



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与低温装置

吴业正 厉彦忠 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与低温装置

吴业正 厉彦忠 主编

吴业正 陈焕新 厉彦忠 曹晓林 鱼剑琳
汪荣顺 安刚 白红宇 侯予 石玉美

编著

高等教育出版社

内容提要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,主要内容包括绪论、制冷循环和机组、食品冷冻技术与保鲜设备、冷藏装置、固定式空调系统及装置、移动空调装置、空气分离装置、天然气液化装置、氢氨液化装置和低温制冷机。制冷机组和低温制冷机是制冷与低温装置的核心部分,本书较全面地分析了各种类型的蒸气压缩式制冷机组、吸收式制冷机组和低温制冷机。在阐述各种装置时,着重讲述其工作原理、主要结构及热负荷计算。对一些近年来发展较快、与节能环保有密切联系的技术和装置,如冰蓄冷技术及装置,书中也有介绍。

本书可作为高等院校能源动力类专业本科生的教材,也可供制冷及低温工程等相关专业的研究生及从事该领域工作的科技工作者自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

制冷与低温装置/吴业正,厉彦忠主编. —北京:高等教育出版社,2009.6

ISBN 978 - 7 - 04 - 026132 - 5

I. 制… II. ①吴… ②厉… III. ①制冷装置 - 高等学校 - 教材②低温装置 - 高等学校 - 教材 IV. TB657

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 045750 号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 薛立华 封面设计 刘晓翔
责任绘图 尹 莉 版式设计 张 岚 责任校对 俞声佳
责任印制 毛斯璐

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 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 国防工业出版社印刷厂

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 960 1/16
印 张 33.75
字 数 630 000

版 次 2009 年 6 月第 1 版
印 次 2009 年 6 月第 1 次印刷
定 价 42.70 元

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

物料号 26132 - 00

前 言

制冷与低温装置是将生产冷量的制冷机械与利用冷量的设备结合在一起的装置。按照冷量利用方式的不同,制冷与低温装置的类型多种多样。因各装置对应的温度范围不同,过去将制冷装置和低温装置分设成两门课程,使用两本教材。随着本科生培养计划的调整,一些院校已将制冷装置与低温装置合并成一门课程,并制定了相应的教学大纲,因而本书的编写就提上了日程,并被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

制冷与低温装置是以耗能为前提的装置,本书阐述了各种装置的能耗分析及节能途径。这类装置的应用范围较广,从日常生活、生产到航空、航天领域,所涉及的装置类型众多。为了按教学大纲规定的学时授课,编著者将各种装置按其共性归类,每个类型中介绍若干典型装置,使读者学习后在掌握基本内容的基础上能够举一反三,解决科研、生产中的实际问题。

本书可与缪道平、朱瑞琪、吴业正等编著的《制冷与低温技术原理》、《制冷压缩机》及《制冷装置自动化》配套使用。根据教学计划,“制冷与低温技术原理”及“制冷压缩机”课程应开设在“制冷与低温装置”课程之前,因此建议读者在学习本课程前宜先阅读上述两门课程的相应教材,为学习本课程奠定基础。

参加本书编写的有:西安交通大学吴业正(第1、2章),华中科技大学陈焕新(第2、4、6章),中南大学曹晓林(第3、4章),西安交通大学鱼剑琳(第5章、附录)、厉彦忠(第7章),上海交通大学汪荣顺、石玉美(第8章),航天科技集团101研究所安刚、中国科学院等离子体研究所白红宇(第9章),西安交通大学侯予(第10章)。全书由吴业正、厉彦忠任主编。

浙江大学陈国邦教授审阅了本书并提出了十分宝贵的意见。西安交通大学能源与动力工程学院研究生徐荣吉、李亚军在稿件处理方面付出了许多辛勤的劳动。本书在编写过程中还参考了许多专家、学者的论著(部分参考文献已列于各章之后)。在此一并表示感谢。

