

制冷装置节能技术

Energy Saving Technology for Refrigerating Plants

张建一 编著

3657

机械工业出版社

制冷装置节能技术

Energy Saving Technology for Refrigerating Plants

张建一 编著



机械工业出版社

本书从制冷装置的设计、技术改造、操作调节、维护保养和节能管理五个方面,论述各环节的节能原理和国内外的实用节能新技术。这些技术许多已试用过,部分已在一定范围内推广。有些节能技术只需少量投资甚至不需投资,即可获得明显的节能效益。书中还收集了制冷行业与节能有关的各种法规、标准及考核指标,用户可对照本企业的实际情况,找出薄弱环节,加强管理,提高经济效益。

本书理论结合实践,既可作为制冷空调专业的教材,又可作为制冷装置的设计人员、操作人员和管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

制冷装置节能技术/张建一编著. —北京:机械工业出版社, 1999. 4
ISBN 7-111-06910-2

I. 制… II. 张… III. 制冷装置-节能-技术 IV. TB657

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1998) 第 30234 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 蒋有彩 版式设计: 冉晓华 责任校对: 肖新民

封面设计: 姚学峰 责任印制: 路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·17 印张·415 千字

0 001—3 000 册

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

制冷技术的发展水平是衡量一个国家国民经济和人民生活水平的重要标志。随着我国改革开放的深入，国民经济的发展，人民生活水平的提高，制冷行业也获得了迅猛的发展。与此同时，制冷装置的能耗在我国总能耗中的比重不断上升。因此，制冷装置的节能已成为重要的研究课题。

本书从制冷装置的设计、操作调节、维护检修、技术改造及管理系统几个方面，阐述了各种节能原理、方法和措施。取材立足于国内，同时也介绍了国外近年来在制冷装置节能方面的进展，以及本书作者近年来的一些研究成果。书中介绍的“制冷装置”，主要是指中等及中等以上容量（规模）的制冷装置（系统），但其节能原理和措施也可用于小型制冷装置。

本书第1章至第6章从设计制冷装置的角度，阐述了各个环节的节能原理和方法。第7章介绍了现役制冷装置的各种节能改造原理和实践。第8章和第9章是操作维护中的节能措施。最后两章讨论了节能管理指标和管理系统。附录中收录了与制冷装置节能有关的国家和行业法规。在阐明节能原理的基础上，注意理论联系实际，许多节能方法已在国内的实践中试用过，有些已在不同范围内推广。多数节能方法和措施，只要制冷装置的设计者和使用者适当配合，就可以用于工程，获得直接的节能效益。本书可作为制冷空调专业的教材，又可作为制冷装置的设计人员、操作人员和管理人员的参考书。

希望本书的出版，能对我国制冷装置的节能起到促进作用。限于作者水平，错误和不当之处，敬请读者指正。

作 者

1998年8月

于集美学村

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 制冷装置方案的选择	3
1.1 制冷方式的选择	3
1.2 压缩式制冷循环的设计参数	15
1.3 压缩式制冷循环中制冷剂的选择	22
1.4 制冷装置控制方式与节能	33
第 2 章 制冷循环的形式	39
2.1 单级压缩制冷的循环形式选择	39
2.2 压缩式制冷循环的压缩级数	48
2.3 双级压缩制冷的循环方案与节能	54
2.4 制冷系统供液方式的选择	62
第 3 章 制冷压缩机与设备的选择	69
3.1 制冷压缩机的选型	69
3.2 制冷压缩机的台数与容量	73
3.3 制冷压缩机能量调节方式的选择	75
3.4 冷凝器的选择	81
3.5 蒸发器的选择	84
3.6 节流装置的选择	89
第 4 章 制冷系统热负荷的控制	97
4.1 低温系统的隔热	97
4.2 太阳辐射热	108
4.3 门洞及通风换气的冷损失	110
4.4 低温系统内的热负荷	115
第 5 章 制冷装置电气设计中的节能	120
5.1 变压器的合理选配	120
5.2 制冷装置中电动机的合理匹配	124
5.3 用户电力系统的功率因数	127
第 6 章 制冷装置设计的最优化	137
6.1 最优化方法应用的必要条件	137
6.2 优化准则	139
6.3 选择求解方法	141
6.4 最优化的策略	142
6.5 设计最优化的研究和计算机辅助设计	144
第 7 章 制冷装置的技术改造	147
7.1 压缩机所匹配的电动机的更新	147

7.2 电动机的磁性槽泥改造	149
7.3 电动机的 Δ -Y变换改造	150
7.4 电力负荷曲线的改进	152
7.5 水泵及水系统的节能改造	153
7.6 风机与风机系统的节能改造	158
7.7 隔热层的维修改造	159
7.8 盐水制冰装置的节能改造	162
7.9 异步电动机节电器及其应用	164
7.10 交流接触器无声运行技术	164
7.11 制冷装置的热(冷)回收利用	165
第8章 制冷装置的运行调节	169
8.1 制冷系统主要运行参数及其控制	169
8.2 制冷系统的调整操作	175
8.3 制冷系统不正常情况的分析和排除	178
8.4 制冷系统运行调整中的节能技术	181
第9章 制冷装置的维护和保养	192
9.1 制冷系统的维护和保养	192
9.2 制冷压缩机的维护和检修	204
9.3 静止工作制冷设备的操作与维护	208
9.4 制冷装置中相关设施的维护	214
第10章 制冷装置的技术经济指标与综合管理	219
10.1 单位冷量耗电量与单位轴功率制冷量	219
10.2 单位产品耗冷量和耗电量	221
10.3 制冷辅助材料消耗量	225
10.4 冷库利用率	226
10.5 制冷装置运行维护的综合管理	230
第11章 制冷装置节能的系统管理	233
11.1 能源计量	233
11.2 制冷装置的工作日记	234
11.3 能源统计分析与制冷运行指标分析	238
11.4 产品电耗定额的制定与管理	241
11.5 管理节能与科技进步节能	243
11.6 节能宣传和法制化	244
附录A 中华人民共和国节约能源法	247
附录B 冷库管理规范(试行)	251
附录C 水产冷冻厂(库)管理办法	256
附录D 冷库管理检查评比办法	260
附录E 评价企业合理用电技术导则(GB3485—83 部分)	261
参考文献	264

