术为例,其通过收集低温蒸汽用于加热高温进水,能够实现热能的再利用。在一些工业区或沿海地区,分级式海水淡化系统常与发电厂发电等工业过程联动。其可以利用发电厂的废热进行海水淡化,减少化石能源消耗,并根据环境温度、进水温度以及生产需求的变化自动调

节蒸发器和热交换器的工作参数,保证动态调整热能的分配及利用。

### (三) 能源消耗模型与效率评估

能源消耗模型会根据不同工艺配置计算系统,计算海水淡化系统在单位时间内的总能源消耗,研究者通常会采用热效率和比能耗(Brine Energy consumption, BEP)作为评估指标,热效率表示系统利用的热能与投入的总热能之比,比能耗则是每生产1吨淡水所需的能量。热效率的计算见公式(1)。其中 $Q_{\text{useful}}$ 表示系统中有效利用的热能, $Q_{\text{total}}$ 表示系统投入的总热能。热效率反映了系统利用热能的能力,热效率越高,说明系统越能将投入的热能转化为有效工作。

$$\eta_{\text{heat}} = \frac{Q_{\text{useful}}}{Q_{\text{total}}} \quad (1)$$

比能耗(BEP)则是生产单位淡水所消耗的能量,常用来衡量海水淡化过程的能源利用效率,比能耗的计算见公式(2)。其中 $E_{\text{total}}$ 是生产过程中所消耗的总能量, $V_{\text{desalinated}}$ 是生产的淡水量。比能耗越低,表明系统在生产淡水过程中越节能。

$$\text{BEP} = \frac{E_{\text{total}}}{V_{\text{desalinated}}} \quad (2)$$

### (四) 分级式海水淡化技术的能源效率优势

分级式海水淡化能够利用多次蒸发和冷凝过程将大量热能逐级利用,显著降低海水淡化系统对外部能源的依赖,减少能源消耗。而反渗透技术虽在能源效率方面有一定优势,但其对电能的需求较高,且其淡化过程容易受到水质变化的影响,分级式海水淡化技术则能在热交换系统设计优化

的情况下，充分利用废热或其他低品位热能资源。分级式海水淡化系统能够在某些海洋气候条件下，凭借废热的回收与再利用将外部能源的消耗降至最低，甚至通过联动供暖系统等其他系统进一步提升能效。

## Q 供暖系统与海水淡化系统的联动设计

### (一) 联动系统的设计原理与架构

供暖系统与海水淡化系统的联动设计，主要是凭借合理配置两者之间的热能传输和回收机制，实现热能的高效利用与协同运行，最大程度提高能源利用效率，结合海水淡化过程中产生的废热与供暖系统的需求，形成互为支撑的能源循环。热源的供给由蒸发器、冷凝器等装置提供，主要包括海水淡化过程中产生的废热或余热。废热可以凭借管道和热交换设备直接传递到供暖系统中的热水或空气加热部分。热能回收模块则利用热交换器或热泵设备，从海水淡化过程中回收热能，满足采暖需求。热能分配部分包括控制系统、泵和阀门等用于调节热能流动和分配的设备，以保证各个环节能够根据需求灵活调节。

### (二) 联动过程中的热能回收与利用

海水在分级式海水淡化系统中经过多级蒸发或冷凝处理后将产生大量废热，连接这些废热与供暖系统将实现废热的有效回收，将其并用于加热建筑物或其他区域可以达到节能的效果。联动设计中的热能回收过程由热交换器、热泵等设备实现。热交换器运用直接接触或靠近的方式将海水淡化系统中的高温废热转移到供暖系统的冷却水或空气中，从而降低温度、减少能源损失并为供暖系统提供必要的热源。利用海水淡化过程中的废热能够满足寒冷地区的采暖需要。在热能回收中利用热泵技术，能够使低品位的废热提升到更高的温度，实现低温废热热能的更高效回收与利用。热泵利用压缩机可以将低温蒸汽压缩至高温高压状态，释放热量供给供暖系统，或用于提高海水淡化过程中的蒸发温度，提高整体效率。由于海水淡化过程中的热能产生具有周期性和波动性，因此，需要对热能回收系统进行灵活设计，使其根据采暖需求和海水淡化过程中的热量波动进行实时调整。

### (三) 联动系统能源效率分析与优化

分级式海水淡化与供暖系统的联动设计涉及多种能源优化技术，这些技术的应用旨在提升系统整体能效，回收和再利用海水淡化过程中产生的废热，有效减少系统总能耗。应用热泵技术和高效热交换器能够将低品位废热升温至适用于采暖的温度，为建筑供热并减少额外的能源输入。热交换器则用于在海水淡化和采暖系统之间高效传递热量，避免能源的浪费。

某海水淡化与采暖联动项目采用热泵技术对低品位废热的回收系统进行了优化，将海水淡化过程中产生的低温废热

利用热泵提升至适合的温度并将其用于供暖，减少了系统对外部能源的依赖。优化前后海水淡化与采暖系统能效数据对比如表 1。

表 1 优化前后海水淡化与采暖系统能效数据对比

参数	优化前	优化后
比能耗(kWh/m <sup>3</sup> )	6.2	4.4
废热回收率(%)	55	75
热效率(%)	68	82

数据结果表明，项目优化后的热能回收率从 55% 提升至 75%，比能耗从 6.2kWh/m<sup>3</sup> 降低至 4.4kWh/m<sup>3</sup>。废热回收系统利用热泵与热交换技术的合理结合提升了海水淡化与采暖系统的整体能源效率，减少能源消耗并使系统更加绿色环保。