书中不足之处,敬请读者指正。

编著者

2008年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 制冷和低温装置的类型	2
1.2 制冷和低温装置在我国的发展	3
参考文献	5
第2章 制冷循环和机组	6
2.1 制冷循环	6
2.1.1 在恒温的热汇和低温热源之间运转的制冷循环	6
2.1.2 压缩式制冷循环	8
2.2 制冷剂与载冷剂	27
2.2.1 制冷剂	27
2.2.2 载冷剂	32
2.3 制冷机组	33
2.3.1 基于蒸气压缩式制冷循环的机组	33
2.3.2 吸收式机组	80
2.3.3 热泵式机组	96
参考文献	100
第3章 食品冷冻技术与保鲜设备	103
3.1 食品冷加工技术	103
3.1.1 食品储藏保鲜机理	103
3.1.2 食品冷藏条件	105
3.1.3 食品的气调保鲜技术	109
3.1.4 食品的真空冷冻干燥技术	111
3.2 冷库	114
3.2.1 冷库的类型、组成及容量确定	114
3.2.2 冷库的建筑结构及隔热结构	119
3.2.3 冷库热负荷计算	124



3.2.4 冷库制冷系统及制冷设备	130
3.2.5 食品冻结、解冻与设备	135
3.3 气调库	146
3.3.1 气调库的结构	146
3.3.2 气调设备	148
3.4 真空冷冻干燥设备	152
3.4.1 冻干机的制冷系统	152
3.4.2 真空冷冻干燥工艺	155
3.5 食品的真空冷却红外线脱水保鲜技术	156
参考文献	159
第4章 冷藏装置	162
4.1 生活及商业用冷藏装置	162
4.1.1 冷柜	162
4.1.2 展示柜	168
4.1.3 电冰箱	177
4.1.4 冰淇淋机	186
4.1.5 热负荷计算	188
4.2 运输用冷藏装置	191
4.2.1 冷藏运输的分类	191
4.2.2 铁路冷藏运输	192
4.2.3 汽车冷藏运输	197
4.2.4 水上冷藏运输	201
4.2.5 冷藏集装箱	201
参考文献	207
第5章 固定式空调系统及装置	209
5.1 中央空调系统	209
5.1.1 全空气系统	209
5.1.2 空气-水系统	211
5.1.3 变制冷剂容量系统	213
5.1.4 冰蓄冷空调系统	215
5.2 空气调节装置	220
5.2.1 组合式空调机组	220
5.2.2 风机盘管机组	223
5.2.3 变风量末端装置	225
5.3 冰蓄冷装置	228

5.4 分散式空调装置	230
5.4.1 分体式空调器	231
5.4.2 柜式空调机	234
5.4.3 恒温恒湿空调机	235
5.5 空调的冷、湿负荷	237
5.5.1 室内、外空气计算参数的确定	238
5.5.2 冷、湿负荷的计算方法	241
5.5.3 空调房间送风状态和送风量的确定	246
5.6 冷水(热泵)机组的选择	249
参考文献	252
第6章 移动空调装置	254
6.1 汽车空调	254
6.1.1 汽车空调制冷装置概述	254
6.1.2 汽车空调的制冷设备	261
6.1.3 汽车空调制冷装置的控制方式与节能	265
6.1.4 汽车空调负荷的确定	267
6.2 列车空调	271
6.2.1 列车空调装置概述	271
6.2.2 列车空调制冷设备	274
6.2.3 列车空调制冷装置的控制	277
6.2.4 地铁与轻轨空调装置	278
6.3 船舶空调	280
6.4 飞行器用空调	287
6.4.1 飞机空调	287
6.4.2 航天飞行器空调	291
6.5 坦克、装甲车空调	296
参考文献	299
第7章 空气分离装置	302
7.1 空气的净化	302
7.1.1 空气的除尘系统	302
7.1.2 空气的净化原理与方法	307
7.1.3 杂质的控制指标	317
7.2 空分设备流程组织	318
7.2.1 空气低温分离系统组织	318

