



“十三五”普通高等教育本科规划教材

低温技术基础

主 编 陈 曦
副主编 祁影霞 谭宏博

非
外
借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

上海理工大学一流本科系列教材

低温技术基础

主 编 陈 曦
副主编 祁影霞 谭宏博
参 编 戴征舒 阚安康 芮胜军
主 审 厉彦忠 文 键



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统地介绍了低温技术的基础知识,内容涉及低温技术相关的原理、流程和设备装置,其中包括低温降温原理、低温气体液化流程、低温空分技术、小型低温制冷机等,并系统地介绍了低温相关的热交换器、绝热技术以及真空技术等。

本书的特点是重视基础、知识点讲解清晰、内容涵盖面广,既涉及低温原理方面的知识,又涉及低温应用方面的知识,并将近年来在低温技术上的新技术、新进展在书中进行了补充介绍,使得本书内容丰富、翔实,兼具理论性与实用性。另外,本书提供了大量的低温工程及设计数据的图表供参考。

本书可以作为能源与动力工程专业(制冷与低温方向)的理论学习教材,也可以作为相关专业工程技术人员设计低温系统及低温装置的参考书。

新 盛 对 基 出

图书在版编目(CIP)数据

低温技术基础/陈曦主编. —北京:中国电力出版社, 2018. 8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-2171-5

I. ①低… II. ①陈… III. ①低温—技术—高等学校—教材 IV. ①TB6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第174217号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:李 莉

责任校对:黄 蓓 郝军燕

装帧设计:郝晓燕

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2018年8月第一版

印 次:2018年8月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:16.5

字 数:400千字

定 价:42.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

低温技术与国民经济和工业技术密切相关，在钢铁工业、化工气体行业、天然气工业、航空航天、大科学装置以及生物医疗等领域应用十分广泛。近年来，随着我国科技发展和工业技术的进步，低温行业发展迅速，如我国化工钢铁业已实现 10 万方低温空气分离设备的国产化。天然气工业中的液化天然气生产已接近 1000 万吨/年，液化天然气进口量已超过 3800 万吨/年。我国自主研发的斯特林制冷机以及脉管制冷机已成功用于我国各种卫星系统，为我国的空间技术发展、国防安全做出重要贡献。我国低温技术也正在为中国散裂中子源、上海光源、北京正负电子对撞机、空间环境地面模拟装置等大科学装置的建设和运行做出贡献。

相应地，近年来我国制冷与低温工程专业的高等教育也获得了快速发展。具有学士学位授予权的高校，从 1986 年的 10 多所发展到目前的 100 多所，具有制冷与低温工程专业博士学位授予权的高校，从 1986 年的 3 所发展到目前的 30 余所。每年有大量的本科生和研究生从学校毕业投入低温行业工作，他们急需一本内容丰富、新颖的入门级低温技术教材。

本书主要介绍低温技术领域的基础理论及循环系统，并对低温技术中涉及的低温换热器、低温绝热技术以及真空技术进行了详细介绍，总体内容安排既有理论性又具有一定工程实用性。在本书中，对低温技术领域的新发展和新技术也进行了补充介绍，为了对学生以后的学术发展提供帮助，书中提供了低温技术领域的学术组织、学术会议以及学术期刊等信息。

本书由陈曦任主编，祁影霞、谭宏博任副主编。第 1 章、第 3 章和第 5 章由上海理工大学陈曦编写，第 2 章由河南科技大学芮胜军编写，第 4 章由西安交通大学谭宏博编写，第 6 章由上海理工大学祁影霞编写，第 7 章由上海海事大学阚安康编写，第 8 章由上海理工大学戴征舒编写。

本书是上海市教委本科重点课程“低温技术基础”和上海理工大学一流本科系列教材建设项目的成果。在本书的编写过程中得到了许多低温技术领域的专业技术人员以及兄弟高校相关教师的指导，同时引用了许多文献资料（数据及图表等），谨向上述有关人员及文献作者表示衷心的感谢。

本书由西安交通大学厉彦忠教授、文键教授主审，两位教授对本书内容提出了许多宝贵意见，在此向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者予以指正。

