



高职高专“十一五”规划教材

制冷技术

■ 孙见君 主编
■ 杜 垚 主审



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

制 冷 技 术

孙见君	主 编
滕文锐	副主编
杜 垚	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书吸收国内外制冷技术最新研究成果,具有简明扼要、深入浅出、内容新颖等特点。全书以蒸气压缩式制冷为主线,分别介绍了蒸气压缩式制冷方法、制冷剂、制冷循环过程,以及组成蒸气压缩式制冷系统的压缩机、换热设备、节流元件和维持系统稳定运行的油分离器、储液器、空气分离器等设备的类型、结构;以吸收式制冷为主线,分别介绍了吸收式制冷方法与制冷原理、吸收式制冷循环工作过程、氨水吸收式制冷机和溴化锂吸收式制冷机的设备组成、工作原理,并进行了相关的热力计算。阐述了制冷技术的发展历程、制冷技术的应用,指出了制冷技术发展的方向。

本书可作为高职高专“制冷与冷藏技术”专业学生的教材,也可供机械化工、建筑、航天、食品、医药等领域从事制冷与冷藏、建筑环境与设备(暖通空调)有关的科研、设计、生产等工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

制冷技术/孙见君主编. —北京:化学工业出版社,
2007.7

高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-00537-3

I. 制… II. 孙… III. 制冷技术-高等学校:技术
学校-教材 IV. TB66

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第076955号

责任编辑:高 钰
责任校对:陈 静

文字编辑:余纪军
装帧设计:于 兵

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:北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张16¼ 字数442千字 2007年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 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:27.00元

版权所有 违者必究

前 言

随着人民生活水平和对环境要求的提高,以及生产技术的进步,制冷技术的发展和應用得到更为广泛的关注。制冷技术包括制冷原理和制冷装备两个方面,本书系统简明地介绍常用制冷方法、原理及其制冷装备。

本书根据教育部 2005 年颁布的高职高专“制冷与冷藏技术”专业业务培养目标和要求,遵循淡化专业意识、拓宽基础、加强素质教育和能力培养的原则,在吸收国内外最新教学和研究成果的基础上编写的。全书共分 6 章,在简要介绍制冷技术的发展历程、制冷技术应用的基础上,着重以蒸气压缩式制冷技术和吸收式制冷技术为主线,阐述蒸气压缩式制冷方法、制冷剂、制冷循环过程,组成蒸气压缩式制冷系统的压缩机、换热设备、节流元件和维持系统稳定运行的油分离器、储液器、空气分离器等设备的类型、结构,以及吸收式制冷方法与制冷原理、吸收式制冷循环工作过程、氨水吸收式制冷机和溴化锂吸收式制冷机的设备组成、工作原理和相关的热力计算。每一章后均附有复习思考题,书末附有常用制冷剂物性图表。

本书参加编写的成员有:孙见君(第 1 章绪论,第 3 章第 1 节中的制冷辅助设备和泵与风机部分、第 2 节,第 6 章)。滕文锐(第 2 章)、隋博远(第 3 章第 1 节中的压缩机、换热器和节流装置部分)、商萍君(第 4 章、第 5 章)。全书由孙见君主编,东南大学杜垲教授主审。

本书得到了江苏省高等教育教学改革研究课题“高等职业类制冷技术人才培养模式研究与实践”的资助。在编写和出版过程中,得到了南京化工职业技术学院热能与动力工程教研室魏龙副教授、常州工程职业技术学院杜存臣副教授、中石化扬子石油化工股份有限公司储运厂孙华光高级工程师等的支持与帮助;南京化工职业技术学院全琴、黄建、蒋李斌等对书中的习题、部分图稿进行了详细的校核与绘制,在此一并表示衷心的感谢。

本书可作为高职高专“制冷与冷藏技术”专业学生的教材,也可供机械化工、建筑、航天、食品、医药等领域从事制冷与冷藏、建筑环境与设备(暖通空调)有关的科研、设计、生产等工作的技术人员参考。

限于作者的水平,书中的不妥之处恳请读者批评指正。

孙见君
2007 年 5 月

高职高专制冷与空调专业系列教材 编审委员会

主 任

王绍良

副主任

李晓东 赵玉奇 孙见君 魏 龙
杜存臣 隋继学 魏 琪

委 员

(按姓氏汉语拼音排序)

常新中	杜 垵	杜存臣	冯殿义	傅 璞
郝万新	李少华	李晓东	林慧珠	刘玉梅
潘传九	申小中	隋继学	孙见君	王绍良
魏 龙	魏 琪	杨雨松	赵晓霞	赵玉奇
郑智宏	周 皞	朱明悦		

