

李松寿 徐世琼 编著
朱富强 谢烈

ZHI
LENG
YUAN
LI
YU
SHE
BEI

制冷原理与设备

上海科学技术出版社

制冷原理与设备

上海水产大学 李松寿
徐世琼
朱富强 编著
湛江水产学院 谢烈

上海科学技术出版社

编写说明

随着国民经济的发展和人民生活水平的不断提高,制冷技术得到了广泛地应用。为了适应制冷技术发展的要求,以及满足制冷工艺专业的需要,我们编写了这本《制冷原理与设备》,供从事制冷技术的有关人员和有关院校师生参考。

本书编写分工如下:绪论、一至五章由徐世琼编写;六至七章由朱富强编写;八至十章和十三至十五章由李松寿编写;十一至十二章由谢烈编写。全书最后由李松寿负责统一定稿。

本书稿完成后,曾请西安交通大学有关同志审阅,在此谨致谢意。限于编者的业务水平,谬误和不妥之处难免,恳切欢迎读者批评指正。

编者
1987年3月

制冷原理与设备

李松寿 徐世琼 朱富强 谢烈 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23 插页 3 字数 554,000

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数: 1-10,200

ISBN 7-5323-0754-9/TB·7

统一书号: 15119·2565 定价: 5.65元

目 录

绪论	1
第一节 制冷原理与设备的研究内容和目的要求	1
第二节 制冷技术的发展概况	1
第三节 制冷技术在国民经济中的应用	3
第一章 人工制冷的的基本方法	5
第一节 利用相变过程获得低温的方法	5
第二节 利用气体的节流效应和绝热膨胀获得低温	5
第三节 涡流冷却效应	8
第四节 半导体制冷	10
第二章 蒸汽制冷循环	13
第一节 逆向卡诺循环——制冷机的理想循环	13
第二节 制冷机的理论循环	17
第三节 蒸汽制冷机的实际循环	25
第三章 制冷剂与载冷剂	27
第一节 制冷剂的种类、特性与选择	27
第二节 常用制冷剂	33
第三节 载冷剂	38
第四章 活塞式制冷压缩机的输汽系数、功率与制冷量	42
第一节 压缩机的理论工作过程与实际工作过程	42
第二节 压缩机的输汽系数	43
第三节 压缩机的功率和效率	49
第四节 压缩机的制冷量与工作温度的关系	52
第五章 两级压缩及复迭式制冷循环	57
第一节 两级压缩制冷循环	57
第二节 两级压缩制冷循环的热力计算	60
第三节 复迭式制冷循环	69
第六章 活塞式制冷压缩机	76
第一节 活塞式制冷压缩机的受力分析及结构参数的选择	76
第二节 开启式压缩机零部件结构	84
第三节 半封闭式压缩机特点	113
第四节 全封闭式压缩机结构	116
第七章 回转式、离心式制冷压缩机	124
第一节 螺杆式压缩机	124
第二节 滑片式压缩机	146
第三节 滚动转子式压缩机	151

第四节	离心式制冷压缩机	153
第八章	制冷机热交换设备换热过程的分析与计算公式	174
第一节	无集态改变时的放热	174
第二节	液体沸腾时的放热	182
第三节	蒸汽凝结时的放热	187
第九章	冷凝器的结构与计算	191
第一节	冷凝器中的传热	191
第二节	冷凝器的结构	193
第三节	冷凝器的计算方法	203
第十章	蒸发器的结构与设计计算	219
第一节	壳管式蒸发器的结构与计算	219
第二节	立管式、螺旋管式及蛇管式蒸发器的结构与计算	226
第三节	冷却排管的结构与计算	229
第四节	冷风机的结构与设计计算	235
第十一章	节流装置	256
第一节	节流阀	256
第二节	热力膨胀阀	259
第三节	毛细管	266
第十二章	制冷机的辅助设备	270
第一节	润滑油的分离与收集设备	270
第二节	制冷剂的分离与贮存设备	273
第三节	制冷剂的净化设备	277
第四节	制冷装置的其他辅助设备	281
第十三章	蒸汽压缩式制冷装置的工作特性及焓分析法的应用	286
第一节	蒸汽压缩式制冷系统的工作特性	286
第二节	焓分析方法在制冷循环中的应用	290
第十四章	吸收式制冷机	296
第一节	吸收式制冷机的工作原理	296
第二节	氨水吸收式制冷机	300
第三节	溴化锂吸收式制冷机	309
第四节	吸收—扩散式制冷机	327
第十五章	蒸汽喷射式制冷机	330
第一节	蒸汽喷射式制冷的工作原理	331
第二节	蒸汽喷射式制冷装置	334
第三节	影响蒸汽喷射式制冷机运转性能的因素	336
附录	338
一、附表	338
二、附图	364

绪 论

第一节 制冷原理与设备的研究内容和目的要求

制冷技术是一门研究人工制冷原理、方法以及如何运用机械设备获得低温的科学技术。

近三十年来,制冷技术得到迅速发展,在国民经济、国防建设和科学研究等方面,几乎都应用制冷技术。随着科学技术的不断发展,目前世界各国研究低温的课题愈来愈多,温度也愈来愈低。由于制冷温度的不同,所采用的制冷方法和制冷设备也各异。

制冷范围的划分通常是以所能达到的温度来区分的。习惯上,是将环境温度以下到 -150°C 划归普通冷冻(简称普冷);将从 -150°C 到 -268.95°C 划归低温冷冻;将从 -268.95°C 以下到接近于绝对零度划归极低温冷冻。

