

太阳能海水淡化技术

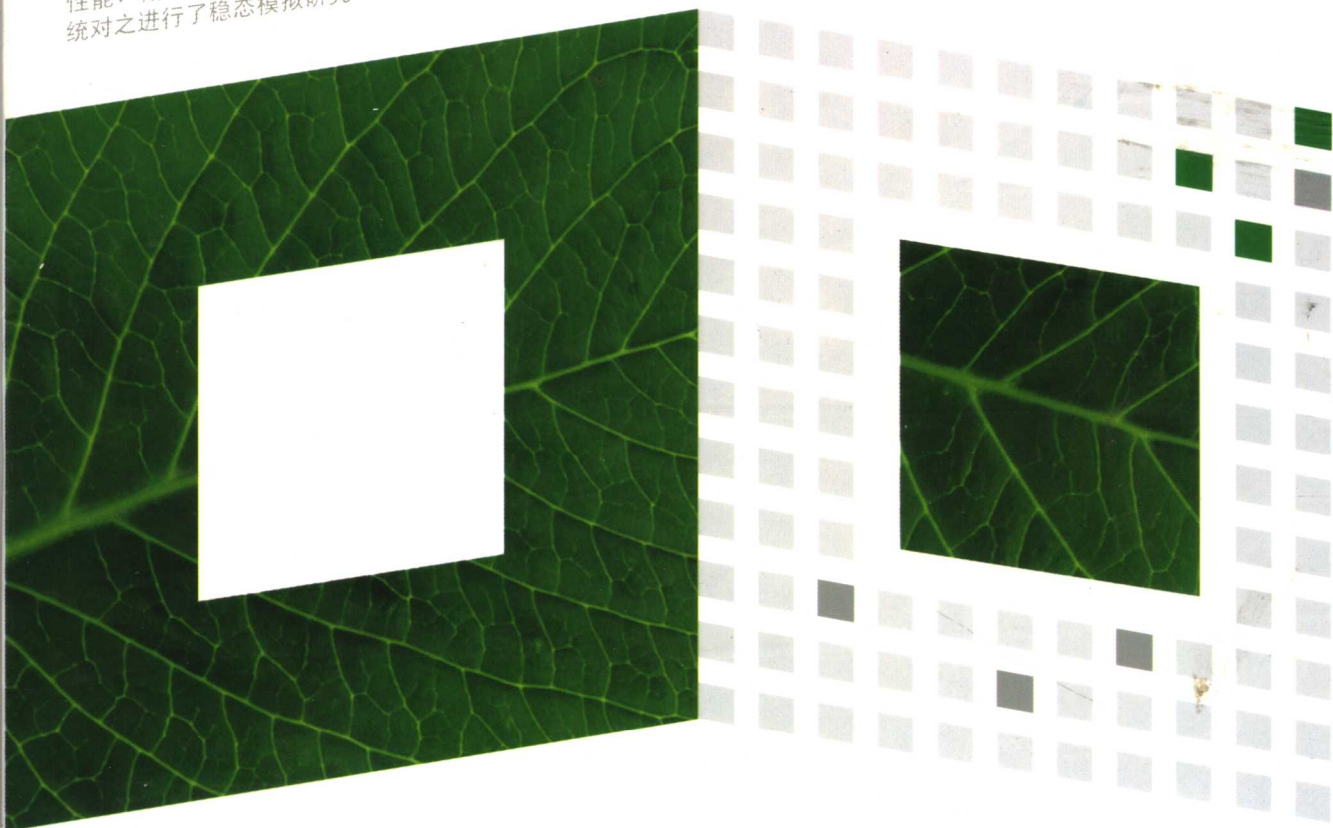
传统工业化海水淡化技术的运行原理大致可分为两类：(1) 相变过程，包括多级闪蒸 (MSF: Multi-stage flash)、多效沸腾 (ME: Multiple-effect boiling) 和蒸汽压缩 (VC: Vapour Compression) 等过程；(2) 渗析过程，主要有反渗透膜法 (RO: Reverse Osmosis) 和电渗析法 (ED: Electrodialysis) 等过程。相变过程最显著的优势就是能够重复利用蒸发与冷凝过程的潜热，使之在预热进入装置的海水的同时，冷凝部分蒸汽成为淡水产品。由于现阶段太阳能发电的成本相当高，利用太阳能发电提供渗析过程能量进行海水淡化并不经济，因此，太阳能与传统工业化海水淡化技术相结合仍主要集中在相变过程。

下面介绍的就是一组将太阳能技术与传统海水淡化技术充分结合的太阳能海水淡化系统。正是在充分认识降膜蒸发和降膜凝结传热优势的基础上，吸收传统工业化海水淡化技术中有利于太阳能利用的方面，创新设计出一组具有多效回热并能实现系统内部自平衡的太阳能海水淡化系统。为了尽快地了解该系统的性能，用电加热系统代替太阳能供热系统对之进行了稳态模拟研究。

太阳能海水淡化技术

Solar Desalinization Technology

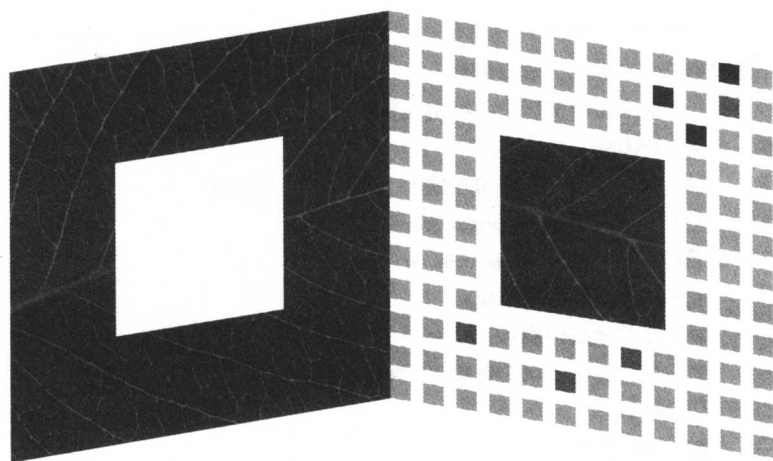
郑宏飞 何开岩 陈子乾/著



太阳能海水淡化技术

Solar Desalinization Technology

郑宏飞 何开岩 陈子乾/著



版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

太阳能海水淡化技术/郑宏飞,何开岩,陈子乾著. —北京:北京理工大学出版社,2005.5

ISBN 7-5640-0448-7

I. 太… II. ①郑…②何…③陈… III. 海水-太阳能-蒸馏法淡化 IV. P747

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第011560号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(发行部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

