

高等学校教学用书

船舶辅机学(二)

船舶制冷装置

上海交通大学 尉迟斌编



北京科学教育编辑室

高等学校教学用书

船舶辅机学(二)

船舶制冷装置

上海交通大学 尉迟斌编

北京科学教育编辑室

目 录

前 言

第 一 章 制冷的目的和方法

1 冷防腐的原理及其在船舶上的应用	1
2 制冷法和制冷机的类型	4
1) 冰制冷	4
2) 机械制冷	6
3) 温差电制冷	14

第 二 章 压 缩 式 制 冷 机

1 制冷机的工作原理及工作过程	16
1) 反循环过程	17
2) 反卡诺循环	18
3) 压缩制冷机的工作循环	20
2 制冷剂	34
1) 选用制冷剂的标准	34
2) 几种主要制冷剂的性质	39
3 活塞式制冷压缩机	42
1) 活塞式压缩机的理论功	42
2) 余隙容积的影响, 各种系数	43
3) 实际过程中的能量损失和压缩机的效率	50
4) 复压制冷循环	53
5) 活塞式制冷压缩机的结构	73

6) 活塞式压缩机主要尺寸和功率的决定	99
4 离心式制冷压缩机	104
1) 离心式制冷压缩机的发展过程及其优缺点	104
2) 离心式制冷压缩机所使用的制冷剂	105
3) 离心式制冷压缩机的结构	106

第三章 制冷装置的热交换器

1 热传导及温度差	113
2 各种热交换器	122
1) 蒸发器	122
2) 冷凝器	131
3) 空气冷却器	142
4) 制冰器	146
3 热交换器的计算	149
1) 蒸发器的计算	149
2) 冷凝器的计算	155
3) 空气冷却器的计算	164

第四章 制冷装置的辅助设备

1 节流阀	181
2 贮液器	183
3 油分离器	184
4 液体分离器	186
5 再热器	187
6 空气分离器	187
7 盐水搅拌器	189

第五章 船舶制冷系统及自动化

1 直接蒸发系统	191
2 盐水制冷系统	193
1) 盐水制冷系统	193

2) 盐水的性质	199
3 空气制冷系統	201
1) 有风道式空气制冷系統	201
2) 無风道式空气制冷系統	202
3) 空气制冷系統的优缺点	206
4 制冷裝置的自动化	207
1) 制冷裝置自动化的意义	207
2) 制冷裝置的自动化系統	209
3) 制冷裝置的自动仪器	212

第六章 船舶絕热和制冷能量的計算

1 冷藏艙的絕热結構	223
2 对船舶絕热材料的要求	229
3 各种船用絕热材料	232
4 絕热計算	235
5 船舶制冷裝置的制冷能量計算	242
6 对食物冷藏艙的要求、食物的冷藏溫度及湿度	250

第七章 眞空式制冷机

1 眞空式制冷机的热力循环	252
2 眞空式制冷机的优缺点及其应用	257

第八章 吸收式制冷机

1 双重溶液的 $I-\xi$ (焓—濃度) 图解	265
2 吸收式制冷机热力过程的 $I-\xi$ 图解	266
3 吸收式制冷机的类型	275

第九章 制冷机的管理与維護

1 制冷剂的装充	280
2 制冷机的运轉	284
3 制冷机可能发生的故障及排除法	284

第十章 船舶空气调节

1 空气调节的意义	287
2 船舶空气调节系统	288
3 空气调节器的结构及其算法	292

第一章 制冷的目的和方法

1 冷防腐的原理及其在船舶上的应用

魚、肉、蛋品、奶制品、蔬菜、水果等新鮮食物，放置稍久，就会变质，輕則变味，重則腐敗，而且气温越高，变化也越快，溽暑盛夏，往往一日以內即发生臭味，这是尽人皆知的事实。那末，为什么这一类食物会有这种变化，而且天气炎热时又特別容易变化呢？卫生常識已替我們揭露了此中祕密：原来在这一类食物的内部或表面存在着各种微生物如細菌、酵母、酶等，由於这些微生物的活动以致引起食物发生变化。

