



制冷技术与工程应用

ZHILENG JISHU YU GONGCHENG YINGYONG

■ 金文 杜鹃 主编 ■ 吕砚昭 主审

ZHILENG JISHU YU GONGCHENG
YINGYONG



化学工业出版社

制冷技术与工程应用

金 文 杜 鹃 主编
吕砚昭 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分为 11 章，以空气调节系统中普遍采用的冷源设备——蒸气压缩式制冷装置为主进行阐述，主要内容包括蒸气压缩式制冷原理、制冷剂、载冷剂和润滑油、制冷压缩机等制冷设备、制冷系统、制冷机组、水系统、空调制冷站设计、吸收式制冷、热泵和蓄冷技术等。

本书充实并强化了空调冷冻站工程设计实例的内容，突出理论与工程实践的有机结合，并着重反映该领域的最新技术进展。

本书可作为高等院校建筑环境与能源应用工程等相关专业的教材，也可供相关专业工程技术人员参考与自学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

制冷技术与工程应用/金文，杜鹃主编. —北京：化学工业出版社，2019.2
ISBN 978-7-122-33453-4

I. ①制… II. ①金… ②杜… III. ①制冷技术
IV. ①TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 286470 号

责任编辑：高 钰
责任校对：杜杏然

文字编辑：陈 喆
装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 443 千字 2019 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究

前言

本书是根据建筑环境与能源应用工程专业的课程教学要求,结合多年的教学经验和工程实践编写的。

本书介绍了蒸汽压缩式制冷原理、制冷剂、载冷剂和润滑油、制冷压缩机等制冷设备、制冷系统、制冷机组、水系统、空调制冷站设计、吸收式制冷、热泵和蓄冷技术等内容,并附有多个工程设计实例,突出理论与工程实践的有机结合。

本书在编写过程中,编写人员结合高等学校建环专业本科指导性专业规范的指导意见,多次组织对本书的大纲及内容进行研讨,参考了相关专业书籍,并虚心听取了设计院、施工企业的技术专家和制冷系统运行管理一线技术人员的意见和建议,力求严谨、实用,遵循理论与实践相结合的原则,突出对学生工程实践能力的培养,内容上深入浅出,符合认知规律。

本书由不同高校中多年从事制冷技术课程教学的老师和设计院的暖通设计师共同编写,主编为金文教授和杜鹃副教授(分别是“制冷技术”国家级精品资源共享课程的负责人和主讲教师)。各章节具体编写情况为:绪论和第11章由长安大学宋慧编写,第1章由西安航空学院金文编写,第2章和第5章由西安科技大学张进编写,第3章和第6章(6.1、6.2和6.3)由西安航空学院王巧宁编写,第4章和第6章(6.4)由西安航空学院卢攀编写,第7章、第8章和第9章(9.1、9.2和9.3)由西安航空学院杜鹃编写,第9章(9.4)由西安市建筑设计研究院姚琳编写,第10章由西安工程大学文力编写。

本书的内容已制作成用于多媒体教学的PPT课件,并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要,请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取,或登录 www.cipedu.com 免费下载。

本书由金文、杜鹃主编,吕砚昭主审。本书在编写过程中得到了西安市建筑设计研究院暖通总工程师吕砚昭教授级高工的大力支持和帮助。吕砚昭教授级高工对本书进行了细致的审阅,提出了宝贵的修改意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中参考了相关的教材、专著、论文、规范和图集,在此一并表示衷心的感谢。由于编者水平有限,时间仓促,书中难免有不足之处,恳请专家和使用本书的读者批评指正。

编者

2018年10月

目录

绪论 1

0.1 制冷的概念	1
0.2 制冷技术的应用	1
0.3 制冷技术的发展及分类	2
0.4 人工制冷的的方法	2
0.5 制冷的发展趋势	6
思考与练习	7

第1章 单级蒸气压缩式制冷原理 8

1.1 蒸气压缩式制冷的基本原理	8
1.1.1 制冷的热力学基础	8
1.1.2 单级蒸气压缩式制冷系统组成	11
1.1.3 单级蒸气压缩式制冷循环过程	11
1.2 蒸气压缩式制冷的理想循环	12
1.2.1 理想制冷循环	12
1.2.2 制约理想制冷循环的主要因素	14
1.3 蒸气压缩式制冷的理论循环	15
1.3.1 理论制冷循环	15
1.3.2 理论制冷循环热力计算	17
1.4 蒸气压缩式制冷的实际循环	22
1.4.1 带液体过冷的制冷循环	22
1.4.2 带蒸气过热的制冷循环	23
1.4.3 带回热的制冷循环	24
1.4.4 实际压缩过程	28
1.4.5 实际制冷循环	29
1.5 影响制冷效率的因素	32
1.5.1 制冷效率的影响因素	32
1.5.2 制冷工况	34
1.6 跨临界制冷循环	35
思考与练习	39

