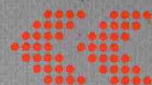
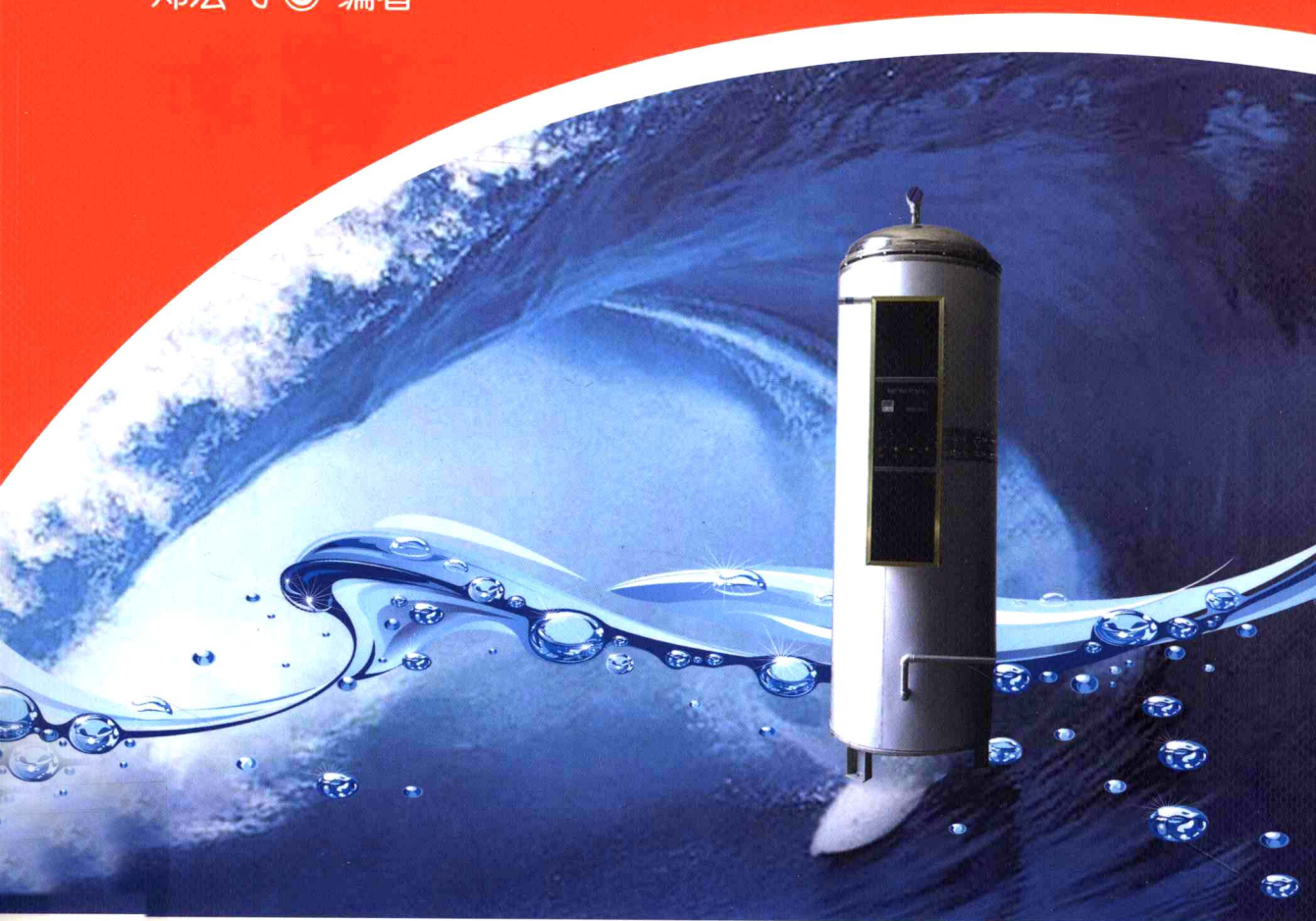


