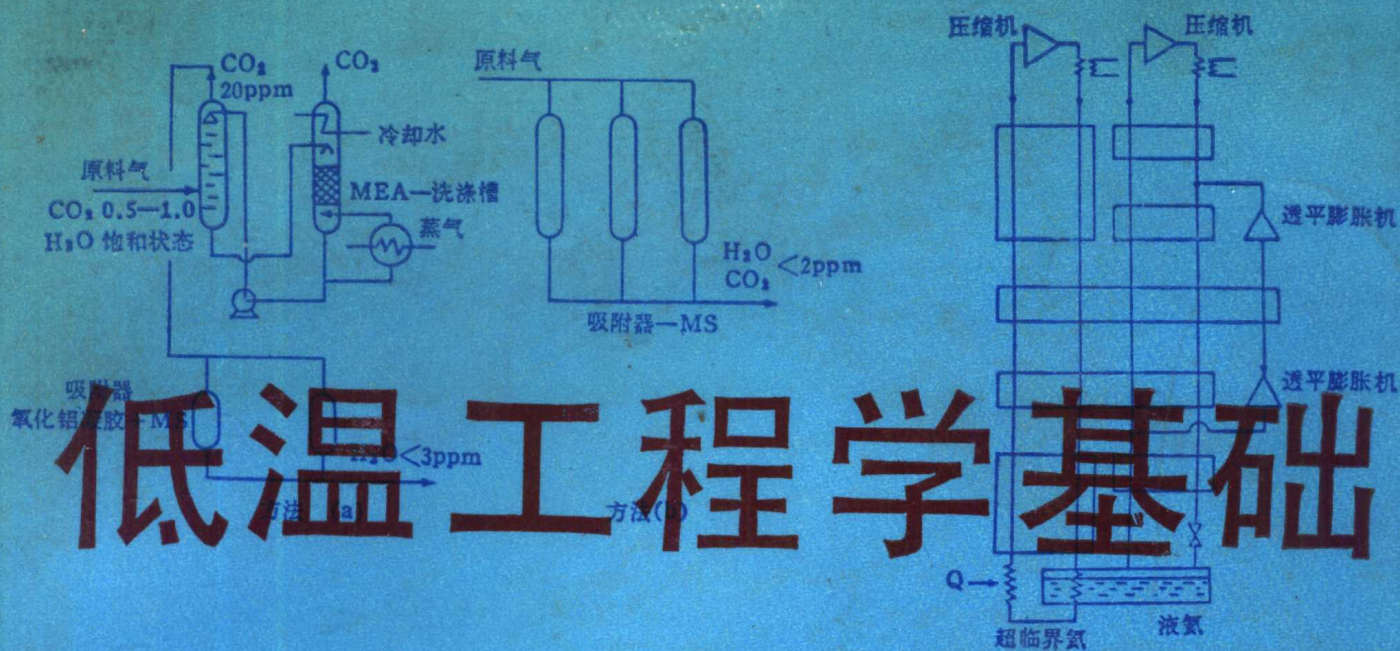
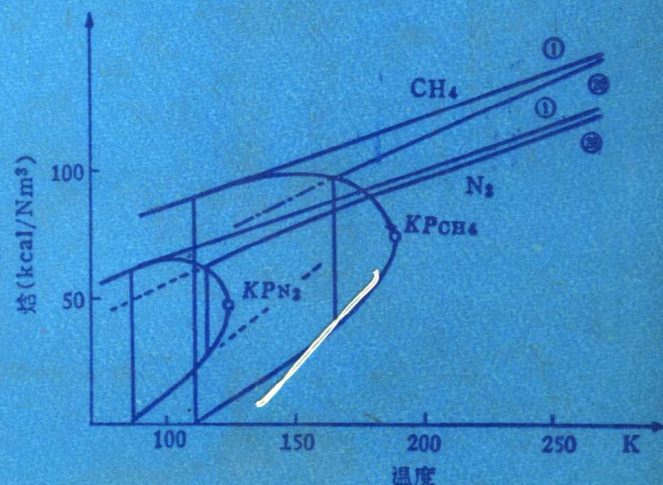
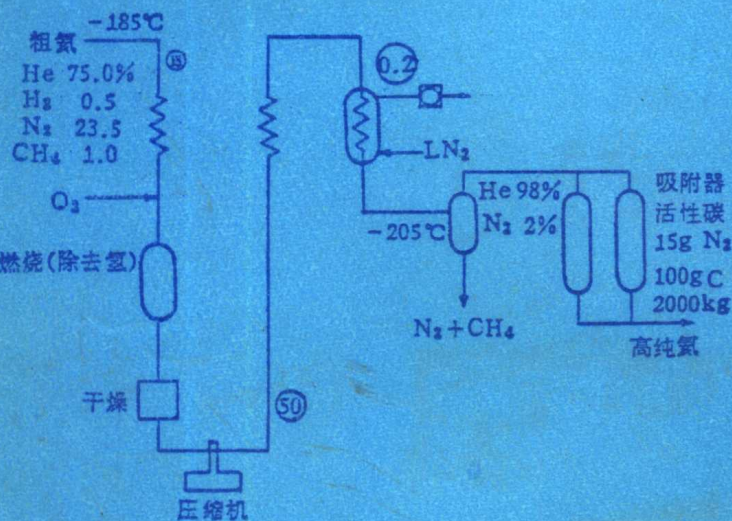