不过，单有微生物的存在並不足以促使食物腐敗，还因为这些食物的主要組織成分是二氧化碳、脂肪、蛋白质等有机物质。当各种微生物在这些有机物质之間活动时，引起了有机物质的分解，以致食物内部的組織成分发生激烈的变化，一方面表现为外貌、气味和滋味的改变，同时食物的营养成分遭受破坏，甚至产生毒素，此时若加食用，不仅滋味不佳，而且会引起中毒，严重的甚至於危及生命。

为了使食物能耐久藏，必須採取防腐的措施。知道了食物会腐敗的原因以后，就不难想到，要防止腐敗必須阻止微生物的活动或者根除微生物，最通行的方法是：热处理、冷处理和烤干。近年来还有利用抗生素以达到食物防腐目的的方法出現，但目前还未能普遍使用。

热处理在某些情况下可以說是应用得最广泛的防腐法，其原理是利用高温将存在於食物內外的微生物消灭掉，保持食物中的

2

有机物质不会发生分解，从而获得防腐的功效，但是食物中所含的有益于人体的维生素有一些在高温下也要遭受损失，故热处理使食物的营养价值同时受到影响，而且有些食物如各种水果，根本不能热处理。此外，若要长期贮存，还必须在热处理以后将食物与四周环境隔绝开，例如装入罐头中加以密封，以避免新的微生物侵入，这就使得防腐工作趋于繁难，因此，热处理防腐法不是长期保藏食物的好方法。

干烤防腐法的原理是将食物中所含的水分除去，断绝微生物的生活源泉。因为就微生物来说，必须是可以溶解的物质才能摄取作为养料，食物烤干以后，寄生其内的微生物的生命活动，当然受到了限制，由此即可达到防腐的目的。但是食物被烤干以后，本身也随着发生一些变化，如滋味和养分都要受到一定的影响等，这是美中不足之处。

最合乎理想的防腐法是冷处理。冷处理不但能收到防腐的效果，还能保持食物的本色。因为高温固然消灭了微生物，但如前所述也破坏了食物的养分；而冷处理则仅仅是抑制微生物的活动，避免有机物质分解过程的发生，或者使像水果、蔬菜等类食物的生命活动延缓，以延滞其成熟期，虽然质量难免有微小的变化，但是其中所含的维生素则几乎不遭受破坏，营养价值没有损失。因此，冷处理防腐法现在正被广泛地采用着。

人类很早就知道运用冷处理以贮藏食物的方法了，但是在十九世纪中叶以前还只会运用不能持久、不能控制的自然制冷法来贮藏食物，而且由于地域条件的限制，冷藏的应用也不能普遍，直到人工制冷法被发现以后，才开始了冷藏防腐的新纪元。

冷藏防腐法有两种形式：冷却和冷冻。

所谓冷却，是将食物的温度只降低到使组成食物的细胞质溶液尚不致于结冰的程度，细胞质仍保持着液体状态；而冷冻则不然，温度降低得比较利害，细胞质被冻结成冰。

很显然，冷冻是比较可靠的防腐法，温度的波动比较小，因为食物内部所含的水分既已冻结成冰，那末，当其溶解时就需要

从外界获取較多的热量；如果在同一時間內从外界輸入的热量是一定的，当然冷冻的食物处于低溫状态的时间就比較长些。

但是冷冻法也有缺点，当細胞质由于冷冻而产生大顆粒的冰結晶时，会破坏細胞膜以致食物的組織結構遭受损坏，当食用时細胞质虽然能溶解成液体，但細胞膜却不能复原，於是細胞变成干癟的物体，食物的本质当然也发生了变化。

