

制冷技术与应用

(第二版)

陈汝东 主编
岳孝方 主审



同济大学出版社

ZHILUENG JISHU YU YINGYONG

制冷技术与应用

(第二版)

陈汝东 主编

岳孝方 主审

同济大学出版社

内 容 提 要

本书着重介绍了蒸气压缩式制冷的循环原理、设备性能、系统设计、机组特性及制冷技术在空调和冷藏方面的应用。对吸收式制冷和制冷系统也作了简要的介绍。每章末有复习思考题和习题。

本书可作为高等院校建筑环境与设备、热能工程等专业的教材,也可作为从事制冷技术应用的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

制冷技术与应用/陈汝东主编. —2版. —上海:同济大学出版社,2006.1

ISBN 7-5608-3219-9

I. 制… II. 陈… III. 制冷技术 IV. TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 002988 号

制冷技术与应用(第二版)

陈汝东 主编 岳孝方 主审

责任编辑 解明芳 责任校对 杨江淮 封面设计 李志云

出 版 行	同济大学出版社
	(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销	全国各地新华书店
印 刷	江苏启东印刷厂印刷
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	22.75
字 数	590 000
印 数	1—5 100
版 次	2006 年 2 月第 2 版 2006 年 2 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5608-3219-9/TB·49
定 价	32.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

第二版前言

自 1992 年《制冷技术与应用》(第一版)出版以来,制冷技术有了新的发展;根据新的教学大纲的要求,并结合教学和工程实践,作者在原教材的基础上进行了修订。

本书共有 14 章,增加的内容有:工质的替代,新工质的性质;制冷系统的自动控制与调节;热泵技术的新应用;低温及环境试验装置和机械制冷技术的新发展等。

本书由陈汝东主编;参加编写的成员有:陈汝东(第 2、10、12 章);刘叶弟(第 4、6 章);赵兰萍(第 1、11、13 章);李芃(第 7、8 章);寿青云(第 3、5、9、14 章)。主审由《制冷技术与应用》(第一版)的主编岳孝方担任。

对在本书的编写和出版过程中提供资料、信息,并付出辛勤劳动的有关人员,在此一并致谢。

由于作者的水平有限,书中不足之处,请读者批评指正。

编 者

2005 年 11 月

第一版前言

本书是在总结我校长期来在供热与空调专业开设“制冷技术”课程的教学经验的基础上,广泛吸收读者们的宝贵意见,并结合目前社会实际需要而编写的。

“制冷技术”是一门实践性较强的专业课程,教学上必须重视理论与实践、教学与应用相结合的原则。为此,在本书中,不但对蒸气压缩式制冷的循环原理、设备性能、系统设计、机组特性作了详尽的叙述,而且对吸收式制冷亦作了一定的介绍,特别加强了制冷技术理论在空调和冷藏方面的应用,以及加强了实践环节的基本知识。

为了便于自学和检测,本书每章均列出基本要求和小结;复习思考题;有些章节还布置了作业题和测验作业题;涉及理论计算内容时,均选有典型例题,供读者参阅。

《制冷技术与应用》一书由同济大学热工教研室编写。其中:绪论,第一、三、五、六、七、十一和第八章中的第三节由岳孝方执笔,第二、四、九、十和第八章中的第一、二节由陈汝东执笔。

在本书的编写和出版过程中,得到我校和函授学院领导以及教师们的关心和支持,绪论中插图由上海轻工业设计院余东宁绘制,谨在此致谢。

由于编者水平所限,时间仓促,书中不足之处恳请读者批评指正,有待日后改正。

编 者

1990年5月写于同济大学

目 录

第二版前言

第一版前言

绪论..... (1)

第 1 章 蒸气压缩式制冷的热力学原理..... (6)

1.1 理想制冷循环——逆向可逆循环 (6)

1.2 理论制冷循环..... (11)

1.3 制冷循环热力计算..... (19)

复习思考题 (23)

习 题 (24)

第 2 章 制冷剂 and 载冷剂 (26)

2.1 制冷剂..... (26)

2.2 载冷剂..... (36)

复习思考题 (38)

第 3 章 制冷压缩机 (39)

3.1 活塞式制冷压缩机的热力性能..... (39)

3.2 活塞式制冷压缩机的结构..... (49)

3.3 螺杆式制冷压缩机..... (58)

3.4 涡旋式制冷压缩机..... (63)

3.5 离心式制冷压缩机..... (65)

复习思考题 (69)

习 题 (69)

第 4 章 冷凝器和蒸发器 (70)

4.1 冷凝器..... (70)

4.2 冷凝器的选择计算..... (73)

4.3 蒸发器..... (82)

4.4 蒸发器的选择计算..... (87)

复习思考题 (94)

第 5 章 节流机构与辅助设备 (95)

5.1 节流机构..... (95)

5.2 辅助设备 (105)

