海水淡化与综合利用关键技术
和装备成果汇编

科技部

二〇一四年七月

编者的话

海水是十分巨大的水资源和化学矿物资源宝库。世界各沿海国家均把大力开发利用丰富的海水资源作为解决陆地水和矿产资源危机的战略途径，我国政府亦把海水淡化列入《中国 21 世纪议程》和《国民经济和社会发展“十一五”规划纲要》中，并作为优先发展主题纳入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》。

“七五”以来，国家通过科技支撑计划、863 计划、973 计划和海洋公益性行业科研专项等科技计划的部署实施，重点支持海水淡化与综合利用技术设备研发应用，使我国具备了百吨级、千吨级、万吨级海水淡化成套技术支撑能力，基本能够满足国内海水淡化工程建设需求。“十五”以来，国家和一些沿海地方政府相继出台了一系列鼓励海水淡化与综合利用技术和产业发展的规划、政策与措施，为我国海水淡化与综合利用技术和产业发展提供了重要支撑。

目前，我国海水淡化单机产能达到国际通用水平，具备了单机规模 2.5 万吨/日低温多效蒸馏法装置和单机 2 万吨/日反渗透膜法海水淡化装置的制备能力，海水淡化设备国产化率由 40%上升到现在的 85%左右。截止 2012 年底，全国已建成投产和在建工程总装机规模近 100 万 m^3/d，与“十五”末相比，增加了十多倍。与此同时，海水淡化与综合利用新技术研发也取得重要进展。电吸附海水淡化新技术已经进入中试阶段；浓海水提钾、提溴技术已能满足工业化生产要求；新能源-海水淡化系统研究迅速发展，新研制的兆瓦级非并网风电海水淡化系统在江苏盐城建成 5000 吨/日示范工程，现已调试出水；国内海水淡化企业创新能力逐步提升，并在国际海水淡化市场上逐渐崭露头角。

为了推动相关海水淡化与综合利用科技成果的全社会共享和产业化应用转化，我们向承担国家和地方科技计划项目的单位，征集了一批先进适用的海水淡化关键技术和装备的成果，经多次组织专家研讨编制形成了《海水淡化与综合利用关键技术和装备成果汇编》，该汇编于 2014 年 6 月 12 通过专家论证，现向社会公开发布。汇编内容分两部分，第一部分为“技术和装备目录”，第二部分为

“技术和装备简介”。“技术和装备简介”部分由 “综述”和“案例”组成，“综述”主要描述技术与装备的基本原理、技术内容，国内外本领域的技术发展情况，主要技术经济指标，应用推广等情况。“案例”包括项目概况、工艺与装备、投资与运行效益分析以及相关应用推广情况。

《海水淡化与综合利用关键技术和装备成果汇编》中的技术和装备成果由承担国家和地方科技计划任务的相关单位提供，经业内专家整理和编辑形成。任何机构使用本成果汇编中的技术和装备，请研究分析技术和装备在相关应用中的实用性，并根据《合同法》等相关法律法规，与技术和装备提供方约定权利义务，在技术交易和使用中严格履行供需双方的责任与义务。

最后，感谢谭永文、阮国岭、许振良、袁俊生、杨波、解利昕、郑宏林、张雨山等专家为本汇编整理和编辑所付出的辛勤劳动，同时感谢所有参加本汇编和提供案例的单位及专家。

目　录

第一部分 技术和装备目录

海水淡化技术和装备目录

序 号	名 称	内 容 概 要	适用范围
一、反渗透海水淡化技术			
1	万吨级反渗透海水淡化系统设计与集成技术	该技术利用反渗透海水膜的选择透过性功能原理，集成海水取水、海水预处理、高压给水、海水淡化、能量回收、淡化水后处理、浓海水排放等工艺技术和设备，根据不同的用途需求，为沿海临港工业区和淡水资源缺乏地区的城镇生活、工业用水的生产与供应，设计、建造的大中型反渗透海水淡化工程。 海水淡化一级脱盐水 TDS≤500mg/L；吨水能耗≤3.5kWh；水质符合国家《生活饮用水卫生标准》。	适用于沿海临港工业区和城镇生活、工业用水的生产与供应。
2	千吨级反渗透海水淡化系统设计与集成技术	利用反渗透原理，集成海水取水、预处理、高压给水、能量回收、产水后处理等工艺技术和设备，根据不同的用途需求，设计、建造设中型反渗透海水淡化系统。 海水淡化一级脱盐水 TDS≤500mg/L；吨水能耗≤4.0kWh；水质符合国家《生活饮用水卫生标准》。	适用于沿海乡镇和海岛生活、工业用水的生产。
3	海岛适用的系列海水淡化技术与装备	本技术成果主要包括适用于海岛环境的 5 m^3/d-500m^3/d 系列海水淡化产品，能够满足不同规模海岛用水需要。采用模块化集成设计，便于运输与安装；采用高效能量回收设备降低能耗，并可与可再生能源匹配，节约能源；采用电化学和特种涂层方法，确保高盐度环境条件下防腐蚀效果；通过太阳能对海水取水进行预热，确保北方冬季水温过低时装备仍能正常运行；采用淡化水后处理技术使产品水满足生活用水需求。	适用于不同环境缺水海岛，也可用于海上科考、石油钻井平台、舰船淡水提供。
4	集装箱式多功能应急水处理装备	供水保障是应急救灾和战时军队后勤保障的极其重要组成部分，该技术提供了一种可适用于任何恶劣环境、对任何水质的水进行处理，且可在无外部供电的情况下仍能实现水处理的移动式应急水处理装备。该技术在一个或数个集装箱体内集成预处理、脱盐、后处理和其他辅助设备，可随时随地对地下苦咸水、海水、江河水和被污染的地表水等进行淡化、净化处理，生产符合国家饮用水标准的生活用水。	移动式应急海水、苦咸水淡化，河水、污染地表水和地下水净化等

5	亚海水淡化系统设计与集成技术	该技术采用反渗透膜法技术，结合传统预处理或膜法预处理工艺，对沿海淡水河口受海水倒灌和滩涂围垦水库的低盐度海水进行净化、淡化，为沿海淡水资源紧缺地区提供城镇生活、工业用水的生产与供应而设计、建造的大中型反渗透亚海水淡化工程。 亚海水淡化一级脱盐水 TDS≤200mg/L；吨水能耗≤2.0kWh；水质符合国家《生活饮用水卫生标准》;综合制水成本可控制在 2.5 元/m^3 以内。	适用于沿海河口海水倒灌水和滩涂围垦水库水的处理。
6	便携式交流直流海水、苦咸水淡化器	便携式交流直流海水、苦咸水淡化器，是一种结构紧凑、方便搬运和携带、应用范围广的便携式交流直流海水、苦咸水淡化器。该技术包括淡化器壳体，淡化器壳体内安装有开关电源及淡化组件，淡化组件包括依次连接供水泵、过滤装置、高压泵、反渗透膜装置，反渗透膜装置设置有浓水口和淡水口，供水泵、高压泵与开关电源电连接，开关电源上设置有直流电源接线柱及交流电源插座。可广泛应用于反渗透苦咸水淡化制造领域。专利号：ZL 2011 2 0367357.5， ZL 2009 2 0265582.0	应急救灾、野外科考、岛屿应急备用。
7	海水淡化反渗透复合膜元件制备技术	该技术通过界面聚合的方式，在涂刮在增强材料无纺布支撑的聚砜支撑膜表面利用间苯二胺单体与均苯三甲酰氯单体反应生成具有脱盐功能的聚酰胺层，制备出海水淡化复合反渗透膜元件。 利用制备的膜片与进水网格、产水布、中心管以及聚氨酯胶水通过一定的方式组装成标准的 8040 海水淡化反渗透膜元件。 海水淡化膜元件的性能：以 32000mg/L 的氯化钠为进水，操作压力 5.5MPa，温度 25℃，pH7.5～8,回收率 8%的条件下，膜元件的脱盐率＞99.6%，产水量达到 28m^3 /d。	适用于海水淡化工程，高含盐量苦咸水淡化以及高含盐量的废水处理等领域
8	海水淡化分离膜外壳制造技术	该技术是利用纤维增强塑料，具有强度高、耐腐蚀性好、可设计性强的优点，以环氧树脂为基体材料，以玻璃纤维为增强材料，采用缠绕工艺成型，高温条件下固化的生产海水淡化膜外壳。 项目技术按照权威的美国 ASME(X)规范要求完成了系统技术研发，按照等强度理论设计，并采用计算机辅助手段优化设计，研发出耐海水腐蚀的材料体系，设计并开发了系列保障工装，开发出 8 " 、4 " 、2.5 " 全部内径规格海水淡化膜外壳的工艺技术。	适用于膜法海水淡化工程建设，以及现有膜法海水淡化装置升级更新。

9	柱塞式海水高压泵和旋转式能量回收与增压集成装置	该技术由九柱塞高压泵和旋转式能量回收与增压一体装置组成。高压泵采用轴向九柱塞结构设计，利用液体自身对泵的运动部件进行润滑，无需任何润滑油。WE 系列高压泵具有体积小，效率高，输出压力、流量波动小，维护周期长等优点。能量回收与增压采用转子旋转式等压交换器和高压容积式增压泵及电动机的同轴结构设计，利用反渗透系统浓水的剩余压力能，通过该装置直接把原海水增压到反渗透系统进水所需压力，降低了海水淡化系统能耗。该集成装置具有设计紧凑合理，能量回收效率高等特点。系列装置适用于 5～1000 m^3/d 反渗透海水淡化系统。	适用于中、小型海水淡化系统的高压给水。
10	节段式海水淡化高压泵设计与开发	该技术创新的轴向吸入结构和液体动压轴承，使泵的结构更简单可靠；双盘双鼓结构轴向力自动平衡装置，在提高泵容积效率的同时，更加安全可靠；高效水力模型的数值模拟和试验研究，保证了泵具有更高的效率和更宽的高效率范围，大幅度降低了海水淡化系统的能耗。 单台流量满足日产淡水 5000 m^3装置的高压泵，流量 220 m^3/h，扬程 620 m，效率 83.07%，性能指标优于国内外同类产品。	适用于中、大规模反渗透海水淡化工程。
11	中开式海水淡化高压泵	以现有的水平中开式多级离心泵为基础，通过选择优秀水力模型和流道优化设计技术提高泵的水力效率；通过首级叶轮采用双吸式、后几级叶轮背靠背安装的技术解决高压泵巨大的轴向力问题；通过圆周方向 180 度对称分布的双蜗壳设计技术，解决叶轮和轴所承受的径向力问题；通过泵体内各级叶轮流道的优化布置，使机械密封处于相对低压位置，以解决机封的承压问题。	适用于单机规模万吨级及以上大型反渗透海水淡化工程。
12	阀控式能量回收技术与装备	采用功能交换的原理，通过程序控制的换向阀组的切换，把反渗透海水淡化系统排出的高压浓海水压力能量置换到新鲜海水上，从而达到能量回收的目的。单套装置浓海水处理量规模为 2～200m^3/h（按系统回收率 40%计算，生产淡水规模约为：32～3200m^3/d），装置工作压力 6.4MPa，能量回收效率 94%以上。	适用反渗透海水淡化系统的能量回收与利用。
13	转子式能量回收技术与装备	该技术利用一种流体的机械能直接驱动（接触式）另一种流体，为两种流动介质的压能交换提供良好的解决方案。采用流体自平衡技术，微隙流体润滑和密封集成技术，使两种介质的能量传递过程在工作中自动达到平衡	适用于沿海临港、海岛、海洋平台等处生活及工业用水的反

		状态，无需人为控制，无需外部驱动和控制元件，大大提高了能量的利用效率；且结构简单，可靠，稳定，根据不同处理量海水淡化系统需求，设计、生产不同规格系列的能量回收装置。 该技术中单套设备处理的水流量为 5～70m³ /h（可多台并联使用，最大处理量可达 560 m³ /h），单机的能量回收效率大于 94%，单机最大承压 6.9MPa，浓盐水与海水的掺混率为 3%～5%。	渗透海水淡化系统。
14	差压交换式能量回收技术与装备	该装置采用差压交换原理，利用高压浓海水余压能来增压进料海水，其结构特点是：两只差压缸相对放置，活塞杆相对接触，四个止回阀分成两组连接，分别置于差压缸的外面，两只差压缸之间由一个四通功能阀连接，可以自动切换，实现连续运行。单套装置浓海水处理量规模为 0.5～5m³/h（按系统回收率 29%计算，生产淡水规模为 0.5～5m³/d），能量回收效率在 95±3%之间，可以多套并联使用。主要用于小规模反渗透海水淡化系统，通常与反渗透系统高压泵串联使用，与无能量回收装置的反渗透系统相比，对高压泵出口压力要求降低，从而降低反渗透系统制水能耗。	适用小型反渗透海水淡化装置的能量回收。
15	海水淡化预处理复合超滤膜组件及装备	本技术主要包括：高强度复合超滤膜组件及成套装备，膜组件有 6″和 8″产品，装备单机处理规模 1000～10000m³ /d，可根据工程规模进行模块化组合。该产品可用于膜法海水淡化工程预处理，高过滤精度可为反渗透提供可靠的进水水质保障，出水 SDI<3，浊度<0.1NTU。模块化设计可根据工程处理规模进行有机组合，灵活方便。装备系统包括：超滤膜单元、自控系统、清洗系统等辅助设备，可广泛应用于膜法海水淡化、苦咸水淡化及再生水回用等工程。	可作为反渗透前处理用于膜法海水淡化及苦咸水淡化工程。此外在饮用水净化，污水深度处理回用方面已经广泛应用。
16	海水淡化水后矿化技术	本技术是一种提高海水淡化系统产水的碱度和硬度的工艺方法及后处理设备。 本技术是一种海水淡化后的后处理工艺，通过对海水淡化出水进行矿化处理，提高海水淡化水的碱度和硬度，最终使成品水质能符合中华人民共和国生活饮用水卫生标准 GB5749-2006 和世界卫生组织标准，而且对人体的健康较为适宜。	适用于沿海临港工业区和城镇生活用水的生产与供应。

二、低温多效蒸馏海水淡化技术			
1	万吨级低温多效蒸馏海水淡化主体装备	是国内制造的首套万吨级低温多效蒸馏海水淡化主体装备，通过对管内蒸发、管内凝结和管束间蒸汽流动的研究，掌握了横管降膜传热机理，开发出适用于多种工艺的系统热力学设计计算软件，并对核心设备强度与稳定性进行研究分析，形成了具有自主知识产权的设计与制造体系，进而完成安装和调试工作，提升了国内热法海水淡化的系统集成能力。实际运行数据表明，系统出水含盐量约 3～4ppm（设计值小于 5ppm），造水比达到 10.8（设计值 10.2），吨水电耗为 0.82kWh/m³（设计值 1.0kWh/m³）。	具有热源的沿海电厂、石化、冶金等企业的海水淡化工程。
2	低温多效蒸馏海水淡化技术	包括 1000 m³/d ～50000 m³/d 等不同规模低温多效淡化工程成套技术，涵盖传热材料、关键设备和部件、专用药剂和材料、仿真及智能化控制技术、设计及制造标准等方面，可与滨海电厂主流发电机组（300MW-1000MW）配套建设，也可应用于电力、石油、化工、冶金等行业利用余热的海水淡化工程。实际运行效果：产水 TDS 为 8mg/L（合同值≤10mg/L），造水比 10.3（合同值≥8），系统吨水电耗为 1.43kWh/m³（合同值≤1.8kWh/m³）。	具有热源的电厂、石化、冶金等企业的海水淡化工程。
3	余能低温多效海水淡化技术	以能量梯级利用为原则，将企业产生的富余蒸汽以及可燃副产品燃烧产生的蒸汽首先用于汽轮机发电，发电做功后的负压蒸汽（乏汽）再直接进入低温多效海水淡化装置制取淡水，实现真正意义的“水电联产”。2×12500m³/d 低温多效装置配套 2×25MW 发电汽轮机，可在 40%～110%负荷间调整，满负荷情况下其造水比（GOR）可达到 10，吨水电耗小于 0.8kWh，产品水电导率小于 10μS/cm；配套的发电汽轮机排汽参数保持在 0.035±0.001Mpa，74±2℃的范围内，汽轮机停产时海淡装置可继续转为“TVC”模式运行，联合系统热效率高达 82.23%。	适用于沿海钢铁、石化、电力等具有富余蒸汽及可燃副产品的工业企业及市政行业。
4	低温多效蒸馏海水淡化仿真培训平台	针对海水淡化宣传教育和技能培训的业务需求，综合采用计算机图形学、虚拟现实、分布交互式仿真等先进技术，开发了具有自主知识产权的低温多效蒸馏仿真培训软件，构建了软硬件运行支撑环境，形成了首套面向低温多效海水淡化装置的仿真培训平台。平台可用	海水淡化专业知识教学、技能培训、职业鉴定和技术交流。

		于承担教育宣传、技能培训、职业鉴定和工程指导等任务，也可用于国内外技术合作。	
5	低温多效蒸发海水淡化系统优化及设计技术	本技术成果可对包括 100 m^3/d～30000 m^3/d 等不同规模的低温多效海水淡化工程进行方案提供和设计计算。涵盖如系统设计、进料流程设计、蒸发器结构设计等关键技术；同时根据具体情况提出换热管材方案、前期预处理方案、防腐技术方案等配套技术；亦可对整个系统的能耗、环境友好度评估给出核算报告。具备了项目策划、教育培训、技术咨询、工程设计能力。	具有热源的热电厂、核电站、石化、冶金等企业的海水淡化工程。
6	低温多效蒸发海水淡化系统实验技术	社会对热法海水淡化的需求催生了试验及测试平台的建设，以用于传热技术、关键设备和部件、专用药剂、蒸汽压缩和材料防腐等方面的深入研究，取得实测数据，为低温多效蒸馏海水淡化大型工程的优化设计、制造提供依据，提高蒸馏淡化的研发水平和自主创新能力。给出了国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所热法海水淡化技术综合实验平台、大连理工大学热法实验平台以及大连理工大学竖管低温多效蒸发海水淡化成套技术与中试三个典型案例，以供有特殊需求的用户参考。	适用于有针对性的新技术研发，工程参数选取、工程方案验证等。
三、海水淡化新技术			
1	电化学海水淡化成套技术设备	开发电凝聚-过滤、FTA-FTC 去离子、低电压电解臭氧消毒全新的海水淡化成套技术与设备。以电凝聚-过滤技术对海水进行预处理，去除悬浮固体（SS）、COD 以及部分金属离子等；以流过式离子吸附器 FTA、流过式电容去离子器 FTC 进行海水淡化，去除 TDS,实现脱盐处理；以低电压电解臭氧进行消毒、深度净化处理，最终得到生活用淡水。同时利用超级电容器存储电能及可快速充放电的特性，实现对整套电化学海水淡化过程中残电回收。	适用资源与环境领域，重点应用于淡水、饮用水资源相对短缺的沿海城市。
2	纳滤膜-膜蒸馏处理海水淡化浓盐水及其资源化综合利用技术	本技术成果主要包括纳滤与膜蒸馏技术，涵盖纳滤膜材料、纳滤膜和膜蒸馏关键设备和部件、专用药剂及智能化控制技术、相关标准等方面，具备项目技术咨询、教育培训、调试指导能力，形成自主创新技术、装备、标准和产业化体系，可与热法和膜法海水淡化配套建设，其浓盐水可用于氯碱、纯碱等化工行业。5~8%海水淡化浓盐水经膜蒸馏过程浓缩到 18~22%盐水，经纳滤膜的 SO_4^{2-} 浓度小于	与氯碱、纯碱等化工行业相配套的海水淡化工程，以及高含盐废水处理等方面应用。

		1.0g/L，满足离子膜烧碱生产要求。	
3	膜蒸馏脱盐技术	实现了膜蒸馏脱盐系统的高膜通量、高效热利用率、高脱盐率和高浓缩比。本技术成果主要包括膜蒸馏膜与膜组件的设计与制造、膜蒸馏过程热量循环利用、膜蒸馏系统工艺设计、膜蒸馏装置安装调试、膜污染防治与再生、系统控制与运行管理技术等。根据客户需求和水质等相关条件，设计和完成百吨级膜蒸馏脱盐系统。形成了系统的新技术、装备与运行管理技术，能够实现海水淡化的高淡水产率、低浓水排放率和浓盐水的高值化，能够应用于环保领域有效解决制约企业发展的高盐废水排放问题。海水淡化淡水产率≥80%、浓海水盐浓度≥15%、GOR≥5，利用低温热源（废热、预热等）。	具有（低温）热源的海水淡化、浓海水淡化、各种行业的高盐废水处理与资源化等。
4	兆瓦级非并网风电海水淡化系统	本技术基于“973”非并网风电理论，突破传统电网为中心的供电形式，以海水淡化系统变工况运行为核心，使风电不并网协同供电、互不干扰、柔性对接，在保证风电优先、高效、低成本全部利用前提下，不足部分由网电（或其它能源）自动补充，保证海水淡化系统持续稳定工作。风机系统制造成本降低 20-25%，发电量增加 8-12%，风电能够得到高效、全部利用，有效缓解我国淡化资源缺乏的现状。	风能、太阳能等可再生能源丰富、淡水资源缺少的沿海、孤岛、西部苦咸水等地区。
四、海水综合利用技术			
1	海水循环冷却成套技术	该技术包括海水循环冷却水处理剂产业化关键技术、大型海水冷却塔关键技术、海水循环冷却的环境影响评价技术、海水循环冷却技术相关标准和大型海水循环冷却工程应用示范。 海水循环冷却水处理技术指标达到或优于国家标准《工业循环冷却水设计规范》(GB50050-2007)，满足《海水循环冷却水处理设计规范》（GB/T 23248-2009）。该技术获国家科技进步二等奖 1 项。	沿海电力、化工等高耗水行业。
2	大生活用海水技术	大生活用海水技术主要技术原理是将海水直接替代淡水作为居民生活用水（主要用于冲厕），属于海水直接利用技术范畴，其应用领域属于城市生活用水领域，可缓解沿海城镇淡水资源危机。该技术成果主要包括海水取水和预处理技术、海水输送技术、防海洋生物附着技术、异味去除技术和大生活用海水生化处	沿海城镇生活用水领域海水直接利用工程。

		理技术等。可为沿海淡水资源缺乏地区的城镇设计、建设大生活用海水工程。 大生活用海水水质：浊度< 5 NTU，SS<10mg/L，BOD_5<10mg/L，DO>2mg/L，大肠杆菌<10 个/mL；大生活用海水的使用费为 0.7 元/m³ ～1.1 元/m³ 。	
3	沸石离子筛法海水提钾高效节能技术	该技术以沸石离子筛理论研究为指导，利用改性沸石钾离子筛对 K^+的高选择特性，实现对海水/苦卤中 K^+的高效富集，获得富钾卤水；以电解质溶液相平衡和结晶理论研究为支撑，经过结晶、筛分及转化等工序实现富钾卤水中元素的节能分离，制取钾肥，副产精盐等产品；并通过中试、工业化实验和万吨级示范工程开发，获得了成套装备。 该技术钾肥产品质量达到国家标准优级品，生产成本较进口钾肥降低 25%，在国际上率先实现了海水提钾过技术经济关。取得中国专利 10 项，获 2010 年河北省技术发明一等奖、2011 中国国际工业博览会创新奖。	海水卤水（海水、浓海水、苦卤）综合利用。
4	浓海水综合利用集成技术	该技术以浓海水为主要原料，采用 “浓海水综合利用集成工艺”提取钾肥、溴素、镁砂、液体盐等产品，并与制碱工艺耦合，实现浓海水的资源化利用和达标排放，并建成了浓海水综合利用中试线，避免浓海水直接排放带来的海洋污染，为解决海水淡化副产浓海水利用问题提供了一条新的途径。 该技术通过中试开发，获得了成套技术和装备，钾、溴提取率大于 80%，钠、镁利用率大于 50%，已获 4 项中国专利。	海水、浓海水、卤水综合利用。
5	浓海水钙法制备氢氧化镁产业化技术	通过对浓海水钙法制取氢氧化镁制备工艺优化、产业化关键技术、专用产业化装备的研究，突破了灰乳制备纯化、洗涤用淡水与浓海水预处理、氢氧化镁常温合成与分离提纯等产业化关键技术，研制出常温连续合成-控制结晶产业化成套装备，实现了高品质氢氧化镁与硫酸钙联产；相关成果经专家鉴定填补国内空白，达到国际先进水平，并荣获 2012 年度海洋工程科学技术二等奖。 该技术生产的产品中 Mg(OH)2 含量≥46.44%（湿基），CaO 含量≤0.48%，和传统工艺相比，产品主含量提高 10%以上，杂质含量降低 80%以上，同氨法与烧碱法相比，综合成本降低 60%以上。	浓海水、富镁卤水及工业废水资源化利用，海水、地下卤水二价离子脱除与高质化利用。

6	硼酸镁晶须连续化控制结晶技术	该技术突破了增强材料硼酸镁晶须连续合成工艺，研制出硼酸镁晶须连续化控制结晶中试技术与装备，建立了百吨级硼酸镁晶须生产线，制备的硼酸镁晶须能耗降低10%以上，纯度高于99%；晶须平均直径在0.5～2μm之间，长度10～50μm，无杂晶。经专家鉴定，整体达到国际先进水平，并荣获2012年度海洋科学技术二等奖。	传统盐化企业产业链延伸与无机功能材料制备。
7	浓海水综合利用新工艺	通过对浓海水资源利用过程中的元素提取顺序、产品品种、工艺接口条件等系统优化研究，形成了浓海水常量元素全利用的“零排放”新工艺，研发出关键技术与装备，制备的各类产品质量均达到国家标准或行业标准，形成的浓海水综合利用新工艺较传统工艺相比，投资收益率提高50%以上，经专家鉴定总体技术达国内领先水平，并荣获2012年度海洋科学技术二等奖。	浓海水、富镁卤水及工业废水资源化利用，海水、地下卤水二价离子脱除与高质化利用。
8	烟道气（浓）海水脱钙预处理技术	该技术以烟道气中的二氧化碳为沉淀剂，使烟道气中的二氧化碳在一定条件下与海水中钙离子发生选择性连续沉淀反应，经过调解、反应、过滤等工序，获得低钙（浓）海水，并副产脱硫剂。在实现低成本脱钙的同时，还达到二氧化碳减排的目的，为解决海水淡化和浓海水综合利用的钙垢问题提供了一条新的途径。 该技术脱钙率>80%，烟道气中的二氧化碳利用率>50%，已获中国专利2项。	海水预处理、浓海水综合利用、卤水综合利用等领域。

第二部分 技术和装备简介

一、反渗透海水淡化技术

反渗透海水淡化技术（SWRO）是当前国际上应用最广泛的淡化技术之一。其利用反渗透原理，集成海水取水、预处理、高压给水、淡化海水、能量回收、淡化水后处理、浓海水排放等工艺技术和设备，将海水中的盐分脱除，变成可供饮用或生产生活使用的淡水。国外海水淡化技术研究始于上世纪 50 年代，发展重点在膜法（以反渗透膜法为主）和蒸馏法（以多级闪蒸和低温多效为主）海水淡化。据联合国关于非常规水源开发研究报告称：1950～1985 年的 35 年间，主要研究蒸馏法、电渗析法、反渗透法和冷冻法（至今未实用）；1986 年后的 10 年，蒸馏法和反渗透法则发挥了突出作用，形成了当代海水淡化的主体。这期间，全世界海水淡化装置以蒸馏法为主。至 2000 年，二种方法的装机容量持平，进入新世纪后，由于反渗透海水淡化技术发展迅速，投资和制水成本大幅下降，其装机容量超过了蒸馏法的总和。目前，除海湾国家外，美洲、亚洲和欧洲，大中生产规模的装置都以反渗透法为首选。反渗透海水淡化技术应用于市政供水具有较大优势。然而，对于要求提供锅炉补给水和工艺纯水，且有低品位蒸汽或余热可利用的电力、石化等企业，低温多效蒸馏技术仍具有一定的竞争性。

我国海水淡化技术研究始于上世纪 60 年代初，主要集中在膜法（电渗析法、反渗透法）和蒸馏法海水淡化技术研究。经过半个世纪多的发展，我国海水淡化取得了较快发展，特别是反渗透法海水淡化技术取得了突破性进展。通过国家科技、产业化项目等计划的实施，特别是浙江省重点科技项目“反渗透海水淡化示范工程”、国家重大科技攻关项目“日产千吨级反渗透海水淡化系统及工程技术开发”和国家科技支撑计划“万吨级膜法海水淡化关键技术与装备研究”的实施，先后建成了日产百吨级、千吨级和万吨级海水淡化示范工程，开发形成了一批具有自主知识产权的工程技术，使我国一跃成为世界上掌握海水淡化核心技术的少数几个国家之一。“十五”以来，我国的海水淡化装机容量以每年 25%～30%的速度增长。截止 2 0 1 2 年底，全国已建成和在建的海水淡化工程及装置近 100 个，总装机规模已超过 100 万 m^3/d。总装机规模与“十五”末相比，增加了十多倍，而反渗透海水淡化能耗降低了约三分之二（能耗由 8 kWh/m^3 降到 3kWh/m^3 左右），淡化水成本降低了约一半（成本由 10 元/m^3 降到 5 元/m^3 左右）。依靠科技的有力支撑，通过海水淡化有效提高我国沿海地区水资源保障能力，已成我国沿海地区

的重要选择。

海水淡化在提供淡水这一基础性资源的同时，也是带动系数大、技术含量高、发展空间广的战略性新兴产业，对于加快传统产业升级和发展模式转变具有重要作用。到 2015 年，海水淡化装备制造的产值将达到 75～100 亿元，如果将淡化工程运营、供水管网建设等相关产值一并计算，总产值还将成倍增加，经济效益十分显著。

海水淡化技术是一项共性技术，尤其是膜法海水淡化技术，它的发展不仅能带动材料、化工、自动化等行业技术进步，也能在电子、电力、生物工程、医药（疗）、化工和环保等领域发挥重大作用。海水淡化技术作为循环经济、清洁生产和提升传统产业的主要手段，将带动相关产业年增产值数百亿元，获取显著的经济、社会和生态效益的回报。

1.万吨级反渗透海水淡化系统设计与集成技术

反渗透海水淡化工程技术经过 40 余年的发展，技术日趋成熟，应用地区和规模越来越大。特别是进入新世纪以来，海水淡化在国际上正在呈现大规模加速发展的趋势。同时，单厂规模出现大型化趋势，近几年新建的海水淡化工程大多在几十万吨/日，可以一次性解决几十万到上百万人的供水问题。

我国规模化反渗透海水淡化技术的发展主要通过国家高技术产业发展计划、科技支撑计划、863 计划、973 计划和海洋公益性行业科研专项等立项布局，沿海地方科技部门以各类科技专项中安排项目和对国家项目经费配套为主。在“十五”引进关键设备、集成共性技术和建设示范工程的基础上，“十一五”开始科技计划重点转入突破多项核心技术、自主生产部分关键设备和建立规模化、国产化示范工程。对海水淡化科技发展进行了重点支持，围绕膜法和低温多效蒸馏海水淡化两个主流工艺分别进行了集中攻关，取得了一系列重要进展。海水淡化科技发展取得重要进展，突破了多项海水淡化核心技术和关键设备。在反渗透海水淡化方面，完成了万吨级反渗透海水淡化工程的示范，并已推广应用于国内多个已建和在建大型海水淡化工程，包括六横水务二期 30000 m^3/d、六横煤电一体 24000 m^3/d、徐大堡 12000 m^3/d 和海阳核电 16800 m^3/d 等海水淡化工程，工程技术达到国外同规模先进水平，使我国一跃成为世界上掌握海水淡化技术的少数几个国家之一。2011 年，首个自主设计并由国内企业总承包的日产 50000 吨反渗透海水淡化工程在河北曹妃甸建成投产，标志着我国反渗透海水淡化工程技术能力迈上新台阶。

该技术利用反渗透海水膜的选择透过性功能原理，集成海水取水、海水预处理、高压给水、海水淡化、能量回收、淡化水后处理、浓海水排放等工艺技术和设备，根据不同的用途需求，为沿海临港工业区和淡水资源缺乏地区的城镇生活、工业用水的生产与供应，设计、建造的大中型反渗透海水淡化工程。由于受海洋环境和海水特性的影响，海水淡化工程与其他水处理工程相比，在设计和施工上差异较大。设计海水取水设施时，应考虑潮位差、风浪、微生物和贝类生长等因素；设计海水预处理系统时，应考虑海水浊度的季节性变化、细菌繁殖和有机物等因素；设计反渗透系统时，应考虑高压、腐蚀性、微溶无机盐沉淀及浓差

极化等因素。当海水浊度较高时，如我国东海、渤海的沿海海域，宜采用加氯、混凝、澄清、过滤的海水预处理工艺。同时，由于万吨级反渗透海水淡化工程规模大，系统设计时需要处理好海水淡化反渗透膜堆组合排列的均匀配水问题，浓海水排海对海洋生态的局部影响问题，以及淡化水后处理及作为市政水源入网等问题。

万吨级反渗透海水淡化一级脱盐水 TDS≤500mg/L；吨水能耗≤3.5kWh；水质符合国家《生活饮用水卫生标准》。

典型案例一

【案例名称】

六横万吨级反渗透海水淡化示范工程

【项目概况】

由舟山市普陀区六横水务公司投资建设，是国家科技支撑计划课题“万吨级膜法海水淡化关键技术与装备研究（2006BAB03A02）”和浙江省科技兴海重大项目“10000 m^3/d 反渗透海水淡化示范工程（2004C13031）” 的示范工程。2008 年 5 月完成项目初步设计，2008 年 9 月在六横镇台门大葛藤山南麓奠基开工，2010 年 1 月完成一期 2 万吨土建设施建设和 1 万吨海水淡化系统建设，2011 年 5 月完成第二个 1 万吨海水淡化系统的建设。本项目的单机规模、吨水电耗，关键设备国产化率等都达到了国内最好水平，工程技术水平进入国际先进行列。项目荣获 2012 年度中国化工科学技术特等奖和中国海洋工程科学技术一等奖。

【工艺与装备】

（一）流程描述

六横万吨级反渗透海水淡化工程的工艺流程见图 1.1.1 。

1）海水取水

取水头部离海岸线最近距离约 150m，该海域处于葛藤水道附近，潮位涨落差小，水深约 8m，海水流动性较大。采用海水取水泵直接从黄海标高 0.00m 处取水，增压后送往海水预处理系统。

2）海水预处理

海水预处理由混凝沉淀池、无阀滤池、自动加药装置、多介质滤器及其反洗设备组成。海水经取水泵增压后，送至混凝沉淀池，同时在混凝沉淀池的进水管道内投加絮凝剂（$FeCl_3$）和助凝剂（骨胶）。经混凝沉淀池后，原海水中的悬浮物、泥沙等充分沉淀。出水进入无阀滤池粗过滤，过滤水进海水清水池，再由增压泵送入多介质滤器，以确保出水水质 SDI＜4。在反渗透进水前注入还原剂（$NaHSO_3$）和阻垢剂（H_2SO_4），使预处理出水达到反渗透膜元件进水水质要求。

3）反渗透海水淡化

反渗透海水淡化系统由保安滤器、高压泵、反渗透装置、能量回收装置、压力提升泵、辅助设备等组成。一期反渗透膜元件为美国陶氏公司生产的 SW30HRLE-400，能量回收装置为美国 ERI 公司生产的 PX-220。二期反渗透系统中，除了能量回收装置采用进口产品外，其余核心设备均实现了国产化，其中反渗透膜元件为杭州水处理技术研究开发中心研发的海水膜元件，高压泵选用国产节段式多级离心泵，分别由江苏大学和浙江科尔泵业研发。

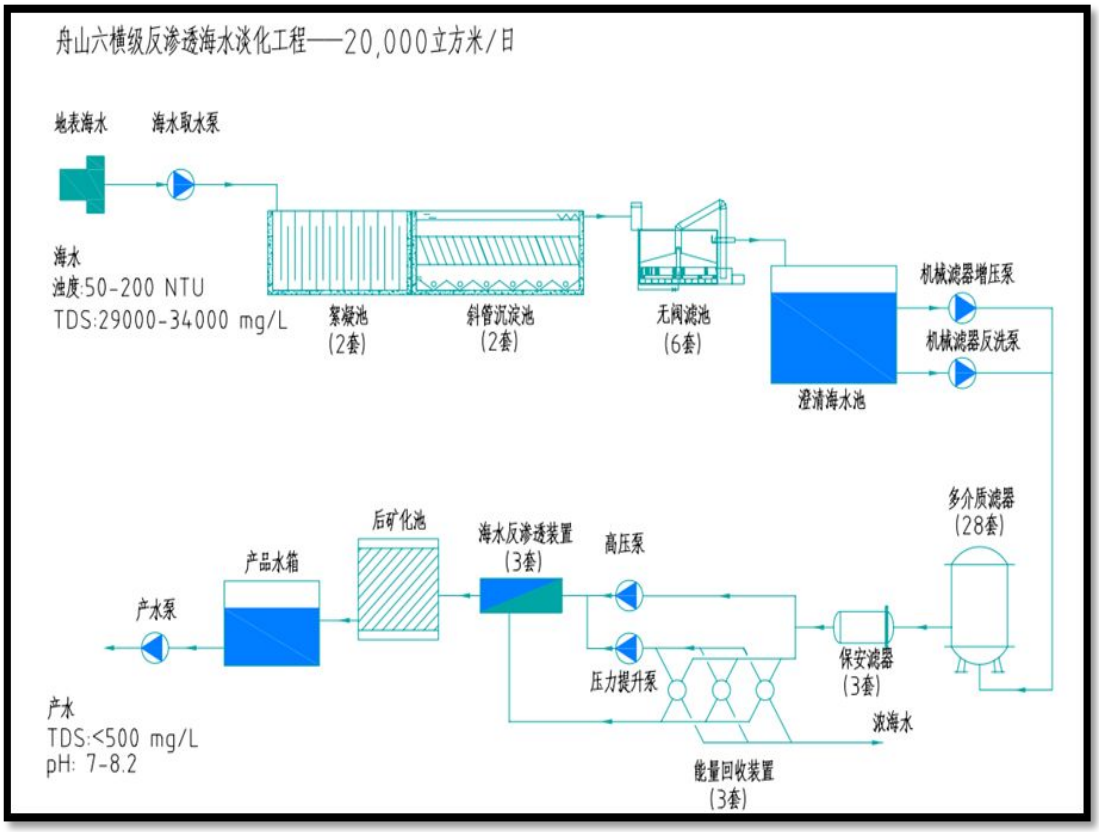


图 1.1.1 舟山六横反渗透海水淡化工程一期 20000m³/d 系统工艺流程图

海水淡化系统使用高效率的能量回收装置，并采用变频技术控制高压泵的启动、运行、停止，使整个系统能够适应随季节性波动引起海域水温的变化，从而减少了单位产水能耗。

4）后处理和供水

后处理和供水设备由二氧化碳投加设备、矿化池、杀菌装置、供水泵等组成。由于淡化水化学稳定性差，产水硬度、碱度及 pH 值偏小，本项目首次在国内研发出淡化水后矿化技术和设备，增加了淡化水的硬度、碱度及 pH 值，同时解决了淡化水对后续供水管道的腐蚀问题。产水输送中投加二氧化氯杀菌剂，以保持管网供水卫生要求。供水水泵配置变频器，实现变频供水，供水管与水库自来水供水管网联网。

舟山六横水务公司一期 20000m³/d 反渗透海水淡化装置见图 1.1.2。

图 1.1.2　舟山六横水务公司一期 20000m³/d 反渗透海水淡化装置

【操作参数与运行结果】

六横水务公司一期 20000m³/d 反渗透海水淡化系统投运 2 年多来，运行情况良好。其中第二套反渗透装置单机产水量 10000m³/d，国产化率大于 70%，产水水质符合《生活饮用水卫生标准》，反渗透装置本体吨水能耗小于 2.2kWh，主要技术指标达到国际先进水平。

表 1.1.1 列出了本项目试运行的部分操作参数和运行数据。

表 1.1.1　舟山六横反渗透海水淡化工程—20000m³/d 系统运行数据

项　目	单 位	设计值	实测值
海水取水量	m³/h	2200	2100
淡化水产量	m³/h	834	850
淡化水 TDS	mg/L	500	235
水回收率	%	37.9	40.5
水　　温	℃	15	15
吨水耗电量	kW·h/m³	4	2.7
反渗透进水压力	MPa	≤6.0	5.0
化学药剂注入量			
$FeCl_3$	mg/L	20	13
骨胶	mg/L	0.5	0.4
$NaHSO_3$	mg/L	2	2
H_2SO_4	mg/L	5	5
CO_2	kg/d	488	460
$CaCO_3$	kg/d	1056	1050

【效益分析】

本工程总投资约 1.5 亿元，20000m³/d 海水淡化系统经过一年运行，生产成本的各项费用见表 1.1.2。

表 1.1.2　六横海水淡化系统吨水生产成本测算表

项目名称	年支出金额（万元）	吨水费用（元）
电费	1458.6	2.21
药剂费	180.18	0.273
膜与材料费	369.94	0.561
维修费	68.98	0.105
工资及福利费	100	0.152
其他费用	50	0.076
合计		3.377

注：膜与材料费包括微孔滤芯和反渗透膜元件更换费，反渗透膜元件寿命按 3 年计算。

【应用情况】

该技术已经在曹妃甸 5 万 m^3/d、六横 II 期 3 万 m^3/d、海阳核电 I 期 1.6 万 m^3/d、六横煤电一体 2.4 万 m^3/d 等多个大型反渗透海水淡化工程应用。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

典型案例二

【案例名称】

曹妃甸 50000 m^3/d 反渗透海水淡化工程

【项目概况】

曹妃甸阿科凌 50000 m^3/d 海水淡化项目，位于唐山曹妃甸工业区，华润电厂北侧，是曹妃甸海水淡化起步工程。由北控阿科凌海水淡化有限公司（香港）与北控曹妃甸水务投资有限公司共同出资建设，占地面积约 35 亩。项目采用世界上先进的双膜法工艺，预处理采用气浮系统和超滤系统的组合在国内海水淡化领域中尚属首例，是目前国内商业运行海水淡化工程最大规模的项目之一。

2010 年 3 月杭州水处理技术开发中心有限公司开始项目施工设计，2010 年 6 月土建开工，2011 年 3 月设备进场安装，2011 年 9 月底顺利出水。

【工艺与装备】

曹妃甸 50000 m^3/d 反渗透海水淡化工程工艺流程见图 1.1.3。

1）海水取水

海水取水系统主要由挡渔网、固定格栅、旋转滤网、海水取水泵、冲击氯化加药装置等组成。

海水通过埋在明渠底部的 2 条管线经重力自流进入海水取水泵房的滞留池，

管线端部设置防鱼网，通过 2 个闸板阀将滞留池分隔为 2 个相互独立的海水取水池，在 2 个海水取水池中各设置 1 套固定格栅、1 台自动滤网及与其相关的冲洗水泵，以确保大颗粒固体等不会经海水取水泵输送至海水淡化主厂房。取水系统设置海水取水泵 3 台，将经过固定格栅及自动滤网过滤后的海水输送至下游工段。

海水取水系统设置次氯酸钠加药装置，采用冲击加药（每 24 小时冲击加药 2 小时）的方法，将浓度为 10%次氯酸钠溶液注入到海水取水管道内，以抑制管道内藻类及微生物的活动和生长。

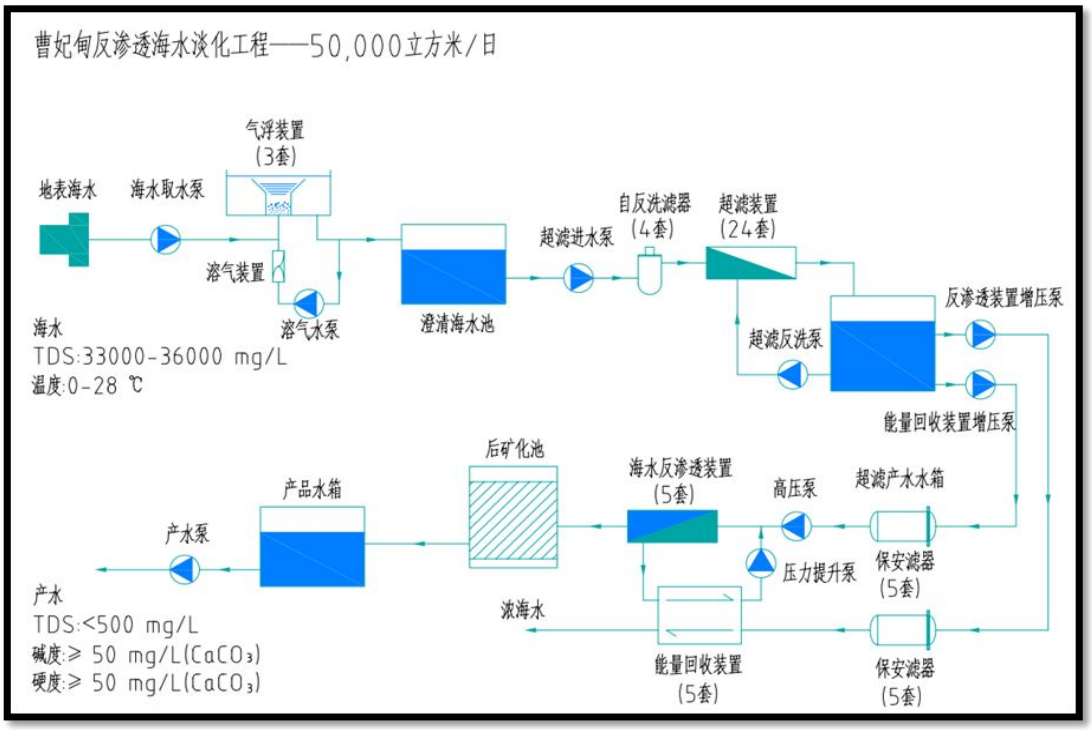


图 1.1.3 曹妃甸反渗透海水淡化工程—50000m³/d 工艺流程图

2）海水预处理

海水预处理系统主要由气浮系统和超滤系统组成。

海水经过取水泵增压，注入絮凝剂（$FeCl_3$）后，被送入气浮系统。海水与特殊的溶气装置产生的部分带正电荷的微小气泡混合，使微小气泡与絮凝体、海水中的悬浮物等进行吸附、桥联进入气浮的布水系统。通过布水系统使海水进入气浮池体，聚凝的絮体及被微气泡吸附桥联的悬浮物等在浮力及零速度的作用下被带螺旋的撇泥勺捞走，自流至污泥池。

从气浮池出来的澄清海水通过超滤增压泵增压，进入过滤精度为 150μm 的

自清洗过滤器后，送入超滤系统。超滤膜的孔径大约为 0.02μm，经过超滤过滤后的海水 SDI<3。

在反渗透进水管道内注入还原剂（$NaHSO_3$）和阻垢剂。

3）反渗透海水淡化

反渗透海水淡化系统由保安滤器、高压泵、反渗透装置、能量回收装置、压力提升泵和辅助设备组成。

50000 m^3/d 反渗透海水淡化系统由 5 套装置组成，采用多组件并联单级除盐流程。反渗透膜采用日本东丽公司生产的 TM820M-440 元件。考虑到曹妃甸地区海域水温季节性波动较大，为保证反渗透系统在 1～28℃范围内，满足产水要求，本项目在水温不同的时间段，采用不同数量的膜元件，以满足产水硼含量小于 1 mg/l。

系统使用高效率的能量回收装置，能够大幅度的减少单位产水能耗。本项目中使用的能量回收装置为 Aqualyng AS 公司生产的 AL-500-32-01-04，能量回收效率高达 90%以上。系统配置淡水冲洗装置和化学清洗装置，对膜装置进行冲洗和清洗。

4）淡化水后矿化处理

反渗透装置产水由于水中绝大部分的离子被除去，从而使得产水的硬度、碱度及 pH 值偏小，本项目在反渗透系统后，增加了后矿化处理。在产水中投加适量的 CO_2，将溶有 CO_2 的产水经过碳酸钙粒料床层，从而溶解碳酸钙粒料，增加反渗透产水的硬度、碱度及 pH 值。同时有效的解决了海水淡化水对后续供水管道的腐蚀问题。

图 1.1.4 和 1.1.5 分别为曹妃甸海水淡化系统反渗透和预处理气浮装置。

图 1.1.4　反渗透装置

图 1.1.5 海水预处理气浮装置

【操作参数与运行结果】

表 1.1.3、表 1.1.4 分别列出了曹妃甸反渗透海水淡化工程—50000m³/d 系统试运行的操作参数及运行数据和淡化水水质分析结果。

表 1.1.3 曹妃甸反渗透海水淡化工程—50000m³/d 系统运行数据

项目	单位	设计值	实测值
海水取水量	m³/h	5085.5	5085
淡化水产量	m³/h	2084.8	2085
淡化水 TDS	mg/L	＜300	196.45
装置水回收率	%	46	46
水　　温	℃	1～28	10
耗 电 量	kW·h	9062.5	7943.9
吨水耗电量	kW·h/m³	4.35	3.81
反渗透进水压力	MPa	6.79	5.3
化学药剂注入量			
NaClO（取水）	mg/L	10	10
$FeCl_3$	mg/L	20	5
$NaHSO_3$	mg/L	5	3.5
阻垢剂 PWT	mg/L	2.5	2.5
NaClO（产水）	mg/L	0.5	0.5
CO_2	kg/h	50.9	52
$CaCO_3$	kg/h	109.8	122

表 1.1.4 曹妃甸反渗透海水淡化工程—50000m³/d 系统水质分析结果

项目	海水进水水质	淡化水水质	脱除率（%）
总固体 TDS（mg/L）	33105.30	196.45	99.4
pH	8.0	7.6	/
钾 K^+（mg/L）	376.00	1.75	99.5
钠 Na^+（mg/L）	10155.00	33.82	99.7
钙 Ca^{2+} （mg/L）	389.00	20.34	94.7

项目	海水进水水质	淡化水水质	脱除率（%）
镁 Mg^{2+}（mg/L）	1216.00	1.05	99.9
重碳酸盐 HCO_3^-（mg/L）	142.00	61.49	56.7
碳酸盐 CO_3^{2-}（mg/L）	1.24	0	/
氯化物 Cl^-（mg/L）	18264.65	55.30	99.7
硫酸盐 SO_4^{2-}（mg/L）	2557.00	2.46	99.9