为了糾正这个缺点，可以采用一种急冻法，此法能使細胞內生成微小而分散的冰結晶，以避免細胞膜被破坏。

冷却法就沒有这种缺点，但是相对而言，食物冷却后的溫度波动就比較大些，因为冷的程度既淺些，也就是說所儲蓄的“冷”量要少些，那末当外界輸入同等的热量时，其溫度的改变当然也快些，因此保持低溫状态的时间不如冷冻法长久。

冷藏食物究竟是採用冷却法好呢还是冷冻法好，得看具体情况如何而定，对于不同的物品应有不同的处理方法，关于这方面的問題将在以后討論。

一艘船舶若是載貨的，而且所載运的是魚、肉、蛋品、奶制品、蔬菜、水果等类鮮貨，航运时间又不是很短的，那末由于貨艙的条件所限，即使是在冬天，有时也很难保証不变质，更不論是在炎夏了，貨物一旦变质，不仅会引起經濟上的巨大損失，而且影响供应工作；如果是外銷的，則会影响国家在国际貿易上的信誉；如果是內銷的，則影响对人民生活物质的供給。因此，貨船的防腐措施显然极其重要。

即使貨船所載运的不是鮮貨，或者根本不是貨船而是客船、舰艇之类的船舶，虽然沒有貨物变质的危險发生，但是船上为数不少的船員和乘客所需要的生活必需品中有很多是易腐的食物，这些食物逐日消耗，不可能随时补充，尤其远洋船舶，更难經常补充給养，何况当船舶在热带地区或者炎热季节航行时，这类食物是連一天也放不住的，为了保証船員和乘客生活必需物資的正常供应，这些船舶上也不能不採取防腐措施。

又如漁船出海捕魚时，由于漁場位置及操作过程的關係，捕

魚工作非短時間內所能結束，往往需要十天半个月以上的時間才能返回基地，所捕获的魚類必須在艙中存放相当长的時間，若不採取防腐措施，其損失是可想而知的。

由此可見食物防腐是船舶上一个相当重要的問題，虽然它和船舶航行的性能無关，但却是航运中的一个重要环节；而船舶上的防腐措施，根据前面的分析，自然是以冷处理的方法較為适宜。

此外，船舶的艙室內，由于結構特殊，往往空气流通不暢，加以居留的人口比較密集，故空气容易污秽，需要採用人工通风的方法加以抽換；同时，当气候較热的季节，还必須对艙室內的溫度、湿度加以調节，使其适合人們的生理要求。又如軍艦中的彈药庫，必須保持在一定的溫度以下，否則会引起彈药的自燃，发生爆炸。凡此种种非应用制冷装置不可。因此，制冷装置虽非船舶动力装置中的一个部門，然而却是船舶中不可缺少的部分。

2 制冷法和制冷机的类型

制冷法，也就是制造低溫的方法，一般有下列几种：

1) 冰制冷 这一种很早就为人們採用的最簡單的制冷方法，是利用冰块在溶解时需要自外界吸取热量的物理特性，达到使某一个空間产生低溫的目的。所应用的冰块，在早期还只是利用江河湖泊或农田中在寒冬季节所結成的天然冰，直到机器制冰的方法发明以后，冰的使用地区和时限才大为扩展，目前人造冰的使用範圍是相当廣闊的。

冰制冷所需要的設備最簡單时只消一个容器，使用时将冰块与所藏的物品混置在一起即可，不过这类物品必需能耐潮湿。考究一些可採用图 1-1 所示的設備，将一个密封的容器（冷藏室）内部用隔壁分

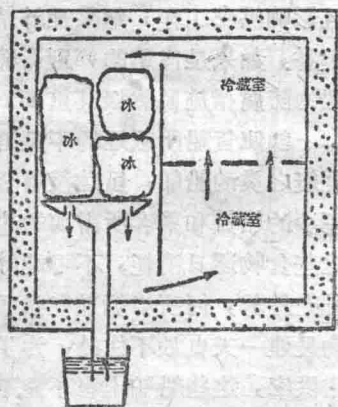


图 1-1

成两部分，其一放置冰块，另一部分则放置所贮藏的物品。隔壁底端和顶端的空隙将左右两部分沟通，室内空气由于温度的差异而产生流动，空气通过冰块被冷却后下沉，而通过藏物吸收热量后的空气则上升，如此循环不已，就会使室内形成低温，产生冷效应。