《制冷原理与设备》是制冷与冷藏技术专业的主要专业课。研究内容是普冷温度范围,并且以 -50°C 以上温度范围为重点,主要讲述食品冻结、冷藏和空气调节所需的制冷技术。内容包括制冷循环和热力计算、各种类型的制冷机及有关设备的工作原理。着重介绍蒸汽压缩式制冷机的结构、应用和设计计算方法。

通过本课程的学习,在紧密联系《工程热力学》、《传热学》及《流体力学》等课程的基础上,要求掌握人工制冷的基本原理及热力计算方法,掌握系列压缩机的结构特点,掌握制冷热交换器与辅助设备的作用原理和设计计算方法,了解螺杆式、离心式压缩机以及吸收式、蒸汽喷射式制冷机的一般原理。通过实验和实习学会制冷装置的操作管理方法,能够分析和处理制冷系统的常见故障。

第二节 制冷技术的发展概况

人类利用天然冷源(冰、雪或地下水)进行防暑降温和保藏新鲜食品,在很早以前就开始了。直到十六世纪以后,由于科学技术的发展,揭示了冰盐混合时的制冷效应,于是人们开始用冰盐混合的冷却方法来冷却饮料,保存新鲜食物,这种方法,一般称为化学制冷。目前应用在简易小冷库、冷藏列车以及在渔船上,用来短期贮藏新鲜食品。

天然冰和冰盐混合物制冷效应,由于温度受到一定限制,又不易控制和调节,而且受到季节和地区的影响,所以难以满足生产、科学研究和日常生活需要。于是在十九世纪中叶开始就出现了人工制冷技术。

制冷技术的发展,迄今大约有一百年的历史。1834年英国人波尔金斯制成第一台用乙醚为制冷剂的制冷机,这台机器可看作是现代制冷机的雏形。以后就发展采用其他的制冷剂和较高压力下,以及建立在其他作用原理上工作的制冷机。1844年美国人约翰·高里制成了用空气为制冷剂的可用来制冰和冷却空气的制冷压缩机。1862年法国人卡尔里制成了吸收式制冷机。1874年瑞士人皮克采用二氧化硫作为制冷剂,同年德国人林杰设计成功氨制

冷机,这被大家公认是制冷机的始祖,对制冷技术的发展起了重大作用。到目前为止,氨仍旧是主要的制冷剂之一。1881年林杰和文德豪津制成了用二氧化碳为制冷剂的制冷机,该制冷剂曾获得广泛流行。1890年以后出现的蒸汽喷射式制冷机,由于它能达到的温度限于 0°C 以上,且容量一般较大,故应用不太广泛。

近一百年以来,在制冷技术领域内,蒸汽压缩式制冷机的发展,始终处于领先地位。进入二十世纪以后,压缩机的类型增多了,机器的转速提高了,设备紧凑,而且逐步向低温、多品种、自动化方向发展。同时制冷剂的种类也不断增多,除氨、二氧化碳、二氧化硫等无机化合物制冷剂以外,随着化学、石油工业的发展,在1930年以后开始使用氟利昂制冷剂,以及近十几年来又出现使用氟利昂的共沸溶液和非共沸溶液作为制冷剂,这就给蒸汽压缩式制冷机的发展开辟了新的道路。

随着半导体技术的发展,半导体制冷已开始在生产 and 科学研究中得到实际应用。这在普冷温度范围内,除了采用压缩式、吸收式和蒸汽喷射式三种制冷方法以外的又一新的制冷方法。但因效率低和成本高,故使其广泛应用受到一定影响。

三千多年前,我国人民已经懂得利用天然冷源,即在冬季采集天然冰贮藏在冰窖里,到夏季再取出来使用。到了战国时期,已出现了藏冰的冰房。如在《左传》中经常提到冰房窖冰之事。在《周礼》中也有“凌人夏颁冰掌事”之说。当时还发明用“冰鉴”盛冰以冷藏食物,并知道用冰来“寒尸”,使尸体不至于很快腐臭。

到了汉代,用冰制冷的技术又有进一步的发展。如《汉书·惠帝记》中提到“秋七月乙亥,未央宫凌室灾”,记载了当时宫内冰库发生火灾的事;又如在《鄞中记》一书中介绍了三国时代“曹操在临漳县西南设井、建石虎于其上藏冰。三伏之日以赐大臣”,在书中还描述了一个大型冰库的规模“有屋一百四十间,下有冰室,室有数井,井深十五丈,藏冰及石墨……,又有窖粟及盐,以备不虞”。可见,当时已经把用冰制冷及用炭作燃料,象对待粮食、食盐一样,当作战备物资加以贮藏。以备需要。这发生在一千七百多年前是极不简单的事。到了唐朝,冰的应用更为普遍,以至出现了“长安冰雪,至夏日则价等金璧”的情况。元朝时,意大利传教士马可勃罗曾来我国游历多年,在其所著《马可勃罗游记》中介绍了我国十八世纪用冰保藏鲜肉及制造冰酪冷食的技术。

我国人民所开创的应用天然冰制冷的技术应该逐步向人工制冷方面发展,但由于我国长期处于半封建半殖民地的社会,严重地阻碍制冷技术的发展。直至解放前夕,全国仅上海、天津、汉口等几个城市有少数冷库,总库容量不到3万吨。上海仅有的几家很小的“冰箱厂”,也只能依靠进口设备零件,搞些修修补补。至于制冷专业教育和科学研究则完全是空白。