SOLAR DESALINATION
PRINCIPLE AND TECHNOLOGY



太阳能海水淡化 原理与技术

郑宏飞 © 编著



化学工业出版社

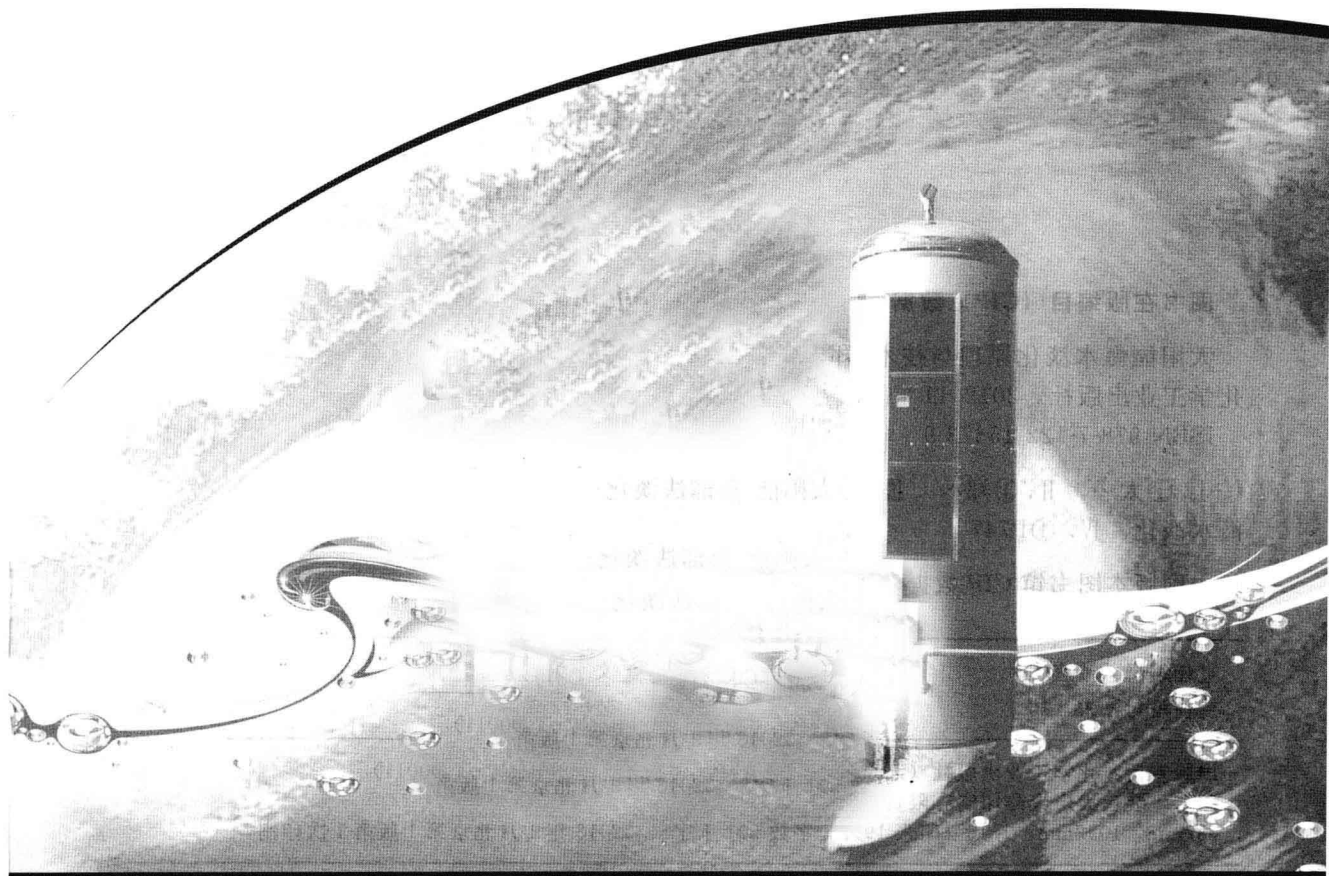
SOLAR D
PRINCIPLE AND TECHNOLOGY



太阳能海水淡化 原理与技术



郑宏飞 ◎ 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书较系统地介绍了以太阳热能为主要能源的各类海水淡化技术。对各类新型的太阳能海水淡化技术进行了分类和总结,简要介绍了太阳能集热技术和它们的技术特点。重点讨论了传统被动式和主动式的太阳能蒸馏器、空气加湿除湿型太阳能海水淡化技术和多种太阳能技术结合的海水淡化装置,介绍了它们的原理和性能。还讨论了与常规海水淡化技术相结合的太阳能海水淡化系统、吸收式与吸附式太阳能海水淡化系统,对它们的能量利用效率和性能系数进行了分析和计算,介绍了它们的运行原理和未来发展的方向。最后,对太阳能海水淡化系统的经济性以及常用的装置材料进行初步讨论,提出了部分建议。

本书可作为大专院校的本科生及研究生教材,可供太阳能热利用、海水淡化、能源工程和水处理等部门的科研、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能海水淡化原理与技术/郑宏飞编著. —北京:
化学工业出版社, 2012. 11
ISBN 978-7-122-15373-9

I. ①太… II. ①郑… III. ①太阳能-蒸馏法淡化-
海水淡化 IV. ①P747

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 222117 号

责任编辑:戴燕红
责任校对:宋 玮

文字编辑:丁建华
装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张19 $\frac{3}{4}$ 字数501千字 2013年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 80.00 元