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 制冷技术的发展历程	1
1.1.1 制冷方法与制冷机	1
1.1.2 制冷剂	3
1.2 制冷技术的应用	5
1.3 制冷技术的发展趋势	6
1.3.1 制冷技术在制冷方法和制冷剂上向绿色环保方面发展	6
1.3.2 制冷技术学科内部进一步交叉融合	7
1.3.3 制冷技术学科与其他学科的交叉融合	7
1.3.4 制冷技术应用中的节能问题	7
1.3.5 制冷产品从设计到制造向个性化、精细化方向发展	7
1.3.6 社会需求促使制冷技术的应用向更广、更深领域发展	8
1.4 制冷技术课程的主要内容和任务	8
1.4.1 制冷技术课程的主要研究内容	8
1.4.2 制冷技术课程的任务与学习方法	9
第 2 章 蒸气压缩式制冷原理	10
2.1 单级蒸气压缩式制冷循环	10
2.1.1 蒸气压缩式制冷理论循环及其热力计算	11
2.1.2 蒸气压缩式制冷的实际循环	15
2.1.3 蒸气压缩式制冷循环的影响因素及工况	25
2.1.4 螺杆压缩式与单级离心压缩式制冷循环	30
2.1.5 空气源热泵和地源热泵	34
2.2 双级蒸气压缩式制冷循环	38
2.2.1 采用双级蒸气压缩式制冷循环的原因和条件	38
2.2.2 双级蒸气压缩式制冷循环	40
2.2.3 双级蒸气压缩式制冷循环的热力计算	44
2.2.4 温度变动对双级蒸气压缩式制冷循环制冷机特性的影响	52
2.3 复叠式制冷循环	53
复习思考题	56
第 3 章 蒸气压缩式制冷机	58
3.1 蒸气压缩式制冷设备	58
3.1.1 压缩机	58

3.1.2	换热器	92
3.1.3	节流装置	105
3.1.4	制冷辅助设备	110
3.1.5	泵与风机	123
3.2	蒸气压缩式制冷系统	144
3.2.1	蒸气压缩式氨制冷系统	145
3.2.2	蒸气压缩式氟里昂制冷系统	151
	复习思考题	161
第4章	吸收式制冷原理	163
4.1	吸收式制冷方法与制冷原理	164
4.1.1	吸收式制冷方法	164
4.1.2	吸收式制冷循环原理	164
4.1.3	吸收式制冷循环工作过程	167
4.2	二元溶液 t - ξ 图、 p - ξ 图和 p - x 图及其定压发生过程	168
4.2.1	二元溶液的 t - ξ 图	168
4.2.2	二元溶液的 p - ξ 图	171
4.2.3	二元溶液的 p - x 图	171
4.2.4	密闭容器内二元溶液的定压发生过程	173
4.3	二元溶液焓-浓度 (h - ξ) 图	176
4.3.1	二元溶液的 h - ξ 图	176
4.3.2	NH_3 - H_2O 溶液的 h - ξ 图	178
4.3.3	溴化锂-水溶液的 h - ξ 图	178
4.4	二元溶液混合、加压和节流	181
4.4.1	两股二元溶液的混合	181
4.4.2	二元溶液的节流	184
4.4.3	二元溶液的加压	184
	复习思考题	185
第5章	吸收式制冷机	186
5.1	氨水吸收式制冷机	186
5.1.1	NH_3 - H_2O 溶液的性质	186
5.1.2	氨水吸收式制冷机工作原理	188
5.1.3	单级氨水吸收式制冷机制冷循环的热力计算	190
5.1.4	氨水吸收式制冷机的性能影响因素及提高途径	192
5.2	溴化锂吸收式制冷机	193
5.2.1	溴化锂吸收式制冷机工作原理	194
5.2.2	溴化锂吸收式制冷机的分类	199
5.2.3	溴化锂吸收式制冷机的特点	200
5.2.4	溴化锂吸收式制冷机的热力计算	201
5.2.5	单效溴化锂吸收式制冷机	207
5.2.6	双效溴化锂吸收式制冷机	212

5.2.7 溴化锂吸收式制冷机的性能影响因素及提高途径	221
复习思考题	226
第6章 其他制冷技术	228
6.1 磁制冷技术	228
6.1.1 基本原理	228
6.1.2 磁制冷机研究	229
6.1.3 开发磁制冷技术需解决的问题	230
6.2 热声制冷技术	231
6.2.1 热声制冷原理	231
6.2.2 热声制冷机及其应用	232
6.2.3 国内热声制冷的研究状况	234
6.3 热管制冷技术	234
6.3.1 热管的发展及现状	234
6.3.2 热管的工作原理	236
6.3.3 热管技术在制冷空调行业中的应用	236
6.4 太阳能制冷技术	239
6.4.1 太阳能光-电转换实现制冷的原理及其研究现状	239
6.4.2 太阳能吸收式制冷的原理及其研究现状	239
6.4.3 太阳能吸附式制冷原理及其研究现状	241
6.4.4 太阳能喷射式制冷原理及其研究现状	241
复习思考题	243
附录 常用制冷剂的热力性质表和图	244
参考文献	252

第 1 章 绪 论

制取低温环境可以通过两种途径来实现，一种是利用天然冷源，另一种是人工制冷。天然冷源主要是指夏季使用的深井水和冬天储存下来的天然冰。在夏季，深井水低于环境温度，可以用来防暑降温或作为空调冷源使用；天然冰可以用来冷藏食品和防暑降温。天然冷源虽具有价格低廉和不需要复杂技术设备等优点，但受到时间和地域等条件，尤其是制冷温度的限制，不能获取 0°C 以下的温度环境。因此，天然冷源只能用于防暑降温、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 0°C 以下的制冷温度，必须采用人工制冷的方法来实现。