复习思考题.....	(117)
第 6 章 制冷系统的自动控制与调节	(118)
6.1 制冷系统自动控制的基本知识	(118)
6.2 传统的自动控制装置	(121)
6.3 现代的自动控制装置	(133)
复习思考题.....	(136)
第 7 章 制冷系统	(137)
7.1 制冷设备的选择	(137)
7.2 制冷剂管道系统的设计	(146)
复习思考题.....	(159)
习 题.....	(159)
第 8 章 冷、热水机组	(160)
8.1 蒸汽压缩式冷水机组	(160)
8.2 热泵型机组	(169)
复习思考题.....	(185)
第 9 章 两级压缩和复叠式制冷循环	(186)
9.1 两级压缩制冷循环	(187)
9.2 两级压缩制冷循环的热力计算	(189)
9.3 复叠式制冷循环	(194)
复习思考题.....	(196)
习 题.....	(197)
第 10 章 冷藏库	(198)
10.1 冷藏库概述.....	(198)
10.2 冷藏库制冷系统和冷却方式.....	(207)
10.3 库房耗冷量计算.....	(214)
10.4 制冷设备的选型计算.....	(223)
10.5 其他形式的冷藏库.....	(231)
复习思考题.....	(233)
习 题.....	(233)
第 11 章 试验用制冷装置及制冰装置	(234)
11.1 试验用制冷装置.....	(234)
11.2 制冰设备.....	(239)
复习思考题.....	(244)

第 12 章 溴化锂吸收式制冷	(245)
12.1 溴化锂吸收式制冷机的工作原理	(245)
12.2 溴化锂吸收式制冷机的热工计算	(254)
12.3 溴化锂吸收式制冷机的性能	(264)
12.4 其他形式的溴化锂吸收式制冷机	(268)
12.5 溴化锂吸收式制冷系统的机房设计	(274)
复习思考题	(278)
第 13 章 机械制冷技术的新发展	(279)
13.1 工质替代	(279)
13.2 自然工质 CO ₂	(281)
13.3 制冷压缩机新技术	(283)
13.4 可有效利用低品位能源的吸收/吸附式制冷技术	(285)
13.5 制冷装置设计新方法	(290)
复习思考题	(291)
第 14 章 制冷系统调试	(292)
14.1 制冷系统调试	(292)
14.2 制冷压缩机的冷量试验原理	(301)
复习思考题	(312)
附录	
附表 1 氨饱和液体及蒸气的热力性质	(314)
附表 2 R12 饱和液体及蒸气的热力性质	(315)
附表 3 R22 饱和液体及蒸气的热力性质	(316)
附表 4 R123 饱和状态下的热力性质	(317)
附表 5 R134a 饱和状态下的热力性质	(319)
附表 6 饱和水与饱和水蒸气表	(321)
附表 7 某些气体的物性值	(322)
附表 8 氯化钠水溶液的物性值	(323)
附表 9 氯化钙水溶液的物性值	(324)
附表 10 乙二醇水溶液的热物理性质	(326)
附表 11 主要城市部分室外气象参数表	(327)
附表 12 食品的焓值(kJ/kg)	(331)
附表 13 主要单位换算表	(334)
附图	
附图 1 氨(R717)lg p - h 图	(335)
附图 2 R12 lg p - h 图	(339)
附图 3 R22 lg p - h 图	(343)

附图 4	R123 $\lg p-h$ 图	(347)
附图 5	R134a $\lg p-h$ 图	(348)
附图 6	溴化锂水溶液 $h-\zeta$ 图	(349)
参考文献		(353)

绪 论

制冷技术是使某一空间或物体的温度降到低于周围环境温度,并保持在规定低温状态的一门科学技术,它随着人们对低温条件的要求和社会生产力的提高而不断发展。

一、天然冷源的应用

人类早就应用天然冷源来降温 and 储藏食品。公元前 5 世纪,埃及人就在尼罗河谷地把盛水陶罐放在屋顶上,利用地面对空间的辐射使水结冰。3000 多年前,埃及的一幅壁画上画了一个奴隶在盛水土罐前挥动扇子使多孔土罐中的水加速蒸发,以获得较低温度的水。我国劳动人民也早已懂得利用天然冰冷藏食品和防暑降温,《诗经》里就有“二之日凿冰冲冲,三之日纳于凌阴”的记载。古代人获得和利用天然冷源的简单操作,实际上完全符合现代热工理论的基本原理,为后来出现人工制冷奠定了基础。

自 19 世纪末开始,人工制冷(机械制冷)逐步进入使用阶段,并迅速得到发展;天然冷源的应用也就逐渐减少。但是人工制冷需要消耗能源,制冷技术的迅速发展,必然造成制冷能耗的大量增加。目前,由于世界范围内的能源紧缺,如何有效地利用和开发天然冷源,又日益受到重视。

天然冷源主要是指冬季储藏的天然冰和夏季使用的深井水。

1kg 冰融化时,约可吸收 334kJ 的热量,而且可使物品保持在接近 0℃ 的低温。当然,天然冰的采集、运输、储存比较麻烦,但可以节省制冷能耗,价格较低,在有条件的地区,仍然可以考虑使用。

在夏季,深井水温低于环境温度,可以用来防暑降温,或者作为空调冷源使用。深井水特别适用于夏季室内空调温度和湿度要求不是很低,而冷量却很大的场合,例如,纺织厂的纺纱、织布等车间。但是,深井水的大量抽汲和使用,不但可能使井水枯竭,而且可能使地层下沉,上海地区深井水位和地层的变化就充分证明了上述论点。据测定,上海市区地层下沉最严重的地方已超过 2m,而且深井水位逐年下降。为了解决这一矛盾,自 1967 年开始,对深井水采用“冬灌夏用”,即冬季向深井中灌入环境温度条件下的低温自来水,夏季再抽汲出来作为空调冷源使用。而且对每口井的充灌和抽汲量作了规定,逐步形成了一套深井水的充灌技术。由于采取了这些有效措施,近几年,上海地层下沉现象基本上得到了控制,而且使夏季应用的深井水平均温度较原来的天然深井水温有所降低。深井水的“冬灌夏用”方法,具有明显的节能意义,得到了许多国家的重视。

