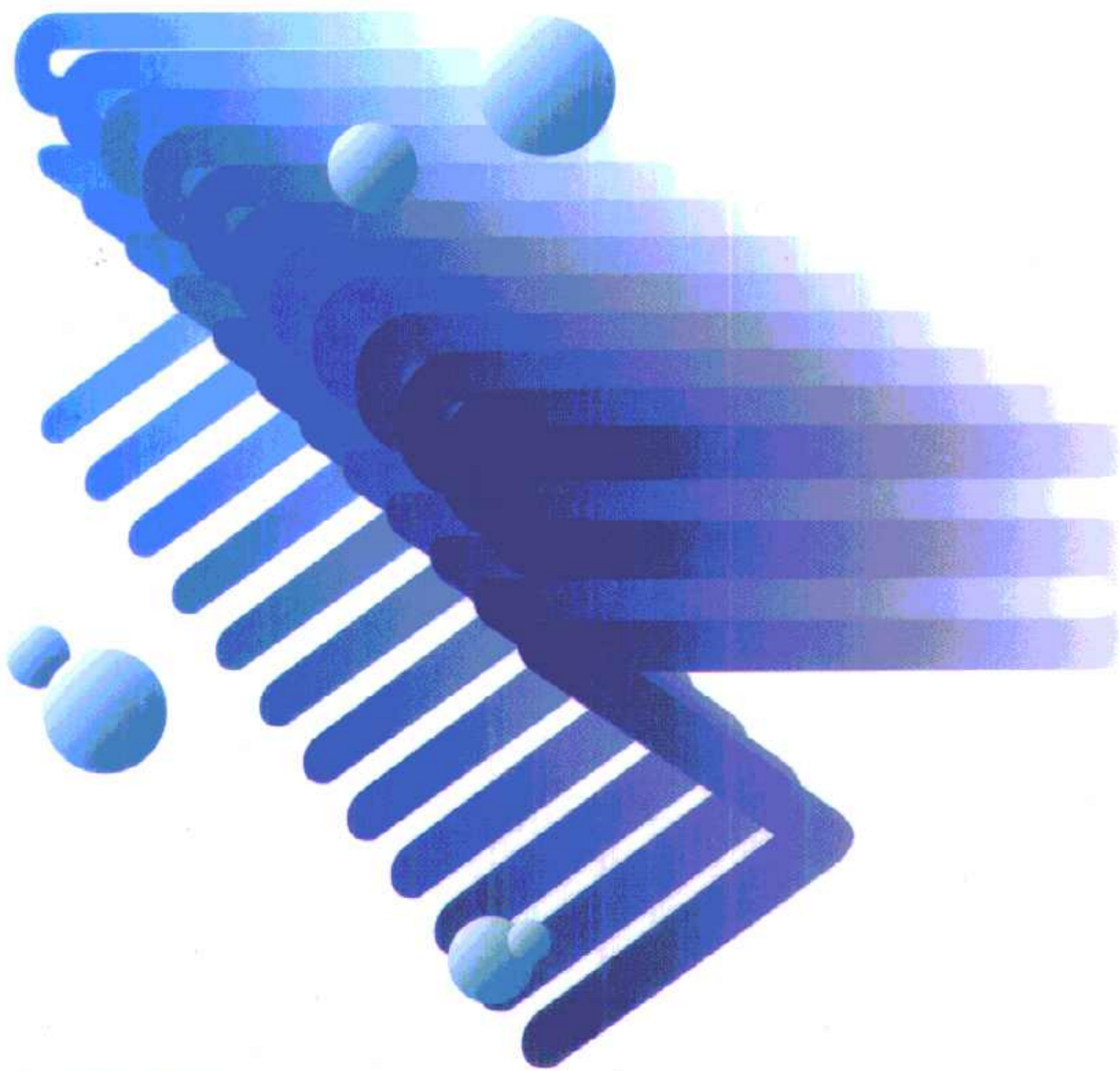


B

普通高等教育机电类规划教材

# 制冷与低温原理

浙江大学 陈光明 陈国邦 主编



TB66-43  
C44 613

普通高等教育机电类规划教材

# 制 冷 与 低 温 原 理

主 编 陈光明 陈国邦  
参 编 沈永年 王剑锋 余建平 邱利民  
主 审 吴业正



A0927924



机 械 工 业 出 版 社

本书是在吸收国内外制冷与低温领域最新研究成果的基础上编写而成,具有简明扼要、深入浅出、内容新颖等特点。全书分六章,介绍从室温至接近 0K 广宽温区内的各种常用制冷和低温方法、原理及应用。主要内容有制冷与低温工质的性质,蒸气压缩制冷,吸收、吸附制冷,低温制冷,气体的液化和分离等。书中还列举例题和习题,书末附有常用工质物性图表及计算机程序。

本书可作为热能与动力工程专业本科生的教材,也可供机械、化工、建筑、航天、食品、医药等领域从事制冷与低温、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

制冷与低温原理/陈光明,陈国邦主编.沈永年等编.  
—北京:机械工业出版社,2000.5  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-07625-7

I.制… II.①陈…②陈…③沈… III.制冷—高等学校—教材 IV.TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 10863 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:蒋有彩 版式设计:霍永明 责任校对:李汝庚

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·18 印张·437 千字

0 001—3 500 册

定价:25.00 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、68326677—2527

# 前 言

为了适应现代社会经济、科技、文化和世界高等教育的发展，教育部于1998年7月正式颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录》。新目录将原来的热力发动机、流体机械及流体工程、热能工程与动力机械、热能工程、制冷与低温技术、能源工程、工程热物理、水利水电动力工程、冷冻冷藏工程（部分）等九个专业，合并为一个新的专业——热能与动力工程专业。新专业目录的实施及专业课时的减少，对专业教材提出了新的更高的要求。为了满足全国高等学校“热能与动力工程”专业对制冷与低温方面教材的需要，我们编写了这本《制冷与低温原理》，并被机械工业出版社列入“九五”教材出版计划。

全书根据教育部颁布的“热能与动力工程”专业业务培养目标和要求，以及淡化专业意识、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而成。主要介绍从室温至接近0K广宽温区内的常用制冷和低温方法、原理及其应用。全书除绪论外共有六章。绪论简要介绍制冷与低温的研究内容、发展历史以及在人民生活 and 国民经济各部门中的应用；第一章简要介绍制冷与低温的热力学基础，以及实现制冷与低温的常用方法；第二章介绍制冷与低温工质的热物性及其计算方法；第三章至第五章分别详细介绍制冷工程中常用的蒸气压缩制冷和吸收制冷，低温领域中的气体制冷和液化循环，气体分离的原理、方法及其应用；第六章结合制冷与低温工程实际，介绍用热力学第二定律对实际系统进行熵分析和焓分析的方法。每一章末尾均附有思考题和习题，书末附有常用工质物性图表及计算机程序。

