



普通高等教育“十五”国家级规划教材

制冷与低温技术原理

吴业正等 编著



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

制冷与低温技术原理

吴业正 朱瑞琪 李新中 编著
厉彦忠 李俊明
吴业正 主编

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,是按照 21 世纪科技发展和人才培养的需要,总结多年教学改革的经验及成果编著而成的。书中比较全面地讲述了制冷与低温技术的原理,包括系统的组成、热力学原理、循环计算、制冷机特性的理论分析和计算以及热交换器等,讲述的对象以蒸气压缩式制冷为主,并涉及吸收式制冷等。书中还介绍了液态低温工质的制取、气体的低温分离以及载冷和蓄冷技术等。为了便于读者将所学理论知识应用于实际,书中一些章节有计算举例,供参阅。此外,除书中所列各种图和表以外,书后还附有一些工质的热物性参数表,供查阅。

本书可作为高等学校能源动力类本科生的专业教材,也可供制冷及低温工程学科的研究生和从事此领域工作的科研和工程技术人员参考,适当选择章节后还可用作专门讲授制冷技术原理的教材,或专门讲授低温技术原理的教材。

图书在版编目(CIP)数据

制冷与低温技术原理 / 吴业正等编著. —北京: 高等教育出版社, 2004. 8

ISBN 7-04-014514-6

I. 制... II. 吴... 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 (2004) 第 044940 号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 宋 晓 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱 静
版式设计 张 岚 责任校对 胡晓琪 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京市白帆印务有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 30
字 数 560 000

版 次 2004 年 8 月第 1 版
印 次 2004 年 8 月第 1 次印刷
定 价 38.10 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

近 20 年来,制冷和低温技术得到了飞速的发展和广泛的应用。从人们的日常生活到国民经济各部门,从传统产业到高新技术产业,从国防科技到航空航天,到处都离不开制冷、低温技术及其设备。制冷和低温技术的快速发展带来了对该领域专业人才需求的持续增长,为了适应人才培养和学科发展的需要,我们编著了本书。

随着科学技术的发展,人们对事物的本质、人类与自然之间的相互关系有了更多、更深刻的了解,于是能源、环境保护等方面的问题受到了格外的重视。制冷和低温学科与之关联甚为密切,因而其内涵也随之得到深层次的开拓,并在本书中得到适当的反映。

首先,书中对影响环境质量的工质问题给予了应有的重视,将截至定稿时为止的主要替代工质问题作了介绍,体现了教科书应尽量反映成熟的科技成果的责任。其次,电子技术的飞速发展,使计算机在辅助设计方面的功能大为扩展,也使系统的控制得到质的飞跃,这在本书中受到重视。例如,书中提供了制冷热物理过程仿真、编程设计所需要的计算公式及各种图表资料,介绍了一些控制系统流量的热电元件,使教科书的质量能随科学技术的发展而提高。第三,本书还收入了一些近年来制冷和低温技术理论与实践方面的成就,如载冷与蓄冷技术的新进展、纳米流体强化传热的研究,用以帮助提高读者的理论修养和实践能力。

与以往的制冷教材和著作相比,本书的一个重要变化是按照国家标准的规定改变了一些基本物理量的符号。例如:制冷中最基本的物理量之一“制冷量”(单位为 W),过去用 Q_0 表示,但按照国家标准,符号 Q_0 只能用来表示单位为 J 的热量。因此,参照 GB/T 7725—96《房间空气调节器》中采用的符号,将 Q_0 改成 ϕ_0 。类似地,将一些表示“热流量”的参数,如冷凝器热负荷 Q_h (单位为 W) 改成 ϕ_h 。

本书由吴业正主编,各章的执笔分别是:西安交通大学吴业正(第一章、第五章),西安交通大学朱瑞琪(第二章的 2.1~2.3、第三章、第七章),西安交通大学李新中(第二章的 2.4 和 2.5、第八章),西安交通大学厉彦忠(第四章、第九