电子邮箱/chiefedit@bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京地质印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/15.5

字 数/363千字

版 次/2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷

印 数/1~1500册

定 价/35.00元

责任校对/陈玉梅

责任印制/李绍英

图书出现印装质量问题,本社负责调换

PREFACE



太阳能利用是一门新兴的综合性学科,近年来,理论和技术上都已取得了显著的进展,在许多方面的实际应用已显示出巨大的社会和经济效益,并且还蕴藏着巨大的发展潜力。

为了普及新能源和可再生能源,特别是太阳能利用的知识,推动新能源和可再生能源在海水淡化领域的应用,我们在多年研究太阳能海水淡化技术的基础上,撰写了太阳能海水淡化技术一书。期望本书能为我国的太阳能海水淡化事业做出积极的贡献。本书可供从事太阳能应用技术研究、海水淡化技术研究的科研和工程技术人员参考。也可作为大专院校高年级本科生和研究生的参考用书。

全书分八章,第一、四、五、八章由北京理工大学郑宏飞撰写,第三、六章由广西大学何开岩撰写,第二、七章由广西大学陈子乾撰写。全书再由郑宏飞作了总体的润色和统稿,以使全书有连贯性。本书在著述时力求严谨并结合实际,但是由于作者水平有限,疏漏谬误之处在所难免,恳请同行和读者不吝指正。

书中大量采用了前人的文献和观点,有些在脚注中给出了说明,其余的在章后的参考文献中列出,本书的作者对前人的贡献致以最诚挚的谢意。

本书在撰写和出版过程中,得到了北京理工大学左正兴教授、广西大学郭进教授、蒙沛南教授等的指导和关照,提出了许多有益的建议,作者表示衷心感谢!在书稿的校对和出版过程中,还得到了北京理工大学出版社范春萍、廖宏欢等同志的极大帮助,在此也表示衷心的感谢!

郑宏飞 何开岩 陈子乾

2005年2月20日



第一章 海水淡化的一般问题 /1

第一节 淡水资源的短缺与解决方案 /1

第二节 海水的组成及性质 /3

第三节 海水淡化过程的理论功耗及蒸馏过程的最小耗热量 /4

第四节 海水淡化一般方法概述 /8

第五节 太阳能海水淡化装置的分类及发展 /12

第六节 太阳能蒸馏的现存问题及解决方向 /16

参考文献 /17

第二章 太阳能利用与太阳能接收装置 /19

第一节 太阳辐射能 /19

第二节 我国的太阳能资源及其区划 /20

第三节 我国太阳能利用的现状与基本技术水平 /23

第四节 平板型太阳能集热器 /23

第五节 真空管型太阳能集热器 /34

第六节 太阳池 /38

第七节 聚焦型太阳能集热器 /43

第八节 太阳能光—电转换原理及一般系统 /48

参考文献 /48

第三章 太阳能海水淡化装置中的基本传热传质关系 /49

第一节 湿空气的物理性质和状态参数 /49

第二节 焓湿图和湿空气的基本热力过程 /53

第三节 空气与水直接接触时的热湿交换 /56

第四节 定压下水蒸气的发生过程 /60

第五节 定压下液体的沸腾过程 /62

第六节 定压下水蒸气的凝结过程 /67

第七节 定压下水的降膜蒸发过程 /72

第八节 降膜蒸发及凝结过程的强化 /75

第九节 在对流边界条件下平板和圆管壁的传热 /77

第十节 材料导热系数及其随温度的变化 /80

参考文献 /81

第四章 传统的太阳能海水淡化装置 /83

- 第一节 盘式太阳能蒸馏器 /83
- 第二节 多级盘式太阳能蒸馏器 /107
- 第三节 外凝结器式盘式太阳能蒸馏器 /108
- 第四节 多级芯型盘式太阳能蒸馏器 /108
- 第五节 聚光型太阳能蒸馏器 /109
- 第六节 倾斜式太阳能蒸馏器 /110
- 第七节 其他形式的被动式太阳能蒸馏器 /111
- 第八节 盘式太阳能蒸馏器的主要缺陷及改进方向 /112

参考文献 /115

第五章 主动式太阳能蒸馏器 /117

- 第一节 有平板式太阳能集热器辅助加热的盘式太阳能蒸馏器 /117
- 第二节 有盖板冷却的主动式太阳能蒸馏器 /125
- 第三节 有储热水箱的主动式太阳能蒸馏器 /126
- 第四节 有主动外凝结器的盘式太阳能蒸馏器 /127
- 第五节 能主动回收外凝结蒸汽潜热的盘式太阳能蒸馏器 /128
- 第六节 太阳能集热器与多级盘式太阳能蒸馏器的结合 /130
- 第七节 太阳能集热器主动加热的多级叠盘式蒸馏器 /134
- 第八节 有折皱底面的多级迭盘式蒸馏器 /137
- 第九节 饱和空气增湿减湿式太阳能蒸馏器 /140
- 第十节 降膜蒸发加湿除湿式太阳能蒸馏器 /142
- 第十一节 单级降膜蒸发与降膜冷凝式太阳能蒸馏装置 /144
- 第十二节 多级降膜蒸发与多级降膜凝结式太阳能蒸馏装置 /147
- 第十三节 带动力强化的盘式太阳能蒸馏器 /152
- 第十四节 降膜蒸发—气流吸附型闭式循环太阳能蒸馏系统 /154
- 第十五节 横管降膜蒸发闭循环式太阳能蒸馏装置 /161