解放后,我国的制冷事业和其他部门一样,也得到了迅猛发展。据1980年底统计全国商业、外贸、水产部门的冷库总容量比解放前约增长60倍。制冷机制造工业已从无到有,从小到大,从仿制到自行设计,正在不断地发展提高。我国从1954年起造出了制冷机,到1957年已有了很大的发展。1964年制订了中小型活塞式压缩机系列,共五种缸径,二十二个品种。1976年制订了全封闭压缩机系列草案,1977年开始搞样机设计工作。蒸喷式制冷机在1967年制成,在1968年制订了《蒸汽喷射制冷机系列》。1968年起,设计试制溴化锂吸收式制冷机,1974年制订颁布了《溴化锂吸收式制冷机型式和基本参数》部标准,目前已生产232.6~3489 kW不同制冷量的溴化锂吸收式制冷机。3489 kW丙烯离心压缩机,在1966年试制成功,在1976年制订了空调用离心式制冷机系列草案。1971年我国又成功地试制

了螺杆压缩机,1974年一机部制冷行业组织了螺杆式制冷压缩机的联合设计,已有批量生产。半导体冰箱、空调器的研制也有了很大的进展。到目前为止,全国制冷机制造厂已有几十家,布局比较合理,在产品、品种和质量方面都达到了一定水平。在1976年又完成了冷库自动控制元件、仪表共7大类135种规格的设计试制任务,填补了我国冷库自动化的一个空白。

我国一些工科高等院校动力系设有制冷和低温技术专业,在商业、水产、海运院校中也设有制冷与冷藏技术专业。此外,有些部门还设立了专业的科研设计单位,多年来为发展我国制冷技术做了不少工作。1977年4月,我国成立了中国制冷学会。1978年5月,又恢复了中国水产学会,下设渔业制冷专业委员会。它们正积极开展制冷科学技术的研究和学术交流,预期将对我国制冷科学技术的发展起很大的促进作用。

第三节 制冷技术在国民经济中的应用

制冷技术在国民经济中应用极为广泛,主要应用在如下几个方面。

在食品工业方面,制冷技术应用最早。由于肉类、水产品、禽蛋、果蔬等易腐食品的生产有着较强的季节性和地区性,为了调剂旺、淡季节、保障供给、支援出口,就需要将食品进行冻藏或冷藏,来延长食品的贮藏期限。由于利用低温方法来贮藏易腐食品具有突出的优点,它较盐渍、干制、熏制和罐藏更能保持易腐食品原有的颜色、香味与营养,因此目前在商业流通网中冷库设施、冷藏船、冷藏列车、冷藏汽车以及冷藏柜台、冰箱等装置的使用逐渐普及,而冷藏库的服务范围,甚至还扩大到保存贵重皮毛、服装、药材、花卉、蚕种等方面。其他如冷饮品、饮料、酿酒等工业也都需要低温,所以食品工业的发展与制冷技术有着密切的关系。

在农业方面,使用化肥是粮、棉增产的重要措施,1公斤化肥可增产3公斤左右粮食,而化肥生产中需要应用制冷。一个年产量5000吨的合成氨厂,约需232.6kW标准制冷量。实现农业现代化要搞科学种田,如培育耐寒品种,微生物除虫,良种精卵的保存,人造雨雪等都与“冷”有关,可见制冷技术与农业的关系也很密切。

在工业方面,制冷技术的应用更为广泛。在石油化工、有机合成(橡胶、塑料、化纤、药物、染料等)、基本化工(酸、碱)等工业中如分离、精炼、结晶、浓缩、提纯、液化、控制反应温度等单元操作都要用到制冷技术。工业生产过程中所用的制冷装置容量都比较大,对温度的要求也不同,有的生产过程只需 0°C 以上的低温就可以了,有的生产过程需要很低的温度。

在空调方面,如冶金、纺织、印刷、精密仪表、电子工业等工厂,某些有特殊要求的实验室、试验中心、计量室,为了保证必要的恒温和恒湿的工作条件,需要进行空气调节,而制冷则是空调装置中不可缺少的组成部分。此外,大会堂、影院、剧场、医院、饭店等公用建筑,以至列车、汽车、救护车、客轮、飞机等交通工具都日益广泛地应用空调装置。

在建筑工程以及矿井、隧道的施工方面,如在地下水位很高的地区或沼泽地带施工时,水就会给建筑施工带来很大困难,甚至使施工无法进行。可用人工制冷来冻结土壤,造成一道冰冻的围墙,就可防止浸水。由于冻土有相当大的抗压强度,如在 -9°C 时为127.4bar,故对挖掘矿井、隧道和建设地下工程是很适用的。另外,如修筑船坞、水闸、加固拱门桥梁时均可采用人工制冷来冻结土壤。对于一些地下工程,往往还要应用制冷的方法进行空调除湿,以便控制室内空气的湿度。

在医药卫生方面,如血清、疫苗、组织器官(如皮肤、眼球等)和各种有机药物需要在较低温度下保存。在抗菌素的生产中,有的还要采用真空冷冻干燥。另外,如人工冬眠,低温麻醉和“冷手术刀”等先进医疗技术也无不都是制冷技术的应用。其他如法医用冷“保存尸体”、医学院校和研究部门用冷冷藏尸体、器官组织,以供科研和教学之用。

