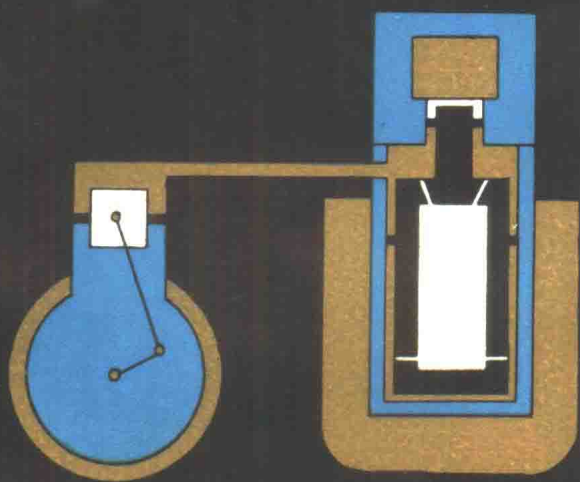


# 低温技术与应用



舒泉声 等 编著

科学出版社



# 低温技术与应用

舒永声等编著

科学出版社

1983

## 内 容 简 介

本书重点介绍低温技术的最新发展和应用。它以液氮温度以下和微型制冷为重点,系统地介绍了氮液化技术、超低温(1 K 以下)技术和各种微型制冷机。本书介绍了低温膨胀机和低温换热器的研究发展情况,讨论了近代绝热方法的改进和典型的液化气体贮运和输送设备,还介绍了低温技术在电子学、空间科学、天然气液化、生命科学和超导电科学中的应用。

本书可供从事低温工程、低温物理、石油化工、电工、电子学、超导电技术、空间科学及生命科学等方面的科技人员和高等院校有关专业师生参考。

## 低 温 技 术 与 应 用

舒泉声等 编著

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年2月第一版 开本: 787×1092 1/32

1983年2月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 0001—4,600 字数: 309,000

统一书号: 15031·470

本社书号: 2944·15—10

定 价: 2.10 元

## 前 言

近十年来,低温技术及其应用有了迅速发展,目前已深入到低温工程、石油化工、高能物理、电力工业、精密仪表、计算技术、超导电技术及医疗器械等各个领域。

低温的应用有力地推动了低温技术的发展,从大型加速器超导磁体用的4900升/时氦液化器到深受实验室欢迎的小型全自动各类氦液化器;从总长60米的大型换热器,到 $\text{He}^3$ - $\text{He}^4$ 稀释制冷机用的烧结铜粉换热器;从每分钟70万转的气体轴承透平膨胀机到仅仅利用宇航废热就能制冷的微型制冷机;从容量数千立方米的液氢贮槽到能够防止微小漏热和广播电台辐射的高超绝热技术;从大型天然气液化装置到向绝对零度进军的核去磁技术,都已得到日新月异的发展。

本书重点介绍低温技术的各项最新发展和应用,以液氮温度以下和微型制冷为重点,简明系统地介绍氦液化技术、超低温(1K以下)技术和各种微型制冷机;讲述低温制冷循环的关键部件(膨胀机和换热器)的研究发展情况;讨论了低温绝热的重要性,近代绝热方法的改进和一些典型的液化气体的贮运输送设备;最后扼要地介绍低温技术在电子学、空间科学、天然气液化、生命科学和超导电技术中的应用。至于液氮温度的另一些问题,读者可参阅国内已经出版的有关制冷机和深度冷冻方面的书籍。

本书的目的是使读者对低温技术的基本情况和新进展有一个总的概念,所选内容是希望每一个低温工作者都应该有所了解的。为了便于更广大读者阅读,我们尽可能地不用数

学推导。

本书第一、三、四、十三、十四章由浙江大学舒泉声执笔，第二章由浙江大学盛敏君执笔，第五、六章由中国科学院上海技术物理研究所杨春江、王维扬和西安交通大学陈纯正执笔，第七章由西安交通大学王启杰、万威武、袁秀伶执笔，第八章由中国科学院上海技术物理研究所庞世杰执笔，第九章由中国科学院安徽光学精密机械研究所徐绍绩执笔，第十、十一章由周赞熙执笔，第十二章由浙江大学李式谟执笔。最后由舒泉声进行了必要的增删和修改，盛敏君负责整理和抄写。

