



# 舰船 制冷与空调

JIANCHUAN ZHILENG YU KONGTIAO

吴 钢 主编  
陈金增 钟民军 李光华 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 舰船制冷与空调

吴钢 主编

陈金增 钟民军 李光华 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要阐述了舰船制冷和空气调节的基础理论,介绍了舰船冷藏和空调设备的工作原理、结构、性能特点及其维护管理要点;论述了舰船冷藏和空调系统负荷计算、风管系统设计的一般方法。为增强本书的针对性,还介绍了舰船冷藏装置设计及空气调节负荷计算实例。针对目前舰船冷藏和空气调节的现状与发展,本书阐述了舰船制冷空调新技术、新装备和机电一体化等新内容。

本书可作为舰船动力工程、制冷空调、环境工程和机械工程及自动化专业教材,也可供相关专业人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

舰船制冷与空调/吴钢主编. —北京:国防工业出版社,  
2009. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 05975 - 5

I. 舰... II. 吴... III. ①舰船系统:制冷系统②船舶系  
统:空气调节系统 IV. U664. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 149145 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18 1/2 字数 422 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

随着现代舰船的发展,对舰船制冷和空气调节的要求越来越高。当前,舰船冷藏和空调系统采用了许多新技术和新设备,舰用空调装置制冷机组从传统的蒸汽压缩式活塞机组发展到应用螺杆机组、离心机组、溴化锂吸收式和蒸汽喷射式等多种制冷机组;对于全封闭结构舰船还增加了应用化学、生物和电子方法的空气净化装置;计算机和新型自控元件在舰船冷藏和空调系统的应用使得装置的自动化程度得到了极大的提高,有利于现代舰船空调舱室温、湿度的优化控制。舰船冷藏和空调装置不断完善,有利于降低舰船武器装备故障率,改善舰员的工作和生活条件,提高现代舰船的战斗力和续航力。

本书主要阐述舰船制冷和空气调节的基础理论,介绍舰船冷藏和空调设备的工作原理、结构、性能特点及其运行维护要点;论述舰船冷藏和空调系统负荷计算、风管系统设计的一般方法;依据理论结合实际的原则,书中有较多舰船冷藏及空气调节系统实例。

针对目前舰船冷藏和空气调节的现状与发展,本书阐述了舰船制冷空调新技术、新装备和机电一体化等新内容。

本书共 15 章,由吴钢主编。参加编写的人员有:吴钢(第 1、2、3、4、5、6 章),陈金增(第 7、8、9、14、15 章),钟民军(第 10、11、12、13 章);李光华、宛克相对本书提出了许多宝贵的意见;李涛和曾强洪参加了部分章节的校对工作。

本书由海军工程大学陈林根教授主审。

本书适用于舰船动力工程、制冷空调、环境工程和机械工程及自动化专业,同时也可供相关专业人员参考。

由于时间匆促,学识水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2007 年 8 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 制冷技术的发展	1
1.2 制冷技术在舰船上的应用	1
1.2.1 舰船冷藏装置的特点	2
1.2.2 舰船空调装置的特点	2
1.3 制冷类型和方法	3
1.3.1 相变制冷	3
1.3.2 气体绝热膨胀制冷	5
1.3.3 半导体制冷	5
第 2 章 制冷剂、载冷剂和冷冻机油	6
2.1 制冷剂	6
2.1.1 对制冷剂的要求	6
2.1.2 制冷剂的种类及命名	7
2.1.3 舰船常用制冷剂	8
2.1.4 制冷剂热物性参数	11
2.2 载冷剂	14
2.3 冷冻机油	15
第 3 章 蒸汽压缩式制冷原理和热力循环	16
3.1 蒸汽压缩式制冷原理	16
3.1.1 蒸汽压缩式制冷装置的基本组成及工作原理	16
3.1.2 压焓图	17
3.2 单级蒸汽压缩式制冷的热力循环	19
3.2.1 单级蒸汽压缩式制冷的基本理论循环	20
3.2.2 制冷剂液体过冷对基本循环的影响	22
3.2.3 制冷剂气体过热对基本循环的影响	22
3.2.4 回热器对制冷循环的影响	23
3.2.5 单级蒸汽压缩式制冷的实际循环	24
3.2.6 单级蒸汽压缩式制冷循环的热力计算	26

