

徐烈 编

• 上海交通大学出版社

低温技术

DI WEN JI SHU

TB66

5

低温技术

徐烈编

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了低温技术的有关基本内容：低温技术的理论基础、制冷及气体液化循环，气体液化装置及其有关的机器与设备，低温测量等。另外，还介绍了与低温相关的一些技术，如低温绝热技术，真空技术等。

本书可作为大学本科“低温技术”课程的教材，还可供从事低温工程、低温物理、石油化工、电工、超导电技术、空间科学及生命科学等方面的科技人员参考。

低 温 技 术

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984号19号)

新华书店上海发行所发行

上海交通大学印刷厂印装

开本 787×1092毫米 1/32 印张 9.25 字数 204000

1988年6月第1次印刷 1988年7月第1次印刷

印数：1—2500

ISBN7-313-00252-1/T 科技书目：178—601

定价：1.55元

前 言

目前，低温技术的发展和已渗透到科学技术的各个领域，成为尖端科学技术和国民经济建设一项必不可少的技术。它不仅对巩固国防（如火箭技术、卫星通讯、现代化武器等）和国计民生（如工农业生产、食品的冷冻与保鲜，生命器官组织的低温贮存及冷冻医疗，超导技术的应用等）都有着密切的关系。而且对于能源的开发、物质结构、天体演变、生命起源等基础理论科学的研究，也是极其重要的。

本书的主要内容有低温技术的理论基础、制冷及气体液化循环、气体液化装置、超低温技术、低温机器与设备、低温绝热技术、真空技术、液化气体的贮运与输送，低温测试技术概论等章节。内容丰富、叙述准确、简明扼要。

在择写本书的过程中，得到上海交通大学动力系许多教授的支持与帮助，特别是孙光三、顾安忠副教授在使用本书的油印本教材时，提出一些宝贵意见，在此表示衷心感谢。在收集资料过程中，还得到国内许多工厂、研究所与高等院校及有关人员的大力支持，在此，也表示深切的谢意。

由于时间有限，更限于本人业务水平，错误和缺点在所难免，恳切地欢迎读者多提宝贵意见。

徐 烈 于上海交通大学

1987.12.

目 录

绪论	1
第一章 低温技术的理论基础	7
1.1 低温技术与热力学的关系	7
1.2 热力学基本定律及几个函数	8
1.3 真实气体	14
1.4 非稳态、非稳定流热力学基础	22
1.5 低温循环过程的焓分析法	33
1.6 获得低温的方法	49
第二章 制冷及气体液化循环	59
2.1 概述	59
2.2 气体液化的理想循环及其理论最小功	60
2.3 以节流为基础的气体液化循环	62
2.4 以等熵膨胀和气体节流为基础的循环(带膨胀机的循环)	71
2.5 逐级气体液化循环	76
2.6 带气体制冷机的液化循环	78
第三章 气体液化装置	87
3.1 天然气的性质及其液化装置	87
3.2 空气的性质、液化与分离	90
3.3 氢的性质与液化	106
3.4 氦的性质与液化装置	112
第四章 超低温技术	122
4.1 ^3He 减压蒸发制冷机	122
4.2 ^3He - ^4He 稀释制冷机	123

4.3 ^3He 液体压缩相变制冷机 (泡墨朗切克制冷机)	126
4.4 顺磁盐绝热去磁制冷机	129
4.5 核去磁制冷机	133
4.6 超低温技术中的特殊实验技术问题	137
第五章 低温机器与设备	143
5.1 节流阀	143
5.2 低温膨胀机	145
5.3 低温换热器	154
5.4 稀释制冷机中的换热器	163
5.5 纯化器	165
5.6 精馏塔	166
第六章 低温绝热技术	171
6.1 概述	171
6.2 型式与特点	173
6.3 绝热结构中的热桥	195
6.4 低温绝热中的漏热计算	196
第七章 真空技术	220
7.1 真空的获得	220
7.2 真空测量	227
7.3 真空检漏	232
7.4 真空系统	235
第八章 液化气体的贮运与输送	243
8.1 低温容器的设计要点	243
8.2 低温容器的典型结构	247
8.3 低温液体输送管道及设备	256
第九章 低温测量技术概论	260

9.1 温度测量.....	260
9.2 液面测量.....	282
9.3 低温流量测量.....	284
主要参考文献.....	285

绪 论

低温科学技术是 19 世纪末才开始兴起的一门科学。近年来，随着其他科学技术的发展和工农业生产的需要，得到了迅速发展和广泛应用，并展现出美妙的前景。目前低温科学技术对于巩固国防（火箭技术、卫星通讯、现代武器等）和国计民生（如工农业生产、食品的冷冻保鲜、生命器官组织的低温贮存及冷冻医疗等）都有着密切关系。不仅如此，低温科学技术对于能源的开发、物质结构、天体演变、生命起源等基础理论科学的研究都是一种必不可少的有力工具。

