



高职高专规划教材

制冷原理

雷 霞 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高 职 高 专 规 划 教 材

制 冷 原 理

主 编 雷 霞
参 编 魏 蔚 靳包平 楚文军
主 审 匡奕珍



机 械 工 业 出 版 社

《制冷原理》是高等职业院校“制冷与空调”专业的主干课之一。

本书以蒸气压缩式制冷循环、溴化锂吸收式制冷循环为主线,阐述了制冷的方 法、制冷的原理、制冷的循环以及常用制冷剂的性质。并运用热力学理论,对制冷循环进行了内在联系、外在影响的理论分析和制冷循环中能量转换及转换效率的分析,以及用于制冷系统机器、设备选型的热力计算。

本书为高等职业院校“制冷与空调”专业的高职学生所编写,也可供从事制冷空调工程的技术人员学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

制冷原理/雷霞主编. —北京:机械工业出版社, 2003.8

高职高专规划教材

ISBN 7-111-12611-4

I. 制... II. 雷... III. 蒸汽压缩制冷—循环—高等学校:技术学校—教材 IV. TB61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 059082 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:倪少秋 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:饶 薇 责任印制:路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·13.75 印张·320 千字

定价:19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

编写说明

随着科技发展、社会进步和人民生活水平的不断提高,制冷与空调设备的应用几乎遍及生产、生活的各个方面,运行和维护制冷与空调设备需要大批专门技术人才,尤其在加入 WTO,融入国际竞争的大潮后,社会对制冷空调设备的安装、维修、管理专业高级技术人才的需求量也愈来愈大。为了满足和适应社会不断增长的需要,全国已有数十所高职高专院校先后开设了“制冷与空调”专业,以加速制冷与空调专业应用型高级技术人才的培养。

为了编写出既有行业特色,又有较宽覆盖面,适应性、实用性强的专业教材,我们组织了全国十几所不同行业高等院校具有丰富教学和工程实践经验的教师编写了这套高职高专制冷与空调专业规划教材。书目见封四。

本套教材在编写过程中,结合我国制冷与空调专业的发展以及行业对高职高专人才的实际要求,在形式和内容上都进行了有益探索。在专业面向上,既涉及家用、商用制冷与空调设备,又涉及工业制冷空调设备,其覆盖范围广;在内容安排上,既介绍传统的制冷空调原理、方法、设备,又补充了大量的新技术、新工艺、新设备,立足专业最前沿;在课程组织上,基本理论力求深入浅出、通俗易懂,实验、实训力求贴近生产,强调实际、实用;特别强调突出能力培养,体现高职特色,既可作为高职高专院校的专用教材,也可作为社会从业人员岗位培训教材。

本套教材编写过程中,得到了有关设计、施工、管理、生产企业和有关专家学者的大力支持,提出了许多宝贵意见,提供了大量技术资料和工程实例,使得教材内容更加丰富、详实,在此表示衷心感谢!

由于受理论水平、专业能力和知识面的限制,加之时间短促,全套教材中难免有疏漏和错误,恳请广大师生和读者批评指正,以便再版时修订、补充,不断完善和提高。

高职高专制冷与空调专业教材编审委员会

2003 年 3 月

前 言

本书编写的宗旨是：深入浅出，知识点的切入和引出符合学生的认知规律，方便大家掌握基本概念并运用基本概念解决实际问题。

为避免盲人摸象，各自揣摩和想象，本书明确给出了“制冷原理”课程在您的专业知识链中的位置和作用。

《制冷原理》以“工程热力学”、“流体力学”和“传热学”为理论基础，而本身又是《制冷压缩机》、《制冷设备》、《制冷工艺》、《空气调节》等专业课程的基础，是联系专业基础理论和专业知识的桥梁和纽带。