3.2.7 单级蒸汽压缩式制冷装置工作特性和工况	29
<b>第4章 蒸汽压缩式制冷压缩机</b>	<b>33</b>
4.1 活塞式压缩机分类及特点	33
4.2 活塞式压缩机的工作原理和性能	34
4.2.1 单级活塞往复式压缩机的基本结构和工作原理	34
4.2.2 活塞往复式压缩机的主要性能参数及影响因素	34
4.2.3 活塞式压缩机的功和功率	38
4.3 活塞式压缩机结构	39
4.3.1 总体结构	39
4.3.2 零部件的作用与结构	41
4.4 螺杆式压缩机	46
4.4.1 螺杆式制冷压缩机的结构和工作原理	46
4.4.2 螺杆式制冷压缩机的性能特点	48
4.4.3 螺杆式制冷压缩机的能量调节	49
4.4.4 螺杆式制冷压缩机的油分离	50
4.5 离心式压缩机	51
4.5.1 离心式压缩机的特点和分类	51
4.5.2 离心式制冷压缩机的工作原理及主要结构	53
4.5.3 离心制冷压缩机的工作特性及调节	54
<b>第5章 制冷装置的热交换器及制冷附属设备</b>	<b>57</b>
5.1 蒸发器的制冷量和结构	57
5.1.1 蒸发器的制冷量	57
5.1.2 蒸发器的类型和结构	57
5.2 冷凝器的负荷和结构	59
5.2.1 冷凝器的热负荷	59
5.2.2 冷凝器的类型和结构	59
5.3 热交换器的设计计算	61
5.3.1 热交换器管内外传热量平衡与换热系数	61
5.3.2 对数平均温差	62
5.3.3 蒸发器换热面积计算	63
5.3.4 冷凝器换热面积计算	63
5.4 制冷装置附件	66
5.4.1 干燥过滤器	66
5.4.2 贮液器	66
5.4.3 回热器	67
5.4.4 油分离器	67

5.4.5	油路系统的辅助设备 .....	68
<b>第6章</b>	<b>制冷装置的自控元件及自动调节 .....</b>	<b>70</b>
6.1	制冷自动控制元件概论 .....	70
6.2	节流元件 .....	71
6.2.1	热力膨胀阀 .....	71
6.2.2	电子膨胀阀 .....	76
6.3	制冷压缩机的制冷量调节 .....	78
6.3.1	压缩机间歇运行调节 .....	78
6.3.2	吸气节流调节 .....	78
6.3.3	变速调节 .....	79
6.3.4	顶开吸气阀控制压缩机运行气缸数 .....	79
6.4	温度与压力控制元件 .....	85
6.4.1	温度继电器 .....	85
6.4.2	电磁阀 .....	86
6.4.3	压力继电器 .....	87
6.4.4	油压继电器 .....	89
6.5	蒸发与冷凝压力调节元件 .....	90
6.5.1	蒸发压力调节阀 .....	90
6.5.2	冷凝压力调节阀 .....	91
6.6	制冷装置自动调节系统 .....	93
6.6.1	制冷装置自动调节系统组成 .....	93
6.6.2	典型制冷控制系统 .....	94
6.7	制冷装置的计算机优化控制 .....	97
6.7.1	冷库制冷装置的计算机控制 .....	97
6.7.2	制冷装置的最佳控制 .....	99
<b>第7章</b>	<b>制冷技术在食品冷藏中的应用 .....</b>	<b>101</b>
7.1	概述 .....	101
7.1.1	食品冷藏原理 .....	101
7.1.2	冷藏装置的组成与任务 .....	101
7.2	舰船冷藏库的负荷以及减少负荷的措施 .....	102
7.2.1	冷库热负荷 .....	102
7.2.2	制冷装置的需要制冷量 .....	104
7.2.3	减少冷库热负荷的措施 .....	105
7.3	负荷计算的传热系数 .....	105
7.3.1	对绝热材料的要求 .....	106
7.3.2	船用低温绝热材料及其性能 .....	106

7.3.3	冷藏库绝热层结构形式 .....	107
7.4	船舶绝热结构传热系数的确定 .....	109
7.4.1	分区法 .....	109
7.4.2	圆弧热流法 .....	110
7.4.3	查表法 .....	112
7.5	制冷装置的设计要点 .....	114
7.5.1	冷藏库制冷系统的特点 .....	114
7.5.2	制冷装置设备的选型计算 .....	114
7.6	舰艇冷藏装置设计实例 .....	118
7.6.1	食品储存量计算 .....	118
7.6.2	库容的计算 .....	118
7.6.3	冷库隔热结构的传热系数 .....	120
7.6.4	热负荷计算 .....	121
7.6.5	冷库不同工况负荷计算 .....	124
7.6.6	冷库所需制冷量 .....	124
7.6.7	制冷机组与冷风机的确定 .....	125
7.6.8	制冷压缩机组及冷风机的选型配置 .....	125
<b>第8章</b>	<b>舰船用其他形式的制冷装置</b> .....	<b>126</b>
8.1	吸收式制冷装置 .....	126
8.1.1	吸收式制冷循环工作原理 .....	127
8.1.2	溴化锂吸收式制冷循环 .....	129
8.1.3	溴化锂吸收式制冷装置 .....	129
8.2	蒸汽喷射式制冷装置 .....	133
8.2.1	蒸汽喷射式制冷循环及工作原理 .....	134
8.2.2	蒸汽喷射式制冷机主要设备 .....	135
8.3	舰用蒸汽喷射式制冷装置 .....	138
8.3.1	组成 .....	138
8.3.2	工作原理 .....	138
<b>第9章</b>	<b>舰船空气调节及湿空气处理</b> .....	<b>142</b>
9.1	舰船空气调节技术应用与发展 .....	142
9.2	湿空气的性质 .....	143
9.2.1	湿空气 .....	143
9.2.2	湿空气的基本状态参数 .....	143
9.3	湿空气的焓湿图 .....	145
9.4	典型的空气处理过程 .....	148
9.4.1	等湿冷却过程 .....	149



