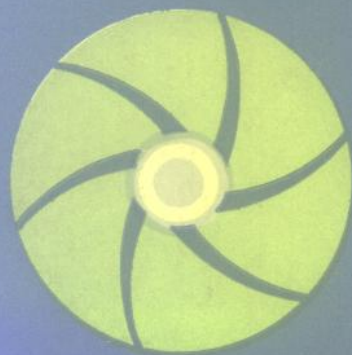


CHUANBO

FUJI



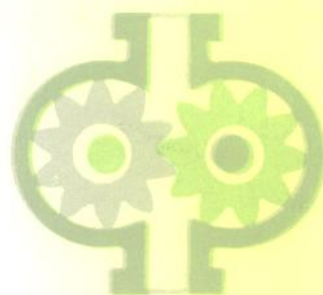
船舶辅机

(下 册)

大连海运学院

阎永阁 金以铨 编
梁继昌 费 千

人民交通出版社



船 舶 辅 机

(下 册)

大 连 海 运 学 院

阎永阁 金以铨 编
梁继昌 费 千

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书从我国远洋船舶实际出发,比较系统地介绍了各种船舶辅机的工作原理、主要性能、具体构造和典型系统,同时阐明了各种船舶辅机的使用和管理。

全书共分四篇,分上、下两册出版。

上册包括第一、二两篇。第一篇共分六章,分别介绍各种船用泵;第二篇共分三章,依次介绍船舶舵机、船舶起货机和船舶锚绞机械。

下册包括第三、四两篇。第三篇共分两章,分别介绍船舶制冷装置和船舶空气调节装置;第四篇亦分两章,依次介绍船用海水淡化装置和船用防污染装置。

本书下册由大连海运学院阎永阁主编,金以铨、梁继昌、费千参加编写,扬春龄、潘延龄、方竹分章校审,最后由阎永阁定稿。

本书主要供航运院校轮机管理专业师生以及远洋和沿海船舶轮机员阅读,也可供船舶机务部门和修造船厂等有关部门的工程技术人员参考。

船 舶 辅 机

下 册

大连海运学院

阎永阁 金以铨
梁继昌 费千 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 $\frac{1}{16}$ 印张: 19 插页: 1 字数: 435 千

1983年12月 第1版

1983年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—9,200册 定价: 2.00元

目 录

第三篇 船舶制冷装置和空气调节装置

第十章 船舶制冷装置	1
第一节 概述	1
第二节 压缩式制冷装置的工作原理	12
第三节 制冷剂和载冷剂	26
第四节 制冷压缩机	38
第五节 冷凝器和蒸发器	70
第六节 船舶制冷装置的附件	81
第七节 船舶制冷装置的自动化和自动化元件	89
第八节 船舶伙食冷库和冷藏舱	117
第九节 船舶制冷装置实例	129
第十节 船舶制冷装置的管理	150
第十一章 船舶空气调节装置	168
第一节 船舶空气调节概述	169
第二节 空调的供风量和供风参数	172
第三节 空调装置和空调设备	176
第四节 空调装置的自动调节	193
第五节 船舶空调装置实例和管理	211
第六节 货舱的通风和干燥	220

第四篇 船用海水淡化装置和防污染装置

第十二章 船用海水淡化装置	222
第一节 概述	222
第二节 船用海水淡化装置的主要类型和工作原理	226
第三节 影响船用蒸馏装置工作的主要因素	229
第四节 船用海水淡化装置实例及其管理	236
第十三章 船用防污染装置	256
第一节 防止船舶污染海洋的重要意义和主要措施	256
第二节 船用油水分离器	266
第三节 油水分离器的自动排油装置和油分浓度监测装置	279
第四节 船舶污水处理装置	286
第五节 船用焚烧炉	293

附 录

附图 1	氨的压焓图.....	插页
附图 2	R12 的压焓图.....	插页
附图 3	R22 的压焓图.....	297
附图 4	R502 的压焓图.....	298
附图 5	湿空气的焓湿图.....	299
附图 6	湿空气的焓湿图.....	300

第三篇 船舶制冷装置和空气调节装置

第十章 船舶制冷装置

第一节 概 述

一、制冷在船上的应用

自从制冷装置问世，迄今不过百余年，但人工制冷现时却已广泛地运用于工农业生产、医疗事业以及国防科研等各个领域。在近代船舶上，制冷也同样获得了广泛的应用，归结起来，主要有如下几个方面：

1. 伙食冷藏

船舶在启航以前，总需携带一定数量的食品，以供船上人员食用。显然，船舶的航程越远，所需携带的食品就越多，储藏的时间也就越长。可是有些食品，诸如鱼鲜、肉类、奶制品以及蔬菜、水果等，在常温下，往往不需数日就会腐坏变质，而且气温越高，腐坏越快，溽暑炎夏，往往更是一日之内，即生臭味。食品腐坏的原因在于：不论动物性食品抑或是植物性食品，都由大量的水分（通常约为食品重量的50%以上，例如肉类的含水量约为45~78%、鲜鱼62~82%、牛奶87%、蛋类74%、蔬菜、水果73~96%），以及蛋白质、脂肪和碳水化合物等有机物质所组成。它们在常温下，为微生物（真菌、细菌、酵母菌等）和酶的积极活动和迅速繁殖提供了有利条件。而食品的腐坏，正是微生物造成其中有机物质分解的结果。此外，象蔬菜、水果等，由于在采摘之后还将不断地吸收氧气，呼出二氧化碳，同时散发热量和水汽，继续进行其生命活动，所以在经过一定的时间后，也会因熟烂而变质。由此看来，为了使食品能耐久藏，就必须设法消灭各种微生物，或者抑制它们的活动与繁殖。为此虽有很多方法，诸如盐腌、熏腊、密饴、醋渍、干制、高温蒸煮、射线处理、真空保藏，以及添加防腐剂等，然而，这些方法都将破坏食品的内部组织，影响它们的外观和滋味，并降低其营养价值。而采用冷藏的方法，则不仅能大大抑制微生物在食品中的繁殖，延缓蔬菜水果的生长成熟，同时也不致破坏食品的原有品质和营养价值。所以，在一般船舶上，为了储存易腐食品，几乎都装有伙食冷库和相应的制冷装置。

