



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育能源动力类专业“十三五”规划教材

制冷原理及设备

(第4版)

主编 吴业正

编著 吴业正 朱瑞琪 曹小林 鱼剑琳
解国珍 晏 刚 陈焕新



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育能源动力类专业“十三五”规划教材

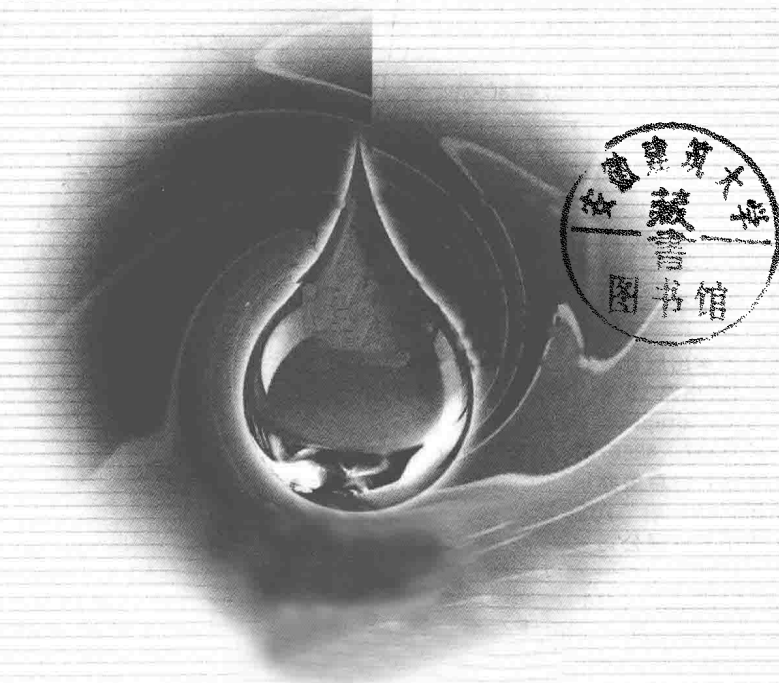
制冷原理及设备

(第4版)

主编 吴业正

编著 吴业正 朱瑞琪 曹小林 鱼剑琳

解国珍 晏 刚 陈焕新



西安交通大学出版社

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书讲述了各种制冷方法,系统的组成,制冷循环的分析和计算,制冷剂,热交换器及辅助设备。书中的内容以蒸气压缩式制冷为重点,并叙述了吸收式和热电式制冷的原理和设计计算。书中还介绍了一些小型制冷装置。为实现低碳经济,必须提高产品的能效和采用环境友好的制冷剂,书中对此有所反映。

在撰写全书时,注意理论与实践之结合,并配以适当的图、表,使读者更易掌握和使用书的内容。

本书可作为高等院校制冷、空调专业学生的教材,也可供相关领域的科研和工程技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

制冷原理及设备/吴业正主编;朱瑞琪,曹小林,
鱼剑琳编著. —4版. —西安:西安交通大学出版社,
2015.12

ISBN 978-7-5605-8192-7

I. ①制… II. ①吴…②朱… ③曹… ④鱼… III.
①制冷-理论 ②制冷-设备 IV. ①TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309364 号

书 名 制冷原理及设备(第4版)
主 编 吴业正
责任编辑 任振国 宋小平

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 陕西元盛印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 25 字数 605千字
版次印次 2015年12月第4版 2015年12月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-8192-7/TB·98
定 价 39.80元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

第 1 版前言

本书是在西安交通大学制冷教研室编写,并已使用了多年的《制冷机原理及设备》(上、下册)教材的基础上,根据专业教学计划的要求重新改编而成的。

本书共分 11 章,它以蒸气压缩式制冷机为重点,阐述了制冷剂、节流机构、蒸气压缩式单级、双级、复叠式制冷循环及其热力分析与计算。在蒸气制冷中还介绍了氨-水吸收式和溴化锂-水吸收式制冷循环、设备及其热力学分析计算,特别对制冷装置中的热交换设备作了详细的论述。介绍了各类热交换设备的设计计算方法,对其它辅助设备、小型的制冷装置及热电制冷也作了较详细的介绍。

根据多年的教学经验和专家、学生的反映,并参考了国外一些新出版的教材,我们在内容和编排上都作了一定的修改和尝试,使读者更易了解、掌握和应用书中的内容。

本书除供制冷专业本科生使用外,在删除第 5 章至第 8 章后,也可作为专科生的教材。它也能作为流体动力机械专业参加自学考试学生的参考书,或供具有一定基础的工程技术人员学习参考。