制冷技术是指用人工方法使某一个空间和物质的温度低于自然界环境介质的温度，并在规定的时间保持这一低温状态的过程。所谓人工方法指的是实现制冷过程而运用的制冷方法（热力学原理和传热原理）、制冷剂以及制冷机。

一般来说，制冷方法主要有三种：①利用物质相变（如融化、蒸发、升华等）的吸热效应制冷；②利用气体膨胀产生的冷效应制冷；③利用帕尔帖效应的热电制冷。除此之外，获得低温的方法还有绝热去磁制冷、热声制冷以及涡流管制冷和激光制冷等。

制冷过程大多依靠内部流动的工作介质来完成（热电制冷除外），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。根据化学组分不同，目前制冷剂可分为单一制冷剂和混合制冷剂。按照化学性质差异，单一制冷剂又分为无机化合物制冷剂和有机化合物制冷剂。有机化合物制冷剂包括碳氢化合物制冷剂和卤代烃制冷剂。混合制冷剂分为共沸制冷剂和非共沸制冷剂。

实现制冷过程所需的机器和设备，称为制冷机。例如蒸气压缩式制冷机包括压缩机、蒸发器、冷凝器和节流机构；吸收式制冷机包括发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和节流机构等。在制冷机中，除压缩机、泵和风机等机器外，其余是换热器及各种辅助设备，统称制冷设备。而将制冷机同消耗冷量的设备结合一起的装置称为制冷装置，例如冰箱、冷库、空调器等。

2000 年，美国机械工程师协会（ASME）将制冷技术评为 20 世纪对人类社会和生活最具影响的十大成就之一。当然，制冷技术能有今天这样的影响经历了相当长一个发展阶段。社会生产和人民生活需求推动着制冷技术的变革和应用。随着国民经济的发展，科学技术的进步，人民生活水平的不断提高，制冷技术的发展与应用必将拥有更加广阔的空间和美好灿烂的明天。

1.1 制冷技术的发展历程

1.1.1 制冷方法与制冷机

现代制冷技术是在 18 世纪中叶开始的。1755 年爱丁堡的化学教授库伦（William

Cullen) 利用乙醚蒸发使水结冰。随后, 他的学生布拉克 (Black) 从本质上解释了融化和汽化现象, 提出了潜热的概念, 开创了现代制冷技术的先河。

1834 年在伦敦工作的美国发明家帕尔金斯 (Perkins) 造出了第一台以乙醚为工质的蒸气压缩式制冷机, 并正式申请了专利。这是后来所有蒸气压缩式制冷方法的雏形, 其重要进步在于这台装置实现了闭合制冷循环。但所使用的乙醚工质易爆, 使得它未能被广泛应用。到 1875 年开利 (Carre) 和林德 (Linde) 用氨作制冷剂, 大大减小了设备的体积。从此, 蒸气压缩式制冷方法在制冷装置的生产和应用中占据了统治地位。

在此期间, 空气绝热膨胀产生显著降温的原理也开始应用于制冷。1844 年, 美国医生高里 (Gorrie) 发明了空气制冷机, 用封闭循环的空气制冷机为发烧病人建立了一座空调站。

1859 年, 开利 (Carre) 发明了氨水吸收式制冷系统, 并申请了原理专利。

1910 年左右, 马利斯·莱兰克 (Maurice Leblanc) 在巴黎发明了蒸气喷射式制冷系统。

19 世纪, 由于早期资本主义社会急迫的供给问题, 促使制冷技术迅速发展, 制冷技术已基本成形。

20 世纪后, 制冷技术有了更大的发展, 1910 年家用冰箱问世, 1917 年在美国作为商品投放市场。1930 年, 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新的变革。

但是, 1974 年 Molina 和 Rowland 提出的制冷系统释放到大气中的氟氯烷制冷剂对同温层臭氧消耗的假设, 引起了全球的广泛关注。由于目前化学工业还未能找到真正高效、环保的 CFC 制冷剂, 因而一些新的制冷技术应运而生。

声制冷是利用处于声场中的固体介质与振荡流体相互作用, 导致在距固体表面一定范围内产生定向的时均热流和时均声功流, 即热声效应而产生制冷效果的方法。热和声之间是可以相互转换的。声介质在机械振荡的同时, 经历一个热力学循环过程, 在适当的条件下, 这一循环的结果将能实现热能与机械能间的相互转换, 从而形成制冷。

热声效应的研究可追溯到 1777 年, Byron Higgins 发现氢火焰放在两端开口的管中适当位置, 管中会激发出声音。到 1974 年, Mekli 和 Thomann 对这一效应做了相反方向的研究。他们向一个充满气体的共振管内输入声波, 结果发现热量从共振管内驻声波的速度最大值处传向压力最大值处。在前人研究成果的基础上, 美国的 Hofler 博士于 1986 年终于制造出了世界上第 1 台可连续工作的声制冷机。声制冷机结构简单可靠、无滑动密封件, 低振动, 寿命长, 在现代科技的某些领域乃至人们的日常生活中具有广阔的应用前景。近几年我国研究人员也开始加入了这项研究工作。