本书由浙江大学制冷与低温工程研究所组织编写。参加编写的成员有：陈国邦教授（绪论、第一章中的脉管和热声制冷部分、第四章），陈光明教授（第一章第一至第三节、第二章第一节及第三至第七节、第三章第一节、第六章），沈永年副教授（第三章第二、三节），王剑锋副教授（第三章第四节），余建平副教授（第二章第二节、第五章第一至第四节），邱利民副教授（第一章第四节，第五章第四节）。全书由陈光明、陈国邦主编，西安交通大学吴业正教授主审。

本书得到了浙江大学课程建设基金的资助。在编写和出版过程中，得到了华中理工大学郑贤德教授，上海理工大学华泽钊教授，上海交通大学王如竹教授，浙江大学李式谟教授、冯仰浦教授和刘楚芸副教授等的支持和帮助；浙江大学博士生郑飞、金滔、何一坚，硕士生季益华等对书中的习题、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1998年教育部新设大专业“热能与动力工程”本科生的教材，也可供机械、化工、建筑、航天、食品、医药等领域从事制冷与低温、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。

陈光明 陈国邦

# 绪 论

## 一、研究的内容和范围

用人工的方法制造和获得低于环境温度的技术称为制冷技术。由于热量只能自动地从高温物体传给低温物体，因此制冷的实现必须包括消耗能量的补偿过程。换句话说，制冷是从低于环境温度的空间或物体中吸取热量，并将其转移给温度高于它的介质中去的过程。

制冷几乎包括了从室温至 0K 附近的整个热力学温标。在科学研究和工业生产中，常把制冷分为普冷和低温两个体系。根据国际制冷学会第 13 届制冷大会（1971 年）的建议，将 120K 定义为普冷与低温的分界线。“低温”是指在低于大约 120K 温度下所发生的现象和过程或使用的技术和设备，即从接近液化天然气的正常沸点至 2K 左右的温度范围。在 120K 和室温之间的温度范围属于“普冷”，简称为制冷。但是，制冷与低温的温度界线不是绝对的。况且，由于用于低温的所有流体和材料总要经受室温，因此它们在低温和室温间的性质和过程不能忽视。

制冷与低温不仅体现在所获得的温度高低不同，还体现在所采用的工作介质及获得低温的方法不同。一般来说，制冷的的方法主要有三种：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利用珀尔帖效应的热电制冷。例如，利用半导体的珀尔帖效应的制冷方法叫做半导体制冷。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。现在可用作制冷剂的物质有几十种，根据化学成分可分为：①卤化碳制冷剂，它们都是甲烷、乙烷和丙烷的衍生物。在这些衍生物中，用氟、氯和溴的原子代替了原来化合物中全部或部分氢原子，其中含氟的一类总的称为氟利昂；②碳氢化合物制冷剂，常用的是烃类中的甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、乙烯和丙稀等；③无机化合物制冷剂，如水、氨、二氧化碳、二氧化硫和空气等；④混合制冷剂。在另一方面，根据制冷剂常温下在冷凝器中冷凝时的饱和压力和大气压力下的蒸发温度高低，又可将制冷剂分为低压高温制冷剂（冷凝压力  $p_k \leq 0.3\text{MPa}$ ，蒸发温度  $t_0 > 0^\circ\text{C}$ ），适用于空调系统；中压中温制冷剂（ $p_k \leq 2\text{MPa}$ ， $0^\circ\text{C} > t_0 > -120^\circ\text{C}$ ），适用于空调及  $-70^\circ\text{C}$  以上的冰箱等制冷装置，以及复叠制冷系统的低温部分或  $-70^\circ\text{C}$  以下的低温装置。

用于低温的制冷工质主要有甲烷、空气、氟、氩、氮、氦、氢和氦等。用于绝热去磁的制冷工质则是固体顺磁性材料。甲烷的正常沸点为 111.7K，显然它属于低温的范围。空气中氮、氧和氩等的低温分离涉及的温度低于 100K。低温中另一个更低的温区是液氮和液氩温区，其沸点温度分别为 27.09K 和 20.27K。氦是自然界诸元素中沸点最低的气体，也是最后被液化的气体。 $^4\text{He}$  的正常沸点为 4.2K，它的同位素  $^3\text{He}$  的沸点为 3.19K。将液  $^4\text{He}$  负压抽气，可以获得低于 2.17K 的温度，这时氦将发生相的变化，由正常液氮相（He-I）转变为超流氦相（He-II）。超流氦具有许多特异性质，如高热导率、无粘性等。氦低温的研究

导致超导电性和超流现象的发现，使人们对物质世界有了更深入的认识。至今，在向 0K 的探索中，利用  $\text{He}^3$ - $\text{He}^4$  稀释制冷与核绝热去磁技术，最低温度可达  $10^{-7}\text{K}$ 。

本书主要是从热力学的观点来分析和研究工质性质、各种制冷方法和制冷循环的理论及其应用，认识和理解物质在低温条件下出现的奇异现象，探索有效利用这些低温现象的途径。

## 二、制冷与低温的应用

制冷与低温技术几乎与国民经济的所有部门紧密联系，与人民生活密切相关。人类生产活动中，越来越多地利用制冷与低温技术来保证生产的进行和产品质量的要求；人类日常生活中，越来越多地食用冻结和冷藏食品，人为制造舒适环境以保障人身健康和工作效率；特别是现代科学技术和国防技术，对低温技术提出了越来越迫切的要求。

### (一) 制冷技术的应用

制冷是一种冷却过程，其最大应用是空调。此外，制冷还包括工业制冷过程，食品的加工和贮藏，从石油化工产品中移去热量，以及在工业部门中的许多特殊应用。

1. 大中型建筑物的空调 世界各国的大型建筑物的夏季降温系统，已成为标准的公用事业设备。即使是在夏季温度不太高的一些地区，大型建筑物也可能要进行空气冷却处理，以排除室内人体、灯光和其他电器设备产生的热量。在炎热的地区，是否装有降温系统，对于工作人员的工作效率有着直接的影响。大型建筑物通常采用某种形式的集中式空调系统。

单层工业建筑物，例如仓库和厂房，通常在屋顶设置空调装置，向下面的空间提供调节的空气。

用于医院及其他医用建筑的空调，常要求采用 100% 的室外空气。手术室内的湿度要求更为严格，以免产生静电。为医院设计一个能够满足特殊要求而能量效率又高的系统，在工程上是一个难题。

2. 工业空调 工业空调不仅指为在恶劣环境中工作的工人提供一定程度的舒适条件，而且也包括有利于加工产品或材料而作的空气调节。

(1) 局部供热和局部冷却 在冷天，比较切实可行的是在工人所在的有限范围供热。在炎热环境中，可把冷气流导入工作区，以维持工人可以接受的工作条件。

(2) 环境模拟实验室 不同的环境模拟实验室的空调要求不同。进行发动机低温试验的环境模拟实验室，必须保持  $-40^{\circ}\text{C}$  左右，而研究动物在热带的行为的实验室，则必须保持高温和高湿。

(3) 印刷厂 在印刷厂实行空调的主要目的是控制湿度。在某些印刷过程中，纸张要通过好几台不同的印刷机，这时必须实行空调以保证套准良好。不适当的湿度会引起诸如静电、纸张卷曲和折皱，以及墨迹不干等麻烦。

