

基本藏

263991

高等学校教学用书



制冷机及制冷设备

J. M. 罗潴费耳德 著
A. T. 特卡巧夫



高等教育出版社

高等学校教学用书



制 冷 机 及 制 冷 设 备

J. M. 罗溥费耳德 著
A. F. 特卡巧夫

南京工学院热工教研组组织翻译
夏彦儒 翁虎年 校订

高等教育出版社

100003

本书系根据苏联国立贸易书籍出版社(Государственное издательство торговой литературы)出版、罗姆费耳德(Л. М. Розенфельд)和特卡巧夫(А. П. Ткачев)著“制冷机及制冷设备”(Холодильные машины и аппараты)一书1955年版译出。原书经苏联高等教育部审定为工艺学院教科书。

原书系根据培养制冷工程师的“制冷机及制冷设备”教学大纲编写。书中叙述了各种型式制冷机与制冷设备的现代理论及计算,并介绍了其构造。

本书附有制冷工程中所用工质的热力学图表一册,不另发售。

本书供高等学校“制冷机”课程作为教材,并可供国民经济中利用冷冻的各部門科学研究人员、工程技术人员及研究生参考。

参加本书翻译者有:夏彦儒、苏长蓀、刘明杰、徐益祿、关密、臧鹭鸣等,并由夏彦儒及翁虎年校订。

制 冷 机 及 制 冷 设 备

南京工学院热工教研组译

夏彦儒 翁虎年校订

高等教育出版社出版 北京宣武门内承恩寺7号
(北京市书刊出版业营业许可出字第054号)

商务印书馆上海厂印刷 新华书店发行

统一书号 15010·847 开本 787×1092 1/16 印张 32 7/8 插页 13
字数 791,000 印数 1—2,000 定价(4) 5.00
1959年12月第1版 1959年12月上海第1次印刷

序

我国(苏联)生产力的偉大发展促成了民用商品生产的突飞猛进。

苏联最高苏維埃第五次常会、苏联共产党中央委员会九月全体会议的決議以及党和政府关于扩大民用商品生产和发展苏联商业的許多決議,都要求在制冷技术方面要有高度发展。

根据上述这些決議而訂出的冷藏庫建造新計劃,規定1956年的冷藏庫要比1950年增加1.2倍。在最近三年內,制冷压缩机和制冷設備的生产将增加3倍。

制冷技术这样巨大的发展,要求大量地培养出高度熟練的制冷工程的专家。

过去所用列文(И. И. Левин)教授所主編的制冷机和制冷設備的教科书是1939年出版的。这些年来,这一門課程的范围和内容都有了很大的变动,因此重新写出本书。

本书中利用了列文教授在原著中所編写的一部分材料。

著者們以感謝的心情指出:他們曾在列文教授所領導的制冷机教研組中参加过长期的工作,而这对他們在編写本书时有很大的帮助。

緒論和第 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII、XIV 章是技术科学博士罗澤費耳德(Л. М. Розенфельд)教授写的。

第 VIII、IX、X、XI 章是技术科学副博士特卡巧夫(А. Г. Ткачев)副教授写的。

第 VII 章“制冷压缩机及制冷机組的构造”是古列維契(Е. С. Гуревич)工程师写的。

在写稿中,列宁格勒制冷工艺学院的制冷机教研組和冷热工程理論基础教研組教师們也参加了工作。

达尼洛符(Г. Н. Данилов)、柯石金(Н. Н. Кошкин)、庫雷列夫(Е. С. Курьлев)三位副教授及米哈尔斯卡雅(Р. Н. Михальская)、謝尔达柯夫(Г. С. Сердаков)、奧諾索夫斯基(В. В. Оносовский)、辛尼青娜(А. С. Спицина)和阿列舒尼娜雅(О. Н. Алешунина)各位助教在本书編写时都會有所帮助;奧德薩食品及制冷工业学院的制冷机教研組的教师們,以及馬尔丁諾夫斯基(В. С. Мартыновский)和巴笛耳凱斯(И. С. Бадилькес)两位教授和柯布拉石維耳(Ш. Н. Кобулашвили)工程师在討論原稿时曾提出許多宝贵的意見和批評。著者們在此特致謝忱。

著者們欢迎对本书的批評意見,并將在授課时加以考虑。

如有批評或意見,請寄到莫斯科 Дубининская ул, 39, Госторгиздат。

目 录

序	5
緒論	1
第一章 制冷机的热力学理論	7
可逆的反循环	7
具有热力发动机的制冷机	15
用制冷机来供暖	22
第二章 气体压缩机的的工作过程	27
活塞式气体压缩机的理論工作过程	27
活塞式气体压缩机实际工作过程中的容积损失	37
气体压缩机实际工作过程中的能量损失	43
活塞式气体压缩机中的多級压缩	46
回轉式压缩机的工作过程	50
离心式气体压缩机的工作过程	54
軸流式压缩机	67
第三章 气体压缩机的工作原理	71
活塞式压缩机的动力学	71
在各种布置方式下活塞式压缩机中慣性力的均衡	77
动力学規律在选择活塞式压缩机主要尺寸时的影响	82
活塞式气体压缩机	84
回轉式气体压缩机	92
离心式气体压缩机	94
压缩机主要尺寸的計算示例	98
第四章 工质性质对制冷机过程的影响	107
气体制冷机循环	107
蒸气制冷机的工质	114
具有调节阀和可逆压缩过程的蒸气制冷机循环	132
在调节阀以前将液体冷却的循环	141
在压缩中使蒸气温度过分提高的蒸气制冷机循环	144
制冷机在超临界区域内的工作情况	151
第五章 蒸气制冷机	154
制冷机的特性	154
活塞式制冷压缩机的容积系数及能量系数	162
制冷机的自动化及其工况的調节	172
制冷机压缩机的热計算示例	184
第六章 多級制冷机及串級制冷机	187
多級制冷机	187
串級制冷机	195
多級机器的实际方案	198
在一个气缸中实行兩級压缩	203
多級制冷机热計算示例	207
第七章 活塞式制冷压缩机及制冷机组的构造	212
活塞式(往复)制冷压缩机构造形式的发展	212
現代苏联活塞式制冷压缩机	219
現代活塞式压缩机的构造	230
自动化制冷压缩机組	238
制冷压缩机各部件的設計特点	242
制冷机設計的原始数据	242
制冷压缩机主要尺寸的确定	245
气閥的构造与設計	248
制冷机的安全装置	259
調节制冷率的装置	265
密封套的构造和計算	270
第八章 制冷设备中的换热原理	275
基本方程式	275
带肋的表面	279
平均温差	283
相似理論簡說	285
沒有集态变化时的对流换热	287
集态变化时的对流换热	298

