



GAODENG XUEXIAO ZHUANYE JIAOCAI

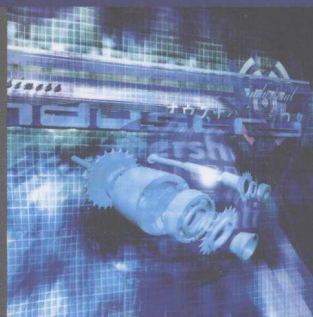
• 高等学校专业教材 •

[高校教材]

制冷技术与 食品冷冻冷藏设施设计

闫师杰 董吉林 主编

REFRIGERATION TECHNOLOGY
AND DESIGN OF FOOD REFRIGERATION
FACILITIES



中国轻工业出版社

高等学校专业教材

制冷技术与食品冷冻 冷藏设施设计

闫师杰 董吉林 主编
汪政富 王文生 邓洁红 副主编

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

制冷技术与食品冷冻冷藏设施设计/闫师杰, 董吉林

主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2007. 9

高等学校专业教材

ISBN 978-7-5019-6032-3

I. 制… II. ①闫…②董… III. ①制冷技术-高等学校-教材 ②食品贮藏-冷冻冷藏设备-高等学校-教材
IV. TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 093295 号

责任编辑: 涂润林

策划编辑: 姚怀芝 责任终审: 劳国强 封面设计: 武 佳

版式设计: 马金路 责任校对: 李 靖 责任监印: 胡 兵 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司印刷

经 销: 各地新华书店

版 次: 2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.5

字 数: 450 千字

书 号: ISBN 978-7-5019-6032-3/TS·3520 定价: 35.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119845 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

40945J4X101ZBW

编 委 会

主 编：闫师杰 董吉林

副主编：汪政富 王文生 邓洁红

编 者：（按姓氏笔画排序）

王文生（国家农产品保鲜工程技术研究中心）

王如福（山西农业大学）

白 杰（宁夏食品检测中心）

邓洁红（湖南农业大学）

母智深（内蒙古农业大学）

闫师杰（天津农学院）

汪政富（中国农业大学）

赵丛枝（河北农业大学）

栾明川（青岛农业大学）

梁丽雅（天津农学院）

董吉林（郑州轻工业学院）

前 言

本书是全国高等院校食品相关专业制冷技术与制冷设施建造方面的专用教材。在编写中,贯彻“厚基础、强能力、高素质、广适应”的指导思想,坚持“起点要高、目标要清、内容要新、形式要活”的基本要求,广泛收集并借鉴国内同类教材的优点,参阅了大量文献资料,吸收了国内外众多的最新科研成果,总结借鉴了我国制冷技术与食品冷冻冷藏设施设计方面的技术,并融入了编者多年的专业科研成果。

本教材所涉及的内容分两大部分:上篇为“制冷技术及原理”,包括第一、第二、第三、第四、第五章,重点介绍制冷原理,制冷设备、系统及其布置与安装,制冷系统的操作与管理等;下篇为“食品冷冻冷藏设施设计”,包括第六、第七、第八、第九、第十、第十一章,主要论述冷库的设计和建造,冷库的管理,冷藏链主要装置,食品冷加工主要装置,以及制冷系统和设施的节能降耗。全书在阐述基本概念、基本原理和基本知识的基础上,通过对新材料、新工艺和新技术的介绍,力求在满足食品冷加工工艺、冷藏、冷链运输和低温销售货架需冷的前提下,将安全和节能的理念贯穿于相关章节。附录部分给出了冷库建造和制冷系统安装时常用的一些数据和参数,供读者参考。

本书内容翔实,注重理论联系实际,既可作为高等学校食品科学与工程、农产品贮藏与加工、食品质量与安全等专业的教材,也对在果品、蔬菜、水产品的贮藏保鲜,冷冻食品加工及储藏,冷藏冷冻设施建造等领域从事科研、管理、营销工作的工作者有一定应用和参考价值。

由于编者水平有限,时间仓促,书中不足和错误之处恳请读者批评指正!