版权所有 违者必究

前言



世界上许多地方都缺乏淡水，中国更是缺水的国家，利用海水淡化是解决人类淡水短缺的重要手段之一。然而，利用常规能源进行海水淡化需要消耗大量化石燃料，同时还会释放出大量温室气体，对人类十分不利。所以，研究利用太阳能进行海水淡化具有重要的社会意义和经济价值。

随着太阳能利用技术的日益成熟，不论是太阳能集热还是太阳能光伏发电，都已经达到实用阶段，特别是太阳能中低温集热技术，已经成为我国太阳能利用的普及技术，集热温度可以很容易达到 150°C ，非常适合用于海水淡化。在这方面的实际应用也已经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《太阳能海水淡化原理与技术》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。本书对太阳能海水淡化技术进行了分类，分为被动式、主动式、加湿除湿式、吸收吸附式、多技术复合式以及与现代海水淡化工业结合式等，提出了各种太阳能海水淡化技术所面临的问题，指出了未来发展的方向。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。也可作为相关院校高年级本科生和研究生的参考用书。

全书分八章，有些章节取自作者原来所著的《太阳能海水淡化技术》一书，但大部分内容已由作者进行了重新润色和修改，增加了新的内容，并根据技术的新发展撰写了新的章节，有些章节还增加了示范装置的照片。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，疏漏和不妥之处在所难免，恳请同行和读者不吝指正。

书中引用了一些前人的文献和观点，并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。如有遗漏的，作者表示最诚恳的歉意。

本书在撰写和出版过程中，得到了北京理工大学熊建银、康慧芳、杨英俊、段占春、韦月霞、常泽辉、谢果、郑子行、戴静、薛晓迪、陶涛、张海莹、江帆、冯朝卿等老师和同学的帮助，还得到广西大学何开岩、陈子乾、郭进等教授及重庆后勤工程学院陈志莉教授的指导和帮助，作者表示衷心感谢！

郑宏飞
2012年8月25日

目 录



第一章 海水淡化的一般问题	1
第一节 太阳能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 一般海水淡化方法概述	7
一、蒸馏法	7
二、冷冻法	9
三、电渗析法	10
四、反渗透法	11
五、溶剂萃取法	11
六、水合物法	11
七、离子交换法	12
八、材料吸收与吸附法	12
九、空气加湿与除湿法	12
第五节 太阳能海水淡化的历史沿革	13
第六节 太阳能海水淡化装置的分类及发展	15
一、太阳能海水淡化装置的分类	15
二、热法太阳能海水淡化技术	17
三、膜法太阳能海水淡化技术	18
四、热法与膜法相结合的太阳能海水淡化技术	19
五、与常规海水淡化装置相结合的太阳能系统	20
六、太阳能电-水联产技术	22
七、目前世界各地运行的主要太阳能海水淡化系统	23
第七节 太阳能海水淡化面临的问题及发展方向	26
一、传统太阳能蒸馏技术面临的问题	26
二、太阳能海水淡化技术的发展方向	26
参考文献	27
第二章 太阳能利用与太阳能接收装置	29
第一节 太阳能集热器的种类及基本技术水平	29
第二节 平板型太阳能集热器	32

一、平板型太阳能集热器的结构	32
二、平板型太阳能集热器的性能参数	35
三、平板型太阳能集热器的热损系数	37
四、影响平板型太阳能集热器效率的因素	38
五、平板型太阳能集热器的选择	39
第三节 真空管型太阳能集热器	42
一、全玻璃真空管太阳能集热器	42
二、金属-玻璃真空管太阳能集热器	43
三、真空管太阳能集热器模块	44
第四节 太阳池	46
第五节 聚焦型太阳能集热器及特点	51
一、太阳能聚焦集热系统	51
二、太阳能聚光集热系统的一般结构	54
三、聚光比对系统集热温度的影响	56
四、太阳能聚光系统的热效率	57
第六节 非成像聚光器	58
一、复合抛物面太阳能聚光器的结构特点	59
二、CPC 聚光器的朝向和接收的能量	64
第七节 抛物面型太阳能聚光器	64
一、抛物面碟式太阳能聚光系统	65
二、槽式抛物面太阳能聚光器	68
第八节 阵列式菲涅耳镜反射聚光系统	72
一、阵列式菲涅耳镜反射聚光系统的结构	73
二、接收器的结构与选择	74
第九节 塔式太阳能聚光系统	75
一、塔式太阳能聚光系统工作原理	75
二、塔式太阳能聚光系统的定日镜	76
三、塔式太阳能聚光系统的中央接收器	78
四、塔式太阳能热发电系统的蓄热系统	78
五、塔式太阳能聚光系统的光学效率及热效率	79
参考文献	80