2. 冷藏运输

水上冷藏运输是“冷链”中的重要一环。为了发展水上的冷藏运输，早在二十世纪初叶人们就曾建造并使用了一批专门装运单一或少数几个货种的专用冷藏船。随着船舶吨位的发展和技術上的进步，现今更出现了从专用冷藏船向能装运多种冷货的多用途冷藏船发展的明显趋势。现在的海上冷藏运输船舶，不但能承运一般的鱼鲜、肉类、油脂、蔬菜和水果等食品，而且能运送温度低至 -170°C 左右的液化天然气和其它化工原料；不但能运送比较娇嫩的名花异草，而且能运送血浆、精液以及其它生物制品。不仅如此，近年来，海上冷藏运输在运输方式上也有了新的发展。继传统的冷藏舱之后，一种新的具有从“门”到“门”运输

特点的冷藏集装箱运输已经崛起，一些可向所载集装箱（这种箱一般只具有隔热结构而不带固定的制冷装置，所以常称之为保温箱）供送冷风的冷藏集装箱船也不断兴建并投入营运。显然，在这些海上冷藏运输船舶上，也都必须装设专门的制冷装置。

3. 船舱空气调节

在近代船舶上，为了保证船员和旅客的身心健康，提高工作效率，一般都装有为制造所谓“人工气候”而服务的空气调节装置。显然，在空调装置中，也必须设有相应的制冷装置。

4. 渔品冷藏加工

渔业船队在出海捕鱼时，往往由于渔汛、渔场较远以及海上气候变化等因素而不能及时返回，为能将船队所捕获的鱼鲜冷藏运抵港埠，就须配置能及时对水产品进行冷冻或贮运的渔业冷藏船。

5. 海上作业船制冷

在为开发海洋资源而建造的海洋考察船、潜水调查船以及其它海上采掘设施上，为了保证某些作业条件和有关工作的正常进行，也必须设有制冷装置和空气调节装置。

除上述外，在海军舰艇上，为了保证舰艇的战斗力和续航能力以及武器弹药的安全贮存，特别是在保证潜艇的长时间潜航上，也均离不开适当的制冷装置和空气调节装置。

由上述可见，制冷技术不仅在陆上，而且在近代船舶上也获得了十分广泛的应用。所以，制冷装置虽非船舶动力装置的组成部分，因而与船舶的航行性能无关，但却与船舶的营运有着极为重要的关连，并成为船上不可缺少的重要装备之一。

二、食品的冷藏条件

就限制微生物的繁殖而言，冷藏温度当然以越低越好，但因某些食品经过冻结之后，细胞膜会遭到破坏，并将不能再恢复到原来的状态，所以对不同的食品，就应分别采用“冷却”、“冷冻”和“速冻”等不同的冷处理方法。

所谓“冷却”，就是把食品温度降到细胞膜尚不致结冰的程度，通常是在 $0\sim+5^{\circ}\text{C}$ 之间。因此，“冷却”并不影响食品的组织，但因微生物在这样的条件下还将具有一定的繁殖能力，所以“冷却”的食品不能过久储藏。

所谓“冷冻”，就是把食品温度降低于 0°C 而使之冻结。采用这种方法，可使微生物几乎完全停止繁殖，因而保藏效果较好。此外，由于“冷冻”可使食品中积蓄大量的冷量，因此，当外界温度波动时，甚至在装卸过程中，仍可使食品的温度不致很快升高。但“冷冻”时如果冻结速度较慢，那么，在细胞膜的内层就会形成较大的冰晶而使细胞膜破裂，细胞汁遭受损失，从而使食品失去或减少其原有的鲜味和营养价值。为了消除这一缺点，可采用“速冻”。

所谓“速冻”，就是在很短的时间内使食品冻结。这时，由于食品在结冰过程中所形成的冰晶颗粒比较均匀、细小，因而就可不致造成或减少细胞膜的破裂。

关于食品的冷冻温度，由于在食品的组织内部总含有各种盐类的水溶液，随着水分的析出，溶液浓度不断增大，食品的冻结温度就逐渐降低，因此，要将食品内的溶液全部冻结，就需冷冻到大约 -60°C ，这时，微生物的发育趋于完全停止。但因食品在冷冻到 -20°C 时，其内部仅剩下大约10%左右的未冻结汁水了，所以在一般情况下，食品的冷冻温度多不低于 -20°C 。

除温度条件外，空气的相对湿度对食品的保藏也有很大影响，因为相对湿度过高，有利

于微生物的繁殖,而相对湿度过低则又会使食品的表层干缩。干缩层除对肉类具有阻碍微生物发育的好处外,对其它食品则都是有害无益的,因为水分的减少不仅会使食品的重量减轻,同时也会使维生素受到破坏和品质下降。

冷藏间的空气所应保持的湿度还与冷藏温度有关,对于“冷冻”的食品来说,由于其温度较低,食品中的水分已被冻结,所以,即使保持较高的湿度,微生物也不致繁殖,但却可以减少食品的干缩,而当温度较高时,为了抑制微生物的繁殖,则应保持较低的湿度。

对于温度在冰点以上的“冷却”食品,特别是新鲜的蔬菜和水果,由于它们在贮运过程中还将不断地散发出水分和二氧化碳等气体,所以为了保持合宜的相对湿度和气体成分(如蔬菜、水果要求 CO₂ 含量在5~8%之间),促使舱内各处温度和湿度分布均匀,还需用通风机进行循环和换气。舱室通风的换气次数,常以每昼夜更换了多少个舱室容积的新鲜空气来表示。当贮运已经“冷冻”的食品时,由于食品的温度很低,生命活动已经受到很大的抑制,因此也可不用换气。

常见易腐食品冷藏贮运时的最佳温度、湿度和通风换气次数列于表10-1,其中的温度、湿度范围也适用于船舶伙食冷库。但因伙食冷库中的食品主要是供船上人员食用,贮藏时间相对较短,所以冷藏温度常在合宜的范围内选用较高的数值,而对于货物的冷藏运输来说,从保证货物品质的角度出发,则应选用合宜温度范围之内的较低温度。

