

建筑环境与设备工程专业用

制冷技术

主 编 李树林
副主编 南晓红 冀兆良



TB66
162

建筑环境与设备工程专业用 制 冷 技 术

主 编 李树林
副主编 南晓红
冀兆良



机 械 工 业 出 版 社

本书阐明了蒸气压缩式制冷的热力学原理；比较全面地介绍了各种空调用制冷系统的组成；各制冷设备的构造、工作原理、主要性能、使用范围；阐述了空调用制冷设备的选择依据及一般选择计算方法；对溴化锂吸收式制冷装置的工作原理、系统组成及使用范围等作了简明的介绍；此外，还对热泵技术、冷藏库设计基础和蓄冷技术等作了一般性的介绍。每章后都附有思考题。

本书可作为高等院校建筑环境与设备工程专业的教材，也可供从事制冷、空调的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

制冷技术/李树林主编. —北京: 机械工业出版社, 2003.9

建筑环境与设备工程专业用

ISBN 7-111-12402-2

I. 制… II. 李… III. 制冷技术—高等学校—教材 IV. TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 046410 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 蒋有彩 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李汝庚

封面设计: 陈 沛 责任印制: 施 红

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·20 印张·493 千字

0 001—4 000 册

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

我们参加编写的《空调用制冷技术》一书，1995年出版，1998年又重印一次。随着近年来制冷技术的迅速发展和应用日益广泛，该书的内容已不能适应当前的需要。为了适应制冷技术发展和满足建筑环境与设备工程专业的教学要求，编写了这本建筑环境与设备工程专业用《制冷技术》。

与《空调用制冷技术》相比，本书既保留了其理论联系实际和叙述深入浅出的特点，又根据社会上的需要和建筑环境与设备工程专业的教学要求，在内容上做了较大改动，删去了一些用得较少或较为陈旧的内容，增加了制冷工质替代、热泵技术、冷藏库设计基础、蓄冷技术等内容，并对一些物理量名称和符号按标准作了改动。本书不仅可供高等院校建筑环境与设备工程专业教学使用，也可供从事制冷空调工作的工程技术人员自学和参考。

本书的编写是以《空调用制冷技术》（李树林主编，李临平、南晓红、史自强、郑爱平、吴昨非等参加编写）一书为基础，同时参阅了西安交通大学、陕西西亚特空调设备有限公司等单位的教材和资料编写而成。参加本书编写的是西安建筑科技大学李树林（绪论、第1、7、12章及8.3节），南晓红（第2、3、4、5、13章），广州大学冀兆良（第6、9、10、11章），西安建筑科技大学党义荣（第8章大部分），王智伟（第14章）。由李树林任主编、南晓红和冀兆良任副主编。

本书在编写过程中得到了西安建筑科技大学的支持和帮助，在此表示衷心感谢。由于编写人员水平所限，书中难免存在缺点和不足之处，请读者批评指正。

作者

2003年4月于西安建筑科技大学

目 录

前言

绪论

0.1 人工制冷的的方法	1
0.2 制冷技术在国民经济中的应用	4
0.3 制冷技术的发展简况	5

第1章 蒸气压缩式制冷的热力学

原理

1.1 热力学基本定律与理想制冷 循环	7
1.1.1 热力学基本定律在制冷技术中 的应用	7
1.1.2 具有恒温热源的理想制冷循环—— 逆卡诺循环	7
1.1.3 具有变温热源的理想制冷循环—— 劳伦兹循环	9
1.1.4 热泵循环	11
1.2 单级蒸气压缩式制冷的 理论循环	11
1.2.1 单级蒸气压缩式制冷的工作原理	12
1.2.2 单级蒸气压缩式制冷的理论循环	13
1.3 单级蒸气压缩式制冷理论循环的 热力计算	14
1.3.1 $p-h$ 图的构成及应用	14
1.3.2 理论循环的热力计算	16
1.4 液体制冷剂的过冷和回气过热	19
1.4.1 液体制冷剂的过冷	19
1.4.2 蒸气的有害过热及回热循环	21
1.5 单级蒸气压缩式制冷的 实际循环	25
1.5.1 实际循环与理论循环的差别	25
1.5.2 工作参数的确定	25
思考题	27

第2章 制冷剂与载冷剂

2.1 制冷剂	29
---------------	----

2.1.1 对制冷剂的要求	29
2.1.2 制冷剂的种类及代号	31
2.1.3 常用制冷剂及其性质	33
2.1.4 关于 CFCs 的替代	36
2.2 载冷剂	38
思考题	40

第3章 活塞式制冷压缩机

3.1 活塞式制冷压缩机的工作原理 及分类	41
3.1.1 活塞式压缩机的工作原理	41
3.1.2 活塞式制冷压缩机的分类	42
3.1.3 我国活塞式制冷压缩机的型式及 基本参数	43
3.2 活塞式制冷压缩机的结构	45
3.2.1 812.5A100G (8AS12.5) 型制冷 压缩机	45
3.2.2 B47F55 (4FS7B) 型制冷压缩机	52
3.2.3 2FM4 型制冷压缩机	56
3.3 活塞式制冷压缩机的性能及 计算	58
3.3.1 理想工作过程与理论输气量	58
3.3.2 实际工作过程与输气系数	59
3.3.3 活塞式制冷压缩机的制冷量及 耗功率	62
3.4 活塞式制冷压缩机的特性及 工况	66
3.4.1 影响活塞式制冷压缩机性能的主要 因素	66
3.4.2 活塞式制冷压缩机的特性	68
3.4.3 单级活塞式制冷压缩机的 工况	69
思考题	70

