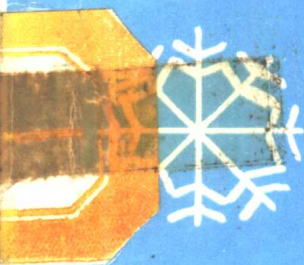




制冷系统及其原理

徐扬禾 主编



航空工业出版社

制冷系统及其原理

主 编 徐扬禾
副主编 李 敏 吴子康 赵竞全

航空工业出版社

1993

(京) 新登字161号

内 容 简 介

本书绝大部分章节涉及普通制冷范围, 主要介绍各制冷系统热力学原理及其分析, 包括蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷、热电制冷和空气制冷。增加了具有发展前途的磁制冷和制冷循环的能量分析法(焓分析法和焓分析法)。

本书是空调制冷专业的主要选修课教材, 也可供从事空气调节、冷藏、冷冻等有关制冷技术方面的科技人员参考。

制 冷 系 统 及 其 原 理

主 编 徐扬禾

副主编 李 敏 吴子康 赵竞全

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号)

— 邮政编码: 100029 —

全国各地新华书店经售

煤炭工业出版社印刷厂印刷

1993年12月第1版

1993年12月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 10.75

印数: 1—2000

字数: 267千字

ISBN 7-80046-666-3/G·123

定价: 5.30元

前 言

在自然界，热量只能自发地从高温物体向低温物体传递，而不能反之。要想使某一物体的温度低于其周围介质的温度，只能依靠人工方法才能实现。

制冷就是采用人工的方法，使自然界中某物（如气体、液体或固体）的温度低于周围环境温度。

制冷技术是一门研究人工制冷原理、方法以及如何运用机械设备获得低温的科学技术。机械制冷所需机器和设备的总和称为制冷机。按照制冷所达到的低温范围，制冷可分为如下几个领域：

120K以上，普通制冷（普冷）；

120~20K，深度制冷（深冷）；

20~0.3K，低温制冷；

0.3K以下，超低温制冷。

由于低温范围不同，所使用的工质、机器设备、采取的制冷方式及其所依据的具体原理有很大差别。

本教材绝大部分内容涉及普通制冷范围，主要介绍各种制冷方法、制冷系统的组成、制冷循环的热力学原理与分析。其中包括蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷、热电制冷、空气制冷以及其它制冷方法（如磁制冷）。对实现制冷循环所需的各种制冷附件，本书不作介绍，这方面内容，除了在一般的制冷书籍中都有详细的介绍外，其中一部分内容将在制冷附件专业课中学习。本书最后一章介绍了制冷循环的能量分析，重点介绍了熵分析法和焓分析法。

编写本教材的一个主导思想是，内容少而精、力求新颖、突出重点。

通过本课程的学习，要求掌握人工制冷方法的基本原理及其热力学分析与计算。

制冷的理论基础之一是热力学，本课程是热力学原理的实际应用。

本书由北京航空航天大学空调制冷技术研究所徐扬禾教授任主编（负责编写概论、第一、二、三、七、八章），李敏副教授编写了第六章，参加编写的还有赵竞全讲师（第五章）、吴子康讲师（第四章），朱春玲同志也参与了第八章的编写工作。

本书由华中理工大学高原副教授审稿，提出了许多宝贵意见，在此，谨向他致谢。

梅冰清同志为本书绘图，陈晏清同志为本书文稿的整理、抄写做了大量工作，在此，表示谢意。

本教材在编写过程中参阅了国内外有关资料和已发行的书刊（见参考文献），在此向这些书籍、资料的作者们表示感谢。

由于编写人员水平有限，书中难免有不妥和错误之处，热诚希望读者批评指正。

编者

1993年10月

目 录

概论

- 第一节 制冷技术的发展概况····· (1)
- 第二节 制冷技术在国民经济和生活中的应用····· (2)

第一章 制冷的的基本热力学原理及制冷方法

- 第一节 制冷的的基本热力学原理····· (4)
- 第二节 各种制冷方法····· (7)
- 第三节 热泵····· (7)

第二章 蒸汽压缩式制冷循环

- 第一节 单级蒸汽压缩式制冷的理论循环····· (9)
- 第二节 单级蒸汽压缩式制冷的实际循环····· (13)
- 第三节 制冷剂的过冷、过热及回热循环····· (16)
- 第四节 单级蒸汽压缩式制冷循环的热力计算····· (30)
- 第五节 单级蒸汽压缩式制冷机的性能及工况····· (22)
- 第六节 多级压缩····· (26)
- 第七节 复叠式制冷循环····· (34)

第三章 制冷剂与载冷剂

- 第一节 对制冷剂的要求····· (37)
- 第二节 制冷剂的分类····· (38)
- 第三节 常用制冷剂····· (40)
- 第四节 混合制冷剂····· (43)
- 第五节 载冷剂····· (44)