食品的最佳冷藏工况表

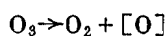
表10-1

食品名称	温度范围(°C)	相对湿度(%)	每昼夜换气次数	贮藏时间(月)
冷肉	-3~+1	80~70		
冻肉	-18~-8	100~70		3~12
油脂	-17~-4	90~85	1~2	
腊肉	-3~+3	95~70	1~2	
冻鱼	-18~-8	100~70	1~2	
蛋类	-1~+1	80~70	2~4	6
苹果	-0.5~+1	92~88	2~4	4~6
梨	-0.5~+1	92~88	2~4	1~4
桔子	+1~+6	87~83	2~4	2~4
菠萝	+4~+7	90~85	2~4	2~3
香蕉	+12~+14	90~85		
蔬菜	-1~+6	90~70	2~4	

应当提到,除冷藏的方法外,对于新鲜的水果和蔬菜,如能在贮藏环境中适当提高 CO₂ 或 N₂ 的含量,降低 O₂ 的浓度,亦即采用所谓“气调贮藏”的方法,则同样可以抑制水果、蔬菜的呼吸强度,延缓它们的成熟过程,从而达到延长贮存时日 and 保鲜的目的。

另外,为了对冷库进行消毒,杀灭冷藏食品上的霉菌和其它各种微生物,以进一步延长货物的贮存时日,提高食品的冷藏质量,在近代船舶冷库中还普遍应用臭氧发生器,以使舱内空气的臭氧含量增高。

臭氧之所以能够杀菌和消毒,主要原因在于臭氧性质极不稳定,很易自发地分解出一单原子氧,即



由于单原子氧是一种十分活泼的元素,极易与其它东西起氧化作用,所以当单原子氧与霉菌等微生物接触时,它就会破坏蛋白质的正常生命活动,使微生物的细胞膜氧化,因而导致微

生物的死亡。

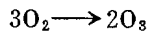
除杀菌作用外，臭氧还可抑制水果的呼吸作用，防止其过快地成熟。因为水果在呼吸时将会放出少量的乙烯（ C_2H_4 ），乙烯对水果有催熟作用，而臭氧则能与乙烯发生氧化，生成甲醛（ $HCOH$ ）和蚁酸（ $HCOOH$ ），从而消除乙烯，其化学反应式为



此外，臭氧对鱼类等还具有除臭的作用。

臭氧处理不宜用于奶制品和油脂类食物，因为这些食物易被氧化并产生脂肪酸，从而使食物变质。另外，对含叶绿素较多的蔬菜，如菠菜、青菜等，也不宜使用臭氧。实验表明，臭氧会使绿色的菜叶出现深色的斑点和凹陷，当臭氧浓度较高时，还会使蔬菜中维生素 C 的含量减少。

臭氧由臭氧发生器产生。臭氧发生器的核心是臭氧发生管，它利用两个金属电极间的高压辉光放电，使空气中的氧气转变为臭氧，即



这和夏季雷雨时天空中的闪电能使大气产生臭氧的道理完全一样。

臭氧发生器一般都装有多根臭氧发生管，并可单独工作或多根同时工作，以便根据冷藏舱室的需要来选择。

臭氧发生器常直接装设在冷藏舱室内，为了便于操作和检修，其控制部分也有放置在舱室之外的。这时需用风机使冷藏舱室内的冷空气经臭氧发生器循流。

各种食物所要求的臭氧浓度和持续时间列于表10-2中，表10-3则给出伙食冷库每小时每立方米库容的冷藏食品所需供入的臭氧量，可供参考。

冷藏各种食物的适宜臭氧浓度

表10-2

食物名称	臭氧浓度 (毫克/米 ³)	臭氧发生器的使用方式	食物名称	臭氧浓度 (毫克/米 ³)	臭氧发生器的使用方式
鱼类	1~2	连续使用	蛋类	1.2~3	间断使用
	2~4	间断使用 (即起停时间相等)		香蕉	6
肉类	1~1.5	连续使用	苹果桔子等	2~3.5	连续使用
	2~3.5	间断使用	含叶绿素少的蔬菜	4.5	间断使用
蛋类	0.8~2	连续使用		3~5	间断使用

伙食冷库臭氧供给量选用表

表10-3

库名	臭氧持续供给量 (毫克/米 ³ 时)	臭氧周期供给量 (毫克/米 ³ 时)		
		供臭氧10分钟	供臭氧15分钟	供臭氧20分钟
		停用20分钟	停用15分钟	停用10分钟
干货	0.01~0.05	0.15	0.1	0.075
蛋库	0.1~0.2	0.6	0.4	0.3
肉库	0.3~0.4	1.2	0.8	0.6
蔬菜水果库	0.3~0.4	1.2	0.8	0.6
鱼库	0.4~0.8	1.8	1.2	0.9

臭氧的浓度可用浸过水的淀粉碘化钾试纸受臭氧作用而改变颜色的方法来测定。一般认为，当臭氧浓度超过2毫克/米³时，就会使人感到头痛并刺激咽喉和鼻腔粘膜而有害健康，所以，在工作人员进入冷藏舱工作前1~2小时，就应停止向冷藏舱供给臭氧，以使其浓度下降到不致对人体有害的程度。

三、制冷方法

所谓制冷，就是用人为的方法从被冷对象中移出热量，以使其温度降低到环境温度以下。

到目前为止，在船上获得实际应用的制冷方法主要有利用天然冰或人造冰等现成冷体来制冷和机械制冷两类。

当利用天然冰或人造冰来制冷时，常需将冰块与被冷体混杂堆放，所能达到的温度一般不高于+3℃。如果在冰中加入适量的盐类，以降低冰盐混合物的熔点，则也可获得较低的温度，见表10-4。

冰中含盐量与融解温度之间的关系

表10-4

NaCl在冰中含量 (%，以重量计)	混合物的融解温度 (°C)	NaCl在冰中含量 (%，以重量计)	混合物的融解温度 (°C)
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

上述利用冰块来制冷的办法虽较简单，但却无法对冷藏温度进行精确的调节，此外，由于冰的溶化，还会使货物潮湿，而大量水分的存在也助长了微生物的繁殖，因而冰块制冷仅在某些内河和短途小船上以及近海捕鱼船上得到了应用。