“制冷原理”传授制冷的的方法、制冷的原理、制冷循环的理论分析和计算、制冷剂的运用等知识。其中，对制冷循环的内在联系和外在影响的理论分析，是制冷系统安装、调试、运行管理和维护的理论基础；对制冷循环的热力计算，是制冷系统机器、设备设计和选型的理论依据；对制冷循环的能量转换及转换效率的分析，是制冷系统能否节能、环保、可持续发展的理论根据。

我们试图从“系统”的高度来引导大家认识和分析制冷循环系统，还望大家在学习的过程中着眼于“系统”，而不是单一的机器和设备。

《制冷原理》一书的知识不是我们想象的那么深奥，它存在于我们的生活中：出汗了，我们会开电扇或扇风，它所运用的原理就是制冷中应用最广泛的相变制冷所运用的原理；生活中，烹饪时的锅盖就是最常见的冷凝器；用泵能够把水从低处送往高处就是为什么要在制冷循环中加入制冷压缩机的原因，热量就是通过这种途径从低温物体流向高温物体。

当然，“制冷原理”的知识也不是我们想象的那么简单，它是一个“系统”工程，且该系统是非均衡的、动态的，并且是耗能大户，牵一发而动全身的奥妙还需要成千上万的你、我、他这样的专业人员去研究、去揣摩、去实践。

本书由北京联合大学雷霞副教授主编。全书共六章，其中绪论、第一、四、六章由雷霞副教授编写，第二章由北京联合大学楚文军讲师编写，第三章由山东商业职业技术学院魏蔚讲师编写，第五章由北京联合大学靳包平副教授编写。