第四章 吸收式制冷

- 第一节 吸收式制冷原理与工作循环····· (47)
- 第二节 吸收式制冷的溶液热力学基础····· (49)
- 第三节 吸收式制冷的工质对····· (57)
- 第四节 氨水吸收式制冷机循环····· (62)
- 第五节 溴化锂吸收式制冷机循环····· (66)
- 第六节 吸收-扩散式制冷系统····· (70)
- 第七节 吸附式制冷····· (73)

第五章 热电制冷

- 第一节 热电制冷的基本原理····· (76)
- 第二节 热电制冷器的热力特性····· (77)
- 第三节 热电制冷的特点····· (83)
- 第四节 热电制冷的应用····· (85)

第五节 热电制冷器的选择	(86)
第六章 空气制冷技术	
引言	(88)
第一节 空气压缩制冷的热力学原理	(88)
第二节 空气压缩制冷机的基本循环	(93)
第三节 空气压缩制冷的实用流程	(98)
第四节 空气压缩制冷机实际流程设计中的几个问题	(107)
第五节 混合工质制冷技术简介	(113)
第六节 涡流管制冷	(118)
第七节 斯特林制冷循环与制冷机	(121)
第七章 磁制冷技术	
第一节 磁热效应	(124)
第二节 磁制冷循环	(125)
第三节 磁性材料工质及超导磁场	(127)
第四节 磁制冷机	(129)
第五节 磁制冷技术的应用	(133)
第八章 制冷循环的能量分析	
引言	(134)
第一节 熵分析法	(135)
第二节 焓和焓分析	(138)
第三节 焓-焓 ($e-h$) 图的构成及应用	(140)
参考文献	(143)
附表	
附表1 NH_3 饱和液体及蒸汽的热力性质	(146)
附表2 R11饱和液体及蒸汽的热力性质	(147)
附表3 R12饱和液体及蒸汽的热力性质	(149)
附表4 R13饱和液体及蒸汽的热力性质	(151)
附表5 R22饱和液体及蒸汽的热力性质	(153)
附表6 R22过热蒸汽的热力性质	(156)
附表7 R502饱和液体及蒸汽的热力性质	(159)
附图	
附图1 NH_3 过热蒸汽区的 $p-h$ 图	(160)
附图2 R11过热蒸汽区的 $p-h$ 图	(161)
附图3 R12过热蒸汽区的 $p-h$ 图	(161)
附图4 R22过热蒸汽区的 $p-h$ 图	(162)
附图5 R502过热蒸汽区的 $p-h$ 图	(162)
附图6 NH_3 的 $p-h$ 图	(163)
附图7 R12的 $p-h$ 图	(164)
附图8 R13的 $p-h$ 图	(165)
附图9 R22的 $p-h$ 图	(166)

概 论

第一节 制冷技术的发展概况

利用天然冰或冷水移走热量是人类祖先最早采用的一种制冷方法,已有五千多年的历史,用地窖作冷贮室,用泉水、井水作冷煤,就是我们熟知的制冷方法。

现代制冷技术作为一门技术科学,是19世纪中期和后期发展起来的迄今大约有一百多年的历史。

1834年美国**波尔金斯 (Perkins)**制成第一台用乙醚为工质的制冷机,它是现代蒸汽压缩式制冷机的雏形,这台机器的重要进步是实现了闭合循环。

在此期间,空气绝热膨胀开始用于制冷。1844年美国医生**高里 (Gorrie)**用封闭循环的空气制冷机为发烧病人建立了一座空调站。空气制冷机使他一举成名。**威廉·西门斯 (William Siemens)**在空气制冷机中确立了回热器原理。

1860年法国人**卡列 (Carre)**发明了氨水吸收式制冷系统。到1874年**林德 (Linde)**设计成功氨制冷机,被公认为制冷机的始祖,这些都对制冷技术的发展起了重大作用。

1913年美国工程师**拉森 (Lynsen)**制造出世界上第一台手操纵家用电冰箱,1918年美国**开尔文纳特 (Kelvinator)**公司首次在市场上推出自动电冰箱,1926年美国**奇异 (G.E.)**公司经过11年的试验,研制成功了世界上第一台全封闭式制冷系统自动电冰箱,1927年家用吸收式冰箱问世。随着化学、石油工业的发展,氟里昂制冷工质的出现和氟里昂制冷机的使用,给制冷技术带来了新的变革。

空调器最早在1920年由美国**开利 (Carrier)**公司制造出来,它是开启式压缩机组装的卧式柜型空调器。本世纪50年代初,窗式空调器问世。以后经过结构上的改进,增设了减音隔音设施,使空调器在创造宁静、安逸的环境方面得到了完善,品种日趋增多。

