



河南省“十二五”普通高等教育规划教材

ZHILENG JISHU

制冷技术

(第二版)

时阳 / 主编



中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

河南省“十二五”普通高等教育规划教材

制 冷 技 术

(第二版)

时 阳 主编

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

制冷技术/时阳主编. —2 版. —北京: 中国轻工业出版社, 2015. 6

河南省“十二五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5184-0357-8

I. ①制… II. ①时… III. ①制冷技术—高等学校—教材 IV. ①TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 078202 号

内 容 简 介

本书循序渐进地介绍了制冷基本原理、主要制冷设备和小型制冷装置。全书共分 15 章, 分别系统全面地讨论了制冷方法、制冷的热力学基础、单级蒸汽压缩制冷循环、制冷剂、载冷剂与贮冷剂、多级压缩及复叠式蒸汽压缩制冷循环、应用非共沸混合制冷剂的制冷循环、溴化锂吸收式制冷、热电制冷、制冷换热器的传热学基础、冷凝器、蒸发器、节流机构、制冷装置的设计、小型冷藏装置和小型空调装置。本书的读者对象是制冷及低温技术或建筑环境与设备工程专业(方向)的本、专科学

责任编辑:王 淳

责任终审:孟寿萱

封面设计:锋尚设计

版式设计:宋振全

责任校对:燕 杰

责任监印: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:三河市万龙印装有限公司

经 销:各地新华书店

版 次:2015 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:22.75

字 数:500 千字

书 号:ISBN 978-7-5184-0357-8

定价:42.00 元

邮购电话:010-65241695 传真:65128352

发行电话:010-85119835 85119793 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邮购联系调换

150272J1X201ZBW

第二版前言

《制冷技术》第一版出版以来，已经过去了近十年的时间。在此期间，制冷技术的研究和应用又有不小的进展。现在，制冷剂已更加强调保护大气臭氧、减少温室气体排放，二氧化碳和碳氢化合物已得到广泛应用，热泵技术更加成熟，制冷装置效率更高。

根据作者应用第一版的教学实践和学生反馈，特别是应用和参考第一版的其他老师的宝贵建议，作者对全书内容进行了更新。在确保理论基础坚实和知识结构完整的基础上，删去了一部分艰深的内容，加入了当代科技发展的一些知识，并在每一章后加入思考题。目的是使学生在学习时更容易理解，能将所学知识应用于现时生产实践；教师授课更为方便。

本书由时阳主编，参加编写的人员为郑州轻工业学院胡春霞（2、8、9、11章）、李改莲（3、5、13章）、金听祥（4、6、10、12章），河南工程学院陈爱东（绪论、1、7、14、15章）。

虽然本书原稿出自十余年教案，第一版在教学中应用也几近十年，且编审人员长期从事教学工作，并有多年的制冷工程和制冷设备设计实践经验，但由于学术水平和见识所限，对于书中的不足，恳请读者指正。

作者

2015年5月

第一版前言

随着人民生活水平的提高，工业、农业、商业和服务业的快速发展，制冷技术已广泛地应用于生产和生活的各个方面。近年来，制冷技术飞速发展，产品日新月异，对其他工业技术给予强有力的支持。与基础科学及工程技术的相辅相成，制冷技术在各领域的应用会越来越多。应用范围的拓展，促进了制冷技术的进步。当前社会的进步，人类对能源高效利用、技术与环境和谐的要求越来越高，也对制冷技术提出了新的要求。

本书是在长期授课所用讲义的基础上进行编写的，以蒸汽压缩式制冷为主，兼收溴化锂吸收式制冷和热电制冷。应用工程热力学基本理论，较全面地讨论了制冷工作原理、制冷机的性能、制冷剂的性质、制冷系统热力计算；应用传热学基本知识，较详细地说明了制冷热交换设备的流动与换热方式、基本结构与设计计算；综合应用工程热力学和液体力学基本概念，较系统地对膨胀阀和毛细管等节流机构的工作原理和计算进行了介绍。著者力图对制冷技术进行清晰明了、但简明扼要的阐述。

为了使读者不仅能了解工作原理和设计方法，而且能够在工程实际中加以应用，对于制冷循环、制冷换热器和小型冷藏装置最基本的计算附有例题，对于应用非共沸混合制冷剂的小型制冷系统的流程附有工程实例图。

