



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与低温 原理

第2版

陈光明 陈国邦 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与低温原理

第2版

主编	陈光明	陈国邦	
参编	沈永年	王剑锋	余建平
	邱利民	金滔	王勤
主审	吴业正	王如竹	



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级教材规划,是在第1版基础上,吸收了国内外制冷与低温领域的最新研究成果编写而成的,具有内容新颖、深入浅出、简明扼要等特点。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与低温的实现方法、基本原理及其应用,重点介绍制冷与低温工质性质、蒸气压缩制冷、吸收制冷、低温制冷、气体液化与分离等。为了方便读者重点理解和掌握内容,本书还配有PPT课件以及mini-REFPROP软件,同时还给出大量例题和习题,书末附有常用工质物性图表。

本书可作为热能与动力工程专业本科生的教材,也可供动力、机械、化工、建筑、航天、食品、医药等领域从事制冷与低温、动力与气体、建筑环境与设备(暖通空调)、化工过程与控制等有关的科研、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. —2版. —北京:机械工业出版社,2009.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-28964-7

I. 制… II. ①陈…②陈… III. ①制冷工程-高等学校-教材②低温工程-高等学校-教材 IV. TB6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第198928号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 版式设计:霍永明
封面设计:张静 责任校对:姜婷 责任印制:杨曦
北京富生印刷厂印刷
2010年3月第2版第1次印刷
184mm×260mm·18印张·441千字
标准书号:ISBN 978-7-111-28964-7
定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

承蒙广大读者、国内同行专家的厚爱以及机械工业出版社的支持,本书有幸被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。这次再版,是在吸收国内外制冷与低温领域的最新研究成果的基础上,充分考虑了第1版出版后广大读者特别是高校老师在使用过程中发现的问题以及所提出的修改建议,进行了精心的修订和增补。主要进行了下面的修订:

第一章

- 1) 考虑变温热源循环在制冷中的重要性,增加了“逆向布雷登循环”的简介。
- 2) 考虑还有专门介绍低温制冷机的专著,简化了“脉管制冷机”内容。
- 3) 考虑“空气蒸发制冷和溶液除湿蒸发制冷”近年来发展迅速,增加了“空气蒸发制冷和溶液除湿蒸发制冷”的介绍。

第二章

- 1) 考虑突出环境保护问题,将制冷工质分类按“自然工质”、“合成工质”进行分类。
- 2) 在制冷工质命名方面,增加了“C3”系列的命名以及同分异构体的命名方法介绍。
- 3) 在制冷工质物性计算方面,删去了“童景山状态方程、LEE方程、BA方程、LKP方程”以及有关“马丁-侯状态方程程序”的内容,增加了有关商用软件REFPROP简介等内容。这些增删主要考虑现在的商用软件已经高度发展的现状以及使用方便的特点。
- 4) 更新了工质的ODP数据以及GWP数据。
- 5) 考虑CO₂得到越来越广泛的使用,增加了CO₂有关特性的介绍。

第三章

- 1) 吸取了跨临界循环的研究成果,增加了跨临界循环的介绍。
- 2) 考虑螺杆压缩机以及涡旋压缩机等可以通过中间进气来实现两级压缩,这一方法目前得到了广泛的应用,因此在两级压缩循环中,增加了有关“中间进气”内容的简介。

第四章

考虑到“西蒙氨液化系统”已经不再使用,因此,简化了介绍。

第五章

- 1) 将第二节与第五节合并,因为它们都属于混合物的分离方法,放在一起更加容易理解。
- 2) 考虑大型空分应用越来越广泛,因此,增加了一节“现代大型低温空气分离系统简介”。
- 3) 删除了“规整填料塔”的介绍,主要考虑它是设备,其工作原理与板式塔相同,因此,应该放在有关设备的教材中介绍较合适。

此外,为了使用方便以及与国际有关标准一致,这次修订还对附录的图表数据进行了统一:

1) 正常沸点120K以上的制冷工质,其比焓和比熵的基准点为0℃的饱和液体,此时的比焓为200kJ/kg,比熵为1kJ/(kg·K);给出的热力性质图为压-焓图。

