

5036

- 830479

1132

高等学校试用教材

# 制冷原理与设备

西安交通大学 张祉祐 主编

GAO DENG XUE  
XIAO JIAO CAI

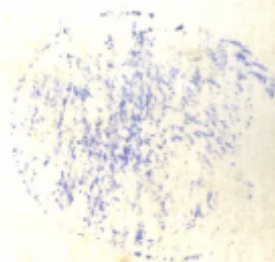


机械工业出版社

15033-6992

15033-6992

15033-6992



统一书号, 15033·6992

定 价, 3.55 元

高等学校试用教材

# 制冷原理与设备

西安交通大学 张祉祐 主编



机械工业出版社

本书是高等工业学校“制冷设备与低温技术”专业的基本教材之一。内容以压缩式蒸气制冷机为主，着重阐述蒸气制冷机的工作原理、循环特性和热力计算方法，以及制冷换热器的结构特点、传热机理和设计计算方法等。此外，还较详细地讲述了蒸气制冷机的节流机构和辅助设备，并介绍了其它制冷方法和循环。

本书在取材方面，既保留了传统的基本内容，又引进了国内外在科研和生产方面的新成就。

本书除作教材外，还可供有一定基础的工程技术人员自学或参考之用。

### 制冷原理与设备

西安交通大学 张祉祐 主编

责任编辑：王存新

封面设计：方芬

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 21 1/4·字数 512 千字

1987年11月北京第一版·1987年11月北京第一次印刷

印数 0,001—6,100·定价：3.55 元

统一书号：15033·6992

# 目 录

前言	
全书通用符号	
绪论	1
第一章 制冷技术的热力学基础	5
第一节 制冷基本原理及获得低温的基本方法	5
第二节 相变制冷	6
一、液体气化	6
二、固体的融化与升华	6
第三节 气体膨胀制冷	9
一、有外功输出的膨胀过程	9
二、节流膨胀过程	10
第四节 逆向可逆循环、制冷循环的热力完善度	11
一、热源温度不变时的逆向可逆循环——逆卡诺循环	11
二、变温热源时的逆向可逆循环	12
参考文献	14
第二章 制冷剂和载冷剂	15
第一节 制冷剂概述	15
一、对制冷剂的要求和选用制冷剂的原则	15
二、制冷剂的种类和代号	16
三、制冷剂按沸点分类	18
第二节 制冷剂的热力学性质	19
一、概述	19
二、制冷剂的一些通用参数关系式	20
三、制冷剂热力学性质的相似性	21
第三节 制冷剂的热物理性质	22
第四节 制冷剂的化学性质及实用性质	25
一、制冷剂的相对安全性	26
二、制冷剂的热稳定性	27
三、制冷剂对金属和非金属材料的作用	27
四、制冷剂的电绝缘性质	27
五、制冷剂和润滑油的作用	27
六、制冷剂与水的溶解作用	28
七、制冷剂的泄漏判别	28
第五节 常用制冷剂的特性	29
一、氨	29
二、氟利昂	30
第六节 混合制冷剂	32
一、共沸混合制冷剂	32
二、非共沸混合制冷剂	32
三、常用混合制冷剂的特性	34
第七节 制冷剂热物性参数的电算法	34
一、热力学参数的基本关系式	35
二、热力学基本方程	35
三、制冷剂焓和熵的计算	37
四、计算举例	38
第八节 载冷剂	42
一、载冷剂的种类和选择原则	42
二、盐水	42
三、有机载冷剂	48
参考文献	48
第三章 单级压缩蒸气制冷循环	50
第一节 单级压缩蒸气制冷机的理论循环	50
一、单级压缩蒸气制冷机的基本组成及工作过程	50
二、单级压缩蒸气制冷机理论循环的性能指标	52
第二节 液体过冷及吸气过热对循环的影响、回热循环	54
一、液体过冷	54
二、吸入蒸气的过热	55
三、回热循环	55
第三节 制冷压缩机的工作过程	58
一、活塞式压缩机的工作过程	58
二、离心式压缩机的工作过程	61
第四节 单级压缩蒸气制冷机实际循环的分析及热力计算	62
一、单级活塞式制冷机的实际循环	62
二、实际循环的性能指标	63