第4章 其他型式的制冷压缩机

4.1 离心式制冷压缩机	72
--------------------	----

4.1.1 离心式制冷压缩机的构造及 工作原理	72	6.3 蒸气压缩式制冷系统的 典型流程	123
4.1.2 离心式制冷压缩机的特性	73	思考题	125
4.1.3 离心式制冷压缩机的能量调节	74	第7章 制冷系统的控制器件及其 自动控制	127
4.1.4 离心式制冷压缩机的特点	75	7.1 制冷系统的自动阀门	127
4.2 螺杆式制冷压缩机	75	7.1.1 电磁阀	127
4.2.1 螺杆式制冷压缩机的构造及 工作原理	76	7.1.2 主阀	128
4.2.2 螺杆式制冷压缩机机组及系统	78	7.1.3 恒压阀	131
4.2.3 螺杆式制冷压缩机的能量调节	79	7.1.4 冷却水量调节阀	132
4.2.4 螺杆式制冷压缩机的特点	80	7.1.5 止回阀	132
4.3 滚动转子式、涡旋式及斜盘式制 冷压缩机	81	7.1.6 电动调节阀	133
4.3.1 滚动转子式制冷压缩机	81	7.2 制冷系统常用的控制器	134
4.3.2 涡旋式制冷压缩机	82	7.2.1 温度控制器	134
4.3.3 斜盘式制冷压缩机	84	7.2.2 压力控制器	136
思考题	85	7.2.3 压差控制器	137
第5章 冷凝器和蒸发器	86	7.2.4 液位控制器	140
5.1 冷凝器的种类、基本构造及 工作原理	86	7.2.5 水流控制器	140
5.1.1 水冷式冷凝器	86	7.3 制冷系统的自动控制	142
5.1.2 空气冷却式冷凝器	89	7.3.1 蒸发器供液量的自动控制	142
5.1.3 蒸发式冷凝器	90	7.3.2 温度的自动调节	142
5.2 蒸发器的种类、基本构造及 工作原理	91	7.3.3 制冷系统的自动保护 及安全控制	143
5.2.1 冷却液体载冷剂的蒸发器	92	7.3.4 空调用制冷系统自动控制	144
5.2.2 冷却空气的蒸发器	97	7.3.5 冷藏库的库温调节与控制	147
5.3 冷凝器和蒸发器的传热分析	100	思考题	149
5.3.1 冷凝器的传热分析	101	第8章 空调冷冻站设计基础	150
5.3.2 蒸发器的传热分析	103	8.1 制冷设备的选择计算	150
思考题	104	8.1.1 制冷压缩机型号及台数的确定	150
第6章 节流机构、辅助设备及制冷 系统	105	8.1.2 冷凝器的选择计算	153
6.1 节流机构	105	8.1.3 蒸发器的选择计算	155
6.2 辅助设备	112	8.1.4 其他辅助设备的选择计算	156
6.2.1 润滑油的分离及收集设备	112	8.2 冷冻站的设计要求及制冷设备的 布置原则	158
6.2.2 制冷剂的贮存及分离设备	115	8.3 制冷系统管路的设计	159
6.2.3 制冷剂的净化设备	116	8.4 制冷设备与管路的隔热措施	164
6.2.4 安全设备	119	思考题	166
6.2.5 其他辅助设备	120	第9章 两级压缩和复叠式制冷	167
		9.1 两级压缩制冷循环	167

9.1.1 一级节流中间完全冷却的两级 压缩制冷循环.....	168	11.2.1 活塞式冷水机组	206
9.1.2 一级节流中间不完全冷却的两级 压缩制冷循环.....	168	11.2.2 螺杆式冷水机组	208
9.2 两级压缩制冷循环的 热力计算	169	11.2.3 离心式冷水机组	209
9.3 复叠式制冷	175	11.2.4 溴化锂吸收式冷水机组	210
思考题.....	178	11.3 空调冷水系统.....	213
第 10 章 溴化锂吸收式制冷装置	179	思考题.....	216
10.1 溴化锂吸收式制冷装置的工作原 理及其循环	179	第 12 章 热泵技术	217
10.1.1 溴化锂水溶液的性质及 $h-\xi$ 图	179	12.1 热泵技术概述	217
10.1.2 溴化锂吸收式制冷装置的 工作原理	181	12.2 理想热泵循环及热泵的种类.....	219
10.1.3 溴化锂吸收式制冷装置的工作 过程及理论循环	182	12.2.1 理想热泵循环	219
10.2 溴化锂吸收式制冷循环的 热力计算	184	12.2.2 热泵的种类	221
10.3 溴化锂吸收式制冷装置的附加 措施与辅助设备	190	12.3 吸收式热泵	221
10.3.1 附加措施	190	12.3.1 第一类吸收式热泵	222
10.3.2 辅助设备	191	12.3.2 第二类吸收式热泵	223
10.4 溴化锂吸收式制冷装置的种类、 型式和特点	193	12.4 热泵的热源	225
10.4.1 溴化锂吸收式制冷装置的种类 ..	193	12.4.1 对热源的一般要求及 热源的种类	225
10.4.2 溴化锂吸收式制冷装置的 几种型式	194	12.4.2 常用的热泵热源	228
10.4.3 溴化锂吸收式制冷装置的 特点	197	12.5 热泵的驱动能源和能源 利用系数	231
思考题.....	199	12.6 热泵的应用	232
第 11 章 空调制冷装置及空调 冷水系统	200	12.6.1 热泵供暖设备	232
11.1 空气调节装置.....	200	12.6.2 热泵在游泳馆及人工冰场中的 应用	235
11.1.1 空调器	200	12.6.3 热泵在茶叶工厂中的综合应用 ..	237
11.1.2 恒温恒湿空调器	203	12.6.4 热泵用于废热的回收	238
11.1.3 特殊用途的空调器和空调 除湿机	204	12.6.5 热泵干燥装置	238
11.2 空调用冷水机组	206	思考题.....	239
		第 13 章 冷藏库设计基础	241
		13.1 冷藏库概述	241
		13.1.1 食品冷加工工艺	241
		13.1.2 冷藏库分类	241
		13.1.3 冷藏库的建筑特点	243
		13.2 冷藏库容量和制冷负荷 的确定	245
		13.2.1 冷库容量的确定	245
		13.2.2 冷藏库制冷负荷的计算	247
		13.3 冷藏库的冷却方式及 制冷系统	251