9.4.2	等湿加热过程	149
9.4.3	等焓减湿过程	149
9.4.4	等焓加湿过程	150
9.4.5	降温去湿过程	150
9.4.6	复杂过程	150
<b>第 10 章</b>	<b>舰船空调舱室的热湿负荷</b>	<b>152</b>
10.1	舰船舱内外空气设计参数的选择	152
10.1.1	舱内设计参数	152
10.1.2	舱外设计参数	155
10.2	太阳辐射热对舰船的传热影响	158
10.2.1	太阳辐射强度	158
10.2.2	船体表面接受的太阳辐射强度	161
10.2.3	太阳照射舱壁温度的确定	163
10.2.4	通过玻璃窗的太阳辐射热	165
10.3	舰船空调舱室热湿负荷计算	167
10.3.1	空调负荷的组成	168
10.3.2	空调负荷的计算	169
<b>第 11 章</b>	<b>空气送风状态及送风量的确定</b>	<b>177</b>
11.1	舱室夏季送风状态参数和送风量确定	177
11.2	舱室冬季送风状态参数和送风量的确定	179
11.3	新风量的确定和空气平衡	180
11.3.1	室内卫生要求	180
11.3.2	补偿局部排风和正压排风量	181
<b>第 12 章</b>	<b>舰船空气调节装置与系统</b>	<b>182</b>
12.1	舰船空调系统的组成和分类	182
12.1.1	舰船空调系统的组成	182
12.1.2	舰船空调系统的分类	183
12.2	常用的空气处理设备	184
12.2.1	空气净化装置	184
12.2.2	空气加热器	192
12.2.3	空气冷却器	193
12.2.4	空气加湿和除湿设备	195
12.3	集中式空调系统	199
12.3.1	集中式空调系统分类	199

12.3.2	集中式空调系统的风量分配	204
12.3.3	集中式空调系统的特点	205
12.4	双风管系统	205
12.5	变风量系统	207
12.5.1	变风量系统的末端装置	207
12.5.2	变风量系统处理过程	209
12.5.3	变风量系统中的几个注意问题	210
12.5.4	变风量系统的特点	211
12.6	风机盘管系统	211
12.6.1	系统特点	211
12.6.2	风机盘管的新风系统	212
12.7	舰船空调系统的特殊性和划分原则	213
12.7.1	舰船空调系统的特殊性	213
12.7.2	舰船空调系统的选择和划分	214
12.8	舰船空气调节装置的自动控制	215
12.8.1	空气调节自动控制系统的基本组成及类型	215
12.8.2	空气调节系统的自动控制	216
12.8.3	降温工况的自动控制	223
12.8.4	供风系统静压的自动控制	224
12.9	舰船空调系统的实例和运行管理	228
12.9.1	舰船空调装置实例	228
12.9.2	空调装置的管理	236
<b>第13章</b>	<b>空调系统的通风管道设计与风机选型</b>	<b>238</b>
13.1	风管内空气的流动阻力	238
13.1.1	摩擦阻力	238
13.1.2	局部阻力	241
13.1.3	风管内空气流动阻力	243
13.2	风管内的压力分布	243
13.3	风管的水力计算	246
13.3.1	假定风速法	247
13.3.2	静压复得法	252
13.4	均匀送风管道的设计计算	254
13.4.1	均匀送风管道的设计原理	254
13.4.2	实现均匀送风的基本条件	255
13.4.3	侧孔送风时直通部分的局部阻力系数	256
13.4.4	均匀送风管道的计算方法	256
13.5	风机选型	258

