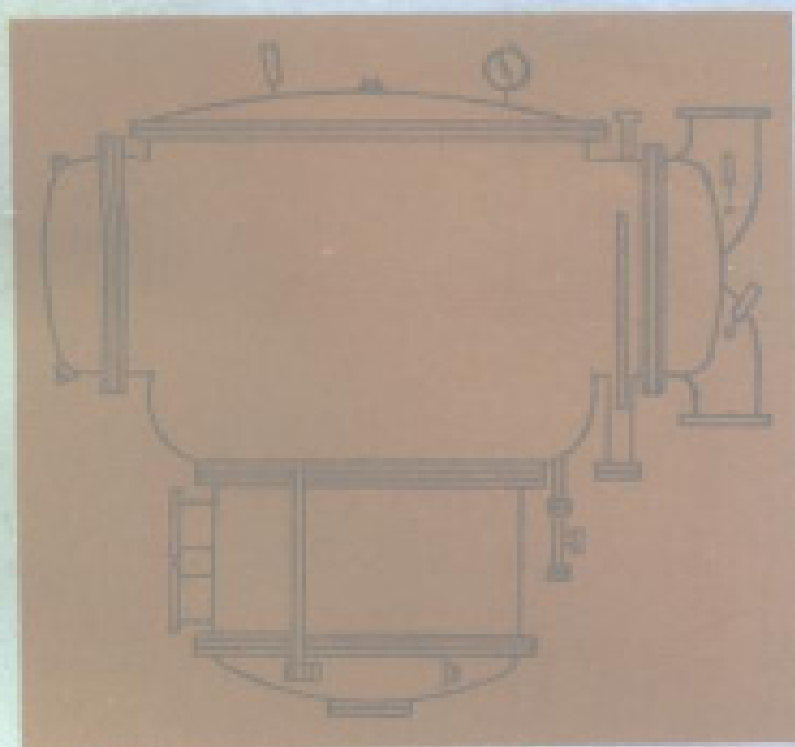


轮机业务知识丛书

(船舶辅机部分)

# 船用海水淡化装置

吴甲斌 编



人民交通出版社

轮机业务知识丛书

(船舶辅机部分)

# 船用海水淡化装置

Chuanyang Haisui Danhua Zhuangzhi

吴甲斌 编



人民交通出版社

D477 / 11

## 内 容 提 要

本书从我国远洋船舶的实际出发,系统地介绍了表面沸腾式和闪发式船用海水淡化装置的工作原理、技术性能和具体结构,同时,也对海水淡化装置的使用、管理和维修做了详细说明。

本书可供轮机人员、从事海水淡化的工作人员及有关院校师生参考。

**轮机业务知识丛书**

(船舶辅机部分)

**船用海水淡化装置**

吴 甲 斌 编

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 2.625 字数: 52 千

1985年3月 第1版

1985年3月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2,400 册 定价: 0.65元

## 前 言

随着交通运输事业的发展，迫切需要有一支与其相适应的、具有一定科学文化水平的职工队伍。搞好全员培训，加强职工技术教育，实为当务之急。当前矛盾是：学习不能都进学校，在职自学又缺少合适的书籍。因此中国航海学会为普及和提高广大海员的航海科学技术水平，以适应航海事业现代化的需要，特倡议组织编写航海知识丛书。中国航海学会编辑委员会与人民交通出版社于1980年在上海组成了航海知识丛书编审委员会，由陈有义、印文甫分别担任正副主任，王世忠、赵国维任秘书。编审委员会开展工作以来，已组织了企事业、学校等专业人员在业余时间分别进行编写，丛书将先后出版，陆续与读者见面。

航海知识丛书根据专业性质分为《航海业务知识丛书》和《轮机业务知识丛书》两套丛书。为了方便海员学习，力求结合实际，通俗易懂，并以小册子形式分专题出版。希望这两套丛书能不断为海员们业务技术学习作出贡献，同时也希望广大海员和航运单位共同来支持它和扶植它，使这两套丛书在不断更新中成为广大海员所喜爱的读物。

《航海知识丛书》编审委员会

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	1
§1 海水淡化的目的.....	1
§2 船用淡水的使用要求.....	3
§3 船用海水淡化装置的发展和分类.....	4
<b>第二章 海水淡化装置的工作原理</b> .....	6
§1 水的热力特性.....	6
§2 海水淡化装置的一般工作原理.....	7
<b>第三章 表面沸腾式海水淡化装置及其系统、盐度计</b> .....	14
§1 表面沸腾式淡化装置及其系统.....	14
§2 装置的自动调节及盐度计.....	21
§3 表面沸腾式淡化装置的技术管理.....	32
<b>第四章 闪发式海水淡化装置及其系统</b> .....	43
§1 尼莱克斯 (Nirex) 型海水淡化装置.....	43
§2 板式热交换器.....	48
§3 闪发式淡化装置的技术管理.....	55
<b>第五章 提高海水淡化装置的工作性能和经济性</b> .....	60
§1 保证所造淡水质量的方法.....	61
§2 海水蒸发器中的结垢及其防止.....	65
§3 提高淡化装置的经济性、保持冷凝器稳定的真空度.....	74

# 第一章 概 述

淡水和空气一样，是人类赖以生存和工农业生产的必需物质之一。虽然地球上水域广阔，约占地球总面积的四分之三，但地球的总水量中，海水占 97.2%，陆地水占 2.8%，而可供利用的淡水仅占 0.64%，随着现代工业的迅速发展和城市人口的增加，用水量激增，工业污水也随之增加，如处理不当，又将造成严重的水域污染，因此，缺乏淡水就成了许多国家和地区的严重问题。

海水淡化是解决这一问题的一个重要途径。近年来不少国家为了开发海洋或军事目的，也都在积极研究和发展海水淡化技术。

航行或工作在辽阔海洋上的船舶，淡水，不论对其动力装置的运行或船上工作人员的生活来说，都是极为重要的消耗性物资。淡水的储存或制造，又是决定船舶运输能力的重要条件之一。所以，海水淡化装置（又称造水装置或淡化装置）是远洋船舶的必备附属设备。

我国为了适应国民经济和国防建设的发展而研制和生产的各种淡化装置，已能基本满足远洋船舶的需要。在实际运行中，广大船员也已取得了丰富的实践经验。

## §1 海水淡化的目的

船舶动力装置需要消耗大量淡水，主要用作柴油机冷却水、锅炉给水、蓄电池用水等。另外，船员及旅客的饮用、

洗濯等生活用水，也需要消耗大量淡水。

这些淡水当然可设专用水舱储存，但是，对于远洋船舶，由于连续航行时间长，离开补给基地远，要储备足够多的淡水，必然要减少载货吨位，影响运输能力的充分利用；同时淡水储存时间长，也容易被水柜或细菌污染而变质；远洋船舶航行的生命力，也要求能源不断地补充淡水，以适应海上航行多变的气象和工作条件，而单纯用水舱所储存的淡水，就难于达到这个目的。

据统计资料来看，一般船舶动力装置的淡水消耗量（以主发动机每1000马力（735.5千瓦）计算）约：柴油机船为0.15~0.23吨/天；汽轮机船为0.4~1.0吨/天；蒸汽机船为3.0~6.0吨/天。

船员生活所用淡水约为每人150~250公斤/天。

目前，万吨级远洋柴油机货船，通常主机功率为10000马力（7355千瓦）左右，船员以50人计，每天消耗淡水即需9.0~14.8吨，如续航力为30天，那末这个航程必须供给淡水270~444吨，这是一个不小的数量。如是远洋客轮，则淡水消耗量就更大，如我国“耀华”轮船船定员800人，每天耗水量达150吨，因此，目前几乎每一艘远洋船舶都装有海淡化装置，我国自行设计制造的万吨级远洋柴油机货轮，装有一台容量为15吨/天的淡化装置，至于大型客轮，则须装设几台容量较大的淡化装置，以满足人员对生活用水的需要。

当然，淡化装置车身也有一定重量，制取淡水通常也要消耗能源，但这些重量与需要的淡水重量相比是很小的，而且还可利用柴油机的排气或冷却水作为热源，进一步利用废热而提高动力装置的经济性。在五十年代，船用淡化装置多采用压力蒸发式（海水蒸发压力为1个大气压即 $9.80665 \times 10^5 \text{Pa}$ ），

其主要缺点是在浸管式蒸发器加热系统中，大量沉积坚硬的水垢。到五十年代末期，真空技术有了进一步发展，压力式蒸发器随之为真空式蒸发器所取代，后者则可以利用主柴油机冷却水废热来加热。目前我国远洋船舶中所采用的海水淡化装置基本上都已是真空式装置，运行中消耗的能量仅为水泵所需的功率，经济性和工作性能都较优良。

## §2 船用淡水的使用要求

如前所述，船用淡水是供给船舶动力装置及船上人员生活用水等需要的，由于海水含盐量较多，一般在大洋中约达35,000毫克/升，pH值为7.5~8.4，所以必须进行淡化并达到一定的淡水品质后，才能使用。一般含盐量低于1000毫克/升以下就称作淡水。所谓淡水品质，主要指淡水中所含的杂质、盐量和硬度等数量指标。用途不同，对淡水品质的要求也不同。现分别叙述如下：

### 1. 锅炉给水

锅炉给水应不含任何杂质，特别对高参数的汽轮机动力装置更是如此，对船舶辅助锅炉要求可以低些。例如，对中、高压锅炉的给水，要求总含盐量①小于5~20毫克/升，硬度②小于0.01~0.05毫克当量/升，对火管式辅助锅炉则要求总含盐量小于150毫克/升，硬度小于0.7毫克当量/升，水管式辅助锅炉的给水要求总含盐量小于30~60毫克/升，硬度小于0.15毫克当量/升。

一般由于造水装置本身的性能，凝汽器管子渗漏，空气等混入热水井以及淡水储存日久会变质等原因，要获得纯净

① 总含盐量是指淡水中含  $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ ， $\text{HCO}_3^-$ ， $\text{SiO}_3^{2-}$  离子含量总数。

② 硬度是指淡水中含  $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Mg}^{2+}$  离子的量。



的水是不可能的。事实上，只要用各种化学或物理的方法，将给水品质控制在一定范围内，就可满足锅炉运行的要求。

## 2. 饮用水

饮用和食用淡水，必须是清澈的，没有不良气味和滋味，并且不含有任何对人体有害的杂质、重金属污染物、有机物、氮化物和细菌等。

由淡化装置得到的高品质蒸馏水，非常接近于纯水，通常要加入一些矿物质，并使总含盐量不大于500~1000毫克/升，盐度不大于250~500毫克/升 NaCl，pH 值为6.5~9.5，才能供人们长期饮用而不致影响健康。

每人的饮用水消耗量，应视劳动强度和工作环境而定，一般每人一昼夜为10~15升。

## 3. 洗濯水

洗濯衣服、洗澡、洗刷食具等所用水的要求，较锅炉给水和饮用水的要求低得多，只要水中不含传染疾病的微生物，未被放射性微粒污染，没有恶臭，盐度不超过300毫克/升，硬度不大于7毫克当量/升（如硬度超过40~42毫克当量/升，洗濯时肥皂即不起泡沫）就可用于洗濯。

## 4. 柴油机冷却水

一般淡水即可，无特殊要求。

## 5. 其它用水

包括用于充装蓄电池和医疗用的蒸馏水，其品质要求较上述均高，但所需数量很少，一般由岸上制备或经造水装置制得的淡水再加工处理后使用。

# §3 船用海水淡化装置的发展和分类

十六世纪末，人类利用大型帆船远涉重洋时，曾用蒸

馏器（海水淡化器）补充日常所需的淡水。到十九世纪初，蒸馏器的进一步发展，使船用锅炉的给水由海水转为淡水。随着船舶蒸汽动力装置参数和结构的不断提高和改进，船舶吨位和航速相应获得提高，这些发展，又反过来要求蒸馏器能提供数量越来越多，品质越来越高的淡水，以满足船舶动力装置和人员对淡水的需要。本世纪六十年代以来，世界上工业发达的国家耗水量激增，城市工业和生活用水十分紧张，因此，海水淡化技术作为提供淡水和纯水的重要手段之一，更为世界各国所重视。海水淡化技术有了较快的发展。不久以前，在船上几乎还全是用浸管式蒸发器的沸腾蒸发装置（因为有蒸发表面所以又称表面式），而现在闪发式海水淡化装置（海水在闪发室中因过热而闪发，无蒸发表面）日益盛行。利用电渗析法、压汽式蒸馏法、离子交换法等原理制成的淡化装置已有在船上应用，另外，反渗透法、冷冻法等也在大力研究试验。在装置系统的改进方面，则有用低能废热以降低制淡成本；改进结构，增强传热以提高效率和缩小装置尺寸；使用真空蒸发，控制盐度和给水处理以防止结垢以及采用组合式结构实现系统的自动控制等等都取得了显著的成绩。

根据装置结构和工作原理的不同，海水淡化装置主要有下列几类：

1. 真空沸腾式制淡装置；
2. 真空闪发式制淡装置；
3. 压汽式制淡装置；
4. 电渗析制淡装置；
5. 离子交换制淡装置。

不过目前，不论是船用或陆用的海水淡化装置，主要还

是采用改进后的蒸馏装置，即真空沸腾式或真空闪发式淡化装置。

## 第二章 海水淡化装置的工作原理

### §1 水的热力特性

在说明淡化装置工作原理之前，有必要了解一些水的基本热力特性。

水在大气压力下被加热到 $100^{\circ}\text{C}$ （实际是 $99.09^{\circ}\text{C}$ ）时，就开始沸腾，这个温度就叫作在大气压力下的饱和温度。如继续加热，水中就有蒸汽气泡从加热面产生并不断上升扩大，直至水面气泡破裂逸出水蒸汽，即形成沸腾过程，而水温始终不变，直到水全部沸腾蒸发成蒸汽。水蒸发所需的热

表1

绝对压力 公斤力/厘米 <sup>2</sup> (千帕)	真空度 毫米 汞柱	饱和 温度 $^{\circ}\text{C}$	液体热 千卡/公斤 (焦耳/公斤)	汽化潜热 千卡/公斤 (焦耳/公斤)
0.05(4.90)	723.2	32.55	32.57(136364)	578.9(2423739)
0.75(7.36)	704.8	39.95	39.96(167305)	574.7(2406154)
0.10(9.81)	686.3	45.45	45.45(190290)	571.6(2393175)
0.20(19.61)	612.6	59.67	59.65(249743)	563.4(2358843)
0.30(29.42)	538.9	68.68	68.66(287466)	558.1(2336653)
0.40(39.23)	465.2	75.42	75.41(315727)	554.1(2319906)
0.50(49.01)	395.5	80.86	80.86(338545)	550.7(2305671)
0.60(58.84)	347.8	85.45	85.47(357846)	548.0(2294366)
0.70(68.65)	244.1	89.45	89.49(374677)	545.6(2284318)
1.00(98.07)		99.09	99.19(415289)	539.6(2259197)
1.50(147.11)		110.79	110.99(464693)	532.1(2227796)
2.00(196.14)		119.62	119.94(502165)	526.4(2203932)

量称为水的“汽化潜热”，而在一定压力下将水加热到饱和温度所需的热量称为“液体热”或水的“显热”。在某种特定的暂时情况下，水也可能出现所谓过热状态，即其温度高于饱和温度，当然这是不稳定的，能立即汽化而水温随之降到饱和温度为止。表 1 所列为水的热力性质。

水被加热或冷却时要吸收或放出液体热；水在汽化时要吸收汽化热；反之，水蒸汽被冷凝时就要放出汽化热。冷凝和冷却时，水所放出的汽化热和液体热，其数值与加热时要吸收的汽化热和液体热相等。

## §2 海水淡化装置的一般工作原理

根据淡化装置的构造和工作原理的不同，将海水蒸发进行淡化的装置主要有两种：

### 一、表面沸腾式淡化装置的工作原理

蒸发器内装有浸沉的加热盘管构成的加热表面，海水供入蒸发器后，被流经加热盘管的外部热源（蒸汽或热水）加热。海水在相当于蒸发器中压力的饱和温度下沸腾蒸发，然后在冷凝器中水蒸汽被凝结成淡水。

表面沸腾式淡化装置主要由蒸发器、冷凝器及一些泵等附属设备，管道附件和控制系统等组成，有的还设有海水预热器，以便利用废热，提高装置的经济性。

装置的基本组成和工作原理示于图 1。

图中：蒸发器 1，由壳体、蒸发管束及汽水分离器等组成。海水供入蒸发器壳体后，被加热而产生蒸汽（称二次蒸汽）。蒸汽流经汽水分离器 7 后，进入冷凝器。

冷凝器 2，由壳体、冷凝管束等组成。由海水泵 4 送来

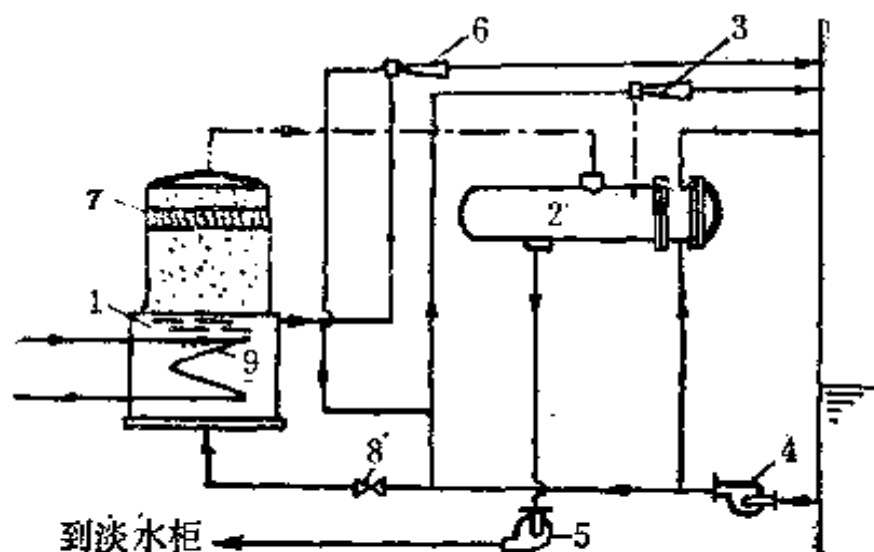


图1 表面沸腾式淡化装置系统简图

1-蒸发器；2-冷凝器；3-空气抽除器；4-海水泵；5-凝水泵；6-盐水泵；7-汽水分离器；8-给水调节阀；9-加热盘管

的海水将蒸汽冷却和冷凝，制成蒸馏水。

空气抽除器3，用来连续抽出冷凝器内留存的空气和蒸汽，使蒸发器及冷凝器内均保持一定的真空度。

海水泵4，向冷凝器连续供应冷却水，同时向蒸发器供应给水。

凝水泵5，用来抽出冷凝器中的淡水，并将其送入淡水柜。

盐水泵6，用来连续地将蒸发器内的浓盐水排走，使蒸发器内海水的含盐量保持在一定限度内。一般采用喷射泵。

当装置工作时，加热介质（热水或蒸汽）进入蒸发器内的蒸发管束，将管外海水加热，使之沸腾蒸发，然后返回自己的工作系统。从海水中蒸发出来的蒸汽（二次蒸汽）则上升经蒸发器上部的汽水分离器7，分离蒸汽中含有的微小水滴以净化蒸汽，随后进入冷凝器，被冷凝管束内的循环海水

所冷却，凝结成蒸馏水，便成为符合一定盐度要求的淡水，最后由凝水泵 5 抽送至淡水舱。循环冷却水就是海水泵 4 泵入的舷外海水。

为了使装置能连续工作，必须使海水泵不断地向蒸发器补充海水，以维持一稳定的蒸发水位。为了使蒸发器中海水含盐量不致因海水的不断蒸发而浓缩过高，影响二次蒸汽质量，就需要盐水泵将盐度较高的海水排出舷外。通常选用喷射泵作为盐水泵。

为了使装置能利用船舶动力装置中温度不高的废热（如温度仅为 $55\sim 65^{\circ}\text{C}$ 的柴油机缸套冷却水）和改善结垢情况，目前广泛应用真空式蒸馏装置，即蒸发器壳体内具有相当高的真空度，例如一般船用海水淡化装置的真空度为93%，这时相应的海水蒸发温度即为 $38^{\circ}\text{C}$ ，所以维持一定的真空度就非常重要。一般用喷射泵作为空气的抽除器来实现这一目的。

按照上述简单系统工作的装置，称为单效应表面式蒸馏装置，是当前柴油机货船采用最广的一种海水淡化装置。为了简化制造和维修管理工作，缩短管系长度和布置紧凑，现在的淡化装置都已采用整体安装结构，即冷凝器放在蒸发器上方组装在一个壳体内，形成一个蒸馏器，而为它服务的一些泵等辅助设备，管道的附件及控制系统均安装在蒸馏器壳体的周围及基座上，详细情况将在后面介绍。

由于船舶内燃动力装置有大量温度较高的废热可以利用，如柴油机冷却水，废汽锅炉的蒸汽等，都可用来作为海水淡化装置的热源，因此，装置的经济性主要决定于制造成本，辅助设备的耗油量和日常维护费用。

在单效应蒸馏装置中，二次蒸汽在凝结过程中放出的大

量热量被冷却海水白白地带走了，如要进一步利用这部分热量，可将两个以上的单效应装置串联起来工作，即把第一效应蒸发器产生的二次汽作为第二效应蒸发器的热源，在其本身被冷凝的同时，又加热了下一效应蒸发器的给水，从而提高了装置的经济性，图2示出双效应蒸馏装置的系统示意图。