本书由山东商业职业技术学院匡奕珍教授主审。

本书编写时，承蒙北京联合大学田沛哲硕士、张文祥副教授的大力支持，

在此一并致谢。

书中不足之处，恳切希望专家和读者指正。

谢谢您使用本书。无论是书中还是您学习中，如有问题，请发 e-mail 至 Jingwa8908@sina.com。我们将与您共同商榷，共同提高。

编 者

2003 年 2 月

目 录

编写说明

前言

绪论 1

第一章

单级蒸气压缩式制冷循环 7

第一节 单级蒸气压缩式制冷循环的制冷方法、原理与循环 8

第二节 理论的单级蒸气压缩式制冷循环及热力计算 11

第三节 实际单级蒸气压缩式制冷循环 17

第四节 单级蒸气压缩式制冷循环的影响因素及工况 40

第五节 单级离心、螺杆压缩式制冷循环 49

第六节 空气源热泵和地源热泵 53

思考题 59

练习题 60

第二章

制冷剂 61

第一节 制冷剂简述 62

第二节 理想制冷剂的性质 65

第三节 常用制冷剂及其替代物 70

第四节 混合制冷剂 76

第五节 制冷剂的发展和环保化替代 80

第六节 载冷剂与蓄冷剂 84

思考题 89

第三章

双级蒸气压缩式制冷循环 91

第一节 采用双级蒸气压缩式制冷循环的原因和条件 92

第二节 双级蒸气压缩式制冷循环 93

第三节 双级蒸气压缩式制冷循环的热力计算 105

第四节 温度变动对双级蒸气压缩式制冷循环制冷机特性的影响 116

第五节 复叠式制冷循环 118

第四章

吸收式制冷循环及吸收剂-制冷剂

溶液性质 121

第一节 吸收式制冷方法与制冷原理 122

第二节 二元溶液的 T - ξ 图和 p - ξ 图 125

第三节 二元溶液的 h - ξ 图 129

第四节 二元溶液的混合、加压和节流 131

思考与练习题 133

第五章

溴化锂吸收式制冷循环 135

第一节 溴化锂-水溶液的特性 136

第二节 单效溴化锂吸收式制冷循环 140

第三节 双效溴化锂吸收式制冷循环 151

第四节 溴化锂吸收式制冷机的性能影响因素及提高途径 157

第五节 直燃型溴化锂吸收式冷热水机组 160

思考题 164

第六章

其他制冷方法 165

附录 171

附表 1 饱和水及饱和水蒸气的热力性质 171

附表 2 NH_3 饱和液体及蒸气的热力性质 172

附表 3 R11 饱和液体及蒸气的热力性质 174

附表 4 R12 饱和液体及蒸气的热力性质 176

附表 5 R13 饱和液体及蒸气的热力性质 178

附表 6 R22 饱和液体及蒸气的热力性质 180

附表 7 R134a 饱和液体及蒸气的热力性质 182

附表 8 R290 饱和液体及蒸气的热力性质 186

附表 9 R502 饱和液体及蒸气的热力性质 187

附表 10 R407C [R-32/125/134a (23/25/52)] 沸腾状态液体和结露状态气体性质 189

附表 11 R410A [R-32/125 (50/50)] 沸腾状 态液体和结露状态气体性质	191	附图 7 R290 的压-焓图	201
附表 12 压缩机名义工况下的制冷量、 单位轴功率制冷量、单位制冷量 重量	193	附图 8 LiBr-H ₂ O 溶液的 h - ξ 图 (1)	202
附表 13 压缩机基本参数	194	附图 9 LiBr-H ₂ O 溶液的 h - ξ 图 (2)	203
附图 1 NH ₃ 的压-焓图	195	附图 10 单级蒸汽压缩式制冷系统	204
附图 2 R134a 的压-焓图	196	附图 11 家用冰箱、空调制冷系统图	205
附图 3 R12 的压-焓图	197	附图 12 氟系统单机多库房冷库的制冷 系统图	206
附图 4 R13 的压-焓图	198	附图 13 实际使用中的空调制冷系统	207
附图 5 R22 的压-焓图	199	附图 14 双级压缩、复叠式实际制冷系统	208
附图 6 R407C 的压-焓图	200	附图 15 吸收式制冷机组	209
		参考文献	211

绪 论

制冷，我们并不陌生，它已与我们的生活息息相关。家用冰箱、空调器给我们生活带来方便和舒适的同时，也提高了我们的生活品质。

随着社会的不断进步，科学技术的不断发展，制冷显示出愈来愈重要的作用。美国机械工程师学会将空调制冷技术列为 20 世纪 10 项最重大工程技术成就之一。

1. 制冷

一杯开水自然冷却到凉白开不是制冷。热量从高温的开水传递给常温的环境介质——空气，是一个自发的传热过程，属于自然冷却。

用人工的方法，从低于环境温度空间或物体（被冷却对象）中吸取热量，并最终将热量转移给环境介质（空气、水）的过程称为制冷。热量从低温对象传给高温对象，是一个非自发的传热过程，需要付出设备、能量作为代价。这就好像水泵消耗电能，才能将低处的积水输送到高处一样。

实现制冷所必须的机器和设备，称为制冷机。

除半导体制冷外，其他制冷过程中，均由制冷剂来完成热量从被冷却对象吸出，然后将其转移给环境介质。制冷剂也称制冷工质。

为了获得持续的低温，需要连续不断地制冷，制冷剂也就需要连续不断地吸热和放热，从而在制冷机器、设备内形成一个周而复始的流动循环，这称为制冷循环。

制冷原理是用热力学的原理来分析、研究制冷循环的理论和应用。

热力学研究的问题是热能与其他形式能量之间相互转换的规律，以及热力系统内、外条件对能量转换的影响。制冷过程涉及到热能和机械能、电能之间的转换；涉及到制冷循环系统。因此也就涉及到能量之间转换的规律；涉及到内、外条件对制冷循环系统的能量转换的影响；并涉及到能量转换的效率。诸如此类问题都需要运用热力学的原理，服从热力学的基本规律，得出的符合科学的结论才能指导制冷循环的应用。