低温技术是研究温度在 120K 以下的有关科学技术。主要包括低温的获得、低温的保持、低温液体的贮运、低温的测试与实验技术等几个基本方面，而每一个方面又包括一系列的基础理论及工艺技术问题。

为了对低温技术的研究有一个较系统的了解，下面就低温区域的划分、发展及应用概况简介如下：

1. 低温区域的划分

低温学(cryogenics)一词最初是根据希腊文“kryos”（其英文译为“icy-cold”，即“冰冷”）及“genes”（其英文译为“born”，意指“出生”）得来的，用来描述温度低于 -100°C 的有关科学与技术。

1955 年之前，英、美、西欧诸国将“cryogenics”和“low temperature techniques”同时并用，来说明低温技术与冷冻技术(refrigeration)所涉及的不同温区。而苏联与东欧一些国家则采用深度冷冻(Глубокое Охлаждение)或

深冷技术(Техника Глубокого Охлаждения)来描述温度低于 -100°C 的有关科学与技术。1969年国际制冷学会(简称 IIR)组织专门的小组对低温术语(Low Temperature Terminology)进行统一命名与编订的建议工作,并在1971年大会上建议:

(1) 温度低于 120K 左右的称为低温(cryogenic temperature or cryotemperatures),不再使用深低温(deep-low temperatures)或超低温(ultra-low temperatures)等词;温度低于 0.3K 的称超低温(ultra-low temperatures)。

(2) 温区可用数字来表示,如液化天然气温度为 112K ,液氮温度为 4.2K 等。

(3) 在超低温下,最好使用 mK 或 μK 来表示。 $1\text{mK} = 10^{-3}\text{K}$, $1\mu\text{K} = 10^{-6}\text{K}$ 。

上述温区划分的方法是明确而实用的。高于 120K 的温区称为冷冻温区,主要的制冷方法是相变原理,主要用于冷藏、冷库和空气调节。温度低于 120K 的温区属于低温,其主要制冷手段是等温节流效应和膨胀机制冷,主要用于工业气体的分离与液化。温度低于 0.3K 的温区属于超低温,其主要制冷方法是磁制冷, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 稀释制冷, ^3He 减压蒸发制冷, ^3He 压缩相变制冷等,主要应用于基础理论研究和某些特殊实验的需要。

2. 低温技术的发展简况

低温技术的发展应追溯到19世纪末期。为了更系统了解低温的发展历史,现将低温史上的大事编录如下(见表0-1)。

低温技术的发展有两个重要的里程碑。一是1853年发现的焦耳-汤姆逊效应(Joule-Thomson effect),特别是1869年安德鲁斯(Thomas Andrews)液化了二氧化碳并

表 0-1 低温史大事录

年 代	达 到 的 温 度	采 用 的 方 法
174	-21°C	盐冰混合液
1877	90K	液化氧气
1883	77K	液化氮气
1898	20K	液化氢气
1908	4.2K	液化氦气
1919	1K	^4He 减压蒸发
1933	0.27K	^3He 减压蒸发
1950	0.0014K	顺磁盐绝热去磁
1956	0.00002K	核去磁
1980	0.00000005K	核去磁等方法

提出了临界温度概念之后,凯利代特(L. P. Cail Letet)和皮克代特(R. Pictet)又几乎同时首先成功地液化了氧气,这才是人类第一次真正跨入了低温技术的新境地。二是1902年克劳特(Claude)发明用膨胀机制冷的方法,这是低温技术发展史上的一场革命,它使气体液化技术由实验室走向工业规模。低温技术的发展相继出现了如下几个时代:20世纪30年代至50年代,为从空气中制取氧,使得空分技术有了很大的发展,人们称这段时期为空分时代;从50年代到60年代,为了宇宙开发和火箭的发射,开始大规模研究与应用20K的液氢,因此被称为液氢时代;而到了60年代,由于空间技术、超导技术和基础理论研究的需要,开始了4.2K液氦技术的大量研究和应用,该时代低温技术研究的主要标志是液氦技术,故称为液氦时代;70年代之后,低温技术的

发展以超导技术从实验阶段逐步走向实用化为主要标志，因此称为超导时代。

3. 低温技术的应用

目前，低温科学技术的发展日趋成熟，已成为一门独立的学科。它广泛应用于工农业各个方面和科学技术的不同领域（详见表 0-2），而且还与其他学科之间相互关联、相互渗透、相互促进，且形成不少边缘学科，如低温电子学、低温生物学、低温医学等，因此低温科学技术的发展将会有力促进其他科学技术的发展。