本书由西安交通大学制冷教研室吴业正教授任主编(第 4,5,9,10,11 章),韩宝琦副教授任副主编(第 2,6,7 章),参加编写的还有周子成副教授(第 4 章),朱瑞琪讲师(绪论、第 1,3,8 章)。

本书由西安冶金建筑学院杨磊教授主审。

编写过程中,薛天鹏副教授、李斌副教授、张长林讲师和刘瑞和讲师提供了许多宝贵的资料 and 意见,谨向他们致谢。

由于编写人员水平有限,书中不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

1987 年 1 月写于西安交通大学

第 2 版前言

蒙读者厚爱,本书自 1987 年 9 月出版以来,已经过了 6 次重印,印数逾 3 万册,但仍不能满足需求,急需再印或再版。我们仔细地考虑后,决定修订后出版,经一年的修订,现已完稿,由西安交通大学出版社出版。

七年来,制冷机及制冷装置的设计、制造取得了长足的进展。一些新的制冷方法正在获得人们的重视和应用;新的制冷机结构和流程也纷纷出现;应用新工质替代 CFC 已成为现实;这一切都促使我们对本书的内容作进一步的修改和充实,这是本书再版的原因之一。

作者通过讲授本书,感到有必要对叙述方法进行调整,使学生更快、更好地掌握基本概念并应用基本概念于解决实际问题,这是本书再版的原因之二。

近年来,国家对书、刊规定了一系列的标准,教材应贯彻执行这些标准,这是本书再版的原因之三。

本书再版后,表示章、节等顺次的方法与以前不同。书中不再出现“章”、“节”等字样,代之而起的是“1”,“1.1”等记号。其目的是与国际上流行的顺次表示法一致。授课时,为便于叙述,可称“1”为第 1 章,“1.1”为第 1 章 1 节,……。

参加本书修订的教师为吴业正教授(第 7,9,10 和 11 部分),韩宝琦教授(第 2,4,5 和 6 部分),朱瑞琪副教授(绪论、第 1.3 和 8 部分)。

修订后的本书,仍会有许多不足,敬请批评、指正。

作 者

1996 年 7 月写于西安交通大学

第 3 版前言

本书第一版出版至今,已有 23 年。在此期间,中国发生了巨大的变化。制冷产品已应用到国民经济的各个领域,相应的制冷技术也突飞猛进。虽然“制冷原理及设备”在 1996 年出了第二版以适应形势的变化,但对内容的修订仍赶不上时代前进的步伐,这就促使了第三版教材的编写。

与第二版相比,第三版有以下变化:

1. 低碳经济的思想贯穿全书 为此在绪论中,强调了“制冷领域的节能减排”;在“制冷方法”(第 1 章)中,增加了“蒸发冷却”;在“制冷剂”(第 3 章)中增加了“冰蓄冷系统”;在“溴化锂吸收式制冷机”(第 7 章)和“小型制冷装置”(第 11 章)中增加了“热泵技术”。

2. 更新了内容 例如:对第 3 章中的“实用制冷剂”作了比较全面的改写,力求符合当前制冷剂的实际情况。同时,在突出制冷剂的“环境影响指标 ODP 和 GWP”时,还强调了制冷剂的“安全性(可燃性和毒性)”。后者是今后考虑制冷剂替代时,不可或缺的指标。

3. 引入新的国标 如:关于“制冷机工况”的国标;关于“制冷压缩机工况”的国标;关于“制冷机和热泵能效”的国标。使读者熟悉国家对制冷产品制订的规范和技术引导。

此外,按照国标对一些符号作了修改。将描写热流量的参数用 Φ 表示(如将制冷量 Q_0 改成 Φ_0)。

4. 增加了思考题 每一章后面均附有思考题,供读者阅读时参考。

参加本书修订的教师为西安交通大学吴业正教授(绪论,第 1,2,3,5,6,7,8,9,10,11 章);朱瑞琪教授(第 1,2,3,8 章);中南大学曹小林副教授(第 4,9 章、思考题)和鱼剑琳教授(第 10,11 章)。吴业正为主编。

本书由西安交通大学俞炳丰教授主审。

编写过程中,得到西安交通大学吴青平老师、徐荣吉博士在文字和插图方面的帮助,作者深表感谢。受作者水平所限,书中不足之处,请读者指正。

作 者

2010 年 9 月写于西安交通大学

第 4 版前言

工业社会经济的长足发展使人们对能源的要求快速增长。上世纪 80 年代以后全球气候变化加剧的形势将人们的节能减排意识提高到新的高度。各行各业都在为节能减排竭尽全力,用于培养人材的教材也在不断更新。在此背景下,我们完成了本教材的再版。

作为专业教材,首先要较好地介绍必要的基础理论知识。在听取教师和学生提出的宝贵意见后,作者改写了部分内容。例如:

(1)在“制冷的的基本热力学原理”中,将逆向卡诺循环和逆向劳伦兹循环 并列叙述;适当增加热泵方面的知识。

(2)增加“理论制冷循环系统”(又名“标准蒸汽压缩制冷系统 VCRC”)的不可逆程度分析。

(3)增加了少量说明热电效应机理的内容。

其次,增加一些制冷技术中采用的结构和方法。例如:

(4)在第 11 章中增加和改写了一些“小型制冷装置”。

(5)补充“水平降膜蒸发器”。

(6)增加“微通道传热管”。

此外,在计算举例中也有一些修改。

除了第 3 版中参与修改的作者外,陈焕新老师(第 1 章)、解国珍老师(第 7 章)和晏刚老师(第 11 章)参加了修改。

编写时,我们参考了一些国内外的文献。它们虽未在相关内容处一一标明,但均已列在书后的参考文献栏中。读者可通过阅读这些文献,获得更多的知识。

编写过程中,得到长安大学郑爱平教授和西安交通大学吴青平高级工程师的帮助,特此致谢!

本书不足之处,敬请批评指正。

作 者

2015 年 10 月写于西安交通大学

目 录

第4版前言	
第1版前言	
第2版前言	
第3版前言	
绪 论	(1)
第1章 制冷方法	(8)
1.1 低温的产生	(8)
1.2 各种制冷方法	(9)
1.3 制冷的基本热力学原理	(23)
1.4 热泵	(27)
思考题	(30)
第2章 单级蒸气压缩式制冷循环	(31)
2.1 单级蒸气压缩式制冷的理论循环	(31)
2.2 单级蒸气压缩式制冷的实际循环	(39)
2.3 单级蒸气压缩式制冷机的性能	(49)
2.4 制冷工况	(52)
2.5 CO ₂ 跨临界循环	(59)
思考题	(63)
第3章 制冷剂	(64)
3.1 概述	(64)
3.2 制冷剂的性质	(68)
3.3 混合制冷剂	(77)
3.4 可接受的ODS替代物	(78)
3.5 实用制冷剂	(81)
3.6 第二制冷剂	(87)
思考题	(92)
第4章 两级压缩和复叠式制冷循环	(93)
4.1 概述	(93)
4.2 两级压缩制冷循环	(94)
4.3 两级压缩制冷机的热力计算和温度变动时的特性	(103)
4.4 复叠式制冷机循环	(109)
4.5 自复叠式制冷循环	(112)
思考题	(114)
第5章 吸收式制冷机的溶液热力学基础	(115)
5.1 溶液、溶液的成分	(115)

5.2	相、独立组分数、自由度和相律	(116)
5.3	理想溶液两组分体系的相图	(116)
5.4	溶解与结晶、吸收与解析、蒸馏与精馏	(119)
5.5	两组分体系的比焓-质量分数($h-w$)图	(120)
5.6	稳定流动下溶液的混合与节流	(123)
	思考题	(127)
第6章	氨吸收式制冷机	(128)
6.1	概述	(128)
6.2	氨水溶液的性质	(129)
6.3	单级氨水吸收式制冷机循环过程及其在 $h-w$ 图上的表示	(131)
6.4	氨水吸收式制冷机与蒸气压缩式制冷机性能的比较	(134)
6.5	吸收-扩散式制冷机	(135)
	思考题	(138)
第7章	溴化锂吸收式制冷机	(139)
7.1	溴化锂水溶液的性质	(139)
7.2	溴化锂吸收式制冷机原理	(144)
7.3	溴化锂吸收式制冷机的热力及传热计算	(147)
7.4	溴化锂吸收式制冷机的性能及其提高途径	(157)
7.5	溴化锂吸收式制冷机制冷量的调节及其安全保护措施	(164)
7.6	双效溴化锂吸收式制冷机	(166)
7.7	双效直燃溴化锂吸收式冷热水机	(176)
7.8	吸收式热泵循环	(179)
	思考题	(184)
第8章	热电制冷	(185)
8.1	热电制冷原理及分析	(185)
8.2	热电制冷的特点及应用	(192)
8.3	热电堆设计	(195)
	思考题	(201)
第9章	制冷机的热交换设备	(202)
9.1	热交换设备中的传热过程	(202)
9.2	蒸发器	(206)
9.3	冷凝器	(216)
9.4	水冷式冷凝器中的冷却水系统	(225)
9.5	制冷装置中的其它换热器	(227)
9.6	制冷机热交换器的对数平均温差及介质表面传热系数	(232)
9.7	冷凝器、蒸发器的设计计算	(243)
9.8	强化传热元件	(266)
9.9	热绝缘	(272)

