



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

空气调节用 制冷技术 (第四版)

彦启森 石文星 田长青 编著

中国建筑工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

空气调节用制冷技术

(第四版)

彦启森 石文星 田长青 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空气调节用制冷技术/彦启森等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-12027-7

I. 空… II. 彦… III. 空气调节系统-制冷技术-高等学校-教材 IV. TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 067720 号

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书以空气调节系统中普遍采用的冷(热)源设备——蒸气压缩式制冷装置为主,系统地阐述其工作原理、构造、系统设计以及工作特性、运行调节等问题,并适当介绍利用热能制冷的吸收式制冷装置,以及连接冷(热)源设备与空调末端设备的冷冻站和水系统的相关问题。本书充实并强化了基本概念与基本原理的论述,力求体系严密、结构清晰,突出系统性与实用性的有机结合。全书取材广泛,内容有所拓宽,着意反映该领域的最新技术进展。

本书亦可供有关专业工程技术人员参考与自学之用。

* * *

责任编辑:齐庆梅 姚荣华

责任设计:张虹

责任校对:赵颖 刘钰

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材
空气调节用制冷技术
(第四版)

彦启森 石文星 田长青 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 16³/₄ 字数: 418千字

2010年7月第四版 2011年3月第三十一次印刷

定价: 30.00元

ISBN 978-7-112-12027-7

(19286)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在《空气调节用制冷技术》（第三版）基础上，结合近年来的教学与工程实践修订而成的。

本书以空气调节系统中普遍采用的冷（热）源设备——蒸气压缩式制冷装置为主，较系统完整地阐述其工作原理、构造、系统设计以及工作性能、运行调节等问题，并适当介绍了可以利用热能、节约电能的吸收式制冷装置，以及连接冷（热）源设备与空调末端设备的冷冻站和水系统的相关问题。为了照顾各院校在要求上有所差异，教材按 60 课时编写，讲授时可根据具体情况适当取舍。

本书的特点在于，（1）力求贯彻“系统”思想：从制冷系统和建筑能源系统的整体角度出发，讲述制冷循环理论、设备、系统设计和性能调节方法，适当增加了空调系统冷冻站相关内容，体现建筑能源系统的整体性；（2）体现创新意识：从教材内容的构成、各章节的具体内容到例题、习题的选用，都希望体现创新思维和当今最新研究成果；（3）具有实用性：教材中给出了较为详尽的计算公式、图表和应用例题，使学生与工程技术人员能快速掌握理论，并付诸应用；（4）力求体系严密：根据多年的教学实践，改进了章节结构，使教材体系严密、逻辑清晰、结构合理；（5）增加了“思考题”和“练习题”：通过思考与练习（可选作），以提高学生分析和解决问题的能力，并检验学习各章内容的效果。

本书绪论由彦启森先生编写，第一、二、三章由彦先生、石文星编写，第四章由彦先生、田长青编写，第五、八章由田长青编写，第六、七章、附图、附表由石文星编写，全书由石文星统稿。

在修订过程中，参阅了大量新近文献，并得到清华大学“985 工程”二期本科教材建设项目的资助；清华大学建筑学院建筑技术科学系研究生周德海、韩林俊、张晓灵、郜义军，博士后杨启超、韩宗伟，以及中国科学院理化技术研究所博士后邵双全，研究生司春强、罗伊默等帮助查阅、整理了大量资料，绘制了部分插图，并校对了书中例题和练习题；中国建筑设计研究院潘云钢教授对第八章进行了精心审校，并提出了宝贵建议；中国建筑工业出版社齐庆梅编辑为本书的出版付出了辛勤劳动。在此，对引文作者、清华大学以及给予编者大力支持和帮助的人士表示衷心感谢！

彦先生一生致力于制冷空调技术及其教学法研究，为我国制冷空调产业的发展和人才培养作出了巨大贡献，本书就是他的部分心血。先生生前非常关注本书的编写与出版工作，故谨以此书再版纪念敬爱的彦先生。

为方便任课教师制作电子课件，我们制作了包括书中公式、图表等内容的素材库，可发送邮件至 jiangongshe@163.com 免费索取。

由于编者水平有限，有不妥和错误之处，希望使用本书的人士给予批评指正。

石文星 田长青
2009 年 12 月于北京清华园

第三版前言

本书是普通高等教育土建学科“建筑环境与设备工程”专业“十五”规划教材，是在原高等学校试用教材《空气调节用制冷技术》（第二版）的基础上，结合多年的教学与工程实践修订而成。