旧中国没有独立的制造各种制冷设备的能力,只有上海、广州等地有几家修理厂。解放后我国制冷技术发展很快。在1954年就能自行制造活塞式制冷机,并生产出了第一台冰箱。到本世纪60年代,我国各大城市基本上都建立了制冷机厂,并逐步形成了制冷行业。1964年起我国制冷工业走上了自行设计的道路。

目前,由于引进国外的先进技术和设备,生产能力增长很快,品种日益增多。1986年电冰箱的产量超过了220万台。到1990年全国单相空调器的产量突破60万台,社会拥有量超过260万台。我国自己已能设计制造制冷量大到8141kW的大型制冷机和制冷量为小到58W的小型制冷机,甚至制冷量为12W的半导体制冷机也能生产。制冷设备的生产厂已遍及全国各地。为了开发新能源,我国也开始了对太阳能制冷及地热制冷的研究。

现在世界制冷技术的发展,主要表现在:

1. 新型制冷工质的研究

由于CFC对臭氧层的破坏作用日益被人们所认识和重视,研制新的纯工质(如R134a),

寻找共沸或非共沸混合工质 (R22/R142b, R22/R152a等) 来替代有害工质R12, 已成为近期内制冷剂的主要研究方向, 这必将为蒸汽压缩式制冷机的发展开阔新的道路。

2. 新型制冷原理与系统的研究和开发。

吸收式制冷系统的完善与发展, 其耗电量已达到可与压缩式制冷机相当的水平。一种采用吸附式机理的太阳能冰箱, 利用活性炭和甲醇的吸附与解析作用, 可直接利用太阳能制冷。磁冰箱的研制, 如果室温下的超导能实现, 那么磁冰箱将成为最有竞争能力的发展对象。

3. 制冷设备规模不断扩大, 机器的种类和型式不断增多, 成套建筑空调用的冷水机组制冷量可达7000kW。

4. 电子计算机在制冷技术上的应用。

包括计算机辅助设计、辅助测试、自动控制、生产管理四个方面, 计算机技术的突飞猛进, 推动了制冷技术的蓬勃发展, 预示着制冷技术的发展有更广阔的前景。

第二节 制冷技术在国民经济和生活中的应用

随着国民经济的发展, 人民生活水平的逐步提高, 制冷技术的应用已渗透到国民经济的各个部门以及人们的日常生活中。

1. 在工业生产方面

机械制造中, 对钢进行低温处理 ($-70\sim 90^{\circ}\text{C}$), 可以改变金相组织, 使奥氏体变为马氏体, 提高钢的硬度和强度; 在机器的装配过程中, 利用低温能方便地实现过盈配合。

化学工业中, 借助于制冷, 可使气体液化、混合气分离以带走化学反应中的反应热; 盐类结晶, 润滑油脱酯需要制冷; 石油裂解, 有机合成 (橡胶、塑料、化纤、药物、染料), 酸碱等生产需要制冷; 天然气液化, 贮运也需要制冷。

2. 在农牧业方面

利用制冷对农作物种子进行低温处理, 创造人工气候室育秧, 保存良种精液, 人造雨、雪等。

3. 在建筑工程方面

利用制冷可实现冻土法采土方。在挖掘矿井、隧道、建筑江河堤坝时, 或在泥沼、砂水处掘进时, 可采用冻土法使工作面不坍塌, 保证施工安全。拌和混凝土时, 用冰代替水, 借冰的融化热补偿水泥的固化反应热, 可以制出大型的独柱混凝土构件, 可有效地避免大型构件因得不到充分散热而产生内应力和裂缝等缺陷。

4. 在空调方面

为了保证必要的恒湿和恒温的工作条件, 对冶金、纺织、印刷、精密仪表、电子工业等工厂, 某些有特殊要求的实验室、试验中心、计量室及较重要的地下建筑等都需要进行空气调节。而制冷则是空调装置中不可缺少的组成部分。此外, 大会堂、影院、剧院、医院、饭店等公用建筑, 以及列车、汽车、救护车、客轮、飞机等交通工具都日益广泛地应用空调装置。

5. 在食品工业方面

现代化的食品工业, 从食品生产、贮运到销售已经形成一条完整的冷链。所采用的制冷

装置有冷库、冷藏汽车、冷藏船以及冷藏列车等。另外，还有供食品零售商店、食堂、餐厅等用的商业冷冻柜，各类冷饮设备和各种带有制冷设备的商品冷藏陈列柜。至于家用电冰箱，随着人民生活水平的不断提高，已成为每个家庭的生活必需品之一。

6. 在国防工业方面

飞机及航天器的乘员舱及设备舱需要空调制冷设备，高寒条件下工作的发动机、汽车、坦克、大炮等常规武器，以及航空仪表、火箭、导弹中的控制仪器的环境模拟试验，都需要制冷及其提供实验的环境条件。原子能反应堆的控制也需要制冷。