第2章 双级压缩和复叠式制冷原理 41

2.1 双级蒸气压缩式制冷	41
---------------------	----

2.1.1	采用双级压缩的原因	41
2.1.2	双级压缩的工作原理	42
2.1.3	一级节流中间完全冷却的双级压缩制冷循环	43
2.1.4	一级节流中间不完全冷却的双级压缩制冷循环	45
2.1.5	循环工作参数的确定	47
2.2	复叠式蒸气压缩制冷	51
2.2.1	多级压缩的局限	51
2.2.2	复叠式制冷的工作原理	51
	思考与练习	53

第3章 制冷剂、载冷剂和润滑油

55

3.1	制冷剂	55
3.1.1	制冷剂的发展历程	55
3.1.2	制冷剂的分类及命名	56
3.1.3	制冷剂的选用原则	58
3.1.4	常用制冷剂的性质	62
3.2	载冷剂	67
3.2.1	载冷剂的选择要求	67
3.2.2	常用载冷剂	68
3.3	润滑油	70
3.3.1	润滑油的作用	70
3.3.2	对润滑油的要求	70
3.3.3	润滑油的分类和选择	71
	思考与练习	73

第4章 制冷压缩机

74

4.1	活塞式制冷压缩机	75
4.1.1	分类	75
4.1.2	结构	77
4.1.3	工作过程	79
4.2	螺杆式制冷压缩机	80
4.2.1	双螺杆式制冷压缩机	81
4.2.2	单螺杆式制冷压缩机	83
4.3	其他回转式制冷压缩机	84
4.3.1	滚动转子式制冷压缩机	84
4.3.2	涡旋式制冷压缩机	86
4.4	离心式制冷压缩机	88
4.4.1	基本结构	88
4.4.2	工作原理	88
4.4.3	磁悬浮离心压缩机	90

4.4.4 特点	91
思考与练习	91

第5章 制冷设备	92
-----------------	-----------

5.1 冷凝器	92
5.1.1 水冷却式冷凝器	92
5.1.2 空气冷却式冷凝器	96
5.1.3 水-空气冷却式冷凝器	97
5.2 蒸发器	98
5.2.1 冷却液体的蒸发器	98
5.2.2 冷却空气的蒸发器	101
5.3 其他换热设备	103
5.3.1 再冷却器	103
5.3.2 回热器	103
5.3.3 中间冷却器	104
5.3.4 冷凝-蒸发器	105
5.4 节流机构	105
5.4.1 手动节流阀	105
5.4.2 浮球节流阀	106
5.4.3 热力膨胀阀	107
5.4.4 电子膨胀阀	109
5.4.5 毛细管	111
5.5 辅助设备	112
5.5.1 制冷剂储存与分离设备	112
5.5.2 润滑油的分离与收集设备	114
5.5.3 制冷剂的净化设备	116
5.5.4 安全设备	120
思考与练习	122

第6章 制冷系统	123
-----------------	------------

6.1 蒸气压缩式制冷系统的典型流程	123
6.1.1 氟利昂制冷系统	123
6.1.2 氨制冷系统	124
6.2 空调用制冷系统	126
6.2.1 房间空调器	126
6.2.2 净化恒温空调机组	128
6.2.3 汽车空调器	128
6.2.4 冷冻除湿机	130
6.3 冷藏用制冷系统	130
6.3.1 直接膨胀供液系统	131

6.3.2	重力供液系统	131
6.3.3	液泵供液系统	132
6.4	制冷系统管道	133
6.4.1	制冷剂管道的布置	134
6.4.2	制冷管材管件的选择	137
6.4.3	制冷剂管道管径的确定	138
6.4.4	制冷剂管道的隔热	139
	思考与练习	140

第7章 空调用制冷机组

141

7.1	活塞式冷水机组	142
7.1.1	特点	142
7.1.2	结构	142
7.1.3	性能及参数	143
7.1.4	接线和接管	143
7.2	螺杆式冷水机组	146
7.2.1	特点	146
7.2.2	结构	147
7.2.3	性能及参数	148
7.3	离心式冷水机组	151
7.3.1	特点	151
7.3.2	结构	151
7.3.3	性能及参数	151
7.4	涡旋式冷水机组	156
7.5	模块化冷水机组	157
	思考与练习	158

第8章 水系统

159

8.1	冷却水系统	160
8.1.1	冷却水系统相关设备及附件	160
8.1.2	冷却水系统设计	167
8.2	冷冻水系统	175
8.2.1	冷冻水系统分类	175
8.2.2	冷冻水系统相关设备及附件	177
8.2.3	冷冻水系统设计	181
	思考与练习	187