本书以空气调节系统中普遍采用的冷（热）源设备——单级蒸气压缩式制冷装置为主，较系统、完整地阐述其工作原理、构造、系统设计以及工作特性、运行调节等问题，并适当介绍了可以利用热能、具有节约电能的吸收式制冷装置。为了照顾各院校在要求上有所差异，教材按 50~60 课时编写，讲授时可根据具体情况有所取舍。

本书充实并强化了基本概念与基本原理的论述，力求体系严密、结构清晰，突出系统性与实用性的有机结合。全书以“系统”思想为主线，站在制冷系统整体角度，阐述制冷循环理论、设备、系统设计、性能调节与性能改善方法；给出了详尽的计算公式、图表和应用例题，具有良好的实用性；取材广泛，内容有所拓宽，着意反映该领域的最新技术进展。在体系编排上，将双级与复叠式蒸气压缩制冷作为改善蒸气压缩式制冷循环性能的措施进行讲述，更能体现制冷循环理论的系统性。在内容方面，充实了近年来所发展的理论成熟、结论明确的内容，如：非共沸工质的性质、劳伦茨循环及其计算方法；超临界制冷循环及其应用；新工质在换热器中的热力、水力计算公式与计算方法；新型节流装置——电子膨胀阀的结构原理；变制冷剂流量系统特性与运行控制以及燃油与燃气溴化锂吸收式直燃机的工作原理等内容。

本书的第一、二、三章由彦启森、石文星编写，第四、五章由彦启森、田长青编写，第六章由田长青编写，第七、八章由石文星编写，彦启森全面统稿。清华大学建筑技术科学系杨新江硕士、黄寓理、马杰、黄宇等同学绘制了部分插图。在此次编写过程中，参考了大量新近文献，在此对本书的原著作者、引文作者以及给予编者大力支持和帮助的各位人士表示衷心的感谢。由于编者水平有限，有不妥和错误之处，希望读者给予批评指正。

编者

2003 年 12 月于北京清华园

目 录

主要符号表	8
绪论	1
第一章 蒸气压缩式制冷的热力学原理	3
第一节 理想制冷循环	3
第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环	5
第三节 蒸气压缩式制冷循环的改善	12
第四节 跨临界制冷循环	21
第五节 蒸气压缩式制冷的实际循环	26
思考题	29
练习题	29
第二章 制冷剂与载冷剂	31
第一节 制冷剂	31
第二节 润滑油	42
第三节 载冷剂	44
思考题	46
练习题	46
第三章 制冷压缩机	48
第一节 活塞式制冷压缩机	49
第二节 回转式制冷压缩机	65
第三节 离心式制冷压缩机	74
思考题	80
练习题	80
第四章 制冷装置的换热设备	82
第一节 冷凝器的种类和工作原理	82
第二节 冷凝器中的传热过程	89
第三节 冷凝器的设计计算	96
第四节 蒸发器种类和工作原理	101
第五节 蒸发器的传热过程	107
第六节 蒸发器的设计计算	111
第七节 其他换热设备	119
思考题	122
练习题	122

第五章 节流装置和辅助设备	123
第一节 节流装置.....	123
第二节 辅助设备.....	134
第三节 控制机构.....	141
第四节 制冷剂管路设计.....	150
思考题.....	156
练习题.....	156
第六章 蒸气压缩式制冷装置及运行调节	158
第一节 蒸气压缩式制冷系统的典型流程.....	158
第二节 空调用蒸气压缩式制冷机组.....	160
第三节 蒸气压缩式制冷系统的工作特性.....	167
第四节 蒸气压缩式制冷装置的性能调节.....	172
思考题.....	183
练习题.....	183
第七章 吸收式制冷	185
第一节 吸收式制冷的基本原理.....	185
第二节 二元溶液的特性.....	187
第三节 单效溴化锂吸收式制冷机.....	194
第四节 双效溴化锂吸收式制冷机.....	202
第五节 吸收式热泵.....	207
思考题.....	212
练习题.....	213
第八章 水系统与制冷机房	214
第一节 空调水系统.....	214
第二节 制冷机房设计.....	226
思考题.....	230
练习题.....	230
附图	232
附图 1 制冷剂 R22 压焓图.....	232
附图 2 制冷剂 R123 压焓图.....	233
附图 3 制冷剂 R134a 压焓图.....	234
附图 4 制冷剂 R717 压焓图.....	235
附图 5 制冷剂 R407C 压焓图.....	236
附图 6 制冷剂 R410A 压焓图.....	237
附表	238
附表 1 R22 饱和液体与饱和气体物性表.....	238
附表 2 R123 饱和液体与饱和气体物性表.....	240
附表 3 R134a 饱和液体与饱和气体物性表.....	241
附表 4 R717 饱和液体与饱和气体物性表.....	243