绪 论

人类利用天然冷源来制冷已有悠久的历史。早在 3000 多年前,我国《诗经》上就有冬季采集冰雪贮藏,到夏季取出降温的记载。但采用天然冷源,难以得到 0°C 以下的低温,还要受区域、季节等条件的限制,远远不能满足社会发展的需要。

工程技术上的人工制冷,就是利用一定的装置(制冷装置),消耗一定的能源,强制地使某一对象(空间或物体)的温度,低于周围环境介质的温度,并维持这个低温的过程。

人工制冷技术是从 19 世纪中叶开始发展的。1834 年英国人波尔金斯制成了用乙醚作制冷剂的第一台制冷机。1844 年美国人高斯发明了空气压缩式制冷机。1862 年法国人卡尔里制成吸收式制冷机。1874 年德国人林德发明了世界上第一台氨压缩机,使制冷技术进入实际应用的广阔天地。人工制冷不受季节、区域等的限制,可以根据需要制取不同的低温。近 50 年来,随着现代科技的迅速发展,制冷技术已经成为现代社会不可缺少的技术,并且正在国民经济、人民生活、国防科研等各领域发挥着日益重要的作用。

食品工业是应用制冷技术最早、最多的部门。由于肉类、水产品、禽蛋、果蔬等易腐食品的生产,有较强的季节性和地区性,为了调剂旺、淡季节,保障供给,就需要将食品进行冷加工、冷藏及冷藏运输。这就需要用制冷装置来装备冷库、冷藏车船等。在现代化的食品工业中,食品从生产、贮藏到运输、销售,始终保持在低温状态。这种完整的冷藏网统称冷链,它可以保证食品的质量,减少生产及分配过程中的损耗,在满足人们生活需要方面发挥重要的作用。

在石油化工、有机合成(橡胶、塑料、化纤、药料、染料等)、基本化工(酸、碱)等工业中的分离、结晶、浓缩、提纯、液化、控制反应温度等单元操作中,都要用到制冷技术。

在空调方面,冶金、纺织、印刷、精密仪表、电子工业等工厂,以及各种实验室、计量室,为了保证必要的恒温恒湿,需要进行空气调节,制冷则是空调装置中不可缺少的组成部分。随着生活水平的提高,舒适性空调在住宅、公共场所及交通工具中的应用也日益广泛。

在产品性能试验、建筑工程、医药生产和医疗、农牧业、体育事业方面,都已广泛应用制冷技术。在许多近代尖端科学技术中,卫星通信、高速电子计算机、激光、超导、红外技术等,都需要制冷技术。

如前所述,制冷必须消耗能量。20 世纪 70 年代以来,能源问题已被列为世界五大问题之一。随着制冷技术应用的日益广泛,制冷装置消耗的能源也在迅速增加。因此,制冷装置的节能正在引起制冷行业越来越广泛的重视。

建国以来,我国的能源工业得到巨大发展。但能源供应仍然十分紧张,全国约有 25% 的工业生产能力由于缺乏能源不能发挥作用,能源短缺一直是制约我国经济发展的一个突出因素。

在能源短缺的同时,我国又存在着能源有效利用率低的矛盾。能源有效利用率是指能源所具有的能量与实际有效利用的能量之比值。它是衡量一个国家、一个企业能源利用水平的综合指标,并直接关系到国民经济的发展。由于教育、管理、科技和经济等诸原因,我国能

源利用存在很大的浪费。长期以来，我国经济增长是以资源高消耗和牺牲环境为代价的，是一种粗放型经济增长方式。统计资料表明，我国总的能源利用率约为 30%。这相当于发达国家 50 年代的水平。目前，西欧各发达国家的能源有效利用率多为 40% 以上，日本高达 50% 以上。

研究表明，由于我国人均能源资源占有量相对不足（仅为世界平均水平的 40%~50%），能源产地远离消费地区。要保证我国“九五”和 2010 年规划的国民经济持续、快速、健康发展，单凭加速投资于能源生产设施是不可能实现的。这不仅因为能源开发投资大、时间长，短期内很难有持久的大幅度增长，而且也受到运输和环境的制约。例如，不论是一个大型煤矿或一个相当规模的油田，一个大型水电站或一座核电站，从勘探设计到建成投产，一般都要 8~10 年，甚至 10 年以上。因此，应当开源与节流并举，节能是缓解我国经济发展中能源供需矛盾不可缺少的措施。根据国内专家的预测，按目前经济发展和能源生产的发展速度，我国未来的能源缺口在 20% 左右。因此节能对保证我国经济发展十分重要。节能的中心思想是：采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可接受的措施，更有效地利用能源。因此，我国制定了能源建设“开发和节约并重，近期要把节能放在优先地位”的总方针。自 80 年代以来，连续颁布了各种节能法规政策。1997 年 11 月，第八届人大通过了《中华人民共和国节约能源法》，并从 1998 年 1 月开始生效。

制冷是耗能大的行业之一。目前广泛采用的压缩式制冷装置消耗大量电能。据中国制冷学会 1994 年的统计，制冷空调设备的年耗电量约占全国总耗电量的 5%~6%，夏季占季节发电量的 18%~20%，个别地区占的比例更大。据估计，1995 年北京、深圳的夏季集中空调用电，已分别占全市总用电的 25% 和 35%。因此，制冷装置的节能是我国节能工作中重要的一环。