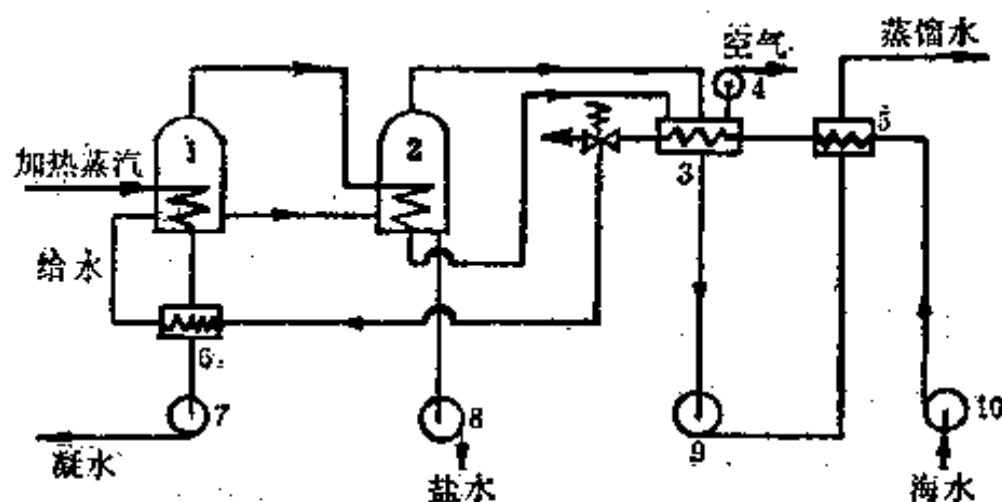


图2 双效应蒸馏装置系统示意图

1、2-蒸发器；3-凝汽器；4-空气抽除器；5、6-预热器；7、9-凝水泵；8-盐水泵；10-海水泵

由于蒸馏设备不产生外功，所以通常不用效率表示其经济性，而用汽水转换比（也称运转比）即蒸馏水产量与加热蒸汽消耗量的比率来表示，一般单效应装置的汽水转换比为0.95左右，二效应装置约为1.75，三效应装置约为2.50。多效应装置的经济性虽然提高了，但所需传热面积增加，这是因为在一定的加热蒸汽参数和凝汽器真空下，两个蒸发器中可用加热温差仅为单效应装置的一半，所需传热面积就为其两倍，所使用的循环泵和换热器数增加，因而设备庞杂笨重，制造成本大，维修管理也相应复杂。船用淡化装置最多不超过三效应，对蒸汽动力装置的船舶，如某些大型客轮和

军舰，为减少消耗于淡化装置的加热蒸汽，以提高动力装置的经济性，常使用多效应蒸馏装置，对一般货船则多采用单效应装置，最多也只用双效应。

## 二、闪发式淡化装置的工作原理

蒸发器（常称闪发室）内无加热表面，海水先进入另一个常压的加热器中，经加热，但不达到沸腾状态，使其温度略高于闪发室压力下的饱和温度，随后此海水进入高度真空的闪发室，由于其温度已高于该处的饱和温度，呈过热状态而使部分海水吸收过热水的热量，自行骤然蒸发，直到海水温度降到稳定的饱和温度为止。因闪发室内没有传热表面，这种装置又有无表面式之称。

现以单级闪发式淡化装置为例介绍如图 3 所示。海水由海水泵 6 输入，经冷凝器 2 使二次蒸汽凝结，一部分海水排至舷外，一部分海水作为给水，再流过加热器 3 进一步提高海水温度，以保证海水进入闪发室后，能高于与闪发室压力相应的饱和温度。由于这部分水已处于过热状态，当它喷入闪发室后，一小部分水立即汽化即实现闪发蒸发过程。闪发室中产生的二次蒸汽在凝汽器 2 内放出潜热后被凝结成淡水，最后用凝水泵 4 送往淡水舱。剩下大量未汽化

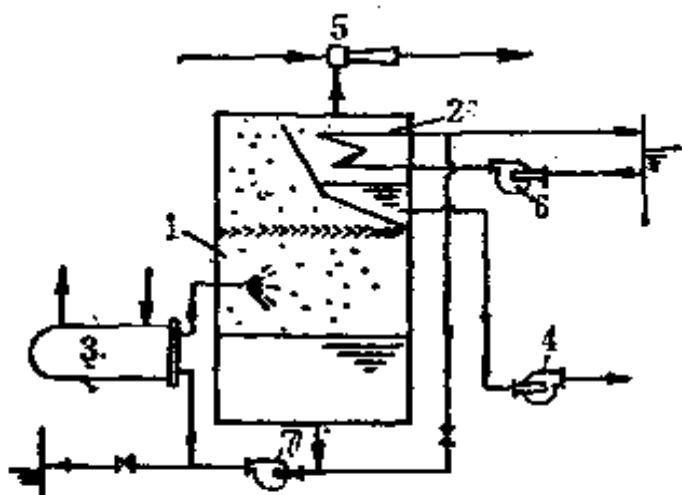


图 3 单级闪发式淡化装置示意图

1-闪发室；2-冷凝器；3-加热器；4-凝水泵；5-空气抽除器；6-海水泵；7-盐水泵



的浓缩海水落至闪发室底部，由盐水泵 7 抽出排至舷外。闪发室中的真空度由空气抽除器 5 产生，抽除器常采用射水抽气器和蒸发喷射器或其它真空泵。

单级闪发式装置的经济性不高，与一般蒸发式相差不多，为提高其经济性，常设计成多级装置，即采用强制循环使热海水连续流过几个闪发室，如图 4 所示。各级闪发室压

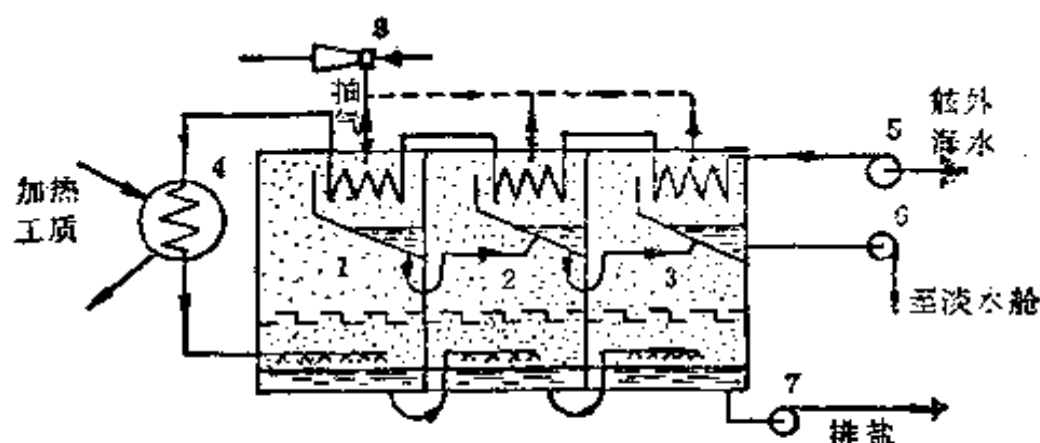


图 4 多级闪发式淡化装置原理图

1-1 级蒸发器；2-2 级蒸发器；3-3 级蒸发器；4-加热器；5-海水泵；  
6-凝水泵；7-盐水泵；8-真空泵

力依次降低，在上一级闪发室内没有被汽化的海水在下级继续蒸发成蒸汽，与此同时，余下的盐水则逐级冷却至相当于各闪发室的饱和温度。从最后一级闪发室出来的浓缩海水则由盐水泵（排污泵）排至舷外。这样排至舷外的热量就减少了，通过冷凝器的冷却水也全部作为给水，充分利用了蒸汽凝结时的潜热，所以这种多级装置经济性大为提高，但装置构造变得复杂，体积也增加，所以除陆用大容量装置有采用 20~30 级外，船上一般只采用二级，最多也有四~五级并组装在一个长方形整体内。这种多级装置在需要淡水量较多的大型客轮和某些专用船舶上（如渔业加工船等）使用比较合

适。

闪发式淡化装置加热器的热源可采用柴油机冷却水、废气锅炉的蒸汽或蒸汽动力装置中的废汽、撤汽等，充分利用了动力装置的热能。

为减少加热器（此为装置中唯一可能形成硬垢的组件）中水垢的形成，加热器出口温度一般限制在 $75^{\circ}\text{C}$ 以下，第一级闪发室中的压力约为 $0.23\sim 0.30$ 绝对大气压。

船用闪发式淡化装置与表面式淡化装置比较有下列优点：

1)结构简单，如采用多级闪发室板式热交换器，则易于实现组合装置，其布置紧凑、体积小。

2)工作可靠，操作方便，在船舶摇摆时无液面倾泼，消除了由于飞溅、真空度变化和输入热量变化而引起的激烈沸腾，生产的淡水品质比较稳定。

3)结垢情况大为改善，污垢较易控制。由于给水（盐水）高速流动，低压、低温非沸腾状态蒸发，闪发室中又没有加热盘管，盐水因连续排泄而使其密度仅稍高于海水密度（约 $1.1$ ）等原因，所以完全消除了其他型式蒸发器的主要缺陷——产生水垢。装置中仅在闪发室外的加热器有可能产生水垢，但它没有海水沸腾现象，所以结垢不严重，易于清除。这样就大大减少了停车清洗时间，装置的维修、保养工作因而大为减少。

4)装置自动化容易实现。由于无垢工作，对盐水浓度控制和给水化学处理等可不必要象表面式装置那样严格要求，使装置自动化系统大为简化。

这些优点，使它在六十年代以后得到迅速推广，已成为取代传统的浸管式蒸馏装置之一。但是闪发式装置也有其缺

点，如设备较庞大，效率也不是最高，而且循环盐水量大等。

## 第三章 表面沸腾式海水淡化 装置及其系统、盐度计

目前，我国远洋船队中采用的淡化装置主要是真空蒸馏装置，这主要是因为可以利用柴油机缸套冷却水的废热，以提高淡化装置的经济性，同时又较好地解决了结垢问题，而且对一般货船来说，利用这部分能源所产生的淡水已经足够了（如在其他船舶，也可用蒸汽来制造淡水以增加产量）。在国外柴油机船上，这种真空型蒸馏装置也应用得较普遍。

如前所述，在船上使用的真空型蒸馏装置（淡化装置）主要有两种型式，一种是表面式蒸馏装置（浸管沸腾式），另一种是闪发式蒸馏装置（闪发蒸发式），下面对表面沸腾式淡化装置及其系统进行介绍。

### §1 表面沸腾式淡化装置及其系统

国产的 ZSF 型和国外的 ATLAS 型沸腾式淡化装置，在船上已被广泛使用，两者结构和系统类似。现以万吨远洋货船配套使用，产量15吨/天的表面式蒸馏装置为例介绍如下。

图 5 为 ZSF-15 型海水淡化装置的结构总图，该装置主要由蒸发海水用的蒸发器 5，汽水分离器 13 和冷凝蒸汽用的冷凝器 14 等组成，它们被组装成一个整体。由于这种蒸发器的加热管组是在水面下直立的，所以又叫做浸管沸腾式海水

淡化器。为使海水淡化器正常运行，该装置还设有给水、加热、冷却、排盐水、抽气和抽淡水（凝水）等系统。

装置的主要性能规格如下：

淡化装置型式	表面沸腾式
生产淡水量	10~15吨/天
淡水含盐度	≤80毫克/升
加热淡水进入温度	55~65℃
凝汽压力	93%真空
给水含盐度	≤35 000毫克/升
加热淡水量	40~60吨/小时
冷却水需要量	67~90吨/小时
蒸发面积	16米 <sup>2</sup>
冷凝面积	21米 <sup>2</sup>
外形尺寸	1700×1180×1993毫米
装置重量	1520公斤

淡化装置的系统原理图如图 6 所示。在运行时，系统工作如下，给水自舷外由淡化装置海水泵10吸入，经弹簧稳压阀14和浮子流量计13注入蒸发器下端盖内，沿直立的加热管束自下而上流动，从柴油机缸套冷却水引出的一部分加热淡水（60~65℃）流经加热管束的管外空间，两者进行热交换后，由于淡化器内压力仅为0.07公斤力/厘米<sup>2</sup>（约707mm汞柱真空度），所以海水在管内被加热到38.66℃便沸腾汽化，未蒸发的盐水尚有 $\frac{3}{4}$ ，大部被排盐泵（真空盐水抽除器）11连续抽除排至舷外，以保证蒸发器中海水盐度不致过高而避免结垢。蒸发所产生的蒸汽，先后经汽水分离挡板和波纹板汽水分离器（图 5 中的20和13），除去所夹带的大部分微小水滴后，进入冷凝器。在冷凝器中，蒸汽在横置的冷凝管束

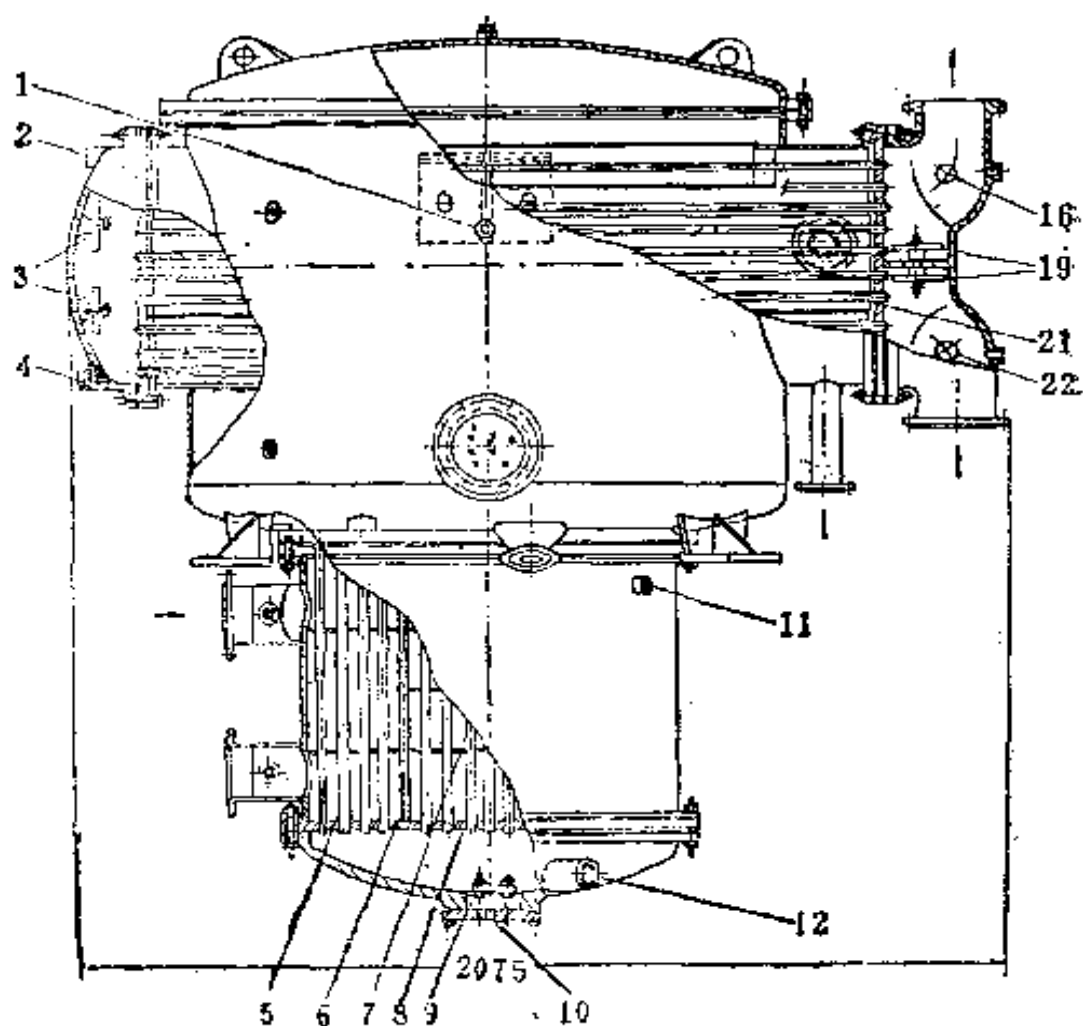
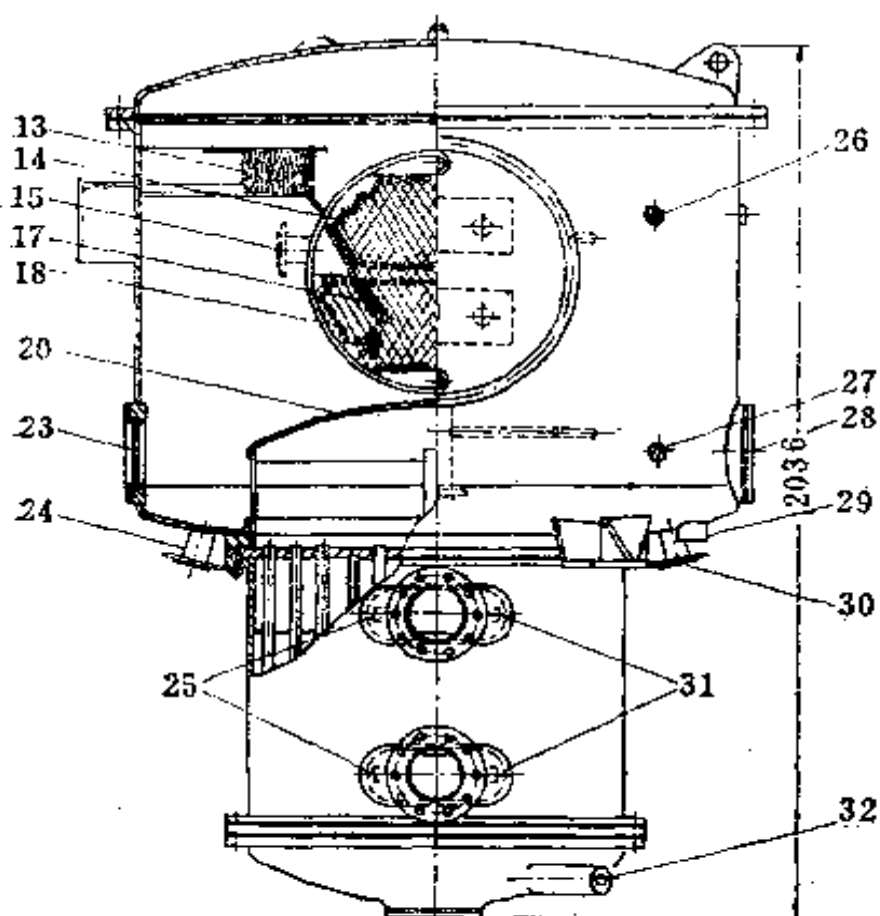


图5 ZSF-15型海

1、16、22、31-温度计插座；2、11-空气旋塞接头；3、9、19-防腐锌8-管板；10-泄水阀接头；12-给水进口；13-汽水分离器；14-冷凝器挡板；21-冷凝器管板；23、28-观察窗；24-排污口；25-压力表接头；格凝结水回流口

外侧流动，被主机海水泵所供给的海水所冷却，蒸汽放出潜热而凝结成淡水，制成的淡水由凝水泵16抽出，经淡水流量计21送至淡水舱（少量凝水经盐度传感器回流，以作盐度测量依据）。不凝结的气体由抽气系统的真空泵12（射水抽气器）抽出，以保持壳体内必要的真空度。

保持装置必要的真空度(93%)是运行中的一个重要问题，但问题常常出现在凝水泵上，由于凝水泵是从高真空的



水淡化器总图

板；4-放水旋塞；5-蒸发器加热管；6-隔水板的定位套管；7-隔水板；管束；15-空气抽出口；17-挡板；18-空气冷却器管束；20-汽水分离  
26-真空表接头；27-真空破坏阀接头；29、32-水位计接头；30-不合

冷凝器中抽水，泵的轴封如不严密而漏入空气，或冷凝器中凝水水位过低而使泵的吸入口发生汽蚀，都能影响泵的正常  
工作，最后导致所规定的真空度建立不起来，所以在凝水泵  
轴承处加装水封和在吸入口与冷凝器蒸汽空间之间接一根平  
衡管17，以使吸入口处的汽体返回冷凝器。有的淡化装置还  
在泵后加装负荷溢流阀，能在淡水产量不足时，在阀内弹簧  
的作用下自动关闭阀门，以防止上述汽蚀现象的产生。

图 6 表面沸腾式淡化装置系统原理图

1-主柴油机; 2-加热水调节阀; 3-主机淡水冷却器; 5-主机滑油冷却器; 6-主机空气冷却器;  
7-主机海水泵; 8-海水调节阀; 9-淡化器; 10-海水淡化装置海水泵; 11-排盐泵; 12-真空泵; 13-浮子流量计;  
14-弹簧稳压阀; 15-给水调节阀; 16-凝水泵; 17-凝水泵平衡管; 18-盐度计; 19-盐度传感器; 20-回流电磁阀;  
21-淡水流量计; 22-真空压力表; 23-真空破坏阀; 24、25-放气旋塞; 26-蒸发温度计; 27-冷却水流出口阀;  
28-加热淡水进、出口阀; 29-取样阀; 30-淡水排出阀(截止止回阀); 31-止回阀; 32-水位计; 33-泄水阀

为了简化设备和减少管理工作，一般都用射水抽除器作为真空泵和排盐泵，射水抽水器的结构简图示于图7。它主

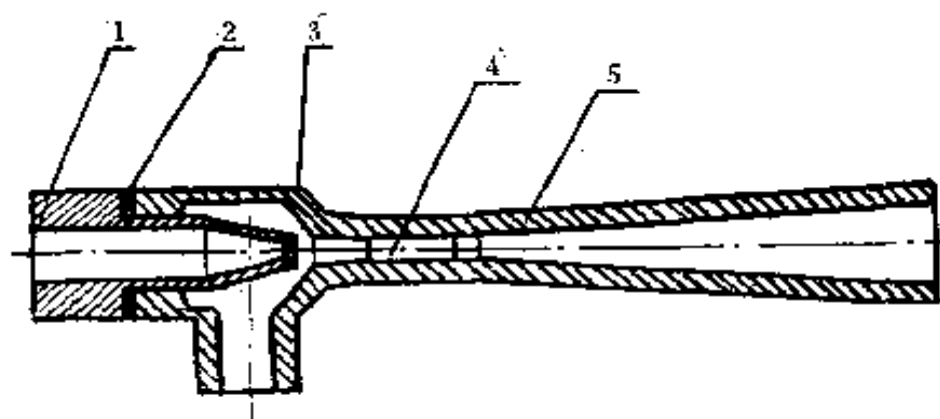


图7 射水抽水器简图

1-喷嘴；2-垫片；3-混合室；4-扩压管；5-本体

要由喷嘴、混合室、扩压管等组成。它的工作是利用流体力学中的原理，使海水泵来的高压工作水，经喷嘴射出时产生高速流动，动能增加的同时压力能必然降低，具有低压卷吸作用而将射流周围的空气带走造成真空，因而可将浓盐水吸至混合室中。浓盐水与工作水流一起流经喇叭形的扩压管时流速降低，其速度能减少，压力能又增加，提高压力而排出。射水抽气器的结构和工作原理都与射水抽水器相仿，只是混合室形状和尺寸有些不同。为了防止喷射泵因某些原因（例如海水泵压头下降或喷射泵出口背压升高等）而失去抽吸能力，造成海水由吸入管倒灌入蒸发器和冷凝器，影响装置的工作，所以在喷射泵吸入管中均设有止回阀。