第9章 空调制冷站设计

188

9.1	设计方法与流程	188
9.1.1	设计基本流程	188

9.1.2 空调制冷站布置	193
9.2 设计成果与要求	196
9.2.1 设计说明书	196
9.2.2 图纸绘制	197
9.3 典型设计	199
9.4 工程实例	204
9.4.1 工程实例一	204
9.4.2 工程实例二	208
思考与练习	219

第10章	吸收式制冷	220
-------------	--------------	------------

10.1 吸收式制冷原理	220
10.1.1 基本原理	220
10.1.2 与蒸气压缩式制冷的比较	221
10.2 工质对	222
10.2.1 二元溶液和工质对	222
10.2.2 溴化锂水溶液	222
10.3 溴化锂吸收式制冷	224
10.3.1 单效溴化锂吸收式制冷	225
10.3.2 双效溴化锂吸收式制冷	229
10.3.3 直燃型溴化锂吸收式冷热水机组	233
10.3.4 溴化锂吸收式制冷装置的特点	235
思考与练习	236

第11章	热泵和蓄冷技术	237
-------------	----------------	------------

11.1 热泵技术	237
11.1.1 热泵的工作原理	237
11.1.2 热泵的分类	238
11.1.3 热泵在空调供热中的应用	238
11.2 蓄冷技术	247
11.2.1 蓄冷技术的原理	247
11.2.2 蓄冷技术的分类	248
11.2.3 蓄冷在空调系统中的应用	249
思考与练习	257

附录	258
-----------	------------

参考文献	276
-------------	------------

0.1 制冷的概念

通俗地说，制冷就是研究如何制备低温并维持这个低温的一门科学技术。为了获得低温，通常有两种方法：一种是利用自然界存在的天然冷源，另一种就是利用制冷技术制备的人工冷源。天然冷源主要是指冬天储存下来的冰和夏季使用的深井水，天然冷源价格低廉，不需要复杂的工艺技术设备等，但它受到时间、地区和气候等的影响，且只能用于温度要求不是很低的空调和少量食品的短期储存。要想获得较低温度且能维持住这个低温，必须采用人工制冷的方式来实现。

所谓人工制冷，是借助一种专门的制冷装置，以消耗一定量的外界能量为代价，使热量从温度较低的被冷却物体或空间转移到温度较高的周围环境中，以获取和维持低于环境温度的低温的技术。这种专门装置称为制冷装置或制冷机。由于热量总是自发地从高温物体向低温物体传递，因此制冷必须消耗外界的能量为代价才能得以实现，所消耗的能量形式可以是机械能、电能、热能、太阳能等形式。制冷机中的流动工质为制冷剂，制冷剂在制冷机中循环流动，实现从低温物体吸收热量，并释放到高温物体中去。

0.2 制冷技术的应用

制冷最早是用来保存食物和降低房间温度的，随着科学技术与社会文明的发展，制冷技术的应用几乎渗透到工业、农业、建筑、医疗、国防等各个科学领域。

(1) 空气调节

空调工程是制冷技术应用最为广泛的领域。所有的空调系统都需要冷源，需要利用制冷装置来控制空气的温度、湿度在一个合理的范围内。空气调节根据使用场合的不同，可以分为舒适性空调和工艺性空调。舒适性空调主要是满足人们工作和生活对室内温度、湿度、新鲜空气等的要求，为室内人员创造舒适健康环境的空调系统。工艺性空调是为生产工艺过程或设备运行创造必要环境条件的空调系统，主要是满足生产工艺过程对室内环境的温度、湿度、洁净度等的要求。

(2) 食品的加工和冷藏

在食品工业中应用制冷技术的场合很多。生产和加工乳制品、奶酪和其他一些饮品

时, 制冷是必不可少的。还有一些易腐食品, 如肉类、海鲜类食品、部分水果蔬菜从加工到生产、储存、运输与销售的各个环节, 均需要保持必要的低温环境, 以避免食物变质。

(3) 医疗卫生

一些医疗手术, 如心脏、肿瘤的切除以及低温麻醉等, 都需要制冷技术提供低温环境, 还有一些药物、血浆、疫苗以及特殊药品、器官或尸体的冷藏等均需要低温保存。

(4) 工业生产

工业的许多生产过程都需要在低温下进行, 比如石油脱蜡、天然气液化、石油裂解以及合成纤维和化肥的生产等均需要在低温环境下进行。在材料回收方面, 目前低温技术是回收钢结构轮胎中橡胶的唯一有效的方法, 采用的是低温粉碎技术(利用材料在低温状态下的冷脆性能, 对物料进行粉碎)。