本书由时阳主编，朱兴旺、姬鹏先为副主编，参加编写的人员为郑州轻工业学院时阳（绪论、2、5、10、13章）、姬鹏先（4、8章）、朱兴旺（9、11章），华北水利水电学院周国峰（6、12章），河南工程学院陈爱东（1、7、15章）、段焕林（3、14章）。

在编写和稿件审阅中得到曼华、徐娜子、黄冬梅、范子慧、王天喆、朱玉丽、郭上玲、郑艳、邱溪媛、王丹利、林琦等老师的指教，在此表示感谢。

虽然编审人员长期从事教学工作，并有多年的制冷工程和制冷设备设计实践经验，但由于学术水平和见识所限，想必有许多欠妥和谬误之处。对于书中的不足，恳请读者指正。

作者

2007年5月

目 录

绪论	1
1 制冷方法及热力学基础	4
1.1 各种制冷方法	4
1.2 液体气化制冷	5
1.3 气体绝热膨胀制冷	5
1.4 劳伦兹循环	8
2 制冷剂、载冷剂与贮冷剂	10
2.1 制冷剂概述	10
2.2 制冷剂对环境的影响	13
2.3 制冷剂的性质	15
2.4 混合制冷剂	21
2.5 常用制冷剂	23
2.6 载冷剂	27
2.7 贮冷剂	30
2.8 与制冷剂相配合的润滑油简介	31
3 单级蒸汽压缩制冷循环	35
3.1 预备知识	35
3.2 单级蒸汽压缩制冷理论循环	36
3.3 过冷、过热及回热循环	40
3.4 单级压缩制冷实际循环与制冷机的热力计算	48
3.5 制冷机的性能与工况	53
3.6 CO ₂ 跨临界制冷循环	59
4 多级压缩及复叠式蒸汽压缩制冷循环	65
4.1 采用多级压缩及复叠式制冷的原因	65
4.2 两级压缩制冷循环	66
4.3 两级压缩循环中间压力的确定	73
4.4 两级压缩制冷机的变工况特性	75
4.5 复叠式制冷	76
5 溶液热力学基础	85
5.1 溶液及其基本定律	85
5.2 两元溶液的相图	92
5.3 溶液的基本热力过程	101
6 应用非共沸混合制冷剂的制冷循环	106
6.1 非共沸混合制冷剂的应用及循环的特点	106
6.2 单级压缩无分凝非共沸混合制冷剂制冷循环	108
6.3 单级压缩分凝循环	110
6.4 两级压缩非共沸混合制冷剂制冷循环	116

7 溴化锂吸收式制冷	120
7.1 概述	120
7.2 溴化锂水溶液	123
7.3 溴化锂吸收式制冷循环与机组流程	126
7.4 溴化锂吸收式制冷机组计算	135
7.5 溴化锂吸收式机组的性能与调节	141
8 热电制冷	147
8.1 热电效应	147
8.2 热电制冷的特点与适用范围	149
8.3 热电制冷元件及材料	151
8.4 电偶对制冷特性	154
8.5 热电制冷器	158
8.6 多级热电制冷器	164
8.7 热电堆的设计	166
9 制冷换热器的传热学基础	174
9.1 概述	174
9.2 带翅表面的传热	174
9.3 无集态变化时的对流换热系数	179
9.4 制冷剂沸腾时的换热系数	185
9.5 制冷剂冷凝时的换热系数	190
9.6 制冷换热器的辐射换热系数	193
9.7 制冷换热器的传热计算	195
9.8 制冷换热器的流体动力计算	198
10 冷凝器的结构与计算	204
10.1 概述	204
10.2 水冷冷凝器的结构与特点	204
10.3 空气强制对流风冷冷凝器的结构与计算	207
10.4 空气自由对流风冷冷凝器的结构与计算	213
10.5 冷凝器的新进展	216
11 蒸发器的结构与计算	221
11.1 蒸发器的种类	221
11.2 表面蒸发器的结构与计算	222
11.3 冷却液体用蒸发器	229
11.4 蒸发器的新进展	233
12 节流机构	237
12.1 节流过程	237
12.2 节流阀	238
12.3 毛细管	261
13 制冷装置的设计	272
13.1 制冷装置的分类与组成	272