三、单级离心式制冷机的实际循环.....64	第六节 复叠式制冷循环..... 115
四、总制冷量、净制冷量、有用制冷量、制冷循环中的冷量平衡.....65	一、复叠式制冷循环的类型及组成..... 115
第五节 蒸发温度及冷凝温度变化时制冷机特性的变化、单级制冷机的工况.....67	二、复叠式制冷循环的计算..... 118
一、当蒸发温度 $T_0$ 不变、冷凝温度 $T_c$ 变化时制冷机的性能.....67	三、复叠式制冷循环的有效能分析..... 119
二、冷凝温度 $T_c$ 不变、蒸发温度 $T_0$ 变化时制冷机的性能.....68	四、中间温度的确定..... 121
三、单级制冷机的工况.....69	第七节 复叠式制冷机的变工况特性及有关问题..... 121
第六节 单级压缩蒸气制冷机的计算机模拟.....72	一、应用温度范围..... 121
一、单级压缩蒸气制冷机理论循环的计算机模拟.....72	二、工质的选择..... 122
二、系统中各个设备的计算机模拟.....75	三、循环型式及工作参数..... 122
第七节 单级压缩蒸气制冷循环的损失分析.....78	四、变工况特性..... 123
一、分析制冷循环能量损失的焓法.....79	五、启动..... 123
二、分析制冷循环能量损失的有效能法.....81	六、膨胀容器..... 123
参考文献.....86	参考文献..... 124
第四章 多级压缩及复叠式蒸气制冷循环.....87	第五章 混合工质制冷循环 .....125
第一节 采用多级压缩及复叠式制冷循环的必要性.....87	第一节 混合工质的应用及混合工质制冷循环的特点..... 125
第二节 两级压缩制冷循环.....87	第二节 溶液的基本性质..... 126
一、循环的型式及其比较.....87	一、溶液、溶液的成分、溶解度..... 126
二、两级压缩两级节流循环.....88	二、溶解热、溶液的焓..... 128
三、两级压缩一级节流循环.....92	三、溶液的基本定律..... 129
四、两级压缩制冷循环的有效能分析.....96	第三节 二元溶液的相平衡..... 131
第三节 两级压缩制冷循环中间压力的确定..... 100	一、几个重要概念..... 131
一、最佳中间压力的确定..... 100	二、吉布斯相律..... 131
二、选配压缩机时中间压力的确定..... 103	三、气液相平衡图..... 132
第四节 两级压缩制冷机的变工况特性..... 105	四、共沸溶液及共晶溶液..... 135
一、变工况特性..... 105	第四节 混合工质热力参数的计算..... 137
二、同变工况特性有关的两个问题..... 108	第五节 单级压缩混合工质制冷循环..... 138
第五节 三级压缩制冷循环..... 109	一、单级压缩基本循环..... 138
一、典型的三级压缩制冷循环..... 109	二、单级压缩单级分凝循环..... 140
二、生产干冰的三级压缩循环..... 112	三、单级压缩两级分凝循环..... 144
三、用离心式压缩机的三级压缩循环..... 113	第六节 两级压缩混合工质制冷循环..... 145
	参考文献..... 148
	第六章 其它制冷循环及方法..... 149
	第一节 吸收式制冷循环..... 149
	一、吸收式制冷机的工作原理及工质..... 149
	二、溴化锂吸收式制冷机循环及其计算..... 151
	三、氨水吸收式制冷机循环..... 155
	第二节 蒸气喷射式制冷循环..... 158
	第三节 压缩式气体制冷循环..... 160
	一、无回热气体制冷机循环..... 160

二、定压回热气体制冷机循环	163	三、最大温差法	209
三、定容回热气体制冷机循环	165	第八节 换热器的流体动力计算	203
第四节 气体涡流制冷	166	一、流体在换热器内流动阻力的计算	203
一、气体涡流制冷的机理分析	166	二、几种典型流动情况下的阻力计算	204
二、气体涡流制冷的计算	167	第九节 电子计算机在换热器计算中的 应用	207
三、涡流管的特性及应用	168	参考文献	207
第五节 热电制冷	169	第八章 冷凝器及过冷器的结构与 计算	210
一、热电制冷的基本原理	169	第一节 概述	210
二、热电制冷的特性分析	171	第二节 水冷式冷凝器及过冷器的结构 与计算	211
三、多级热电堆	172	一、立式壳管式氨冷凝器	211
四、半导体制冷设备的特点及应用	172	二、卧式壳管式冷凝器	214
第六节 固体吸附制冷	173	三、套管式冷凝器及过冷器	220
一、分子筛吸附制冷循环	173	第三节 空冷式冷凝器的结构与计算	221
二、氢转化吸收与贮存式热泵循环	175	一、空冷式冷凝器的种类和结构	221
参考文献	176	二、空气受迫运动空冷式冷凝器的 计算	222
第七章 制冷换热器的传热学基础	177	三、空气自由运动空冷式冷凝器的 计算	225
第一节 概述	177	第四节 蒸发式冷凝器的结构与计算	226
第二节 翅片管的型式及传热特性分析	177	一、蒸发式冷凝器的结构	226
一、翅片管的型式	177	二、蒸发式冷凝器中的传热过程	227
二、翅片管的传热特性分析	179	三、蒸发式冷凝器主要参数的选择	228
第三节 无集态变化时的对流换热	180	四、蒸发式冷凝器的计算举例	229
一、流体在管内受迫流动时的换热	180	第五节 冷凝器的新发展	232
二、流体横向流过光管管簇和翅片管 簇时的换热	182	一、壳管式冷凝器的发展趋势	232
三、液体呈膜状流动时的换热	185	二、空冷式冷凝器的发展趋势	233
第四节 制冷剂液体沸腾时的换热	187	参考文献	235
一、制冷剂在大空间内的沸腾换热	187	第九章 蒸发器的结构与计算	237
二、制冷剂在管内的沸腾换热	190	第一节 蒸发器的功用及种类	237
第五节 制冷剂蒸气冷凝时的换热	192	第二节 常用冷却液体的蒸发器的结构	237
一、蒸气在垂直壁上冷凝时的换热	192	一、满液式蒸发器	237
二、蒸气在水平光管和低波纹管上冷 凝时的换热	193	二、干式蒸发器	238
三、蒸气在光管和低波纹管管簇上冷 凝时的换热	195	三、立管式及螺旋管式蒸发器	239
四、蒸气在管内冷凝时的换热	196	第三节 满液式蒸发器的设计计算	241
第六节 辐射换热及辐射换热系数的 计算	196	一、满液式蒸发器主要参数的选择	241
一、热辐射的基本概念	196	二、满液式蒸发器设计计算举例	241
二、物体间的辐射换热	197	三、满液式蒸发器的简化算法	244
三、辐射换热系数的计算	198	第四节 干式蒸发器的设计计算	245
第七节 换热器的传热计算	198	一、干式蒸发器主要参数的选择	245
一、按传热方程计算	198		
二、效率-传热单元数 ( $Ntu$ ) 法	199		