(5) 国防工业与科学研究

高寒地区的汽车、坦克发动机等需要做环境模拟实验, 火箭、航天器也需要在模拟高空的低温条件下进行实验, 超导体的应用、半导体激光、红外线探测等都需要人工制冷技术。

除此之外, 制冷技术在农业、生物技术、建筑工程、冰上运动、新型材料、微电子技术等领域也起着十分重要的作用。

0.3 制冷技术的发展及分类

最初, 人们有计划地储存和应用天然冰用于夏季的食品冷藏和防暑降温。14 世纪后, 开始使用冰和氯化钠的混合物冻藏食品。16 世纪, 出现水蒸发冷却空气。1748 年, 柯伦证明乙醚在真空下蒸发会产生制冷效应。1834 年, 美国成功研制第一台乙醚制冷机。1856 年, 以 CO_2 、 SO_2 、 NH_3 为制冷剂的压缩式制冷机问世。1875 年, 以氨做制冷剂的制冷机大大减小了制冷设备的体积, 这使得压缩式制冷机在制冷装置的生产和应用中占了统治地位。1929 年, 通用公司发现了氟利昂, 氟利昂的出现极大地推动制冷装置的发展, 为制冷技术带来了新的变革, 制冷技术迅速发展。直至 20 世纪 70 年代以后, 随着科学技术的发展, 特别是计算机、新型材料等的迅速发展, 人们对食品、舒适和健康方面的需求, 以及在空间技术、国防建设和科学实验方面的需要, 使得民用和工艺性空调所需求的制冷量飞速增长。制冷空调技术已经成为造福人类、开创未来不可或缺的技术。

制冷技术领域非常广, 涵盖了制冷技术与设备、人工环境、冷藏与冻结以及一些低温行业等。制冷技术根据制冷温度的不同, 大致可以分为三类: 一类是普通制冷, 其制冷温度高于 -120°C ; 第二类是深度制冷, 其制冷温度介于 -120°C 和 20K 之间; 第三类为低温和超低温制冷, 其制冷温度位于 20K 以下。空气调节用制冷技术属于普通制冷的范畴。

0.4 人工制冷的的方法

在制冷技术中, 人工制冷方法很多, 目前广泛使用的制冷方法有以下几种。

(1) 相变制冷

物质有三态: 固态、液态、气态。物质的状态发生改变称为相变。相变过程中, 由于物质分子重新排列和分子热运动速度的改变, 会吸收或放出热量, 这种热量称为潜热。一般固

体融化为液体、固体升华为气体、液体汽化为气体都要产生吸热效应。

所谓相变制冷就是利用物质在一定的低温下相变吸热来制冷。有制冷效应的相变过程有溶解、汽化和升华，其中广泛应用的是液体汽化制冷，它常见的应用形式有四种：蒸气压缩式制冷、吸收式制冷、吸附式制冷和蒸汽喷射式制冷。在空气调节用制冷技术中，蒸气压缩式制冷和吸收式制冷应用最为广泛。

1) 蒸气压缩式制冷

在普通制冷温度范围内，蒸气压缩式制冷是应用最为广泛的制冷系统，它属于液体汽化相变制冷，以消耗一定的电能或机械能为代价实现热量由低温物体向高温物体的转移。系统流程图如图 0-1 所示，蒸气压缩式制冷系统由蒸发器、压缩机、冷凝器、膨胀阀 4 个基本部件构成，通过制冷剂管道将它们连接为一个系统。

其工作过程为：低温低压的制冷剂液体在蒸发器内吸收被冷却物体的热量（制备冷量）汽化为低温低压的制冷剂蒸气，被压缩机吸入、压缩为高温高压的制冷剂蒸气，进入到冷凝器，将热量释放给冷却介质水或空气后，高温高压的制冷剂蒸气冷凝为高温高压的制冷剂液体，再进入膨胀阀节流降压为低温低压的制冷剂液体，之后又进入到蒸发器吸收被冷却物体的热量实现制冷，如此循环往复。

2) 吸收式制冷

在普通的制冷温度范围内，吸收式制冷的应用也比较广泛。吸收式制冷也是利用制冷剂液体在低温下吸热汽化来实现制冷，与蒸气压缩式不同的是消耗热能而非机械能。吸收式制冷的工作与原理如图 0-2 所示，系统主要由四个热交换设备组成，即发生器、冷凝器、蒸发器和吸收器组成，它们组成两个循环：制冷剂循环和吸收剂循环。