在淡化器壳体的下部装有两个玻璃计（图6中32），用以观察凝水和盐水的水位。由于工作时盐水内充满汽泡，所以蒸发器水位计中的水位必然比真实水位低，并随蒸发器负荷加剧而扩大差别。一般当水位计的水位视高为半高或稍高



一些时，实际水位约比蒸发器上管板稍高，所以水位计所示盐水水位仅供管理时参考比较。海水水位在蒸发过程中是自动调节的，通常保持在水位计视高的一半左右（约50~100毫米之间）。如真空度过高或热淡水温度过高，因沸腾加剧，水位将下降，反之则升高。

蒸发器和冷凝器中的热交换过程是在一定温差下进行的，它必须能保证淡化装置在满负荷运行时热量达到平衡，通过计算和试验可知热淡水（加热介质）进出蒸发器的温度降应为6~9℃，冷却水进出冷凝器的温升则为5~6℃。但是，当海水温度较高，如为30~32℃时，温升降低约为3~5℃，这时的冷却水量也将由每小时约70~80吨增加到接近90吨，因此，管理时只要观察温差情况，就可以初步判断淡化装置的运行是否正常。

由于淡化装置壳体是一个高真空容器，所以必须设有控制真空度的真空破坏阀23（在壳体中部）。当运行中真空度过高时，为避免盐水沸腾过份剧烈而影响淡水质量，可略开此阀，使少量空气进入而使真空度维持在规定的范围内。当淡化装置停止使用时，也必须将真空破坏阀打开，以免壳体受压损坏。

淡化器壳体用钢板焊制，为了防止海水腐蚀，有些结构采用铜合金或防腐锌板，如壳体下端盖为ZHSi80~3硅黄铜铸造，蒸发器和冷凝器的管板用HSn62-1锡黄铜，蒸发管和冷却管分别为 $\phi 19 \times 1.5$ 毫米和 $\phi 16 \times 1$ 毫米的HA177-2铝黄铜管，在冷凝器与蒸发器的端盖部分均设有防腐锌板。冷凝器壳体因与淡水和蒸汽接触，用不锈钢制造就可防止腐蚀，但与浓盐水接触的构件则不行，必须采用抗腐蚀性更强的材料，有研究使用钢板内涂聚三氟氯乙烯等塑料保护层。

的，但是否安全无毒，还需要进一步考验。射水抽除器一般用不锈钢制作喷嘴，其余部分用 ZHSi80-3 硅黄铜制造。

## §2 装置的自动调节及盐度计

### 一、淡化器水位的调节

淡化装置在运行中工作是否正常，其中心环节在于装置的给水和凝水系统，如果它们能连续而稳定地工作，一般地说淡化装置就可正常运行。例如蒸发器中的海水水位，只有在供入的海水量等于蒸发量和排污量两者之和时，才能维持一定的正常工作水位，而维持一定的水位是必要的，因为如蒸发器中海水水位上升，二次蒸汽夹带盐分增加，将影响淡水质量，如水位下降则因热交换削弱，又导致淡水产量减少，甚至不能工作。再如凝汽器中的凝水水位也应处于动态平衡而保持在一定范围内，否则，如水位太高，冷却管将被凝水淹没使凝结困难，如凝水水位过低则有可能使凝水泵吸空和产生汽蚀现象，导致装置工作失常。

为了保证装置能连续可靠地运行，确保淡水质量，同时又减少管理中的麻烦，淡化装置可装设凝水和给水水位的自动调节机构。但是近来为了简化淡化装置的控制系统，有时不一定设置水位自动调节机构，这是因为在柴油机动力装置船上，一般都利用主机冷却水作为加热工质，淡化装置常常是在主机进入正常稳定运行后才投入工作。这时主机冷却水温度变化不大，所以只要调节好加热工质和冷却海水的供入量；保证淡化装置壳体内真空度不变，制淡水能力一定；使电动水泵的转速不变，维持排量恒定，凝水和给水系统就能够保持动态平衡而维持水位在某范围内。那末淡化装置中真

空度的变化情况怎样呢？经试验可知，它与加热工质和冷却海水，以及蒸发器的污秽程度等有关。图 8 为 ZSF-5 型海水淡化装置的特性曲线图。从图中可见淡水产量  $G$  和真空度  $P$  均与加热工质和冷却海水的参数有关（曲线表明，加热水温度每升高  $5^{\circ}\text{C}$ ，产量约增加 1 吨/24 小时；冷却水增加 5 吨/小时，产量约增加 0.5 吨/24 小时），所以在管理中，调节好加热工质和冷却海水量后，真空度也就随之保持不变了。因此，只要在选择淡化装置本体结构和各泵排量时注意它们的合适配套，并在装置启动时，注意对给水泵和凝水泵的排出压力加以适当调整，就可以使给水和凝水的水位保持稳定。

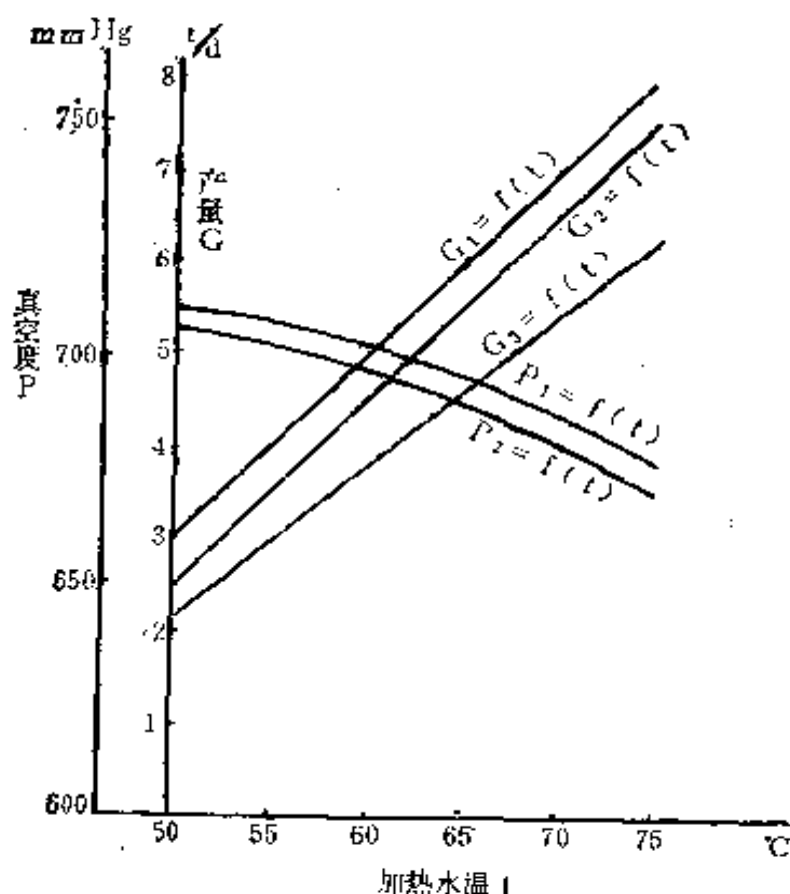


图 8 海水淡化装置的特性曲线图

如设置水位自动调节，则可在蒸发器和冷凝器的工作水

位相应部位，或外接水柱内，装设电极式或浮子式的液位发讯器，由它来控制给水和凝水管路上调节阀（如电磁阀）的启闭或节流阀的开度，甚至在必要时（如水位控制失灵，凝水水位又低于最低工作水位），自动停止凝水泵的运转，并发出相应的声、光警报。图9为淡化装置水位控制系统原理图。图中1、2、3、4均为电极式水位发讯器，在给水和凝水管路上装设了调节用电磁阀1DF和2DF，借电磁阀的启闭就可控制给水和凝水水位。这样的水位控制环节，可以在前些时候制造的装置中看到，近年来，新造的淡化装置已不采用此环节，所以控制系统大为简化。图10是与万吨级远洋货船配套使用的ZSF-15型海水淡化装置电气原理图。由图可见，给水泵和凝水泵马达的交流接触器1CJ、2CJ分别由按钮手动控制，仅在装置启动和停止时才进行操作，正常运行时，装置能自行保持稳定的水位而连续运转。

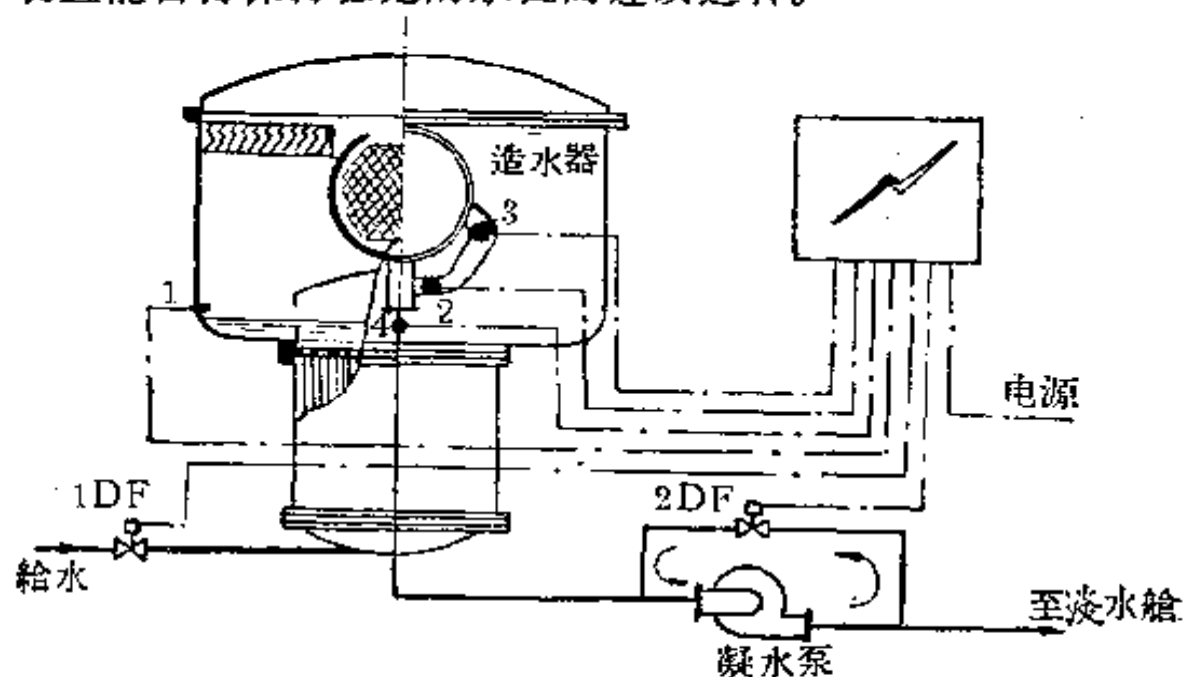


图9 水位控制原理图

1-盐水最高水位发讯器；2-凝水最低水位发讯器；3-凝水最高水位发讯器；4-凝水报警水位发讯器

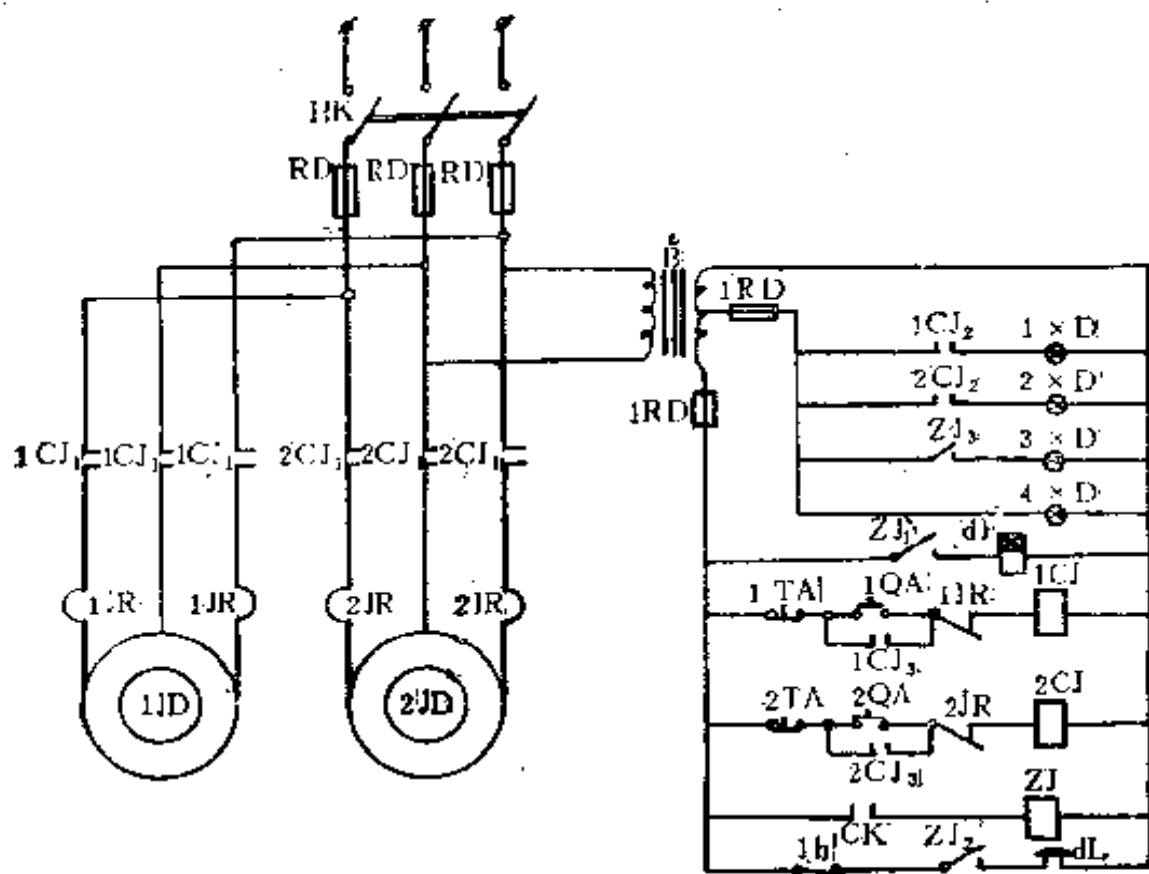


图10 ZSF-15型海水淡化装置电气原理图

*RD*-熔断器; *JR*-热保护继电器; *JD*-交流电动机; *B*-变压器; *XD*-指示灯; *dF*-电磁阀; *TA*-停止按钮; *QA*-启动按钮; *CJ*-接触器; *ZJ*-中间继电器; *dL*-报警电铃; *CK*-盐度计信号装置触点; *HK*-电源开关; *1h*-消声开关

## 二、淡水含盐量的自动控制

在装置的调节方面,除了水位控制外,淡水含盐量的自动控制也是十分重要的,所产淡水含盐量超过一定范围,就能使该淡水失去使用价值,所以不论是新老淡化装置都普遍装设了淡化含盐量自动控制系统。

含盐量自动控制系统由检测、指示单元和执行机构二部分组成,前者是盐度计(或盐量计),后者是用于控制淡水回流的电磁阀,它们都装在淡水系统中。在前面所介绍的淡

化装置系统图 6 中可以看到，盐度计18随时能表明淡水的含盐量。当含盐量由于某些原因超过限定值时，淡水管道上的回流电磁阀20自动切换通路，使不合格的淡水不再流往淡水柜而重新流回蒸发器进行淡化，或直接泄至舱底（如闪发式制淡装置），以免淡水舱遭到污染。

### 三、盐度计的组成、工作原理及调校

在含盐量自动控制系统中，盐度计是一种比较特殊的专用仪器，国产的远洋船上一般都配有南京分析仪器厂生产的 DD-100 型电导式盐量计，此外在我国远洋货船中也常见到 SL-30 型盐度计，它们的结构和原理基本雷同。盐度计一般由传感器（又称传送器）、控制器、指示器（毫伏计）三部分组成，它是采用电导原理进行工作的，所以被叫作电导式盐度计。当被测淡水中含有微量盐分或其它介质时，就具有导电能力，而且随水中含盐量增加，其导电能力也增强，这时导电能力称作电导。具体的作法是在水中插两个电极，然后测量两电极间水的电阻值，由于电阻大小与水中含盐量成反比，所以测得电极间水中电阻的变化便可间接检测出水中含盐量的变化。

DD-100 型盐度计的传感器测量部分，是由固定在圆筒形躯壳内的一对不锈钢同心电极和一个补偿电阻组成，其主要作用是将淡水的含盐度转换成电信号，其外壳和外罩由聚碳酸脂压成圆筒形，从凝水管来的被测水，由筒形外壳下端进入外壳内并冲刷电极，然后自上端出口排出。

传感器中电极两端输出的电信号可用毫伏计等仪表测示，称测示仪表为指示器。为方便起见，该仪表的表盘常用含盐浓度单位-毫克/升刻度，以便直接指示淡水的盐度。

盐度计中的指示仪表与传感电极的接线方法一般有三种，见图11所示，一种是直接测定通过两电极的电流变化（图11,a）；另一种是测定电极两端的电位差（图11,b）SL-30型盐度计就用此法；第三种如图11,c所示，是将电极作为测量电桥的一臂，因为电极间水的电阻值变化，使电桥输入端的电压相应变化，电桥的平衡状态偏离而输出相对应的交流信号，DD-100型电导式盐量计就是采用这种接法。

两电极间信号的大小，不仅由通过传感器的水质决定，还与水的温度有关，温度越高，导电性越好。为了消除温度对盐分浓度的影响，所以在传感器中采用热敏电阻作为测量电桥中的一个臂，以便将温度补偿到某一特定值如40℃，这样电桥两端的输出信号就仅与水质的含盐量有关，与水的温度变化无关。也有用改变测量电路中串联的温度修正电阻值的办法来消除温度影响，如SL-30型盐度计，在水温高时，使与传感器相串联的一组温度修正电阻串入量减少，以保持一恒定的分压比来补偿因水的电阻值降低所带来的测量误差，这种方法同样可以消除水温对测量的影响。

盐度计的控制器是一个铝质密封箱子，内装稳压电源、测量桥电路和报警器等，控制器下侧有七个插座供电路连接用，可分别用电缆连接电源、报警、指示表和四个传感器（如检测一种水质只需使用一个传感器）。

DD-100型盐度计的指示器是一个满刻度为1毫安的广角度船用毫安表，指示表面用含盐浓度-毫克/升刻度，如船上常用的DD-100C型盐度计，其测量范围可根据需要，在含盐量满量程为0~15毫克/升和0~150毫克/升两档内切换选择，相应的有效量程分别为1.6~9毫克/升和16~90毫克/升，报警点的含盐浓度值也可按需要选定，这些都只要

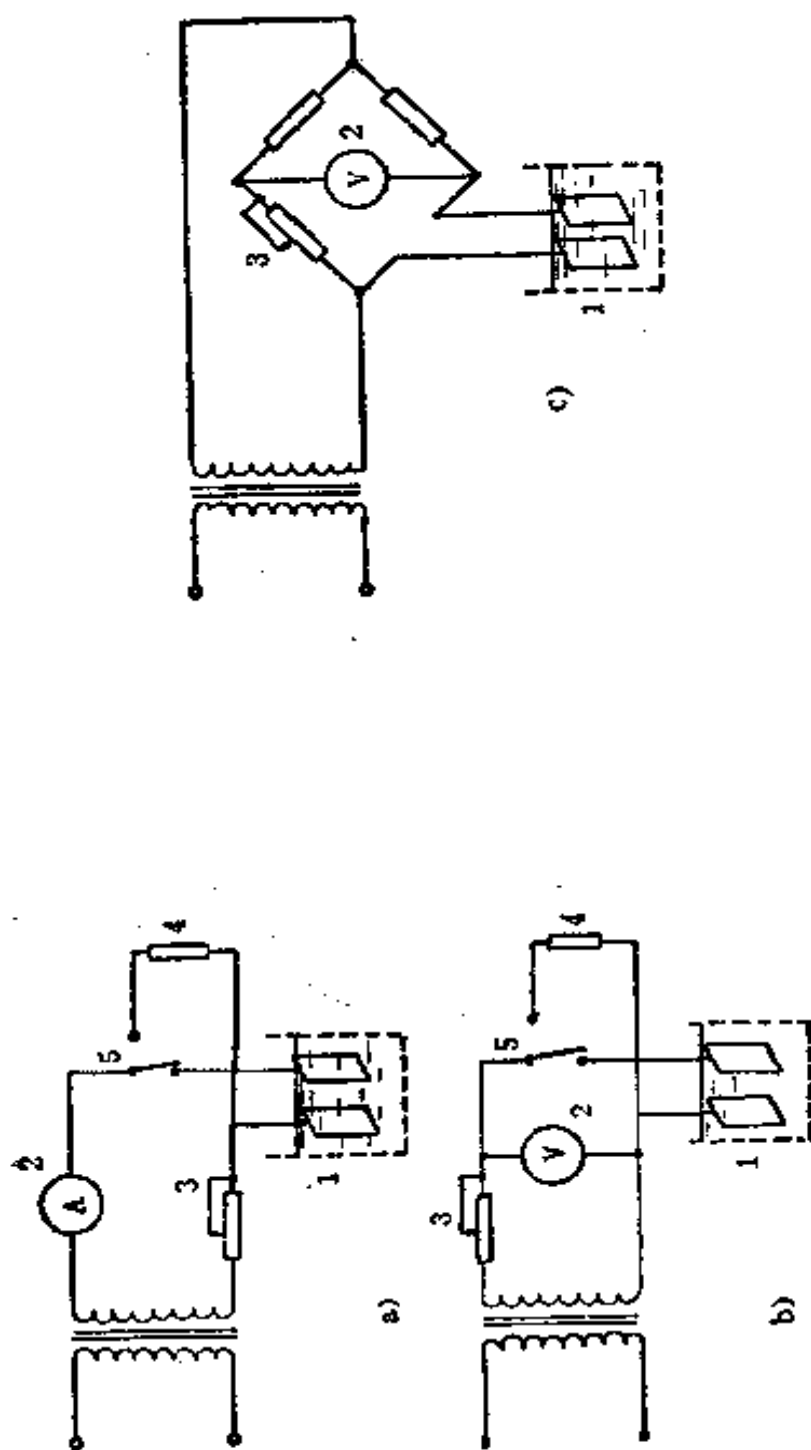


图11 盐度计电路接线原理图

1-电极；2-盐度指示计；3-调整电阻；4-试验用标准电阻；5-转换开关



在控制器上调定，切换有关旋钮即能实现。

盐度计一般在出厂前都已校对好，使用时不需经常调校，但也可能因振动等原因使指示器指针偏离正常位置，如误差 $\geq 1\%$ ，就应调整，调整时，可将控制器面板上的量程切换开关拨至“ $\times 1$ ”，然后接通电源，再将传送器（即传感器）选择开关拨至“校对”处，这时指针就会有数值指示，但是需要经过约两小时的预热后，指针才能稳定在某一位置即所谓校对点上（校对点的数值按盐度计具体型号而定，如前述 DD-100C 型，高量程时为 90 毫克/升，低量程为 9 毫克/升）。如有偏差，则应卸下“量程调节”的有机玻璃罩壳，用螺丝刀转动电位器，使指针指停留在该测量范围的校对点上，调校好后应将罩壳锁紧盖好。