思考题	(277)
第 10 章 制冷机的其它辅助设备及管道	(279)
10.1 膨胀机构及阀门	(279)
10.2 蒸气压缩式制冷机的辅助设备及管道	(290)
思考题	(299)
第 11 章 小型制冷装置	(301)
11.1 小型冷藏、冷冻装置	(301)
11.2 空调器(机)及去湿机	(316)
11.3 展示柜	(326)
11.4 冰淇淋机	(331)
思考题	(333)
参考文献	(334)
附表及附图	(339)
附表 1 NH_3 饱和液体的热物理性质	(339)
附表 2 R22 饱和液体的热物理性质	(339)
附表 3 NH_3 饱和液体及蒸气的热力性质	(340)
附表 4 R22 饱和液体及蒸气的热力性质	(343)
附表 5 R22 过热蒸气的热力性质	(346)
附表 6 R14 饱和液体及蒸气的热力性质	(349)
附表 7 R23 饱和液体及蒸气的热力性质	(351)
附表 8 R123 饱和液体及蒸气的热力性质	(353)
附表 9 R134a 饱和液体及蒸气的热力性质	(357)
附表 10 R134a 过热蒸气性质	(358)
附表 11 R152a 饱和液体及蒸气的热力性质	(359)
附表 12 R290 饱和液体及蒸气的热力性质	(361)
附表 13 R600a 饱和液体及蒸气的热力性质	(363)
附表 14 R744 饱和液体及蒸气的热力性质	(365)
附表 15 饱和水及饱和水蒸气的热力性质	(367)
附表 16 某些气体的热物理性质	(369)
附表 17 一个大气压下饱和湿空气的热力性质	(370)
附表 18 NaCl 水溶液的性质	(372)
附表 19 CaCl_2 水溶液的性质	(373)
附图 1 NH_3 的压-焓图	(375)
附图 2 R22 的压-焓图	(376)
附图 3 R14 的压-焓图	(377)
附图 4 R23 的压-焓图	(378)
附图 5 R123 的压-焓图	(379)
附图 6 R134a 的压-焓图	(380)

附图 7 R152a 的压-焓图 (381)

附图 8 R290 的压-焓图 (382)

附图 9 R600a 的压-焓图 (383)

附图 10 R744 的压-焓图 (384)

附图 11 $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 溶液的 $h-w$ 图 (385)

附图 12 $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ 溶液的 $p-1/T$ 图 (386)

附图 13 $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ 溶液的 $h-w$ 图(1) (387)

附图 14 $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ 溶液的 $h-w$ 图(2) (388)

绪 论

制冷技术是为适应人们对低温条件的需要而产生和发展起来的。

在长期的生产实践和日常生活中,人们发现许多现象与温度有密切关系。人体对温度相当敏感。炎热条件下希望降温以提供适宜的工作和生活环境。所有生物过程都受温度影响,低温抑制食品中酵、霉菌的增殖,对食品保鲜起重要作用。

材料的某些重要特性与温度有关,如机械材料具有冷脆性,塑料、橡胶也有同样的性质;又如金属的导电性随温度下降而提高,有些元素或化合物当温度降到某一确定值时出现超导性(电阻变为零),人为地利用材料的这些特性,需要制冷技术。物态与温度有关,通过降温发生物态变化,可以使混合气体分离、气体液化而便于储运。化学反应与温度也有直接关系,许多生产工艺过程中温度对产品性能和质量有很大影响,等等。

综上所述,为了满足生产和生活的要求,需要通过制冷提供低温。随着技术的发展以及人民生活水平的不断提高,制冷在工业、农业、国防、建筑、科学技术等国民经济各个部门中的作用和地位日益重要。

1. 制 冷

制冷作为一门科学是指用人工的方法在一定时间和一定空间内将物体冷却,使其温度降到环境温度以下,并保持这个温度。

这里所说的“冷”是相对于环境而言的。灼热的铁块放在空气中,通过辐射和对流向环境传热,逐渐冷却到环境温度;一桶开水置于自然环境中,逐渐变成常温水,类似这样的过程都是自发的传热降温,属于自然冷却,不是制冷。只有通过一定的方式将铁块或热水冷却到环境温度以下,才可称为制冷。因此,制冷就是从物体或流体中取出热量,并将热量排放到环境介质中去,以产生低于环境温度的过程。

机械制冷中所需机器和设备的总和称为制冷机或制冷系统。

制冷机中使用的工作介质称为制冷剂。制冷剂在制冷机中循环流动,同时与外界发生能量交换,不断地从被冷却对象中吸取热量,向环境排放热量。制冷剂一系列状态变化过程的综合为制冷循环。为了实现制冷循环,必须消耗能量。所消耗能量可以是机械能、电能、热能、太阳能或其它形式的能。