第三章 传统的太阳能海水淡化装置

第一节 盘式太阳能蒸馏器	81
一、盘式太阳能蒸馏器的运行原理	81
二、盘式太阳能蒸馏器的性能分析	82
三、蒸馏器的效率	84
四、蒸馏器中的自然对流换热系数 h_c 的确定	84
五、盘式太阳能蒸馏器在实际天气条件下的运行	94
第二节 多级盘式太阳能蒸馏器	104
第三节 外凝结器式盘式太阳能蒸馏器	106

第四节	多级芯型盘式太阳能蒸馏器	106
第五节	聚光型太阳能蒸馏器	107
第六节	倾斜式太阳能蒸馏器	109
第七节	其他形式的被动式太阳能蒸馏器	110
第八节	盘式太阳能蒸馏器的主要缺陷及改进的方向	112
参考文献		114

第四章 主动式太阳能蒸馏器 116

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	116
一、装置的性能分析		117
二、装置的实验运行		121
第二节	具有盖板冷却的主动式太阳能蒸馏器	123
第三节	有储热水箱的主动式太阳能蒸馏器	124
第四节	有主动外凝结器的盘式太阳能蒸馏器	125
第五节	具有主动回收潜热的外凝结器式太阳能蒸馏器	126
第六节	太阳能集热器与多效盘式太阳能蒸馏器的结合	128
第七节	太阳能集热器主动加热的多级叠盘式蒸馏器	132
第八节	具有褶皱底面的多级叠盘式蒸馏器	135
第九节	双热源多级叠盘式太阳能蒸馏器	138
第十节	管式太阳能蒸馏器	143
一、单效管式太阳能蒸馏器		144
二、两效管式太阳能蒸馏器		148
三、三效管式太阳能蒸馏器		149
四、负压下管式蒸馏器的产水性能		152
第十一节	单级降膜蒸发与降膜冷凝式太阳能蒸馏装置	153
第十二节	多级降膜蒸发与多级降膜冷凝式太阳能蒸馏装置	156
第十三节	带动力强化的盘式太阳能蒸馏器	160
第十四节	横管降膜蒸发闭循环式太阳能蒸馏装置	162
一、装置的运行原理		162
二、装置的性能		163
三、结论		166
第十五节	竖壁自储水式太阳能蒸馏器	166
参考文献		171

第五章 加湿除湿型太阳能海水淡化装置 173

第一节	湿空气的物理性质和状态参数	173
一、湿空气的物理性质		173
二、湿空气的状态参数		175
第二节	焓湿图和湿空气的基本热力过程	177
一、焓湿图 ($h-d$ 图)		177
二、湿空气的基本热力过程		178

第三节 空气与水直接接触时的热湿交换	180
一、空气与水之间的热湿交换原理	180
二、空气与水直接接触时的状态变化过程	182
第四节 加湿除湿式太阳能海水淡化装置的原理与分类	183
第五节 热水型太阳能加湿除湿海水淡化系统	184
第六节 太阳能热空气型加湿除湿型海水淡化系统	191
第七节 太阳能热水与热空气复合型加湿除湿型海水淡化系统	195
第八节 多效太阳能加湿除湿海水淡化系统	199
第九节 降膜蒸发-气流吸附型闭式循环太阳能蒸馏系统	201
一、蒸发-气流吸附过程的传质问题	202
二、降膜蒸发-气流吸附型太阳能蒸馏装置的工作原理	203
三、实验装置的描述	203
四、实验结果与讨论	204
第十节 其他典型的空气加湿除湿型太阳能海水淡化系统	209
一、塔式空气加湿除湿型太阳能蒸馏器	209
二、降膜蒸发加湿除湿型太阳能蒸馏器	211
参考文献	213

第六章 与常规海水淡化技术相结合的太阳能海水淡化系统 215

第一节 太阳能多级闪蒸海水淡化系统	216
一、多级闪蒸原理及相关技术	216
二、太阳能多级闪蒸海水淡化系统	221
第二节 太阳能多效蒸馏海水淡化系统	225
一、多效蒸馏淡化原理	225
二、多效蒸馏流程的分类	226
三、多效蒸馏设备的分类	227
四、效间温度差分配与影响效数的因素	229
五、工艺条件	230
六、多效蒸馏的优缺点	231
七、太阳能多效蒸馏的装置的实验运行	231
第三节 太阳能蒸汽压缩蒸馏海水淡化系统	233
一、压缩蒸馏的原理	233
二、压缩蒸馏过程	234
三、蒸汽压缩蒸馏的主要形式	235
四、蒸汽压缩蒸馏的优缺点	238
五、太阳能压缩蒸馏装置	238
第四节 利用淡水与海水的分压差进行海水淡化	239
第五节 横管降膜蒸发多效回热式太阳能海水淡化装置	242
一、实验装置及运行原理	242
二、实验结果与分析	244
三、系统在实际天气下的运行	246