目 录

附表 5	R407C [R32/125/134a (23/25/52)] 沸腾状态液体与结露状态气体物性表	244
附表 6	R410A [R32/125 (50/50)] 沸腾状态液体与结露状态气体物性表	246
附表 7	R22 饱和液体的物性值	247
附表 8	R410A 饱和液体的物性值	248
附表 9	氯化钠水溶液物性表	248
附表 10	氯化钙水溶液物性表	249
附表 11	乙烯乙二醇水溶液物性表	251
附表 12	几种常用载冷剂的物性比较	251
附表 13	主要国际单位制与迄今使用单位名称对照表	252
附表 14	主要单位换算表	252
主要参考文献		253

主要符号表

A	面积, m^2	T_0, t_0	蒸发温度, K 或 $^{\circ}\text{C}$
C	热容量, kJ/K	U	内能, kJ
c	比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	u	比内能, kJ/kg
c_p	定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	V	体积, m^3 ; 体积流量, m^3/s
c_v	定容比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	v	流速, m/s ; 比容, m^3/kg
D, d	直径, m	v_m	质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
F	力, N	W	功, J 或 kJ
H	焓, kJ	w	比功, J/kg 或 kJ/kg
h	比焓, kJ/kg	x	湿蒸气的干度, %
K	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	z	水平管束上、下重叠的排数 或系数
k	绝热指数	α	换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
L	长度, m	ϵ	制冷系数
M	质量流量, kg/s	ϵ_c	逆卡诺循环制冷系数
m	质量, kg ; 多变指数	ϵ_{th}	理论循环制冷系数
n	转速, r/min	ζ	热力系数
P	功率, W 或 kW	η_c	卡诺循环的热效率
p	压力, Pa 或 bar	η_d	压缩机的传动效率
p_k	冷凝压力, bar	η_f	肋片效率
p_0	蒸发压力, bar	η_i	压缩机的指示效率
Q	热量, J 或 kJ	η_m	压缩机的摩擦效率
q_k	冷凝器单位热负荷, kJ/kg	η_e	电动机效率
q_0	单位质量制冷能力, kJ/kg	η_R	制冷循环的制冷效率
q_v	单位容积制冷能力, kJ/m^3	η_v	压缩机的容积效率
R	潜热, kJ ; 热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$	λ	材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Re	雷诺数	μ	供热系数; 动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
r	比潜热, kJ/kg	ν	运动黏度, m^2/s
S	熵, kJ/K	ξ	析湿系数; 浓度, kg/kg 或 %
s	比熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	ρ	密度, kg/m^3
T	绝对温度, K	σ	传湿系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$\Delta T, \Delta t$	温差, K 或 $^{\circ}\text{C}$	τ	肋化系数
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$	ϕ	热流量, W 或 kW
T_k, t_k	冷凝温度, K 或 $^{\circ}\text{C}$	ϕ_k	冷凝器热负荷, W 或 kW
t_m	空气湿球温度, $^{\circ}\text{C}$		

主要符号表

ϕ_0	制冷量, W 或 kW	w	冷却水
φ	空气的相对湿度, %	$a \cdot e$	空气侧当量
ψ	热流密度, W/m ² 或 kW/m ²	$b \cdot f \cdot z$	水平肋管管束上沸腾
下角标		$b \cdot z$	管束上沸腾
1, 2, 3...	表示一个系统或一个循环的不同点, 或不同时间间隔	$c \cdot f$	肋管上冷凝
a	空气或绝热过程	$c \cdot f \cdot z$	水平肋管管束上冷凝
b	沸腾	$c \cdot n$	管内表面冷凝
c	逆卡诺循环; 压缩或冷凝	$c \cdot o$	管外表面冷凝
e	有效值或膨胀; 当量	$c \cdot o \cdot f$	肋管外表面冷凝
f	介质或肋片	cr	临界状态
h	热源	$c \cdot w$	冷冻水
i	指示值; 定焓过程; 表示内侧; 进口	ev	蒸发
k	高压或高温	f	霜
l	长度或潜热	opt	最优
m	质量或机械量	sat	饱和
o	低压; 低温或外侧	$s \cdot c$	再冷
p	压力或定压过程; 管道	$s \cdot h$	过热
r	制冷剂	st	静装配
s	饱和状态或定熵过程; 显热	上角标	
t	温度或定温过程	"	气相
V	体积	'	液相或修正后的物理量
		*	迭代计算物理量的新值