参考文献 /166

第六章 与传统海水淡化技术相结合的太阳能海水淡化系统 /168

- 第一节 引言 /168
- 第二节 太阳能多级闪蒸海水淡化系统 /169
- 第三节 太阳能多效蒸发海水淡化系统 /179
- 第四节 太阳能蒸汽压缩蒸馏海水淡化系统 /187
- 第五节 利用淡水与海水的分压差进行海水淡化 /192
- 第六节 横管降膜蒸发多效回热式太阳能海水淡化装置 /195

参考文献 /201

第七章 太阳能空气取水器 /202

- 第一节 概述 /202
- 第二节 太阳能制冷结露法空气取水器 /202

第三节	太阳能吸附式空气取水器	/208
	参考文献	/212
第八章	吸收式与吸附式太阳能海水淡化系统	/213
第一节	吸收与吸附工质的一般特点与性能	/213
第二节	吸收式太阳能海水淡化系统	/214
第三节	与工业化海水淡化技术相结合的吸收式太阳能系统	/216
第四节	吸附式太阳能海水淡化系统	/221
第五节	与工业化海水淡化技术相结合的吸附式太阳能系统	/223
	参考文献	/228
附表 1	干空气的热物理性质	/230
附表 2	干饱和水蒸气的热物理性质	/231
附表 3	饱和水与饱和水蒸气热力性质表 (按温度排列)	/232
附表 4	饱和水与饱和水蒸气热力性质表 (按压力排列)	/234
附图 1	湿空气焓湿图	/236

第一章 海水淡化的一般问题

我国人均水资源量不足 2 400 m³，仅为世界人均水资源量的 1/4。沿海地区虽占国土面积的 13%，却居住着全国 40%的人口，提供 60%以上的国内生产总值。由于人口稠密，沿海地区大部分城市人均水资源量低于 500 m³，部分地区甚至在 200 m³ 以下，水资源的紧张正阻碍着这一地区的经济发展速度。从世界范围来看，许多国家正面临着人口增长的压力。据统计，到 1999 年，世界人口已超过 60 亿。预计到 2020 年，世界人口将达到 75 亿；而到 2050 年，世界人口将可能超过 90 亿。人口的快速增长，伴随着人均淡水资源占有需求的增加，据此可以肯定地预言，淡水资源的短缺将是许多国家未来必将面临的严重问题。因此，在海水资源丰富的地区，发挥临海优势，走海水淡化之路，是解决沿海城市缺水问题的一条重要途径。而且，目前应用海水淡化技术来开发辅助水源已成为各国最常采用的方法。

第一节 淡水资源的短缺与解决方案

淡水是人类社会赖以生存和发展的基本物质之一。人体的 60%是液体，其中主要是水。水对人体健康至关重要，一旦失去体内水分 10%，生理功能即将严重紊乱；失去水分 20%，人体很快就会死亡。人类以外的其他生命体也是如此，水是一切生命之源。水对社会经济而言也不可或缺，农作物无水会枯死，工业生产无水会瘫痪。因此，水亦是一切文明之源。地球表面积约为 $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，其中海洋面积占 70.8%。海洋的平均深度约为 3 800 m，所以地球上的总水量约为 $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ ^[1~3]。若从地球上人均占有总水量的水平来看，水资源是十分丰富的，人类似乎不应有缺水之虞。然而，由于含盐度太高而不能直接饮用或灌溉的海水占地球上总水量的 97%以上，仅剩占总量不到 3%的淡水。就这不到 3%的淡水，其分布也极不均衡，其 3/4 被冻结在地球的两极和高寒地带的冰川中，其余的从分布上看，地下水也比地表水多得多（多 37 倍左右）。如此算来，存在于河流、湖泊和可供人类直接利用的地下淡水已不足总量的 0.36%^[1~3]。地球上各种水资源的存量及占总水量、淡水的百分比见表 1-1。

表 1-1 全球水资源的分布^[4]

水资源贮存地	总量/km ³	占总水量的百分比/%	占淡水的百分比/%
大气中	12 900	0.001	0.01
冰川中	24 064 000	1.72	68.7
地表水	300 000	0.021	0.006

续表

水资源贮存地	总量/km ³	占总水量的百分比/%	占淡水的百分比/%
河流	2 120	0.000 2	0.006
湖泊	176 400	0.013	0.26
沼泽	11 470	0.000 8	0.03
地下土壤	16 500	0.001 2	0.05
极地	10 530 000	0.75	30.1
岩石圈	23 400 000	1.68	—
海洋	138 000 000	95.18	—
总量	1 396 513 390	—	—

表 1-2 大致给出了地球上的水资源分布及水质情况，工农业及生活用水对水质的要求示于表 1-3。

表 1-2 地球上的水资源分布及水质情况^[2]

水 源 分 布		水 量		水 质 (含盐量/10 ⁻⁶)
		体积/10 ⁹ m ³	占比例/%	
空气中水汽		12 900	0.001	
地 表 水	江河、湖泊	230 000	0.017	100~500**
	冰川	29 120 000	2.157	
	海洋	1 318 720 000	97.2	28 000~35 000
地 下 水		8 616 600	0.625	300~10 000
合 计		1 356 699 500	100.00	
** 部分少雨地区，地表水含盐量可达 0.1%~0.5%。某些内陆湖水含盐量可高达 4% 以上。				

表 1-3 各种应用对水质的要求^[2]

应 用 范 围	容 许 杂 质 含 量/10 ⁻⁶
饮 用	<500
工 业	1~3 000*
农 业	<3 000
★ 医药、电子等工业及某些科学实验用水，对水质的要求更高。	