天然冷源虽然具有较高的节能性和经济性,但是,它的数量和温度毕竟有一定限度,使用也有一定条件。随着社会生产力的不断发展和人民生活水平的日趋提高,用冷范围日益广泛,对温度值的要求也越来越低,天然冷源已远不能满足社会发展的要求。

二、人工制冷的发展

1748 年,苏格兰科学家库伦(Cullen)观察到乙醚的蒸发会引起温度下降,1755 年,他又在真空罩下制得了少量冰,同时发表了论文《液体蒸发制冷》。因此,人们通常把 1755 年作为人

工制冷史的起点。从此以后,经过许多科学家的努力和热力学理论的发展,人工制冷技术逐步开始进入应用阶段。其中应该提到的是德国人林德(Linde),他于1875年首先制作了具有实用价值的氨压缩式制冷装置,直至今日,蒸气压缩式制冷仍然是使用范围最广泛的一种制冷方法。

在蒸气压缩式制冷方法出现和发展期间,其他制冷方法也相继出现和不断发展,例如吸收式制冷和蒸气喷射式制冷。这两种制冷方法的机理和蒸气压缩式相同,都是利用液体在一定压力下汽化吸热,从而产生制冷效应,其区别在于促使工质(制冷剂)进行循环的方式不同。

1834年,法国人珀尔帖(Peltier)发现用两种不同金属组成环路,若通以直流电源,两金属接点处会出现一定温差,当一个接点保持环境温度时,则另一个接点会低于环境温度,出现了冷效应。珀尔帖效应是塞贝克(Scebeck)的逆效应,它是由于两种不同金属节点的电位差产生的:当直流电由高电位的金属流入低电位时,其减少的能量在接点处以热量形式向外放出;而电流由低电位的金属流入高电位时,在接点处从外界吸收能量(热量)。因此该接点温度就低于环境温度,这种制冷方法通常称为热电制冷。但由于当时条件所限,热电制冷尚不具备实用价值,直到20世纪初,由于半导体材料的出现,才使热电制冷逐步进入应用阶段,所以热电制冷也被称为半导体制冷。

另外,利用气体绝热膨胀以及固体绝热去磁法,也可以获得很低的温度。

应该指出,各种制冷方法均有其自身的特点和适用范围,直至今日,没有一种制冷方法在低于环境温度直到接近绝对零度的制冷区间内,能始终保持着最佳的制冷效果。因此,不同的制冷区间应选用不同的制冷方法。

目前,根据低温的温度要求,通常把制冷范围分为三个区间,即

普通制冷范围(简称“普冷”):低于环境温度—— -120°C (153K)。

深度制冷范围(简称“深冷”): $-120^{\circ}\text{C} \sim -253^{\circ}\text{C}$ ($153 \sim 20\text{K}$)。

低温制冷范围: $-253^{\circ}\text{C} \sim -273^{\circ}\text{C}$ ($20 \sim 0\text{K}$)。

不同的制冷范围,选用不同的制冷方法。在空调和食品冷藏,以及一般所要求的用冷温度,均属于普冷范围,使用最广泛的制冷方法是液体汽化法。

目前,利用液体汽化法制冷的装置主要有两种,即蒸气压缩式制冷装置和吸收式制冷装置。这些装置正沿着系列化、标准化、机组化、自动化和省能化的方向发展。

三、制冷技术的应用

在现代社会中,制冷技术的应用已涉及到国民经济的各个部门以及人们的日常生活,现就其主要应用方面介绍如下:

1. 空气调节

制冷装置可以用来降低空气的温度和含湿量,从而使空气的温、湿度得到调节。空气调节根据其使用场合的不同,分为两种形式:

(1) 舒适性空调。这种空调的目的主要是满足人们工作和生活对环境温、湿度的要求,如高温车间降温,医院、会堂、影剧场、宾馆、住宅以及诸如车、船、飞机等各种交通工具的空气调节等。

(2) 工艺性空调。这种空调的目的主要是为了满足生产工艺和检测等对环境温、湿度的要求,如纺织、印刷、电子元件、光学仪器、精密机床等车间和检测、计量室等。这类空调所需要的温、湿度必需根据工艺要求确定,而且有时要求具有高精度的空调参数,才能保证产品质量

和测试数据的正确性。

图 0-1 展示了高层宾馆中的制冷、空调系统。在该系统中,首先用制冷装置(冷水机组)制得 $5^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$ 的低温冷冻水,然后通过水泵把冷冻水送入各个客房中的风机盘管,在盘管中与室内空气进行热交换,使空气降温、去湿,在夏季,室内就能保持舒适的温、湿度环境。