13.2 制冷装置设计的几个问题..... 281

13.3 制冷、空调系统的计算机控制..... 287

13.4 物联网与制冷空调..... 296

14 小型冷藏装置..... 300

14.1 电冰箱..... 300

14.2 冷柜..... 307

14.3 冷藏陈列柜..... 309

14.4 小型装配式冷库..... 312

14.5 小型冷藏装置隔热与冷负荷计算..... 315

14.6 小型冷藏装置自动控制..... 321

15 小型空调装置..... 331

15.1 房间空调器..... 331

15.2 多联机..... 343

15.3 其他小型空调装置..... 349

绪 论

(1) 关于制冷

制冷是指用人工的方法在一定的时间和一定的空间内,将被冷却对象的温度降至环境温度以下,并保持这个低温。

从热力学我们知道,热量不能自发地由低温物体传至高温物体。因此,要实现制冷,就必须有消耗较高位势能量的补偿过程。

(2) 制冷机与制冷装置

实现制冷所需的各机器与各设备的结合体称为制冷机。

制冷机中所使用的工作介质称为制冷剂或制冷工质。

制冷机与用冷设备的组合称为制冷装置。制冷的应用与制冷装置是密不可分的。

制冷装置有很多种类。一般来说,有可能使用不同类型的制冷机来提供冷量。但由于不同的制冷机有不同的应用范围,所以不同使用目的的制冷装置,通常使用不同类型的制冷机。

制冷装置的分类,主要是依据使用目的不同来划分。目前,各类制冷装置大致可划分成以下十个大类。但这仅是大致划分,而且分类并不严格,实际上还有很多其他制冷装置。随着制冷技术的发展,制冷装置越来越多,分类也越来越模糊了。大致上制冷装置有以下几类:

1) 冷藏用制冷装置 冷藏用制冷装置是食品冷链的开端和最重要的部分,主要有冷库(土建冷库和组合冷库)、冻结设备(隧道速冻机、螺旋速冻机、板式速冻机、真空冻干机、搁架排管、冻结箱等)。冷藏用制冷装置主要用于食品的冷加工、贮藏和分配,也可用于贮存其他物品,如药品、疫苗、化工产品等。其应用目的是保持食品的原有品质,以防因生化作用或霉菌作用而变质。

2) 冷藏运输装置 冷藏运输装置是食品冷链的中间环节,这类制冷装置主要有铁路机械保温车、回冰保温车、冷藏汽车、保温汽车、冷藏船、冷藏集装箱等。

3) 空调用制冷装置 空调用制冷装置包括集中空调用制冷装置和空调器两类,前者指集中空调的冷源和蓄冷装置,后者有房间空调器、单元空调器、机房空调器、恒温恒湿机、去湿机等类型。

4) 建筑工程用制冷装置 指在浇灌混凝土、隧道挖掘等场合应用的制冷装置,通常是大型成套设备。主要用于大型混凝土构件的冷却、复杂地质条件的地下掘进等。

5) 工业用制冷装置 工业用制冷装置用于一些特定的生产工艺过程。在一些场合,工业用制冷装置就是生产工艺设备,如空分装置、LGN设备、干冰设备等,生产过程所用的原料就是制冷剂。在另一些场合,制冷装置仅为生产工艺提供必要的条件,原料不是制冷剂,制冷机提供的冷量冷却原料、半成品,如冷冻切削的冻结、啤酒发酵罐冷却、空气的冷冻除湿、冷处理设备。

6) 低温实验装置 指用于教学、科研以及产品低温性能实验的装置。主要用来研究物质或设备在低温下的性能,检查产品在低温条件下的性能指标。如低温环境实验室、低温生

物显微镜、红外探测仪冷却器、低温恒温水浴冷却器、冰点仪等。

7) 生活及商用制冷装置 生活及商用制冷设备是仪器冷链的末端,主要有电冰箱(冷藏箱、冷冻箱、冷藏冷冻箱)、冷藏陈列柜、冰淇淋机、小型块冰机等,除家用外还用于商店、饭店、宾馆、食堂、医院等地。通常人们将生活制冷设备称为家用制冷器具,实际上这个术语并不确切,除了家用这一特征外,无其他明显特征。但由于是家用,家用制冷器具在安全性能指标方面有很高要求。在我国,家用制冷器具这一名称的另一含义是由于我国的归口管理而产生的,指制冷量为 14kW 及以下的空调器、容积在 1m^3 及以下的冷藏箱、冷冻箱和冷冻冷藏箱。