<b>第 14 章 制冷装置的试验与运行</b> .....	260
14.1 制冷装置的气密性与真空试验 .....	260
14.1.1 机组及制冷系统的泄漏检验 .....	260
14.1.2 机组及制冷系统的抽真空试验 .....	260
14.2 冷冻机油与制冷剂的充注 .....	261
14.2.1 机组加注新油 .....	261
14.2.2 添加冷冻机油 .....	261
14.2.3 放油 .....	261
14.2.4 制冷剂的充入和抽出 .....	262
14.3 制冷装置的运行 .....	263
14.3.1 制冷机组启动 .....	263
14.3.2 运行中的管理与停车 .....	264
14.3.3 正常运行时工况的调整 .....	266
14.3.4 正常停车和故障停车的判别 .....	267
14.4 制冷装置的日常维护 .....	267
14.4.1 日常运行记录 .....	267
14.4.2 日常维护 .....	267
14.4.3 机组和系统内去水分 .....	267
14.4.4 氟利昂系统中的空气排除 .....	268
<b>第 15 章 制冷装置的故障分析</b> .....	269
15.1 制冷装置的故障检查方法 .....	269
15.2 制冷系统的故障分析 .....	271
附表 1 R12 饱和性质表 .....	272
附表 2 R22 饱和液体及蒸汽热力性质 .....	273
附表 3 R134a 饱和状态下的热力性质 .....	275
附表 4 局部阻力系数 .....	277
附表 5 通风管道统一规格 .....	283
<b>参考文献</b> .....	285

# 第1章 绪论

## 1.1 制冷技术的发展

制冷就是从某一物体或空间吸取热量,并将其转移给周围环境介质(水、空气等),使该物体或空间的温度低于环境的温度,并维持这一低温的过程。用于完成制冷过程的设备综合体称为制冷机或制冷装置。

实现制冷的途径有天然制冷和人工制冷两种。

天然制冷是以天然冰为冷源,利用冰融化需吸收融解热而实现制冷的。由于天然制冷受季节、地区和储存条件的限制,产生的低温无法达到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,这就促进了人工制冷的发展。

人工制冷分为普冷和低温两个体系。“低温”是指低于 $123\text{K}$ 温度以下所发生的现象或过程以及相关的技术和设备;在 $123\text{K}$ 至室温范围所对应的温区属于“普冷”。

1755年爱丁堡的化学教授库仑(William Cullen)利用乙醚蒸发使水结冰。他的学生布拉克(Bolack)从本质上解释了融化和汽化现象,导出了潜热的概念,并发明了冰量热器,标志着人工制冷的开始。

1834年在伦敦工作的美国发明家波尔金斯(Jacob Perkins)正式申请了乙醚在封闭循环中膨胀制冷的英国专利。这是蒸汽压缩式制冷机的雏型。

1859年法国卡列(Ferdinand Carre)设计制造了第一台氨吸收式制冷机。

在各种型式的制冷机中,压缩式制冷机发展较快。从1872年美国波义耳(Boyle)发明了氨压缩机,1874年德国人林德(Linde)建造了第一台氨制冷机后,氨压缩式制冷机在工业上获得了较普遍的使用。之后出现了以二氧化碳为制冷剂的制冷机(1881年),蒸汽喷射式制冷机(1890年)。1929年氟利昂制冷剂的出现,给压缩式制冷机带来了新的变革,压缩式制冷机得到了飞速发展。20世纪60年代,半导体制冷的出现对微型制冷器的发展起到了推动作用。

20世纪以来制冷技术应用范围的扩大,制冷设备种类的增多,计算机技术的发展,极大地推动了制冷技术的蓬勃发展,尤其是动态仿真优化、辅助设计、辅助测试、自动控制、集成制造等技术的应用使得制冷空调技术进入了崭新的时代。

1954年我国开始制造活塞式制冷机,1964年开始自行设计制冷机。目前我国已能自行设计和制造活塞式、离心式、螺杆式、吸收式、蒸汽喷射式制冷机以及半导体制冷器。中小型的活塞式制冷机的品种和产量有了飞速的发展,部分产品在技术方面已接近国际先进水平,基本上可以满足国内市场的需求,有的产品已打入国际市场。

制冷技术目前广泛应用于日常生活、工业、农业、医疗卫生、交通、国防和科学研究中。

## 1.2 制冷技术在舰船上的应用

在舰船上制冷技术主要应用于舰船食品的冷藏和舰船舱室的空气调节。

为了保证舰船上人员的身体健康,舰船远航执行战斗训练任务时必须携带足够的粮食、蔬菜、水果和鱼肉类食品。现代舰船上都设有冷藏库,用于保存易于腐烂变质的食品。

为了增强舰船的战斗能力,保证舰船的机械设备和作战指挥仪器工作在适宜的温度范围内,必须对舰船居住舱室、武器弹药库、特殊战位、电子作战舱室进行空气调节。现代舰船上通常都装有空调装置对舱室空气进行必要的处理,然后以一定的方式送入舱室,使室内的温度、湿度、气流速度和清新度适应工作与生活的要求。