按照人工制冷所能达到的低温范围，制冷技术分为普通制冷（ $T > 120\text{k}$ ）、深度制冷（ $T = 120 \sim 20\text{k}$ ）、低温制冷（ $T = 20 \sim 0.3\text{k}$ ）和超低温制冷（ $T < 0.3\text{k}$ ）。通常也将 120k 以下的制冷系统称为低温制冷。由于制冷温度范围不同，所要采用的工质、获得低温的方法以及使用的机器设备有较大的差别。本书侧重叙述普通制冷的工作原理和热力学分析方法。普通制冷主要应用于食品冷加工、空气调节和一般的生产工艺用冷等。

2. 制冷技术的研究内容

制冷技术的研究内容是：

1) 研究获得低温的方法和有关的机理，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) 研究制冷剂的热力性质和物理化学性质，为制冷循环提供性能满意、安全可靠的工作介质。

3) 研究实现制冷循环所必须的机器和设备, 包括它们的工作原理、性能分析、结构设计, 以及制冷装置的工艺流程、系统配套设计, 制冷装置的配电和自动化。

《制冷原理》的学习内容主要涉及前 2 项。

3. 制冷技术的应用

制冷目前已覆盖了工业、农业、国防、医疗卫生、建筑工程、生物工程、宇宙开发、微电子等高精尖技术以及人民生活等各个领域。

在人民生活中, 家用冰箱、空调器已广泛地进入了城镇家庭, 并正由城镇向农村普及。

在商业领域, 食品的生产、运输、贮藏、销售始终伴随着冷却、冷冻、冷藏, 形成了完善的冷藏链, 成为食品工业中重要的系统工程。丰富多样的食品从产地走进家庭, 依靠完善的食品冷藏链“门对门, 不露天, 不落地”的保证, 不但完好地保存了食品的风味, 提高了食品的质量, 而且减少了生产和分配中的食品损耗, 保证了各个季节市场的合理销售。

舒适性空调已经应用于各类建筑和公共场所: 宾馆、饭店、医院、博物馆、图书馆、商务中心、智能大厦、游乐和健身场所, 满足人们的身心健康和提高工作效率。

工艺性空调也深入到生产的各个方面: 高技术产业需要高洁净度的生产环境, 以保证产品的质量; 精密计量、精密仪器仪表需要恒温恒湿的环境, 以保证其精度和正常特性; 印刷、纺织需要适宜的湿度环境, 科学实验需要创造人工气候环境等等。

工业生产中, 为改善钢的性能对钢进行低温处理; 为保证冶炼及铸件的质量, 对送入高炉的空气降温降湿。合成酒精、人造橡胶、气体液化、溶液冷却、石蜡分离、聚乙烯制造等工艺, 也均需要制冷的参与。

农业生产中, 用低温保存和处理农作物种子, 建造人工气候育苗室。低温保存牲畜良种的精液便于人工配种。

国防工业中, 航空仪表、火箭、导弹的控制仪器以及航空发动机都需要在模拟的高温、低温条件下进行性能实验。在高寒地区使用的汽车、坦克、大炮以及常规武器, 也需要建造各种类型的低温实验室进行实验。它们所要求的蒸发温度一般都比较低, 大约在 $-40 \sim -80^{\circ}\text{C}$ 。如坦克实验, 可以建一个大小合适的蒙古包, 用空气制冷的方法创造一个 -80°C 的低温环境。

在建筑业中, 制冷更是功不可没。为保障施工安全和施工质量、效率, 在挖掘矿井、隧道或建筑江河堤坝时, 通常采用冻土法以保持工作面。尤其在大量混凝土的拌合工作中, 需要用冰替代水来抵消水泥的固化反应热, 保证大型构件灌注中的散热充分, 避免产生内应力和裂缝。三峡工程就是一个实例。