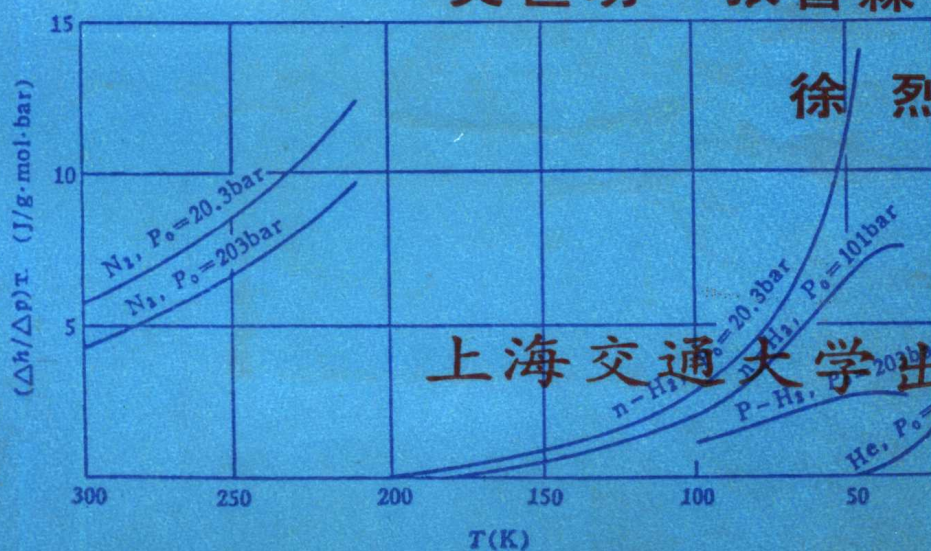


低温工程学基础



吴世功 张善森等编译

徐烈 审核



上海交通大学出版社

低温工程学基础

吴世功 张晋霖 刘玉竹

(航空航天工业部 101 研究所)

刘汉俊

(中国科学院高能物理研究所)

编译

徐 烈

(上海交通大学)

审校

上海交通大学出版社

(沪)新登字205号

内 容 简 介

全书共十六章。1~4章主要介绍低温工程的理论基础;5~15章介绍低温循环的热力学分析、低温的产生、低温的测量、低温材料的性质、低温设备的结构与设计、制冷剂的安全使用等;16章阐述了超低温的产生方法。

本书附有大量的工程设计、低温实验和科学研究所必需的图表、数据,是一部实用性很强的必备参考书。可供从事低温工程、低温物理、超导技术、冶金和化工等领域的科技工作者和大专院校有关专业的师生参考。

低温工程学基础

出版:上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发行:新华书店上海发行所

印刷:上海市崇文印刷厂

开本:787×1092(毫米)1/16

印张:23

字数:569000

版次:1991年9月 第一版

印次:1991年10月 第一次

印数:1—1200

科目:248-320

ISBN7-313-00841-4/TB·1

定价:25元

前 言

1908年首次制得液氮后,1913年又发现了水银的超导现象。从此,人类向超低温世界迈出了可喜的第一步。在二十世纪六十年代以后,超低温技术已成为近代物理学的重大支柱之一,低温工程已发展成为能左右人类未来的一种重要的应用技术。随着超导技术的应用,低温工程也实现了史无前例的划时代的技术革新。从核聚变、磁悬浮列车和超导旋转机械等大型设备,到利用约瑟夫逊结的低温电子学,低温工程和超导技术都在以日新月异的步伐向更大的深度和广度进军。

新中国成立后,我国的低温技术得到了很大发展,但与世界先进国家相比,仍有一定差距。为了学习国外的先进技术,促进我国低温技术的发展,我们编译了这本《低温工程学基础》。