表 0-2 低温技术的主要应用领域

序号	应用领域	应 用 事 例
1	能 源	低温输电(低温流体冷却常规导线)、超导电缆输电、磁流体发电(MHD)、超导贮能、超导发电机与电动机、受控热核反应、液化天然气燃料、液氢燃料等。
2	资源开发	超导磁选矿、资源勘探、资源开发与利用、氢飞船等。
3	空间技术与宇宙开发	火箭推进剂、磁辐射屏蔽、氢-氧燃料电池、宇航员及生命呼吸气、空间环境模拟、高速火箭发射、风洞试验、卫星热控制等。
4	真空技术	超高真空、薄膜技术(真空镀膜)等。
5	电讯及电子计算机	卫星通讯、超导高速计算机等。
6	计量及检测技术	超导高灵敏探测器(如 SQUID)、红外探测器、标准计测器、激光器等。

续表 0-2

序号	应用领域	应 用 事 例
7	冶 金	纯氧炼钢、金属冷处理、金属冶炼的保护气体等。
8	机 械	超导磁体、超导磁浮高速轴承、超导直线加速器、冷装配、低温破碎、低温粉碎等。
9	化 工	高能燃料(液氢、液氧)、重氢(氘)的提取、稀有气体和高纯气体的提取、氨资源保护与利用。
10	交通运输	高速磁悬浮列车、低温液化气体的水上、铁路、公路及航空运输、船舶磁力推进。
11	食 品	水产品(鱼、虾等)、畜产品(肉类、禽蛋品等)、水果、蔬菜的快速冷冻、贮存与运输。
12	畜 牧 业	良种牧畜精液与胚胎的低温保存与培养等。
13	医疗卫生及生物学	低温手术、器官、皮肤、血液、精液、细胞的保存, 心磁计、 π 介子照射治疗以及低温生物学研究等。
14	环境保护	污水处理, 重金属污染的磁分离, 低温脱硫, 低温冷冻干燥等。
15	原子能利用	^3He 的提取, 反应堆材料低温辐射试验, 低温吸附及裂变气的回收。

续表 0-2

序号	应用领域	应 用 事 例
16	基础理论研究	高能物理加速器及氢泡室, 超导与超流理论研究, 等离子体物理与凝聚态物理, 超低温的获得, 自由基化学反应机理研究等。
17	其 他	海洋开发, 土木工程(冻土), 防灾, 液化天然气冷量利用, 低温化学工艺等(如保存高活性物质, 生产同质异性物, 瞬时冷却提高逆反应产量等)。

上面介绍的低温技术在各种领域中的应用, 归纳起来有三种方式:

第一种方式是使某些混合气体通过低温下的液化与分离得到的一定的产品。如分离空气可以获得氧、氮及几种稀有气体; 分离焦炉气可提取生产合成氨的原料气——氮、氢混合气; 分离油田及石油裂解气可获得乙烯、丙烯等多种化工原料; 从天然气、合成氨尾气及核裂变物质中可提取氦气及其他稀有气体等。

第二种方式是生产液化气体, 如液化天然气、液氧、液氮、液氢、液氦等。

第三种方式是通过低温液体的气化或采用低温制冷机来制造低温环境, 以满足空间技术、超导技术、低温医学、红外技术等需要。

综上所述, 低温技术在国民经济各个部门中都得到广泛应用, 上至宇宙空间、下至海底。同时, 它还与其他学科交叉渗透, 获得更快发展。因此, 低温技术是一门内容丰富、日趋独立的新型学科。

第一章 低温技术的理论基础

1.1 低温技术与热力学的关系

低温技术是为了获得并保持 120K 以下的温度，使其服务于人民的生活、工农业生产、国防建设与科学研究。要获得并保持这样的温度，主要的理论基础是热力学。

我们知道，热力学是一门研究能量及其相互转换规律的基础科学，它主要研究热能与其他能量——特别是机械能的转换规律。而低温的获得是在机械能（有时也利用热能、电能或磁能等）的作用下，从低温热源吸取热量，通过低温装置中低温工质的作用，连同机械能转化成的热量，一并传给高温热源（通常是环境介质）。

热力学与低温技术的关系，可概括为如下几个方面。

1. 基本制冷方法的研究必须运用热力学的知识。

可以用来制冷的基本过程中必须有两个条件，即能达到比较低的温度和复原时可以吸热。物质怎样才能实现这样的过程，而又在怎样的条件下才比较有效，都必须用热力学的知识来判断和分析。例如用热力学方法分析工质存在有转化温度之后，才最后地解决了氢、氦节流降温和液化的问题，而绝热退磁可以制冷的这一现象必须用磁场热力学的知识来解释和分析。