辐射换热	309	换热设备的流体力学计算	318
水与空气之间的换热	311		
第九章 冷凝器与过冷器			321
水冷式冷凝器	321	用空气冷却的冷凝器	348
水冷式冷凝器的热计算	327	过冷器与换热器	345
淋水-蒸发式冷凝器	333		
第十章 蒸发器			346
用以冷却液态热媒的蒸发器	346	蒸发器工作的技术-经济分析	362
用以冷却空气的蒸发器	356		
第十一章 空气冷却器			368
空气冷却器的类型	368	干式空气冷却器的计算	372
冷却过程	370	湿式空气冷却器的计算	374
第十二章 离心式与蒸气喷射式制冷机			378
离心式空气制冷机	378	带有热力发动机的离心式制冷机	393
离心式蒸气制冷机	382	蒸气喷射式制冷机	395
第十三章 氨水溶液的热力循环			402
溶液的浓度与焓	402	氨水溶液的正热力循环	412
溶液热力平衡的理论	405	氨水压缩机式制冷机热力循环的工作过程	421
氨水溶液平衡相的热力参数的确定	408		
第十四章 吸收式制冷机			426
吸收式制冷机联合循环的理论	426	吸收式制冷机工作的分析	461
没有换热器和精馏器的吸收式制冷机	431	吸收-再吸式制冷机	471
具有换热器和精馏器的吸收式制冷机	439	小型吸收式制冷机	473
吸收式制冷机的设备	452	利用冬季低温以作动力供热	478
参考书刊			481
附录			485
制冷机工质的热力图(附册)			

緒 論

在排热而降温的过程——也叫做冷却过程——中,至少有两个物体参加:被冷却物体与冷却物体。冷却物体所能吸取的热量确定它的制冷效应。在有“相”变化而同时吸取大量热能的过程(液体的沸腾、冰的融化、二氧化碳的升华等等)中,制冷效应很大。举例来说,一公斤融化着的冰在恒温 0°C 时的制冷效应为80大卡,而在不融化的条件下温度提高 1°C 时只有0.5大卡。

也可用其他各种物理方法来制冷:物体降低内能而膨胀做功(绝热膨胀或多变膨胀),用节流过程降低内能(焦耳-汤姆孙效应),热电现象(珀尔帖效应)与磁现象(定温磁化的顺磁物体的磁场被绝热地切断时)等等^[1,11]。

最简单的冷却方法就是使被冷却物体与周围介质作热交换;所谓周围介质可能是室外的空气、土壤、河水或海水。但是只靠热交换的天然方法——纵然是最良好的热交换——也只能将被冷却物体的温度降低到周围介质的温度。物体之冷却,可能由最高温度降至接近于绝对零度的温度;由最高温度冷却到周围介质温度这一个阶段称为天然冷却,低于周围介质这一个阶段称为人工冷却。

由此,人工冷却的温度上限是周围介质的最低温度,下限是绝对零度;提出的热量叫作人工制冷量。

大自然中的温度变动使人们可能保存或储蓄天然冷。为了保存冬季的天然冷,采用最广的物质是冰。但冬天所能储备的冰量有限而储存期间的损失很大——纵然采用最好的绝热方法,损失还是很大。采冰与储冰的手续要耗费大量的人工,因此用这个方法来自冷,在经济上不见得永远是最合适的。

使冰与食盐混合(致冷混合物)可降低冰的融化温度。致冷混合物的最低温度决定于它的低熔冰盐合晶点。在冰盐混合物的低熔冰盐合晶点上,盐酐含量为80%,温度为 -21.2° 。其他致冷混合物能造成更低的温度^[2,4]。

致冷混合物的各组分,或借储蓄冬季的冷量而得(冰),或耗费能量而制成(盐的结晶)。只要混合物中存有这些组分,就一直可用这个方法来自冷。

罗蒙诺索夫在关于低温的科学上有很大的贡献^[3]。他在“论热与冷”(1745年)一文中分析了致冷混合物中所发生的过程。他在“1755年1月20日所作液体冷冻实验”一文中提出的实验数据和结论特别值得注意。

洛维茨(Т. Е. Ловиц)院士继续罗蒙诺索夫的工作,用致冷混合物得到了 -50° 的低温,其他的科学家利用洛维茨的工作而液化了某些气体(氨、二氧化硫等),这些气体后来都开始用于制冷工程中。门捷列耶夫(1860年)^[5]和后来的斯托列托夫(А. Г. Столетов)(1882年)^[6]发现了物质由气态变为液态和由液态变为气态这两种过程的物理本质;他们的卓越成就在制冷技术中起