章),清华大学李俊明(第六章)。

书后所附多媒体课件(光盘)由西安交通大学吴业正、熊联友、晏刚、侯予、王瑾和张玉文合作开发研制。

本书由中国工程院王浚院士审阅,他在审稿过程中提出了十分宝贵的意见;西安建筑科技大学杨磊教授对内容提出了书面意见;西安交通大学讲师晏刚、研究生马贞俊在稿件处理方面做了不少工作。在此一并表示衷心的感谢。

本书编写过程中参考了许多教授、专家的论著,部分参考文献列在每一章的后面。

由于水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者指正。

作者

2003年6月于西安

主要符号表

拉丁字母

<i>a</i>	汽化率;循环倍率;声速;热扩散率, m^2/s
<i>A</i>	表面积, m^2
<i>c</i>	比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;流速, m/s
<i>COP</i>	性能系数
<i>d</i>	含湿量, kg/kg (干空气);直径, m
<i>D</i>	直径, m ;
<i>E</i>	补偿能
<i>f</i>	吸收器稀溶液再循环倍率;阻力系数;频率, Hz
<i>g</i>	重力加速度, m/s^2
<i>h</i>	比焓, kJ/kg
<i>H</i>	高度, m
<i>k</i>	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
<i>m</i>	质量, kg
<i>M</i>	摩尔质量, kg/mol
<i>n</i>	转速, r/min
<i>p</i>	压强,压力, Pa
Δp	压力损失
<i>P</i>	功率, W
q_m	质量流量, kg/s
<i>Q</i>	热量, J
<i>r</i>	汽化潜热, kJ/kg
<i>R</i>	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;热阻, K/W
<i>s</i>	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
<i>S</i>	熵, J/K
<i>t</i>	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$

T	热力学温度, K
U	内能, J
v	比体积, m^3/kg
V	体积, m^3
W	功, J
w	质量分数; 比功, J/kg ; 容积比功, J/m^3
x	干度, 摩尔分数
y	摩尔分数
z	压缩因子
Z	液化系数

希腊字母符号

β	肋化系数
ρ	密度, kg/m^3
ϕ	制冷量, W; 化学势
η	效率
π	压力比
λ	溶液的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 容积效率(输气系数)
μ	动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
ν	运动粘度, m^2/s
ξ	高低压级压缩机的理论输气量之比
σ	溶液的表面张力, N/m
δ	表示液空进料的含液率; 厚度, m
φ	相对湿度; 平面角, rad; 回收率(分离度); 体积分数
Ω	立体角, sr

下标

a	吸收, 空气
ave	平均
b	纵向
c	横向, 卡诺循环, 冷
cr	临界
d	泵, 露点
D	低压级
e	电, 当量

ex	热交换器
E	蒸发, 膨胀
f	流体, 自由度
g	发生器
G	高压级
H	高压(温), 热泵
i	内侧
j	当量
k	冷凝状态
l	单位长度, 液相
L	低, 理论
m	平均, 机械
max	最大
min	最小
M	常温(压)
o	蒸发状态, 外侧
p	等压过程
pr	液化
R	制冷
s	绝热, 饱和
th	节流
v	凝结
w	污垢

目 录

主要符号表	I
第 1 章 绪论	1
1.1 制冷的定义	1
1.2 制冷和低温技术的研究内容、应用及发展历史	1
1.2.1 制冷和低温技术的研究内容	1
1.2.2 应用	2
1.2.3 发展历史	5
参考文献	7
第 2 章 制冷方法	9
2.1 物质相变制冷	9
2.1.1 相变制冷概述	9
2.1.2 蒸气压缩式制冷	14
2.1.3 蒸气吸收式制冷	15
2.1.4 蒸气喷射式制冷	16
2.1.5 吸附制冷	18
2.2 电、磁、声制冷	23
2.2.1 热电制冷	23
2.2.2 磁制冷	24
2.2.3 声制冷	26
2.3 气体涡流制冷	29
2.3.1 气体涡流制冷的机理分析	29
2.3.2 气体涡流制冷的计算	31
2.4 气体膨胀制冷	32
2.4.1 气体绝热节流制冷循环	32
2.4.2 布雷顿制冷循环	38
2.4.3 斯特林制冷循环	46
2.4.4 维勒米尔制冷循环	49