7.2.2	空分装置的制冷系统	321
7.2.3	空分装置的精馏系统	333
7.2.4	空分装置的换热系统	336
7.3	空分流程系统中的新技术	338
7.3.1	增压透平膨胀机技术	338
7.3.2	填料塔技术	341
7.3.3	全精馏无氢制氩技术	344
7.3.4	内压缩工艺流程技术	347
7.3.5	高压换热器技术	349
7.4	空分装置工艺流程的设计与计算	352
7.4.1	空分装置工艺流程的设计	352
7.4.2	空分装置工艺流程参数的确定	353
7.4.3	空分装置工艺流程的计算方法	354
7.4.4	空分装置的能耗分析	361
	参考文献	367

第8章 天然气液化装置

8.1	天然气的净化	369
8.1.1	酸性气体的脱除	370
8.1.2	水分的脱除	379
8.1.3	其他杂质的脱除	385
8.2	天然气液化装置的分类	386
8.2.1	根据负荷形式分类	386
8.2.2	根据流程方式分类	388
8.3	级联(复叠)式液化装置	388
8.4	混合制冷剂(MRC)液化装置	391
8.4.1	采用闭式MRC循环的液化装置	391
8.4.2	带预冷的MRC循环液化装置	392
8.4.3	采用开式MRC循环的液化装置	394
8.5	利用膨胀机制冷的液化装置	395
8.5.1	天然气膨胀制冷的液化装置	395
8.5.2	氮气膨胀制冷的液化装置	396
8.5.3	氮-甲烷膨胀制冷的液化装置	397
8.5.4	制冷循环的选择	398
8.6	液化天然气的汽化及冷能回收	399
8.6.1	液化天然气的汽化	399
8.6.2	液化天然气冷能的回收利用	405

参考文献	409
第9章 氢氮液化装置	412
9.1 氢液化装置	412
9.1.1 氢原料气及其纯化	412
9.1.2 氢气的液化	414
9.1.3 氢液化流程的特点	416
9.1.4 氢制冷的氢液化装置	420
9.1.5 氦氮制冷的氢液化装置	427
9.1.6 氢的安全与防爆	433
9.2 氢液化装置设计	435
9.2.1 流程的组织	435
9.2.2 设计参数的选择	438
9.2.3 流程的设计计算	440
9.3 氮液化装置	441
9.3.1 氮气的液化及其用途	441
9.3.2 基本的氮液化循环及特点	442
9.3.3 氮制冷机	447
9.3.4 温度低于 4.2 K 的制冷方法	449
9.3.5 典型的氮液化装置及其应用	451
参考文献	464
第10章 低温制冷机	466
10.1 低温制冷技术概述	466
10.1.1 低温制冷机的分类	466
10.1.2 低温制冷机的应用	469
10.2 斯特林制冷机	472
10.2.1 斯特林制冷循环及制冷机工作过程	472
10.2.2 整体式斯特林制冷机	474
10.2.3 分置式斯特林制冷机	475
10.3 G-M 制冷机	479
10.3.1 G-M 制冷机工作原理	479
10.3.2 各温区 G-M 制冷机	482
10.4 脉管制冷机	485
10.4.1 基本型脉管制冷机	485
10.4.2 改进型脉管制冷机	487
10.5 逆布雷顿制冷机	495

10.5.1 逆布雷顿制冷循环	496
10.5.2 逆布雷顿制冷机	499
参考文献	504
附录	506
附录 5-1 部分工业建筑的室内温湿度及其允许波动范围	506
附录 5-2 围护结构瞬变传热引起冷负荷计算的有关数据	508
附录 5-3 透过玻璃窗日射得热形成冷负荷计算的有关数据	519
附录 5-4 人体、照明散热冷负荷系数	522
附录 5-5 夏季(7月)部分城市日射得热因数	523
附录 5-6 空调器常用单位换算	524