字母上横杠表示两相分界面的边界面或量的平均值, 如 \bar{t} 表示平均温度。

绪 论

“制冷”就是使自然界的某物体或某空间达到低于周围环境的温度，并使之维持这个温度^[1]。人类就是依靠“制冷”，从自然环境开创了人工环境，促进人类文明进步，满足不断发展的要求。当然，随着大量人工环境的需求，也要付出大量的能源和环保代价，因而，应充分利用自然环境，以减少能源需求，还应创造更优质的人工环境。

人类对环境的需求可以分为两个方面，其一是人类生活与生产环境，包括居住环境、交通环境、医疗环境和工农业生产环境；其二是人类饮食的保障，包括冷藏、冻结、保鲜、真空升华干燥和冷藏物流与冷藏链。而从创造人工环境观点而言，则可分为空间人居环境和生产环境。空间人居环境包括人体安全极限环境、工业卫生环境和健康舒适环境，其中主要的是创造健康舒适环境，它涉及生理学和心理学，客观因素和主观因素。生产环境包括生产要求、检测要求和物品贮运要求，它纯属客观因素，对环境温湿度要求范围宽，对环境参数要求内容广。例如：生产要求热湿控制、有害物控制，甚至要求恒温恒湿、工业洁净、生物洁净；贮运环境的空气温度范围为 10~50℃，甚至需要控制空气组分；检测环境要求空气温度范围可达 -85~70℃、相对湿度的精度可达 2%，甚至要求能实现变温环境和高低压环境。此外，现代科学的许多部门，如宇宙空间的模拟、高真空的获得、半导体激光、红外线探测以及金属和合金“超电导”的实现，还需要 20K 以下温度的低温和超低温技术。

实现制冷可以通过两种途径：一是利用天然冷源；二是利用人造冷源。

天然冷源时代。《诗经》就有“二之日凿冰冲冲，三之日纳于凌阴”的诗句；《周礼》有“凌人：掌冰正。岁十有二月，令斩冰，三其凌。春始治鉴，凡内外饗之膳羞，鉴焉，凡酒、浆之酒醴亦如之。祭祀，共冰鉴。宾客，共冰。大丧，共夷掣冰。夏，颁冰掌事。秋，刷。”的记载；《艺文志》则有“大秦国有五宫殿，以水晶为柱拱，称水晶宫，内实以冰，遇夏开放。”的记载。公元前 1000 年人类就有计划地存贮和应用天然冰，用于食品贮存和环境降温。14 世纪后，开始利用冰和氯化钠的混合物冻结食品。16 世纪后出现水蒸发冷却空气。1890 年左右空气调节获得初步发展，既有工业空调又有舒适空调。1906 年出现“空气调节”名词，从而形成巨大的企业——天然冰的贮配，同时创造出一些人类所需的温湿环境。

自 19 世纪中叶开始开创了人工环境时代。1834 年第一台乙醚活塞制冷机问世，1844 年出现空气制冷机，1859 年出现吸收式制冷机，1890 年制冰工业开始，从而开创了制冷空调工业。例如：1911 年 Carrier 的湿空气图表，1918 年自动冰箱问世，1923 年发明食品快速冻结，1927 年生产出空调器、空气源热泵，1930 年汽车空调逐渐发展，1935 年出现卡车自动冷藏装置、飞机发动机低温试验装置等。

此外，由于 1928 年制造出氟利昂 R12，人类则从采用天然制冷剂迈向采用合成制冷剂的时代，解决了人类对制冷剂的各种要求。这样，人类从采用天然冰到采用人造冰，从

采用天然冷源迈向采用人造冷源的时代，创造出了各种人工环境，人类生活发生了重大变化。但是，此时用于创造人类生活与生产环境（也就是空调）所需求的制冷量只接近总人工制冷产量的 10%。直至 20 世纪 70 年代以后，随着科学技术的发展，特别是信息技术的迅猛发展，以及人们对健康舒适环境要求的不断提高，民用与工业空调所消耗的制冷量达到总人工制冷产量的 60%。美国工程院在《20 世纪最伟大的工程技术成就（The greatest engineering achievements of the 20th century）》一书中就将“空调与制冷”技术排名第十，足以说明制冷技术展现出“造福人类”、“开创未来”的作用。