按照制冷所得到的低温范围,制冷技术划分为以下几个领域:

- ① 120 K 以上,普通制冷;
- ② 120~20 K,深度制冷;
- ③ 20~0.3 K,低温制冷;
- ④ 0.3 K 以下,超低温制冷。

习惯上将 120 K 以下的制冷统称为低温制冷。

由于制冷温度范围不同,所采取的制冷方式,使用的工质、机器设备及其依据的原理有很大差别。

本教材主要涉及普通制冷(简称“制冷”)的技术领域。

2. 制冷技术的研究内容

制冷技术的研究内容可以概括为以下三方面。

(1) 研究获得低温的方法、有关的机理以及与此相应的制冷循环,并对制冷循环进行热力学的分析和计算。

(2) 研究制冷剂的性质,从而为制冷机提供性能满意的工作介质。机械制冷要通过制冷剂热力状态的变化才能实现。所以,制冷剂的热物理性质是进行循环分析和计算的基础数据。此外,为了使制冷剂能实际应用,还必须掌握它们的一般物理化学性质。

(3) 研究实现制冷循环所必需的各种机械和技术设备,包括它们的工作原理、性能分析、结构设计,以及制冷装置的流程组织、系统配套设计。此外,还有热绝缘问题,制冷装置的自动化问题,等等。

上述前两个方面构成制冷的理论基础,是制冷原理的研究内容。第三方面涉及到具体的机器、设备和装置。

3. 制冷技术的应用

制冷最早用于保存食品和降低房间温度。随着科学技术和社会文明的进步,制冷的应用几乎渗透到各个生产技术、科学研究领域,并在改善人类的生活质量方面发挥巨大作用。

1) 商业及人民生活

食品冷冻冷藏和舒适性空气调节是制冷产品应用最为量大面广的领域。

商业制冷主要用于对各类食品冷加工、冷藏储存和冷藏运输,使之保质保鲜,满足各个季节市场销售的合理分配,并减少生产和分配过程中的食品损耗。现代化的食品工业,从生产、储运到销售,有一条完整的“冷链”。所使用的制冷装置有:各种食品冷加工装置、大型冷库、冷藏汽车、冷藏船、冷藏列车、分配性冷库,供食品零售商店、食堂、餐厅使用的小型冷库、冷藏柜、各类冷饮设备、食品冷陈列柜,直至家庭用冰箱。

舒适性空气调节为人们创造适宜的生活和工作环境,如家庭、办公室用的局部空调装置或房间空调器;大型建筑、公共场所、车站、机场、宾馆、商厦、影剧院、游乐厅、办公楼等使用的集中式空调系统;各种交通工具,如轿车、客车、飞机、火车、船舱等的空调设施;文物保藏环境的空气调节装置等等。

体育、游乐场所除采用制冷提供空气调节之外,还用制冷建造人工冰场。我国人工冰场原集中在东北、华北,现在南方城市也相继建造了新型人工冰场。20世纪90年代,为适应冬季滑雪运动,在我国北方兴建人造雪场,用制雪机造雪。

2) 工业生产及农牧业

许多生产场所需要用制冷提供生产性空气调节系统。例如,高温生产车间、纺织厂、造纸厂、印刷厂、胶片厂、精密仪器车间、精密加工车间、精密计量室、计算机房等的空调系统,为各生产环境提供必需的恒温恒湿条件,以保证产品质量或机床、仪表的精度,或精密设备的正常特性。

机械制造中,对钢进行低温处理($-70\sim-90\text{ }^{\circ}\text{C}$)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,利用低温进行零件的过盈配合。化学工业中,借助于制冷,使气体液化、混合气分离,带走化学反应中的反应热。盐类结晶、润滑油脱脂需要制冷;在钢铁工业中,高炉鼓风需要用制冷的的方法先将其除湿,再送入高炉,以降低焦铁比,保证铁水质量。

农、牧业中,制冷用于对农作物的种子进行低温处理;建造人工气候育秧室;保存优良种畜的精液,以便进行人工配种等。通过“低温储藏”,将粮库内的粮食温度保持在 $4\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,可使含水量较高的($15\%\sim 16\%$)粮食长期储存。

3) 建筑工程

利用制冷实现冻土法开采土方。在挖掘矿井、隧道,建筑江、河堤坝时,或者在泥沼、沙土中掘进时,采用冻土法保持工作面,避免坍塌和保证施工安全。使用移动式冷水站,制取低温冷水,供混凝土搅拌,制造低温混凝土,这在制作大型混凝土构件时十分必要,可以有效地避免大型构件因散热不充分而产生内应力和裂缝等缺陷。在我国,应用这一技术并采用混凝土高温缓凝剂解决了浇筑面积达 1500 m^2 的无纵缝大仓面混凝土快速施工。