13.3.1 冷藏库的冷却方式	251	表 A-2 氯化钠水溶液的热物理性质	283
13.3.2 冷库的制冷系统及机房系统	254	表 A-3 氯化钙水溶液的热物理性质	284
13.3.3 冷库制冷系统的融霜	257	表 A-4 乙二醇水溶液的热物理性质	286
13.4 冷库技术的发展	258	表 A-5 NH_3 饱和液体及蒸气的 热力性质	288
13.4.1 装配式冷库	258	表 A-6 R12 饱和液体及蒸气的 热力性质	291
13.4.2 夹套冷库	259	表 A-7 R22 饱和液体及蒸气的 热力性质	294
13.4.3 气调冷库	260	表 A-8 R134a 饱和液体及蒸气的 热力性质	297
13.4.4 立体式自动化冷库	262	表 A-9 R142b 饱和液体及蒸气的 热力性质	298
思考题	262	表 A-10 R600a 饱和液体及蒸气的 热力性质	300
第 14 章 蓄冷技术	263	附录 B 附图	303
14.1 蓄冷技术概述	263	图 B-1 NH_3 的 $p-h$ 图	303
14.1.1 蓄冷的基本概念	263	图 B-2 R12 的 $p-h$ 图	304
14.1.2 蓄冷系统分类	264	图 B-3 R22 的 $p-h$ 图	305
14.1.3 蓄冷空调系统特点	264	图 B-4 R134a 的 $p-h$ 图	306
14.2 蓄冷空调系统	265	图 B-5 R142b 的 $p-h$ 图	307
14.2.1 水蓄冷空调系统	265	图 B-6 R600a 的 $p-h$ 图	308
14.2.2 冰蓄冷空调系统	269	图 B-7 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 溶液的 $h-\xi$ 图之一	309
14.2.3 冰蓄冷系统与水蓄冷系统 的比较	278	图 B-8 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 溶液的 $h-\xi$ 图之二	310
14.2.4 蓄冷空调系统应用场合	279	参考文献	311
思考题	279		
附录	281		
附录 A 附表	281		
表 A-1 饱和水及饱和水蒸气的 热力性质	281		

绪 论

0.1 人工制冷的方法

“制冷”就是采用人工的方法，使某一物体或空间达到比环境介质更低的温度，并保持这个低温。这里所说的环境介质，是指自然界的空气和水。为了使某一物体或空间达到并维持所需要的低温，就得不断地从它们中间取出热量并转移到环境介质中去。这个不断地从被冷却对象取出并转移热量的过程，就是制冷过程，简称制冷。

实现制冷可以通过两种途径：利用天然冷源和利用人工冷源。

天然冷源是自然界存在的冷源，例如冰、雪和地下水等，都可以作为冷源，用作食品的冷藏和防暑降温。我国对天然冰、雪的应用有着悠久的历史，而且在采集、贮存和使用天然冷源方面积累了丰富的经验，直到现在，天然冷源在一些地区仍然得到应用。天然冷源具有价廉、贮量大等优点，而且利用天然冷源不需要复杂的技术设备，所以在满足使用要求的前提下，应优先考虑利用天然冷源。但是利用天然冷源受时间、地区及运输等条件的限制，一般不能得到 0°C 以下的温度，而且不易控制和调节，所以天然冷源只用在防暑降温和少量食品的短期贮藏方面。工业生产及科学试验等对低温的要求，大都是通过人工冷源（或称人工制冷）来实现。

人工冷源是利用人工的方法实现制冷。人工制冷需要比较复杂的技术和设备，而且生产的冷量成本较高，但是它却完全避免了天然冷源的局限性，特别是可以根据不同的要求获得不同的低温。

人工制冷可以获得的温度称为制冷程度。制冷程度与所采用的制冷设备及其操作方法有关。根据制冷程度的不同，人为地把制冷技术分为普通制冷和低温制冷两部分。一般将 120K 以上的制冷称为普通制冷，更低的制冷程度则属于低温制冷范围。本书主要涉及普通制冷的技术领域。

实现制冷所需要的机器和设备的总和称为制冷机。制冷机中使用的工作物质称为制冷工质或制冷剂。人工制冷的的方法很多，常见的有以下几种。

1. 利用液体气化的吸热效应实现制冷（蒸气制冷）

任何液体气化时都产生吸热效应，在恒温下单位质量的液体气化时所吸收的热量叫气化潜热。不同物质的液体在同一压力下，它们的饱和温度（沸点）及气化潜热各不相同；即使是同一种液体，其饱和温度和气化潜热也各不相同，压力降低时液体的沸点下降，气化潜热增大。例如，在 1 个物理大气压（ 101325Pa ）下，水的饱和温度约为 100°C ，气化潜热为 2256.9kJ/kg ；氨的饱和温度为 -33.4°C ，气化潜热为 1369.1kJ/kg 。而同样是水，在 874Pa 压力下气化时，可达到约 5°C 的饱和温度，气化潜热为 2489.8kJ/kg 。因此，只要选择适当的工作物质、创造合适的压力条件，就可以利用液体的气化获得所要求的温度。

液体的气化潜热可按下式计算：

$$r = h'' - h' = T(s'' - s') \quad (0-1)$$

式中 r ——液体的气化潜热 (kJ/kg);