冰制冷法所造成的低温有一定的限度，一般不能低于 3°C ，这样的低温对于船舶的运输要求来说是不能满足的，因为大多数货物需要在比这低得多的温度下才能久藏。为此，在采用冰制冷方法时常在冰块之间撒进一些食盐，使冰的熔点降低，降低的程度依所加入的食盐量而定，其间的关系可参阅表1。

表 1-1 随食盐含量而定的冰的熔点

食盐含量 (%)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	食盐含量 (%)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)
0	0.0	14	-9.0
2	-1.1	16	-10.5
4	-2.4	18	-12.1
6	-3.5	20	-13.7
8	-4.9	22	-15.2
10	-6.1	24	-16.9
12	-7.5	26	-18.7

上叙的冰制冷法可称为直接法，常应用于小型渔船或某些短航程的船舶上。此法的缺点是会使所藏物品沾染水分，因此对于不能受水浸湿的物品不宜于采用此法。

采用间接法可以避免这种缺点。其法是使冰块与冷藏物不接触，而另用盐水作为制冷媒介。如图 1-2 所示，在一只冰柜 D 内装设一组盘管，其中充以盐水，此盘管与冷藏室 A、B、C 内的冷却盘管相通。盐水在冰柜内被冰块冷却，温度降低后流至冷藏室内吸收热量，然后流向冰柜，再被冰块冷却，如此循环不已，一方面是冰块受热而渐渐溶解，一方面则冷藏室的温度降低，从而获得冷效应。至于盐水的流动可以用盐水泵来完成，也

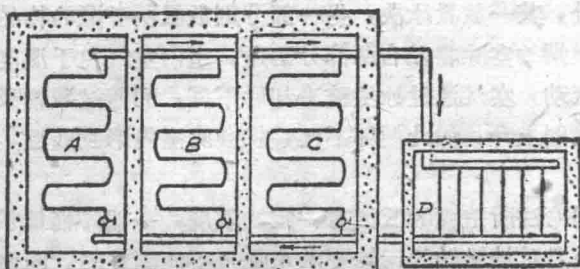


图 1-2

可以利用盐水本身温度的差异而使其自行环流。

间接法虽然可以避免贮藏物与冰块直接接触，但所需的设备比较复杂，占据的空间比较大，这对船舶来说是不利的。

用作制冷的冷源的物质除了水结成的冰块以外，还可以应用一种称为“干冰”的固体二氧化碳。“干冰”的溶解温度极低、在大气压力下温度低达 -78.9°C 时即由固态升华为气态，因此它能制造极低的温度；同时它的单位容积制冷量很大，约为冰块的 3.4 倍，因此当制冷量一定时，需用的干冰体积却小得多。又由于“干冰”在三相点（压力为 5.28 大气压，温度为 -56.6°C ）以下吸热后即由固态升华为气态，没有液体产生，可以使冷藏空间内和冷藏物干燥清洁。此外，因为干冰的溶解温度既已很低，故可不必渗用食盐，免除了因盐水而引起的对盛器的腐蚀作用。

使用“干冰”的最大缺点是价值高昂，而且因为温度过低，容易损伤物品和人的皮肤，故在使用时必须十分留心，并且对于冷藏室的绝热要求也高些。因此，干冰并不适用于一切场合，只对一些需要在较低的低温下急冻的物品才适用。

2) 机械制冷 冰制冷除了上叙的种种缺点以外，还有不能维持较长的、连续的冷藏时间的缺陷，除非是不断地供应冰块，这当然很不方便。为了补救这些缺点，通常采用机械制冷法。