四、结论·····	248
第六节 与太阳池结合的低温多效海水淡化系统·····	248
第七节 太阳能光伏电池驱动的反渗透海水淡化系统·····	250
第八节 太阳能光伏热技术联合驱动的反渗透海水淡化系统·····	255
第九节 太阳能热动力循环驱动的反渗透海水淡化系统·····	256
第十节 塔式太阳能海水淡化系统·····	258
参考文献·····	261
第七章 吸收式与吸附式太阳能海水淡化系统 ·····	263
第一节 吸收与吸附工质的一般特点与性能·····	263
第二节 吸收式太阳能海水淡化系统·····	264
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·····	266
第四节 一个多效吸收式太阳能海水淡化系统的实际测量与评价·····	271
一、实验装置的结构·····	271
二、实验装置的运行原理·····	272
三、实验结果与分析·····	273
第五节 吸附式太阳能海水淡化系统·····	277
第六节 与工业化海水淡化技术相结合的吸附式太阳能系统·····	281
一、单效吸附式太阳能海水淡化系统·····	281
二、多效吸附式太阳能海水淡化系统·····	285
参考文献·····	289
第八章 太阳能海水淡化的效益评价与材料选用 ·····	291
第一节 太阳能海水淡化的经济可行性·····	291
第二节 太阳能海水淡化系统的经济评价方法·····	293
一、资金的时效性·····	293
二、已经安装完成的太阳能海水淡化系统的经济分析·····	294
三、两个系统的实例计算·····	297
四、选址状态下的太阳能海水淡化系统的经济分析·····	298
五、系统规模对产水成本的影响·····	299
六、影响系统产水成本的多因素分析·····	300
第三节 太阳能海水淡化装置的材料选用·····	301
一、海水对金属材料腐蚀的基本过程·····	302
二、海水对金属材料腐蚀的影响因素·····	302
三、导热性能对材料选择的影响·····	304
四、金属材料的其他性质对材料选择的影响·····	305
参考文献·····	306

第一章



海水淡化的一般问题

我国人均水资源不足 2400m^3 ，仅为世界平均水平的 $1/4$ 。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% 以上的国民生产总值。由于人口稠密，沿海地区大部分城市人均水资源量低于 500m^3 ，部分地区的人均水资源量甚至在 200m^3 以下，水资源的紧张正阻碍着这一地区的经济发展速度。因此发挥临海优势，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为各国最常采用的方法。

第一节 太阳能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，一旦失去体内水分的 10% ，生理功能即严重混乱；失去水分 20% ，人体很快就会死亡。水对人类以外的生命也是如此，它是一切生命之源。水对社会经济而言也不可或缺，农作物无水会枯死，工业生产无水会面临瘫痪。因此，水是一切文明之源。地球表面积约为 5.1 亿平方公里，其中海洋面积就占据了它的 70.8% 。海洋的平均深度约为 3800m ，所以地球上的总水量约有近 14 亿立方公里^[1~3]。若从地球上人均占有水量来看，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据了地球上总水量的 97% 以上，仅剩的不到 3% 的淡水，其分布也极其不均，它的 $3/4$ 被冻结在地球的两极和高寒地带的冰川中，其余的从分布上说，地下水也比地表水多得多（多 37 倍左右）。剩下的存在于河流、湖泊和可供人类直接利用的地下淡水已不足 0.36% ^[1~3]。在地球上各种水资源的存量及占总水量的百分数见表 1-1。

表 1-1 全球水资源的分布^[4]

水资源储存地	总量/ km^3	占总水量的百分数/%	占淡水的百分数/%
大气中	12900	0.001	0.01
冰川中	24064000	1.72	68.7
地表水	300000	0.021	0.006
河流	2120	0.002	0.006
湖泊	176400	0.013	0.26
沼泽	11470	0.0008	0.03
地下土壤	16500	0.0012	0.05
极地	10530000	0.75	30.1
岩石圈	23400000	1.68	—
海洋	138000000	95.18	—
总量	1396513390		

表 1-2 大致给出了地球上水资源的分布及水质情况，工农业及饮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)/ppm ^①
		体积/10 ⁹ m ³	占比例/%	
空气中水汽		12900	0.001	
地表水	江河、湖泊	230000	0.017	100~500 ^②
	冰川	29120000	2.157	
	海洋	1318720000	97.2	28000~35000
地下水		8616600	0.625	300~10000
合计		1356699500	100.00	

① 1ppm=1/1000000=1mg/L。

② 部分少雨地区，地表水含盐量可达 1000~5000ppm。某些内陆湖水含盐量可高达 40000ppm 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/ppm
饮用	<500
工业	1~3000 ^①
农业	<3000

① 医药、电子等工业及某些科学实验用水，对水质的要求更高。

由表 1-2、表 1-3 可见，海水虽多，却因含盐量太高而不能直接应用。地球上可供人类利用的淡水的分布又极不平均。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，现代工业的迅速发展，一方面使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泄，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 1500~1800m³（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。某些国家之间发生冲突甚至战争实起因于争抢淡水资源。全球每年有 3.575×10^6 人死于与不洁净水有关的疾病^[5]。因此，淡水的供应问题已成为人们必须考虑的根本问题。