报警点调节，如没有特殊需要，可不必进行调整、校验，因为仪器出厂时，已将报警点调节在报警点调节范围的最小值处，如使用中需要调校，可将“报警调节器”（另一配套的附件）插入控制器下方的传送器插座，然后将“传送器选择”旋钮拨到相应位置，再转动“报警调节器”的旋钮，使指示表的指针指到预定的报警点浓度位置上。这时拧松“报警调节”的螺母，调节里面的电位器，到报警灯刚开始发出红色闪光信号瞬间为止，为了精确调校，可重复操作进行核对，调好后应将电位器封罩锁紧。并取下“报警调节器”。

DD-100 型盐度计的测量范围如表 2。

仪器应放置在室内干燥通风，温度适中没有腐蚀气体的场所，以免电气元件受蚀损坏。

除上述国产盐度计外，我远洋船上也常用一种 SL-30 型盐度计，它是由盐度传感器的电极接受淡水随含盐量变化而

表 2

规 格	测 量 范 围		报 警 点	校 对 点	有效量程
	满 量 程 毫克/升	有效量程 毫克/升	报警范围 毫克/升	毫克/升	内最小分度 毫克/升
DD-100A 双量程	0~5	0.5~3	3~5	3	0.1
	0~15	1.5~9	9~15	9	0.3
DD-100B 单量程	0~10	1~6	6~10	6	0.2
DD-100C 双量程	0~15	1.5~9	9~15	9	0.2
	0~150	15~90	90~150	90	2

形成电导变化的信号。该信号经放大后，控制继电器动作，使淡水含盐量超过50毫克/升（NaCl）时，打开回流电磁阀并发出报警信号。SL-30型盐度计外形见图12，电路原理图见图13，其盐度传感电极与毫伏计的接线系采用测定电极两端电位差的办法，整个电路由图中右部测量电路和左部控制电路所组成。

盐度计供电源电压为220伏或110伏（交流电），经变压器降成20伏后供入测量电路。盐度传感器  $EU$  和温度修正电阻（ $R_4 \sim R_7$ ）及电阻  $R_8$  组成一分压电路。当淡水含盐量改变时，传感器两电极间电阻改变，因此在点11与点12之间的电位差也随之相应改变，这一交流电压变化信号通过二极管  $D_1$  与电容器  $C_1$  整流为直流信号后，传给盐度指示计（毫伏表）便显示出所测淡水的含盐量。要控制继电器  $JZ$  的通电与断电，使整个控制电路工作，必须将上述直流信号送至晶体管开关线路。如淡水含盐量正常，则传感器两电极间电阻较大，具前后两点11、12的电位差较大，使三极管  $T_1$  因输入电压较小而保持截止状态，而与  $T_1$  相互射极偶合的三极

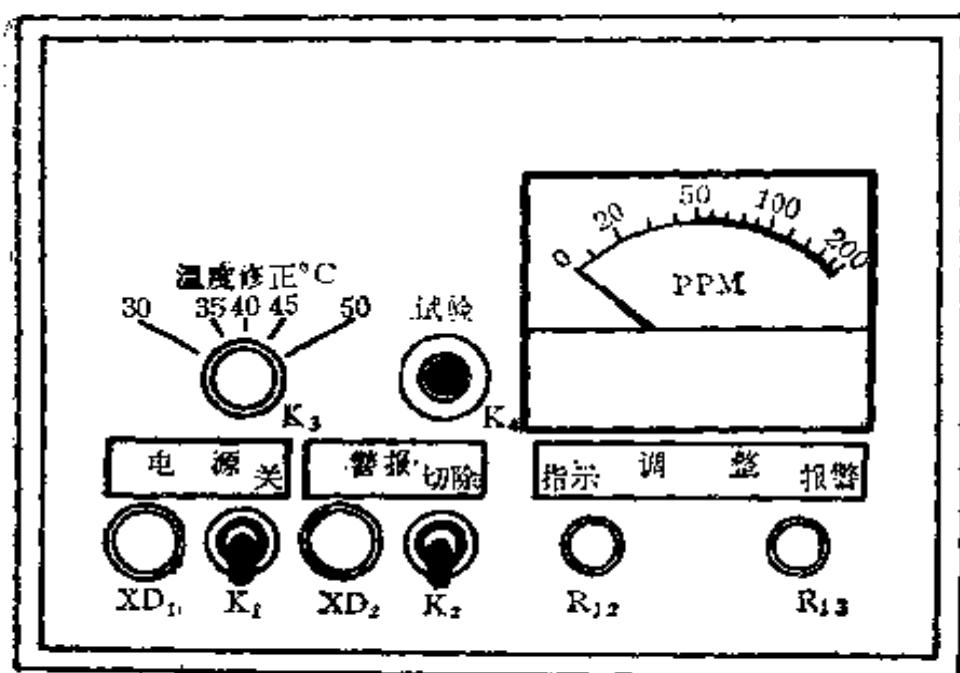


图12 SL-30型盐度计外型

$K_1$ -电源开关;  $K_2$ -报警蜂鸣器消声开关;  $K_3$ -温度修正旋钮;  $K_4$ -试验按钮;  $XD_1$ -电源指示灯;  $XD_2$ -报警红灯;  $R_{12}$ -调整指示电位器;  $R_{13}$ -报警电位器

管  $T_2$  则导通, 使继电器  $JZ$  通电, 随之整个控制电路断电。反之, 当含盐量超过限定值时, 情况与上述相反, 使控制电路得以接通。这时, 电磁阀通电而开启, 使不合格淡水不再流入淡水柜, 转而流入舱底, 同时报警灯  $XD_2$  与蜂鸣器  $FB$  发出报警信号。

只有当淡水含盐量重新恢复到限定值后, 三极管  $T_1$  由  $T_2$  射极耦合才得以重新截止, 控制电路断电, 电磁阀断电而关闭, 所造淡水又继续流入淡水柜。

温度值调整是通过与传感器相串联的一组温度修正电阻  $R_4 \sim R_7$  实现的, 水温高, 应串入较少的电阻, 以补偿水的电阻值降低而造成的测量误差使分压比保持恒定。使用中, 只需将温度修正旋钮对准所测水温度相近的刻度, 即可实行温度补偿。

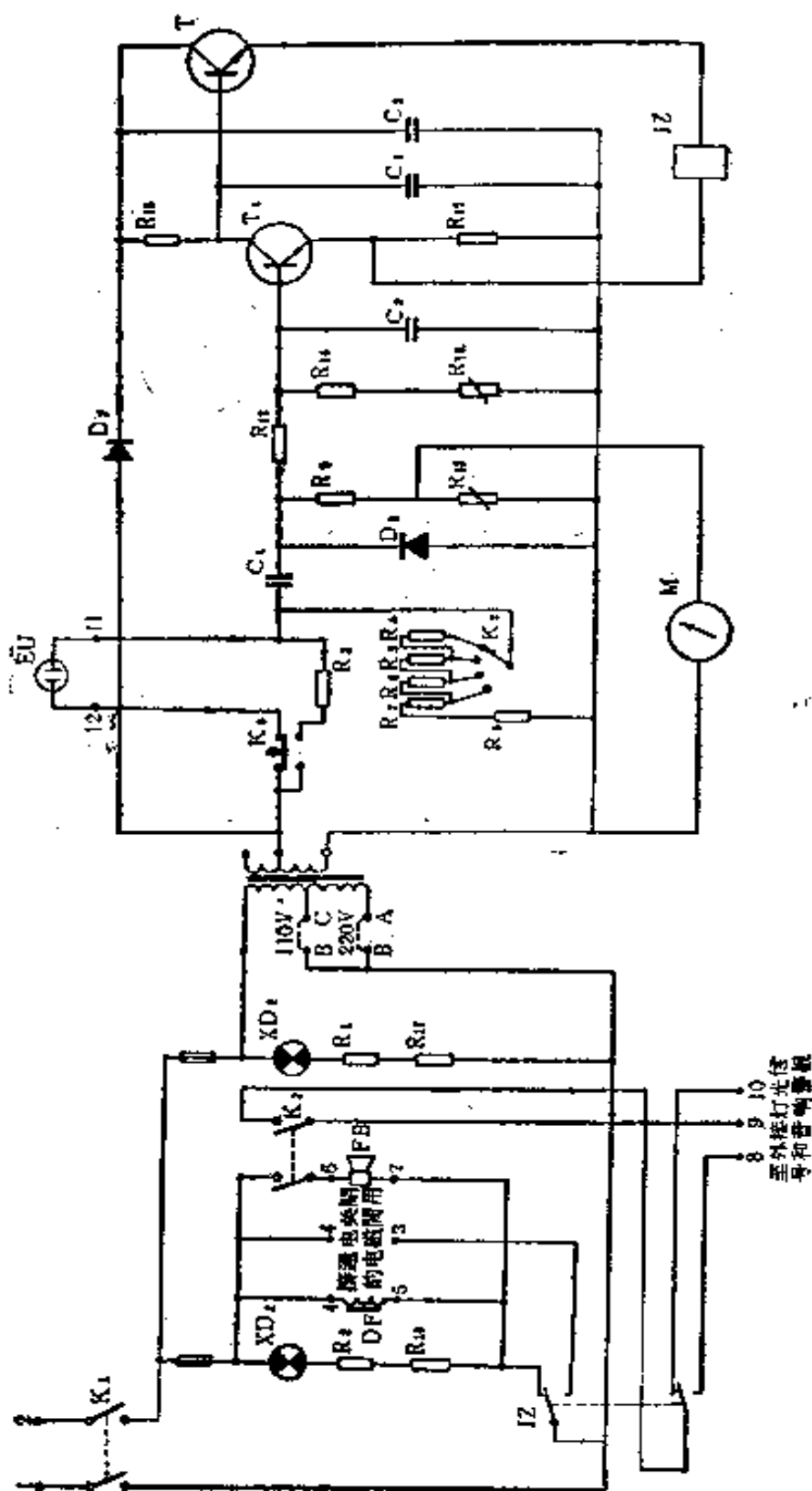


图13 SL-30盐度计电路原理图

$K_1$ -电源开关,  $K_2$ -蜂鸣器消声开关;  $K_3$ -温度修正旋钮;  $XD_1$ -电源指示灯,  $XD_2$ -报警红灯,  $M$ -盐度指示器;  $D$ -二极管;  $T$ -三极管;  $R$ -电阻;  $C$ -电容;  $JZ$ -继电器;  $FU$ -盐度传感器;  $DF$ -电磁阀;  $FB$ -蜂鸣器;  $R_1$ -试验用固定电阻,  $R_2$ -指示电位器,  $R_3$ -报警电位器 (图中各接点数字与该型盐度计接线柱标号相对应)

在运行中如需要调整淡水含盐量限定值时，可调整可变电阻  $R_{13}$ ，以改变控制电路的工作。 $R_{13}$  的改变使三极管  $T_1$  的基极偏压电阻的分压比随之变动，因此，输入电压达到使三极管  $T_1$  导通的值改变，相应的传感器两极间电阻值必然也改变，从而达到调整含盐量限定值的目的。

SL-30型盐度计校验、调整的一般操作方法，可参阅技术说明书及有关资料。校验时，可将温度修正旋钮  $K_3$  对准  $30^\circ\text{C}$  刻度，按下试验旋钮  $K_4$ ，使盐度指示计（毫伏计） $M$  与传感器  $EU$  脱开，而与专用的试验电阻  $R_9$  接通，如此时盐度指示为70毫克/升，声、光报警和电磁阀均动作，则表示盐度计指示正常，如不正常，应及时调整。调整时接通电源开关  $K_1$ ，关闭蜂鸣器开关  $K_2$ ，将温度修正旋钮对准  $50^\circ\text{C}$ 。随后将报警电位器  $R_{11}$  按逆时针方向转到底，按下试验按钮  $K_4$ ，再顺时针方向慢慢转动  $R_{13}$ ，直至报警红灯亮为止，然后调整指示电位器  $R_{12}$ ，使指示计  $M$  读数正好为50毫克/升时调整完毕。

传感器中的电极应经常用软布擦拭，并注意保持清洁以免沾污而造成电极短路。

### §3 表面沸腾式淡化装置的技术管理

#### 一、装置的运行管理

在有关技术说明书里，对运行管理都有详细叙述，操作时可按其使用技术条令进行，现以图6所示系统为例，简述如下：

##### 1. 启用

在启动水泵前应先做好下述准备工作，首先将水位自动

调节的控制旋钮放到手动位置，并关闭淡化器的真空破坏阀23、底部泄水阀33和凝水泵的出口阀30。

随后开启给水系统上的各阀，如海水泵10的吸入阀、喷射泵（抽除器）至舷外的排出阀等，但这时给水调节阀15及流量计旁通阀则需关闭。

接着打开冷凝器冷却海水进、出口阀，将海水引入冷凝器，这时应注意泄放冷凝器端盖和水箱端盖内积存的空气。

开启蒸发器加热淡水进、出口阀28，使蒸发器与主机缸套冷却水系统接通。

开启冷凝器和蒸发器的放气阀24、25，放气完毕时，可看到从中流出整股水流，此时应立即将其关闭。

准备工作做好后，就可对淡化装置供水与抽真空。

启动海水泵10，将水供至两台喷射泵后淡化器中就出现真空。为保证喷射泵工作正常，供给的工作水压力应不小于 $3.5\sim 4.0$ 公斤力/厘米<sup>2</sup>（表压），并可用调节阀14加以调节。

开启并调节给水调节阀15的开度，当真空度达到规定值时（93%），应调节给水量为蒸发量的 $3\sim 4$ 倍，这可由浮子流量计13的浮子高度示出。

当淡化器中的真空度达到93%左右时，将调节阀2稍关小，使主机冷却水在淡化器中循环。此时因突然在主机淡水冷却系统中加入一冷却器，淡水温度可能下降，所以在关小阀2时，应同时注意调节主机冷却水温，勿使温度发生大幅度突然下降。

主机冷却水在蒸发器中循环后，其中的海水即开始汽化。这时应注意勿使主机冷却水进入过多，以防海水沸腾过于猛烈，致使淡水含盐量过高。

产生蒸汽后，淡化器中的真空度可能下降，应调节冷却海水旁通阀 8，增加冷却水的循环量。

此时，装置即投入正常运行，或将装置转至自动控制下工作。

## 2. 运行中的管理

由于装置是在低温高真空下工作，所以蒸发管表面的结垢是很少的，但为了降低盐水浓度以减少结垢，应经常从分离器下抽出盐水，抽除量为蒸发量的 8 倍，因此，给水量就应为蒸发量的 4 倍（由流量计中示出）。

当需要调节淡水产量时，应同时调节加热淡水和冷却海水量。为保证装置低温蒸发，减少结垢，必须控制加热淡水进入蒸发器温度不超过  $65\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。同时为保证装置能满负荷运行，加热淡水进出蒸发器的温度降一般为  $6\sim 9^{\circ}\text{C}$ 。如果船舶航行于热带航区，海水温度较高，使冷凝器冷却温差变小，传热不良，同时喷射泵抽吸能力也将下降，致使蒸发器真空度降低，则应加大冷却水量（常限于 130% 以内，以免管子剧烈冲蚀），或适当降低蒸发量运行。冷凝器的冷却水量常应使其经工作后的温升为  $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ ，但当海水温度高达  $30\sim 32^{\circ}\text{C}$  时，可使其不低于  $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。

为了充分发挥冷凝器工作能力 1 应使冷却表面尽可能大，以保证所生蒸汽全部冷凝，所以在运行时要保持冷凝器内的凝水水位为  $\frac{1}{2}$  左右。

蒸发器内的海水水位在工作中是自动调节的，通常其水位应保持为玻璃管内视高  $50\sim 100$  毫米，如真空度过高和加热淡水温度过高则水位下降，反之水位将上升。

所产淡水的含盐度由盐度计测定，必要时也可以从凝水泵出口接管上的旋塞取出试样，进行化学分析。一般其含盐

度平均在 50 毫克/升以内，如海区给水含盐度不同也会有所变化，给水含盐量越少则成品淡水的含盐度越低，通常船用淡化装置的给水含盐度在 35000 毫克/升以下。盐水（排污水）的含盐度不超过 50000 毫克/升以利于防垢和保证淡水质量。

### 3. 停车

近年来由于海洋和港口污染严重，所以当船舶驶近港口、河口或在离海岸不超过 20 海里的海域航行时，淡化装置就应停止运行，因为这些地方的水域可能被细菌、石油等公害污染，这不仅会使所造淡水有细菌和油味（不合卫生要求），而且能使淡化器结垢加剧。

停车程序大致如下：

首先关闭加热系统的阀门，使热源终止而蒸发逐渐停息，这时要注意调节主机淡水冷却器的工作，以免进入主机缸套冷却水的温度升高对主机运行不利，同时应立即停止凝水泵运转，关闭其排出阀。

当蒸发器冷却后，关闭流量计前的截止阀和工作海水泵 10 以停止给水、抽气、排污等系统的工作。同时关闭冷凝系统。

最后开启壳体上的真空破坏阀，用泄水阀将淡化器中的盐水放空。如停港时间较长，可用淡水将淡化器内部冲洗一遍。

设备停用后，应注意防止海水和热水漏入，以免引起结垢。

## 二、装置的故障及其消除方法

现将淡化装置常见的故障原因及消除故障的方法列于表



3。必须指出，装置在实际运行中情况多变，影响的因素是比较复杂的，往往不容易一下子就分析判断得准确，这需要在实践中注意摸索积累经验，才能达到事半功倍的程度，表3内容仅作参考。

表 3

故障产生原因	消除方法
<p>1. 所造淡水含盐量过高</p> <p>1) 由于给水量太多而蒸发器内水位太高。</p> <p>2) 盐水抽除器抽除盐水量过少。</p> <p>3) 由于进入蒸发器的热量太多而沸腾剧烈。</p> <p>4) 真空度太高，使蒸发温度变低造成剧烈沸腾。</p> <p>5) 冷凝器管束漏泄。</p> <p>2. 淡水的制造量减少</p> <p>1) 进入蒸发器的加热淡水量过少。</p> <p>2) 蒸发器管束内表面结垢，或外侧污秽。</p> <p>3) 蒸发器淡水空间存有空气，热水不能流过全部受热面。</p> <p>4) 真空度降低，蒸发温度升高。</p> <p>5) 进入蒸发器的给水量少或排污量过多，被带去的热量增加。</p> <p>6) 冷却海水量太少或其温度过高而使二次蒸汽不能全部冷凝。</p> <p>7) 淡水管路上回流电磁阀关不严密。</p> <p>3. 真空度不足（低于90%），造成蒸发温度过高。</p> <p>1) 法兰、接管上接头，阀件和旋塞的填料处有漏泄。</p> <p>2) 真空表指示失灵。</p> <p>3) 进入冷凝器的冷却水不够。</p> <p>4) 冷凝器管束积垢。</p>	<p>1) 减少给水量，使其为蒸发量的3~4倍。</p> <p>2) 调整盐水抽除器的排量。</p> <p>3) 减少加热水的供给量。</p> <p>4) 减少冷却海水循环量或稍开真空破坏阀。</p> <p>5) 重新胀管，更换或堵塞。</p> <p>1) 增加加热淡水量。</p> <p>2) 清洗蒸发器管束。</p> <p>3) 打开蒸发器壳体上的放气旋塞，泄放空气。</p> <p>4) 见真空度降低的处理方法。</p> <p>5) 调整给水量和排污量。</p> <p>6) 增加冷凝器冷却水量。</p> <p>7) 拆检电磁阀并消除故障。</p> <p>1) 查明泄漏消除之。</p> <p>2) 校验仪表或更换。</p> <p>3) 增加冷却海水循环量。</p> <p>4) 清洗除垢。</p>

故障产生原因	消除方法
5) 冷凝器冷却水侧有空气, 冷却水不能流过全部冷却管。 6) 凝水泵排量不足, 冷凝器中水位过高。 7) 蒸汽在冷凝器内不能全部冷凝而抽气器将抽出蒸汽。 8) 射水抽气器的喷嘴损坏、堵塞或安装不当。 9) 射水抽气器空气吸入管上的止回阀损坏或卡住。 10) 射水抽气器的工作水压力过低 (低于3.5~4.0毫米水柱) 因此水量不足, 或其水温过高。 11) 工作水泵壳体内积存空气以至射水抽气器的水量不足。 12) 射水抽气器背压大于8米水柱, 因此通海排出阀没有全开, 或可能是止回阀过紧。 13) 真空破坏阀未关或泄漏。	5) 放出空气。 6) 检查凝水泵 (见下述)。 7) 增加冷却水量或减少进入蒸发器的加热淡水量。 8) 更换喷嘴或清洗调整。 9) 拆检止回阀。 10) 检查海水泵及其吸入滤器, 必要时拆开检查。水温可视现场情况适当处理。 11) 排除工作水泵内的空气, 必要时拆检。 12) 射水抽气器排出管路上的所有阀件必须全开。 13) 关闭或除漏。
4. 蒸发器管束、海水抽出管路、盐水抽水泵等被结垢所堵塞。 1) 由于真空度降低, 蒸发温度过高。 2) 蒸发器中加热淡水过热 (超过70℃)。 3) 排污量太小 (可能因给水量不足或排出管路上阀件未全开或其止回阀损坏卡住)。	1) 提高真空度。 2) 减少加热淡水供入量。 3) 增加给水量使之成为蒸发量的3~4倍或检查阀件使之工作正常。
5. 凝水泵不出水或排量不足。 1) 排出阀未开或开度不足。 2) 凝水泵排出压力过高。 3) 轴封漏气或叶轮阻漏环磨损。 4) 水泵转数不足。 5) 凝水水位太低, 凝水泵失吸。 6) 凝水泵的进出口管被污物堵塞。	1) 开足排出阀。 2) 开足排出阀, 使排出压力降至2公斤/厘米 <sup>2</sup> 以下。 3) 调整或更换磨损件。 4) 检查原动机转数并处理之。 5) 关小排出阀或当有凝水水位自动调节者检查凝水水位的控制线路, 并调整好。 6) 清除污物。