本书编著过程中，中国科学院学部委员、物理研究所洪朝生教授对前三章提出了宝贵的修改意见，学部委员管惟炎教授对部分应用章节提供了修改意见，曾泽培先生对1K以下制冷提供了指导。同时，中国科学院物理研究所赵忠贤、钱永加、王听元，浙江大学陈国邦、林理和，中国科技大学曹烈兆、张其瑞，上海科技大学盛灵惠，中国科学院情报研究所王绍言均提供了资料和帮助。在定稿过程中，浙江大学陈运铤教授、马元骥教授也给予了许多鼓励和指导，谨在此表示衷心感谢。

由于本书涉及的领域十分广阔，我们的水平有限，书中定会有不少欠妥和错误之处，欢迎读者予以批评指正。

舒 泉 声

于杭州求是村

# 目 录

前言 .....	i
第一章 低温热力学基本概念 .....	1
一、温度和内能 .....	1
二、过程量: 功和热量 .....	2
三、态函数: 广义力与广义位移 .....	3
四、焓与熵 .....	5
五、热力学基本定理 .....	7
六、制冷系数和卡诺比 .....	8
七、热力学函数 .....	11
八、相变 .....	13
九、非理想气体 .....	14
第二章 低温的获得 .....	19
一、降低温度的方法 .....	20
二、气体制冷循环 .....	35
三、氧、氮和氢的液化 .....	53
第三章 氮液化技术 .....	59
一、氮液化的理论分析 .....	60
二、简单的单膨胀机型氮液化器 .....	72
三、有大量杂气也能连续运转的氮液化器 .....	73
四、三类先进的中小型氮液化器 .....	78
五、介绍三个典型的大型氮液化器 .....	89
六、1.8 K HeII 液化器(制冷机) .....	95
七、两项有希望的液氮温度制冷技术 .....	98
第四章 超低温技术 .....	103
一、 $\text{He}^3$ 恒温器 .....	104

二、稀释制冷机 .....	108
三、泡墨朗切克制冷机 .....	118
四、顺磁盐绝热去磁冷却 .....	124
五、核去磁冷却 .....	130
六、实验技术中几个特殊问题 .....	136
<b>第五章 微型制冷机</b> .....	<b>145</b>
一、贮液式制冷器 .....	145
二、固体制冷器 .....	149
三、气体节流式制冷器 .....	152
四、机械式气体制冷机 .....	155
五、辐射制冷器 .....	173
六、热电制冷器 .....	176
<b>第六章 低温膨胀机</b> .....	<b>181</b>
一、活塞式膨胀机 .....	181
二、透平膨胀机 .....	199
<b>第七章 低温传热和换热器</b> .....	<b>216</b>
一、低温传热的某些特点 .....	217
二、低温换热器 .....	233
<b>第八章 低温绝热技术基础</b> .....	<b>255</b>
一、绝热技术和材料的发展 .....	255
二、多层绝热 .....	261
三、真空空心玻璃微球绝热 .....	270
四、低温绝热中的漏热计算 .....	273
<b>第九章 液化气体的贮运和输送</b> .....	<b>280</b>
一、液化气体贮运设备概述 .....	280
二、小型贮存容器 .....	288
三、大型固定式贮槽 .....	295
四、高压液化气体贮槽 .....	302
五、运输式贮槽 .....	306
六、输液和输液管道 .....	311