(4) 纺织厂 纺织品对湿度和温度的变化是很敏感的。在现代化的纺织厂中，需要采用空调来防止织品的柔软度和强度发生变化或产生静电。

(5) 精密零件和洁净室 精密金属零件制造厂要求采用空调来保持温度均匀，以免金属发生膨胀和收缩；保持一定的湿度，以防金属生锈；过滤空气，使尘埃含量尽量小。洁净室技术已用于生产电子元件及其他材料的封闭环境。

(6) 计算机房 计算机房的空调系统用来控制空气的温度、湿度和洁净度。如果机房内温度过高，某些电子元件就会发生故障，故应保持机房温度在  $20\sim 30^{\circ}\text{C}$  的范围内。

(7) 发电厂 火力发电厂习惯上都采用室外空气通风, 以保证工人具有良好的工作条件, 但由于设备紧凑和电流强度增大, 已经没有足以安装通风管道的空间。在现代化发电厂中, 许多狭窄的地方采用通以制冷机的空气冷却盘管来提供冷量, 盘管比普通通风管要小得多。

3. 住宅空调 住宅空调器包括窗式空调器、壁挂式空调器和柜式空调器等, 有冷风型和热泵型两种。冷风型只有夏季供冷效果。热泵型则通过电磁换向阀, 具有冬、夏季可分别供热和制冷功能。近年来, 住宅空调器已成为我国居民消费的热点家电产品之一。我国住宅空调器的年产量达上千万台, 然而全国的空调器普及率仅为 1%。空调器产品将向体积小、能耗低、噪声低、多功能、电脑化方向发展, 以满足家用及企事业单位购买的多样化需求。

4. 车辆空调 车辆空调主要用于公共汽车、火车、卡车、旅游车、拖拉机、吊车的驾驶室、飞机和轮船等。这些交通工具中, 冷负荷主要用于抵御来自太阳的辐射热和来自人体散发的热量。与建筑物空调相比, 这些负荷的特点是变化迅速, 单位体积的强度高。

5. 食品冷藏和分配 多种肉类、鱼类、水果和蔬菜都易于腐败变质, 据统计, 当今全世界每年因各种原因造成的腐烂变质食品, 占人类食品年总产量的 45%。为了延长水果、多数蔬菜和已加工的肉类如香肠的贮存时间, 贮存温度应稍高于其冻结点。其他的肉类、鱼类、蔬菜和水果经冷冻后, 可在低温下贮存数日甚至数月, 到消费者手中才解冻后食用。

典型的食品冻结链由下列环节组成: 冻结、在冷藏库中贮藏、陈列在食品市场的冷藏柜中, 最后存放在家用冰箱或冰箱的食品冷冻箱内。

(1) 冻结 必须将食品的温度迅速降低到冻结区以下。冻结的方法有: ①吹风冻结法, 将温度大约为  $-30^{\circ}\text{C}$  的空气高速吹过堆叠在叉形货架上的食品包; ②接触冻结法, 把食品放置在金属板表面之间进行冻结; ③浸没冻结法, 将食品浸没在低温盐水中; ④流化床冻结法, 小块食品用输送带传送, 同时用冷空气由下向上吹过输送带, 使食品保持悬浮状态; ⑤用液氮或二氧化碳之类的低温介质进行冻结。

(2) 冷藏 肉类在屠宰后, 应快速冻结, 然后运送到冷藏库在  $-20\sim-23^{\circ}\text{C}$  下贮藏, 可长达数日甚至数月之久。鱼类的冷藏温度还要低些。

(3) 分配 将食品从冷藏库运送到食品市场需用冷藏运输。随着市场体制的建立, 铁路、公路、水路对冷藏运输工具的需求量大幅上升, 冷藏集装箱的发展受到格外的重视。此外, 还有一些新产品, 如带机组和不带机组的铁路冷板冷藏火车、冷板冷藏汽车、液氮冷藏车、活动冷板小型冷藏集装箱、带机组的固定冷板小型冷藏集装箱等。

最后, 消费者将食品贮藏在家用冰箱或冷冻箱中, 直到取出食用为止。在家用冰箱的设计和制造方面, 式样和一次成本是首要考虑的问题。但是节能要求和新工质替代技术的要求又给冰箱设计和制造带来新的挑战。

6. 食品加工 某些食品除了冻结和冷藏外, 还需进行加工, 这些作业也需要制冷。

(1) 乳制品 乳制品主要有牛奶、冰淇淋和奶酪。进行巴氏消毒时, 牛奶的温度要升高到大约  $73^{\circ}\text{C}$ , 然后将其冷却到  $3^{\circ}\text{C}$  和  $4^{\circ}\text{C}$  贮存。制作冰淇淋时, 要将各种配料进行巴氏消毒, 充分混合, 然后把混合物冷却到  $6^{\circ}\text{C}$  左右, 最后进入冻结器, 使之温度降低到  $-5^{\circ}\text{C}$ 。制成的冰淇淋在低于冻结温度下贮存。

(2) 奶酪 奶酪的品种有数百种, 每一种的制备过程都不相同, 但基本步骤都是把牛奶的温度降低到  $30^{\circ}\text{C}$  左右加入添加物, 一部分混合物凝固成凝乳, 将液态乳清排出。凝乳在

冷冻室内固化，固化温度在 10℃ 左右。

(3) 饮料 生产浓缩果汁、啤酒和其他酒类饮料时，制冷是必不可少的。在冷却后饮用，可以改善许多饮料的滋味。将浓缩果汁在果园附近生产后，以冷冻状态运输，可以使运输费用较之原果显著降低。

(4) 酿造 在酿造工业中，制冷可以控制酿造过程中的化学反应速度，并保护某些中间产品和最终产品。大规模生产啤酒时，发酵应在 8~12℃ 之间进行，这一温度依靠制冷来保持。在以后的加工过程中，散装啤酒的贮存和最后装瓶或装桶，都要求在制冷室内进行。

(5) 冷冻干燥 某些生物制品和粮食制品是用冷冻干燥法贮存的。在冷冻干燥过程中，制品冷冻后利用升华作用以除去水分。一些速溶咖啡的生产厂就是采用这种冷冻干燥工艺进行生产的。

7. 化学工业和加工工业 制冷技术在化学和加工工业中的应用有：气体分离；气体冷凝；使混合物中一种物质凝固，从而与其他物质分离；液体的低温贮存，使其压力不致过高；移去反应热等。

#### 8. 制冷的特殊应用

(1) 制冰机 用于饭店和旅馆制冰，大型工业制冰机则用于食品加工厂和化工厂，家用冰箱也可用来制取少量冰块。

(2) 滑冰场 把制冷剂或冷冻盐水的输送管埋在沙或木屑中，然后在上面泼上水并使之冻结，就可构成人工溜冰场。

(3) 建筑工业 在建筑工业中，用冻土法挖掘土方和建筑桥梁基础、地下铁道等可以提高施工效率，保障施工安全。制冷还应用于冷却巨型的混凝土块，因为混凝土固化时会释放出化学反应热，必须将其移除，以免发生热膨胀和混凝土应力。