了很大的作用。后来液体的沸腾广泛地被利用来获得制冷效应。

門捷列耶夫在气体的压缩性方面的工作,替气体节流过程在制冷工程上的应用打下了科学基础^[6]。

后来人们利用处于一定热力状态下的物体来获得低于周围介质温度的温度。上述这几位科学家的工作对这一点也起了推进的作用。这些物体有液态空气、液态氮、固体二氧化碳等。

根据热力学第二定律,一个物体不可能不预先耗费功而自发地达到一个可以把它自己的温度降低到比周围介质的温度还低的状态(储蓄天然冷量不在此例)。换言之,能够发生人工冷却的物体必具有能量^①,且不能继续不断地发生冷却作用。由此必须继续不断地耗费功才能继续不断地进行人工冷却。同时,被冷却物体则把热量传给周围介质。

这样的传热是用反热力循环或制冷循环来实现的,在这种循环中(例如反卡诺循环中),从被冷却物体提出的热量在换热器中传给工质。然后用压缩机绝热地将工质压缩,使它的温度升高到与周围介质的温度相等。在另一换热器中,工质将热量放出,传给周围介质,然后再绝热地膨胀,降低内能而作功,其温度降低到被冷却体(冷源)的温度,结果是:耗费的功等于压缩机的功与膨胀机的功之差。这个制冷循环是由四个机件来实现的:压缩机、膨胀机和两个换热器。在实际制冷循环中,常以节流阀来代替膨胀机,而机件的数目常不止四个。

用以实现反循环的这些机件,总起来叫作制冷机。制冷机三个字只是一个习用的名称,因为它事实上是指为实现制冷循环所必需而联在一起的许多机件(换热器、压缩机、膨胀机或节流阀等等)。

制冷循环可以不闭合而仍不影响它的各热力过程^[8]。循环只完成一部分后,可停止热力过程,再在其他的时间或其他的地点继续下去。固体二氧化碳(干冰)、液态空气、液态氮等等的制造都是不闭合循环的例子。

制造干冰^[9]时,用压缩机将二氧化碳气体压缩到一定的压力,然后由这些气体将热量排给周围介质而液化。将液态二氧化碳节流至较低的压力,就形成固体二氧化碳。循环在此处中止,固体二氧化碳可提出保存以便在别的地方发生制冷效应。此时固体升华而转变为气体。

由此,这个热力循环是由两部分组成的:在一部分中耗费了功而将气体二氧化碳转变为固体,在另一部分中则由于固体二氧化碳转变为气体而发生人工冷。在这个过程中每单位质量所发生的冷量相当于该闭合热力循环的制冷效应。

发生人工冷的方法有二,第一个方法以天然冷的储蓄为基础。第二法以热力学第二定律所表示的自然规律为基础。

第一法属于冰盐制冷的范围,我们不讨论它,第二法是机械制冷的基础,本书将予以详细讨论。

用制冷机所能达到的温度范围很大。因此通常习惯地分为中度制冷范围与深度制冷范围。

① 按能够发生人工冷却的物体并不是具有能量。例如高压空气(温度与周围介质的相同)可以制冷,但并不是因为具有能量而是因为焓减少了,固体干冰的内能也比气体 CO_2 的少——译者注。

可能原作者是指工质在冷凝器以前之状态,而译者是指工质在冷凝器以后之状态——校者注。

前者的温度不低於 -120° ，後者的温度在 -120° 以下 [7]。深度制冷主要用于空气及其他气体的液化，而自成一門独立的制冷技术 [7]。制冷机這一門課程只討論获得中度制冷的办法。

反循环不仅可用于制冷，也可用以制热。著名俄国科学家米赫耳松 (B. A. Михельсон) [10] 称这种利用反循环的制热为动力制热 (动力供热)。

在制冷循环中，热量由被冷却物体傳至周圍介质。在动力制热循环 (通常称为热泵) 中，热量由周圍介质傳至被热物体，因为这个循环的目的是将物体的温度維持在周圍介质的温度以上，这样的热量轉移，和制冷循环中一样，也不可能不耗費功而实现。

动力制热原理也由热力学第二定律表示出来。根据这个定律，一个物体的温度高于周圍介质温度时，假如不耗費适量的功来維持这个温度，又不向它加热，則它必冷却。

制冷循环与热泵循环的区别只在于温度間隔的位置。周圍介质的温度是制冷循环的温度上限，而是热泵循环的温度下限。图 1 中的温熵图表示三个反循环。在被冷却物体温度 T_0 和周圍介质温度 T 之間进行的反循环 1—2—3—4 (图 1, a) 是制冷循环。热泵循环 5—6—7—8 (图 1, б) 也是一个反循环，但以温度 T 向周圍介质吸取热量而傳給温度为 T_0 的热源。