潜艇的隐蔽、潜航和战斗能力的发挥,在一定程度上也受到空气调节的完善程度的限制。

舰船航行在世界各个海域,由于各地区的气候条件差别很大,因此舰船所处的外界环境气候的变化是很复杂的。所以,舰船冷藏和空调装置有不同于一般陆用冷藏和空调的特点。

### 1.2.1 舰船冷藏装置的特点

舰船冷藏库的制冷工艺设计原则与陆地冷库基本一致,但又有不同之处,这是因为:

(1)绝热结构要求高。由于船体基本上是用金属材料制造,金属骨架伸入绝热结构之中造成热流短路,使冷藏库的渗入热量增加。

(2)与陆地冷库相比较,舰船冷藏库工作环境更为潮湿,水汽易于从绝热层表面渗入绝热层中。水分渗入绝热层会严重破坏绝热结构,减弱绝热效果。因此舰船冷藏库绝热层应有良好的防潮措施。

(3)舰船航行途中,机组只允许进行简单的维修,因此舰船制冷系统的各种机组、设备应安全可靠,并且在符合体积小、重量轻的船用要求的同时,应根据造船规范的规定配有备用机组、设备和备件,以保证航行中的正常运转。

(4)制冷装置应能适应舰船航行中的特点,即在船体剧烈摇摆和振动的条件下应能正常运转,自动控制系统可靠性要强。

(5)舰船冷藏库负荷变化比较大,昼夜之间外界温度可能有 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 的变化。这就对制冷装置的能量调节提出了较高的要求,设计时机组和设备的选用应留有余量,系统设计要有灵活性。

(6)机械设备应能耐海水和盐雾腐蚀。

### 1.2.2 舰船空调装置的特点

舰船空调装置不仅关系到舰员的身体健康而且影响到舰艇的战斗能力。与一般陆用空调的不同之处在于:

(1)航行区域远,热、湿负荷变化大。由于舰船出访和远航训练的要求,现代舰船空气调节得到普遍重视。远航区域季节、气候条件的不同,外界空气温度、湿度的改变,必然导致舱室内空气温度、湿度的波动。目前舰船的主要航线基本在北纬 $60^{\circ}$ 至南纬 $40^{\circ}$ 之间,也就是处于地球的热带和亚热带海域。在此区域,最炎热的地方为红海和波斯湾,海上气温可达 $38^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ,较冷的地方为海参崴,冬季气温约为 $-29^{\circ}\text{C}$ 。但舰船大多数时间并不在这些地方长期停留和航行。所以,一般都按最热气温为 $35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为70%、最冷气温为 $-15^{\circ}\text{C}$ 作为环境条件进行设计。这样,在航行于超过设计气候的地区时,就需要用控制掺入回风量的方法,来尽可能地满足舱室空调适宜气候条件的要求。

(2)生活空间小,对空气调节质量要求高。由于舰员生活房间比较狭小,舰员要常年在狭小的舱室内工作和生活,如果不能及时排除舰船上人员发出的二氧化碳、水蒸气和热量,并补

充一定温度和湿度的新鲜空气,那么舱室内的空气就会变得污浊;如果舱室内不能保证人们生活所必需的卫生条件,将会影响人体健康,减弱战斗力。

(3)机械和武器装备热、湿负荷集中,装备对环境条件要求高。现代舰船机械和武器装备大多采用计算机和电子技术实施监控,环境的温度、湿度直接影响到电子元件和计算机的性能发挥和正常使用;而舰船机房设备布置集中、空间小,若不能及时排除机械、电气设备所散发的热量、水分和油蒸汽,将会影响机械设备和电子仪器的正常工作,增加故障率,直接影响舰船的战斗力和战斗力。

(4)潜艇在水下航行时空调装置是耗能大户,直接影响到潜艇水下续航力。由于常规潜艇蓄电池的容量有限,因此,应该采用蓄冷等技术节省水下航行时空调的能耗,提高潜艇水下续航力和待机时间,减少充电次数和潜艇暴露率。

随着科学技术的不断发展,低温技术也将会在舰船武器装备上得到应用,如超导电力推进技术,超导磁储能理论和技术,超导通信和导航技术,舰载电磁炮等。

## 1.3 制冷类型和方法

在工业生产和科学研究中,按照制冷温度来划分通常将制冷分为“普冷”和“深冷”(又称低温技术)两个体系,前者的制冷温度高于 120K,而后者低于 120K。低温技术主要应用于航天、红外探测、原子能、超导、低温电子学、低温物理、低温医学和低温生物学等方面。制冷与低温不仅体现在所获得的温度高低不同,还体现在所采用的工质以及获得低温的方法不同。它们的划分界限不是绝对的,两者有重叠交叉之处。