T ——液体的饱和温度 (K);

h' 、 h'' ——分别为饱和液体、饱和气体的比焓 (kJ/kg);

s' 、 s'' ——分别为饱和液体、饱和气体的比熵 [kJ/(kg·K)]。

每 1kg 制冷剂气化时的吸热量, 称为单位制冷量 q_0 。它不仅与液体的气化潜热有关, 还与开始气化前湿蒸气的干度有关。压力较高的饱和液体经节流减压后进入两相区, 并含有一定的湿蒸气。所以, 单位制冷量可表示为

$$q_0 = r(1 - \chi) \quad (0-2)$$

式中 q_0 ——单位制冷量 (kJ/kg);

χ ——湿蒸气的干度。

利用液体气化的吸热效应实现制冷称为蒸气制冷。蒸气制冷可分为蒸气压缩式、蒸气喷射式和吸收式三种类型。目前人工制冷中使用最为广泛的是蒸气压缩式制冷。

2. 利用气体膨胀产生的冷效应实现制冷 (气体膨胀制冷)

高压气体绝热膨胀时, 对膨胀机作功, 同时气体的温度降低, 用这种方法可以实现制冷。与蒸气制冷相比, 气体膨胀制冷是一种没有相变的制冷方式, 通常多以空气作为工质, 所以也称为空气膨胀制冷。构成这种制冷方式的循环系统称为理想气体的逆向循环系统。最早出现的空气制冷机采用定压循环。

图 0-1 示出了采用定压循环的空气制冷机流程及其循环的 $T-s$ 图。循环由两个等压过程和两个等熵过程组成。从压缩机 A 排出的高温高压 (T_2 、 p_2) 气体进入空气冷却器 B, 并在压力 p_2 下被定压冷却到状态 3 (T_3 、 p_3), 然后进入膨胀机 C 中等熵膨胀到状态 4 (T_4 、 p_4), 温度和压力同时降低, 成为低温低压的冷气流, 冷气进入冷室 D, 在定压下吸收被冷却对象的热量而实现制冷, 空气温度回升到 T_1 。压缩机再由冷室中吸入状态 1 (T_1 、 p_1) 的气体, 等熵压缩到状态 2 (T_2 、 p_2), 这样便完成了一个循环。

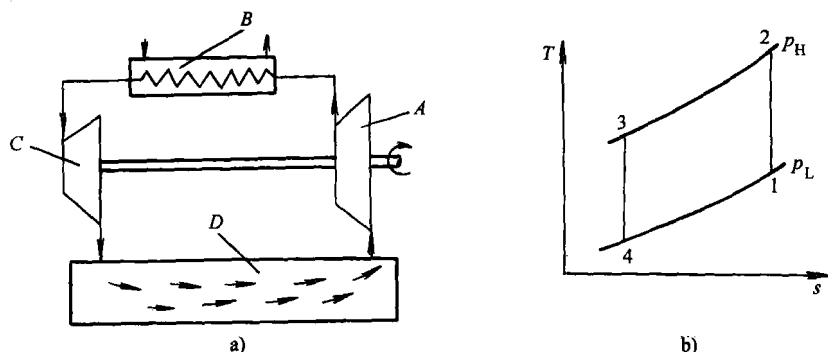


图 0-1 采用定压循环的空气制冷机

a) 系统流程图 b) 循环的 $T-s$ 图

A—压缩机 B—空气冷却器 C—膨胀机 D—冷室

循环中各有关状态参数的关系如下

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad T_3/T_4 = (p_3/p_4)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

式中 κ ——空气的等熵指数。

因为

$$p_2 = p_3 = p_H \quad p_1 = p_4 = p_L$$

所以

$$T_2/T_1 = (p_H/p_L)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad T_3/T_4 = (p_H/p_L)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

即

$$T_2 = T_1 (p_H/p_L)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad T_3 = T_4 (p_H/p_L)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

式中 p_H/p_L ——压力比。

每 1kg 空气在冷室中的吸热量 q_0 (kJ/kg) 为

$$q_0 = h_1 - h_4 = c_p(T_1 - T_4)$$

式中 c_p ——空气的定压平均比热容 [kJ/(kg·K)]。

循环所消耗的净功为

$$w_t = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4) = c_p[(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)]$$

式中 w_t ——循环中单位质量空气所消耗的净功 (kJ/kg)。

循环的制冷系数 ε_0 为

$$\varepsilon_0 = q_0/w_t = \frac{1}{(p_H/p_L)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

气体逆向循环是利用气体吸收显热实现制冷的。因为气体的比热容很小，单位制冷量就很小，一般情况下要求气体的流量大，循环的经济性较低，所以后来气体膨胀制冷逐渐被蒸气压缩式制冷所取代。现在它主要用于飞机机舱的冷却降温，而且在循环型式上也有较大改进。

3. 利用半导体的热电效应实现制冷（热电制冷）

一百多年以前，人们就发现了温差电现象。如图 0-2 所示，由两种不同导体 A 和 B 组成的一个闭合回路，当其中一个联接点被加热（称为热端），另一个联接点被冷却（称为冷端）时，即两个联接点有温差存在时，便在回路中产生了电动势，称为温差电动势。温差电动势的大小与导体的性质及两个联接点的温差有关。对于两种导体，当冷端温度一定时，电动势的大小只与热端的温度有关。根据这个电动势大小，就可确定热端周围介质的温度。这种温差电现象又叫温差电效应，也就是通常用来测量温度的热电偶原理。相反，如图 0-3 所示，用两种不同导体联接成闭合回路，并在回路中接入直流电源。当有电流通过环路时，则一个联接点的温度就会降低成为吸热端（冷端），而另一个联接点的温度会升高成为放热端（热端），这种现象称为帕尔帖效应，或称热电制冷和制热。