在飞机制造和宇宙航行事业中,为了测试产品的低温性能,需要建立环境试验室,以便模拟某一气候条件进行试验。如航空发动机、航空仪表、飞机和火箭、航天器的材料零件等都要进行低温检验,必须合格后才被允许上天。对于坦克、装甲车、军械等同样有必要进行环境试验。

在许多近代尖端科学技术部门中,高速电子计算机、卫星通讯、激光、获得高真空、红外技术……等,都需要制冷技术。

现在在文化、体育事业中也离不开制冷,如摄影棚的空调、人工雪景的布置、室内冰球场等都需要“冷”。如我国第一座露天人工冰球场在1976年建成,使我国冰球运动员一年四季都可以进行训练和比赛。

以上为普通冷冻范围内制冷技术的应用。而在低温冷冻范围内制冷技术的应用也日趋广泛。如近代炼钢工业所需要的氧气是用低温空气分离技术而获得的。如用作火箭推进剂的液氧和液氢也是借助低温技术获得的。又如用低温方法从电解水的产物中分离出氢的同位素氘,氘是热核能的原料,如这一问题能得到进一步解决,则人类将有取之不尽,用之不竭的能源。另外又发现了金属和合金在低温下的超导现象,使用超导电缆在传输大能量电力时极为经济。而形成金属的超导,就需要低温技术和设备。

总之,制冷技术的应用是很广泛的,随着国民经济的发展,科学技术的进步,人民生活水平的不断提高,在制冷的应用方面将展示出无限广阔的远景。

第一章 人工制冷的的基本方法

人工制冷的的方法，可分为物理方法和化学方法两种，而绝大多数制冷方法属于物理方法。在普通冷冻温度范围内，应用最广泛的物理方法为相变制冷和气体绝热膨胀制冷，其次尚有温差电制冷和涡流制冷等。

第一节 利用相变过程获得低温的方法

相变是指物质集聚态的变化。物质在发生集态变化时，必然伴随着一定数量的能量交换。相变制冷就是利用某些物质相变时的吸热效应。固体物质的融解或升华，液体的汽化，这都是吸热的相变过程，通过这些过程吸收大量热量(即潜热)，从而可获得低温。例如在大气压力下水冰融解的温度为 0°C ，单位制冷量 $q_0 = 334.96 \text{ kJ/kg}$ ；干冰(固态二氧化碳)在大气压力下的升华温度为 -78.9°C ，单位制冷量 $q_0 = 573.62 \text{ kJ/kg}$ 。当压力降低时，其升华温度也相应降低，可达到 -100°C 以下。在用干冰制冷时，常用凝固点较低的液体如酒精(乙醇)等作为冷量传递介质(酒精在大气压力下的沸点为 79°C ，凝固点为 -131°C)。使用时，先将被冷却物体泡在酒精等液体中，然后向酒精中投放干冰，用控制投入量的方法来控制温度。

干冰必须用隔热容器保存和运输，在正常情况下，每昼夜损耗约为 $6\sim 8\%$ 。

利用水冰或干冰制冷，一般能满足短时间大负荷制冷量的要求，比较适用于快速降温的需要。但由于只能单次使用，不能连续使用，严格讲，这不能叫制冷，而仅仅是用冷。因为制冷过程，是一个使热量从低温物体传给高温物体的连续过程。该过程是依靠称之为制冷机来实现的。

液体转化为蒸汽称为汽化，它包括两个过程：蒸发和沸腾。在现代制冷技术中，主要是利用制冷剂在低压下的汽化过程来制取冷量的。为了实现汽化制冷，普遍是应用制冷机，包括蒸汽压缩式制冷机、吸收式制冷机和蒸汽喷射式制冷机。由于蒸汽压缩式制冷机在目前应用最广泛，因此，本书将重点讲述蒸汽压缩式制冷机的原理与设备。对吸收式制冷机和蒸汽喷射式制冷机的原理与设备也将扼要介绍。

第二节 利用气体的节流效应和绝热膨胀获得低温

利用压缩气体的绝热节流过程和绝热膨胀过程获得低温，是制冷技术中通常采用的方法之一，绝热节流过程是在节流阀(或称膨胀阀)中实现的。节流前后气体的焓值保持不变，没有外功输出。绝热膨胀过程需要在膨胀机内实现，并有外功输出。下面对这两种过程进行分析比较。

一、气体的节流

气体在通过节流阀时,由于流速大,时间短,来不及与外界进行热交换,可近似地作为绝热过程来处理,称为绝热节流。节流时存在摩擦阻力损失,所以它是一个不可逆过程,节流后熵必然增加,并引起附加功损失,根据稳定流动能量方程式,气体在绝热节流时,节流前后焓值不变。对理想气体来说焓值只是温度的函数,因此理想气体节流前后的温度是不变的。而对实际气体来说焓值是温度和压力的函数,所以实际气体节流前后的温度一般将发生变化,这一规律即称之为焦耳·汤姆生效应,或称为“节流微分效应”。

节流微分效应的定义如下:

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \quad (1-1)$$

由热力学微分方程的运算可得:

$$\alpha_h = \frac{A}{c_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \quad (1-2)$$

上式是计算节流微分效应的一般公式。不难看出, α_h 的数值是与气体的性质有关,对于理想气体 $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p}$, 故 $\alpha_h = 0$, 即理想气体节流时, 温度不变。而对于实际气体, 则可能有下述三种情况:

- (1) $T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p > v$, 此时 $\alpha_h > 0$, 即节流后温度降低, 产生冷效应;
- (2) $T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p < v$, 此时 $\alpha_h < 0$, 即节流后温度反而升高, 产生热效应;
- (3) $T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = v$, 此时 $\alpha_h = 0$, 即节流后温度不变。

对于实际气体应用计算公式来求温度效应是困难的。因此通常都用试验方法作出 $\alpha_h = f(T, p)$ 的曲线图, 然后再应用这些图来计算温度效应。用 $T-s$ 图和 $h-s$ 图来计算是很方便的。

研究 $T-s$ 图上等焓线的变化(见图 1-1)可看出: 在气态区域内, 当压力为 p_1 , 节流前温度为 T_3 时, 节流后 $\Delta T_{3-4} = 0$, 图 1-1 中 3 称为转化点, 气体处在该状态时, 节流前后温度不变, T_3 称为转化温度, 亦称转回温度。节流前气体的温度低于转化温度时, 节流后温度降低, 如图 1-1 中 1, 节流后 $\Delta T_{1-2} = (T_1 - T_2) > 0$, 产生冷效应。若气体的温度高于转化温度时, 节流后温度升高, 如图 1-1 中点 5, 节流后 $\Delta T_{5-6} = (T_5 - T_6) < 0$, 产生热效应。

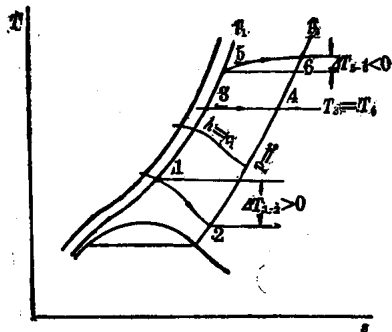


图 1-1 不同压力和温度时节流效应的变化

对于符合范德瓦耳方程式的实际气体, 其转化温度大致可用下式计算:

$$T_{\text{转}} = 6.75 T_{\text{临}} \quad (1-3)$$

即气体的转化温度与临界温度 $T_{\text{临}}$ 有关, $T_{\text{临}}$ 愈低, 则转化温度愈低, 反之亦然。一些气体的转化温度见表 1-1。

表 1-1 中 $\frac{T_{\text{转}}}{T_{\text{临}}}$ 的数值与式(1-3)之间的差别在于范德瓦耳方程在定量上不够正确的缘故。对于一般临界温度不太低的气体如氨、氟利昂-12 等, $T_{\text{转}}$ 的数值都比较高, 故在通常温

表 1-1 一些气体的转化温度 $T_{转}(K)$

气体名称	分子式	$t_{临}(^{\circ}C)$	$t_{转}(^{\circ}C)$	$\frac{T_{转}}{T_{临}}$	压力范围 MPa (大气压)
氮	N_2	-146.8	257	~4.2	9.81~0.0981 (100~1)
氩	Ar	-122	317	~3.9	9.81~0.0981 (100~1)
空气		-140.5	487	~5.7	9.81~0.0981 (100~1)
氢	H_2	-239.7	-83	~5.7	9.81~0.0981 (100~1)
氦	He	-267.7	-233	~7.5	2.94~0.0981 (30~1)

度下节流后的温度都是降低的，因此可采用节流的办法获得低温和使其液化。但对于临界温度极低的气体如 H_2 和 He ，在通常温度下节流后温度非但不降低，而且反而升高，故要采用节流以使 H_2 和 He 降温 and 液化，必须要用冷却的办法使它们在节流前降低到比各自转化温度更低的温度。由此可见，焦耳·汤姆生效应对气体的液化和获得很低温度具有很重要的意义。

当压力下降时，节流所产生的温度变化称为积分节流效应，在 $T-s$ 图中(图 1-2) ΔT_j ，即积分节流效应。

二、气体的绝热膨胀

气体的绝热膨胀(等熵膨胀)是制冷技术中获得低温的另一个重要方法。气体在等熵膨胀时，压力微小改变而引起的温度变化，称为等熵微分效应，以 α_s 表示，即：

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \quad (1-4)$$

由热力学微分方程的运算可得：

$$\alpha_s = \frac{AT}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (1-5)$$

由上式可知，对于气体 $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ 总是正值，所以 α_s 也总是正值，即气体等熵膨胀温度总是降低的，即产生冷效应。

比较(1-2)式和(1-5)式可看出：

$$\alpha_s = \alpha_h + \frac{Av}{c_p} \quad (1-6)$$

即等熵膨胀的微分效应大于节流过程的微分效应。

气体的等熵膨胀是在膨胀机内进行的，在 $T-s$ 图中(图 1-2)，状态 $1(p_1, T_1)$ 的气体绝热膨胀到状态 $2(p_2, T_2)$ 对外作功，并获得低温。

如果状态 1 的气体在节流阀中膨胀到压力 p_2 ，而节流过程是等焓过程，沿等焓线交等压线 p_2 于状态 $2'$ ，显然 $T_2' > T_2$ ，则绝热膨胀的积分温度效应 ΔT_s 大于绝热节流的积分温度效应 ΔT_j ，即 $(T_1 - T_2) > (T_1 - T_2')$ 。