编者

2007年3月于天津

目 录

绪论	1
----	---

上篇 制冷技术及原理

第一章 制冷原理	5
第一节 热力学基础知识	6
第二节 制冷原理以及蒸气压缩制冷系统的压焓图	17
第三节 蒸气压缩制冷循环的热力学原理	27
第四节 压缩式制冷循环的热力计算	42
第二章 制冷设备与系统	50
第一节 制冷压缩机	50
第二节 冷凝器	71
第三节 蒸发器及送风道	77
第四节 节流阀	84
第五节 制冷辅助设备	88
第六节 控制器件与控制方式	100
第七节 制冷系统的供液方式	108
第八节 制冷系统的融霜方式	111
第三章 制冷剂、载冷剂和润滑油	115
第一节 制冷剂	115
第二节 载冷剂	126
第三节 润滑油	129
第四章 制冷设备的布置、安装及管道计算	131
第一节 制冷机房和设备的布置原则	131
第二节 制冷系统管道的计算和布置	139
第三节 设备和管道的隔热	155
第四节 系统吹污及气密性试验	161
第五节 压缩机试运行	164
第五章 制冷系统的操作管理	168
第一节 制冷装置运行参数的分析	168
第二节 活塞式制冷压缩机的操作与调整	173

下篇 食品冷冻冷藏设施设计

第六章 冷库的规划设计	181
第一节 冷藏库的组成、分类及容量设计	181

第二节	冷库的建筑特点和选址要求	184
第三节	冷藏库的布置	186
第四节	冷库建筑的主要结构	189
第五节	冷库建筑结构的损坏及预防和补救措施	193
第六节	冷库建筑的特殊形式	194
第七节	冷库围护结构的隔热	200
第八节	冷库围护结构的隔汽防潮	208
第七章	冷库耗冷量计算	216
第一节	围护结构耗冷量 Q_1 的计算	217
第二节	货物的冷却耗冷量 Q_2 的计算	219
第三节	冷库开门和通风换气的耗冷量 Q_3 的计算	221
第四节	电机运行耗冷量 Q_4 的计算	222
第五节	运行管理耗冷量 Q_5 的计算	223
第六节	冷库总耗冷量的确定	223
第八章	冷库的管理	225
第一节	冷库的卫生管理	225
第二节	冷库的房库管理	228
第三节	冷库管理的现代化	235
第九章	冷藏链的主要装置	239
第一节	冷藏链的分类和组成	239
第二节	主要的冷藏运输设备	242
第三节	国内外冷藏链的现状与发展趋势	245
第十章	其他食品制冷装置	247
第一节	食品速冻设备	247
第二节	真空冷冻干燥技术与设备	261
第十一章	制冷装置的主要节能技术	268
第一节	库体的建造及合理使用	268
第二节	制冷系统的运行调节	270
附录		275
主要参考文献		299

绪 论

一、食品是关系国计民生的重要商品

“民以食为天”，食品工业是关系国计民生的工业，也是与农业、工业、流通等领域有着密切联系的永恒不衰的大产业，承载着提高人民生活水平、带动农业发展、实现工业强国的希望和重托。并且在服务“三农”、扩大就业、出口创汇等方面为国家经济发展和社会稳定起着突出作用。

近年来我国食品工业已经步入了发展的快车道，2005 年我国食品企业工业总产值超过 2 万亿元人民币，顺利完成了“十五规划”的预期目标，为实现“十一五”规划的良好开局，奠定了基础。“十五”期间，食品工业总产值年均增长 19.4%，销售收入年均增长 20.3%，经济总量连续五年居各工业行业之首。

食品是关系国计民生的重要商品，它关系到保障、改善和增强国民体质的大事。但是，大多数食品是易腐、易变和易损的鲜活商品，在其生产、贮藏、运输和销售过程中极易腐败变质，既造成食品的浪费，也影响食品的食用安全性。因此，与食品工业配套的食品装备的完善和提高，特别是食品冷加工、冷藏和冷链体系的构建，是当前提升我国食品工业水平，和国际接轨的重要环节之一。

二、国内外冷冻冷藏设施的发展概况

（一）冷库建设

与食品工业相关的冷冻冷藏设施是当今世界上发展最快的工业之一。冷库作为食品低温流通的中枢，近年来在我国得到了显著的发展，不仅建库的规模和容量急剧增长，还表现在建库技术上的现代化上，如土建结构的预制装配化、货场堆垛输送的机械化、管理与控制的自动化等。1955 年，我国开始建造第一座冷库，当时主要是贮存肉制品。1968 年开始，北京建筑第一座水果机械冷库，1978 年又建筑第一座气调库。随着我国国民经济和食品工业的快速发展，随着我国人民对食品种类、营养和安全要求的日益提高，随着出口贸易的逐年增长和质量的相应提升，我国冷库建筑也发生了很大的改变。主要表现在：①分配性冷库建设由过去的大中城市、人口集中的工矿区及水陆交通枢纽向原料生产地转移；②冷库建设投资趋向于多元化，由国家投资为主体，向企业、个体多元化投资转移；③果蔬产地冷库建设发展势头迅猛，主要为单层冷库，单间贮藏量以几百吨的为多；农民投资建造 10~100t 的微型冷库具有投资小、收益快，经营灵活的特点，适合我国目前不少果蔬产区农民、沿海地区渔民的经济、技术和文化水平；④采用聚氨酯夹芯板拼装的组合式冷库建造比重大大提高；砖混结构的围护结构进行聚氨酯现场分层发泡已经成为冷库保温设置的重要形式；⑤果蔬气调库数量的增长速度加快，建造质量稳步提高。