8) 低温医疗装置 用于医疗目的的制冷装置主要有低温手术器械、低温理疗设备、低温切片刀、低温杜瓦等。

9) 制冰装置和制干冰装置及农业用制冷装置 这类装置的产品可作为二次冷源,如盐水制冰装置、桶式快速制冰机、片冰机、板冰机、制干冰设备与气体液化装置等。农业用制冷装置主要用于良种(农作物、优良种畜的精液)的低温保存、人工气候育秧室、微生物除虫、粮食储藏、人造雨雪以及化肥生产等。

10) 低温军事装备 指用于军事目的的制冷装置,主要有瞄准仪、夜视仪、制导器等用的冷却器。

(3) 制冷的几个领域

按温度区域可以把制冷分成四个研究领域:

- 1) 普通制冷 $120\text{K} (-153^\circ\text{C}) \sim \text{常温}$
- 2) 深度制冷 $20\text{K} (-253^\circ\text{C}) \sim 120\text{K} (-153^\circ\text{C})$
- 3) 低温制冷 $0.3\text{K} (-272.85^\circ\text{C}) \sim 20\text{K} (-253^\circ\text{C})$
- 4) 超低温制冷 $<0.3\text{K} (-272.85^\circ\text{C})$

由于温度范围的不同,所使用的机器设备与工质、所采用的制冷方法均有很大的区别。

普通制冷应用最广泛,遍布人类生活和生产活动的各个方面。普通制冷是我们这门课程的研究对象。

深度制冷主要应用于空气的分离与液化、低温生物的保存与研究,是《低温技术原理与装置》课程的研究对象。

低温制冷主要应用于科学研究和空间技术。超低温制冷则主要应用于低温物理、基本粒子等物理学研究。这两部分是本书内容的继续和深化。

(4) 制冷技术的研究内容和理论基础

制冷技术是一个概括用语,其研究内容主要为以下几个方面:

1) 制冷原理 a) 研究获得低温的方法和有关的机理以及与之相应的制冷循环,应用热力学的观点和方法分析制冷循环和它的应用,对制冷循环及其中各过程进行计算;b) 研究制冷剂的性质,从而为制冷机选择合适的制冷剂。

2) 制冷设备 研究实现制冷循环并满足使用要求的各种换热器、节流机构的辅助设备,主要是它的结构设计和性能分析。

3) 制冷装置的内容 研究各种制冷装置的性能、结构、系统流程组织、设备配套、隔热等问题。

制冷技术的普遍理论基础是《工程热力学》、《传热学》和《流体力学》。制冷原理所研究的逆向循环中热能与其他形式能量的转换问题,不同位势热能的转换问题都离不开《热力

学》关于能量转换的基本规律。在制冷设备和制冷装置的研究和设计中，主要是研究能量的传递和流体的流动，需要应用《传热学》和《流体力学》的基本理论。在制冷压缩机的研究分析中，需要综合应用以上三个科学分支。因此，研究制冷技术必须具备坚实的《工程热力学》、《传热学》和《流体力学》基础。制冷技术的研究需要这三门基础学科的指导，同时，制冷技术的发展又不断充实和完善了这些基础学科。

除此之外，在制冷技术中还需要应用《化学》、《电工技术》、《电子技术》、《工程力学》等学科的基础理论，如进一步深入研究制冷技术，还可能需要《半导体物理》和《不平衡过程热力学》的知识。