7. 在医疗卫生方面

冷冻手术如心脏、外科、肿瘤、白内障、扁桃腺的切除手术，皮肤和眼球的移植手术及冰袋、“冷刀”、低温麻醉等，均需要制冷技术。除了低温保存疫苗、药品外，医药中还用冻结真空干燥法保存血液及皮肤。

此外，在微电子技术、能源、新型材料、卫星通讯、红外线探测与摄影、制取高真空、半导体激光、宇宙开发、生物技术等这些尖端科学领域中，制冷技术也有重要的应用。

复习思考题

1. 现代世界制冷技术的发展主要表现在哪些方面？
2. 制冷技术在国民经济中应用在哪些领域？

第一章 制冷的基本热力学原理及制冷方法

第一节 制冷的基本热力学原理

根据为制冷所提供的能量形式不同,制冷可分为两大类:输入功实现制冷和输入热量实现制冷。

一、输入功实现制冷

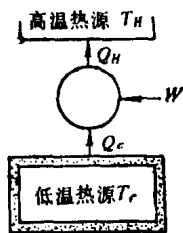


图 1-1 制冷机的能量转换关系示意图

图1-1为输入功实现制冷的能量转换示意图。制冷机从低温热源吸热,向高温热源放热,此时制冷机消耗功。

将热力学第一定律具体应用到制冷系统,可得出热量 Q_c 、 Q_H 和功 W 之间的关系:

$$Q_c + W = Q_H \quad (1-1)$$

制冷机消耗的功 W 与高低温热源的温度有关,也与制冷机的工作过程有关。当制冷机的各个过程均为可逆过程时,称为可逆制冷机。根据热力学第二定律,在两个恒温热源间工作的可逆制冷机,一个循环的熵增等于零。

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_c}{T_c} \quad (1-2)$$

式中 Q_H ——向高温热源放出的热量;

Q_c ——由低温热源吸收的热量;

T_H ——高温热源的温度;

T_c ——低温热源的温度。

将式(1-2)代入式(1-1)中,得到按逆卡诺循环运转的制冷机功与热之间的关系:

$$W = \left(\frac{T_H - T_c}{T_H} \right) \cdot Q_H = \left(\frac{T_H - T_c}{T_c} \right) \cdot Q_c \quad (1-3)$$

因为制冷的目的是从低温热源吸取热量,以维持其低于环境温度的低温,所以把衡量制冷机性能的系数定义为:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} \quad (1-4)$$

ε 称为制冷系数,是衡量制冷循环经济性的指标。制冷机消耗的功愈少,自低温热源吸取的热量愈多,则制冷系数愈大,循环愈经济。

对于按逆卡诺循环工作的制冷机,若用 ε_c 表示其制冷系数,则按公式(1-3)得

$$\varepsilon_o = \frac{T_o}{T_H - T_o} = \frac{1}{(T_H/T_o) - 1} \quad (1-5)$$

当 T_H 保持不变时， ε_o 随 T_o 的减小而减小，见图1-2。

图1-2表明：

1. 当 T_o 接近 T_H 时， ε_o 的数值迅速上升，即只需要输入少量的功，就能从低温热源吸取足够的热量。

2. 当 T_o 低时， T_H 的变化对 ε_o 的影响较小； T_o 高时， T_H 的变化对 ε_o 的影响较大。例如： $T_o = -50^\circ\text{C}$ ， T_H 从 40°C 增加到 50°C ， ε_o 减少10%； $T_o = 25^\circ\text{C}$ ， T_H 的同样变化，却使 ε_o 减少40%。

实际制冷机的制冷系数 ε 低于在同样两恒温热源间工作的可逆制冷机的制冷系数 ε_o ，但它们随 T_H 、 T_o 变化的规律是相同的。实际制冷机中， T_H 通常为环境温度， T_o 随需要而定。