机械制冷是利用工质的热力学过程以获得冷效应的方法。根据工作原理的不同可以分成下列几类：

一) 压缩制冷法 此种制冷法所应用的工质有空气和低温汽

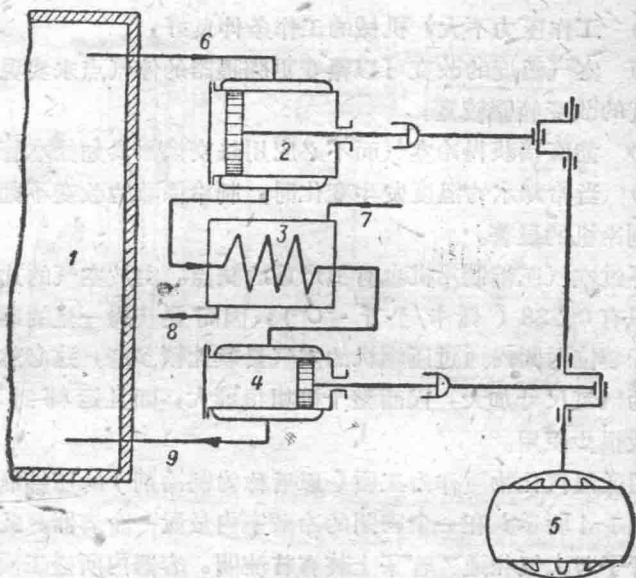


图 1-3

化物质。以空气为工质的压缩制冷法原理如图 1-3 所示，其中 1 是冷藏室，2 是压缩机，3 是冷却器，4 是膨胀器，5 是原动机（电动机、蒸汽机或其它动力机）。压缩机和膨胀器的连杆通过同一根曲轴与原动机相连。

工作时空气在压缩机 2 内被压缩到 4~6 大气压（也可以高些或低些），然后排入冷却器 3，由于有冷却水沿管 7 流入冷却器后经过管 8 流出，因而空气在冷却器中被冷却，再由此进入膨胀器 4，高压空气在此与蒸汽在蒸汽机中一样进行膨胀，推动活塞，当然这也帮助了压缩机的运转，不过其主要作用是使空气的温度随着压力的降低而降低。低温空气沿着管 9 进入冷藏室 1 的下方，吸取室内的热量，再沿着冷藏室上方的管 6 排至压缩机 2 内。如此周而复始，冷藏室内就产生了冷效应。

空气压缩制冷机有以下一些优点：

i) 工质是空气，对人体无碍，而且取之不尽用之不竭，不用花钱购买；

- ii) 工作压力不大，机械的工作条件良好；
- iii) 空气温度的改变可以籍变更膨胀器的停气点来实现，而且温度的改变范围较宽；
- iv) 能直接获得冷空气而不必应用热交换器具如盐水管等；
- v) 当冷却水的温度发生变化时，制冷系数的改变不如他种压缩制冷机的显著。

不过空气压缩制冷机也有很严重的缺点。由于空气的比热极小，只有 0.238 (仟卡/公斤· $^{\circ}C$)，因而要获得一定的制冷能量，在单位时间内通过压缩机的空气量就比较多些，这必然使压缩机的气缸尺寸加大，因而整个机组很庞大，而且运转时不经济，故很少使用。

用低温汽化物质作为工质(以后称为制冷剂)的压缩制冷原理如图 1-4 所示，在一个密闭的冷藏室内放置一个容器，此容器通过管子与大气相通，管子上装有节流阀。容器内所盛工质的汽化温度极低(例如液体氨当容器内压力为大气压时，温度在 $-34^{\circ}C$ 左右即汽化)。因此，当节流阀开放，容器内的压力降低到制冷剂的饱和压力时，制冷剂即汽化，而制冷剂汽化时必须依赖周围环境供给热量，于是冷藏室内的热量就被制冷剂吸收去，从而造成低温。