(4) 医疗生物 在医药卫生部门中，使用冷却干燥法制成药物，低温保存血浆、疫苗和某些药品及生物样品。心脏、肿瘤、白内障、扁桃腺等低温外科手术，皮肤、眼珠等的移植手术等，也需要应用制冷技术。

#### (二) 低温技术的应用

近几十年来，低温已远离了神秘的实验技术时代，发展成为自然科学中重要的分支。低温工程已经渗透到科学技术的各个领域，在能源和交通、航空和航天、现代工业、科学研究和生物医疗等部门，一旦离开低温，它们的发展和现代化的进步是难以实现的。

1. 能源与交通 随着能源需求的日益增加，要求保护现有能源、探索代用燃料和新能源、改善能源结构，以减小将来的能源危机和改善环境条件。

(1) 天然气 天然气是世界上继煤和石油之后的第三大能源。预计从 21 世纪开始，天然气将部分替代石油和煤，成为全球最主要的能源之一。天然气主要成分为甲烷，其氢碳比远高于石油，是一种优质清洁型燃料。用作城市煤气，可大大减轻对环境的污染；用作汽车燃料，CO<sub>2</sub> 排放量可减少近 1/3，尾气中 CO 含量可降低 99%。天然气作为化工原料，可用于生产合成氨和甲醇等。利用天然气发电的联合循环，可将电厂的热效率从 35% 提高到 42%。大规模天然气的开采、贮存和运输，依赖天然气的液化。液化天然气 (LNG) 也许是低温在工业上的最大应用者。

(2) 核聚变 热核反应堆也许是当今尝试的最巨大的技术业绩。核聚变反应堆托卡马克 (Tokamak) 装置依靠大型超导磁体对聚变反应器中的高温等离子体进行磁约束，这些超导



线圈在大绕组空间内产生很强的磁场来保证等离子体的空间位置和形状，建立起等离子体的磁约束系统。近年来，由国际原子能机构 IAEA (International Atomic Energy Agency) 协调的国际热核实验堆 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 将在 20 世纪末建造，约在 2040 年左右商品化。

(3) 超导列车 自 70 年代以来，日本一直在开发采用超导磁体的磁悬浮列车，1972 年在一个小试验车上运行成功，随后进行了一系列的研究与开发。超导磁悬浮列车在大容量运输、低环境污染和较高安全性等方面具有很大的潜力。超导磁悬浮列车的悬浮间隙大，一般可大于 100mm (普通磁悬浮列车的悬浮间隙大约只有 10mm)，大大减少对路轨公差和控制的要求；速度可高达 500km/h 以上。日本在山梨县建造的 42.8km 超导磁悬浮列车试验线，速度达到了 550km/h。

磁悬浮用超导磁体对低温的要求是提供连续制冷，车载制冷机要结构紧凑、重量轻、效率高。随着高温超导体研究的进展，如果超导列车能采用高温超导体，则经济性能会大为提高。

(4) 氢能利用 氢是将来的发动机、发电厂、飞机、航天系统等各种工业过程的主要代用燃料。用液氢作燃料的汽车所排出的废气 (水)，几乎不影响环境。将来的超高音速飞机要用液氢来推进。研究指出，液氢的高比热容还可用来冷却以极高速度飞行而产生摩擦热的机翼表面。氢浆或甲烷浆对于超音速和超高音速飞行也显示出优点。

2. 航空与航天 早在 30 年代，低温就在火箭中得到了应用。第二次世界大战中，V-2 火箭第一次应用酒精和液氧做为推进剂。载人空间飞行起初也是用酒精和液氧作为推进剂。航天飞机采用具有 254kN 冲力的火箭发动机，可达 2km/s 速度，能将航天飞机送至离地 108km 高度的外层空间。

无论是载人的或不载人的航天器，低温总是空间计划的关键部分。地面试验装置需用大容积的舱室来模拟深空间条件，高真空的空间环境要用液氮和液氦冷却的低温泵来产生。

美国航天穿梭机都是采用液氢和液氧系统作为推进剂。在火箭发射场的地面设施中，包括数万立方米的液氢和液氧贮槽。阿波罗操作舱采用液氧生命维持系统，用液氢和液氧燃料电池产生随机电力，登月舱则用超临界低温氧作为生命维持。1969 年 7 月，这个具有低温系统的登月舱首次登月成功。要是离开低温，许多卫星和空间飞船的发射成功和空间的科学测量都是不可能的。低温技术还用于空间飞行器上仪器的冷却，红外天文卫星用 4K 的液氦和 1.8K 的超流氦冷却的仪器来探测宽频道的红外辐射。红外探测器利用固体制冷剂 (氢、氦和甲烷等) 的升华来冷却，或采用辐射制冷技术。

中国空间技术是 50 年代中期发展起来的。1970 年 4 月 24 日，长征一号火箭把东方红一号卫星送入轨道。我国的长征三号火箭采用氢氧发动机技术。1990 年 4 月 7 日，长征三号火箭将亚洲一号卫星送入地球静止轨道。无疑，随着长征系统火箭的运载能力的进一步提高，中国将发展通信卫星、气象卫星和资源卫星，并开始执行我国的载人航天计划。

低温在航空领域的应用，涉及生命维持系统、地面研究设施，以及超高音速在空间边缘飞行的推进系统。早期应用包括高空军用飞机上的液氧呼吸器与氮气作为飞机轮胎的气源。现在，液氮不仅用于商用飞机上食品的保存，而且能取代普通冷冻系统，包括冰和固体二氧化碳。

风洞是获得空间飞行数据的基本工具。在开发空间时代的风洞中，低温成为最引人注目

的应用之一。因为使用冷氮气的低温风洞，能产生的雷诺数要比以前曾达到的数值高 10 倍。这种超音速模拟，使临界超音速区的研究成为可能。

3. 科学实验 诺贝尔奖金是科学研究中卓越成绩的缩影。已有近 20 个诺贝尔奖金获得者，他们要么研究低温现象本身，要么研究涉及低温。例如：1910 年荷兰范德瓦尔斯关于气态和液态方程的研究，1913 年荷兰翁尼斯进行低温下物质特性的研究，生产出液氮；1933 年焦克 (Giauque) 和摩克道格 (Mac Dougall) 实验成磁制冷；1957 年美籍华人杨振宁、李政道发现宇称不守恒原理；1962 年前苏联朗道对凝聚态物质的研究；1972 年美国巴丁、库珀、施里弗关于超导性理论的发展；1973 年日本井崎、美国贾埃弗和英国约瑟夫森对半导体和超导体隧道效应的研究；1976 年美国里克特和美籍华人丁肇中发现新一类基本粒子 (P<sub>Si</sub> 或丁粒子)；1976 年前苏联卡皮查氮液化器的发明与应用；1987 年德国贝德诺茨和瑞士米勒发现新的超导材料；1996 年美国李戴维等发现了 He-3 同位素中的超流性，以及 1996 年美籍华人崔琦等三人发现超低温状态下，电子通过极强磁场时的电子偏离现象，实验的温度降到热力学温度零度附近。