为了获得低温, 早期大多采用气体膨胀方式来制冷。但由于低温下气体的蒸气压迅速降低, 使其获得更低制冷温度十分困难。磁制冷技术的出现, 解决了制取极低温的难题。磁制冷方式是一种以磁性材料为工质的制冷技术, 其基本原理是借助磁制冷材料的可逆的磁热效应 (Magnetocaloric Effect, MCE), 即在等温磁化时向外界排放热量, 退磁时从外界吸取热量, 从而达到制冷目的。

磁制冷的研究可追溯到 120 多年前, 1881 年 Warburg 首先观察到金属铁在外加磁场中的热效应。20 世纪初, Langevin 第一次展示通过改变顺磁材料的磁化强度导致可逆温度变化。1918 年 Weiss 和 Piccard 从实验中发现 Ni 的磁热效应。1926 年 Debye、1927 年 Giauque 两位科学家分别从理论上推导出可以利用绝热去磁制冷的结论后, 极大地促进了磁制冷的发展。1933 年 Giauque 等人以顺磁盐 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ 为工质成功获得了 1K 以下的超低温, 此后磁制冷的研究得到了蓬勃发展。最初, 人们将磁制冷技术用于极低温的制

取, 1976 年美国 NASA Lewis 的 Brown 研制的磁制冷实验装置首次在实验室实现了室温磁制冷; 1977 年 Los Alamos 实验室的 Steyert 设计了一个实验装置, 在 3K 温跨下仅获得了 1W 的功率。1985 年日本九州大学设计了一种永磁式串级回转磁制冷样机, 1996 年美国宇航公司的工程师 Carl Zimm 研制了室温磁制冷样机。2001 年 12 月美国又研制出永磁体室温磁制冷冰箱展示机, 从而将室温磁制冷从实验室研究推进到实用化研究阶段。日本中部电子公司与东芝公司共同开发出利用稀土永磁体磁场的新型磁制冷系统。2000 年该公司率先在世界上开发出利用超导磁体的强磁场的磁制冷系统, 2002 年 10 月又报道了开发出利用稀土永磁体的往复驱动型磁制冷系统。2003 年开发出的磁制冷系统, 将稀土永磁体磁场变化给予的驱动部分从原来的水平方向往复驱动变成旋转型驱动。

在进一步提高蒸汽压缩式制冷效率和减少对环境危害的同时, 科学家和工程研究人员仍在不断探索新的制冷技术, 以适应不同场合的需求。

1.1.2 制冷剂

从历史上看, 制冷剂的发展经历了 3 个阶段: 第一阶段是 19 世纪的早期制冷剂 (1830~1930 年); 第二阶段是 20 世纪 90 年代前的氯氟烃 CFCs (Chlorofluorocarbon) 与含氢氯氟烃 HCFCs (Hydrogen containing chlorofluorocarbon) 制冷剂 (1930~1990 年); 第三阶段是其后的绿色环保制冷剂, 主要为氢氟烃 HFCs (Hydrofluorocarbon) 和天然工质类 (1990 年至今)。

(1) 第一阶段——早期的制冷剂 1805 年, 埃文斯 (O. Evans) 原创性地提出了在封闭循环中使用挥发性流体的思路, 用以将水冷冻成冰。他描述了这种系统, 在真空中将乙醚蒸发, 并将蒸气泵到水冷式换热器, 冷凝后再利用。迄今为止, 虽然没有发现有关建成这种制冷机的任何报道, 但他的思想或多或少地对后来的帕金斯 (J. Perkins) 和特里维西克 (R. Trevithick) 二人产生了影响。

1824 年, 特里维西克首先提出了空气制冷循环设想, 但也未建成装置。1834 年, 帕金斯则第一次开发了蒸汽压缩制冷循环, 并获得了专利。在他所设计的蒸汽压缩制冷设备中使用二乙醚 (乙基醚) 作为制冷剂。

随着帕金斯所发明的蒸汽压缩式制冷设备正式投入使用, 从 19 世纪 30 年代开始陆续开发了一些实际的制冷剂。帕金斯开发的第一台制冷机, 使用的制冷剂是作为工业溶剂的橡胶馏化物 (Caoutchoucine)。他之所以选用这种流体, 主要是由于当时较易获得这种流体。由此可见, 从早期开始, “易获得性” 始终成为制冷剂选择的一条重要原则。

表 1-1 列出了早期用过的制冷剂。

从 19 世纪 30 年代到 20 世纪 30 年代的 100 年中, 人们一直都在沿用这些当时所熟悉的制冷剂, 其目标是实现制冷和保证设备的寿命。当这些单一工质不能满足新的目标要求时, 1885 年皮克提特 (Pictet) 提出了使用混合物的设想。

1924 年, 凯瑞 (W. H. Carrier) 和沃特菲尔 (R. W. Waterfill) 进行了开创性的系统研究, 调查了一些适用于大排量压缩机和离心压缩机的候选制冷剂, 详细分析了氨 (NH_3)、乙基乙醚、二氧化碳 (CO_2)、四氯化碳 (CCl_4)、二氧化硫 (SO_2) 和水 (H_2O) 的情况。他们当时得出的结论是: CO_2 的性能取决于循环方式和过冷度, 而其性能比其他所调研的制冷剂都差; 水蒸气的效率低; 由于安全原因, SO_2 被排除; CCl_4 特别是含水时腐蚀金属, 也被放弃。他们最终选择了二氯乙烷异构体 (R1130) 作为第一台离心式压缩机的制冷剂。