国外在冷库建设上的主要特点是：预制装配式冷库已经成为冷库建造的主要形式，聚氨酯等优良保温隔热材料的应用得到了普及，保温层设计均采用了较低的热流量，实现了

节能型隔热层厚度的设置；美国和加拿大 20 世纪 90 年代后建造的冷库基本为单层冷库，平均高度 10m 以上；广泛采用加大月台面积，并对月台进行全封闭保温；在库内货物的堆码和运输中，电瓶叉车已经普及，近年来立体自动化冷库开始在发达国家兴建和应用；气调库在水果和蔬菜贮藏上的应用很普遍，夹套库在不少国家应用普及度迅速提高，从而使果蔬贮藏期和贮藏质量显著延长和提高；冻结物冷藏间和冻结间的温度向更低、降温更快的方向发展。

（二）制冷技术和冷冻冷藏装置

近年来，随着大量国外制冷厂商在我国的独资和合资经营，以及我国在制冷领域的科技创新，在制冷装置、部件和相关测控仪器、仪表生产及制冷工艺设计方面，均得到快速的提高和优化。目前，在制冷工艺设计方面，采用氟利昂作为制冷剂的氟制冷系统应用比率显著提高，体现了自动化程度高，操作简便，系统紧凑等特点，但在大中型冷库上采用氨制冷系统仍为主流；螺杆式制冷压缩机、蒸发式冷凝器在中大型冷库上得到了广泛使用；在冷却物冷藏间、冻结物冷藏间和冻结间，高性能的冷风机已经成为冷分配设备的主体形式；基本淘汰了开启式氟利昂制冷压缩机的使用，取而代之的是半封闭和全封闭氟利昂制冷机组在中小冷量需求范围的广泛应用，由半封闭压缩机组成的并联式机组还能满足大冷量的需求；电子膨胀阀的应用，使制冷剂供液量得以精细调节，可实现最小稳定过热度的控制，将成为今后节能控制的主要优化措施之一；氨泵供液系统已经逐步代替重力供液系统，使制冷系统的制冷效率明显提高；制冷压缩机配置的各种能量调节装置，可根据制冷负荷的变化及时调节制冷量的大小，使之与制冷工艺要求相匹配，减少了能耗；测量、控制和保护器件的性能和精度明显提高，从而保证了制冷工艺的要求和人员及贮运食品的安全性；陆路冷藏车、铁路机械保温车、水路冷藏船在鲜活食品的冷藏运输中，应用程度正在提高；冷藏集装箱运输已经成为我国主要出口航线上冷藏货物装载的主要形式；流态化速冻装置、真空冷冻干燥装置和高效制冰和冷水设备，已经在食品加工领域广泛应用；冷链体系的完善和重视程度已经引起政府相关部门和食品冷藏企业的高度重视。

尽管我们在制冷技术和制冷装置应用方面已经取得了很大的进展，但是与国外发达国家相比，仍有较大的差距，国外在制冷技术和冷冻冷藏装置的应用上，突出优势主要表现在：①基本实现食品无缝化冷链体系，产品在贮运过程中损失很小；②果蔬贮运前均采用专门的预冷设施进行预冷，因而果蔬贮运质量和货架期显著提高和延长；③制冷系统采用电子计算机自动化控制设计、变频技术在压缩机和冷风机上的广泛应用，使得制冷装置的运行能耗较低；④在美国和加拿大，20 世纪 80 年代以后建造的冷库基本都采用螺杆式制冷压缩机，螺杆压缩机已经发展成为功能多样、性能先进的机型；⑤蒸发式冷凝器得到了普及应用，既节约了水资源，也降低了能耗；⑥制冷设备和装置的性能和可靠性较高，使用寿命相对较长。

三、制冷技术在食品行业中的应用

（一）冷冻冷藏食品及冷藏链

20 世纪世界食品生产最大的成就就是冷冻食品的生产。由于冷冻食品方便、优质、安全的特征而深受市场的欢迎。在我国，它伴随着改革开放后人民生活水平的迅速提高和城市化进程的加速，也得到迅速发展，从 1995 年的人均消费 2kg 跃升为 2004 年的人均