“制冷”领域，可以说包括制冷技术与设备、人工环境、冷藏与冻结以及低温与气体工业。根据制冷温度的不同，制冷技术大体可划分为三类，即

普通制冷：高于 -120°C ；

深度制冷： -120°C 至 20K ；

低温和超低温： 20K 以下。

实现人工制冷的的方法有多种，按物理过程的不同可分为：液体汽化法、气体膨胀法、热电法、固体绝热去磁法等。不同制冷方法适用于获取不同的温度。

空气调节用制冷技术属于普通制冷范围，主要采用液体汽化制冷法，其中以蒸气压缩式制冷、吸收式制冷应用最广。本教材重点讲述蒸气压缩式制冷（热泵），并对利用热能的吸收式制冷（热泵）装置以及连接冷（热）源设备与空调末端设备的冷冻站和水系统作简单介绍。

第一章 蒸气压缩式制冷的热力学原理

液体气化过程需要吸收气化潜热，而且其沸点（饱和温度）与压力有关，压力越低，饱和温度也越低。例如，水在绝对压力为 0.87kPa 下，饱和温度为 5℃，气化时需要吸收 2488.7kJ/kg 热量；氨在 1 个标准大气压力（101.33kPa）下的饱和温度为 -33.33℃，气化时需吸收 1369.59kJ/kg 的热量。因此，只要创造一定的低压条件，就可以利用液体的气化获取所需的低温。这种用于气化制冷的液体被称为制冷剂（或工质）。

液体气化制冷的工艺流程如图 1-1 所示。图中点划线以外部分为制冷段，制冷剂从贮液器经膨胀阀节流，降低压力和温度；低温低压的液态制冷剂在蒸发器中吸收周围空气或物体的热量而气化，从而降低室温或物体的温度，达到制冷的目的。而图中点划线以内部分为液化段，它的作用是一方面使蒸发器内保持一定的低压，另一方面使在蒸发器中气化了了的制冷剂液化，重新流回贮液器，再用于制冷。液化的方法是抽取蒸发器的低压气态制冷剂并使之增压，以提高其饱和温度；然后再利用自然界大量存在的常温空气或水（统称冷却剂），使之在冷凝器内液化。图 1-1 所示的制冷系统采用压缩机使气态制冷剂增压，故称蒸气压缩式制冷。

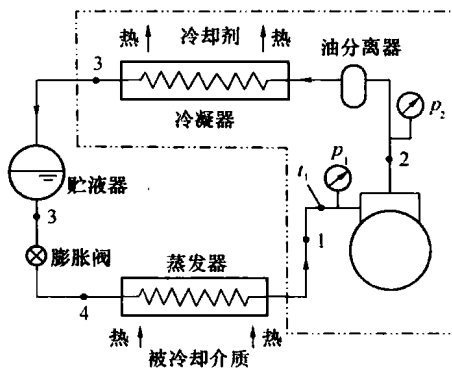


图 1-1 液体气化制冷原理图

从上可以看出，蒸气压缩式制冷的工作原理是使制冷剂在压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器等热力设备中进行压缩、放热冷凝、节流和吸热蒸发四个主要热力过程，从而完成制冷循环，实现对被冷却介质的制冷效果。

第一节 理想制冷循环

一、逆卡诺循环

卡诺循环（Carnot Cycle）是在两个温度不相同的定温热源之间进行的理想热力循环。图 1-2 所示的 1→2→3→4→1 是逆卡诺循环（Reverse Carnot Cycle），也是理想循环。逆卡诺循环中，制冷剂沿等熵线 3→4 绝热膨胀，温度从 T'_k 降至 T'_o ；然后，在低温热源温度 T'_o 下，沿等温线 4→1 吸热膨胀，从低温热源吸收热量 q_o ；制冷剂再沿等熵线 1→2 被绝热压缩至状态 2，温度从 T'_o 升至 T'_k ；最后，制冷剂在高温热源温度 T'_k 下，沿等温线 2→3 进行放热压缩，向高温热源放出热量 q_k 。