2) 沸点120K以下的低温工质,其比焓和比熵的基准点为常压(0.10133MPa)饱和液体,

此时的比焓为 0kJ/kg ，比熵为 $0\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；给出的热力性质图为温-熵图。

相应地，书中的例题以及习题有关数据也进行了统一。

这次再版，主要由浙江大学陈光明教授执笔并统稿，邱利民教授、金滔教授、王勤副教授参加了编写工作。西安交通大学吴业正教授和上海交通大学王如竹教授对全书进行了认真的审阅，并提出了许多建议。在修订过程中，浙江大学陈国邦教授一直关注修订的进程并对全书文稿进行了非常认真的审核。浙江大学制冷与低温研究所的唐黎明教授、甘智华副教授、张绍志副教授、张学军副教授、何一坚副教授、陈其副教授、汤珂副教授、张小斌副教授、韩晓红副教授、孙大明副教授都认真阅读书稿并提出许多建议。上海交通大学黄永华副教授绘制了本书附录 B 中的全部热力性质图。浙江大学博士生巩学梅、刘利华、徐梦洁、洪大良、戴征舒、高赞军等同学，对书中的例题和习题进行了认真的校对并一一进行计算。在此一并表示衷心的感谢。

本书可作为热能与动力工程专业本科生的教材，也可供动力、机械、化工、建筑、航天、食品、医药等领域从事制冷与低温、动力与气体、建筑环境与设备（暖通空调）、化工过程与控制有关的科研、设计、生产等工作的技术人员参考。

陈光明 陈国邦
于浙江大学求是园

第1版前言

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。本书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焓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

主要符号表

拉丁字母

A	面积
a	比亥姆霍兹自由能, 循环倍率
c	比热容
C	热容
D	直径, 扩散系数
E	焓
e	比焓
f	频率
G	热导
g	比吉布斯自由能
H	焓, 磁场强度, 亨利常数
h	比焓
I	电流
K	平衡常数
L	长度
M_r	相对分子质量, 余函数
m	多变指数, 质量
N	数量
P	功率, 渗透系数
p	压力
Q	热量
q	单位质量热量
q_0	静态吸附容量
R	气体常数, 电阻, 回流比
r	汽化热, 摩尔比
S	熵, 溶解系数
s	比熵
T	热力学温度
t	摄氏温度, 时间
U	热力学能, 喷淋密度
u	比热力学能
V	体积

v	比体积, 速度
W	功
w	比功, 质量分数
x	干度, (液相) 摩尔分数
y	液化率, (气相) 摩尔分数
Z	压缩因子, 电偶对材料的优质系数

希腊字母

α	温差电系数, 热扩散率, 相对挥发度
α_s	微分等熵效应
α_h	微分节流效应
γ	电导率, 比热比
δ	热渗透长度值, 膜厚
ε	制冷系数, 填料润湿率
ζ	热力系数
η	热力完善度, 效率
θ	对比正常沸点
κ	等熵指数
λ	热导率, 输气系数
μ	化学势, 冷气流占总气流的比例
ν	运动粘度
π	珀尔帖系数
ρ	密度, 电阻率
τ	循环周期
Φ	制冷量
ϕ	单位制冷量, 相位差
ω	角速度, 偏心因子

上标

'	液相的
"	气相的
R	参考流体的
*	理想气体状态下的

下 标

0	蒸发过程的, 理论的, 参考态的
a	环境的, 吸收器的
b	正常沸点的
c	临界的, 冷的, 组元的
comp	压缩的
d	扩散的
e	膨胀的, 蒸发的
exch	换热过程的
<i>f</i>	自由度
g	发生器的
H	高的
<i>h</i>	焓的
<i>i</i>	序号
is	孤立系的
in	进的
k	冷凝的, 卡诺循环的
L	低的, 液相的
l	液体的, 泄露的, 洛伦兹循环的
m	平均的, 摩尔的

max	最大的
min	最小的
N	N 型电偶的
net	净的
opt	最佳的
out	出的
P	P 型电偶的
<i>p</i>	等压的
p	相的
<i>q</i>	热量的
R	压缩过程的
r	对比的, 可逆循环的
rec	回热过程的
s	等熵过程的
s	饱和状态的
tr	三相点的
V	气相的
<i>v</i>	等容过程的, 单位容积的
w	水的