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

典型案例三

【案例名称】

华能玉环电厂海水淡化项目

【项目概况】

华能玉环电厂海水淡化项目位于浙江省玉环县大麦屿经济开发区，地处浙东南沿海的乐清湾东岸，玉环岛西侧，三面环山，一面临海。玉环岛的陆地面积约为 180 平方公里，淡水来源主要为天然降水，由于海岛面积小，岛上为丘陵小山地貌，集水面积不足，没有修建大型水库的条件。虽然天然降水丰富，淡水资源还是极其紧张。人均水资源占有率仅为 656m³，不仅远低于浙江省

图 1.1.6 浙江省玉环

(1750m³/人)和全国(2200m³/人)的平均水平，甚至低于国际公认的 1000m³/人严重缺水标准。华能玉环电厂海水淡化项目是为解决华能玉环电厂生产、生活用水建设的。

图 1.1.7 华能玉环电厂

项目采用了“双膜法”工艺，全部工程投资不到 2 亿元（含地基处理、土建及安装调试费用），该系统于 2006 年 3 月 24 日投入运行，是当时国内最大的膜法海水淡化项目之一。

华能玉环电厂海水淡化项目建设在电厂厂区西侧，按工艺流程沿海堤布置，2005 年 10 月份开始设备安装，2006 年 3 月调试完毕投入运行。海水淡化车间建筑面积 3200m²，系统设计寿命为 30 年。

【工艺与装备】

华能玉环电厂安装的是国产首台百万千瓦超超临界燃煤火力发电机组，是国家 863 计划“超超临界燃煤发电技术”研究课题组成部分。由于现场没有“热

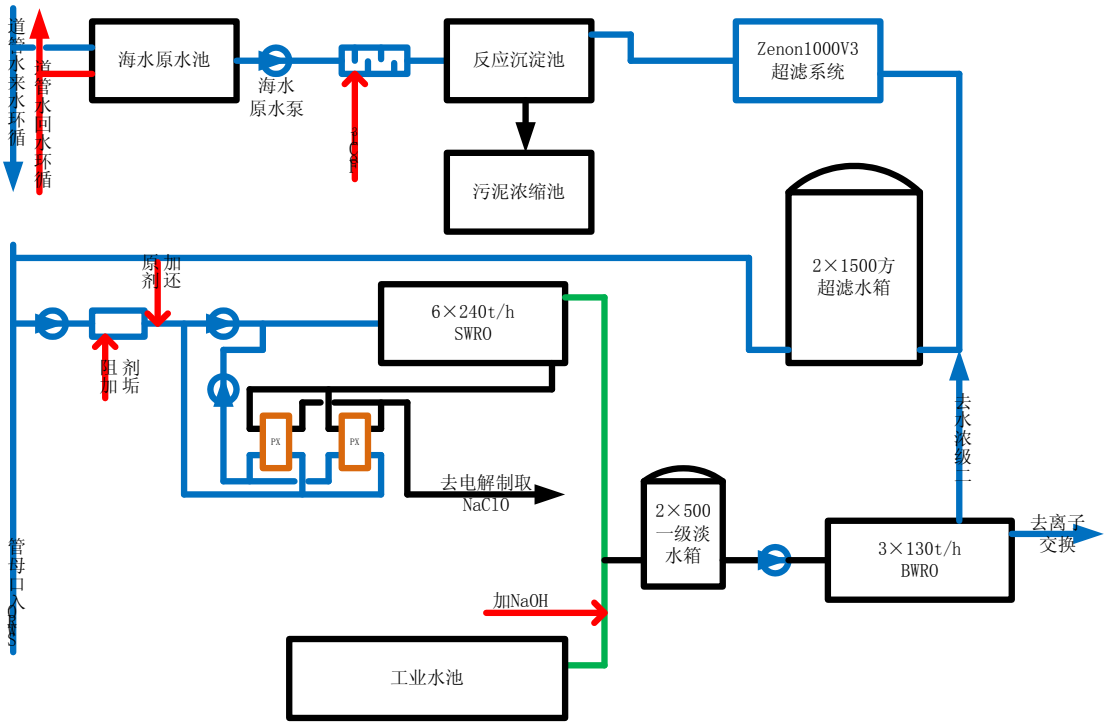


图 1.1.8 华能玉环电厂海水淡化工艺流程

法”海水淡化所需的蒸汽来源，同时由于是在南方新建厂，也没有外来蒸汽，所

以“膜法”海水淡化工艺成了华能玉环电厂唯一选择。

华能玉环电厂膜法海水淡化由反应沉淀池+超滤+反渗透组成，反应沉淀池设两组四座，单座出力为 1000m³/h。反应沉淀池产水通过管道和超滤配水槽相连，超滤设置六套，共用配水槽配水，配水装置布置在配水槽底部，超滤产水进入超滤水箱，再进入 6 套反渗透共用的进水母管。

一级反渗透设置 6 套，每套产能为 240m³/h。二级反渗透设置 3 套，每套产能 130m³/h。

华能玉环电厂海水淡化项目主要创新点：与发电工艺相结合的创新取水系统；包括 “微涡旋”混凝澄清设备和超滤工艺预处理系统；配置了高效能量回收装置的一级反渗透系统等。

1）与发电工艺相结合的创新的取水系统

华能玉环电厂凝汽器采用海水直流冷却，取水口位于乐清湾-15.6m 等深线附近的海域，排水口设置在-5m 等深线附近的海域。海水淡化系统充分利用了电厂的取水系统，以降低造价；同时利用发电厂余热使排放水温升高的有利条件，降低海水淡化的运行能耗。因此，华能玉环电厂的海水淡化系统采用了两路进水，一路取自循环水泵出口（凝汽器入口侧），一路取自虹吸井（凝汽器出口侧）。

2）预处理系统

乐清湾是一个开口向南的南北向海湾，湾内海水受沿海南下洋流携带、流入湾内河流及潮汐冲刷的多重影响，为高含沙区，含砂属极细粉砂和粗粘土。根据实测资料，电厂取水口附近垂线平均含沙量大潮为 0.214kg/m³，中潮为 0.260 kg/m³，小潮为 0.041 kg/m³。

项目设置了混凝澄清和超滤组成的预处理系统。混凝澄清的主设备为四座国内首次在海水中应用的“微涡旋”折板式反应沉淀池，钢筋混凝土结构，内部没有转动部件，可有效地减少防腐成本。混凝澄清沉淀处理后的海水浊度小于 5NTU，进入后续的超滤系统。华能玉环电厂超滤系统采用了浸入式超滤，共设 6 个膜池，总计 1800 支膜元件。预处理系统投加的药剂有混凝剂，三氯化铁；助凝剂，阴离子聚丙烯酰胺；连续杀菌剂，次氯酸钠；冲击杀菌剂，DBNPA（戊二醛）等。

华能玉环电厂膜法海水淡化预处理系统总占地面积约为 2400 m²，据计算，和机械搅拌加速澄清池及两级过滤的常规工艺相比，占地面积仅是其三分之一。

3）节能的反渗透脱盐系统

反渗透系统技术主要集中在回收率的确定、能量回收的确定及反渗透的布置。系统可以简单的分为三个部分，即动力部分、脱盐部分及加药部分。

动力部分的高压泵是脱盐系统的心脏，华能玉环电厂的高压泵采用变频控制，密切配合不同温度、不同含盐量的海水及不同阶段反渗透的能耗，既节约电能，又提升反渗透膜的安全性。高压海水流经反渗透膜元件，除产水外，55%的浓水只是损失了反渗透膜的水阻（段间压差），还蕴含着巨大的能量，所以“膜法”海水淡化设置能量回收装置是降低系统能耗的关键。华能玉环电厂采用的是压力转换器，是液-液直接传递压力的一种能量回收装置，能量回收效率可达94%，确保了华能玉环电厂的较低的吨水电耗。

玉环电厂海水淡化系统一级反渗透共设 6 组，每组压力容器 58 只，每个压力容器内装有 7 支膜元件，系统回收率为 45%，设计出力 240 m³/h（5760m³/d），总出力为 34560m³/d。

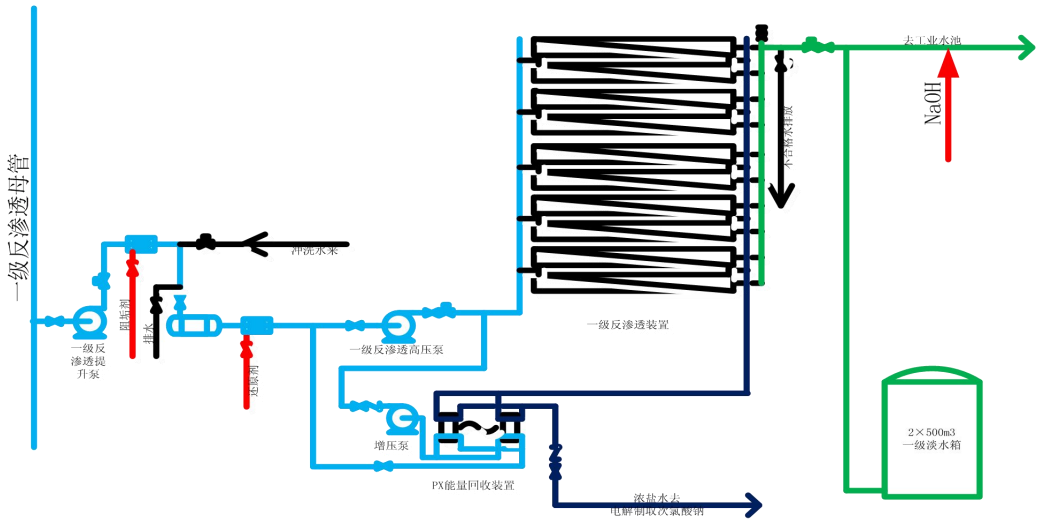


图 1.1.9 华能玉环电厂一级海水淡化系统示意图

图 1.1.10 反渗透膜堆

图 1.1.11 高压给水单元

4）循环利用浓海水，降低运营成本

将反渗透的部分浓水作为电厂 3×90kg/h 电解海水制取次氯酸钠的原料，充分利用其中 2 倍浓缩的氯化钠，既节约了电解装置的能耗，又实现了循环经济。

5）运行现场无人值守

华能玉环电厂海水淡化项目由于较高的自动化水平，真正实现了除正常巡检外，运行现场无人值守。

【操作参数与运行结果】

2006 年 3 月 24 日，海水淡化项目投入运行。到 2011 年底华能玉环电厂海水淡化系统共产淡水约 3500 万 m³。

在 2009 年 7 月，华能玉环电厂组织有关单位对海水淡化系统进行了性能测试，主要参数如表 1.1.5。

表 1.1.5 华能玉环电厂海水淡化系统性能测试

试验项目	测试内容	性能保证值	测试结果
超滤	总产水量（m³/h）	3200	3200
	平均回收率	≥90%	91.7%
	出水浊度（NTU）	＜0.1	0.027
	出水 SDI	＜3	2.15
一级反渗透	总产水量（m³/h）	1440	1440
	平均水回收率	≥45%	45.0%
	平均脱盐率	≥99%	99.12%
海水淡化淡水综合电耗 （kWh/m³）		2.713	
一级淡化淡水电耗（kWh/m³）		2.578	

注：海水淡化理论耗能量，1.41kWh/m³。项目设计能耗，3.7kWh/m³。

【效益分析】

华能玉环电厂海水淡化设备静态总投资为 18800 万元（含建筑、安装、设备，不含征地），去掉其中的材料部分，形成资产的为 15020 万元，若以 15 年折旧计，年折旧成本 1001.33 万元。

1）制水成本及说明

基于 2009 年及 2010 年的实际数据计算，华能玉环电厂海水淡化的吨水成本为 5.52 元。制水成本较高的原因是根据火力发电厂设计规范的要求，海水淡化的产能是由电厂峰值用水量确定的。华能玉环电厂自投产以来，不懈的追求节能减排降耗，海水淡化脱盐部分年利用率较低，在相同的背景下，单位产水需分摊的设备折旧费用较高。因此若按设计负荷常态供水,成本可大为降低。详细见下图。

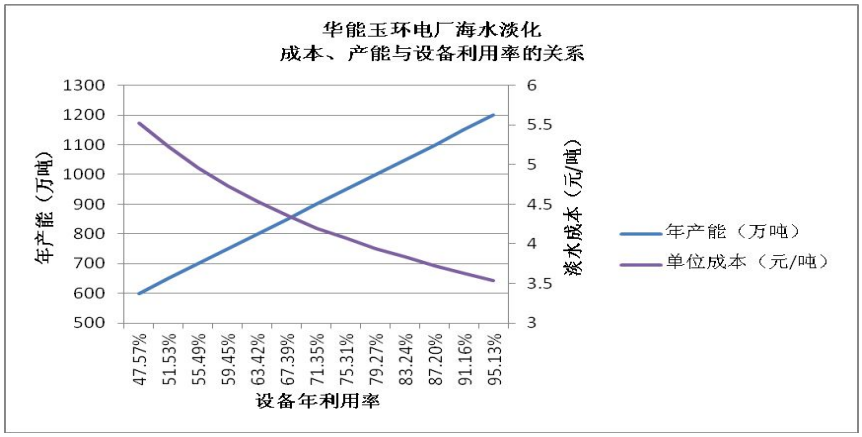


图 1.1.12 华能玉环电厂海水淡化成本、产能与设备利用率的关系

设备年利用用率在 75%左右（6600 小时）时，华能玉环电厂海水淡化项目吨水成本在 4 元以下。

2）单位药耗

海水淡化除了电力消耗外，还有日常的药品消耗，对 2009 年及 2010 年海水淡化的药品实际消耗进行统计，单位药耗为 0.86 元/m³。其中阻垢剂、混凝剂及还原剂等运行用药品 0.72 元/m³，占 84.24%；柠檬酸、戊二醛等维护用药品 0.14 元/m³，占 15.76%。不同的药品所占的比例如表 1.1.6。

表 1.1.6 华能玉环电厂海水淡化系统日常的药品消耗

序号	运行用药品	%	序号	维护用药品	%
1	次氯酸钠	2.34%	9	草酸	0.12%
2	工业液碱	8.16%	10	磷酸三钠	1.84%
3	还原剂(亚硫酸氢钠)	20.80%	11	柠檬酸	11.18%
4	混凝剂(三氯化铁)	13.92%	12	十二烷基苯磺酸钠	0.01%
5	氯片	1.21%	13	戊二醛	2.60%
6	盐酸	6.85%	14	十二烷基磺酸钠	0.01%

序号	运行用药品	%	序号	维护用药品	%
7	阴离子助凝剂	0.95%			
8	阻垢剂	30.00%			
合计（费用比例）：		84.24%	合计（费用比例）：		15.76%

3）维护成本

统计 2009 年及 2010 年度实际发生的维护费用，运行维护材料费约为 150 万元/年。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：华能玉环电厂，策划部

联系人；庞胜林

地址；浙江省玉环县大麦屿开发区

邮政编码；317604

电话；0576-87177359

E-mail：qetuo7009@hotmail.com

2.千吨级反渗透海水淡化系统设计与集成技术

1997 年，浙江省重大科技攻关项目“500 m^3/d 反渗透海水淡化示范工程”在浙江省嵊泗县嵊山岛建成投产。首次采用了透平式能量回收装置，使海水淡化工程单位产水能耗降至 5.5 度以下，填补了我国反渗透海水淡化工程的空白。2000 年，在国家科技部重点科技攻关项目“日产千吨级反渗透海水淡化系统及工程技术开发”的支持下，先后在山东长岛、浙江嵊泗建成了 1000 m^3/d 反渗透海水淡化示范工程，采用了压力交换式能量回收装置，吨淡水能耗降至 4.2 度以下，各项技术经济指标达到国际先进水平。在示范工程的引导下，我国已建成一批千吨级以上反渗透海水淡化工程。

该技术采用反渗透原理，集成海水取水、预处理、高压给水、能量回收、产水后处理等工艺技术和设备，根据不同的用途需求，设计、建造中型反渗透海水淡化系统，适用于沿海乡镇和海岛生活、工业用水的生产。由于受海洋环境和海水特性的影响，海水淡化工程与其他水处理工程相比，在设计和施工上差异较大。设计海水取水设施时，应考虑潮位差、风浪、微生物和贝类生长等因素；设计海水预处理系统时，应考虑海水浊度的季节性变化、细菌繁殖和有机物等因素；设计反渗透系统时，应考虑高压、腐蚀性、微溶无机盐沉淀及浓差极化等因素。当海水浊度较高时，如我国东海、渤海的沿海海域，宜采用加氯、混凝、澄清、过滤的海水预处理工艺。

能耗是反渗透海水淡化工程的主要技术经济指标。因此，反渗透海水淡化工程通常采用能量回收装置来回收高压浓缩海水的剩余能量，以便降低海水淡化吨水能耗和造水成本。目前常用的能量回收装置有压力交换式能量回收装置和水力透平式能量回收装置，后者视规模大小，可回收高压浓缩海水 50～80%的剩余能量，而前者采用了直接接触正位移压力交换机理，其对高压浓缩海水能量回收率在 94%以上。图 1.2.1 为常用反渗透海水淡化工艺流程示意图。

海水淡化一级脱盐水 TDS≤500mg/L；吨水能耗≤4.0kWh；水质符合国家《生活饮用水卫生标准》。

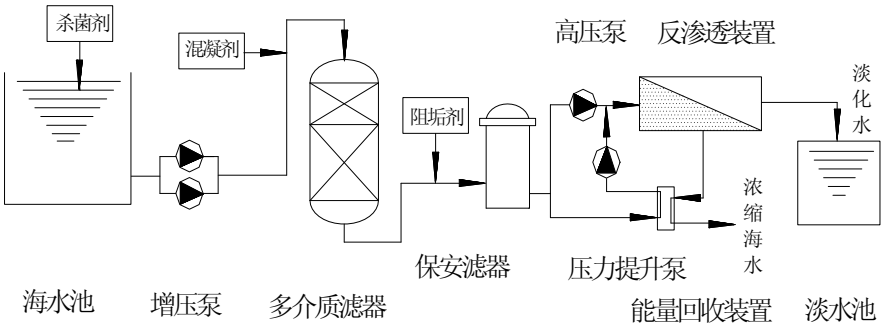


图 1.2.1　反渗透海水淡化工艺流程示意图

典型案例一

【案例名称】

嵊山日产 500 吨淡水反渗透海水淡化工程

【项目概况】

嵊山岛是舟山市严重缺水的岛屿之一。由于受地理、地形、地貌的制约，淡水资源开发难度很大。平常年全镇可供淡水 $21\times10^4m^3$，需水量 $40\times10^4m^3$，供需予盾十分突出。淡水资源奇缺已成为制约该岛经济持续发展和人民生活水平提高的瓶颈。为从根本上缓解该岛淡水资源供需矛盾，经过专家多方面论证，认为在该岛建造反渗透海水淡化工程是开拓稳定可靠的淡水资源的战略性的根本措施和必由之路。

项目于 1997 年 4 月立项，浙江省、舟山市和嵊泗县三级科技部门主管负责项目的组织协调工作，国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心为项目的技术提供和服务方，负责工程设计和设备研制工作，嵊山镇政府为项目的用户单位，负责土建和配套设施的施工。

【工艺与装备】

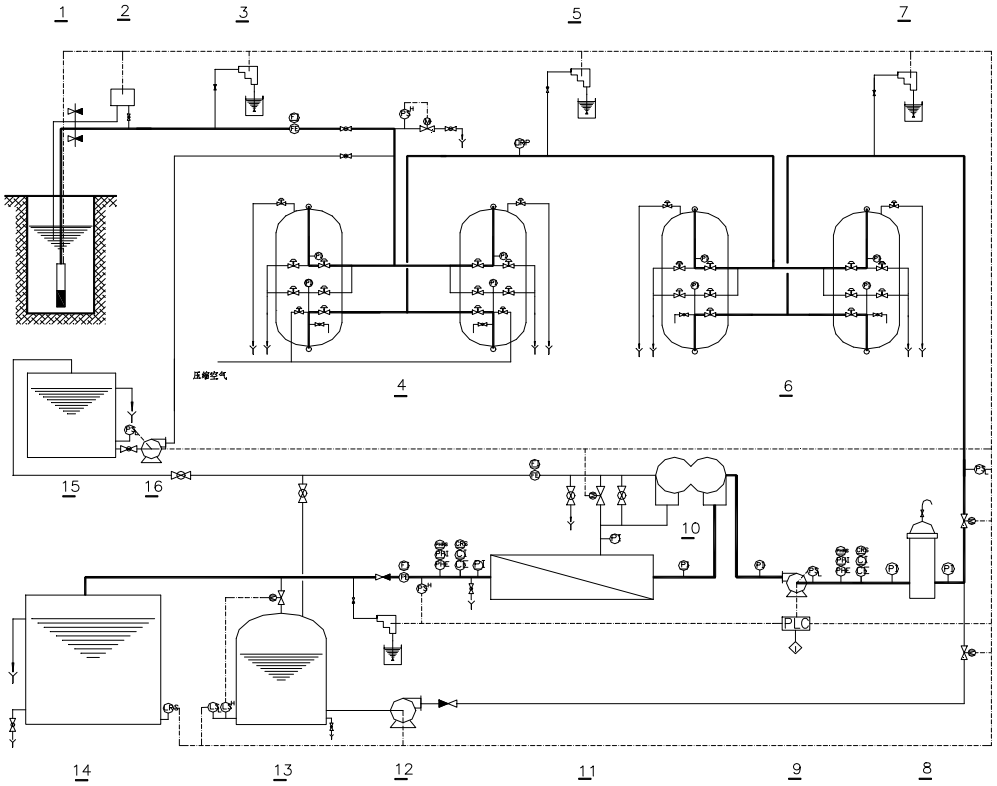
嵊山 500 m3/d 反渗透海水淡化工程的工艺流程如图 1.2.2 所示。

（1）海水取水

由于嵊山海域潮位、风浪都较大，遇台风取水设施易遭破坏，该工程项目采取海滩打沉井方法，以多级离心潜水泵取水。沉井深度为最低潮位线以下 2.7m。海水取水后直接送到海水预处理系统。

（2）海水预处理（海水调节处理）

海水预处理部分由 NaClO 发生器、自动投药设备、多介质过滤器、活性炭过滤器及滤器反冲洗设备组成。



1.海水泵　2.NaClO 发生器　3.混凝剂计量泵　4.多介质滤器　5.还原剂计量泵　6.活性炭滤器　7.阻垢剂计量泵　8.保安滤器　9.高压泵　10.能量回收装置　11.反渗透装置　12.淡水泵　13.淡水箱　14.淡水池　15.浓水池　16.滤器反洗泵

图 1.2.2　崂山 500 m^3/d 反渗透海水淡化工程工艺流程图

海水取水泵后分出一小股带压海水，进入 NaClO 发生器，在直流电场的作用下产生 NaClO，再注入海滩沉井，以杀灭海水中的细菌、微生物和藻类。

海水预处理系统共有 3 套自动投药设备，分别投加混凝剂（$FeCl_3$）、还原剂（$NaHSO_3$）和阻垢剂(H_2SO_4)。每套化学剂自动注入设备由计量泵、计量箱组成。在反渗透系统前的管系中海水的余氯一般保持 0.3～0.5mg/L，这样可以防止微生物生长，但以聚酰胺为膜材料的反渗透复合膜耐氯性很差，需投加还原剂（$NaHSO_3$）脱余氯。投加 H_2SO_4 是为了调节海水 pH 值，以防止难溶无机盐类在反渗透海水淡化过程中出现沉淀。

（3）反渗透海水淡化

反渗透海水淡化系统由保安滤器、高压泵、能量回收装置、变频控制高压泵柜、反渗透装置及辅助设备组成。

反渗透装置采用多组件并联单级除盐流程。膜元件为美国陶氏化学公司生

产的海水复合膜元件 SW30HR－8040。系统实行计算机、可变程（PLC）自动控制，为确保系统自动、安全、稳定运行，在工艺和控制技术上采取如下措施：

高压泵前、后分别设置低、高压开关。当流量、压力出现反常时，系统将自动联锁报警，停机，以保护高压泵和反渗透膜元件。

淡水冲洗系统。一旦反渗透装置停止运行，即启动淡水冲洗泵，置换出反渗透膜组件中的浓缩海水，以防止加入阻垢后产生的亚稳态过饱和微溶盐出现沉淀。淡水冲洗系统也可用作化学清洗，对反渗透装置定期进行化学清洗和灭菌，及较长时间停止运行时，对反渗透装置进行维护保养。

当产品水含盐量超过设定值时，自动把淡化水切换排废并报警。

高压给水系统采用了能量回收装置（水力透平机），回收排放高压浓缩水的能量，能量回收率约为 60%，吨水能耗降低到 5.5 度以下。

考虑到嵊山海域水温季节性变化较大，产水量和单位产水能耗变化相应较大，系统采用变频控制技术控制高压泵的启动、运行、关闭，以节约单位产水的能耗，使反渗透海水淡化系统稳定、可靠地运行。

【操作参数与运行结果】

表 1.2.1 和表 1.2.2 分别列出了嵊山 500 m^3/d 反渗透海水淡化工程试运行的操作参数及运行数据和淡化水水质分析结果。

表 1.2.1　嵊山 500 m^3/d 反渗透海水淡化工程运行数据

项　　目	单　　位	设 计 值	实 测 值
海水取水量	m^3/h	60.0	58.3
淡化水产量	m^3/h	20.8	22.3
淡水水质	mg/l	＜500	162.8
水回收率	%	35.0	38.2
水　温	℃	25.0	23.0
耗电量	kW・h	115.0	115.5
单位产水耗电量	kW・h/m^3	5.5	5.2
反渗透进水压力	MPa	5.6～6.2	5.5
化学剂注入量			
$FeCl_3$	mg/l	2.0	1.8
$NaHSO_3$	mg/l	2.0	1.0
H_2SO_4	mg/l	10.0	13.0

项　　目	单　　位	设 计 值	实 测 值
NaOH	kg/d	0.8	

表 1.2.2　嵊山 500 m^3/d 反渗透海水淡化工程淡化水水质分析结果

项　　目	海滩沉井海水	淡化水	生活饮用水标准
总固体 TDS(mg/L)	26 776.14	162.79	1 000
pH	7.69	6.31	6.5～8.5
总碱度 (mg/L) $CaCO_3$ 计	133.57	3.77	4.50
总硬度 (mg/L) $CaCO_3$ 计	5 303.09	8.77	
钾 K^+(mg/L)	300.00	2.21	
钠 Na^+(mg/L)	8 064.52	55.58	
钙 Ca^{2+}(mg/L)	363.64	0.36	
镁 Mg^{2+}(mg/L)	1 066.58	1.91	
铁 Fe(mg/L)	0.02	0.02	0.3
重碳酸盐 HCO_3^-(mg/L)	156.67	4.60	
碳酸盐 CO_3^{2-}(mg/L)	6.04	—	
氯化物 Cl^-(mg/L)	14 850.00	96.28	250
硫酸盐 SO_4^{2-}(mg/L)	1 959.60	1.71	250
硝酸盐 NO_3^-(mg/L)	3.14	0.09	20
硅酸盐 SiO_3^{2-}(mg/L)	5.91	0.01	
游离二氧化碳 CO_2(mg/L)	1.92	2.35	
耗氧量 COD (mg/L)	0.81	0.51	

【效益分析】

嵊山 500 m^3/d 反渗透海水淡化工程是我国自行设计建造的第一个反渗透海水淡化工程，填补了国内空白。该系统能耗低于 5.5kWh/m^3，造水成本为 7－8 元/吨。而在当地干旱年份，船运淡水成本为 18－25 元/吨。由此可见，海水淡化为解决缺水地区和海岛淡水供应不足问题是完全可行的。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

典型案例二

【案例名称】

嵊泗千吨级反渗透海水淡化示范工程

【项目概况】

嵊泗县人均年淡水资源占有量为 197m³，仅为浙江省平均水平的 1/11，属于资源性缺水严重的海岛县。一直以来，嵊泗只能采用定时供水和大陆运水来解决缺水问题。为解决这一关键问题，县菜园镇从 2000 年起开始建设海水淡化设施，是我国最早采用海水淡化供水的岛屿之一，并从 2001 年起开始供应淡化水，使嵊泗的生活环境得到了很大的改善，嵊泗的旅游优势得以发挥，海岛经济得以快速发展。到 2013 年底，嵊泗仅菜园镇海水淡化厂已建成海水淡化装置 7 套（见表 1.2.3），产水量达 10600m³/d，岛上的海水淡化供水量已占当地供水总量的 80%以上，海水淡化水已成为该县的第一水源。

表 1.2.3　嵊泗海水淡化装置表

淡化装置	建成时间	装置设计规模(m³ /h)
第一期装置	2001	1000
第二期装置	2002	600
第三期装置	2004	1000
第四期装置(1)	2005	2000
第四期装置(2)	2006	2000
第五期装置	2010	2 X 2000

【工艺与装备】

嵊泗千吨级反渗透海水淡化示范工程的工艺流程见图 1.2.3 。

1）海水取水

由于嵊泗岛所处海域一年内将近有 10 个月海水较混浊，且工程所处位置地质条件差，选定直接取水的方式，采用真空抽吸，直接从海中抽取海水，通过增压泵增压后送往海水预处理系统。

2）海水预处理

海水的预处理包括水力澄清池、无阀滤池、自动加药装置、多介质滤器与反

洗设备。海水经过取水泵增压后进入水力澄清池，絮凝剂通过计量泵在水力澄清池入口投加，去除海水中的绝大部分颗粒和有机物，出水经过无阀滤池过滤进入清水池，再由增加泵将出水送入多介质过滤器进行深度过滤，达到反渗透的进水要求。

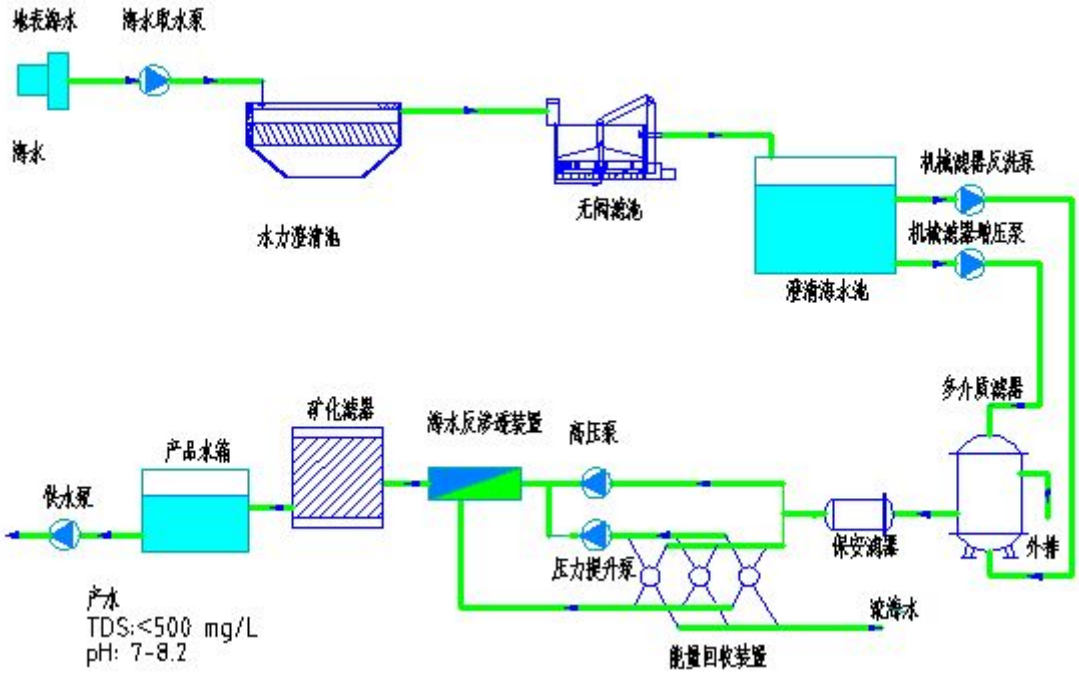


图 1.2.3 嵊泗千吨级反渗透海水淡化系统工艺流程图

3）反渗透海水淡化

反渗透海水淡化系统包括保安滤器、高压泵、反渗透装置、能量回收装置、压力提升泵及相关的辅助设备。经多介质滤器过滤后的出水进入保安滤器，确保反渗透系统的安全，出水通过高压泵增压进入反渗透装置，高压浓水进入压力交换式能量回收装置加压原海水，通过提升泵的压力提升作用，进入反渗透系统，大大节约了能耗，产水进入产水池。

4）后处理和供水

后处理和供水设备由矿化滤器、杀菌装置、供水泵等组成。淡化水通过麦饭石滤层，增加了淡化水的硬度、碱度及 pH 值，产水输送中投加二氧化氯杀菌剂，以保持管网供水卫生要求。

5）自动控制系统

系统采用变频技术控制高压泵的启动、运行、停止，使整个系统在合适的工况下运行， 每套淡化装置均设有中央控制室进行监控，淡化装置运行时关键参数

如水箱液位、电导、流量、压力、温度、pH 等各种参数均通过二次仪表引入工控机进行采集和显示。

图 1.2.4 和 1.2.5 为嵊泗千吨级反渗透海水淡化工程的取水系统和反渗透装置。

图 1.2.4 嵊泗淡化厂海水取水系统

图 1.2.5 嵊泗千吨级海水淡化工程反渗透装置

【操作参数与运行结果】

以第三期装置为例，表 1.2.4 列出了本项目运行的操作参数与运行数据

表 1.2.4 嵊泗三期反渗透海水淡化工程—1000m³ /d 运行数据

时间（年-月-日）	温度（℃）	进水压力（MPa）	产水流量(m³/h)	原水电导(us/cm)	产水电导(us/cm)	脱盐率(%)
2006-03-07	10.9	5.8	42.8	42007	307	99.27
2006-09-10	27.1	4.8	43.8	42667	622.4	98.54

时间（年-月-日）	温度（℃）	进水压力（MPa）	产水流量(m^3/h)	原水电导(us/cm)	产水电导(us/cm)	脱盐率(%)
2007-02-11	11	5.4	39.9	38360	303	99.21
2007-09-01	27.3	4.7	44.1	37281	636.6	98.29

海水淡化一级脱盐水 TDS≤500mg/L，产水水质符合《生活饮用水卫生标准》，反渗透装置本体吨水能耗小于 4kWh。

【效益分析】

全套海水淡化装置 2006 年实际运行总费用为 466.4 万元，其中电费 452.3 万元；单位产水电耗 3.23kWh/m^3，电力成本为 2.59 元/m^3。吨水生产成本见表 1.2.5。

表 1.2.5 吨水生产成本表

项目名称	运行成本（元/m^3）
电费	2.59
药剂费	0.30
维修费	0.35
工资及福利费	0.50
其他费用	0.15
合计	3.89

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

3.海岛适用的系列海水淡化技术与装备

本技术与装备采用的是反渗透海水淡化技术，整个流程由取水、预处理、高压泵、能量回收、反渗透膜组件、后处理等组成，其能量回收采用自主研发的能量回收装置。

反渗透海水淡化装置只需外界提供电力和海水即可运行，对现场配套条件要求简单，是最常用海水淡化技术。例如，我国自 1997 年在嵊山岛上建成了我国第一座 500 m^3/d 反渗透海水淡化装置之后，先后在大连长海县的大长山岛（1999 年，1500 m^3/d）和獐子岛（1999 年，1000 m^3/d）、马迹山（1999 年，200 m^3/d）、长岛（2000 年，1000 m^3/d）、嵊泗（2000 年，1000 m^3/d）、小钦岛（2000 年，75 m^3/d）等地也相继投建了反渗透海水淡化装置，均极大地缓解了当地严重缺水的状况。据统计，截止 2012 年底，我国已建成 95 套淡化装置，其中 45 套用于海岛，但是这些海岛淡化规模较大，且能保证电力供应，与沿海建设海水淡化装置基本相同。对于远离陆地的小型海岛，就面临着电力供应与规模限制两大难题，所以如何解决能源供应和规模限制造成的处理工艺、能耗、设备运营管理的不同成为了目前面临的主要问题。

相对于大型岛屿，地处偏远且与国家主权维护、海洋科学研究、海洋勘探紧密联系的小型海岛基本不具备提供充足电力能源的条件，可再生能源（风能、太阳能、波浪能等）与反渗透的结合能够为海岛海水淡化提供一条新的途径。风能海水淡化可分为风电海水淡化（分离式）和风力直接驱动海水淡化（耦合式）。分离式是利用风能发电产生的电能来驱动海水淡化装置；耦合式是直接将风力的机械能用于海水淡化。绝大多数采用的是间接风能海水淡化方式，其能量供应不稳定，具有间歇性和波动性的问题。太阳能海水淡化按照能量的利用方式，可分为太阳能光热海水淡化和太阳能光电海水淡化。前者是利用太阳能产生热能来驱动海水相变过程，主要指太阳能光热海水淡化，2013 年由国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所提供技术、上海骄英能源科技有限公司建设了我国首个太阳能光热海水淡化装置；后者是利用太阳能发电，存储于蓄电池后驱动反渗透淡化过程。波浪能海水淡化也是将波浪能转化为电能，然后用于后续的淡化装置。诸多海岛海水淡化工程证明，采用单一的可再生能源均不能满足淡化装置连续稳

定运行的要求，进而也不能保证持续供水，开发多种可再生能源互补的海水淡化系统是解决这一问题的重要途径。2011 年，青岛大管岛建成与可再生能源互补供电系统耦合的 5m³/d 海水淡化工程，利用风能、太阳能和波浪能互补供电系统，结合海水淡化装置的分时分模块错峰运行特点，实现了海岛反渗透海水淡化装置的连续稳定运行，整套系统由国家海洋技术中心和国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所合作完成。

技术指标

产品规模：5m³/d～500m³/d 系列化产品，吨水电耗小于 4.5 kWh，产水 TDS<500mg/L。

典型案例

【案例名称】

三亚东瑁洲岛海水淡化示范工程

青岛大管岛和灵山岛海水淡化示范工程

西沙永兴岛和琛航岛海水淡化示范工程

【项目概况】

项目来源于 2009 年国家海洋公益性行业科研专项经费“海岛适用的系列海水淡化技术装备及应用研究”项目。紧密围绕我国海岛开发与保护的淡水需求，结合国内外海水淡化发展动态以及我国不同海域的海岛现状，研发了两种自主知识产权的能量回收装置、产品水后处理技术和装置；立足国产超滤、反渗透膜组件及自主研发的能量回收装置、与可再生能源耦合的多能互补技术，形成适用于海岛的反渗透海水淡化自主创新成套技术和系列化装备。

【工艺与装备】

（1）充分利用海岛地下苦咸水资源，降低装置造价和产水成本的反渗透淡化技术与装备。东瑁洲岛距三亚市 5.4 海里，岛内没有淡水，但蕴含地下苦咸水资源。岛上驻军的用水主要依靠船运，用水成本很高。利用本成果建立的 100m³/d

苦咸水淡化示范工程，采用掺混的后处理工艺，增加了产水的矿化度，提高了饮用水的品质，装置造价低，制水成本按柴油发电计算不足 3 元。

图 1.3.1 东瑁洲岛 100m³/d 苦咸水淡化工程

（2）充分利用海岛上的可再生能源，多能互补反渗透淡化技术与装备。青岛市的大管岛属于小型海岛，离大陆较远，岛上长期没有电力供应，淡水资源紧缺。利用本成果建立的 5m³/d 海水淡化示范工程，与多能互补式可再生能源供电系统联合运行；针对北方冬季水温较低，装置产水效率低，甚至无法正常运行的问题，设计了浓水热量回收和太阳能低温海水加热系统，充分利用了可再生能源，确保装置在冬季高效、低能耗运行，适用于我国北方海岛。

图 1.3.2 大管岛 5m³/d 海水淡化工程

（3）采用国产超滤膜组件、反渗透膜、能量回收装置和淡化产品水后处理技术的高国产化率反渗透淡化技术与装备。青岛市的灵山岛是北方第一高岛，淡水主要来源于雨水，随机性很大，水资源奇缺。利用本技术成果，建立的 300m³/d 海水淡化示范工程，采用国产的超滤膜、反渗透膜及自主研发的差动式能量回收装置，关键设备国产化率超过 75%。设计完整的淡化水后处理工艺，保证了淡化水管网输送安全，提高饮用水品质，更加符合居民生活用水习惯。

图 1.3.3 灵山岛 300m³/d 海水淡化示范工程

（4）耐南方高温、高湿、高盐雾海岛环境腐蚀的反渗透海水淡化技术与装备。海南三沙市的永兴岛和琛航岛远离大陆，驻岛官兵用水主要靠雨水收集、船运和地下苦咸水解决，水质差、费用高、用水安全无法得到保证。利用本技术成果分别建立 100m³/d、50m³/d 反渗透海水淡化装置，采用电化学、海洋防腐涂料和超级双相不锈钢等措施，保证其在高温、高湿、高盐雾强腐蚀环境下长期稳定运行。

图 1.3.4 永兴岛 100m³/d 海水淡化工程

【主要技术指标】

产品规模：5m³/d～500m³/d 系列化装备产品，吨水电耗小于 4.5 kWh，产水

TDS<500mg/L。

【效益分析】

根据海岛环境特点以及能源供应情况，5m³/d～500m³/d 系列化产品所需投资在 25～300 万之间，可满足海岛上 25～2500 人的日常生活用水需求。

【应用情况】

成果已成功应用于大管岛 5m³/d 海水淡化工程、东瑁洲岛 100 m³/d 苦咸水淡化工程、琛航岛 50m³/d 海水淡化工程、永兴岛 100m³/d 海水淡化工程和灵山岛 300m³/d 海水淡化工程，取得了良好的示范效果。海南省三沙市东岛和中建岛两套 50m³/d 海水淡化装置处于设备加工阶段。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市，南开区，科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

4.集装箱式多功能应急水处理装备

水是生命之源，供水保障是应急救灾和战时军队后勤保障等极其重要组成部分，生活饮用、医疗救护、武器装备维护等均需要以充足的用水保障为前提。集装箱式多功能应急水处理装备需要从水源、机动方式、电源适应性、制水规模等方面着手，开发安全可靠的现代化净水工艺技术，形成系列化装备产品，满足各种极端情况下保障所需的水质和水量要求，为切实提高应急救灾和战时军队后勤保障能力提供有力的支撑。

该装备是指一个或数个集装箱体内集成包括预处理、脱盐、后处理在内的全部工艺设备和其他辅助设备，必要时包括自带发电设备。采用该装置提供了一种适用于任何恶劣环境、对任何水质的水进行处理，且可在无外部供电的情况下仍能实现水处理的移动式应急水处理装备。为适应现代化战争的需求，世界各国都在加强其后勤供水净化技术和装备的研究。反渗透是当前最为先进的膜法水净化技术之一，可实现水的淡化和净化，还可用于被核生化（NBC）战剂污染的水源处理，具有产水水质好、系统集成度高、应用灵活性强、装备操作简单等特点。以反渗透膜工艺为核心的各类净水技术和装备已在世界各发达国家的军事供水中得到大量应用。

近年来，地震、海啸、泥石流等破坏力极强的灾害不断，造成当地居民流离失所，痛失亲人，而快速救灾及灾后重建是各国政府及社会对受灾人们最大的安慰与帮助。其中，为灾区提供干净的饮用水及生活用水是救灾的首要任务。如在我国发生的四川汶川大地震，在灾后的重建中，救灾队伍利用多功能应急水处理装备制水设备制取干净卫生的饮用水提供给受灾的群众使用。更早前的印尼大海啸及后来的日本地震也造成了大量的人们流离失所。在日本的大地震中，救灾人员就地将海水经集装箱式海水淡化设备脱盐净化制成饮用水提供给受灾人群。

该类净水装备按净化水源分，主要分为海水、苦咸水、地表水和核生化（NBC）污染水四类；按装备机动方式分，主要分为集装箱式和车载移动式二类；按照电源的适应性分，主要分为电网供电、独立发电车供电、自带柴油发电机供电和光伏太阳能或蓄电池组供电四类；装备的制水规模大致与受益人员数量及用水量相配套，并可通过多台装备的并联组合，以满足更大规模的用水需求。

典型案例一

【案例名称】

澳门红十字会集装箱应急供水设备

【项目概况】

由澳门红十字会根据应急救灾现场的一些经验和需要，江河海公司结合多年在水处理行业的经验，专门为应急救灾设计了这套供水设备。此项目已获得澳门红十字会的认可并合作成功。项目设备已得到推广应用。正在各种应急救灾现场发挥出该设备的优势。

图 1.4.1 澳门红十字会集装箱应急供水设备

【工艺与装备】

（一）流程描述

设备工艺流程图 1.4.2 所示。

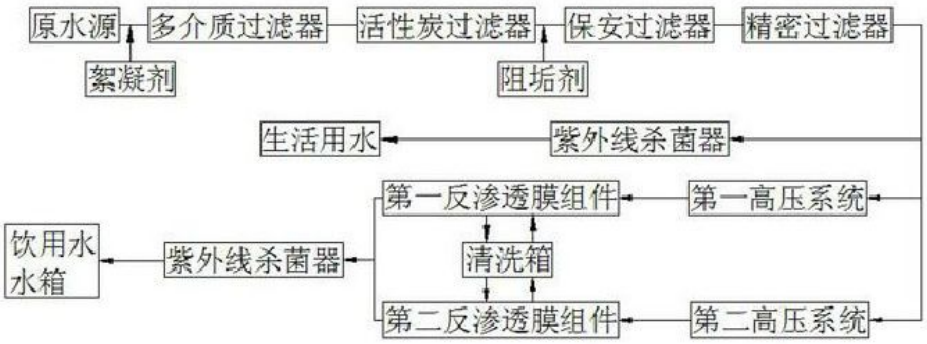


图 1.4.2 澳门红十字会集装箱应急供水流程

有外围电源供电情况下，利用该装置主淡化系统对苦咸水或海水进行淡化时，其工作流程为：增压泵接通电源进行供给原水，原水经过过滤装置中的多介质过滤器、活性炭过滤器、保安过滤器、精密过滤器依次过滤，然后经过第一高压系统加压进入第一反渗透膜组件进行淡化处理，所生产的浓水从浓水排放口排出。

在外部环境不具备使用外部电源的情况下，利用该装置的辅助淡化系统对地下苦咸水、海水、江河水、被污染的淡水进行处理时，其工作流程为：自吸泵接

通由设置在集装箱体内的发电机提供的电源进行供给原水，原水经过过滤装置中的多介质过滤器、活性炭过滤器、保安过滤器、精密过滤器依次过滤，然后经过第二高压系统加压进入第二反渗透膜组件进行淡化处理，所产生的浓水从浓水排放口排出。

【主要技术指标】

1）处理含盐量 40000mg/L 的海水时（海水平均含盐量为 35000mg/L），可产 3.5m^3/h 水质符合《生活饮用水卫生标准》的淡化水。

2）在处理地下苦咸水、江河水及被污染的地表水时，可产得 4.5m^3/h 的优质饮用水。

3）供应卫生用途水的生产（仅限于处理地下苦咸水或江河水，出水卫生、洁净、适于冲洗、洗涤），其一，在制备饮用水时，可同时制备卫生用途的水（源水澄清过滤、杀菌）10～15m^3/h，用于冲洗公共场所，洗涤等生活方面用水；其二，在不制备饮用水时，可制备卫生用途的水（源水澄清过滤、杀菌）15～30m^3/h，用于冲洗公共场所、洗涤等生活方面用水。

4）配电：主机 22kW，副机：11kW

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；珠海市江河海水处理设备工程有限公司

联系人；詹向东

地址；珠海市吉大白莲路 188 中通大厦

邮政编码；519015

电话；0756-3225888

E-mail：jianghehai@vip.163.com

典型案例二

【案例名称】

500 吨 / 日的集装箱式反渗透海水淡化装置

【项目背景】

海洋经济被提升为国家发展战略后，在提升和拓展海洋经济工作中，给海岛以及海域的保护、开发和利用提出了新的发展命题。提高海域使用，就要提高海岛使用，海域使用需要依托海岛展开，而海岛的基础设施尤其是缺乏淡水，淡水资源是人类生存的必要条件。

本技术开发集装箱式海水淡化装置，在国内大范围推广，可以大幅降低我国海水淡化装备投资和制水成本，为海岛、沿海村落、沿海旅游度假区、海洋石油平台和驻岛部队等团体提供淡水。而更大的产业辐射是海域使用扩大带来的交通业、养殖业、养殖生产资料业、水产加工业、海岛旅游度假等产业。对保障海岛地区淡水供应安全，提高海岛居民生活品质，稳定海岛居住人口，促进临港工业的发展，对发展我国民族工业，提高海岛地区的经济发展水平，具有显著的经济和社会效益。

本项目开展集装箱式海水淡化装备的开发、设计及应用，不仅是一次新的尝试，而且具有非常重要的现实意义和社会效益。

【工艺与装备】

（一）流程描述

500 吨 / 日的集装箱式反渗透海水淡化装置工艺流程见图 1.4.3。

1）海水预处理

海水预处理由自清洗滤器、自动加药装置、超滤及其反洗设备组成。海水经取水泵提升后，送至自清洗滤器及超滤装置，同时在自清洗滤器的进水管道内投加絮凝剂（$FeCl_3$）和杀菌剂（次氯酸钠）。经混凝和超滤工序后，原海水中的悬浮物、泥沙等充分截留去除，以确保出水水质 SDI＜4。超滤出水进入中间水箱，再由增压泵送入后续反渗透系统。在反渗透进水前注入还原剂（$NaHSO_3$）和阻垢剂，使预处理出水达到反渗透膜元件进水水质要求。

2）反渗透海水淡化

反渗透海水淡化系统由保安滤器、高压泵、反渗透装置、能量回收装置及压力提升泵、辅助设备等组成。

海水淡化系统使用高效率的能量回收装置，并采用变频控制技术控制高压泵的启动、运行、停止，使整个系统能够适应海域水温季节性波动引起的变化，从而减少了单位产水能耗。

3）后处理和供水

后处理和供水设备由氯化钙投加装置、碳酸氢钠投加装置、产水池和供水泵等组成。

由于淡化水化学稳定性差，产水硬度、碱度及 pH 值偏小，本项目使用了淡化水后矿化技术和设备，增加了淡化水的硬度、碱度及 pH 值，同时解决了淡化水对后续供水管道的腐蚀问题。