早期的制冷剂, 几乎多数是可燃的或有毒的, 或两者兼而有之, 而且有些还有很强的腐蚀和不稳定性, 或有些压力过高, 经常引发事故。随着第一次世界大战结束, 制冷机的产量

表 1-1 早期用过的制冷剂

年 份	制 冷 剂	化 学 式
19 世纪 30 年代	橡胶馏化物	
	二乙醚(乙基醚)	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$
19 世纪 40 年代	甲基乙醚(R-E170)	$\text{CH}_3-\text{O}-\text{CH}_3$
1850	水/硫酸	$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$
1856	酒精	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{OH}$
1859	氨/水	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$
1866	粗汽油	
	二氧化碳(R744)	CO_2
19 世纪 60 年代	氨(R717)	NH_3
	甲基胺(R630)	$\text{CH}_3(\text{NH}_2)$
	乙基胺(R631)	$\text{CH}_3-\text{CH}_2(\text{NH}_2)$
1870	甲基酸盐(R611)	HCOOCH_3
1875	二氧化硫(R764)	SO_2
1878	甲基氯化物, 氯甲烷(R40)	CH_3Cl
19 世纪 70 年代	氯乙烷(R160)	$\text{CH}_3-\text{CH}_2\text{Cl}$
1891	硫酸与碳氢化合物	$\text{H}_2\text{SO}_4, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_5\text{H}_{12}, (\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}_3$
20 世纪初	溴乙烷(R160B1)	$\text{CH}_3-\text{CH}_2\text{Br}$
1912	四氯化碳	CCl_4
	水蒸气(R718)	H_2O
20 世纪 20 年代	异丁烷(R600a)	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}_3$
	丙烷(R290)	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_3$
1922	二氯乙烷异构体(R1130)	$\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$
1923	汽油	HCs
1925	三氯乙烷(R1120)	$\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CHCl}_2$
1926	二氯甲烷(R30)	CH_2Cl_2

增加, 急需各方面合适的制冷剂。选择制冷剂的注意力转向了安全和性能。

(2) 第二阶段——氯氟烃 CFCs 与含氢氯氟烃 HCFCs 制冷剂 CFCs 和 HCFCs 制冷剂的发现和开发, 源于 1928 年有人给梅杰雷 (T. Midgley) 爵士的一个电话。当时他因开发了用四乙化铅改进正辛烷汽油的性能而成为著名的发明家。他从电话中得知, 制冷工业需要新型制冷剂, 希望这种制冷剂安全、稳定、性能好而且容易获取。于是他与其助手亨尼 (A. L. Henne) 和麦克耐瑞 (R. R. McNary) 从当时的物性表中搜寻具有合适沸点的化合物, 条件是有好的稳定性、无毒和不燃。当时出版的四氟化碳 (CF_4) 的沸点 (尽管当时发表的 CF_4 沸点值是不正确的, 比后来证实的沸点高了许多), 引导他们的注意力集中到了有机氟化物。氟本身有毒, 但他们认识到含氟的化合物可以是无毒的。

1930 年, 梅杰雷和他的助手在亚特兰大举行的美国化学学会年会上, 宣布了第一份关于有机氟化合物制冷剂的文章, 文中说明了如何根据所要求的沸点, 将碳氢化合物氟化或氯化, 并说明了化合物成分将如何影响可燃性和毒性。他们评价了单碳族 15 种含氢、氯和氟的化合物, 最终选出了氯氟烃 12 (CFC12 , R12 , CF_2Cl_2), 并于 1931 年得到商业化。紧接着, 1932 年, 氯氟烃 11 (CFC11 , R11 , CF_2Cl_2) 也被商业化。随后, 一系列 CFCs 和 HCFCs 陆续得到了开发, 最终在美国杜邦公司得到大量生产, 逐渐替代了已使用 100 年之久的那些早期制冷剂 (除 NH_3 外), 而成为 20 世纪制冷剂的主要潮流, 在制冷空调和热泵系统中得到了广泛应用。表 1-2 为后来常用的这些制冷剂的开发时间。后来的研究人员, 用更新的方法和数据重复了梅杰雷的工作, 都得到了相似的结果。这一类制冷剂的特点是安全、稳定且热工性能良好。

表 1-2 第二阶段制冷剂开发时间表

年 份	制 冷 剂	年 份	制 冷 剂
1931	R12	1936	R22
1932	R11	1945	R13
1933	R114	1955	R14
1934	R113	1961	R502

(3) 第三阶段——绿色环保类制冷剂 为了遵循《蒙特利尔议定书》的规定,开发新的环保的制冷剂来替代 CFCs 和 HCFCs 是十分迫切的。目前正在使用的环保制冷剂有 3 大类:含氢氟烃 HFC (Hydrofluorocarbon) 类;回归第一代的天然工质(氨、碳氢类、CO₂ 等);HCFC 和 HFC 混合制冷剂。表 1-3 列出了目前各种用途常用的制冷剂及替代制冷剂。