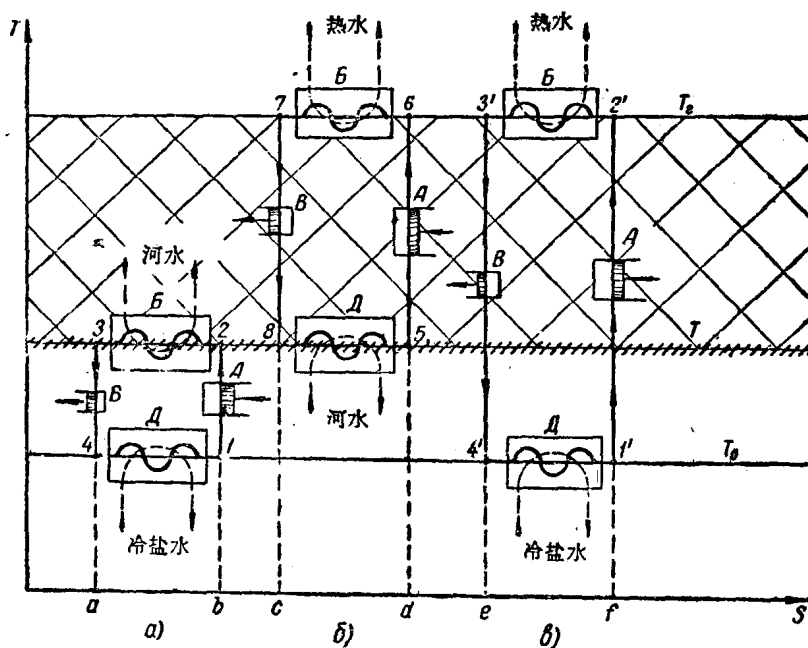


图 1. 反循环:

а—制冷机; б—热泵; в—热化机; А—压缩机; Б—冷凝器; В—膨胀机; Д—蒸发器。

由此，制冷机不仅可用于人工制冷，也可用以制热。用以制热时，制冷机改变成所谓热泵。

在工程中，常需要同时制冷和制热。用制冷机也可满足这个要求。用以同时制冷和制热的反循环 1'—2'—3'—4' (图 1, в) 可简称为反热化循环。

按它的性质来看，同时制冷和制热的反循环使我们可以充分地利用制冷机。

反循环都是在两个热源之間进行的。按热源温度的間隔，制冷机可分为三类：

- (1) 中度制冷机 (由 -120° 至周圍介质的温度);
- (2) 深度制冷机 (-120° 以下);
- (3) 热泵, 在周圍介质温度与受热体温度之間工作。

也可以利用珀耳帖效应来获得低温。如在热电偶的导电絲中通直流电, 則視电流方向的不同, 导絲接头的温度会提高或降低, 这个現象称为珀耳帖效应。

由于各接头温度的差异, 就发生逆电动势, 而必須用电压来克服这个逆电动势。由于各导电絲的温度不同, 当电流通过导电絲时就引起了額外的电动势; 这个現象称为湯姆逊效应。

純粹用电制冷的可能性造成了一个引人入胜的远景。假如珀耳帖效应的利用获得成功, 例如用以冷却家庭冰箱, 則这种不用制冷剂、不用机器又无任何运动部件的制冷方法将会在很多场合有它的优越性。

作計算时, 从热电偶所发生的电动势 E 出发; E 的单位为 $\mu V/度$ 。

使接头冷却时所吸取的热量相当于流过的电量而与珀耳帖系数, 电流强度及時間都有关系。

所供給的热量等于有效制冷量、焦耳热和因接头温差而发生的傳热的损失之和。

为了实际应用珀耳帖效应, 必須建立热电动势 $E > 200\mu V/度$ 。例如, 制冷率为 50 大卡/时的中型家用电冰箱需要 $E = 480\mu V/度$ 。在这种情况下, 一般金属多半不合用。

約飞 (А. Ф. Иоффе) 和他的学生們在半导体方面的工作^[105]一定会使这个发生反循环的新原理付諸实现。

人工冷之广被采用于各种生产过程中^[15]和广被采用以保存食品, 这引起我国一門新工业——制冷工业——的建立。制冷工业是偉大的十月社会主义革命以后才开始发展的国民經济中的一个部門。在今天, 苏联的制冷工业是一个强大的企业, 它拥有最新式的制冷机。

假如沒有运输设备保証将食品完好地运送至消費地点, 則在各地用冷藏庫来儲藏食品就不能获得应有的效果。特备的冷藏船担任在海洋中运送食品的责任, 铁道上的冷藏車与公路上的冷藏汽車 (有时称为恒温車) 担任陆路上运送食品的责任^[13,14]。

在商业网中和直接在日常生活中, 采用小型自动制冷机和冰箱^[21,22,23]。商店中常采用冷藏柜台。假如沒有制冷装置, 食品工业的各种企业——肉品联合工厂, 啤酒, 酿造和奶油厂, 乳品联合工厂, 粮仓——都不堪設想^[15]。

冰結凌的生产, 水果与蔬菜的冷冻都是建立在制冷工程基础上的新工业。

制冷技术不仅应用在食品工业中。

在許多工业部門的各种企业中, 制冷机都是必要的装备。化工厂、仪器制造厂、实验站, 以及矿井的掘、地下铁道的建造都采用制冷机^[16,17]。

用以制造所謂“人工气候”或空气調节的装置是人工冷的最大用戶^[18,19]。在夏季, 冶金厂、紡織企业和剧院維持一个“清涼”的温度和一定的湿度, 这是非常重要的。可自动調节温度和湿度的制冷机正好适合这个要求。

冷藏庫建筑的增加与制冷装置在工业各部門中的广泛运用, 推进了制冷机器制造业的发

展。

現代的小型、中型和大型制冷機可以滿足各不同用冷工業部門的廣泛要求^[27,28,29]。它們保證獲得溫度不太低的人工冷(空氣調節)、溫度較低的(凍結室和凍結設備)和溫度很低的(工業各部門、實驗室)人工冷。