目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 低温技术的历史背景	1
1.2 低温技术的应用领域	5
1.3 低温学术组织及资源	8
第 2 章 获得低温的方法	10
2.1 概述	10
2.2 相变制冷	13
2.3 气体绝热节流制冷	15
2.4 气体等熵膨胀制冷	21
2.5 绝热放气制冷	24
第 3 章 气体液化循环	27
3.1 低温工质的性质	27
3.2 气体液化循环基础	34
3.3 空气节流液化循环	38
3.4 带膨胀机的空气液化循环	49
3.5 氦液化循环	58
3.6 氢液化循环	68
3.7 甲烷及天然气液化循环	74
第 4 章 气体精馏原理及设备	79
4.1 溶液热力学基础	79
4.2 空气的组成及其主要成分间的气液平衡	85
4.3 空气的精馏	88
4.4 塔设备的结构	98
4.5 二元精馏过程的计算	103
4.6 精馏塔的塔板效率	109
4.7 填料塔精馏过程的计算	112
第 5 章 小型低温制冷机	116
5.1 低温制冷机分类	116
5.2 斯特林制冷机	121
5.3 G-M 制冷机	137
5.4 脉管制冷机	145
5.5 微型气体节流制冷器	157

5.6	逆布雷顿制冷机	164
第6章	低温换热器	168
6.1	换热器的分类	168
6.2	管式换热器种类及结构	169
6.3	板翅式换热器	177
6.4	小型低温换热器	184
6.5	板翅式换热器计算	189
6.6	管式换热器计算	196
第7章	低温绝热技术	209
7.1	低温绝热概述	209
7.2	绝热材料	210
7.3	绝热方式及结构	218
7.4	低温储运与储槽设计	229
7.5	低温绝热容器的设计方法	232
第8章	真空与低温技术	235
8.1	真空与低温技术的关系	235
8.2	真空及其测量	235
8.3	真空的检漏	237
8.4	真空泵	240
8.5	低温真空泵	243
8.6	真空系统	247
8.7	低温真空技术的应用	250
	参考文献	254

第 1 章 概 述

制冷是采用某种方法将物体温度降低到或维持在环境温度以下，根据温度所在的区域把制冷技术分为普冷技术和深冷技术，习惯上把普冷技术称为制冷技术，把深冷技术称为低温技术。低温学 (Cryogenics) 在字面上的意思是“产生冰冷”，然而，如今已作为低温的同义词来用。普冷与低温的温度分界并没有很明确的定义，美国国家标准局 (NIST) 的研究人员把低于 -150°C (123K) 的温度范围作为低温领域。这是一个合乎逻辑的分界线，因为一些所谓的“永久性”气体，例如氦、氢、氖、氮和空气的沸点都在 123K 以下，而氟利昂、硫化氢、氨等常用制冷剂沸点都在 -150°C (123K) 以上。图 1-1 表示了低温的分界线和范围，在工程上常把 120K 作为制冷与低温的分界线。

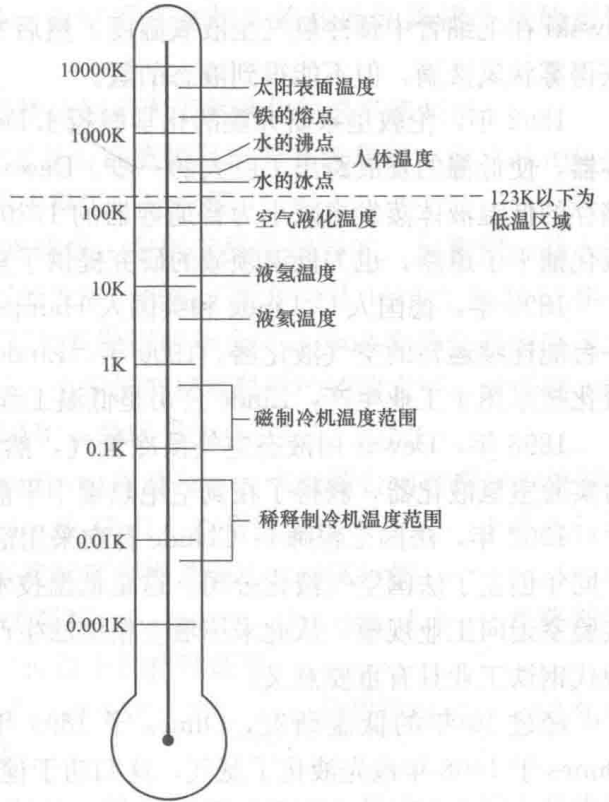


图 1-1 低温的分界线和范围

低温技术是在热力学和传热学的理论基础之上发展起来的，同时低温技术的发展又拓展了热力学和传热学的低温领域，丰富了热力学和传热学的内涵。低温技术发展已有近 150 年历史，现已广泛应用于国民经济、国防建设和现代科学技术的各个方面。目前低温技术已在气体液化和分离、低温燃料 (LNG 和 LH_2)、超导技术、材料处理及回收、航天技术、生物冷冻医疗等领域得到了广泛应用。随着低温技术的发展和新材料的出现，低温技术在高技术领域中发挥着越来越重要的作用。