8kg, 10 年间增长了 3 倍。

食品冷藏链是建立在食品冷冻工艺学的基础上, 以制冷技术为手段, 使易腐食品从生产者到消费者之间的所有环节, 即从原料 (采摘、捕捞、收购等)、生产、加工、运输、贮藏、销售流通的整个过程中, 始终保持适宜的低温条件, 以保证食品的质量, 减少食品的损耗, 这种连续的低温体系称为食品冷藏链, 简称冷链。

一般而言, 食品冷藏链由冷冻加工、冷冻贮藏、冷藏运输和低温销售四部分构成。冷冻加工包括肉类、鱼类的冷却和冻结, 也包括果蔬的预冷和速冻果蔬食品的加工, 主要涉及冷却和冻结装置; 冷冻贮藏包括冻藏和冷藏, 果蔬的调节气体贮藏也包含在冷藏的范畴, 主要涉及各种冷藏库、气调库、冷藏柜、冻结箱和家用冰箱等; 冷藏运输包括食品的中、长途运输和短途送货等, 主要涉及铁路机械保温车、冷藏汽车、冷藏船、冷藏集装箱等低温运输工具; 低温销售主要包括冷冻食品的低温批发和销售, 以及果蔬、冷却肉和蛋品的冰点以上温度的销售, 低温销售也是食品冷链的重要组成部分。

(二) 制冰和降低水温

采用专用制冷装置, 通过对冷却介质水温的降低, 产生冷水或冰, 与所加工和保藏的食品混合或接触, 起到改善食品加工性能, 提高食品保藏品质的作用。制冰机制得的冰的类型有片冰、板冰和湿态雪花冰。湿态雪花冰由于呈颗粒状, 不会刮伤食品表皮, 温度通常保持在 $-2\sim-0.5^{\circ}\text{C}$ 之间, 可以满足快速冷却要求而且不会使冷却温度低于食品汁液的冻结点, 因而在易腐果蔬冷藏、运输中普遍使用。此外, 雪花冰在肉食加工行业也得到了广泛的应用, 例如在香肠生产的滚揉和搅拌过程中, 由于高速旋转的滚揉桶与配料的摩擦而产生的高温和刀片高速旋转的摩擦产生的高温既助长了细菌的滋生, 又改变了肉的颜色与口感, 而且会造成脱脂 (肥肉溶化), 使生产的香肠细菌超标, 色泽暗淡, 口感较硬而且油腻。当雪花冰被混合到香肠的配料中时, 会获得快速冷却和理想的浓度, 保持香肠的色泽与口感, 防止脱脂, 提高卫生标准。

(三) 食品的冷冻干燥

真空冷冻干燥技术 (简称冻干) 是将含水物料在低温状态下冻结, 然后在真空条件下水升华除去, 使物料干燥的一门高新技术。由它加工而成的冻干食品能最大限度保持新鲜食品的色、香、味和营养成分, 具有很高的品质, 便于运输和贮存。

真空冷冻干燥技术早期用于生物体脱水, 第二次世界大战后才用于食品工业。20 世纪 70 年代以来, 冻干食品已经在工业化国家相当流行, 成为国际贸易的大宗食品。90 年代后特别是最近几年, 随着商品经济的不断发展, 出口贸易的活跃和人民生活水平的提高, 对冻干食品的需求量越来越大, 我国相继建立起一批冻干食品的生产基地。

由于真空冷冻干燥在低温低压下进行, 而且水分不经过液态直接升华, 所以经过真空冷冻干燥加工的产品, 各种营养成分、特别是那些易挥发的热敏性成分的保存率大大提高, 因而能最大限度地保持原有的营养成分, 有效地防止干燥过程中的氧化、营养成分的转化和状态变化。此外, 冷冻干燥制品成海绵状、无干缩、复水性极好, 食用方便、含水分极少, 可在常温下长时间保存和运输。

由此可见, 食品工业的发展在很大程度上受制于制冷和冷藏业, 而食品工业又是农业的下游产业, 因而我国发展农业的根本出路在于发展食品加工业。在发达国家, 农产品加工产值与农业产值之比为 $(1.5\sim2.0):1$, 我国仅为 $(0.4\sim0.5):1$, 加工量占产量的比