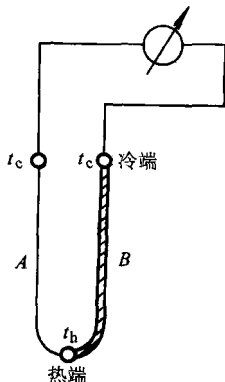


图 0-2 热电偶原理

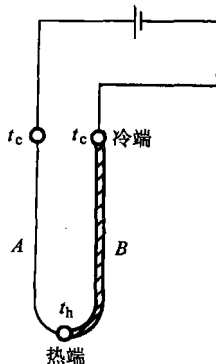


图 0-3 热电制冷原理

由于一般金属的帕尔帖效应很弱，即各联接点的吸热或放热作用十分微弱，因此在制冷和制热方面没有实用价值。所以，虽然早在一百多年以前就发现了帕尔帖效应，但真正用于制冷，还是由于半导体技术的发展才开始的，一些半导体材料的帕尔帖效应就比较明显。所谓热电制冷，就是利用半导体材料的这一效应进行制冷。

图 0-4 示出半导体制冷原理。它采用一种称为“空穴型”(P 型)的半导体材料，和另一种称为“电子型”(N 型)的半导体材料，组成半导体制冷电偶，电偶之间利用铜或铝联接片焊接而成。当直流电从 N 型半导体流向 P 型半导体时，则在联接片 (2、3) 上产生吸热现象，这端称为冷端；而在联接片 (1、4) 上便产生放热现象，该端称为热端。这样冷端便实现了制冷。如果电流方向相反，则冷、热端就会互相变换，原来的冷端变为热端、热端变为冷端。一个电偶所产生的制冷效应较小，所以实用上是将数十个这样的电偶串联而成，将不同电偶的冷端和热端分别排列在一起组成热电堆，如图 0-5 所示。

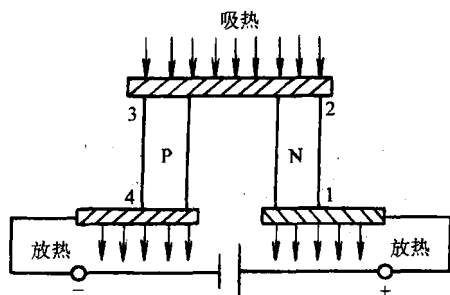


图 0-4 半导体制冷电偶

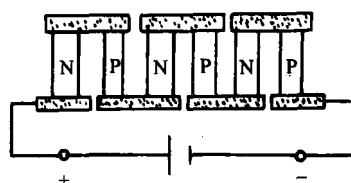


图 0-5 热电堆

热电制冷的系统和过程，不需要凭借某种工质实现能量的转移；整个装置没有任何机械运动部件，运行中无噪声；设备体积小，便于实现自动控制。但是热电制冷耗电量大，制冷量小，能够获得的温差也不大。目前热电制冷在国防、医疗、畜牧等方面都已得到应用，但多应用在冷量需求量较小的场合。

目前，在制冷与空气调节技术中，蒸气制冷方法占绝对优势，其中又以蒸气压缩式制冷应用最为普遍。因此，本书将重点介绍蒸气压缩式制冷的原理及其设备。

0.2 制冷技术在国民经济中的应用

最初制冷主要用于防暑降温和食品的贮藏。但是，随着社会的进步和科学技术的发展，制冷技术在各个领域中都得到广泛的应用。它直接关系到很多工业部门的生产发展和人类生活水平的提高。制冷技术在国民经济中应用极为广泛，主要应用在下面几个方面。

1. 用于空气调节的冷源

空气调节广泛地应用于工业生产及生活服务设施中。随着科学技术的发展，许多仪器仪表厂、纺织厂、精密机床厂、感光材料厂、电子元件厂等的一些生产工艺过程，都需要在一定的温度和湿度条件下进行，需要进行空气调节；为了保证人们的工作和生活环境的舒适，一些旅馆、饭店、大型公共建筑、交通运输设施等，都需要应用空气调节装置。而作为冷源，制冷则是空气调节装置中不可缺少的组成部分。

2. 用于食品工业

食品工业的发展与制冷技术有着密切的关系。目前, 制冷技术广泛地用于食品工业。一些易腐食品, 如鱼、肉、蛋、果品、蔬菜等的加工、贮藏和运输, 都需要在低温条件下进行, 以保证食品的质量和减少干缩损耗。现代化的食品工业, 从食品的生产、贮运到销售, 都已经形成完整的冷链。所采用的制冷装置包括冷藏库、冷藏汽车、冷藏船、冷藏列车、冷藏柜、冰箱等。其他如冷饮品、饮料等工业也都需要制冷装置。

3. 用于石油化学工业

石油化学工业中许多工艺过程都需要在低温下进行, 例如盐类的结晶、溶液的分离、石油的脱脂、天然气的液化、石油的裂解等过程。化学工业中的合成橡胶、合成纤维、合成塑料、合成氨的生产都需要制冷。

4. 用于产品的性能试验及科学研究

一些工业产品如飞机发动机、航空仪表、机车车辆、无线电和电子产品等, 一些武器如坦克、大炮及弹药, 都需要在 $-40 \sim -70^{\circ}\text{C}$ 的低温下进行性能试验。

在机械制造业中, 对钢材进行 $-70 \sim -90^{\circ}\text{C}$ 的低温处理, 可以改变其金相组织, 使奥氏体变成马氏体, 提高钢制机械零件的硬度及耐磨性。

一些科学研究机构, 如材料研究所、物理研究所、化学研究所等都需要人工制冷, 以满足科学研究和试验的需要。

5. 用于医疗卫生方面

一些医疗手术, 如心脏、肿瘤、白内障的切除等, 皮肤和眼球的移植手术及低温麻醉等, 都需要制冷技术。医药工业中利用真空冷冻干燥法冻干生物制品及药品。一些药物、疫苗及血浆等都需要在低温下贮藏。