本书是在日文版《低温工程手册》的基础上经过增删编译而成的。本书从低温工程基础理论的简要阐述开始,逐步过渡到高深技术的具体说明,内容丰富。凡低温技术的成果,均有详细记述。本书还收录了大量设计和研究所必需的图表、数据,是一部实用性很强的工具书。

参加本书编译工作的有航空航天部101所的吴世功(1~4章)、张善森(11、12、14章)、刘宝林(13、15章)、中科院高能所的刘汉俊(5~10、16及附录)、朱成钧。本书的审校工作由上海交通大学的徐烈等同志完成。全书整理、加工、修改由吴世功及刘汉俊完成。

在本书的编译过程中还得到华中理工大学郭方中教授和西安交通大学钱鸿章教授的帮助与指导,他们在百忙之中也审改了本书稿。另外,特别要说明的是在本书的整个出版过程中得到航空航天部101所和上海交通大学有关领导的大力支持,在此,我们对他们的帮助与指导表示衷心感谢。由于水平所限,书中定有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

编译校者 1991.4

目 录

第一章 低温工程的发展史及应用领域	(1)
1.1 低温工程的发展史	(1)
1.2 低温工程的应用领域	(3)
1.3 学术用语	(5)
第二章 热力学基础	(7)
2.1 前言	(7)
2.2 基本定律	(7)
2.3 制冷原理	(8)
2.4 不可逆过程	(11)
2.5 物性参数	(14)
第三章 制冷剂的性质	(18)
3.1 前言	(18)
3.2 力学性质	(18)
3.3 热学性质	(26)
3.4 传输现象	(34)
3.5 电学性质	(36)
3.6 超流动氮	(38)
第四章 氮资源及其提取技术	(45)
4.1 作为制冷剂的氮	(45)
4.2 氮的贮藏量	(45)
4.3 氮的消费量	(47)
4.4 氮的生产成本	(48)
4.5 氮的提取方法	(50)
4.6 氮气提取装置的实例	(51)
4.7 ^3He	(59)
第五章 低温装置的热力学——焓分析	(61)
5.1 产生低温的各种方法	(62)
5.2 涡流管	(79)
5.3 产生损失的原因	(81)

第六章 产生低温的装置实例	(85)
6.1 液化器和制冷装置的技术指标	(85)
6.2 氮液化器的应用实例	(88)
6.3 往复运动机械与涡轮机械	(89)
6.4 压缩机	(90)
6.5 膨胀机	(94)
6.6 氮液化器的实例	(97)
6.7 1.8K、300W 制冷机	(100)
6.8 柯林斯型氮液化器	(102)
6.9 多级斯特林气体制冷机	(103)
6.10 G-M 制冷机	(105)
6.11 小型制冷机	(107)
第七章 低温的温度测量	(109)
7.1 前言	(109)
7.2 温度测量的条件与测量系统	(109)
7.3 热力学温标	(111)
7.4 1968年国际实用温标 (IPTS-68)	(117)
7.5 电阻温度计	(122)
7.6 用热电偶进行温度测量	(125)
7.7 测量低温温度的其它方法	(127)
7.8 射线和磁场对温度传感器的影响	(129)
7.9 低温温度计的标定	(131)
7.10 热接触	(132)
第八章 低温下的材料性质	(134)
8.1 前言	(134)
8.2 热学性质	(134)
8.3 机械性质	(141)
第九章 低温流体的热传递	(145)
9.1 基本概念	(145)
9.2 单相流动传热	(147)
9.3 沸腾传热	(150)
9.4 强迫两相流传热	(157)
9.5 几个例题	(162)
9.6 符号的说明	(166)

第十章 绝热技术	(167)
10.1 热阻的定义	(167)
10.2 传热机理	(168)
10.3 绝热方法	(168)
10.4 使用蒸发气体的绝热方法	(181)
第十一章 低温恒温器的设计和制造	(184)
11.1 解决问题的工作程序	(185)
11.2 低温恒温器的构造举例	(185)
11.3 构成低温恒温器的各种零部件	(191)
11.4 应用举例	(202)
第十二章 各种低温恒温器	(208)
12.1 贮液式低温恒温器	(208)
12.2 连续流动式低温恒温器	(214)
12.3 带制冷机的低温恒温器	(219)
第十三章 使用液化气体的安全措施	(221)
13.1 低温液化气体的性质及其作用	(221)
13.2 安全措施	(222)
13.3 共同性的安全事项	(230)
第十四章 真空技术与低温技术	(231)
14.1 热力学的气体理论	(231)
14.2 真空技术的概念	(237)
14.3 使用电离真空计的真空度测量	(243)
14.4 输运现象	(244)
14.5 真空系统中表面的影响	(245)
14.6 小结	(248)
第十五章 低温泵	(249)
15.1 各种气体的蒸气压与温度的关系	(249)
15.2 低温泵的特性	(250)
15.3 低温泵的设计	(258)
15.4 小结	(262)
第十六章 超低温的获得	(263)
16.1 液体 ^3He 的抽空减压	(263)