制冷技术的应用见表 0-1。

4. 制冷技术的发展

根据我国、埃及和希腊等文化发展较早国家的历史记载, 人类最早的制冷是对天然冰雪的利用, 收藏冬季自然界的冰雪供夏季使用。

埃及人将清水存于浅盘中, 天冷通风时, 由于蒸发吸热, 使盘内剩余水结冰, 是较早的简单的人工制冷。

表 0-1 制冷技术的应用

温度范围		应 用 举 例
K	°C	
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 (干冰)
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、氢及氩气还原, 液氧、液氮
50 ~ 20	- 223 ~ - 253	氟和氢液化, 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

现代机械制冷技术是随着工业革命而开始, 在 19 世纪中、后期发展起来的。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。

1834 年美国人波尔金斯 (Jacob Perkins) 获得了乙醚在封闭循环中膨胀制冷的英国专利, 并在伦敦运转了一台波尔金斯压缩式制冷机, 制得了冰。此为最早的蒸汽压缩式制冷机。

1844 年美国人戈里 (John Corrie) 介绍了他发明的空气制冷机, 为世界第一台制冷和空调用的空气制冷机。

1859 年法国人卡列 (Ferdinand Carre) 设计制造了第一台氨吸收式制冷机。

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

1918 年美国工程师考布兰发明了第一台家用电冰箱。

在各种型式的制冷机中, 压缩式制冷机发展较快。从 1872 年美国人波义耳 (Boyle) 发明了氨压缩机, 1874 年德国人林德 (Linde) 建造第一台氨压缩机以后, 氨压缩式制冷机在工业上获得较广泛的应用。直到 1929 年美国通用电气公司首次发现氟里昂制冷剂 R12 以后, 由于氟里昂制冷剂的无毒、不燃烧性质, 使氟里昂制冷机迅速发展起来, 氟里昂制冷机的应用超过了氨制冷机。至 20 世纪 80 年代, 随着氟里昂制冷剂中的部分制冷剂 (CFC 类) 对大气臭氧层的破坏得以公认, 寻找新的、可替代的制冷剂成了新的研究方向。

进入 20 世纪, 由于市场需求的迅猛增长, 制冷行业国际竞争的加剧, 环境保护意识的提高, 全球节能的迫切需要, 同时受微电子、计算机、网络、新型原材料和其他相关工业领域的技术进步的渗透和促进, 现代制冷技术日新月异、飞速发展, 有了质的变化, 主

要表现在:

1) 制冷范围进一步扩大,上可至环境温度以上,下可至 1K 以下低温。如热泵,它是利用制冷循环给环境温度以上的空间供暖;用顺磁盐绝热退磁方法,可以使制冷温度达到 1K 以下的低温,因而进一步扩大了制冷技术的应用领域和范围。

2) 制冷方法日趋增多。蒸气压缩式制冷、蒸气吸收式制冷、蒸气喷射式制冷、吸附式制冷、热电制冷、空气膨胀制冷、涡流管制冷、磁制冷和绝热放气制冷等等。可以概括地说:任何伴随有吸热的物理现象,原则上都有可能用来制冷。

3) 制冷机器、设备的种类和形式更加丰富,新品种层出不穷,产品不断改进,性能日趋完善。高效、节能、可靠、环保、低成本已经成为制冷行业主题。制冷压缩机从单一的往复式发展到回转式:有离心式制冷压缩机、螺杆式制冷压缩机、滚动转子式制冷压缩机、涡旋式制冷压缩机等。热交换设备的材料和结构也不断得以改善,从而使设备性能不断提高,体积却不断缩小。尤其是计算机技术在制冷制造行业的应用,计算机的辅助设计(CAD)和计算机的辅助制造(CAM)使制冷机器、设备从设计过程到制造过程均有计算机的仿真和优化,使产品更节能高效。

4) 制冷系统的运行管理采用微机管理。随着自动控制技术的发展,高级自动控制系统开发,制冷产品已经普遍采用微机控制。制冷系统的传统控制模式正在发生改变,已由原来的简单机械式控制发展到对制冷系统实行综合控制。同时网络技术用于制冷系统的远程控制、故障诊断已经成为现实。从而使制冷系统的可靠、节能运行变为可能。