此外, 人工制冷用于农牧业中的种子低温处理, 建造人工气候育秧室。建筑工程及矿井、隧道的施工中, 如遇到流砂和泥沼, 可以用人工制冷的方法将流砂或泥沼冻结, 然后就可方便地进行施工(冻土施工法)。在许多近代尖端科学技术部门中, 如微电子技术、能源、新型材料、生物技术、航天技术、卫星通信、红外技术等都需要制冷技术。

总之, 制冷技术的应用是非常广泛的, 随着科学技术的进步, 社会经济的发展, 人类生活水平的不断提高, 制冷技术在国民经济中的应用将展示出更加宽广的前景。

0.3 制冷技术的发展简况

现代制冷技术作为一门科学, 是 19 世纪中期和后期发展起来的。1834 年, 美国人波尔金斯 (Perkins) 试制成功了第一台以乙醚为制冷剂的蒸气压缩式制冷机。1844 年高里 (Gorrie) 在美国费城用封闭循环的空气制冷机建立了一座空调站。1859 年法国人卡列 (Carre) 制成了氨水吸收式制冷机。1875 年卡列和林德 (Linde) 用氨作制冷剂, 制成了氨蒸气压缩式制冷机, 从此蒸气压缩式制冷机一直占据统治地位。1910 年左右, 马利斯·莱兰克 (Maurice Lehland) 在巴黎发明了蒸气喷射式制冷机, 由于它的热力系数较小, 且容量一般较大, 所以应用不甚广泛。

进入 20 世纪以后, 制冷技术有了更大的发展。随着制冷机械的发展, 制冷剂的种类也不断增多。1930 年以后, 氟利昂制冷剂的出现和大量应用, 曾使压缩式制冷技术及其应用范围得到极大的发展。由于氟利昂具有良好的热力性质, 使制冷技术的发展进入了一个新的

阶段。1974 年以后, 人类发现氟利昂簇中的氯、氟碳化物 (简称 CFC), 能严重地破坏臭氧层, 危害人类的健康和破坏地球上的生态环境, 是公害物质。因此减少和禁止 CFC 的生产和使用, 已成为国际社会共同面临的紧迫任务, 研究和寻求 CFC 制冷剂的替代物, 以及面对由于更换制冷剂所涉及的一系列工作, 也成为急需解决的问题。十多年来, 世界各国都投入了大量的人力和财力, 对一些有可能作为 CFC 的替代物及其配套技术进行了大量的试验研究, 并开始使用混合溶液作为制冷剂, 使蒸气压缩式制冷的发展有了重大的技术突破。与此同时, 其他制冷方式和制冷机的研究工作进一步加快, 特别是吸收式制冷机已经有了更大的发展。而且面对世界性的能源危机和环境污染, 对制冷机的发展提出更高的节能和环保要求。

现在制冷技术正处于一个飞速发展的时期。人们利用逆向循环实现热量的转换, 热泵也列入了制冷技术的范畴。受微电子、计算机、新型原材料和其他相关工业领域技术进步的渗透和促进, 制冷技术取得了突破性的发展。从制冷的温度范围来说, 可以获得从稍低于环境温度直到接近于绝对零度的低温。单机组的制冷量从几十瓦到几万千瓦, 成套建筑空调用的离心式制冷机组制冷量接近 25000kW。制冷机的种类和型式在不断增加, 制冷系统的流程、主机、辅机、制冷剂及自动控制都在不断地发展。电子计算机在制冷机的设计、制造、测试、控制及生产管理等方面的广泛应用, 为更好地实现设计的优化及制冷系统调节控制的自动化, 为取得最佳的技术经济效益和环境效益, 提供有利的条件和可靠的保障。

中国人很早就知道利用天然冰进行食品的冷藏和防暑降温, 在《诗经》和《周礼》中就有了“凌人”和“凌阴”的记载。“凌”就是冰, 这说明在奴隶社会的周朝, 已有专门管理冰的人员和贮藏冰的房屋。1986 年在陕西省姚家岗秦雍城遗址, 发掘出可以贮藏 190m³ 冰块的地下冰室。这说明早在春秋时期, 秦国就很重视食物冷藏和防暑降温方面的设施建设。我国劳动人民在采集、贮运和使用天然冰方面积累了丰富的经验。然而, 由于中国长期处于封建社会, 束缚了生产力的发展和技术的进步, 现代的制冷技术一直没有得到发展。直到 1949 年, 我国还没有能制造制冷设备的工厂, 只在沿海几个大城市有几家进行配套安装空调工程的洋行和修理冰箱的小作坊, 制冷设备均为国外引进。全国仅有少数冷藏库, 总库容量不到 3 万 t。

我国的制冷机制造工业起源于 20 世纪 50 年代末期, 是在几个安装、修理厂的基础上发展起来的。从开始仿制生产活塞式制冷机, 到自行设计和制造, 并制定了有关的系列标准, 以后又陆续发展了其他类型的制冷机。目前已有活塞式、螺杆式、离心式、涡旋式、吸收式、热电式及蒸汽喷射式等类型的制冷装置, 许多产品的质量和性能已接近和达到世界先进水平。

以往我国的制冷装置主要用于工业生产和大型建筑的空调中。近年来由于经济的发展和居民生活水平的不断提高, 制冷装置用于生活中的比例迅速提高, 产品的数量也急骤增加。据统计, 到 20 世纪末期, 我国冷藏库的总库容量超过 500 万 t; 已分别拥有年生产 1500 万台电冰箱和房间空调器的生产能力, 电冰箱和空调器的产量均居世界第一。可以预计, 随着国民经济的发展和居民生活水平的提高, 制冷机的生产和应用将会达到更高的水平。