### 三、定期性的维护工作

淡化装置经一定期限（例如3~6个月）运行后，应根据需要进行检查清洗，如打开制淡器壳体的人孔门或蒸发器的下端盖和冷凝器端盖，检查蒸发器、冷凝器的结垢和渗漏情况。

对各水泵和有关系统，应检查各结合处是否严密，填料函的密封情况和轴的磨损程度以及工作叶轮的结垢是否超过规定限度等等。

#### 1. 热交换管束的清洗。

蒸发管的内壁由于海水的加热蒸发而结垢或污秽（一般为 $Mg(OH)_2$ 和 $CaCO_3$ 类碱垢，另一类是 $CaSO_4$ 垢），冷凝器冷却管的内壁虽然只有放热过程，但由于海水中夹带泥沙或污物而使其沉积结垢，所以应经常拆下端盖，用与管径相当的（国产制淡装置蒸发管内径一般为16毫米，冷凝器冷却管内径常为14毫米）铜丝刷子进行刷洗清除。

近年来，为了减少除垢工作量，改善劳动条件，常采用酸洗的方法来除垢。如酸洗后，加热元件上的垢仍清除不掉，再用机械法除垢。除垢药剂一般是酸性物质如稀盐酸溶液、氨基磺酸和柠檬酸等。

酸洗时，先将存水放净，取出防腐锌板，然后注入浓度不超过5%的稀盐酸溶液（具体浓度视结垢情况而定），此外，为了防止盐酸对金属的腐蚀，溶液中还可投入0.5~1%的“福尔马林”。如此浸洗2~6小时，并应随时检查溶液浓度下降情况，直到水垢全部松散，浓度不再下降为止（这时浓度值应小于1%，以免引起管上防腐膜的破坏），随后即可放出除垢剂，并立即用清水冲洗干净。最后再可用50%

苏打水冲洗一下，以中和残余盐酸的作用。

为了便于操作，近年来也常用氨基磺酸做为除垢剂的主要成分，并拌有缓蚀剂和用颜色表示反应是否结束的指示剂。我国远洋船舶上常用的有GAMLEN XD和ATLAS H400等，这些药剂，有的是干粉末，酸洗时，用水配成溶液后，注入蒸发器直至淹过上管板为止。如能在溶液中通入一定蒸汽，使其在浸泡过程中一面加热（不超过77℃）一面搅动，则可加快水垢与药剂的反应速度。如果是内部涂有防腐塑料层的淡化器，为了防止高温蒸汽的破坏作用，可用压缩空气搅拌，水垢经药剂浸泡后即能自行溶解。如一次浸泡后还不能除去全部水垢，则可再次浸泡，只要将老溶液放掉一部分，再加进一些新药剂以增加溶液的浓度加速化学反应，直至水垢全部除净，酸洗即告完成。

对于蒸发器竖管外壁因热淡水长期流过而造成的污垢，应用化学药水煮沸来进行清洗，通常向蒸发器内注入苏打溶液（碳酸钠），溶液浓度保持在1%左右（即每吨淡水加入7~8公斤苏打粉），煮沸时间应持续8小时。

## 2. 射水抽除器检修注意事项

对装置所用的两个抽除器，应定期检视喷管的磨损和阻塞情况；对喷管出口与扩压管进口间的距离（喷管轴向位置）应保持一定，以免影响混合过程的工作，因此，在更换垫片等时，要特别注意不要用过厚或过薄的垫片；为了同一理由，也应注意保证喷管与扩压管间安装的同心度，两者的不同心度应小于0.5毫米。

## 3. 漏气及其防止

空气漏入会使制淡器真空度降低，使淡水产量减少，甚至能使装置失去工作能力。

为了检查制淡装置的密封性，可停止运行，将制淡器通外界的各阀关闭，然后开动射水抽气器，将制淡器抽空至93%真空度，随后停止抽气，静观一小时后的真空度下降情况，如保持在83%以上，则可认为漏泄接近正常，否则检漏并排除之。通常最容易漏泄的地方是凝水泵的轴封处和各有关阀门的阀杆填料箱处。近年来，对凝水泵的轴封结构作了许多改进，如加装阻漏O形密封圈和加水封等，漏泄情况已有很大改善，但因泵在低真空下工作，仍应多加注意。

装置停用时的检漏，可通过压缩空气皂泡法进行检查（气压常小于1公斤力/厘米<sup>2</sup>），在运行中，可采用烛火法或线香法检漏，即以烛火或线香沿各接合面慢慢移动，如发现其向内吸动，则表明该处漏气。

对于填料函的漏泄，常用调整其松紧度或增加填料来补救，对于静止不动的密封处，可涂上牛油或油漆以防漏。

对于漏洞或漏缝，可先塞入适当的填充物，然后再在表面涂以油漆、沥青或环氧树脂。

#### 4. 漏水及其防止

漏水现象在冷凝器中最为常见，这主要是由于海水腐蚀所造成。当冷凝器中的海水漏入淡水空间时，将严重影响淡水质量，所以要立即堵漏。

找漏工作除同样可用烛火法和线香法进行外，也可用灌水查漏法确定。经验证明，管口接合处常由于管与管板扩接不良而泄漏。

管端接合处的漏泄可用扩管（增扩）法加以消除。扩管时应注意用力缓慢，使扩管器上的压力逐渐增加，以利于金属均匀变形，同时不要扩得过紧，以免管子被压薄而拔长，甚至使弹性减少，反而密封不好。当然扩接得过松也是不行

的。管端扩管部分的深度应仅占管板厚度的75~90%，否则管子在管孔内边会受到切割而损坏。扩管后应仔细检查有否裂缝，并作水压试验。

如需扩接新管，则受扩张的管端必须退火。在没有装入管子前，应先分别将管端和管板装接处清理干净，此外，扩接配合的孔径也不能相差太大，通常以0.3~0.5毫米为宜。

至于管子本身的烂穿问题，这主要是由于海水内含有盐类，产生电化学腐蚀所造成的，为此根据金属化学活泼性强弱的顺序，设法用活性较强的锌，来置换淡化器的铜管、铁壳，与盐类作用而先受腐蚀，达到淡化器防腐目的，办法是在冷凝器的水室端盖和蒸发器的下端盖内装设锌板，一般就把它称作防腐锌板。因此，只要注意保持防腐锌板表面的清洁，经常铲除已经氧化、松脆了的表面氧化层，使化学反应继续充分进行，以免降低保护作用外，并在其蚀损达50%时，及时加以换新，这样铜管的电化学腐蚀烂穿现象是可以有效防止的。

锌板的表面积大小，一般应有被保护换热面面积的1/1000。除防腐锌板外，还有其他材料可选用，如化学活泼性较好的镁板和较便宜的含20~60%的铝合金也同样可作为防腐板。纯铝板则因表面很易形成自己的氧化保护膜，所以只可勉强采用。

在运行中，一旦发现管子本身漏泄，可先用铜塞或木塞将管子两端堵住，待停车后再换新管。

#### 四、食用水消毒

采用真空蒸馏装置制造淡水，虽有种种优点，但因是低温蒸馏，水还没有加热到100℃即处于沸腾状态，不能达到

煮沸消毒灭菌的目的。特别在港口和河口水域蒸馏时，水源常被细菌等污染，所造淡水要做为食用，必须进一步消毒处理。尽管最低的消毒温度还没有明确规定，但经一些试验表明，在沸腾条件下，高于 $49^{\circ}\text{C}$ 的沸腾海水中病原细菌不会生存，因此当蒸馏装置在该温度以上运转时，所产生的蒸馏水不会有细菌感染的危险，但是问题在于，危险性往往来自蒸馏过程之后，冷凝器和蒸馏水冷却器管子漏泄而造成的感染，而在运行中，轻微的渗漏是难免的。所以目前船上均采用下述简便而有效的消毒设施：

#### 1. 投氯消毒法。

这与城市自来水用漂白粉处理的原理一样，即在水舱中投入次氯酸钠 ( $\text{NaOCl}$ ) 或氯石灰，让水中存有  $2\sim 3$  p.p.m. 的氯离子量，但此时水中有较浓的氯气味，所以要装一活性碳滤器，让水流过滤器吸掉氯，当水中的剩余氯量减少到  $0.5$  p.p.m. 再使用。

#### 2. 臭氧消毒法。

将臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 发生器所产生的臭氧通入水中进行消毒。

#### 3. 电极法。

将一部分海水通过电极加以电离而产生游离氯，再将这种含有游离氯的海水混入饮用淡水中达到消毒目的。

#### 4. 紫外线消毒法。

将食用水流过紫外线灯消毒器，利用紫外线的照射而达到杀菌目的。

因为消毒处理需要备有专门设施和附加操作，所以在食用水消耗量不大或连续航行时间不长的海洋货船上，仍用专门饮水舱从港口装带饮水供航行中使用。有的客船也有专设蒸发温度高于  $100^{\circ}\text{C}$  的制淡装置，以制造无菌饮用淡水。

## 第四章 闪发式海水淡化装置及其系统

### §1 尼莱克斯 (Nirex) 型海水淡化装置

闪发式海水淡化装置由于有一些独特的优点,设计制造和维护管理也不困难,所以目前已有多种型式的闪发式装置在船上应用,这里以我国远洋船队中使用较多的尼莱克斯 (Nirex) 型海水淡化装置作为实例予以介绍,其他型式不过是蒸发级数或利用的热源和装置系统有所不同,其基本特征无多大差别。

Nirex 型闪发式蒸馏装置按加热工质的不同分为三种型号,即用柴油机缸套冷却水的 JWFP 型;用缸套冷却水或蒸汽的 JWSFP 型;和用废气锅炉蒸汽为加热工质的 SFP 型,它们都有一个共同特点,即采用板式热交换器代替老式的管壳式热交换器,有的装置还采用喷淋式冷凝器。由于板式热交换器远较管壳式热交换器占的地方小,所以其装置总体积要比普通的淡化装置小,而且是做成组装式的,安装、维修都比较方便。

现介绍我国一些船上装用的 JWSFP 型造水装置,其整体布置图示于图14(a),该装置工作系统示于图14(b)。

从图中可见,该装置由安置在两侧的两个板式热交换器(一为盐水加热器1,另一为淡水冷却器2)和在中间的蒸发冷凝室3构成主体部分,在其下方装有三台双联离心泵(即两台离心泵装于同轴,由一台电动机驱动),此外,还有一台射水抽气器19和一台供蒸汽加热用的蒸汽射水器28以及盐



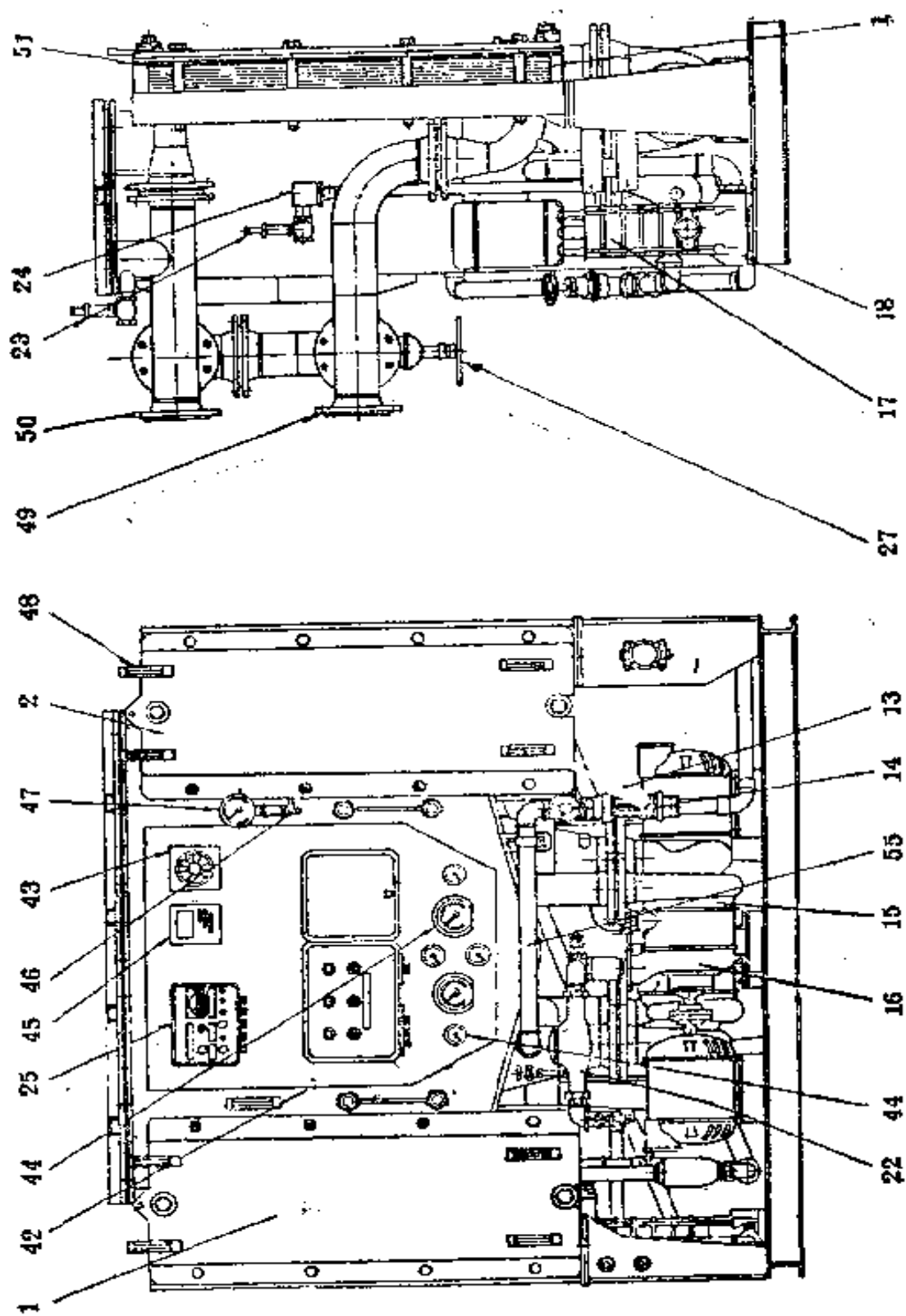
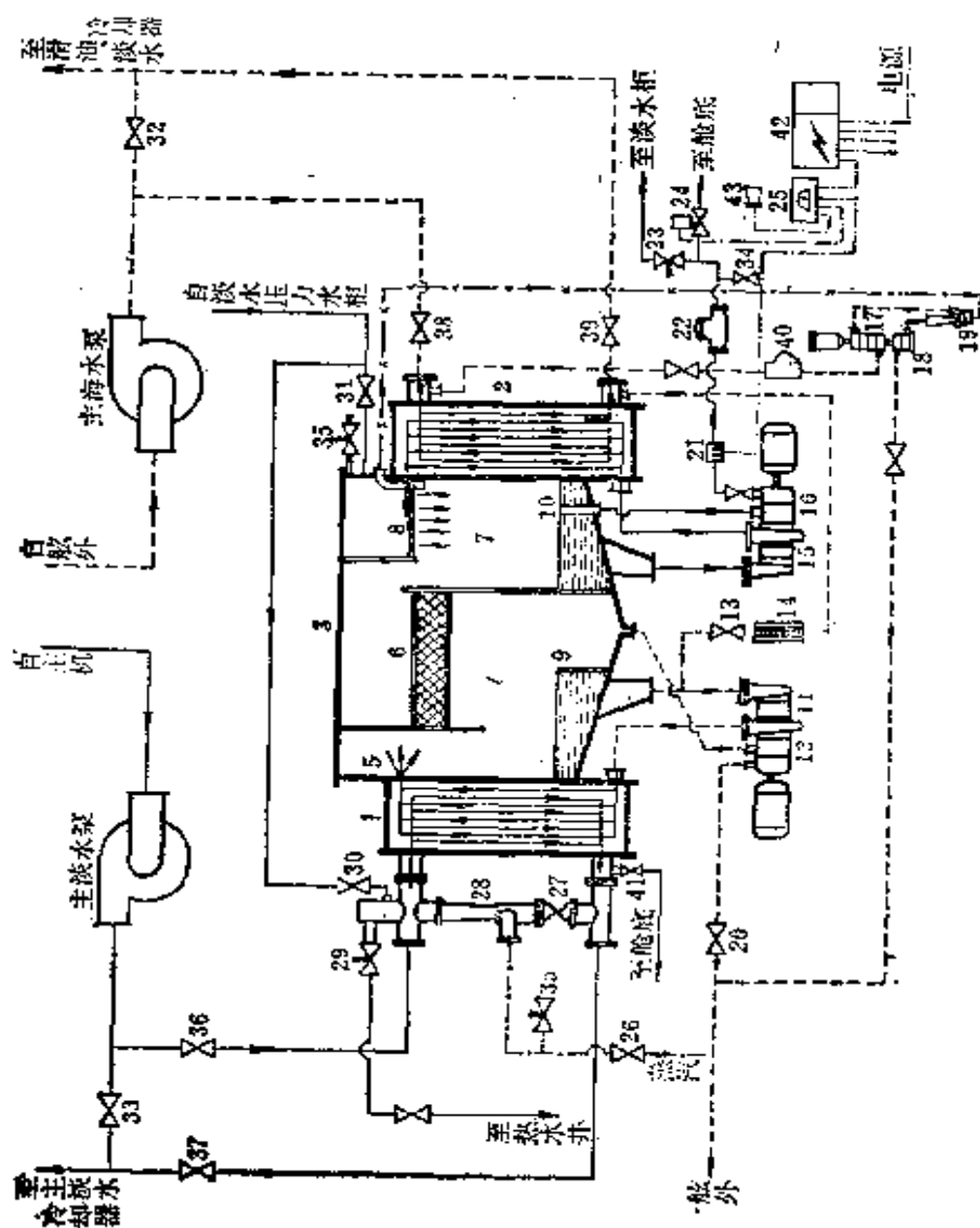


图14(a) JWSFP 型闪发式装置总体布置图

图14(b) JWSFP 型闪发式

海水淡化装置系统原理图

1-盐水加热器;2-淡水冷却器;  
3-蒸发冷凝室;4-闪发室;5-  
喷雾器;6-汽水分离器;7-冷  
凝室;8-淋水板;9-溢流板;  
10-溢流管;11-盐水循环泵;  
12-排盐泵;13-给水调节阀;  
14-浮子流量计;15-淡水循环  
泵;16-凝水泵;17、18-真空  
泵的供、排水泵;19-真空泵(射  
水抽气器);20-排污调节阀;  
21-盐度传感器;22-凝水流量  
计;23、29-弹簧止回阀;24-泄  
流电磁阀;25-盐度计;26、27-  
截止阀;28-蒸汽射水器;30、31-  
启动注水阀;32-冷却海水调  
节阀;33-加热淡水调节阀;34-  
凝水取样阀;35-安全阀;36、37-  
加热淡水进出口阀;38、39-冷  
却海水进出口阀;40-过滤器;41-  
泄水阀;42-电控制板;43-蜂鸣  
器;44-压力表;45-铭牌;46-真  
空破坏阀;47-真空压力计;48-  
温度计;49、50-加热淡水进出  
口;51-板式热交换器前盖板。



度计25、泄流电磁阀24等设备。

该装置淡水产量为10~60吨/天，工作过程按图14引述如下：

当用柴油机缸套冷却水作为加热工质时，来自主机的冷却淡水（温度为65℃），经阀36进入板式盐水加热器1中，加热循环盐水后从阀37流回主机冷却系统。加热淡水的温降约为5~8℃，每小时流量约为每昼夜淡水产量的4~5倍。装置下方的盐水循环泵11将盐水从闪发室底部抽出，并和从淡水冷却器2流出的部分冷却海水混合，然后做为给水被一起泵入加热器1，并被加热至55℃左右。当给水离开加热器1自喷雾器5喷入闪发室4中时，由于闪发室始终保持88.5%的真空度，其相应的水蒸汽饱和温度仅为48℃左右，所以给水呈7℃左右的过热状态，喷入的部分给水便立即蒸发，直至给水温度降至闪发室饱和温度为止，未蒸发的大部分给水落入闪发室底部，由盐水循环泵抽出再送回加热器。

为了补充给水和降低闪发室和加热器中盐水的浓度（含盐量），以保证淡水质量和实现无垢工作，必须从船舶冷却水系统中，不断供入大量海水，其流量接近来的设计要求应为淡水产量的八倍之多，即给水倍率为8，由浮子式流量计14示出，并可用给水阀13进行调节。

闪发室中大量多余的盐水，从装于底部的溢流板9溢出，由排盐泵排至舷外，装设溢流板的目的是为了使循环盐水能始终保持有一定水位，同时也控制了适当的排盐量，否则将因吸入水位太低而使盐水循环泵吸入口产生汽蚀，甚至失吸。如水位一直上升，则应加大排盐泵排量，当其排量已达最大值时，则可减少补给水量。

闪发室中所产生的蒸汽，通过汽水分离器6的档板系统

和网状除雾器后，所夹带的海水微粒被分离干净，随后，蒸汽转入喷淋式冷凝器，在冷凝室7中遇到从上面淋水板8喷淋下来的冷却淡水，便凝结成淡水。它们一起落入冷凝室底部水槽，由淡水循环泵15抽出，并送入板式淡水冷却器2，将热量传给从主机海水泵供来的海水（海水吸热后，一小部分作为补充给水，其余流至滑油淡水冷却器），这部分被冷却后的淡水再进入冷凝室顶部的淋水板之上，作为二次蒸汽的冷却工质循环使用。随着所产生的淡水不断增加，冷凝室底部水槽中的淡水，通过为保持凝水泵一定进口水位的溢流管10，由凝水泵16抽出，经盐度传感器21、流量计22、弹簧止回阀23被排至淡水柜。当所造淡水的含盐量超过50毫克/升（NaCl）时，盐度计25就自动打开泄流电磁阀24，使不合格的淡水排至舱底废弃。