美国布洛克海文 (Brookhaven) 国家实验室建造的 ISABELL 粒子加速器，由 1100 个 7t 重的超导磁体，构成两个圆周为 4 公里的交错圆圈。这些超导磁体采用了最大的氮制冷机，但是即使包括制冷机的功率在内，所消耗的电能只有普通磁体的四分之一。这种制冷机的关键设备是透平膨胀机，其转速高达 66 万 r/min。

美国费米国家加速器实验室在一个 4000GeV 的加速器中，采用了 1000 个超导磁体，它们与普通磁体联合，可使加速器能量加倍。圆周为 6.4km 的整个低温回路，保持在 4.2K 温度下运行。

建于瑞士日内瓦的欧洲原子能研究组织 (CERN) 大强子对撞机 (LHC) 项目，是另一个高能物理研究装置。它由 2000 个高场超导磁体组成 27km 的圆环，超导系统采用 1.9K 超流氮冷却，需用液氮  $9.77 \times 10^6$ L。

超导约瑟夫逊结 (J-J) 对于电压和磁流的反应是极其独特的。它的重要特点在于在某一电压下，这些器件的电振荡与电压频率成正比。如果将 J-J 装入超导回路中去，则它对微小磁场十分敏感。这些 J-J 称为 SQUID，是超导量子干涉仪的缩写。SQUID 是对磁场最敏感的元件，因而获得了重要应用。SQUID 可用来测绘地磁和用于导航等。在空间技术中，可用于红外探测和微弱信号放大，在医疗中用于探测人体的心磁和脑磁。总之，超导在电子技术中的应用已显示出巨大优越性，现已发展成一个新的应用领域——低温电子学。

在计算机技术方面，数据的运送速度不可能大于光速 ( $0.3048 \times 10^9$ m/s)，但现在以纳秒计算的时间已处于计算机速度范围的较慢一端。因而，必须彻底减小计算机的尺寸，增加其运行速度。这只有借助于低温技术才可能实现。目前研制的超导器件是已知最快的真实时间模拟信息——数字信息转换器 (A/D 转换)，这种器件应用了约瑟夫逊结，能实现  $2 \times 10^9$  次/s 的 A/D 转换。

4. 工业 用空气作为原料生产的液氧和液氮是非常重要的工业气体商品。每年在所有低温产品中，它们占据了大约三分之一。约有 50% 的液氧用于钢铁工业，从铁水中移除碳，还用于金属的切割。另外有 20% 用于化学工业。空间计划中所需的液氧量看来是惊人的，但充其量不过氧的总销售量的 2%。采用纯氧加速活水处理，可使速度提高 3~5 倍。

液氮在食品工业有着重要应用。用液氮速冻高档鱼虾、饺子，已是众所周知的事。航空

公司为随机厨房冷冻每年要消耗大量液氮。汽车轮胎、橡胶制品和塑料零件用液氮处理后变脆，经低温粉碎后重新利用。

玻璃生产过程中采用的“浮动玻璃”流水法，即将炉子中拉出来的玻璃浸入并“浮”在干氮气垫上。此外，液氮还用于控制火灾中火焰的蔓延。

氩气是特种焊接的保护气体。高纯氩的生产可用低温精馏法来实现。

5. 生物医疗 低温生物学是一门冷冻贮存有生命物质的科学。现在用来保存血液及其组分的冷冻工艺已经成熟，传统的方法只能使血液有效保存 21 天，采用液氮快速冷冻法可将贮存时间大为延长。低温冷冻技术也用于骨髓、组织培植、肿瘤细胞和皮肤的保存，动物和鱼类胚胎冷冻后，再复原可得到健康的后代。良种奶牛采用低温冷冻精液繁殖后代已在农牧业中广泛应用。现在将整个器官进行低温保存，已成为共同关心和感兴趣的课题，但这有赖于今后低温生物学的进展。

一个有争议的低温应用就是用液氮将死人冷冻起来，这些死者希望有朝一日科学发达时能使他们起死回生。在美国加里福尼亚液氮库中，已有 34 人冻结在液氮中，但至今没有一人复活过。

低温冷刀在外科中的应用已有多年历史了，它可以移除或破坏某一组织，包括引起震颤麻痹的脑区组织。严格的冷冻控制可以在极少出血的情况下，移除健康器官附近的病变组织。用液氮冷冻进行低温外科治疗已普遍应用，低温外科法切除肝癌等研究也取得进展。现在医院的呼吸用氧采用管道供氧，它是由液氧贮罐供给的。

近年来，磁共振成像技术（MRI）已被许多医院采用。采用超导量子干涉仪测量人体的心磁图和脑磁图的技术也将走向应用。这些器件在不用电极接触人体或不需要任何手术的情况下，探测人体的组织病变，并使精度大为提高。

### 三、制冷与低温的发展历史

#### （一）制冷技术的发展历史

人类最早将冬季自然界的天然冰雪保存到夏季使用，这在我国、埃及和希腊等文化古国的历史上都有记载。

人工制冷的的方法是随着工业革命而开始的。1748 年英国柯伦证明了乙醚在真空下蒸发时会产生制冷效应。1755 年苏格兰人 W. Callen 发明了第一台蒸发式制冷机，1781 年意大利人凯弗罗进行了乙醚蒸发制冷实验。1834 年美国人 J. Perkins 获得了乙醚在封闭循环中膨胀制冷的英国专利，并制得了冰。1856 年苏格兰人 J. Harrison 发明了压缩式制冷机，采用二氧化碳、二氧化硫、氨、氯甲烷作制冷剂。1859 年法国人 F. Garre 发明氨吸收式制冷机。美国人 D. Byok 于 1873 年制造了第一台氨压缩机。次年，德国林德建成了第一个氨压缩式制冷系统。此后，氨压缩式制冷机在工业上获得普遍应用。直至 1929 年氟利昂发现之后，氟利昂压缩式制冷机才快速发展起来，并在应用中超过了氨制冷机。

空气制冷机的发明比蒸气压缩式制冷机稍晚。1844 年美国人 J. Gorrie 发明了空气循环式制冷机，并于 1851 年获得美国专利，这是世界第一台制冷和空调用机器。1862 年英国基尔克发明了封闭循环的空气制冷机，并获英国专利。

1858 年美国人尼斯取得了冷库设计的第一个美国专利，从此商用食品冷藏事业开始发展。

由于制冷技术的发展和在工业生产中的应用，各发达国家率先建立本领域的学术组织。

1888年英国成立了“英国冷库和冰协会”，1891年美国成立“美国冷藏库协会”，1900年法国成立了“法国和殖民地冷藏工业理事会”。1903年和1904年，美国先后成立了“美国制冷设备制造协会”和“美国制冷工程师协会”。在此基础上，国际制冷学会（IIR）于1908年在法国巴黎宣告成立。它是一个政府间的科技性国际组织，现在大约有60个国家会员。我国于1978年加入该会，为二级会员国。