表 1-3 绿色环保制冷剂的现状

制 冷 用 途	原 制 冷 剂	制 冷 剂 替 代 物
家用和楼宇空调系统 大型离心式冷水机组	HCFC22 CFC11 CFC12,R500 HCFC22	HFC 混合制冷剂 HCFC123 HFC134a HFC 混合制冷剂
低温冷冻冷藏机组和冷库	CFC12 R502,HCFC22 NH ₃	HFC134a HFC 或 HCFC 混合制冷剂 NH ₃
冰箱冷柜、汽车空调	CFC12	HFC134a HC 及其混合制冷剂 HCFC 混合制冷剂

选择替代制冷剂主要从环境、安全性、热工性能、实用性等几个方面加以权衡。具体有以下因素:①制冷剂的大气寿命;②臭氧耗损潜值 ODP;③变暖影响总当量 TEWI;④制冷剂的毒性和可燃性;⑤制冷剂运行的压力;⑥制冷剂的热工特征;⑦与系统中所用材料的相容性;⑧与润滑油的互溶性和相容性。其他现场或设备因素也可能影响替代制冷剂的选择。例如,制冷剂的改变会改变对冷水机组或机房的建筑物要求。

1.2 制冷技术的应用

制冷技术的应用范围非常广泛。普通制冷主要用于空调、除湿、热泵蒸发和热泵干燥;低温制冷主要用于冷藏、冷冻、化工生产工艺过程,生化制品的生产;超低温制冷主要用于气体分离、气体液化、超导和宇航等。

制冷技术在国民经济的各个部门及人们的日常生活中的应用主要体现在以下几方面。

(1) 冷藏 制冷技术在冷冻与冷藏上的应用主要是对易腐食品(如鱼、肉、蛋、果类、蔬菜等食品)进行冷加工、冷藏及冷藏运输,以减少生产和分配中的食品损耗,保证各个季节市场的合理分配。采用的制冷装置有冷库、冷藏汽车、冷藏船、冷藏列车、冷藏商品陈列柜、冷柜和家用冰箱等。

(2) 空气调节 随着人们生活水平的提高,为了满足人们舒适的生活和工作环境,空调技术的使用得到了很大的发展。例如宾馆、商场、剧场、大型公共建筑、汽车、飞机座舱、办公室、居民住宅等的空调设备,为人们提供了适宜的生活和工作环境,不仅有益于身心健

康,而且可以提高生产和工作效率。

大型集中式空调系统供冷。例如我国的首都机场,拥有空调冷量 $1.2 \times 10^4 \text{ kW}$;日本大阪的“国际博览会”,建筑面积 $80 \times 10^4 \text{ m}^2$,拥有空调冷量 $10 \times 10^4 \text{ kW}$;法国某居民住宅的空调系统,拥有空调冷量 $7 \times 10^4 \text{ kW}$,可向 6000 户居民、 $100 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的居住面积供冷。

(3) 除湿 高温生产车间,纺织厂、造纸厂、印刷厂、胶片厂、机器设备的操作控制房,精密仪器车间,精密机床加工车间,精密计量室,计算机房等的环境除了对温度要求调节外,往往对环境的湿度也有较高的要求。使用冷冻除湿机进行除湿,可以保证产品的质量,机器、仪表的精度,以及精密设备的正常特性。

(4) 工业生产 在工业生产中,借助于制冷,可使气体液化、气体分离,带走化学反应中的反应热。盐类结晶,燃料、化肥的生产,天然气的液化、储运都需要制冷。利用制冷可以对钢进行低温处理 ($-90 \sim -70^\circ\text{C}$),可以改变其金相组织,使奥氏体变成马氏体,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。在钢铁工业中,高炉鼓风需要用制冷的方法先将其除湿,然后再送入高炉,以降低焦化比,保证铁水质量,一般大型高炉需几千千瓦冷量。

(5) 农牧业 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,保存动物良种等。

(6) 建筑工程 利用制冷可实现冻土法开采土方。在挖掘矿井、隧道、建筑江河堤坝时,或在泥沼、砂水处掘井时,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,借冰的溶化热补偿水泥的固化反应热,可以制出大型混凝土构件,有效地避免了大型构件因得不到充分散热而产生内应力和裂缝等缺陷。

(7) 国防工业 高寒条件下工作的发动机、汽车、坦克、大炮等常规武器的性能,在研制和生产过程中往往需进行环境模拟实验;航空仪表、火箭、导弹中的控制仪器,也需在地面模拟高空低温条件进行性能实验,这些都需要利用制冷为其提供低温和低压环境试验条件。原子能反应堆的控制也需要制冷,人防与地下工程需要制冷进行除湿。

(8) 医疗 除了低温保存疫苗、药品、血液及皮肤外,冷冻手术,如心脏、外科、白内障摘除的切除手术,皮肤和眼球的移植手术及低温麻醉等,均需要制冷技术的支持。生物化学产品、药品需要利用真空冷冻干燥。