为什么要采用喷淋式冷凝器呢？主要是可以利用两种热交换介质直接混合，以提高换热效率，另外，一般情况下，板式热交换器的通路面积相对地比较狭窄，作为凝汽器使用也有不利的方面，从本装置的总体布置来看，对安排对称紧凑也不无可取之处。

由于这种淡化装置刚开始工作时，就要有足够的循环冷却水以喷淋冷凝从闪发室来的蒸汽，所以最初启动时，要专门从船舶日用淡水压力柜经注水阀31引入启动用冷却淡水，当冷凝室水位达到玻璃水位计一半高度时，即可正常工作。

闪发冷凝室所需的真空度是由射水抽气器（真空泵）19建立的，射水抽气器的工作海水由立式离心供水泵17供给（海水压力约为6公斤/厘米<sup>2</sup>），抽气器排出的汽水混合物由排水泵18排至舷外。启动时，为建立制淡器内90%的真空度，约需真空泵提前工作10~12分钟。

当装置转成使用废气锅炉所产生的蒸汽作为热源时，应先将主机缸套冷却水的进出口阀36、37关闭，把盐水加热器1中存有的缸套冷却水放空，以免污染锅炉给水。然后由阀30自淡水压力柜引来清洁淡水，打开加热循环阀27，经蒸汽截止阀26供入压力约为3公斤力/厘米<sup>2</sup>的减压蒸汽，蒸汽供入量应调整得使加热循环水进入加热器时为65~70℃，以保持淡化装置的正常热交换工况。加热淡水的循环是由蒸汽射水器28的吸排作用实现的，在经过射水器时，淡水又与蒸汽混合而被加热，随后，热淡水在盐水加热器内放出热量，使工作盐水提高温度而实现过热闪发。蒸汽射水器的剩余蒸汽及部分凝水经弹簧止回阀29排至热水井。

本装置的加热器和冷却器中，都以液态工质进行热交换，所以具有较高的传热系数。而且由于在热交换器中，既不产生蒸汽，也不冷凝蒸汽，就使其传热面有完全避免结垢的可能，而达到无垢工作的目的。

为了调节淡水产量，可调节阀32和33，分别实现加热和冷却的旁通调节，这些阀关得愈小，则淡水产量愈高。

本装置的主要部件如泵、抽除器、盐度计、电磁阀等（除板式热交换器外）的结构和性能都与以前叙述的表面沸腾式装置相类似，在这里不作重复。下面着重介绍一下板式热交换器。

## §2 板式热交换器

板式热交换器是由许多铝青铜波纹板叠合起来，两端加上盖板，用螺栓夹紧的高效能新型换热器。它与一般常用的管壳式热交换器相比，具有结构紧凑、体积小、重量轻、节省材料、传热效率高、工作适应性大、拆装和清洗方便等优

点，所以在食品、化工、机械、船舶等工业方面获得了广泛的应用。在我国远洋船舶的一些新型装置中，已采用这种板式热交换器，因它便于维护检修，很受船员欢迎，预料不久将会得到普遍推广，以代替老式低效的管壳式热交换器。

现将板式热交换器的结构、工作原理及其特点介绍如下：

板式热交换器主要由若干个波纹板和两板之间的密封垫圈(图15)及两端的压紧板所组成，由螺栓将它们扣紧并固定在结构上，由于换热板是带波纹的，因此每一对相邻波纹板夹紧后，其间形成一组空隙流道，当加热和被加热介质在板的两侧，相对方向交错的流道内流动时，热量便通过换热板进行传递(见图16)。

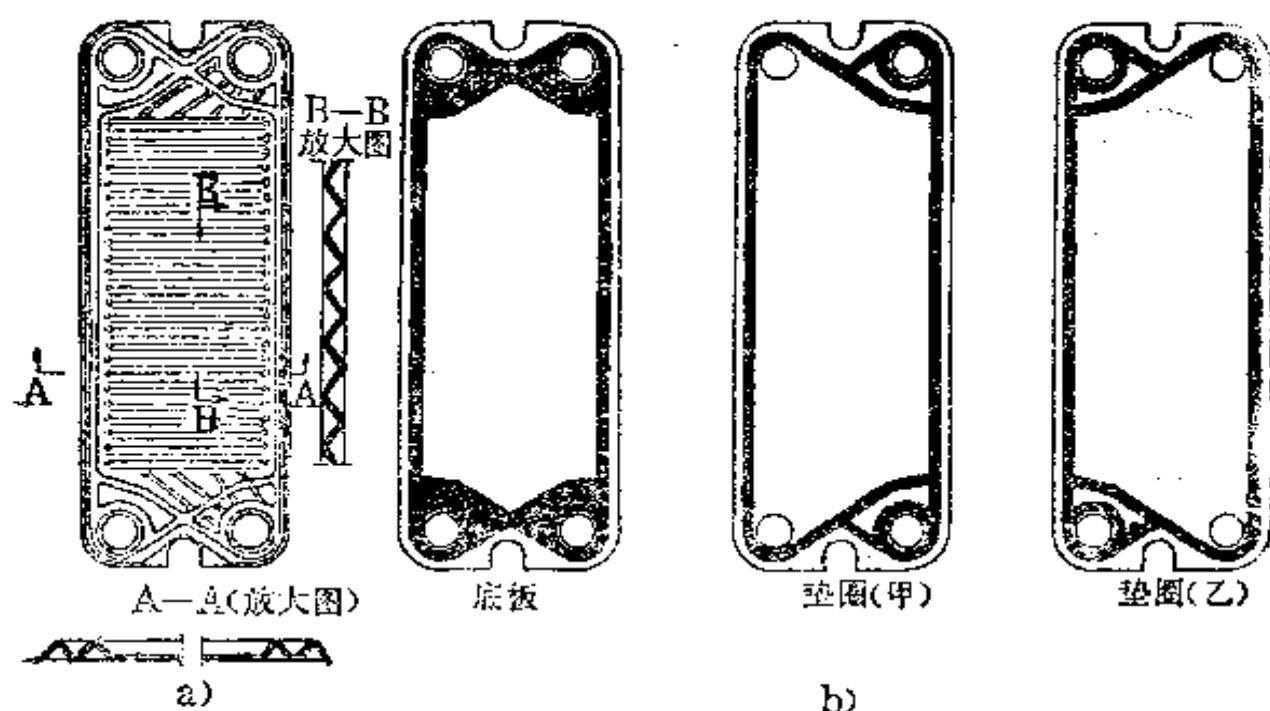


图15 换热板及其垫圈  
a) 换热板；b) 垫圈和底板

为了隔开波纹板形成的介质流道和防止互混及漏泄，在

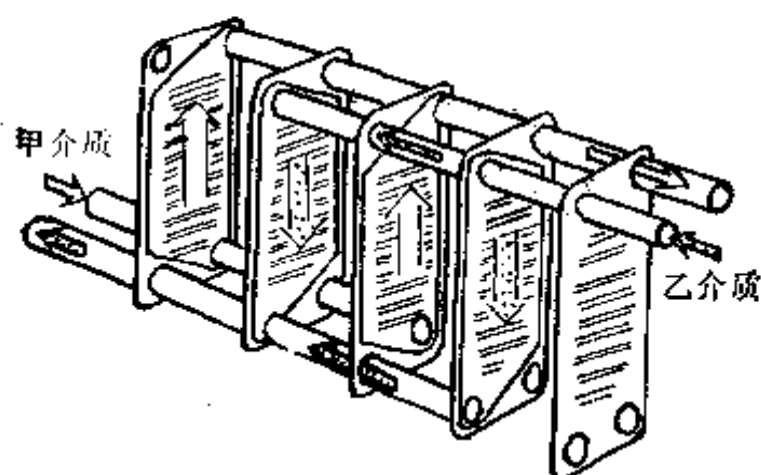


图16 板式热交换器内介质流动情况

相邻板之间的周界上夹有垫圈（见图15）。垫圈的材料一般为丁晴橡胶或压缩石棉，它由树脂粘合剂粘结在板的凹槽中。换热器的关键元件是传热板，传热板的结构尺寸和波纹形状必须考虑到提高换热板的刚性，以保证它具有一定的抗压能力，因流动着的介质带有一定压力，其次，要考虑到增加有效面积和使介质在低速下能发生强烈湍动，从而强化传热过程。常见的换热板是一种水平波纹板如图15所示，因板间距离很小，靠若干接触点支承，接触数是由板形结构决定的，如图示结构平均每30厘米<sup>2</sup>的面积上仅有一个触点，所以一般板式热交换器不能承受较高的压力，国内生产的这种换热板目前允许使用的压力为6公斤力/厘米<sup>2</sup>（试验压力达10公斤力/厘米<sup>2</sup>），但对普通船用热交换器，这样的承受压力已足够了。

在组装换热板时，如图17所示，先装好底板，然后交替装上甲型与乙型（垫圈形状不同）换热板，末了是一整块橡皮盖板，最后用左右两夹板和几个螺栓固紧，形成一个整体。组装时必须按记号将板对齐，均匀夹紧，垫圈表面应清洁干净，以免板错位、歪斜和夹杂而漏泄。如橡皮垫圈使

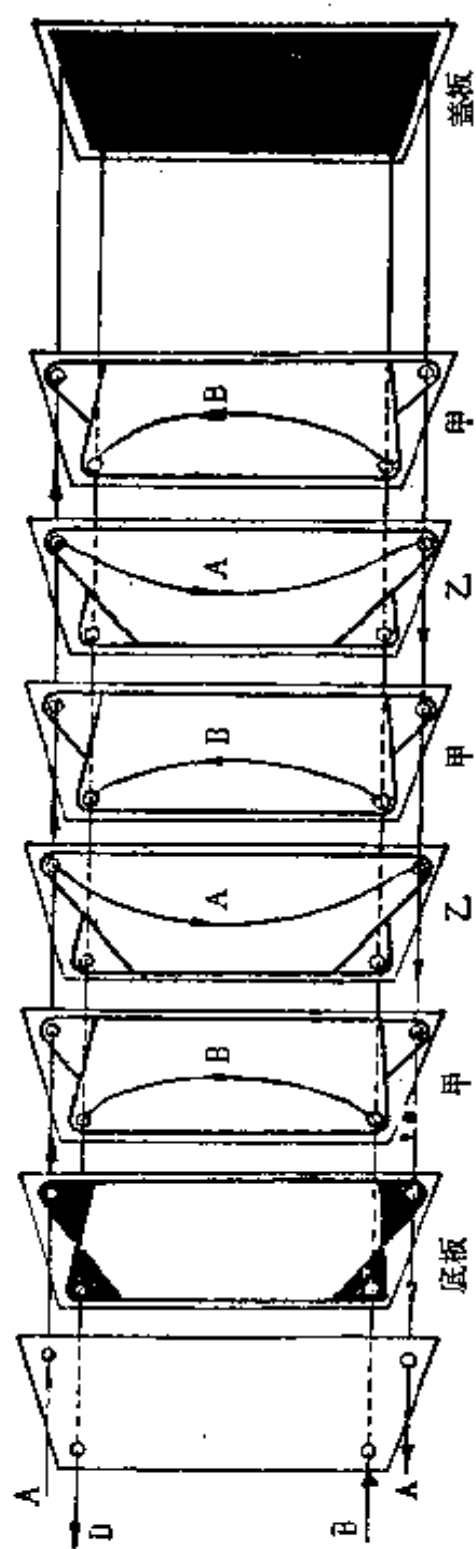


图17 板式换热器的组装及其流程图示意图



用日久而引起老化损坏，在一般情况下，稍为拉紧牵条螺栓即可消除漏泄，如仍无效，应仔细检查，找出漏水处后，将橡皮垫圈小心擦净或换新。

#### 〔附〕 板式热交换器在表面沸腾式淡化装置中的应用 (JWSFP 型)

前述表面沸腾式淡化装置中已介绍，不管是我国系列产品或国外的 ATLAS 型淡化装置，都传统地采用浸管式热交换器。但最近几年来，板式热交换器不仅在闪发式淡化装置中已有采用，而且在表面沸腾式淡化装置中，也开始用板式热交换器作为装置的蒸发器和冷凝器，如我国“广河”、“青海”等远洋船舶就装备了这种新型的表面沸腾式淡化装置。国内有关部门也正在研制这种用板式热交换器的表面沸腾式淡化装置。

这种表面沸腾式装置由于采用了板式热交换器，所以体积小、重量轻、打开清洗方便、调整控制也较简单。它也避免了闪发式固有的效率不高的缺点，即闪发式淡化装置为了用循环海水本身所含的热量作为闪发二次蒸汽的蒸发潜热，就需要大量的加热海水进行循环，并要排走大量盐水，随之热量损失增加，经济性降低，现在，由于盐水量少，所以向舷外排出废热的损失也少，效率便随之提高。

下面将“青海”轮上装用的该种装置示于图 18，它是 NIREX (JWSP) 型，其结构由冷凝器及蒸发器上下两部分组成一扁圆形整体，在上下界面上设有除雾器以分离二次蒸汽中夹带的盐水微粒。蒸发器由板式热交换器组成，加热工质（温水）在海水换热板两侧相对流动，蒸发器的特点是换热板海水侧上部沟槽没有密封垫片，以使盐水和二次蒸汽由沟槽向上流出换热板。由于给水量能严格控制 和 给水通

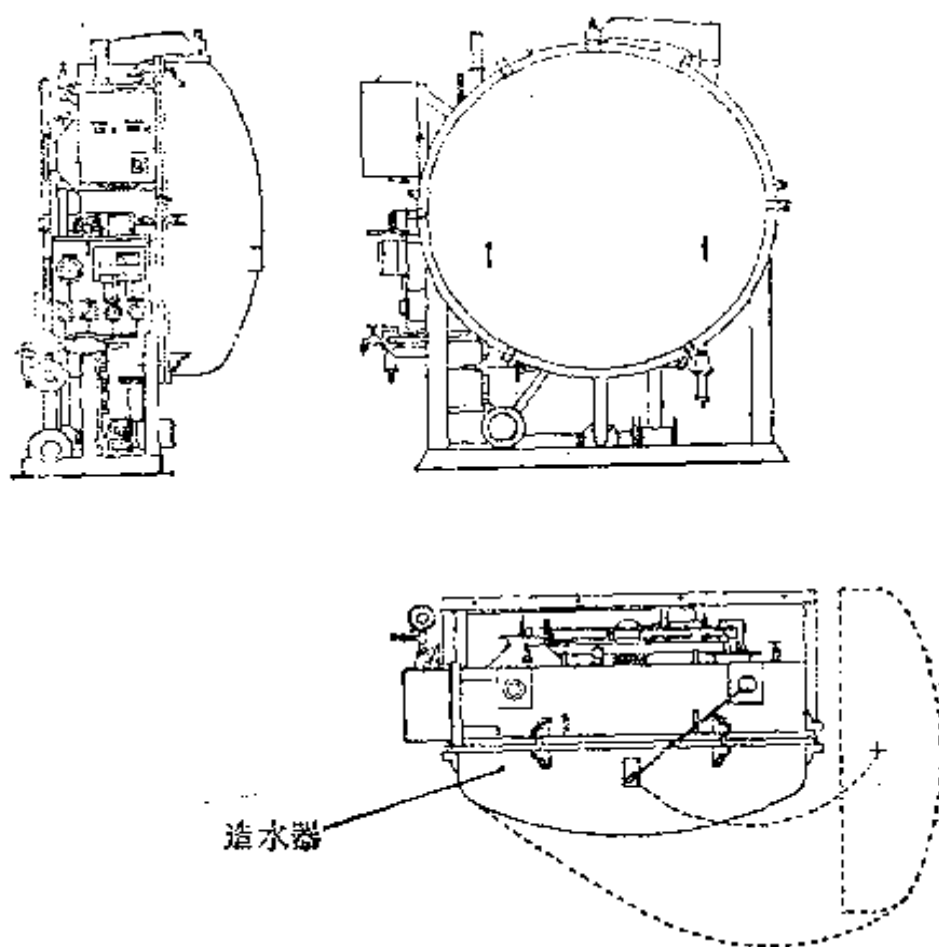


图18 JWSP 型造水装置构造图

过沟槽的时间很短，所以不会产生盐垢。冷凝器的构造与蒸发器类似，不过蒸汽流向相反，即二次蒸汽冷凝中没有密封垫片的上部沟槽流入。

JWSP 型海水淡化装置的工作系统示于图19，由抽除器泵 9 将海水供入给水管及空气抽除器 7，通过节流孔12不断定量供入给水，通空气抽除器 7 建立并保持装置必要的真空度。

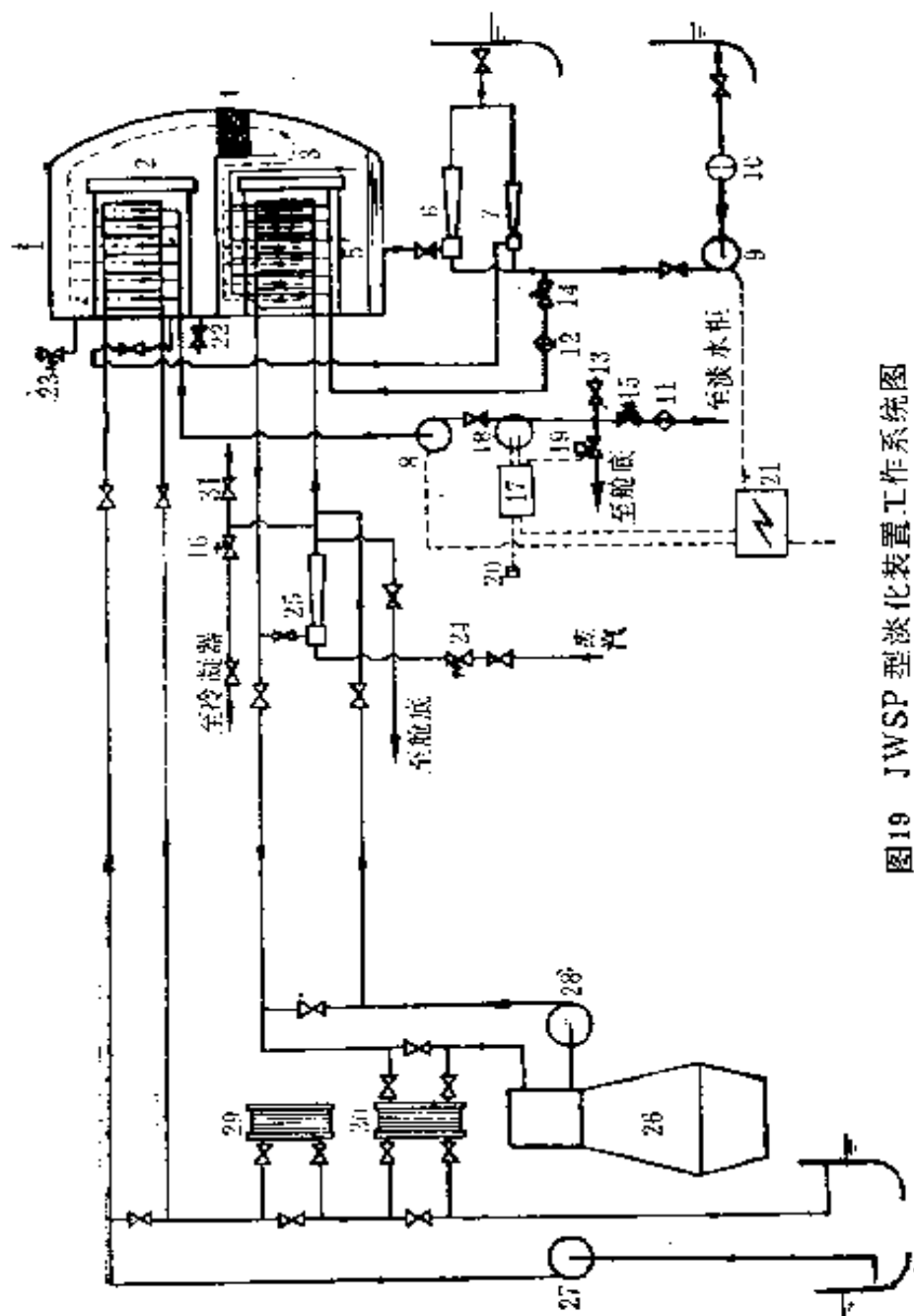


图19 JWSP型淡化装置工作系统图

1-海水蒸馏装置；2-冷凝器；3-蒸发器；4-除雾器；5-盐水池；6-盐  
水抽除器；7-节流孔；8-取样阀；9-淡水泵；10-过滤器；11-流  
量计；12-节流孔；13-取样阀；14、15、16-弹簧阀；17-盐度计；18  
传感器；19-电磁阀；20-蜂鸣器；21-配电板；22-真空泄气阀；23、  
24-安全阀；25-蒸汽喷射器；26-主机；27-海水泵；28-缸套水泵；  
29-滑油冷却器；30-缸套水冷却器；31-启动淡水注入阀

在蒸发器中，利用主机缸套冷却水的热量将海水加热蒸发，用盐水抽除器 7 将积存在蒸发器下方的盐水不断抽出并排至舷外。蒸发产生的蒸汽经除雾器 4 除去盐水颗粒后转而进入冷凝器 2。在冷凝器 2 中，蒸汽被海水泵 27 供入的冷却海水所冷凝，最后，淡水由淡水泵（转子刮板泵）8 送至淡水舱。蒸发器 3 的热源也可用蒸汽，这时由蒸汽喷射器 25 将引来的淡水加热，在蒸发器中循环工作与以前所介绍情况相同。

在 JWSP 型海水淡化装置的淡水管路中也有盐度计（SL-30 型），其工作原理与一般装置相同。

### §3 闪发式淡化装置的技术管理

#### 一、一般技术保养工作

污垢是影响该装置工作的主要问题，因此在保养中应特别注意清除装置的污垢，如每月检查防腐锌板的腐蚀情况，必要时换新；每工作二个月就应检查喷射抽气器及循环泵上全部滤网并加以清洗；每三个月就应将盐度计传感器中的电极用软布擦净；隔一年后则应将汽水分离除雾器放入酸液内清洗去污等。