例也大大小于发达国家。以肉类为例，2002 年我国肉类总产量达 6500 万吨，而加工量不足 6%，水果、蔬菜加工量也不足 10%。由于冷链体系不完善，导致食品的腐败变质所造成的损失粗略估计在千亿元以上，既触目惊心又令人痛心。因而，全面提高我国食品行业工程技术人员制冷知识和技术水平，提高制冷装置和设施在食品行业的普及和利用率，加速提升我国食品冷链的水平，加快与国际接轨的步伐，掌握制冷技术与食品冷冻冷藏设施的设计、选型、使用和维护是非常关键的环节。

上篇 制冷技术及原理

第一章 制冷原理

教学目标：通过本章的学习，使学生能够达到如下目标：

1. 解释饱和、过冷和过热状态的含义；
2. 描述并使用能量方程、显热和潜热方程；
3. 当某种物质的状态由液态变为气态时，辨别温度、压力、热和焓之间的关系；
4. 理解热力循环、卡诺循环、逆卡诺循环的过程；
5. 了解制冷原理以及实现连续制冷的条件及过程并分辨蒸气压缩制冷系统的各个过程；
6. 画出蒸气压缩系统中各组成部分及其连接管路的简图并说出它们的名称；
7. 掌握压焓图的结构，会使用压焓图并找出气化潜热和过热；
8. 在压焓图中能画出理想的蒸气压缩循环的各个过程，并能确定特性参数的变化；
9. 掌握蒸发温度和冷凝温度的变化对循环性能的影响；
10. 掌握过热或过冷对于循环性能的影响；
11. 能画出并描述复合式和层叠式多级系统的分布图；
12. 根据制冷系统特点确定制冷循环，并画出系统的制冷循环压焓草图；
13. 计算制冷效率、压缩热、排出热、所需要的压缩机理论排气量、功率以及 COP 和 EER。

一般而言，制冷就是一个冷却的过程，更准确的定义是从物质中移出热量，使之达到并保持一定的低温，低于环境温度。目前使用最广泛的产生机械制冷作用的方法称为蒸气压缩制冷系统。在这个系统中，我们使一种挥发性的液态制冷剂在蒸发器中蒸发，这个过程可以将热量从被冷却物质中带走，使之冷却。为了保证蒸发过程的持续，还需要使用压缩机和冷凝器将制冷剂恢复并重新使用。

还有一种广泛使用的制冷方法称为吸收制冷系统。在这个过程中，制冷剂也被蒸发，与压缩制冷相同，但不同的是这种方法通过将制冷剂吸收到另一种液体中来达到持续蒸发的目的。稍后我们将解释蒸气压缩与吸收制冷的工作原理。

还有其他的一些制冷方法，如热电制冷、蒸气喷射制冷和空气循环制冷，这些系统仅用于一些特殊的用途，在此我们就不对它们的原理进行解释了。热电制冷是十分昂贵的，一些小型的台式家用冰箱会用这种方法制冷。蒸气喷射制冷的效率较低，过去常用在船舶

上,现在已经大部分都被蒸汽压缩系统所取代。空气循环系统有时用在飞机机舱的空调系统中,制冷温度极低,一般低于 -130°C 时,称为低温制冷,这种情况需要用一些特殊的系统,低温制冷的一个用途是通过液化空气分离制取氧气和氮气。

蒸汽压缩系统的主要设备包括:蒸发器、压缩机、节流阀和冷凝器。这些设备是独立的或整合型的。整合型的设备在工厂进行组装,家庭中使用的冰箱就是一个常见的整合型的例子。整合型设备的明显优势在于结构紧凑,大量生产时成本较低。

商业用的各种制冷设备有各自的具体功能,冷却室、冰柜、展示柜等在食品服务行业广泛使用。自动制冰机、冷饮机、有制冷功能的售货车也是很常见的设备。

用于空调制冷的设备与用于其他用途的设备类似,因此,在学习制冷基础的初始阶段,我们不将它们区别对待。空调系统包括加热、制冷、加湿和除湿以及对内部环境的空气进行过滤。在我们处理两种研究领域交叉的情况时,偶尔会需要提到与空调有关的问题,但不做深入讨论。

第一节 热力学基础知识

一、常用物理量及其概念

要理解制冷原理需要一些基础的物理知识。在本节中,我们将讲解一些常用物理量并举一些简单的应用例子。对于有较好的物理学基础的人来说,这一节可以作为复习,甚至可以省略。