第十章	低温在电子学装置中的应用	325
一、	红外探测器	326
二、	量子放大器	333
三、	参量放大器	338
四、	激光器	339
五、	电子学装置与制冷装置的热耦合	343
第十一章	低温技术在空间科学中的应用	346
一、	火箭发动机的简单原理	347
二、	氢氧火箭发动机	348
三、	核动力火箭	351
四、	太阳能火箭	353
五、	空间环境的地面模拟	354
第十二章	低温技术在 LNG 中的应用	358
一、	天然气的液化	358
二、	LNG 气化及其冷量的利用	368
三、	LNG 的贮运	372
第十三章	低温与生命科学	381
一、	低温治疗与免疫的原理	381
二、	-100°C 以上的冷冻治疗机	384
三、	-100°C 以下的冷冻治疗机	385
四、	生物的深低温贮存	389
五、	治疗癌肿的低温超导装置	392
第十四章	低温超导的应用	396
一、	低温下发现的超导材料	296
二、	低温超导的大型应用	401
三、	低温超导与电子仪表和精密测量	410
四、	低温超导与高速交通系统	416
五、	超导输电和贮能	418
	主要参考文献	422



## 第一章 低温热力学基本概念

目前低温工作者最常用的制冷剂，仍然是液化气体。任何制冷过程都是有序度增加(或熵减少)的过程，也可以认为一部制冷机就是一台熵排出器。因此，有必要先介绍一下热力学基本原理。热力学基本定理可以通过不同方法叙述，我们这里采用比较通俗的经典说法。为了简明起见，我们略去了“热力学状态”、“热孤立”……等等一系列概念的定义和其它一些与低温获得不是密切相关的内容，只扼要地介绍与低温获得直接有关的几个热力学原理。同时，针对在超低温下制冷新方法的特点，介绍一部分在普通工程热力学中通常不讨论的热力学概念。当然，这些叙述是相当简略的，只是为了帮助读者理解本书内容而进行的简单回顾。

### 一、温度和内能

我们知道，假如两个系统都与第三个系统处于热平衡，则这两个系统彼此之间也是处于热平衡。这是一个简单的公理，也就是所谓的热力学第零定理。由此可见，系统之间相互热平衡时，系统的热力学状态中必然有一个参数是相等的，这个参数称之为温度，它是系统热力学状态的单值函数。所以，温度是描述一个系统冷热程度的参数。

根据温度的这一定义，我们可以选取任何一个系统作为温度计，而且可以选取任何一种确定温度数值的规律——温标。这样确定的温度( $t$ )称为“经验温度”。

既然认为温度表示物质内部热运动的强度，故当物质内部热运动完全停止时所显示的温度就叫做绝对零度，自绝对零度算起的温度就叫绝对温度。在热力学基本公式中常采用绝对温度，以  $T$  表示。它与常用的摄氏温标的关系如下：

$$T = t + 273.15 \text{ K}. \quad (1.1)$$

现在最常用的气体制冷剂是液氮、液氢和液氦。这三种气体正常沸点附近的温区就分别称为液氮温度 (77K 附近)、液氢温度 (20K 附近)、液氦温度 (1—5K)，1K\* 以下称为超低温。任何低温过程都与工质的能量转换密切相关。储存于工质中的能量有三种形式：(1) 工质重心移动而形成的外动能  $E_{\text{动}}$ ；(2) 工质重心的垂直位移而产生的外位能  $E_{\text{位}}$ ；(3) 由于分子、原子的运动和分子、原子相互作用而储于工质的分子和原子中的内能与内位能之和称为内能，以  $U$  表示。系统总能量为

$$E = E_{\text{动}} + E_{\text{位}} + U. \quad (1.2)$$

$E_{\text{动}}$  显著地存在于高速流动的工质中，例如在高速透平中，但在活塞式膨胀机的气缸和管道中有时可以略去。 $E_{\text{位}}$  在低温技术所讨论的过程中变化甚小，一般不列入方程。内能  $U$  在任何热过程中都表现出来，因此十分重要。内能  $U$  的数值完全由系统所处的状态所决定，与如何变化到这个状态的过程无关。

## 二、过程量：功和热量

功是能量转换的最基本形式之一。如果系统内能的改变是由于做功的结果，那末内能改变的数量就可以用功的数量来表示。热量是物体在热传递过程中能量改变量的量度。在热

\* 也有人定 0.3K 以下为超低温。

力学中，定义系统吸收的热量为系统总能量的增加减去外界对系统所做的功。所以，功和热量都是内能变化的量度。显然，对于某一个没有变化的系统来说，讨论它有多少“功”或多少“热量”是没有意义的，只能说这个系统的内能有多大，而功和热量是只在变化过程中才出现的量。它们不仅与过程的初态和终态有关，而且与变化到终态的过程和方式也有关系，这种量称之为过程量。