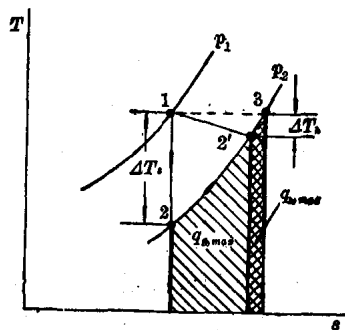


图 1-2 气体的等熵膨胀和节流过程温度效应的比较

绝热膨胀或绝热节流后的气体进行等压吸热则可制取冷量, 在极限情况下气体被等压由 T_2 或 T'_2 加热到 $T_3 = T_1$, 因此采用等熵膨胀的气体最大制冷量是:

$$q_{s,\max} = c_p(T_3 - T_2) = c_p(T_1 - T_2) \quad (1-7)$$

而采用等焓节流过程的气体最大制冷量是:

$$q_{h,\max} = c_p(T_3 - T'_2) = c_p(T_1 - T'_2) \quad (1-8)$$

所以对实际气体在过热区内, 无论从温度效应还是从制取冷量来看, 等熵膨胀过程的这些数值比节流过程要大得多, 气体采用等熵膨胀是合理的, 而采用节流过程是不经济的。

[例 1-1] 设初态为 $p_1 = 39.2 \text{ bar}$, $T_1 = 245 \text{ K}$ 的空气若采用绝热膨胀和绝热节流到 $p_2 = 0.98 \text{ bar}$, 试比较其温度效应 ΔT_s 、 ΔT_h 和最大制冷量 $q_{s,\max}$ 、 $q_{h,\max}$ 。

解:

(1) 由空气的 T - s 图, $p_1 = 39.2 \text{ bar}$, 由 $T_1 = 245 \text{ K}$ 沿等熵线到 $p_2 = 0.98 \text{ bar}$, 查得 $T_2 = 85 \text{ K}$ 。

$$\Delta T_s = T_1 - T_2 = 245 - 85 = 160 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} q_{s,\max} &= c_p(T_1 - T_2) = 1.006(245 - 85) \\ &= 160.9 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

空气的定压比热 $c_p = 1.006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

对空气从状态 1(p_1, T_1) 等熵膨胀到状态 2(p_2, T_2) 时也可按下式计算温度 T_2 :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{0.981}{3.92}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 0.347$$

$$T_2 = 0.347 \times T_1 = 0.347 \times 245 = 85 \text{ K}$$

(2) 由空气的 T - s 图, $p_1 = 39.2 \text{ bar}$, $T_1 = 245 \text{ K}$ 经等焓线节流到 $p_2 = 0.98 \text{ bar}$, 查得 $T'_2 = 233 \text{ K}$

$$\Delta T_h = T_1 - T'_2 = 245 - 233 = 12 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} q_{h,\max} &= c_p(T_1 - T'_2) = 1.006(245 - 233) \\ &= 12.07 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{\Delta T_s}{\Delta T_h} = \frac{160}{12} = 13.3$$

$$\text{或 } \frac{q_{s,\max}}{q_{h,\max}} = \frac{160.9}{12.07} = 13.3$$

故空气在过热区内从同一状态 1, 膨胀到状态 2 时采用等熵膨胀时温度降要比节流温度降大 13.3 倍, 或最大制冷量要比节流循环大 13.3 倍。

第三节 涡流冷却效应

涡流冷却效应最早是在 1933 年由法国工程师兰卡(G·Ranque)在实验室中发现的。涡流冷却效应的实质是利用人工方法产生的涡流, 使气流分离成冷、热两部分, 其中分离出来的冷气流便可用来制冷。这种冷却效应虽然在 1933 年就已被提出, 但它的发展很慢, 直到 1946 年以后才对涡流管作了比较全面的实验研究, 并引起各方面的注意。但由于经济性差, 故应用得不普遍。

气流的涡流冷却效应是在涡流管的涡流室内进行的。涡流管是一根构造比较简单的管

子,如图 1-3 所示。它是由喷嘴、涡流室、分离孔板及冷热两端的管子组成。

涡流室的内部形状为阿基米德螺旋线,喷嘴是沿切线方向装在涡流室的边缘,压缩气体

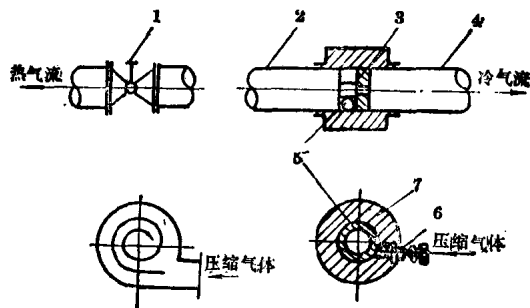


图 1-3 涡流管结构示意图

1. 调节阀; 2. 热端管子; 3. 分离孔板; 4. 冷端管子; 5. 涡流室; 6. 喷嘴; 7. 隔热层

(通常是空气,也可以是其他气体如 CO_2 、 CH_4 等)经冷却到室温后进入喷嘴进行膨胀获得很高的速度,这样的高速气流沿切线方向流入涡流室,便在涡流室内形成自由涡流。其旋转质量的角速度在涡流室的边缘部分较小,而接近轴心部分则愈来愈大,于是在涡流室内沿半径方向便形成了不同流速的气层,而气层之间产生了摩擦。由于摩擦的结果使内层气流的角速度降低,而外层气流的角速度增高,因而内层气流便将一部分动能传给外层气流,这样在涡流室中心部分的气流便具有较低的温度,而边缘部分的气流当经过热端管子时,由于摩擦的存在使动能又转变为热能,经调节阀流出时便具有较高的温度。涡流管内这样一个过程可表示在 $T-s$ 图上(见图 1-4)。