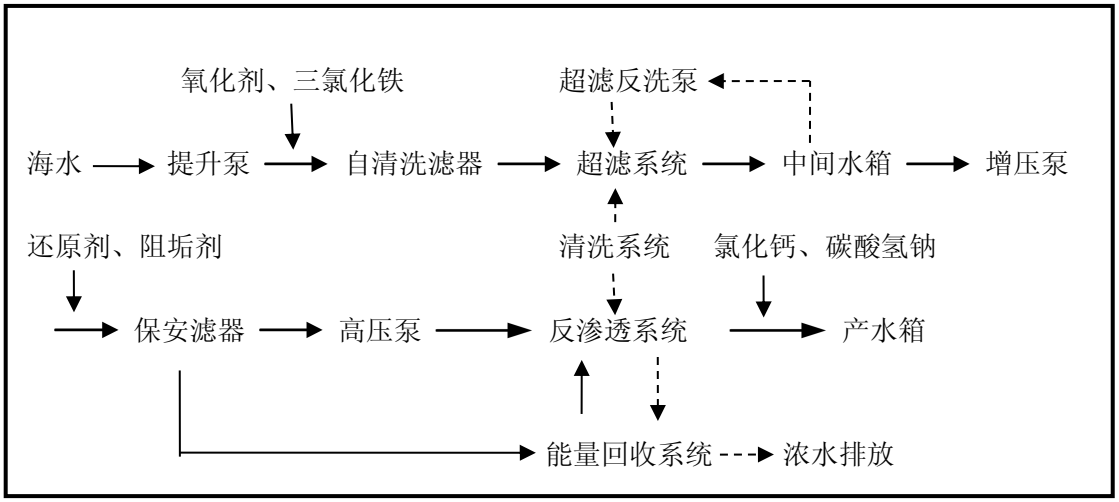


图 1.4.3 某海岛 500 吨 / 日的集装箱式反渗透海水淡化装置工艺流程图

（二）操作参数与运行结果

表 1.4.1 列出了本项目试运行的操作参数及运行数据。

表 1.4.1 某海岛 500 吨 / 日的集装箱式反渗透海水淡化装置运行数据

项　目	单 位	设计值	实测值
海水取水量	m^3/h	60	60
淡化水产量	m^3/h	20.8	20.8
淡化水 TDS	mg/L	500	185
水回收率	%	40	40
水　　温	℃	15	15
吨水耗电量	kWh/m^3	4	3
反渗透进水压力	MPa	≤6.0	5.0
化学药剂注入量			

项　目	单 位	设计值	实测值
氯化铁（$FeCl_3$）	mg/L	5	3
次氯酸钠（NaClO）	mg/L	1	1
亚硫酸氢钠（$NaHSO_3$）	mg/L	3	3
硫酸（H_2SO_4）	mg/L	5	5
氯化钙($CaCl_2$)	mg/L	60	50
碳酸氢钠($NaHCO_3$)	mg/L	60	50

产水水质符合《生活饮用水卫生标准》，反渗透装置本体吨水能耗小于 2.5kWh，主要技术指标达到国际先进水平。

【效益分析】

本工程总投资约 300 万元，500m³/d 海水淡化系统经过一段时间的运行，生产成本的各项费用如表 1.4.2 所示。

表 1.4.2 500m³/d 集装箱式反渗透海水淡化装置吨水生产成本表

成本组成	费用（元/d）	吨水费用（元）
电费	1125	2.25
药剂费	150	0.30
膜与材料费	400	0.80
工资及福利费	100	0.20
合计	1775	3.55

注：膜与材料费包括超滤膜、微孔滤芯和反渗透膜元件更换费，超滤膜按 3 年更换计算，反渗透膜元件按 3 年更换计算。

【应用情况】

该技术装备已经在国内某海岛应用。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

5.亚海水淡化系统设计与集成技术

亚海水是指沿海淡水河口受海水倒灌和滩涂围垦水库的低盐度海水。

滩涂围垦水库由于滩涂水库底层含盐量高，蓄淡后的水库水质含盐量约在2500～7000mg/L。由于受到海水侵蚀和上游河流污染，靠自然稀释淡化，速度缓慢，估计至少20年以上，如象山滩涂水库已建成20年以上，现水库水质含盐量仍超过1000mg/L，无法作为市政饮用水水源。

海水倒灌一般发生在河流的入海口附近。在雨水充沛的季节(如夏季)，整条河流的淡水水位高于海平面，所以入海口的水是淡水。到了干旱季节（如冬季），河流的水位就有可能低于海平面，这时，含盐较高的海水就倒流入河流入海口，造成入海口附近的河水含盐量上升，特别是涨潮时，海水可以倒灌入河流连绵几十公里。海水倒灌是我国沿海地区普遍存在且日趋严重的问题，严重影响了当地居民生活和企业生产的用水需求。

“十五”以来，随着海水淡化技术，特别是反渗透海水淡化技术的快速发展，人们在关注海水淡化解决沿海地区和岛屿淡水紧缺的同时，也开始注意投资、运行成本更低，能耗和环境影响更小的亚海水淡化工程。在科技支撑和引领下，建设了一批亚海水淡化示范工程。亚海水淡化采用反渗透技术，根据水源的差异和预处理办法的选择，典型工艺流程如下：

流程一，采用传统预处理的亚海水淡化流程

水源水泵 ⇨ 混凝澄清 ⇨ 介质过滤 ⇨ 清水池 ⇨ 增压水泵 ⇨ 介质过滤 ⇨ 保安过滤 ⇨ 高压给水 ⇨ 反渗透装置 ⇨ 产品水池 ⇨ 供水泵 ⇨ 供水管网

流程二，采用膜法预处理的亚海水淡化流程

水源水泵 ⇨ 混凝澄清 ⇨ 清水池 ⇨ 增压水泵 ⇨ 超滤系统 ⇨ 超滤水池 ⇨ 增压水泵 ⇨ 保安过滤 ⇨ 高压给水 ⇨ 反渗透装置 ⇨ 产品水池 ⇨ 供水泵 ⇨ 供水管网

亚海水淡化一级脱盐水TDS≤200mg/L；吨水能耗≤2.0kWh；水质符合国家《生活饮用水卫生标准》，综合制水成本可控制在2.5元以内。

典型案例一

【案例名称】

东莞玖龙纸业 100000m³/d 低盐度海水淡化系统

【项目概况】

东莞玖龙纸业有限公司位于东莞市东江入海口，受地理位置影响，每年的年末至第二年年初都会受到咸潮的影响，严重影响了正常的生产需要，为了缓解咸潮所带来的影响，东莞玖龙纸业在国家政策的支持下，投资建设 100000m³/d 低盐度海水淡化系统，一期建成 50000m³/d 系统。该项目是当时国内最大规模的亚海水淡化系统。该项目利用反渗透技术，成功将海水倒灌形成的亚海水进行淡化，满足了企业生产的要求，取得了明显的经济和社会效益。

该项目由杭州水处理技术研究开发中心负责工程设计和设备安装、调试，玖龙纸业负责工民建等配套设施建设。项目于 2005 年 6 月开工建设，11 月设备成套完毕，开始现场安装，2006 年 8 月调试出水。

【工艺与装备】

东莞玖龙纸业低盐度海水淡化工程的工艺流程见图 1.5.1 。

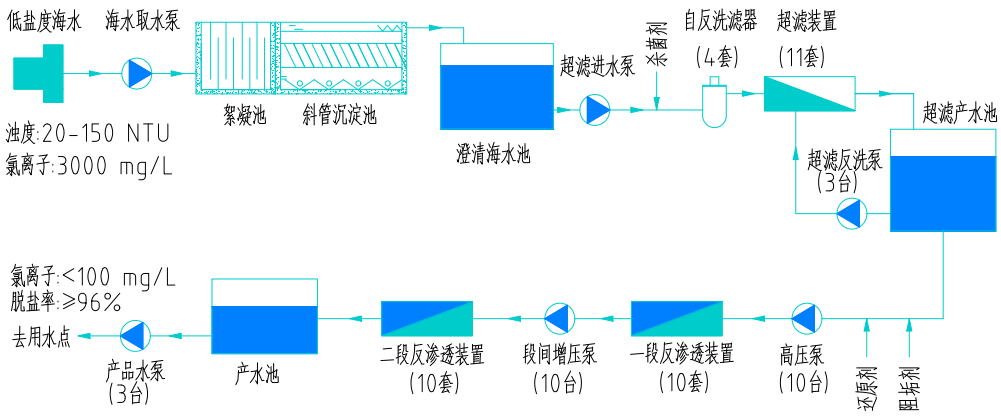


图 1.5.1 东莞玖龙纸业低盐度海水淡化工程—50000m³/d 工艺流程图

1）取水

该项目水源采取避开咸潮高峰，在退潮时将相对较淡的亚海水取入蓄水池，亚海水再经输水管道输送到清水车间，经投药、混凝、沉淀等步骤，初步处理后的亚海水输送到海水淡化系统。

2）预处理

预处理系统由加药装置、自清洗滤器、超滤装置、超滤水池、超滤反洗系统等组成。

在自清洗滤器前投加杀菌剂 NaClO，以抑制细菌、微生物等在超滤及超滤产水池繁殖；自清洗滤器定时、定压差轮换反洗。11 套超滤装置并联运行，反洗等自用水约 10%，超滤的运行采用全流过滤的模式，定时反洗、气洗、分散化学清洗，视情况或定期进行化学清洗。设超滤产水池以调节流量的平衡，防止超滤产水波动对系统连续运行的影响，并作为超滤系统反冲洗及分散化学清洗过程的水源储存池。

为防止余氯对反渗透膜的氧化破坏，在反渗透高压泵进水管上，投加还原剂 $NaHSO_3$，还原超滤产水中的余氯。并在超滤水进入反渗透装置前投加阻垢剂。

3）反渗透淡化

淡化系统由高压泵、反渗透装置，段间增压泵，化学清洗装置及低压冲洗泵等辅助设备组成。

每套反渗透装置采用一级二段脱盐流程，段间设置增压泵，根据进水的含盐量变化，段间增压泵压力提升范围为 2～6kg/cm^2，大大增加了二段膜元件的产水量，改善膜元件的运行状况。反渗透装置设有多个保护开关，当因误操作或其他原因使反渗透压力、流量出现反常时，系统将自动连锁报警，以保护高压泵、段间泵、反渗透膜元件等不受损坏。

图 1.5.2 反渗透装置

图 1.5.3 超滤装置

【操作参数与运行结果】

系统于 2006 年 12 月进行 168 小时连续联动试车成功后，顺利投入运行。调试和检测的结果表明，该系统运行参数稳定，各单元设备运行正常，操作简便，性能指标均达到设计要求。具体数据见表 1.5.1。

序号	项目	指标	设计值
1	污染指数 SDI	3	≤4
2	超滤产水流量	2700m³ /h	2700m³ /h
3	反渗透产水流量	2000m³ /h	2000m³ /h
4	反渗透回收率	75%	≥75%
5	反渗透脱盐率	97.7%	≥96%
6	反渗透产水氯根	≤100ppm	≤100ppm

表 1.5.1 调试和检测的结果

【效益分析】

系统的造水成本根据 2007 年的实际使用情况进行计算，吨水成本仅 2.5 元，不到海水淡化吨水成本的 50%，与自来水供水价格基本相当。吨水成本构成见表 1.5.2。

表 1.5.2 系统的造水成本

序号	名称	吨产水费用（元）
1	投资成本	1.00
2	电费	0.45
3	膜更换费	0.40
4	化学试剂费	0.30
5	劳动力费	0.03
6	维修费	0.32
	合计	2.50

计算依据

(1)装置生产能力　　2000 m³ /h

(2)工程总投资	5000 万
(3)利息	7%
(4)装置开工率	40%
(5)电费成本	0.3 元/度
(6)单位产水能耗	1.5kWh/m^3 产水
(7)维修费（以总投资计）	1%
(8)装置及配套设施使用寿命	10 年
(9)反渗透膜元件平均使用寿命	5 年
(10)化学药剂费用	0.3 元/m^3 产水
(11)劳动力（三班三人制 ）	20000 元/年.人

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

典型案例二

【案例名称】

慈溪杭州湾新区 50000 m^3/d 滩涂水处理项目

【项目概况】

浙江省慈溪市是杭州湾跨海大桥的南端终点。2000 年经国务院批准，在此建设杭州湾新区开发区。作为基础设施配套工程，规划建设 20 万 m^3/d 供水厂。由于该地区净水资源匮乏，市政府决定将受到海水侵蚀和河流污染的滩涂水库——四灶铺水库作为水源，采用膜技术进行深度净化处理。第一期 50000 m^3/d 水厂由蓝星环境工程公司承建，于 2004 年 11 月建成投产。项目采用传统工艺与膜技术相结合的新型水处理技术，将微污染滩涂水变为市政供水。该项目成为国内首家采用双膜技术处理滩涂水的 5 万吨级规模自来水厂，至今运行良好。每天为用户提供 5 万吨的优质自来水，为市政供水开辟了新的水源，缓解了当地缺水状况。该项目是北京市科委《水资源利用与水环境保护技术开发（Ⅱ）—膜技术与设备研发及产业化》课题的示范工程，获得了中国膜工业协会科技进步二等奖。

【工艺与装备】

1）原水水质

慈溪四灶浦水库水质作为市政供水存在多项指标不符合要求。其中溶解性总固体、COD、氨氮、氯离子等超标 ，色度、气味、悬浮物等也不能满足饮用水的要求。

表 1.5.3 慈溪四灶浦水库水质主要数据

项　目	单位	含量	项目	单位	含量
色度		8～15	总硬度	mg/L	120～150
肉眼可见物		有杂质不溶物	碱度	mg/L	266
浊度	度	20～200	臭和味		强苦咸味
溶解性总固体	mg/L	980～1200	Fe	mg/L	0.75
COD	mg/L	6～30	Cl	mg/L	280～350
细菌总数	个/ml	＞600	氨氮	mg/L	16.7

2）工艺流程

由于该水源为地表水，容易受环境因素影响，水质波动较大。预处理工艺考虑了水质波动因素及藻类爆发期的处理方法。采用了生物接触氧化，以防止和降低高 COD 含量的进水；平流沉淀和汽水反冲滤池作为降浊的重要环节与传统的水厂基本相同。之后采用的超滤＋反渗透的双膜法深度处理工艺，使出水的水质较常规方法处理发生了根本性的变化。之后，反渗透出水与非反渗透水按比例勾兑混合后进入市政供水管网。工艺流程如图 1.5.4。

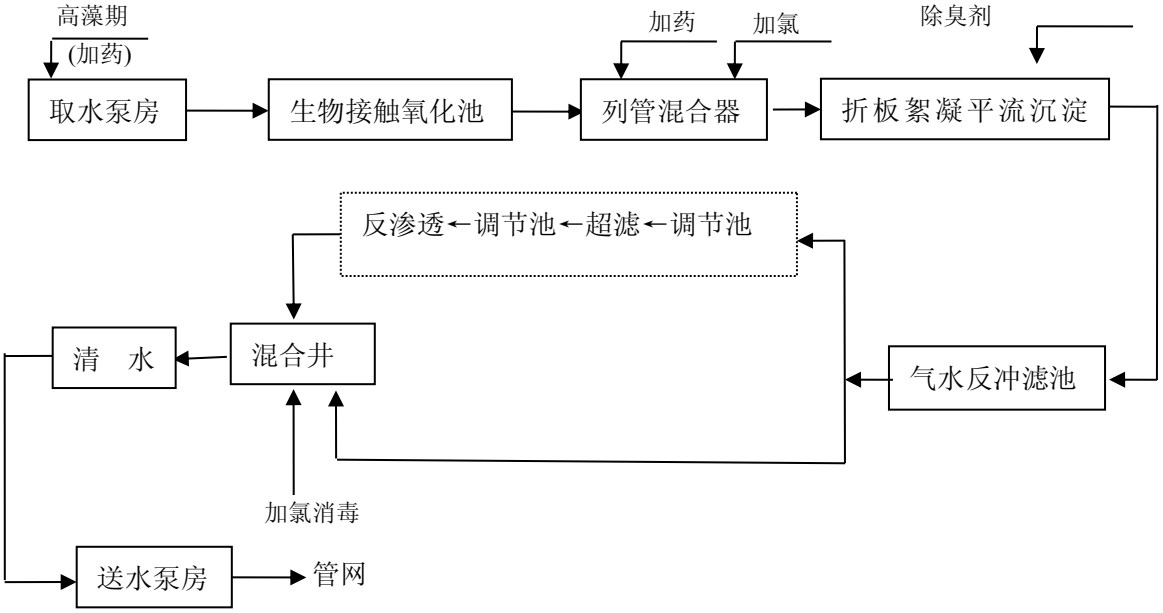


图 1.5.4 慈溪杭州湾新区 50000 m^3/d 滩涂水处理工艺流程

3）膜设备设计参数及组成

（1）膜设备设计参数

表 1.5.4 膜设备设计参数

超滤主要设计参数		反渗透主要设计参数	
项目	参数值	项目	参数值
膜通量	60GFD	膜通量	9500GPD
过滤方式	单通错流	单支膜产水量	36 m^3/d
单支膜产水量	8.3m^3/h	单支膜脱盐率	98%
单套膜数量	40	单套膜数量	288

超滤主要设计参数		反渗透主要设计参数	
单套产水能力	280 m³/h	单套产水能力	210 m³/h
系统回收率	92%	系统回收率	75%
总产水能力	30000 m³/d	总产水能力	20000m³/d

（2）膜设备组成

a. 超滤单元

采用 100μm 袋式过滤器，防止大颗粒悬浮物对超滤膜孔的永久堵塞，提高超滤膜运行的安全可靠性。

超滤单元按 1 套出力 280 m³/h 设计，共四套，运行过程中，为保证系统的稳定、可靠运行，需定时进行反冲洗和快冲。每隔一段时间要对超滤系统进行化学清洗，超滤装置设一套化学清洗系统。

b. 反渗透单元

在进反渗透膜前，添加阻垢剂和还原剂，以抑制浓水侧的结垢，并保证进水的余氯小于 0.1ppm，同时预留非氧化性杀菌剂加药口，预防系统微生物污染。采用 5μm 保安过滤器，防止颗粒物对反渗透膜孔的永久堵塞，提高反渗透膜运行的安全可靠性。

反渗透单元按 1 套出力 210 m³/h 设计，共四套，每套系统停运时，用反渗透透过水进行冲洗，以防浓水长时间停留在膜表面，设一套冲洗装置，同时每隔一段时间还要对反渗透系统进行化学清洗，以恢复反渗透膜的性能，设一套化学清洗装置。

【操作参数与运行结果】

1）出厂水质

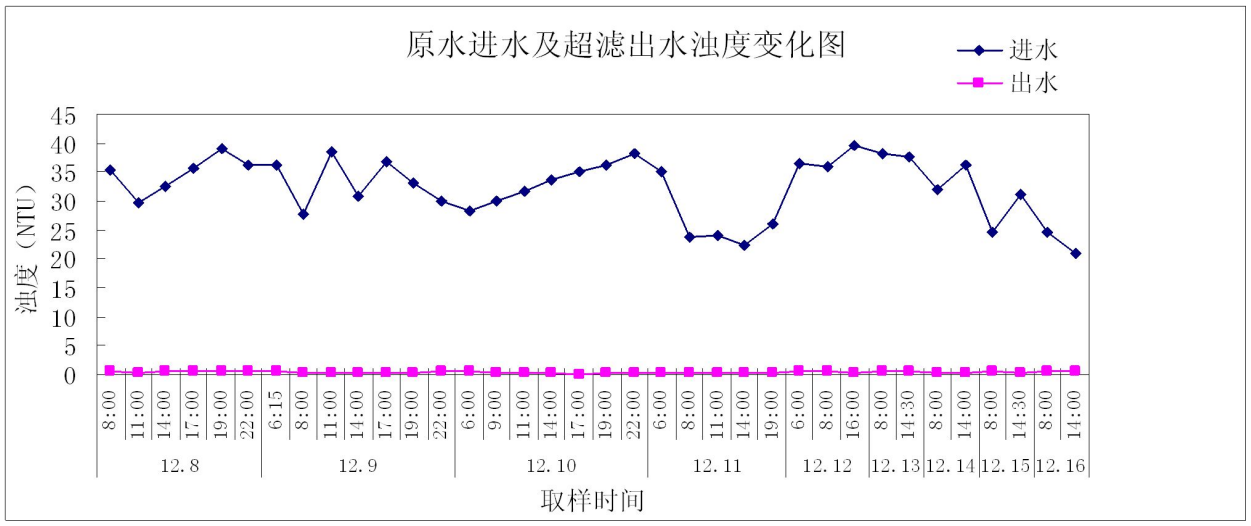
表 1.5.5 出厂水质检测结果

项目	检测值	项目	检测值
色度	<5	挥发酚	<0.001mg/L
浊度	0.1NTU	总硬度	80 mg/L
臭和味	无	氯化物	160 mg/L
pH	7.5	总溶解性固体	450 mg/L

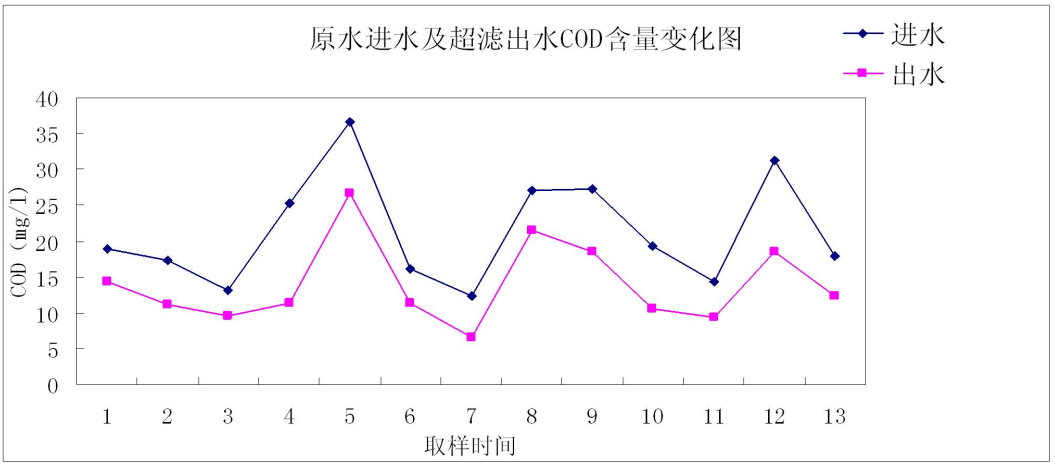
项目	检测值	项目	检测值
氨氮	0.05 mg/L	细菌总数	1CFU/mL
COD_{Mn}	<1 mg/L	大肠杆菌	<1CFU/100mL

2）运行结果

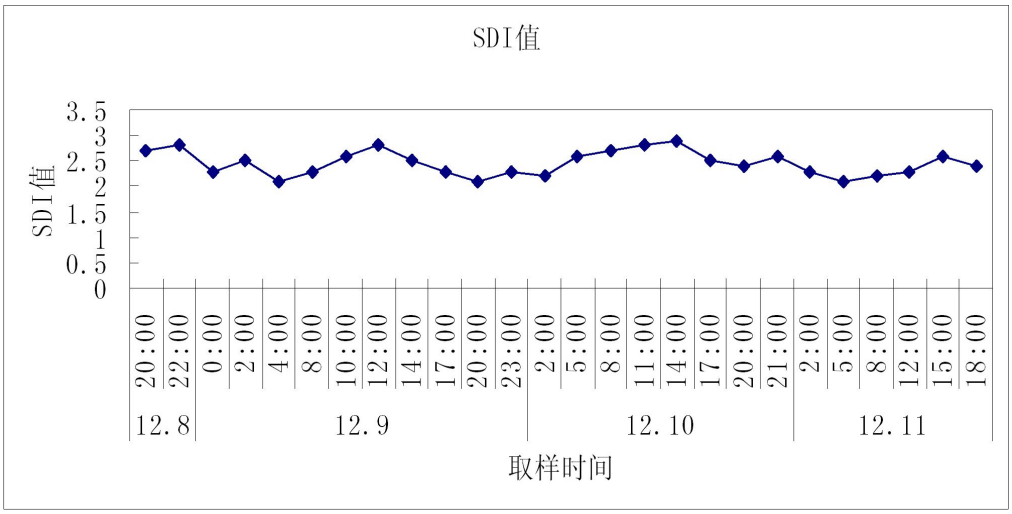
（1） 超滤进出水浊度



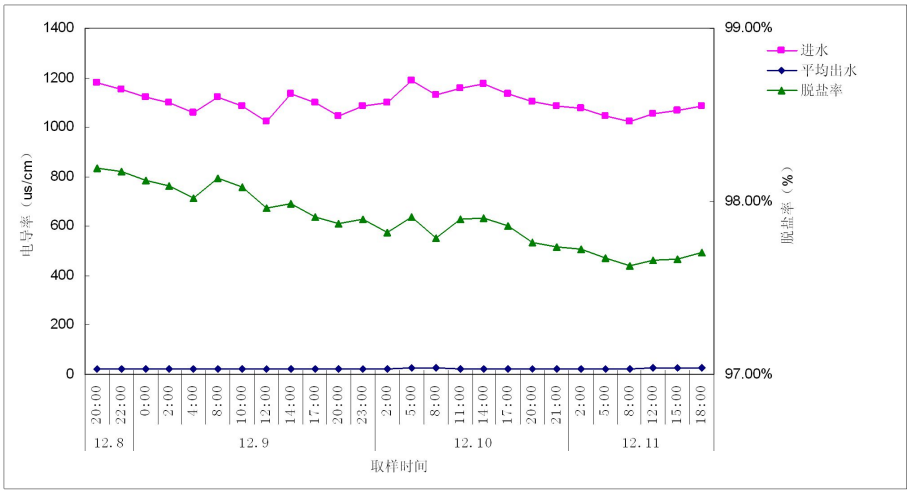
（2） 超滤进出水 COD



（3） 反渗透进水 SDI 值



（4） 反渗透进出水电导率及脱盐率



3）运行成本计算依据

（1）总处理水量 2080m³/h，合 1820 万 m³/年（一年按 8760 小时计）

（2）电费：0.69 元/kW（2004 年）

（3）超滤膜、反渗透膜按 3 年更换一次，滤芯按 2 个月更换 1 次

（4）超滤和反渗透的清洗周期按 1 个月计

（5）人员按 28 人计

4）成本计算（2005 年）

成本计算见表 1.5.6。

表 1.5.6 成本计算

名称	消耗量	年消耗（万元）	吨水成本（元）
助凝剂	0.3ppm	18.48	0.01
PAC	35ppm	191.32	0.10
液氯	6ppm	20.52	0.011
亚硫酸氢钠	3ppm	10.30	0.006
阻垢剂	5ppm	273.3	0.15
清洗药耗		18.00	0.012
滤芯		18.18	0.01
超滤膜		328.67	0.17
反渗透膜		184.32	0.10
总耗电	1645kwh	991.66	0.54
人员费用		75.6	0.04
维修费用		162.94	0.09
设备折旧			0.17
小 计			1.41

图 1.5.5 平流沉淀系统

图 1.5.6 超滤系统

图 1.5.7 反渗透除盐系统

图 1.5.8 中央控制室

【结论】

慈溪杭州湾新区水厂项目在国内首次采用双膜法（超滤膜+反渗透膜）工艺处理微污染滩涂水，得到更为安全、更卫生的饮用水；尽管水价略高，但在可以接受的范围内。该项目在缺发淡水资源地区，采用膜技术为市政水源地建设开辟了道路，缓解了当地缺水状况。不但具有很好的经济和社会效益，而且也具有一定的战略意义。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；蓝星环境工程公司

联系人；王宇彤

地址；北京市顺义区空港工业 B 区

邮政编码；101318

电话；010-61468158

E-mail：wangyt1220@163.com

6. 便携式交直流供电海水淡化器

随着水资源的日益短缺，海水、苦咸水淡化作为一重要的淡水补充方式显得越来越重要，目前脱盐技术工艺中最先进的技术—反渗透，以其能耗低、出水好、操作方便，正愈来愈广泛地被应用于各个领域。尤其是那些生活条件艰苦，缺水和饮用水水质差的地区。但是该设备要正常制出淡水，不但要求具备电源，而且要求具备一定的安装条件，而在条件简陋、发生意外或遇紧急情况，或无电、断电情况下，该装置就无法制出淡水。目前市场仅有单兵使用的救生用淡化装置，其产水量小，仅能满足个人饮用，产水水质差，在实际应用中有较大的局限性。

设计的手动、电动多用途便携式淡化装置就是为满足某些特殊环境，如地质勘探、部队野外执行任务，远洋渔船、运输船舶及岛屿等，在遇到意外情况下的救生需要，多种动力的选择就是充分利用周围一切可利用的环境资源，对周围环境中一切可以利用的水源（海水、苦咸水、可能被污染的河水等）利用各种动力源进行快速处理，制备安全的饮用水。

该技术主要以交流电、直流电或蓄电池为电力能源，在水源丰富的沿海、海岛或苦咸水及灾区受污染淡水区域，紧急情况下急缺淡水，但一般制淡水设备因人力及物力操作不便时，该装备提供的便携式交流直流海水、苦咸水淡化器可很容易携带搬运至各种特殊场所，以满足救灾应急或野外生存的需要；在固定场所或野外流动环境，解决以家庭或团体为单位的人的生活及饮用用水，在电力资源紧张或操作方案制约人力及物力的情况下能就地制出符合要求的纯净水，满足应急或野外生存的需要，该装备结构紧凑，在使用时，可方便、快捷地进行搬运和携带，并且应用范围广。

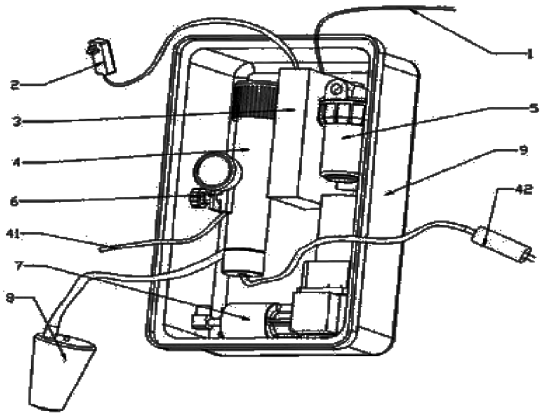


图 1.6.1 便携式交直流供电海水淡化器

典型案例

【案例名称】

海上游艇用淡化设备

图 1.6.2 海上游艇用淡化设备

【项目概况】

海上私人游艇由于游艇小，仓位紧张，无法安装常规船用淡化设备，一般采用船舱储存淡水和携带少量直饮水，所以出海海钓、游玩淡水是游客非常重视考虑的事情。便携式小型淡化设备的配备，减小了游客在淡水方面的顾虑，为生活饮水提供了可靠保障。

该游艇配备后，游艇航行 10 天，采用船上普通电源制水，共制备 200 升淡水，大大缓解了游艇上淡水的紧张局面，保证了游客的旅行安全和旅游品质。

【工艺与装备】

该装备主要利用反渗透膜技术进行脱盐分离水分子和有害物质。在有电条件下利用电能驱动小型高压泵通过膜组件的脱盐制取新鲜淡水，在无电状况下利用手动发电制出新鲜淡水。其关键技术为：

（1）采用手摇发电机给蓄电池充电，通过蓄电池带动微型电动机，再由微型电动机带动小型高压泵对膜系统内的海水进行增压，将咸水、污染水进行处理

制备新鲜淡水。

（2）在手摇电动机模式配套手动自吸式水泵将海水抽入淡化装置中，保证了装置制水的连续性。

（3）配备可接驳多种电源的装置，在周围环境有电源（照明电源、20V 电源及直流电源）时，可直接接驳电源采用电动制水。

（4）其工艺流程：海水—供水泵—多介质过滤器—活性炭过滤器—保安过滤器—高压泵—反渗透系统—产水。

【主要技术经济指标】

该装置在有电能情况下，通过电能驱动从海水、苦咸水、受污染等水源分离出干净淡水，在紧急情况或者无电能情况下，通过人力手摇驱动同样从海水、苦咸水、受污染的水源中淡化出合适人们饮用的淡水。

该装置无论作为一般备用制淡水还是紧急救灾情况下使用，产出的淡水水质都能达到国家饮用水标准。

该装置主要性能如下：

制水能力≥0.005～0.007m^3/h（每小时 5～7 升水）

重量：≤27kg

配电：200W

体积：700×340×480mm

运行荷载小，每吨淡水小于 20 度电。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：珠海市江河海水处理设备工程有限公司

联系人：詹向东

地址：珠海市吉大白莲路 188 号中通大厦 1 楼

邮政编码：519015

电话：0756-3225888

E-mail：jianghehai@vip.163.com

7.海水淡化反渗透复合膜元件制备技术

界面聚合法制备高性能的复合反渗透膜是目前国际上应用最广泛的复合膜制备技术，通过该方式制备的反渗透膜元件广泛应用于饮用水、工艺用水、废水资源化、中水回用以及海水淡化等技术领域。目前，全球95%以上反渗透水处理工程采用复合反渗透膜元件。

海水淡化用反渗透复合膜元件是SWRO技术成为最具竞争力的海水淡化技术的关键，海水淡化用反渗透膜元件性能及其工业化水平体现了一个国家的反渗透膜制造技术和整个分离膜技术的总体水平。国外海水淡化反渗透复合膜技术研究始于20世纪60年代，其目的是为了克服不对称反渗透膜易压密、膜产水阻力大、醋酸纤维素膜易水解和pH适用范围窄等缺点，复合反渗透膜可实现分别对支撑层和脱盐层进行优化，有利于膜材料的选择和膜性能的提高，使获得高水通量、高脱盐性能的反渗透膜成为可能，但同时对反渗透膜的制备工艺技术和生产设备提出了更高的要求；经过近二十年的研究和开发，在海水淡化反渗透复合膜与膜材料、复合膜制备技术、卷式膜元件制作材料和技术等方面取得重大突破，并于20世纪80年代初由美国Filmtec公司成功实现商品化生产；而后美、日等国的其它膜技术公司，又相继成功开发出了各自的海水淡化用反渗透复合膜产品；通过开发新型功能膜材料、提高膜材料性能、优化制备技术、改变复合膜表面结构和性能、优化膜元件结构和制作材料及工艺等措施，海水淡化反渗透复合膜元件制造技术及其产品性能有了更大的发展和进步；海水淡化反渗透复合膜产品性能发展趋势主要表现在以下几个方面：

1）高脱盐率：海水淡化用反渗透复合膜元件的脱盐率由上世纪末的平均99.2%提高到目前的平均99.5%，已完全能满足一级反渗透海水淡化制备饮用水的要求。

2）大水通量：海水淡化用反渗透复合膜元件水通量提高了35%以上，单支膜元件（规格8040）的产水量早期仅为4500GPD（17.1 m^3/d）左右，目前最高已达到大于9000GPD（34 m^3/d）；膜元件水通量的提高，不仅提高了系统的回收率，同时还降低了系统的投资成本和淡水的制水成本，促进了反渗透海水淡化技术的推广应用。

3）低污染：在同等使用条件下，海水淡化反渗透膜元件的清洗周期与早期的

膜元件产品相比，延长了一倍以上；抗污染性能的提高和清洗周期的延长，不仅可降低膜元件的运行成本、延长膜元件的使用受命、降低制水成本，还能保证反渗透技术在水质相对较差的海域正常应用。

国内反渗透海水淡化近几年来市场需求大，反渗透海水淡化技术和产业发展迅速，带动了国内海水淡化用反渗透复合膜技术及产业和反渗透海水淡化工程技术发展；国家和各级政府都十分重视反渗透海水淡化技术及关键膜与膜材料的开发，先后在“973 计划 ”、“863 计划 ”和科技攻关中设项目研究开发反渗透海水淡化技术及相关膜与膜材料；经过近二十年的研究开发和技术攻关，在反渗透复合膜与膜材料、膜和元件制作技术、反渗透海水淡化工程技术等方面取得了一批成果，尤其在反渗透复合膜制备及其产业化方面取得了突破性进展，苦咸水反渗透复合膜实现了工业化生产，成功开发了普通海水淡化反渗透复合膜元件技术和相应膜产品，产品性能为脱盐率 99.6%，产水量 28m³/d，目前处于工业性试制阶段，为进一步开发高性能膜产品打下了基础。

典型案例

【案例名称】

国产反渗透海水淡化膜元件

【装备概况】

该成果来源于“十一五”国家 863 计划“反渗透膜材料及产业化关键技术”研究项目。经过项目组的研究攻关，突破了反渗透海水淡化复合膜制备产业化关键技术，研制出具有自主知识产权的反渗透海水淡化膜元件，并在舟山六横万吨级反渗透海水淡化单机装置中进行示范应用。万吨级国产海水淡化膜应用示范工程由舟山市六横水务有限公司投资建设，于 2011 年 5 月调试产水，并投入使用。膜系统运行 3 年来，脱盐率、产水量等各项运行指标正常。该成果荣获 2012 年中国化工科学技术特等奖。

【原理与结构】

反渗透海水淡化膜元件是海水脱盐单元的核心部件，其由反渗透海水膜片、进水隔网、产水流道布、中心产水管等材料通过胶水密封后卷制而成。反渗透海水膜片的性能决定了膜元件的性能，反渗透海水膜为芳香聚酰胺材料，通过多元

胺和酰氯经界面聚合反应而成，膜片采用复合式结构，由无纺布、多孔膜支撑层和功能分离层组成。图 1.7.1 和 1.7.2 分别为反渗透海水膜片和膜元件结构。

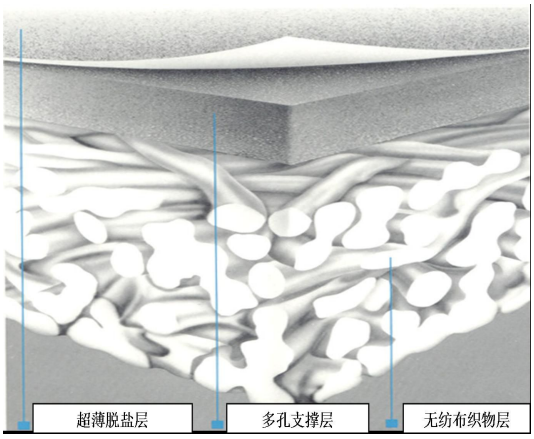


图 1.7.1 反渗透海水膜片结构

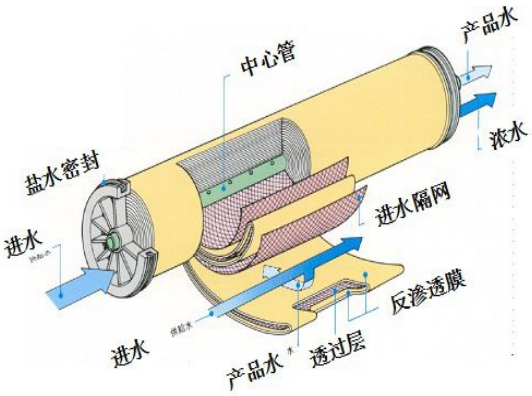


图 1.7.2　反渗透海水膜元件结构

【技术经济指标】

反渗透海水淡化膜片性能：NaCl 脱盐率 99.7%，水通量 0.85m^3•m^{-2}•d^{-1}（溶质浓度 32000mg•L^{-1}，5.5MPa，25℃，pH7-8）。

海水淡化膜元件经国家海水及苦咸水利用产品质量监督检验中心检测，产品性能：NaCl 脱盐率 99.7%，产水量 28.3m^3•d^{-1}（溶质浓度 32370 mg•L^{-1}，5.5MPa，25.2℃，回收率 8.18%，pH7.35）。

【应用情况】

国产反渗透海水淡化膜元件已在舟山六横万吨级反渗透海水淡化单机装置中进行示范应用，这也是国产膜元件首次在大型海水淡化系统中的应用。万吨级反渗透海水淡化单机装置采用国产膜元件 840 支，设计产水量为 10000 m^3/d。该单机装置于 2011 年 5 月调试成功并投入试运行。系统调试和检测结果表明，膜元件运行正常，各工艺段出水水质达到设计要求，产水经化验分析达到国家《生活饮用水卫生标准》GB5749 的要求。图 1.7.3 为舟山六横万吨级国产海水膜元件应用示范装置。表 1.7.1 为万吨级国产海水膜元件应用示范装置现场运行测试数据。

图 1.7.3 舟山六横万吨级国产海水膜元件应用示范装置

表 1.7.1　万吨级国产海水膜元件应用示范装置现场运行测试数据

序号	运行测试项目	实测值
1	海水温度	15℃
2	产品水 pH	7.1
3	产水流量	420m³/h
4	浓水流量	560 m³/h
5	回收率	42. 9%
6	海水含盐量	28895.78mg/L
7	产水含盐量	125.39 mg/L
8	脱盐率	99.57%

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；潘巧明

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935407

E-mail：panqm@chinawatertech.com

8.海水淡化分离膜外壳制造技术

该技术为国家“十一五”科技支撑计划项目子课题，由哈尔滨乐普实业发展中心独自承担完成，拥有全部知识产权。

该技术产品以环氧树脂为基体材料，以玻璃纤维为增强材料，采用缠绕工艺成型，高温条件下固化的玻璃钢制品。海水淡化膜外壳是建设膜法海水淡化工程不可或缺的部件，其内部装配膜元件，承担膜元件分离海水时的工作压力，已经成为不可替代的材料。

技术产品按照美国 ASME（X）设计计算，利用计算机辅助设计进行应力分析，采用不锈钢预埋件制作剪切槽提高区域可靠性；通过在树脂体系中嵌入柔性链段来提高韧性；研发了内加热模具与内加热装置，在缠绕过程中对模具实施内加热的技术方法，将产品的纤维重量百分含量由 75%提升到 79%左右；技术产品通过研究专用开孔设备，确保原浓水口间距的加工精度在±1.5mm 之内。

技术产品已通过 ASME（X）工艺评定，符合各项技术指标要求，技术产品可以在进行大气压至设计压力十万次疲劳试验后，通过 6 倍设计压力的爆破试验，产品技术国际先进，已替代部分进口产品，并出口到多个国家和地区。

该技术荣获中国化工科学技术特等奖和中国膜工业协会科学技术一等奖。

典型案例

【案例名称】

新加坡大士 318,500m³/d 大泉海水淡化厂项目

【项目概况】

新加坡大泉海水淡化厂位于大士，由凯发集团（Hyflux）设计、建造、拥有及经营。这家海水淡化厂斥资 10 亿零 500 万新元（1 新元约合 5 元）建造，日产量达 7000 万英制加仑，是亚洲最大的使用反向渗透技术的海水淡化厂。

该项目使用技术产品 R8040B1000S-7W 膜外壳 3672 支。

【工艺与装备】

项目分为预处理部分、反渗透部分、产品水后处理三个部分。

预处理部分的目的是将海水处理成为达到反渗透膜进水要求的水。预处理工艺的设计是基于 RO 膜的进水水质条件，采用多级过滤型式，能确保反渗透进水浊度污染指数达到要求。多级过滤的设置提高了预处理过滤效果，保证 RO 膜的进水水质。从另一角度说，也保证装置始终在安全、合理的条件下运行，保证反渗透膜工作性能，提高了装置运行可靠性。

反渗透部分由高压泵、反渗透膜、玻璃钢分离膜外壳、清洗系统等组成，为了降低系统能量损耗，同时配有能量回收装置。用反渗透原理制造淡水需在高压下进行，工作压力一般在 4.0～6.5Mpa 范围内，预处理的海水经高压泵增压后进入反渗透膜，透过反渗透膜的即为淡水，剩余未透过膜的具有高压力能的浓海水通过能量回收装置将部分待处理的原海水直接升压，再用增压泵来补偿经过膜堆和管道损失的压力，这部分升压后的原海水与高压泵升压后的原海水混合后，送往反渗透膜组。由于反渗透过程是一种浓缩的过程，因此反渗透膜表面的污染是不可避免的。当反渗透设备的性能下降（具体表现为产水量下降，产水含盐量上升，膜压差上升）时，即需对反渗透膜进行化学清洗。系统设计了循环清洗配置。

透过反渗透膜的淡水经过产品水后处理即成为直饮水。

图 1.8.1 新加坡大泉 318,500m³/d 海水淡化系统

【主要技术经济指标】

1）内径规格： 8″；

2）装膜芯数：7 芯；

3）设计压力：6.9MPa；

4）水压循环：65℃下，水压循环 10 万次，无渗漏；

5）爆破压力：≥ 6 倍设计压力；

6）耐腐蚀性：全部部件可耐海水长期腐蚀。

【效益分析】

新加坡大泉海水淡化厂每天可淡化 7000 万加仑（31.823 万方/日）。该厂投资 10 亿 500 万新元，按 1 新加坡元=4.9207 人民币元，换算成人民币为 49.453 亿元。

新加坡目前每天的用水量约 4 亿加仑，大泉海水淡化厂每天可制造 0.7 亿加仑的净化水。这样的生产量足以让新加坡有能力应对气候变化或长期干旱等带来的水资源挑战。

【应用情况】

1）舟山六横水务有限公司承建国家“十一五”10,000 m³/d 海水淡化示范工程，使用技术产品 R8040B1000S-7W 膜外壳 120 支，于 2011 年试运行；

2）北控阿科凌海水淡化有限公司承建唐山市曹妃甸 50,000 m³/d 海水淡化国家发改委重点示范项目，使用技术产品 R8040B1000S-7W 膜外壳 660 支，于 2011 年试运行；

3）技术产品为崂泗海水淡化工程 10,000m³/d、秀山海水淡化工程 3,000m³/d、瞿山海水淡化工程 2,500m³/d、长途海水淡化工程 5,000m³/d、岱山绿源海水淡化工程 2,500m³/d、黄岛电厂海水淡化工程一期 10,000m³/d、青岛海泊河海水淡化工程 4,800m³/d 提供配套膜外壳。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；哈尔滨乐普实业发展中心

联 系 人；王其远

地　　址；哈尔滨市南岗区长江路 209 号浦发大厦 2501 室

邮政编码；150090

电　　话；0451-82267301

E-mail：ropv005@ropv.com.cn

9.柱塞式海水高压泵和旋转式能量回收与增压集成装置

最早成功应用的能量回收装置是水力透平式，瑞士Calder.AG公司的Pelton Wheel透平机，PumpGinard公司的Francis透平机和丹麦Grundfos公司生产的BMET透平直驱泵，效率一般为50%-70%。经过改进，美国PEI公司生产了Hydraulic Turbocharger。20世纪90年代，一种新的能量回收技术开始了工业应用。其工作原理是“功交换”，通过界面或隔离物，直接把高压浓盐水的压力传递给进料海水，过程得到简化，只需要经过“水压能—水压能”一步能量转换，能量回收效率得到较大提高。由于其高的能量回收效率（>90%），目前在反渗透海水淡化能量回收的市场上占主导地位。主要产品有PX、DWEER、HTC、HPB、PES、Aclualyng、iSave、SWPE等。

国内柱塞式海水高压泵与旋转式能量回收与增压集成装置的研究开始于2008年，沃尔公司借鉴国外先进同类装置，反复琢磨，优化创新，掌握了装置的工作原理。此后公司在原有的高压泵生产工艺基础上，通过材料优选、设备改进、加工工艺优化等手段分别于2011年、2012年初研制成功第一代纯水润滑轴向柱塞高压泵及转子能量回收同轴增压装置，装置经过反复应用实验，结构改造和生产工艺改进与完善，最终形成系列化产品，并形成了产业化生产能力。

柱塞式海水高压泵的研制基于高压轴向油泵工作原理、参考国外相关先进技术资料创新设计而成。试制过程中，如何利用低粘度的海水减小缸套与活塞之间、滑靴与斜盘之间、配流盘与阀板之间的相对运动产生的摩擦阻力是主要技术攻关难题。对此，我们采用自润滑技术原理，并采用耐腐蚀的双相不锈钢2205、超级双相钢2507以及工程塑料PEEK的合理搭配，成功解决了这一难题。

旋转式能量回收与增压集成装置采用转子压力交换原理，在自主研发的自润滑轴向柱塞高压泵的基础上，利用配流盘与阀板之间的密封原理，并结合转子压力交换再集成容积式增压泵，形成了集成的转子压力交换能量回收装置。

为实现产品对机加工的超高精度要求，沃尔公司引进德玛吉车铣复合加工中心、台湾立式加工中心、数控车床、数控磨床等超精加工设备，对产品进行精加工。解决了产品的同轴度、平行度、位置度及高压密封等技术难题，实现了产品回收率高、效率高、输出压力稳定、流量波动小、使用寿命长、维护周期长等特点。

沃尔公司自主研发的柱塞式海水高压泵和旋转式能量回收与增压集成装置，从产品性能看，各项指标达到国际上同类产品的先进水平，已获得国家相关专利，并通过第三方认证；从产品价格看，产品可替代同类进口产品，且价格比国际市场上的同类产品低 30%左右，具有显著的价格优势，售后服务更加优质、方便、快捷；从节能效果看，公司生产的转子能量回收同轴增压装置的能量回收率达到 85%～95%，整机机械效率达到 90%～95%，具有较高的节能效果。

典型案例

【案例名称】

柱塞式海水高压泵和旋转式能量回收与增压集成装置

【项目概况】

柱塞式海水高压泵与旋转式能量回收与增压集成装置的研究开始于 2008 年，沃尔公司借鉴国外先进同类装置和公司原有的高压泵生产工艺技术，通过材料优选、设备改进、加工工艺优化等手段分别于 2011 年、2012 年初研制成功第一代纯水润滑轴向柱塞高压泵及转子能量回收同轴增压装置，并形成了产业化生产能力。

该装备开发得到了浙江省经济和信息化委员会新产品（新技术）（项目批准号：20140110；20140111）和海盐县中小企业技术创新资金项目：2013 年海盐县中小企　　业技术创新资金项目（项目批准号：盐科（2013）50 号）的资助。研制过程，形成了 “纯水润滑液压柱塞泵”（专利申请号：201120579430.5；201110459064.4）、“具有增压功能的旋转压力传递装置”（专利申请号：201210264032.3；201220368688.5）、“联轴高压柱塞泵”（专利申请号：201320830323.4；201310689733.6）、“具有冲洗止回阀的高压柱塞泵及水净化系统”（专利申请号：201320830309.4）、“高压柱塞泵用柱塞”（专利申请号：201320830285.2)等一批专利技术。经第三方认证，柱塞式海水淡化高压泵和旋转式能量回收与增压集成装置已获得浙江省省级工业新产品（新技术）鉴定（验收）证书。

【原理与结构】

1）柱塞式海水高压泵

纯水润滑液压柱塞泵如图 1.9.1 所示，该纯水润滑液压柱塞泵的泵水过程如下：驱动轴 2 带动缸体 20、止推盘 14、柱塞滑靴组件旋转，中心弹簧 11 通过缸

体 20、球绞 22 和回程盘 12 将作用力平均市价到每个滑靴 9 上，以保证滑靴 9 紧贴斜盘 8 的斜面滑动。当柱塞 10 向左运动到极限位置时，止推盘 14 项相应的开口被配流盘 15 全部遮盖，缸孔中形成密闭。随着驱动轴 2 的转动，滑靴 9 在斜盘的推动下带动柱塞 10 向右运动，使得缸孔密闭容积减小，水压上升，然后止推盘 14 上的开口与配流盘 15 的出水口连通，使得缸孔内的高压水被柱塞 10 不断排出，经过配流盘 15 的卡扣到达泵的出口，实现泵水过程。当然，随着驱动轴 2 的继续转动，柱塞 10 向再次左运动，使得缸孔内水压降低，然后止推盘 14 上开口则会与配流盘 15 上的进水口连通，实现吸水过程。随着上述驱动轴 2 的旋转，每个缸孔不断循环地吸水排水，从而泵出流量连续的高压水。但是，现有柱塞泵泵出的水量是固定的，不能适应多种泵水量需求。