如淡化装置的淡水产量低于额定值而操作又无不当，可能是加热器或冷却器的换热板已经结垢，影响了传热效果，这时应检查积垢情况，必要时加以清洗。在换热板拆检清洗后，安装时应注意按一定顺序并将螺栓均匀拉紧，以免使流程搞乱和板片歪斜而损伤橡皮垫圈和接头。

板式热交换器常因漏水而发生故障，所以应仔细检查加热器、冷却器换热设备的垫料、橡皮接头是否保持完好，并

应查看这些热交换器是否有机械损伤等，如有损坏应及时加以消除。

## 二、装置的运行操作

### 1. 启动

闪发式制淡装置的启动步骤如下（参照图14）：

（1）首先使冷却器2投入工作，为此将海水通入冷却器2，然后调节旁通阀32以获得额定海水流出量，再通过启动注水阀31向淡化器灌入淡水，直至冷凝室玻璃水位表的水位上升到一半高度时为止。

（2）建立真空，关闭真空破坏阀46，将射水抽气器的关闭阀打开，以接通射水抽气器的供水泵17，然后开动供水泵17使水引到抽气器19，这时压力约6个大气压（约 $5.884 \times 10^5$ 帕），经10~12分钟就能建立90%真空。抽气器喷出水柱的最大背压为7米水柱。

（3）供入给水，打开给水调节阀13，海水通过流量计14，给水调节阀13，盐水循环泵11供入淡化器作蒸发用。此时应调整其流量，使之等于八倍以上的淡水产量。

（4）开动其余的泵，调整淡水及盐水排出管道上的阀门，使盐水和淡水的排出泵保持1公斤/厘米<sup>2</sup>的背压。

（5）使加热器1投入运行，可打开阀门36使主机缸套冷却水引入加热器1，再调节旁通阀33，以获得额定淡水产量。

（6）用盐度计检查淡水含盐量，启动时，如灌入淡水的含盐量超过警戒点，盐度计的蜂鸣器43及电磁阀24将动作，当含盐量合格后，电磁阀自动关闭，淡水自动排入淡水柜并消除报警音响。

（7）调节淡水产量，关小旁通调节阀32、33，系统的加

热和冷却相应加强，这时淡水产量增大。当旁通阀32关小时，冷却海水流量增加，由于闪发室内真空度提高、沸点降低，冷却面上水垢的积聚就会减少，但是，这样也将造成淡水的含盐量增加，应开大旁通阀32以减少冷却海水量，直到含盐量降低到可用程度为止。

同理，如舷外海水的温度改变时，也应作相应调节。在正常情况下，冷却海水流过冷却器后的温升应为 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ ，如海水温度低于 $10^{\circ}\text{C}$ 时，仍保持着 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 温升，则过分冷却也将造成前述后果，应适当减少冷却海水量。

一般情况下，这种淡化装置的设计工况是在主机缸套冷却水温度为 $65^{\circ}\text{C}$ ，舷外海水温度为 $30^{\circ}\text{C}$ 时，淡化量为最低额定值；如舷外海水温度为 $12^{\circ}\text{C}$ 时，淡化量达到最高额定负荷即增加为最低额定值的150%。

供入加热器的热量，可用加热淡水调节阀33进行旁通调节。运行时，如发现循环盐水的过热度超过 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ ，这说明盐水循环泵排量太小，造成的原因可能是由于加热器结垢而使泵的排出阻力增加或泵的填料箱漏气，或者是补给水里含有大量空气而使泵的排量不足，应及时检查原因加以排除。

## 2. 停用

停止的步骤一般如下：

(1) 打开制淡器上的真空破坏阀46。

(2) 打开旁通阀33，关闭加热淡水进出口阀36、37，以使加热器停止工作。这时应注意主机淡水冷却器的工作情况，不使其因停用淡化装置而缸套冷却水温度升高（应适当开大阀33）。

(3) 停止射水抽气器19的工作，关闭相应的阀门，再关闭蒸汽截止阀26停止蒸汽射水器28的工作。

(4)关闭给水管路上的给水调节阀13, 停止补给水的供入。

(5)停止其它泵的运转, 关闭排水管路上的止回阀23和阀34。

(6)关闭盐度计。

(7)将冷却器的旁通阀32打开, 再关闭其海水进出口阀38、39, 使冷却器停止工作。

(8)将淡化器中的盐水通过泄水阀41放空。

停港时, 应关闭闪发式制淡装置的全部引入阀, 以免将港内污水引入热交换器而影响装置的正常运行。

### 三、故障及其排除

现将闪发式淡化装置运行中常见的故障和排除方法列于表4。

表 4

工作条件 (缸套冷却水加热)	不正常现象及其排除方法
A. 缸套冷却水温度一般规定为65℃, 海水温度为30℃。	1. 如产量下降, 可根据所附技术资料检查缸套冷却水及海水的流量, 当较额定值为低时 (见技术规格) 则关小旁通调节阀32、33, 海水流量应根据海水温度而变化, 海水温度低时, 流量减少, 反之流量增加。 2. 如产量逐步下降, 一般是由于加热器的换热板上有积垢, 应加以清除。
B. 给水 供给水量必须至少等于6倍的淡水产量。	1. 如给水太少, 积垢的可能性增加。 2. 如流量计不准, 可使给水量等于排盐泵12的最大排量。
C. 沸点及真空度。	1. 系统中漏水

续上表

工作条件 (缸套冷却水加热)	不正常现象及其排除方法
	<p>当装置与外界联系的阀全部关闭, 及抽气器停止工作时, 真空的损失应不超过全部真空的10%。</p> <p>对淡化装置的压力试验最大为1个大气压 (<math>9.80665 \times 10^4</math> 帕)。</p> <p>2. 拍气器失灵</p> <p>射水抽气器的正常工作水压为5~6公斤力/厘米<sup>2</sup>, 如水压过低, 应清洗滤网, 必要时进行拆修。</p> <p>3. 校验喷管压力, 其最大值为7米水柱。</p>
D. 排盐泵及凝水泵	<p>这些泵应在背压等于7~10米水柱的情况下工作。</p>
E. 电动机	<p>当泵失灵时, 应检查电动机转向及转速。</p>
<p>F. 盐度</p> <p>一般应在0~30P.P.M.之间。</p>	<p>如盐度过大, 这可能是因为:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 排盐泵停止工作或排量不足, 这可从闪发室水位上升看出来, 应设法使泵正常运行。</li> <li>2. 汽水分离除雾网位置不当, 并与分离挡板接合处安装不紧密。</li> <li>3. 沸点太低 (低于40°C), 则应减少通到冷却器的海水量。</li> <li>4. 换热板或垫料等损坏时, 可能导致海水混入制好的淡水中, 所以损坏的板必须更换, 如没有备件时, 相邻的一块板必须拆除。</li> <li>5. 盐度计由于传感器内电极上有杂物而造成短路。</li> </ol>
<p>G. 当用蒸汽加热时, 如蒸汽压力为2~4大气压, 则正常的工作温度为65~70°C。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 如凝结水循环进口处温度高于70°C或低于65°C, 可调整加热蒸汽调节阀, 以改变压力来控制温度。</li> <li>2. 凝结水到热水井线路上的背压不应超过5米水柱, 不然可用其背压阀加以调整。</li> </ol>
<p>H. 蒸汽喷射抽气器</p> <p>其蒸汽压力见技术规格。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 工作蒸汽必须是规定压力的干饱和蒸汽。</li> <li>2. 从蒸汽抽气器出来的凝结水背压不得超过4米水柱。</li> </ol>



## 第五章 提高海水淡化装置的工作性能和经济性

提高淡化装置的工作性能和经济性，不仅取决装置本身的结构，而且与管理人员的正确操作，日常维修也有密切关系。我们可归纳为下列三方面问题来讨论：

1. 保证装置所产淡水的品质，有些淡化装置往往不能制造出原来设计要求那样纯净的淡水，即含盐量过多，不能满足一般使用要求；

2. 在淡化装置内部，怎样避免生成难以消除的坚硬水垢是运行中需要很好解决的问题，不然将使淡水产量大幅度下降，影响装置的正常运行，除垢清洗工作频繁，维修工作量增加。

3. 如何提高淡化装置的热经济性，设法用较少的热量制造出更多的淡水也是一个重要的问题。但是一般柴油机动装置船舶，都利用柴油机冷却水的废热作淡化装置的热源，因此就不存在这个问题，不过在其他类型船舶或客船上还是要解决热经济性问题。

近年来，人们通过实践，对装置进行了许多改进，例如在利用废热，强化传热，给水预处理，防止和清除结垢，简化装置结构和系统，采取组合式装置，减少装置重量和尺寸以及装置系统的自动控制等方面都取得了显著成绩，淡水品质有了一定的保证，淡水成本进一步降低，新型的淡化技术也相继出现并日趋完善。

## §1 保证所造淡水质量的方法

用蒸馏法制取淡水,因二次蒸汽不溶解盐分,其成品水的质量按理是应当纯净的,但是实际上淡水中却含有盐分,以致必须专门装设盐度计来检测淡水中的含盐量,以免含盐过多的淡水混入淡水柜。对含盐过多的淡水,应重新淡化或弃入舱底,以保证所产淡水的含盐量在规定的范围之内。

### 一、淡水质量下降的原因

为什么在蒸馏的成品水中还含有盐分呢?这主要有两方面原因:

#### 1. 漏泄

如果装置中凝汽器等换热设备的装配、连接有问题,海水就可能经其中不严密处从外部漏入淡水,使淡水中含盐量急剧上升。

#### 2. 蒸汽污染

由于蒸发过程中的一些物理原因,盐水微粒掺入二次汽中,使蒸汽污染,造成淡水的含盐量升高。这主要与装置内部结构的设计制造和运行管理有关。

为了杜绝海水漏入冷凝器的淡水空间,就要经常对换热器进行防漏和检漏工作,一旦发现漏损必须立即堵塞。

要深入了解蒸汽污染问题,可进一步分析蒸发过程。海水在蒸发器中沸腾蒸发时,热量从加热面传到贴近的海水,形成高温膜,接着热又传给水空间的海水,靠对流作用,海水温度趋于均匀一致。随着传热量增加,高温膜呈过热状态,海水也略为过热。随后在加热面的一些微孔或细坑上,过热水在其间闪发产生蒸汽,而出现呈核状的蒸汽小泡。随着

热量增加，汽泡数增多，而高温膜更薄，此时汽泡虽然仍依附在加热表面上，但在水循环作用下作摆动，接着脱离加热表面扶摇直上。在上升时，一些汽泡在海水中聚合增大，并随着流体静压力减少，汽泡也略膨胀，当升到海水蒸汽界面时，汽泡破裂释出蒸汽，破裂时产生的许多微小水滴则被抛至蒸汽空间，并随同汽流一起上升，这种汽流夹带小水滴的现象是极平常的，其中较大的水滴因水比水蒸汽重，而升到一定高度后即下落返回水空间，细微的海水滴则随蒸汽一起进入冷凝器，使造出的淡水含有一定盐分，在沸腾过程中如汽水共腾，显然也能使蒸汽污染。

## 二、保证淡水质量的措施

要减少蒸汽中夹带的海水，提高造水质量，可从下述方面着手，装设完善的汽水分离器，增加蒸汽空间高度（盐水水位不能过高），限制蒸发器内汽流上升速度（蒸发面的蒸发强度高，汽流速度就大），使二次蒸汽的比重小一些，以扩大同盐水的比重差，这些都能削弱蒸汽夹带能力（当蒸发器工作压力降低，二次蒸汽的比重就变小，比重差就大，象现代船用淡化装置工作压力仅 $0.07$ 公斤力/厘米<sup>2</sup>），还应尽量使蒸发器的负荷不要过大，以降低蒸汽空间的水滴充斥程度。当然，蒸发器内的盐水含盐量也不能过高，不然夹带盐分就增加了。

对于已在使用中的淡化装置，要减少蒸汽污染，应控制沸腾程度，使之不要太剧烈，因为当蒸发器负荷过大时，汽泡量增多，蒸汽上升速度也大，于是进入蒸汽空间的细微小滴数量增加，一些颗粒较大的水滴也容易被高速蒸汽流带入冷凝器，所以夹带水滴率是随蒸发器负荷提高而增加的。实

践中发现，有的装置当由利用柴油机冷却水废热转而采用新蒸汽作为蒸发器的热源时，就能因沸腾剧烈而二次蒸汽被污染，淡水含盐量迅速上升，这是装置结构和系统本身造成的缺陷。但是，在实际运行中，如发现淡水含盐量过大，可根据情况适当调小加热工质的供热量，减弱蒸发器热负荷，淡水含盐量就会相应下降。

对闪发式淡化装置，如闪发室热负荷过大也能导致二次蒸汽污染，这时就要控制进入闪发室海水的过热度，使之在 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 范围内，如过热度升高至 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ 则不仅喷入的水流表面闪发汽化，而且水流中心也会闪发汽化并产生气泡，从而使细小水滴量随之增加。如果喷入闪发室的过热水微粒直径小，喷水量相同时，闪发汽化表面增加，产生水滴量就减少。

汽水共腾现象也能使蒸汽污染，汽水共腾是指二次蒸汽被突然大量吸出，导致汽压迅速下降，或蒸发器中盐水的对流波相互碰撞，而引起盐水更剧烈的间歇性波动，使大滴盐水被蒸汽带走而污染。使淡化装置在比较稳定情况下运行，或在二次蒸汽出口接管中装设恒压阀都可以避免汽压骤然下降而汽水共腾的。

如在蒸发器盐水表面，甚至在蒸汽空间充满泡沫，蒸汽也将带走大量盐水，造成污染。产生泡沫的原因可能是由于盐水的含盐量高，或有悬浮固体（胶体或不溶体）以及油类和某些去垢剂。上述物质，特别是有机胶体，能通过表面张力对水膜产生稳定作用，使气泡从加热面上升时起，盐水膜就包围着气泡，并保持力学上的稳定性，从而形成泡沫。对盐水中的溶质和悬浮固体可采取泄放的办法加以限制，也可用促使表面活化但不溶于盐水的化学防沫剂。这种防沫剂能

积聚在汽泡沫上，引起很高的局部表面张力差，使泡沫的膜迅速破坏而消灭之。

实验可知，蒸发器中蒸汽空间的实际高度，对水滴被夹带的影响很大，一般汽泡破裂时产生的较大水滴，抛向空间的高度约400~500毫米，所以蒸发器的蒸汽空间高度通常都设计在800~1000毫米左右（留有适当余地）。淡化装置在实际运行中，由于水面上有一层较厚的泡沫层，或者蒸发器内压力突然因某种原因下降，海水迅速汽化，水中汽泡量增多，而使汽水容积“发涨”，造成假水位现象，使实际的蒸汽空间高度减少。为了避免产生上述现象而污染蒸汽，就必须在运行中注意蒸发器的给水供应情况，不让海水水位过高，蒸发器内盐水的含盐量也不能太大，蒸发器的工作负荷应力求稳定而不过高。

为此，可采取一系列相应措施，例如适当减少加热温差，控制加热蒸汽和沸腾盐水的传热温差，使之不超过20~25℃，调节加热工质的供入量，以避免过大的蒸发强度。对一般表面式蒸发器，其最有利的蒸发强度约为蒸发面镜面负荷2000~3000米<sup>3</sup>/米<sup>2</sup>·时，其次，为防止盐水浓度过高，需要注意调节浓盐水排污量，使盐水浓度不超过规定数值，同时必需保持蒸发器有足够的循环水源，以减少汽泡体积，降低汽泡上升速度等，此外，为了防止水滴被汽流拖入冷凝器，应设法使二次蒸汽在蒸发器中的流速不要太大，一般应保持在0.5~1.0米/秒左右，其中较大的数值适用于二次蒸汽汽压较低の場合。二次蒸汽中的水滴，还可用加装合适的汽水分离装置加以清除，一般均采用防溅挡板，溢流堰和波纹板分离器，在闪发式造水装置中则用网状分离器等。

综合上述，在运行管理中，如能保持适当的蒸发强度，

控制好盐水浓度，并保证分离器和热交换器工作的可靠，那末，装置所造淡水的质量一般是可以保证的。

## §2 海水蒸发器中的结垢及其防止

除了保证所造淡水质量外，技术管理中，防止淡化装置加热元件内部结垢和除垢也是一个大问题。由于水垢的导热性极差，例如黄铜的导热系数约  $70 \sim 100$  千卡/米<sup>2</sup>·时·℃（ $293076 \sim 418680$  焦耳/米<sup>2</sup>·时·℃），而水垢的导热系数仅为  $1 \sim 2$  千卡/米<sup>2</sup>·时·℃（ $4186.8 \sim 8373.6$  焦耳/米<sup>2</sup>·时·℃），所以当换热面结垢后，传热系数  $K$  值就显著下降，引起换热量  $Q = K \cdot F \cdot \Delta t$ （ $F$ ——面积； $\Delta t$ ——时间）大大减小，因此，结垢使淡化装置能力降低，淡水产量达不到预定要求，严重的时候甚至能堵塞流道，使装置不能运行。用钻通管子的方法来清除结垢时，脱落下来的大块垢片有可能损坏排盐泵叶轮，所以操作时应特别注意。

下面，我们进一步介绍淡化装置中结垢的情况和有关规律，以便事先采取预防措施，尽量减少水垢的产生。

### 一、垢的生成及其影响因素

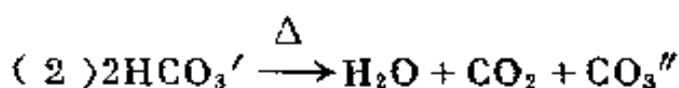
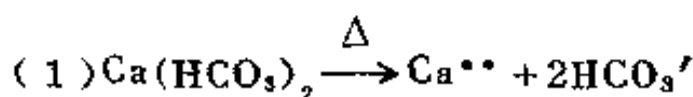
总的来说，蒸发器等加热元件上结垢，是由于海水中的某些盐分因溶解度比较低，而沉积粘附在加热元件表面上而形成的。我们知道海水中所含盐分的溶解度很不相同，而且随温度不同而变化。一般海水中盐类的主要成份如下：

盐类	溶解度（毫克/升）
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	180
$\text{CaSO}_4$	1220
$\text{MgSO}_4$	1960

MgCl <sub>2</sub>	3300
NaCl	25620
<hr/> 总计32280	

食盐 (NaCl) 在海水中含量最多, 约占 79%, 但其溶解度较高, 因此, 食盐不大可能结垢。硫酸镁 MgSO<sub>4</sub> 和氯化镁 MgCl<sub>2</sub> 在水中的溶解度也相当高, 所以结垢的可能性也不大。硫酸钙 CaSO<sub>4</sub> 在海水中的溶解度则比较低, 很容易结垢, 而且温度越高其溶解度越低, 它并能将其它盐类形成的松散沉渣一起粘结到加热面上, 形成坚硬水垢, 这是一个讨厌的特性、这种水垢的导热系数又很低, 约 0.2 千卡/米<sup>2</sup>·小时·℃ (837 焦耳/米<sup>2</sup>·小时·℃), 仅为其它水垢的 10% 左右, 一旦产生这种 CaSO<sub>4</sub> 垢, 对运行就非常不利。

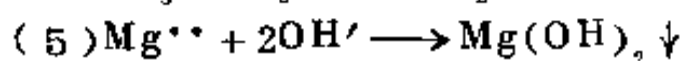
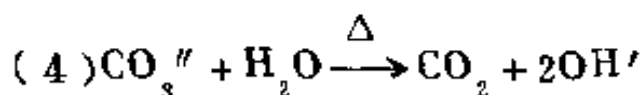
碳酸氢钙 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 在水温升高时, 很容易分解, 分离出 CO<sub>2</sub> 和相应的碳酸盐而形成水垢。当海水被加热时, 导致结垢的化学反应如下:



如海水加热温度低于 75~77℃ 时, 化学反应主要按下式进行, 它形成 CaCO<sub>3</sub> 垢, 并生成许多泥渣:



如海水加热到 80℃ 以上时, 则 CO<sub>3</sub>'' 开始分解, 所产生的 OH' 与 Mg<sup>++</sup> 结合成为 Mg(OH)<sub>2</sub> 而形成水垢, 其化学反应如下:



温度低于 $82\sim 83^{\circ}\text{C}$ 时， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 呈泥渣沉淀，如温度继续提高，则很快形成水垢沉附在加热表面上。

至于坚硬而又不易传热的 $\text{CaSO}_4$ 垢，则实践证明，当蒸发器的排污量大，盐水浓度较低时，盐水流通速度快，每一份盐水在蒸发器内没有足够的时间形成 $\text{CaSO}_4$ 结晶并沉淀下来，所以盐水浓度为海水的一倍半时，才有少量析出，只有当海水盐度过大（三倍于海水盐度），加热温差又过高，这时因过分剧烈的沸腾而产生高密度汽袋才会形成 $\text{CaSO}_4$ 垢，而且数量也较 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为少。

由于蒸馏淡化装置是在真空下工作，蒸发温度又低于 $70^{\circ}\text{C}$ ，传热温差也较低，所以它形成的水垢中大部分是 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，并都以泥渣形式随浓盐水排污泄出，但水垢的主要成份仍为 $\text{CaCO}_3$ 和极少量 $\text{CaSO}_4$ 。

图20示出在不同加热温差下，蒸发温度对于各种成垢量之间的相对关系。

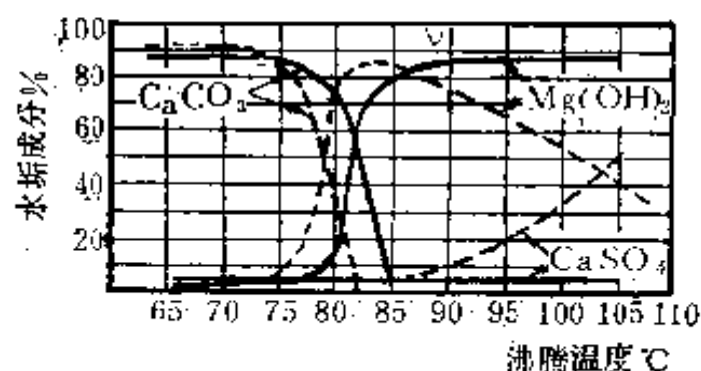


图20 水垢组成与蒸发温度及传热温差的关系  
—— $\Delta t \approx 12^{\circ}\text{C}$ ；---- $\Delta t \approx 44^{\circ}\text{C}$