1.1 低温技术的历史背景

同其他物理量如压力、磁场、电场等相比，温度对加工工艺和材料性能的影响更加显著。利用温度效应这种能力是人类独有的特征之一，它促进了人类文明的重大进步。由于产生较高温度的火焰并不困难，在人类的文明史上很早就开始应用高温，与此相反，由于产生低温有很大的困难，人类应用低温的时间远远落后于高温。

1.1.1 低温技术的发展

低温技术的发展可以追溯到 19 世纪 50 年代，1852 年发现了 Joule-Thomson 节流效应，

1869年 T. Andrews 液化了二氧化碳并提出了临界温度概念, 之后, 低温技术有了最初的萌芽。低温界普遍认为, 低温发展的起点为 1877 年法国工程师 L. P. Cailletet 和瑞士物理学家 R. Pictet 几乎同时成功的液化了被称为“永久性”气体的氧气, 虽只是雾状液滴, 但标志着人类第一次真正跨入了低温技术的新领域。

1883 年, 波兰科学家 S. Wroblewski 和 K. Olszewski 在克拉科夫工业大学正式获得了在试管中沸腾着的液氧, 过了一段时间, 他们又液化了氮气。在成功地制取了液氧和液氮后, S. Wroblewski 和 K. Olszewski 分别独立工作, 利用 Cailletet 膨胀技术来液化氢气。Wroblewski 在毛细管中预冷氢气至液氧温度, 然后突然从 10MPa 膨胀到 0.1MPa, 他于 1884 年获得雾状氢液滴, 但不能得到液态的氢。

1892 年, 伦敦皇家研究院的化学教授 J. Dewar 发明了能储存低温液化气体的真空夹层容器, 使低温的发展跨出了巨大的一步。Dewar 发现, 夹套内壁镀银的真空玻璃容器, 可使储存的低温液体蒸发率减小为普通容器的 1/30, 因此能长期储存低温液体, 这为氢和氮的液化铺平了道路, 也为低温领域的研究提供了重要的实验条件。

1895 年, 德国人 C. Linde 和英国人 Hampson 采用简单节流法部分分离空气, 制成了一台能连续运转的空气液化器。1900 年, Linde 制成用氮预冷的空气液化器, 第一个将空气液化技术用于工业生产, Linde 公司是低温工程行业的先驱者之一。

1898 年, Dewar 用液态空气预冷氢气, 然后用绝热节流使氢气成为液体, 制成了一台实验室氢液化器, 获得了在真空绝热罐中平静沸腾着的 20mL 液氢, 温度为 20.4K。

1902 年, 法国工程师 G. Claude 首次采用活塞式膨胀机开发了实用的空气液化系统, 并于同年创立了法国空气液化公司。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, 从此采用液空精馏法生产氧气和氮气的工业获得稳步发展, 该技术对现代钢铁工业具有重要意义。

经过 10 年的低温研究, Onnes 于 1895 年在荷兰莱顿大学建立了低温物理实验室。Onnes 于 1908 年最先液化了氦气, 这归功于他的实验技巧和精心计划。他用加热印度的独居石砂方法得到 360L 氦气, 并采用液态空气和液氢预冷高压氦气, 再用节流膨胀获得 60mL 液氦。1910 年 Onnes 在一次不成功的固化液氦的实验中(通过液氦容器减压)得到了 1.04K 的温度, 并发现了超流氦。

1911 年, 正当 Onnes 检查液氦温度下固体电阻的各种阻值时, 他发现实验所用汞丝电阻突然降为零。这一发现标志着超导电性(现今许多科学装置的基础)首次被发现, Onnes 也由此获得了 1913 年的诺贝尔奖。