在普通制冷技术实际中应用的制冷方法,主要有利用液体汽化时吸收汽化潜热的相变特性制冷、气体绝热膨胀制冷和半导体制冷。

### 1.3.1 相变制冷

这一方法主要是利用液体在蒸发汽化时要吸收大量汽化潜热的特性进行制冷,因而又称为蒸发制冷。该方法在实际工程中应用广泛。根据其工作原理不同,蒸发制冷可分为蒸汽压缩式、吸收式和蒸汽喷射式制冷。

#### 1. 蒸汽压缩式制冷

蒸汽压缩式制冷机是应用最广泛的制冷机,被广泛应用于冰箱、空调等制冷装置中,如图 1-1 所示,它主要由压缩机、冷凝器、节流机构和蒸发器等组成,选用汽化温度很低的液体作为制冷剂(也称为工质),液体制冷工质在蒸发器中吸收被冷却对象的热量并汽化,形成的低压蒸汽被压缩机压缩成高压蒸汽,然后进入冷凝器被常温冷却介质(如水或空气)冷却,凝结成高压液体,经节流后变成低压、低温状态进入蒸发器,如此周而复始实现连续制冷。

#### 2. 吸收式制冷

吸收式制冷与蒸汽压缩式制冷一样,是利用制冷剂在低压下汽化吸热以达到制冷的目的。所不同的是,蒸汽压缩式制冷是靠消耗机械功实现热量从低温热源处向高温热源处的转移,而吸收式制冷则靠消耗热能来完成这一热量转移;蒸汽吸收式制冷机是用吸收器、溶液泵、发生器等部件代替蒸汽压缩式制冷机中的压缩机,如图 1-2 所示。

蒸汽压缩式制冷使用的工质一般为单一工质,例如 R12 或 R22,而吸收式制冷使用的工质是两种沸点相差较大的物质组成的二元溶液,其中沸点低的物质为制冷剂,沸点高的

物质为吸收剂,两种物质形成制冷剂—吸收剂工质对。目前获得广泛应用的工质对主要是氨—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。前者用于低温系统(蒸发温度为 $+1^{\circ}\text{C} \sim -45^{\circ}\text{C}$ ),后者用于空气调节系统(蒸发温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 以上)。

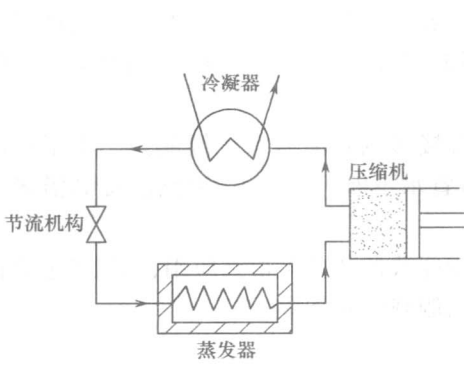


图 1-1 单级蒸汽压缩式制冷装置示意图

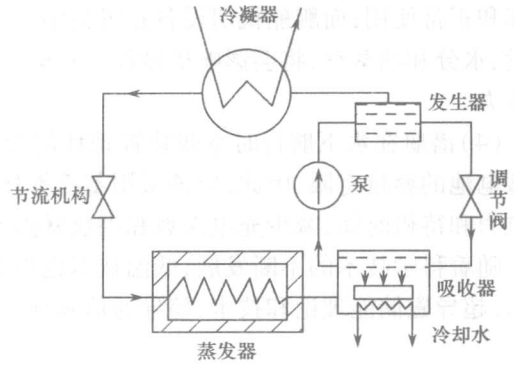


图 1-2 吸收式制冷装置示意图

吸收式制冷装置主要由冷凝器、节流机构、蒸发器、吸收器、调节阀、发生器和溶液泵所组成。制冷剂蒸汽在冷凝器中被冷却成液态后,经节流机构节流降压后变成低压制冷剂;低压制冷剂进入蒸发器吸热汽化产生制冷效应。为使水蒸气还原成液态,利用吸收器中的吸收剂液体将制冷剂蒸汽吸收,吸收剂浓溶液在完成吸收过程后变成稀溶液,由溶液泵将稀溶液送到发生器中。在发生器中溶液被加热,由于制冷剂的沸点远低于吸收剂,因此溶液中制冷剂不断地被蒸发出来成为制冷剂蒸汽,进入冷凝器。蒸发后余下的混合工质变成浓溶液又回到吸收器中,以便吸收从蒸发器出来的制冷剂蒸汽,于是形成了一个封闭循环。吸收剂一般具有较高的沸点温度和极好的稳定性。例如溴化锂的沸点高达 $1265^{\circ}\text{C}$ ,极易溶于水,其溶液具有强烈的吸湿性,且浓度越大,温度越低,吸湿性能越强。吸收式制冷装置的主要优点是:可直接利用低品位的热源作为动力而不需使用压缩机,结构简单,制造管理容易,运行时没有噪声和振动,维护费用较低廉。此外,用水作制冷剂,对环境没有污染。主要缺点是:热效率比蒸汽压缩式制冷低,设备密封性要求高,冷却水耗量大,而且溴化锂水溶液在大气中对钢材有腐蚀作用,因而设备使用寿命较短。