机械制冷法主要有蒸发制冷、气体膨胀制冷和半导体制冷三种，其中气体膨胀制冷主要应用于飞机空调和气体的低温液化，半导体制冷多用于潜艇、医疗器械和小型空调，只有蒸发制冷应用最为普遍。蒸发制冷如依具体工作原理的不同，又可分为压缩制冷、吸收制冷和蒸汽喷射制冷三种。现分别简述如下。

1. 压缩制冷

我们知道，任何液体在蒸发化气时，都要吸收大量的气化潜热，例如要使1千克水的温度升高1℃，约需吸收1千卡^①的热量，而在一个标准大气压下，若将1千克100℃的水全部汽化，则需供入539千卡的气化潜热。所以，利用这一自然规律，选择气化温度很低的液体，例如在一个标准大气压下气化温度为-29.8℃的氟利昂12作为制冷剂，让它在节流阀5（图10-1）的控制下进入冷库1的盘管（蒸发器）2中，那么，由于节流降压的结果，制冷剂就会在较低的压力下蒸发气化，从冷库中吸取大量的热量，使库温

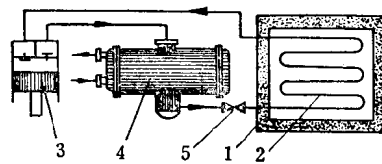


图10-1 压缩式制冷装置原理图

1-冷库；2-蒸发器；3-压缩机；4-冷凝器；5-节流阀

① 在国际单位制中，热量单位采用焦[耳]，符号为J。我国生产上以往采用卡[路里]，符号为cal。1cal = 4.1868J（卡指国际蒸汽表卡）。

相应降低，从而达到制冷的目的。

但是，为了使蒸发器2中的压力不致因制冷剂的不断流入并发生气化而升高，就需用压缩机将制冷剂及时抽出，以维持蒸发器中的稳定低压，同时，将气态制冷剂压缩到较高的压力，使气态制冷剂的饱和温度相应提高，造成其对外放热的条件。这样，在冷凝器中就可利用舷外海水对制冷剂气体进行冷却，使气态制冷剂重新液化，然后再经节流阀供入蒸发盘管中蒸发吸热，从而实现连续不断的制冷。

由上可见，蒸发器（蒸发盘管）2、压缩机3、冷凝器4和节流阀5是使制冷剂气化、吸热和重新液化所不可缺少的机械和设备，因此这四种机械和设备就成为压缩制冷装置必须具备的基本组成部分。而其中的压缩机，不论在循环运送制冷剂方面，维持蒸发器中所需的低压，并把气态制冷剂压缩为高压高温的蒸气，以使其在冷凝器中得以用舷外海水重新冷凝为液态方面，还是在控制蒸发温度、调节制冷能量方面，都是起着关键作用的设备，同时也是装置中最主要的耗能环节，因此，我们也就把这样的制冷装置称之为“压缩式制冷装置”。

压缩制冷是现今应用最为广泛的一种蒸发制冷，也是船舶冷藏装置所采用的主要制冷方式。

2. 蒸汽喷射式制冷

蒸汽喷射式制冷也是一种蒸发制冷。它用水作制冷剂。由于水在0℃时就要冻结成冰，因此，这样的制冷方式只能用作空调制冷。

我们知道，水在一个标准大气压下的蒸发温度是100℃，但如将压力降低到0.5、0.1、0.01千克力/厘米²（约50、10、1千帕）^①，则蒸发温度就要对应地分别降为80.86℃、45.45℃和6.7℃。因此，只要让水在高度的真空下蒸发汽化，即可获得0℃以上的低温。

由于在高真空中水蒸汽的比容很大，如用一般的真空泵来保持蒸发器中的低压，不仅设备过于庞大，而且经济性也很差，因而多采用蒸汽喷射器来作为抽真空的设备，“蒸汽喷射制冷”也就由此而得名。

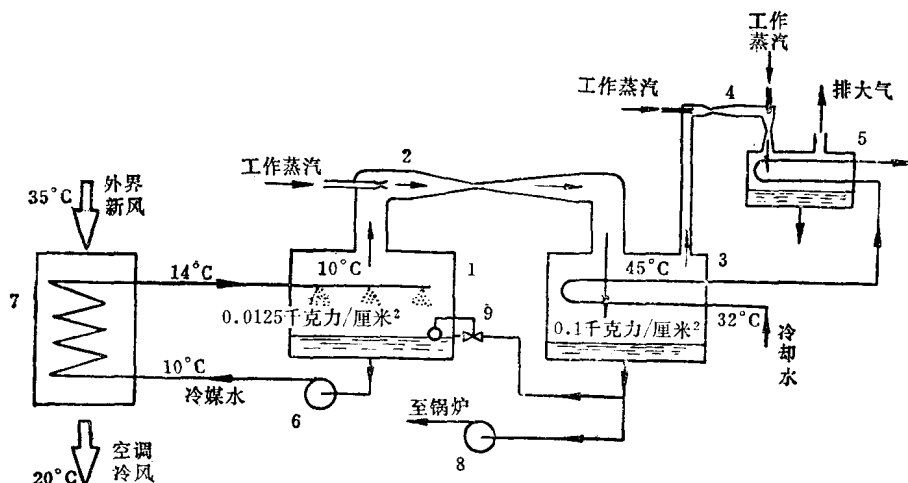


图10-2 蒸汽喷射式制冷装置原理图

1-蒸发器；2-一级蒸汽喷射器；3-主冷凝器；4-二级蒸汽喷射器；5-辅冷凝器；6-循环水泵；7-空调箱；8-凝水泵；9-浮球阀

① 在国际单位制中，压力和压强的单位采用帕[斯卡]，符号为Pa。我国生产上以往采用千克力/厘米²，符号为kgf/cm²。1kgf/cm² = 9.80665 × 10⁴ Pa。