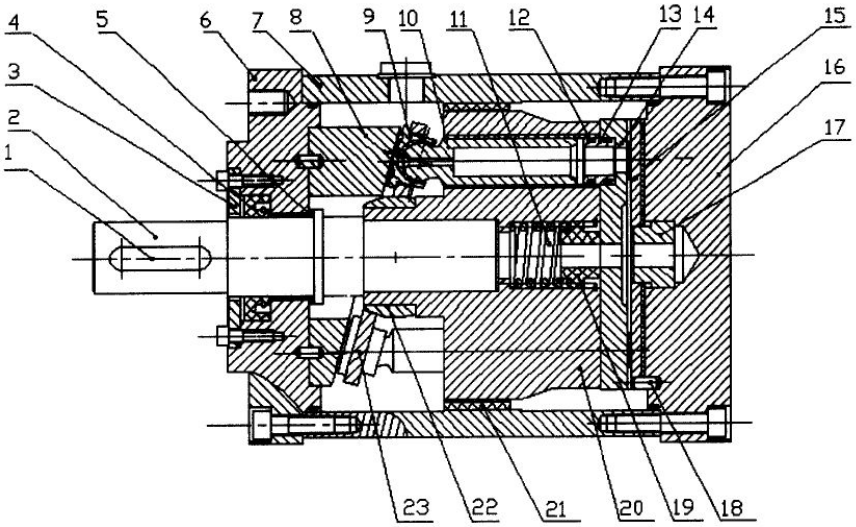


图 1.9.1 现有技术中柱塞泵的结构示意图

新开发的柱塞式海水高压泵采用的“纯水润滑高压柱塞泵”技术攻克了现有轴向柱塞泵无法在以水为介质运行的场所应用的问题，其技术创新主要体现在：

——通过在缸体上设置多个缸孔，多个柱塞滑靴在缸孔内依次做活塞运动，实现每个缸孔依次泵水，实现连续泵水。

——设计有止推盘和配流盘，使得可以通过水进行润滑也不会降低泵的寿命，不再需要其他润滑剂。

——纯水润滑泵中的所有摩擦副均采用耐摩擦的增强塑料，使得在纯水润滑

的环境下能够提高使用寿命。

——配流盘上设有密封圈，确保高压水不会沿配流盘径向泄露。

——该纯水润滑泵径向尺寸小、体积小、重量轻，在泵水过程中浪费的能量小，能效较高。

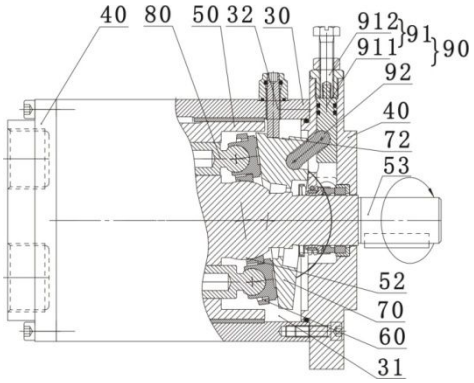


图 1.9.2 柱塞泵的局部剖视图

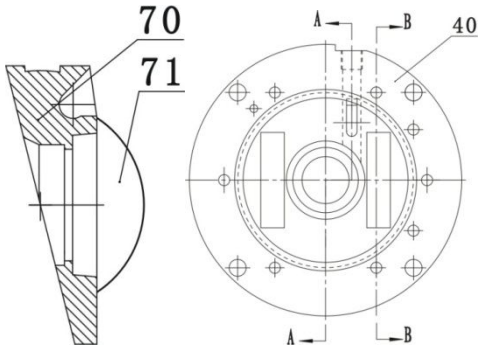


图 1.9.3 斜盘的剖视图及端盖的主视图

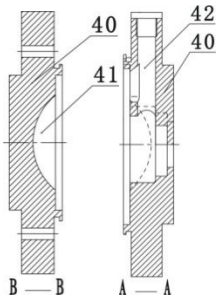


图 1.9.4 端盖的 B-B 向剖视图及 A-A 向剖视图

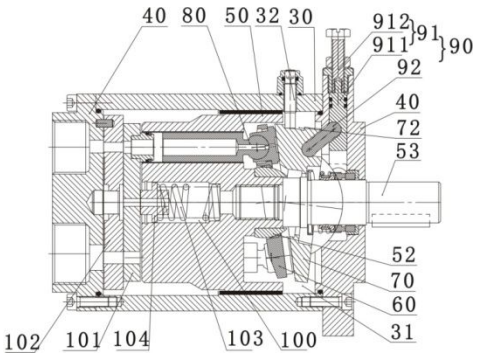


图 1.9.5 柱塞泵装配剖视图

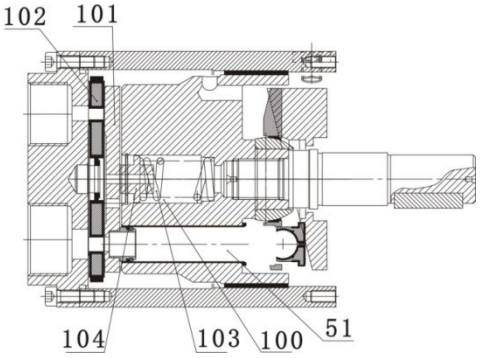


图 1.9.6 柱塞泵拆掉部分零件剖视图

2）旋转式能量回收与增压集成装置

采用的“具有增压功能的旋转压力传递装置”技术实现能量回收设备和增压设备的一体化，其技术创新主要体现在：

——将能量回收设备和增压设备一体设计，简化海水淡化系统，减小设备的占地面积，减少设备连接所需管道。

——采用转子进行能量回收，使得能量回收装置体积较小，能量利用效率较低。

——通过一个变频电机带动能量回收的转子和增压泵，方便了转速控制，减少了电机的使用。

——能量回收的转子中设计有进口斜坡和漩涡段，减弱水锤现象，并减少进料海水中废弃海水混入量。

——增压泵中在对称叶片之间设计有顶杆，使得叶片能够顺利地往复运动，

不会出现叶片卡死情况，提高增压泵运行稳定性和可靠性。

——在转子上设置多个通道，使得转子旋转过程能够通过多个通道依次进行能量回收，能够连续输出增压后的进料海水。

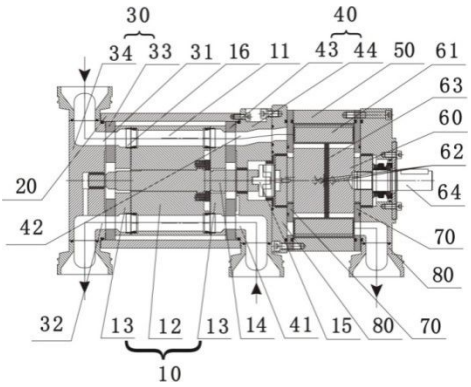


图 1.9.7 旋转压力传递装置剖视图

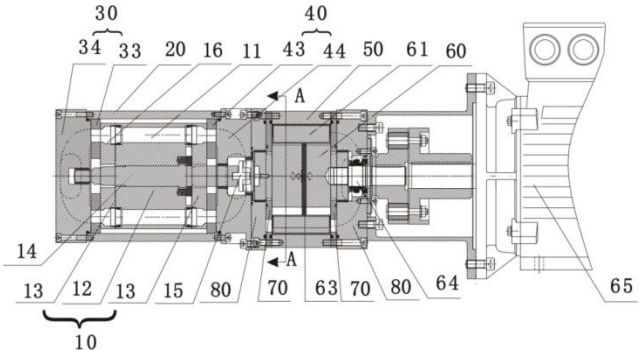


图 1.9.8 具有电机的旋转压力传递装置剖视图

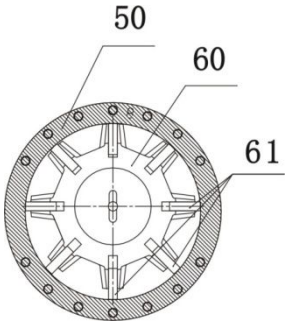


图 1.9.9 具有电机的旋转压力传递装置 A-A 向剖视图

【主要技术经济指标】

表1.9.1 是转子能量回收同轴增压装置同其它产品性能比较

表1.9.1 转子能量回收同轴增压装置同其它产品性能比较

比较项目	流体非直接接触式技术			流体直接接触式技术	
	Pelon 叶轮	逆转泵	水力透平	功交换器 WE	沃尔能量回收装置
能量回收率（%）	约 50	约 30	45～55	85～95	85～95
整机机械效率（%）	85～95	约 70	67～75	90～95	90～95
流量变化适应性	好	很差	较好	好	好
结构复杂程度	复杂	简单	较复杂	较复杂	较复杂
运行维护困难度	困难	容易	容易	比较困难	容易
装置成本	较低	低	较高	高	高
应用前景	较好	差	中	好	好

采用能量回收装置的节能效果：若以淡水产量 1000 m^3/d，WE 98%的转换效率，Turbo 60%（2500 m^3/d 流量下）的转换效率计算，在相同工况下，采用功交换式能量回收装置反渗透海水淡化系统的能耗远远低于无能量回收的反渗透海水淡化系统。

表 1.9.2 三种海水淡化方式的能耗比较

	无能量回收	水力透平	功交换器
SWRO 系统规模（m^3/d）	1000	1000	1000
RO 进水压力（MPa）	5.97	5.97	5.97
RO 回收率（%）	40	40	40
高压泵入口压力（MPa）	0.20	0.20	0.20
高压泵进水流量（m^3/d）	2500	2500	1000
高压泵效率（%）	75	75	75
系统电力负荷（kWh/m^3）	5.20	2.95	2.20

【应用情况】

该装备已经在天津市海跃水处理高科技有限公司、天津市蓝十字膜技术有限公司、杭州上拓环境科技有限公司等企业等多个企业使用，认为该技术具有良好的性能，节能效果显著。

根据对国内外海水淡化市场分析，确定产品生产规模为年产 2000 台套，2015 投入生产，前三年为市场开拓阶段，第四年达到年销售额 2000 台套，其中，国内合计 320 台套，国际合计 1680 台套。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；浙江沃尔液压科技有限公司

联系人:蒋祖光

地址；浙江省嘉兴市海盐县通元镇通元大道 266 号

邮政编码；314306

电话；0573-86660388

E-mail：jzg@woerchina.com

10.节段式海水淡化高压泵设计与开发

海水高压泵是反渗透海水淡化工程中的核心动力设备，是海水淡化工程的“心脏”，高效节能节段式海水高压泵是一种由轴向吸入、内置液体动压轴承、轴向力自动平衡装置等结构要素和高效水力模型构成的新型节段式海水离心泵。

国外的大型海水淡化高压泵产品主要有德国 KSB 公司、瑞士 Sulzer 公司和美国 Flowserve 公司等生产。德国 KSB 公司 Multitec-RO 系列和 HGM-RO 系列为轴向吸入节段式多级泵，其 HGM-RO 系列是最新的专门针对海水淡化系统研发，为全内置的滑动轴承结构，结构更简单，效率更高。HGM-RO 型泵共有 11 个规格，最大流量 1150 m^3/h，效率普遍比 Multitec-RO 泵高 2%～3%。Sulzer 公司 MC 型泵是传统的两端支撑节段式多级泵，为径向吸入结构，MC 系列泵相对效率较低、尺寸和重量较大，需采用双机械密封。Sulzer 改进型的新一代海水淡化 MBN 型高压泵取消了非驱动端的外置滚动轴承，内置在泵内一套滑动轴承，但仍然保持了径向吸入的传统结构，最大流量为 750m^3/h，效率略低于 Multitec-RO 泵。Sulzer 公司和美国 Flowserve 公司的中开式多级泵产品，结构复杂、重量重、泵体难加工、需采用双机械密封，产品成本非常昂贵，中开式多级泵仅在超大规模海水淡化流程中有优势。从国外现有技术现状来看，由于节段式多级泵结构相对于中开泵价格便宜，预期在单机规模 2 万 m^3/d 以内具有非常广阔的市场。

“十一五”期间，我国的海水淡化高压泵技术取得了突破性进展，在科技支撑计划和相关省部级科技计划的支持下，开发了对应于 5000m^3/d 反渗透海水淡化系统的海水高压泵（见图 1），发明了新型海水淡化高压泵结构，研制了高效水力模型，开发形成了具有自主知识产权的产品，实现了在万吨级海水淡化工程中成功应用。海水淡化高压泵完全满足大型海水淡化工艺要求，效率指标达到 83.07%，指标优于国外同规格海水高压泵最好水平，运行费用比进口高压泵低 10%以上，减少设备投资 30%以上。

图 1.10.1　节段式海水淡化高压泵机组

典型案例

【案例名称】

5000 m^3/d 海水淡化系统配套高压泵

【项目概况】

海水高压泵设计与开发是国家科技支撑计划课题“万吨级膜法海水淡化关键技术与装备研究”的组成部分，也是国内第一套万吨级反渗透海水淡化示范工程的重要国产化设备。2006 年启动节段式海水淡化高压泵研制工作，2009 年 3 月年完成样机的研制工作，2009 年 6 月完成样机的试验室型式试验，2009 年 11 月样机在六横万吨级海水淡化示范工程中进行工业性运转考核，一直应用至今，样机效率指标领先国际先进水平。该项目荣获 2013 年度中国机械工业科学技术二等奖、江苏省 2013 年度科学技术二等奖。

【原理与结构】

1）技术方案

创新的轴向吸入结构和液体动压轴承，使泵的结构更简单可靠；双盘双毂结构轴向力自动平衡装置，在提高泵容积效率的同时,更加安全可靠；高效水力模型的数值模拟和试验研究，保证了泵具有更高的效率和更宽的高效率范围，大幅度降低了海水淡化系统的能耗，高压泵转子系统安全性分析新技术，保证了高压

泵转子动力系统稳定运行。

2)总体结构

总体结构方案就是采用经过改进后的新型的轴向吸入节段式多级泵的结构型式，采用液体润滑轴承的最为简单结构。泵的结构如图 1.10.2 所示。

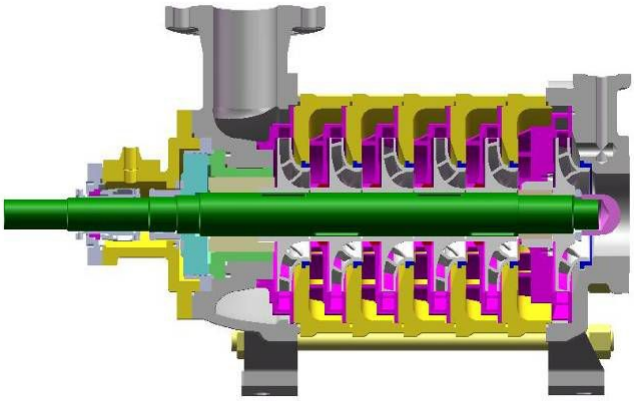


图 1.10.2　轴向吸入式海水淡化高压泵结构

3）高效水力模型的研究

采用计算流体动力学三元流场诊断，通过叶轮、导叶几何参数组合的多方案优化比选，实现了泵性能优化设计。基于计算流体力学 CFD 方法，针对泵单级水力模型泵 进行全性能预测。多种水力模型优选，少数模型正交试验研究优选实型泵模型。高效水力模型研制的技术路线见图 1.10.3、图 1.10.4。

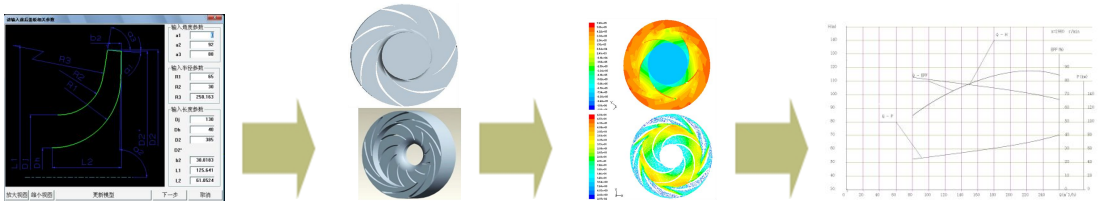


图 1.10.3 CAD-CFD 海水淡化高压泵优化平台

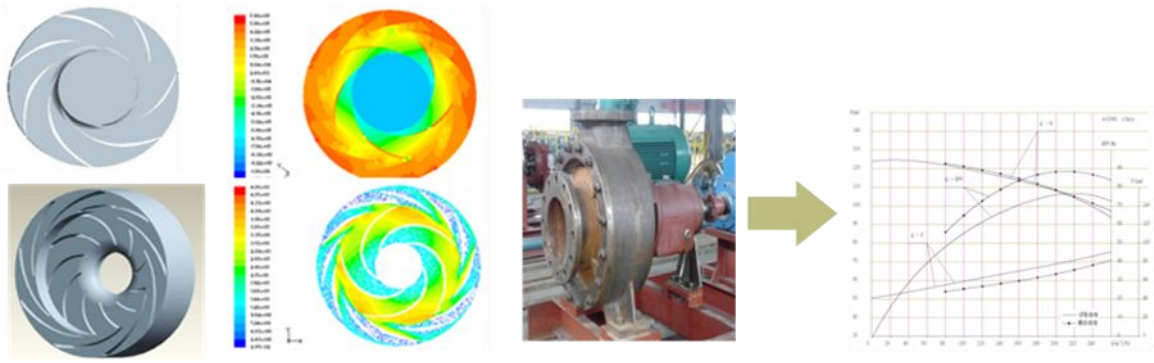


图 1.10.4 海水淡化高压泵水力模型优选试验研究

4）高压泵转子系统安全性分析

基于试验和 CFD 找出叶轮前后压力分布规律，建立了轴向力计算方法。在准确计算轴向力方法基础上，开发了轴向力平衡计算程序。研制成功了新型轴向力动态平衡装置。实现轴向力动态动态平衡，具有结构紧凑、灵敏度高、容积损失小的特点。高压泵采用平衡鼓和平衡盘联合机构来平衡轴向力，采用水润滑轴承兼作平衡鼓。此结构不仅减少了泄漏量，而且拥有水润滑轴承的所有优点，比滚动轴承的摩擦力小，平衡鼓的间隙选取要以水润滑轴承的设计为依据。平衡装置结构见图 1.10.5。高压泵轴向力及轴向力平衡计算表明，随着灵敏度提高（值变小），泄漏量也随之降低。灵敏度 k=0.26，平衡装置泄漏量小于 6 m³/h，平衡装置泄漏损失不到 3%。

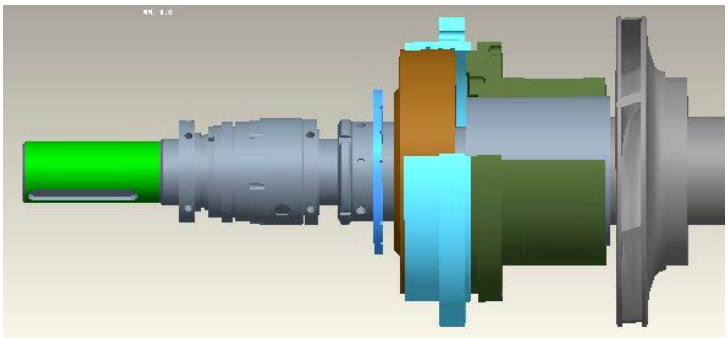


图 1.10.5 轴向力自动平衡装置

5）优化设计了水润滑轴承

提出了水润滑轴承和转子系统的耦合计算方法，研究不同转速、不同压力的变工况时、转子不平衡力作用下的转子轴心轨迹变化规律，开发水润滑轴承计算

程序。针对水润滑轴承-转子-口环动力系统，开发高压多级泵转子系统稳定性分析技术。海水淡化高压泵转子系统见图 1.10.6。

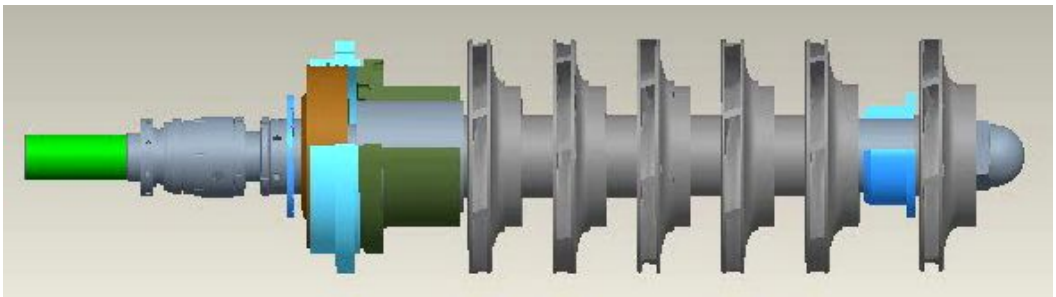


图 1.10.6 海水淡化高压泵转子系统图

【主要技术经济指标】

1）主要技术指标

流量：220 m^3/h　　扬程：620 m　　效率：83.07 %

转速：2975 r/min　　配带电机功率：545 kW

2）运行结果

海水淡化高压泵效率指标优于国外同类产品，现场运行对比参数如表 1.10.1。

表 1.10.1　国内外高压泵现场运行参数对比

	I（A）	Q（m^3/h）	P（MPa）
本课题高压泵	332	179	4.3
KSB高压泵	352	175	4.2

【应用情况】

首台对应于 5000m^3/d 反渗透海水淡化系统的海水高压泵在六横一期示范工程，自 2009 年 11 月投产运行至今，运行稳定，能耗低于进口高压泵，效率指标优于国外同规格海水过压泵的最好水平，产品已生产销售，成果完成商业化应用。

另外，单机 1.0 万吨、单机 1.5 万吨的海水淡化高压泵的研制技术开发目前已完成，正在样机试制阶段，系列海水淡化高压泵和增压泵产品正在开发并实施成果转化和产业化。

本项目首次实现了国产海水淡化高压泵在万吨级示范工程中应用，使系统吨水电耗降到 2.6kWh/m^3，创国内海水淡化吨水能耗新低。海水高压泵的运行费用

比进口高压泵低 10%以上，减少设备投资 30%以上，国产设备的突破，也促使进口设备大幅降价，解决了制约海水淡化产业发展的瓶颈问题，提高了技术创新能力，技术、经济、环境效益显著。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；江苏大学流体机械工程技术研究中心

联系人；叶晓琰

地址；江苏省镇江市学府路 301 号

邮政编码；212013

电话；0511-88780280，13956025610

E-mail：yexiaoyan@ujs.edu.cn

11.中开式海水淡化高压泵

目前世界上最先进和应用最广泛的海水淡化技术是反渗透法（SWRO），反渗透系统包括三大关键部件：膜组件、高压泵和能量回收装置。高压泵是反渗透系统的心脏，它的作用是提供膜系统所需的高压。从国际上近年来大型反渗透海水淡化工程中的反渗透单机、高压泵、能量回收装置的配置情况来看：占 53%的高压泵单机规模在 1 万～2 万 m^3/d 之间。

目前国外在该流量段的高压泵主要采用两种结构形式：节段式多级结构和水平中开式多级结构。节段式多级结构的特点是体积小、重量轻，造价便宜，但效率不高，维修相对麻烦。而水平中开式多级结构的特点是质量可靠、维修方便、效率较高，但缺点是整体体积大，内部流道结构复杂，铸造困难，价格较高。在反渗透海水淡化装置中，电费占造水成本的 1/2～2/3，设备投资占造水成本的 1/4 左右。反渗透海水淡化系统的能耗指标主要取决于高压泵、提升泵和能量回收装置，而高压泵是主要耗能设备，其电耗约占系统运行费用的 35％，是影响产水成本的主要因素之一。因此，在保证高可靠性的前提下，高效率应该作为选择不同规模下反渗透海水淡化用高压泵的主要指标。所以目前国际上单机流量大于 1 万 m^3/d 的反渗透海水淡化系统中，高压泵大多数是采用水平中开式多级离心泵，流量越大，泵的效率越高，最高效率可达 80％～85％。

另外，由于我国没有专用于反渗透海水淡化的高压泵，因此市场被国外大公司所垄断，售价高昂，使反渗透海水淡化装置的造价难于下降。进口高压泵一旦发生故障，维修时间长，往往造成海水淡化装置停产，这会对装置所在地的生活和生产造成不利影响，在水资源紧缺时期甚至会影响社会稳定，因此高压泵被国外垄断，极不利于我国的供水安全。利用国产高压泵替代进口是我国沿海地区社会与经济的发展的迫切要求。

该设备主要特点：

（1） 通常适用流量大于 $400m^3/h$ 的场合。

（2） 泵的最高效率可达 80%～85%，流量可达 $850m^3/h$。

（3） 叶轮背靠背安装，水力自动平衡，没有轴向推力。

（4） 采用双蜗壳结构，径向力自动平衡，使叶轮和轴不受径向力影响。

（5） 维护保养非常方便，检修时不需要拆动进出管路。

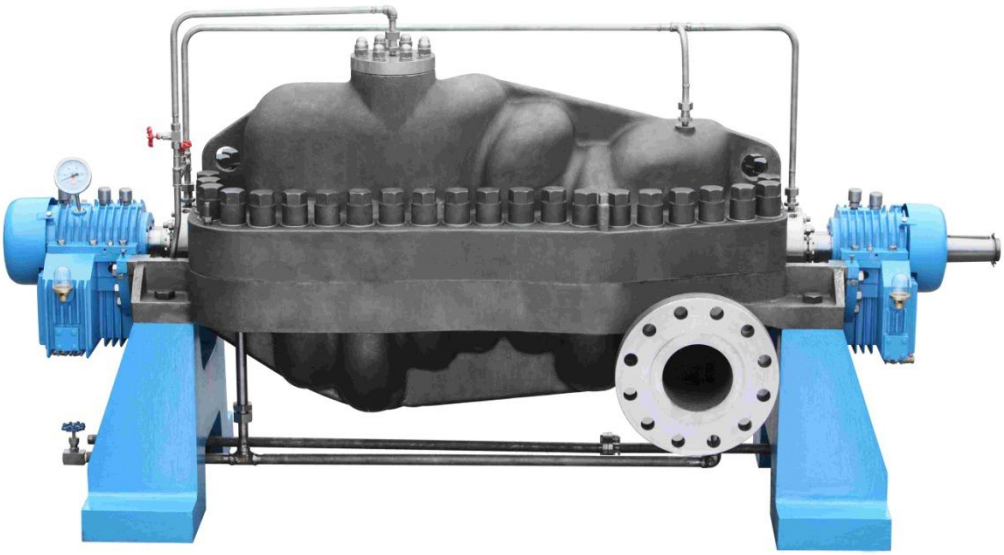


图 1.11.1 高压泵外形照片

典型案例

【案例名称】

1.25 万 m^3/d 海水淡化系统配套高压泵

【项目概况】

该设备属于国家科技支撑计划项目“日产 10 万吨级膜法海水淡化国产化关键技术开发与示范”中的课题三“海水淡化高压泵的开发”所产生的成果。2012 年完成首台样机的试制工作，2013 年应用于六横 1.25 万吨级反渗透海水淡化示范工程，目前已在试运行。

【原理与结构】

根据国家标准 GB/T13007《离心泵 效率》指标，综合水力效率、转子系统临界转速、制造成本、制造难度等几个方面，该设备按照兼顾效率与制造成本两个方面，确定泵的叶轮总级数为 5 级。

首级叶轮为双吸结构，其优点是可以提高泵的气蚀性能、水力平衡轴向力。后面 4 级叶轮采用单吸式，并分成 2 组背靠背安装，使轴向力自身达到水力平衡。具体见下图：

图 1.11.2 叶轮在轴上布置示意图

由于万吨级高压泵的流量较大，流道比较宽，故具备把每级涡壳设计成圆周方向 180 度对称的双涡壳水力结构的条件，以消除叶轮所产生的绝大部分径向力，剩余径向力则由布置在两侧的滑动轴承来承受。

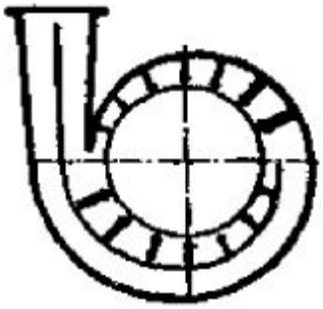


图 1.11.3 双蜗壳结构原理示意图

关键技术或设计创新特色

（1）水平中开式多级离心泵的总级数达到5级

从理论上来说，扬程一定，流量越大比转速就越大，泵的效率就越高。所以相同的性能参数，多级泵的效率比单级泵的效率要高。但级数越高制造成本就高，更主要的是制造难度越来越高。尤其是对于水平中开式多级离心泵，更是如此。目前国内的水平中开式多级泵大多不超过3级。

（2）水平中开多级泵中的首级叶轮采用双吸式结构

目的是改善泵的吸入性能，降低汽蚀余量，平衡轴向力，而后面几级采用单吸叶轮，背靠背安装。目的是平衡巨大的轴向力。

（3）主轴两端的支撑轴承采用油室润滑和冷却

泵的两端支撑轴承各设有一个专用的油室，优点是改善轴承的润滑条件和冷却条件，从而大大提高两端支撑轴承的使用寿命，提高高压泵的整机可靠性。

（4）主轴支撑轴承外侧采用风扇冷却

在两端支撑轴承的外侧各设计一个风扇，风扇安装在主轴上，随主轴一起旋转，就像电机的风叶，实践证明对轴承的冷却效果非常好。

（5）采用便拆式机械密封（集装式机械密封）

采用集装式机械密封的突出优点是维修、更换非常方便，可大大缩短维修周期。而国内目前的水平中开泵还是采用填料式密封，不但泄漏难以避免，更主要的是功率损耗较大。虽也有采用机械密封形式，但都是散装式结构，安装和更换非常不方便。

（6）蜗壳采用圆周方向对称的双流道结构

绝大部分离心泵都是采用单蜗壳，这种结构如在非设计工况使用时就会产生一定的径向力，偏离设计点越多，径向力越大，对水泵整机运转的可靠性就越不利。而本设备采用双蜗壳结构，在圆周方向180度对称，产生的径向力相互抵消，可大大降低泵的振动，延长泵的使用寿命。

【主要技术经济指标】

单机流量：Q=540m³/h，扬程：H=600m，泵效率：80%。

【应用情况】

已生产 3 台高压泵，其中一台已安装在六横 1.25 万吨级反渗透海水淡化示范工程，并应用该技术开发了日产淡水 1 万吨、1.5 万吨海水淡化系统高压泵。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；南方泵业股份有限公司

联系人；赵才甫

地址；浙江省杭州市余杭区仁和镇

邮政编码；311107

电话；0571-86301515

E-mail：tech@nanfang-pump.com

12.阀控式能量回收技术与装备

海水淡化已成为解决全球水资源短缺的重要战略手段之一，有着广阔的发展前景。在能源价格不断攀升的形势下，反渗透海水淡化凭借相对较低的成本、设备简单、易于维护和设备模块化的优点迅速占领市场，逐步取代蒸馏法成为应用最广泛的方法。

反渗透海水淡化属于压力驱动的膜分离过程，根据盐浓度的不同，原料海水进入反渗透膜组件之前由高压泵将压力提升到 5.5～8.0MPa 之间。其中约 45%的原料海水被淡化成产品水，剩余约 55%被浓缩为浓海水。浓缩海水中含有与反渗透给水相同的压力品位，直接排放将造成巨大的能量浪费。因此通过能量回收装置高效回收利用高压浓海水中的余压能量，对大幅降低反渗透海水淡化产水成本具有重要意义。

早在上世纪 80 年代，国外就开始采用水力涡轮式能量回收装置回收浓水的能量，浓海水余压能经过“压力能—机械能(轴功)—压力能”两步转化过程，能量回收效率约 30%～75%，使反渗透海水淡化制水能耗由原来的 10～12kWh/m³ 下降到 6～8kWh/m³。到 90 年代末，反渗透海水淡化膜制备技术不断提高，性能不断改善，基于功交换原理的能量回收装置也开始进入了商业化应用，该能量回收装置只需“压力能—压力能”一步转化过程，能量回收效率高达 90%以上，制水能耗下降到 4～5kWh/m³。

本海水淡化能量回收装置采用等压正位移原理，通过直接接触的压力交换方式，高效回收利用反渗透海水淡化系统排出的高压浓海水的余压能，并将其转化为反渗透系统进料海水的压力能，实现系统浓海水余压能的高效直接利用，有利于大幅降低高压泵的输出流量及系统制水的电能消耗。该装置主要由切换器、压力交换缸和止回阀组三部分组成，通过切换器周期性往复运动，实现高压浓海水与低压原海水间压力交换过程的连续进行。具有往复行程短、驱动力小、运行效率高等优点。

经过国家 “十五”、“十一五”科技支撑计划项目研究，形成了具有我国自主知识产权的阀控式能量回收技术与装备。装置单机处理负荷最高可达 2000m³/d（以系统产水量计），装置最高工作压力 6.9MPa，能量回收效率 95～98%。该

技术装置2006年在天津塘沽1000 m³/d反渗透海水淡化示范工程首次得到示范应用（见图1.12.1）。

图1.12.1 天津塘沽1000 m³/d反渗透海水淡化能量回收装置示范现场

典型案例一

【案例名称】

能量回收装置在纳滤海水淡化工程的应用

【项目概况】

该项目得到了国家科技支撑计划（2002BA313B10，2006BAB03A021）和天津市科技攻关重大项目（043185211-4）的资助。

2012年，中国海洋大学在青岛黄岛电厂建设了一套100 m³/d纳滤海水软化系统，采用胶州湾地区海水为原海水。该系统装置需要回收利用的高压浓海水的最高压力为3.8MPa，流量为3.5 m³/h。

该能量回收装置于2012年6月完成现场安装和调试运行，至今已连续稳定运行2年时间。图1.12.2为能量回收装置现场应用图片。

图 1.12.2　能量回收装置在纳滤海水淡化工程的应用（青岛）

【工艺与装备】

海水纳滤软化系统排放的高压浓海水全部进入海水淡化能量回收装置进行压力交换和回收利用，经能量回收装置加压后的增压海水需再经系统提升泵进一步补充少量压头，使其达到纳滤膜组器的操作压力水平，并与高压泵输出的高压海水汇合后共同作为纳滤膜组件的系统进料。能量回收装置与海水淡化纳滤软化系统间通过 Profibus 通讯协议方式实现一体化运行控制。

【应用情况】

2013 年和 2014 年该技术装置在天津锐马兰盾科技有限公司 NF-ERD 海水淡化工程一期和二期中分别获得了工程推广应用。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：天津大学海水淡化与膜技术研究中心；

联 系 人：王　越

地　　址：天津市南开区卫津路 92 号天津大学化工所

邮政编码：300072

电　　话：022-27406889

E-mail：tdwy75@tju.edu.cn

典型案例二

【案例名称】

千吨级插装阀控式能量回收装备

【装备概况】

为提升我国海水淡化技术核心竞争力，2008 年项目组在浙江省重大科技计划项目“千吨级反渗透海水淡化能量回收装置开发（2008C13045）”的支持下，深入研究大中型能量回收装置能量传递机理，提出等压交换式能量回收工艺原理，自主开发出四通旋转阀、电液换向阀、水压驱动阀、压力交换管以及换向控制系统等关键部件与技术，研制出千吨级插装阀控式能量回收装置。经测试，装置负载（浓海水）处理量为 65m³/h 时，能量回收效率达 97.7%，达国际先进水平。图 1.12.3 为 ER-DY65 型插装阀控式能量回收装置。

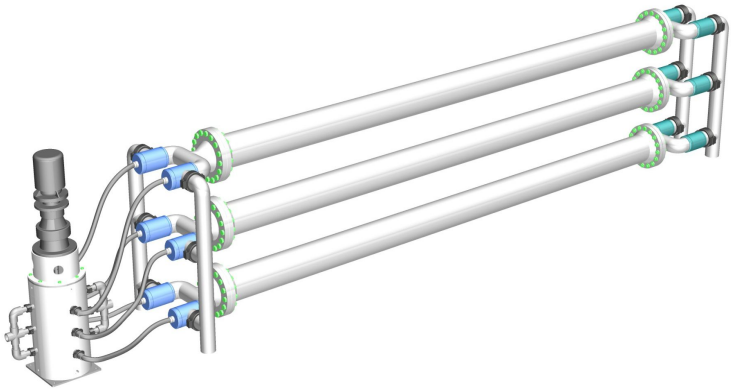


图 1.12.3　插装阀控式能量回收装置（ER-DY65）

【原理与结构】

ER-DY 是一款用于大中型规模反渗透海水淡化系统的高效能量回收装置。ER-DY 通常与反渗透系统高压泵并联使用，利用浓海水余压能直接增压部分进料海水，降低了通过高压泵增压的进料海水的流量，从而减小高压泵的规模和能耗。

ER-DY65 由三个压力交换单元组成，并可以随系统处理量增大而增加压力交换单元。每个压力交换单元由 1 只电液换向阀、2 只水压驱动执行阀、2 只配流单向阀、1 根压力交换管构成。电液换向阀独立控制对应 2 只水压驱动执行阀执行高低压浓水换向。ER-DY65 采用模块化设计，换向瞬间压力流量波动小，结构简单，易于实现标准化。

插装阀控式能量回收装置 ER-DY65 通过控制电液换向阀动作，利用压力海水

作为启闭水压驱动阀、单向阀的动力，使低压海水进入低压缸，同时排出低压浓水；高压浓水进入高压缸，同时推动高压海水进入反渗透装置，即让高压浓水压力直接传递给低压海水，完成海水、浓水的输送过程，使高压的反渗透浓水的余压能量予以回收。

图 1.12.4 为插装阀控式能量回收装置工作原理示意图。

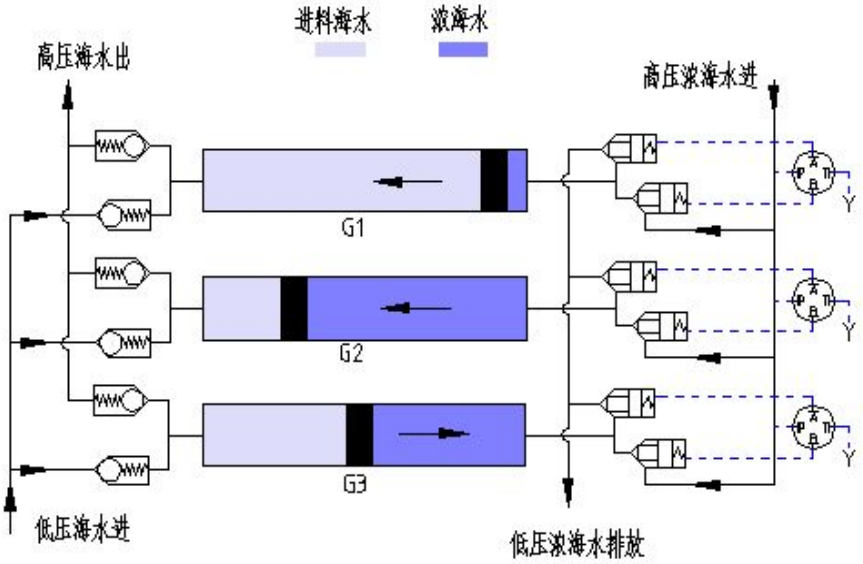


图 1.12.4　插装阀控式能量回收装置（ER-DY65）工作原理

关键技术

（1）项目首次提出插装阀控式能量回收装置工艺原理，采用插装式结构及多根压力交换管耦合技术，利用高压浓海水直接推动压力交换管中的活塞来增压进料海水，实现海水淡化浓海水余压能高效回收再利用。

（2）项目针对能量回收装置过流介质浓海水的特性及能量回收过程工况特点，对高低压浓海水换向控制技术、摩擦副材料配对优选、自润滑及密封技术等关键技术进行研究，自主研制出与能量回收装置工况匹配的水压单向阀、水压插装阀、电液换向阀、压力交换管等关键水压部件及技术，保证了大中规模能量回收装置得以实现。

【主要技术经济指标】

经浙江省计量科学研究院检测（报告编号：LL-2010040396），研制的插装阀控式能量回收装置（ER-DY65）性能测试结果如下：

1）单套能量回收装置负载处理量：65m³/h；

2）对应有效能量转换效率：97.7%；

3）噪音：78dB。

能量回收装置的应用可以大幅降低海水淡化系统制水能耗，经济效益十分明显。以应用一套ER-DY65能量回收装置(与日产淡水1000m³/d海水淡化工程配套)为例：

吨水可节约用电：3.5kW•h/m³；电价：0.8元/kW.h；开工率：90%计

则每年节电总费用为：

ξ=1000×365×0.8×3.5×0.9/10000=91.98（万元/年）

目前，与1000m³/d海水淡化工程配套的美国产PX型能量回收装置售价约50万人民币，预计6个月即可回收设备投资。同时与不用能量回收装置的系统相比，可以减少高压泵规模的60%，大大降低高压泵的投资，基本不会增加设备总投资。

【应用情况】

该能量回收装置已在舟山海岛中小型海水淡化工程中得到推广应用。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人：张希建

地址：杭州市西湖区文一西路50号

邮政编码：310012

电话：0571-88935372

E-mail：13958008566@126.com

13. 转子式能量回收技术与装备

能量回收技术是反渗透海水淡化系统（SWRO）中的关键技术之一，其最大的贡献是将被反渗透膜截留的60%左右的高压浓盐水的能量回收利用，直接给原海水增压，从而使反渗透海水淡化能耗降低了约三分之二（能耗由 8 kWh/m³ 降到 3.5kWh/m³ 左右），对反渗透海水淡化系统的大规模工业应用具有不可替代的重要价值。而且，海水淡化系统的整体流程工艺也要因能量回收原理、技术与结构的不同而随之调整，能量回收技术与装置无论在构成作用抑或建设成本中都已成为反渗透海水淡化系统中的核心技术。液体压力能量回收技术自 20 世纪 80 年代起在反渗透淡化装置上开始引入应用研究，经过近 40 年的不断发展，液体压力能回收技术和装置已经成为一个完整而独立的技术体系及产业，是反渗透淡化系统内必不可少的组成部分。液体能量回收利用技术按照是否需要机械动力传递而分为两大类:第一类采用离心泵原理，利用机械动力转换在高低压液体间实现能量传递；第二类应用正位移原理，高低压液体直接接触进行能量交换。在每一大类中，根据具体实现方式的不同，又可以分成几种不同的形式。机械动力传递型主要分为佩尔顿泵(Pelton Wheel)和水力透平(Turbo Charger)两种类型；正位移式功交换器型按照核心部件的不同，可以分为活塞式(也称固定式)功交换器和旋转式(也称转子式)压力能交换器。其中，美国 ERI 公司研发的 PX 系列旋转式压力交换器因其巧妙利用流体驱动和流体直接接触的压力传递方式，具有能量回收效率高、装置体积小、运行安全可靠和无需外置控制或驱动元件等特点，逐渐成为反渗透海水淡化能量回收的主流技术，现在我国投产运营的成规模海水淡化系统中主要都采用该结构的能量回收装置。

我国反渗透海水淡化能量回收技术方面的研究从上世纪 90 年代末开始，主要集中于双液压缸功交换式能量回收器，天津大学对“反渗透淡化系统阀控余压回收装置”进行了实验研究，该装置由两个水平放置的水压缸以及水压缸海水端和盐水端的三通电磁阀构成，研究成果已经成功应用于小型海水淡化系统中。对于旋转式压力能交换器，国内有几家单位进行探索性研究，主要包括杭州水处理技术研究开发中心有限公司、中科院宁波材料所、浙江大学和南方泵业股份有限公司等，目前该类技术的研究一方面在陶瓷转子转速匹配控制技术和高精度加工装配技术方面确实与美国产品存在差距，另一方面很难突破美国技术形成的专利

壁垒。浙江大学与南方泵业股份有限公司发挥各自优势，经过两年多的研究，已经在旋转式压力能交换器能量回收转子驱动转速与掺混匹配控制设计技术、转子端盖间微隙润滑与密封集成设计技术、端盖三维流道的动力学设计技术、能量回收转子压力交换通道制备成型技术和转子整体高精度加工控制技术等关键技术环节实现了突破，研制的模型能量回收装置在自制试验台测试表明其密封保压能力、能量回收效率和掺混控制水平已逼近美国 ERI 公司同类产品水平。而且在端盖流道结构和转子通道形状设计方面有创新，具有自己的设计特色和结构特点。

模型试验的主要性能参数为，回收处理流量为 10 m^3/h，最高回收压力为 5.9MPa，平均泄漏率为 3%～4.5%，能量回收效率为 94%，掺混率为 5%。

典型案例

目前，旋转式压力能交换器的研发尚处于中试阶段，10 m^3/h 的小型能量回收装置将在浙江大学摘箬山科技示范岛进行应用示范，50 m^3/h 的能量回收装置目前已经完成了零部件的加工，将进行装配调试和整机性能试验阶段，试验测试完成后，将在六横万吨级反渗透海水淡化示范工程中进行应用放大试验。该技术现阶段尚没有工程应用案例。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；浙江大学海洋学院 南方泵业股份有限公司

联系人；焦磊

地址；杭州西湖区余杭塘路 866 号

邮政编码；310058

电话；0571-88141027

E-mail：jiaolei@zju.edu.cn

14.差压交换式能量回收技术与装备

能量回收装置的作用就是把反渗透系统高压浓海水的压力能量回收再利用，从而降低反渗透海水淡化的制水能耗和制水成本。能量回收效率是评价能量回收装置压力能回收效果和经济性的最关键指标之一。

按照工作原理，能量回收装置主要分为水力涡轮式和功交换式两大类。在水力涡轮式能量回收装置中，能量的转换过程为“压力能-机械能(轴功)-压力能”，其能量回收效率约35%～70%。功交换式能量回收装置，只需经过“压力能-压力能”一步转化过程，其能量回收效率高达90%以上，已成为国内外研究和推广的重点。

国外功交换式能量回收产品主要有美国ERI公司的PX (Pressure Exchanger)压力交换器、瑞士CALDER AG公司的DWEER（Work Exchange Energy Recovery）功能交换器。

项目团队开发的差压交换式能量回收装置(ER-CY系列)能量回收效率达96%以上，其技术水平处于国内领先、国际先进。

典型案例一

【案例名称】

ER-CY2.8差压交换式能量回收装备

【装备概况】

该能量回收装置的研究与开发得到了国家海洋局科技计划项目“能量回收器的开发”、国家海洋公益性行业科研专项“光伏太阳能反渗透海水淡化装置研究”（200805035）的资助。

洞头县25m³/d反渗透海水淡化示范工程位于浙江省海洋水产养殖研究所洞头基地，由杭州水处理中心于2007年5月建成并正式投入使用。工程首次采用了由杭州水处理技术研究开发中心自主研制的国产化能量回收装置（ER-CY2.8）。由于能量回收装置（ER-CY2.8）采用差动交换原理，可与国产中压泵串联使用，为此工程不用配置昂贵的海水高压泵。

其工程工艺原理如图1.14.1所示，通过海水取水泵将海水（浑浊度约80～150NTU）泵入水力循环澄清池，经混凝沉淀处理后出水浑浊度下降到5～10NTU，

再经海水增压泵增压（约0.32MPa）后泵入多介质过滤器进一步过滤处理，使其浑浊度降低到1NTU以下，污染指数≤5。经过预处理的合格海水通过保安滤器后由海水中压泵进一步升压到1.5～1.8MPa左右，再经能量回收装置增压至海水淡化额定操作压力（约4.5～5.5MPa）后进入反渗透膜组器，透过反渗透膜的淡化水（约29%）收集后从膜堆引出，再经pH调质处理后供给用户使用；其余的反渗透高压浓海水（约71%）进入能量回收装置（ER-CY2.8），余压能交换后排出系统。

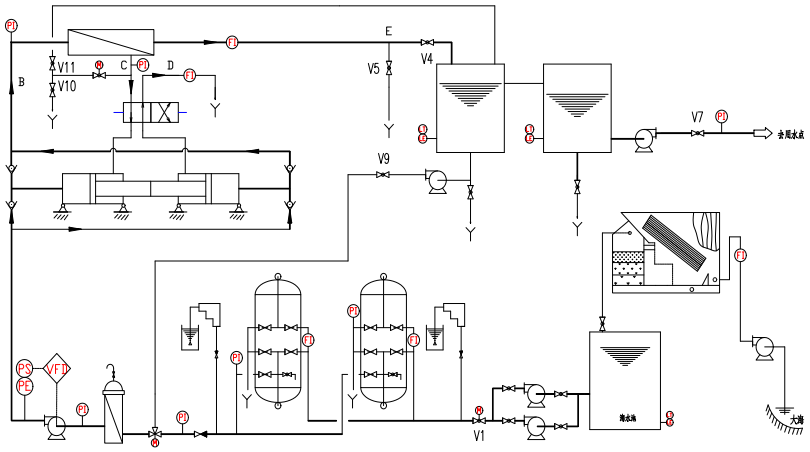


图 1.14.1 示范工程工艺原理

经过六年的连续运行表明:能量回收装置运行稳定，能量回收效率高，海水淡化制水能耗显著降低。该能量回收装置仅为国外同等产品价格的 60%左右，海水淡化装备总造价同比下降近 8%，与不用能量回收装置的同等设备相比制水能耗约下降 5kWh/m³。

图 1.14.2 25m³/d 海岛节能型海水淡化装置

海水经处理后，产出的淡水能完全达到生活饮用水标准，解决了洞头基地的

生活和科研生产用水。对于历来淡水缺乏的洞头县，利用现代科学技术进行海水淡化，为洞头县通过开发海洋资源为居民补充饮用水、解决海岛缺水问题做出了良好的示范作用，引起了当地媒体和政府的关注，产生了良好的经济效益和社会效益。

【原理与结构】

ER-CY 是一款用于中小规模反渗透海水淡化系统的高效能量回收装置。ER-CY 通常与反渗透系统高压泵串联使用，与无能量回收装置的反渗透系统相比，对高压泵出口压力要求降低，从而降低反渗透系统制水能耗。

图 1.14.3　ER-CY2.8 差压交换式能量回收装备

ER-CY 系列能量回收装置采用差压缸原理，利用高压浓海水余压能来增压进料海水，其结构特点是：两只差压缸相对放置，活塞杆相对接触，四个止回阀分成两组连接，分别置于差压缸的外面，两只差压缸之间由一个四通功能阀连接，可以自动切换，实现连续运行。特色与创新性如下，