二、输入热量实现制冷

图1-3是通过输入热量制冷的示意图。图中未表示出输入的功，因此在这种制冷方法中，所需输入的功，一般可忽略不计。

热量 Q_o 取自低温的被冷却物体， Q_H 来自高温蒸汽、燃烧气体或其它热源， Q_E 是系统在 T_E 温度下（通常是环境温度）放出的热量。

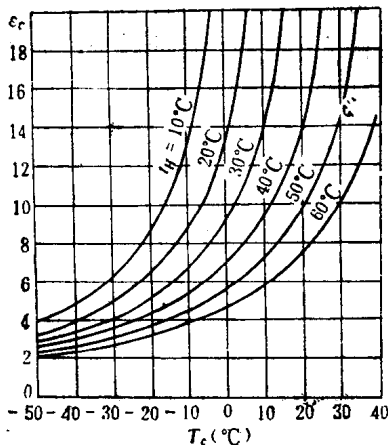


图 1-2 ε_o 与 T_H 、 T_o 的关系

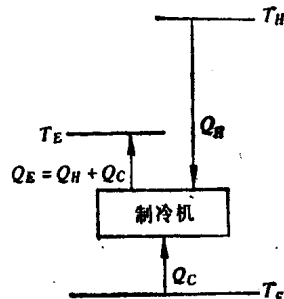


图 1-3 输入热量制冷的示意图

按热力学第一定律，

$$Q_E = Q_H + Q_o \quad (1-6)$$

对于可逆制冷机，根据热力学第二定律，在一个循环中，熵增为零，即

$$\frac{Q_E}{T_E} = \frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_o}{T_o} \quad (1-7)$$

从公式 (1-6)、(1-7) 得到

$$\frac{Q_o}{Q_H} = \left(\frac{T_o}{T_E - T_o} \right) \left(\frac{T_H - T_E}{T_H} \right) \quad (1-8)$$

通过输入热量制冷的制冷机，其经济性是以热力系数作为评价指标的。热力系数是

指获得的制冷量与消耗的热量之比，用 ζ 表示：

$$\zeta = \frac{Q_c}{Q_H} \quad (1-9)$$

对于可逆制冷机，热力系数用 ζ_o 表示：

$$\zeta_o = \frac{Q_c}{Q_H} \quad (1-10)$$

根据式(1-8)得

$$\zeta_o = \left(\frac{T_c}{T_E - T_o} \right) \cdot \left(\frac{T_H - T_E}{T_H} \right) \quad (1-11)$$

公式(1-11)表明，通过输入热量制冷的可逆制冷机，其热力系数等于工作在 T_E 、 T_o 之间的逆卡诺循环制冷机的制冷系数 ε_o 与工作在 T_H 、 T_E 之间的正卡诺循环的热效率 $(T_H - T_E)/T_H$ 的乘积。因此，不能将输入功的制冷系数与输入热量的热力系数直接比较。公式(1-8)表明，输入热量制冷的制冷机，其热力系数随加热热源温度 T_H 和被冷却物体温度 T_o 的升高而增加。

三、有传热温差的制冷循环

以上所讨论的过程都是按逆向卡诺循环来进行的，是假定制冷剂与热源之间的热交换具有无限小的温差，因此，就需要热交换器的传热面积无限大，这在实际情况是不能实现的。而制冷剂与周围介质、制冷剂与被冷却物体之间总是存在着一定的温差，那么有传热温差时，制冷循环中其制冷系数将发生什么变化呢？我们举一例子来说明。

设有热源温度 $T_H = 25^\circ\text{C}$ ，冷源温度（或称低温热源温度） $T_o = -10^\circ\text{C}$ 。

求：1) 在这两个温度间运转的可逆制冷机的制冷系数；

2) 当制冷剂与冷、热源传热温差为 10°C 时的制冷系数。

解：1) 对于可逆制冷机，无传热温差，故

$$\varepsilon_o = \frac{T_o}{T_H - T_o} = \frac{263}{298 - 263} = 7.51$$

2) 当传热温差为 10°C 时，制冷剂的最高温度为 35°C ，最低温度为 -20°C ，因而

$$\varepsilon = \frac{(-20 + 273)}{(35 + 273) - (-20 + 273)} = 4.60$$

可见，传热温差导致制冷系数的明显下降。这是因为在获得相同的冷量时，有传热温差的制冷循环将消耗更多的功。

四、热力完善度

由于在相同的高、低温热源间工作时，实际制冷机和可逆制冷机的制冷系数不同，于是就引入一个新的参数——热力完善度 η 来衡量实际制冷机的效率：

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \quad (1-12)$$

仍以上述例子的各项参数为例，当实际制冷机的传热温差为 10°C 时

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} = \frac{4.60}{7.51} = 0.61$$

若传热温差增加到20℃，由于

$$\varepsilon = \frac{243}{318 - 243} = 3.24$$

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} = \frac{3.24}{7.51} = 0.43$$

传热温差的增加，意味着循环的不可逆程度增加，因此 η 也可作为对制冷循环不可逆程度的衡量指标。在循环中，减少传热温差、减少摩擦均会减少循环的不可逆程度，并导致热力完善度的提高。

应当指出：

1. 制冷系数 ε 和热力完善度 η 是衡量实际制冷循环的两个不同的经济指标。 ε 只是从热力学第一定律即能量转换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在实际上是不可能达到的。

2. 当我们比较两个制冷机循环的经济性时，如果两者的热源温度 T_H 、 T_0 相同，那么采用 ε 与采用 η 进行比较是等价的；如果两者的 T_H 、 T_0 不相同，那么只有对它们的 η 加以比较才是有意义的，因为这时只比较 ε 不能看出哪个制冷机循环的经济性更好。