制冷装置的节能包括了制冷装置的设计、操作调节、维护管理，以及技术改造各个环节。有些人认为，节能只是节省部分能源，减少一点运行费，意义不太大。实际上这种认识是片面的，节能的效益是相当可观的。设计不合理，操作管理不善的制冷装置，其能耗水平可比节能的装置高 2~3 倍。一套节能的制冷装置必然处于高效运行，能达到最大生产能力，并保证所需的低温。在一套节能运行的制冷装置中，各机器设备都处于最佳运行状态，零部件的磨损减少，维修费用下降，安全可靠性提高，使用寿命延长。因此，制冷装置的节能不仅具有社会效益，而且对于用户具有多方面的综合效益，广大制冷工作者对此应有充分的认识。

第 1 章 制冷装置方案的选择

1.1 制冷方式的选择

在设计选择制冷装置时，第一个问题就是确定制冷的方式。目前人工制冷主要有四种方法，即相变制冷、气体膨胀制冷、涡流管制冷和热电制冷。每种制冷方法各有其特点。显然只有针对制冷对象的具体条件，选择合理的制冷方法，才能满足制冷的要求，进一步实现制冷中的节能，达到良好的经济效益。因此，对各种制冷方法应有深入的认识和理解。

1.1.1 各种相变制冷方法的特点

相变是指物质集聚态的变化。例如冰变成水就是一种相变过程。物质在发生相变时，必然伴随着一定数量的能量交换，这是一种物理现象。相变制冷就是利用某些物质相变时的吸热效应，达到降低温度的效果。

固体物质的融解或升华，液体的气化，都是吸热的相变过程，通过这些过程吸收大量热量，就可获得低温。例如，在大气压力下冰融解的温度为 0°C ，每公斤冰可吸收 334.96kJ 的热量；干冰（固态二氧化碳）在大气压力下升华温度为 -78.9°C ，每公斤干冰可吸热 573.62kJ 。由于冰和干冰只能单次使用，不能连续使用，因此严格讲只是用冷，还不能称为制冷。

液体转化为蒸气称为气化，在现代制冷技术中，广泛利用制冷剂（液体）在低压下的气化过程来制取冷量。利用这种原理的制冷方式可分为蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷和蒸气喷射式制冷。

1. 蒸汽压缩式制冷

在蒸汽压缩式制冷中，工质（制冷剂）的蒸气首先被压缩到比较高的压力，被外部冷却介质（冷却水或空气）冷却而转变为液体，再经节流，使压力和温度同时降低，利用低压力下工质液体的气化即可吸热制冷。气化后的蒸气再由压缩机吸入压缩，不断循环。采用这种

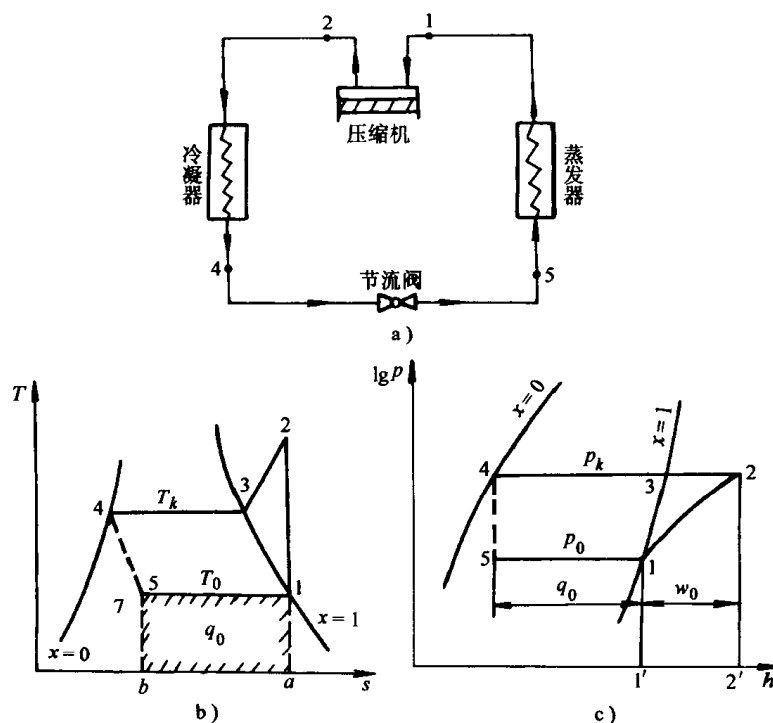


图 1-1 蒸汽压缩式制冷

a) 单级压缩制冷循环系统

b) $T-s$ 图 c) $p-h$ 图

制冷方法时，所用的工质必须具有这样的特性：在常温和普通低温下能够液化。图 1-1a 所示即为蒸气压缩式制冷流程，图 1-1b 和 c 为该循环的 $T-s$ 图和 $p-h$ 图。

蒸气压缩制冷的压缩过程可以采用各种不同类型的压缩机，例如活塞式、螺杆式或离心式压缩机。蒸气压缩式制冷从 19 世纪 70 年代开始发展，至今已有 100 多年的历史，而且已发展到相当完备的程度。由于具有许多明显的优点，蒸气压缩式制冷是目前国内外应用最广泛的制冷方式。其主要特点如下：

1) 能达到的制冷温度范围广。从稍低于环境温度至 -150°C 均可实现。可根据不同的温度要求选择不同的制冷剂和压缩级数。表 1-1 所示为不同压缩级数和不同制冷剂所能达到的最低蒸发温度。

表 1-1 压缩式制冷能达到的最低蒸发温度 ($^{\circ}\text{C}$)

压 缩 级 数	制 冷 剂	冷 凝 温 度		
		30	35	40
单 级	R717	-25	-22	-20
	R12	-36	-34	-31
	R22	-36	-34	-31
	R502	-39	-36	-34
双 级	R717	-65		
	R22	-75		
	R12	-68		
单级复叠	R22+R13	-85~-90		
单一双级复叠	R22+R13	-110		
三级复叠	R22+R13+R14	-110~-140		
单一双-单级复叠	R22+R13+R14	-110~-140		