1）由于差压交换式能量回收装置的二位五通换向阀阀杆是靠自由活塞在水压力作用推动的，因此推力可以很大，换向比较平稳快速，而且不需要复杂的控制系统来主动控制阀门动作，并且可以最大限度地利用压力交换管的容积率，适合用于各种小型的反渗透海水淡化系统。

2）由于压力交换管被输送液侧按规律设置了 4 只水压单向阀，可以根据压力交换管内压力情况自动启闭，不但可以简化装置控制系统，而且不容易出现故障。

3）由于水压自动换位能量回收装置的二位五通换向阀是行程阀，自由活

塞运动极限位置时推动二位五通换向阀换位，可以使能量回收装置自动转换工作状态，对系统流量和压力的适应性好，多套并联使用方便。

【主要技术经济指标】

1）单套能量回收装置负载处理量：2.8m³/h,

2）对应有效能量转换效率：96%，

3）噪音：75dB。

【效益分析】

1）能量回收装置的应用可以大幅降低海水淡化系统制水能耗，经济效益十分明显。以应用一套 ER-CY2.8 能量回收装置(与日产淡水 25m³/d 海水淡化工程配套)为例：

以吨水可节约用电：3.5kW•h/m³；电价：0.8 元/kW.h；开工率：90%计，

则每年节电总费用为：

ξ=25×365×0.8×3.5×0.9/10000=2.3（万元/年）

预计 2.5 年即可回收设备投资。

2）由于能量回收装置（ER-CY2.8）采用差动交换原理，可与国产中压泵串联使用，为此工程不用配置昂贵的海水高压泵，基本不会增加海水淡化设备总投资。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人：张希建

地址：杭州市西湖区文一西路 50 号

邮政编码：310012

电话：0571-88935372

E-mail：13958008566@126.com

典型案例二

【案例名称】

灵山岛 300m³/d 反渗透海水淡化工程

【装备概况】

该工程是海洋公益性行业科研专项经费项目“海岛适用的系列海水淡化技术装备及应用研究”的示范工程。2011 年 9 月完成项目初步设计并开始现场勘查土建工作，2012 年 2 月开始设备安装工作，2012 年 11 月完成项目建设，通过验收。该工程国产化程度高，是国产化设备在海岛地区成功应用的典范。工程采用了本技术成果研发的差动式能量回收装置。

【工艺与装备】

灵山岛反渗透海水淡化工程规模为 300 m³/d，采用超滤+反渗透双膜法工艺，结合本成果研制的差动式能量回收装置，产水稳定可靠，运行成本低。工程采用改良的预制沉井取水，通过沉井过滤海水，经潜水泵抽取海水进入取水管道，氯化杀菌后由增压泵加压并送入自清洗过滤器。自清洗过滤器出水存储在原水箱中，由供水泵输送至超滤系统。约 90%的海水透过超滤膜成为产水进入中间水箱，约 10%的海水作为浓水，夹带一些杂质作为回流至原水箱或排放。超滤产水由中间水泵加压分成两股，一股进入到高压泵，经高压泵加压后进入到反渗透膜组内，另一股进入到能量回收中利用反渗透浓海水的余压进行加压后进入到反渗透膜组中。反渗透产品水存储在 RO 产品水箱内，经产品水泵进入矿化器及添加碱剂调整淡化水的 pH 和矿化度，达到生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)，最终由淡水输送泵输送至蓄水池。

工程采用本成果研发的能量回收装置，设计流量为 450 m³/d，能量回收装置的应用降低了高压泵的流量要求与系统配电负荷，使反渗透系统能耗明显下降，且无需增压泵，仪表配备也比较简单。

图 1.14.4 差动式能量回收装置图

能量回收装置由能量交换缸、两位五通换向阀、配流阀、蓄能器和自控系统五个部分组成。

表 1.14.1 样机主要组件及参数

名称	数量	主要组件	主要材料
能量交换液缸	2	液缸、活塞、缸盖、密封、活塞杆	316L
两位五通换向阀	1	阀体、阀芯、密封、过度接头、油缸	2205
液压泵站	1	油泵、换向阀、电机、油箱、过滤器、	304
配流阀	4	阀体、阀芯、阀座、弹簧	2205
电控仪表	1	PLC、传感仪表、接近开关、磁性开关	
其他附件		支架、管道、阀门、胶管	316L

(1)能量交换缸具备增压功能，增压比为 1.08。设计采用了动密封技术，减小了摩擦力，保证了密封性能。

(2)两位五通换向阀采用液压泵驱动、PLC 控制，通过安装在活塞杆外套上的限位开关的反馈信号动作。通过改进流道设计、优化阀芯两端活塞密封和阀芯长度等设计和试验，改进了流量分配、实现了较平滑切换，有效地降低了换向时的压力波动。

(3)配流阀由阀体、阀芯和弹簧组成，启闭迅速、关闭严密，流动阻力小、压力损失低。

(4)蓄能器采用充氮加压缓冲的原理，可使每个工作周期的压力波动时间缩

短 72%，压力波动幅度降低 57%。

(5)自控系统以可编程逻辑控制器（PLC）为核心，控制液压泵站油泵电机的启停和液压缸往复的换向。通过 PLC 实现对被能量回收系统的准确控制和对智能仪表精确检测。能量回收控制系统通过接口与反渗透膜测试控制系统对接，实现上位机显示和整个系统的一体化调控。

连续运行试验结果表明，灵山岛 300 m^3/d 反渗透海水淡化工程吨水能耗约为 4.08 kWh，差动式能量回收装置流量为 450m^3/d，噪声为 70 dB，远低于《反渗透用能量回收装置（HY/T 108-2008）》标准要求，有效能量转换效率可达到 96.2%。

【效益分析】

单台流量为 450 m^3/d 的差动式能量回收装置成本约为 20 万元。国际市场上流量为 400 m^3/d 左右的能量回收装置价格一般在 40 万元以上，PX、DWEER 等公司的能量回收装置均需配备增压泵和变频器，PX 还需配置复杂的流量、压力、电导率仪表才能调试到正常工作状态，会额外增加费用。本技术成果的能量回收装置不仅造价低，且具备自增压能力，无需增压泵，仪表配备也简单，可减少整个反渗透系统的工程建设投资，具有明显的价格优势和经济效益。

【应用情况】

本技术成果已具备工程示范经验，不仅被应用于青岛灵山岛 300 m^3/d 海水淡化工程，同时还被用于国家海水及苦咸水利用产品质量监督检验中心反渗透膜性能测试平台，运行 4 年，连续两年承担国家质检总局反渗透膜检测任务。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com。

15.海水淡化预处理复合超滤膜及组器

在世界上所有海水淡化设施中，膜法水处理技术已占到 60%以上，成为海水淡化主流技术。反渗透膜由于流道窄，不能反洗等特点，对进水水质有严格的要求，最主要的进水指标 SDI<5，因此反渗透系统要求严格的预处理。传统的预处理过程通常包括混凝-澄清-砂滤等，其中砂滤过程是关键，但砂滤过程本身却存在着过滤精度不高、占地面积较大等问题，尤其随着沿海地区海水水质恶化，要求更精细的预处理技术，超滤以其更高的过滤精度逐渐取代砂滤成为反渗透预处理主流技术，近年来国内外一些大型海水淡化工程越来越多的采用超滤设备。超滤可有效去除细菌、藻类、微生物等污染物，确保出水 SDI<3，可为反渗透提供有效水质保障，因此在海水淡化和污水回用中，超滤+反渗透的双膜法工艺已经得到广泛应用。

超滤膜产品的核心是膜材料，膜材料性能优劣直接影响产品使用寿命、投资成本和运行成本。在国家科技计划支持下，通过不断研究开发，突破了高品质中空纤维膜制备技术、产业化技术以及应用技术，国产超滤技术产品逐渐赶超国际先进水平，尤其十二五期间，海水淡化预处理超滤膜得到国家科技支撑计划支持，已经开发出高性能海水淡化预处理膜组件，采用自主知识产权的复合热致相中空纤维膜制备技术开发出具有较高综合性能的膜产品，表现在膜强度较原有湿法纺丝膜提高 3 倍以上，耐压性提高 2 倍以上，基于此膜通量较原产品有较大提高，膜综合性能达到国际先进水平。

复合热致相中空纤维膜平均孔径 0.03μm，拉伸强度 600CN 以上，耐压强度大于 0.4MPa；产水水质达到 SDI_{15}<3；浊度<0.1NTU；膜组器设计通量达到 60～80L/（m^2·hr），使用寿命 5 年以上。

典型案例一

【案例名称】

1000 m^3/d 海水淡化示范工程

【项目概况】

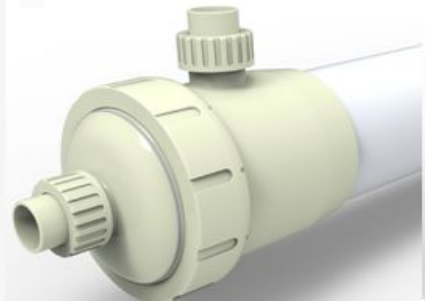
该项目的研究开发得到了天津市科技发展计划项目（043185211-6）和国家科技支撑计划项目（2013BAB08B01）的资助。

已经开发出两种型号海水预处理超滤膜组件，6″和 8″。设计并研制出不同水处理量的标准化、模块化单元，满足不同处理规模的工程项目的应用需求。

（1）海水淡化预处理膜组件

应用领域	海水淡化
型号	UOS-650
过滤方式	外压式
膜材料	复合PVDF
膜孔径	0.03μm
膜面积	$50m^2$
中空纤维内外径	0.7/1.2mm
壳体材质	UPVC

为满足组件在海水淡化预处理高含盐量条件下高效稳定工作，新型膜组件在设计中舍弃所有的金属配件，全塑材质的膜组件更适宜在高盐度水体中使用，膜组件使用寿命得到保证。



（2）模块化装备

压力式 CMF 机台模块化设计，每个单元可集成 40～120 支膜组件，膜单元可以多台并列运行或组合成更大的单元，以满足不同处理规模的工程需求。通过优化设计解决了大型装备气、水均匀性的问题，提高了膜系统运行的稳定性。

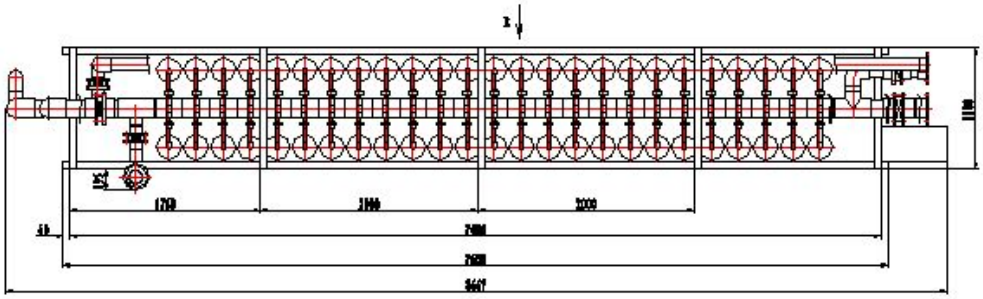


图 1.15.1　CMF-50 俯视/侧视示意图

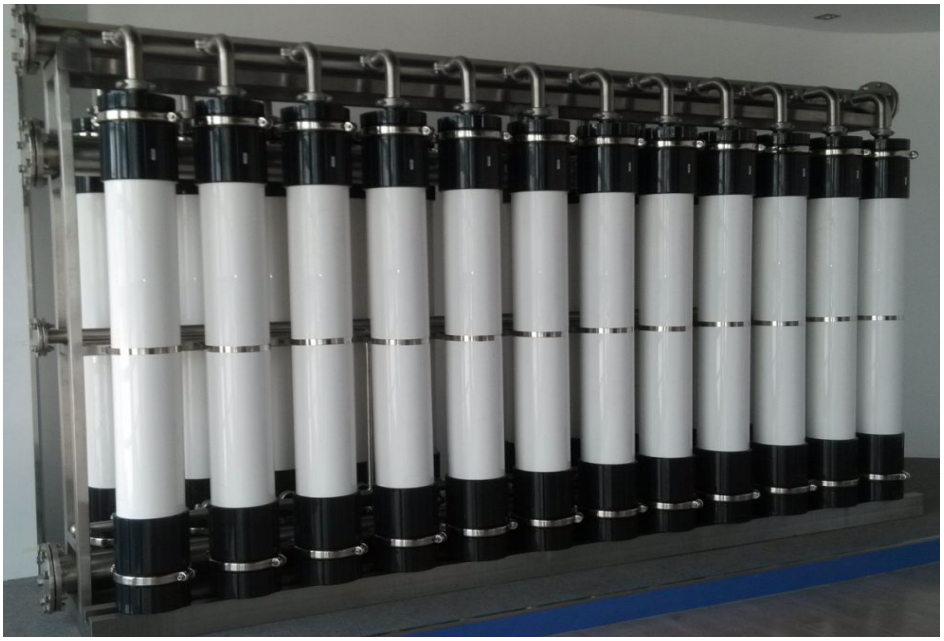


图 1.15.2　CMF-50 机台实物图

表 1.15.1 膜单元规格（CMF）

机台型号	CMF6-40	CMF6-50	CMF6-60	CMF6-80	CMF6-100	CMF6-120	CMF8-40	CMF8-50	CMF8-80	CMF8-100
外形尺寸(MM)	7000*1100*3000	8260*1100*3000	9510*1100*3000	7300*2250*3000	8610*2250*3000	9970*2250*3000	8550*1100*3040	1012*1100*3040	8600*3000*3040	1020*3000*3040
处理能力(m^3/h)	60～80	80 ～100	100～120	120～160	160～200	200～240	100～130	130～165	200～260	260～320

天津市重大科技项目，2004-2006 年实施，主要针对天津渤海湾复杂水体进行反渗透海水淡化工程示范，重点研究海水淡化工艺、运行效果、工艺稳定性和运行参数等相关技术内容。本项目集成天津市优势科研力量，产学研合作，由天津市科委组织，牵头单位海洋局天津市海水淡化与综合利用研究所、天津膜天膜、天津科技大学等单位参与，对渤海水、预处理工艺、反渗透等各工艺段进行研究。取得了一批科研成果，为后续产品、装备开发奠定了很好的基础。通过此课题，证明超滤作为反渗透预处理的可靠性。

【工艺与装备】

取水—混凝—平流沉淀—超滤—RO

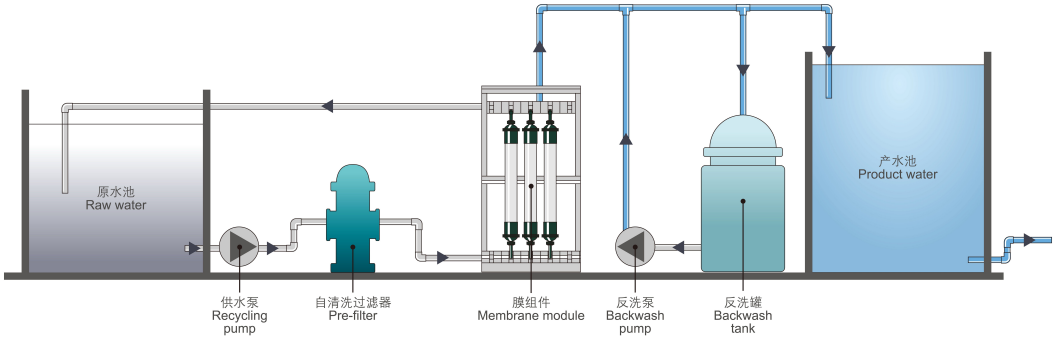


图 1.15.3 CMF 工艺流程示意图

图 1.15.4　实物图

【运行结果】

SDI<3,浊度<0.1NTU，超滤吨水处理费用<0.15 元。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；天津膜天膜科技股份有限公司

联系人；戴海平

地址；天津经济技术开发区第十一大街 60 号

邮政编码；300457

电话；022-66230233-610

E-mail dhp@motimo.com.cn。

典型案例二

【案例名称】

双膜法再生水处理工程案例

【项目概况】

天津是严重缺水城市，采用双膜技术将天津经济开发污水厂处理达标排放的水深度处理后回用于园区内企业，达到污水资源化目标。天津泰达新水源公司建设了国内第一个双膜法高盐污水再生项目，建设一期全部采用全进口设备，但是存在价格昂贵，售后服务不及时等问题，为改变这一状况，在国家科技部和天津市科委共同支持下，由天津膜天膜公司自主开发超滤膜及装备，与天津泰达新水源公司共同承建了 5000m³/dCMF 系统示范性工程，于 2003 年 10 月正式运行。同年，该项目被建设部命名为“建设部城市污水再生利用综合示范工程”。 经过十余年的发展，从膜产品、系统装备到工程运行均取得显著成果，膜的使用寿命已经从初期的 3 年提高到 5 年以上。自主开发的系统设备在自动化程度、运行的稳定性和可靠性方面都有了大幅提高，目前该工程反渗透预处理超滤设备已经完全取代进口设备，总处理规模达到 40000m³/d。

【工艺与装备】

原水 → 格栅 → 沉砂池 → SBR 反应池 → 混凝沉降 → 调节池 → CMF → RO → 用户

图 1.15.5. 超滤系统设备

【运行结果】

- CMF 系统运行稳定可靠；
- 超滤产水 SDI<3，浊度<0.1NTU，SS<1mg/L，水质完全达到 RO 进水要求；
- 国产化设备与进口设备性能相当，运行费用却更为低廉；
- 国产膜组件价格低廉，设备造价相比进口同类设备低约 30%以上。
- 超滤系统水回收率高，大于 95%。

【效益分析】

目前国产超滤系统设备投资成本：300～400 元/m³ 水.d, 运行成本在 0.15 元/m³ 水。

【应用情况】

在国家和地方政府的支持下，自主创新膜技术不断开发，产品质量稳步提高，市场占有率大幅上升，目前国产超滤膜及成套装备已经在市政、工业水处理领域得到广泛推广应用，并逐步取代进口成为主流产品。预计十二五期间，在海水淡化领域，国产超滤设备的推广应用将实现较大突破，取代进口实现国产化将成为现实。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；天津膜天膜科技股份有限公司

联系人；戴海平

地址；天津经济技术开发区第十一大街 60 号

邮政编码；300457

电话；022-66230233-610

E-mail dhp@motimo.com.cn。

典型案例三

【案例名称】

浸没式超滤作为海水淡化预处理技术

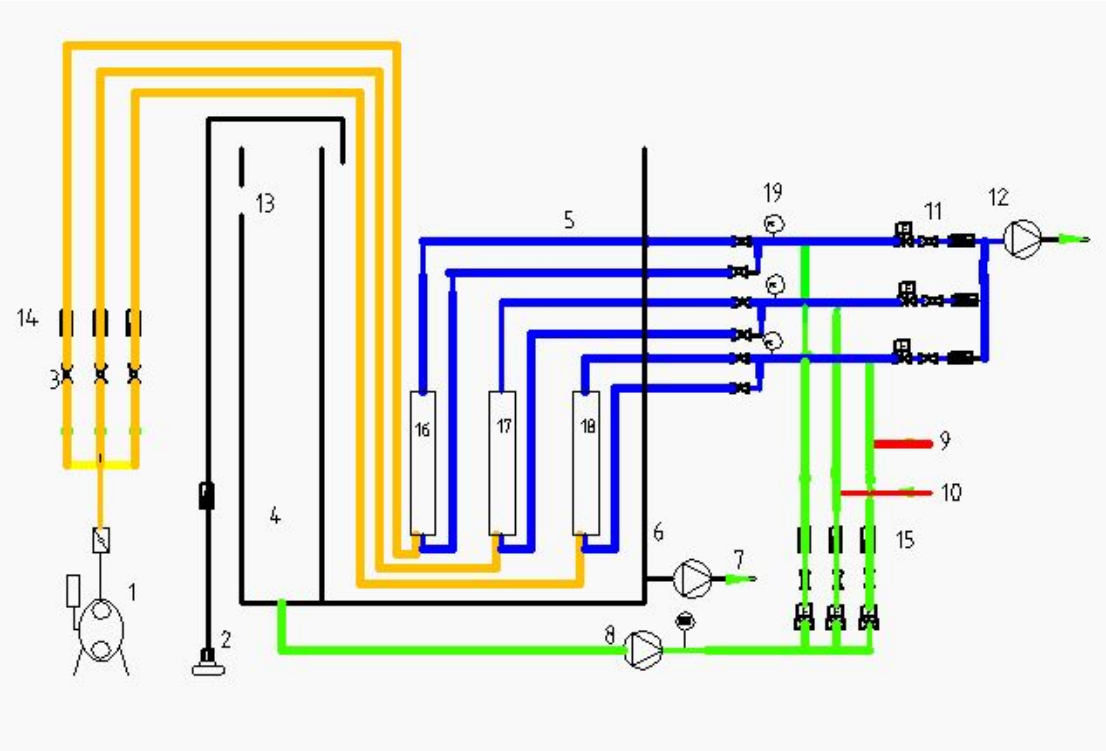
【项目概况】

由杭州水处理技术研究开发中心有限公司投资建设的浸没式超滤膜组件及预处理中试装置，是国家海洋局海洋公益性行业科研专项项目（201105025）的支持项目。2013 年 3 月完成项目设计，2013 年 7 月完成整个中试装置的安装并于六横水务海水淡化厂进行试验研究。本项目采用浸没式超滤作为海水淡化的预处理方案，对不同的海水进水浊度进行了试验研究，于 2013 年 12 月完成了整个中试试验。

【工艺与装备】

（一）流程描述

浸没式超滤作为海水淡化预处理的工艺流程见图 1.15.6。



1 鼓风机，2 进水泵，3 曝气，4 产水箱，5 反应器，6 回流排放泵，7 排泥， 8 反洗泵，9/10 加药，11 电动阀，12 至产水箱，13 产水箱进口，14 气体流量计，15 液体流量计，16/17/18 膜组件 A/B/C，19 压力表

图 1.15.6 浸没式超滤中试实验流程图

1.浸没式超滤取水

浸没式超滤原水采用虹吸方式由六横水务海水淡化厂混凝池取得，如图1.15.7。为满足不同情况下超滤对处理水量要求，在膜箱之前的进水管道上安装离心泵，离心泵的启停通过水箱液位计控制。

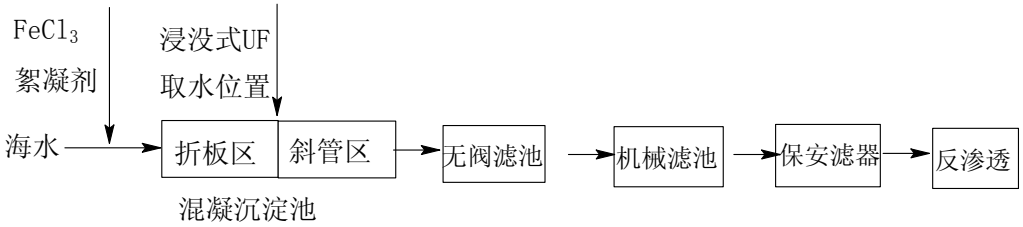


图 1.15.7　浸没式超滤取水位置

2.浸没式超滤的运行方式

运行过程通过 PLC 程序控制，整个运行过程包括 7 个模式：排气、曝气、产水、反洗，化学清洗，离线清洗，排泥等。

实验过程采用 24 h 连续运行，曝气量通过手动球阀调节，抽停比通过时间继电器控制，反洗周期、排泥周期、化学清洗周期根据实际情况确定。鼓风机常开，通过手动阀调节调节气量大小。

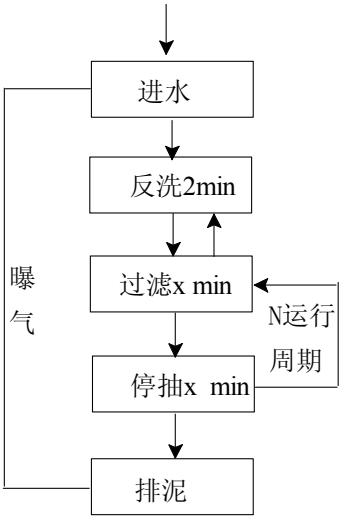


图 1.15.8 实验流程图

【操作参数与运行结果】

表 1.15.2 列出了本项目试运行的操作参数及运行数据。

表 1.15.2 浸没式超滤运行参数及产水水质

项　目	单 位	设计值
进水浊度	NTU	200～800
膜通量	LMH	50～60
曝气量	Nm^3/h	3～4
跨膜压差	kPa	40～60
反洗周期	h	2～6
反洗水量	m^3/h	产水量的 80%
反洗气量	Nm^3/h	3
排泥周期	d	1～3
吨水耗电量	$kW·h/m^3$	≤0.6
产水水质		
产水浊度	NTU	≤0.1
SDI		≤3.0

【主要技术指标】

膜通量≥40LMH，产水浊度≤1NTU，SDI≤3，满足反渗透进水要求。

【效益分析】

中试试验总投资约十万元，包括装置材料费用、膜材料及膜组件费用，化学药品消耗、电力消耗、人工工资等。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

16.海水淡化水后矿化技术

世界上淡水资源不足，已成为人们日益关切的问题。作为水资源的开源增量技术，海水淡化已经成为解决全球水资源短缺措施中的一种主要方法，应用越来越广。海水淡化水具有洁净、高纯度和供给稳定的特点，是安全可靠的高品位水源。淡化产品水可进入自来水管网，作为城镇居民生产、生活的重要水源，也可作为海岛、船舶、海上平台等主要水源；其次淡化产品水可作为企业生产和生活用水，也可作为以发电等锅炉补水为代表的工业用高纯水和工艺用水。但海水经淡化处理后，钙离子含量很低，其水质不稳定且具有很强的腐蚀性，甚至会发生常见的红水现象。

本技术的作用在于通过对海水淡化水的矿化处理，对其进行化学稳定性处理，调节海水淡化水的碱度和硬度，适度提高 pH 值，使产水的朗格里尔饱和指数（LSI）值在 0～0.50 范围，总碱度（TAC）80mg/L（以 $CaCO_3$ 计），总硬度（TH）80～120mg/L（以 $CaCO_3$ 计），使其水质稳定，不具有腐蚀性，使其满足管网输配的要求。

本技术提出了两种实现后矿化的技术方法。一种是通过药剂泵直接投加药剂的实现后矿化的技术方法，适用于小型海水淡化系统，设备简单，投资省，操作维护极为简便。另一种是通过一种专门后矿化设备—矿化池及配套的二氧化碳投加系统来实现后矿化的技术方法，适用于大中型海水淡化系统。该技术不仅能够实现水质稳定和改良，而且其矿化池整体结构简单，矿化池内的反应充分而均匀，能够实现碳酸钙依靠重力，根据碳酸钙的消耗，自动向矿化池补料，本技术还能对矿化池进行气水冲洗，使设备的生产和维护都更加节省劳力和成本。

该技术得到国家科技支撑计划“万吨级膜法海水淡化关键技术与装备研究”（2006BAB03A02）的资助，成果已推广应用于国内外多个已建和在建大型海水淡化工程，包括六横水务二期 30000 m^3/d、曹妃甸日产 50000 m^3/d、印尼 Adipala 66 万千瓦超临界燃煤电站等海水淡化工程。

最终产水指标如下：钙含量≥20mg/L；碱度（以碳酸钙计）≥50mg/L；出水 pH＜8.5（呈弱碱性）；水质符合国家《生活饮用水卫生标准》。

典型案例一

【案例名称】

曹妃甸日产 50000 吨 / 日的反渗透海水淡化工程

【项目概况】

2006 年，国家发展改革委员会（NDRC）编写了京津冀地区能源规划报告。为了加速京津冀地区城市的经济发展，NDRC 已从战略上分析了能源的限制因素。该分析中指出限制因素包括地方煤炭资源消耗殆尽、水源缺乏以及土地资源的不足。建成的海水淡化工厂可以向曹妃甸开发区的企业以及当地社区供应淡水。经过后矿化处理的淡化水达到国家生活饮用水标准。该项目位于曹妃甸工业区，靠近华润发电厂北侧。根据产业重组目录（2005 年版），曹妃甸海水淡化项目以其环保节能以及综合利用的性质而归属于被鼓励的项目，并且符合国家产业政策。

2011 年首个自主设计并由国内企业总承包的日产 50000 吨 / 日的反渗透海水淡化工程在河北曹妃甸建成投产，标志着我国反渗透海水淡化工程技术能力迈上新台阶。该项目中的海水淡化水后处理系统采用了后矿化技术和设备，增加了淡化水的硬度、碱度及 pH 值，同时解决了淡化水对后续供水管道的腐蚀问题。

【工艺与装备】

（1）工艺原理

反应方程式：$CaCO_3+CO_2+H_2O \rightarrow Ca^{2+}+2HCO_3^-$

在海水淡化水进入矿化池前，将 CO_2 投加至海水淡化水中，然后将投加了 CO_2 的海水淡化水通入矿化池进行矿化。

（2）工艺流程及描述

本技术包括以下步骤：

（a）在海水淡化水中投加 CO_2，并使其充分混合

将海水淡化水的进水主管引出一路 CO_2 投加旁路管，CO_2 投加旁路管接入 CO_2 后再回至进水主管，CO_2 使用食品级低温液态 CO_2，经过蒸发器转化为气态 CO_2，再经减压，然后通至 CO_2 投加旁路管。

（b）将投加了 CO_2 的海水淡化水在矿化池内进行矿化

海水淡化水从碳酸钙填料床的下方通入矿化池，经过碳酸钙填料床，再溢入出水槽收集后作为后处理产水流出矿化池。矿化池中的碳酸钙由补料管从上方靠重力自动补充，碳酸钙填料床满至补料管的下端管口，使碳酸钙始终处于过量。

后矿化系统工艺流程图如 1.16.1 所示。图 1.16.2 为曹妃甸 50000 m3/d 淡化水后矿化处理主体设备。

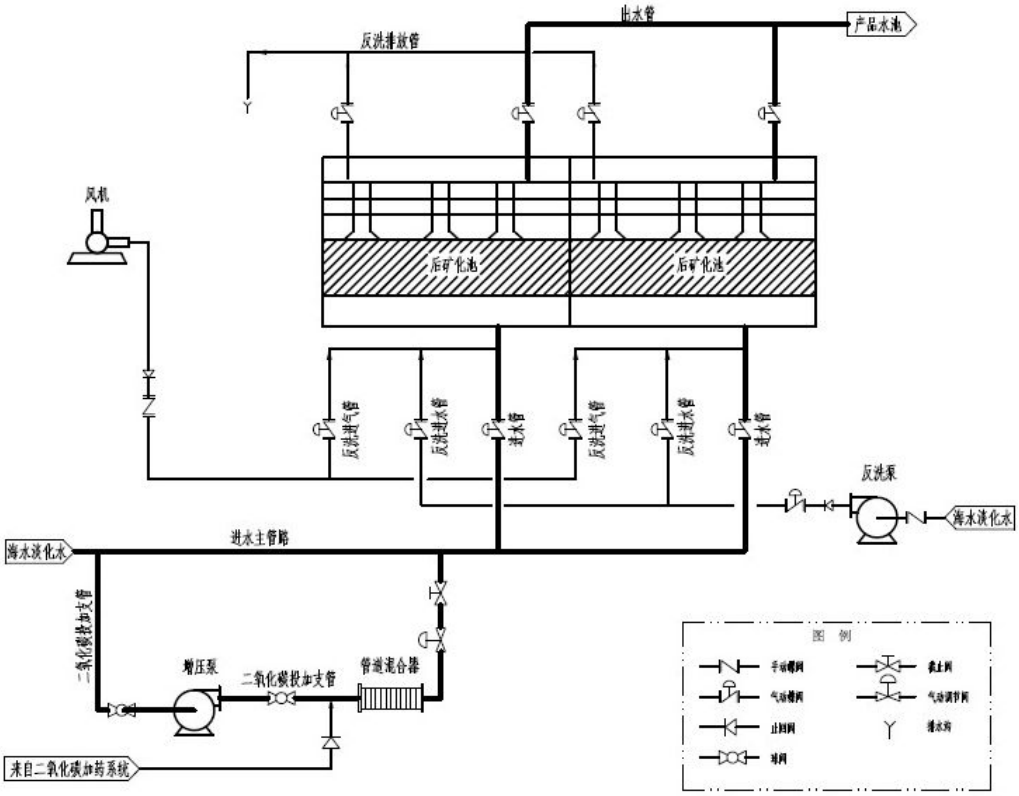


图 1.16.1　淡化水后矿化处理工艺流程图

图 1.16.2　曹妃甸 50000 m^3/d 淡化水后矿化处理主体设备

【操作参数与运行结果】

（1） 二氧化碳投加量 50.9 kg/h，碳酸钙耗量 109.5 kg/h；

（2） 出水中的钙含量≥20mg/L；

（3） 出水碱度（以碳酸钙计）≥50mg/L；

（4） 出水呈 pH＜8.5 的弱碱性。

【效益分析】

本工程后矿化工序总投资约 300 万元，经过 2 年时间的运行，后矿化工序生产成本的各项费用见表 1.16.1。

表 1.16.1 吨产品水后矿化工序生产成本表

项目名称		日支出金额（元）	吨产水费用（元）
电费		440	0.009
药剂费	CO_2	1100	0.022
	$CaCO_3$	3150	0.060
合计		1855	0.091

注：食品级二氧化碳价格按 900 元/m³，碳酸钙按 1200 元/m³，电费按 0.8 元/kWh 计。

【应用情况】

该技术成果已经在曹妃甸 5 万 m^3/d、六横 II 期 3 万 m^3/d 等多个大型反渗透海水淡化工程应用。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人：杨波

地址：杭州文一西路 50 号

邮政编码：310012

电话：0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

典型案例二

【案例名称】

印尼 Adipala 电厂 15 吨 / 小时反渗透海水淡化工程

【项目概况】

印尼 Adipala 电厂位于印尼中爪哇省西南部的 Cilacap（芝拉扎）市 Adipala 镇，距首都雅加达约 600 公里。为了满足生产及生活需要，电厂配套建成了反渗透海水淡化、生活水消毒矿化和锅炉给水处理系统，其中生活水系统即取用经过二级反渗透处理后的产水，再经过消毒和矿化处理达到生活饮用水标准，供生活使用。

该项目中的后处理系统采用了海水淡化水加药矿化技术，增加了淡化水的硬度、碱度及 pH 值，同时解决了淡化水对后续供水管道的腐蚀问题。

【工艺与装备】

（1） 工艺原理

反应方程式：$2NaHCO_3+CaCl_2 \rightarrow Ca^{2+}+2HCO_3^{-}+2NaCl$；

在海水淡化水中，依次投加适量的氯化钙和碳酸氢钠溶液，增加淡化水的硬度、碱度及 pH 值。

（2）工艺流程及描述

本技术包括以下步骤：在海水淡化水中投加氯化钙溶液，并使其充分混合，增加硬度；接着再投加碳酸氢钠溶液，并使其充分混合，增加碱度及 pH 值。

工艺流程图 1.16.3 所示：

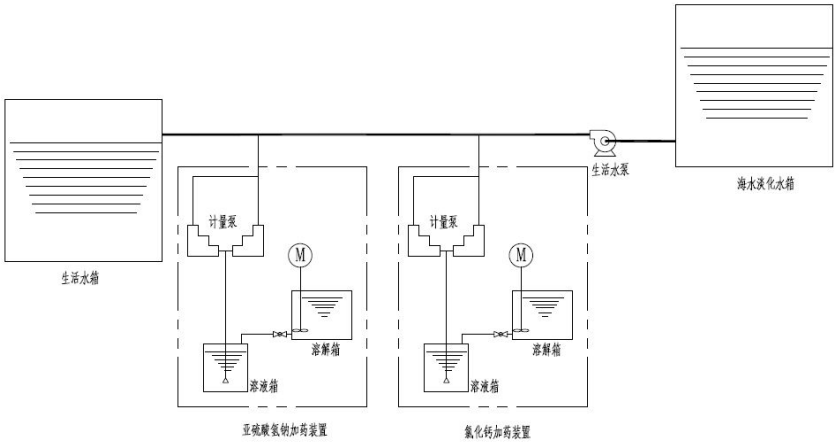


图 1.16.3 印尼 Adipala 电厂 15m³/h 反渗透海水淡化水后矿化工艺流程图

（3）设备描述

本技术主要包含以下装备：

a. 氯化钙加药系统：包含药剂溶解箱和药剂溶液箱，以及氯化钙计量泵等；

b. 碳酸氢钠加药系统：包含药剂溶解箱和药剂溶液箱，以及碳酸氢钠计量泵等。

【操作参数与运行结果】

（1）氯化钙投加量 90 mg/L，碳酸氢钠投加量 140 mg/L；

（2）出水中的钙硬度（以碳酸钙计）≥80mg/L；

（3）出水碱度（以碳酸钙计）≥80mg/L；

（4）出水呈 pH＜8.5 的弱碱性。

出水符合国家《生活饮用水卫生标准》GB5749-2006，满足印度尼西亚国家颁布的饮用水标准。

【效益分析】

本工程后矿化工序总投资约 6 万元，后矿化工序生产成本的各项费用见表 1.16.2。

表 1.16.2　吨产品水后矿化工序生产成本表

项目名称		日支出金额（元）	吨产水费用（元）
电费		4.8	0.01
药剂费	$CaCl_2$	52	0.14
	$NaHCO_3$	100	0.28
合计		325	0.43

注：氯化钙价格按 1600 元/t，碳酸氢钠价格按 2000 元/t，电费按 0.8 元/kWh 计。

【应用情况】

该技术成果已经在印尼 Adipala 电厂 15m³/h 反渗透海水淡化工程、印尼 SUMATERA BARAT 2 ×112MW 燃煤发电厂海水淡化工程等多个反渗透海水淡化工程应用。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位；杭州水处理技术研究开发中心有限公司

联系人；杨波

地址；杭州文一西路 50 号

邮政编码；310012

电话；0571-88935411

E-mail：yangb@chinawatertech.com

二、低温多效蒸馏海水淡化技术

多效蒸馏又名多效蒸发，是典型的化工单元操作。由于一般蒸发过程的产品为浓缩液，海水淡化的产品为蒸汽冷凝形成的淡水，因此多效蒸馏在海水淡化领域习惯上称为多效蒸馏。与多级闪蒸相比，多效蒸馏的优点有：

1、传热系数高。多效蒸馏的传热过程是沸腾和冷凝换热，双侧相变的传热系数高于单侧相变的多级闪蒸的传热系数，相同的温度范围可减少传热面积。

2、动力消耗少。闪蒸淡水依赖的是海水的显热，为了保持一定的传热系数需要循环大量的盐水，使得多级闪蒸的动力消耗要高于多效蒸馏。

3、操作弹性大。负荷从 40%到 110%变化时皆可稳定运行且不明显降低造水比。

多效蒸馏的缺点是海水在加热面上沸腾，同样的温度下容易在传热管壁上结垢，需要采取严密的防垢措施并经常清洗。为了防止传热管的结垢，上世纪 70 年代末推出了低温多效蒸馏。其特征是维持系统的最高蒸发温度低于 70℃并保持海水的浓缩倍率小于 2。在工艺流程上是将一系列的水平管降膜蒸发器或竖直管降膜蒸发器串联起来并分成若干效组，用一定量的输入蒸汽作为热源，通过多次的蒸发和冷凝，使得二次蒸汽的潜热得到多次利用，从而得到多倍于加热蒸汽量的蒸溜淡化水的海水淡化过程。

低温多效蒸馏技术具有传热效率高，产品水水质好，负荷调节范围大，操作温度低，结垢腐蚀倾向小等优点，可利用电厂、化工厂、低温核反应堆或其他余热提供的低品位蒸汽将海水多次蒸发和冷凝达到很高的造水比，特别适合与低位余热结合建设大中型海水淡化厂，是国际上主流的海水淡化技术之一。世界上最早提供低温多效技术的是以色列 IDE 公司，法国 Sidem 公司上世纪后期从多级闪蒸转型低温多效技术研发和装备的供应，并与 IDE 公司一起长期占据低温多效蒸馏市场的主导地位。进入新世纪，韩国 Doosan 和意大利 Fisia 也开始从其擅长的多级闪蒸技术转向了大型低温多效蒸馏技术的开发应用。目前，正在运行的工厂规模最大的低温多效蒸馏淡化厂位于沙特阿拉伯的 Marafiq，规模 80 万 m^3/d，由法国 Sidem 公司建设；单台规模最大的低温多效蒸馏装置在沙特的 Yanbu，规模 6.8 万 m^3/d，由韩国 Doosan 公司建设。当前，采用电水联产方式建设大型

低温多效海水淡化厂是国际上共同的发展趋势，由于海水淡化厂与发电厂共建，可有效利用电厂的未上网电价和发过电的低压蒸汽生产优质淡化水，从而降低海水淡化的造水成本。

我国对低温多效的科技支持起始于“九五”科技攻关计划，通过国家“十五”、“十一五”科技支撑计划的持续支持，已在低温多效蒸馏海水淡化技术研究、装备制造、工程建设等方面取得了突破。形成了集技术研发、工程设计、设备制造、调试运行、仿真培训为一体的 MED 集成创新技术体系，在大型低温多效电水联产海水淡化技术集成及其标准化、产业化方面取得了重大进展。2004 年，国内首个自主技术 3000m^3/d 低温多效蒸馏示范工程建成投运；2008 年，6 套 4500m^3/d 及 3000m^3/d 装置出口国外；首套国产 12500m^3/d 装置于 2008 年 12 月成功投运；2010 年，完成了 2.5 万 m^3/d 装置设计；2013 年 12 月，国内首套 25000 m^3/d 装置成功调试出水，实现了单机规模的一次重要跨越。在以上工作的基础上，形成了一批创新性突出、具有自主知识产权、技术水平高的科技创新成果。

目前，国内运行的低温多效海水淡化装置总规模为 31 万 m^3/d，主要的问题是国产装备占比不高、市场竞争能力有待提升等，急需多种手段并举快速提升国产技术和装备的技术水平和国际竞争能力。本章介绍了 6 类低温多效蒸馏海水淡化相关技术，力图反映我国该技术领域的全貌并对将来的用户有一定的参考作用。

1. 万吨级低温多效蒸馏海水淡化主体装置

多效蒸馏海水淡化（MED）主体设备装置包括多效串联的蒸发器以及末端的凝汽器，其核心技术为横管降膜蒸发。海水通过喷淋，在换热管外表面形成降膜，加热蒸汽在换热管内凝结释放潜热，加热管外海水进行蒸发，由于各效蒸发器保持一定的温度和压力梯度，管内冷凝和管外蒸发逐效进行，末效蒸发器产生的蒸汽在凝汽器内凝结，从而获得多倍于加热蒸汽量的淡水。装置的优点是传热效率高、产品水水质好、负荷调节范围大，低温操作减小了腐蚀与结垢倾向，是经济可靠的水电联产技术方法之一。

本项目受到上海市重大技术装备首台业绩突破项目-海水淡化装置蒸发器研制（70801），上海市科学技术委员会科研计划项目-大型低温多效蒸发海水淡化应用技术预研究（71612024），以及上海市引进技术的吸收与创新年度计划项目-大型海水淡化设备—蒸馏装置的优化、设计和制造技术（06-114）等的资助，集成上述技术成果的首套国产 12500m^3/d 装置于 2008 年 12 月成功投运，各项性能指标达到设计值，最大产水出力为 13625 m^3/d（设计值 12500 m^3/d），出水电含盐量约 3～4ppm（设计值小于 5ppm），造水比达到 10.8（设计值 10.2），吨水电耗为 0.82kWh/m^3（设计值 1.0kWh/m^3）。该装置于 2009 年荣获中国电力科学技术奖一等奖、2010 年度国家能源科技进步一等奖（国家能源局颁发）。在此基础上，国内首套 25000 m^3/d 装置也在 2013 年 12 月成功调试出水，各项性能指标达到设计值，是国内低温多效蒸馏海水淡化主体装置在技术上的又一跨越。

万吨级低温多效蒸馏海水淡化主体装置的研制成功，不仅是国内在该技术领域的一次飞跃，在一定程度上也助推了我国热法海水淡化产业的发展。无论藉以缓解缺水问题，减轻沿海及周边缺水地区过度开采地下水对环境造成的危害，以及大规模、大范围、跨流域调水可能产生的环境问题；还是促进装备制造业、冶金、化工、材料、电子等行业技术进步，带动相关产业发展，都会产生良好的经济效益和社会效益。

典型案例

【案例名称】

12500m^3/d 低温多效蒸馏海水淡化工程

【项目概况】

该工程项目位于河北省沧州市黄骅港，为神华河北国华沧东发电有限责任公司配套海水淡化二期工程，系统出力 12500 m^3/d（一期工程为 Sidem 技术，单套装置出力 10000 m^3/d），于 2008 年 12 月成功投运。所产淡水主要供电厂及其周边工业企业用水。

【工艺与装备】

该装置设置 6 效蒸发器，采用一级平行进料工艺，降低了蒸发器的结垢风险。设置可调式热压缩蒸汽喷射器，抽汽位置位于第 4 效蒸发器，提高了装置造水比，且保证系统在电厂调峰引起的压力波动情况下，实现 40-110%负荷条件下的稳定可靠运行。蒸发器外围设置海水预热器、蒸馏水冷却器、凝结水冷却器、抽真空回热系统等，对于全年不同时期的海水温度，系统物料海水、成品水和浓水温度均能得到保证。蒸发器壳体材料采用 316L 不锈钢制造，并进行酸洗钝化，保证其耐海水腐蚀性，蒸发器上三排采用钛管，防止海水的冲刷并起到布液作用，其余区域使用铝黄铜管，保证运行寿命。通过优化换热管布置和蒸发器内部结构、合理选择丝网式除雾器横截面积，保证二次蒸汽流经管束、除雾器和壳体的压力损失降到最低，使效间温差损失在可控范围以内，并使除雾效果达到最佳，确保成品水水质。

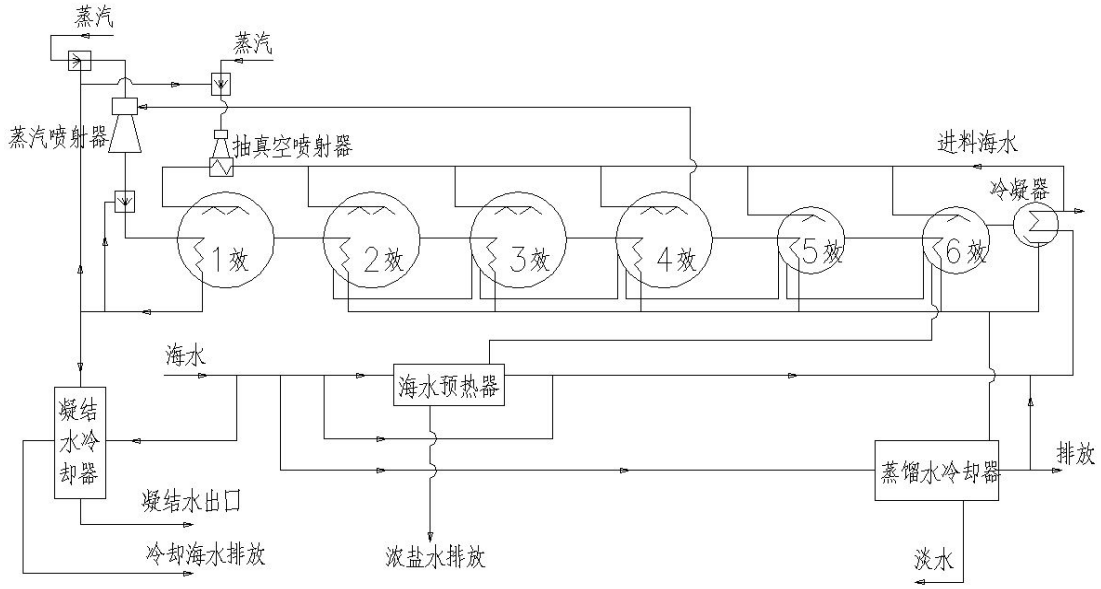


图 2.1.1 六效平行进料低温多效蒸馏海水淡化系统工艺流程图

图 2.1.2 神华河北国华沧东发电有限责任公司 12500m³/d MED 装置

解决的关键技术问题

（1）传热机理研究和分析。考察操作参数和物性参数对换热性能的影响，建立起对应的换热系数数据库以及经验公式，作为工程设计指导；

（2）低温多效蒸馏海水淡化热力学设计计算与校核计算软件开发。热力学计算过程能够准确反映海水降膜蒸发过程的特点，充分考虑闪蒸、盐水沸点升高、二次蒸汽流动产生的压力损失等因素，提高计算结果的准确性，并辅助以校核计算，对核心设备设计提供指导和参考依据；

（3）针对设备容量大、性能参数高的特点，采用新型工艺流程，采用可调节 TVC 提高系统造水比，并对不凝气抽出和真空回热系统等进行优化设计，最大程度提升系统整体性能；

（4）蒸发器内部采用对称布置除雾器，优化导流板和效间通道设计，保证二次蒸汽在蒸发器内合理流动，将温度损失控制在 0.2℃以内，使蒸发器整体传热性能得到进一步优化；

（5）开发出适用于低温多效蒸馏海水淡化的丝网式除雾器，并优化除雾器设计原则；

（6）针对低温多效蒸馏装置的薄壁容器结构特点，在蒸发器设计过程中充分考虑了在运行工况下的强度和变形问题，建立相关技术分析体系；

（7）低温多效蒸馏装置的设计与制造标准研究。制定了相关企业标准，涉及制造、工装、酸洗钝化和检验检测等技术条件。

【主要技术指标】

蒸汽压力 0.55MPa（绝压），温度 320℃，原海水温度 0~28.0℃，含盐量 31660mg/L 时的工况下，装置产水量不小于 12500 m^3/d，造水比 10.8，产品水 TDS≤5mg/L，吨水耗电<1.0kWh。

【效益分析】

工程主体设备装置投资约 8000 万元，工程总投资约 1.19 亿元。

按照业主方提供的数据，造水成本包括蒸汽成本、电费、化学品消耗、人工费、设备折旧费、维护修理费和相关财务费用。其中，蒸汽成本是影响制水成本的敏感因素。如果仅计算海水淡化抽汽制水后，电厂所增加的燃料成本，吨水蒸汽成本为 3.24 元/t，贷款偿还年限 20 年，还款方式为等额本金还款，吨水综合成本为 5.86 元/t。

【应用情况】

黄骅发电厂 2.5 万 m^3/d 低温多效海水淡化装置，湛江宝钢 2×1.5 万 m^3/d 低温多效海水淡化装置。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：上海电气海水淡化工程技术公司