2.5 绝热放气制冷	52
2.5.1 气体的绝热放气	52
2.5.2 G-M 制冷循环	55
2.5.3 SV 制冷循环	57
2.5.4 脉管制冷机	59
参考文献	60
第3章 蒸气压缩式制冷	63
3.1 可逆制冷循环	63
3.1.1 压缩式制冷的热力学原理概述	63
3.1.2 逆卡诺制冷循环	65
3.1.3 劳伦茨循环	66
3.2 单级蒸气压缩式制冷的理论循环	67
3.2.1 特点及工作过程	67
3.2.2 制冷剂的状态图	68
3.2.3 理论循环	69
3.3 单级蒸气压缩式制冷的实际循环	73
3.3.1 实际循环	73
3.3.2 各种实际因素对循环的影响	74
3.3.3 单级蒸气压缩式制冷机的热力计算	83
3.3.4 单级蒸气压缩式制冷机的变工况特性	89
3.4 蒸气压缩式制冷中的制冷剂	93
3.4.1 概述	93
3.4.2 制冷剂的性质	96
3.4.3 混合制冷剂	103
3.4.4 实用的制冷剂	105
3.4.5 制冷剂热力性质的计算	111
3.5 采用混合制冷剂的单级蒸气压缩式制冷循环	112
3.5.1 理论循环	112
3.5.2 实际循环	113
3.6 多级蒸气压缩制冷循环	115
3.6.1 两级压缩制冷的循环形式	116
3.6.2 两级压缩制冷的系统流程与循环分析	117
3.6.3 两级压缩制冷循环的热力计算	124
3.6.4 两级压缩式制冷机的变工况特性	129
3.6.5 应用离心式制冷机的多级压缩制冷循环	130
3.7 复叠式制冷	131

3.7.1	蒸气压缩式复叠制冷系统与循环	131
3.7.2	复叠式制冷系统设计与使用中的若干问题	134
3.7.3	自行复叠循环	136
3.8	CO ₂ 制冷	137
3.8.1	近临界循环和跨临界循环	137
3.8.2	CO ₂ 跨临界循环的应用装置	139
3.8.3	干冰制备	142
	参考文献	143
第4章	吸收式制冷及气体分离的溶液热力学基础	145
4.1	基本定律	146
4.1.1	拉乌尔定律	146
4.1.2	康诺瓦罗夫定律	147
4.1.3	吉布斯定律	149
4.2	气液相平衡	150
4.2.1	相平衡图	150
4.2.2	溶液的混合与分离	152
	参考文献	156
第5章	吸收式制冷	157
5.1	概述	157
5.1.1	制冷剂与吸收剂	157
5.1.2	制冷性能参数	159
5.2	氨水溶液和溴化锂水溶液的 $h-w$ 图	161
5.2.1	氨水溶液的 $h-w$ 图	161
5.2.2	溴化锂水溶液的 $h-w$ 图	162
5.3	溴化锂吸收式制冷机	164
5.3.1	溴化锂水溶液的性质	164
5.3.2	单效溴化锂吸收式制冷机	170
5.3.3	双效蒸气加热溴化锂吸收式制冷机	184
5.3.4	双效直燃溴化锂吸收式冷热水机	197
5.3.5	双级溴化锂吸收式制冷机	204
5.3.6	提高溴化锂吸收式制冷机性能的途径	208
5.3.7	溴化锂吸收式制冷机制冷量的调节及其安全保护措施	212
5.4	氨吸收式制冷机	214
5.4.1	氨水溶液的性质	215
5.4.2	氨吸收式制冷循环	217
5.4.3	扩散-吸收式制冷机	225