尽管低温技术在美国被认为是比较新的领域, 但美国工业界早在 20 世纪初就开始使用液化气体。1907 年, Linde 在美国建立了第一个空气液化工厂。1916 年 Linde 公司在 Ohio 州投入使用了第一台商业供氦系统。1917 年, 美国矿务局与 Linde 公司、空气产品公司、Jefferies-Norton 公司一起建了三个实验工厂, 从 Texas 州的天然气中制取氦。这些氦气供第一次世界大战中的飞艇使用。Claude 公司自从 1907 年起就在法国批量产氦, 但到了 1922 年美国才开始商业供氦。

1926 年美国 R. Goddard 博士首次采用液氧和汽油为推进剂的火箭试验, 该技术后来被德国在“二战”期间用于 V-2 武器系统, 于 1942 年成功试射 V-2 火箭, 这是第一个使用低温液体推进剂的火箭, 该火箭采用了液氧和酒精(75%乙醇与 25%水的混合物)。现代国防

建设中的远程打击导弹以及发射卫星用的大推力火箭大都采用了低温燃料。

同一年(1926年), William Francis Giaugue 和 Peter Debye 分别提出了绝热去磁方法能达到超低温(小于 0.1K)的想法。但直到 1933 年, Berkley 大学的 Giaugue 和 Macdougall, 以及莱顿大学的 Dehaas、Wiersma 和 Kramers 才运用这个技术达到 0.3K 到 0.09K 的温度。

早在 1898 年, Dewar 就测试了真空粉末的热传递。1910 年, Smoluchowski 公布了绝热方法上的一个重大改善, 即使用真空粉末来绝热。1937 年在美国, 真空粉末绝热被首次应用在低温液体的球形储罐中。两年后, 第一台使用真空粉末绝热的铁路槽车开始运输液氧。

1934 年, 俄罗斯科学家 Kapitza 在英国剑桥研制了用于氦液化的透平膨胀机。

1947 年, 麻省理工学院 Collins 教授开发了具有活塞膨胀机的氦液化器, 由 A. Little 公司生产, 使液氦在低温技术的开发和实际使用中得以广泛应用。

1952 年, 美国国家标准局低温工程实验室建成, 它用于提供燃料的工程数据, 并为原子能委员会提供大量的液氢, 促进了低温工程的发展。低温工程年会从 1954 年至 1973 年一直由国家标准局赞助。1972 年在佐治亚州理工大学举行的年会上, 会议委员会投票决定年会每两年一次, 与超导技术应用会议交叉举行。由于低温材料科学的快速发展, 该低温工程大会(CEC)已成为与国际低温材料会议(ICMC)的联合大会(CEC/ICMC)。

早在 1956 年, 液氦技术快速发展的时候, Pratt 和 Whitney 飞行器公司被授权为美国空间项目研制燃烧液氢的火箭发动机。1961 年 10 月 27 日, 在肯尼迪航天中心, 土星飞行器进行首次试验, 土星-V 号是第一个使用液氢液氧混合推进剂的空间飞行器。

1966 年, Hall、Ford、Thompson 在曼彻斯特, Neganov、Borisov、Liburg 在莫斯科分别用 He^3/He^4 稀释制冷机成功地得到了 0.1K 以下的持续低温。

1969 年英国国际研究发展公司制成了一台 2420kW、200r/min 的超导电机。1972 年在一条船上安装了一台超导电机来驱动电力系统。

1987 年诞生的氧化物高温超导体由德国 Miller 和 Johannes Georg Bednorz 博士最先发现, 随即引发了全球性的高温超导体研究热潮。中国科学家赵忠贤在该研究领域有巨大影响。

1990 年由我国朱绍伟博士等所报道的有关双向进气型脉冲管制冷机受到了全世界低温制冷机领域研究人员的普遍关注, 脉冲管制冷技术已逐渐成熟, 大量用于航天领域中。

1.1.2 低温技术大事记

从前面的低温发展史我们看到, 低温技术已从 Linde 和 Claude 时代有趣奇怪的现象发展到如今应用于许多工程的关键领域。表 1-1 为低温技术发展大事记, 图 1-2 展示了低温技术在 1850 年到 2000 年间的发展情况。低温技术的发展相继经历了以下几个时代: 20 世纪 30~50 年代的空分时代, 从空气中制取氧, 促进了钢铁工业的发展; 20 世纪 50~60 年代的液氢时代, 快速兴起的航天技术需要低温燃料, 使之从实验室阶段进入大规模工业使用阶段, 主要用于宇宙开发和火箭发射的需要;