图10-2是蒸汽喷射式制冷装置的原理图。蒸汽喷射器2不断喷射高速汽流，将蒸发器1中产生的蒸汽和漏入的空气不断抽出，使蒸发器内保持高度真空。这样，处于蒸发器中作为制冷剂的水也就不断地蒸发，吸收其余部分水(它作为冷媒水)的热量，使其温度降低。低温水由循环水泵6送往空调箱7中，用以冷却空气，然后再返回蒸发器中放热、降温。蒸发器中因蒸发所产生的蒸汽则由喷射器2抽送至主冷凝器3，在等压下冷凝为水。凝结水一部分由凝水泵8抽出并送入锅炉，以产生低压蒸汽，供作喷射器的工作蒸汽，而其余部分则经节流阀9减压后流回蒸发器，重新补充蒸发使用掉的水量。考虑到现有喷射器的较合宜的压缩比不大于8，如采用一级喷射，往往不能使排出压力升高到大气压力以上，因此，为了能将冷凝器中的不凝性气体排入大气，就需采用二级甚至三级的喷射装置，亦即将前一级冷凝器中压力尚低于大气的非凝性气体和尚未凝结的蒸汽，依次由第二、第三级喷射器抽送到下一级冷凝器中，以凝结剩余的蒸汽，并使其中的压力逐级升高，直至能够将非凝性气体经排气管排入大气为止。在蒸发温度为 10°C ，对应的蒸发压力为 0.0125 千克力/厘米²(约 1.25 千帕)的条件下，无疑需采用三级喷射，只是为了简明起见，图中未予全部绘出。由此不难想见，蒸发器中的蒸发温度越低，所需的喷射级数就越多，而当蒸发温度相同时，喷射级数越多，工作蒸汽的消耗量越少，经济性就越高，但与此同时，设备也将越趋庞大和复杂。

与压缩制冷相比较，蒸汽喷射制冷的优点是设备构造简单，占地面积较小，制造、管理容易，特别是用水作制冷剂，对人体毫无毒害，且又很易取得，同时汽化潜热亦大；它的缺点是要在高真空下工作，只能取得 0°C 以上的低温，而且工作蒸汽的消耗量很大，经济性较差，因此只适用于空气调节系统和其它需要 0°C 以上低温水的生产工艺中，对有废汽、废热可兹利用的场合尤为适宜。

这种制冷方式在第二次世界大战时曾应用于某些军舰，60年代初期也曾见用于一些大型油轮，但在目前新建的各类船舶上则基本未见使用。

3. 吸收制冷

吸收制冷是利用溶液的特性来完成制冷循环的一种蒸发制冷法。因此，在吸收式制冷装置中，至少也需采用二元物质来作为工质对，并以二元溶液中蒸发温度较低的物质作为制冷剂，而把在同一压力下蒸发温度较高并具有强烈吸收制冷剂能力的另一种物质作为吸收剂。

与压缩制冷方式相对照，吸收制冷虽然也是利用制冷剂在蒸发器中的低温蒸发而吸热制冷的，而且高压、高温的制冷剂蒸气的放热凝结也同样是在冷凝器中完成的，但是，在把蒸发器中生成的制冷剂蒸气抽吸出来并提高其压力和温度的方法上，却与压缩制冷不同。在吸收式制冷装置中是没有压缩机的，它用吸收器和发生器代替了压缩机。其中，吸收器起着压缩机的吸气行程的作用，用来将蒸发器中生成的制冷剂蒸气不断地“吸收”出来，以维持蒸发器中的低压；而发生器和泵则起压缩机的压缩行程的作用，用以将制冷剂蒸气的压力和温度提高，以便在冷凝器中将热量转移出去而凝结成为液态。

目前，可应用于吸收式制冷装置的工质对已有数十种，但获得广泛应用的却只有氨-水溶液(氨为制冷剂，水为吸收剂)和溴化锂-水溶液(水为制冷剂，溴化锂为吸收剂)两种。前者可用于低温系统，后者适用于空气调节系统。

从船上使用吸收制冷装置的实际情况出发，这里仅拟简单介绍溴化锂吸收式的制冷原理，然后对氨、水扩散-吸收式电冰箱作一简略说明

1) 溴化锂吸收式制冷

溴化锂是一种无色粒状的结晶盐，性质稳定，沸点很高(1265°C)，极易溶于水中，其

水溶液具有强烈的吸湿性，而且浓度越大、温度越低，吸湿能力越强。利用溴化锂水溶液的这些基本特性，就可直接以热能作为动力能源而实现吸收制冷。

图10-3所示即为吸收制冷的工作原理图。由图可见，装置主要由发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、溶液热交换器和泵等组成。当发生器中的溶液被工作蒸汽或热水加热后，由于水的沸点远低于溴化锂，因此溶液中的水分不断地蒸发出来，成为制冷剂水蒸汽，同时使发生器中剩余溶液的浓度增高。浓溶液在重力和压差的作用下，经溶液热交换器放出热量后，进入吸收器并与其中的稀溶液混合成中间溶液；而制冷剂水蒸汽则经分离器（图中未示出）将其夹带的液滴分离后进入冷凝器，被冷却水冷却，凝结成制冷剂水。由于冷凝器内的压力较高（如冷凝温度为 46°C ，则对应的冷凝压力应为 688.35 毫米汞柱真空压力），因此凝结水需通过节流装置（此处即为U形水封管，该管同时起保持冷凝器与蒸发器之间压差的作用）降压，然后再进入蒸发器。

蒸发器中的制冷剂水由蒸发器泵送往蒸发器内的喷淋管，均匀喷淋在蒸发器管的外表面上。这样，由于蒸发器内的压力较低，同时又吸取了蒸发器管中冷媒水的热量，于是，制冷剂水就会在压力较低的蒸发器中蒸发，使冷媒水的温度降低（如果在蒸发器中能够保持 753 毫米汞柱^①的真空压力，则蒸发器中制冷剂水的温度即可对应地降低为 3°C ，空调冷媒水的温度也就可望从 13°C 降低到 6°C 左右）。

蒸发出来的水蒸汽进入吸收器中，被由吸收器泵送来并均匀喷淋在冷却管外表面上的中间溶液所吸收，以保持蒸发器中的低压，同时使中间溶液变为稀溶液。为了保持吸收作用的正常进行，在吸收过程中放出的吸收热则由吸收器冷却管束中流动的冷却水所带走。吸收器中的稀溶液由发生器泵经热交换器再送往发生器中加热，从而完成了一个封闭的循环。