温度为 T_1 , 压力为 p_1 的高压气体在喷嘴内绝热膨胀到压力 p_2 时,理论上所能达到的最低温度(等熵膨胀时所能达到的温度)为:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-9)$$

在图 1-4 中,点 1(p_1, T_1)表示高压气体在喷嘴之前的状态,点 2(p_2, T_2)表示理想情况下在喷嘴内绝热膨胀时温度降低到 T_2 ,点 2a 表示涡流管内出来的冷气流的状态(压力为 p_2 ,温度为 T_{2a}),点 3 表示经调节阀出来的热气流状态(压力为 p_2 ,温度为 T_3)。1-2a 和 1-3' 分别表示两股冷热气流的分离过程,这一过程是不可逆的,在 $T-s$ 图上用虚线表示。3'-3 为热气流经调节阀的节流过程,焓值保持不变。

从涡流管内出来的冷气流温度 T_{2a} 总是高于 T_2 ,这是因为:(1) 气体在喷嘴中不可能是等熵膨胀;(2) 涡流室中内层的气体不可能将其动能全部传递给外层气体;(3) 在涡流室中还存在着向心的热量传递过程。因此,涡流管中气流的冷却效应为:

$$\Delta T_s = T_1 - T_{2a} \quad (1-10)$$

涡流管的冷却效率为:

$$\eta_s = \frac{\Delta T_s}{T_1} < 1 \quad (1-11)$$

式中 $\Delta T_s = T_1 - T_2$ (等熵膨胀温度效应)

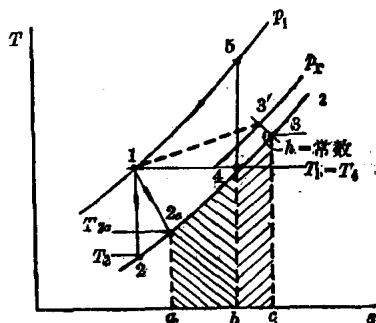


图 1-4 涡流管内气体温度变化的温熵图

将 1 kg 冷气流由温度 T_{2a} 加热到 T_4 ($T_4 = T_1$) 时所吸收的热量即为涡流管冷气流单位制冷量:

$$q_{0x} = c_p(T_1 - T_{2a})\text{kJ/kg} \quad (1-12)$$

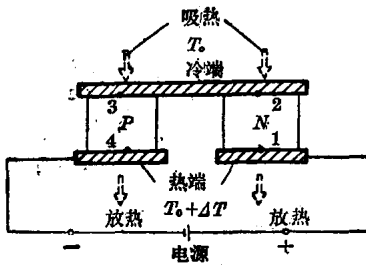
涡流管的优点是结构简单、维修方便、工作安全可靠。它的主要缺点是效率太低, 制冷系数小于压缩式制冷机。

第四节 半导体制冷

半导体制冷又称温差电制冷或热电制冷。它与压缩式、吸收式、蒸汽喷射式等人工制冷方法在原理和设备方面均不同。半导体制冷是利用特种半导体材料, 制成半导体器件, 当有直流电通过时, 半导体的一端发生放热(加热)现象, 而另一端发生吸热(冷却)现象, 利用上述现象来制取冷量的称为半导体制冷。

在 1834 年, 法国科学家珀尔帖首先发现了热电制冷和制热效应, 即金属的温差电效应, 是将两种不同的金属组成一对热电偶, 并在电偶中通以直流电, 这时将在电偶的不同结点处产生吸热和放热现象, 这种现象称为珀尔帖效应。由于金属的珀尔帖效应很弱, 因此, 在制冷和制热上没有多大实用价值。所以, 虽然早在一百多年以前就发现了这个现象, 但真正用于制冷, 还是由于半导体技术的发展才开始的。

半导体制冷的物理现象如图 1-5 所示, 即把一个 P 型半导体和一个 N 型半导体用铜联



接片焊接成电偶对, 当直流电从 N 型半导体流向 P 型半导体时, 则在 2·3 端的铜联接片上产生吸热现象, 此端称为冷端; 而在 1·4 端的铜联接片上产生放热现象, 此端称为热端。由于一个电偶对产生的热电效应较小(一般为 1.163W 左右, 视元件的尺寸大小而异), 所以实用上是将数十个电偶对串联而成, 将冷、热两端各放在一起, 称为热电堆, 制冷量将可增大。

图 1-5 半导体制冷器的电偶对

介绍。

和一切制冷方法一样, 我们总希望半导体制冷器的制冷系数尽可能地提高和达到较大的温差。

图 1-5 中在每对半导体热端和冷端的结点处每一秒钟所放出或吸收的热量称为珀尔帖热 q_p 。它与通过的电流成正比, 即

$$q_p = \pi I = (\alpha_p - \alpha_N) T I \quad (1-13)$$

式中 π ——珀尔帖系数, 与材料的温差电动势率 α 和相应接点的绝对温度 T 有关, 即 $\pi = (\alpha_p - \alpha_N) T$;

I ——所通过的电流值。

当每对半导体制冷器所产生的珀尔帖热量和所传入的热量达到平衡时, 即珀尔帖热量 q_p 等于冷端从外界吸入的热量 q_0 (制取的冷量) 与沿温差电偶对传到冷端的热量 q_h 之和。则:

$$q_x = q_0 + q_h \quad (1-14)$$

而 q_h 又分为两部分, 即:

$$q_h = q_\lambda + q_J \quad (1-15)$$

(1) 由热端向冷端因温差而引起的传导热量 q_λ

$$q_\lambda = \lambda(T_h - T_c) \quad (1-16)$$

式中 λ ——温差电偶对的热导率;