16.2	^3He — ^4He 稀释制冷机	(268)
16.3	玻曼朗契克冷却	(279)
16.4	绝热去磁	(281)
16.5	超低温的温度测量	(292)
16.6	分级式换热器	(298)
附录 低温工程学数据集		(302)
目 录		(302)
低温工程学学术用语表		(304)
图表·数据		(307)

第一章 低温工程的发展史及应用领域

众所周知,“Kryo”这个词来源于希腊语的 Kryos(寒冷的意思)。因此,“低温工程”(Kryo—technik)一般是指与低温有关的工程。但是,这里我们特别规定,只把与120K以下的温度有关的工程才称为“低温工程”。

1.1 低温工程的发展史

低温工程的基础可以追溯到热力学成为一门独立科学体系的时期。曾经有许多物理学者研究过热力学,人们初期的兴趣是探索气体的性质,尤其是对气体的液化感兴趣。时至今日,液化气体的性质已经非常清楚了,人们的研究兴趣已转移到了下述问题的探讨上,即液化气体作为冷媒用时,为了最大限度地有效利用这些液化气体,应该如何选定最佳条件。

亚里士多德(Aristoteles, 公元前384~322)曾提出过这样一个问题:“能把空气变成水吗?”其后大约过了两千年,在1790年才第一次弄清了空气和水的化学成分。

第一个用热力学观点研究制冷问题的人是罗伯特·玻义耳(Robert Boyle, 1627~1691),他以建立玻义耳—马略特气体定律而闻名于世。

以科学测定热量的创始人而著称的布莱克(Joseph Black, 1728~1799)在1764年提出了汽化潜热的概念,他还指出,空气是气态物质,如果把空气冷却到相当低的温度,它将发生液化,再进一步冷却还能固化。

1789年,克劳特(Louis Clouet)和蒙格(Gasper Monge)成功地液化了 SO_2 。1787年,范·马鲁姆(Van Marum)液化了氨。1802年,多尔顿(John Dalton, 1766~1844)对气体液化所必需的工作条件首先发表了明确的观点,他认为:“一切气体都可以变成液体状态,这几乎是毫无疑问的,不能液化的理由是根本不存在的。也就是说,纯气体在低温、高压下一定会变成液体”。

法拉第(Michael Faraday, 1791~1867)曾获得了40个大气压的压力和163K的温度,他利用乙醚和二氧化碳作冷媒,液化了 CO_2 、 H_2S 、 SO_2 、 NO_2 、 C_2H_2 、 NH_3 和 HCl 。但是, O_2 、 N_2 、 CH_4 、 CO 、 NO 、 H_2 以及当时才刚刚发现的稀有气体还不能液化,这一组气体当时被叫做“永久性气体”。

医生安德鲁(Thomas Andrew, 1813~1905)在 CO_2 的实验中证实了临界点的存在,并且发现在高于临界温度时,单纯用加压的方法不能把气体液化。

由于制冷机的出现,第一次打开了气体液化的突破口。最初的制冷机是根据级联式蒸发器的原理制造的,这种方式分许多级,由一个接一个的蒸发器串联而成,某一级蒸发器对相邻的下一级起冷却器的作用。奥利雪夫斯基(Karol Olszewski, 1846~1915)和伏洛布列夫斯基(Siegmund von Wroblewski, 1848~1888)用这种方法成功地液化了 CH_4 、 CO 、空气和 N_2 ,他们得到了48K的低温。

1885年，林德（Carl von Linde, 1842~1934）首先成功地实现了工业规模的空气液化。他所用的流程示于图 1.1。林德采用逆流式热交换器和焦耳-汤姆逊节流的方法，尽管这种方法后来有种种不同的改型，但至今还在使用。