溴化锂吸收式制冷装置的主要优点是：可直接利用低参数的热源作动力而不需使用压缩机，因而结构简单，制造管理容易，运行时没有噪音和振动，维护费用亦较低廉；此外，用水作制冷剂，完全没有毒害和污染，而且整个装置都处在真空状态下工作，没有爆炸危险，运转十分安全。它的主要缺点是：热效率比压缩式低，冷却水的消耗量大（约为压缩式的 $1.5\sim 2$ 倍）；为保持内部的真空度，对设备的密封性要求较高；用水作制冷剂不能获得 0°C 以下的低温；同时，由于溴化锂水溶液在大气中对钢材具有强烈的腐蚀作用，所以装置的使用寿命亦短。这种制冷方式主要适用于空调制冷，并首先在工厂、高层建筑和大会堂等陆用场合得到重视，随后也受到了船用领域的注意，特别是由于其运行时噪音甚小，有利于潜艇潜航时的隐蔽，因此已为相当数量的一批核潜艇所采用。今后如能在保持较少筒体以使结构更为紧凑的情况下，更好地解决装置内部在航行摇摆时的液面波溅等问题，则吸收式制冷装置必将在船上得到推广和使用。

2) 氨、水扩散-吸收式制冷

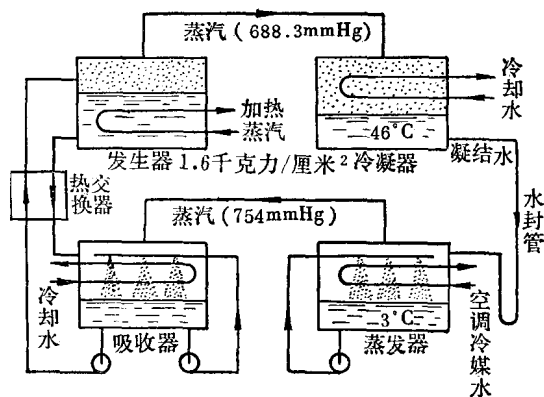


图10-3 吸收制冷的工作原理图

① $1\text{mmHg} = 133.332\text{Pa}$ 。

扩散-吸收式制冷机是一种可直接用热能作动力、没有压缩机、也无需溶液泵和膨胀阀的小型制冷装置。在这种制冷装置的系统完全没有任何运动部件，各设备之间都用管子焊接起来，系统严密，结构简单，工作可靠无声，使用寿命亦长，因此曾得到广泛的应用。

为了能用吸收式制冷产生 0°C 以下的低温，在这种制冷系统中一般都采用氨和水作工质对，并以氨为制冷剂，蒸馏水为吸收剂。

我们知道，整个吸收式制冷系统是处在两个不同的压力之下，其中发生器和冷凝器处于较高的压力之下，而蒸发器和吸收器则处于较低的压力之下。这样，当采用氨和水作工质对后，系统中发生压力与吸收压力之间的差值就要比溴化锂型大得多。例如当蒸发温度为 -20°C 、冷凝温度为 30°C 时，两者的饱和压力差约为 10 千克力/厘米 2 （约 1 兆帕），而发生压力与吸收压力的差值则与此接近，因此，为能克服这样大的压差，使吸收器中的氨水溶液进入蒸发器中，又要实现系统的无泵化，就出现了在氨水中再加入一种辅助气体的办法。辅助气体由氢气来担任，因为氢气不溶于氨和水且比氨轻，而且在一般的制冷工况下不会凝结。这样，氢气进入蒸发器和吸收器后，就会与氨气混在一起，弥漫于溶液的液面上，使吸收器液面所受的总压力升高到与发生器内的压力相等，从而就可利用比重的不同，使溶液由吸收器自动地流向发生器。另一方面，在蒸发器中虽然也因混入氢气而使压力升高到与冷凝器中相等，但并不影响氨液的低温蒸发。这是因为，根据道尔顿定律，混合气体的总压力等于各组成气体的分压力之和，所以，只要控制蒸发器内氢气的分压力等于一定的数值，就能得到所需的氨气分压力。例如，当混合气体的总压力为 $14\sim 16$ 千克力/厘米 2 （约 $1.4\sim 1.6$ 兆帕）时，如氢气的分压力为 $13\sim 15$ 千克力/厘米 2 （约 $1.3\sim 1.5$ 兆帕），则氨气的分压力仅为 1 千克力/厘米 2 （约 100 千帕）左右。这样，氨进入蒸发器时，就会因其分压力的突然降低而扩散蒸发，这实质上对氨起着膨胀阀的降压作用，同时，其蒸发温度也将对应地降低为 -32°C 左右。正因为这种系统除使用氨和水作工质对外，还充入了氢气，以平衡扩散压力，所以被称为扩散-吸收式或三流体吸收式制冷系统。

图 10-4 即为一氨水扩散-吸收式制冷系统。发生器 1 中的浓溶液被电热器加热后，其中的氨先行气化，借热虹吸作用，携带少量的水汽沿上升管 4 进入分离器 5。在这里，水滴因重力而下落，流向吸收器，而氨气和水汽则聚集在顶部，并在聚集到一定数量后即沿中心管进入分析器 6，氨气中的水汽被浓溶液吸走，同时加热浓溶液，然后与其中析出的部分氨气一

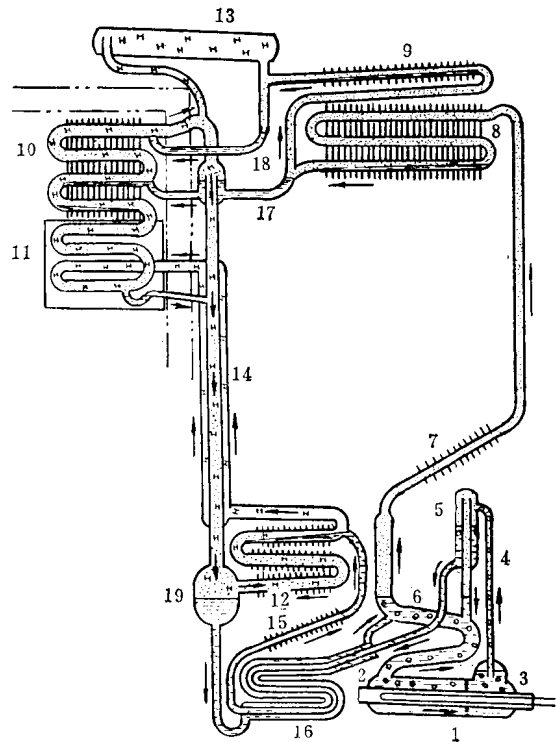


图10-4 氨水扩散-吸收式制冷系统

1-发生器；2-浓液室；3-淡液室；4-上升管；5-分离器；6-分析器；7-精馏器；8-主冷凝器；9-副冷凝器；10-冷藏蒸发器；11-冻结蒸发器；12-吸收器；13-贮氨筒；14-气体热交换器；15-预冷却器；16-液体热交换器；17、18-液封管；19-储液筒