目 录

第2版前言	
第1版前言	
主要符号表	
绪论	1
一、研究的内容和范围	1
二、制冷与低温的应用	1
三、制冷与低温的发展历史	7
习题	9
第一章 制冷与低温的热力学基础	10
第一节 相变制冷	10
一、液体汽化	10
二、固体的熔化与升华	11
三、压-焓图	12
第二节 气体绝热膨胀制冷	13
一、有外功输出的膨胀过程	13
二、绝热放气过程	14
三、节流膨胀过程	15
第三节 制冷循环热力学特性分析	16
一、热源温度不变时的逆向可逆循环——逆卡诺循环	16
二、变温热源时的逆向可逆循环——洛伦兹循环及逆向布雷顿循环	18
三、热能驱动制冷循环	19
四、蒸气机械压缩制冷循环	20
五、气体液化循环	21
六、斯特林制冷循环	22
七、G-M 制冷循环	24
八、脉管制冷循环	26
九、热泵循环	28
第四节 其他制冷方法	28
一、空气蒸发制冷和溶液除湿蒸发制冷	28
二、气体涡流制冷	30
三、半导体制冷	34
四、热声制冷	37
五、绝热去磁制冷	39
六、氦稀释制冷	42
习题	45
第二章 制冷与低温工质性质	47
第一节 概述	47
一、制冷与低温工质的选用原则	47
二、制冷与低温工质的命名	48
第二节 工质物性计算的热力学基础	52
一、基本热力学关系式	52
二、溶液热力学的基本概念与基本定律	54
三、溶液相平衡	59
四、二元溶液的相平衡图	62
第三节 制冷与低温工质的热力学性质及其计算方法	66
一、热力学性质表示方法	66
二、热力学性质的计算机计算	69
三、热力学性质计算商用软件	71
第四节 制冷与低温工质的物理化学性质	71
一、安全性	72
二、热稳定性	73
三、对材料的作用	73
四、对润滑油的互溶性	74
五、对水的溶解性	74
六、泄漏性	74
七、与大气环境的友好性	75
第五节 常用制冷与低温工质	76
一、自然工质	76
二、合成工质	81
三、混合工质	82

第六节 载冷剂	85	三、带膨胀机的混合气体液化循环	171
一、载冷剂的作用及选用原则	85	习题	172
二、常用载冷剂	86		
第七节 冷冻机用润滑油	87	第五章 流体混合物分离原理与方法	174
一、润滑油的作用及选用原则	87	第一节 气体的理想分离	174
二、分类与特性	88	第二节 流体混合物分离方法	176
习题	90	一、冷凝和闪蒸	176
第三章 蒸气制冷循环	92	二、精馏	179
第一节 单级机械压缩制冷循环	92	三、吸附	187
一、理想循环	92	四、吸收	191
二、实际循环	104	五、薄膜渗透	194
三、循环性能数值计算	107	第三节 低温空气分离系统	197
四、循环特性分析与制冷机工况	109	一、林德单塔系统	197
第二节 两级机械压缩制冷循环	112	二、林德双塔系统	200
一、概述	112	三、林德-富兰克系统	200
二、两级压缩制冷循环	113	四、海兰特系统	202
第三节 复叠式制冷循环	118	五、副产气体分离系统	202
一、系统的组成	118	第四节 氢及氦的分离系统	205
二、性能指标计算	122	一、氢分离系统	205
三、系统的运行特性分析	124	二、氦分离系统	207
第四节 吸收制冷循环	126	第五节 现代大型低温空气分离系统简介	208
一、概述	126	一、外压缩系统	208
二、蒸汽单效吸收制冷	127	二、内压缩系统	209
三、蒸汽双效吸收制冷	133	习题	212
四、直燃吸收制冷	137		
五、蒸汽吸收制冷其他循环	140	第六章 制冷与低温循环的热力学第二	
习题	146	定律分析	214
第四章 气体制冷和液化循环	148	第一节 熵分析法	214
第一节 节流循环	148	第二节 焓分析法	216
一、一次节流循环	148	一、焓的概念	216
二、有预冷的一次节流循环	151	二、制冷与低温循环中典型过程焓分析	218
三、二次节流循环	155	习题	223
第二节 等熵膨胀循环	157		
第三节 等焓膨胀和等熵膨胀的组合循环	159	附录	224
一、克劳特循环	159	附录 A 常用单位换算表	224
二、海兰特循环及卡皮查循环	162	附录 B 常用制冷工质的热力性质表和图	225
第四节 复叠式气体液化循环	168	表 B-1 R-22 饱和性质表	225
一、经典复叠制冷液化循环	168	表 B-2 R-23 饱和性质表	228
二、自动复叠制冷液化循环	169	表 B-3 R-50 (甲烷) 饱和性质表	230
		表 B-4 R-123 饱和性质表	231
		表 B-5 R-134a 饱和性质表	233