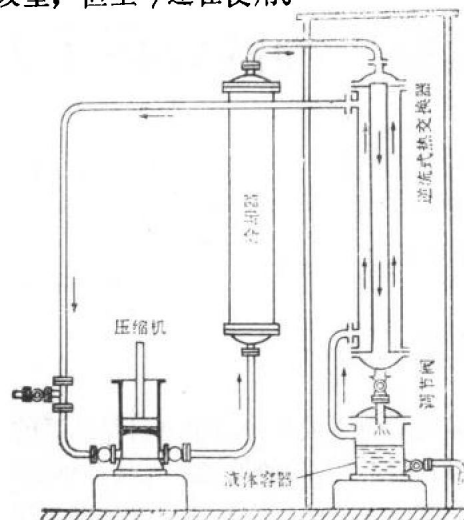


图 1.1 最初的林德空气液化器流程图

氢的液化是由杜瓦（James Dewar, 1842~1923）实现的。他为了把氢气预冷到68K，使用了减压的液态空气，这液态空气是用林德装置制备的。杜瓦在进行冷却和处理液化气体时，还充分地认识了真空绝热所起的决定性作用，于是他发明了真空绝热容器。这种容器电镀得闪闪发光，用以减少热辐射；为提高真空度，他还使用了吸附剂。图 1.2 是杜瓦研制的真空绝热容器，这种杜瓦瓶是最终演变的形状，至今还在使用着。

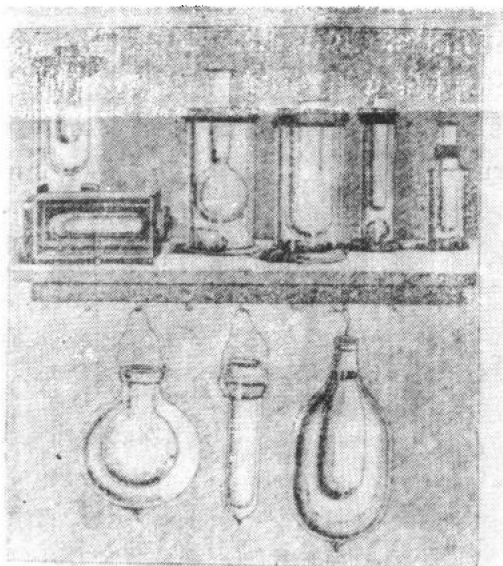


图 1.2 杜瓦研制的真空绝热容器

1908年10月7日，卡莫凌·昂尼斯（Kamerlingh Ohnes）在莱登第一次成功地液化了氦。在氦的液化过程中，为预冷而使用了减压的液氢。另外，液化仍然采用了林德的原理，而且还用高真空作为各种不同制冷剂之间的绝热。

氦液化的重大成功，是人类向另一个崭新世界迈出的极为重要的第一步。之所以这样说，

是因为许多物理上的新效应在液氮的温度下才第一次被观测到之故。但是，在液化刚刚实现的当时，其重要性并未得到足够的认识。

其后大约过了十年才向前迈出了决定性的一步，随后便加快了发展速度。

针对氮温度（5.2K~1K）的广泛应用，卡皮查（Pjotr Kapitza, 1894~）研制了能连续运转的氮液化器，取得了决定性的进展。这台液化器采用绝热膨胀预冷，以及焦耳-汤姆逊节流。由于采用了气体轴承的往复式膨胀机，所以就不用液氢预冷了。但是，操作这套装置必须具有高度熟练的技术，当时，一般人是不能掌握的。

对于低温技术的发展，西蒙（Francis Simon, 1893~1958）提出：极简单的，且能间断生产数升液氮的设备是极其有用的。他把小型泵中的高压氮气用液氢预冷到12K，在一次完全的节流过程中，就能液化其中的大部分氮气。因为这种方法在许多研究室都能直接利用，所以在短期之内就成功地发现了低温领域的许多重要的物理现象，这些发现唤起了人们对这个研究领域的兴趣，成为低温工程发展的重要动力。

柯林斯（Samuel Collins, 1898~）和迈斯纳（Walter Meissner, 1882~）两人致力于改进能连续运转的氮液化器。在1950年以后，改进的氮液化器出现在市场上。至1977年为止，世界上已有500台以上的氮液化器在运转，这个数字以后不断增加。在这期间，液化器达到了相当高的技术水平。现在的液化器几乎都能以非常高的液化效率完全自动地长时间连续运转。因此，几乎在一切大的物理研究所都能用液氮做实验了。

除上述制冷方法外，最近二十年以来，新的制冷方式不断出现。其中有菲利普公司的科勒（Willem Köhler）和普拉斯特（Gijsbert Prast）改进的斯特林制冷机以及牛津的西克斯米思（H. Sixsmith）发展的透平膨胀机。这些制冷方式将在另外章节中详细讨论。此外，美国的吉福特（Gifford）和麦克马洪（McMahon）对回热制冷循环的发展也做出了很大贡献，使长时间连续运转的微型制冷机变成现实。以上叙述了产生低温的划时代的发展概况。关于低温技术的进步和发展的详情，已编入K·门德尔森著的《向绝对零度进军》一书。