### 三、态函数：广义力与广义位移

任何制冷机的工作都离不开工质状态的改变，要想描述制冷机的工作情况，就应该首先明确如何描写工质的状态。工质状态及其变化是通过象内能  $U$ 、温度  $T$  这样的物理量来说明的。这些物理量是工质状态的单值函数，它与达到该状态的过程无关，叫做态函数。在气体制冷系统中经常用来描述状态的参数有压力  $P$ 、温度  $T$  和比容  $v$ ，它们是工质状态的基本参数。在描写状态变化时，这些参量之间的关系公式叫做状态方程。对于气体，一个与实际结果有很好近似的状态方程是范德瓦尔方程：

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = nRT, \quad (1.3)$$

其中  $P$  为气体的压力， $V$  为气体的容积， $R$  为普适气体常数 ( $R = 8.314$  焦耳/克分子·度或  $1.9859$  卡/克分子·度)， $T$  为气体的绝对温度， $n$  为气体的克分子数， $\frac{a}{V}$ ， $b$  分别为压力和容积修正项，通常由实验测定。

上式适合于任何统一的单位制，本书基本采用 SI 单位，并辅以常用的卡等。

对于理想气体  $a$ ， $b$  均等于零。

功是能量转移的最基本形式。众所周知,在最普通的机械作用下,力 $\times$ 位移=功。在气体制冷机中,压缩和膨胀时常见的机械功 $W$ ,就是在某一压力 $P$ 下工质容积的变化:

$$dW = PdV, \quad (1.4)$$

$$W = \int PdV.$$

在低温工程中讨论更为广泛的制冷问题时,需要把这些概念进一步发展。可以认为,体系在热动平衡情况下的性质,由体系所受的“机械”作用和它的温度 $T$ 所确定。在这些“机械”作用中最简单的就是容积 $V$ ,它表示外壳限制体系的作用。而在其它制冷方式中,电极化时的电场强度、磁极化时的磁场强度都是与容积 $V$ 有相同性质的参数。我们将这一类参数称为外参数,可用一组态变数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 来表示,它们的变化叫广义位移。同样,可以把与压强 $P$ 性质相类似的一系列参数用 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 表征出来,称之为广义力,这些参数是内含量。这时,当某一外参量 $x_i$ 发生变化时,必定伴之有施于体系的一个宏观功。当然,这时既可以是压缩气体做功,也可以是磁场做功,或者是电场做功。这个功可表示为

$$dW = y_i dx_i, \quad (1.5)$$

$$W = \int y_i dx_i.$$

表 1.1 常见系统中的广义力和广义位移

系 统	广 义 力		广 义 位 移	
	名 称	符 号	名 称	符 号
流体和固体	压 强	$P$ 达因/厘米 <sup>2</sup>	体 积	$dV$ 厘米 <sup>3</sup>
顺 磁 盐	磁场强度	$H$ 奥斯特	磁 矩	$dM$ 尔格/奥斯特
电 介 质	电场强度	$E$ 伏特/厘米	电极化强度	$dP$ 尔格·厘米/伏特
表面可变质	表面张力	$\sigma$ 达因/厘米, 尔格/厘米 <sup>2</sup>	表面积	$-dA$ 厘米 <sup>2</sup>
弹性物体	张 力	$\tau$ 达因	长 度	$-dL$ 厘米