### (四) 不同运行模式下的能效表现

联合运行模式下的海水淡化系统与采暖系统密切协作，实现了废热的回收再利用。而独立运行模式下的海水淡化系统则与采暖系统分开运行，存在废热回收效率较低等问题。某沿海城市的海水淡化与采暖联动系统进行了联合运行模式与独立运行模式的对比实验，不同运行模式下的系统能效对比如表 2。

表 2 不同运行模式下系统能效对比

参数	联合运行模式	独立运行模式
比能耗(kWh/m <sup>3</sup> )	4	5.6
废热回收率(%)	70	50
热效率(%)	80	68

在联合运行模式下，沿海城市废热回收率达到 70%，比能耗为 4.0 kWh/m<sup>3</sup>；而在独立运行模式下，废热回收率仅为 50%，比能耗则高达 5.6 kWh/m<sup>3</sup>。不同运行模式下的能效表现明确指出，联合运行模式能够有效提高废热的回收率，优化能源利用效率，减少系统能耗。

## Q 联动设计的实际应用与案例分析

### (一) 实际应用中的系统布局与实现

系统布局设计需考虑海水淡化系统产生的废热与采暖系统之间的热量匹配问题，合理的布局能够确保两者能效最大化，减少能量浪费和设备负荷。联动系统常利用两种方式进行热量的传递与交换。一种是通过在系统中设置多级热交换器，使海水淡化过程中产生的低温废热能够通过不同级别的热交换器逐级传递至采暖系统，保证热量的逐步有效利用。另一种方式是运用集成热泵技术，进一步提高废热的回收效率。

### (二) 案例研究：不同地区联动设计效果对比

阿联酋和挪威两地的实际应用案例，为分级式海水淡化与采暖系统联动设计的能效表现提供了对比分析的基础。

这两个地区在海水淡化和采暖系统联动设计的实施过程中面临的环境条件和能源需求存在较大差异，因此，联动设计的优化方案和结果也有显著不同。

阿联酋对采暖需求相对较低，其更关注的是如何在利用废热供热的同时优化能源消耗。其海水淡化项目主要为利用废热回收技术将海水淡化过程中的高温废热转移到空调系统和少量采暖系统中。在实施后，废热回收率提升了25%，比能耗从5.2kWh/m<sup>3</sup>降至3.9kWh/m<sup>3</sup>，系统热效率从67%提升至80%。与之对比，挪威地区的海水淡化与采暖联动系统面临的是较为寒冷的气候环境，其对采暖的需求较为旺盛。在挪威的项目中，废热回收需兼顾建筑的采暖需求及温室种植等附加用途。该项目优化了热泵与多级热交换器的配置，使废热回收率达到80%，比能耗降至4.2kWh/m<sup>3</sup>，热效率达到85%。阿联酋与挪威的分级式海水淡化与采暖系统联动设计效果对比如图2所示。

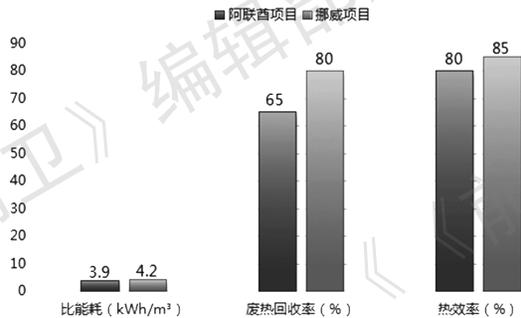


图2 阿联酋与挪威项目联动设计效果对比

此对比表明，虽然两个项目采用的技术相似，但最终的优化效果会因地理环境和能源需求的不同有所差异。阿联酋项目更注重节能和少量采暖需求的优化，而挪威项目则在高效废热回收和大规模采暖需求方面表现突出。

### (三) 系统优化与改进措施

设计热交换器可使用钛合金、铜合金等高热导性材料，

这些材料能够在海水环境中长期稳定工作，提高热交换效率，减少热能浪费。而采用多级热交换器结构则能在不同温度层次之间逐步回收废热，提升系统的热利用率。针对优化热泵系统进行优化时，可以采用变频技术调节压缩机的转速，动态调整不同运行模式下的能效。精确控制热泵的工作状态，可使其在低负荷和高负荷情况下都保持较高的能效比。回收低品位废热时，采用先进的逆向制冷技术，能够提升热泵的热效能，减少系统对外部能源的依赖。

### Q 结束语

本文针对分级式海水淡化技术与采暖系统联动设计的能源效率进行了深入分析，在优化系统设计和能效评估后，提出能够最大限度提升能源利用效率的方案。不同运行模式下的能效表现和实际应用中的案例分析表明，联动设计能够显著降低能耗并减少环境影响。随着技术的不断发展和技术应用的深化，分级式海水淡化与采暖系统的联动设计将在节能减排、资源综合利用等方面发挥更大的作用，推动能源结构的优化与环境可持续性的发展。

### 参考文献

- [1] 严荣杰, 蔡小飞, 郭理军. 热水采暖系统恒温控制阀结构的分析与改进[J]. 阀门, 2023(02): 191-194.
- [2] 李翠环. 低温地板辐射采暖系统的新型控制策略[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(18): 134-137.
- [3] 潘春佑, 李露, 王可宁, 等. 电驱动分级脱盐海水淡化装置的工业设计应用[J]. 净水技术, 2019, 38(S1): 264-265, 359.

### 作者简介:

周磊(1982-), 男, 汉族, 山东威海人, 本科, 工程师, 威海国际经济技术合作股份有限公司, 研究方向: 水暖。