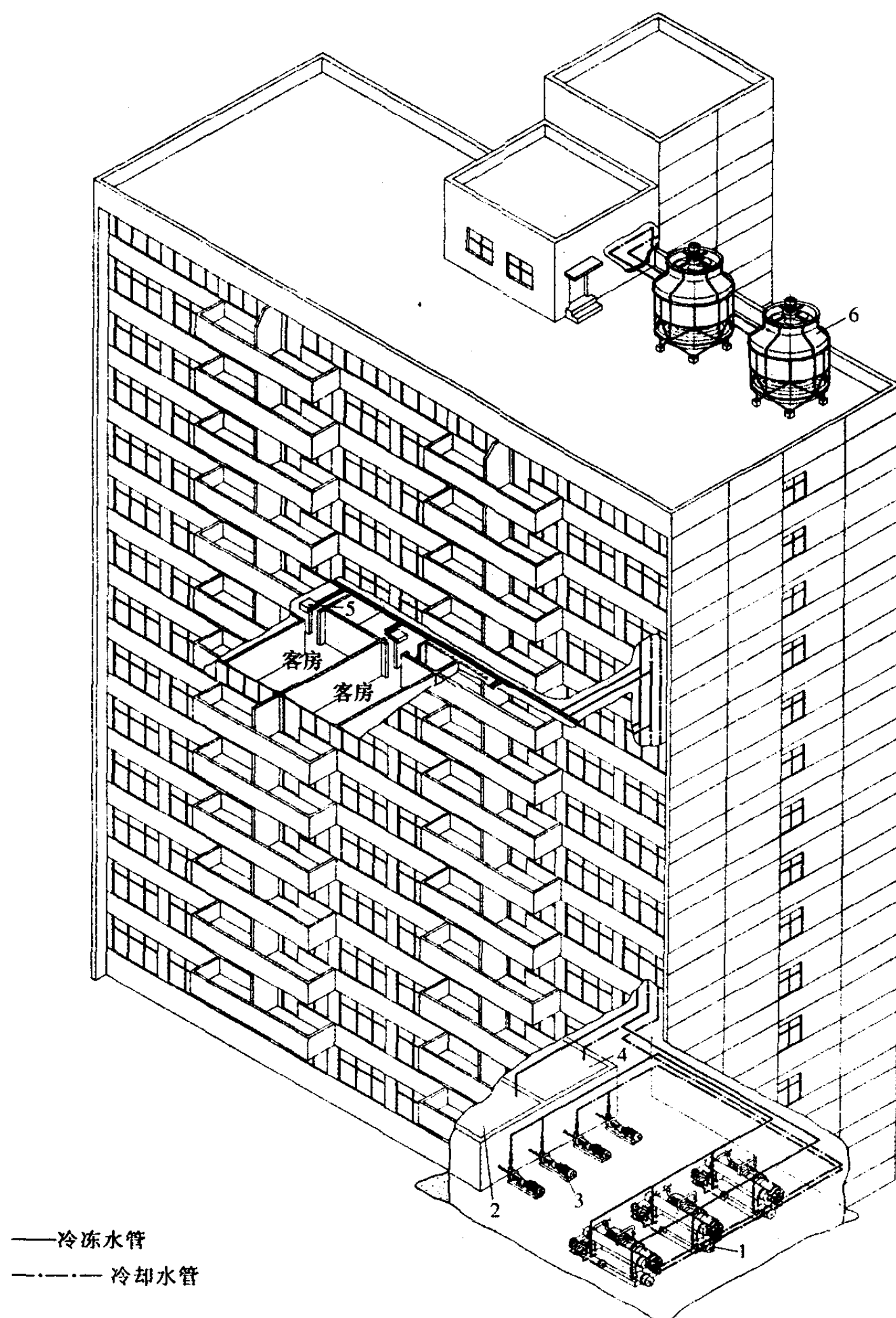


图 0-1 高层建筑制冷、空调系统图

1—冷水机组; 2—冷冻水池; 3—水泵; 4—冷却水池; 5—风机盘带; 6—冷却塔

2. 食品冷藏

蔬菜、水果、鲜蛋等的低温保鲜储存,肉、鱼、禽类等食品的冻结、冷藏,以防食品变质和平

衡食品的季节性生产与全年耗用之间的矛盾,均需制冷装置提供冷源。

另外,食品在运输、销售,以及在单位和家庭存放期间,也应保持合适的低温条件。因此,冷藏运输工具,如冷藏汽车、火车、冷藏船、冷藏集装箱,以及冷藏商品陈列柜、厨房冰箱和家用电冰箱等冷藏设备都在大力发展和推广应用之中。

图 0-2 展示了小型冷藏库的制冷系统以及各个库房情况。制冷装置运行时,就能使各个库房保持在所要求的低温温度内。冻结间的温度通常在 $-23^{\circ}\text{C}\sim-30^{\circ}\text{C}$,使进库的食品在一定时间内冻结。冷藏间的温度通常按冷藏食品的种类和时间确定,当冷藏冻结食品时,一般为 $-18^{\circ}\text{C}\sim-25^{\circ}\text{C}$ 。高温间的温度约为 0°C 左右,主要存放鲜蛋和果蔬类食品。