综上所述，制冷技术是各基础学科理论的应用与延伸。与此相同，是各基础学科的综合应用与延伸。

思考题

1. 制冷的定义是什么？制冷的应用与哪些热力学理论相关？
2. 制冷装置主要应用在哪些方面？你如何看待制冷空调装置的节能问题？

1 制冷方法及热力学基础

1.1 各种制冷方法

制冷的方法很多，由其基本科学基础，可分成物理制冷和化学制冷两大类。物理制冷因其方向可逆性好，得到广泛应用。而化学制冷的过程方向难以逆向进行，所以很少应用。

物理制冷的的方法很多，常用的物理制冷方法见表 1-1。

表 1-1 常用的物理制冷方法

基本方法	分类方法	工程技术方法
相变制冷	液体气化制冷	蒸汽压缩制冷
		吸收制冷
		蒸汽喷射制冷
		吸附制冷
		液态气体气化制冷
	固体熔融制冷	冰冷却
		冰盐冷却
		共晶冰冷却
	固体升华制冷	干冰制冷
		固态气体升华制冷
气体制冷	气体绝热制冷	气体节流制冷
		气体等熵膨胀制冷
	绝热放气制冷	—
热电制冷	—	—
涡流管制冷	—	—
氮稀释制冷	—	—
绝热退磁制冷	—	顺磁盐绝热退磁制冷
		核绝热退磁制冷
低温热汇辐射制冷	—	—

在普冷的范围内，最常用的制冷方法是液体气化制冷、固体熔融制冷、气体膨胀制冷和热电制冷。我们着重讨论的就是这几种制冷方法。

1.2 液体气化制冷

在上述这些制冷方法中，应用最多的一类是液体气化制冷。

从热力学我们知道，在一个密闭的容器中，如存在且仅有某一物质的液体和气体（即某一物质的液体处于密闭容器中，且容器中除了此种液体和它自身蒸发产生的蒸汽以外，无任何其他液体或气体），那么，在一定的温度和压力条件下，气液两相将达到平衡。此时的液体称为饱和液体，气体称为饱和蒸汽。在饱和状态时，介质所具有的压力为饱和压力，温度为饱和温度。饱和压力与饱和温度的关系是一一对应，完全相关的。任意一个饱和温度都有一个且仅有一个与之对应的饱和压力。如饱和温度升高，饱和压力随之升高；如饱和温度降低，饱和压力也随之降低。即其中一个参数变化，另一个也相应改变。这种关系称为饱和温度与饱和压力的关系，简称 $p-T$ 关系。

如果此容器是绝热的，当从此容器抽走一部分饱和蒸汽，压力就会下降，同时温度也下降。相反，如向容器中再压入一些饱和蒸汽，压力将上升，温度随之提高。

如果我们维持容器及其中的介质温度不变，当从容器中抽走一部分饱和蒸汽，液体就必然要再气化一部分，以产生饱和蒸汽来维持平衡。液体气化时需吸收气化潜热，而这一热量来自系统外部。在液体气化制冷中，正是利用气化时吸收潜热这一特性，使被冷却物体降温，或是维持在低于环境温度的某一低温。例如在电冰箱中，制冷剂在蒸发器中气化，吸收食品的热量，使食品的温度降低；空调器也是利用制冷剂在蒸发器中气化，吸收室内空气的热量，使室内空气维持在环境温度以下。

为了使上述过程能够连续进行下去，必须不断地从容器中抽走蒸汽，再不断地将液体补充到容器中去。如把抽走的蒸汽凝结下来，成为液体后再送入容器中去，就能满足过程连续这一要求。从容器中抽走的蒸汽，如想直接凝结成液体，所需冷却介质的温度将比液体的蒸发温度还要低。我们利用饱和温度随饱和压力升高而升高这一原理，将蒸汽的压力提高，使蒸汽压力高于常温下的饱和压力，就能实现常温下凝结。这样，制冷剂在低温低压下蒸发，产生制冷效应，而在常温高压条件下凝结向环境或冷却介质放出热量。