第 1 章 蒸气压缩式制冷的热力学原理

1.1 热力学基本定律与理想制冷循环

1.1.1 热力学基本定律在制冷技术中的应用

热力学是研究热能与其他形式能量之间相互转换的规律，以及热力系统内、外条件对能量转换的影响的学科。制冷技术应用了热力学原理，服从热力学基本规律。

在人工制冷中，不仅有热量的转移，也包括热功转换的过程。热力学第一定律是能量守恒和转换定律在具有热现象的能量转换中的应用。它指出：自然界的一切物质都具有能量，能量能够从一种形式转换为另一种形式，从一个物体传递给另一个物体，在转换与传递过程中能量的数量不变。

热力学第一定律仅指出能量转换在数量上的关系。然而遵循热力学第一定律的过程却未必都能实现，还须同时遵循热力学第二定律。热力学第二定律揭示了能量交换和转换的条件、深度和方向。

热力学第二定律指出：机械功可以全部变为热，但热却不能无条件地全部转换成机械功，即不可能从单热源取热，使之完全变为功而不引起其他的变化。由此可知，利用一个热源（或冷源）无法完成循环过程。制冷剂在循环过程中，除了向低温热源吸热（制冷）外，还必须向高温热源排热。第二定律又指出：不可能把热从低温物体传至高温物体而不引起其他变化。这就是说，热量能自发地从高温物体传向低温物体，而不能自发地从低温物体传向高温物体。就象水不能自发地从低处流向高处一样，只要借助于外界的力量（消耗一定的机械功，引起了其他变化），就能使水从低处流向高处。这个外界的作用力称为“补偿过程”。热量由低温物体传向高温物体，也必须有一个补偿过程。人工制冷的过程就是在外界的补偿下，将低温物体的热量向高温物体传送的过程。目前使用的补偿过程的方法有两种：一种是消耗功（机械能或电能）来提高制冷剂的压力和温度，使制冷剂将自低温物体（低温热源）吸取的热量，连同机械功转换成的热量一同排至环境介质（高温热源）中，从而完成热量从低温传向高温的过程；另一种是消耗热能，用热量由高温传向低温的自发过程作为补偿，来实现将低温物体的热量传送到高温物体的过程。

为了连续地实现能量的转移和转换，就必须使工质经过一系列的状态变化完成循环。随着效果的不同，循环可分为正向与逆向两种。利用工质的状态变化，将热能转换为机械能的循环叫做正向循环，它在热力图上依顺时针方向进行。利用工质进行的状态变化，通过消耗能量使热量从低温物体（冷源）传给高温物体（热源）的循环叫做逆向循环，它在热力图上是依逆时针方向进行的。

1.1.2 具有恒温热源的理想制冷循环——逆卡诺循环

在热力学中，把由互相交替的两个等温过程和两个绝热过程组成的正向循环称为卡诺循环。它是工作在一个恒温热源和一个恒温冷源之间的理想热机循环。按与卡诺循环相同路线

而循相反方向进行的循环叫做逆卡诺循环。图 1-1 所示的是逆卡诺循环的 $T-s$ 图。制冷工质在恒温冷源（被冷却物体）的温度 T'_e 和恒温热源（环境介质）的温度 T'_c 间，按可逆循环进行工作。制冷工质在吸热过程中，其温度与被冷却物体的温度 T'_e 相等，在放热过程中，与环境介质温度 T'_c 相等。也就是说在吸热和放热过程中，工质与被冷却物体及环境介质之间没有温差，传热是在等温下进行的，压缩过程和膨胀过程都是在没有任何损失的情况下进行的。循环中制冷工质沿绝热线 3-4 膨胀，温度从 T'_c 降低至 T'_e ，然后沿等温线 4-1 膨胀。在等温膨胀过程中，工质在 T'_e 温度下，从被冷却物体吸收热量 q_0 ；工质再从状态 1 被绝热压缩至状态 2，温度从 T'_e 升高至 T'_c ；最后沿等温线 2-3 压缩。在等温过程中，工质在 T'_c 温度下向高温热源（环境介质）放出热量 q_c 。

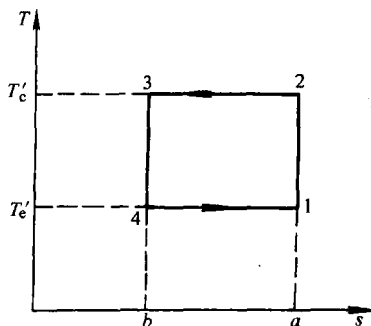


图 1-1 逆卡诺循环的 $T-s$ 图

这样，每一循环过程中，1kg 工质从低温热源吸取 q_0 的热量，所消耗的循环净功为 w_0 ，向高温热源（环境介质）放出热量 q_c 。根据热力学第一定律，则

$$q_c = q_0 + w_0 \quad (1-1)$$

式中 w_0 ——循环净功，它为压缩功 w_c 与膨胀功 w_e 之差，即 $w_0 = w_c - w_e$ 。

制冷循环的性能指标为制冷系数，它表示消耗单位功量所能获得的制冷量，用 ϵ 表示。

$$\epsilon = q_0 / w_0 \quad (1-2)$$

逆卡诺循环的制冷系数可从图 1-1 推得：

$$q_0 = T'_e(s_1 - s_4) = T'_e(s_a - s_b) \quad (1-3)$$

$$q_c = T'_c(s_2 - s_3) = T'_c(s_a - s_b) \quad (1-4)$$

$$w_0 = q_c - q_0 = (T'_c - T'_e)(s_a - s_b) \quad (1-5)$$

所以逆卡诺循环的制冷系数为

$$\epsilon_c = \frac{q_0}{w_0} = \frac{T'_e(s_a - s_b)}{(T'_c - T'_e)(s_a - s_b)} = \frac{T'_e}{T'_c - T'_e} = \frac{1}{\frac{T'_c}{T'_e} - 1} \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可见，逆卡诺循环的制冷系数与制冷工质的性质无关，仅取决于低温热源（被冷却物体）的温度 T'_e 和高温热源（环境介质）的温度 T'_c 。 T'_c 越低， T'_e 越高，制冷系数越大，制冷循环的经济性越好。而且 T'_e 的变化比 T'_c 的变化对循环的制冷系数影响更大，这点可以从下面两个偏导数的绝对值看出。