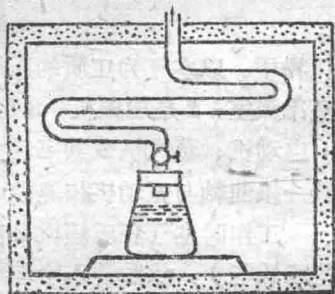


图 1-4

为了避免容器内的压力升高，制冷剂一经汽化就应向外引出，因此，若要使冷藏室内长时间维持低温，就必须不断地产生冷效应，也就是要不断地消耗制冷剂，这样做显然是不合理的。为了能以有限量的制冷剂长期产生冷效应，必须将已经吸热而汽化的制冷剂加以回收再供使用，为此，应采用与空气压缩制冷法相似的装置，此装置如图 1-5 所示，包括一部压缩机，一具冷凝器，一具膨胀器(实际是使用节流阀)，一套放置在冷藏室内的盘管。

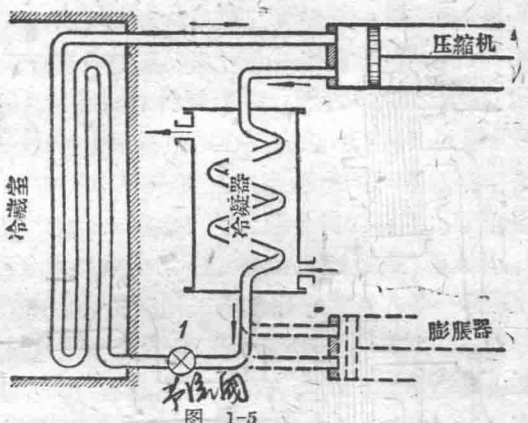


图 1-5

当湿度较大、温度很低的制冷剂在盘管内流过时，由于吸收了盘管外的热量而汽化，干度增大，形成干蒸汽进入压缩机内，经过压缩后，压力增大，温度也升高，然后排至冷凝器中，将热量放出，凝为液体，再经过膨胀器，使温度和压力都降低，以便重行进入冷藏室内的盘管中，再一次地吸热汽化；如此循环不已，就可以不断地产生冷效应。

目前应用的人工制冷法，绝大部分属于这一类型。所用的压缩机有活塞式、离心式、迴转式，但后者应用得极少。近年还有采用自由活塞压缩机的，目前还在发展中。

二) 真空制冷法 真空制冷法所应用的工质是盐水(或纯水)。真空制冷法的原理如图 1-6 所示，1 是蒸发器；当喷射泵 2 的喷嘴 4 内有蒸汽流通时，蒸发器内部即形成低压，作为工质的盐水乃由水槽 5 通过管 6 及调节阀 7 进入蒸发器之顶部，由此向下通过筛板，雾化后喷入蒸发器腔内，由于其中的压力很低，于是盐水中的一部分汽化。因为蒸发器外面已用绝热材料包裹住，外界热量不能传入，故此一部分水分汽化时所需的热量，不得不取自剩余的盐水，于是剩余的盐水温度降低。当蒸发器内的压力越低即真空度越高时，盐水的温度也越低；此低温盐水由离心泵 20 输送到冷藏室，吸收热量，产生冷效应，然后沿管 21