此外,电子技术、能源、新型原材料、宇宙开发、生物技术等尖端科学领域中,制冷技术也起着重要的作用。

1.3 制冷技术的发展趋势

随着社会经济的不断发展和制造技术的变革,各行各业对制冷技术提出了更多的要求,当然也刺激了制冷技术的发展。宏观上讲,制冷技术的进步仍然表现为制冷方法、制冷工质和制冷机的推陈出新。然而,作为集热力学、传热学、流体力学、机械制造工艺学等于一身的制冷技术,在科学技术发达的今天,已不再单单表现为某一方面的进步,而是追求综合效果的最优化,即向绿色环保、节能高效、智能化方向发展其应用领域更广、更深。

1.3.1 制冷技术在制冷方法和制冷剂上向绿色环保方面发展

臭氧层破坏是当今全球性环境问题之一,它对人类健康和人类所依赖的生态环境造成了巨大的有害影响。保护臭氧层已经成了世界各国义不容辞的迫切任务。削减和淘汰 CFCs 和

HCFCs 在内的消耗臭氧层物质 (ODS) 不仅对于保护臭氧层进而保护环境有着十分重要的意义, 也是许多相关领域中开展科学研究和技术革新的强大推动力。由于制冷与空调领域中广泛采用的 CFCs 和 HCFCs 对臭氧层有破坏作用以及产生温室效应, 因此开发新的制冷方法, 以及研究用以替代 CFCs 和 HCFCs 的制冷剂显得尤为重要。

1.3.2 制冷技术学科内部进一步交叉融合

制冷技术的多学科交融不仅获得了最佳的制冷效果, 也使人们减少了能耗, 改善了环境, 提高了生活质量和产品质量。空调系统从单一的降温调节向温度、湿度参数调节及空气品质控制方向发展和应用; 对于食品工业, 果品蔬菜在冷冻冷藏加工、储存、运输中, 不仅要控制温度、湿度, 为了保证其新鲜程度, 还需要调节空气成分。在零售领域过去单一控制温度的冷藏柜、小型冷库等冷藏设施中, 为了减少食品储存的干耗, 现已增添了加湿装置, 以保持食品的鲜度。气体工业的发展, 液氮成本的降低, 使液氮速冻装置和液氮冷藏汽车在我国食品工业中的实用化已变成现实; 生物低温保存需要现代化科学测量技术、能源工程、低温电子学提供高性能冷冻干燥设备、程控生物升/降温仪、生物快速冷冻设备、冷冻治疗仪、低温真空设备、高低温试验设备、天然气液化、高温超导红外器件等设备。在克服了回油和高效分离技术难点后, 采用回热式一次节流循环、单压缩机、混合工质制备 -70°C , -130°C , -150°C 低温的制冷技术替代复叠式制冷循环技术等。这些都表明, 学科内部之间的交融具有巨大的潜力。

1.3.3 制冷技术学科与其他学科的交叉融合

① 随着计算机技术及现代控制理论的发展, 控制方面已由过去人工的智力控制向电子计算机的智能控制发展。模糊控制、神经网络控制技术, 将被进一步推广应用。例如, 电子膨胀阀具有根据制冷系统中热负荷的变化, 自动跟踪调节制冷剂流量, 以达到热负荷最佳平衡的能力, 在变频空调中得到了较为广泛的应用, 并在制冷系统中也初步显示出优越性。

随着住宅的智能化, 智能信息家电产品已开始实用化。集制冷技术与电子技术、计算机、通讯、建筑为一体形成网络控制, 网络冰箱和空调有望在今后率先推广应用。

② 空气动力学原理在制冷空调中的应用在逐渐扩大和交融。航空三元流动、旋涡分离等空气动力学原理在离心式制冷压缩机、轴流式通风机中的应用, 可以提高能量效率和降低运行噪声。利用这些理论对叶轮和扩压器设计进行改进, 效率可望提高 $40\%\sim 50\%$ 。

1.3.4 制冷技术应用中的节能问题

我国的人均能源资源占有量相对不足, 仅为世界平均水平的 $40\%\sim 50\%$ 。能源问题是制约我国现代化建设的关键问题之一。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高, 制冷空调的应用已十分普及。目前广泛采用的压缩式制冷消耗大量的电能, 其消耗电能所占的比重相对较大。据报道, 北京、深圳的夏季集中空调用电量, 已分别占全市总用电量的 25% 和 35% 。可见, 制冷空调的节能也就显得越发重要。

制冷空调的节能一方面表现为提高能量效率, 用有限的资源和最小的能源消费获取最大的冷量; 另一方面, 表现为利用其他领域或过程中的能量, 如太阳能、地热或废热来制取系统所需的冷量。

1.3.5 制冷产品从设计到制造向个性化、精细化方向发展

不同领域的需求, 导致制冷产品的性能有所侧重。市场经济条件下, 竞争发展的必然结果也使产品个性化和精细化的设计和制造成为今后重要发展趋势, 在追求效能最大化的前提下为不同的业主提供最佳的装置设备和实施方案。

为此, 我们必须做好用先进制造技术来代替原有旧的制造技术的准备。如:

- ① 普遍应用计算机辅助设计软件提高设计效率;
- ② 采用计算流体力学技术 (CFD)、有限元技术 (FEM) 等手段提高创新速度;
- ③ 以电子信息技术为手段进行制冷机械知识的快速综合与集成, 提高产品开发速度;
- ④ 利用制造自动化的各种新技术, 包括柔性制造系统 (FMS)、分布式数控 (DNC)、快速原型技术 (RP) 等, 加快产品的试制和定型, 以快速形成生产能力等。