表 B-6	R-410A 饱和性质表	235	图 B-8	R-702 (正氨) 温-焓图	261
表 B-7	R-600a 饱和性质表	237	图 B-9	R-704 (氨-4) 温-焓图	262
表 B-8	R-702 (正氨) 饱和性质表	238	图 B-10	R-717 (氨) 压-焓图	263
表 B-9	R-704 (氨-4) 饱和性质表	240	图 B-11	R-728 (氨) 温-焓图	264
表 B-10	R-717 (氨) 饱和性质表	242	图 B-12	R-729 (空气) 温-焓图	265
表 B-11	R-728 (氨) 饱和性质表	246	图 B-13	R-732 (氧) 温-焓图	266
表 B-12	R-729 (空气) 饱和性质表	248	图 B-14	R-744 (二氧化碳) 压-焓图	267
表 B-13	R-732 (氧) 饱和性质表	250	附录 C	常用载冷剂的热物理性质表	268
表 B-14	R-744 (二氧化碳) 饱和 性质表	252	表 C-1	氯化钙水溶液的热物理性质	268
图 B-1	R-22 压-焓图	254	表 C-2	氯化钠水溶液的热物理性质	270
图 B-2	R-23 压-焓图	255	表 C-3	乙二醇水溶液的热物理性质	271
图 B-3	R-50 (甲烷) 温-焓图	256	表 C-4	几种常用载冷剂的热物理性质 比较	273
图 B-4	R-123 压-焓图	257	参考文献		274
图 B-5	R-134a 压-焓图	258			
图 B-6	R-410A 压-焓图	259			
图 B-7	R-600a 压-焓图	260			

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，曾称致冷。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。由于热量只能自发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。

制冷几乎包括了从室温至 0K 附近的整个热力学温度范围。但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 温度下所发生的所有现象和过程或使用的技术和设备，即从液化天然气的正常沸点至 0K 附近的温度范围属于低温；而在 120K 与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，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降温的方法不同。一般来说，制冷的方法主要有三种：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。除此之外，获得低温的方法还有绝热去磁制冷、稀释制冷以及激光制冷等。

绝大多数制冷过程依靠内部流动的工作介质来完成，即把热量从被冷却物体转移到环境介质中。实现这种功能的工作介质称为制冷工质，从被冷却介质中吸热的制冷工质称为制冷剂，曾称致冷剂，有时也叫冷媒。

本书主要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。在生产活动中，人们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；在日常生活中，人们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的发展，对制冷与低温技术提出了越来越高的要求。

（一）制冷技术的应用

制冷技术的最大应用是空调中的制冷。除此之外，制冷还应用于工业过程、食品的加工和贮藏以及工业部门中的许多特殊领域。

1. 大中型建筑物的中央空调 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。即使在一些夏季温度不太高的地区，大型建筑物也可能需要进行空气冷却处理，以排除室内人体和灯光等其他电器设备产生的热量。在炎热地区，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，向下面空间提供调节后的空气。

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。

2. 工业空调

工业空调指为在恶劣环境中的工人提供一定程度的舒适条件和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地方的有限范围供热；在炎热的环境中，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对空调的要求不同。进行发动机低温试验的环境模拟实验室，必须保持 -40°C 左右；而研究动物热带行为的实验室，则必须保持高温和高湿。

(3) 印刷厂 在印刷厂使用空调的主要目的是控制湿度。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) 精密零件制造和洁净室 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，以保证工人有良好的工作条件。在现代化发电厂中的许多狭窄地方，采用制冷机配合风机盘管来提供冷量，因为风机盘管比普通通风管道要小得多。