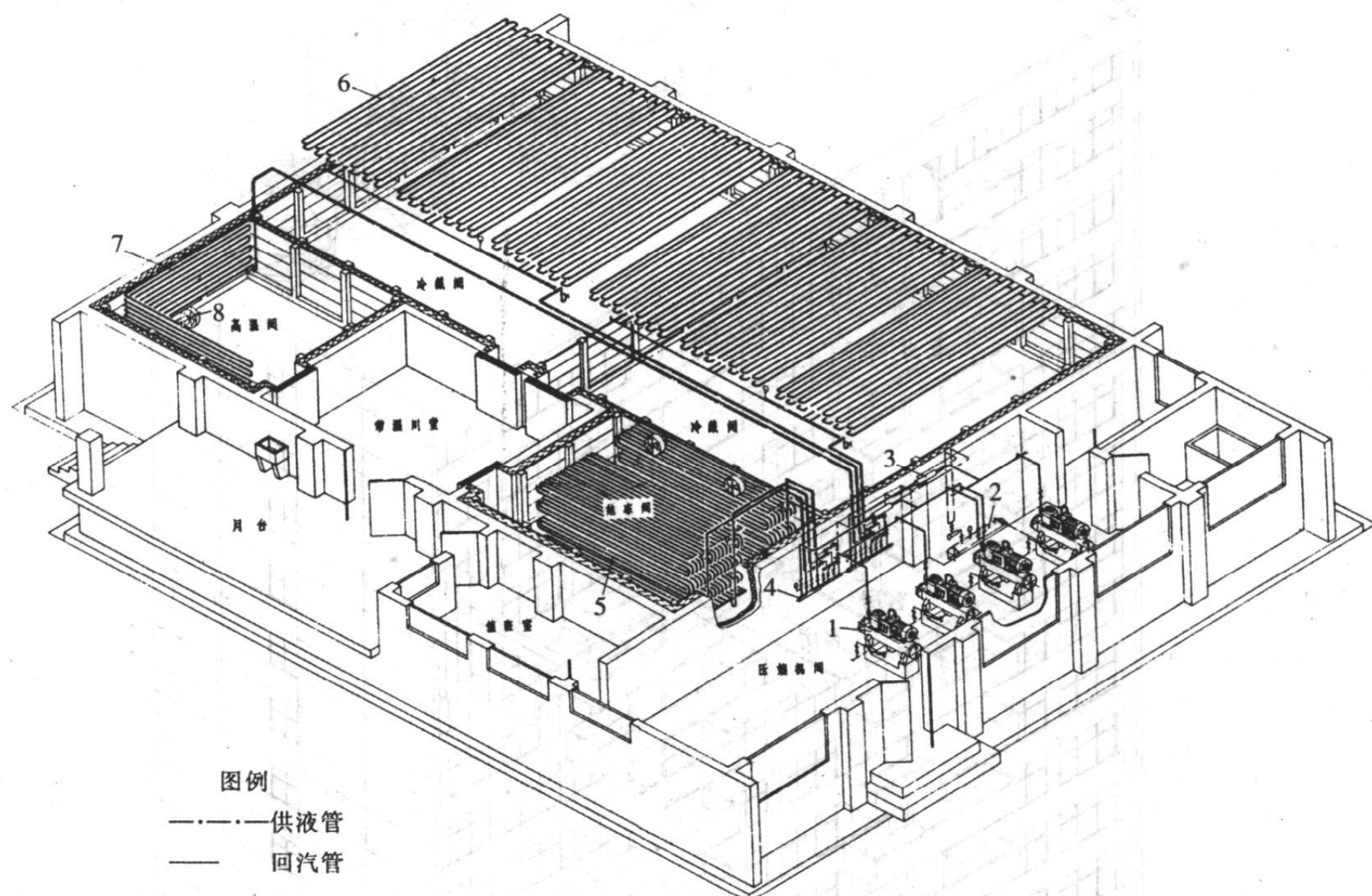


图 0-2 小型冷库制冷系统及其库房分布

1—压缩冷凝机组; 2—高压储液器; 3—热交换器; 4—调节站;
5—搁梁式蒸发排管; 6—顶排管; 7—冷排管; 8—轴流风机

3. 生产工艺

某些产品,例如合成橡胶、合成纤维、气体液化、石油裂解和脱脂,以及许多化工原料的提取都需要利用制冷装置为其提供所要求的低温工艺条件,以保证生产过程顺利进行。

另外,制冷技术在国防工业、航天技术、医疗卫生、科学研究以及农牧业等方面也有许多重要应用,制冷技术为各种使用目的提供了许多专用低温设备。

自进入 20 世纪 80 年代以来,我国的国民经济和人民生活水平有了很大提高,制冷和空调行业也得到了迅速发展,制冷与空调设备的大量应用,必然造成能源的大量消耗。

我国是能源短缺的国家,人均能源占有率不足发达国家的 1/5。而能源浪费却十分严重,使用又不合理。我国目前的建筑节能水平,还远低于发达国家,单位面积能耗是气候相近的发达国家的 3~5 倍,所以建筑节能是本世纪我国建筑业的一个重要的课题。为此建设部制订了建筑节能规划,早在 1995 年颁布了《城市建筑节能实施细则》等文件,把《民用建筑节能设计标

准(采暖居住建筑部分)》JGJ26—95 列为强制性标准,2000 年 10 月 1 日发布了《民用建筑节能管理规定》,对不符合节能标准的项目,不得批准建设。

在我国,建筑能耗约占总能耗的 30%,其中 50%~70%为空调制冷或采暖的能耗,因此开展建筑节能研究对国民经济的可持续发展具有重要的现实意义。在建筑能耗中,通过围护结构散失的热(冷)量占有很大比重,采用保温隔热性能好、经济性好的材料作为围护结构,对于节约建筑能耗十分必要,因此,需要合理设计建筑围护结构,以符合国家建筑节能设计标准的要求。

空调制冷系统效率的高低关键在于冷热源的选择和匹配是否合理。而随着能源供应的日渐紧张,使用天然能源或废热作为空调冷热源,将成为系统优化的最佳选择,例如利用太阳能、地热能、工业废热等作为空调冷热源,既可提高效率,达到了节能目的,又能保护环境,实现可持续性发展。