第 1 章 绪 论

随着生产技术和人民生活水平的提高,进入生产和商品流通领域的制冷和低温装置日益增多。例如已得到广泛应用的空气调节装置,不但为人们的工作和生活提供舒适的环境,而且已成为精密零件加工、计算机房运行、仪器仪表生产等行业的必要生产条件。作为现代物流重要内容之一的冷链,更是集冷库、冷柜、冰箱和冷冻冷藏运输设备等制冷装置于一体的庞大物流系统。科学研究和国防建设,除了需要装备常用的制冷和低温装置外,还需要有一些特殊的装置,如用于模拟空间环境的氦制冷装置。

制冷装置和低温装置的划分,以其运行温度范围为依据。在温度 120 K 以上运行的装置称为制冷装置;在温度低于 120 K 范围内运行的装置称为低温装置。表 1-1 中列出了不同温度范围内制冷和低温装置的一些应用。

表 1-1 制冷和低温装置在不同温度范围内的一些应用

温度范围		应用举例
T/K	t/°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(丙烷等)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,氢及氦气还原,液氧、液氮、空间低温环境模拟(热沉)
50 ~ 15	-223 ~ -258	氖和氦液化,宇航员出舱空间真空环境模拟(氦低温泵)
15 ~ 4	-258 ~ -269	超导,氮液化
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

为了提高制冷和低温装置的性能,使它们在生产、使用中降耗、节能和与环境友好,必须开发和应用新技术、新方法,生产和使用新装置。

1.1 制冷和低温装置的类型

按性能和用途,制冷和低温装置大致有以下类型。

(1) 冷冻、冷藏装置

这类装置主要用于各种食品的冷加工、冷藏储存和冷藏运输,使其保质保鲜,满足市场的需求。食品从冷加工到消费者的使用,要经过加工、运输、分配、消费等一系列环节。每个环节都需要相应的制冷装置,如食品冷加工装置、大型冷库、冷藏运输设备、小型冷库、展示柜、冷柜、冷饮机、电冰箱等。这些装置不但要性能良好,运行可靠,而且彼此间要合理匹配。

冷冻、冷藏装置除用于食品保质保鲜外,还用于其他领域,如医用领域中药品、疫苗的保存,组织细胞的保存,真空冷冻干燥装置制作血干、皮干等。

(2) 空气调节及降温装置

舒适性空调为人们提供舒适的环境,如家庭用的房间空调器,宾馆、办公楼用的中央空调系统,各种载人交通工具使用的空调装置,均为人们提供舒适的环境。有些场合需要生产性的空调,如装备在计算机房的恒温、恒湿机组,手术室和特殊护理病房用的洁净空调等。

为了满足环保和节能要求而开发的热泵装置,将供热和制冷有机地结合,在20世纪80年代开始快速发展,并推动了可再生洁净能源的利用,成为空调装置发展的重要方向之一。

在中央空调系统中配置蓄冷装置,使白天的部分高峰电负荷转移到后半夜,既调节了供电系统的负荷,又降低了用户的开支。

(3) 生产用装置

石油化工行业采用与制冷有关的生产工艺,将取得显著的经济效益。如:生产聚乙烯时采用冷凝工艺,可提高反应器内单位时间、单位体积的聚乙烯产量;在核电工业中,压水堆核电站运行时,必须对核岛安全壳、反应堆堆坑等设施通风冷却,以保证连续运行;在大型水电站建设中,只有采用低温混凝土,吸收混凝土在凝固过程中放出的热量,才能防止坝体发生裂缝。为保证混凝土拌和到形成低温(如7℃)的混凝土,使用集装箱移动式冷水站提供低温冷水;矿山凿井中采用的冷冻法凿井,借助制冷装置,用人工制冷技术暂时加固井筒周围的不稳定地层或隔绝地下水流。