由以上两表可见，海水虽多，却因含盐量太高而不能直接利用。地球上可供人类利用的淡水的分布又极不平衡。陆地上存在大量荒漠和半荒漠地区，这些地区雨量稀少，严重缺水，

不少水源含盐量较高,不能直接饮用,也不能供工农业利用。更为严重的是,随着世界人口的骤增和现代工业的迅速发展,一方面对淡水的需求量急剧增大;另一方面,由于工业废弃物的大量排放,使得大量河流、湖泊等原来洁净的水体受到严重污染,致使原本就不多的淡水资源遭到破坏,从而进一步加剧了人类淡水供求的矛盾。据估计,平均每人每年需用淡水约 $1\,500\sim 1\,800\text{ m}^3$ (包括工农业用水),这在降水量不太丰富的地区是极难满足的。目前,世界上许多国家不仅明显感到了工农业生产所需淡水的短缺,而且许多地区甚至难以找到符合饮用标准的水源。甚至某些国家之间发生冲突、战争亦起因于争抢淡水资源。因此,淡水的供应问题已成为人们必须考虑的根本问题之一。

据统计,我国水资源总量居世界第六位,但人均水资源拥有量仅为世界人均水资源量的 $1/4$ 。联合国可持续发展委员会等 7 个有关组织曾对 153 个国家和地区进行统计,我国人均水资源量排在世界第 121 位,被联合国列为 13 个最贫水国家之一。我国海岸线长,一些岛屿和沿海盐碱地区以及内陆苦咸水地区均属缺乏淡水的地区。这些地区的居民由于长期饮用不符合卫生标准的水,产生了各种病症,直接影响居民的身体健康和当地的经济建设。因此,解决淡水的供应不足也是我国面临的一个严峻问题。

为了增大淡水的供应,除了采用常规的措施,比如就近引水或跨流域引水之外,一条更有利的途径就是就近进行海水或苦咸水的淡化,特别是对于一些用水量分散而且偏远的地区而言更是如此。地球上最充足的水资源是海水,在许多地方,如我国的青海、西藏等高原地带,苦咸水也很丰富。在许多沿海地区和边远的内陆地区就近用海水或苦咸水淡化制取淡水要比从远处运输方便而且经济得多。

对海水或苦咸水进行淡化的方法很多,但常规的方法,如蒸馏法、离子交换法、渗析法、反渗透膜法以及冷冻法等,都要消耗大量的燃料或电力。据报道^[5~6],截至 1990 年,全世界已安装的海水淡化装置的产水能力为 $1.3\times 10^7\text{ m}^3/\text{d}$ 。而且每隔 10 年,这个数字就要增加一倍。淡化水的迅速增加,会产生一系列的问题,其中最突出的就是能源的消耗。据估计,每天生产 $1.3\times 10^7\text{ m}^3$ 的淡化水,则每年需要消耗原油 $1.3\times 10^8\text{ m}^3$ ^[1]。即使人们支付得起这笔燃料的费用,地球的温室效应、空气污染等也警示人们必须谨慎从事。因此,寻求用丰富而清洁的太阳能来进行海水淡化,必将受到青睐。从我国国情出发,情况亦是如此。我国广大地区如农村、孤岛等至今仍普遍缺乏电力,因此在我国能源较紧张的条件下,利用太阳能从海水(苦咸水)中制取淡水,乃是解决淡水缺乏或供应不足的重要途径之一。所以,利用太阳能进行海水淡化,有广泛的应用前景。

从经济上考虑,利用太阳能进行海水淡化亦越来越具有市场竞争力。在美国利用太阳能制取淡水,价格仅为每千克 11 美分,为一般纯净水价格的 $1/4$ 左右。据测算,在我国利用太阳能制取淡水,价格也仅为每千克 0.1 元左右,适合我国目前的消费水平。

第二节 海水的组成及性质^[2]

海水是一种具有复杂组成的液体,已知所含化学元素多达 80 余种,主要以离子形式存在。在海水浓缩、结晶过程中,这些离子多以盐的形式析出。其中有 11 种成分的含量超过 10^{-6} (见表 1-4),称为海水的“主要组分”,它们占海水总含盐量的 99.58%。

表 1-4 海水中的主要化学组分

元 素	Cl	Na	Mg	S	Ca	K	Br	Sr	B	Si	F
存在形式	Cl ⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	(SO ₄) ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Br ⁻	Sr ²⁺	B(OH) ₃	Si(OH) ₄	F ⁻
含量/10 ⁻⁶	19 000	10 500	1 350	885	400	380	65	8.0	4.6	3.0	1.3

此外，海水中也溶解有多种气体（见表 1-5），含量最多的为二氧化碳、氮气和氧气等。

表 1-5 海水中溶解的气体

气 体	CO ₂	N ₂	O ₂	Ar
含 量/10 ⁻⁶	102.5	12.82	8.05	0.479

海水中的悬浮物、溶解气体及 pH 值等，是海水淡化过程中与操作直接有关的影响因素，对海水预处理的方法及生产过程中的结垢、腐蚀等有很大影响。

海水的理化性质也是海水淡化装置的设计、计算和操作过程中必须考虑的参量。海水的一般化学性质见表 1-6，物理性质见表 1-7。

表 1-6 海水的一般化学性质

pH 值	氯度/‰	盐度/‰	总盐量/‰
7.5~8.4	~19.38	~34.85	~35.07

注：① 氯度指沉淀 0.328 523 3 kg 标准海水中全部卤素所需纯银的克数，单位为‰；
 ② 盐度指在 1 千克海水中，将所有碳酸盐及有机物完全氧化，将所有卤化物转化为氯化物后，其所含氧化物和氯化物的总克数，单位为‰；
 ③ 总盐量是海水中各溶解盐类浓度的总和，单位为‰。

表 1-7 海水的一般物理性质（25℃，1 个大气压下的标准海水）

密度 /(kg·m ⁻³)	比热 /(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	汽化潜热 /(kJ·kg ⁻¹)	冰点 /℃	沸点 /℃	蒸汽压 /Pa	渗透压 /Pa	动力黏度 /(Pa·s)
1 023.4	3.90	2 436.3	-1.91	100.56	0.981 2p ₀	-0.084T	0.96×10 ⁻³