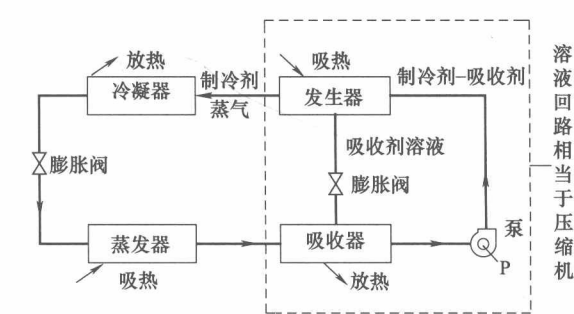


图 0-2 吸收式制冷的工作与原理

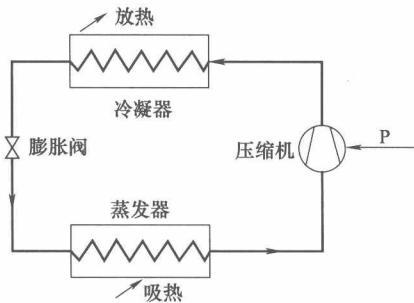


图 0-1 蒸气压缩式制冷系统流程图

其工作过程为：图 0-2 左半部分所示的为制冷剂循环，蒸发器内的制冷剂吸收了被冷却物体的热量变成制冷剂蒸气，被吸收器内的吸收剂吸收后，由溶液泵输送至发生器，在发生器内吸收外界的热量，制冷剂从制冷剂-吸收剂溶液中分离出来进入到冷凝器，在冷凝器中向环境介质放热，冷凝为高压常温液体后，经节流装置节流成低温低压的气-液混合物进入蒸发器，在蒸发器中吸收被冷却物体的热量，汽化成

低温低压的制冷剂蒸气，如此循环往复。图 0-2 所示的右半部分为吸收剂循环（图中虚线部分），属正循环，主要有吸收器、发生器和溶液泵组成。吸收器中的液体吸收剂不断吸收蒸发器中产生的低压制冷剂蒸气，以达到维持蒸发器内低压的目的。吸收剂吸收制冷剂蒸气后形成的制冷剂-吸收剂溶液，经溶液泵升压后进入发生器。在发生器中，该溶液吸收外界供给的热量后被加热、沸腾，其中低沸点的制冷剂汽化形成高压气态制冷剂，与吸收剂分离进入冷凝器，浓缩后的吸收剂溶液经降压后返回吸收器，再次吸收来自蒸发器的低温低压的制

冷剂蒸气。整个吸收剂循环相当于蒸汽压缩式制冷循环中的制冷压缩机。

3) 蒸汽喷射式制冷

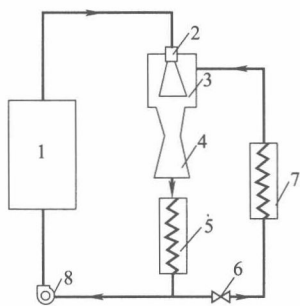


图 0-3 蒸汽喷射式制冷系统图
1—锅炉；2—喷嘴；3—混合室；
4—扩压器；5—冷凝器；6—膨胀阀；
7—蒸发器；8—循环泵

蒸汽喷射式制冷和吸收式制冷相同，都是通过消耗一定的热能、利用液体汽化时吸收热量来实现制冷。蒸汽喷射式制冷系统图如图 0-3 所示，系统主要由喷射器、冷凝器、蒸发器、节流阀、锅炉及泵几部分组成，其中喷射器由喷嘴、混合室和扩压器三部分组成。

工作过程：用锅炉产生高温高压的工作蒸汽，将其送入喷嘴，膨胀并高速流动（流速可达 1000m/s 以上），于是在喷嘴出口处，造成很低的压力，由于混合室和蒸发器相连，所以蒸发器中的压力也会很低，低温低压的部分水吸热汽化，将未汽化的水温度降低，这部分低温水用来制冷，蒸发器中产生的制冷剂水蒸气和工作蒸汽在喷嘴出口处混合，一起进入扩压器，在扩压器中，流速降低压力升高后进入冷凝器，被外部的冷却水冷却而变成液态冷凝水再经冷凝器分两路流出，一路经节流降压后进蒸发器，继续蒸发制冷，另一路经泵升压后回锅炉，重新生产工作蒸汽。

蒸汽喷射式制冷的特点：可以利用余热、废热，结构简单，加工方便，没有运动部件，使用寿命长，但它对工作蒸汽的要求较高，喷射器（包括喷嘴、混合室和扩压器）的流动损失大，效率比较低。

4) 吸附式制冷

吸附式制冷和吸收式制冷相同，都是通过消耗一定的热能、利用液体汽化时吸收热量来实现制冷，其系统图如图 0-4 所示。吸附式制冷系统由吸附器、蒸发器、冷凝器以及膨胀阀等几部分组成。