这样，每一制冷循环，通过 1kg 制冷剂将热量 q_o 从低温热源（被冷却物）转移至高温热源（冷却剂），同时，所消耗的功量 Σw 也转化为热量传给高温热源，即

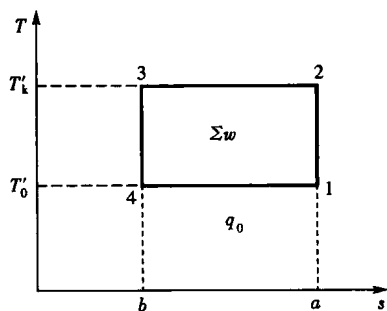


图 1-2 逆卡诺循环

这样，制冷系数则为

$$\epsilon_c = \frac{T'_0}{T'_k - T'_0} \quad (1-3)$$

公式 (1-3) 说明，逆卡诺循环的制冷系数与制冷剂的性质无关，仅取决于被冷却物和冷却剂的温度 T'_0 、 T'_k 。被冷却物温度越高，冷却剂温度越低，制冷系数越高，制冷循环的经济性越好。而且，被冷却物温度的变化比冷却剂温度的变化对制冷系数的影响要大，这点可从以下两个偏导数看出。

$$\left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_k} \right| = \frac{T'_0}{(T'_k - T'_0)^2}$$

$$\left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_0} \right| = \frac{T'_k}{(T'_k - T'_0)^2}$$

因此

$$\left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_0} \right| \geq \left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_k} \right|$$

此外还需指出，制冷循环也可用来获得供热效果，例如冬季制冷剂在蒸发器内吸收室外较冷空气（或水等物体）的热量，而通过冷凝器加热空气（或水）向室内供热。这种装置称为热泵。热泵的经济性用供热系数 μ 表示，供热系数为单位耗功量所获取的热量，即

$$\mu = \frac{q_k}{\Sigma w} = \epsilon + 1 \quad (1-4)$$

从这里可以看出，热泵的供热量（也称为制热量）永远大于所消耗的功量，所以热泵是能源综合利用中很有价值的装置。

二、劳仑兹循环

在实际的制冷循环中，冷源（被冷却物）的放热过程和热源（冷却剂）的吸热过程一般都伴随温度的变化，这时，不宜用逆卡诺循环作为衡量标准。而劳仑兹循环 (Lorenz Cycle) 则是在两个变温热源之间进行的理想制冷循环，如图 1-3 所示。在劳仑兹循环中，制冷剂沿等熵线 $c \rightarrow d$ 绝热膨胀，温度从 T'_c 降至 T'_d ；然后，沿着与低温热源温度变化相逆的路径进行吸热膨胀，温度由 T'_d 升至 T'_a ，吸收热量，实现可逆多变膨胀过程；制冷剂再沿等熵线 $a \rightarrow b$ 被绝热压缩至状态 b ，温度从 T'_a 升至 T'_b ；最后，沿着与高温热源温度变化相

逆的路径进行放热压缩，温度由 T'_b 降至 T'_c ，放出热量，实现可逆多变压缩过程。由此可以看出，劳仑兹循环是由两个等熵绝热过程和两个可逆多变过程组成的理想制冷循环。

从冷源（被冷却物）吸收的热量

$$q_0 = \int_d^a T'_{0i} ds = T'_{0m}(s_a - s_d)$$

向热源（冷却剂）放出的热量

$$q_k = - \int_b^c T'_{ki} ds = T'_{km}(s_b - s_c)$$

制冷系数

$$\epsilon_t = \frac{q_0}{\Sigma w} = \frac{q_0}{q_k - q_0} = \frac{T'_{0m}}{T'_{km} - T'_{0m}} \quad (1-5)$$

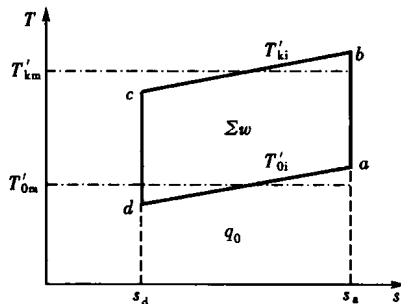


图 1-3 劳仑兹循环

从公式 (1-5) 可以看出，劳仑兹循环的制冷系数等于一个以放热平均温度 T'_{km} 和吸热平均温度 T'_{0m} 为高、低温热源温度的等效逆卡诺循环的制冷系数，仅取决于被冷却物和冷却剂的温度状况，而与制冷剂性质无关。