注：表中 p₀ 为同温纯水的蒸汽压；T 为海水温度（K）。

第三节 海水淡化过程的理论功耗及蒸馏过程的最小耗热量

海水淡化是分离海水中盐和水的过程，要实现这一过程，可以通过气、液、固之间的各种相变过程来实现。但不管采用何种方法，或是经过何种途径，盐与水的分离均是一种非自发过程，都必须消耗一定的能量。如何减少这一过程的能量消耗，是海水淡化技术中必须首先考虑的问题。从热力学的角度来考虑，这些过程的理论最小耗能量 $W_{\min}$ 或最小功耗 W_{th} 分别是多少呢？

海水淡化过程的最小能耗和最小功耗是不同的概念。最小能耗是以热力学第一定律为基础，从能量的数量关系来考察系统的产出与付出的关系；最小功耗是以热力学第二定律为基础，从能量的品质关系来考察系统的产出与付出的关系。

海水淡化的最小功耗问题，许多学者都进行过讨论。其中，赛德曼（Sideman，1980）

认为海水淡化过程是从海水中分离出水蒸气的过程，从海水与蒸汽的熵、焓和自由能的关系出发，给出了海水淡化过程的理论最小功耗约为 $0.79 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ （在 25°C 时）^[7]。

而根据化学公式计算，假设海水淡化过程是内含盐量为 3.4% 海水中取出含盐量为 0.05% 的淡水，而使剩余浓盐海水的浓度提高 4 倍。从这一基本条件出发，也可计算淡化过程所需之理论功耗（极限情况）为^[7]：

$$W_{\text{th}}=1.41(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3)$$

事实上，在实际的海水淡化过程中，远远没有达到这一指标。具体到蒸馏过程，从卡诺循环的热工角度出发，可以给出蒸馏过程的最小功耗，计算如下：

图 1-1 给出了一个带有普遍性的海水脱盐过程的示意图。我们以此为依据，推导出适用于任何机理的脱盐过程所需的最小能量公式^[8~9]。选取图 1-1 所示的整个盐水转化系统作为研究的控制体，忽略动能和势能的变化，根据热力学第一定律，对于稳态稳流过程有：

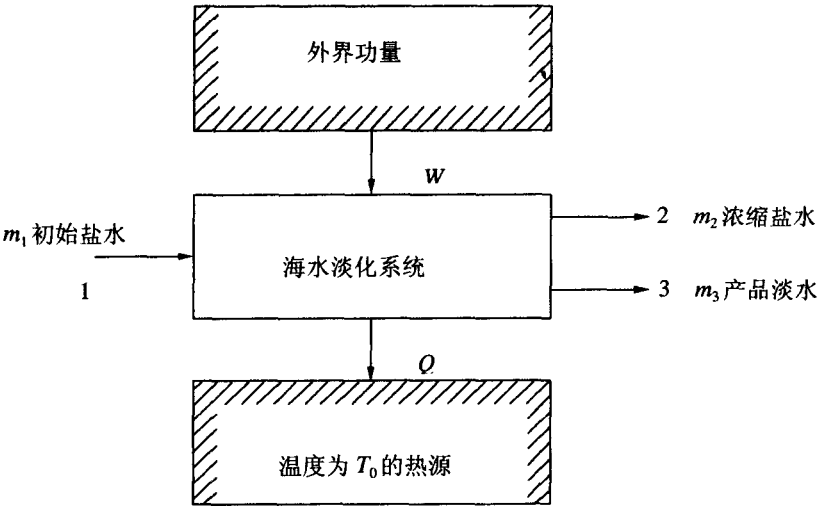


图 1-1 海水脱盐的普遍过程

$$W + m_1 i_1 = m_2 i_2 + m_3 i_3 + Q \quad (1-1)$$

式中， W 为外界输入系统的功； Q 为系统向低温热源的放热； m_1 ， m_2 ， m_3 分别为 1，2，3 点的质量流率，并有 $m_1 = m_2 + m_3$ ； i_1 ， i_2 ， i_3 分别为 1，2，3 点的流体的比焓。

如果过程是可逆的，由热力学第二定律有：

$$m_2 s_2 + m_3 s_3 + Q/T_0 - m_1 s_1 = 0 \quad (1-2)$$

式中， s_1 ， s_2 ， s_3 分别为 1，2，3 点流体的比熵。联立（1-1）和（1-2）式可得：

$$W = m_2 (i_2 - T_0 s_2) + m_3 (i_3 - T_0 s_3) - m_1 (i_1 - T_0 s_1) \quad (1-3)$$

上式即为从盐水中分离出淡水所需要最小功。它适用于任何可逆过程。如果过程既是等温的又是可逆的，则式（1-3）中的 T_0 可改写为 T ，那么

$$W = m_2 (i_2 - T s_2) + m_3 (i_3 - T s_3) - m_1 (i_1 - T s_1) \quad (1-4)$$

利用吉布斯函数的定义， $g = i - Ts$ ，则（1-4）式可写为：

$$W = m_2 g_2 + m_3 g_3 - m_1 g_1 \quad (1-5)$$

这里 g_1 ， g_2 ， g_3 分别为 1，2，3 点单位质量流体的吉布斯自由能。

实际的海水淡化过程,是将浓度为 C_1 的海水,分化成浓度为 C_2 的浓盐海水和浓度为 C_3 的淡水,即:海水 (C_1) $\rightarrow$ 浓盐海水 (C_2) + 淡水 (C_3)。

此过程所需的能量,与三者的浓度有关,需要的最小功,取决于海水淡化过程的终态与始态的自由能之差,即式 (1-5)。设 m_1 中有 n_1 mol 的盐, N_1 mol 的水,并用 $g_{1\text{盐}}$ 和 $g_{1\text{水}}$ 表示每摩尔盐和水在 1 点的自由能,显然, $m_1 g_1 = n_1 g_{1\text{盐}} + N_1 g_{1\text{水}}$ 。对 2 和 3 点作类似讨论,并代入式 (1-5) 得

$$W = (n_3 g_{3\text{盐}} + n_2 g_{2\text{盐}} - n_1 g_{1\text{盐}}) + (N_3 g_{3\text{水}} + N_2 g_{2\text{水}} - N_1 g_{1\text{水}}) \quad (1-6)$$

式中, n_3, n_2, n_1 ——淡水、浓盐海水、海水中电解质的摩尔数;