工作过程：首先是利用固体吸附剂对某种制冷剂有吸附作用，吸附能力与吸附温度有关。固体吸附剂受热，吸附床内压力不断上升，上升到冷凝压力开始解析出制冷剂，并在冷凝器里冷凝为液体，节流降压后进入蒸发器。同时，当固体吸附剂冷却后，吸附床内压力下降，下降到低于蒸发压力时开始吸附制冷剂蒸气，蒸发器中的制冷剂吸热汽化产生冷量，实现制冷过程。

从工作过程可以看出，由加热、解吸、冷凝与冷却、吸附、蒸发交替进行，它是一种间歇式制冷。要实现连续制冷输出，就必须采用两台或多台吸附器，通过多台吸附器加热/冷却运行状态的切换，实现连续供冷。

目前，比较成熟的工质对有：活性炭-甲醇、沸石-水、活性炭-氨、硅胶-水、金属氢化物-氢、氯化钙-氨以及氯化锂-氨等，目前应该用最广泛的是活性炭-甲醇。

吸附式制冷的特点：吸附式制冷可以以太阳能、工业余热等低品位能源作为驱动力，采用非氟氯烃类物质为制冷剂，系统中运动部件少，有节能、环保、结构简单、无噪声、运行稳定等优点，但是系统循环周期太长、制冷量相对较小、COP 有待进一步提高。

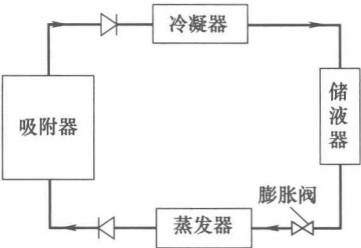


图 0-4 吸附式制冷系统图

(2) 热电制冷

热电制冷的机理完全不同于蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷。热电制冷利用的是温差电效应（珀尔帖效应）的原理来实现制冷的。

1834 年法国物理学家珀尔帖在铜丝的两头各接一根铋丝，在将两根铋丝分别接到直流电源的正、负极上，通电后，发现一个接头变热，另一个接头变冷，这说明两种不同材料组成的电路在有直流电通过时，两个接头处分别发生了吸、放热现象，这就是珀尔帖效应。它就是热电制冷的依据。

珀尔帖效应的大小主要取决于两种材料的热电性。纯金属的导电性好、导热性好，其金属电偶回路产生的珀尔帖效应也很小，制冷效率不到 1%。半导体材料内部结构的特点，决定了它产生的温差电效应要比其他金属更加显著，所以热电制冷都采用半导体材料，故热电制冷也称为半导体制冷。其原理图如图 0-5 所示，它由金属片 I、II、III 和导线将 P 型半导体和 N 型半导体连接成一个回路，回路由低压直流电源供电。当电流经金属片 I 进入 N 型半导体时，在连接处就会放出热量，形成热端；当电流由 N 型半导体进入金属片 III 时，连接处就会吸收热量，形成冷端；当电流由金属片 III 进入到 P 型半导体时，在与金属片 II 的连接处会放出热量，形成热端。

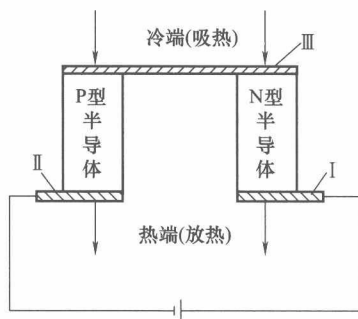


图 0-5 热电制冷原理图

热电制冷是靠 P 型半导体中的空穴和 N 型半导体中的电子在运动中直接传递能量来实现的，不需要制冷剂来实现能量的转移。热电制冷没有压缩机、没有机械装置，工作时无噪声、无污染，设备尺寸小、重量轻、启动快、使用灵活；但是热电制冷用的半导体材料价格高、耗电多、效率低，因此不适合在大规模的用冷场合。

(3) 气体膨胀制冷

气体膨胀制冷是人工制冷方法中发明最早的方法之一，是利用高压气体的绝热膨胀来达到低温，并利用膨胀后的气体在低压下的复热过程来制冷，其原理如图 0-6 所示。气体膨胀制冷系统由制冷换热器、压缩机、冷却器以及膨胀机四部分组成。

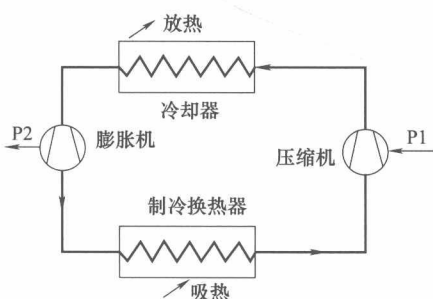


图 0-6 气体膨胀制冷原理图

工作过程：低温低压的空气或制冷剂在制冷换热器中低压吸热升温后进入压缩机，被绝热压缩升温升压，然后进入冷却器冷却到常温（将热量释放给环境介质水或空气）后进入膨胀机，在膨胀机内进行绝热膨胀，降温降压后进入制冷换热器内继续吸收被冷却物体的热量（实现制冷），温度升高后又被吸入到压缩机进行新的循环。