溴化锂—水吸收式制冷机已在部分核潜艇空调装置中得到应用。

### 3. 蒸汽喷射式制冷

蒸汽喷射式制冷也是依靠液体在汽化时要吸收汽化潜热来制冷的。一般利用水作为制冷剂,与前述的两种制冷方法不同之处在于:蒸汽喷射式制冷机是用喷射器取代压缩式制冷机中的压缩机,如图 1-3 所示。

高温、高压蒸汽进入喷射器中的喷嘴后高速喷出形成低压环境,蒸发器中的液体制冷剂吸热汽化,产生制冷效应,产生的低压蒸汽进入喷射器与高速喷射气流汇合后进入喷射器的扩压室,并使流速降低,压力升高,然后经冷凝器

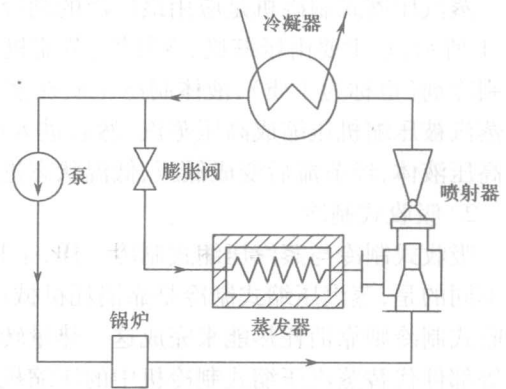


图 1-3 蒸汽喷射式制冷装置示意图

冷凝成液体,一部分经泵提高压力后重新回到锅炉中,一部分经膨胀阀节流降压供入蒸发器中。蒸汽喷射式制冷装置由于没有压缩机,机组振动噪声小,有利于舰艇的隐蔽;但制冷机组工作蒸汽消耗量大,经济性较差,目前仅在少数蒸汽动力舰船上使用。

### 1.3.2 气体绝热膨胀制冷

该方法是利用气体等熵膨胀后温度降低的特性来制冷的,通常用活塞式膨胀机来实现。高压气体在绝热条件下膨胀,借活塞向外输出机械功,这样就消耗了大量的气体内能;另外,由于膨胀时气体体积增加,分子之间距离增大,为克服分子之间引力而又消耗气体分子的一些能量。这样,气体分子的内能在等熵膨胀过程中大量消耗,使膨胀的气体温度显著降低。

在低温技术中 G-M(Gifford-McMabon)制冷机便是采用气体绝热膨胀制冷而达到 4K 左右的温度。

### 1.3.3 半导体制冷

半导体制冷是根据帕尔帖(Peltier)效应而付诸实际应用的一种制冷方法。其原理是:当电流流过半导体热电偶时,其一端结点处由于产生电子—空穴对而内能减少,温度降低,故产生制冷效应;而在另一端结点处则由于电子—空穴对复合而导致内能增加,温度升高,并向周围放热。

热电偶由半导体材料制成,一种为电子型(N型)半导体材料,另一种为空穴型(P型)半导体材料,热电偶之间用金属片(又称汇流条)相连,如图 1-4 所示。接通电流后,金属片 2 从外界吸热,金属片 1 向外界放热。

该现象的物理本质解释如下:N型半导体靠电子移动导电,P型半导体靠空穴移动导电。在外电场作用下,N型半导体中的电子由负极流向正极,P型半导体中的空穴由正极流向负极。电子和空穴均称为载流子,它们在半导体中的势能,大于在金属