N_3, N_2, N_1 ——淡水、浓盐海水、海水中水的摩尔数;

$g_{3\text{盐}}, g_{2\text{盐}}, g_{1\text{盐}}$ ——淡水、浓盐海水、海水中每摩尔盐的自由能;

$g_{3\text{水}}, g_{2\text{水}}, g_{1\text{水}}$ ——淡水、浓盐海水、海水中每摩尔水的自由能。

设海水中的盐都是氯化钠,并且完全电离,利用活度与自由能的普遍关系,

$$g = g_0 + RT \ln a \quad (1-7)$$

a 为溶液中水的活度。如果活度近似用浓度 C 代替^[2],则各点上盐和水的摩尔自由能可写为:

$$g_{\text{盐}} = g_{\text{盐}}^0 + 2RT \ln C$$

$$g_{\text{水}} = g_{\text{水}}^0 + RT \ln \frac{N}{N+2n} \approx g_{\text{水}}^0 - 2RT \frac{n}{N}$$

式中, $g_{\text{盐}}^0, g_{\text{水}}^0$ 为标准状态下盐、水的自由能。注意,上式中运用了 N 远大于 n 的条件。

因为终态的浓盐海水与淡水中的盐和水的总量,分别等于始态海水中的盐和水的量,所以有:

$$n_3 + n_2 = n_1 \text{ 和 } N_3 + N_2 = N_1 \quad (1-8)$$

将这些关系代入式 (1-6) 中,经化简后得:

$$W = \Delta G = 2RT \left(n_3 \ln \frac{C_3}{C_1} + n_2 \ln \frac{C_2}{C_1} \right) \quad (1-9)$$

此即为海水淡化理论耗能量的计算公式。

假设在 25℃ 时,淡化前后初始海水、浓盐海水和淡水的盐浓度分别为:

$$C_1 = 0.582 \text{ mol/L}$$

$$C_2 = 2.328 \text{ mol/L}$$

$$C_3 = 0.00855 \text{ mol/L}$$

取 1 L 淡水作为计算基准,则: $n_3 = 5 \times 10^{-10} \times 1000 \text{ g} \div 58.5 \text{ g/mol} = 0.00855 \text{ mol}_{\text{盐}}/\text{L}_{\text{淡水}}$ 。另外可得每升溶液中,浓度 C_1 和 C_2 所对应的溶质摩尔数分别为 0.582 和 2.328。同时,设每得到 1 L 淡水,产生 x L 浓盐海水,则

$$1 \times (C_1 - C_3) = x (C_2 - C_1)$$

$$x = \frac{C_1 - C_3}{C_2 - C_1} = \frac{0.582 - 0.00855}{2.328 - 0.582} \text{ L} = 0.3286 \text{ L}$$

因此, $n_2 = 2.328 \times 0.3286 = 0.7649 \text{ (mol)}$ 。

$$\begin{aligned}
 W &= 2RT \left(n_3 \ln \frac{C_3}{C_1} + n_2 \ln \frac{C_2}{C_1} \right) \\
 &= 2 \times 8.314 \times 298.2 \left(0.00855 \times \ln \frac{0.00855}{0.582} + 0.7649 \times \ln \frac{2.328}{0.582} \right) \quad (1-10) \\
 &= 5.077 \times 10^3
 \end{aligned}$$

淡水密度为 1000 kg/m^3 ，则每生产 1 m^3 淡水所需要的最小功为：

$$W_{\min} = 5.077 \times 10^3 \times 1 \times 10^3 \times 1 / (3.6 \times 10^6) = 1.41 \text{ (kW} \cdot \text{h/m}^3\text{)}$$

即理论耗功量（电能或机械能等）约为 $1.41 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ ，或 $1.41 \times 3600 = 5076 \text{ kJ/m}^3$ 。

实际上目前各种淡化方法，产生 1 m^3 淡水所需的能量，都远远大于此值。除了实际情况与理想条件有所差别外，主要限于技术水平。这说明，海水淡化在降低能耗方面，尚有很大的潜力可以发掘。目前世界上最先进的海水淡化装置的单位产量耗功量（电能或机械能等）约为 25000 kJ/m^3 （淡水）（用反向渗透膜法和机械蒸汽压缩法）^[9]，约为理想条件下功耗的 5 倍。我国目前的反向渗透膜海水淡化技术基本达到国际先进水平，小型装置的单位淡水产量的耗功量甚至仅需 20000 kJ/m^3 ，约为最小功耗的 4 倍。

如果用热能代替功作为海水淡化的能源，则可通过卡诺循环效率求得所需的最小热量：

$$Q_{\min} = W_{\min} \frac{T}{T - T_0} \quad (1-11)$$

式中 T 为热源的温度， T_0 为冷源的温度，单位为 K。

例如以 100°C ，1 个大气压的水蒸气作为热源，环境温度为 21°C ，则得到单位淡水产量所需的最小热能为

$$\begin{aligned}
 Q_{\min} &= 1.41 \times \frac{373}{373 - 294} \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3 \\
 &= 6.66 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3 \text{ (淡水)} = 23976 \text{ kJ/m}^3 \text{ (淡水)}
 \end{aligned}$$

这一数值近似地相当于生产 1 m^3 淡水至少需要 $10.28 \text{ kg } 100^\circ\text{C}$ 的水蒸气，因为从每千克水蒸气中大约可取出 2330 kJ 的热量。

令 $t_0 \approx 25^\circ\text{C}$ 为定值， $W_{\min}$ 亦为定值。以 $Q_{\min}$ 对加热温度 T 作图，可得一曲线，如图 1-2 所示。

由图可见， $Q_{\min}$ 随 T 的升高而减小，但超过 140°C 以后，曲线已趋于平坦，故从热效率考虑，蒸馏过程的操作温度无需超过 $140 \sim 150^\circ\text{C}$ 。