现代农牧业也需要制冷低温装置。对农作物种子低温处理、保存良种牲口的精液用于人工授精、培育适应高寒地区的农作物,均需使用制冷低温装置。

(4) 空间技术用装置

火箭推进器所需的液态氧和液态氢在低温下制取,它们由气体液化和分离装置提供。人造卫星使用的红外探测器也离不开低温环境,否则难以录取优质图像,这就促进了辐射制冷器、固体制冷器、斯特林制冷机和维勒米尔制冷机及相应装置的发展。

(5) 实验用装置

为研究人工降雨、防冰雹的技术,需要能提供 $-45 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围的云雾室,用于研究雨滴、冰雹的增长过程,各种催化方法及扰动时对云雾的影响。

应用液态氮、液态氦的低温泵,可使密闭容器内的气体冷凝而获得高真空。它在航天器的地面模拟实验中起重要作用。而以微型制冷机与真空系统构成的低温冷凝泵,广泛用于高真空技术,是半导体工业和低温物理研究的重要工具。

在高寒环境下使用的仪器、仪表、飞机、坦克均需在地面作模拟实验。制冷、低温装置是提供高寒环境的不可或缺的装置。

至于 ^3He 液化与 ^4He 超流性中一些物理特性的研究、低温下约瑟夫逊效应的研究,更需要低于 4 K 的温度条件。

1.2 制冷和低温装置在我国的发展

我国虽在采集、储存和应用天然冰方面有悠久历史,但应用以现代制冷技术为基础的制冷装置于生活和生产,则始于19世纪80年代,1880年在上海筹建“上海机器制冰厂”。第一次世界大战期间,冷冻肉食品的需要量激增,为此在中国建起了多座冷冻、冷藏仓库,中国制冷行业的发展开始起步。1933年,较大的制冷装置已超过30套。至1948年,全国肉类食品冷库容量达到三万吨,水产类冷库的生产能力达到冻结580吨/日,冷藏13200吨/次。这些冷库的冷冻、冷藏设备主要从国外进口,仅在上海地区有一些小厂生产少量制冷设备的备件,进行小型制冷设备的维修或组装进口产品和设备。

我国在公共建筑上安装空调设备,始于20世纪初的上海。1937年由我国自己建造的中国银行大楼,安装了进口的制冷量为17000kW的空调设备。随后上海的一些电影院、剧院纷纷采用中央空调系统,并逐步在南方(如广州)和北方(如长春)推广。

我国的近代冷藏运输虽始于20世纪初,但直到1949年也只有不超过90辆破损不堪的冷藏火车。至于海上冷藏运输,则因当时的制冷技术落后、造船能力薄弱而未能实现。

1949年以前,我国空气分离及液化设备的应用几近空白。从1934年在青岛首次安装小型制氧设备至1949年,仅在上海、青岛等地有不到100套空气分

离装置,总制氧能力不到 $3\ 500\ \text{m}^3/\text{h}$ (标准状态下)。

我国的制冷机制造业,在20世纪30年代虽有了萌芽,但直到1949年仍只有修配及安装性质的小厂,而用于制氧的空分设备全部依赖进口。

1949年后,由于对制冷装置的需求日益增多,开始了制冷装置生产基地的建设。20世纪60年代初,在上海建成了比较完整的制冷装置制造中心,主要通过仿制进口产品,生产制冷机械和设备。1959年以后,进入了自行设计、制造产品的时期,并向专业方向发展。在此期间,开发了中小型活塞式制冷压缩机系列产品,开始了离心式制冷压缩机、吸收式制冷机的研制;设计、生产了一批氨制冷设备及一些制冷系统控制元器件;在冷冻、冷藏方面生产出采用氨制冷机的大中型冷库成套设备和制冰设备,以及采用氟利昂12的小型冷库。同时,也生产一些房间空调器、恒温恒湿机。20世纪80年代以后,由于制冷空调市场的急速发展,吸引了大量资金,揭开了中国制冷空调行业腾飞的序幕。进入20世纪90年代,我国成为冷冻、空调装置第一生产大国,低温装置的生产也有很大的发展。