1.2 低温工程的应用领域

在此简要地叙述一下低温工程的应用领域。从古至今最广泛的低温应用领域是利用各式各样的气体分离法生产工业气体。随着工业气体消耗量的急剧增加，以液化气体的状态进行贮存和运输，已成为发展的必然趋势。这样做无论从容积还是从容器重量来看，都有显著的节约效果。与此直接相关的技术都得到了迅速的进步和发展，例如低温液体的输送和贮存等。需要量正在急剧增加的液化天然气（LNG）也存在着同样的实际问题。

因液氢有爆炸危险性，所以长期以来占有特殊的地位。随着氮液化器效率的提高，液氢在产生极低温这一基本用途上的重要性将逐渐降低。但是，在其它方面还有氢的特殊的研究课题，例如，在进行原子核和基本粒子实验的泡室和靶中，液氢的大量使用是不可缺少的。

用于上述实验及作为火箭燃料的氢，进一步大规模地使用，将带来特种技术的高度发展。顺便讲一下与此有关的氢浆问题，它是氢的液体和固体的混合物，使用氢浆可以减少蒸发损失。如上所述，液氢在其它工业部门还能作为能量的载体而具有特殊的意义。在这方面，氢发动机燃烧室的进展尤其引人注目。氢作为燃料用，优点在于其燃烧产物不会造成公害。

电气工程领域也在期待着通过低温工程来实现重大的技术革命，其中包括超导在各种工程中的应用。利用超导线圈产生强磁场已经达到较高的开发阶段。现在，人们对于使用超导线圈的电力机械及变压器的发展特别感兴趣，日本等国家正在进行高速磁悬浮列车的开发。再就是向人口密集的大城市输送电力，超导电缆的使用恐怕也是必不可少的。

[illegible]

• 4 •

在许多方面都得到了广泛的应用。

比较新的低温应用领域是生物学和医学。在生物学的研究中,为了尽量保持细胞的某种状态不变而利用了低温技术。低温外科的方法在许多医学领域取得成功是肯定无疑的。特别在眼科和泌尿科,不久前使用了低温冷刀。可变温度的低温解剖刀,最近的发展特别令人鼓舞。

为了直观地表示上述低温的各种应用,这里以“低温工程树”的形式示于图1.3。该图出于日本人之手,具有许多大小树枝的树干表示低温工程的应用领域和研究领域,树根相当于低温工程的基础。

为了有效地促进低温工程的发展,需要积极开展基础科学和工程技术之间的交流,以及各种应用领域和研究领域之间的交流。现今,在低温工程领域急速发展的过程中,依靠适当机构的协助,上述各种必不可少的交流才能成为现实。进一步把这些机构建立起来,可以说是当务之急。从以前的经验可知,通过成为研究中心的低温研究机构(大学、研究所等)的组织,能大大促进低温工程的发展。为了有效地开展工作,这样的中心组织至少必须具有一定的规模并经常处于领先的工业技术。

现将上述这种“低温中心”的任务叙述如下:

必须承担液化气体的准备(液化、购买、贮存等)和向所属各研究机构提供液化气体。这样供应制冷剂比较经济。除液化装置的经营和维修管理以外,还必须要兼管其它各种技术设备(回收、纯化装置、泵、检漏仪、各种测试仪表等)。研究、试验人员所需的工作材料和零件必须集中保管(诸如特殊气体、特殊金属、焊接器具、法兰盘、真空管、配管、热电偶、测试仪器、阀门、备用零件等)。这样既经济又能保证经营顺利。

“低温中心”的另一项职责就是对研究者的指导和帮助。其它领域的研究人员可把他们自己的研究课题带到“低温中心”和低温工程、低温物理专家认真讨论,并一起工作。这样,非本专业人员就能很容易地掌握低温实验技术。从另一方面来看,这样做可以使“中心”原有的经验和开发技术获得更广泛的应用,还能经受实际检验,所以对“低温中心”也是有益的。

“低温中心”本身的实质性研究领域包括新的冷却装置的开发,以及开发所必需的基础理论研究(冷却方式的特性、工质的特性、传热、导热、气体的冷凝、超导等)。此外,温度测量和温度控制方面的研究开发也不可忽视。