在空调制冷系统的工作过程中,系统大多数时间在部分负荷的工况下运行,系统效率较低。智能化控制技术的应用,对优化系统运行、节约能源具有十分重要的意义。

还应指出,自 20 世纪 40 年代开始,由于氟利昂(饱和烃类的卤素衍生物)制冷剂的出现和大量应用,曾使压缩式制冷技术及其应用范围得到了极大的发展,特别是在空调制冷和中小型低温制冷领域中,几乎全部采用了这类制冷剂。但是,近十几年的研究证明,氟利昂簇中的含氯而无氢的氟化碳(简称 CFC)会严重地破坏大气中的臭氧以及地球高空的臭氧层,从而增强了太阳对地面的紫外线辐射强度。据预测,臭氧减少 1%,紫外线辐射量将增加 2%,而紫外线辐射量的增加,将促使人体的某种病患(如皮肤癌、白内障等)增多,加剧温室效应,以及危害地球上的许多生物,破坏生态平衡。有人提出,臭氧层减少到原来的 1/5,将是地球存亡的临界点。因此,减少和禁用 CFC 的使用和生产已成为当今国际社会共同保护人类生态环境所面临的紧迫任务,研究和寻求 CFC 制冷剂的替代物也成为急需解决的问题。但是,也可以预计,随着 CFC 甚至其他制冷剂的逐步禁用,新的制冷剂甚至新的制冷方法终将出现,制冷技术也必定会得到更进一步的发展。

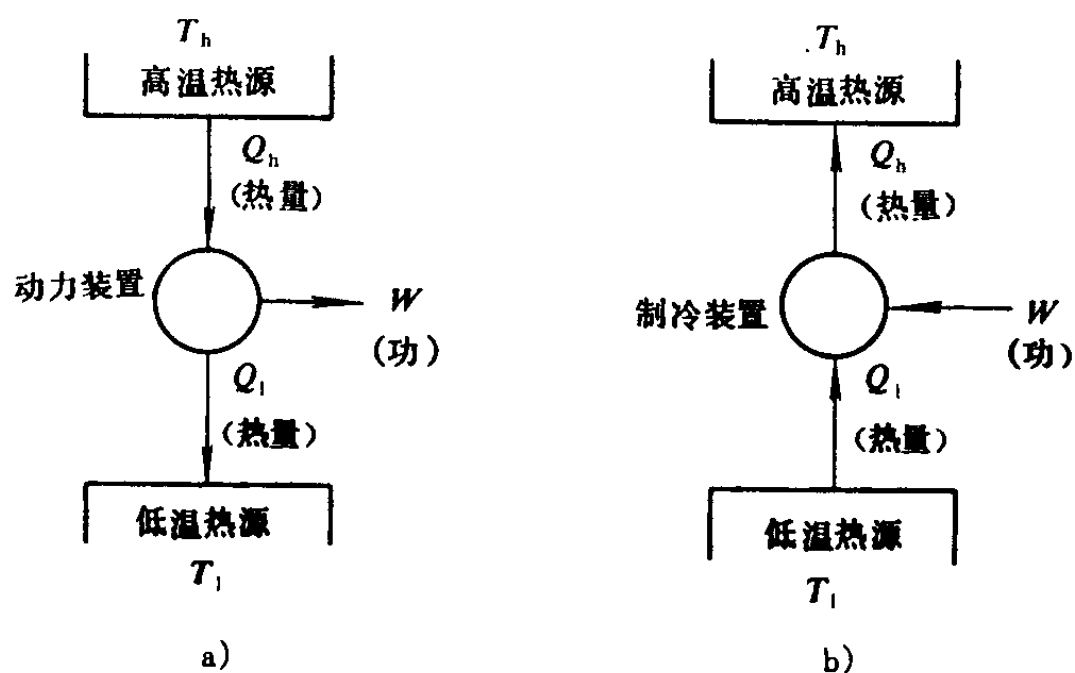
第 1 章 蒸气压缩式制冷的热力学原理

由热力学实验知道,任何液体在沸腾过程中将要吸收热量,液体的沸腾温度(即饱和温度)和吸热量随液体所处的压力而变化,压力越低,沸腾温度也越低。例如,1kg 氟利昂 22 液体,在 0.584MPa 压力时,其沸腾温度为 5°C ,吸热量为 200.62kJ/kg (单位质量气化潜热)。当压力为 0.296MPa 时,其沸腾温度降为 -15°C ,吸热量变为 211.00kJ/kg 。而且不同液体的饱和压力、沸腾温度和吸热量也各不相同。因此,只要根据所用制冷液体(称制冷剂)的热力性质,创造一定的压力条件,就可以在一定范围内获得所要求的低温。在实际用冷场合,需要连续和稳定地获得冷量,它不可能让制冷剂一次气化后即排入大气,这不但造成极大的浪费,而且污染环境。为此,必须使气化吸热后的制冷剂蒸气全部重新回复到原来的液体状态,然后才能再次用来制冷。制冷剂经过一系列的状态变化后重新回复到它的初态,称为制冷循环。显然,要实现制冷循环必须要有一定的设备,而且要以消耗能量作为补偿。蒸气压缩式制冷循环就是用压缩机等设备,以消耗机械功作为补偿,对制冷剂的状态进行循环变化,从而使用冷场合获得连续和稳定的冷量及低温。