1.3.6 社会需求促使制冷技术的应用向更广、更深领域发展

历史经验证明, 科学技术的发展取决于社会需求。同时, 科学技术的发展, 又反过来进一步提升社会的需求。工业产业结构的优化升级, 基础产业支撑地位的加强, 将进一步刺激作为有关产品生产工艺过程保障的工业制冷装置的更新、改造和配套发展。

以石油化工工业为例, 随着大型尿素、合成氨、乙烯生产装置等的建设, 将进一步促进 NH_3 和 CO_2 压缩机组等需求的发展和提高。又如: 电子、医药、医疗、生物工程、食品、航天等行业的发展, 将进一步促进洁净空调装置和技术的广泛应用。

1.4 制冷技术课程的主要内容和任务

1.4.1 制冷技术课程的主要研究内容

目前, 工程中应用最为广泛的是蒸气压缩式制冷循环和吸收式制冷循环。前者利用制冷剂产生的潜热, 通过压缩、冷凝、节流、蒸发 4 个过程组成的封闭循环实现制冷; 后者由吸收剂和制冷剂组成工质对溶液, 利用热能驱动, 实现发生、冷凝、节流、蒸发、吸收等过程组成的封闭循环。

本课程以蒸气压缩制冷技术和吸收式制冷技术为主线, 介绍普通制冷温度范围内的蒸气压缩制冷原理、制冷压缩机、制冷设备, 以及吸收式制冷原理、氨水吸收式制冷机、溴化锂吸收式制冷机; 结合绿色环保、减少温室气体排放和节能要求, 简要介绍热声制冷、磁制冷、地源热泵、热管制冷和太阳能制冷等技术。具体内容包括如下几点。

- ① 人工获得低温的方法。
- ② 蒸气压缩式制冷原理, 制冷循环过程; 蒸气压缩式制冷循环的热力学分析和计算; 制冷剂的热力学性质和物理化学性质。
- ③ 实现蒸气压缩式制冷循环的制冷机, 以及组成制冷机的主要设备。
- ④ 蒸气压缩式制冷压缩机结构、工作原理、影响其工作效率的因素分析; 冷凝器、蒸发器的结构、工作原理、影响其工作效率的因素分析; 节流元件的结构、工作原理、影响其工作效率的因素分析; 以及其他设备, 如油分离器、储液器等的结构、工作原理。
- ⑤ 典型蒸气压缩式螺杆制冷机的性能分析。
- ⑥ 吸收式制冷原理, 制冷循环过程; 吸收式制冷循环的热力学分析和计算; 吸收剂的热力学性质和物理化学性质。
- ⑦ 实现吸收式制冷循环的制冷机, 以及组成制冷机的主要设备。
- ⑧ 发生器结构、工作原理、影响其工作效率的因素分析; 冷凝器、蒸发器的结构、工作原理、影响其工作效率的因素分析; 吸收器结构、工作原理、影响其工作效率的因素分析; 以及其他设备, 如溶液泵、真空泵等的结构、工作原理。
- ⑨ 溴化锂吸收式制冷机、氨-水吸收式制冷机的性能分析。
- ⑩ 热声制冷、磁制冷、地源热泵、热管制冷和太阳能制冷的工作原理、系统组成和影响其性能的因素分析。

1.4.2 制冷技术课程的任务与学习方法

制冷与空调设备在生活中应用得越来越多,与生活实际密切相关。为满足制冷空调设备生产、销售和维修的要求,许多学校和社会办学部门开设了制冷空调专业。制冷技术课程的任务是:一方面引导读者系统地理解制冷原理与制冷机、制冷机与组成制冷机组各设备之间的关系,学会运用制冷原理分析制冷系统中问题,建立制冷工程概念;另一方面,通过对制冷压缩机和制冷设备结构的介绍,为读者从事制冷系统维护和制冷机组维修,以及取得制冷工、制冷设备维修工证书,即获得社会认证打好基础。

本课程的学习是一个举一反三的过程。可以分3个层次来学好这门课程:第一层次学习时,应放眼全局,理清这门课程的总体思路,熟记章节的标题以及章节的关系;第二层次学习时,可以章节为单元,详细解读这一单元解决的问题,采用的方法和所得的结论;要记住制冷技术是原理、制冷机以及制冷工质共同产生的结果,因而了解了蒸气压缩式制冷原理,就要想到蒸气压缩式制冷机以及组成这一系统的设备及其结构;第三层次的学习,宜采用总结和提出问题并力争解答的方式来进行。对全书总结、梳理,可以把握制冷技术课程的主线和大方向;经常提问题,反映了读者在制冷技术上有所思考。这个层次的学习,就如同站在高山上的指挥员,挥动战旗,指挥山下的士兵作战一般,对制冷技术的相关问题一览无余。

尽管制冷技术课程的学习有一定的规律可循,但对所掌握的规律仍然要人去揣摩。要掌握制冷技术课程的基本内容,还需要读者参加实习和仿真操作、参观实物,注意制冷原理与设备内容的有机融合,及时关注高效、节能、环保、新功能制冷机的出现及其所应用的制冷原理。