二、干式蒸发器的设计计算举例	246	第三节 浮球调节阀	288
三、干式蒸发器的最佳设计及电算框图	251	一、浮球阀的种类和应用	288
第五节 表面式蒸发器的结构与计算	251	二、浮球阀的结构及计算	290
一、空气冷却器的用途和分类	251	第四节 热力膨胀阀的工作原理和调节特性	290
二、直接蒸发表面式空气冷却器的结构	252	一、热力膨胀阀的种类和工作原理	291
三、表面式蒸发器的设计、计算	253	二、热力膨胀阀的结构及使用	292
四、表面式蒸发器的计算举例	256	三、热力膨胀阀的充注方式及调节特性	294
第六节 冷却排管的结构与计算	260	第五节 热力膨胀阀的计算	297
一、冷却排管的结构	260	一、热力膨胀阀容量的计算	297
二、冷却排管的设计计算	261	二、热力膨胀阀的结构计算	298
第七节 蒸发器中的新型换热管	264	第六节 其它型式的自动膨胀阀	300
一、满液式蒸发器中的新型换热管	264	一、恒压膨胀阀	300
二、干式蒸发器中的新型换热管	265	二、热电膨胀阀	301
三、空气冷却器中的新型换热管	265	第七节 节流管的理论分析和计算	302
参考文献	266	一、节流管内膨胀过程的特性	302
第十章 其它换热器及辅助设备	267	二、气液两相绝热流动过程的热力学分析	303
第一节 冷凝蒸发器	267	三、无回热节流管的计算方法	305
第二节 中间冷却器与回热器	268	第八节 确定节流管尺寸的曲线图	309
一、中间冷却器	268	一、基于理论分析的曲线图	309
二、回热器	270	二、基于实验研究的曲线图	311
第三节 制冷剂的贮存、分离和净化设备	272	三、节流管的工作特性	314
一、贮液器	272	第九节 节流机构的性能试验	314
二、气液分离器	273	一、容量试验	314
三、空气分离器	274	二、热力膨胀阀的关闭过热度试验	315
四、过滤器和干燥器	276	三、节流管沿程阻力系数的试验确定	316
第四节 润滑油的分离及收集设备	277	参考文献	317
一、油分离器	277	第十二章 压缩式制冷机组的性能分析和节能措施	318
二、旋液器	278	第一节 压缩式制冷机组的性能分析	318
三、集油器	279	一、压缩-冷凝机组的性能分析	318
第五节 制冷剂泵	280	二、单元制冷机组的性能分析	320
参考文献	281	第二节 冷库用制冷机组的性能分析	322
第十一章 制冷机的节流机构	282	第三节 压缩式制冷机的节能措施	323
第一节 概述	282	一、循环及制冷剂选定中的节能措施	323
一、制冷剂液体膨胀过程的特点	282	二、制冷装置设计中的节能措施	324
二、节流机构的功用及种类	283	三、制冷机运转中的节能措施	325
第二节 手动节流阀	283	参考文献	325
一、手动节流阀的结构特性	284	法定计量单位及其与工程制单位的换算	326
二、手动节流阀的流量计算及工作特性	287		



## 绪 论

从低于环境温度的物体中吸取热量，并将其转移给环境介质的过程，称为制冷。

由于热量只能自动地从高温物体传给低温物体，因此实现制冷必须包括消耗能量（如电能、热能、机械能或太阳能等）的补偿过程。

制冷和低温这两个概念是以制取低温的温度高低来区分的。通常，从环境温度到120K的范围属于制冷，而从120K以下到绝对零度的范围属于低温。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。

实现制冷所必需的机器，称为制冷机。它是指完成制冷循环所必需的机器和设备的总称。例如，单级蒸汽压缩式制冷机包括压缩机、蒸发器、冷凝器和节流阀；单级吸收式制冷机包括发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和节流阀等。在制冷机中，除转动的压缩机、泵等机器以外，其余是换热器及各种辅助设备，统称为制冷设备。而将制冷机同使用冷量的设施结合在一起的装置称为制冷装置，如冰箱、冷库、空调机等。

除半导体制冷以外，制冷机都依靠内部循环流动的工作介质来实现制冷过程，即把热量从被冷却物体转移到环境介质中。完成这种功能的工作介质，称为制冷剂，也叫制冷工质。

为了连续不断地制冷，制冷剂必须周而复始地进行热力状态变化，即完成制冷循环。本课程的“制冷原理”部分主要是从热力学的观点来分析和研究制冷循环的理论和应用。

与制冷的定义相似，从环境介质中吸取热量，并将其转移给高于环境温度的加热对象的过程，称为热泵制热。热泵循环和制冷循环的形式相同，只是所使用的制冷剂和循环工作区间的温度不同。