關於增加制冷機生產方面，一個非常重要的問題就是金屬消耗的節約。我國制冷機製造業建造了高速機器。製造這些機器時所耗費的金屬比以前的各種設計少得多了。我們的先進設計家採用轉速高而慣性力平衡得很好的機器，並創制相應的閥門^[28,29]，這樣才達到了節省金屬的目的。

在現代的制冷高速壓縮機中，能量消耗的節約也很重要。制冷機熱力循環的性質影響到制冷所耗的能量。由制冷循環的熱力學分析可見，實際熱力循環愈完善，則獲得單位冷量所耗的能量愈小。因此，需要很低的溫度時，常採用兩級或三級壓縮，並使工質經過中間冷卻。這樣的熱力循環降低了能量的消耗，因而較為完善。壓縮機的容積效率和能量效率的提高反映出循環的優越性^[1,30,31]。

有許多著作致力於制冷機實際循環中能量損失之減少問題；在實際制冷工程中，這些著作正被利用着^[31,32,50,77]。

在我國國民經濟的情況下，解決高生產率制冷機的問題，必須根據技術——經濟分析，同時考慮到能量和金屬的消耗以及壓縮機和各種設備的製造費用。

制冷機中所用工質的選擇也是一個重要問題。因此，工質特性的研究是直接和制冷機器製造業的發展聯系着的^[32—39]。

現代機器製造業的一個重要特點是機器的設計與它的生產情況緊密地配合。

我國(蘇聯)制冷機製造業發展的這些遠景，使得人們要用最少的勞動量和時間來不斷地製造出新型的壓縮機。現代制冷機構造的特點是零件、組件及整個壓縮機的統一化。採用了這個制度，就可用標準零件。造成不同的機器，從而保證成本降低，機器質量提高。制冷壓縮機的標準化也是現代我國機器製造業的重要特點。

在工業企業中、煤礦中和公共建築中調節空氣時需要制冷率由 20 萬至 3.5 百萬標準大卡/小時的制冷機。在化學工業中生產人造橡膠等產品時，要求制冷率由 10 萬至 3.5 百萬大卡/小時的制冷裝置。食品工業中有時也宜採用生產率很大的制冷機。

在制冷率很大的裝置中，活塞式壓縮機頗不相宜，因為它既龐大又昂貴。在這種情況之下，採用透平壓縮機較為合理^[40,41]。透平式制冷裝置的採用是我國制冷工業當前的一個課題。

制冷機的完善程度與換熱器的性能也有關係，換熱器(蒸發器、冷室致冷管組、空氣冷卻器、冷凝器)的任務是向被冷卻物體吸取熱量再把它傳給周圍介質。

現代制冷工業的重要問題是要使以小溫差工作的換熱器強化^[24,25,26]。制冷工業中普遍採用的工質——氟利昂——的特點是散熱係數小。因此如何提高氟利昂制冷機中換熱器的性能問題正吸引着我國科學家和工程師們的注意。

近年以來，我國制冷技術方面有顯著的進步。目前正極力重視制冷機的自動化。要使制冷

机中各过程自动化,必須根据被冷却物体的各种工艺过程与机器本身内部的各过程之間的相互关系,来建立制冷机的不稳定工作状态的理論和調节理論。

自动喂送工质到被冷却对象这个新方法的发明^[42],不只是便利了新冷藏庫的建造,也改进了它的运行,在运行中主要的問題是如何在质量上把食品保存得好。

現代化制冷机耗用大量的能。根据企业的能量平衡的分析和整个国民經济的利益来挑选制冷机的类型(压缩式或吸收式),才能保証在能量方面获得重大的利益。在耗用大量的热和冷的企业中(肉类联合工厂、乳品联合工厂及其他食品企业),自己設有中心热电厂时,最好采用吸收式或吸收—压缩式系統。利用次級能源(烟道气等)和当地天然資源(包括太阳能)来制冷有重大的意义。

制冷循环不只是用以制冷,在动力工程中也采用它。由各工业部門的中央热电企业来供热的大工业中心多半需用不同压力的蒸汽。由汽輪机撤出最高压力的蒸汽而将它整个耗費在供热方面是不合算的,因为这减少了中央热电厂的发电量。在这种情况下,由各企业采用热泵来供热是最合理的。

热能动力方面所用的变热器以各种不同方式来实现反循环。所采用的有:电动的或汽輪机拖动的压缩装置(透平式和旋轉式),蒸汽冲射式压缩器,热化学变热器^[43]。

在利用次級能源的基础上采用制冷循环来供热,可减少为供热而耗費的燃料。利用制冷机可在冬季供热而在夏季冷却房屋中的空气。由此,利用制冷机以供热,就可以用最經濟的方式来解决終年調节空气的問題。

第一章 制冷机的热力学理论

可逆的反循环

一直到近年,制冷机理论的特点是设法使制冷机的工作循环接近卡诺循环。

大家知道,只有在被冷却物和周围介质的温度为恒值,且在热交换过程中,工质与热源间的温差为无限小的情况下,才可用耗功最少的可逆卡诺循环来获得人工冷。在这种情况下卡诺循环可以作为制冷机完善程度的范例。然而在实际情况中,制冷过程常常是在变温的情况下进行的。

热力学中把所研究的过程当作是与时间无关的,因而变温的热源必须看作一系列无穷多的、连续的、温度不同而不变的热源。当变温热源的物理过程上的各点温度都不随时间而变时,这种物理过程可借无穷多的微小卡诺循环来实现而无不可逆的损失。然而,当热源的温度不是恒值时,要实现一个由两个定温过程和两个绝热过程所组成的可逆循环是不可能的。在冷却变温热源的物理过程中,工质的等温线应当相应着热源的低温。既然变温热源与工质发生热交换过程时的温差不是无限小,结果就有不可逆的损失;因此在这种情况下,由两个定温过程和两个绝热过程所组成的循环也是不可逆的。