(一) 质量、力和重量

物体的质量是它所包含的物质的量,其国际单位是 kg。

力是一个物体施加于另一个物体的推力或拉力。其国际单位为 N。

物体的重量是地球引力施加在物体上的力。也就是说,重量是一种力而不是质量。

(二) 密度、比体积和相对密度

密度(ρ)是某种物质单位体积的质量(m);比体积(ν)是密度的倒数。即:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

$$\nu = \frac{V}{m} \quad (1-2)$$

式中 V ——体积, m^3 。

物质的密度和比体积会随着温度和压力的变化而变化,尤其是液体和气体。

液体的相对密度定义为它的密度与相同体积的 4°C 的水的密度的比值。

4°C 的水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 所以相对密度为

$$r = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\rho}{1000} \quad (1-3)$$

式中 ρ ——物质的密度, kg/m^3 ;

ρ_w ——是 4°C 的水的密度, kg/m^3 。

质量、密度和比体积都是物质的物理特性。对于制冷过程来说还有其他一些重要的物理性质的量,即:压力、温度、焓和比热容。下面我们很快将给出这些特性的定义。

(三) 压力、绝对压力、表压、真空压力、液柱压力和水汽分压

1. 压力

压力定义为施加在单位面积上的力。用公式的形式来表达就是：

$$p = \frac{\text{力}}{\text{面积}} = \frac{F}{A} \quad (1-4)$$

如果力的单位为牛顿，面积的单位用平方米，则压力的单位为牛/米² (N/m²)。在国际单位制中，压力的单位为帕斯卡 (Pa)，1Pa=1N/m²。然而在制冷工作中还经常会用到许多其他的压力单位，如毫米汞柱、巴 (bar) 和大气压，附录中列出了这些单位之间的相互转化。

2. 绝对压力、表压和真空度

我们定义绝对真空的空间里压力为零，在这个零值之上由流体产生的压力称为绝对压力 (p_{abs})。大气层中的空气由于它们的重量而产生了施加在地球表面上的压力，称为大气压 (p_{atm})。一个标准大气压 (1atm) 一般用施加在海平面上的大气压力来衡量，经过测量得出这个数值大约等于 $1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 。根据天气条件的变化这个数值会略有变化。随着海拔高度的增加，大气压会下降，这是由于它上面的空气的重量减小了。例如在西藏地区的大气压就比北京地区的大气压低。

测量压力的工具通常是用来测量流体的压力与大气压之间的差值，而不是流体的绝对压力。测出的高于大气压的压力称为表压 p_g 。绝对压力、表压和大气压之间的关系如下：

$$p_{\text{abs}} = p_{\text{atm}} + p_g \quad (1-5)$$

表压使用起来很方便，因为大多数的压力测量仪器是以大气压的读数为零度来进行校准的。

当一种流体产生的压力低于当地大气压时，这个压力与大气压之间的差值就称为真空压力或真空度 (p_{vac})。绝对压力、大气压和真空度之间的关系如下：

$$p_{\text{abs}} = p_{\text{atm}} - p_{\text{vac}} \quad (1-6)$$

有些压力表可以同时读出真空压力和表压，称为复合压力表，复合压力表在制冷工作中特别有用，因为在压缩机的吸收管路中，压力常低于大气压。

在实际应用中，我们经常会遇到用液柱的高度来表示的压力 (比如 mmHg)。下面我们将讲述这种单位是如何被计算出来的。

3. 液柱压力

液体由于它本身的重量可以产生压力，而重量又取决于液柱的高度。产生的压力与液柱高度之间的关系如下：

$$p = \rho H \quad (1-7)$$

式中 p ——液体施加的压力，N；

ρ ——液体的密度，kg/m³；

H ——液柱的高度，m。

液体柱高度和压力之间的这种关系被用来制造一种用液柱来测量压力的仪器，称为流体 (气体) 压力计或 U 形压力计。如果施加在压力计 U 形管两端的压力相同，都是大气压，则 U 形管内的液面保持在同一水平；如果一端与容器相连，容器中的压力高于大气压，则与容器相连接的一端液面较低；如果容器中的压力低于大气压 (真空压力)，则与容器相连接的一端液面较高。

气压计是一种特殊的压力计，用来测量大气压力，所使用的液体是汞。管中抽成真空

以使得汞柱一端没有任何空气压力，由于有大气压施加于汞柱的底端，所以汞柱上升的高度就表示了大气压。

4. 液压柱或气压柱

用液压柱或气压柱为单位来表示压力是很方便的，液压柱或气压柱就相当于公式 1-7 中所示的液柱高度 H 。在某些场合中，我们可以用 760mmHg 来表示大气压，取代 1.03kg/cm^2 。也就是说我们可以用公式将其他的压力单位转化为液柱来表示，这种转换关系也可以从附录中查得。