同时用一台制冷机实现制冷和制热的循环，称为联合循环。从能量利用的观点来看，这是一种有效利用能量的方法。它既有效地利用了冷量，又有效地利用了热量。

由于制冷循环、热泵循环和联合循环的原理和计算方法是相似的，因此在本教材中只着重分析制冷循环。

“制冷设备”部分主要分析各种换热设备的工作原理、结构和传热计算，而且本教材中着重讲述压缩式制冷机的换热设备。

制冷在国民经济各部门及人民生活中应用很广。

在人民生活中，家用冰箱、空调机组的应用已日渐增多，它对提高人民的生活水平，减轻家务劳动，改善工作和休息条件起着重要的作用。在生产发达的国家里，冰箱和空调机或环境温度控制设备已成为家庭中必不可少的设备；有的国家的家用冰箱普及率已达到99%以上。我国目前尽管冰箱普及率还很低，但近年来增长速度很快，发展前景很乐观。

商业部门在食品加工、冷藏以及冷藏运输中，为了对肉类、鱼类、蛋类、蔬菜、水果等进行冷加工、冷藏和冷藏运输，就需要用制冷机来装备能达到低温的冷库、冷藏船、冷藏火车和冷藏汽车。在罐头食品、啤酒、冰淇淋、棒冰和汽水等食品和饮料的生产过程中，也需要应用制冷机。现在，工业发达的国家对食品从生产到销售，已能全部做到使其始终保持在低温状态。这种一连串的保存和运输冷食品用的制冷装置，统称为冷链。由于采用了制冷的

方法，使食品的质量得到了保证，并且消除了某些食品在生产上的季节性和消费上的均匀性之间的矛盾。

在化学工业部门中，气体的液化、混合液体和气体的分离、燃油和润滑油的脱蜡、盐类的结晶、某些化学反应过程的冷却、吸收反应热和控制反应速度等过程中，都需要应用制冷技术。

在钢铁工业中，用制冷的方法去掉空气中的水分，将要鼓入高炉中之前的空气干燥，可降低高炉冶炼过程的焦比，保证冶炼质量。又如炼轧钢时起吊设备操纵室的空气调节，也都需要制冷技术。

降温和空气调节在工厂、住宅和公共场所的应用也愈来愈广。空气调节分为舒适性空调和生产性空调两类。舒适性空调是为了满足人们工作时和休息时的需要，创造一个使人感到舒适的气候环境，以便提高人们的工作效率和身心健康，如宾馆、会堂、剧场、体育馆、机场候机室、地下铁道候车室和车间、实验室、办公室等处，都需要舒适性空调。生产性空调是为了满足生产中某些工艺过程的需要，如纺织厂、造纸厂、印刷厂、精密仪器加工和装配车间及精密计量室等，都需要生产性空调。空气调节技术包括制冷、供暖、通风和防尘，其中制冷降温是空气调节的一项关键技术。

在机械工业和航天工业、电子工业等部门中，制冷的应用也很广。例如：钢的低温处理，可使金相组织内部的奥氏体转变成马氏体，改善钢的性能；电子计算机的储存器、多路通讯、雷达等电子设备，都需要在低温下工作；用制冷的方法来提高电子设备的可靠性，也成为一种新动向。许多航空仪器仪表，以及航空发动机都需要在模拟高空气候条件的实验室里测试性能。在高寒地带使用的汽车、拖拉机、坦克车、常规武器、铁路车辆、建筑机械和筑路机械等产品，也都需要在模拟寒冷气候条件的低温实验室里进行性能实验。这些实验室都要依靠制冷技术来达到低温。

在核工业中，制冷技术用来控制反应速度、吸收核反应过程放出的热量。伊朗一个核原子能电站中使用制冷机的能量达 280MW。

在建筑工业中，用冻土法挖掘土方和建筑桥梁基础，可以提高施工效率，保障施工安全。混凝土加冰搅拌也已经普遍采用。

在医药卫生部门中，使用冻结和干燥法制成药物，低温保存血浆、疫苗和某些药品以保证质量。心脏、外科、肿瘤、白内障、扁桃腺等的低温手术，皮肤、眼珠等的移植手术，也都需要应用制冷技术。

在农业方面，种子的低温处理，人工配种时牲畜精液的低温保存等，也需要应用制冷技术。

下面简单地介绍制冷技术的发展历史。

人类最早是将冬季自然界里的天然冰雪，保存到夏季使用。这在我国、埃及和希腊等文化发展较早的国家的历史上都有记载。如我国《诗经·“豳风”》中记载有：“二之日凿冰冲冲，三之日纳于凌阴”（凌阴就是冰窖）。这是人类利用天然冰制冷的最早记载。又“周礼”中记载有“凌人夏颁冰掌事”。说明当时已有专门管理夏季用冰的官员，称为凌人。此外，在《邶中记》记载了“曹操在临漳县西南设井，建石虎于其上藏冰，三伏之日以赐大臣”。这是我国使用天然冰技术的又一记载。