普遍地采用卡诺循环来鉴定各种类型制冷机(例如空气式,吸收式等)的热力完善程度,常导致不正确的结果,因而导致不正确的实际运用。

现在我们来研究一个在不变的周围介质温度 T 和被冷却物体温度 T_0 时工质所经过的制冷循环。设工质与热源(周围介质与被冷却物体)在热交换过程中的温差为无限小。在这种情况下,卡诺循环是其热力完善程度的极限。这个由两个定温过程和两个绝热过程所组成的理想制冷循环 1—2—3—4 的熵温图如图 1, a 所示。自温度为 T_0 的低温热源所提出的热量 q_0 , 在定温过程 4—1 中传给工质。面积 a—4—1—b 即表示这个热量。面积 1—2—3—4 表示循环中所耗的功 Al 。理想的卡诺循环中,工质与热源间之温差无限小,所以同样这两个吸热和放热过程也可适用于热源。所不同者仅过程的方向而已。假如工质是湿蒸气,最容易实现卡诺循环。此时点 1 的位置应使绝热压缩终了时在压缩机内获得饱和蒸气。点 4 应该相当于湿蒸气或饱和液体膨胀过程的终点。

把蒸发器内所形成的蒸气连续不断地吸出,可以使沸腾温度保持在不变的 T_0 值上。这样,两根定温线—— T_0 (蒸发器温度)和 T (冷凝器温度),及两根绝热线,1—2(压缩线)和 3—4(膨胀线)形成了湿蒸气领域里的卡诺循环。循环功 Al 比压缩功 Al_k 少一个膨胀功 Al_p 之值:

$$Al = Al_k - Al_p$$

绝热地压缩蒸气的压缩功等于点 2 与点 1 处两焓值之差 $Al_k = i_2 - i_1$, 膨胀功则为 $Al_p =$

$$= \dot{q}_3 - \dot{q}_4。$$

制冷技术中，通常采用制冷系数 ε 来鉴定反循环的性能。制冷系数是从被冷却物体提出的热量与以热量为单位的循环功之比：

$$\varepsilon = \frac{q_0}{Al}。 \quad (I-1)$$

卡诺循环的制冷系数 ε_c 可以用温度来表示：

$$\varepsilon_c = \frac{T_0}{T - T_0}。 \quad (I-1a)$$

在这种循环中所耗的功最小，其值与制冷系数成反比：

$$Al = \frac{q_0}{\varepsilon_c}。 \quad (I-2)$$

公式(I-1a)指出：当周围介质温度为 T 时，被冷却物体的温度 T_0 愈低，则用于获得单位冷量所耗的功也愈多。在同一地点，所有制冷机的周围介质温度均相同；这时具有不同被冷却物体温度 T_0 的卡诺循环，其用于产生单位冷量所耗的功将视温度 T_0 之值而定。因此一定地点、一定时间内的制冷系数应视被冷却物体的温度 T_0 而定。

周围介质温度 T 及吸热热源的温度 T_1 为恒值时，卡诺循环也表示热泵的热力完善程度的极限情况。热泵的卡诺循环 $5-6-7-8$ 如图 1, δ 所示。面积 $8-5-d-c$ 相当于传给工质的热量 q ，面积 $7-6-d-c$ 相当于工质所放出的热量 q_1 ，面积 $5-6-7-8$ 相当于循环功。这个循环的最小功是

$$Al_c = \frac{q_1}{\mu}。 \quad (I-3)$$

我们用所获得的热量与所耗的功之比来衡量热泵循环的性能。这个比值事实上就是反循环过程的制热系数 μ ，习惯上称为转换系数：

$$\mu = \frac{q_1}{Al_c}。 \quad (I-4)$$

制热系数是以同样外热源温度工作的正循环热效率的倒数：

$$\mu = \frac{1}{\eta_T}， \text{ 因为 } \eta_T = \frac{Al_c}{q_1}。 \quad (I-4a)$$

事实上与正循环相反的是热泵循环而不是制冷循环。如先按热力发动机的可逆循环运行，然后再按热泵可逆循环运行，则外部介质将不发生任何变化。在热力发动机与制冷机循环中工作过程的方向和温度范围都不同。

可逆的卡诺循环并不是唯一可能实现人工制冷和动力制热而无不可逆损失的循环。可逆循环可视为热源的性质而以不同的方式来实现。但任意可逆循环可以当作是由无穷多而无限小的卡诺循环所组合起来的。上面所建立的有关热力学制冷性能的概念适用于每一个单元卡诺循环。

现在研究一种较为普遍的情况：放热的被冷却物和吸热的周围介质完成任意热力过程。如在过程的各点上，热源与工质间的温差均为无限小，则在保持机械平衡的条件下，这些过程是可逆的^[31,45]。

图 2 上的 $a-b$ 和 $c-d$ 线表示热源热力过程的性质, 过程的方向由线外的箭头表示。1-2-3-4 为工质的循环, 其方向如线内的箭头所示。循环 1-2-3-4 是反行的。因而工质的过程线 2-3 和 4-1, 与热源的过程线 $a-b$ 和 $c-d$ 位置相同, 但方向相反。