另外,人们的认识也发生了根本的变化,主要表现在:

1) 对生存环境的保护。由于臭氧消耗和温室效应引起严重的环境危害,致使 20 世纪 80 年代末开始了全球性地禁止 CFC 物质。制冷行业面临一次历史性的冲击:寻找、研究、开发新的、可替代的制冷剂。并且还需面对由于更换制冷剂所涉及的一系列工作。

2) 对制冷系统的关注。由于制冷系统的工作方式是系统机器、设备的总体集成方式,集成的好坏,将直接影响到系统效率的高低。因此,从注重单一制冷产品的高效,发展到同时注重制冷系统的高效;用计算机模拟制冷循环,研究制冷系统及部件的稳态和瞬态特性,对系统作深入地分析和改进;设计上更注重各机器、设备间的匹配;运行上不仅注重系统满负荷运行时的效率,也注重系统部分负荷运行时的效率,制冷系统的能量调节随系统负荷变化而随时变化。

3) 对太阳能、地热能的利用,系统能量的回收再利用。由于经济的发展和生活水平的提高,制冷、采暖和空调已经是建筑物的必须设施;另一方面由于常规能源的不断开采和使用,其储藏量不断减少,同时环境污染问题突出。因此,在保证系统节能的同时,对太阳能、地热能的开发和利用,系统能量的回收再利用尤为必要。

我国制冷行业的发展始于 20 世纪 50 年代末期。制冷机制造业从 20 世纪 50 年代的仿制开始到 20 世纪 60 年代自行设计制造,发展了多种形式制冷机,制订了有关产品系列和标准。目前我国已经发展成为制冷空调产品的生产大国,具有品种比较齐全的大、中、小型制冷空调产品系列,产品的质量、性能、技术水平较过去有很大的提高,并形成有一定基础的科研、教学、设计和生产体系,正在缩小与国外先进水平的差距。当然,我们还需看到,我国是制冷空调产品的生产大国(其产值约占我国国民生产总值的 2%),但还不

是制冷空调产品的技术强国。国内具有相当知名品牌的企业与国际知名跨国公司相比,无论是资本实力、生产规模、营销网络及方式、产品研究开发能力,还是品牌知名度,以及制冷系统控制、智能化、网络化运行等都有相当大的差距。还需要依靠全体制冷空调工作者的努力,把我国的制冷空调工业推进到一个新水平。

制冷是年轻而又充满朝气的学科和工业领域,环保、节能、可持续发展是其永恒的主题。巨大的市场需求和新技术的交叉渗透将为它开辟宽广的发展道路。

第 一 章

单级蒸气压缩式制冷循环

1

- 第一节 单级蒸气压缩式制冷循环的制冷方法、
原理与循环
- 第二节 理论的单级蒸气压缩式制冷循环及热力
计算
- 第三节 实际的单级蒸气压缩式制冷循环
- 第四节 单级蒸气压缩式制冷循环的影响因素及
工况
- 第五节 单级离心、螺杆压缩式制冷循环
- 第六节 空气源热泵和地源热泵

第一节 单级蒸汽压缩式制冷循环的制冷方法、原理与循环

一、制冷方法、原理

生活中有这样的经验，买回水果、蔬菜后，会径直放入家中的冰箱里，因为水果、蔬菜将很快地被降低温度保鲜起来，供我们随时享用。夏天，回到有空调的家中，进门的第一件事就是打开空调，家里凉了，我们也爽了！可见，冰箱、空调给我们提供了一个持续的低温环境。低温是怎样产生的？又是怎样维持的？水果蔬菜的热量、家里空气的热量交给了谁？又是怎样被带走的？