古代的埃及和希腊很早就有利用冰的记载。埃及人将清水存于浅盘中，放在露天里，遇

天冷有风时，结成薄冰，加以利用。古希腊人把水贮存在大瓶中，放在通风的高处，并不停地在瓶外洒水，由于水分蒸发吸热，可将瓶内水的温度降低。

机械制冷的方法是随着工业革命而开始的。1748年英国人柯伦证明了当乙醚在真空下蒸发时可以产生冷效应。1781年意大利人凯弗罗在刊物上发表了乙醚蒸发制冷的实验。1805年美国的爱文斯提出了一个压缩式制冷的封闭循环。1834年美国珀金斯获得了乙醚在封闭循环中膨胀制冷的英国专利（No.6662），在伦敦东部的哈吉运转了一台珀金斯压缩式制冷机，并制得了冰。这就是压缩式制冷机的发明过程。图0-1是珀金斯提出的压缩式制冷机的原理图。

空气制冷机的发明比蒸汽压缩式制冷机稍晚。1844年，美国人戈里在美国佛罗里达州的商业广告中介绍了他发明的空气制冷机，在1851年他获得了美国专利（No.8080），这是世界上第一台制冷和空调用的机器。1862年，英国人基尔克发明了封闭循环的空气制冷机，并得到了英国的专利（No.1218和No.2211）。

吸收式制冷机的发明几乎与压缩式制冷机同时。

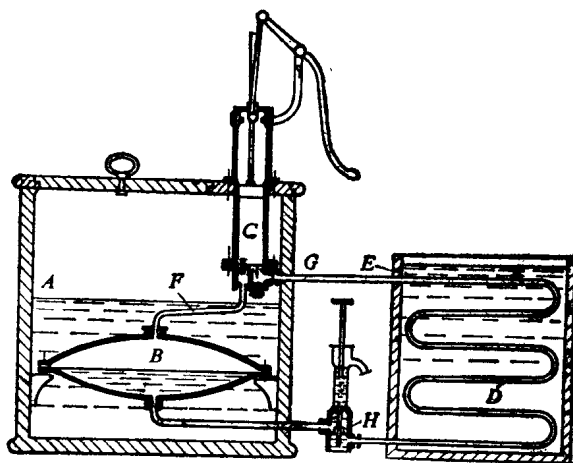


图0-1 珀金斯发明的压缩式制冷机原理图

A—存水容器 B—蒸发器 C—压缩机 D—冷凝器 E—冷凝器的存水容器  
F—吸气管 G—排气管 H—节流阀

在各种型式的制冷机中，压缩式制冷机发展得较快。从1872年英籍美国人波义尔发明了氨压缩机、1874年德国人林德建造了第一台氨压缩式制冷系统后，氨压缩式制冷机在工业上获得了较普遍的使用。直到1929年密其莱在美国通用电气公司的实验室里首次发现了氟利昂12以后，由于它的无毒性质，使氟利昂压缩式制冷机很快地发展了起来，并且在应用方面超过了氨制冷机。

1858年，美国人尼斯取得了冷库设计的第一个美国专利（No.21977），以后他相继在美国的一些城市中建造了公共冷库。这是商业上食品冷藏事业发展的开始。在家用冰箱方面，世界上第一台家用电冰箱是美国考布兰工程师在1918年发明的。自此以后，制冷技术在人民生活中获得了应用。

随着制冷机型式的不断发展，制冷剂的种类也逐渐增多。最早在压缩式制冷机中应用的制冷剂是空气、二氧化碳、乙醚。在吸收式制冷机中应用的是水和硫酸。以后渐渐在压缩式

制冷机中应用氯甲烷、二氧化硫和氨等。1929年以后，随着氟利昂制冷剂的出现，制冷压缩机和制冷系统的种类也不断有所发展。

我国解放前制冷工业十分落后，基本上没有制造制冷机的能力。到1949年全国解放时为止，全国冷库总容量只有35000 t，而现在我国的一个大城市中就拥有了这样的容量。到第一个五年计划末期，全国制冷机制造厂发展到十几家，产品有三十多种。到1976年，我国机械工业系统的制冷行业厂发展到38家，到1981年为止，据不完全统计，全国制冷机行业厂已发展到500余家。1982年机械工业部的制冷机产量达到40万台（套）。

在高等学校和科研机构方面，1957年在西安交通大学设立了全国第一个制冷专业；1956年第一机械工业部（即现在的机械委）设立了通用机械研究所。促进了全国制冷技术的发展。

近年来，我国制冷工业十分兴旺。通过引进国外先进技术和发挥我国自己的设计制造力量，使我国制冷机的产量和质量都有显著的提高。但与世界上发达国家相比，还存在一定的差距，需要依靠全体制冷工作者的努力，把我国的制冷工业迅速推进到一个新的水平。

# 第一章 制冷技术的热力学基础

## 第一节 制冷基本原理及获得低温的基本方法

在绪论中已经提到，制冷是把低温热源中的热量转移到高温热源去的过程。根据热源温度的不同，实现这种热量转移的机器种类可以有制冷机、热泵以及同时制冷与制热的机器——联合机等三种。图 1-1 是这三种机器工作原理的示意图。