研究蒸气压缩式制冷循环的主要目的,是为了分析影响制冷循环的各种因素,寻求节省制冷能耗的途径。

1.1 理想制冷循环——逆向可逆循环

在热力学中已经介绍,工质循环有两种方式。一种是正向循环,它是使高温热源的工质通过动力装置对外做功,然后再流向低温热源(图 1.1a)),称动力循环,即把热量转化为机械功的循环。所有的热力发动机都是按正向循环工作的,在温-熵或压-焓图上,循环的各个过程都是依次按顺时针方向变化的;另一种是逆向循环,它是使工质(制冷剂)在吸收低温热源的热量后通过制冷装置,并以外功作补偿,然后流向高温热源(图 1.1b))。逆向循环是一种消耗功的循环,制冷循环就是按逆向循环进行的,在温-熵或压-焓图上,循环的各个过程都是依次按逆



时针方向变化的。

逆向循环又分为可逆和不可逆两种。可逆循环是一种理想循环,它不考虑工质在流动和状态变化过程中的各种损失。如果在工质循环过程中考虑了上述各种损失,即为不可逆循环。在制冷循环中,不可逆损失主要来自两方面:即制冷剂在流动和状态变化时因内部摩擦、不平衡等引起的内部不可逆损失,以及冷凝器、蒸发器等换热器存在传热温差的外部不可逆损失。为了逐步熟悉和掌握影响制冷循环的各种因素,并寻求热力学上最完善的制冷循环,首先介绍逆卡诺循环。

1.1.1 无温差传热的逆向可逆循环——逆卡诺循环

逆卡诺循环是可逆的理想制冷循环,它不考虑工质在流动和状态变化过程中的内部和外部不可逆损失。虽然逆卡诺循环无法实现,但是通过该循环的分析所得出的结论对实际制冷循环具有重要的指导意义。

利用液体气化制冷的逆卡诺循环必须具备的条件是:高、低温热源温度恒定;工质在冷凝器和蒸发器中与外界热源之间无传热温差;工质在流经各个设备时无内部不可逆损失;膨胀机输出的功为压缩机所利用。实现逆卡诺循环的必要设备是压缩机、冷凝器、膨胀机和蒸发器。工质按逆卡诺循环过程以及这些过程在温-熵图上的表示如图 1.2 所示。

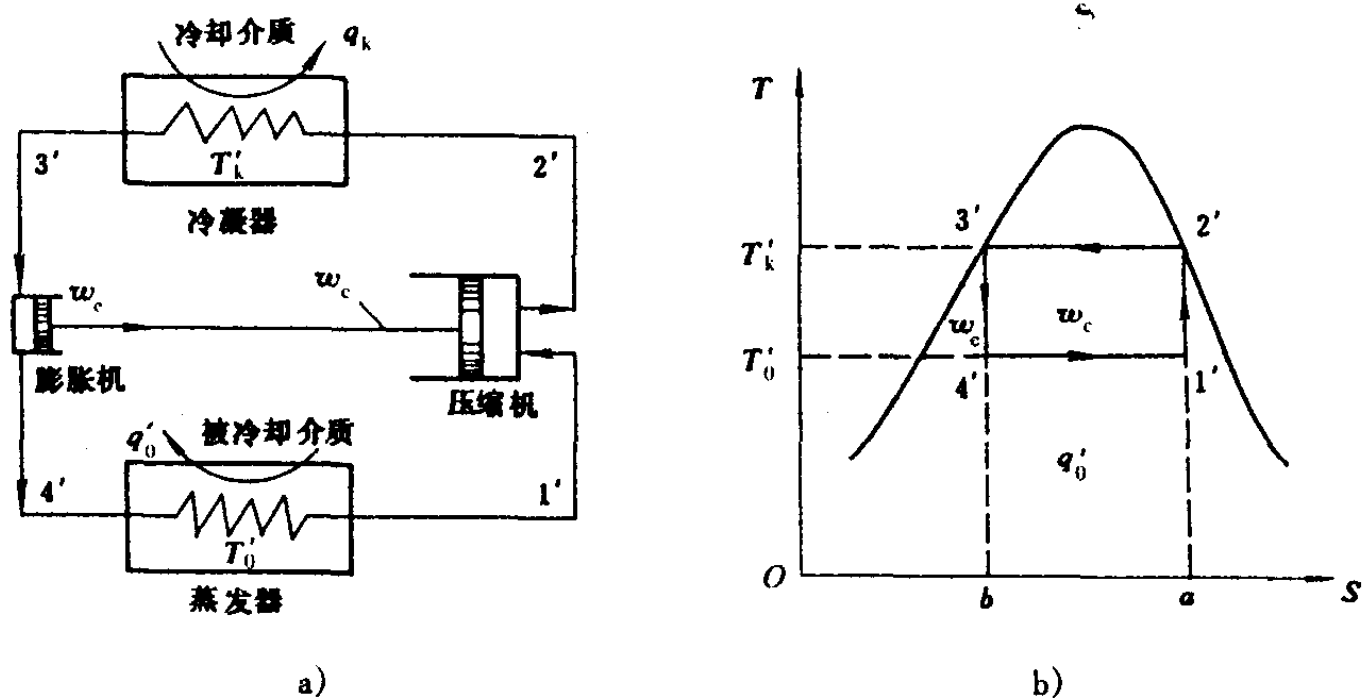


图 1.2 逆卡诺循环过程

由图 1.2 可知,制冷剂按逆卡诺循环的四个热力过程为:

绝热压缩过程 1'—2',在压缩机中制冷剂的温度由 T'_0 升至 T'_k ,压缩机做功 w ;

等温冷凝过程 2'—3',冷凝器中制冷剂在等温 T'_k 向高温热源放出热量 q'_k ;