另外,各“低温中心”之间必须努力进行广泛的协作。

在工程领域,随着低温应用的不断扩大,为适应这一发展形势,成立了一系列国内和国际的组织,它们在为低温工程和低温物理的发展而积极发挥作用。

1.3 学术用语

当某个研究领域正在迅速发展之际,由于发展的需要,引进新的概念是必要的,但有时也给彼此间的交流带来困难。在低温工程领域,N.库尔特(N.Kurti)在好多年之前就同许多国家的专家协作,致力于学术用语的统一工作。其中包括对各种术语的定义和适用范围作了介绍,同时出版了英语和法语的对照表。西德物理学会的低温技术组经过一番努力,确定了相应的德语名称。法国低温工程协会出版发行的《国际制冷词典》对此也做了积极响应。

低温工程的术语对照表（英、日、中）收在本书的附录中。

这里我们规定，将

120K~80K 叫做 LNG 温度（液化天然气温度）

80K~63K 叫做 N_2 温度（氮温度）

22K~14K 叫做 H_2 温度（氢温度）

5.2K~1K 叫做 4He 温度（氦-4温度）

1K~0.3K 叫做 3He 温度（氦-3温度）

1K以下的温度变得越来越重要了，我们将这一温区称为“超低温”（ULT）*

为了便于学术交流以及沟通彼此之间的思想，我们应尽可能使用推荐的术语，尽量不要个人创造词汇。

* ULT系Ultra Low Temperature的缩写。美国NBS的研究人员建议将0.3K以下的温区称为超低温。

第二章 热力学基础

2.1 前 言

这里的讲述，只限于对已经了解的各种基础理论提出两、三个要点。

首先介绍热力学的几个基本定律。在进行大量计算时，这些定律通用的形式给出了计算所依据的最重要的基准；其次介绍可逆和不可逆的制冷原理；最后叙述单一物质系统的特性及其计算和表达的方法。

一般来说，本章使用的状态函数，只适用于平衡系统。但是，对于在压缩机和膨胀机中发生的状态变化也适用。其理由是，压缩机和膨胀机中的状态在所考虑系统的弛豫时间内，变化是十分缓慢的。

2.2 基本定律

第零定律

如果两个物体分别和第三个物体处于热平衡，则这两个物体之间也处于热平衡状态。

这种表述一般从我们的直接感觉就能得到证实。由这条定律可以清楚地理解热平衡的含义，使原来只凭感觉承认的“温度”这一概念，变成了一个具有一定意义的物理量。

第一定律

关于第一定律，有下面几种表述方法。

“将处于绝热状态的系统，由状态 1 可逆地变化到状态 2 所需要的功 L_{12} （正或负）与变化的途径无关。”

或者

“在各系统中，都存在一个由其状态确定的状态函数 U （内能），在绝热可逆的状态变化中，内能的增加等于对该系统所做的功 L ，即

$$U_2 - U_1 = L_{12}”$$

或者

$$“Q_{12} = (U_2 - U_1) - L_{12}” \quad (2.1)$$

第一种表述是从能量守恒定律导出的，或者说是从第一类永动机 * 不可能实现导出的。第二种表述提出了内能这一状态参数，同时阐明内能的变化是能够测量的。第三种表述可以看成是热量 Q 的定义。热和功一样，都是能量转移的一种形态。但是，即使知道了内能的变化量，也不会完全清楚它究竟是由于热量的转移引起的，还是由于做功所引起的。

第二定律

* 第一类永动机是一种假想的循环装置，在这种循环中它只对外界做功，而不使外界产生任何变化。

在系统中有一个叫做熵 S 的状态参数, 通过可逆地加入的热量 dQ_{rev} 可以写成:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (2.2)$$

对于实际的孤立系统, 由于在变化中必然有不可逆过程, 所以其变化方向只限于系统熵增加的方向。

第二定律的前半部分定义了状态参数熵, 并给出了测定熵的方法。这也可以说, 温度又增添了新的含义, 并且给出了确定热力学绝对温度的方法。第二定律的后半部分是从下列经验事实得出的推论, 而不是直接观察的结论。这些事实是: 在我们周围的环境中状态变化只沿确定方向进行; 在孤立系统中可以阻止向某方向的变化; 第二类永动机*是不可能实现的; 等等。对低温技术人员而言, 第二定律非常重要, 它表明在孤立的系统中, 不能自然而然地获得低温, 只有消耗外功才能达到降低温度的目的。即使看来是自然地获得低温, 那也是由于系统的熵减少而实现的。