一起来做一个试验：常温空间里，在如图 1-1 所示的密闭容器内加入一定量的纯液体，如水（ H_2O ）。静置一段时间，忽略容器内外温度的细小变化，从微观看，密闭容器的上部空间会有水蒸气出现（放入香脆的饼干即知），即水表面附近动能较大的一部分水分子，克服液体表面张力飞离液面到达容器的上部自由空间，液体蒸发；同时上部自由空间好动的水分子会与液面碰撞后飞回水中，气体凝结。

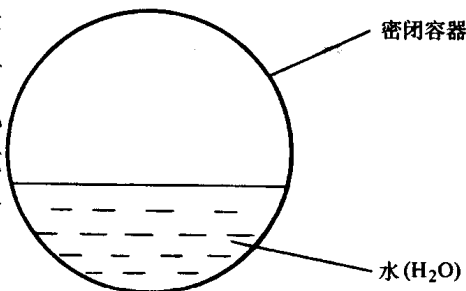


图 1-1 密闭容器示意图

水分子的飞出与飞回是无止境的，因为分子永远处于运动中，但它们有规可循。刚开始，液体的上部自由空间没有水分子，蒸发飞出的水分子数多于凝结飞回的水分子数，随着上部自由空间的水分子数越来越多，水分子浓度越来越大，飞回液体的水分子数也相应增加，到一定程度时，它们会达到一个气、液两相的动态平衡，如图 1-2 所示。即同一时间内液体表面飞出的水分子数等于飞回的水分子数，这时我们称密闭容器内液体达到了饱和状态。液面上的蒸汽称为饱和蒸汽，液体称为饱和液体。此时容器内的蒸汽压力称为饱和压力，对应的气、液温度称为饱和温度。并且有一结论：饱和温度与饱和压力——对应。即对应于一定的饱和温度，就有一确定的饱和压力；反之，对应于一定的饱和压力，就有一确定的饱和温度。对于 H_2O

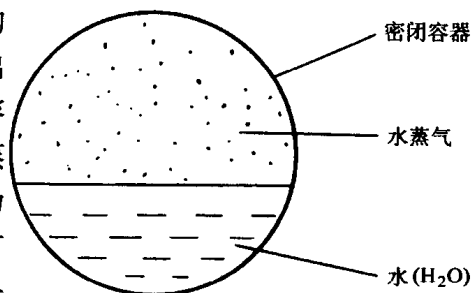


图 1-2 密闭容器内气-液相平衡

饱和压力 $p = 1\text{at} = 101325\text{Pa}$ 时，饱和温度 $t = 100^\circ\text{C}$

饱和压力 $p = 0.31\text{at} = 31160\text{Pa}$ 时，饱和温度 $t = 70^\circ\text{C}$

饱和压力 $p = 0.0092\text{at} = 934.5\text{Pa}$ 时，饱和温度 $t = 6^\circ\text{C}$

水的 p - t 图如图 1-3 所示。

试想，如果从密闭容器上开口，引出密闭容器上部自由空间的水蒸气，如图 1-4 所示。又将会有什么现象发生呢？

首先，气、液两相的动态平衡被打破。密闭容器上部自由空间的水分子数减少，压力减小，液体将蒸发飞出更多的水分子弥补抽出的水分子，以期维持原有的动态平衡。其

次，液体蒸发需要热量。容器内液体蒸发将从容器里的液体和容器周围的空气中吸取热量。

当密闭容器上部的气体被源源不断地抽出，密闭容器下部的液体就将源源不断地汽化，将从容器里的其他液体和容器周围的空气中源源不断地吸取热量，因此，容器里的液体温度和容器周围的空气温度将降低，直至达到一个新的动态平衡。低温就这样产生了，如图 1-5 所示。

在制冷原理中，这个密闭容器被称为蒸发器。生活中，冰箱内结霜或凝结水珠的部位，家用空调器的室内机即为蒸发器。蒸发器内的液体称为制冷剂，也称制冷工质。它可以是 H_2O 、 HN_3 、R22、R134a 等等。蒸发器外被降温的空气称为被冷却对象。冰箱里的水果蔬菜、家里的空气均属于被冷却对象。