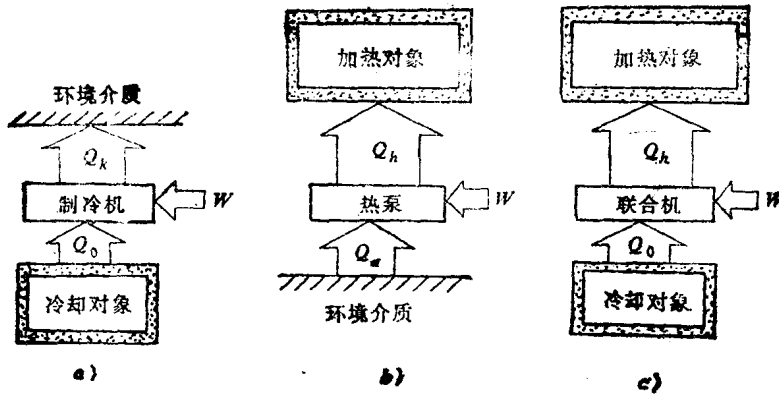


图1-1 制冷机、热泵和联合机的工作原理

a) 制冷机 b) 热泵 c) 联合机

在图 1-1 中，制冷对象是指需要降低到比环境温度更低的温度的空间或物体，如冷库，加热对象是指需要加热到比环境温度更高的温度的空间或物体，如暖房。不论是制冷 (a)，还是制热 (b)，或同时制冷与制热 (c)，都需要消耗能量  $W$ 。

从热力学的角度考虑，制冷机、热泵和联合机，尽管工作的温度区间不同，它们的基本原理是一样的，即是利用某种工质的状态变化，从较低温度的热源吸取一定的热量 ( $Q_0$  或  $Q_c$ )，通过一个消耗功  $W$  (或热量) 的补偿过程，向较高温度的热源放出热量  $Q_k$  或  $Q_h$ 。而且在这一过程中，向高温热源的放热量应等于从低温热源吸取的热量与所消耗的功之和，即对于，

$$\left. \begin{array}{l} \text{制冷机} \\ \text{热泵} \\ \text{联合机} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Q_0 + W = Q_k \\ Q_c + W = Q_h \\ Q_0 + W = Q_h \end{array} \quad (1-1)$$

为了实现上述能量转换，首先必须有使制冷剂能达到比环境介质更低的温度的过程，并连续不断地从被冷却物体吸取热量。在制冷技术范围内，实现这一过程有下述几种基本方法：

1. 相变制冷 即利用液体在低温下的蒸发过程及固体在低温下的熔化或升华过程向被冷却物体吸取热量——即制取冷量。

2. 气体膨胀制冷 高压气体经绝热膨胀即可达到较低的温度，令低压气体复热即可制

取冷量。

3. 气体涡流制冷 高压气体经涡流管膨胀后即可分离为热、冷两股气流，利用冷气流的复热过程即可制冷。

4. 热电制冷 令直流电通过半导体热电堆，即可在一端产生冷效应，在另一端产生热效应。

在这一章中只阐述相变制冷及气体膨胀制冷，其它制冷方法将在第六章中讲述。

## 第二节 相变制冷

### 一、液体气化

蒸气压缩式制冷机、吸收式制冷机以及蒸气喷射式制冷机都是利用制冷剂液体的气化来制冷的。

任何液体气化时都要吸收热量。在定压下 1kg 液体气化时所吸收的热量称为气化潜热。

$$r = h'' - h' = T(s'' - s') \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-2)$$

对于任何一种液体，气化潜热是随其蒸发压力而变的；而在相同压力下，不同的工质其气化潜热也是不相同的。图 1-2 示出几种制冷剂在温熵图上的饱和曲线。由图可以看出：(1) 工质的分子量越小，其气化潜热的数值越大；(2) 对任何一种工质，随着蒸发温度的提高其气化潜热不断减小，当达临界状态时气化潜热为零。

在制冷机的工作过程中，在低温下蒸发的制冷剂液体都是令高压液体经节流降压而得到的。较高压力的饱和液体节流降压后即进入两相区，并闪发出一定的饱和蒸气。对于 1kg 制冷剂，若用  $x$  表示闪发后的干度，则当其余液体全部转变为饱和和蒸气时吸收的热量为

$$q_0 = r(1 - x) \quad (1-3)$$

$q_0$  一般称为单位制冷量。分析式 (1-3) 可知，单位制冷量不仅与气化潜热有关，还随节流后的干度而变。制冷剂液体在节流膨胀前后压力变化范围越大，则节流过程中闪发的气体越多，因而单位制冷量就越小。

### 二、固体的熔化与升华

在制冷技术中常应用水冰或溶液冰的熔化及干冰（即固体二氧化碳）的升华过程来制冷。除干冰可以由高压液体二氧化碳用降压法得到外，水冰和溶液冰都需用制冷机制备。无论水冰、干冰或溶液冰，因不具备流动性，都只能用作二次冷源，不能利用它们的熔化或升华过程来组成制冷机的循环。

天然冰的来源是有限的，现代制冷技术中大量应用的水冰都来源于人工制冰厂。水冰的熔化温度为零摄氏度。所以，利用水冰熔化只能保持 0℃ 以上的低温。一千克零摄氏度的水冰熔化成同温度的水时，可以吸收 335 kJ 的热量。