第二节 各种制冷方法

根据制冷方法的物理本质来分类，常见的有以下四种：物态相变制冷、气体膨胀制冷、涡流管制冷和热电制冷。物态相变制冷包括固体融解制冷（例如：冰融解时吸热）、固体升华制冷（如固态二氧化碳在大气压下升华吸热）和液态气化制冷。其中液态气化制冷应用最广，它是利用液体气化时的吸热效应实现制冷的。蒸汽压缩式、吸收式、蒸汽喷射式和吸附式制冷都属于液体气化制冷。

根据热功转换关系，正如上节所分析的，蒸汽压缩式制冷，热电制冷属于输入功实现制冷；吸收式制冷、蒸汽喷射式制冷、吸附式制冷属于输入热量实现制冷。

此外，正在研制而且具有很大发展前途的磁制冷，属输入功实现制冷的范围。

第三节 热 泵

逆向循环不仅可以用来制冷，还可以把热能释放给其温度高于环境温度的某物体或空间，使之温度升高。作为后一种用途的逆向循环系统称为热泵。制冷机与热泵在热力学上并无本质区别，它们的工作循环过程都是逆向循环，区别仅仅在于使用目的。逆向循环具有从低温热源吸热，向高温热源放热的特点。当使用目的是从低温热源吸收热量时，系统称为制冷机；当使用目的是向高温热源释放热量时，系统称为热泵。在许多使用场合，同一台机器在一些时候作制冷机用，在另一些时候作热泵用。还有些使用场合，同时需要某低温下的冷却效应和另一高温下的加热效应，那么系统可以同时作制冷机和热泵使用。

图1-1的能量转换关系和式(1-1)也完全适用于热泵,只是这时我们所希望得到的是高温排热量 Q_H 或者说热泵通过可逆循环,消耗了能量 W ,将低温热量 Q_c 转换成了高温热量 Q_H 。

我们把衡量热泵的加热性能,用热泵系数 φ_H 来表示:

$$\varphi_H = \frac{Q_H}{W} \quad (1-13)$$

由式(1-1)可知

$$\varphi_H = \frac{Q_c + W}{W} = 1 + \varepsilon \quad (1-14)$$

由上式可以看出:

1. 式(1-14)给出了同一台机器,在相同工况下作热泵使用时的热泵系数与作制冷机使用时的制冷系数之间的关系。

2. 式(1-14)还表明, φ 永远大于1,所以热泵的热力学经济性比消耗电能或燃料直接获取热量的经济性总是要高些。

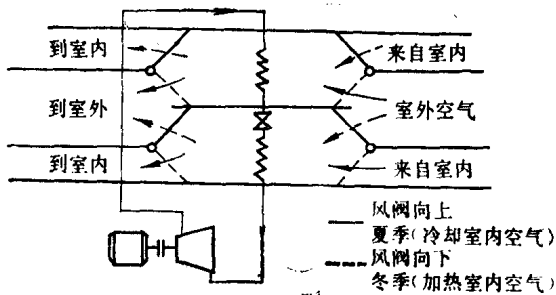


图 1-4 空调热泵系统

由于制冷机与热泵的工作循环都是逆向循环,所以各种制冷循环原则上都可构成热泵循环。可以有蒸汽压缩式热泵,吸收式热泵、空气式热泵、热电式热泵等。

图1-4为一般的压缩式空凋制冷系统,只需将空调风管的布置作适当改动就可达到夏季冷却、冬季加热的目的。如图所示,夏季四个风阀向上,室内循环空气经过蒸发器盘管被冷却,室外空气流经冷凝器,带走高温排出的热量,系统起到制冷作用;冬季四个风阀向下,

室外空气经过蒸发器盘管,室内空气经过冷凝器盘管,室内空气加热,系统起到热泵的作用。

复习思考题

1. 按提供的能量形式不同,制冷可分哪两大类?
2. 什么是制冷系数 ε ?影响逆卡诺循环制冷系数的主要因素是什么?如何影响的?
3. 试述热力系数 φ 、热力完善度 η 的定义及其物理意义。
4. 什么是热泵?热泵系数 φ_H 与制冷系数 ε 之间有何关系?