现代建筑史上宏伟的英吉利海峡海底隧道工程,制冷在其中发挥重要作用。它从海底横穿英吉利海峡,连接英国和法国,全长 52 km 。列车以 160 km/h 的时速穿过隧道时,空气温度将上升到 $49\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$,因而必须有一套独特的冷却系统。共安装 8 套冷水机组,分装在隧道两侧各 4 套供隧道内降温,每套机组制冷能力 $6000\sim 7000\text{ kW}$ 。

4) 科学实验研究

各种环境模拟装置中,用制冷创造人工环境,为科学研究和生产服务。例如,国防工业领域中,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需要在相应环境条件下作模拟试验;航空、航天仪表,火箭、导弹中的控制仪,也需要在地面做模拟高空环境下的性能试验。低温低压环境实验装置提供这类研究的需要。

气象科学中,用制冷系统给云雾室提供 $+30\sim -45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件。云雾室用于人工气候的实验,研究雨滴、冰雹的增长过程、冷暖催化剂,各种催化方法及扰动对云雾的宏观、微观影响、模拟云的物理现象,等等。

5) 医疗卫生

用局部冷冻配合手术有很好的治疗效果,如肿瘤、扁桃腺切除,心脏、皮肤、眼球移植,心脏大血管瓣膜冻存和移植,手术中采用低温麻醉。疫苗、药品需要低温保存。用真空冷冻干燥法制作血干、皮干。骨髓和外周血干细胞的深低温冷冻。诸多低温医疗器械、治疗仪、诊断仪(如基因扩增仪)等都使用了制冷手段。可以说,现代医学已离不开制冷。

此外,在尖端科学领域,如微电子技术、能源、新型材料、宇宙开发、生物技术中,低温制冷技术也起着十分重要的作用。有人称低温制冷技术是“尖端科学的命脉”,此话实不为过。

表 1 列出制冷技术的应用范围。

4. 制冷技术的发展历史

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。在此之前,追溯到人类的祖先,人们很早已懂得冷的利用和简单的人工制冷了。用地窖作冷储室、用泉水冷却储藏室已有 5000 年历史。

表 1 制冷技术的应用

温度范围		应用举例
K	℃	
300~273	27~0	热泵,冷却装置,空调装置
273~263	0~-10	苛性钾结晶,冷藏运输,运动场的滑冰装置
263~240	-10~-33	冷冻运输,食品长期保鲜,燃气(丙烷等)液化装置
240~223	-33~-50	滚筒装置的光滑冻结,矿井工作面冻结
223~200	-50~-73	低温环境实验室,制取固体 CO ₂
200~150	-73~-123	乙烷、乙烯液化,低温医学和低温生物学
150~100	-123~-173	天然气液化
100~50	-173~-223	空气液化、分离,稀有气体分离,合成气分离,氢及氦气还原,液氧、液氮
50~20	-223~-253	氮和氢液化,宇航舱空间环境模拟
20~4	-253~-269	超导,氦液化
4~10-6	-269~-273.15	³ He 的液化, ⁴ He 超流动性,Josephson 效应,测量技术,物理研究

我国古代,劳动人民用天然冰进行食品冷藏和防暑降温。《诗经》中有记述农民全年劳作的诗,其中有:“……,二之曰凿冰冲冲,三之曰纳于凌阴。……”(《诗经》:幽风·《七月》),说的是农民每年二月份到河里去凿冰,三月份将冰储存到地窖中(“二之曰”、“三之曰”,分别指周历的二月和三月。“冲冲”即“砰砰”的打冰声。“凌阴”即冰窖。)。又,《周礼》中有“凌人夏颁冰掌事”的记载。可见,我国在先秦时代已将采冰、储冰纳为一项季节性的常规劳作,并已设有专门掌管冰窖的行政机构(即“掌事”)。魏国曹植所写的《大暑赋》中有这样的诗句:“积索冰于幽馆,气飞积而为霜”,这说明当时已懂得将天然冰作空调之用了。

西方最早来中国考察的意大利人马可·波罗在他的《马可·波罗游记》一书中,对中国制冰和造冰窖的方法有详细记述。

古埃及出土的大约 2500 年前的壁画中,画有奴隶手持棕榈拂甩去扇多孔性的陶制器皿,同时不断在外面洒水,使器皿外的水通风蒸发,由于蒸发吸热,器皿内的水会结冰。这是较早的人工制冰。

以上列举的只是古代人对天然冰的收藏、利用和简单的人工制冰,还谈不上制冷技术。

1755 年,爱丁堡的化学教授库仑(William Cullen)利用乙醚蒸发使水结冰。他的学生布拉克(Black)从本质上解释了融化和汽化现象,导出了潜热的概念,并发明了冰量热器,标志着现代制冷技术的开始。