联系人：樊智锋

地址：上海市，杨浦区，杨树浦路 2218 号

邮政编码：200090

电话：021-60703803

E-mail：fanzhf@shanghai-electric.com

2. 低温多效蒸馏海水淡化技术

多效蒸馏海水淡化技术（MED）是目前国际上广泛应用的主流淡化技术之一，淡化过程控制盐水的最高蒸发温度不高于 70℃、海水浓缩倍率小于 2。项目技术集成了“十五”科技支撑计划的科技成果，受到“十一五”国家科技支撑计划-5 万 m^3/d 低温多效海水淡化成套技术与装备开发（2006BAB03A01）的资助，开发出了 MED 高效节能工艺，以及引射系数可调节的蒸汽热压缩装置（TVC）、铝合金传热管、国产阻垢剂以及喷淋布液、汽液分离元件和弹性连接胶圈等关键部件和材料，完善了智能化控制系统；建成 30m^3/d 中试验证平台，进行了工艺系统和多项关键参数、传热管和阻垢剂等核心材料、TVC 等关键部件的验证和优化；通过系统优化将有效传热温差从 30℃提升到 50℃，系统热效率提高 60%；在此基础上形成了集技术研发、工程设计、设备制造、调试运行、仿真培训为一体的 MED 集成创新技术体系。

项目技术以 100%国产化率中标 3 个印尼海水淡化工程，总规模 2.1 万 m^3 /d，合同额 2.6 亿。这些工程通过国际第三方机构（HPTC）的检验，移交业主使用。实测结果：7 效淡化装置达到 10 以上的造水比，吨水能耗（1.24～1.43kWh），产品水 TDS(5.3～7.98mg/L) ，全部指标优于合同要求；用日产 5 千吨级的装置达到了国外公司日产 2.5 万吨级装置的技术性能。

获得专利授权 13 项，其中发明专利 6 项；制定蒸馏海水淡化相关标准 5 项，其中发布实施 3 项；完成海水淡化专著 2 部，发表论文 22 篇，完成专题研究报告和专题规划 30 多篇。实现技术股权收益 1600 万元，工程设计收入 1530 万元，其他咨询收入 473.5 万元。

项目技术的部分成果“2×3000m^3/d MED+RO 海水淡化示范工程”获 2007 年海洋创新成果一等奖，“3000m^3/d、4500m^3/d 低温多效海水淡化成套技术国产化及应用”获 2013 年海洋科学技术奖一等奖。该技术有效带动与其相关的能源供应、原材料生产、装备制造、工程建设以及管理服务等产业的发展，成为拉动国民经济增长的新支点，对于增加我国淡水资源总量、改善水资源结构、保障水安全有重要的现实意义。

可提供的工程化装置规模为 1000m³/d－50000m³/d，产水水质 TDS≤5mg/L；吨水耗电＜1.5kWh；造水比≥10，并可根据用户要求量身定做，提供个性化的技术和装备。

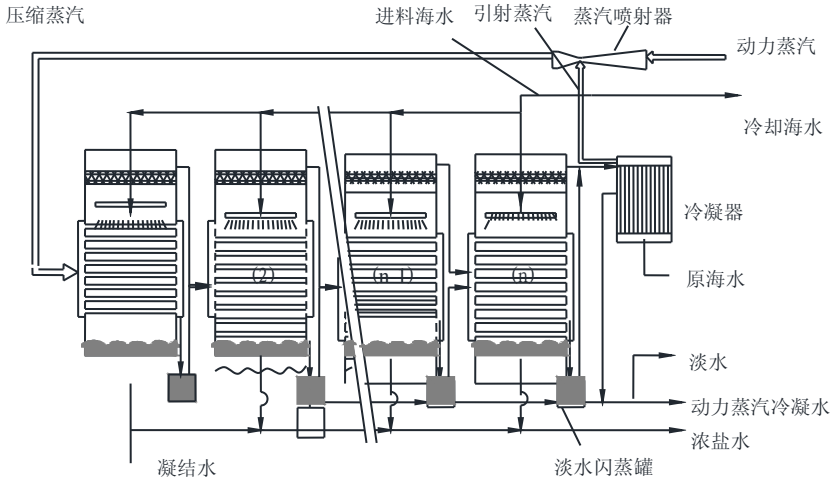


图 2.2.1 典型大型低温多效海水淡化技术工艺流程图

典型案例

【工程名称】

2×4500m³/d 低温多效电水联产海水淡化工程

【项目概况】

印尼英德拉玛尤 3×330MW 燃煤电站电水联产项目 2×4500m³/d 海水淡化工程位于西爪哇省 Indramayu Regency 市，用于满足全厂的用水需求。2011 年 10 月通过印尼业主方组织的验收。

本项目作为目前国内出口的拥有自主知识产权的最大海水淡化设备，开创了我国低温多效蒸馏海水淡化装置进军国际市场的先河，标志着中国的海水淡化技术与装备已经初步具备国际竞争能力。

【工艺与装备】

工程的工艺与装备开发立足于自主技术成果，通过组织专门的设计团队，对已有的工程设计、装置制造和运行经验进行总结和提升。设计过程中，针对相关

技术问题，开展了大量试验研究与技术验证，

项目采用低温多效海水淡化技术。通过配置热压缩蒸汽喷射泵，用于提高系统蒸汽利用率；通过配置启动蒸汽喷射真空泵，用于减少系统启动时间；通过设置 13 个闪蒸罐，将产品淡水和浓海水冷却的同时充分回收其潜热，提高装置热效率。在装置制造方面，各效蒸发器壳体及内部构件均采用 316L 不锈钢制造，确保装置运行的可靠性及利用率；喷淋系统采用交叉排列的布液形式，提高布液组合的系数，保证配水管道和传热管的流量分配；喷嘴采用自行开发设计的漩涡离心式实心锥喷嘴；汽液分离装置折流板采用双层 V 形板结构，便于操作、维护和更换。

图 2.2.2　印尼英德拉玛尤 2×4500m³/d MED 海水淡化工程

解决的关键技术问题

（1）开发出逆流分组进料节能工艺，提升了进料水温度，减少了各效蒸发器预热面积，保证了系统热能的高效利用，降低水泵能耗约 12%；

（2）开发出引射系数可调的 TVC，工作蒸汽压力偏离设计工况 20%的情况下系统仍能稳定运行，引射系数通过改变喉嘴距离在设计值的±25%之间自由调节；

（3）开发出“W 型”折流板式气液分离装置，具有分离效率高、操作弹性大、受工况波动影响小的特点；

（4） 开发出适用于 MED 工况的耐老化橡胶密封材料，耐老化性能提升

50%；优化了传热管与管板间密封胶圈结构设计，有效提升了密封性能；

（5）制备出分子量分布窄的聚羧酸主剂，通过与耐温、增效组份复配，开发出 SI 型高效、环保阻垢剂，阻垢率较国外同类产品提高 14.5%，价格仅为国外产品的 30%-50%；

（6）建立了 MED 仿真培训平台，实现海水淡化装置运行及管理人员的岗前培训、在岗培训、故障设置、事故演练、技能鉴定等目标，也可为国内外海水淡化公司进行演示和技术交流。

【主要技术指标】

蒸汽压力 0.89MPa（绝压），温度 265℃，原海水温度 32℃，含盐量 32000mg/L 时的工况下，装置产水量 195.2t/h，造水比 10.3，产品水 TDS 7.98mg/L，吨水耗电 1.43kWh。

【效益分析】

成套装备的合同额 8750 万元。

造水成本包括化学药品消耗、热力消耗、电力消耗、人工工资、福利及管理费用、维修费用、设备折旧费用等，折旧年限以 20 年计，装置的设备利用率以 90％计，根据 2011 年 10 月至今实际运行情况，电水联产的海水淡化经营成本为 3.658 元/m³，造水成本为 4.634 元/m³。

【应用情况】

印度尼西亚龙湾电厂 2×3000m³/d 和巴齐丹电厂 2×3000m³/d MED 海水淡化装置。正在依托项目技术，支撑众和海水淡化工程有限公司中标浙江舟山电厂二期 4 号机扩建项目 12000 m³/d 海水淡化装置加工；进行（2×3＋2）万 m³/d 低温多效海水淡化工程的设计，淡化工程位于福建晋江，与火电厂水电联产。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@163.com

3. 余能低温多效海水淡化技术

近年来由于多效蒸馏（MED）海水淡化汽源适应性强、不宜结垢及腐蚀等优点得到迅速发展和应用，但行业内低温多效海水淡化装置绝大部分为“TVC”模式（利用热压缩器）运行，该模式多使用压力 0.4～0.9MPa 的高品质蒸汽作为淡化汽源；少部分在 E 模式（不利用热压缩器）下运行的装置也是使用减温减压器将正压蒸汽减温减压成负压蒸汽后使用。目前凝汽式汽轮机的末端排汽，均为通过间接式换热，将末端排汽凝结成水回至锅炉，而排汽中大量的潜热被冷却水或冷却空气带走，进而释放至大气中，经测算散失的热量占整个发电机组投入热量的 60%左右。

本技术得到国家科技支撑计划的项目（2006BAB04B01）资助，其核心是遵循能量梯级利用的原则，将企业内各主工艺产生的富余蒸汽以及各主工艺产生的煤气等可燃副产品通过锅炉燃烧产生的蒸汽首先用于汽轮发电机组发电，做完功的负压排蒸汽（乏汽）再直接进入低温多效海水淡化装置制取除盐水，做到发电与海水淡化的紧密结合，实现真正意义的“水电联产”。该技术目前已获得国家发明专利（专利号：ZL200810103167.5），经过对关键技术和关键装备的不断攻关，目前已形成相关设计、加工、制造及运行方面的知识产权及专有技术，并具备了工程化推广应用的条件。基于该技术建设的实际工程通过了行业专家的科技评估验收，并获得“首钢总公司科学技术一等奖”、“中国钢铁工业协会、中国金属学会科学技术二等奖”、“北京市科学技术二等奖”，该技术对于利用余能降低低温多效海水淡化的制水成本具有重要意义。

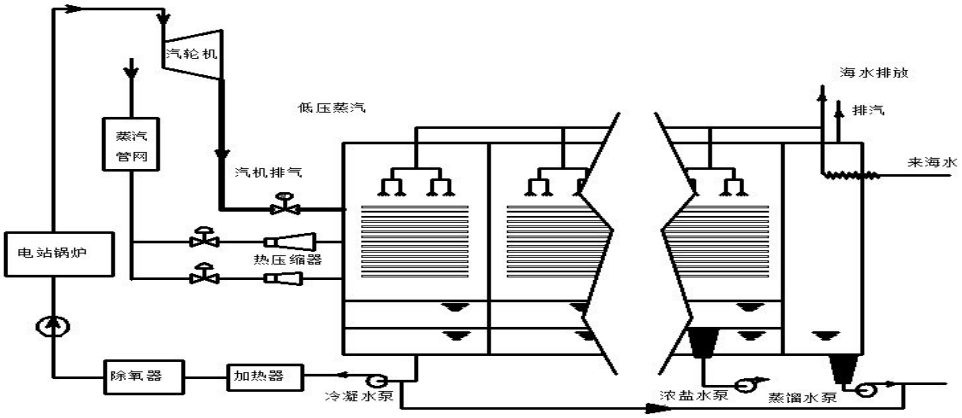


图 2.3.1 典型余能低温多效海水淡化技术工艺流程图

典型案例

【项目名称】

首钢京唐 2×12500m³/d 低温多效海水淡化配套 2×25MW 汽轮发电机工程

【项目概况】

通过一系列关键技术及关键装备的攻关，在位于河北省唐山市曹妃甸工业区的首钢京唐公司钢铁厂成功建成了 2×12500m³/d 低温多效海水淡化配套 2×25MW 汽轮发电机“水电联产”项目，该项目自 2011 年 10 月成功投产以来，运行稳定、可靠、高效，各项技术指标均达到或优于设计标准。通过测试海水淡化装置在对应不同蒸汽流量时，均运行良好，各负荷状态下完全满足设计要求。汽轮机运行稳定，各参数控制正常：发电量达到设计值，连续保持稳定状态；抽汽参数正常；系统操作简便、灵活；汽轮机与淡化装置之间的负压封闭式盲板阀可以有效切断，确保汽轮机停产检修时与海淡装置的带真空切断。

项目投产后不但满足了钢铁厂对高品质除盐水的需求，降低了对地表水源的需求与依赖，大幅降低了海水淡化的制水成本，提高了淡化水价的竞争力；同时还提高了钢铁厂的自供电能力，避免了燃气、蒸汽的放散，实现了能源的梯级利用，创造了较好经济效益和环境、社会效益。项目水平国际先进。

【工艺与装备】

该项目工艺设置为低温多效海水淡化装置直接使用汽轮机的排汽，排汽参数保持在 0.035±0.001Mpa，74±2℃的范围内，大大降低了海水淡化的制水成本，实现了能量的梯级利用，汽轮机停产检修时，海水淡化装置可继续转为“TVC”模式使用蒸汽管网高等级余热蒸汽运行，排汽不足时还可同时使用汽轮机排汽及管网蒸汽运行，大大提高了海水淡化装置的使用效率。

该项目中的低温多效海水淡化装置为 7 效；采用平行六面体形状，在国内属于首次使用，结构紧凑、节省空间，使热交换过程更加充分；单套装置配置双 TVC，可实现三种运行模式的切换；蒸发器外壳采用不锈钢板，换热管采用钛管及铜合金管，采用现场组装方式。配套汽轮机不设置凝汽器，其排汽直接进入海水淡化装置做为淡化汽源，该汽轮机属非标准汽轮机，进行了单独研发。汽轮机结构设计采用三维高端 CAD-CAE-CAM 辅助设计，建立数学模型，对各部件进

行了强度、振动、流动性能分析，由数控加工设备进行制造。另外，还通过优化汽轮机主汽、抽汽两个因素对排汽参数的影响处于允许范围内，汽轮机组的可调抽汽很好的解决了进汽量波动问题，抽汽应用至海水淡化装置维持真空喷射器等，不仅替代了高品质蒸汽，还保证了厂区蒸汽、燃气的零放散。

图 2.3.2 首钢京唐公司 2×12500m³/d 海水淡化装置图

图 2.3.3 首钢京唐公司海水淡化配套 2×25MW 汽轮发电机图

解决的关键技术问题

（1）发明利用汽轮发电机组末端乏汽进行海水淡化的工艺，该工艺创造性的将低温多效海水淡化与汽轮发电机组有机结合，利用发电后乏汽进行海水淡化，节省系统投资并大幅度降低了海水淡化制水及发电的成本；

（2）开发出低温多效海水淡化与汽轮发电机的联合运行的调控方法，将两套复杂的工艺装置通过控制手段有效联合，实现运行中系统各参数在高效区间运行，确保系统安全、稳定；

（3）开发出汽轮机末端负压排汽压力、温度控制系统；通过海水淡化装置末端抽真空系统保证联合系统运行压力稳定，通过喷水及蒸汽辅助加温闭合控制系统保证联合系统温度稳定，通过上述两种方式保证汽轮机负压排汽即海水淡化装置用汽的参数稳定；

（4）发明真空状态下海水淡化与发电子系统间的切断装置，确保发电故障时，海水淡化装置可在真空状态下与发电系统完全切断，进而投入“TVC”模式运行，保障供水，提高海水淡化机组的使用效率；

（5）开发出通过海水淡化制取高品质除盐水用于补充生产及调配污废水，节约淡水资源，并实现污废水零排放的耦合式盐平衡技术；

（6）创新设置抽汽式汽轮机组，将汽轮机抽汽应用至海水淡化装置维持真空喷射器等，替代高品质蒸汽，提高发电效率，并可通过提高抽汽量及发电量有效避免厂区蒸汽、燃气的放散。

【主要技术指标】

2 套 12500m³/d 低温多效海水淡化装置分别可在 40%-110%负荷间调整，满负荷情况下其造水比（GOR）可达到 10，单机产水量可在 521t/h 的设计水平，吨水电耗小于 0.8kWh，产品水电导率小于 10μS/cm；2 套 25MW 汽轮机排汽参数保持在 0.035±0.001Mpa，74±2℃的范围内；联合系统热效率为 82.23%。

【效益分析】

工程总投资约 27000 万元。

项目核心内容为 2×12500m³/d 低温多效海水淡化装置配套 2×25MW 汽轮发电机，自 2011 年 10 月投产以来，系统安全可靠，运行良好。由于蒸汽在汽轮机中透平做功后价值大幅度下降，使得海水淡化的蒸汽成本也大幅度下降，并节省

了发电凝汽器及冷却水系统建设的一次投资及其运行成本。经测算水、电两项年可产生经济效益约 9889.4 万元，项目回收期约 2.7 年。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：北京首钢国际工程技术有限公司

联系人：张岩岗

地址：北京市石景山区石景山路 60 号

邮政编码：100043

电话：010-88298667

E-mail：zhyg365@163.com

联系单位：首钢京唐钢铁联合有限责任公司

联系人：吴礼云

地址：河北省唐山市曹妃甸工业区

邮政编码：063200

电话：0315-8872001

E-mail：15832552001@139.com

4. 低温多效蒸馏海水淡化仿真培训平台

针对海水淡化装置大型化、超大型化发展带来的技能型员工短缺、培训技术手段缺乏问题，同时也为“海水淡化（低温多效系统）操作员”新工种培训提供技术保障，在“十一五”国家支撑计划项目课题“5 万 m^3/d 低温多效蒸馏海水淡化成套技术与装备开发”（2006BAB03A01）的支持下，首次提出海水淡化仿真培训理念，建立了分布式体系架构和动态特性建模方法，构建了大型装置虚拟样机和交互式支撑环境，开发了具有自主知识产权的低温多效蒸馏仿真培训软件，研制了全球首套面向 MED 装置的全数字化开发运行支撑平台，形成了涵盖教学、培训、研发、考核和诊断等功能的完整解决方案，实现了由传统培训模式向现代仿真培训模式的根本转变，填补了海水淡化领域仿真培训空白。

该成果具有前瞻性和创新性，在面向操作规程的工艺过程仿真、多学科多领域虚拟样机开发和综合集成、分布交互式仿真软件系统和三维虚拟环境构建等方面实现技术突破，处于国际先进水平。成果已获得国家版权局计算机软件著作权（著作权号：2009SR039477），并荣获 2013 年度海洋工程科学技术二等奖，成功承担发展中国家海水淡化管理研修班培训、海外工程现场调试指导以及国内外技术交流等任务，对提升我国海水淡化综合实力、推动国家职业资格证书制度以及扩大国际影响力方面具有重要的现实意义。

图 2.4.1 低温多效蒸馏海水淡化仿真培训平台

典型案例

【项目名称】

发展中国家海水淡化与综合利用管理人员研修培训项目

【项目概况】

采用自主开发的低温多效海水淡化仿真培训平台，进行低温多效蒸馏海水淡化技术的宣传展示、互动教学、技能培训及学术交流等，通过工艺原理演示、专业知识教育与考核、模拟操作以及故障处理手段，丰富培训手段，提高培训质量和效率，尤其是对发展中国家管理和技术人员的培训效率。

【工艺与装备】

以 2×4500m^3/d 低温多效海水淡化装置为原型，采用基于微机环境的开发和运行支撑为手段，通过蒸发器、冷凝器和闪蒸罐的数学建模和大型装置虚拟样机开发，实现 60%-110%变负荷工况的全物理过程模拟和各种故障表现形式。通过构建“虚拟工厂”，开发流量、液位等关键参数 PID 控制策略，自上而下地实现对工厂过程和控制逻辑的动态模拟。通过开发沉浸式虚拟操作支撑环境，实现仿真模型、三维虚拟环境与工艺控制仿真系统的无缝集成和交互操作，具备原理演示、虚拟操作、设备联动、事故演练、故障处理及考核管理等功能，满足不同培训对象、不同应用场合的培训需求。

解决的关键技术问题

（1）综合采用 HLA/RTI 作为分布式仿真支撑工具、虚拟场景生成和绘制工具作为渲染引擎、沉浸式交互设备作为人机接口，通过特定的虚拟场景实现了真实装置的三维重现，提高真实感和沉浸感。

（2）选择国际著名的开放源代码软件 Open Scene Graph（OSG）作为虚拟场景图形引擎，实现了大规模真实场景绘制的关键算法，开发出立体显示、多屏拼接和多通道人机接口支持功能，降低研发成本。

（3）开发了三维巡视、设备操作、设备定位、环绕观察和动画演示等五种操作方式，导航图窗口有漫游、跳转两种模式，以及着色显示和放大镜显示两种特殊显示方式，提高操作的快速性和便捷性。

图 2.4.2　技术交流及教学培训

【主要技术指标】

三维虚拟场景规模约 300 万面片，关键设备仿真模型在 1920×1080 分辨率下的显示速率 27 帧/秒；关键参数的稳态和动态精度符合工艺操作技术要求，误差保持在正常值的±2%以内；过程控制仿真系统的工艺流程、工况参数和报警阈值与装置实际控制系统相同，PID 控制回路衰减率 85%；系统各仿真节点保持高度的时空一致性，互操作性、可重用性和可扩展性强，最大可支持 255 个节点。

【效益分析】

项目总投资约 780 万元。项目的核心价值体现在：一是将低温多效海水淡化的关键设备使用、工况流程操作、典型故障处理、技能培训考核和日常维护管理等任务融合到沉浸交互式虚拟装置的操作控制中，避免由于误操作导致的设备损坏或人身伤害，同时不造成能源消耗和环境污染。二是 2010 年人保部批准设立的两个新工种，即“海水淡化（低温多效）系统操作员”和“海水淡化（反渗透）系统操作员”，已明确列入新修订的《国家职业分类大典》，项目实现了海水淡化培训模式的变革，为新工种的培训和鉴定提供了技术手段。三是项目成果可通过合作开发或技术服务等方式，用于国家职能部门、科研院所和海水淡化企业进

行职业技能鉴定、专业技术培训和合作交流等业务，对提升我国海水淡化综合实力、推动国家职业资格证书制度以及扩大国际影响力等方面意义重大，经济社会效益显著。

【应用情况】

平台 2009 年 7 月建成，自 2010 年起连续四年用于商务部组织的非洲国家、葡语国家、阿拉伯国家等发展中国家海水淡化与综合利用管理研修班，培训对象涵盖非洲、中东、拉美等 30 多个国家，共百余人次，极大丰富了培训手段，培训质量和效率显著提高。此外，还用于 INDRAMAYU 2×4500m^3/d、PACITAN 和 BANTEN 2×3000m^3/d 等海外工程调试指导，并多次接待各级领导视察、国内外海水淡化技术交流等，获得业界的好评。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

5. 低温多效蒸发海水淡化系统优化及设计技术

2006 年起，国华电力公司提出了万吨级 MED 海水淡化装置国产化的课题，大连理工大学 MED 海水淡化技术研发课题组受北京国华电力工程技术有限责任公司委托，完成了“万吨级低温多效海水淡化装置国产化技术开发”，基于该项技术成果建设成功的 1.25 万 m^3/d 低温多效蒸发海水淡化装置在国华河北沧东电厂投入日常运行，主要技术经济指标高于该厂引进的 SIDEM 公司装置，标志着我国已经初步掌握 MED 海水淡化装置设计制造技术。

工程化装置规模为 $100m^3/d$－$30000m^3/d$，产水水质 TDS≤5mg/L；吨水耗电＜1.5kWh；造水比≥10。

典型案例

【工程名称】

12500m^3/d 低温多效电水联产海水淡化工程

【项目概况】

2006 年，中国神华集团国华电力公司决定开展万吨级 MED 海水淡化装置国产化研发工作，大连理工大学 MED 海水淡化技术研发课题组受北京国华电力工程技术有限责任公司委托，完成了“万吨级低温多效海水淡化装置国产化技术开发”，基于该研究成果的国内首台万吨级 MED 海水淡化装置于 2008 年 12 月在河北沧州黄骅电厂建成出水，节能技术指标和经济性指标超过进口设备 20%以上，该项成果获得“2010 年度国家能源科学技术进步一等奖”。


国家能源科技进步奖

证 书

为表彰国家能源科技进步奖获得者，特颁发此证书。

项目名称：1.25万吨/天低温多效海水淡化蒸馏装置研发及在火电厂的应用

奖励等级：一等

获 奖 者：大连理工大学

证书号：NEA-2010-D-1-02-D06

图 2.5.1 国家能源科技进步一等奖证书

【工艺与装备】

本项目采用低温多效海水淡化技术，平行进料流程，通过 TVC 装置配置进口蒸汽参数，提高蒸汽利用效率。系统采用 4+2 效蒸发器，TVC 装置设计在第

四效之后。装置采用正三角形布管，根据黄骅电厂的蒸汽参数和海水条件选用最优喷淋密度，相比较引进的 SIDEM 公司的海水淡化设备，其更适用于我国的地理环境和海文参数。

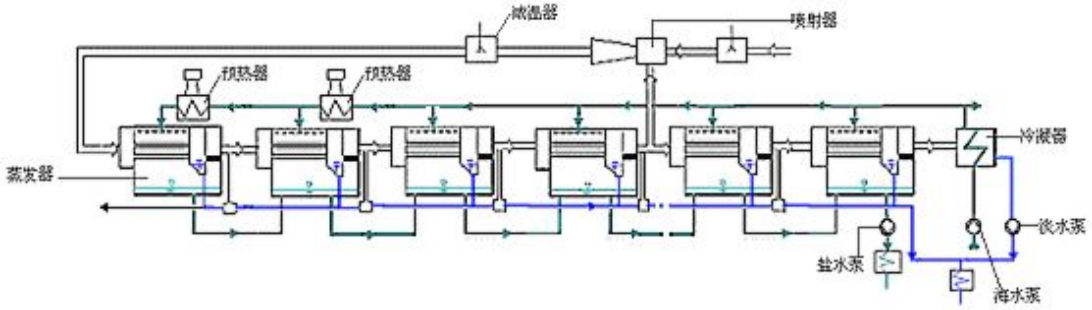


图 2.5.2 黄骅电厂 1.25 万吨/天国产海水淡化装置流程

图 2.5.3 河北黄骅电厂 1.25 万 m^3/d MED 海水淡化装置

解决的关键技术问题

（1）优化设计系统流程，根据实际情况设计蒸发器总效数、TVC 摆放位置等，确保了系统热能的高效利用，降低蒸发器面积，降低成本。

（2）优化设计进料方式，根据实际情况设计最适进料方式，如平行顺流、平行逆流、分段顺流、分段逆流等。

（3）优化设计蒸发器内管束布置方式，优化一二流程比例，经优化后传热系数增大可至 18%，换热面积得到有效节约。

（4）优化设计装置喷淋密度，节约换热面积 5%-10%。

（5）设计密封方式，根据不同位置、不同要求设计不同的密封装置。

【主要技术指标】

蒸汽压力 0.5MPa（绝压），温度 265℃，原海水温度 0-30℃，含盐量 32000mg/L

时的工况下，装置产水量不小于 12800m³/d，造水比 10.8，产品水 TDS≤5mg/L，吨水耗电<0.9kWh。

【效益分析】

工程总投资约 8750 万元，折旧年限以 20 年计，装置的设备利用率以 90％计，根据 2009 年 1 月至今实际运行情况，水电联产条件下，根据不同条件单位造水成本为 3.5-5 元/m³ 。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：大连理工大学能源与动力学院

联系人：沈胜强

地址：辽宁省，大连市，能源与动力学院 209 室

邮政编码：116023

电话：0411-84708464

E-mail：zzbshen@dlut.edu.cn

6. 低温多效蒸发海水淡化系统实验技术

为了提高我国蒸馏淡化装置研发水平，增强热法海水淡化技术的自主创新能力，我国建立了一系列先进的试验及测试装置。在传热技术、关键设备和部件、专用药剂、蒸汽压缩和材料防腐等方面做了深入研究，取得大量详实可靠的研究数据，为低温多效蒸馏海水淡化大型工程的优化设计、制造提供了依据。现介绍其三：

典型案例一

【项目名称】

热法淡化技术综合试验平台

【项目概况】

国内专业化的海水淡化综合实验研究平台，是发改委“海水淡化技术国家地方联合工程实验室(天津)”、科技部“国家海水利用工程技术研究中心”、“天津市海水淡化与综合利用技术工程中心”、“国家海洋局海水资源利用工程技术研究中心”等科技创新研发平台的重要组成部分。先后完成多项国家科技攻关、科技支撑计划、863 计划、海洋公益性行业专项以及天津市等地方重大科研项目，发布海水淡化相关标准 6 项，待发布国家标准 3 项，拥有专利 50 余项，为各级政府、企业用户提供海水淡化技术咨询 50 余项。

【工艺与装备】

实验平台的主要工艺与装备包括：

（1）低温多效海水淡化中试装置

图 2.6.1 低温多效中试装置

1）进行低温多效海水淡化实际工况下工艺流程、传热性能、控制参数优化研究；

2）测试蒸汽喷射泵、捕沫装置等关键部件的性能测试；

3）进行阻垢材料、防腐技术、装置密封和设备结构等方面的测试评价；

4）为新工艺、新材料、新技术的工程化应用提供验证和数据支撑。

（2） 传热综合实验平台

图 2.6.2 传热实验平台

1）集水平管降膜、垂直管升、降膜和单管蒸发于一体，工况控制和数据采集实现全自动；

2）主要用于测试评价各种传热管材（传统铜管、异型管、改性管以及铝合金、不锈钢、钛合金等）的传热性能；

3）可为海水淡化工程设计提供可靠的基础传热数据；

4）可用于对金属材料、非金属材料、防腐涂料、阻垢剂等研究内容进行动态模拟实验。

（3） 蒸汽热压缩实验平台

图 2.6.3 蒸汽热压缩实验平台

1）国内首个海水淡化系统专用蒸汽热压缩实验平台；

2）对低温多效海水淡化用各种类型(结构固定式、可调式、多喷嘴式等）蒸汽喷射泵的研发及测试；

3）基于此开发出的自主蒸汽喷射泵已成功用于多套 MED 海水淡化工程装置，打破了国外垄断。

（4）低温多效海水淡化喷淋实验平台

图 2.6.4 低温多效喷淋实验平台

1）采用先进的控制和数据处理系统；

2）用于热法淡化布液系统及部件评价及优选；

3）具有喷嘴高精度三维定位、数据自动采集和实时分析功能；

4）可研究测试单一喷嘴布液性能，也可对多个喷嘴的组合布液性能进行测试。

（5）汽液分离实验平台

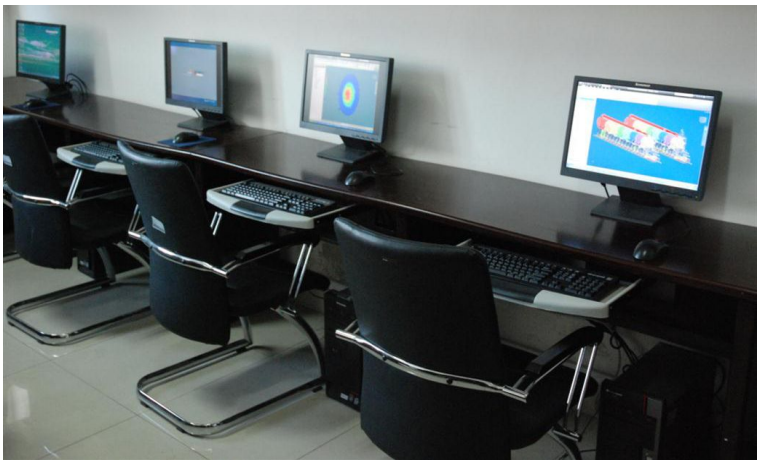
图 2.6.5 气液分离实验平台

1）可对不同结构（折流板式、丝网式）气液分离元件性能进行测试研究；

2）用于测试不同操作工况下分离效率；

3）采用可更换雾化喷嘴设计，通过选用不同规格喷嘴，可获得 10-200μm 不同粒径分布的液滴。

（6）低温多效海水淡化工程设计平台



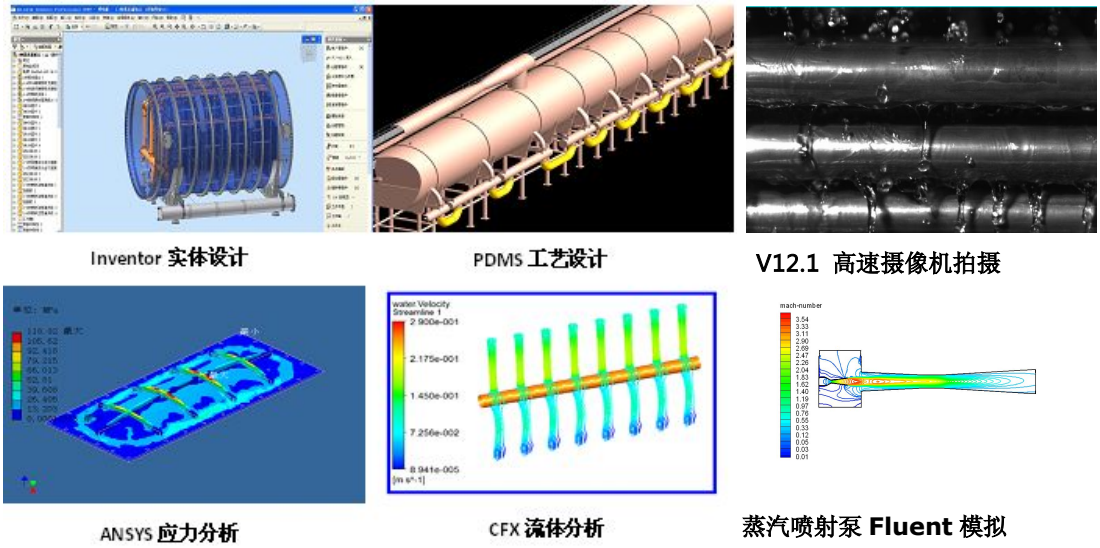


图 2.6.6 部分工程设计软件

1）采用升级及二次开发的计算、设计软件，各专业设计数据共享，减少重复工作，提高计算的准确性。如 MEDGYV2010、Matlab 等；

2）采用 SW6 、 Ansys 等进行蒸发器结构开发；

3）采用 CFX、Fluent 进行蒸汽及海水流体动力学分析；

4）采用 Inventor 进行装置三维机械设计；

5）采用 PDMS 完成装置管路三维设计；

6）采用 Promis.进行电气控制设计。

专用数据库的开发以及多软件平台交叉验证和三维设计输出为提高装置的可靠和稳定运行提供了技术保障。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市，南开区，科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

典型案例二

【项目名称】

大连理工大学热法淡化技术试验平台

【项目概况】

本实验室为辽宁省海水淡化重点实验室，以海水淡化核心技术为主要研究方向，2010 年立项建设，以教育部重 211、985 点院校大连理工大学为依托单位。

实验室现有研究人员 60 余人，其中教授 8 人，副教授 15 人，具有博士学位 25 人，实验室每年发表相关论文百余篇，培养博士、硕士十余人。近年来获得国家科技进步二等奖、国家能源科技进步一等奖等国家、省部级奖项多项。

【工艺与装备】

实验室的主要工艺与装备包括：

（1）五效低温多效海水淡化系统实验台

图 2.6.7 五效低温多效系统实验平台

实验室现有五效塔式低温多效海水淡化示范装置，其主要功能如下：

（1） 可模拟不同系统结构的海水淡化装置性能；

（2） 研究不同效间传热差异、优化效间温差；

（3） 优化蒸发器连接方式；

（4） 评估系统稳定性；

（5）水平管降膜蒸发综合性能测试实验台。

图 2.6.8 水平管降膜蒸发性能测试实验台

本实验台设计与实际工程蒸发器等大小，管长 8m，蒸汽由实验室 1t/h 锅炉提供，其主要功能如下：

（1） 对管内凝结传热与管外蒸发换热综合模拟；

（2） 研究管束间流动干涉，进而优化布管方式；

（3） 研究管束间蒸汽横掠、换热管内外温差等各主要参数的影响；

（3）水平管降膜蒸发传热实验台。

图 2.6.9 水平管降膜蒸发传热实验台

本实验台管内采用电加热，侧重于研究换热管外换热行为的主要影响因素及机理，其主要功能如下：

1）水平管降膜蒸发管外流动与传热影响因素测试；

2）水平管管内凝结流动与传热研究，研究换热管内换热行为的主要影响因素及机理；

3）研究降膜蒸发蒸汽掠过管束的流动过程及流动阻力。

（4）喷射器实验台

图 2.6.10 喷射器实验台

本实验台着重于喷射器相关性能研究，其主要功能如下：

（1） 喷射器内相变现象、内激波效应观测及研究；

（2） 可调式喷射器研发；

（3） 喷射器性能测试及评估；

（5）CFD 建模及模拟计算。

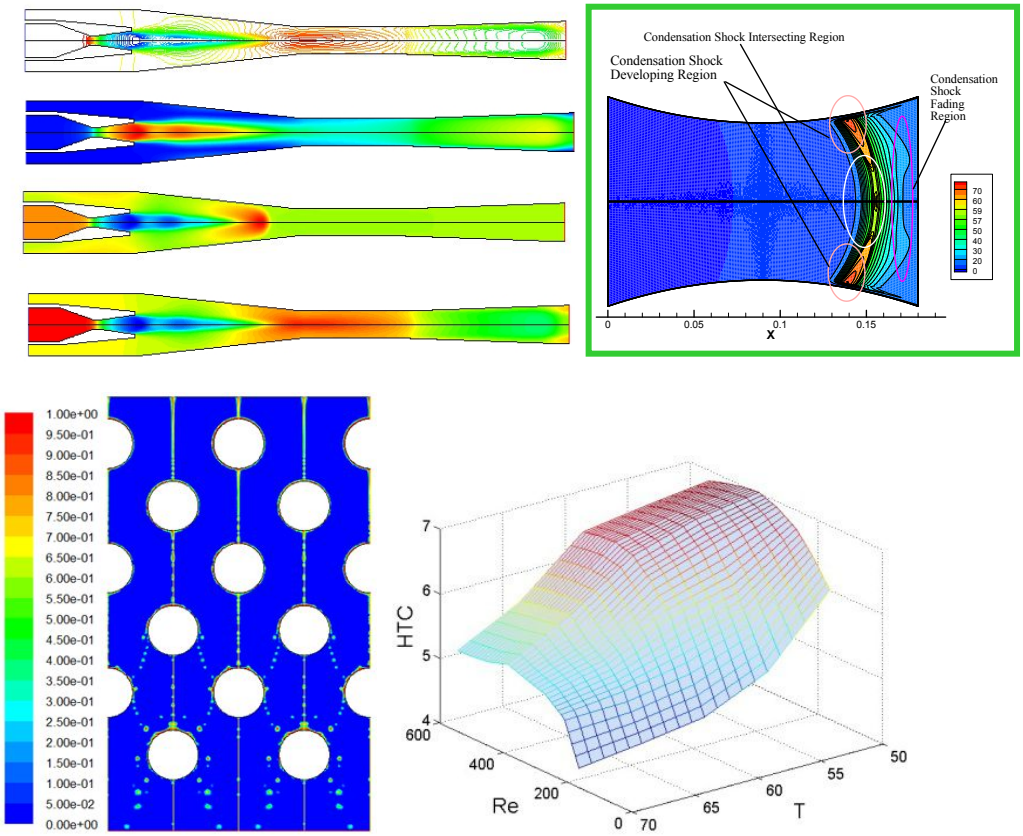


图 2.6.11 CFD 建模及模拟

本实验室支持有需求的 CFD 建模及模拟。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：大连理工大学能源与动力学院

联系人：沈胜强

地址：辽宁省，大连市，能源与动力学院 209 室

邮政编码：116023

电话：0411-84708464

E-mail：zzbshen@dlut.edu.cn

典型案例三

【项目名称】

竖管低温多效蒸发海水淡化成套技术与中试

【项目概况】

本项目是一种利用炼化企业低品位余热的低温多效海水淡化工艺方法及其成套装置（ZL201010621743.2）。受到国家自然科学基金项目 (50376005)、（50776012），大连市社会发展专项计划项目（2004B3SF033）；中石油集团公司科技开发项目（05B05302）、（2008D-4205-12）等的资助。项目针对预热的特点研发了热水蒸发型和蒸汽热泵型余热利用方式；脱氧脱碳深度预处理有效地减轻和抑制了污垢生长，降低腐蚀速率，减少了缓蚀阻垢剂的使用，延长了装置的使用寿命。同时能够提高首效蒸发温度，提高了造水比，实现热能的高效利用。采用竖管降膜蒸发方式，显著降低了占地面积；研发了铝黄铜降膜蒸发强化管、滴状冷凝传热表面、液体分布器和捕沫器等专有核心技术。2006 年在中石油大连石化公司完成了日产淡水 500 吨的工业化示范装置，所有工程设计和安装运行实现全部国产化，被评为中石油集团公司当年的十大科技进展项目。2013 年 5 月万吨级低温多效蒸发海水淡化国产化工艺包开发项目通过了集团公司组织的专家验收。本工艺可广泛地应用在海水淡化、苦咸水淡化、稠油污水回用以及环保废水处理等方面。特别在具有大量低温余热可供利用的场合具有较广阔的市场前景。

【工艺与装备】

本项目采用竖直管低温多效蒸发海水淡化技术。本项目是一种利用低品位余热的低温多效海水淡化工艺方法及其装置，并将工艺流程模块化，可灵活、便捷的进行大规模装置的设计和加工制造。本工艺流程包括过滤预处理模块、蒸发预热模块和 6 效蒸发（2 组蒸发塔，每组 3 效）模块和控制检测系统。本装置具有以下鲜明特点：（1）针对炼化企业的低压蒸汽和高温热水两种热源，开发了蒸汽热泵和热水型两种蒸发余热单元，提高了装备对不同热源的适应和匹配能力；（2）利用多介质过滤器、微滤、预热器和脱气塔组成的系统对海水进行深度预处理，脱氧脱碳预处理降低海水中含氧含碳量，有效地减轻和抑制了污垢生长，降低腐蚀速率，减少了缓蚀阻垢化学药剂的使用量，延长了装置的使用寿命，也减少浓

盐水排放带来的污染。同时能够提高首效蒸发温度，提高热能的利用效率，增加造水比，。将微滤增设在蒸发设备前，有效地实现布液系统的安保。（3）开发了铝黄铜强化传热管，实现竖直管内海水降膜蒸发，显著降低了装置的占地面积。（4）脱气冷凝器使用了本团队拥有的滴状冷凝专利技术。

解决的关键技术问题：

（1）海水深度脱氧脱碳预处理工艺技术，减少了化学试剂添加量的同时，减轻了设备的腐蚀结垢，为提高首效蒸发温度提供了基础。

（2）采用具有自主知识产权的强化传热技术，开发了铝黄铜螺纹降膜蒸发技术和滴状冷凝换热器，其换热器的体积小于同类装置 10~20%。

（3）开发了高效低阻捕沫装置，具有分离效率高、操作弹性大、受工况波动影响小的特点，充分保证了产品水水质的要求。

（4）开发了热泵型和热水型两类蒸发预热单元，提高了装置利用不同品位废热源的灵活性。

（5）建立了全流程的低温多效蒸发小型试验平台，可实现新技术研究和人员的培训。

图 2.6.12　500 m³/d 低温多效蒸发海水淡化示范工程

【主要技术指标】

根据热源供给情况，可采用热泵型和热水型两种工艺方案，原海水的 TDS

大约 36000~39000 ppm，产水水质：硬度≤3mg/L， TDS＜10mg/L；产水率≥70%。产品水的含氧量小于 20ppb，二氧化碳含量小于 2ppm。

【效益分析】

以 500 吨淡水/天低温多效蒸发海水淡化平台为例，工程总投资约 1500 万元。折旧年限以 15 年计，单位造水成本为 4.5 元/m^3 。

【应用情况】

本项目组再中试研究的基础上，已经完成了万吨级低温多效蒸发海水淡化国产化工艺包的研究，2013 年 5 月通过了中石油集团公司组织的专家验收。同时，利用电渗析浓缩技术和蒸发结晶技术，完成了低温多效蒸发海水淡化零排放工艺和成套装备的初步研究。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：大连理工大学化学工程研究所

联系人：马学虎

地址：大连市高新区凌工路 2 号

邮政编码：116024

电话：0411-84707892；13804957443

E-mail：xuehuma@dlut.edu.cn

三、海水淡化新技术

按照《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》、《国家“十二五”科学和技术发展规划》和《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》等，国家已有《海水利用专项规划》、《国务院办公厅关于加快发展海水淡化产业的意见，国办发〔2012〕13 号》、2012 年 8 月 14 日科技部《海水淡化产业发展“十二五”规划》、《高性能膜材料科技发展“十二五”专项规划》等，以及国家发改委《海水淡化产业发展“十二五”规划》等，指出要加强水资源节约，大力推进海水淡化和苦咸水利用，优化海洋产业结构，科学规划海洋经济发展，合理开发利用海洋资源，培育壮大海水综合利用产业。加强海洋基础性、前瞻性、关键性技术研发，提高海洋科技水平，增强海洋开发利用能力。此外海水资源是基础性自然资源和战略性经济资源，水资源可持续利用是关系到我国经济社会发展的重大战略问题。

目前，海水淡化是从海水中提取淡水的技术，当前的主流技术有热法和膜法两类。热法是利用热源将海水加热蒸发得到蒸汽，而后将蒸汽冷凝得到淡水，主要包括多级闪蒸（MSF）和多效蒸馏（MED）技术。膜法是利用水泵将海水增压后流经选择透过性高分子膜，淡水优先透过膜而得到淡水，主要是反渗透（RO）技术。过去十年中，海水反渗透（SWRO）膜技术发展势头强劲，目前主导了中东地区以外的海水淡化市场，但中东地区，由于当地石油资源廉价和习惯使用电水联产模式，热法仍是海水淡化技术的首选。

电化学海水淡化技术因其低成本、低能耗、无二次污染等优势越来越受到人们的重视。目前世界上尚无采用电化学技术实现海水淡化的成套技术设备，其核心技术为流过式电容去离子法 FTC（Flow Through Capacitor，又称 CDI: Capacitive Deionization）。CDI 是在电场力的作用下，直接将水中相对量很小的离子吸附分离出来，而不是把大量的水从原水中分离出来，因而无需高温、高压，所以能耗相对较低，且浓水少、产水率高。CDI 技术已在钢铁冶金、石化炼油等污水除盐处理中得到实际应用，并体现出优势，但应用于海水淡化尚无先例。

目前，主流的海水淡化过程在产生淡水的同时，也会有较大量的浓盐水产生。常规海水淡化项目中，海水的利用率在 30%～45%，海水的浓缩倍数通常为 1.5～

2，因此，海水淡化中会产生大量的较高浓度的盐水，对于周围的海洋生态环境将会产生一定的影响，特别是对于半封闭海湾或者海洋生态环境比较脆弱的区域，浓盐水排放及处理技术一直是大规模海水淡化应用中急需解决的课题。常规海水淡化浓盐水的排放及处理方式有：1）利用管道将浓盐水输送至较为开阔的海域排放，尽可能降低对近海区域生态环境的影响；2）尽量提高海水淡化设备排放的盐水浓度，将该浓盐水作为下游制盐工业的原料；3）利用蒸发--结晶--干燥等单元操作对海水淡化浓盐水进行处理，在回用浓盐水中淡水的同时，将其中盐分以固体结晶形式回收。同时浓盐水含有防腐剂、消泡剂、阻垢剂、灭菌剂、生物杀灭剂、酸洗剂等，成分复杂。因此，将纳滤和膜蒸馏等前沿技术应用于海水淡化浓盐水制氯碱工业用精盐水术，开发高效的海水淡化浓盐水的新技术势在必行。

1.电化学海水淡化成套技术设备

本项目以电凝聚-过滤进行预处理，以流过式离子吸附器(FTA：Flow Through Adsorption)、流过式电容器(FTC：Flow Through Capacitor，又称 CDI: Capacitive Deionization)进行海水淡化，以低电压电解臭氧进行消毒处理。该工艺与现有蒸馏、膜法（反渗透）等海水淡化工艺不同，可实现海水淡化和盐一体化生产，且海水淡化生产全程无化学药剂使用，并期望将产水达到饮用水标准，作为城市饮用水并入城市供水管网，产水成本降至 3.5 元/m³。通过示范工程的建设、运行，确定适宜的工艺条件及与之相适应的系列化电化学海水淡化成套技术设备。

电化学海水淡化的核心技术为流过式电容去离子法 FTC（Flow Through Capacitor，又称 CDI: Capacitive Deionization）。CDI 是在电场力的作用下，直接将水中相对量很小的离子吸附分离出来，而不是把大量的水从原水中分离出来，因而无需高温、高压，所以能耗相对较低，且浓水少、产水率高。

CDI 技术已在钢铁冶金、石化炼油等污水除盐处理中得到实际应用。目前电化学海水淡化技术因其低成本、低能耗、无二次污染等优势越来越受到人们的重视，但世界上尚无采用电化学技术实现海水淡化的成套技术。

淡化水色度（度）≤15；浑浊度（度）≤1；无异臭、异味；无肉眼观察可见杂物；pH 值 6.5～8.5；TDS/mg/L≤1000；细菌总数 CFU/mL ≤100；总大肠菌群、粪大肠菌群 每 100mL 水样中不得检出。淡化水从海水的提取率高于 60%；每吨水生产成本为 3.5 元；海水淡化吨水耗电量可控制在 2.0kWh 以下。以 10000 m^3/d 计，投资在 5000 万左右，占地 4800 m^2。

辽宁营口市沿海产业基地建成大型电化学海水淡化示范基地，为我国以海水为水源生产饮用水提供示范。

典型案例

【案例名称】

240 m^3/d 电化学海水淡化成套技术设备

【项目概况】

辽宁隆鑫高新能源开发有限公司开发了电凝聚-过滤、FTA-FTC 去离子、低电压电解臭氧消毒全新的海水淡化成套技术与设备。在试验室小试的基础上，已在辽宁营口市沿海产业基地建成可产水 240 m^3/d 电化学海水中试生产线，采用苦咸水、大连海水及营口近海海水水样进行了为期 6 个多月的中试探索。本项目拥有自主知识产权的电化学海水淡化技术设备，开创了我国电化学海水淡化装置大规模开发利用工业化的先河，填补了电化学海水淡化领域技术空白，标志着中国的海水淡化设备研发已达先进水平。

【工艺与装备】

本项目以电凝聚-过滤技术对海水进行预处理，去除悬浮固体（SS）、COD 以及部分金属离子等；以流过式离子吸附器 FTA、流过式电容器 FTC 进行海水淡化，去除 TDS，实现脱盐处理；以低电压电解臭氧进行消毒、深度净化处理，最终得到生活用淡水。同时利用超级电容器存储电能及可快速充放电的特性，实现对整套电化学海水淡化过程中残电回收。本项目核心技术-流过式电容去离子法 FTC（又称 CDI）与蒸馏、反渗透相比，所具有的优势体现在：CDI 是在电场力的作用下，直接将水中相对量很小的离子吸附分离出来，而不是把大量的水从原水中分离出来，因而无需高温、高压，所以能耗相对较低，且浓水少、产水率高。本项目所采用的技术工艺流程与部分装置设备见图 3.1.1 和图 3.1.2。