第二章 蒸汽压缩式制冷循环

第一节 单级蒸汽压缩式制冷的理论循环

一、单级蒸汽压缩制冷系统与循环

单级蒸汽压缩式制冷系统如图2-1所示。它由压缩机1、冷凝器2、膨胀阀3和蒸发器4组成。其工作过程如下：制冷剂在蒸发器内，在压力 p_0 、温度 t_0 下沸腾， t_0 低于被冷物体的温度。压缩机不断地抽吸蒸发器中产生的蒸汽，并将它压缩到冷凝压力 p_k ，然后送往冷凝器，在压力 p_k 下等压冷凝成液体，同时，制冷剂放出冷凝热量，并传给冷却介质（通常是水或空气）。与冷凝压力 p_k 相对应的冷凝温度 t_k 一定要高于冷却介质的温度，冷凝后的液体通过膨胀阀或节流元件进入蒸发器。当制冷剂通过膨胀阀时，压力从 p_k 降到 p_0 ，少部分液体气化，极大部分剩余液体的温度降至 t_0 ，这部分液体在蒸发器中蒸发，并从被冷却的物体中吸取它所需要的蒸发热。而气化的这部分蒸汽称为闪发蒸汽，在它被压缩机吸入之前几乎不再起吸热作用。

在整个循环过程中，压缩机起着吸收、压缩和输运制冷剂的作用，是整个系统的“心脏”；节流阀对制冷剂起节流降压作用，并调节进入蒸发器的制冷剂流量；蒸发器是输出冷量的设备，制冷剂在蒸发器中吸收被冷却物的热量，达到制冷的目的；冷凝器是输出热量的设备，从蒸发器中吸收的热量连同压缩机消耗的功所转化的热量在冷凝器中被冷却介质带走。根据热力学第二定律，压缩机所消耗的功（电能）起了补偿作用，使制冷剂不断从低温物体中吸热，并向高温物体放热，从而完成整个制冷循环。

二、压焓图及温焓图

为了研究蒸汽压缩式循环中每一个过程，了解各个过程之间的关系以及某一过程发生变化时对其它过程的影响。用各种热力状态图来研究整个循环，可使问题得到简化，而且可看到循环中各种状态的变化以及这些变化对循环的影响。

在制冷循环的分析和计算中，常借助于压焓图和温焓图。由于循环的各个过程中功与热量的变化均可用焓值的变化来加以计算，因此，压焓图在制冷工程中得到更为广泛的应用。

1. 压焓图

压焓图的结构如图2-2所示。以绝对压力为纵坐标（为了缩小图的尺寸，提高低压区域的精度，通常纵坐标取对数坐标），以焓值为横坐标。

图中临界点 K 左边的粗实线为饱和液体线，线上的任何一点代表一个饱和液体状态，干度 $x=0$ 。右边的粗实线为干饱和蒸汽线，线上任何一点代表一个饱和蒸汽状态， $x=1$ 。这两条粗线将图分为三个区域：饱和液体线的左边是过冷液体区，该区域内的液体称为过冷液体，过冷液体的温度低于同一压力下饱和液体的温度；干饱和蒸汽线的右边是过热蒸汽区，

该区域内的蒸汽称为过热蒸汽，它的温度高于同一压力下饱和蒸汽的温度。两条线之间的区域为两相区，制冷剂在该区域内处于气、液混合状态(湿蒸汽状态)。图中共有六种等参数线簇，

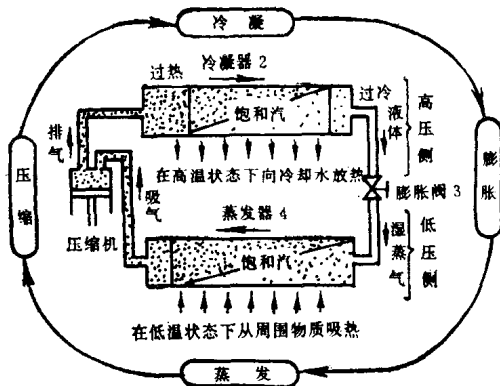


图 2-1 单级蒸汽压缩式制冷系统循环图

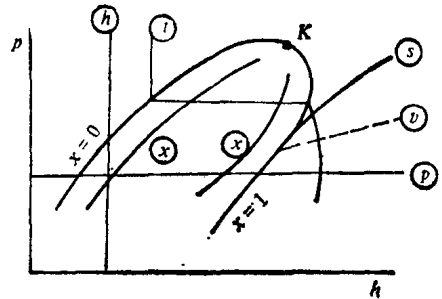


图 2-2 压焓图

等压线——水平线；

等焓线——垂直线；

等温线——液体区几乎为垂直线。两相区内因制冷剂状态的变化是在等压、等温下进行的，故等温线与等压线重合，是水平线。过热蒸汽区为向右下方弯曲的倾斜线；

等熵线——向右上方倾斜的实线；

等容线——向右上方倾斜的虚线，但远比等熵线平坦；

等干度线——只存在于湿蒸汽区域内，其方向大致与饱和液体线或饱和蒸汽线相近，视干度大小而定。

2. 温熵图

温熵图的结构如图2-3所示。它以熵为横坐标，温度为纵坐标。图中临界点K左边的实线为饱和液体线，右边实线为饱和蒸汽线。这两条线把整个温熵图划分为三个区域：饱和液体线的左边为过冷液体区，饱和蒸汽线的右边为过热蒸汽区，两条线之间为湿蒸汽两相区。图中也有六种等参数线簇，