20 世纪 60~70 年代为液氦时代, 主要用于空间技术、超导技术和基础理论研究需要;

20 世纪 70 年代以后为超导时代, 强磁场, 大电流超导材料和超导约瑟夫逊效应的发现, 使低温技术与超导结合, 形成了无可替代的强磁场新技术与极高灵敏度的电磁新器件;

21 世纪初为低温技术的完善及应用推广时代, 低温设备及系统的效率、可靠性、稳定性不断提高, 低温技术在工业及大科学工程中的应用上逐渐拓展。

表 1-1

低温技术发展大事记

年 份	重 大 事 件
1877	Cailletet 和 Pictet 液化了氧气
1879	Linde 创立了林德公司
1883	Wroblewski 和 Olszewski 在 Cracow 大学的实验室完全液化了氮气和氧气
1884	Wroblewski 获得了雾滴液氢
1892	Dewar 发明了低温液体储存的真空绝热容器
1898	Dewar 在英国皇家学院成功地制得了液氢
1902	Claude 创立了法国空气液化公司并研制成功膨胀机空气液化系统
1907	Linde 创立了第一家空气液化公司; Claude 从空气液化流程中得到了氩气
1908	Onnes 液化了氦气
1910	Linde 发明了双精馏塔空气分离系统
1911	Onnes 发现了超导电性 (1913 年诺贝尔奖)
1916	美国开始生产商业化生产氩气
1917	从天然气中制取氦气在美国获得成功
1926	Giauque 和 Debye 分别独立提出绝热去磁制冷的思想
1933	采用磁制冷获得低于 1K 的低温
1934	Kapitza 设计并制造了第一台用于氦液化的膨胀机
1937	真空粉末绝热开始用于商业化低温液体储存容器
1939	第一台真空绝热铁路槽车在液氧运输中被采用
1942	V-2 武器系统点火试验 (采用液氧)
1947	Collins 型低温容器研制成功
1949	第一台化学工业配套用的 300t/d 的氧气系统建成
1950	顺磁盐绝热去磁制冷获得 mK 级温度
1952	美国国家标准局 (NIST) 低温实验室建立
1957	液氧推进的 Atlas 火箭点火升空; 超导电性基础理论 (BCS 理论) 创建
1958	发明高效多层低温绝热技术
1959	大型液氢厂在美国建成 (服务于 NASA)
1963	Linde 公司在美国加州建成 60t/d 的液氢装置; Gifford 提出脉冲管制冷
1964	两艘 LNG 储运船开始服务
1966	He ³ /He ⁴ 稀释制冷机面世, ³ He- ⁴ He 稀释制冷获得 10 ⁻³ K 低温
1969	2420kW 直流超导电机建成
1970	已具备 60 000~70 000m ³ /h 的生产能力的液氧装置问世
1980	芬兰赫尔辛基技术大学采用两级串联的核磁矩绝热去磁方法获得 5×10 ⁻⁸ K 的低温
1985	朱棣文等实现激光冷却原子, 得到 24μK 钠原子气体 (1997 年诺贝尔奖)
1986	柏诺兹和缪勒发现了 35K 超导的钡铜氧体系, 并获得 1987 年诺贝尔物理学奖
1897	我国物理所赵忠贤及美国休斯敦大学的朱经武等发现 90K 钇钡铜氧超导体
1989	西安交通大学朱绍伟等采用双向进气脉冲管制冷获得了 42K 低温
1992	中国科学院低温中心周远等采用多路旁通方案获得了 23.8K 的低温
1996	浙江大学陈国邦提出了二级小孔脉冲管制冷方案, 制冷机最低温度达 3K

续表

年 份	重 大 事 件
1997	西安交通大学的氦透平膨胀机成功用于 KM6 神舟飞船地面模拟
2001	中原石油勘探局建造了国内首座生产性质的 LNG 工厂
2002	上海技术物理研究所研制的斯特林制冷机在神舟三号中成功应用
2003	我国首次发射的载人航天飞行器, 将航天员杨利伟送入太空
2005	我国承建的首条液化天然气 (LNG) 船顺利出坞
2017	10 万方等级空分装置及空气压缩机组实现国产化