1831 年,在伦敦工作的美国发明家波尔金斯(Perkins)造出了第一台以乙醚为工质的蒸气压缩式制冷机,并正式呈请了英国第 6662 号专利,这是后来所有蒸气压缩式制冷机的雏型。这台机器的重要进步是实现了闭合循环,但所使用的工质乙醚易爆。到了 1875 年,卡列(Carre)和林德(Linde)用氨作制冷剂。从此,蒸气压缩式制冷机开始占了统治地位。

在此期间,空气绝热膨胀会产生显著温降的现象开始用于制冷。1811 年,美国医生高里(Gorrie)用封闭循环的空气制冷机为发烧病患者建立了一座空调站,空气制冷机使他一举成

名。威廉·西门子(William Siemens)在空气制冷机中确立了回热器原理。

1859年,卡列发明了氨水吸收式制冷系统,申请了原理专利。

1873年,美国人皮克(Byok)制造了第一台氨压缩机,并迅速得到应用。

1910年左右,马利斯(Maurice)发明了蒸气喷射式制冷系统。

20世纪20年代,凯利(Carrier)等开发了离心式制冷压缩机。

基本原理性研究之后近一个世纪以来,制冷的发展步伐在很大程度上受机器及制冷剂发展的制约。1930年起,以下一些创新和进步改变了人工制冷的进程:全封闭压缩机的成功开发(美国通用电器公司);米杰里(Midgley)发现氟里昂制冷剂并用于压缩式制冷机;混合制冷剂的应用;伯宁顿(Pennigton)发明回热式除湿器循环;空气-空气热泵的出现。

目前,现代制冷工业正处于一个飞速发展的时期。以市场迅猛增长,国际竞争激烈,节能的迫切性和环境保护的迫切性为背景和刺激;受微电子、计算机、新型原材料和其它相关工业领域的技术进步的渗透和促进;制冷工业在技术进步上取得了一些突破性的进展,同时也面临新的挑战。主要反映在下列几方面。

1) 制冷领域的节能减排

二战后,工业经济的长足发展使人们对能源的需求快速增长。1980年以后全球气候变化加剧的趋势更将节能减排意识提到新的高度。各行各业都在为节能减排竭尽全力,制冷空调行业也不例外,所做工作可大致归纳成以下三个方面。

(1) 新颖高效机器设备的开发 为满足需要,制冷产品的种类、型式日益丰富,新品种层出不穷,产品性能的提高和改进日新月异。采用新型线的螺杆式制冷压缩机、用磁悬浮轴承的离心式制冷压缩机的投产,不但提高了制冷机的能效,而且缩小了机器的体积。为了调节制冷量和供热量,使制冷机适应冷、热负荷的动态变化,早在1981年就研制了变转速转子式制冷压缩机;1983年开发出热电膨胀阀;1986年以后,模糊控制技术、神经网络技术、遗传算法控制技术应用于房间空调器,推动了空调系统控制技术的发展。与此同时,对一些部件,如已有换热器的改进和新型换热器的开发也取得良好的进展。小管径及微通道换热器的应用支持了跨临界CO₂循环的开发。各种传热强化技术的应用使制冷装置有更高的能效。

(2) 可再生能源的利用 用太阳能及各种余热驱动的制冷机(如吸收式制冷机),从自然界吸取热量的空气源热泵、水源热泵、地源热泵、太阳能热泵,以及利用各种余热的余热热泵,均以可再生能源的利用为前提,在经济的可持续发展中起积极作用。

(3) 采用冷热电三联供的分布式能量系统 至2007年,美国大学中已有二百多个分布式能量系统,大都采用冷热电联供技术,为校园供电、供暖和供冷。2010年美国能源部的项目有25%计划改用冷热电三联供。

冷热电联供技术的开发应用,对科学用能、提高能源利用率有重要价值。

2) 制冷剂替代

1830年至1930年的第一代制冷剂(以“能用”为选择标准,如水、乙醚和空气等),到第二代制冷剂(以“安全和耐久性”为标准,如氟里昂、氨和水等,以氟里昂为主流),经过了漫长的160年。1987年以后,基于罗兰(S. Rowland)和莫里纳(M. Molina)关于CFCs破坏大气臭氧层的理论以及对南极臭氧空洞的观察,加深了人们对保护大气臭氧层的认识和紧迫感,产生了一系列国际协定,如《关于消耗大气臭氧层物质的蒙特利尔协定书》(1987)、《京都议定书》(2005年生效)。1989年,第一批替代制冷剂商品化生产。10年后,对大多数“消耗大气臭氧