3. 住宅空调

住宅空调按结构形式可分为窗式空调器、壁挂式空调器和柜式空调器等，有冷风型和热泵型两种。冷风型只用于制冷，热泵型则通过电磁换向阀，具有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。空调器产品正向体积小、能耗低、噪声低、多功能、智能化方向发展，以满足家用及企事业单位的多样化需求。

4. 运输空调

车辆空调主要用于家用汽车、公共汽车、火车、飞机和轮船等交通工具中驾驶员和乘客所在的地方，也用于货车、旅游车、拖拉机、吊车等的驾驶室。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. 食品贮藏与配送

各种肉类、鱼类、水果和蔬菜等食品都易于腐败变质。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的贮存时间，其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，直到消费者解冻后才食用。

典型的食品冷藏链由下列环节组成：冻结，在冷藏库中贮藏以及陈列在食品市场的冷藏柜中，各个环节的配送，最后存放在家用冰箱内。

(1) 冻结 必须将食品的温度迅速降低到冻结点以下。冻结的方法有：①吹风冻结法，将温度大约为 -30°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，把食品放置在冷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 肉类屠宰后应快速冻结，然后运送到 $-20\sim-23^{\circ}\text{C}$ 的冷藏库中贮藏，贮藏时间可长达数日甚至数月之久。鱼类的冷藏温度还要更低。

(3) 配送 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。

(4) 存放 最后，消费者将食品贮藏在家用电冰箱中，直到取出食用为止。在家用电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°C ，然后将其冷却到 3°C 和 4°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°C 左右，最后进入冻结器，使之温度降低到 -5°C ；制成的冰淇淋在低于冻结温度下贮存。

(2) 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。许多饮料在冷却后可以改善其滋味。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水果的直接运输显著降低。

(3) 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 $8\sim 12^{\circ}\text{C}$ 之间进行，这一温度依靠制冷来保持。在其后的加工过程中，散装啤酒的贮存和最后装瓶或装桶过程都要求在制冷室内进行。

(4) 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。一些药品、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 小型制冰机通常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理在沙或木屑中，然后上面泼上水并使

之冻结,就可构成人工溜冰场。

(3) 建筑业 在建筑业中,用冻土法挖掘土方、构建桥梁基础、制造地下铁道等,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破坏。

(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。低温技术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,人类对保护现有能源、探索代用燃料和新能源、改善能源结构,减缓能源危机和改善环境条件的要求越来越迫切。

(1) 天然气 天然气是继煤和石油之后的第三大化石能源,正在部分替代石油和煤,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。天然气用作城市燃气,可大大减轻对环境的污染;用作汽车燃料,CO₂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52%。大规模天然气的开采、贮存和运输依赖天然气的液化技术。液化天然气(LNG)或许将成为低温在工业上的最大应用者。

(2) 核聚变 核聚变反应堆托卡马克(Tokamak)装置依靠大型低温超导磁体对聚变反应器中的高温等离子体进行磁约束,这些低温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)已经在20世纪末建造,其商品化预计在2040年左右实现。

(3) 超导列车 自20世纪70年代以来,日本一直致力于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(而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。

磁悬浮用低温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发展,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、航天系统等各种动力的主要代用燃料。用低温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因极高速度飞行而产生摩擦热的机翼表面。低温氢浆或甲烷浆对于超声速和超高速飞行也显示出优点。

2. 航空与航天

早在20世纪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作为推进剂。载人空间飞行起初也是用酒精和液氧作为推进剂,航天飞

机具有 254kN 冲力的火箭发动机, 可达 2km/s 速度与 108km 的高度。

无论是载人的或不载人的航天器, 低温技术总是空间计划的关键技术。如果离开低温, 许多卫星和空间飞船的成功发射和空间的科学测量都是不可能的。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。

美国航天飞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。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。

中国空间技术自 20 世纪 50 年代中期以来迅速发展起来。1970 年 4 月 24 日, 长征一号火箭把东方红一号卫星送入轨道。1990 年 4 月 7 日, 采用氢氧发动机技术的长征三号火箭将亚洲一号卫星送入地球静止轨道。由于长征系列火箭运载能力的提高, 中国已经发展了通信卫星、气象卫星、资源卫星、载人航天以及探月工程。