在空调、热泵技术方面,我国从20世纪80年代初开发出分体式空调器,90年代开始生产压缩机转速可变的空调器,并开发出全封闭、半封闭式空气源热泵型冷热水机组。在20世纪90年代,水源热泵机组和大地耦合热泵系统均得到迅速的发展。20世纪80年代初,我国洁净空调技术在医院手术室等处开始应用,90年代进一步深入微电子工业领域。2001年底,国家发布了修订后的洁净厂房设计规范。

为了将白天的高峰电负荷转移到后半夜,部分空调工程中采用了蓄冷技术。2000年国家标准《采暖通风与空气调节设计规范》中增加了蓄冷蓄热条款。

在20世纪80年代,我国速冻食品以每年6%~7%的速率增长,1991年产量达96万吨,90年代末已达到300万吨。1982年开始建造千吨金属组装式冷库,1994年15000吨金属组装式气调冷库开始研制。

在低温装置方面,从1992年至2001年研制了大型乙烯冷箱,现已具备设计制造 $(6\sim 8)\times 10^5$ 吨/日级的大型乙烯冷箱的能力。1996年至2000年研制的空气分离设备,单位分离氧能耗低于 $0.45\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3\text{O}_2$ (标准状态),氧的提取率达99%,氮的提取率达67%。1998年至2002年完成移动式空气分离设备的研制,并在最高海拔4 km的环境下做了实验,还在高温40℃和低温-40℃下进行了实验。

为了保护环境,研制开发了一些产品,1996年至2002年开发了污水富氧曝气成套设备。2001年完成一家制药厂污水综合治理1000吨/日的高浓度难解制药废水处理工程。根据保护臭氧层的《蒙特利尔议定书》和限制温室气体排放的《京都议定书》,中国制冷和空调行业已完全淘汰CFCs类工质。今后将逐步淘汰HCFCs类工质和温室效应气体,并通过开发高效节能技术降低CO₂排

放,为国民经济可持续发展做贡献。

参 考 文 献



- [1] 中国制冷学会. 中国制冷史. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- [2] 张朝晖. 中国制冷空调行业技术创新与发展. 制冷与空调, 2007, 7(1): 1-4.
- [3] Stoecker W F. Refrigeration and air-conditioning. 2nd edition. New York: McGraw-Hillbook Company Ltd. , 1982.
- [4] Stoecker W F. 制冷与空调. 陈国邦, 胡熊飞, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [5] ASHRAE. Handbook of fundamental. Atlanta: ASHRAE Inc. , 1996.
- [6] 吴业正, 韩宝琦, 朱瑞琪. 制冷原理和设备. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 1997.
- [7] 吴业正, 朱瑞琪, 李新中, 等. 制冷与低温技术原理. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [8] Yu B F, Wu Y Z, Wang Z G. Phase-out and replacement of CFCs in China. Bulletin of IIR, 2000(1): 3-12.

第 2 章 制冷循环和机组

制冷过程就是利用物理过程中的吸热效应使物体温度降至环境温度以下,并维持此温度的过程。为了完善制冷过程,需要研究制冷循环,开发或选用所需设备。

2.1 制冷循环

通过制冷循环,可以使物体的温度在要求的时间内保持在环境温度以下。

2.1.1 在恒温的热汇和低温热源之间运转的制冷循环

在制冷循环中,工质从低温处吸热,此处称为低温热源;工质向高温处放热,此处称为热汇。当恒温的低温热源温度为 T_l 、恒温的热汇温度为 T_h 时,理想的制冷循环就是逆卡诺循环。它由两个可逆的等温过程和两个等熵过程组成,见图 2-1。图中 4-1 为等温吸热过程,1-2 为等熵压缩过程,2-3 为等温放热过程,3-4 为等熵膨胀过程。