由此可知，液体气化制冷循环应由液体气化、蒸汽升压、蒸汽液化和液体降压四个过程组成。蒸汽压缩制冷、吸收制冷、吸附制冷等制冷方法的循环都具备这四个过程。

1.3 气体绝热膨胀制冷

大部分气体制冷机是利用高压气体的绝热膨胀来达到低温，并利用膨胀后的气体在低压下的复热来制冷。气体绝热膨胀有两种方式，即绝热节流和等熵膨胀。

1.3.1 气体节流制冷

当气体在流动中遇到孔口或调节阀门时，由于局部阻力，使其压力显著下降，这种现象称为节流。

在工程上，由于气体经过节流机构的时间很短，流速较高，与外界的热交换量很小，可

近似作为绝热过程来处理，故称为绝热节流。根据稳定流动的能量方程式，气体在绝热前后，比焓值基本不变，即 $dh \approx 0$ ，这是绝热节流的特征。

由于节流存在摩擦损失，所以是一个不可逆过程，必有 $ds > 0$ 。

当气体是理想气体时，因内能 u 和 pv 均只是温度的参数，故比焓值与温度存在对应关系，节流前后的比焓值基本不变，所以温度也基本不变。即因 $dh=0$ 、 $du=0$ ，因而 $dT=0$ 。可认为是等焓过程，即可认为是等温过程，其温度效应为零。

实际气体的内能是温度和压力的函数，比焓值也是温度和压力的函数，节流前后温度将随压力的变化而变。实际气体节流时的温度效应用 α_h 来表示，称为焦耳-汤姆逊效应。

实际气体节流时，温度变化与压力降低的比例关系称为微分节流效应，可表示为

$$\alpha_h = (\partial T / \partial p)_h \quad (1-1)$$

由热力学知

$$\alpha_h = (\partial T / \partial p)_h = [T(\partial v / \partial T)_p - v] / C_p \quad (1-2)$$

由上式可知， α_h 的数值取决于气体节流前后的状态和气体的种类。

当 $T(\partial v / \partial T)_p > v$ 时， $\alpha_h > 0$ ，节流后温度降低；

当 $T(\partial v / \partial T)_p = v$ 时， $\alpha_h = 0$ ，节流前后温度不变；

当 $T(\partial v / \partial T)_p < v$ 时， $\alpha_h < 0$ ，节流后温度升高。

我们可以用气体在节流过程中的能量转化关系，对上述三种情况进行解释。

$$\text{因} \quad dh = du + d(pv) = 0$$

$$\text{所以} \quad du = -d(pv)$$

由热力学知，内能由内位能 u_p 和内动能 u_k 两部分组成，内位能是比体积的函数，内动能仅与温度有关。上式可改写成

$$du = du_p + du_k = -d(pv) \quad (1-3)$$

所以有

$$du_k = -du_p - d(pv) \quad (1-4)$$

气体节流时，总有压力下降，比体积增大，因此总有 $du_p > 0$ ，即内位能增大。但 $d(pv)$ 的变化由气体节流前的状态参数确定。

当 $d(pv) > 0$ 时， $du_k < 0$ ，节流后温度降低；

当 $d(pv) = 0$ 时， $du_k < 0$ ，节流后温度降低；

当 $d(pv) > 0$ 时，且 $|d(pv)| < |du_p|$ 时， $du_k < 0$ ，节流后温度仍降低；

当 $d(pv) > 0$ 时，且 $|d(pv)| = |du_p|$ 时， $du_k = 0$ ，内动能保持不变，节流前后温度也保持不变，此时的温度称为节流转温度；

当 $d(pv) > 0$ 时，且 $|d(pv)| > |du_p|$ 时， $du_k > 0$ ，节流后温度上升。

转化温度 T_{inv} 与压力有关，其函数关系表示在 $T-p$ 图上为一连续曲线，称为转化曲线。转化曲线与 T 轴所包围的区域是制冷区，见图 1-1。

当压降为一定数值时，节流所产生的全部温度变化称为积分节流效应，其定义式为

$$\Delta T_h = T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_h dp = \alpha_{hm}(p_2 - p_1) \quad (1-5)$$