把循环 1-2-3-4 分割成许多单元循环, 其中之一如图 2 上的阴影面积所示。这个单元循环的热力学制冷性能视其制冷系数 ϵ_i 而定。既然单元循环的熵差为无限小, 热源的吸热温度 T_i 及排热温度 T_{oi} 可以视为恒值, 而得

$$\epsilon_i = \frac{T_{oi}}{T_i - T_{oi}} \quad (I-5)$$

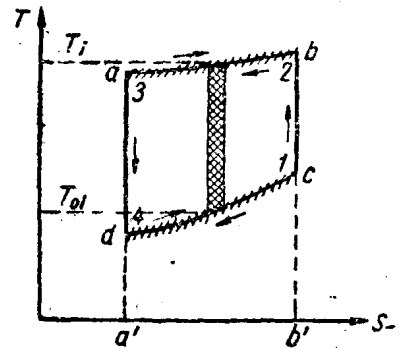


图 2. 可逆反循环。

数值 ϵ_i 表示热源的温度为给定的恒值 T_i 及 T_{oi} 时的热力学制冷性能。各单元循环的 ϵ_i 值均不同。循环 1-2-3-4 的热力学制冷性能确定于其制冷系数 ϵ :

$$\epsilon = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{\int_a^c T_{oi} ds}{\int_a^b T_i ds - \int_a^c T_{oi} ds} \quad (I-6)$$

因此, 任意循环的热力性能, 确定于其所能分割成的单元卡诺循环的最小功。各个单元循环的最小功愈小, 整个循环的最小功也愈小。

各种可逆循环的最小功也各不相同, 其值决定于实行过程的各外部热源的性质。

耗功最小的可逆循环, 是给定情况下循环在热力方面完善性的标准。它的实用意义就在于此。将实际耗费的功与最小功作比较, 就不难确定实际循环与在给定条件下无损失地工作, 而制冷量相同的循环比较起来完善到了什么程度。

现在进一步说明不管外热源的性质如何就用卡诺循环作为鉴定循环完善程度的标准的不正确性。

假设有一个被冷却的热源; 它的性质确定于 $a-b$ 线(图 3, a), 周围介质的温度 T 为恒质。

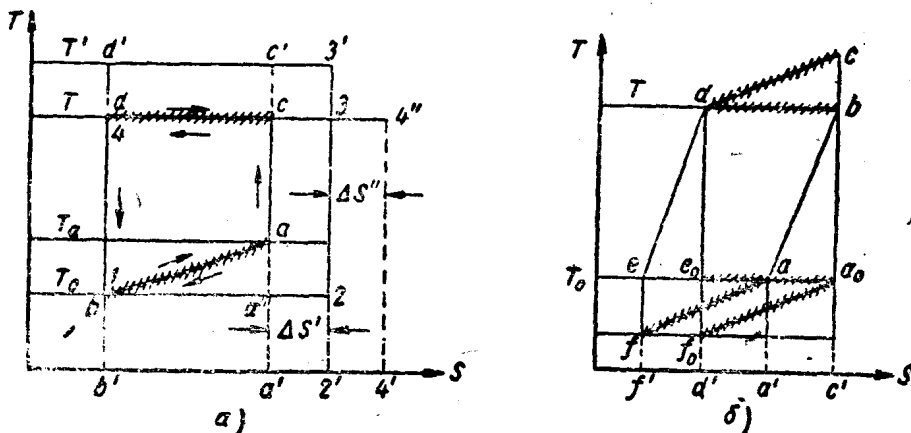


图 3. 可逆的制冷循环:
a—一般的; b—具有内热交换的。

此时被冷却的热源应放出面积 $a'-a-b-b'$ 所代表的热量 q_0 大卡/公斤。设用工质来实现可逆的制冷循环 $a-c-d-b$ 。在这个循环里,由于热交换过程中工质与热源间的温差为无限小,因而热源的冷却线 $a-b$ 和周围介质的吸热线 $d-c$ 实际上是与工质的状态变化线 $b-a$ 和 $c-d$ 相重合的,所不同者仅方向相反而已。如 $a-c$ 与 $d-b$ 代表绝热压缩和膨胀过程,则制冷循环 $a-c-d-b$ 是可逆的,因而其功 Al_0 亦为最小。这个循环的制冷系数 $\varepsilon_0 = \frac{q_0}{Al_0}$ 是在给定条件下与其他所有其他循环制冷系数比较起来的极大值。

现在试看为此同一目的而实现卡诺循环的可能性。

这个循环是由两个定温过程和两个绝热过程所组成的,然而是不可逆的,因此实质上不能称为卡诺循环。

纵然在过程终了时还有极好的热交换,也只有当工质的定温线与 T_0 (图 3, a) 处于同一水平时才能向被冷却热源提取热量 q_0 , 工质在温度为 T_0 的等温过程中所吸入的热量 q_0 可以这样表示出来: 从与点 b 相重合的点 1, 沿温度为 T_0 的等温线截 $1-2$ 线段, 使其下的面积 $1-2-2'-b'$ 与面积 $b-a-a'-b'$ 相等。矩形 $b-2-3-d$ 在温度界限 T_0 及 T 之间形成了一个由两根定温线和两根绝热线所组成的循环。在这个循环里, 工质在温度 T_0 时所吸入的热量正和循环 $a-c-d-b$ 中所吸入的热量一样多。从温熵图上可知, 由于面积 $b-2-3-d$ 大于面积 $a-c-d-b$, 因而在这种情况下, 定温循环的循环功 Al'_c 大于功 Al_0 。由于在同一的制冷量 q_0 值下, $Al'_c > Al_0$, 所以由两根定温线和两根绝热线所组成的循环的制冷效应 $\varepsilon'_c = \frac{q_0}{Al'_c}$ 比可逆循环的制冷效应 $\varepsilon_0 = \frac{q_0}{Al_0}$ 为小。