绝热膨胀过程 3'—4',在膨胀机中制冷剂的温度由 T'_k 降至 T'_0 ,膨胀机输出功 W_c ,并为压缩机所利用;

等温蒸发过程 4'—1',蒸发器中制冷剂在等温 T'_0 吸收低温热源中的热量 q'_0 。

这样,单位质量制冷剂在每一次循环中从低温热源吸收的热量 q'_0 为

$$q'_0 = T'_0 (S_a - S_b) (\text{kJ/kg})$$

向高温热源放出的热量 q'_k 为

$$q'_k = T'_k (S_a - S_b) (\text{kJ/kg})$$

外界输入压缩机的净功 w_c 为

$$w_c = w - w_e = q'_k - q'_0 = (T'_k - T'_0)(S_a - S_b) \text{ (kJ/kg)}$$

制冷循环常用制冷系数 ϵ (即 COP, Coefficient of Performance) 表示它的循环经济性能, 制冷系数等于单位耗功量所制得的冷量, 对于逆卡诺循环而言:

$$\epsilon_c = \frac{q'_0}{w_c} = \frac{T'_0(S_a - S_b)}{(T'_k - T'_0)(S_a - S_b)} = \frac{T'_0}{(T'_k - T'_0)} \quad (1.1)$$

从公式(1.1)可知, 逆卡诺循环的制冷系数 ϵ_c 仅与高、低温热源温度有关, 而与制冷剂的热物理性能无关。当 T'_0 升高, T'_k 降低时, ϵ_c 增大, 这意味着单位耗功量所能制取的冷量增加, 提高了制冷循环的节能性和经济性。当 T'_k 与 T'_0 越接近, ϵ_c 的值迅速上升, 即只用少量的功就可以把较多的热量从低温热源转移到高温热源。求公式(1.1)两个偏导数的绝对值, 得:

$$\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_k} \right) \right| = \frac{T'_0}{(T'_k - T'_0)^2}$$

$$\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_0} \right) \right| = \frac{T'_k}{(T'_k - T'_0)^2}$$

由于 $T'_k > T'_0$

所以 $\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_0} \right) \right| > \left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_k} \right) \right| \quad (1.2)$

由公式(1.2)得知, T'_0 与 T'_k 对制冷系数 ϵ_c 的影响是不等价的, T'_0 的影响大于 T'_k 。同时, 也意味着要实现温度较低的制冷具有更高的难度。

由于逆卡诺循环不考虑各种损失, 而且压缩机利用了膨胀机对外输出的功, 因此, 在恒定的高、低温热源区间, 逆卡诺循环的制冷系数 ϵ_c 最大, 在该温度区间进行的其他各种制冷循环的制冷系数均小于 ϵ_c , 所以, 逆卡诺循环制冷系数可用来评价其他制冷循环的热力完善度。

1.1.2 具有传热温差的逆向可逆循环

如果在逆卡诺循环中考虑冷凝器和蒸发器的传热温差(外部不可逆)各为 ΔT_k 和 ΔT_0 (图 1.3), 则该循环多消耗的功可用面积 $2'233'2'$ 和 $11'4'41$ 表示, 减少的制冷量为面积 $11'4'41$ 。同理, 可得具有传热温差的逆向可逆循环制冷系数 ϵ'_c 为

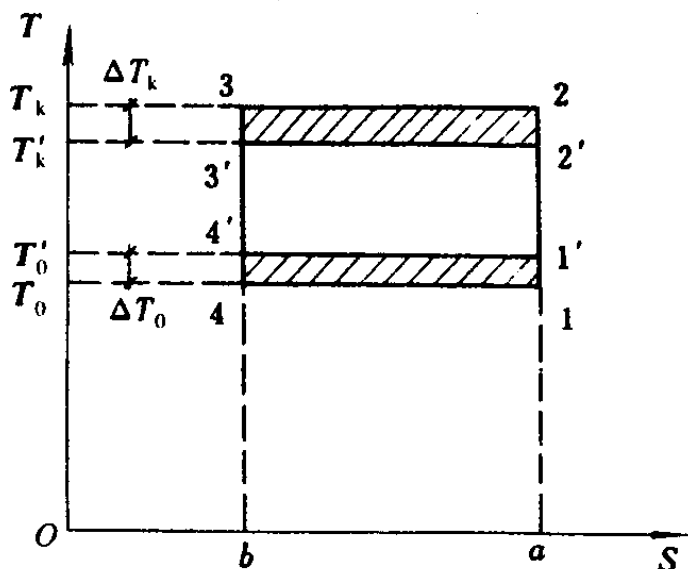


图 1.3 具有传热温差的逆向可逆循环

$$\epsilon'_c = \frac{T_0}{(T_k - T_0)} = \frac{T'_0 - \Delta T_0}{(T'_k - T'_0) + (\Delta T_k + \Delta T_0)} \quad (1.3)$$

显然 $\epsilon'_c < \epsilon_c$, 这表明具有传热温差的不可逆循环的制冷系数, 总小于相同热源温度时的逆卡诺循环制冷系数, 而且随传热温差 ΔT_k 和 ΔT_0 的增大而降低。同时, 从图 1.3 和公式(1.3)可知, 蒸发器传热温差 ΔT_0 对制冷系数 ϵ'_c 的影响将大于冷凝器传热温差 ΔT_k 。实际制冷循环的制冷系数随高温热源和低温热源的溫度不同以及过程的不可逆程度而变化, 其值可