由以上所述可知，蒸发器中的结垢，主要与下列因素有密切关系：盐水浓度，蒸发温度，传热温差和盐水在蒸发器内停留的时间等，而在实际运行中的经验表明盐水浓度则是比较关键的因素。



## 二、预防结垢的办法，防垢剂和除垢

淡化装置在运行过程中，海水里的钙、镁、碳酸根、硫酸根等离子，在一定条件下将形成软垢（ $\text{CaCO}_3$ ， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ）和硬垢（ $\text{CaSO}_4$ ），此外，海水中的有机物，悬浮物，硅等也会慢慢析出，并都粘附在传热管上，使传热性能大为恶化。因此，能否控制污垢析出，关系到淡化装置能否长期可靠运行。所以，研究预防结垢和除垢的方法，寻找更好的防垢剂，一直是制造和使用者的关注的问题。目前在下列诸方面积极采取措施：

### 1. 控制温度

当蒸发器的蒸汽压力和温度较高时，虽然蒸馏率也较高，但结垢率却随蒸发温度和加热温差的增大而显著增高，这是因为温度越高， $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 在水中溶解度越低，越容易沉淀析出，传热温差过大，则会使受热面附近局部区域盐水浓度升高，造成迅速结垢，所以一般应控制得小一些。特别是考虑到 $\text{CaSO}_4$ 垢的传热系数极低又十分坚硬难除，以及 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 垢（尤其是它的干垢）很难清除，因此，当用蒸汽作加热工质时就应尽量设法将蒸发温度控制在 $75\sim 77^\circ\text{C}$ 以下，以减少这些垢的产生。那些蒸发温度在 $40\sim 45^\circ\text{C}$ 左右的高真空蒸馏淡化装置，常连续运行几个月而不必除垢清洗。

### 2. 控制盐水浓度

盐水浓度是一个需要特别注意的问题，因为它对结垢量和水垢成分影响很大，而在运行中盐水浓度又是一个容易变化的参数，管理时应经常检查并加以控制。现代船用淡化装置，一般都采用高真空装置，由于真空达到93%左右，

相应的蒸发温度仅为 $38.5\sim 41^{\circ}\text{C}$ ，传热温差为 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ ，盐水浓度也常低于 $7\%$ （海水含盐量约为 $3.5\%$ ），所以 $\text{CaSO}_4$ 垢不可能产生。为了控制盐水浓度在合适的范围之内，国产的船用淡化装置，通常抽出的盐水量应为蒸发量的 $2\sim 3$ 倍，同时供入淡化装置的海水量应为蒸发量的 $3\sim 4$ 倍（给水量可从给水流量计直接读出）。在这样的稳定工况下，盐水浓度是不会过高的。

在某些蒸汽动力装置的船舶和老式淡化装置中，使用蒸汽作为加热工质，加热温差常大于 $35\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，因此盐水浓度必须进一步降低，才能保证不产生 $\text{CaSO}_4$ 水垢。

蒸发器的排盐（又称排污）情况，可由排污率 $\varepsilon$ 加以评定，排污率 $\varepsilon$ 是排污水量 $W_B$ 与淡水产量 $W$ 之比，即：

$$\frac{W_B}{W} = \varepsilon$$

在蒸发器的盐量平衡中（图21），如略去二次汽带走的微量盐水，则有下列关系：

$$S_0(W + W_B) = S W_B$$

因此，蒸发器中的盐水浓度可换算成：

$$S = \frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon} S_0$$

多大的排污率最有利呢？实际上这也是一个辩证的问题，排污率越高，盐水浓度越接近海水含盐量，结垢就越

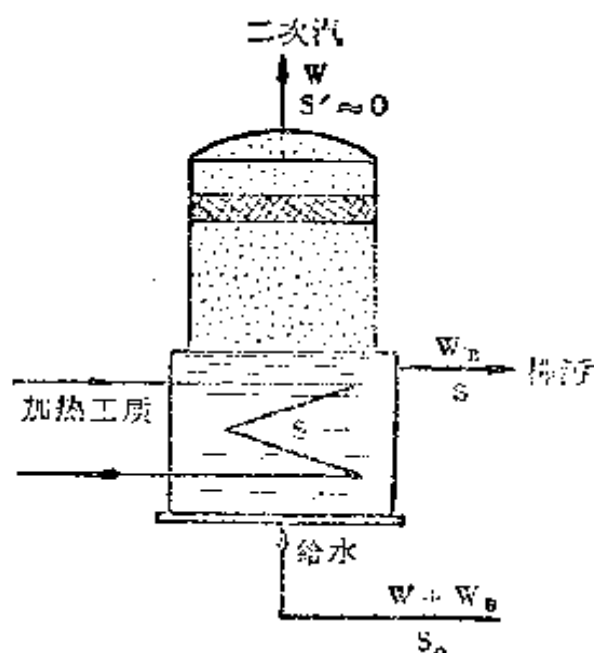


图21 蒸发器盐量平衡图  
 $S$ 、 $S_0$ 、 $S'$ ——盐水、海水和蒸汽的含盐量，毫克/升；  
 $W_B$ 、 $W$ ——排污与二次蒸汽数量，升/时

少，但是这将使辅助水泵的耗功量增加，同时对于使用新蒸汽作为热源的淡化装置，则大量热能被污水带走，因而使装置耗热量增加。所以，对这种装置，其排污率  $\varepsilon = 1 \sim 2$ ，即盐水浓度为海水含盐量的  $1.5 \sim 2$  倍（硫酸钙垢主要取决于盐水浓度，如盐水浓度保持或低于海水含盐量的  $1.5$  倍，可以基本上避免硫酸钙垢的生成）。内燃机动力装置船上的淡化装置用气缸冷却水的废热作热源，所以排污率  $\varepsilon$  可高达  $4 \sim 5$ ，甚至有达到  $10 \sim 12$  的。经研究表明，一味增大  $\varepsilon$  实际上对防垢也没有多大好处，因为这样纵然能避免产生  $\text{CaSO}_4$  垢和减少单位重量给水在蒸发器中的结垢率，但是  $\varepsilon$  过大后，总给水量也随之剧增，沉附于蒸发器内的实际水垢总量反而增加。所以一般并不盲目增大排污率，通常认为最合适的排污率  $\varepsilon$  为  $1 \sim 2$ ，视实际情况再适当增大。

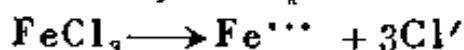
### 3. 化学处理

降低沸腾温度和加热元件温度以及降低盐水浓度对减少结垢是很重要的，但也不能完全避免结垢，而且有的装置调节比较困难，所以给水的化学处理仍然是一般蒸馏淡化装置所常用的防垢办法。在给水进入蒸发器前，将某些防垢剂投入其中，它就能抑制水垢的产生。

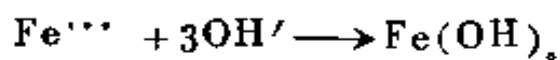
用来处理给水的药剂很多，它们的作用往往有自己的局限性，例如聚合三磷酸钠（粉末状混合物）只能在  $80^\circ\text{C}$  以下防止  $\text{CaCO}_3$  垢的形成，如温度较高，其本身不稳定而且会使混合物分裂成胶质软泥，这种软泥的传热性能极差又很难清除。这就使聚合三磷酸钠的使用价值大为降低。

淡化装置的防垢剂主要属于酸类和酸性盐。强酸因腐蚀性过强，操作不大方便，所以仅在陆用淡化装置中使用。船用淡化装置，因现场操作条件较差，为考虑劳动保护安全起见，

在对给水全部或部分地处理时，一般不用强酸（但在一些高温蒸馏装置如压汽式淡化装置，因结垢较严重，也有使用硫酸等的）。应用较广的防垢剂有三氯化铁（ $\text{FeCl}_3$ ）（一些低温蒸馏装置用“Hagevap”可以很好地抑制  $\text{CaCO}_3$  垢和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  垢的产生），因为  $\text{FeCl}_3$  投入海水后分解如下式：



使铁离子  $\text{Fe}^{+++}$  与给水中  $\text{OH}'$  离子结合而产生  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  如下式：



这种反应很激烈，如加入足够数量的  $\text{FeCl}_3$ ，则给水中分解出来的  $\text{OH}'$  就被  $\text{Fe}^{+++}$  所吸收，同时也促使  $\text{CO}_3''$  被  $\text{H}_2\text{O}$  吸收而转为  $\text{OH}'$ ，最终又与  $\text{Fe}^{+++}$  结合（见前述海水加热而结垢的化学反应式（4）），因为给水中的  $\text{OH}'$  和  $\text{CO}_3''$  大部分在与  $\text{Fe}^{+++}$  结合中被吸收了，所以  $\text{CaCO}_3$  垢无法形成，同时也阻止了  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  垢的产生，至于所造成的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，可溶性极低，能形成泥渣状沉淀物，随排污不断排出，因而不会结垢。

$\text{FeCl}_3$  是干燥粉剂，虽然是稳定、无毒的，但其水溶液却具有强腐蚀性，即使将其暴露在大气中也能吸收潮汽而呈酸性，因此必须将其藏于密封容器。在操作  $\text{FeCl}_3$  的水溶液时，人员应戴上防护用具，注意防止酸的侵蚀，并使其浓度保持在10%以下（这时如皮肤触及，立即抹去可不致造成伤害），对于操作器具和加药接管等也要用塑料或具有防腐覆层的器材制作。

为了尽可能地防止水垢产生，对真空式蒸发淡化装置， $\text{FeCl}_3$  的使用量一般为0.09公斤/吨海水，当蒸发器的工作压力大于1公斤力/厘米<sup>2</sup>（绝对）时，用量要增加一倍、具体

数量则可根据实际情况作些增减，但不能用药过多，以避免对金属产生腐蚀作用。

近年来，这些给水处理的化学药剂，已逐渐用柠檬酸代替，它在船上应用有很多胜过三氯化铁的优点，如腐蚀性微弱，即使溢漏也无害处，操作安全。化学处理的方法，虽然能获得较稳定的防垢效果，但也不能彻底解决问题，而且带来操作上的麻烦和经常性的耗费，因此，近年来也在研究一些无剂处理的特殊方法，如采用磁性水改器，即让水流以一定的流速通过磁场，由于磁场效应在水流内产生感应电动势，能使钙盐、镁盐等离子，以极细的晶体结构，从水中析出呈泥渣状沉淀物，而获得一定的防垢效果，并可使老垢脱落，但使用中的处理效果不如化学防垢法显著，而且不稳定，影响因素也太多，例如水流速度、水温、水中积存空气和磁性水改器装得不垂直等都能显著影响其效果，所以使用磁性水改器时，应切实按照水改器的使用技术要求运行。磁性水改器不仅适用于淡化装置，对锅炉及柴油机冷却系统等多种热交换器也都有一定的防垢效果。

在淡化装置技术管理中除垢工作是不可避免的，因为即使采用了种种方法还是不能彻底解决蒸发器的结垢问题，只是抑制和减弱了结垢过程，延长了蒸发器的清洗周期而已，除垢的方法一般有下列数种：

1)冷淋或冷冲除垢，即将蒸发器内盐水放干，通入蒸汽加热，随后突然用冷水淋洗换热面，使其上污垢碎裂剥落。基于同样原理，也可不用冷水淋洗而是将蒸发器内盐水放干，通入蒸汽加热后，突然通入冷水浸没换热面使污垢脱落，这又叫做冷冲除垢。以上二种利用热胀冷缩除垢的办法有一个缺点，就是容易引起设备的机械损坏，操作时必须加

以注意。

2) 药剂除垢, 即将药剂注入蒸发器的容水腔内, 借药剂与换热面上水垢发生化学反应而除去污垢, 一般采用定期酸洗。经研究试验表明, 对  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  和  $\text{CaCO}_3$  垢, 用柠檬酸或氨基磺酸进行清洗较为有效。在添加酸前先用可饮水注入装置中要清洗的部位, 使其循环并加热到  $60^\circ\text{C}$ , 清洗时一次加酸量要足以使整个水液呈酸性, pH 值维持在  $4\sim 5$ 。酸可分数次加入(例如 5 次), 每次添加时间约为 30 秒, 间隔  $2\sim 3$  分钟以使其充分反应, 同时加入适量腐蚀抑制剂。要溶解全部  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  约需 3 小时, 然后用海水冲洗造水装置, 即可重新投入运行。在酸洗时, 如循环水中有明显的垢渣, 则应先放泄或用原水冲洗系统, 然后再注酸, 这样可减少用酸量, 减少材料的腐蚀及垢渣堵塞的可能。不可为了溶去难清除的水垢而盲目地过量用酸(最多为正常用酸量的两倍), 否则将造成设备的严重损坏。

对于难除的硫酸钙, 经试验表明, 用乙醇酸钠溶液经  $4\sim 5$  小时清洗可以除去, 该溶液可用 70% 的商品级乙醇酸和氢氧化钠溶液中和制成, 并应根据情况适量加入腐蚀抑制剂。用乙醇酸钠清洗溶液在温度为  $77\sim 82^\circ\text{C}$  时循环 24 小时, 能有效地清除  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  垢, 但是在管子上留有软粉末状  $\text{CaCO}_3$ , 清洗时如不用苏打粉 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 中和约 20% 的酸或者不使溶液的 pH 值达到  $8.5\sim 9$  呈碱性, 而是维持在 7.0 呈中性, 则这种二次垢是可以避免的。

3) 机械除垢, 即利用机械工具如刮刀, 木锤, 钢丝刷振荡器等除去换热面上的污垢, 用一种塑料小球, 定期通过管束其清洗效果也较好。机械除垢简单有效, 不过操作劳动强度较大, 比较费力。

### §3 提高淡化装置的经济性、保持冷凝器稳定的真空度

近年来随着船舶技术状况的改进和船员、旅客生活服务水平提高，淡化装置的淡水产量不断增长，所要消耗的能量也越来越大，因此，如何努力提高淡化装置的经济性，以利用较少的能量造出更多的淡水，同时又不增加装置本身的复杂性，这是在制造和使用淡化装置时必须加以注意的问题。就目前来说，利用船舶动力装置废热作为热源的真空气蒸馏淡化装置经济性最好，用得也最广泛。

要提高淡化装置的经济性，主要依靠下列诸方面的改进：

1. 加强传热，改进蒸发与冷凝液体薄层中的传热；
2. 用降低海水蒸发温度至 $55\sim 70^{\circ}\text{C}$ 及增加蒸发器泄放百分率的办法，或采用闪发蒸发的方式以达到无垢工况；
3. 充分利用二次汽冷凝潜热和排盐水的热量；
4. 利用船舶动力装置的废热作为低温蒸馏的热源。

人们经过长期努力，创造了种种具体办法，如将流过冷凝器的循环冷却水，部分地引入蒸发器作为补给水，利用动力装置加热蒸汽的凝水或排污水来对给水进行预热，利用原子能动力装置的废热作为淡化装置的热源，尤其是用柴油机冷却水作为海水淡化装置低温热源的办法几乎已为近代柴油机船所普遍采用，其他还有如薄膜式、压汽式蒸馏装置等。显然这些都将有利于热经济性的提高，如采用二级或更多级装置或多效应（即将一效应产生的二次汽作为下一效应的加热蒸汽）蒸馏装置，就更进一步改善了装置本身的热利用率。船用多级淡化装置因地方等限制一般不超过二级或三

级，陆用淡化装置都选用多级装置，其级数有三、五十级之多，这都是为了提高装置效率的缘故。

### 一、利用废热的真空式蒸馏装置方案

前面介绍的一些提高装置经济性办法中，利用船舶动力装置的废热，是最简便而又行之有效的，我们知道船舶动力装置中有大量的废热存在，为了利用废热，在蒸汽动力船上，常用主机抽汽或辅机的乏汽来作为蒸发器的热源，并在有些情况下（例如用中压锅炉，连续排污）可用锅炉的排污来作为淡化装置的给水；在柴油机船上，则用柴油机的缸套冷却水（常有65~55℃温度）或废气锅炉产生的蒸汽作为淡化装置的热源。由于利用废热作为热源，所以除了要耗用淡化装置的初建费和占用船舶的一定空间外，仅需消耗少量水泵所用的电能，就能获得充分而价廉的淡水，如水泵选配得合适，则有可能将产生每吨淡水的电耗量降低到5度（千瓦·小时），从而大大地提高了淡化装置的经济性。

上述柴油机船上利用废热淡化海水的方案，虽然使经济性大为提高，并在早期建造的柴油机船上广泛采用，但因流过淡水冷却器的海水，数量上大大超过淡化装置的需要，而其多余的低温冷却水仍大量排至舷外，所以还没有充分利用废热，这样就出现了另一种方案，即把冷却过柴油机缸套的热淡水，直接引入蒸发器作为淡化装置的热源，则废热利用就更完善一些。

### 二、保持冷凝器必要而稳定的真空度

要利用柴油机冷却水的废热，必须解决低温蒸馏的问题，因为柴油机冷却水的温度一般不能超过65~75℃。要使



海水在这一温度条件下蒸发汽化，就势必要使海水蒸发时的饱和压力降低至大气压力以下才能实现。

那末，怎样才能使淡化装置壳体内保持一定的真空度呢？大家知道，蒸发器出来的二次蒸汽不断被冷凝器冷却和凝结，变成冷凝水并被抽出，所以，只要冷凝器的冷却水量足够多，冷凝器中的压力就会大大下降而造成一定的真空度。在稳定的工作条件下，蒸汽在冷凝器中的工作过程达到一种动态平衡，所以是按等压过程来进行的，压力的大小取决于蒸汽的凝结温度，凝结温度则与流过冷凝器的冷却水温度和流量有关，如果冷却水温度越低而流量是足够大的话，蒸汽的凝结温度就越低，而它所对应的饱和蒸汽压力也就越低。照这样说，似乎只要我们向冷凝器连续供应充足的低温冷却水，并不断抽出凝水就可以建立稳定的真空了，但事实并不是这样，还存在着一些影响建立真空度的重要因素。

例如，冷凝器中存有不凝性气体（主要是空气），就是妨碍建立真空的最主要因素，因为海水中溶有的空气在海水蒸发过程中释放出来，同时也有外界大气经不严密处渗漏进壳体内部，而空气在常温下是不能凝结的，所以尽管与低的蒸汽凝结温度相对应的饱和压力可以很低，但不凝性气体越聚越多，致使冷凝器中它的分压力会逐渐增加，最后使蒸发冷凝器中的压力大量超过所需要维持的压力值，即不能建立必要的真空度。为此，真空式蒸馏装置还必须设有抽气设备，以便将冷凝器中所积聚的空气不断抽除，从而保证低温凝结所产生的真空度不致被破坏。

蒸馏装置中不凝性气体的含量对冷凝器的传热性能也有很大影响，在运行技术管理中同样应密切注意，不然将大为影响淡化装置的产量。当不凝性气的体积含量从 0 增加到

0.7%时，其所需传热面积几乎增加一倍。不凝性气体的抽除量，应根据运行中冷凝器传热性能的好坏而加以调节。为了去除不凝性气体，常在冷凝器管束的末端处抽出逸气。试验表明，在不凝性气体含量较低的情况下连续抽出逸气对保持管束的传热系数非常重要，不然会大大削弱传热效果。

在低于大气压力情况下，要保持传热系数不降低，则最小逸气率应为总蒸汽量的0.4%。最小逸气量必须大大超过实际不凝性气体产生量，因为为了有效地清除流经管束的不凝性气体，就需要使蒸汽流速达到一定的数值。在低于上述最小蒸汽流速时，不凝性气体的影响就会扩大，并会造成整个管束上集结气体，最小蒸汽流速一般约为0.9~1.5米/秒（蒸汽流速设计值一般为12~15米/秒）。所以在实际运行中，保证抽气设备工作正常，使有一定的逸气量是不能忽视的。

图22中又示出一带有空气抽除器的冷凝器简图，图中可知，冷凝器的冷却管束被挡板划分为主冷却管束和空气冷却器两部分。当蒸汽流经主冷却管束时，大部分被冷凝成水，并落到下部的集水箱，而汽流中夹带的空气和尚余的很小部分蒸汽，则绕过挡板，进入空气冷却器管束，进一步受到冷却，这一小部分蒸汽随之也冷凝成水，因而能减少蒸汽随空气被抽出的可能，另外，空气被进一步冷却后，容积缩小，降低了抽除空气的功率消耗。

应该说明，真空式蒸馏不仅为利用温度较低的废热开拓了道路，同时还将因蒸发温度的降低，使海水加热到沸点的热量减少、节省了热能，所以降低蒸发压力本身就是提高淡化装置经济性的一个重要措施。另外，如前所述，低温蒸发对防垢也有益处。

当然，加装抽气设备降低蒸发能力会使装置复杂，管理工作量增加，并在抽气时要多消耗一定能量，但从总体来看得大于失，并且只要注意管理，抽气问题也不成问题，所以这种真空式蒸馏装置就被广泛使用了。

前已介绍，作为真空式蒸馏装置，还有一种闪发式装置，它也是利用废热使海水在低温低压下蒸发汽化，其经济性和其他性能也得到了显著改进。目前，世界上大规模地从海水制取淡水的最经济而实用的办法，是采用多级闪发式蒸馏装置。

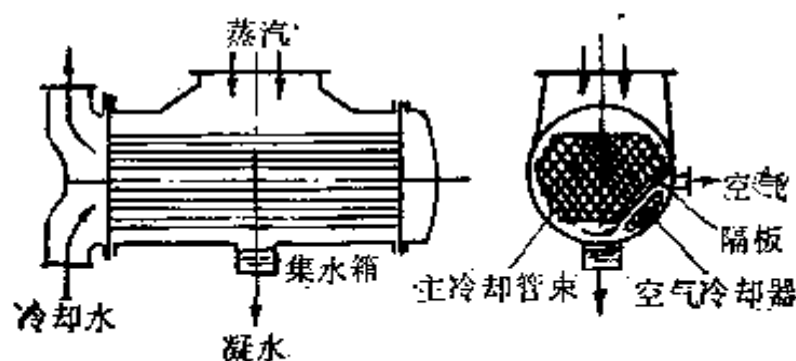


图22 冷凝器构造简图