2. 制冷的基本方法之一是相变制冷。因此，对这类低温工质的热物性研究也是低温技术的重要方面，无论从理论

上或通过实验来研究工质热物性和热力性质都与热力学的知识和方法分不开的，不仅用到一般热力学知识，还用到溶液热力学知识。

3. 利用基本制冷方法来构成技术上可以实现的连续工作的循环，必须以热力学的理论——热力学的基本定律为指导。任何违背热力学基本定律的设想，在技术上都是无法实现的。

4. 低温装置基本过程的计算也要依据热力学第一定律和第二定律，运用由这两个基本定律建立的能量方程和熵方程。通过装置(或循环)的热力计算，才能确定它的性能指标和经济性，同时为各个设备的设计和选用提供原始资料。

由此可见，热力学对低温技术的关系是非常密切的。低温技术离不开热力学的知识、理论和方法。

由于低温技术中涉及热力学知识较多，本章只扼要地介绍与低温获得直接有关的几个热力学原理。至于基本的制冷方法，溶液热力学及低温工质的性质将在后面章节中陆续介绍。

1.2 热力学基本定律及几个函数

大家知道，任何一个制冷(获得低温)过程都是有序度增加的过程，制冷机可认为是一台熵排出器。因此，研究制冷过程的实现和改善都要遵循热力学基本定律。

热力学第一定律实际上是介绍物质(工质)的能量守恒和转换定律，能量的形式可以转换，但总能量保持不变。在制冷系统中，可用下面的表达式来描述热力学第一定律：

$$TdS = dU + A pdV \quad (1-1)$$

考虑更广泛的制冷系统，其表达式为：

$$TdS = dU + \sum y_i dx_i \quad (1-2)$$

式中： T 为温度， S 为熵， U 为内能， x_i 为广义位移， y_i 为广义力。

热力学第二定律指出了系统变化可能进行的方向和达到平衡的必要条件。它有许多种说法，在低温液化中，常这样叙述：“热量不能自动地由低温物体传到高温物体”。这里特别要指出的是“不能自动”这四个字，因为在制冷机中，热量是从低温热源取出而放到高温热源中去的，它不是一个自动过程，是一个消耗制冷功的结果。

根据热力学第二定律，可以直接推导出卡诺定律：在相同的高温热源 T_1 和低温热源 T_2 之间工作的所有可逆制冷机（卡诺循环），其制冷系数相等；在这同样温度之间工作的所有制冷机，以可逆制冷机的制冷系数为最大。

实际过程中，由于机械摩擦、气流摩擦及气体压缩和膨胀时的温度不均匀及与气缸的温差，均会引起不可逆热流动的熵增加，环境的漏热也会引起熵增加，因此，实际过程总是一个不可逆的过程。因此实际制冷机的效率低于具有同样温度界限的卡诺循环的效率，它们的制冷系数之比值称为卡诺比，它代表该循环过程的热力完善程度。卡诺循环的制冷系数为

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (1-3)$$

式中： ε 为制冷系数； Q_1 为工质在一个循环中释放给高温源的热量(W)， Q_2 为工质从低温源取出的热量(W)； T_2 、 T_1 分别为低温源和高温源的温度(K)。

一些室温与常见低温之间的卡诺循环的制冷系数见表 1-1。

表 1-1 几个常见温度下卡诺循环的制冷系数 ϵ

室 温	低 温 温 度		制 冷 系 数 ϵ
	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$	绝对温度, K	
20 $^{\circ}\text{C}$ (293.15K)	0	273.15	13.6
	-10	263.15	8.8
	-50	223.15	3.2
	-173.15	100	0.52
20 $^{\circ}\text{C}$ (293.15K)	-223.15	50	0.21
	-268.15	5	0.017
	-272.15	1	0.0034

下面介绍几个重要的热力学函数：内能 U 、焓 H 、自由能 F 和自由焓 G 。引入这四个热力学函数，可以更为方便地通过数学分析，讨论更加广泛的制冷问题。

1. 内能 U

任何工质的能量均由三种形式的能量所组成：工质重心移动而形成的外动能 E_R ；工质重心的垂直位移而产生的外位能 E_p ；分子、原子中的内动能和内外能之和的内能 U 。系统的总能量

$$E = E_R + E_p + U \quad (1-4)$$

在非高速流动的工质中， E_R 很小，可以略去。在低温过程中， E_p 变化也很小，而内能 U 在任何过程均表现出来，由其状态所决定，与变化的过程无关。

2. 焓 H

流动过程的工质，其总能量由两部分组成。即由内能 U 和