在家用冰箱方面，世界上第一台电冰箱是美国考布兰工程师在1918年设计的。自此之后，制冷技术在人民生活中获得应用。

空调技术的应用起始于1919年，美国芝加哥兴建了第一座空调电影院，次年开始在教堂配备空调。11年之后出现了舒适空调火车。

随着制冷机型式的不断发展，制冷工质的种类也逐渐增多。最早在压缩式制冷机中应用的制冷剂是空气、二氧化碳、乙醚。在吸收式制冷机中应用的是水和硫酸。以后渐渐在压缩式制冷机中应用氯甲烷、二氧化硫和氨等。1929年以后，随着氟利昂制冷剂的出现，制冷压缩机和制冷系统的种类也不断发展。

我国解放前制冷工业十分落后，基本上没有制造制冷机的能力。到1949年全国解放时，全国冷库总容量只有35000t，相当于现在一个城市的拥有容量。到第一个五年计划末期，全国制冷机制造厂发展到十几家，产品30多种。改革开放以来，我国的制冷技术获得迅猛发展，逐步形成门类齐全、基本满足国民经济发展的繁荣景象。

90年代以来，我国的制冷空调工业发展迅猛，空调器年产量达到近1000万台，电冰箱社会拥有量达数千万台，制冷空调工业已成为国民经济中的重要支柱产业。随着家用电器的普及，人们开始追求快捷、方便、富有营养的食品。伴随着我国新型冻结设备的发展，全国冷冻食品的年产量已达100多万吨。

## （二）低温技术的发展历史

低温的发展可以追溯到18世纪50年代之前，但低温界普遍认为，低温发展的起点为1877年人类首次液化氧气，至今已有120多年历史。

1877年法国工程师L. P. Cailletet和瑞士的物理学家R. Pictet分别液化了当时被称为“永久性”气体的氧气，但只能获得雾状液滴。

1883年，波兰科学家S. Wroblewski和K. Olszewski在Cracow大学正式获得了在试管中沸腾着的液氧，并在几年后获得了液氮。接着，于1884年获得液氢雾滴，但未获得完全液态氢。

1892年，英国化学教授，J. 杜瓦发明了能贮存低温液化气体的真空夹套容器，使低温的发展跨出了巨大的一步。杜瓦发现，夹套内壁镀银的真空玻璃容器，可使贮存的低温液体的蒸发率减小为普通容器的1/30，因而能长期贮存低温液体，这为氢和氨的液化铺平了道路。1898年，杜瓦制成了第一台实验室氢液化器，获得了在真空绝热管中平静沸腾着的20cm<sup>3</sup>液氢。

1895年，德国C. 林德和英国人汉普逊制成了第一台能连续运转的空气液化器，他们采用简单节流法部分分离空气。1900年，林德制成用氨预冷的空气液化器。林德是第一个将空气液化技术用于工业生产者。法国工程师G. 克劳特在1902年首次采用活塞式膨胀机开发了实用的空气液化系统，并于同年成立了法国空气液化公司。从此，液空精馏法生产氧和氮工业获得稳步发展。

1908年，荷兰科学家 K. 翁尼斯在莱登大学物理实验室实现了最后一种“永久”气体氦的液化。他把来自印度的氦气，通过液氢预冷和节流膨胀获得了液氦。此后不久，翁尼斯用真空泵对氦液面减压，获得了超流氦。

1933年，美国 W. Giauque 和 MacDougall 在 Berkeley 通过对顺磁盐的单级绝热去磁，获得 0.27K 低温。1963年，Kurti 等用绝热去磁法获得了  $1.2 \times 10^{-6}$ K 极低温。

美国 R. Goddard 博士于 1926 年进行首次采用液氧和汽油为推进剂的火箭试验，这种技术后来被德国用于 V-2 武器系统。德国在 1942 年试射 V-2 火箭成功，这是第一个应用低温液体推进剂的火箭，采用液氧和 75% 乙醇与 25% 水的混合物。

1934年，俄罗斯科学家卡皮查在英国剑桥发明并开发了用于氦液化的透平膨胀机。13年后，美国麻省理工学院柯林斯教授开发了具有活塞膨胀机的氦液化器，由 A. Little 公司生产，使液氦得以广泛使用。

在 50~60 年代，快速兴起的航天事业需要低温技术，使之从实验室进入大规模工业技术。强磁场、大电流超导材料和超导约瑟夫逊效应的发现，使低温技术与超导结合，形成了无可替代的强磁场新技术与极高灵敏度的电磁新器件。

1966年，Hall 和 Ford, Neganov 和 Borisov 采用  $\text{He}^3\text{-He}^4$  稀释制冷机，分别获得低于 0.1K (0.025K) 的连续制冷。稀释制冷技术是 H. 伦敦在 1951 年提出来的。这种制冷法较之利用绝热去磁原理工作的磁制冷，在 0.01~0.10K 温区具有优越性。

我国的低温研究工作是从 50 年代开始的。1953 年，中国科学院物理研究所低温物理研究室成立，开始进行氢、氦液化设备的建立，1956 年和 1959 年分别建成氢液化器和氦液化器。60 年代以后，采用活塞式膨胀机的氦液化器在国内各实验室得以应用，为超导技术研究提供了基础。

为了发展核能与火箭技术的需要，当时的化工部、航天部在 60 年代开始了大规模液氢生产和应用技术的研究。1966 年大连光明化工研究所等建成液氢精馏制取氢-氘 (HD) 实验装置。1971 年航天部建成 1000t/h 氢液化器，有关火箭发动机的液氢技术研究全面展开。日产吨级液氢装置投产，实现了液氢的公路和铁路槽车运输。同时，航天部物理所建成带 20K 温度氮板超高真空泵的第一台大型真空环境模拟设备。1984 年，我国第一颗通信卫星用长征三号运载火箭发射成功。

我国从 1951 年开始自行设计和试制空气分离及液化设备，到 1983 年共生产了近 4000 套空气分离及液化设备。1960 年杭州制氧机研究所成立。杭州制氧机厂在 1966 年开始生产  $6000\text{m}^3/\text{h}$  全低压空气分离设备。自行设计的大型空分设备  $10000\text{m}^3/\text{h}$  于 1988 年投入运转，随后实现 5 种稀有气体的提取。1993 年，开封空分设备厂与美国空气制品公司合作制造大型制氧机， $30000\text{m}^3/\text{h}$  和  $35000\text{m}^3/\text{h}$  空分设备分别在宝钢和鞍钢运转成功。

我国在小型制冷机技术领域的研究比较活跃。早在 70 年代，我国早期的卫星通信地面站采用了 G-M 制冷机冷却低噪声放大器。70 年代开始，用气体节流制冷器冷却红外器件，氮节流制冷器用于航空红外照相机的冷却。80 年代末，上海技术物理所等研制的辐射制冷器用于风云一号气象卫星的红外遥感系统中，这是我国首次在卫星上使用低温制冷器。近年来，许多单位在分置式斯特林制冷机、采用磁性蓄冷材料的 G-M 制冷机及脉管制冷机的研究取得了进展。这些制冷机的应用范围，包括高技术领域和更广泛的用途，温度范围可覆盖从低于室温至极低温。