在用蒸汽为海水淡化装置供热的系统中，一般以低压蒸汽供热最为经济，由于受防垢方法的限制， $T_{\max} < 130^\circ\text{C}$ 为宜。

对于太阳能供热装置，在目前技术条件下，太阳能集热器的集热温度最大可达到 120°C ，但性价比最高的集热器一般集热温度在 75°C 左右。此时蒸馏过程的最小热耗为：

$$Q_{\min} = 1.41 \times \frac{75 + 273}{(75 + 273) - (25 + 273)} \approx 9.8 \text{ (kW} \cdot \text{h/m}^3\text{)}$$

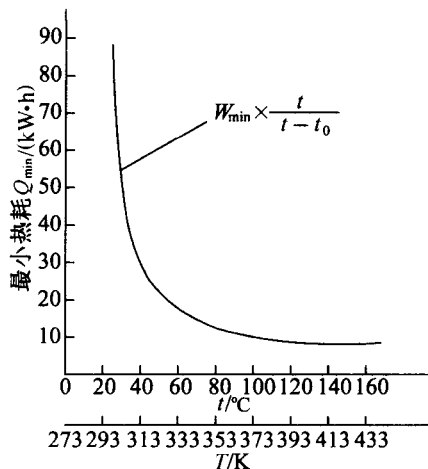


图 1-2 $Q_{\min}$ 与 T 的关系

第四节 海水淡化一般方法概述^[2]

从海水中取出淡水或去除海水中的盐分都可达到海水淡化的目的，实际的海水淡化过程也基本上可分为这两大类。目前可实际应用的海水淡化方法中，以前一类为主，仅电渗析法与离子交换法属于后一类。见表 1—8。

表 1—8 海水淡化一般方法

从海水中分离出淡水					从海水中分离出盐	
1. 蒸馏法	2. 冷冻法 (结晶法)	3. 水合物法 (结晶法)	4. 溶剂萃取法	5. 反渗透法 (膜法)	6. 电渗析法 (膜法)	7. 离子交换法
(1) 竖管蒸馏 (2) 蒸汽压缩蒸馏 (3) 多级闪蒸 (4) 太阳能蒸馏	(1) 蒸汽压缩式冷冻法 (2) 蒸汽吸收式冷冻法 (3) 冷媒直接接触冷冻法					

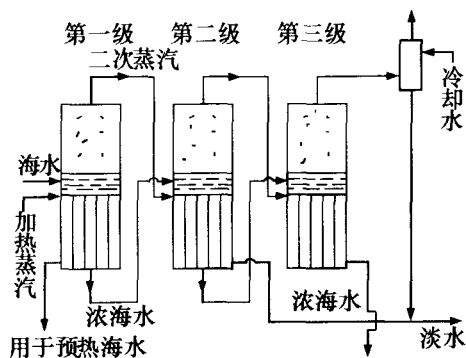


图 1—3 竖管蒸馏流程

级蒸发器进行蒸发。串联蒸发器的个数称为级数（亦有称效数），最末一级与减压系统相连，以保证浓海水沸点由首级至末级逐级降低，从而实现前一级中二次蒸汽对后一级浓海水的加热作用。自二级以后，各级的冷凝水即为产品淡水。

竖管蒸馏的优点是热利用效率高；缺点是锅垢危害严重、设备费用较高。

(2) 蒸汽压缩蒸馏 (Vapor Compression Distillation): 原理如图 1—4 所示，海水先经预热，至蒸发器中受热汽化，产生的二次蒸汽经压缩后，又返回蒸发器夹套中冷凝，这样就供给了过程所需的热量。此方法的特点是除了开工之初需辅助热源产生蒸汽作为

1. 蒸馏法

蒸馏法是将海水加热汽化，再使蒸汽冷凝而得淡水。根据所用能源及流程、设备不同，又可分为以下四种主要形式：

(1) 竖管蒸馏 (Vertical Tube Distillation): 流程如图 1—3 所示，将多个蒸发器串联，原料海水进入第一级蒸发器，由加热蒸汽间接加热，产生的蒸汽称为二次蒸汽，引至下一级蒸发器作为加热蒸汽使用，浓海水也依次进入下一

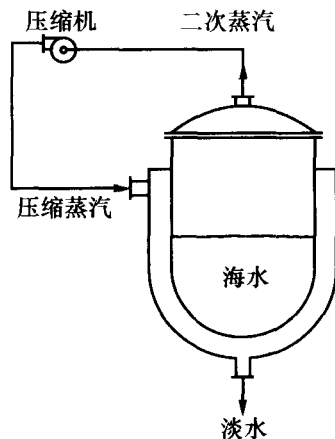


图 1—4 蒸汽压缩蒸馏原理

起动外，不需要外部热源。

蒸汽压缩蒸馏的优点是热利用效率高；缺点是锅垢危害严重。

(3) 多级闪蒸 (Multistage Flash Distillation): 多级闪蒸有多种流程方案，现介绍如图 1-5 所示的一种方案。海水先经加热，然后引至一个压力较低的设备中使之骤然蒸发，依次再进入压力更低的一级再骤然蒸发，产生的蒸汽在海水预热管外冷凝而得到淡水，经逐级预热的海水则进入主加热器中由来自热源的蒸汽加热。此方法的特点是加热与蒸发过程分离，设备构造较简单，费用较低，特别适合于大规模生产。缺点是盐水循环量大、运行费用高。

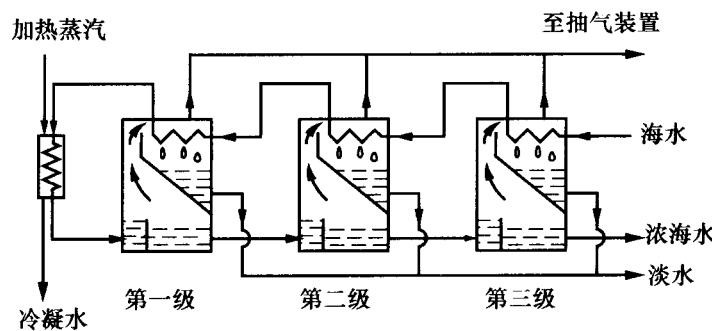


图 1-5 多级闪蒸流程

(4) 太阳能蒸馏 (Solar Distillation): 其原理是利用太阳的辐射热能，加热海水进行淡化。最简单的太阳能蒸馏器原理如图 1-6 所示。为增加吸热效率，盛海水的底盘涂成黑色，产生的蒸汽在太阳辐射透过率较高的玻璃板或塑料膜上冷凝而得到淡水。太阳能蒸馏是最古老的海水淡化方法，其优点是运行费用最低，设备也很简单。缺点是装置占地面积大，单位面积产水量低，且热性能受地区及气候条件影响。目前较简单的装置，平均日产淡水量仅为 $3 \sim 4 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 左右。