第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环

一、蒸气压缩式制冷的理论循环

逆卡诺循环的关键是两个可逆等温过程，而纯工质或共沸混合工质的定压蒸发和冷凝是等温过程，因此，利用此类工质，在其湿蒸气区内进行制冷循环有可能实现逆卡诺循环。

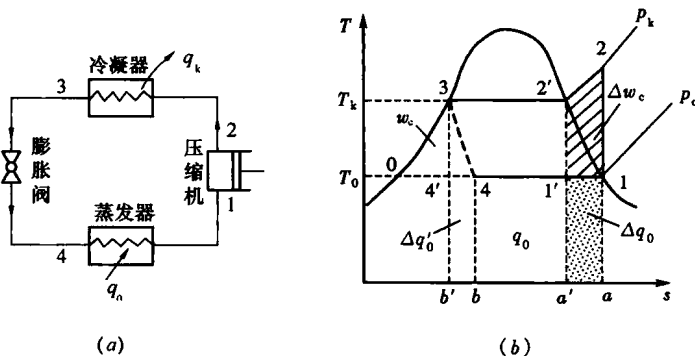


图 1-4 蒸气压缩式制冷的理论循环

(a) 工作过程；(b) 理论循环

但是，实际采用的蒸气压缩式制冷的理论循环是由两个等压过程、一个绝热压缩过程和一个绝热节流过程组成，如图 1-4 所示。它与理想制冷循环相比，有以下三个特点：

- (1) 用膨胀阀代替膨胀机；
- (2) 蒸气的压缩在过热区进行，而不是在湿蒸气区内进行；
- (3) 两个传热过程均为等压过程，并且具有传热温差。

为什么采用这样的制冷循环？

(一) 膨胀阀代替膨胀机

理论制冷循环为了利用制冷剂从高压变为低压状态的膨胀功，设有膨胀机，这在理论上是经济的，但是，对于常规蒸气压缩式制冷的实现并不合理。因为，液态制冷剂膨胀过程的膨胀功不大，而且机件小、摩擦损失又相对比较大，所以，为了简化制冷装置以及便于调节进入蒸发器的制冷剂流量，采用膨胀阀代替膨胀机。

如图 1-4 (b) 所示，从理论上讲，在相同蒸发温度和冷凝温度条件下，与理想循环 $1' \rightarrow 2' \rightarrow 3 \rightarrow 4' \rightarrow 1'$ 相比，理论制冷循环有两部分损失：

(1) 节流过程 $3 \rightarrow 4$ 是不可逆过程，制冷剂吸收摩擦热，产生无益气化，降低有效制冷能力。每 1kg 制冷剂蒸发所能吸收的热量（称为单位质量制冷能力）减少 $\Delta q'_0$ ， $\Delta q'_0$ 可用虚线多边形面积 $44'b'b4$ 表示。

(2) 损失了膨胀功 w_c 。在制冷循环中每 1kg 制冷剂消耗的功量就是压缩机的耗功量，即 $\Sigma w = w_c$ ，比理想制冷循环多消耗功量 w_c ， w_c 可用面积 $034'0$ 表示。

显然，采用膨胀阀代替膨胀机，制冷系数有所降低，其降低程度称为节流损失。节流损失的大小除随冷凝温度与蒸发温度之差 ($T_k - T_0$) 的增加而加大外，还与制冷剂的物理性质有关，由温熵图可见，饱和液线越平缓（即液态制冷剂比热越大）或者制冷剂的比潜热越小，节流损失越大。

(二) 干压缩过程

湿压缩过程压缩机吸入的是湿蒸气（如 $1'$ 点），它有两个缺点：

(1) 压缩机吸入湿蒸气时，低温湿蒸气与热的气缸壁之间发生强烈热交换，特别是与气缸壁接触的液珠更会迅速蒸发，占据气缸的有效空间，致使压缩机吸入的制冷剂质量大为减少，制冷量显著降低。

(2) 过多液珠进入压缩机气缸后，很难立即气化，这样，既破坏压缩机的润滑，又会造成液击，使压缩机遭到破坏。

因此，蒸气压缩式制冷装置运行时，严禁发生湿压缩现象，要求进入压缩机的制冷剂为饱和蒸气或过热蒸气，这种压缩过程称为干压缩过程。

为了压缩机实现干压缩过程，有两种措施可以实现：

(1) 采用可调节制冷剂流量的节流装置，使蒸发器出口的制冷剂为饱和蒸气或过热蒸气。

(2) 在蒸发器出口增设气液分离器，气体制冷剂进入其中，速度降低，气流运动方向改变，使气流中混有较重的液滴分离并沉于分离器底部，再返回蒸发器，分离器上部的饱和蒸气则被吸入压缩机。