## 思 考 题

1. 冬天气温很低，使池塘里的水结成冰，请问这一过程是否为制冷过程？请举一日常生活中利用制冷过程的例子。
2. 试判断：“在炎热的夏天，把室内的冰箱门打开，可以起到空调的作用，降低室内温度。”此观点是否正确？为什么？
3. 简述制冷与低温的发展历史。

# 第一章 制冷与低温的热力学基础

制冷与低温是为了获得并保持比环境温度低的温度，它涉及的温度范围，从环境温度到接近 0K。为了获得并保持低温条件，就得采用人工制冷的办法。根据热力学第二定律，热量是不会自动地从低温物体转移到高温物体上去，因此，所有的人工制冷方法都有一个共同的特点，即利用某种物质状态变化，从较低温度的物体（称低温热源）吸取一定的热量（ $Q_0$ ），通过一个消耗功  $W$ （或热量）的补偿过程，向较高温度的物体（称高温热源）放出热量（ $Q_h$ ），并且它们在数量上符合热力学第一定律，即

$$Q_0 + W = Q_h \quad (1-1)$$

我们称能实现上述能量转换的装置为制冷机。为了使制冷机具有制冷功能，首先必须有使它本身能达到比低温热源更低温度的过程，并连续不断地从低温热源吸取热量。在这一章里，我们将简要介绍实现这一过程的常用方法以及它们的热力学原理，在以后的有关章节里将详细介绍其中更常用的一些方法的特点和计算分析方法。

## 第一节 相变制冷

### 一、液体气化

物质从液态变为气态的过程称为气化。任何液体气化时都要吸收热量。在定压下单位质量液体气化时所吸收的热量称为气化热。

$$r = h'' - h' = T(s'' - s') \quad (1-2)$$

式中， $h''$ 、 $h'$ 分别为饱和蒸气和饱和液体的比焓； $s''$ 、 $s'$ 分别为饱和蒸气和饱和液体的比熵。

对于任何一种液体，气化热是随其气化时的压力变化而变化的；而在相同压力下，不同的液体其气化热也是不相同的。图 1-1 是一些制冷剂在  $T-s$  图上的饱和曲线。从图中可以看出：①制冷剂的沸点越高，其气化热的数值越大；②对任何一种物质，随着气化温度的提高其气化热不断减小，当到达临界状态时气化热为零。

在制冷机的工作过程中，在低温下蒸发的制冷剂液体都是由高压液体经节流降压而得到的。较高压力的饱和液体节流降压后即进入两相区，并闪发出一定的饱和蒸气。对于 1kg 制冷剂，若用  $\chi$  表示闪发后的干度，则当其余液体全部转变为饱和蒸气时吸收的热量为

$$q_0 = r(1 - \chi) \quad (1-3)$$

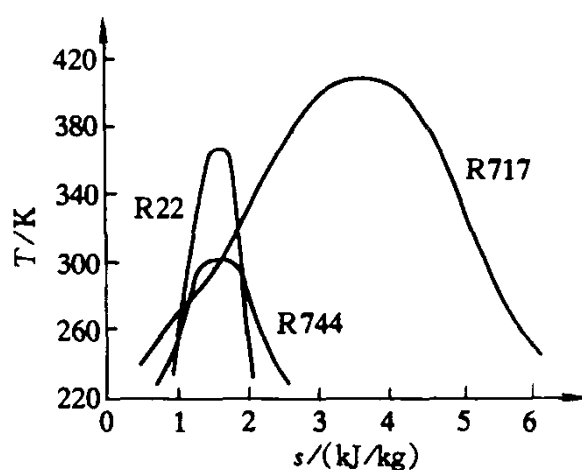


图 1-1 一些制冷剂在  $T-s$  图上的饱和曲线

式中， $r$  为制冷剂的气化热， $q_0$  为单位质量制冷量，简称单位制冷量。

分析式 (1-3) 可知，单位制冷量不仅与制冷剂的气化热有关，还随节流后的干度而变。制冷剂液体在节流膨胀前后压力变化范围越大，则节流过程中闪发的气体越多，单位制冷量就越小。

## 二、固体的融化与升华

在制冷技术中常应用纯水冰或溶液冰的融化及干冰（即固体二氧化碳）的升华过程来制冷。除干冰可以由高压液体二氧化碳用降压法得到外，纯水冰和溶液冰都需用制冷机制备。无论纯水冰、干冰或溶液冰，因不具备流动性，所以都不能利用它们的融化或升华过程来组成制冷机的循环。

天然冰的来源是有限的，现代制冷技术中大量应用的纯水冰都来源于人工制冰厂。纯水冰的融化温度为  $0^{\circ}\text{C}$ ，所以利用纯水冰融化只能使被冷却的物体保持  $0^{\circ}\text{C}$  以上的温度。1kg 纯水冰在  $0^{\circ}\text{C}$  融化成同温度的水时，可以吸收 335kJ 的热量。

在水的三相点温度以下，冰可以直接升华为水蒸气，冰升华时的温度与相应的压力有关。表 1-1 列出了升华压力和升华温度之间的关系。

表 1-1 冰的升华压力和对应的升华温度

| 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 0    | -25                 | -50                   | -75                    |
|------------------------|------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 升华压力/kPa               | 0.61 | $63 \times 10^{-3}$ | $3.87 \times 10^{-3}$ | $0.116 \times 10^{-3}$ |

应用冰和盐混合物的融化过程可以达到  $0^{\circ}\text{C}$  以下的低温。冰盐冷却的物理过程如下：首先是冰吸热而融化，即在冰的表面上蒙了一层水膜，此时的温度为  $0^{\circ}\text{C}$ 。接着盐便溶解于水膜中，吸收一定的溶解热，因而使温度降低。此后，冰在较低的温度下融化，热交换是通过冰块表面上的盐水膜进行。当冰全部融化，盐全部溶解后，便形成具有一定含量的盐水溶液，冰盐冷却所能达到的温度与盐的种类以及溶液的含量有关，见表 1-2。

表 1-2 冰盐混合时的温度

| 混合物的组成  | 盐或酸的质量分数 | 混合后的最低温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 混合物的组成   | 盐或酸的质量分数      | 混合后的最低温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|---|----------|------------------------------|--|---------------|------------------------------|
| 水和盐   |          |                              | $\text{NaNO}_3$  | 0.371         | -18.5                        |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$                                      | 0.231    | -5.1                         | $\text{NaCl}$  | 0.248         | -21.2                        |
| $\text{NaNO}_3$   | 0.429    | -5.3                         | $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  | 0.444         | -21.5                        |
| $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ | 0.524    | -8.0                         | $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  | 0.556         | -40.3                        |
| $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                   | 0.714    | -12.4                        | $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  | 0.588         | -55                          |
| $\text{NH}_4\text{NO}_3$                                    | 0.375    | -13.6                        | 雪或碎冰与双盐混合物   |               |                              |
| $\text{NH}_4\text{SCN}$                                     | 0.571    | -18.0                        | $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{SO}_4$      | 0.112 + 0.084 | -3.1                         |
| $\text{KSCN}$   | 0.600    | -23.7                        | $\text{KCl} + \text{KNO}_3$  | 0.190 + 0.035 | -11.8                        |
| 雪或碎冰和盐  |          |                              | $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$  | 0.091 + 0.148 | -18.0                        |
| $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                   | 0.291    | -9.0                         | $\text{Na}_2\text{NO}_3 + \text{KNO}_3$  | 0.359 + 0.062 | -19.4                        |
| $\text{CaCl}_2$   | 0.231    | -11.0                        | $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | 0.054 + 0.386 | -20.0                        |
| $\text{KCl}$  | 0.281    | -11.0                        | $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{NO}_3$                                  | 0.115 + 0.270 | -22.5                        |
| $\text{NH}_4\text{Cl}$                                      | 0.200    | -15.8                        | $\text{NH}_4\text{Cl} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$                              | 0.074 + 0.311 | -22.5                        |
| $\text{NH}_4\text{NO}_3$                                    | 0.375    | -17.3                        | $\text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$  | 0.049 + 0.404 | -25.0                        |