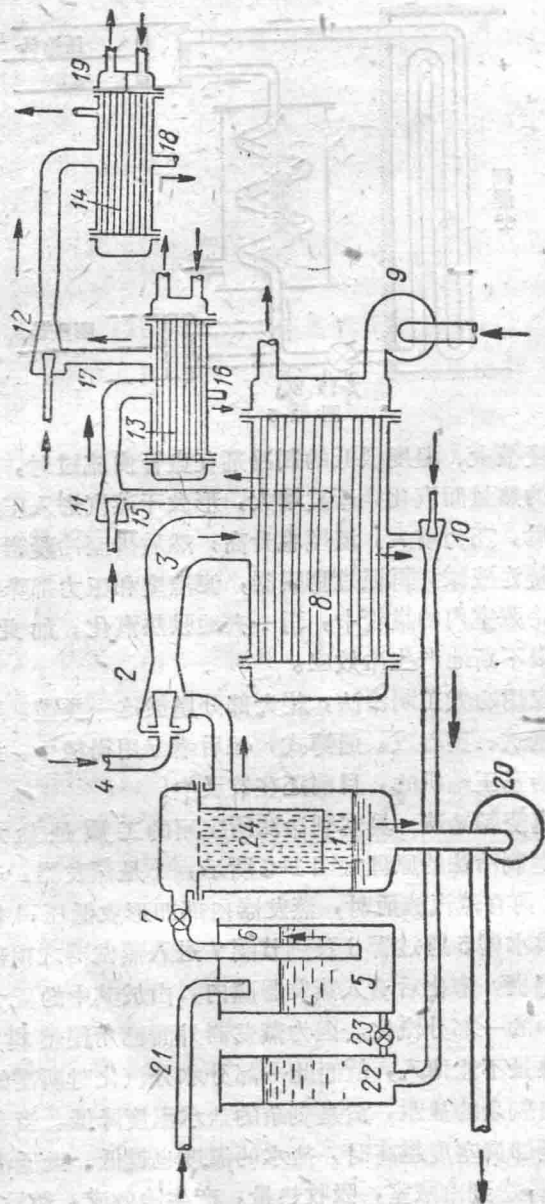


图 1-6

回至水槽 5 內，由此重回蒸发器，再度被冷却，完成另一次循环。

至於在蒸发器內生成的蒸汽和一部分漏进来的空气被喷射泵 2 抽出后，即在扩散器 3 內被压缩，然后随同工作蒸汽进入凝汽器 8 內。凝汽器 8 上配备有离心式冷却水泵 9、喷射式凝水泵 10 和两级喷射式抽气泵——此抽气泵係由两只蒸汽喷射泵 11、12 及两具凝汽器 13、14 組成。凝汽器 8 內的凝水由喷射泵 10 送入淡水柜 22 內，空气则由第一级喷射泵 11 沿管 15 抽出，此时压力还未超过大气压力，乃连同工作蒸汽一道进入第一级凝汽器 13，蒸汽在此凝結，凝水沿管 16 排至热水箱，空气则由第二级喷射泵 12 沿管 17 抽出，再随蒸汽一同压进第二级凝汽器 14 內；此时空气压力已增高到大於大气压力。凝水沿管 18 排至热水箱，空气则沿管 19 放至大气。

盐水中的水分在蒸发器內不断汽化而析出，盐水的濃度势必逐渐加大，为了能調节盐水的濃度，在水槽 5 和淡水柜 22 之間用管連通，並装配閥門 23，籍此即可将淡水适量地送入水槽 5 內，从而控制盐水濃度。

在蒸发器內装有档板 24，其用途在於防止盐水水滴被喷射泵 2 抽去。

利用水作制冷工质的最大优点是汽化时吸收掉的热量多，例如水在 0°C 时其汽化潜热 $r=597.3$ (仟卡/公斤)，比常用的制冷剂如氨、二氧化碳等的汽化潜热大得多。而且水性無毒，使用时极安全，價值也极为低廉。但是要使水能在 0°C 汽化，必須維持一个近乎绝对真空的低压力—— 0.006228 (绝对大气压)；同时，在此低压力下的水汽比容极大，达到 206.3 (米³/公斤)，不宜用普通的压气机而必須用喷射泵来工作，因而其經濟性能极差；只有当蒸发溫度在 0°C 以上时，才能接近压缩制冷法的經濟性能；因此真空制冷法不宜用於冷藏装置；通常只应用於空气調节装置。

三) 吸收式制冷法 吸收式制冷法是直接应用热能作为制冷能源的制冷方法，所应用的工质是由两种沸点相差很大的物质合