参考文献	228
第6章 热交换过程及换热器	230
6.1 制冷机中热交换设备的传热过程及传热计算方法	230
6.1.1 通过平壁的传热	230
6.1.2 通过圆管的传热	231
6.1.3 通过肋壁的传热	233
6.1.4 平均传热温差与析湿系数	234
6.1.5 换热器传热计算的平均温差法	236
6.2 蒸发器	238
6.2.1 蒸发器的分类与结构	238
6.2.2 蒸发器内的对流换热	247
6.2.3 蒸发器的传热计算	254
6.3 冷凝器	270
6.3.1 冷凝器的分类与结构	270
6.3.2 冷凝器内的对流换热	277
6.3.3 冷凝器的传热计算	281
6.4 蒸发器供应量的自动调节	288
6.4.1 热力膨胀阀	288
6.4.2 热膨胀阀	291
6.4.3 毛细管与浮球阀	295
6.5 制冷系统的传热强化与削弱	298
6.5.1 强化传热的原则及方法	298
6.5.2 蒸发器表面结霜及霜抑制	302
6.5.3 添加纳米颗粒强化传热	305
6.5.4 制冷系统中的隔热	307
参考文献	311
第7章 载冷与蓄冷	314
7.1 传统载冷剂与蓄冷剂	314
7.1.1 对载冷剂性质的要求	314
7.1.2 常用的传统载冷剂	315
7.1.3 传统的蓄冷剂(共晶冰)	316
7.2 环保要求下载冷技术的新发展	317
7.2.1 概述	317
7.2.2 流态冰	317
7.2.3 环保型制冷与载冷系统	319
7.3 蓄冷	322

7.3.1 空调蓄冷概述	323
7.3.2 水蓄冷	324
7.3.3 冰蓄冷	324
7.3.4 气体水合物蓄冷	331
参考文献	335
第8章 液态低温工质的制取	336
8.1 低温工质的性质	336
8.1.1 低温工质的种类及其热力性质	336
8.1.2 空气及其组成气体的性质	338
8.1.3 氢的性质	340
8.1.4 氮的性质	343
8.1.5 低温工质的 p 、 v 、 T 参数计算	346
8.2 气体液化循环	349
8.2.1 概述	349
8.2.2 节流液化循环	351
8.2.3 带膨胀机的液化循环	360
8.2.4 用氮制冷设备提供冷量的氮液化循环	371
8.2.5 天然气液化循环	372
参考文献	376
第9章 气体的低温分离	378
9.1 气体的组成及气液相平衡	378
9.1.1 气体的组成	378
9.1.2 空气的二元系气液平衡	381
9.1.3 空气的氧-氮-氩三元系气液平衡	388
9.2 气体的精馏	391
9.2.1 气体分离的方法	391
9.2.2 液态空气的蒸发与空气的冷凝	403
9.2.3 空气的精馏	406
9.2.4 精馏塔	407
9.2.5 空气二元系精馏过程的计算	419
9.2.6 天然气的精馏	431
参考文献	443
附表	444
附表1 饱和水及饱和水蒸气的热力性质	444
附表2 氮饱和液体及蒸气的热力性质	446
附表3 R22 饱和液体及蒸气的热力性质	449

附表 4	R134a 饱和液体及蒸气的热力性质	452
附表 5	R142b 饱和液体及蒸气的热力性质	453
附表 6	R290 饱和液体及蒸气的热力性质	455
附表 7	R600a 饱和液体及蒸气的热力性质	457
附表 8	正常氨饱和液体及蒸气的热力性质(R702)	459
附表 9	氨饱和液体和蒸气的热力性质(R704)	459
附表 10	氨饱和液体和蒸气的热力性质(R728)	460
附表 11	液态空气在泡点线、蒸气在露点线上的热力性质(R729)	461
附表 12	氧饱和液体和蒸气的热力性质(R732)	462
附表 13	二氧化碳饱和液体和蒸气的热力性质(R744)	463

第 1 章 绪 论

制冷和低温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,低温抑制食品发酵、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,有些纯金属或合金当温度降低到某一数值时出现超导性。人为地利用这些特性,需要人工创造低温环境。通过降温产生物态变化,可以使混合气体分离、气体液化。扩散和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。空间和遥感遥控技术更是与制冷技术紧密联系。

综上所述,随着科学技术的发展以及人民生活水平的不断提高,制冷和低温技术在工业、农业、国防、建设、科学研究等国民经济各个部门中的作用和地位日益重要。

1.1 制冷的定义

制冷是指用人工的方法在一定时间和一定空间内将物体冷却,使其温度降低到环境温度以下,并保持这个温度。

按照所获得的温度,通常将制冷的温度范围划分为以下几个领域:120 K 以上,普冷;120 ~ 0.3 K,深冷(又称低温);0.3 K 以下,极低温。

由于温度范围不同,所采用的降温方式,使用的工质、机器设备以及依据的具体原理有很大差别。

1.2 制冷和低温技术的研究内容、应用及发展历史

1.2.1 制冷和低温技术的研究内容

制冷和低温技术的研究内容可以概括为以下四个方面:

(1) 研究获得低于环境温度的方法、机理以及与此对应的循环,并对循环进

行热力学的分析和计算。

(2) 研究循环中使用的工质的性质,从而为制冷机和低温装置提供合适的工作介质。因工质在循环中发生状态变化,所以工质的热物理性质是进行循环分析和计算的基础数据。此外,为了使这些工质能实际应用,还必须掌握它们的一般物理、化学基础。

(3) 研究气体的液化和分离技术。例如液化氧、氮、氢、氦等气体,将空气或天然气液化、分离,均涉及一系列的制冷和低温技术。

(4) 研究所需的各种机械和设备,包括它们的工作原理、性能分析、结构设计。此外还有热绝缘问题,装置的自动化问题,等等。

上述前三个方面构成制冷与低温技术原理的基本研究内容,第四方面涉及具体的设备和装置。

1.2.2 应用

制冷和低温技术最早用来保存食品和降低房间温度。随着技术和社会文明的进步,其应用几乎渗透到生产技术、科学研究各个领域,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技术应用最量大面广的领域。

商业制冷主要用于各类食品冷加工、冷藏贮存和冷藏运输,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。现代的食品工业,从生产、贮运到销售,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、餐厅使用的小型装配式冷库、冷藏柜、各类冷饮设备、食品冷藏冷冻展示柜,直至家庭用的电冰箱。

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。

体育、游乐场所除采用制冷提供空气调节外,还用于建造人工冰场。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,如广州溜冰俱乐部,冰场面积 $1\ 000\text{ m}^2$,年上冰人次已达20万;上海杰美体育中心的室内冰场,面积达 $1\ 200\text{ m}^2$ 。

(2) 工业生产及农牧业

许多生产场所需要生产用空气调节系统,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,为各生产环境提供恒温、恒湿条件,以保证产品质量或机床、仪表的精度。

机械制造中,对钢进行低温处理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、石油裂解、合成橡胶、生产化肥均需要制冷。在钢铁工业中,高炉鼓风需要用制冷的的方法先除湿,再送入高炉,以降低焦铁比,提高铁水质量。

在农牧业中,利用低温对农作物种子进行低温处理;保存良种牲口的精液,以便进行人工授精。在交通运输业中,已有采用压缩天然气的汽车。因液化天然气存储体积小,能量密度大,今后液化天然气的发展必定更具优势。

(3) 建筑工程

在挖掘矿井、隧道、建造江河堤坝时,或者在泥沼、沙水中掘进时,采用冻土法保持工作面,避免坍塌和保证施工安全。拌和混凝土时,用冰代替水,借冰的熔化热补偿水泥的固化反应热,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。

英吉利海底隧道全长 52 km,是迄今世界上最长的隧道。列车以 160 km/h 的速度穿过隧道时,空气温度将上升到 49 ~ 55 °C,必须进行降温处理。为此采用了 8 套冷水机组,分装在隧道两侧,供隧道降温,每套机组的能力达到 6 000 ~ 7 000 kW。

(4) 科学研究

科学研究往往需要人工的低温环境。例如:为了研究高寒条件下使用的发动机、汽车、坦克、大炮的性能,需要先在相应的环境条件下作模拟试验;航天仪表、火箭、导弹中的控制仪,也需要在地面作模拟高空环境下的性能试验,低温、低压环境实验装置为这类试验提供了条件。

气象科学中,云雾室需要 -45 ~ 30 °C 的温度条件。云雾室用于人工气候实验,研究雨滴、冰雹的增长过程,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

冷冻医疗是可靠、安全、有效、易行和经济的治疗方法,特别是用于治疗恶性肿瘤。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,手术时的低温麻醉。细胞组织、疫苗、药品的冷保存,用真空冷冻干燥法制作血干、皮干,等等。可以说,现代医学已离不开制冷技术。

(6) 空间技术