$$\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_c} \right) \right| = \frac{T'_e}{(T'_c - T'_e)^2} \quad \left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_e} \right) \right| = \frac{T'_c}{(T'_c - T'_e)^2}$$

因此

$$\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_e} \right) \right| > \left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_c} \right) \right|$$

逆卡诺循环的一个重要条件，就是制冷工质与被冷却物体和冷却介质之间，必须无温差情况下相互传热。可是实际的热交换过程总是在有温差的情况下进行的，否则理论上要求换热设备（蒸发器或冷凝器）具有无限大的传热面积，这当然是不可能的。对于实际循环的制冷系数小于逆卡诺循环的制冷系数可予以推证。比如热交换时存在温差，因而在吸热过程

中, 工质的温度 T_e 应低于低温热源的温度 T'_e , 即 $T_e < T'_e$ 。在放热过程中, 工质的温度 T_c 应高于高温热源的
温度 T'_c , 即 $T_c > T'_c$ 。将具有传热温差的制冷循环画在 $T-s$ 图上, 如图 1-2 所示。由于存在传热温差, 即 $T_e = T'_e - \Delta T_e$ 、 $T_c = T'_c + \Delta T_c$ 。为了使 1kg 制冷工质所获得的制冷量与逆卡诺循环的相同, 图中面积 $b4'1'a'b$ 应等于面积 $b41ab$ 。因此有传热温差的制冷循环所消耗的功量为面积 12341, 它比逆卡诺循环多消耗的功量在图中为斜线所示出的面积。这种由两个等温过程和两个绝热过程组成的有传热温差制冷循环的制冷系数为

$$\epsilon = \frac{T_e}{T_c - T_e} = \frac{1}{\frac{T_c}{T_e} - 1}$$

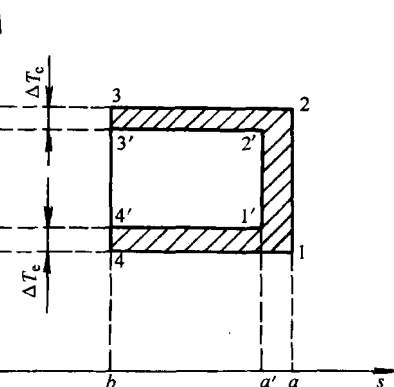


图 1-2 有传热温差制冷循环的 $T-s$ 图

将它与逆卡诺循环的制冷系数相比, 由于 $T_c > T'_c$, $T_e < T'_e$, 所以 $\epsilon < \epsilon_c$ 。

由此可见, 有传热温差的制冷系数总是小于逆卡诺循环的制冷系数。这点在热力学第二定律中已经证明: 由两个等温过程与两个绝热过程所组成的逆卡诺循环最经济, 其制冷系数也最大, 任何实际制冷循环的制冷系数都小于逆卡诺循环的制冷系数。因为逆卡诺循环是在没有传热温差和没有任何损失的可逆情况下进行的, 没有任何不可逆损失, 所以它是具有恒温热源的理想制冷循环。任何实际过程都不可能是无传热温差或无任何损失的机械运动, 所以逆卡诺循环实际上是无法实现的。但是, 逆卡诺循环不仅从理论上指出了提高制冷装置经济性的重要方向, 例如应使制冷工质蒸发温度 T_e 不要过低, 使冷凝温度 T_c 不要过高, 同时它还可用作评价实际制冷循环完善程度的指标。

实际制冷循环中, 制冷工质在流动或状态变化过程中, 因摩擦、扰动及内部不平衡等因素而引起一定的损失, 在换热器中, 因存在传热温差而引起传热损失。所以, 实际制冷循环是一个不可逆循环, 其不可逆程度用热力完善度衡量。通常将工作于相同温度间的实际制冷循环的制冷系数 ϵ , 与可逆循环的制冷系数 ϵ_c 的比值, 称为该不可逆循环的热力完善度, 用 η 表示, 即

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \quad (1-7)$$

热力完善度是用来表示实际制冷循环接近逆卡诺循环的程度。它的值越接近 1, 说明实际循环越接近可逆循环, 不可逆损失越小, 经济性越好。

热力完善度也是制冷循环的一个技术经济指标, 但其与制冷系数的意义不同。 ϵ 只是从热力学第一定律的数量角度反映循环的经济性, 而 η 是同时考虑了能量转换的数量关系和实际循环中不可逆程度的影响。从数值上看, ϵ 可以小于 1、等于 1 或大于 1, η 则始终小于 1, 因为理想的可逆循环实际上是不可能达到的。当比较两个制冷装置循环的经济性时, 如果两者的工作温度 T_c 、 T_e 相同, 采用 ϵ 与采用 η 进行比较是等价的; 如果两者的 T_c 、 T_e 不相同, 只有对它们的 η 加以比较才是有意义的, 因为这时只比较 ϵ 不能看出哪个制冷装置循环的经济性更好。

1.1.3 具有变温热源的理想制冷循环——劳伦兹循环

逆卡诺循环必须具备的条件之一是高、低温热源温度恒定。制冷装置在实际运行中, 高