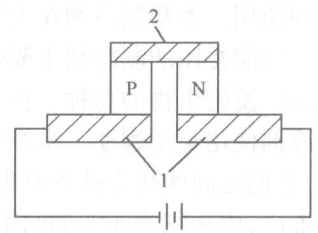


图 1-4 半导体制冷原理图

中的势能,因此当载流子流过结点(金属和半导体的联结点)时,必然会引起能量的传递。当载流子由较高势能变为较低势能时,向外界放出热量;当载流子由较低势能变为较高势能时,必须吸收外界热量。根据这一原理,当接通电源后,空穴从金属片 2 流入 P 型半导体时,势能提高,从金属片 2 中吸取热量,降低了结点处金属片 2 的温度,当空穴从 P 型半导体进入金属片 1 时,因势能下降而放出热量,使金属片 1 和 P 型半导体结合处温度升高。同理,当电子从金属片 2 流入 N 型半导体时,因势能提高,得从金属片 2 中吸取热量,当电子从 N 型半导体流入金属片 1 时,因势能降低,放出热量。由于电子和空穴移动时,均使金属片 2 降温,因而形成冷端;金属片 1 升温,因而形成热端。冷端向被冷却空间(或物体)吸热,达到制冷的目的;热端向环境介质(空气或水)排热。当改变电源的正负极方向时,电子和空穴的流动方向也发生改变,冷端和热端的位置也相应发生变化。

半导体制冷具有结构简单、无任何运动部件、无噪声、体积小、启动快、控制灵活等优点,但效率低、能耗大。它适用于制冷量较小的场合,例如电子元器件的冷却、测量空气的露点仪、医用冷刀和冷帽、小型热电冰箱或空调器等。在航空航天、尖端武器等军事领域有广泛应用前景。

目前舰船上的冷藏装置与空调装置多采用蒸汽压缩式制冷,所以本书重点介绍单级蒸汽压缩式制冷装置的工作原理、特性、结构和管理维护。



## 第2章 制冷剂、载冷剂和冷冻机油

### 2.1 制冷剂

制冷剂是在制冷装置内不断发生状态变化,以传递和转移热量,完成制冷循环的工作介质,又称为制冷工质。制冷系统中的制冷剂,由于压缩机和节流机构的作用,使制冷剂在蒸发器内吸取被冷却对象的热量而蒸发,在冷凝器内将热量传递给周围空气(水)进而被冷凝成液体,这样不断地循环工作,被冷却物的热量不断被吸取,从而达到制冷的目的。工质的性质影响着制冷装置的功能发挥,因此,要使得制冷装置运行正常、性能良好,就必须熟悉制冷剂的性质。

蒸汽压缩式制冷机中的制冷剂从低温热源中吸取热量,在低温下汽化,再在高温下凝结,向高温热源排放热量。所以,只有在工作温度范围内能够汽化和凝结的物质才有可能作为制冷剂使用。多数制冷剂在大气压力和环境温度下呈汽态。

目前常用的制冷剂主要是卤代烃,也称氟利昂(Freon),卤代烃是链状饱和碳氢化合物的氟、氯、溴衍生物的总称。在18世纪后期,人们就已经知道了这类化合物的化学组成,但当作制冷剂使用是汤姆斯·米杰里于1929年—1930年间首先提出来的。氟利昂制冷剂的种类很多,它们之间的热力性质有很大区别,但在物理、化学性质上又有许多共同的优点,所以得到迅速推广,成为制冷业发展的重要里程碑之一。

但是,1974年美国加利福尼亚大学的莫利纳(M. J. Molina)和罗兰(F. S. Rowland)教授首先指出,卤代烃中的氯原子会破坏大气臭氧层。在卤代烃制冷剂中,R11、R12、R13、R14、R113、R114等都是全卤代烃,即在它们的分子中只有氯、氟、碳原子,这类氟利昂称为氯氟烃,简称CFCs;如果分子中除了氯、氟、碳原子外,还有氢原子(如R22),称为氢氯氟烃,简称HCFCs;如果分子中没有氯原子,而有氢原子、氟原子和碳原子,称为氢氟烃,简称HFCs。根据莫利纳和罗兰的理论,CFCs对大气臭氧层的破坏性最大。这就是著名的CFCs问题。

现已证实,大气臭氧层的耗减甚至出现空洞将会引起人们的皮肤癌、白内障等发病率的上升;会减退人类的免疫功能;引起农产品如大豆、玉米、棉花、甜菜等减产;会杀死水中微生物而破坏水生食物链,使渔业减产;同时还会助长温室效应,加速全球气候变暖。

为此,联合国环保组织于1987年制定了《关于消耗大气臭氧层物质的蒙特利尔议定书》,正式规定了逐步削减CFCs的生产和消耗的时间表。

世界各国的科学家和技术专家一直在寻找新的制冷剂。

#### 2.1.1 对制冷剂的要求

##### 1. 热力学性质方面的要求

(1)在标准大气压力下制冷剂的蒸发温度要低,一般不应高于 $-10^{\circ}\text{C}$ ,相应的蒸发压力应高于或接近于大气压力,以免空气渗入制冷系统。