任何气体在分子运动时都具有一定的压力。湿空气由于空气和水汽组成，它们都具有各自的压力，叫做分压力，两者之和组成空气的总压力。水汽分压力的大小反映了空气中含水汽量的多少，水汽的最大压力称为对应温度下水汽饱和压力。空气温度越高，则空气中水汽的饱和压力越大，空气中水汽达到饱和分压力，则空气不再吸收水分，称为饱和空气。

(四) 功、功率和能 (量)

功是当移动一个物体时，施加在它上面的力所产生的效果。可以用下面的公式来表示：

$$\text{功} = \text{力} \times \text{距离} \quad (1-8)$$

在国际单位制中，功的单位是焦耳 (J)，1N 的力使物体移动 1m 所做的功为 1J，也就是说： $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ 。

功率是做功和所用时间的比，可以用下式表示：

$$\text{功率} = \frac{\text{功}}{\text{时间}} \quad (1-9)$$

在工业应用中，功率常常比功具有更直接的意义，设备的工作能力是以它们的输出功率或能量消耗为基础的。功率的单位常用马力 (hp) 和千瓦 (kW)，功率的标准国际单位是千瓦 (kW)，等于 1kJ/s 。

能被定义为做功的能力，尽管它是一个抽象的概念。比如，我们使用贮存在燃料中的化学能，通过在高压下产生燃烧的气体来驱动引擎的活塞做功，所以功是能的一种形式。能有许多种存在形式，可以分为几类，它们被贮存在物体内部，或在各种形式之间转化或从一个物体转移到另一个物体。

能可以以许多不同的形式贮存在物质中，下面我们要把所有的注意力集中到能量转化或转移的其中一种形式，那就是热。其他的一些能量贮存的形式将在以后的章节进行讨论。

(五) 热、温度和焓

1. 热

热可以定义为由于温差的存在而从一个物体向另一个物体转移的能量的一种形式。

我们要注意，热量只能自然地由温度较高的物体向温度较低的物体转移，我们说它是“往下走”的。当然，如果没有温差就没有热量的转移。

制冷是一个特殊的热量传递过程，我们要将热量从物体移走，使它达到我们想要的低温，或保持这种低温。当然，一定具有一种物体比我们要从中移除热量的这个物体的温度还要低。这就是为什么我们要创造机械制冷的办法，也就是本书的主题。

尽管我们常说冷却某个东西，但制冷实际上是要把热量移走。从技术角度而言，冷却

这个词是毫无意义的，它只是我们身体对于处于低温状态的物体或正在失去热量的物体的一种感觉。

热量的国际单位是 J，我们注意到它也是功的单位，由于功和热是同一个物理性质——能量——的两种不同形式，所以可以用同一个单位来表示。实际上我们可以看到许多例子，在其中能量的一种形式——功，通过摩擦转化成另一种形式——热。有一个常见的例子就是汽车的轮胎与路面的摩擦使轮胎变热。

在国际单位中，使用 J 作为各种形式的能量的惟一的单位，使用 kW 作为功率的惟一单位可以简化计算过程。但是，在一些使用米制的国家，在制冷工作中，人们仍然会使用卡 (cal) 或千卡 (kcal) 作为热能的单位。1cal 是指将 1g 15℃ 的水的温度升高 1℃ 所需要的热量。

2. 温度

温度是物质的一个特性参数，它取决于物体内部分子运动的速度。分子是组成物体结构的粒子。分子运动的速度越快，物体的温度就越高。但是我们不可能通过测量分子运动的速度来确定物体的温度。我们的触觉可以给我们一种对温度的相对的比较，我们会根据自己的反应说某个东西是热的或冷的，但这不足以得出精确的数值。我们通过观察温度的变化所产生的一些物体变化，得到精确测量温度的方法。最常见的温度测量仪器（温度计）利用了液体热胀冷缩的物理现象。水银温度计由一个细长的玻璃管和一个盛装水银的球状物组成，当温度升高时，水银膨胀并沿着管子上升，我们看一下水银柱顶端的位置相应的温度刻度就可以读出温度的数值。在国际单位制中，温度的单位是摄氏度 (℃)，在 1.01×10^5 Pa 下水的沸点是 100℃，冰点温度是 0℃。