为了读者理解方便，现将几个常见系统的广义力和广义位移列于表 1.1 中。

#### 四、焓 与 熵

在实际制冷循环中，常常要涉及到工质的流动。在分析流动过程(图 1.1)时，根据能量守恒定律可以证明，流体的能量除内能  $U$  以外，总有一项流动能  $PV$  代表使工质进入或离开系统所需的能量。 $U$  和  $PV$  都是由状态单值决定的，可以在统一单位下把它们相加起来，得到一个新的综合量，这就是焓。焓也是一种态函数，用符号  $H$  或比焓  $i$  表示：

$$H = U + APV, \quad (1.6)$$

式中  $A$  为热功当量， $\frac{1}{A} = 4.1855$  焦耳/卡。

在流体系质中  $H$  代表工质所携带的总能量流。在开口的流动系统中有

$$dQ = dH + AdW,$$

其中  $dQ$  为系统吸收的热量，而  $dW = -VdP$ 。所以，在压力不变的情况下，焓的变化就代表了系统吸收或放出的热量。这

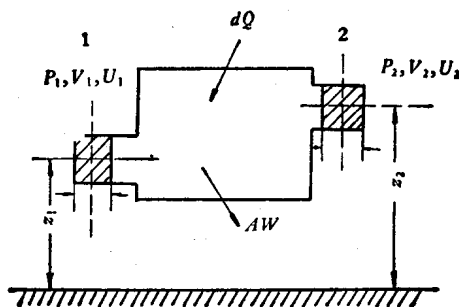


图 1.1 工质流动过程示意图

正是在低温换热器中常见到的情况。

对更广泛的制冷系统，焓可以写成更为通用的形式：

$$H = U + \sum x_i y_i, \quad (1.7)$$

式中  $x_i$  为广义位移， $y_i$  为广义力。

对热相互作用来说，状态参数温度  $T$  起着某种推动力的作用，它与压力在机械的相互作用中所起的作用相似。热相互作用是通过分子微观运动来实现的。熵  $S$  就是一个与分子热运动特性有关的状态参数，严格说来，它的意义应通过统计物理来说明。熵代表一个热平衡系统在一定的压力和温度下内部分子热运动的无序程度。为了更形象起见，可以认为，它的作用与容积  $V$  在机械作用中的作用相类似。它是准静态过程中有无热交换的标志。系统的温度不变并不等于没有热交换，例如等温过程。有温度变化也并不等于有热量交换，例如绝热过程。

考虑到热量的性质和功相当，工质在一定温度  $T$  下对外有热交换时，我们也可以把这一热交换在数量上用温度  $T$  和熵  $S$  的变化的乘积来表示：

$$\begin{aligned} dQ &= TdS, \\ Q &= \int TdS. \end{aligned} \quad (1.8)$$

在工程热力学里，可以严格证明熵  $S$  是一个新的热力学态函数。只要状态确定了，它的数值也就跟着被确定了。当工质由状态 1 变到状态 2 时，它的熵变化可以由积分求得：

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}. \quad (1.9)$$

积分上下限代表系统的初态和终态。在制冷工作中研究熵的绝对值是没有意义的，关键在于研究熵的变化。

## 五、热力学基本定理

人们在低温工程中改善热效率的一切努力，都必须服从热力学的客观规律。这些规律可以归纳为热力学第一定律和第二定律。很多热力学公式都可以从这些定律推导出来。

根据能量守恒和转换定律，能量的形式可以转换，而总能量保持不变。因此，在工质受热做功的过程里，工质由于受热而自外界得到的能量（热量），应该等于对外界做功所付出的能量与储存于工质内部的能量变化之和。这就是热力学第一定律的基本内容。对于简单的流体系统，上述内容的数学表示称之为“简单的能量方程”：

$$TdS = dU + APdV. \quad (1.10)$$

考虑到更为广泛的制冷系统，热力学第一定律可以写成更为广义的微分形式：

$$TdS = dU + \sum y_i dx_i. \quad (1.11)$$

例如，用顺磁盐在磁场中绝热去磁制取极低温时，磁介质为补偿磁滞损失，由电源做的功是

$$\begin{aligned} dW &= \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}, \\ TdS &= dU + \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

式中  $\mathbf{H}$  是磁场强度， $\mathbf{B}$  是磁感应强度。

热力学第二定律是在生产活动中为了进一步提高热机和制冷机的效率而提出的。第一定律指出了能量守恒定律在热工学中的应用，而第二定律则给出了提高热机和制冷机效率的方向和限度。第二定律可以用下述两种方法表达：