1. 逆卡诺循环的性能系数

对于 1 kg 制冷剂,每一循环的吸收量 q_0 为

$$q_0 = T_l(s_1 - s_4)$$

放热量 q_h 为

$$q_h = T_h(s_2 - s_3)$$

输入比功 w_c 为

$$w_c = q_h - q_l = (T_h - T_l)(s_1 - s_4)$$

性能系数 COP_c 为

$$COP_c = q_l/w_c = T_l/(T_h - T_l)$$

上式表明,制冷循环的性能系数可以小于 1、等于 1 或大于 1。

2. 不可逆过程对制冷循环性能的影响

为了说明不可逆过程对循环性能的影响,取吸热时的传热温差为 ΔT_h 和

ΔT_l , 此时制冷循环为 $1'-2'-3'-4'-1'$, 见图 2-2。

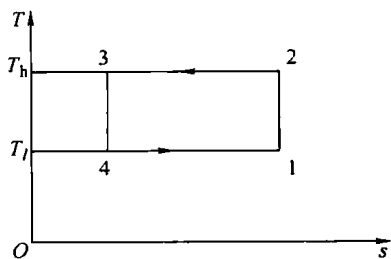


图 2-1 逆卡诺循环

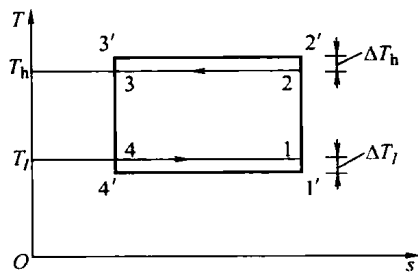


图 2-2 有传热温差的不可逆制冷循环

1 kg 制冷剂的吸热量 $q_{l, \text{irev}}$ 为

$$q_{l, \text{irev}} = (T_l - \Delta T_l)(s_{1'} - s_{4'})$$

放热量 $q_{h, \text{irev}}$ 为

$$q_{h, \text{irev}} = (T_h + \Delta T_h)(s_{2'} - s_{3'})$$

与理想循环相比, 1 kg 制冷剂的吸热量减少了 $\Delta T_l(s_{1'} - s_{4'})$, 放热量增加了 $\Delta T_h(s_{2'} - s_{3'})$

输入比功为 w_{irev} 为

$$w_{\text{irev}} = (T_h - T_l + \Delta T_h + \Delta T_l)(s_{1'} - s_{4'})$$

比理想循环增加了 $\Delta w_{\text{irev}} = (\Delta T_h + \Delta T_l)(s_{1'} - s_{4'})$, 相当于面积 $2-2'-3'-3-2$ 与面积 $1'-1-4-4'-1'$ 之和。性能系数 COP_{irev} 为

$$\text{COP}_{\text{irev}} = \frac{(T_l - \Delta T_l)(s_{1'} - s_{4'})}{(T_h - T_l + \Delta T_h + \Delta T_l)(s_{1'} - s_{4'})} = \frac{T_l - \Delta T_l}{T_h - T_l + \Delta T_h + \Delta T_l} \quad (2-1)$$

为了表达之简便, 后面将不可逆循环中各参数的下标“irev”省略, 即将 w_{irev} 写成 w , 将 COP_{irev} 写成 COP 。

与具有相同的低温热源和热汇条件的可逆循环相比, 不可逆循环的 COP 降低。用于衡量制冷循环不可逆程度的参数循环效率 η 为

$$\eta = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_c} \quad (2-2)$$

由于实际循环的性能系数 COP 始终低于同样温度条件下可逆循环的性能系数 COP_c , η 必小于 1。

例 2-1 按图 2-2, 假设热汇温度 $T_h = 293 \text{ K}$, 低温热源温度 $T_l = 255 \text{ K}$, 传