等温线——水平实线；

等熵线——垂直实线；

等压线——两相区内等压线与等温线重合，是水平线。过热区内等压线是向右上方倾斜的实线。过冷区域内等压线密集于 $x=0$ 的线附近，可近似用 $x=0$ 的线代替；

等容线——用虚线表示；

等焓线——过热区及两相区内，等焓线均为向右下方倾斜的实线，但两相区内等焓线的斜率更大，过冷区液体的焓值可近似用同温度下饱和液体的焓值代替；

等干度线——只存在于两相区内，其方向与饱和液体线或饱和蒸汽线大致相同。

在温度、压力、比容、焓、熵、干度等参数中，只要知道其中任意两个状态参数，就可以在压焓图或温熵图中确定过热蒸汽及过冷液体的状态点，其他状态参数便可直接从图中读出。对于饱和蒸汽及饱和液体，只需知道一个状态参数就能确定其状态。

三、制冷循环过程在压焓图上的表示

我们研究的是图2-1所示的单级蒸汽压缩制冷理论循环，其压焓图如图2-4所示。这种理

论循环有如下特点：

1. 离开蒸发器和进入压缩机的制冷剂是处于蒸发压力下的饱和蒸汽状态。

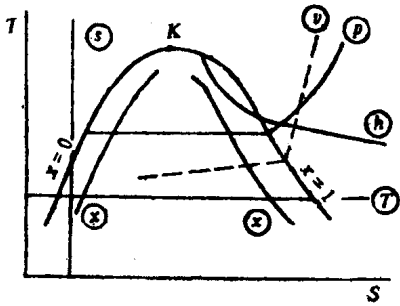


图 2-3 温熵图

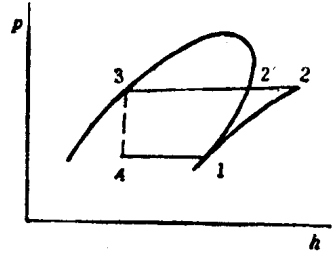


图 2-4 单级理论循环

2. 离开冷凝器和进入膨胀阀的液体是处于冷凝压力下的饱和液体。
3. 压缩机的压缩过程为等熵压缩。
4. 制冷剂通过膨胀阀节流时是等焓过程。
5. 制冷剂在蒸发和冷凝过程中没有压力损失。
6. 在各设备的连接管道中，制冷剂不发生状态变化。
7. 制冷剂的冷凝温度等于外部热源温度，蒸发温度等于被冷却物体的温度。

上述理论循环与实际循环存在一定的差异。但由于理论循环可使问题得到简化，便于对它们进行分析研究，而且它的各个过程均是实际循环的基础，故可作为实际循环的比较标准。

点 1：制冷剂进入压缩机状态。该点的状态是等压线 p_0 与干饱和蒸汽线（即 $x = 1$ 的等干度线）相交点的状态。

点 2：制冷剂排出压缩机，进入冷凝器的状态。过程 1—2 表示制冷蒸汽在压缩机中的等熵压缩过程。点 2 是等压线 p_k 和过点 1 的等熵线的交点，处于过热蒸汽状态。

点 3：制冷剂出冷凝器冷凝成饱和液体状态。过程 2—2'—3 表示制冷剂在冷凝器内的冷却（2—2'）和冷凝（2'—3）过程，且是等压过程。制冷剂过热蒸汽进入冷凝器后先冷却成饱和蒸汽（2—2'），然后在温度不变的情况下冷凝成饱和液体（2'—3）。所以，点 3 是等压线 p_k 与 $x = 0$ 的饱和液体线的相交点。

点 4：制冷剂出节流阀，进入蒸发器的状态。过程（3—4）为节流过程，制冷剂焓值不变，压力由 p_k 降到 p_0 ，温度由 t_k 降到 t_0 ，液态制冷剂部分汽化，进入两相区。所以点 4 是等压线 p_0 与过点 3 的等焓线的相交点。由于节流过程是不可逆过程，所以用虚线表示。

过程线（4—1）表示制冷剂在蒸发器中是在等温 t_0 、等压 p_0 下进行的汽化过程，制冷剂的状态沿等压线 p_0 向干度增大的方向变化，直到全部变为干饱和蒸汽为止。这时制冷剂的状态又重新回到进入压缩机的状态 1，从而完成一个完整的理论循环。

四、单级蒸汽压缩式制冷理论循环的热力计算

在进行制冷循环的热力计算之前，首先需要了解系统中各设备内功和热量的变化情况，