1. 不可能把热量从低温物体转移到高温物体而不产生其它影响；

2. 不可能从单一热源吸取热量使之完全变为有用功而

不产生其它影响。

热力学第一定律的数学表达式为

$$S_b - S_a \geq \int_a^b \frac{dQ}{T}. \quad (1.13)$$

在可逆过程中上式为等号, 在不可逆过程中上式为不等号。

根据热力学第二定律可以直接推出卡诺定理: (1) 在同样的高温热源  $T_1$  和低温热源  $T_2$  之间工作的一切可逆制冷机的制冷系数都相等; (2) 在同样的高温热源  $T_1$  和低温热源  $T_2$  之间工作的制冷机以可逆制冷机的制冷系数最大。

最后, 介绍一下热力学第三定律: 用任何方法, 无论这种方法如何理想, 都不可能以有限次的操作将任何系统的温度降低到绝对零度。

## 六、制冷系数和卡诺比

在低温工程中, 常用制冷系数  $\varepsilon$  来表示一个制冷循环的热效率, 如图 1.2 所示。制冷系数为工质从低温源取出的热量与外界对工质所做功之比:

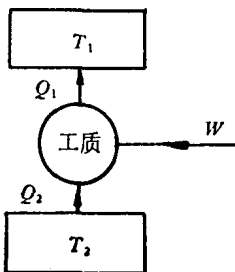


图 1.2 制冷过程示意图

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{AW} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}, \quad (1.14)$$

式中  $Q_2$  为从低温源取出的热量, 即循环的制冷量;  $Q_1$  为工质在一个循环中释放给高温源的热量;  $AW$  为外界对工质所做的功。

从卡诺定理我们知道, 在同样的高低温热源的情况下, 一切实际制冷机所能达到的极限, 就是可逆制冷机的制冷系数, 而一切可逆制冷机在同样的条件下的制冷系数都是相等的。



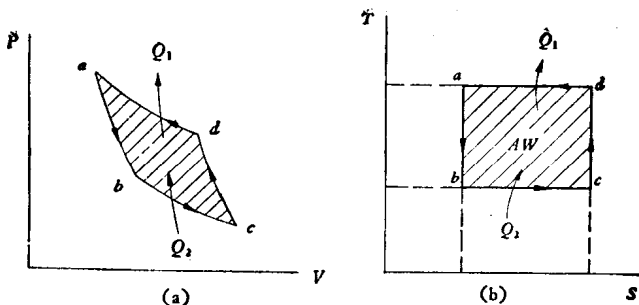


图 1.3 (a) 卡诺循环的  $P-V$  图; (b) 卡诺循环的  $T-S$  图.

所以我们先介绍一个典型的可逆循环——卡诺循环。卡诺循环是以理想气体为工质，由两个等温过程和两个绝热过程所组成的理想热力循环。图 1.3 中 (a) 和 (b) 分别为在以  $P-V$  为坐标的示功图上，和在以  $T-S$  为坐标的示热图上表示的卡诺循环的热力学过程，其中  $a \rightarrow b$ ， $b \rightarrow c$  是工质膨胀对外做功的过程； $c \rightarrow d$ ， $d \rightarrow a$  是工质被压缩、接受外界做功的过程。在卡诺制冷循环中，工质对外做的功大于外界对工质所做的功，二者的差值在图中用斜线来表示，即斜线部分表示工质在一个循环中对外界做的净功。然而，在  $T-S$  图上斜线部分则表示工质在一个循环过程中所吸收的热量。可以严格证明卡诺循环的制冷系数为

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (1.15)$$

在低温工程中可用图 1.4 所示的理想情况来代替卡诺循环，其中压缩机和膨胀机都是严格等熵的（理想的），换热器的换热温差接近于零；水冷却器和低温冷负载的传热也是理想的。这样，在整个流程中没有熵的增加，因此可以看成是一个卡诺循环。然而，实际上在每一个部件处都不是理想的等熵过程。因为热量只能从高温物体流向低温物体，所以换热器、