层物质”进行了替代。由于采取了一系列措施,包括采用替代制冷剂以及对制冷装置设计、制造和维修等方面的重大改进,1998年,南极上空臭氧层空洞面积趋于稳定(1998年前面积不断增加)。此时,一部分第三代制冷剂的“温室效应”问题凸显出来,例如替代R22的R410A,它不破坏大气臭氧层(“臭氧损耗潜能”ODP为0),但它的“全球变暖潜能值”GWP比R22高16%,因而不宜长期使用。从2010年起,迎来了第四代制冷剂时代,此时制冷剂的选择标准为“降低全球气候变暖”。图1所示为1860~2000年全球气温变化情况。研究表明人为的温室气体排放影响了1980年以后的气候异常。为此,一些应用历史悠久的制冷剂,特别是自然工质,如 CO_2 、 NH_3 、丙烷和丁烷等成为第四代制冷剂的重要选用对象。在采取了一些科学技术和安全措施后,它们已在汽车空调、冷藏冷冻装置中应用。对第四代制冷剂的研制及解决应用中存在问题,使制冷技术的发展达到新的高度。

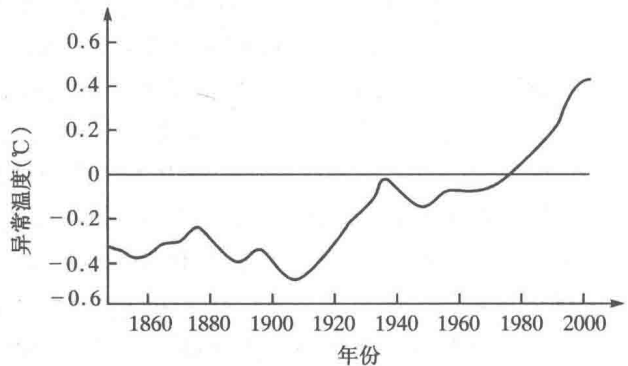


图1 1860—2000年全球气温变化

第四代制冷剂时代,此时制冷剂的选择标准为“降低全球气候变暖”。图1所示为1860~2000年全球气温变化情况。研究表明人为的温室气体排放影响了1980年以后的气候异常。为此,一些应用历史悠久的制冷剂,特别是自然工质,如 CO_2 、 NH_3 、丙烷和丁烷等成为第四代制冷剂的重要选用对象。在采取了一些科学技术和安全措施后,它们已在汽车空调、冷藏冷冻装置中应用。对第四代制冷剂的研制及解决应用中存在问题,使制冷技术的发展达到新的高度。

3) 微电子和计算机技术在制冷上的应用

“机电一体化”浪潮给制冷工业以巨大推动。

基础研究方面:计算机模拟制冷循环始于1960年,如今已广泛用于研究制冷系统及部件的稳态和瞬态特性;研究制冷的热物理过程;计算制冷剂单质或混合物的性质;研究压缩机性能,对系统作深入分析和改进等。

制冷产品的设计制造:计算机现在广泛用来作为产品设计制造的辅助工具(即计算机辅助设计CAD和计算辅助制造CAM)。例如,结构零件设计的有限元法和有限差分法以及用计算机控制精密机械加工。一旦计算机和机器人发展到实现制造过程高度自动化,设计工程师与制造操作者之间的界限将不复存在。

4) 新材料在制冷产品上的应用

陶瓷及陶瓷复合物(如熔融石英、稳定氧化锆、硼化钛、氧化硅等)具有一系列优良性质,比钢轻,强度和韧性好,耐磨,化学及尺寸稳定性好,导热系数小,表面光洁度好。将陶瓷用烧结法渗入溶胶体一次成形零件或用作零件的表面涂釉,改善零件表面性能。

聚合材料(工程塑料、合成橡胶和复合材料)用来作为制冷的电绝缘、减振件和软管材料,利用聚合材料的热塑性,以高级工艺通过热定形的方法制做压缩机中的复杂零件(转子、阀片等)。这些新材料的应用,带来制冷产品性能、寿命和效益的提高。

5) 制冷空调与信息技术的融合

将数字设计及仿真技术、健康诊断技术、自适应控制技术、网络技术等融合于空调制冷产品的全寿命过程中,不但可以提高产品质量,而且能节省设备的运行费用,达到节能减排的目的。利用气象预报和大楼使用信息,预估未来的负荷,通过互联网和智能手机,对机组的运行进行控制,可以明显地降低能耗,提高被调空间的空气品质。对食品冷链的全程控制,需要掌握冷链各环节的即时信息,包括食品本身和周围环境的大量参数,对这些信息处理并反馈给控制系统后可达到既保证食品质量,又降低能耗的效果。