2) 单机容量范围大、规格多。蒸气压缩式制冷机的单机制冷量从最小 100W 左右，到数千 kW。有大、中、小各种容量，可以根据需要选择，非常方便。

3) 在中、小容量范围设备比较紧凑，可适应不同场合的需要。目前广泛应用于空气调节、冰箱、食品冷加工、冷藏、石油、化工等各领域。

4) 效率较高。蒸气压缩式制冷的最主要优点是在普冷领域的较高温度下，制冷系数较大。空调工况时，理论制冷系数可达 4.26，实际制冷系数为 2.3 左右。因此，蒸气压缩式制冷的运行经济性较高。

5) 当使用温度较低时，其综合性能变差。通常当使用温度低于 -70°C 时，级数增加，机器变得十分复杂，可靠性低，维护使用麻烦，成本也大大提高。

6) 要使用专门的制冷剂，这些制冷剂往往对环境有污垢，对人体有害。例如常用的氨，燃烧会爆炸，有毒、有强烈刺激性。常用的 CFC 和 HCFC 制冷剂，对大气臭氧层有破坏作用。

在制冷技术的应用中，以 -50°C 以上应用占绝大多数，故压缩式制冷在低温下不利的缺点影响不大。由于以上优点，压缩式制冷是目前制冷技术中的主流，在各行各业及生活中获得了广泛的应用。

2. 吸收式制冷

吸收式制冷也利用液体（制冷剂）气化来实现制冷。其主要特点是以热能为动力，利用

溶液的特性来完成工作循环。图 1-2 为氨水吸收式制冷循环的原理图。

吸收器中的浓氨水由溶液泵加压后送入发生器。浓氨水在发生器内被加热，产生较高温度和较高压力的氨蒸气，这些氨气进入冷凝器被凝结为液体氨。液氨经过膨胀阀节流，降温降压后进入蒸发器，从通过蒸发器的冷冻水（又称载冷剂）中吸取热量而蒸发，冷冻水即可作为冷源使用。发生器中剩余的稀氨水通过减压阀降压后，送入吸收器进行喷淋，稀氨水在喷淋过程中吸收从蒸发器引来的低压氨蒸气，成为浓氨水，然后继续循环。

吸收式制冷的工作原理虽然早在 18 世纪 70 年代就已提出，但直到 1859 年才试制成功第一台吸收式制冷机，即氨水吸收式制冷机。氨水吸收式制冷由于效率（热力系数）较低等原因，其应用受到限制。

随着制冷技术的发展，1945 年出现了溴化锂吸收式制冷机，开创了吸收式制冷机的新局面。溴化锂吸收式制冷以水为制冷剂，以溴化锂溶液为吸收剂。由于溴化锂吸收式制冷机效率较高，并具有许多独特的优点，特别是节能效果较好，引起了人们广泛的重视。

氨水吸收式制冷装置和溴化锂吸收式制冷装置具有一些共同的特点，但也有许多不同的特点。下面分别介绍这两种制冷装置的特点。

氨水吸收式制冷装置的特点：

- 1) 耗电少。由于其动力主要为热能，耗电量大大少于压缩式制冷装置。据国内 80 年代开发的利用地热的实用装置^[1]，用于冷库时其耗电量比氨压缩式制冷可节省 65%。
- 2) 可利用废热、余热。由于吸收式制冷以热能为动力，许多情况可以直接利用工业生产中的废热和余热。
- 3) 变负荷容易，调节范围广。可在 10%~100% 范围内调节制冷量。
- 4) 单级即可达到 -40℃ 的低温。
- 5) 可以露天布置，操作方便，易于维护管理。
- 6) 运行噪声低，可靠性高。装置中除了泵外，没有运动部件。
- 7) 换热设备面积大，耗钢材量大。
- 8) 冷却水消耗量大。
- 9) 一次性投资大于活塞式制冷机。
- 10) 效率较低。
- 11) 没有系列成套的产品，必须现场设计。

根据以上特点，氨水吸收式制冷适用于有余热可利用或燃料低廉的场合。用蒸汽加热的氨吸收式制冷机，适用于电、热、冷相结合的企业；利用化工废热的氨水吸收式制冷机，适用于在化工过程高温放热，而在低温下又需要冷量的工艺过程；直接燃烧的氨吸收式制冷机，其制冷温度可达 -20~-60℃，当制冷量大于 1163kW 时，利用廉价燃料是比较经济的。

溴化锂吸收式制冷机有如下特点：

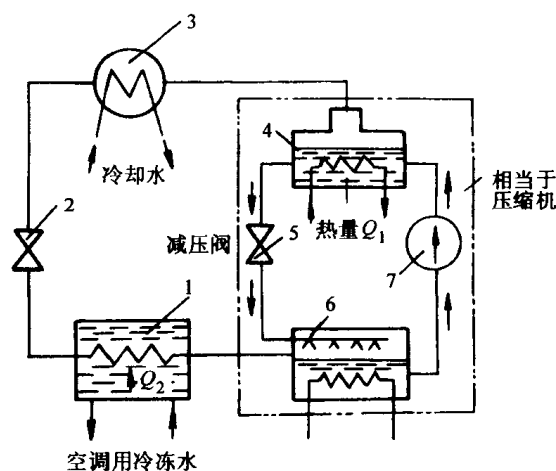


图 1-2 吸收式制冷原理图

1—蒸发器 2—膨胀阀 3—冷凝器
4—发生器 5—减压阀 6—吸收器 7—溶液泵

1) 以热能为动力,耗用电能很少。耗电量仅为蒸汽压缩式的5%,甚至更少。对热源要求不高,可以利用各种废热、余热。例如高于20kPa表压的蒸汽、高于75℃的热水,以及地热、太阳能等均可利用。具有很好的节电、节能效果。

2) 整个机组除了功率很小的泵外,没有其它运动部件,振动小、噪声低。

3) 机器处于真空下运转,无爆炸危险。溴化锂溶液作为工质,无毒、无臭、无公害、安全可靠、有利于环境保护。

4) 冷量调节范围宽。随着外界负荷变化,机组可在10%~100%的范围内进行冷量的无级调节。即使低负荷运行,热效率几乎不下降,性能稳定,能很好地适应负荷变化的要求。