式中的 α_{pm} 为 $p_2 \sim p_1$ 范围内的平均微分节流效应。在工程计

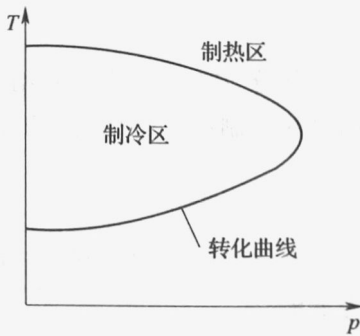


图 1-1 转化曲线

算中可利用 α_{hm} 来计算节流温降。

微分节流效应可通过定义式或状态方程来计算，也可通过实验得出。对于空气和氧，当 $p < 15 \text{ MPa}$ 时，经验式为

$$\alpha_h = (a_0 + b_0)(273.15/T)^2 \quad (1-6)$$

式中常数为

$$\text{空气} \quad a_0 = 2.73 \times 10^{-3} \quad b_0 = 8.95 \times 10^{-8}$$

$$\text{氧} \quad a_0 = 3.19 \times 10^{-3} \quad b_0 = 8.84 \times 10^{-8}$$

气体绝热节流时无外功输出，即 $dw=0$ ，气体的温降较小，制冷量也较小，但设备简单，便于调节气体流量。

1.3.2 气体等熵膨胀

如使气体经膨胀机膨胀降压，则有外功输出，气体的温降较大，制冷量大，但设备复杂。

气体进行有外功输出的绝热膨胀时，最理想的情况是等熵膨胀。在等熵膨胀中，温度随压力的微小变化而变化的关系称为微分等熵效应，可表示成如下定义式

$$\alpha_s = (\partial T / \partial p)_s \quad (1-7)$$

由比焓的特性式

$$dh = C_p dT - [T(\partial v / \partial T)_p] dp \quad (1-8)$$

由此可导出

$$dq = dh - v dp = C_p dT - T(\partial v / \partial T)_p dp \quad (1-9)$$

$$ds = dq/t = C_p dT/T - (\partial v / \partial T)_p dp \quad (1-10)$$

对于等熵过程， $ds=0$ ，于是

$$\alpha_s = (\partial T / \partial p)_s = T(\partial v / \partial T)_p / C_p \quad (1-11)$$

如气体是理想气体，因

$$\begin{aligned} \alpha_s &= (\partial T / \partial p)_s = T(\partial v / \partial T)_p / C_p \\ (\partial v / \partial T)_p &= R/p \end{aligned} \quad (1-12)$$

$$\text{故} \quad \alpha_s = RT/pC_p \quad (1-13)$$

膨胀过程的温差，称为积分等熵效应。

$$\Delta T_s = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_s dp \quad (1-14)$$

对于理想气体，积分等熵效应为

$$\Delta T_s = T_2 - T_1 = T_1[(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1] \quad (1-15)$$

膨胀前后温度的关系为

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \quad (1-16)$$

对于实际气体， ΔT_s 通常是用热力学图表查取，最常用的是 $T-s$ 图。

将微分节流效应与微分等熵效应作一比较，可以发现

$$\alpha_s - \alpha_h = v/C_p \quad (1-17)$$

由于 $v > 0$ ， $C_p > 0$ ，所以

$$\alpha_s > \alpha_h \quad (1-18)$$

当初参数与压降相同时

$$q_{0s} - q_{0h} = w_e \quad (1-19)$$

即等熵膨胀制冷的制冷量比绝热节流大，差值即为膨胀功。

1.4 劳伦兹循环

由工程热力学可知,逆卡诺循环工作在恒温热源条件下。工程实际应用时,大部分热源为变温热源。因此,有必要探讨在变温热源条件下的可逆循环。

1.4.1 逆向循环概述

逆向循环是耗功循环,所有制冷机都是按逆向循环工作的。在 $T-s$ 图或 $p-h$ 图上,循环的各个过程依次同时按逆时针方向进行。

同动力循环一样,在构成逆向循环的各个过程中,只要包含有不可逆过程,这个循环就是不可逆循环。

各种形式的不可逆因素可分为两类。第一类为产生于内部,与外界条件关系不大的因素,称为内部不可逆因素;如制冷剂在流动和状态变化过程中,因摩擦、扰动及内部不平衡而引起的损失都是内部不可逆。第二类是与外界条件关系紧密的因素,称为外部不可逆因素;如换热过程的传热温差等。

研究逆向可逆循环的目的,是要找出热力学上最完善的制冷循环,作为评价实际循环效率高低的标准,并找出改进实际循环的方向。

在恒温热源条件下,逆卡诺循环是可逆循环。

1.4.2 变温热源

制冷机在实际工作中,被冷却对象的温度和环境介质温度往往是随热交换过程的进行而变化的。例如,载冷剂进入蒸发器进行冷却,进口处载冷剂的温度较高,在出口处温度降低了。又如冷却水或空气流过冷凝器时,由于吸收了热量,其温度渐渐升高。

变温热源是这样一种热源,对于一微团介质,其温度随热交换过程的进行而变化,且具有一定的变化趋势。可表述如下:变温热源是随热交换过程的进行,热源各部分温度不同且连续变化,但宏观上与时间无关的热源。

1.4.3 劳伦兹循环

在变温热源条件下,可逆的逆向循环应是什么样的呢?