常用的制冷工质为空气、二氧化碳、氮气等。

(4) 涡流管制冷

涡流管制冷与蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷的制冷机理完全不同。它是一种借助涡流管的作用使高速气流产生漩涡分离出冷、热两股气流，利用冷气流而获得制冷的办法。涡流管主要由喷嘴、涡流室、冷端管、热端管、热端控制阀以及压缩气体等组成，其工作原理如图 0-7 所示。压缩气体进入涡流管后，在喷嘴中膨胀减压增速，从切线方向射向涡流室，在涡流室中高速旋转，形成自由涡流，经过自由涡流

层与层之间的动能和热量交换，产生能量分离效应，分离成温度不同的两部分气流。中心部分的气流温度较低，外层部分的气流温度较高。高温流体经过热端控制阀的边缘部分流出，低温流体碰撞热端控制阀中心部位后返流至涡流室冷孔板中心孔流出，可以同时获得制冷和制热两种效应。通过调节热端控制阀的开度可以调节冷、热气流的比列，可以得到最佳制冷效应或最佳制热效应。

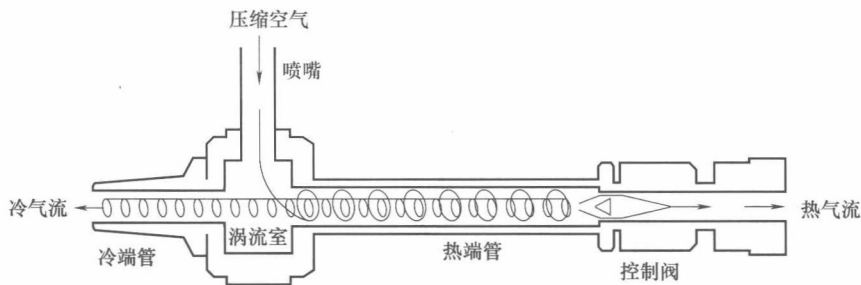


图 0-7 涡流管制冷工作原理图

涡流管制冷无运动部件、启动快、轻巧、方便携带，不需要用电、制冷剂，但是涡流管制冷效率较低、噪声较大，适用于有高压气源或可以廉价获得高压气体的场合。

0.5 制冷的发展趋势

(1) 环保

臭氧层的破坏和全球气候变暖是当今世界所面临的主要环保问题。由于制冷装置广泛采用的制冷剂 HCFC（据研究表明氟利昂中的一个氯原子可以破坏约一万个 O_3 分子）使平流层中 O_3 浓度大幅度减少，让太阳产生的到达地球表面的紫外线大大增加，对人类的健康以及地球的生态环境产生了非常不利的影响。1992 年通过了《蒙特利尔议定书哥本哈根修正案》，议案规定：1995 年年底停止使用 CFCs（氯氟烃）物质，发达国家于 2030 年完全停止消费 HCFCs（氢氯氟烃）物质，2040 年完全停止消费 HCFCs。目前我国的空调、制冷机组、热泵以及其他制冷装置中的制冷剂主要是 R22 和 R134a。基于环保的需要，研究主要集中在新型制冷剂的研发以及与新型制冷剂有关的新技术、新设备、新材料和新的制冷理论和实践两方面。

当前对新型制冷剂的发展趋势主要是 HFC（氢氟烃）和自然工质。在 HFC 的研究中，作为 R22 替代物的 R407C、R401A 以及一些共沸制冷剂都有一定量的使用，这些制冷剂在满足特定需要的同时，也有一定的节能效果。但 HFC 虽然解决了臭氧层问题，可其产生的温室效应不容忽视。从与环境的相容性来说，自然工质是最好的替代物，如 NH_3 、 CO_2 等，如果能解决其与润滑油、材料的相容性、能效等问题，自然工质是最完美的选择。当然在研发新型制冷剂时还应考虑其他环境因素，如设计出的新型制冷剂是否会在一定条件下发生分解等产生一些潜在危险（如毒性或形成酸雨）。

除了新型制冷剂以及相关新技术新设备等的研究外，新的制冷技术也有突破，代表性的有热声制冷和磁制冷研究。它们与传统的蒸汽压缩式制冷相比具有很大的优势：它们无需使用传统的制冷剂，不会导致臭氧层的破坏和温室效应，无需往复运转的设备以及密封、润滑等构件，寿命大大延长。其中热声制冷在红外传感、雷达、计算机芯片以及其他低温电子器