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平均值的 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。这些地区的人民由于长期饮用不符合卫生标准的水，产生了各种病症，直接影响着人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。

目前，我国城市缺水总量达 60 亿立方米。特别是人口占全国的 40% 以上，社会总产值占全国的 60% 的我国沿海地带和海岛地区，缺水数量占到全国缺水总量的 1/3 以上，水资源紧张已成为制约这些地区经济和社会发展的瓶颈。据专家统计和预测，沿海城市的用水量年增长率在 1998~2007 年间为 4.5%~6.5%，在 2010~2015 年将是 1998 年的 2 倍，缺水状况将进一步恶化。以现在中国经济发展的第三极——天津滨海新区为例，天津市人均水资源占有量为每年 153m³，是全国人均水资源占有量的 6.9%，已经严重制约了滨海新区的发展^[6]。

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,一条有利的途径就是就近进行海水或苦咸水的淡化,特别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,截至1990年,全世界已安装的海水淡化装置的产水能力为 $13 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}^{[7,8]}$ 。但是到2008年,根据国际海水淡化协会报告,世界范围的海水淡化系统合同装机容量已经达到 $87 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$,而正在运行的系统容量为 $63 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}^{[9,10]}$ 。可见这个数字增加非常惊人,基本上每隔10年,这个数字就要增加一倍还多。淡化水的迅速增加,就会产生一系列的问题,其中最突出的就是能源的消耗问题。据估计,在1990年的阶段,每天生产 $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的淡化水,每年需要消耗原油1亿3千万吨^[1]。即使到现阶段,技术有了相当大的进步,每天要生产 $63 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的淡水,也需要耗电 $3.78 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{d}$,每天需要排放近400000t CO_2 。即使人们支付得起这笔燃料的费用,但地球的温室效应、空气污染等也告示人们必须谨慎从事。因此,寻求用太阳能来进行海水淡化,必将受到人们的青睐。从我国国情出发,情况亦是如此。我国广大农村、孤岛等地区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上的竞争力,在美国利用太阳能制取淡水,价格仅为每公斤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,价格也仅为每公斤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1ppm(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+}	$(\text{SO}_4)^{2-}$	Ca^{2+}	K^+	Br^-	Sr^{2+}	$\text{B}(\text{OH})_3$	$\text{Si}(\text{OH})_4$	F^-
含量/ppm	19000	10500	1350	885	400	380	65	8.0	4.6	3.0	1.3

注: $1\text{ppm}=10^{-6}$ 。

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、氮和氧等。

表 1-5 海水中溶解的气体

气 体	CO_2	N_2	O_2	Ar
含量/ppm	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	约 19.38	约 34.85	约 35.07

注：1. 氯度指沉淀 0.3285233kg 标准海水中全部卤素所需纯银的量 (g)，单位为‰。

2. 盐度指在 1kg 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量 (g)，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℃, 101325Pa 下的标准海水)

密度 /(kg/m ³)	比热容 /[kJ/(kg·℃)]	汽化热 /(kJ/kg)	冰点 /℃	沸点 /℃	蒸汽压 /Pa	渗透压 /Pa	动力黏度 /[kg/(m·s)]
1023.4	3.90	2436.3	-1.91	100.56	0.9812 p_0	-0.084 T	0.96×10 ⁻³

注：表中 p_0 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。而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；而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，Sideman (1980) 把海水淡化过程认为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 0.79kW·h/m³ 淡水（在 25℃ 时）^[10]。

而根据化学计算，设海水淡化过程是内含盐量为 34000ppm 海水中，取出含盐量为 500ppm 的淡水，而剩余浓海水的浓度提高 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（极限情况）为^[10]：

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

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。以此为依据，可以推导出适用于任何机理的脱盐过程所需的最小能量公式^[11,12]，选取图 1-1 所示的整个盐水转化系统作为所研究的控制体，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：

$$W + m_1 h_1 = m_2 h_2 + m_3 h_3 + Q \quad (1-1)$$

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 $m_1 = m_2 + m_3$ ； h_1 、 h_2 、 h_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。联立式(1-1) 和式(1-2) 可得：