起进入精馏器7。在精馏器7中，由于水汽的凝结温度较氨为高，因此经初步冷却后，水汽即行凝结，从而保证了进入主冷凝器8的基本上是比较纯净的氨气。

在主冷凝器8中氨气大部凝结为氨液，并经液封管17进入蒸发器10的中部，而小部分尚未凝结的氨气则进入副冷凝器9继续凝结，然后经另一液封管18进入蒸发器的上部，这样就可不必将全部冷凝器都置于蒸发器的上方，以使系统的高度减少，同时也使蒸发器得以安置在冰箱中的顶部这一最有利的位罝。

氨液在进入蒸发器后，由于蒸发器中已经充有一定压力的氢气，其分压力远比冷凝压力为低，因此它就会迅速蒸发扩散，并在对应的较低蒸发温度下蒸发吸热。

氨气扩散到蒸发器内的氢气中，形成氨氢混合气，从蒸发器上部沿气体热交换器14的内管进入储液筒19，然后从吸收器12的下端进入吸收器。

在吸收器中，由于氨氢混合气不断地与来自发生器的稀溶液接触，氨气不断地被稀溶液所吸收，因而使蒸发器出口处得以保持一稳定的低压条件，同时混合气逐渐变成含氨较多、比重较轻的气体，然后沿气体热交换器14的外管上升，并在经气体热交换器降温以进一步分离氨气后，从蒸发器下部流回蒸发器。而吸收器中所形成的浓溶液，则因发生器上升管4内充满的是气液混合物，比重较小，所以能自行流向发生器。至于设置在吸收器和发生器之间的预冷器15和液体热交换器16，其作用与气体热交换器一样，都是为了提高系统的制冷效率。

除上述外，为了使整个系统中的总压力保持平衡，并提高系统适应环境温度变化的能力，在冷凝器出口与充氢的蒸发吸收回路之间，还连有贮氢筒13。贮氢筒中的氢气平时停滞不动，只起传递静压的作用。但当环境气温上升以致使氨气在冷凝器中不能凝结时，冷凝器中的氨气就会将贮氢筒中的部分氢气挤入蒸发吸收回路中，使整个系统中的总压力都随之升高。这样，环境温度虽然变高，但氨气仍可冷凝，同时，蒸发器中氨气的分压力也不会因氢气量的增加而有很大的改变；相反，当环境温度下降时，由于蒸发器中的部分氢气又会回存到贮氢筒中，使整个系统中的总压力也一同降低，从而使系统具有了适应环境温度变化的更大能力。

4. 半导体制冷

半导体制冷是本世纪五十年代才付诸实际应用的一种制冷方法，它利用半导体材料的热电效应来工作，可直接用电能使热量从低温处移往高温处，所以又称为热电制冷或温差电制冷。

我们知道，由两种不同的金属联结成的热电偶，当两联接端的温度不同时，电偶回路中就会产生电动势，而且温差越大，其电动势也越大，这就是热电偶温度计的测温原理。而半导体制冷就是上述热电偶原理的逆向应用。

如图10-5a)所示，如把一只P型半导体和一只N型半导体元件联接成电偶对，那么，在接上直流电源后，在接头处就会产生温差并造成热量的转移。其中，在上面的接头处，电流方向从N到P，温度下降并从周围环境吸热，称为“冷端”，而在下面的接头处，电流方向则从P到N，温度上升并向周围环境放热，称为“热端”。显然，利用这一热电效应，就可制冷。但是，在实际应用时，由于每对元件的吸热量很小，所能造成的温差亦很有限，所以需要根据使用的温度和冷量，把许多组电偶对加以并联或串联，组成为热电堆(图10-5b)，然后再接上直流电源，并通过某种方式对热端进行冷却，使之保持一定的温度，同时把热电堆的冷端放进工作空间吸热，以使工作空间的温度降低，从而达到制冷的目的。

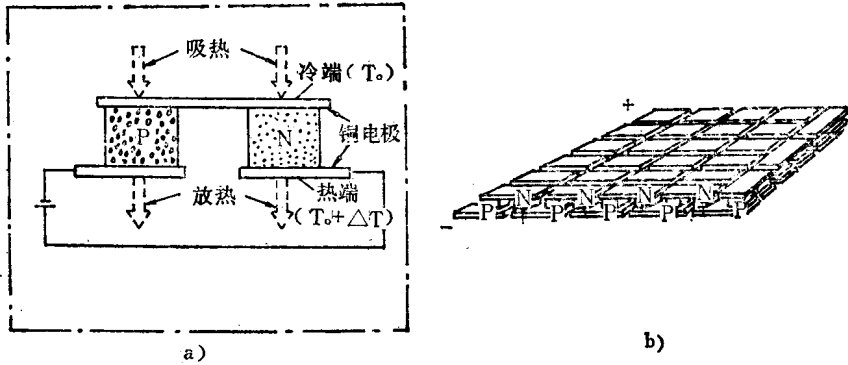


图10-5 半导体制冷原理图和一级热电堆

半导体制冷所能造成的温差，决定于热端的冷却温度和半导体材料的优质系数。材料的优质系数与材料的“温差电势系数”的平方成正比，与材料的“电导率”成正比，而与材料的“热导系数”成反比。因此，对半导体材料是有一定选择的。现时应用的半导体材料多为以碲化铋为主的三元固溶体合金，其中P型材料是 $\text{Bi}_2\text{Te}_3-\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ，N型材料是 $\text{Bi}_2\text{Te}_3-\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ，优质系数一般为 $(2.5\sim 3.4)\times 10^{-3}$ 。由于材料性能的限制，目前半导体制冷所能达到的最大温差约60K，在实际应用中，一级热电堆的工作温差为30~40K。如欲获得更低的温度，就需采用多级制冷，即把下一级热电堆的冷端与上一级热电堆的热端联接在一起，如图10-6所示，以增大工作温差。目前，多级的半导体制冷已可获取 -100°C (170K)的低温。但温度越低，效率和每对元件的吸热量就越小。