5) 对外界条件变化的适应性强。如标准外界条件为:蒸汽压力588kPa表压,冷却水进口温度32℃,冷媒水出口温度10℃的蒸汽双效机,实际运行表明,能在蒸汽压力196~784kPa表压,冷却水进口温度25~40℃,冷媒水出口温度5~15℃的宽阔范围内稳定运转。

6) 成套出厂,国内已有系列产品。安装简便,对安装基础要求低。用户购买即为机组形式,安装时只需一般校平,按要求连接汽、水、电即可。由于机器运转时振动小,无需特殊基础,只考虑静负载即可。可以安装在室内、室外、底层、楼层或屋顶。

7) 制造简单、操作、维修保养方便。机组中除屏蔽泵、真空泵和真空阀等附属设备外,几乎都是静止的换热设备,制造比较容易。由于机组性能稳定,对外界条件变化适应性强,因而操作比较简单。机组的维护保养工作主要是保持其气密性。

8) 在有空气的情况下,溴化锂溶液对普通碳钢具有强烈的腐蚀性。这不仅影响机组的寿命,而且影响机组的性能和正常运转。

9) 机组在真空下运行,空气容易漏入。即使漏入微量的空气,也会严重地损害机组的性能。为此,制冷机要求严格密封,这就给机器的制造和使用增添了困难。

10) 机组的排热负荷较大,因为制冷剂蒸汽的冷凝和吸收过程均为排热过程。此外,对冷却水的水质要求也比较高,在水质差的地方,使用时应进行专门的水质处理,避免影响机组性能的正常发挥。

根据以上特点,溴化锂吸收式制冷主要用于空气调节制冷和为生产工艺提供0℃以上的冷媒水。当有廉价热源可利用时,其运行经济性高于压缩式制冷。当有余热、废热可以利用时,其优势最为突出。

目前我国已经制定了蒸汽单效和双效溴化锂吸收式制冷机系列^[2],还能生产热水机型和直燃机型,研制了与背压汽轮发电机联合运转的低压双效机型。近年来,我国的溴化锂制冷机技术进步很快。1994年4月在上海举办了第一届全国溴化锂制冷机、空调热泵机组技术展览会。溴化锂制冷机的控制已发展到自动控制、可编程序控制。1993年全国生产台数已达1000多台,占世界第二位。一些产品在蒸汽单耗技术指标方面已接近国际先进水平。溴化锂吸收式制冷机已成为我国大型空调设备的主要机型之一,引起各方面的极大关注。

3. 蒸汽喷射式制冷

蒸汽喷射式制冷虽然在1901年制成了第一套雏型装置,但一直到20年代才开始用于工业。它与吸收式制冷相似,也是依靠消耗热能而工作。但蒸汽喷射式制冷只用单一物质为工质。虽然在理论上可应用一般的制冷剂,目前只有以水为工质的蒸汽喷射式制冷机得到实际应用。

蒸汽喷射式制冷装置主要由锅炉、喷射器、冷凝器、节流阀、蒸发器和水泵等组成,其工作

原理如图 1-3 所示。作为代替压缩机功能的喷射器是由喷管、混合室和扩压管三部分组成。

由锅炉出来的工作蒸汽（状态 1'）在喷射器的喷管中膨胀增速至状态 2'，在喷管出口的混合室内形成低压，将蒸发器内的制冷蒸汽（状态 1）不断吸入混合室。工作蒸汽与制冷蒸汽混合变成状态 2，经过扩压管减速增压至状态 3，进入冷凝器定压放热而凝结。由冷凝器流出的饱和液体（状态 4）分两路，一路由泵送入锅炉（状态 5'）再产生工作蒸汽（状态 1'），另一路作为制冷工质经节流阀降压降温（状态 5），进入蒸发器气化吸热，就这样组成封闭循环实现制冷。

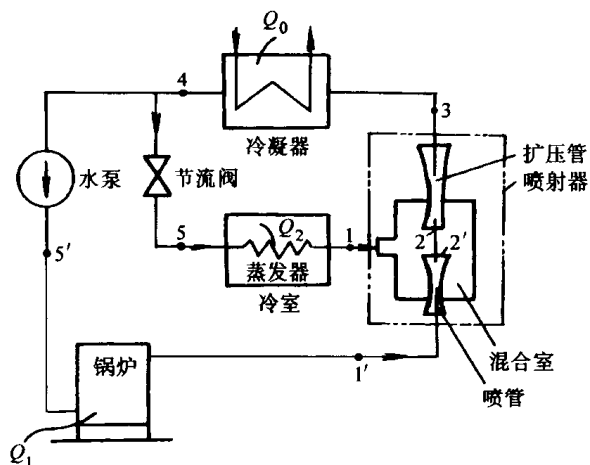


图 1-3 蒸汽喷射制冷闭式循环原理图

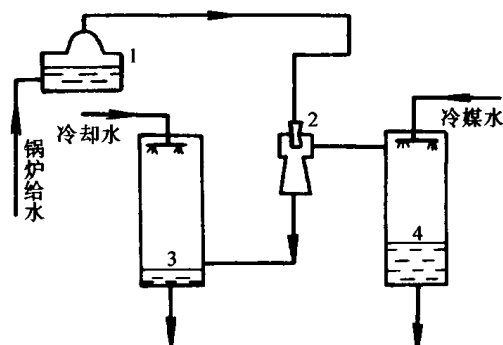


图 1-4 蒸汽喷射式制冷机开式循环原理图

1—锅炉 2—喷射器 3—冷凝器 4—蒸发器

在工程上常使用开式循环，其循环系统如图 1-4 所示。在这种循环中由喷射器出来的工作蒸汽，与被引射蒸汽的混合汽直接冷凝在冷却水中，不再返回锅炉和蒸发器中，锅炉和蒸发器用水则另外补给。显然开式循环的原理与闭式循环是一样的。在蒸汽喷射式制冷机中，用于喷射器的工作介质和蒸发器的制冷工质都是水，这样就不存在制冷工质与工作介质分离的问题，使设备大为简化。