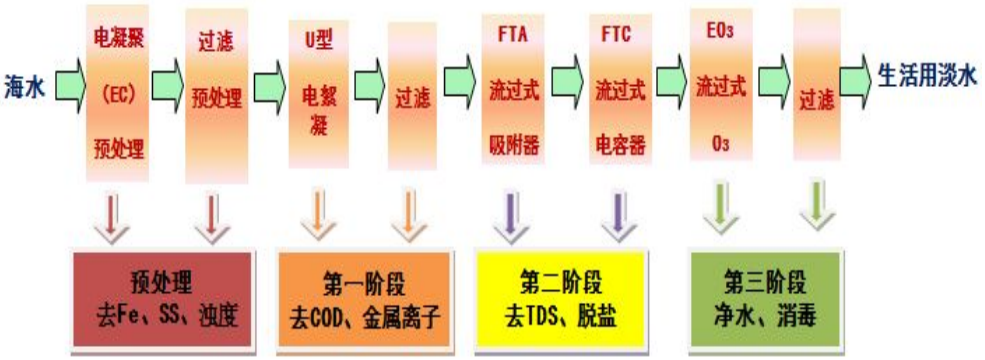
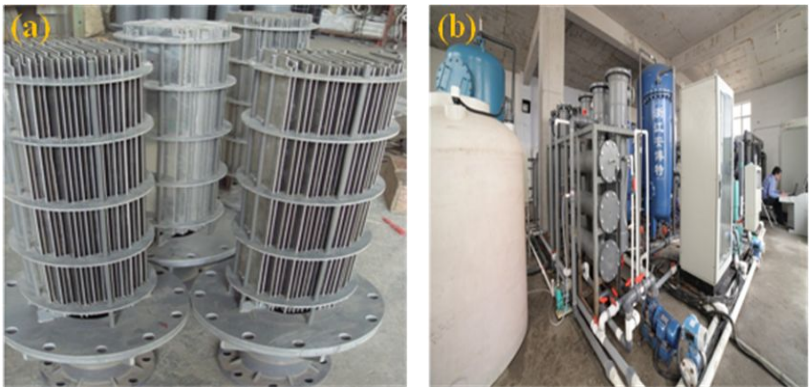


图 3.1.1 电化学海水淡化技术工艺流程图



a. 电凝聚（EC）单体内部实物图；b. 工程现场中试装置示意图

图 3.1.2　电化学海水淡化部分装置实物图

创新性和特色

1） 电凝聚-过滤预处理关键技术及设备。采用周期换向电凝聚-过滤工艺强化海水预处理,以期去除海水中的浊度、SS、Fe、Ca、Mg 等离子，并通过周期换向提高凝聚效率、防止极板钝化和省电。

2） 流过式吸附器（FTA）吸附材料与吸附去离子技术、设备。研究新型 FTA 吸附材料用于直接处理离子浓度高的海水（同时吸附海水中的 Na^+、Cl^-），用 FTA 吸附去离子工艺无须对海水原液进行稀释、调整 pH、或添加化学品（如阻垢剂、石灰、酸与甲醛等）。

3） 超大型电容去离子（FTC）工艺关键技术及设备。与蒸馏、反渗透相比，FTC 是在电场力的作用下，直接将水中相对量很小的离子吸附分离出来，而不是把大量的水从原水中分离出来，因而无需高温、高压，所以能耗相对较低。FTC 去离子的心脏是由许多片涂层防腐复合钛材料制成的平行电极，电极材料直接影响离子去除的效率。FTC 质量的优劣，水平的高低，关键在于电极之电双层建立（充电）与消散（放电）的效率。本项目主要开发钛-碳电极作为海水淡化工艺的电极材料，并采用双极性电极组装。

4） 超电容储存、回收 FTC 残电关键技术。本项目开发的超电容，具有快充快放和电流瞬间放大功能，因而可将从 FTC 上回收的残电，用于下一次充电（吸离子）作业。试验结果表明，用超电容可回收 FTC 电极 30%以上的残电，保障 FTC 以低功率运转，吨水耗电量在反渗透用电量的 1/3 以下，海水淡化本体装置的吨水耗电量可在 2kWh 以内。

5） 超大型 FTA-FTC 装置的设计与优化。在现有的吸附法与电容去离子装备中，还没有能满足大流量、快速海水淡化的超大型电容去离子成套装备。在工艺

条件确定的条件下，借鉴现有装备中成熟可靠的设备进行组合集成，研制新的工艺设备。

6） 低电压电解臭氧消毒、深度净化技术及设备。臭氧反应器由臭氧阳极+金属阴极+容器+直流电源组成。特制阳极在通低压（12V 以下）直流电后，将产生臭氧催化剂，在出水中直接产臭氧，臭氧生成率达到 30%，远高于传统的辉光放电（3000V，4%），用其进行消毒和进一步深度净化去除有害物。

【操作参数与运行结果】

已在辽宁营口市沿海产业基地建成可产水 240 m^3/d 电化学海水中试生产线，采用苦咸水、大连海水及营口近海海水水样进行了为期 6 个多月的中试探索，中试工艺装置可连续正常运行。同时海水淡化生产全程无化学药剂使用，并期望将产水达到饮用水标准，作为城市饮用水并入城市供水管网。

【效益分析】

电化学海水淡化的造水成本包括化学药品消耗、电力消耗、材料消耗、人工工资、福利及管理费用、维修费用、设备折旧费用以及银行贷款等。在进行造水成本分析时，工程的折旧年限以 15 年计，装置的设备利用率以 90％计，每度电价以 0.6 元计，根据 2012 年 4 月至今中试实际运行情况，海水淡化单位生产经营成本为 2.8 元/m^3，单位造水总成本为 3.45 元/m^3。以 10000 m^3/d 计，投资在 5000 万左右，占地 4800 m^2。以日产 5 万吨淡化水工程估算，总投资约 39636 万元。

【应用情况】

工程化装置规模为 1000 m^3/d～10000 m^3/d，产水水质 TDS≤1000mg/L；吨水耗电＜2.0 kWh；淡水收率达 70%以上。以上装置均可根据用户要求定制设计。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：辽宁隆鑫高新能源开发有限公司

联系人：贾晓东

地址：辽宁省营口市沿海产业基地新联大街东 1 号

邮政编码：115004

电话：0417-3888990

E-mail：757151999@qq.com

2.纳滤膜-膜蒸馏处理海水淡化浓盐水及其资源化综合利用技术

海水淡化和浓盐水综合利用技术相结合，不但可以解决淡水资源短缺问题，而且极大降低淡化和综合利用成本，提高经济效益，且可解决淡化后浓盐水排放问题，因而是未来海水淡化和综合利用的发展方向和趋势，将引领海水淡化和综合利用的发展潮流，技术的生命周期将会很长。本技术已有授权专利 2 件（1、一种聚合物中空纤维复合纳滤膜的制备方法，中国发明授权专利号：ZL 200510110158.5，2008.7.16；2、含六氟异丙醇基团的膜功能单体及其纳滤膜制备方法，中国发明授权号：CN102527265B，2013.11.27），已完成项目”海水淡化浓盐水资源化综合利用关键技术研究”上海市科技攻关项目 11DZ1205200-上海电站辅机厂有限公司和华东理工大学）。本项目采用纳滤膜-膜蒸馏处理海水淡化浓盐水及其资源化综合利用技术。

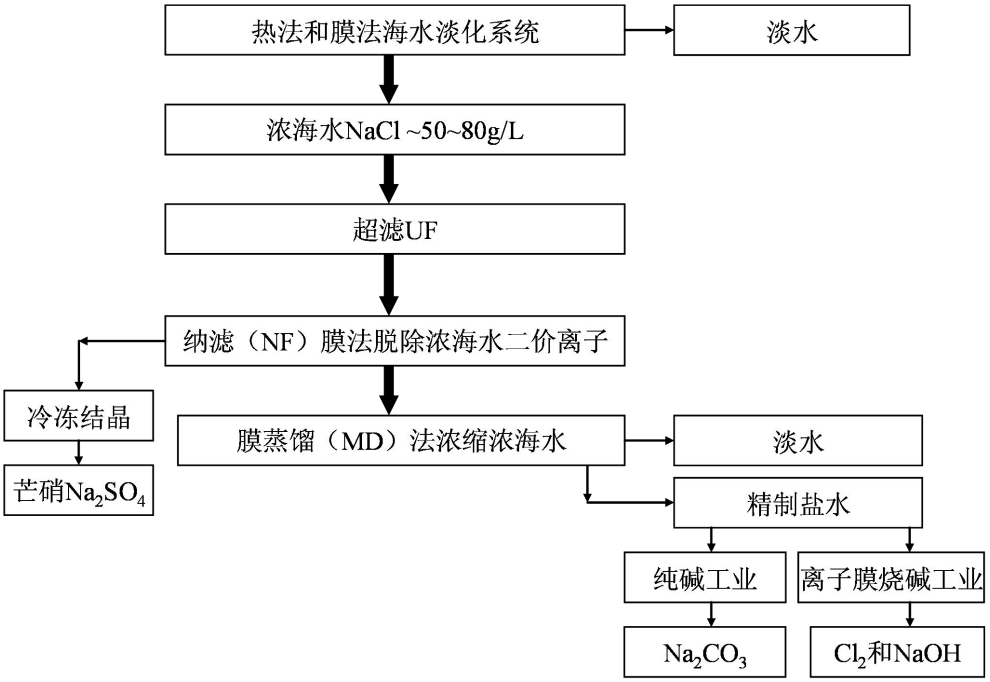


图 3.2.1 海水淡化浓盐水资源利用装置流程图

目前海水淡化浓盐水综合利用技术大都延续传统工艺和技术，采用制盐后老卤综合利用，相对独立，无法实现真正意义的零排放。当前国内从海水中提取锂和海水淡化浓盐水制氯碱工业用精盐水的技术几乎还是空白，因此，将纳滤和膜蒸馏等前沿技术应用于海水淡化浓盐水制氯碱工业用精盐水术，掌握高效的浓盐

水提取锂方法势在必行。采用图 3.2.1 海水淡化浓盐水资源利用装置，纳滤-膜蒸馏和经纳滤-膜蒸馏-结晶的盐水实测值见表 3.2.1，由此可知，本技术可满足离子膜电解槽的淡盐水质量指标要求。

表 3.2.1 离子膜电解槽淡盐水指标及纳滤-膜蒸馏和经纳滤-膜蒸馏-结晶的盐水实测值

离子膜电解槽的淡盐水	纳滤-膜蒸馏的盐水	纳滤-膜蒸馏-结晶的盐
NaCl 200～220g/L	NaCl 200～250g/L	NaCl 99.10%
SO42- ≤6.7g/L	SO42- ≤1.0g/L	SO42-≤0.30%
pH 7～11	pH 7～8	
ClO3- ≤ 20g/L	ClO3- ≤10g/L	
Ca2++Mg2+≤20ppb	Ca2++Mg2+≤15ppb	Ca2++Mg2+≤0.10%
SS≤1ppm	SS 测不出	水分≤0.5%

目前，国内外膜蒸馏规模佰吨级，主要采用聚丙烯(PP)、聚偏氟乙烯(PVDF)和聚偏氟乙烯(PTFE)等平板膜和中空纤维膜，而华东理工大学采用静电纺丝法开发了超疏水 PVDF（接触角大于 150°），应用于膜蒸馏过程。国内外高含盐纳滤膜规模仟吨级，主要采用聚酰胺(PA)、磺化聚醚砜(SPES)和含氟聚酰胺(F-PA)等纳滤膜，国外公司有美国 Film-Tec 公司、日本东丽公司、美国 GE 公司、美国 DOW 公司等，而华东理工大学开发了含六氟异丙醇基团的二胺单体，采用界面聚合法制备了具有优良耐氯性能的含氟纳滤膜，具有自主知识产权（含六氟异丙醇基团的膜功能单体及其纳滤膜制备方法，中国发明授权号：CN102527265B，2013.11.27）。

5～8%海水淡化浓盐水经过膜蒸馏过程浓缩到 18～22%盐水，其膜通量大于 15 L·m-2·h-1（70℃）；纳滤膜通量大于 50 L·m-2·h-1（0.6MPa，200g/LNaCl 溶液），SO42-截留率大于 95%；脱除离子膜电解槽淡盐水中硫酸根离子，SO42-浓度小于 1.0g/L，满足离子膜烧碱生产要求。

纳滤膜技术已上海氯碱化工股份电化厂（中试，2001~2002 年）、上海氯碱化工股份华胜公司的脱除每天 40 吨硫酸钠工程等获得应用；膜蒸馏技术可在海水淡化浓盐水、高含盐废水处理等方面应用。此外，均可根据用户要求定制设计。

典型案例

【案例名称】

每天 40 吨硫酸钠纳滤膜脱除离子膜电解槽的淡盐水工程

【项目概况】

通常，离子膜烧碱含盐少，不能随碱带走原盐带入和除掉盐水中的游离氯添加的 Na_2SO_3 生成的 SO_4^{2-} 离子，SO_4^{2-} 在系统中累积。进电槽的盐水中 SO_4^{2-} 浓度过高，对电解的影响主要有如下：1、在电解过程中，SO_4^{2-} 过高会阻碍氯离子放电，而使水中氧离子放电产生氧气，不仅导致氯气中氧量上升，而且因 SO_4^{2-} 含量过高，使反应加剧，缩短阳极使用寿命，同时还会使电解电流效率降低；2、盐水中 SO_4^{2-} 含量过高，使 Na_2SO_4 与 NaCl、NaOH 一起在膜各个部位沉淀析出，使膜有效面积减少、局部电流密度升高，且影响电流传导效果；3、当盐水含 SO_4^{2-} 过低时，虽然膜上析出的 Na_2SO_4 少，但此时 SO_4^{2-} 不利于有效阻止 I^- 等离子对膜的入侵，容易损伤膜并降低电流效率；4、由于 Na_2SO_4 的沉积，在通常较光滑的膜阴极表面形成隔离层，从而降低膜对 OH^- 反向迁移的阻挡能力。传统采用氯化钡沉淀除 SO_4^{2-} 离子，其对环境影响极大。

针对这一问题，上海氯碱化工股份华胜公司采用纳滤膜脱除离子膜电解槽的淡盐水中 SO_4^{2-} 离子，并配套 30 万吨离子膜装置，2005 年建成，用于满足离子膜装置的盐水要求。

【工艺与装备】

本项目采用纳滤膜技术。主要是针对离子膜电解槽出来的淡盐水（温度 70～90°C），其质量指标如下：NaCl 200～220g/L，pH 7～11，ClO^{3-} ≤ 20g/L，SO_4^{2-} ≤6.7g/L，$Ca^{2+}+Mg^{2+}$≤20ppb，SS≤1ppm。目标是脱除离子膜电解槽淡盐水中硫酸根离子，SO_4^{2-} 浓度小于 1.0g/L，满足离子膜烧碱生产要求。该技术已得到推广应用，并可应用与海水淡化浓盐水浓缩处理中。

图 3.2.2 纳滤膜法脱除硫酸根离子装置

创新性和特色

1） 开发出耐高温（70～90℃）和耐氧化纳滤膜；

2） 开发高性能纳滤膜性能（一价离子截留率小于 20%，二价离子截留率高于 95%）；

3） 设计与优化了纳滤膜与膜壳密封胶圈结构设计，提升密封性能；

4） 建立了纳滤膜法脱除硫酸根离子装置仿真培训平台，实现纳滤膜法脱除硫酸根离子装置、运行及管理人员的岗前培训、在岗培训、故障设置、事故演练、技能鉴定等目标，也可为国内外纳滤膜法脱除硫酸根离子进行演示和技术交流。

【操作参数与运行结果】

主要是针对离子膜电解槽出来的淡盐水（温度 70～90℃），其质量指标如下：NaCl 200～220g/L，pH 7～11，ClO^{3-} ≤ 20g/L，SO_4^{2-} ≤6.7g/L，Ca^{2+}+Mg^{2+}≤20ppb，SS≤1ppm。目标是脱除离子膜电解槽淡盐水中硫酸根离子，SO_4^{2-}浓度小于 1.0g/L，满足离子膜烧碱生产要求。自 2005 年装置建成以来，装置可连续正常运行。

【效益分析】

纳滤膜法脱除硫酸根离子的成本包括化学药品消耗、电力消耗、人工工资、福利及管理费用、维修费用、设备折旧费用等。在进行造水成本分析时，工程的折旧年限以 10 年计，装置的设备利用率以 90％计，其成本为 6.8 元/m³ 。以脱除每天 40 吨硫酸钠纳滤膜计，工程总投资约 1000 万元。

【应用情况】

纳滤膜技术已上海氯碱化工股份电化厂（中试，2001~2002 年）、上海氯碱化工股份华胜公司的脱除每天 40 吨硫酸钠工程等获得应用；膜蒸馏技术可在海水淡

化浓盐水、高含盐废水处理等方面应用。此外，均可根据用户要求定制设计。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：华东理工大学膜科学与工程研发中心

联系人：许振良

地址：上海市梅陇路 130 号

邮政编码：200237

电话：021-64252989

E-mail：chemxuzl@ecust.edu.cn

3.膜蒸馏脱盐技术

本技术方案利用错流过程提高了膜蒸馏的膜通量，利用多级/效蒸发过程实现了热量的高效循环利用，通过改善膜结构和预处理防止膜污染，通过过程控制实现高淡水产出比和排出液高浓缩比，通过技术集成形成完整的MD脱盐工艺和设备系统。该技术获得天津市科技支撑计划重点项目“节能减排膜蒸馏海水淡化研究与应用示范”（12ZCZDSF02200）和国家科技支撑计划 “膜蒸馏海水淡化技术研究”（2006BAB03A06）等资助。目前，已建起了初具规模的膜蒸馏疏水膜生产线、膜组件制造生产线、膜蒸馏成套设备生产车间以及较完善的测试系统。膜蒸馏的应用规模达到了百吨级水平、造水比≥5、浓水含盐量≥20%。

膜蒸馏（MD）是一种将膜技术与蒸发技术相结合的新型脱盐技术。在MD过程中既有常规蒸馏的蒸汽传质与冷凝过程，又有分离物质扩散透过膜的膜分离过程，膜蒸馏是一种结合了蒸馏过程的膜过程。MD技术特征包括：（1）非挥发性物脱除率高；（2）盐浓度对MD效率影响相对较低，浓缩比高；（3）良好的抗污染性能，物料水预处理要求相对低，MD水质适应性较强；（4）MD水处理过程在接近常压及较低温度（60～≤100℃）下进行；（5）膜、膜组件及主要设备由高分子材料制备，因而能够处理具有腐蚀性的酸碱盐等工业废水；（6）蒸发效率高、能够利用低温热源，如：太阳能、地热、工业废热、排空天然气、热电厂/锅炉乏汽等；（7）MD采用组件化设计，设备体积小、集成化程度高、易于维护和操作；（8）MD能同其它脱盐技术（RO、MED等）联用以提高整个系统的效率；在有低温热源可利用的情况下，极具成本优势。

膜蒸馏脱盐技术是目前国际国内研究的热点，在高浓盐水体系的脱盐方面具有独特优势。迄今膜蒸馏技术还没有大规模产业化应用。在国际上，世界主要发达国家和跨国公司加大了在膜蒸馏方面的研发力度和投入（比如美国、德国、韩国等国家，GE、凯发等公司曾经和正在同天津大学等合作），试图抢占深度脱盐领域的技术与市场先机。在国家和地方科技计划的支持下，近几年我国的膜蒸馏技术研究取得了质的进步，突破了许多技术难点，包括膜与膜组件生产制造、膜蒸馏节能工艺、膜蒸馏系统设计、装配与运行等，在脱盐方面已显示出了可预期的规模化应用前景。目前，膜蒸馏在反渗透浓水深度脱盐淡化、高盐废水脱盐与

资源化、卤水脱盐与淡化等方面获得了应用，取得了很好的成效。在海水淡化方面，由于缺乏投入，膜蒸馏应用研究进展相对较慢。总体上，我国在膜蒸馏的研发方面处于世界领先水平。

原海水含盐量 35000mg/L，海水进水温度 90℃左右，装置产水量 80～100 m^3/d,造水比≥4～5,产品水 TDS≤15mg/L,浓水含盐量 15～20%,吨水耗电<2kWh。

膜蒸馏脱盐技术可在海水淡化浓盐水、高盐废水资源化方面进行了较多的应用。

典型案例

【案例名称】

膜蒸馏海水淡化装置系统

【项目概况】

天津碱厂是我国大规模海水冷却的先行先试者，海水经过冷却工艺后其盐度和其它化学成分含量都有较大增加（特别有机物），直接排放会造成污染方面的担忧。将其淡化产生淡水是一种大胆尝试。在多方面的支持下，一个百吨级的膜蒸馏海水淡化系统于 2011 年建成出水。本项目是目前国际国内最大规模的膜蒸馏海水淡化装置，标志着我国的膜蒸馏海水淡化设备研发已达到国际领先水平。

【工艺与装备】

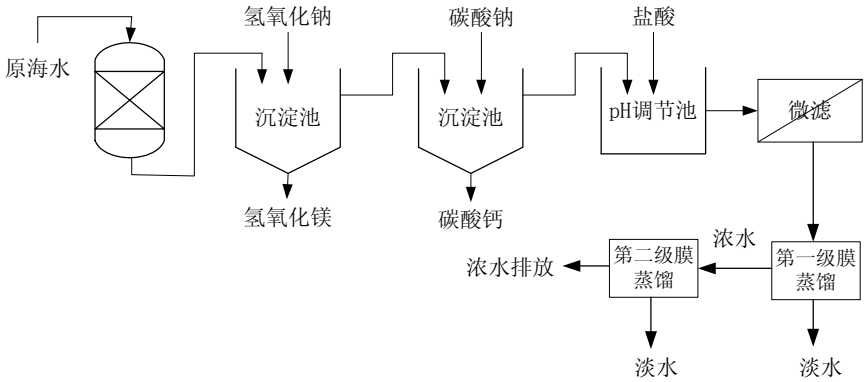


图 3.3.1 膜蒸馏海水淡化工艺图（两级膜蒸馏）

本项目采用自主研发膜蒸馏集成系统技术。通过具有完全自主知识产权的错流设计显著提高了膜通量和膜的抗污染性能，即提高了膜蒸馏效率；将多级/效

蒸的技术原理应用于膜蒸馏过程实现热量的高效循环利用，以降低热成本；利用TIPS 中空纤维膜和膜表面的改性提高膜的抗污染性能，通过科学的过程控制实现高淡水产出比和排出液高浓缩比，通过技术集成形成了完整的 MD 海水淡化工艺和设备系统。

图 3.3.2 膜蒸馏海水淡化装置图

创新性和特色

1）开发出 TIPS 膜蒸馏用疏水 PVDF 中空纤维膜，具有较高强度和均匀的孔径结构；

2）开发出错流式膜组件，并进行了放大，尽可能克服了膜蒸馏组件的放大效应，保证了膜蒸馏过程具有较大的膜通量；

3）开发出导热中空纤维及其换热组件，并应用于膜蒸馏过程的热量回收；

4）开发出适用于 MD 工况的多级/多效式热量循环利用工艺，即利用前段较高温度的蒸汽加热后段较低温度的海水，如此循环达到了热量的循环利用，显著降低了 MD 的热成本；

5）根据 MD 海水淡化的规律设计出两级 MD 海水淡化工艺，实现海水淡化过程的优化配置。

【操作参数与运行结果】

原海水含盐量 35000mg/L，海水进水温度 90℃左右，装置产水量 80～100

m³/d,造水比≥4～5,产品水 TDS≤15mg/L,浓水含盐量 15～20%,吨水耗电<2kWh。

【效益分析】

MD 处理 100m³海水产生 85m³淡水和 15 吨氯化钠含量 20%的浓盐水；淡水（蒸馏水）价格按照 5 元/m³，20%氯化钠浓盐水（供电解车间）的价格按照 100 元/m³计，总收益约为 1900 元；100m³MD 海水淡化的直接运行费用成本（包括化学药品消耗、电力消耗、热力消耗（废热）、人工成本等）约为 1400 元。则直接收益为 500 元/100m³海水，即处理 1m³海水的收益为 5 元。

【应用情况】

膜蒸馏脱盐技术可在海水淡化浓盐水、高盐废水资源化方面进行了较多的应用。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：天津大学化工学院

联系人：李保安

地址：天津市，南开区，卫津南路 92 号

邮政编码：300072

电话：022-27404732

E-mail：libaoan@tju.edu.cn

4.兆瓦级非并网风电海水淡化系统

风能的自然特点是风速变化大，能量供应不稳定，具有间歇性，波动性。不稳定风电一般采用以下两种供电方式变换为相对稳定能源来适应海水淡化系统的额定需求，一是风电与储能系统（如蓄电池、抽水蓄能、空气压缩储能、飞轮储能等）结合，波动的风电经储能系统进行存储后，再经过适当变换为负载稳定供电。这种方式需要全功率配备储能系统，不仅成本高昂，而且储能系统经过一次蓄电放电循环，能量损失约 30%左右，风电利用效率低；二是风电和网电采用切换方式互补供电，当风电电压高于设定切换电压时，网电断开，只使用风电。此时由于后端负载功率有可能大于风电功率，单靠风电不能完全满足负载要求，就会导致负载工作失常，甚至来回切换，引发设备故障。而当风电电压低于设定切换电压时，则断开风电全部使用网电，又造成风电能量的浪费。

非并网多能源协同供电关键技术将风电与海水淡化系统直接耦合。针对风电的波动和间歇特性，重点解决两方面的问题：一个是在风电较小时，如何与其他能源协调供电，使系统稳定运行；另一个是海水淡化系统的多工况优化控制，以便适应风电的波动特性，维持负载能耗基本不变。非并网多能源协同供电关键技术与国内外现有技术性能比较如表 3.4.1 所示。

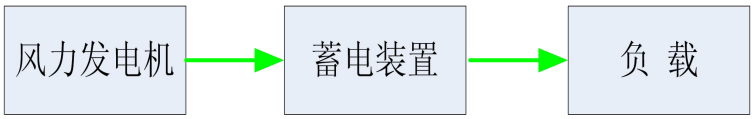
表 3.4.1 非并网多能源协同供电关键技术与其它系统性能比较

系统性能	风电并网	风/蓄/网互补	风/网切换互补	风/网智能互补
供电模式	并网	离网	离网	非并网
稳压稳频 稳相位装置	需要	不需要	不需要	不需要
切换装置	需要	需要	需要	不需要
切换时间	≈0.1s	≈0.1s	≈0.1s	不需要
蓄能装置	不需要	需要	不需要	不需要
风/网同步	不可以	不可以	不可以	可以
风电利用效率	一般	较低	较低	较高
系统可靠性	一般	较低	较低	较高

系统性能	风电并网	风/蓄/网互补	风/网切换互补	风/网智能互补
系统成本	高	较高	一般	较低
对电网冲击	一般	较大	较大	很小

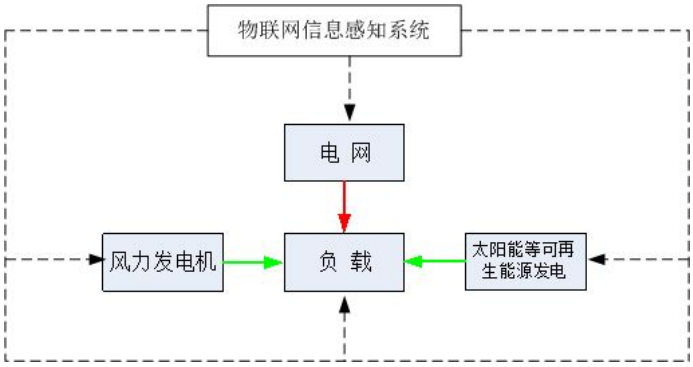
本项目基于非并网模式，不需要传统供电模式的稳频、稳压、稳相位、蓄能等装置，可以实现风/网同步供电，提高了风电的利用效率，增强了系统的可靠性，同时也大幅度降低了系统成本和对电网的冲击。

“非并网风电”是指风电系统的终端负荷不再是传统的单一电网，而是通过必要的技术创新与集成，直接应用于一系列能适应风电特性的高载能产业及其它特殊领域（如电解铝工业、氯碱工业、海水淡化、电解水制氢、抽油机等）。非并网风电系统基本构成包括：风力发电机、智能控制系统和高载能负载（图 1.c）。非并网风电与离网、并网型风电的区别如图 1 所示。



a、风电离网型接入模式

b、风电并网型接入模式



c、非并网风电接入模式

图 3.4.1 非并网风电与离网、并网型风电的区别

风电的这种非并网模式，将风电与负载直接耦合为一个“新系统”，其优势体现在：（1）风电直接利用，回避风电上网电压差、相位差、频率差难以控制的问题，绕开电网这一限制风电大规模应用的瓶颈，也避免了风电并网对电网系

统的影响；（2）突破终端负荷使用风电的局限，使大规模风电在非并网风电系统中全部利用；（3）由于没有了上网条件的束缚，风力机结构得到优化，大幅度降低了成本。

典型案例

【案例名称】

兆瓦级非并网风电海水淡化系统

【项目概述】

本技术的研发得到了国家 973 计划“大规模非并网风电系统的基础研究”（2007CB210300）和国家科技支撑计划“兆瓦级非并网风电海水淡化系统研发及先导性示范”（2013BAB08B04）的资助。2011 年，在江苏沿海建成非并网风电日产 100 吨淡水的风电海水淡化示范工程，2014 年 3 月 28 日建成非并网风电单台兆瓦级风机日产 10000 吨淡水示范工程，该成果在世界范围内属于技术首创，意味着我国新能源技术实现重要突破。

授予发明专利 7 项，2011 年获江苏省科学技术奖二等奖（非并网风电海水淡化系统）。

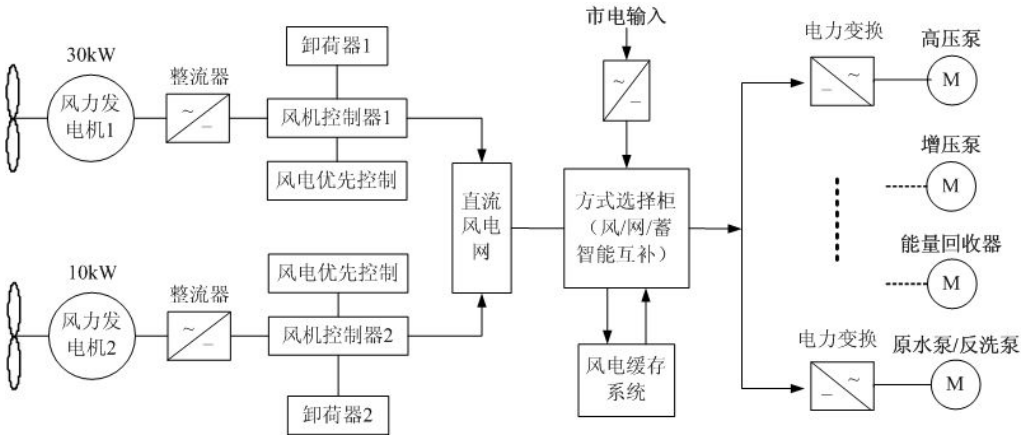
【工艺与装备】

1、非并网风电日产 100 吨海水淡化系统

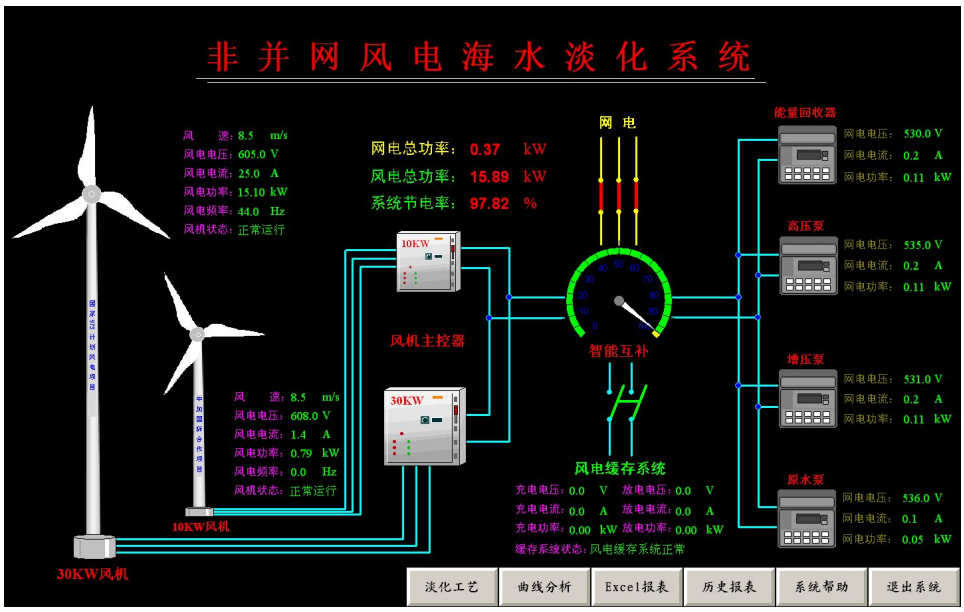
2011 年在江苏沿海大丰市建立非并网风电日产 100 吨海水淡化系统示范基地，如图 3.4.2 所示。

图 3.4.2 非并网风电日产 100 吨海水淡化系统大丰示范基地现场图

大丰非并网风电海水淡化系统由 30kW 和 10kW 风机、风机控制器、风网智能控制器、风电缓存系统以及新型膜法海水淡化系统等组成。系统结构图如图 3.4.3 所示。



a. 非并网风电日产 100 吨淡化海水系统结构图



b. 非并网风电海水淡化监测系统风网协同供电界面

图 3.4.3 非并网风电海水淡化系统结构示意图

风机所发风电组成风电直流网。风电、网电和风电缓存系统在方式选择柜实现风网智能互补和风电直接供电模式选择。智能互补后为原水泵、反洗泵、增压泵、高压泵和能量回收器等提供电力。

在示范工程运行过程中，大丰市疾控中心两次去现场取水样分析，大丰市自来水公司到现场取水样并做 1:1 混合使用试验。结果表明，所生产的淡化水清澈透明，各项指标均达到国家饮用水标准。

图 3.4.4 非并网风电海水淡化系统示范基地全景

2、非并网风电单台风机日产万吨海水淡化系统

本示范工程的投资合作方为哈电集团（哈电发电设备国家工程研究中心有限公司）和江苏丰海新能源淡化海水发展有限公司，大丰市还为此成立了新能源淡化海水产业示范园，并为项目组专设研发中心和场地，调集精兵强将从人力、物力与财力予以支持。

项目采用金风集团生产的单台 2.5MW 低风速风机并改造成非并网低风速专用风机。电气控制方案设计主要涵盖了风力发电机组、电力系统接线方式、电力传输方式、海水淡化厂厂用电母线连接方式、保证系统稳定运行采取的措施和控制原则。为适应非并网风电的特性，保证海水淡化装置运行调整的灵活性，本课题兆瓦级非并网风电淡化海水方案设计了 5 套，因赶工期改为 3 套并部分电动机负载加装了变频装置，每套海水淡化装置可以分别独立运行。每套装置在一定的范围内可以连续调整，从而改变出水量，但不会改变电流效率和淡化水的质量。

根据海水淡化过程特点，基于该电力变换控制系统，风电既可以独立，也可以与蓄电池、柴油机、网电、太阳能发电等协同为海水淡化装置供电。本方案为 100%采用风电进行运行，同时通过分组运行和蓄电池的协调供电使整个系统运行稳定，实现了所有产生动力为 100%风电提供。其控制策略如下：

1）当 P 风＞P 淡化时， P 风为风力发电机组的实时输出功率， P 淡化为海水淡化系统的额定功率，此时风力发电机组向海水淡化系统 3 组 RO 膜渗透产水机组供电和为蓄电装置充电直到充满为止，蓄电装置不放电， 3 组 RO 膜渗透机组全部运行；

2）当 P 风=P 淡化时，风力发电机组向海水淡化系统 3 组 RO 膜渗透产水机组供电，此时蓄电装置不充电不放电，3 组 RO 膜渗透机组满负荷运行；

3）当 P 风＜P1 组淡化时，保持风力发电机组向任意 2 组 RO 膜渗透机组供电，2 组 RO 膜渗透机组满负荷运行；

4）当 P 风＜P2 组淡化时，将所述 2 组 RO 膜渗透机组逐组关闭，保持风力发电机组向任意 1 组 RO 膜渗透机组供电， 1 组 RO 膜渗透机组满负荷运行；

5）当 P 风＜P3 组淡化时，风电和蓄电池协同为 1 组 RO 膜渗透机组供电，1 组 RO 膜渗透机组满负荷运行。当 P 风＜P1 组淡化额定功率约 1/2 时，海水淡化系统停止运行，风力发电机组为蓄电装置充电。

风电逐步增大时，按照 1-5 的控制策略反向进行。

本项目从调试、竣工至今已 5 个月，各项指标均达到预期效果。

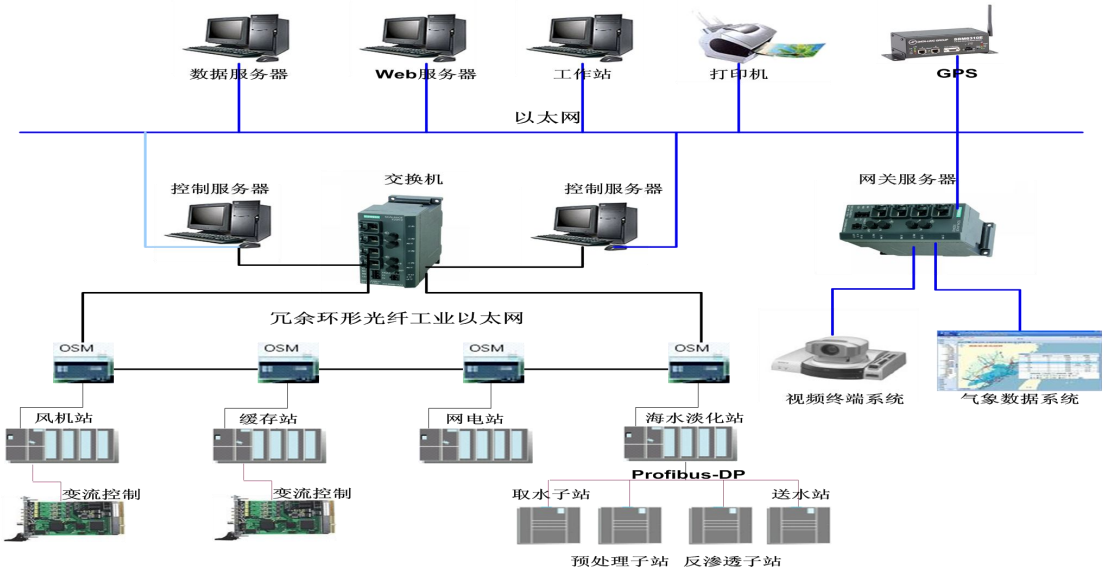


图 3.4.5 非并网风电海水淡化监控系统结构图

图 3.4.6 大丰市非并网风电日产万吨淡化海水示范项目生产车间

图 3.4.7 灌装车间与生产出的海水淡化水

【操作参数与运行结果】

在 100 吨示范工程运行过程中，大丰市疾控中心两次去现场取水样分析，大丰市自来水公司到现场取水样并做 1:1 混合使用试验。结果表明，所生产的淡化水清澈透明，各项指标均达到国家饮用水标准。

【效益分析】

该项目解决了风电与海水淡化系统耦合、运行规律及耦合途径等科学问题，并将成果转化为多项创新性关键技术。目前由中国盐业集团和中国药业集团投资参股，负责淡化海水的市场营销。每吨水装 2300 瓶商品，每瓶水成本 5 厘钱，市场销售价根据不同区域约为 1.5～2.1 元/瓶，只要销售产能的 30%，即可当年收回投资。同时，中国药业集团已征地 200 亩用于建设国内最大的大输液生产基地；哈电集团正在建设产业高端装备制造业基地；中国盐业集团和我院已正式签订协议，合作开展浓盐水零排放综合利用。

【应用情况】

2011 年，江苏省宏观经济研究院，江苏风盛海水淡化科技有限公司以及南京大学“江苏省非并网风电与高载能工程实验室”在江苏盐城大丰建成日产 100 吨淡水的风电海水淡化示范工程。

2014 年 3 月 28 日，建成非并网风电单台兆瓦级风机日产 10000 吨淡水示范工程，首个兆瓦级非并网风电淡化海水项目成功调试出水。该项目由江苏省宏观经济研究院作为技术支撑单位，哈电集团对项目总承包。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：江苏省宏观经济研究院

联系人：顾为东

地址:江苏省南京市鼓楼区北京西路 70-1 号 3 楼

邮编：210024

电话：13505155607

Email:guwd@zjzw.net

四、海水综合利用技术

海水综合利用系指海水的直接利用和海水化学资源利用，其中，海水直接利用主要是海水替代紧缺的淡水用于工业冷却水、海水脱硫和大生活冲厕用水等，海水化学资源利用主要是开发海水中的钠、钾、镁、溴、锂等急需的化学矿物资源。

国外大量采用海水作为工业冷却水，年利用量已经超过 7000 亿 m^3，海水循环冷却系统单套最大循环量超过 10 万 m^3/h，香港海水冲厕年替代淡水 2.7 亿 m^3，已形成了成套产业化技术标准和规范；每年从海洋中提取海盐 6000 万吨、镁化物 260 多万吨、溴素 50 万吨，海水提锂、铀等新技术已进入工业化应用开发阶段。

我国政府高度重视海水综合利用新技术的研发，在《国家中长期科技发展规划纲要》中，“海水直接利用技术”和“海水化学资源利用技术”均列为“水和矿产资源”领域的优先主题。国家科技部将这两项技术列入“九五”、“十五”和“十一五”科技支撑（攻关）计划给予重点支持。

经过多年的产学研联合攻关，我国在海水循环冷却、大生活用海水关键技术研发和示范工程建设方面取得重大进展，建成了 10 万 m^3/h 海水循环冷却示范工程、46 万 m^2 大生活用海水示范小区；我国海盐产量达 3000 万吨，浓海水提溴产能为 15 万吨，海水提钾在国际上率先实现了技术经济突破并已建成国际上首个万吨级海水提钾工程，浓海水提取镁、海洋无机盐功能材料和浓海水综合利用集成等新技术开发均取得了阶段性进展，初步形成了我国海水综合利用自主技术与标准体系，为促进海水资源综合利用新兴产业的发展提供了有力支撑。

1.海水循环冷却成套技术

海水循环冷却技术，是以原海水为冷却介质，经换热设备完成一次冷却后，再经冷却塔冷却、并循环使用的冷却水处理技术。海水循环冷却技术是上世纪七十年代以来发展起来的一种环保型节水技术，其技术基础是海水直流冷却和淡水循环冷却技术的结合，其关键技术总结为“三剂一塔”，即海水缓蚀剂、阻垢剂、菌藻抑制剂、海水冷却塔技术。海水循环冷却技术在国外已经成熟，在美国、墨西哥、德国、西班牙等国得到了较广泛的应用，应用行业涉及电力（火电）、核电、化工、石化、冶金（钢铁）等领域。

我国海水循环冷却技术起步较晚，但发展速度较快。“八五”起步开展相关研究和应用探索，“九五”完成百吨级海水循环冷却中试研究。特别是国家“十五”、“十一五”科技支撑计划支持以来，海水循环冷却技术取得了重大突破。2004年在天津碱厂完成了化工行业国内首个千吨级海水循环冷却技术工程示范，在深圳福华德电厂完成了电力行业国内首个万吨级海水循环冷却技术工程示范；2009年在浙江宁海电厂完成电力行业国内首个10万吨级海水循环冷却技术工程示范。在这些具有里程碑意义的标志性工程中，通过科技攻关有效地解决了海水循环冷却系统有关海水腐蚀、结垢、生物附着和海水冷却塔的盐沉积、盐雾飞溅等问题，成功实现了以海水代替淡水作为工业循环冷却水、在海水冷却水系统使用普通碳钢、比海水直流冷却排污量降低95%以上利于环保等多项创新，有关技术填补国内空白，总体技术达到国际先进水平。海水循环冷却水处理技术指标达到或优于国家标准《工业循环冷却水设计规范》(GB50050-2007),满足《海水循环冷却水处理设计规范》（GB/T 23248-2009）。其中“海水循环冷却技术研究与工程示范”获2006年海洋创新成果一等奖、2007年度国家科学技术进步奖二等奖。

截止2012年底，我国已建海水循环冷却工程8个，在建和拟建项目16个，总规模约110万m^3/h。其推广应用的经济效益、环境效益、社会效益十分显著，应用前景广阔。

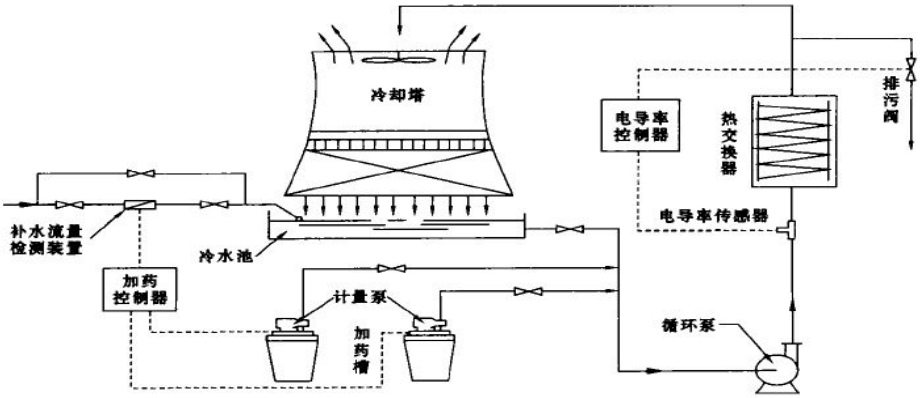


图 4.1.1 海水循环冷却技术工艺流程示意图

典型案例

【案例名称】

浙江宁海电厂 10 万 m³/h 海水循环冷却示范工程

【项目概况】

项目由中国神华能源股份有限公司等投资建设，由国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所提供循环冷却水处理技术支撑，是国家科技支撑计划“10 万吨级海水循环冷却技术与装备研发”课题的示范工程。2005～2009 年相继完成工程可研、设计、建设、水处理方案设计和成功投运。项目实施标志着我国海水循环冷却在关键技术和规模上与国际全面接轨，技术水平进入国际先进行列。项目荣获 2006 年海洋创新成果一等奖、2007 年国家科技进步二等奖等多项奖。

【工艺与装备】

宁海电厂一期工程装机 4×600MW 亚临界燃煤机组冷却系统采用海水直流冷却，二期扩建工程装机 2×1000MW 超超临界燃煤机组冷却系统采用海水循环冷却，与其配套的海水循环水系统主要包括：补水取水泵站、净化站、循环水泵、冷却塔、加药装置、循环水管路及其配套设备。

（1）循环水补水：一期直流冷却原海水进二期海水净水站经过混凝沉淀处理补充至海水循环冷却集水池；

（2）循环水系统：集水池海水经循环水泵提升至凝汽器发生热交换后，输送到海水冷却塔冷却降温浓缩回流到集水池。通过海水补充水量、冷却塔蒸发水量和浓海水排污水量建立水平衡关系维持系统稳定运行。

（3）循环水处理加药系统：SW203 系列海水阻垢分散剂通过计量泵投加到补水管，SW303 系列菌藻抑制剂通过计量泵直接投加到集水池。

创新性和特色：

（1）集成大型海水循环冷却关键技术，在我国首次建成 2 套 10 万 m³/h 海水循环冷却示范工程，打破国外浓缩倍率通常控制在 1.2～1.8 的常规，实现海水循环冷却 2.0±0.2 运行和大规模集成创新；

（2）突破海水循环冷却水处理药剂产业化共性关键技术，建立我国首个海水水处理药剂年产达 3000 吨研发基地，并构建了相应的环境影响评价技术方法和指标体系；

（3）攻克超大型海水冷却塔优化设计技术，实现我国大型海水冷却塔设计制造零的突破；

（4）完成了我国首部海水循环冷却技术国家标准《海水循环冷却水处理设计规范》（GB/T23248-2009）并发布实施，在编相关国家标准 12 项，海洋行业标准 22 项，形成我国自主创新海水循环冷却标准体系。

【操作参数与运行结果】

海水循环冷却系统操作参数见表 4.1.1。

表 4.1.1 海水循环冷却系统工艺运行参数（单台机组）

循环水量 t/h	蒸发损失 t/h	风吹损失 t/h	排污水量 t/h	补充水量 t/h	浓缩倍率
107895	1304	57	1247	2608	1.8～2.2

运行结果：阻垢率＞90%，△A＜0.2；异养菌数＜5×105 个/ml，杀菌率 99%以上；海水冷却塔盐雾飞溅量≤循环量的 0.0016%。突破国家标准 GB 50050-2007《工业循环冷却水处理设计规范》规定的循环冷却水水质标准要求的禁区，达到 GB/T 23248-2009《海水循环冷却水处理设计规范》技术要求。

图 4.1.2 浙江宁海电厂 2×10 万 m³/h 海水循环却示范工程

【效益分析】

单套 10 万 m³/h 海水循环冷却系统，投资约 2.2 亿元，较淡水循环冷却高约 6000 万元，年运行成本（水费、电费、药剂费、工资福利费、修理费等）较淡水循环冷却节省约 2500 万元，3 年收回增加的设备投资。

【应用情况】

10 万 m³/h 海水循环冷却成套技术于 2009 年应用于浙江宁海电厂，建成了国内首例具有自主知识产权的 2×10 万 m³/h 海水循环冷却工程。2013 年该技术应用于国投津能发电有限公司天津北疆电厂 2×10 万 m³/h 海水循环冷却工程。示范工程均运行稳定可靠，有力地支撑了宁海和北疆电厂的海水节水减排。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

2.大生活用海水技术

大生活用海水技术属于海水直接利用技术范畴，主要技术原理是将海水直接替代淡水作为居民生活用水(主要用于冲厕),其应用领域属于城市生活用水领域。据统计大生活用水占城市生活用水总量的35%左右，因此大生活用海水技术具有非常重要的节水意义，是缓解沿海城市淡水资源紧缺局面的有效途径之一。世界范围内规模化采用大生活用海水技术的地区只有我国香港地区，香港地区海水冲厕技术已经成功应用了多半个世纪，并形成法律法规和相应的水质标准；截止到2012年，使用海水的人口占香港地区总人口的80%左右，海水供应量达到2.72亿m^3/a，由于供水规模大，海水的成本较低，在香港海水免费供应给用户使用。