此外还有一个常用的热力学温度的单位，它的零度值是取可能存在的最低温度，称为开尔文 (K) 温度标度。它与摄氏度的关系如下：

$$T(K) = t(^{\circ}\text{C}) + 273\text{K} \quad (1-10)$$

3. 焓

能量可以分为流动的能量和贮存的能量，一个物体中贮存的总能量包括几种形式，比如我们都注意到了物体中贮存有化学能，因为我们已经认识到物质通过燃烧可以释放出所贮存的化学能。还有两种常见的能量贮存的形式是动能和势能。动能是由于物体的运动或它的速度而贮存的能量，而势能是由于它的位置或海拔高度而贮存的能量。温度和压力也会使物体具有额外的能量。我们都注意到高压的气体具有能量（如沸腾时产生的蒸气），高温下的水可以向外释放热能。我们把这种以温度和压力所贮存的能量称为焓 (H)。

对于焓还有更为准确的定义，但在我们所讨论的范围内是没有必要的。在制冷工业中常使用一种说法叫热含量，它的含义与焓相同。准确地说，热是一种可以在物体之间流进、流出的能量形式，而焓或热容是物体的贮存能量的形式。作为一种能量的形式，焓的单位是焦耳。比焓是单位质量的物质的焓，它的单位是 J/kg。

将温度与焓（热含量）区别开来是很重要的，温度是对一个物体的热的水平的一种衡量，当物体获得热量时，它的温度升高，而物体的焓（热含量）除了温度外，还取决于它的质量。例如，极少量在 1400℃ 的温度下熔化了的钢，其温度要比一大池子 90℃ 水高得多，但是这一大池子水的焓却高于这少量熔化的钢。也就是说，这些水中所贮存的内能更多。这是一个很重要的事实，因为在许多实际应用的情况中，我们可以从这一池水中得到

更多的热量，尽管它的温度较低。

(六) 湿度、湿球温度和露点温度

1. 湿度

空气的潮湿程度叫空气的湿度，其大小由空气中水汽含量而定。按用途不同可分为以下三种表示方法。

绝对湿度：每立方米湿空气中含有的水汽的质量 (kg/m^3)。由于在湿空气的状态变化过程中，其体积和质量是变化的，即使湿空气的水汽含量不变，由于温度变化其体积也随着变化，绝对湿度用体积作为参数，所以绝对湿度也随着变化，这样就不能反映空气中的水汽含量的多少。

含湿量：1kg 干空气中带有的水汽量 (g/kg)。干空气和水汽在常温下可以看作理想气体，根据湿空气、干空气和水汽三者之间的体积、温度、压力和质量的关系，可以得到：

$$d = 1000 \frac{m_c}{m_g} = 622 \frac{p_c}{p_g} = 622 \frac{p_c}{p_B - p_c} \quad (1-11)$$

式中 m_c 、 m_g ——湿空气中水汽和干空气质量，kg；

p_c 、 p_B ——水汽分压力和大气压力，Pa。

一般在一个地区大气压力可以看作常数，因此水汽分压越大，含湿量 d 也越大。含湿量在空调中用途很大，计算中经常用到它，由含湿量和焓制成的湿焓图是空调计算的基本线图。

相对湿度：在一定温度下，一定的空气中只能容纳一定的水汽量，若空气中水汽量超过这个限度就会凝结成雾。这个限度的水汽量称为饱和湿度。在饱和湿度下相应饱和水汽分压 p_{cB} 、饱和绝对湿度 Z_B 与饱和含湿量 d_B 。未饱和空气的绝对湿度 Z 与饱和湿度 Z_B 之比就叫相对湿度 φ 。

$$\varphi = \frac{Z}{Z_B} \times 100\% = \frac{p_c}{p_{cB}} \times 100\% = \frac{p_B - p_c}{p_B - p_{cB}} \frac{d}{d_B} \times 100\% \approx \frac{d}{d_B} \times 100\% \quad (1-12)$$

2. 湿球温度

温度计的感温球与空气直接接触所测出的空气温度称为空气的干球温度，如果用带有水分的湿纱布包在温度计的感温球上，这样的温度计就叫湿球温度计，所测出的温度就叫湿球温度，是纱布中的水与周围空气进行热、湿交换达到最终稳定状态时的温度。

3. 露点温度

某物体被降温时其表面会出现凝结水，这是因为这些表面的空气含湿量超过了饱和含湿量，空气中的水就凝结出来，所对应的水汽凝结时的饱和含湿量的温度就叫露点温度。仪器、设备的表面温度低于空气的露点温度就会结露而损坏仪器。

二、与制冷有关的热力学状态与关系

(一) 液体、蒸气和状态变化

物质有三种不同的存在形式（也称作相）：固态、液态和气态。我们可以做一个实验很好地显示物质的状态是如何从液态变为气态（沸腾），从气态变为液态（冷凝）的。比如，室温下的一锅水，处于开放状态，所受到的压力为海平面的大气压，即一个大气压