同其它型式的制冷机比较，蒸汽喷射式制冷机有如下特点：

1) 可以利用余热、废热，70℃以上热源即可利用。

2) 没有运动部件，使用寿命较长。

3) 金属消耗量比吸收式少，造价较低。

4) 安装简便，占地面积小。

5) 操作管理方便安全，运行可靠。

6) 当制冷温度较高时，运转费低。通常在制取 10℃或温度更高的冷水时，运行经济性优于其它制冷机。

7) 在低温工况下（8℃以下），运行经济性低于吸收式制冷机。

8) 对工作蒸汽要求较高。当工作蒸汽压力降低时效率明显降低。

根据以上特点，蒸汽喷射式制冷主要适用于制取 2~20℃的冷媒水，尤其在制取 10℃以上冷媒水时效率较高。近年来，由于溴化锂吸收式制冷技术不断取得进步，效率和性能不断改善。因此，蒸汽喷射式制冷的应用越来越少。

蒸汽喷射式制冷可以对被冷却物料直接进行冷却而不需要制冷剂或冷媒。在这方面它具

有其它制冷方法无法替代的优势，因而在特定场合还具有生命力。例如，在药品生产、食品冷冻干燥、混凝土骨料预冷、腐蚀性溶液冷却等方面均可应用。

1.1.2 气体节流和膨胀制冷

压缩气体的绝热节流过程和绝热膨胀过程可以获得低温，利用这两种物理现象可实现人工制冷。从理论上说，各种气体均可使用。由于空气是无处不在的免费资源，因此这种制冷方法中的气体基本上采用空气。

实际上，气体的绝热节流和绝热膨胀两者有许多不同。气体的绝热节流采用的设备是节流阀，节流前后气体的焓值不变。而气体的绝热膨胀采用的设备是膨胀机，膨胀过程理论上沿着等熵线进行。绝热膨胀之后气体的温度大大低于绝热节流后的温度，即采用绝热膨胀的制冷效果明显优于绝热节流。因此，气体绝热节流很少应用，在工程上实际应用的是空气绝热膨胀制冷。

空气绝热膨胀制冷通常又称为空气压缩制冷，其制冷循环工作原理如图 1-5 所示。先将空气压缩，使其压力和温度升高，然后进入冷却器，用大气或水冷却（等压冷却），进入膨胀机绝热膨胀，压力降低温度也降低，这时将低温空气引入被冷却对象吸热，空气吸热升温后，又被压缩机吸入，进行新的循环。

空气压缩制冷与蒸汽压缩制冷相比较，具有下列特点：

1) 空气压缩制冷所用的制冷剂是空气，容易取得，对环境无污染。它的动力源是普通的空压机，可以一机多用。一般工矿企业都有空压设备，因而提供压缩空气十分方便。在已有气源的场合建立低温室时，可以减少投资，加快建设速度，免除了蒸汽压缩制冷的制冷剂供应、运输和储存等问题。

2) 制冷量便于调节。对一个要求有几种不同温度，或不同冷负荷的低温室来说，只要不同时使用，则可共用一套制冷设备，这样不但节约了设备投资，也提高了设备的利用率。

3) 压缩空气膨胀做功以后立即被冷却下来，只要控制一定的膨胀比，即可得到相应的温降。因为空气本身是制冷剂，又是冷媒，所以降温速度快，能量利用率高，容易获得低于 -60°C 的低温和较大的制冷量。

4) 运行操作管理方便。一般情况下只需操作涡轮进口的调节阀门，就可保证其进出口压力的膨胀比，达到所需的低温。

5) 性能可靠。在空气压缩制冷机中，除了涡轮冷却器因磨损等原因需维修更换外，一般情况下性能是十分可靠的。小型涡轮冷却器由于重量轻，体积小，使用安装都很方便。它还可以装成制冷车移动使用，减少管路系统的冷损耗。

空气压缩制冷循环的最大缺点是单位制冷量所消耗的功率，比蒸汽压缩式制冷循环大，这是它没有得到广泛应用的主要原因。蒸发温度在 -10°C 以上时，空气制冷循环的单位制冷量所消耗的功率，比蒸汽制冷循环大 4~5 倍，即使在蒸发温度 -60°C 时也要大一倍多。因此，

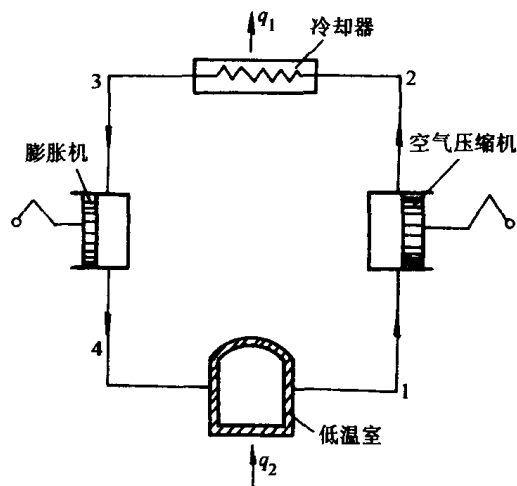


图 1-5 空气压缩制冷循环工作原理图

对蒸发温度 -50°C 以上、长时间使用的场合,不宜采用空气压缩制冷循环。对于温度低于 -70°C 并需制冷量较大的用户来说,空气压缩制冷系统比蒸汽压缩制冷系统在基建投资、功率消耗和使用维护等方面都优越一些。因为采用蒸汽压缩制冷循环时,蒸发温度越低,则单机的制冷量越小,所需机组的台数则越多,其辅助设备也较多,消耗的总功率也就越大。