溶液冰是指由共晶溶液冻结成的冰，也称共晶冰。将共晶溶液充灌在密封容器里，并将它冻结成固体，即得到溶液冰。然后把这种容器移到需要冷却的地方，依靠吸收热量使共晶固体融化，就可使冷却对象降温。在共晶固体未完全融化成液体之前，它的温度是不变的，



称为共晶温度。共晶温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的共晶冰，通常应用于无机械制冷的冷藏汽车中。共晶温度高于  $0^{\circ}\text{C}$  的共晶冰，通常作为储能空调系统的储能介质。表 1-3 列出了一些用于制冷目的的共晶溶液的物理性质。

表 1-3 一些共晶溶液的物理性质

| 共晶溶液种类   | 盐在水溶液中的质量分数  | 冻结温度 / $^{\circ}\text{C}$ | 密度 / $(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 比热容 / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ |       | 融化热 / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ | 共晶溶液在冻结时的体积膨胀率 (%) |
|--|--------------|---------------------------|-------------------------------|--|-------|--|--------------------|
|  |              |                           |                               | 溶液   | 共晶冰   |  |                    |
| ZnSO <sub>4</sub> 和 H <sub>2</sub> O                                 | 0.272        | -6.5                      | $1.249 \times 10^3$           | 3.127  | 1.574 | 213.1  | 6.8                |
| BaCl <sub>2</sub> 和 H <sub>2</sub> O                                 | 0.225        | -7.8                      | $1.239 \times 10^3$           | 3.345  | 1.637 | 246.6  | 7.9                |
| Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 和 H <sub>2</sub> O     | 0.300        | -11.0                     | $1.312 \times 10^3$           | 3.182  | 1.536 | 186.3  | 5.2                |
| NH <sub>4</sub> Cl 和 H <sub>2</sub> O                                | 0.193        | -11.1                     | $1.148 \times 10^3$           | 3.307  | 1.729 | 301.0  | 8.1                |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> 和 H <sub>2</sub> O                   | 0.412        | -17.35                    | $1.188 \times 10^3$           | 2.972  | 1.557 | 286.3  | 5.8                |
| NaNO <sub>3</sub> 和 H <sub>2</sub> O                                 | 0.370        | -18.5                     | $1.29 \times 10^3$            | 3.059  | 1.565 | 215.6  | 5.6                |
| NaCl 和 H <sub>2</sub> O  | 0.224        | -21.2                     | $1.17 \times 10^3$            | 3.336  | 2.005 | 236.1  | 7.9                |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + KNO <sub>3</sub> 和 H <sub>2</sub> O | 0.045 + 0.08 | -3.8                      | $1.093 \times 10^3$           | 3.935  | 1.833 | 319.8  | 8.1                |
| KCl + KNO <sub>3</sub> 和 H <sub>2</sub> O                            | 0.19 + 0.035 | -11.8                     | $1.15 \times 10^3$            | 3.182  | 1.666 | 265.8  | 7.7                |
| NaNO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub> 和 H <sub>2</sub> O              | 35.9 + 6.2   | -19.4                     | $1.34 \times 10^3$            | 3.014  | —     | 217.9  | 6.1                |

干冰是固体二氧化碳的习惯叫法。干冰升华时需要吸收升华热，故可用来制冷。干冰的三相点参数为：三相点温度  $t_{tr} = -56.6^{\circ}\text{C}$ ，三相点压力  $p_{tr} = 5.2 \times 10^2 \text{kPa}$ ，在大气压下，干冰的升华热为  $573.6 \text{kJ}/\text{kg}$ ，升华温度为  $-78.5^{\circ}\text{C}$ 。

干冰受热时直接升华为二氧化碳，它对食品无害，因此可用来冷却和保存食物，并且可直接与食物接触。

### 三、压-焓图

相变制冷是利用制冷剂的状态变化实现的。制冷剂在不同状态时具有不同的特性。制冷剂的特性可用表格、函数公式或曲线图来表示。附录 B 给出了常用制冷剂的热力性质表。随着计算机技术的迅速发展，函数公式的用途越来越大，在第二章中将详细介绍利用计算机和函数公式来求得制冷剂特性数据的方法。

制冷剂性质曲线图有多种形式，在制冷低温工程中用处最大、用得最多的两种曲线图分别为温-熵 ( $T-s$ ) 图和压-焓 ( $p-h$ ) 图。温-熵图在《工程热力学》中已经介绍得较为详细，这里不再讨论，下面仅对压-焓图加以介绍。压-焓图的纵坐标表示压力，横坐标表示比焓值。通常纵坐标都以对数坐标表示，因此压-焓图也叫  $\lg p-h$  图。附录 B 给出了一些常用制冷剂的压-焓图。

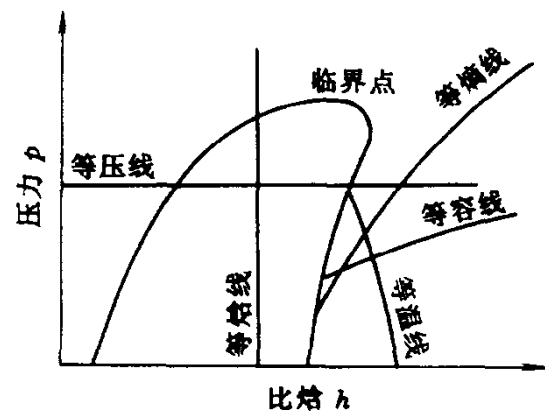


图 1-2 压-焓图

压-焓图的基本构造线图如图 1-2 所示。图中的拱状曲线代表制冷剂所有的饱和液体和饱和蒸气的状态，曲线上的最高点为临界点，它是饱和蒸气和饱和液体的分界点，在它左面的曲线为饱和液体线，在它右面的曲线为饱和蒸气线。拱状线内的区域为两相区，饱和液体线左边的区域为过冷液体区，饱和蒸气线右边为过热蒸气区，临界点以上为超临界区。

在压-焓图上，等压线和等比焓线（等焓线）是最简单的，分别为水平线和垂直线。纯