我们假定有这样的两个热源,高温热源最高温度 T_{hb} ,最低温度 T_{hc} ,平均温度 T_{hm} ;低温热源最低温度 T_{cd} ,最高温度 T_{ca} 平均温度 T_{cm} ;如图 1-2 所示。

在这种情况下,如要应用逆卡诺循环,则制冷剂向高温热源的放热过程为 $b-g$ 、温度为 T_b ,在 b 点传热温差为 0,在 g 点传热温差为 $T_b - T_c$;制冷剂从低温热源吸热过程为 $d-h$ 、温度为 T_d ,在 h 点的传热温差为 $T_a - T_d$ 。由于热源与等温换热过程存在传热温差,逆卡诺循环不能成立。

如果我们使循环沿 $a-b-c-d-a$ 进行,则无传热温差,这种循环称为劳伦兹循环。它由等熵压缩过

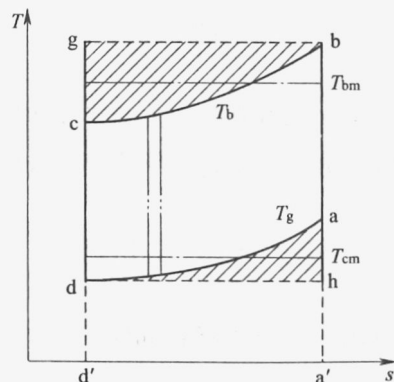


图 1-2 变温热源条件下可逆的逆向循环

程、与高温热源无传热温差的放热过程、等熵膨胀过程和与低温热源无传热温差的吸热过程组成。其中放热和吸热过程是与热源相适应的任意过程。在图 1-2 上，循环的制冷量为面积 $a-a'-d-d'$ ，所消耗的功为面积 $a-b-c-d$ 。

为了分析劳伦兹循环，我们可将其分成无限多微元循环。因在每个微元循环中，热源温度变化为无穷小，所以可以认为热源温度是恒定的，且每个微元循环都是在热源温度 T_{hi} 和 T_{ci} 之间工作的逆卡诺循环。由于每个微元循环是可逆的，其组成的整个循环也是可逆的。从以上分析我们可以得出这样的结论：在变温热源条件下，劳伦兹循环是可逆循环。也就是说，在变温热源条件下，劳伦兹循环的制冷系数最高。

每一个微元循环的制冷系数为

$$\epsilon_i = \frac{dq_0}{dq_k - dq_0} = \frac{T_{ci} ds}{T_{hi} ds - T_{ci} ds} = \frac{T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}} \tag{1-20}$$

整个循环的制冷系数可表示为

$$\epsilon_l = \frac{q_0}{q_k - q_0} = \frac{\int_d^a T_{ci} ds}{\int_c^b T_{hi} ds - \int_d^a T_{ci} ds} \tag{1-21}$$

若用 T_{hm} 和 T_{cm} 分别来表示高、低温热源的平均温度，则劳伦兹循环的制冷系数可简化为

$$\epsilon_i = \frac{T_{cm}(s_a - s_d)}{T_{hm}(s_b - s_c) - T_{cm}(s_a - s_d)} = \frac{T_{cm}}{T_{hm} - T_{cm}} \tag{1-22}$$

式中：

$$T_{cm} = \int_d^a T_{ci} ds / (s_a - s_d)$$

$$T_{hm} = \int_c^b T_{hi} ds / (s_b - s_c)$$

劳伦兹循环对于两个无温差的换热过程究竟是什么过程、两个过程是否相同均无限制，也不要求两条过程线平行。

思考题

1. 主要的制冷方法有哪些？普冷领域常用哪些制冷方法？
2. 简述液体气化制冷的原理，并找出它主要应用在哪些制冷方法中？
3. 实际制冷机工作在什么样的环境下？与理论制冷机的区别在哪里？