综上所述,空气压缩制冷适用于已有气源或气源可多种利用的场合,它可建立不同容量、不同温度、不长期使用的低温室。也适用于温度低于 -70°C ,具有专用气源的大、中型低温室或要求在较低温度下,短时间供给大冷量的冷冲击试验或快速冷却的场所。

1.1.3 涡流管制冷

涡流管制冷是法国工程师兰克 (G. Ranque) 1933 年在实验室发现的,因此涡流管又称兰克管。涡流管制冷的实质,就是利用人工方法产生的涡流,使气流成冷热两部分,其中分离出来的冷气流便可用来制冷。这种制冷方法虽然在 1933 年就已提出,但直到 1946 年以后,才引起人们的注意,对涡流管制冷进行了比较全面的实验研究,获得实际应用。

涡流管的结构比较简单,如图 1-6 所示,主要由喷嘴、涡流室、孔板及冷热两端的管子组成。气体在涡流室内产生涡流而分离成冷热两部分,涡流室的内部形状为阿基米德螺线,喷嘴沿切线方向装在涡流室的边缘,其连接方法有不同的形式。

在涡流室的一侧装有一个分离孔板,其孔径约为管子内径的二分之一(或稍小一些),它与喷嘴中心线的距离大约为管子内径的二分之一。分离孔板的右侧为冷端管子,另一侧为热端管子,在管子端部装有一个控制阀,阀离涡流室的距离约为管子内径的 10 倍,可用手动调节控制阀的开启度。

工作时经过压缩并冷却到常温的气体由进气管进入,并在喷嘴 2 内膨胀,以很高的速度沿切线方向进入涡流室,形成自由涡流,经过动能的交换并分离成温度不相同的两部分。中心部分的气体经孔板 3 流出,即是冷气流,边缘部分的气体从另一端经控制阀 7 流出,即为热气流。所以涡流管可以同时得到冷、热两种效应。根据试验,高压气体经过涡流管可得到 $-10\sim-50^{\circ}\text{C}$ 的冷气流,热气流的温度可达 $100\sim 130^{\circ}\text{C}$ 。控制阀用来改变热端管子中气体的压力,因而可以调节两部分气流的流量比,从而也改变了它们的温度。如果控制阀全关,则全部气体从冷端管子流出,也就不存在冷热效应。如果控制阀全开,

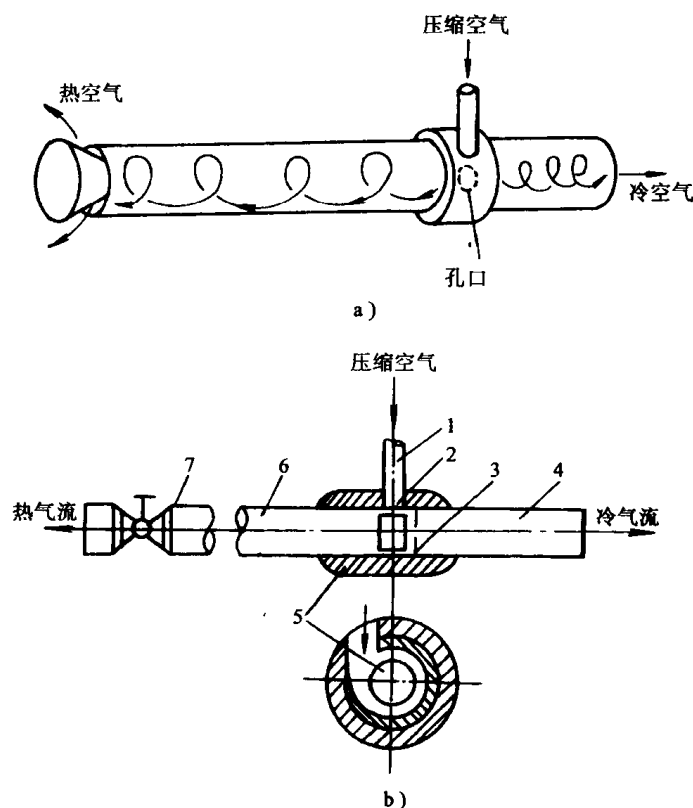


图 1-6 涡流管

a) 工作原理图 b) 结构示意图

1—进气管 2—喷嘴 3—孔板 4—冷端

管子 5—涡流室 6—热端管子 7—控制阀

则会有少量气体从孔板处吸入，涡流管的工作就相当于一个气体喷射器。

涡流管制冷的主要特点如下：

1) 构造简单、操作维护方便。涡流管制冷器没有运动部件，实际上只是一根形状特殊的管子，操作维护简单。

2) 体积小、重量轻。例如前苏联研制的 MX-2 型微型涡流管制冷器，其尺寸仅为 $\phi 18\text{mm} \times 50\text{mm}$ ，重量仅 15g。

3) 制冷温度比较低。如上述的 MX-2 型涡流管，制冷温度可达 -55°C 。国内试验，当工质为空气，压力为 780kPa，温度为室温时，单级涡流管的制冷温度可达 -70°C 。

4) 起动时间短。

5) 制冷工质价廉易得。可以采用空气作工质，其它的气源也可利用。

6) 效率较低。涡流管的效率较低是影响其应用的主要因素。近年来经不断地研究改进，涡流管的绝对效率已在 0.235 以上。

7) 噪声较大。

根据以上特点，涡流管已成为微型制冷技术中很有发展前途的制冷器。例如，它可用于小型光电器件，低温外科器械、军用飞行器上。

对于有廉价压缩空气或天然气源可以利用，制冷量不大，或者使用空间较小而又不经常使用的场合，涡流管制冷显然具有优势^[3]。

1.1.4 热电制冷

热电制冷也叫温差电制冷、半导体制冷或电子制冷，是以温差电现象为基础的制冷方法。它是利用“塞贝克效应”的逆效应——珀尔帖效应的原理制冷的。

塞贝克效应就是一百多年前人们发现的温差电现象。即在两种不同金属组成的闭合线路中，如果保持两接触点的温度不同，就会在两接触点间产生一个电势差——接触电动势，同时闭合线路中就有电流流动，称为温差电流。反之，在两种不同金属组成的闭合线路中，若通以直流电流，就会使一个接点变冷，另一个接点变热。这种现象称为珀尔帖效应。此效应是由法国科学家 Jean C. A. Peltier 在 1834 年发现的，亦称温差电现象。