用温度来表示制冷系数也可以获得同样的结论。被冷却物 (在过程 $a-b$ 中) 所放出的热量可用下式计算 [31]:

$$q_0 = \int_b^a T ds = T_m (s_a - s_b), \quad (I-7)$$

式中 T_m 是过程 $a-b$ 中的平均温度。

这样, 可逆循环的制冷系数就可用下式表示:

$$\varepsilon_0 = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{T_m (s_a - s_b)}{T (s_a - s_b) - T_m (s_a - s_b)} = \frac{T_m}{T - T_m} \quad (I-8)$$

因为过程 $a-b$ 的温度大于 T_0 , 即 $T_m > T_0$, 所以 $\varepsilon'_c < \varepsilon_0$ 。分析可逆循环的制冷系数, 可以得出这样的结论, 即当机器的工作温度低于制冷所必需的温度时, 将耗去不必要的功。在给定条件下物体须从温度 T_a 被冷却到 T_0 。按定温循环工作时, 全部的冷量是在最低温度下获得的; 这就意味着不是用最经济的方法获得的。

具有热源 $a-b$ 和 $d-c$ 的循环 $a-c-d-b$ 是可逆的。同时, 在温度为 T_0 及 T 的恒温热源之间工作而由两根定温线和两根绝热线所组成的循环 $2-3-d-b$ 也是可逆的。这就可以使我们把两个循环都在温熵图上画出来 (我们知道只有可逆过程才可在温熵图上画出)。然而这两个循环的热力性能是不同的, 因为它们的制冷系数不同, 因此最小功也是不同的。热源是 $a-b$ 而

由两根定温綫和两根絕热綫所組成的循环是不可逆的,因为在这种情况下,具有温差的热交换过程中并未作功。这个不可逆循环也可在熵焙图上表示出来,但这是根据过程的可逆性条件出发,想象地画成的。

进一步从热力学第二定律可以証明,由于不可逆性而产生的熵增会使循环功增加^[45,46,47]。具有热源为 $a-b$ 而进行制冷过程的可逆制冷循环,其热平衡方程可以写成

$$q_0 + Al_0 = q. \quad (I-9)$$

从被冷却物提出同一热量 q_0 的不可逆循环,其热平衡方程是

$$q_0 + Al' = q'. \quad (I-9a)$$

q' 与 q 之差确定了不可逆循环比可逆循环所多的功:

$$\Delta Al' = Al' - Al_0 = q' - q. \quad (I-10)$$

熵焙图上的面积 $c-3-2'-a'$ 表示 $q' - q$ 差数;它等于 $T\Delta s'$, 所以

$$\Delta Al' = T\Delta s'. \quad (I-11)$$

从上式可知:(1)在获得同一冷量的条件下(当周圍介质的温度为恒值时)不可逆制冷循环比可逆制冷循环所多消耗的功等于周圍介质的温度与因循环的不可逆性而产生的熵增的乘积。

(2) $\Delta Al'$ 之值表示經過不可逆过程后,把工质回复到原始状态所需的最小功。

由热力学第二定律得出的上述結論也适用于工质与周圍介质間有温差存在的场合。图 3, a 上的面积 $b'-d'-3'-2'$ 表示具有温差时所传递的热量 q'' 。温度 T' 較 T 为高。在温度 T' 时抽出热量 q'' , 必須耗用額外功 $\Delta Al''$, 这个額外功的数值視必須把热量自温度 T 轉移到 T' 的补偿情况而定,即等于温度 T 与熵增 $\Delta s''$ 的乘积。事实上,当两循环的制冷量 q_0 相同时,所耗功之差 $\Delta Al'' = Al'' - Al'$ 就等于所抽出热量之差 $q'' - q' = T\Delta s''$ 。从点 4 沿等温綫 T 作面积 $4-4''-4'-b'$, 使等于代表所抽出热量 q'' 的面积 $d'-3'-2'-b'$, 即可确定 $\Delta s''$ 之值。

不可逆循环 $2-3'-d'-1$ 比可逆循环 $a-o-d-b$ 所超出的总功等于

$$\Delta Al = T(\Delta s' + \Delta s'') = T\Delta s. \quad (I-11a)$$

如在热交换中热源的温度和工质温度均系变值,用平均恒定温度与对应的熵增的乘积来表示热量比較方便。这种表示热量的方法是馬尔丁諾夫斯基 (B. C. Мартыновский) 所制定的,就是写出与 (I-7) 式相似的方程式。确定了周圍介质的平均恒定温度 T_{cm} 后,就可求出循环中由于不可逆性而損失的总功^[1,31,48]:

$$\Delta Al = T_{cm}\Delta s, \quad (I-12)$$

式中 Δs 为循环中所有不可逆过程的熵增之和。

不可逆循环中所耗的功 Al 是可逆循环的功 Al_0 及因不可逆損失而耗費的額外功 ΔAl 之和:

$$Al = Al_0 + \Delta Al. \quad (I-13)$$

可逆循环中 $\Delta Al = 0$, 因而所耗的功为最小。

当 $\Delta Al \neq 0$, 亦即 $\Delta s > 0$ 时,則有不可逆的損失, Al 也不等于最小功。

上面已提到过,不可逆过程只可能想象地在热力学坐标图中表示出来。假定不可逆过程的始終两态是平衡的,就可求出这两点。这样就使我們可以不問过程的性质而确定熵的增量。上