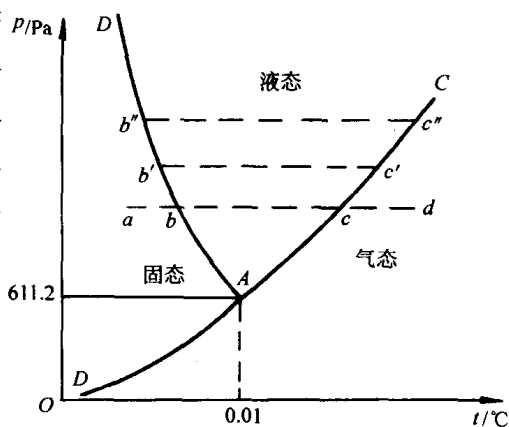


图 1-3 水的 $p-t$ 图

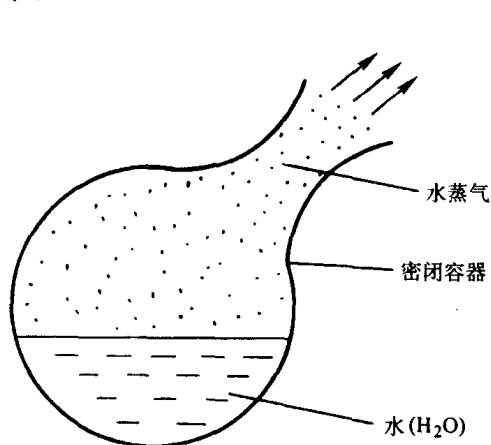


图 1-4 密闭容器内气-液平衡破坏

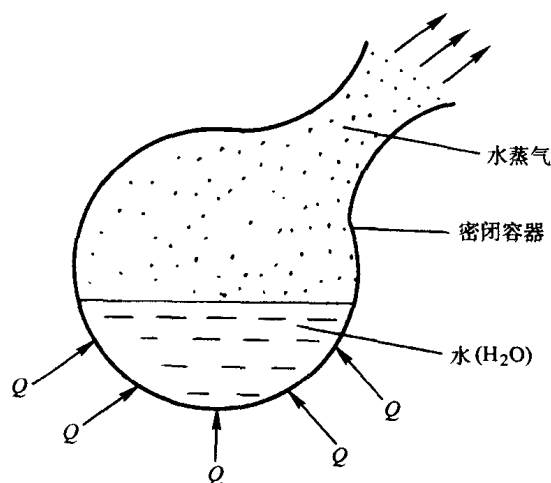


图 1-5 密闭容器制冷

蒸发器是热交换设备，其作用是将蒸发器外被冷却对象的热量传递给蒸发器内制冷剂，制冷剂（在低温低压下）相变吸热而使被冷却对象的温度降低。

从蒸发器内源源不断地抽出制冷剂气体的装置称为制冷压缩机，其作用之一是不停地将完成了吸热过程而汽化的制冷剂蒸气从蒸发器中抽吸出来，使蒸发器维持低压状态，便于蒸发吸热过程能继续不断地进行下去。根据饱和压力与饱和温度——对应关系，当蒸发器内制冷剂的压力降低时，蒸发器内制冷剂的温度也随着降低。对于 H_2O ，饱和压力 $p = 0.0092 \text{at} = 934.6 \text{Pa}$ 时，饱和温度 $t = 6^\circ\text{C}$ ，可用于空调降温。

有了制冷压缩机、蒸发器即可产生制冷效果，如图 1-6 所示。但要维持持续稳定的制冷将是困难的，因为蒸发器内制冷剂需要不断补充。另外，这种装置的制冷剂蒸气直接散发到大气中，不能再回收，既不经济又不环保。是否能设置适当的装置，形成一个制冷循环，它不仅可以回收制冷剂蒸气再次使用，而且还可以控制蒸发压力，获得我们需要的各