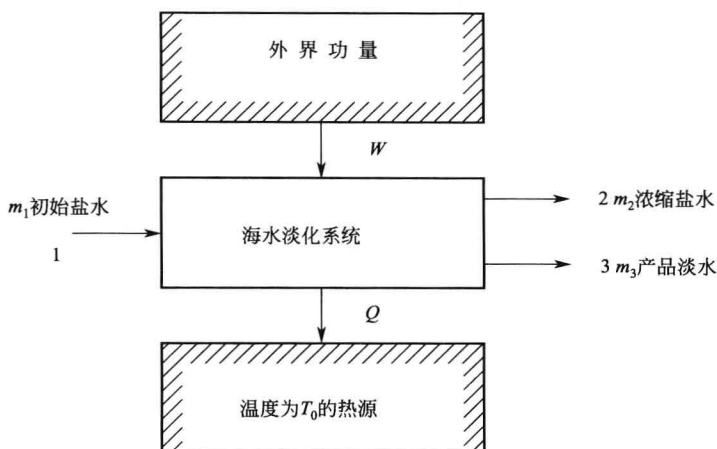


图 1-1 海水脱盐的普遍过程

$$W = m_2(h_2 - T_0 s_2) + m_3(h_3 - T_0 s_3) - m_1(h_1 - T_0 s_1) \quad (1-3)$$

式(1-3)即为从盐水中分离出淡水所需要的最小功。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

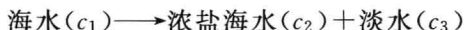
$$W = m_2(h_2 - T s_2) + m_3(h_3 - T s_3) - m_1(h_1 - T s_1) \quad (1-4)$$

利用吉布斯函数的定义， $g = h - Ts$ ，则式(1-4)可写成为：

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

式中， 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，淡化成浓度为 c_2 的浓盐海水和浓度为 c_3 的淡水，即



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 摩尔的盐， N_1 摩尔的水，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、海水中电解质的物质的量，mol；

N_3 、 N_2 、 N_1 ——淡水、浓盐海水、海水中水的物质的量，mol；

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

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

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

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

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

$$g_{\text{盐}} = g_{\text{盐}}^0 + 2RT \ln c \quad (1-8)$$

$$g_{\text{水}} = g_{\text{水}}^0 + RT \ln \frac{N}{N+2n} \approx g_{\text{水}}^0 - 2RT \frac{n}{N} \quad (1-9)$$

式中， $g_{\text{盐}}^0$ 、 $g_{\text{水}}^0$ 分别为标准状态下盐、水的自由能，J/mol。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，等于始态海水中的量，所以有：

$$n_3 + n_2 = n_1 \text{ 和 } N_3 + N_2 = N_1 \quad (1-10)$$

将这些关系代入式(1-6)中，经化简后得：

$$W = \Delta G = 2RT \left(n_3 \ln \frac{c_3}{c_1} + n_2 \ln \frac{c_2}{c_1} \right) \quad (1-11)$$

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：

$$c_1 = 34000 \text{ ppm} = 0.582 \text{ mol/L}$$

$$c_2 = 136000 \text{ ppm} = 2.328 \text{ mol/L}$$

$$c_3 = 500 \text{ ppm} = 0.00855 \text{ mol/L}$$

取 1L 淡水作为计算基准，则： $n_3 = 500 \times 10^{-3} \text{ g/L} \div 58.5 \text{ g/mol} = 0.00855 \text{ mol 盐/L 淡水}$ 。
另外可得每升溶液中，浓度 c_1 和 c_2 所对应的溶质浓度分别为 0.582mol/L 和 2.328mol/L。
同时，设每得到 1L 淡水，产生 x 升浓盐海水，则

$$1 \times (c_1 - c_3) = x(c_2 - c_1) \quad (1-12)$$

$$x = \frac{c_1 - c_3}{c_2 - c_1} = \frac{0.582 - 0.00855}{2.328 - 0.582} = 0.3286 \text{ (L)} \quad (1-13)$$

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

$$\begin{aligned} W &= 2RT \left(n_3 \ln \frac{c_3}{c_1} + n_2 \ln \frac{c_2}{c_1} \right) \\ &= 2 \times 8.314 \times 298.2 \left(0.00855 \times \ln \frac{0.00855}{0.582} + 0.7649 \times \ln \frac{2.328}{0.582} \right) \\ &= 5.077 \times 10^3 \text{ (kJ/L)} \end{aligned} \quad (1-14)$$

淡水密度为 1000kg/m³，则每生产 1t 淡水所需要的最小功为：

$$W_{\min} = 5.077 \times 10^3 \times 1 \times 10^3 \times \frac{1}{3.6 \times 10^6} = 1.41 \text{ (kW} \cdot \text{h/m}^3) \quad (1-15)$$

即理论耗功量（电能或机械能等）约为 1.41kW·h/m³，或 1.41×3600=5076kJ/m³。实际上目前各种淡化方法，产生 1t 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，主要由于技术水平。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 25000kJ/m³（淡水）（用反向渗透膜法和机械蒸汽压缩法）^[12]，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 20000kJ/m³，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，则可以通过卡诺循环效率而求得所需的最小热量：

$$Q_{\min} = W_{\min} \frac{T}{T - T_0} \quad (1-16)$$

式中， T 为热源的温度； T_0 为冷源的温度。

例如以 100℃，101325Pa 的水蒸气作为热源，环境温度为 21℃，则得到单位淡水产量所需的最小热能为

$$Q_{\min} = 1.41 \times \frac{373}{373 - 294} \text{ (kW} \cdot \text{h/m}^3) \quad (1-17)$$