第三定律

普朗克 (Planck) 的表述: “对任何系统, 当 $T \rightarrow 0$ 时, 必有 $S \rightarrow 0$ ”。

能斯特 (Nernst) 的表述: “在任何系统的等温变化过程中, 当 $T \rightarrow 0$ 时, 必有 $\Delta S \rightarrow 0$ ”。

能斯特的比较狭义的表述, 是对许多物理化学实验观察而得出的结论。

包括普朗克在内的上述表述方式, 对统计力学和自由能 g^{**} 的绝对值计算具有重要意义。从这条定律可以推导出: 随着绝对温度 $T \rightarrow 0$, 比热、热膨胀系数, 及其它的热力学状态参数的一阶偏微分也趋于零。

从这条定律还可以导出: 虽然由 mK 到 μ K 可以无限地接近绝对零度, 但是不能达到绝对零度。这是一个重要的原理。

最后介绍有关热力学中普遍使用的方法。热力学的理论是在对压力、体积、温度或它们的复合量等一系列宏观量之间的关系进行了大量测量分析及归纳的基础上建立起来的。统计力学是使用力学或量子力学的原理对每个粒子进行解析, 从而导出包含大多数粒子的整个系统的宏观关系, 将它与观测结果相比较, 可以使它与类似的量相对应。而集实验研究者和理论研究者的所有有用的形式逻辑之大成, 从两、三个前提出发, 公理性地建立起来的热力学理论也是很成功的。

2.3 制冷原理

2.3.1 问题的提出

试考虑从低温 T_0 的系统吸取热量 Q_0 这一过程。

* 第二类永动机是一种假想的循环热机, 在这种循环中它从单一热源吸收热量, 把热变成功, 而不使外界产生任何变化。

** 这里自由能是指吉布斯 (Gibbs) 自由能, 是确定热平衡条件的一个重要热力学状态参数。自由能可用下式表示:

$$g = u + pv - Ts$$

式中 g 、 u 、 v 、和 s 分别表示工质的比自由能、比内能、比体积和比熵。

由热力学第二定律可知,若不消耗能量,这个过程便无法进行。要进行这一过程,一种方法是采用循环做功 L , 从低温 T_0 的系统吸取热量 Q_0 , 向温度为 T_u 的室温环境释放出热量 Q_u 。

对于制冷机的一个循环,由第一定律得

$$\oint dU = 0$$

所以

$$\oint dL = - \oint dQ$$

也就是

$$|L| = |Q_u| + |Q_0| \quad (2.3)$$

2.3.2 制冷的最小功

为了计算最小功,必须假定全部过程都是可逆的。作为制冷循环,如果考虑进行两个等温变化和两个等熵变化的情况(卡诺循环),则由第一定律可知

$$|L| = |Q_u| - |Q_0|$$

又由第二定律可知

$$\frac{|Q_0|}{T_0} = \frac{|Q_u|}{T_u} = \Delta S \quad (2.4)$$

一般将利用的量和消耗的量之比叫做效率 ϵ , 在制冷的情况下,

利用的量 = 在低温部分吸收的热量

$$= Q_0$$

消耗量 = 为驱动制冷机而供给的能量

$$= L$$

$$\therefore \epsilon_{KM} = \frac{|Q_u|}{|L|} \quad (2.5)$$

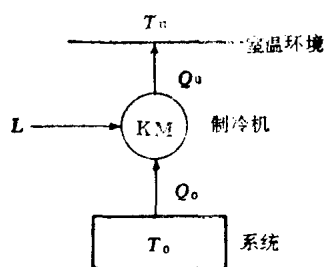


图 2.1 制冷的机理

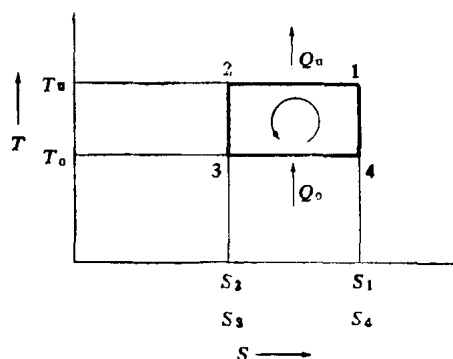


图 2.2 卡诺循环

在两个等温过程中, $Q_u = T_u (S_2 - S_1) < 0$,

$Q_0 = T_0 (S_4 - S_3) > 0$ 。其中 $S_1 - S_2 = S_4 - S_3 = \Delta S$ 。

在两个等熵过程中, $S_3 - S_2 = 0$, $S_1 - S_4 = 0$ 。

在可逆制冷机中,