件的降温中已有应用；磁制冷在卫星、宇宙飞船等航天器中有应用；高温磁制冷还在进一步的研究中。

(2) 节能

随着我国经济发展的突飞猛进，用能需求也迅猛增长，同时节能减排指标迅速提高，使得新能源有了巨大的发展空间。建筑能耗占社会总耗能的 20%~30%，其中冷热源设备及系统占建筑能耗的 60%左右。可见，在国家大力提倡节能与能源合理利用、推行清洁能源工程、鼓励开发可再生能源的前提下，冷热源系统的节能对于建筑节能起着举足轻重的作用。

节能，一方面是减少各种损失，改善各种设备的效率；另一方面是提高各种低位能源的品位来达到节能的目的。目前制冷节能新技术中发展迅速的有热泵技术和冰蓄冷技术。

热泵是备受全世界关注的新能源技术。它是一种将低位热源的热能转移到高位热源的装置。热泵通常从自然界的空气、土壤或水中获取低位热能，再以消耗一定的功为代价，可以为热用户提供可利用的高品位热能。热泵技术不断创新，发展十分迅速，在空调领域应用越来越广泛。

冰蓄冷利用夜间电网低谷期制冰将冷量储存在蓄冰装置中，白天电网高峰时段再将蓄冰装置中的冰融化释放冷量来满足空调负荷需求。冰蓄冷对于电网来说，实现削峰填谷，平衡电力负荷、改变发电机组效率；对于制冷机组而言，可以改善制冷机组运行效率以及减少系统的装机容量。业内人士普遍认为，蓄冷空调是节能、节约投资的最佳技术之一。

(3) 智能化

制冷系统是一个封闭系统，要求有很好的密闭性。为了保障制冷设备的正常运转，并达到所有要求（如空调系统负荷运行工况多、干扰因素较多、温湿度相关联等），需要把控制温度、压力、流量、湿度等许多热工参数的一些热工仪表、调节元件等组合起来，形成一个控制系统。通过控制系统可以对制冷系统各设备参数进行及时的检测、调节，一个综合节能控制的制冷空调系统节能效果会更加客观。

随着计算机技术的不断发展，整个制冷系统都在向全自动化方向发展。对制冷装置有关参数的最佳综合调节、实现系统整体节能等是制冷系统的必然趋势。

思考与练习

1. 什么叫制冷？实现制冷由哪两种途径？
2. 什么叫人工制冷？人工制冷有哪些方法？最常用的是什么方法？
3. 根据制冷温度的不同，制冷技术分为哪几类？
4. 制冷目前在人类社会中有何应用？
5. 制冷技术的发展趋势是什么？

第1章

单级蒸气压缩式制冷原理

目标要求：

- ① 理解蒸气压缩式制冷系统的基本组成及各部分功能；
- ② 熟悉单级蒸气压缩式制冷循环的经济性评价指标及影响因素；
- ③ 掌握单级蒸气压缩式制冷热力学基础以及理想制冷循环、理论制冷循环、实际制冷循环特点和工程应用方法；
- ④ 熟练应用压焓图对单级蒸气压缩式制冷循环进行热力计算。

制冷是指用人工的方法将被冷却对象的热量转移到周围环境介质，使得被冷却对象达到比环境介质更低的温度，并在所需的时间内维持这个低温。制冷与冷却都是一个降温过程，但冷却是热量从高温对象传向低温对象的过程，是一个自发的过程；而制冷是将热量从低温对象传给高温对象，是一个非自发的过程，需要使用一定的设备，消耗外界能量作为补偿。同时，热量的转移需要一种能够携带热量的工作物质来完成，这种工作物质在制冷系统中称为制冷剂。制冷就是通过制冷剂热力状态不断发生变化来完成的。

蒸气压缩式制冷是利用制冷剂液体在汽化过程中从周围介质（被冷却物）吸收热量（汽化潜热）而产生冷效应来实现的。我们知道，液体工质在不同压力下其饱和温度（沸点）不同，液体压力越低，对应的饱和温度越低，因此只要创造一定的低压条件，就可以利用液体汽化的方法获取所要求的低温。

1.1 蒸气压缩式制冷的基本原理

1.1.1 制冷的热力学基础

(1) 热力学定律

在制冷系统中，能量的相互转移与转换需要通过制冷剂吸热或放热、膨胀或压缩等变化来完成，因此制冷的理论基础就是研究能量相互转换过程中所应遵循的科学规律，即热力学。热力学是从宏观角度研究物质的热运动性质及其规律的学科，主要是从能量转化的观点来研究物质的热性质，它揭示了能量从一种形式转换为另一种形式时遵从的宏观规律，总结了物质的宏观现象而得到的热力学理论，它研究系统在整体上表现出来的热现象及其变化发