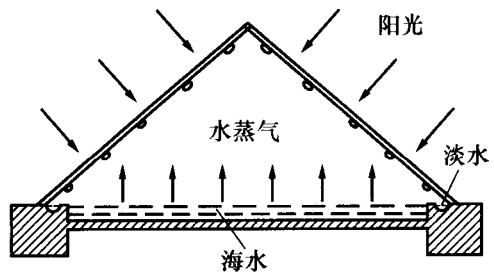


图 1-6 太阳能蒸馏原理

太阳能蒸馏法不受原水浓度的限制，淡水纯度高（一般可达 $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-5}$ ），特别适用于气温高、日照时间长的缺水地区。在热源充足和有废热可利用的地区也可采用类似于图 1-3~图 1-5 的装置方便地得到淡水。

2. 冷冻法

海水结冰时，只有纯水呈冰晶析出，盐则不同时析出，取冰融化即得淡水。利用这一原理进行海水淡化的方法，即为冷冻法。根据所用冷冻剂不同及冷冻的处理方法不同，冷冻法又分为以下三种形式：

(1) 蒸汽压缩式真空冷冻法 (Vacuum Freeze-Vapor Compression Method): 原理如图 1-7 所示，海水预冷至零度左右后，喷入高真空冷冻室中，部分水汽化吸热，使剩余海水冷冻而析出冰晶（水本身即为冷冻剂）。形成的冰晶与盐水的固液混合物，经分离洗涤后，除去冰晶表面附着及内部包藏的盐分，然后溶化而得淡水。产生的蒸汽经压缩后进入融化器

冷凝。冰融化和蒸汽冷凝所得淡水，一部分用做产品淡水放出，另一部分返回洗涤分离器中用于洗涤固液混合物。

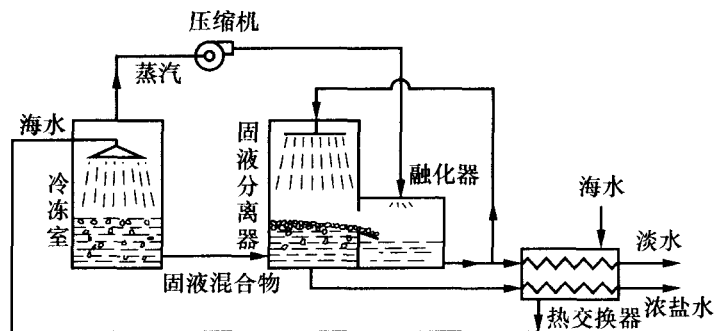


图 1-7 蒸汽压缩式真空冷冻法海水淡化原理

(2) 蒸汽吸收式真空冷冻法 (Vacuum Freeze-Vapor Absorption Method): 原理如图 1-8 所示, 以吸收剂吸收冷冻室产生的蒸汽, 从而使海水不断汽化与冷冻结冰。稀释后的吸收剂, 经浓缩再生后循环使用。除以吸收系统代替压缩机外, 其他与蒸汽压缩式冷冻法相同。

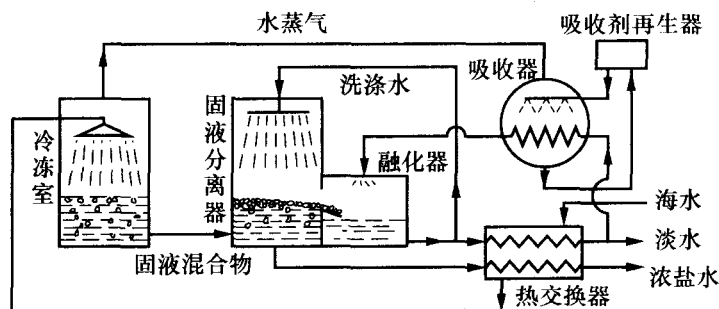


图 1-8 蒸汽吸收式真空冷冻法海水淡化原理

(3) 冷媒直接接触冷冻法 (Direct Refrigerant Freezing Process): 原理如图 1-9 所示, 以不溶于水、沸点接近于海水冰点的正丁烷为冷冻剂, 与海水混合, 预冷后进入冷冻室中。室内温度约为 -3°C , 压力稍低于大气压, 正丁烷便汽化吸热, 使海水冷冻结冰。正丁烷蒸汽压缩至 1 个大气压以上, 进入融化器与冰直接接触, 正丁烷蒸汽液化, 冰融化, 形成的水与正丁烷的不互溶体系, 借密度不同而分离, 水作为产品放出, 正丁烷在过程中循环使用。

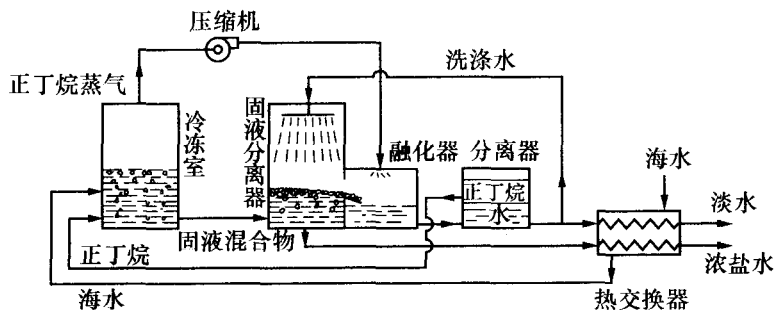


图 1-9 冷媒直接接触冷冻法海水淡化原理