低温在航空领域的应用涉及生命维持系统、地面研究设施以及以超高声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。其中, 低温成为最令人瞩目的应用之一。使用液氮气的低温风洞产生的雷诺数要比历史上曾达到的最高雷诺数数值高 10 倍。这种超声速模拟使临界超声速区的研究成为可能。

3. 科学实验

诺贝尔奖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, 要么他们的研究涉及低温。例如: 1910 年荷兰人范德瓦尔斯 (Johannes Diderik van der Waals) 关于气态和液态方程的研究; 1913 年荷兰人翁尼斯 (Heike Kamerlingh Onnes) 进行低温下物质特性的研究, 生产出液氦; 1957 年美籍华人杨振宁、李政道发现宇称不守恒原理; 1962 年苏联人朗道 (Lev Davidovich Landau) 对凝聚态物质的研究; 1972 年美国人巴丁 (John Bardeen)、库珀 (Leon Neil Cooper)、施里弗 (John Robert Schrieffer) 关于超导性理论的研究; 1973 年日本人井崎 (Leo Esaki)、美国人贾埃弗 (Ivar Giaever) 和英国人约瑟夫森 (Brian David Josephson) 对半导体和超导体隧道效应的研究; 1976 年美国人里奇特 (Burton Richter) 和美籍华人丁肇中 (Samuel Chao Chung Ting) 发现新一类基本粒子 (PSi 或丁粒子); 1978 年苏联人卡皮查 (Pyotr Leonidovich Kapitsa) 在氦低温物理领域的基础性研究和发现; 1987 年德国人贝德诺茨 (J. Georg Bednorz) 和瑞士人米勒 (K. Alexander Müller) 发现新的陶瓷超导材料; 1996 年美国人李戴维 (David M. Lee) 等发现了³He 同位素中的超流性, 以及 1998 年美籍华人崔琦 (Daniel C. Tsui) 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 0K 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 重的低温超导磁体构成两个圆周为 4km 的交错圆圈。这些超导磁体采用了巨大的氦制冷机, 但是总能耗并不大, 即使包括制冷机的消耗功率在内, 所消耗的电能也只有采用非超导磁体

的1/4。这种制冷机的关键设备是透平膨胀机，其转速高达 6.6×10^5 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。

欧洲原子能研究组织（CERN）建于瑞士日内瓦的大强子对撞机（LHC）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，超导系统被1.9K超流氦所冷却，需用液氮 9770m^3 进行预冷。

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（超导量子干涉仪的缩写）。SQUID是世界上最敏感的元件，因而获得了重要应用。SQUID可用于测绘地磁和用于导航等。在空间技术中，SQUID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。

在计算机技术方面，数据的传送速度不可能大于光速（ 0.3048×10^9 m/s），但现在以毫微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数转换器（A/D转换），这种器件应用了约瑟夫逊结，能实现每秒 2×10^9 次的A/D转换。总之，超导在电子技术中的应用已显示出巨大的优越性，现已发展成一个新的应用领域——低温电子学。

4. 工业

用做工业气体的空气，是生产液氧和液氮的原料来源，而液氧和液氮是非常重要的商品。每年在所有低温产品中，它们占据了大约1/3。大约有50%的液氧用于钢铁工业，从铁液中除碳，还用于金属的切割，约有20%液氧用于化学工业；空间计划中所需的液氧量看来是惊人的，但充其量不过是氧的总销售量的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，已经得到越来越广泛的应用。航空公司为随机厨房进行冷冻每年要消耗大量液氮。

液氮还可用于汽车轮胎、橡胶制品和塑料零件的再利用处理，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

低温生物学是研究温度（指低于生物体本身的温度）对生物的影响及其应用的生物学分支学科。低温生物学过去主要研究植物的冻害以及细菌和昆虫对低温的耐性等。20世纪以来，开始了对生物和作为食品的生物材料的低温处理研究，该研究逐渐进入了细胞和分子的水平，研究成果被广泛应用于生物制品、家畜精子以及人的某些器官，特别是血细胞的低温保存。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、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研究的进展。