采用上述措施后，压缩机的绝热压缩过程就可在过热蒸气区进行，压缩终状态点 2 也为过热蒸气，故制冷剂在冷凝器中并非等温冷凝过程，而是一个等压冷却、冷凝过程。

由图 1-4 (b) 可以看出，采用干压缩过程后，虽然可以增加单位质量制冷能力 Δq_0 （用长方形面积 $a11'a'a$ 表示），但由于压缩终状态点 2 为过热蒸气，故压缩耗功增大 Δw_c （用多边形面积 $122'1'1$ 表示），制冷系数亦将有所降低，降低程度称为过热损失，其大小与制冷剂物理性质有关，一般来说，节流损失大的制冷剂，过热损失较小。

(三) 关于热交换过程的传热温差

理想制冷循环的重要条件之一就是制冷剂与冷源（被冷却物）和热源（冷却剂）之间必须在无温差条件下进行可逆换热过程。然而，实际换热都是在有温差的情况下进行，否

则理论上将要求蒸发器或冷凝器应有无限大的传热面积，这显然是不合实际的。这样，有传热温差的制冷循环的冷凝温度必然高于冷却剂的温度，蒸发温度必然低于被冷却物的温度，因此，相比无温差的理想过程，其制冷系数必将降低，传热温差越大，制冷系数降低越多；实际应用中应进行技术经济分析，以选择合理的传热温差，使初投资和运行费的综合值最为经济。

二、蒸气压缩式制冷理论循环的热力计算

(一) 压焓图的应用

表示制冷剂状态参数的图线有几种。前面分析蒸气压缩式制冷循环时使用了温焓图，此图的特点是热力过程线下面的面积即为该过程所收受的热量，很直观，便于分析比较。但是，由于定压过程的换热量以及绝热过程压缩机的耗功量都可以用过程初终状态的比焓计算，所以，进行制冷循环热力计算时常使用图 1-5 所示的压焓图（也称莫里尔图）。

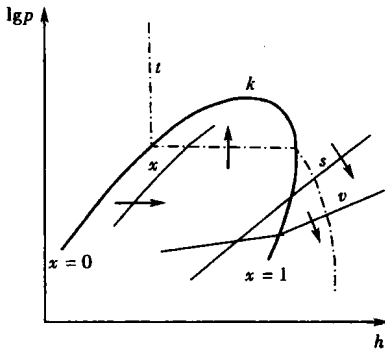


图 1-5 压焓图

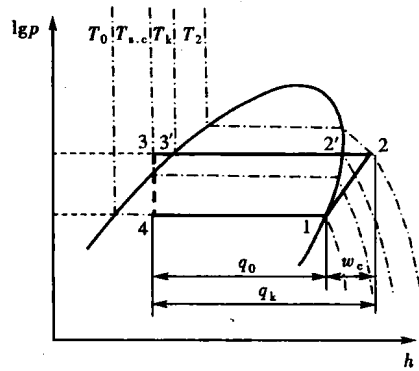


图 1-6 蒸气压缩式制冷理论循环

压焓图的纵坐标是压力，为了清楚地表示低压部分，采用对数坐标，即 $\lg p$ ；横坐标是比焓 h 。图上绘有等压线、等温线、等比焓线、等比熵线、等比容线和等干度线，箭头表示各参数的增值方向。干度等于 0 的曲线是饱和液线，干度等于 1 的曲线是饱和蒸气线，两条线的交点 k 为制冷剂的临界点，这两条线将图分为三个区：饱和液线左侧为液区，饱和蒸气线右侧为过热蒸气区，两线之间为湿蒸气区。

由于制冷剂的热力参数 h 、 s 都是相对值，因此在使用压焓图和物性表时，必须注意它们之间的 h 、 s 基准点是否一致，对于基准点取值不同或单位不一致的图表，最好不要混用，否则必须进行换算^[2]。例如，R22、R123 的国际单位制的图表（参见附图 1、2 和附表 1、2），一般规定 0°C 时饱和液体的 $h' = 200\text{kJ/kg}$ ， $s' = 1.00\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

图 1-6 是压焓图上表示的蒸气压缩式制冷的理论循环，1→2 为绝热压缩过程，即等熵压缩过程；2→3 为制冷剂在冷凝器中等压放热过程，其中 2→2' 放出过热热量，2'→3' 放出比潜热，3'→3 是液体再冷却放出的热量；3→4 为节流过程，绝热节流前后制冷剂比焓不变，故为垂直线（但由于节流过程是不可逆过程，且也不是等焓过程，故用虚线表示）；4→1 为制冷剂在蒸发器内的等压吸热过程。

根据稳定流动能量方程式可得：

蒸发器中等压吸热过程，单位质量制冷剂的制冷能力为