T_h ——热端绝对温度;

T_c ——冷端绝对温度。

(2) 另一部分是电流因温差电偶对电阻 R 而产生的焦耳热 q_J , 它的一半即 $\frac{1}{2}I^2R$ 传给冷端, 另一半传给热端。

$$q_J = \frac{1}{2}I^2R = \frac{1}{2}I^2\rho\frac{L}{s} \quad (1-17)$$

式中 ρ ——温差电偶对材料的电阻率;

L ——温差电偶对的长度;

s ——温差电偶对的截面积。

综上所述, 冷端从周围介质所吸收的热量即所制取的冷量为:

$$q_0 = (\alpha_p - \alpha_n)TI - \lambda(T_h - T_c) - \frac{1}{2}\rho\frac{L}{s}I^2 \quad (1-18)$$

半导体制冷器所消耗的功率 P 包括两部分:

(1) 温差电偶对上产生的焦耳热所消耗的功率 P_J

$$P_J = I^2R = I^2\rho\frac{L}{s} \quad (1-19)$$

(2) 克服温差电动势时所消耗的功率 P_E

$$P_E = IE = I(\alpha_p - \alpha_n)(T_h - T_c) \quad (1-20)$$

故

$$P = P_J + P_E = I\left[I\rho\frac{L}{s} + (\alpha_p - \alpha_n)(T_h - T_c)\right] \quad (1-21)$$

所以半导体制冷器的制冷系数为:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{P} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)TI - \lambda(T_h - T_c) - \frac{1}{2}I^2\rho\frac{L}{s}}{I\left[I\rho\frac{L}{s} + (\alpha_p - \alpha_n)(T_h - T_c)\right]} \quad (1-22)$$

由上式可知, 从半导体材料的质量来看, 温差电偶对的特性是由材料的温差电动势率 α 、电阻率 ρ 、热导率 λ 来决定的。因为这三个参数互有影响, 所以从理论和实验总结, 可用一个由 α, ρ, λ 组成的综合参数 z 来表示, 即:

$$Z = \frac{\alpha^2\sigma}{\lambda} \quad (1-23)$$

式中 $\sigma = \frac{1}{\rho}$ 称为导电率。

最佳制冷系数 ε_{\max} , 最大温差 $\Delta T_{\max} = T_h - T_c$, 最佳电流值 I_{opt} 可用以下式子表示:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_0}{T_h - T_0} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2} z(T_h + T_0)} - \frac{T_h}{T_0}}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} z(T_h + T_0)} + 1} \quad (1-24)$$

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} z T_0^2 \quad (1-25)$$

$$I_{opt} = \frac{\alpha \cdot \sigma \cdot s}{L} T_0 \quad (1-26)$$

由式(1-24)和(1-25)可看出,在给定的 T_h 与 T_0 温度条件下,制冷系数最佳值及可能达到的最大温差完全与半导体材料的 z 值有关,当 z 值增加时,所能达到的最大温差也随之增加。由此可知, z 值是一个重要指标,称为半导体材料的优值(质)系数,希望此值愈大愈好。半导体的 Z 值比绝缘体和金属都大,目前最好的半导体材料, P 型可达 $z_P = 4 \times 10^{-2}/K$, N 型可达 $z_N = 3 \times 10^{-3}/K$ 。故研究半导体制冷材料,首先要着眼于提高材料的优值系数。

在式(1-24)中,如果令 $M = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z(T_h + T_0)}$

$$\text{则: } \varepsilon_{\max} = \frac{T_0}{T_h - T_0} \cdot \frac{M - \frac{T_h}{T_0}}{M + 1} \quad (1-27)$$

式(1-27)中右边第一个因子是逆向卡诺循环的制冷系数,它与热端温度 T_h 及冷端温度 T_0 有关,第二个因子表示半导体制冷器,由于不可逆过程而引起的制冷系数降低的因素。

如上所述,半导体制冷与通常应用的压缩式和吸收式制冷不同,它的独特之处是在某些特殊场所往往起着机械式制冷所不能起的作用。其一,半导体制冷器无机传动部分,因而无噪音,无磨损,运行可靠,维修方便,因此在车、船、卫星站、飞机、地下建筑等部门得到了广泛的应用;其二,半导体制冷器的冷却速度快,易于手动和自动控制;其三,半导体制冷器体积小,无庞大的机械设备,因而可大大节约建筑面积,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那样大小。

我国目前生产的半导体空调器(水冷式)每小时制冷量为 $1.745 \sim 5.815\text{kW}$,国外半导体空调器单机制冷量可达 31.4kW 。

由于半导体制冷器需要消耗直流电,制冷系数比压缩式一般要低,耗电量约大一倍,以及由于价格昂贵,故使它的应用受到一定的限制。从表 1-2 中可以看出,半导体制冷的制冷系数仅为压缩式制冷系数的 $1/2$,耗电却要大一倍。

表 1-2 半导体制冷系数与压缩式制冷系数比较表

半 导 体 制 冷		压 缩 式 制 冷
空调器耗电(千瓦/冷吨)*	1.75	0.88
空调器制冷系数(ε)	2	4
冷藏装置耗电(千瓦/冷吨)	11.2	5.15
冷藏装置制冷系数(ε)	0.25	0.54

* 1 美制冷吨 = 3.517kW 。