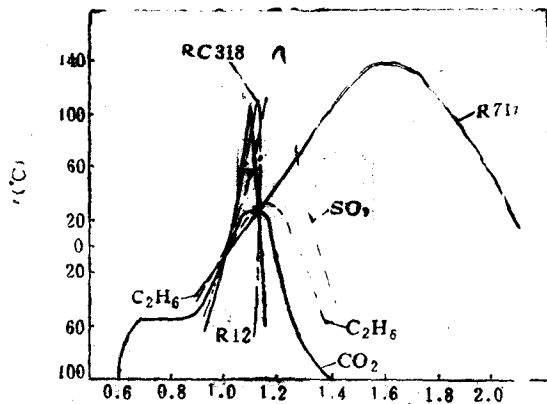


图1-2 一些制冷剂在T-s图上的饱和曲线

在水的三相点温度以下，冰可以直接升华为水蒸气。表 1-1 列出了升华压力和升华温度之间的关系。

表 1-1 冰的升华压力和对应的升华温度

温度 (°C)	0	-25	-50	-75
升华压力(kPa)	0.61	$63 \times 10^{-3}$	$3.87 \times 10^{-3}$	$0.116 \times 10^{-3}$

冰的膨胀系数随温度而变，其变化关系见表 1-2。在实用上，结冰的冰桶都需要做成上部开启的，以允许其膨胀。当水冻结成冰时，其体积大约膨胀 9%。

表 1-2 冰的膨胀系数

温度 (°C)	0	-5	-10	-15	-20
膨胀系数	0.000276	0.000213	0.000171	0.000128	0.000123

冰的平均密度为  $\bar{\rho} = 900 \text{ kg/m}^3$ 。

在 0~20°C 范围内，冰的平均比热为  $c = 2.093 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ，冰的比热与温度的关系如下式所示

$$c = 2.165 - 0.000264T \quad [\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}] \quad (1-4)$$

表 1-3 列出了冰的导热系数与温度间的关系

表 1-3 冰的导热系数

温度 (°C)	0	-50	-100
导热系数 $\lambda$ (W/(m·K))	2.23	2.78	3.384

对于 -20°C 以上的温度，可取冰的导热系数的平均值为

$$\lambda_m = 2.33 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

0°C 时冰的导温系数为  $a = 0.00419 \text{ m}^2/\text{h}$

在实用上，用冰产生冷却效应以冷却某一物体或空间时，是通过空气或水作为传热介质的。用冰冷却的强度取决于传热介质与冰之间的换热系数。水和冰表面之间的换热系数约为  $116 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。空气与冰表面之间的换热系数与温差及空气的流动状态有关，见表 1-4。

表 1-4 从空气到冰表面的换热系数

空气的运动情况	当温差为下列温度 (°C) 时的换热系数 (W/(m <sup>2</sup> ·K))		
	5	10	15
自然循环	4	7	9.3
强制循环(流速为 2m/s)	11.6	17.5	23.2

尺寸在 10cm 左右的冰块，其表面积和体积之比约为  $25 \sim 30 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

应用冰盐混合物的熔化过程可以达到零摄氏度以下的低温。冰盐冷却的物理过程如下：首先是冰吸热而熔化，即在冰的表面上蒙了一层水膜，此时的温度为 0°C。接着盐便溶解于水膜中，吸收一定的溶解热，因而使温度降低。此后，冰在较低的温度下熔化，热交换是通过冰块表面上的盐水膜进行。当冰全部熔化，盐全部溶解后便形成具有一定浓度的盐水溶液，冰盐冷却所能达到的温度与盐的种类以及溶液的浓度有关，见表 1-5。

表1-5 冰盐混合或冰与酸混合时的温度<sup>(1)</sup>

混合物的组成	混合后的		混合物的组成	混合后的	
	每100份水、雪或冰中含盐(或酸)的重量百分数	最低温度(°C)		每100份水、雪或冰中含盐(或酸)的重量百分数	最低温度(°C)
水和盐			CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	82	-21.5
Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	85	-4.7		125	-40.3
NH <sub>4</sub> Cl	30	-5.1		143	-55.0
NaN <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75	-5.3	雪或碎冰和硫酸		
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	110	-8.0	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (66%)	8	-16
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	250	-12.4		13	-20
NH <sub>4</sub> · NO <sub>3</sub>	60	-13.6		25	-25
NH <sub>4</sub> · SCN	133	-18.0		40	-30
KSCN	150	-23.7		72	-35
				100	-37
雪或碎冰和盐			雪或碎冰与双盐混合物		
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	41	-9.0	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14 + 10.5	-3.1
CaCl <sub>2</sub>	30	-11.0	KCl + KNO <sub>3</sub>	24.5 + 4.5	-11.8
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	67.5		NaNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	55.3 + 48	-17.7
KCl	30		KCl + NH <sub>4</sub> Cl	12 + 19.4	-18.0
NH <sub>4</sub> Cl	25	-15.8	Na <sub>2</sub> NO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub>	62 + 10.7	-19.4
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	60	-17.3	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9.6 + 69	-20.0
NaNO <sub>3</sub>	59	-18.5	NH <sub>4</sub> Cl + NaH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	19.8 + 44	-22.5
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	62	-19.0	NH <sub>4</sub> Cl + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12 + 50.5	-22.5
NaCl	33	-21.2	KNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	9 + 74	-25.0

溶液冰是指由共晶溶液冻结成的冰，其熔化温度一般在0°C以下。将共晶溶液充灌在密封的金属容器里，并将它冻结成固体，即得到溶液冰。然后把这种金属容器移到需要冷却的地方，依靠吸收热量使共晶固体熔化，就可使冷却对象降温。在共晶固体未完全熔化成液体之前，它的温度是不变的。这种形式的冷源通常应用于无机械制冷的冷藏汽车中。