由于半导体材料内部结构的特点，决定了它产生的温差电效应比其它金属更显著。所以热电制冷都采用半导体材料，故亦称为半导体制冷。

由一块 P 型半导体和一块 N 型半导体联结成的电偶，如图 1-7 所示。当通过直流电流 I 时，P 型半导体内载流子（空穴）和 N 型半导体内载流子（电

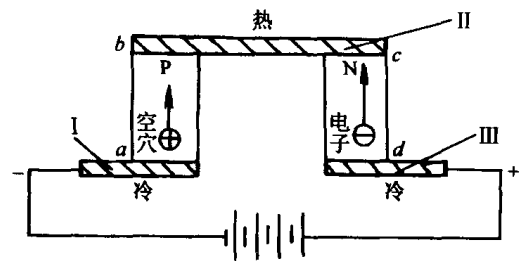


图 1-7 基本热电偶

子)，在外电场作用下产生运动。由于载流子（空穴和电子）在半导体内和金属片内具有的势能不一样，势必在金属片与半导体接头处发生能量的传递及转换。因为空穴在 P 型半导体内具有的势能，高于空穴在金属片内的势能，在外电场作用下，当空穴通过结点 a 时，就要从金属片 I 中吸取一部分热量，以提高自身的势能，才能进入 P 型半导体内。这样，结点 a 处就冷却下来。当空穴过结点 b 时，空穴将多余的一部分势能传递给结点 b 而进入金属片 II，因此，结点 b 处就热起来。同理，电子在 N 型半导体内的势能大于在金属片中的势能，在外电

场作用下,当电子通过结点 d 时,就要从金属片Ⅲ中吸取一部分热量,转换成自身的势能,才能进入N型半导体内。这样结点 d 处就冷却下来。当电子运动到达结点 c 时,电子将自身多余的一部分势能传给结点 c 而进入金属片Ⅰ,因此节点 c 处就热起来。这就是热电偶制冷与发热的基本原理。如果将电源极性互换,则电偶对的制冷端与发热端也随之互换。

一对电偶(由一块P型半导体和一块N型半导体组成)的制冷量是很小的,如 $\phi 6\text{mm} \times 7\text{mm}$ 的电偶对,其制冷量仅为 $0.92 \sim 1.16\text{W}$ 。为了获得较大的冷量,可将很多对电偶串联组成热电堆,称单级热电堆。单级热电堆通常只能得到大约 50°C 的温差。为了得到更低的冷端温度,可用串联、并联及串并联的方法,组成多级热电堆,上一级热电堆的热端贴在下一级热电堆的冷端,下一级热电堆实际上起着上一级热电堆的散热器作用。图1-8a、b为二级热电堆串联和并联型式。图1-8c为串并联三级热电堆结构示意图。

半导体制冷是靠空穴和电子在运动中直接传递能量来实现的。它与蒸汽压缩式和吸收式制冷比较有如下特点:

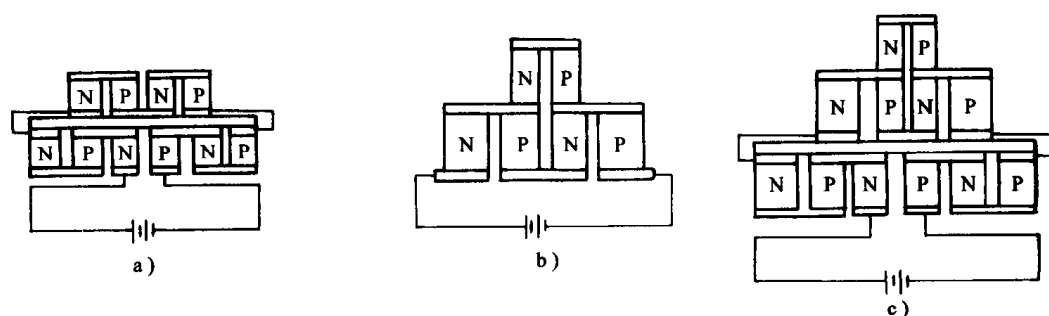


图 1-8 多级热电堆

a) 串联二级热电堆示意图 b) 并联二级热电堆示意图 c) 串并联型三级热电堆示意图

- 1) 半导体制冷不用制冷剂,故无泄漏、无污染,清洁卫生。
- 2) 半导体制冷无机械转动部分,因此工作无噪声、无磨损、寿命长、可靠性高、维修方便。
- 3) 冷却速度和制冷温度可通过改变工作电流的大小任意调节,灵活性很大。冷却速度快。
- 4) 可用改变电流极性来达到冷热端互换的目的,故用于高温恒温器等场合有独到之处。
- 5) 体积可以做得很小。例如一个能达到 -100°C 低温的四级半导体制冷器,其外形尺寸只有一个香烟盒大小。
- 6) 制冷量可以很小。制冷量可小至 1W 或更小。
- 7) 半导体制冷需要供给直流电源。
- 8) 半导体制冷器价格较高。

半导体制冷的主要缺点是大容量(制冷量)时效率太低,耗电量大约比蒸汽压缩式制冷大一倍。但是,蒸汽压缩式等制冷方法的效率,与其制冷装置本身的容量大小有关。容量越小,效率越低。而半导体制冷的效率与其容量大小无关,即在制冷量极小时,仍保持其效率不变。因此,对于制冷量仅几十瓦的场合,半导体制冷的效率高于其它制冷机。例如,当温差小于 50°C ,制冷量在 20W 以下时,半导体制冷装置的效率比蒸汽压缩式高。