与压缩式制冷方式相比较，半导体制冷没有任何机械运动部分，没有噪音、振动和制冷剂等问题，设备简单，工作可靠，维护方便，形小体轻，冷却速度和制冷温度都可通过调节工作电流来加以控制，且可简便灵活地使制冷转变为供热。此外，由于压缩式的制冷效率将随能量的减小而降低，而半导体制冷则与能量的大小无关，所以在小能量的情况下反而比一般压缩式经济。所以，尽管目前半导体材料的成本较高，制冷

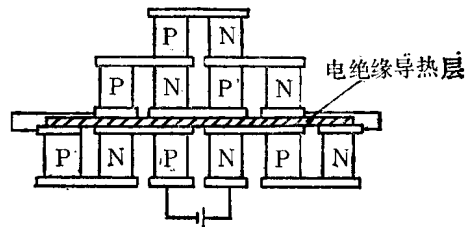


图10-6 三级热电堆

效率较低，制造工艺亦较复杂，且需使用直流电，但在潜艇、卫星站和车船等不宜使用制冷剂与一般制冷装置的特殊环境中以及小能量、小尺寸的制冷条件下，半导体制冷仍然显示出突出的优越性。在船上，半导体制冷多见于小型冷藏器、小型冰箱和微型空调器中。

至此应该说明，在上述各种制冷方法中目前应用最多的还是压缩式制冷。而作为压缩式制冷装置来说，一个不可缺少的重要组成部分就是压缩机。由于船用场合所需的制冷量多处于中小范围，因此，在各型制冷压缩机中又以活塞式应用最多，螺杆式次之，而离心式则比较少见。有鉴于此，下面就重点讨论活塞式压缩制冷装置，并在此基础上相应地介绍螺杆式。

第二节 压缩式制冷装置的工作原理

一、逆卡诺循环和制冷系数

热力学第二定律告诉我们：热量是不会自发地从低温物体传往高温物体的，要实现这种“逆向传热”，即制冷，就必须消耗一定的外功。从低温物体移出单位热量所需外功的多少，与所取的循环过程有关。从热力学中我们知道，逆卡诺循环在这方面具有最高的热经济性。

逆卡诺循环在温-熵图 ($T-S$ 图) 上可用图线 1-2-3-4-1 来表示 (图 10-7)，其中，1-2 为绝热压缩过程，制冷剂在这一过程中被绝热压缩，消耗机械功，温度由 T_1 升高到 T_2 ；2-3 为等温放热过程，在这一过程中，制冷剂被等温冷却，对外放热；3-4 为绝热膨胀过程，制冷剂因绝热膨胀，温度由 T_2 降到 T_1 ，其压力也相应降低；4-1 为等温吸热过程，在这一过程中，制冷剂于等温条件下吸取热量，产生冷效应。

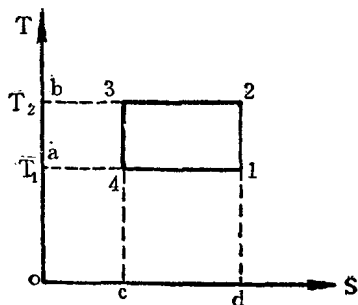


图 10-7 逆卡诺循环的 $T-S$ 图

我们知道，在温-熵图上，热量是可以面积来代表的，同时温-熵图与任何其它热力线图一样又都是相对于每单位重量的工质而言的。因此，如以 q_0 代表每千克制冷剂从低温处所移出的热量 ($h_1 - h_4$)，称为单位重量制冷量 (千卡/千克或千焦/千克)，那么，在 $T-S$ 图上 q_0 即可用相应的图形面积来表示，即 $q_0 = h_1 - h_4 = \text{面积 } d1aod - \text{面积 } c4aoc = \text{面积 } d14cd$ 。绝热压缩每千克制冷剂所消耗的外功 $Al_1 = \text{状态点 2 与状态点 1 的焓差 } h_2 - h_1 = \text{面积 } d2bod - \text{面积 } d1aod = \text{面积 } 12ba1$ ；而制冷剂因绝热膨胀对外做的功 $Al_2 = \text{状态点 3 与状态点 4 的焓差 } h_3 - h_4 = \text{面积 } c3boc - \text{面积 } c4aoc = \text{面积 } 43ba4$ 。这样，在整个循环中，每千克制冷剂所消耗的外功 $Al = Al_1 - Al_2 = \text{面积 } 12ba1 - \text{面积 } 43ba4 = \text{面积 } 12341$ 。由于这部分功在转变为热量后，将和 q_0 一起在 2-3 等温放热过程中传给高温热源，所以，每千克制冷剂传给高温热源的热量 $q = q_0 + Al = \text{状态点 2、3 的焓差 } h_2 - h_3 = \text{面积 } d23cd$ 。

循环所产生的制冷量 q_0 和所耗外功 Al 的比值，表征着制冷循环的热经济性，即每消耗单位外功所能制取的冷量，称为制冷系数。这样，逆卡诺循环的制冷系数即为

$$\varepsilon_{\text{卡}} = \frac{q_0}{Al} = \frac{\text{面积 } d14cd}{\text{面积 } 12341} = \frac{T_1(S_1 - S_4)}{(T_2 - T_1)(S_1 - S_4)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (10-1)$$

从上式看来，要提高制冷系数，就应尽量提高蒸发温度 T_1 ，并降低冷凝温度 T_2 ，但实际上， T_1 的提高受限于冷藏货物时所需的冷藏温度，而 T_2 的降低则受到冷却介质温度的限制。由此可见，如无必要，就不应使制冷装置在较大的温差下工作。

逆卡诺循环是一个理想的循环，具有最高的制冷系数，并与制冷剂的性质无关。实用的制冷循环，由于受到种种条件的限制，不可能实现逆卡诺循环，而只能是设法趋近这一循环。

二、单级蒸气压缩式制冷循环

1. 单级蒸气压缩制冷的理论循环

1) 基本循环

为了使问题简化和便于研究，我们首先忽略一些实际因素，假设 (1) 压缩过程可按等熵