表1-6列出了一些用于制冷目的的共晶溶液的物理性质。

表1-6 一些共晶溶液的物理性质<sup>(1)</sup>

共晶溶液种类	含量(%)		冻结温度(°C)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	比热(kJ/(kg·K))		熔化热(kJ/(kg·K))	共晶溶液在冻结时的体积膨胀率(%)
	盐	水			溶液	共晶冰		
ZnSO <sub>4</sub> 和H <sub>2</sub> O	27.2	72.8	-6.5	1.249 × 10 <sup>3</sup>	3.127	1.574	213.1	6.9
BaCl <sub>2</sub> 和H <sub>2</sub> O	22.5	77.5	-7.8	1.239 × 10 <sup>3</sup>	3.345	1.637	246.6	7.9
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 和H <sub>2</sub> O	30.0	70.0	-11.0	1.312 × 10 <sup>3</sup>	3.182	1.536	196.3	5.2
NH <sub>4</sub> Cl和H <sub>2</sub> O	19.25	80.75	-11.1	1.148 × 10 <sup>3</sup>	3.307	1.729	301.0	8.1
NH <sub>4</sub> Cl <sub>3</sub> 和H <sub>2</sub> O	18.6	81.4	-15.7	1.057 × 10 <sup>3</sup>	3.349	1.779	329.9	7.6



(续)

共晶溶液种类	含量(%)		冻结温度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热(kJ/(kg·K))		熔化热 (kJ/(kg·K))	共晶溶液在冻结时的体积膨胀率(%)
	盐	水			溶液	共晶冰		
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> 和H <sub>2</sub> O	41.2	56.8	-17.35	1.188×10 <sup>3</sup>	2.972	1.557	286.3	5.8
NaNO <sub>3</sub> 和H <sub>2</sub> O	37.0	63.0	-18.5	1.29×10 <sup>3</sup>	3.059	1.565	215.6	5.6
NaCl和H <sub>2</sub> O	22.4	77.6	-21.2	1.17×10 <sup>3</sup>	3.336	2.005	236.1	7.9
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +KNO <sub>3</sub> 和H <sub>2</sub> O	4.5+8.0	87.5	-3.8	1.093×10 <sup>3</sup>	3.935	1.833	319.8	8.1
KCl+KNO <sub>3</sub> 和H <sub>2</sub> O	19.0+3.6	77.5	-11.8	1.16×10 <sup>3</sup>	3.182	1.663	265.8	7.7
NaNO <sub>3</sub> +KNO <sub>3</sub> 和H <sub>2</sub> O	35.9+6.2	57.9	-19.4	1.34×10 <sup>3</sup>	3.014	-	217.9	6.1

干冰升华时需要吸收升华潜热，故可用来制冷。干冰受热时直接升华为二氧化碳，它对食品无害，因此可用来冷却和保存食物，并且可直接与食物接触。

干冰的三相点的参数为：三相点温度  $t_{tr} = -56.6^\circ\text{C}$ ，三相点压力  $p_{tr} = 5.2 \times 10^2 \text{kPa}$ ，在大气压下，干冰的升华热为  $573.6 \text{kJ/kg}$ ，升华温度为  $-78.5^\circ\text{C}$ 。

干冰的平均密度为 1.56。干冰的升华潜热与温度之间的关系为

$$r = 665.5 - T - 0.00626T^2 - 0.000018T^3 \quad (1-5)$$

干冰的导热系数为  $0.383 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，其热导率和温度间的关系可用下式表示：

$$\lambda = \frac{274.8}{T^{1.324}} \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})] \quad (1-6)$$

在  $-115^\circ\text{C}$  到  $-183.1^\circ\text{C}$  温度范围内，干冰的平均比热值为  $1.189 \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。在  $-56^\circ\text{C}$  到  $-110^\circ\text{C}$  范围内，干冰的比热值见表 1-7。

表 1-7 干冰的比热和温度间的关系

$t(^\circ\text{C})$	-56.6	-60	-70	-80	-90	-100	-110
$c_p(\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	1.563	1.528	1.428	1.340	1.260	1.193	1.135

### 第三节 气体膨胀制冷

在气体制冷机中，是利用高压气体的绝热膨胀以达到低温，并利用膨胀后的气体在低压下的复热过程来制冷。气体绝热膨胀的特性随所使用的设备而变，一般有两种方式。一种方式是令高压气体经膨胀机（活塞式或透平式）膨胀，此时有外功输出，因而气体的温降大，复热时制冷量也大；但膨胀机结构比较复杂。在一般的气体制冷机中均采用这一膨胀方式。另一种方式是令气体经节流阀膨胀（通常称为节流），此时无外功输出，气体的温降小，制冷量也小，但节流阀的结构比较简单，且便于进行气体流量的调节。这种膨胀方式在气体制冷机中使用较少。

下面，我们用热力学的方法对两种膨胀过程进行简单的分析和比较。

#### 一、有外功输出的膨胀过程

当气体实现有外功输出的绝热膨胀时，最理想的情况是可逆的绝热膨胀——即等熵膨胀。等熵膨胀中温度随微小压力变化而变化的关系可用下式表示