=6.66kW·h/m³(淡水)=23976kJ/m³(淡水)

这一数值近似地相当于生产 1m³ 淡水至少需要 10.28kg 100℃ 的水蒸气，因为从每千克的水蒸气中大约可取出 2330kJ 的热量。

令，T₀≈25℃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℃ 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 140~150℃。

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℃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℃，但性价比最高的集热器一般集热温度在 75℃ 左右。此时蒸馏过程的最小热耗为：

Q_{min}≈1.41×(75+273)/(75+273)-(25+273)=9.8 (kW·h/m³) (1-18)

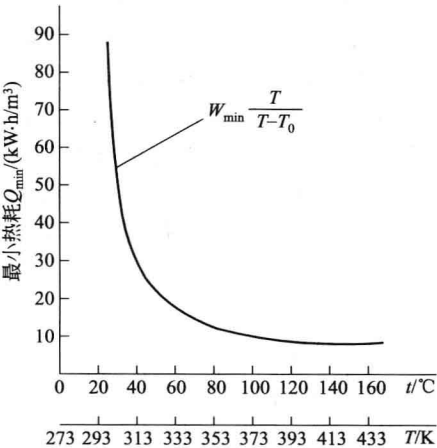


图 1-2 Q_{min} 与 T 的关系

第四节 一般海水淡化方法概述[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。表 1-8 中所列为目前实际应用的主要淡化方法。

表 1-8 一般海水淡化方法

分 类	方 法
从海水中分离出淡水	一、蒸馏法
	1. 竖管蒸馏
	2. 多级闪蒸
	3. 蒸汽压缩蒸馏
	4. 太阳能蒸馏
	5. 空气增湿减湿法
	6. 材料吸收与吸附法
	二、冷冻法(结晶法)
	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
	三、水合物法(结晶法)
	四、溶剂萃取法
	五、反渗透法(膜法)
从海水中分离出盐	一、电渗析法(膜法)
	二、离子交换法

一、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级蒸发器进行蒸发。串联蒸发器的个数称为级数 (有人称效数), 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。

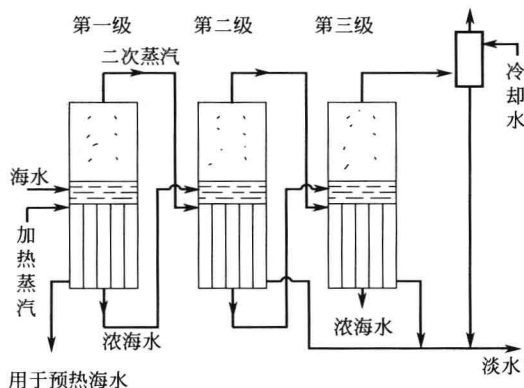


图 1-3 竖管蒸馏流程

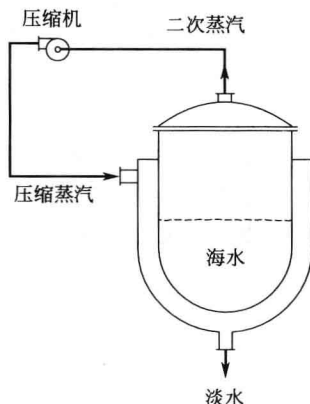


图 1-4 蒸汽压缩蒸馏原理

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启动外, 不需要外部热源。这类系统特别适合在电力丰富的地方建立中小型海水淡化系统。

蒸汽压缩蒸馏的优点是热利用效率高, 缺点也是锅垢危害严重。

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骤然蒸发, 产生的蒸汽在海水预热线外冷凝而得到淡水, 经逐级预热的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

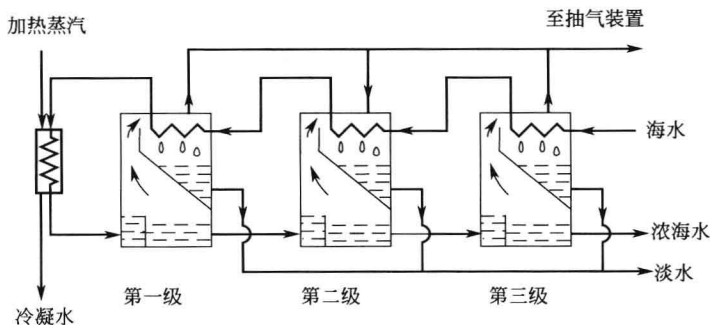


图 1-5 多级闪蒸流程