在国家“九五”、“十五”等科技攻关（支撑）计划和地方科技计划的支持下，国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所等单位经过多年不懈的努力，解决了多项大生活用海水使用过程中的关键技术，主要包括海水取水和预处理技术、海水输送技术、防腐蚀技术、防海洋生物附着技术、异味去除技术和大生活用海水生化处理技术、大生活用海水海洋处置技术等，为该技术工程化的推广应用提供了有力的技术支持；并在2007年建成青岛隆海•海之韵居民小区大生活用海水示范工程，填补了国内空白，其运行的各项技术指标达到或优于考核目标，表明我国已掌握大生活用海水技术产业化的关键技术，为加速我国海水大生活用海水利用技术的推广奠定了坚实的基础。

典型案例

【案例名称】

青岛隆海•海之韵小区大生活用海水示范工程

【项目概况】

本项目是“十五”国家科技攻关计划重大项目“水安全保障技术研究”中的课题“大生活用海水技术示范工程研究”和其后期滚动课题“大生活用海水技术研究与工程示范”的示范工程。该工程中海水除作冲厕使用外，还作为小区游泳

池的补充水；设计海水水量为：平均供水量 1050 m^3/d，供水量 132 m^3/h，供水水质符合“大生活用海水水质标准”；2007 年 6 月完成工程的全部建设内容，进行为期半年的试运行，2007 年底完成工程验收。

图 4.2.1 青岛隆海•海之韵小区大生活用海水示范工程

技术成果“大生活用海水技术研究与工程示范”获 2009 年度海洋创新成果奖一等奖。

【工艺与装备】

大生活用海水示范工程小区青岛隆海•海之韵住宅小区地处胶南市南端灵山湾畔，总建筑面积约 46 万 m^2，预计总居住人口约为 13600 人；距离海边约 2500 m。本项目海水取水工艺采用沉井取水，海水通过管道输送至小区水池，经加药杀菌后通过水泵输送至用户家中，使用后的海水直接排入下水道进入城市污水管网。

海水取水沉井直径为 6.0m，壁厚为 0.6m，沉井的刃脚落在地质勘探的第 4 层砾砂层中，沉井深度定为 13.3m,井底标高-10.30m，井底刃脚长度 1.0m。海水管路从海边的沉井敷设至小区水量调节池内，敷设长度大约为 2500m，海水流量为 1050 m^3/d；输送管的数量为 2 根，每条输送管的公称外径为 DN125，耐压等级为 0.6MPa，管道材质为耐海水腐蚀的 PE 管内流速为 0.70m/s，管内水头损失为 18m。小区内水量调节池建设在地下，地上部分可作为海水输送泵站。调节池采用钢筋混凝土结构并进行防渗处理，设计调节池分为 4 格，有效容积 210m^3 。水池底面厚度为 0.5m，水池壁厚 0.4m，顶面距离地面 0.3m。水池内设潜海水泵 4 台，其

中 2 台采用变频恒压供水，水池内同时设置海水溢流管和淡水进水管。消毒药剂工艺采用加入药剂法，消毒剂为盐酸聚六亚甲基胍，该药剂具有无毒、无腐蚀性、长效抑菌、防止二次污染等特点。小区海水配水管总长度约为 8.0km，管径为 DN50~DN200 不等。配水管分为低压供水区和高压供水区，高压区主要布置在小区的北区，高压区用户为 11 层以上用户。大生活用海水工程中海水用量较小，用后海水直接排入下水道进入城市污水管网。

该工程通过对海水取水方案的优化选择和论证，利用国家“九五”、“十五”等科技攻关计划项目的科技成果，综合考虑工程所在地区海水水质、海边地形地质特点和风浪潮汐状况，成功完成了海水取水沉井的设计、建设，在保证海水水量的前提下，利用沉井地下砂层的过滤作用最大程度地降低了海水中的污染物含量，使海水水质满足相关标准的要求，最大程度地降低了工程运行费用；海水供水系统中，成功采用变频调速供水设备，有效地减少了海水输送过程的能耗；该工程是国内首个大生活用海水示范工程。

【操作参数与运行结果】

操作参数：海边沉井泵站潜海水泵数量为 3 台（2 用 1 备），每台流量 20 m^3/h，扬程 22m。小区泵站内设置潜海水泵 4 台（3 用 1 备），流量为 42 m^3/h，扬程 60m；小区泵站设置 3 个水泵的控制点，分别为在-1.25m 高水位时海边水泵停泵，在-2.45m 低水位时海边水泵开泵，在-4.15m 低水位时，小区水池水泵停泵。

运行结果：海水取水量大于 1000 m^3/d，海水水质达到设计要求后入户，即：浊度< 5NTU，SS<10mg/L，BOD_5<10mg/L，DO>2mg/L，大肠杆菌<10 个/mL。

【效益分析】

该工程总投资约 500 万元，运行费用小于 1.0 元/m^3；该项目每年可节约淡水约 38 万 m^3，节省水费 30 万元以上，经济效益和社会效益明显。

【应用情况】

大生活用海水示范工程建在青岛隆海•海之韵住宅小区，该小区地处山东省青岛胶南市南端灵山湾畔；大生活用海水示范工程服务总建筑面积约 46 万 m^2，海水水量大于 1000 m^3/d，运行情况稳定，供水水质达到设计要求，运行费用小于 1.0 元/m^3，于 2007 年年底完成工程验收。

该项目是由国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所负责设计，与青岛市

发改委、青岛市城市节约用水办公室、青岛隆海集团市政工程有限公司共同合作完成的国内首个大生活用海水示范工程。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

3.沸石离子筛法海水提钾高效节能技术

本技术属于海水资源利用领域，是利用改性沸石离子筛对钾离子的特殊选择性，从海水中富集提取钾肥技术。我国钾肥的年消费量已达 1000 万吨以上，但由于陆地钾矿资源贫乏，农业所需钾肥的 50%以上长期靠进口。长此以往，必将影响国家的粮食安全，因此多途径地开发钾资源势在必行。海水中的钾溶存量达 550 万亿吨，是全球陆地储量的一万余倍，且是一种可持续开发的钾矿资源。全球陆地钾矿资源仅集中在加拿大、俄罗斯等少数国家，一个世纪以来众多沿海国家致力于海水钾资源的开发，共提出包括沉淀法、萃取法、离子交换法和膜分离法等四种技术路线的百余种专利方法。但因海水的组成复杂，且 K^+浓度仅有 0.38kg/m³，给高效提取钾肥带来极大难度，特别是经济上不易过关，因而上述方法均未能实现工业化。

在国家 “九五”、“十五”、“十一五”科技支撑（攻关）项目（96-916-03-01、2001BA602B-06、2004BA602B-06、2006BAB03A10）和地方科技计划的持续支持下，河北工业大学等单位经过三十年的产学研联合不懈攻关，研制出“沸石改性钾离子筛” 核心材料及沸石离子筛法海水提钾技术，攻克了海水中钾高效富集、钾肥节能分离、模拟移动床连续离子交换装备等一系列关键技术和装备难题，在国际上率先实现了技术经济的突破，在“十五”期间成功地完成了百吨级中试和工业化试验，在“十一五”期间建成了万吨级海水卤水提钾生产线，进入产业化实施阶段。

该技术实现了海水（或浓海水）和苦卤中钾、钠、镁、硫酸根资源的综合利用，产品质量达到国家钾肥标准优级品指标，生产成本较进口钾肥降低 25%。成果经河北省和天津市科委组织专家鉴定，达到国际领先水平，为解决我国农用钾肥来源问题提供了一条有效途径，为海洋、化肥和制盐行业的产业结构优化调整提供了支撑。

该技术获 2010 年河北省技术发明一等奖 1 项、2011 年中国国际工业博览会创新奖 1 项，获发明专利 10 项（ZL02116876.8、ZL200510133689.6、ZL201010573766.0、ZL201210173025.2、ZL201010031348.9、ZL201010573766.0、ZL201210326107.6、ZL201220451130.3、ZL201210030109.0、ZL201210245534.1），提出“沸石离子筛法海水提钾工程设计规范”和“钾高效交换剂”行业标准 2 项。

典型案例一

【案例名称】

4 万吨/年海水苦卤提取硫酸钾及综合利用工程

【项目概况】

该项目是“十一五”国家科技支撑重大项目课题“5 万 t/a 海水提钾技术开发”（2006BAB0310）的示范工程（山东省发改委立项批复备案证号为：0700000069）。同时，该项目列为 2007 年国家火炬计划项目（证书编号：2007GH050127）和国家发改委重大技术创新项目（发改委投资[2009]999 号）。该工程总投资 2.45 亿元，设计年产硫酸钾 4.0 万 t/a、精制盐 10 万 t/a、氯化镁 10 万 t/a，由山东埕口盐化有限公司投资建设。该项目于 2007 年开工建设，2009 年建成投产。获 2010 年河北省技术发明一等奖和 2011 中国国际工业博览会创新奖。

图 4.3.1　4 万 t/a 海水苦卤提取硫酸钾及综合利用工程

【工艺与装备】

该项目的钾富集工艺原理为：

吸附过程：$NaZ + K^{+}$(海水)$\rightarrow KZ + Na^{+}$(海水)

洗脱过程：Na^{+}(卤水)$+ KZ \rightarrow K^{+}$(富钾卤水) $+ NaZ$

式中，Z 代表沸石。

该项目的工艺流程如图 4.3.2：

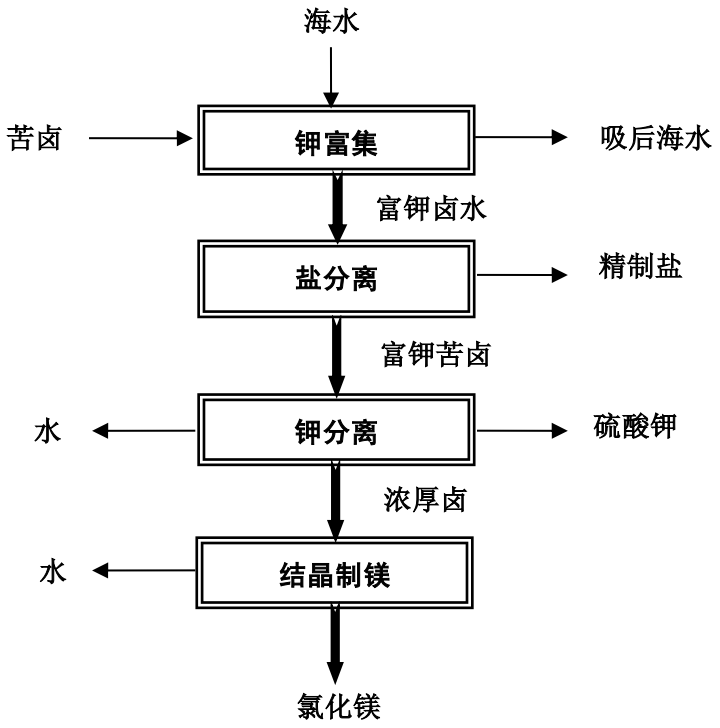


图 4.3.2 海水苦卤提取硫酸钾及综合利用

该项目的创新点如下：

（1）研制出沸石改性钾离子筛材料，实现了海水钾的高效分离。利用沸石离子筛理论研究成果，对天然斜发沸石进行改性处理，首次获得了对海水中 K^+ 具有高选择性的钾离子筛材料，有效解决了海水中 K^+ 与 80 余种共存元素高效分离问题。

（2）创新出叠加高效富钾技术，实现了海水钾的高倍率富集。依据离子交换理论研究成果，利用钾离子筛材料，研制出叠加吸附工艺，有效地解决了海水的高倍率富集的问题，K^+ 富集率达 100 倍。

（3）创新出湿式筛分节能制钾工艺和装备，实现了钾肥的节能分离。利用水盐体系相平衡和结晶理论成果，通过实施晶体颗粒的调制和湿式筛分，有效解决了钾与钠、镁、硫酸根等的节能分离和资源综合利用的难题，克服了传统苦卤制钾高能耗和低收率的缺陷，钾回收率达 85%以上，能耗降低一倍。

该项目主体设备包括：多级离子交换器（Φ4500×6000，6 台；Φ4500×9000，2 台）、多效蒸发器（F=300m^2，3 台）、连续结晶器（Φ3000）等，见图 4.3.3、

图 4.3.4。

图 4.3.3 钾富集系统装备

图 4.3.4　蒸发分离系统装备

【操作参数与运行结果】

运行表明，钾肥产能达 43000t/a、精制盐产能达 93000t/a、氯化镁产能达 10500 万 t/a，实现了达产、达标。具体技术指标如下：

（1）钾提取率：85%；

（2）产品质量：硫酸钾产品质量达国家 GB 20406-2006 优级品标准，精制盐产品质量达国家 G B /T 5 4 6 2 - 2 0 0 3 一级精制盐标准。

（3）生产成本：硫酸钾生产成本为 2486 元/t，精制盐生产成本 366 元/t。

【效益分析】

项目总投资 21646.99 万元。截止到 2013 年底，实现销售收入 6.45 亿元，利税总额 1.72 亿元，产生了较高的经济效益，也标志着海水提钾在我国率先实现了产业化，为解决我国钾资源严重短缺问题开辟了有效途径。同时，也避免了 60 万 t/a 海盐苦卤直接排海带来的环境污染，产生了重要的社会和环境生态效益。

典型案例二

【案例名称】

1 万 t/a 海水直接提取氯化钾工程

【项目概况】

该项目是“十一五”国家科技支撑重大项目课题“5 万 t/a 海水提钾技术开发”（2006BAB03A10）的示范工程，由天津海博纳化工有限公司投资建设。该工程于 2006 年开工建设，2009 年建成投产。该项目是国际上首座万吨级海水直接提钾工程，标志着海水提钾技术在我国率先实现工业化应用。

图 4.3.5　1 万 t/a 海水直接提取氯化钾试验厂

【工艺与装备】

该项目的工艺流程如图 4.3.6。

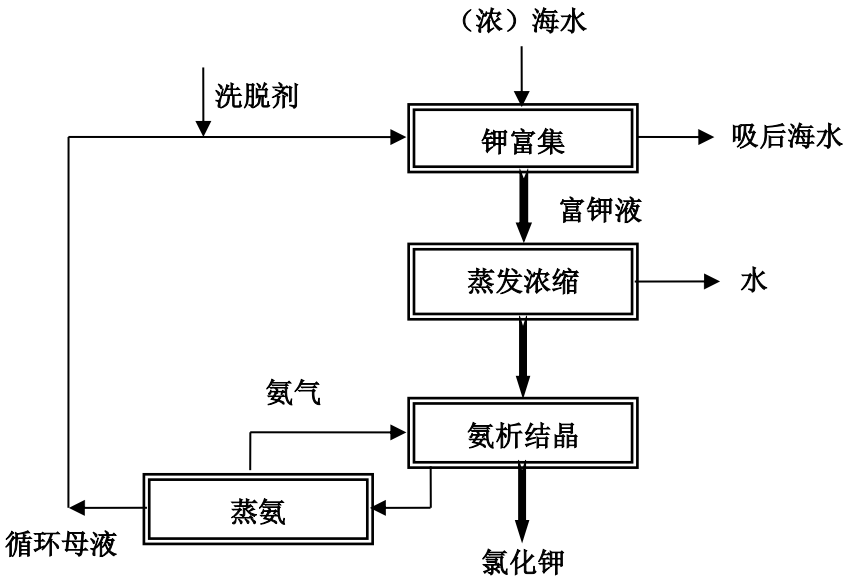


图 4.3.6 海水直接提取氯化钾工艺流程

该工程的连续富钾系统和钾分离结晶系统等主体装备如图 7、图 8 所示。

图 4.3.7 连续离子交换富钾系统装备

图 4.3.8 钾分离系统装备

该项目的创新点如下：

（1）创新出海水直接提钾高效节能工艺，实现了氨和氯化钠的循环利用，大幅降低了原料消耗和能耗；

（2）研制出模拟移动床连续离子交换富钾系统装备，实现了海水中钾的可控提取，大幅度提高了富钾过程效率。

【操作参数与运行结果】

试验测试表明，工艺设备运行稳定，产品质量达国标 GB 6549-2011 优等品标准，产品氯化钾平均日产量 30 吨；原料和水电汽消耗达到了预期指标；沸石柱、结晶器、蒸发器、沉降器和离心机等主体设备的能力可以满足生产能力要求；生产成本较进口钾肥低 20%，实现了达产达标。该工程运行结果如下：

（1）钾提取率：86%；

（2）产品质量： $K_2O \geq 60.0\%$。

【效益分析】

以年产农用氯化钾 10 万吨为例，项目建设总投资 25000 万元。项目达产销售额达 25000 亿元，利税总额为 8740 万元，投资回收期为 4.1 年（含建设期 1 年），投资利润率（税后）为 26.2%，经济效益显著。

【应用情况】

该技术可用于海水直接提钾，也可配套大规模海水淡化工程的浓海水利用。基于该成果，在河北省曹妃甸工业区建设日处理 5 万吨浓海水提取氯化钾工程，

山东、浙江等地海水淡化企业已完成了浓海水提钾项目的前期工作，上述工程将带来显著的经济、社会和环境效益。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：河北工业大学海洋科学与工程学院；

联系人：袁俊生；

地址：天津市红桥区光荣道 8 号；

邮政编码：300130；

电话：022-60204274；

E-mail：jsyuan2012@126.com。

4. 浓海水综合利用集成技术

该技术属于海水资源利用领域，是以海水淡化副产浓海水为原料，通过提钾、提溴、提镁和制盐等元素提取工艺的耦合，实现浓海水的资源化利用，并实现处理后海水的达标排放。随着海水淡化产业蓬勃发展，其副产大量浓海水排海引起海洋生态环境污染问题日益受到关注，浓海水处理已提上日程。浓海水中化学组分的浓度为标准海水近 2 倍，若获取相同的化学资源，浓海水输送量仅为天然海水量的一半，可显著降低提取成本。此外，利用浓海水进行化学资源提取无需设置取海水和加氯杀菌等预处理设施，可大大节约投资和工程造价；并且，海水淡化操作过程中副产浓海水的温度、流量参数稳定，便于化学资源提取过程的常年平稳运行。

在国家科技支撑（攻关）计划和地方科技计划的大力支持下，河北工业大学等单位经过产学研联合，先后攻克浓海水提取钾肥、溴素、镁砂、液体盐等关键技术，并实现各技术间的耦合及工艺优化，形成浓海水综合利用集成新工艺，并建成了国内首座浓海水综合利用中试线。该技术实现了浓海水中钾、钠、镁、硫酸根资源的综合利用，并实现了处理后浓海水的达标排放，为解决浓海水排放及资源化利用问题提供了一条有效途径，并能够沟通上游海水淡化与下游制碱行业，为形成现代海洋化工新型产业提供了支撑。

本技术氯化钾质量达到 GB 6549-2011 II 类优等品标准（K_2O≥60%，H_2O≤2.0），成本低于进口产品价格 20～30%；工业盐质量符合 GB/T 5462-2003 优级品指标（液体盐参照 QB/T 1879-2001 制碱用液体盐技术指标）；溴素质量满足 QBT 2021-1994 一级品标准；镁砂执行 GB/T2273-2007 烧结镁砂产品标准。该成果已获 6 项专利（ZL201210173046.4、ZL201210245534.1、ZL201110445347.3、ZL201010601557.2、ZL201210146756.8、ZL201210146719.7、201310145740.X）。

典型案例

【案例名称】

10000 m³/d 浓海水综合利用示范工程

【项目概况】

该项目是在河北省重大技术创新项目（曹妃甸工业区浓海水提钾综合利用示范工程 10276717Z，曹妃甸大规模海水综合利用技术集成及工程示范 12276702Z）支持下开展的浓海水综合利用示范工程，由曹妃甸新岛化工有限公司投资建设。该工程以北控阿科凌海水淡化公司 5 万 m^3/d 海水淡化工程副产浓海水资源为原料，生产氯化钾、溴素和液体盐等产品。该项目浓海水设计处理量为 10000 m^3/d，氯化钾 2000t/a，溴素 400t/a，液体盐 10000t/a（折纯）。该项目与 2013 开始建设，已完成土建施工，正在进行设备安装。

【工艺与装备】

该项目工艺流程如图 4.4.1 所示。

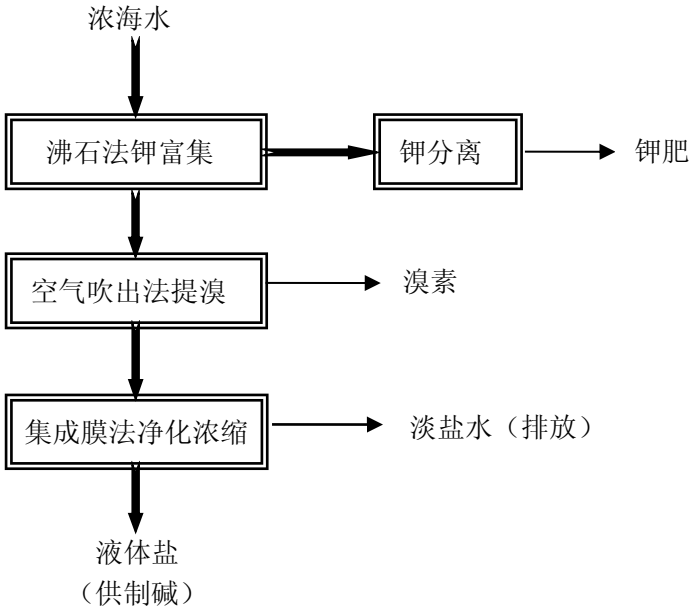


图 4. 4. 1 浓海水综合利用集成工艺流程

该项目的创新点如下：

（1）创新出浓海水综合利用耦合工艺，实现了浓海水中化学资源的优化提取及梯级利用和处理后海水的达标排放；

（2）创新出集成膜法浓海水净化和浓缩制液体盐新技术，并实现了与制碱工艺耦合，显著提高了综合利用效益；

（3）研制出基于单价离子交换膜的国产化电渗析制盐系统装置，大幅度降低了装备投资费用。

【操作参数与运行结果】

（1）钾、溴提取率：≥80%，氯化钠提取率≥60%；

（2）产品质量：氯化钾产品质量达国家 GB 6549-2011 II 类优等品标准，液体盐达 QB/T 1879-2001 制碱用液体盐技术指标，溴素质量满足 QBT 2021-1994 一级品标准。

【效益分析】

以向北京供水 100 万 m^3/d 海水淡化配套浓海水综合利用工程的一期 50 万 m^3/d 海水淡化副产浓海水量 62.5 m^3/d 计，利用该技术可年产 20 万吨氯化钾、224 万吨液体盐（折纯）、2.1 万吨溴素、30 万吨高纯镁砂，副产 50 万吨石膏，项目总投资 23.4 亿元，销售额 16.9 亿元，利润总额 2.8 亿元，投资回收期为 5.73 年，经济效益显著。

【应用情况】

依托该技术，已完成了《北控水务 100 万 m^3/d 海水淡化副产浓海水综合利用工程预可行性研究》，国华沧东发电有限公司、国电山东蓬莱发电厂、浙能乐清发电厂等海水淡化工程的可行性研究工作，为进一步的产业化推广应用奠定了基础。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：河北工业大学海洋科学与工程学院；

联系人：袁俊生；

地址：天津市红桥区光荣道 8 号；

邮政编码：300130；

电话: 022-60204274；

E-mail：jsyuan2012@126.com。

5.浓海水钙法制备氢氧化镁产业化技术

该技术属于海水资源利用领域，是利用浓海水和氧化钙为原料，通过连续反应结晶生产氢氧化镁的新技术。氢氧化镁广泛应用于烟气脱硫、酸性水中和、重金属脱等环保领域，是无机阻燃剂和制造其它镁系物的基础产品，市场前景广阔。传统的海水卤水制取氢氧化镁工艺普遍采用晶种添加间歇合成法，存在操作繁琐、合成效率低、产品质量不稳定等缺陷。另外，灰乳中的杂质不可避免的带入到产品中，反应过程中钙离子和海水卤水中的硫酸根离子结合的硫酸钙也混入产品中，影响产品质量。

在国家科技支撑计划的支持下，针对传统钙法制取氢氧化镁合成过程中产品质量差、硫酸钙伴生析出的技术难题，首创了浓海水钙法制取氢氧化镁常温连续结晶及杂质分离产业化技术，实现了氢氧化镁和杂质（硫酸钙、灰渣等）的分离；针对传统氢氧化镁洗涤过程中微溶性钙盐难以洗涤去除的难题，首创了静态混合器—卧式螺带搅拌组合洗涤技术，较传统技术洗涤效率提高 50%以上；优化了灰乳制备与纯化、洗涤用淡水与浓海水的预处理等产业化关键技术；研发了连续合成、结晶生长及杂质分离提纯三合一的海水卤水制取氢氧化镁产业化装置，制备出粒度分布均匀、过滤性能好的氢氧化镁，形成了具有自主知识产权的钙法浓海水低成本制备高质量氢氧化镁的产业化成套技术与装备，通过国家海洋局科技司成果鉴定，“达到国际先进水平”。

典型案例

【案例名称】

河北黄骅万吨级浓海水制取膏状氢氧化镁示范工程

【项目概况】

该项目由河北银山精制碘盐有限责任公司投资建设，是“十一五”国家科技支撑计划课题“万吨级浓海水提镁技术研究开发”的示范工程。2008 年 7 月完成示范工程的施工设计，2008 年 10 月完成生产原料购置，2008 年 10 月 15 日完成

示范工程建设。示范工程连续稳定运行 2 年以上，产能达到 10140t/a，示范装置产出的膏状氢氧化镁质量优于 HY/T111-2008 料浆状及滤饼状氢氧化镁I类标准要求；以示范工程产出的膏状氢氧化镁煅烧制备的氧化镁主要指标全部达到 HG/T2573-2006 I 类合格品指标要求。该项目填补了国内低成本制备高质量氢氧化镁的产业化空白，项目的成果总体达到国际先进水平，荣获 2012 年中国海洋工程科学技术二等奖。

【工艺与装备】

（1）主要工艺流程及操作参数

生产工艺共分为化灰工序、浓海水及淡水精制工序、卤水硫酸根脱除工序、氢氧化镁连续合成工序、固液沉降分离工序和氢氧化镁洗涤压滤工序。

化灰工序：采用带除渣立式化灰槽，按石灰：水 1：4 的比例化灰，灰乳采用三级旋流对灰乳进行精制，精制灰乳中氢氧化钙含量控制在 100g/L 左右，精制灰乳用于合成氢氧化镁。

浓海水和淡水精制工序：采用酸化工艺，将其中的碳酸盐类通过酸化、吹出，除去其中的碳酸根，避免合成和洗涤过程中碳酸钙的生成，酸化 pH 值控制在 3～4。

卤水硫酸根脱除工序：采用卤水和反应完成液连续反应，通过控制硫酸钙的过饱和度，制得大颗粒硫酸钙。

氢氧化镁合成工序：采用两级连续合成反应器，通过控制反应的过饱和度和反应时间使反应过程副产的硫酸钙生长成较大颗粒的结晶。反应液的 pH 值应控制在 9.8～10.4 左右，根据反应液的 pH 值调节灰乳流量。

氢氧化镁沉降分离工序：采用连续式道尔沉降器沉降分离。

洗涤压滤工序：加水比例：氢氧化镁滤饼/水为 1：2 的比例，采用三次分离、两次加水洗涤的工艺制备膏状氢氧化镁产品。

（2）主要设备

万吨级浓海水提取氢氧化镁主要设备 60 余台套。化灰工序主要由斗式提升机、化灰槽、除渣机、灰乳槽、离心泵、旋流器等组成；淡水、海水卤水精制工序主要由贮酸罐、离心泵、真空罐、计量罐等组成；卤水硫酸根脱除主要由连续除硫反应结晶器、沉降器组成；合成反应工序由两级结晶反应器、流量计、pH

计等组成；氢氧化镁沉降工序由沉降器组成；压滤洗涤工序主要由离心泵、静态混合器、压滤机、洗涤槽等组成。

（3）创新点

①创新出含硫酸盐卤水和含钙卤水制备硫酸钙技术

采用连续控制结晶技术，实现了低成本制备大颗粒、高质量硫酸钙产品的制备，克服了传统间歇反应硫酸钙颗粒小、沉降分离困难的弊端，解决了钙法制备氢氧化镁产品过程中硫酸钙分离难题。

②创新出降低钙法生产氢氧化镁中杂质技术

通过技术创新，形成了降低钙法生产氢氧化镁反应完成液中杂质与减少氢氧化镁产品中硫酸钙的方法等两项核心技术，实现了钙法海水卤水生产氢氧化镁过程中，氢氧化镁产品中夹带的硫酸钙等不溶性杂质的有效去除，

③研制出浓海水钙法制备氢氧化镁产业化技术

集成研发的原辅料精致除杂、氢氧化镁结晶生长与硫酸钙分离、产品净化除杂等系列技术，形成了浓海水钙法制备氢氧化镁产业化技术，填补了国内空白。

【操作参数与运行结果】

运行结果表明，示范工程生产能力达到 10000t/a，镁离子收率＞73%，膏状产品中 $Mg(OH)_2$ 含量大于 46.44%，CaO 含量小于 0.5%，符合 HY/T111-2008 优等品要求，氢氧化镁煅烧制得 MgO 达到 HG/T2573-2012 Ⅰ类一等品质量标准(93%)，部分产品达到优等品质量标准(95%)。

【效益分析】

该工程总投资约 1000 万元。生产运行过程中单位消耗轻烧白云石 0.473t、浓海水 36.73m³、电 63.2kWh，其它费用 260 元/t，示范工程年利税总额达 490 万元。

【应用情况】

项目成果用于山东海天生物化工有限公司的浓海水净化与资源化技术研究项目，制备出高质量的氢氧化镁、碳酸钙和硫酸钙，减少了一二次泥排放造成的污染。同时广西银亿科技矿冶有限公司、有研稀土新材料公司等将该成果应用于冶金和稀土废水制备氢氧化镁项目，已达成合作协议。广西银亿的 4000m³/d 废水处理项目产业化后，可消除 20 余万 t/a 的工业废渣，还可生产 10 万 t/a 的高

质量氢氧化镁，经济效益显著。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

6.硼酸镁晶须连续化控制结晶技术

该技术属于无机功能材料和海水资源利用领域，是以海洋化工产品为原料，通过高温固相结晶反应生产硼酸镁晶须新技术。硼酸镁晶须具有轻质、高强高韧、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等特点，可作为金属基、陶瓷以及高聚物等复合材料增强剂，使基体性能大幅度提高。同其它晶须材料相比，硼酸镁晶须具有原料易得、成本较低以及环境友好等特点，已发展为当今复合材料最具应用前景的纤维材料之一。

在“十五”、“十一五”国家科技支撑计划课题的支持下，国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所与日本合作，突破了增强材料硼酸镁晶须连续合成工艺，研发了硼酸镁晶须连续化控制结晶中试技术与装备，建立的百吨级硼酸镁晶须生产线，填补了国内空白，制备的硼酸镁晶须纯度高于 99%；晶须形貌规整，平均直径在 0.5～2μm 之间，长度 10～50μm，无杂晶，经专家鉴定，整体技术达到国际先进水平，填补了国内空白，并荣获 2012 年度海洋科学技术二等奖。

典型案例

【案例名称】

百吨级硼酸镁晶须生产线

【项目概况】

该项目作为“十一五”国家科技支撑计划项目子课题“增强材料硼酸镁晶须百吨级中试技术研究”的示范工程，于 2008 年完成选址、勘察和施工设计，2009 年底完成生产线建设，并于 2011 年通过了科技部组织的专家验收，专家一致认为，该项目成果达到国际先进水平，形成的具有自主知识产权的硼酸镁晶须制备成套技术，为海水镁资源的高值化利用提供了技术支撑。

【工艺与装备】

硼酸镁晶须原料经净化除杂、混合、匀浆，制备出成分均匀的浆状物料；浆状物料经喷雾干燥器干燥制备出硼酸镁晶须中间物料；中间物料于专用制备匣钵中，经特制连续化结晶生长窑炉，通过连续控温生长，制备出硼酸镁晶须烧结体；连续化高温结晶程控炉的前部设置尾气排出管路，尾气经排出管排出后经两级碱

液吸收，吸收液采用水冷却；烧结体经粉碎、洗涤、分离、干燥，制备出形貌规整、具备高长径比的硼酸镁晶须产品。工艺流程见图 4.6.1 所示。

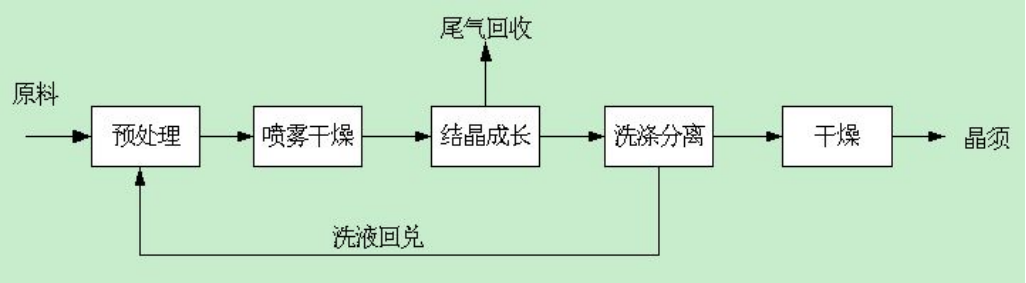


图 4.6.1 硼酸镁晶须合成制备工艺流程简图

该项目的创新点如下：

（1）攻克了以苦卤中为生产原料制备高质量硼酸镁晶须的产业化关键技术，原料成本降低 70%。

（2）采用生长基元模型，优化了晶须合成工艺，实现了硼酸镁晶须的连续化制备。

（3）研发了连续化结晶生长窑炉，与普通窑炉相比，能耗降低 5～10%。

【操作参数与运行结果】

该项目制备的硼酸镁晶须纯度高于 99%，产品貌规整（见图 4.6.2），平均直径在 0.5～2μm 之间，长度 10～50μm，无杂晶；研制的硼酸镁晶须连续生长炉，与普通窑炉相比能耗降低 10%以上。

增强实验表明：该晶须以 20％(质量分数)的配比添加到复合材料中，使铝基复合材料弹性模量增加了 50％，拉伸强度增加了 12％；使镁基复合材料的弹性模量增加了 10～20％；以 25％(质量分数)的配比添加到尼龙—6 中，其热变形温度由 75℃提高到 200℃，拉伸强度由 72.13MPa 提高到 116.02MPa；弯曲强度由 124.25MPa 提高到 215.3MPa，弯曲模量由 2.66GPa 提高到 70.9Gpa。

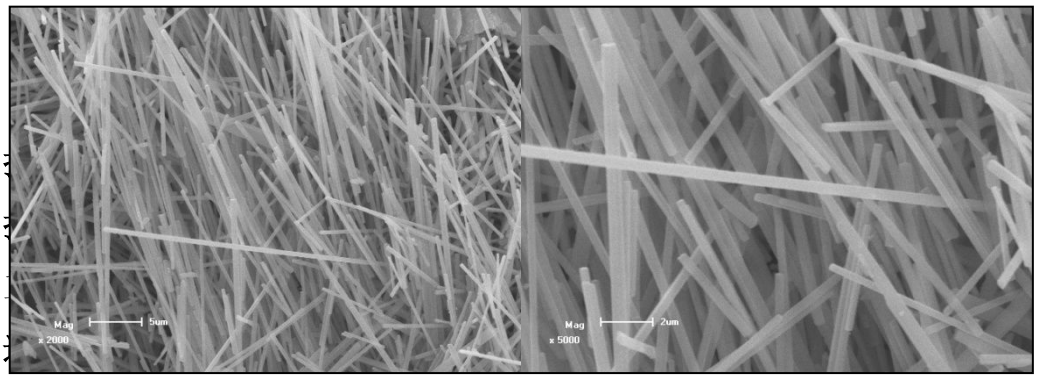


图 4.6.2 连续化高温结晶程控炉与硼酸镁晶须产品

【效益分析】

百吨级硼酸镁晶须生产线运行成本包括化学药品消耗、水电消耗、人工工资、福利及管理费用、维修费用、设备折旧费用等。在进行成本分析时，工程的折旧年限以 10 年计，根据工程运行实际计算，硼酸镁晶须生产成本为 5.48 万元/m³。

【应用情况】

国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所分别与辽宁大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学以及东北大学、香港 ASM 公司合作共同开发研制硼酸镁晶须增强聚合物基、镁基以及电子产品零部件增强材料复合材料，应用研究表明：硼酸镁晶须作为金属基、聚合物基、陶瓷等材料的增强剂，所制备的新型复合材料性能大幅度提高，展现了广阔的应用前景。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

7.浓海水综合利用新工艺

该技术属于海水资源利用领域，根据浓海水特点及浓缩过程的相图分析，以能耗、原料成本核算及产品质量为评价指标，确定淡化后浓海水中常量元素的提取顺序，并结合盐化工产品市场现状和发展前景，开展了产品品种的优化。传统的海水综合利用工艺流程是海水(或浓海水)经日晒浓缩后，由中度卤水进行空气吹出法提溴，提溴后卤水复晒至析出原盐。析出原盐后的苦卤蒸发浓缩制取氯化钾，同时，得到的高低温盐生产工业盐和硫酸镁；制取氯化钾后的老卤去提溴，提溴后的母液蒸发制取氯化镁。该工艺流程需占用大面积的土地资源，且得到的产品附加值低，市场竞争力差。

该技术通过对浓海水资源利用过程中的元素提取顺序、产品品种、工艺接口条件等系统优化，形成了浓海水制取硫酸钙晶须、离子交换法浓盐水制取氯化铵钾联产液体盐等多项成果，研制出浓海水提溴、制取硫酸钙晶须、氯化铵钾、液体盐等系列浓海水综合利用新工艺与成套的技术与装备，并搭建了 30m³/d 浓海水综合利用新工艺实验平台。形成的浓海水常量元素全利用的“零排放”新工艺与传统工艺相比，投资收益率提高 50%以上经专家鉴定总体技术达国内领先水平，并荣获 2012 年度海洋科学技术二等奖。

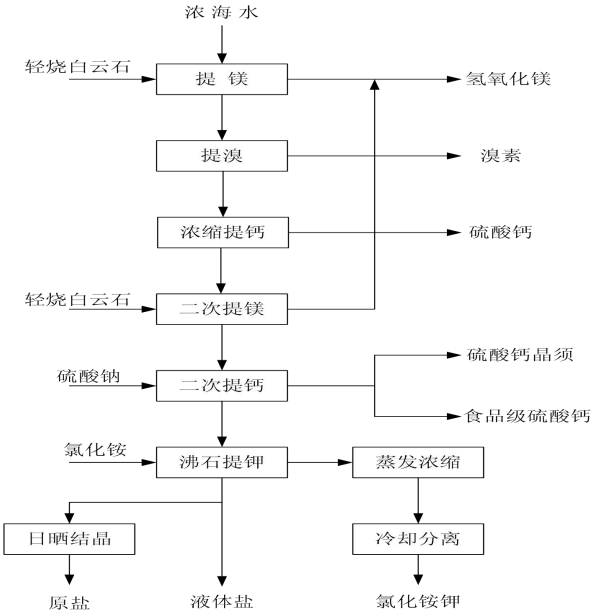


图 4.7.1 浓海水综合利用新工艺流程图

典型案例

【案例名称】

金川集团股份有限公司高含盐废水资源回收项目

【项目概况】

金川集团有限公司生产系统副产高浓度的含盐废水15000m³/d,废水经除油、pH值调节、曝气、气浮、重金属沉淀脱除、沉淀等处理工序，废水中的重金属平均含量均在5ppm以下，重金属含量达到排放标准，但由于其高盐分(平均TDS：70438mg/l，最高TDS达94290mg/l)，将其排放将造成排放区域土地重度盐碱化，对环境造成严重污染。金川集团有限公司作为全国资源综合利用三大基地之一，是国家首批循环经济试点单位，近年来，不断采用新工艺、新设备、新技术，形成“选、冶、排、收”的冶炼产业链，力求将废弃物“吃干榨尽”，资源综合利用率显著提高。

该高含盐废水资源回收项目基于“浓海水综合利用新工艺”技术，通过实验及中试研究确立了“日晒浓缩－两级自然冷冻－冷冻母液脱碳－日晒制盐”的工艺路线，有效地遏止了高含盐废水排放对环境造成的污染。通过室内试验和中试研究，已突破高含盐废水综合利用过程的产业化关键技术，形成了经济可行的产业化技术方案。

【工艺与装备】

采取串联加卤，建立各池之间的滩田浓度梯度；在浓度梯度形成后，开始由上一级蒸发池向下一级池中加卤，再将其上一级卤水导入本级，进行日晒蒸发浓缩；日晒浓缩过程中，收集池底部析出硫酸钠产品，并储存母液用来冬季冻硝；为防止碳酸盐夹带析出，采用除碳-冻硝工艺，收集析出硫酸钠产品，存储冻硝母液用于日晒制盐；为防止碳酸盐夹带析出，采用除碳-日晒制盐工艺，收集析出氯化钠产品，并存储母液，与原水搀兑，用于日晒蒸发浓缩制硝，实现闭路循环。

主要装备包括：多级浓缩/蒸发/结晶池系统，用于高含盐废水或卤水的浓缩、结晶过程；中转储罐，用于高含盐废水综合利用过程的物料中转与存储；酸化除碳系统，包括酸罐、防腐潜水泵及注酸管路系统，用于高含盐废水酸化法除碳。

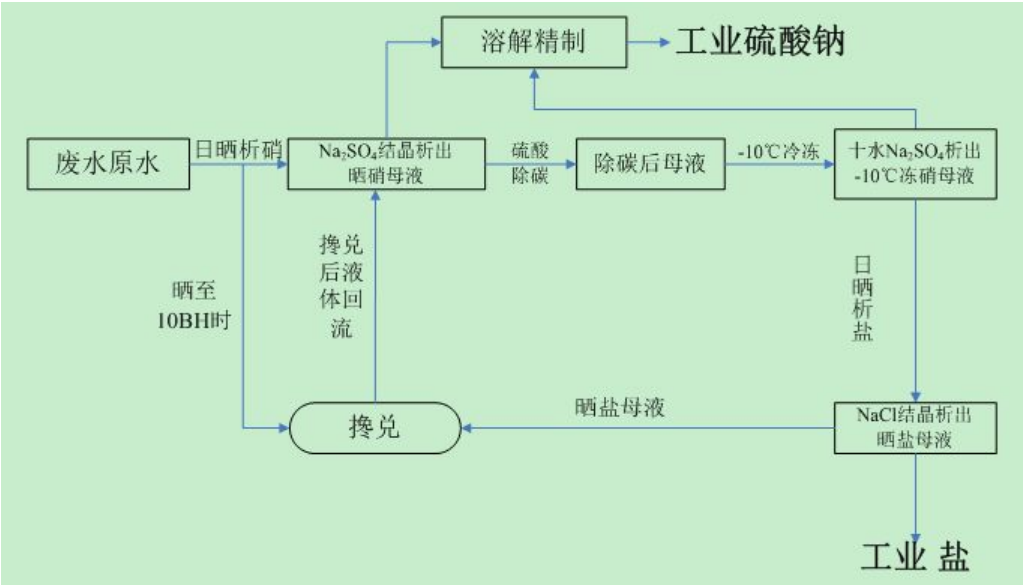


图 4.7.2 高含盐废水综合利用产业化工艺流程图

该项目的创新点如下：

（1）突破了高含盐废水浓缩制硝、析硝母液冬季冻硝、冻硝母液浓缩制盐系列关键技术，解决了高硫酸钠体系盐硝分离的难题；

（2）研发出析硝母液除碳技术，实现了盐、硝产品中的碳酸根的有效去除；

（3）研发出“日晒浓缩-两级自然冷冻-冷冻母液脱碳日晒制盐” 高含盐废水综合利用新工艺，实现了盐硝四级联产；

（4）明确了高含盐废水浓缩过程中重金属离子富集规律，对产品中重金属进行了有控制，芒硝和工业盐中重金属含量符合国家相关标准要求。

【操作参数与运行结果】

制备的 $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 产品含量 91.47%，工业盐氯化钠含量达到 95%以上，硫酸钠总收率达 95.99%；芒硝和工业盐中碳酸根和碳酸氢根未检出，重金属含量符合国家相关标准要求。

【效益分析】

15000 m^3/d 的高含盐废水工程总投资约 28000 万元，投资回收期为 9 年左右。该项目立项并产业化后能够根除有色冶金高盐废水的排放造成的土地盐碱化，资源回收利用率达 95%以上，相关产品均达到国家或行业相关标准要求。经测算，拓展用于集团 15000m^3/d 高含盐废水处理后，年可回收工业盐 15 万吨，硫酸钠 18 万吨，为企业创造可观的经济效益。

【应用情况】

该技术的推广应用，有利于促进形成浓海水综合利用产业链，其推广应用将促进我国制盐产业全面的技术升级，在大幅度提高制盐企业的经济效益的同时，减少制盐用地、保护海洋环境，提高海水淡化及浓海水利用的综合效益，实现经济、社会、环境效益的共赢。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所

联系人：张雨山

地址：天津市南开区科研东路 1 号

邮政编码：300192

电话：022-87894686

E-mail：dhskjc@vip.163.com

8.烟道气（浓）海水脱钙预处理技术

该技术属于海水资源利用领域，是一种利用烟道气中二氧化碳处理脱除海水或卤水中钙离子的一种预处理新技术。海水及卤水是一个复杂的无机盐溶液体系，多含有钙、镁等硬离子，如海水中钙离子的浓度为 0.40kg/m^3，卤水中的钙离子浓度则高达 1.00kg/m^3以上。在海水淡化和卤水（浓海水）综合利用过程中，极易形成难容的钙垢，沉淀于传热界面或膜的表面，影响传热效率或者影响膜的寿命，特别是当海水浓缩超过三倍后，硫酸钙会大量结晶析出，导致海水淡化和综合利用过程效率急剧下降。此外，在海水或卤水综合利用工程中，钙盐作为一种杂质，将会影响海洋化工产品的品质。现有技术中，海水脱钙的方法一类是加入沉淀剂的方法，另一类是吸附法或离子交换法，但这类方法均需要的化学药剂的消耗和较高设备投资，导致处理成本较高，制约了其工业应用的可行性。

在国家自然基金项目（面向海水淡化的烟道气脱硫固碳与海水脱钙的耦合及系统优化研究（21306037））和省市科技计划（天津市应用基础及前沿技术研究计划：利用烟道气脱除海水中钙的研究（10JCZDJC24000）；河北省科技支撑计划：海水综合利用中新型气液传质设备的研究和开发（13273101D））的支持下，研制成功烟道气法海水脱钙新技术，提出了利用废弃烟道气中的二氧化碳在海水中形成的碳酸根作为沉淀剂，替代化学药剂脱除海水中钙的新工艺，实现变废为宝，不仅大幅度降低了脱钙成本，而且减少了温室气体的排放，为实现海水卤水高效脱钙，提升海水淡化和综合利用过程效率提供了新的途径。该成果已获 2 项中国专利（ZL201210199641.5 用烟道气进行海水脱钙的方法、ZL201320129585.8 一种烟道气海水脱钙的装置），并完成了中试研究。

典型案例

【案例名称】

960 m^3 / d 烟道气卤水脱钙预处理工程

【项目概况】

该项目由山东默锐科技有限公司投资建设，利用该公司 8°Be ´ 地下卤水（Ca^{2+}含量为 0.9g/L）进行脱钙处理，实现卤水净化，为进一步综合利用生产高

纯精制盐提供原料保障。目前该工程已建成，并完成了试车测试，各项技术经济指标均达到了预期目标。

【工艺与装备】

该项目的工艺流程见图 4.8.1。

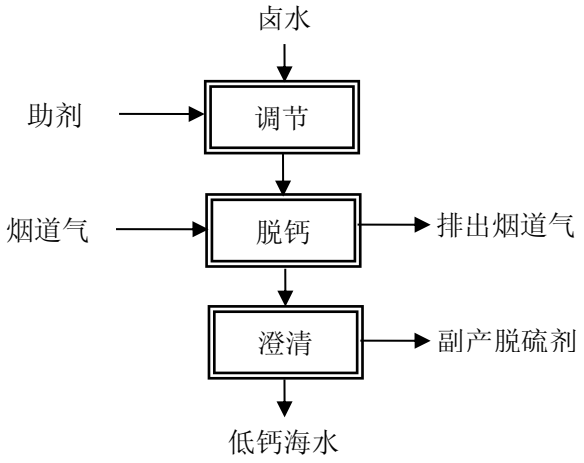


图 4.8.1 烟道气法海水脱钙工艺流程

该项目的主要设备包括：预混器、脱钙吸收器、过滤器等。

该项目的主要创新点如下：

（1）创新出利用烟道气脱除（浓）海水中钙的新工艺，实现了海水或卤水的低成本、高效软化，并同时达到固定烟道气中二氧化碳的目的。

（2）研制出专用高效烟道气脱钙吸收器，实现了海水、卤水中钙的高效、选择性脱除。

【操作参数与运行结果】

工程试运行表明，卤水中钙离子脱除率大于 80%，处理成本：0.48 元/m^3 卤水（8^0Be´）。具体技术指标如下：

（1）原卤水钙离子含量按 0.9 g/l 计。

（2）烟道气中 CO_2 百分含量：≥10%

（2）烟道气用量（约）：900 m^3/h

（3）处理能力：960 t / d（8° Be′ 海水）

（4）海脱钙率：≥ 80%（可达 80%）

（5）低钙卤水 pH：8-9；

（6）电耗： 0.4kWh/m^3。

【效益分析】

以原卤水钙离子含量 0.9 g/l，处理能力为 960 t / d（8°Be′海水），设备费（含设备基础费和安装费）为 25 万元，占地约 300 m^2。运行结果表明，卤水处理成本：0.48 元/m^3，可见该技术具有投资小、成本低的特色。

【应用情况】

该技术开发的利用烟道气脱钙技术具有处理成本低、投资少、环境效益高等显著优势，具有广泛的应用前景。目前，在唐山三友集团、山东海化集团等企业均开展了利用烟道气脱钙技术对浓海水（卤水）净化处理项目的前期实验工作。

【技术信息咨询单位及联系方式】

联系单位：河北工业大学海洋科学与工程学院

联系人：袁俊生

地址：天津市红桥区光荣道 8 号

邮政编码：300130

电话：022-60204274

E-mail：jsyuan2012@126.com