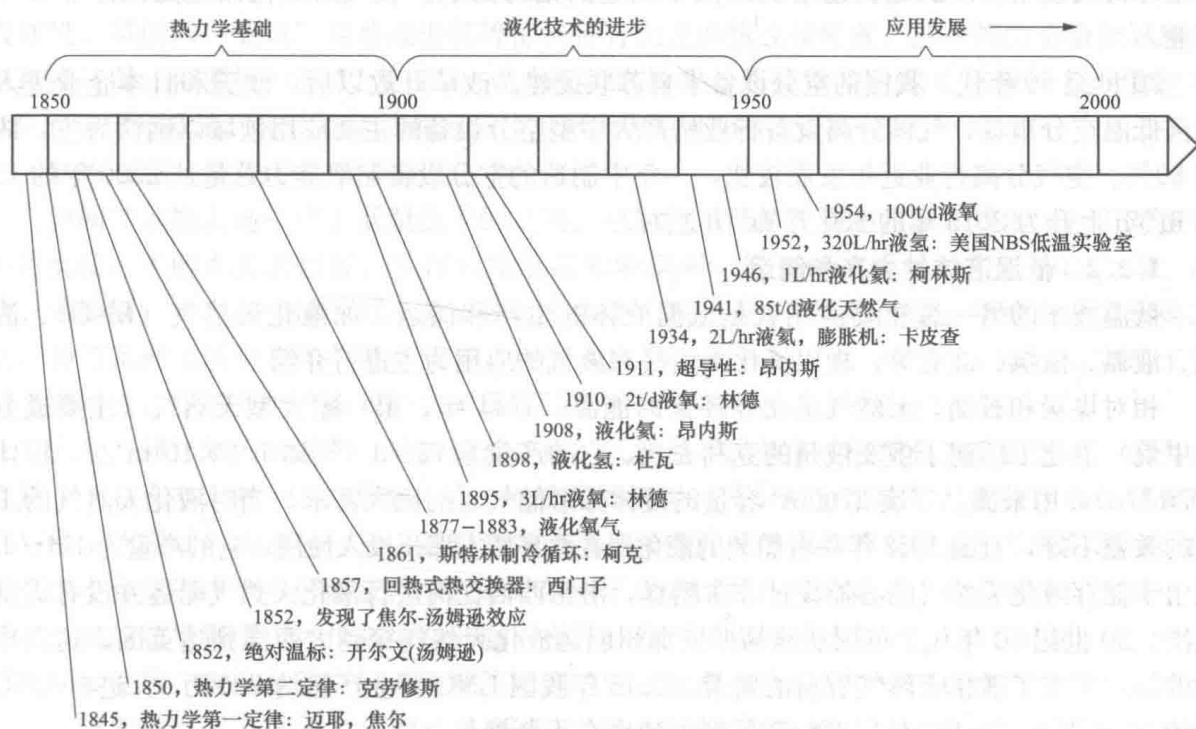


图 1-2 低温技术在 1850—2000 年间的发展情况

1.2 低温技术的应用领域

1.2.1 气体分离

气体分离是使某些混合气体通过低温下的液化与分离得到一定的产品。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。通过低温过程从空气和天然气中制取出来的产品：氧、氮、氩、氖、氦、氙、氡，在冶金和化学等工业部门中得到了广泛的应用，其重要性和需求量与日俱增。

低温的最初用途是为了满足焊接行业的需求而生产氧气，这种用途一直延续至今，一家典型的氧气生产厂的规模从 1910 年的 2t/d 增长到 1925 年 35t/d，20 世纪 50 年代初已经达

到 100t/d, 1950 年最大规模的氧气生产厂产量大约是 200t/d。1947 年美国氧气的总产量为 $0.541 \times 10^6 \text{ t}$ ($4.07 \times 10^3 \text{ m}^3$ 的气体), 1954 年总产量已经增长到 $8.3 \times 10^5 \text{ t}$; 1947 年氮气的总产量为 $1.67 \times 10^4 \text{ t}$, 1960 年已经增长至 $5.34 \times 10^5 \text{ t}$ 。将氧气或者氮气从这些工厂输送到最终用户的过程中需要用到真空绝热罐卡车和轨道车, 在当时这本身就是一个比较大的行业。这些空分工厂的一部分氮气被用作炼钢和炼铝工业中的保护气体, 并开始被用来制取一些化学制品, 比如氨水。用于炼钢的氧气高炉是 Durrer 在 19 世纪 40 年代后期在瑞士发明并发展起来的。纯氧在这些高炉内的用途是更有效地氧化杂质, 与使用空气相比提高生产效率且降低钢的含氮量。1952 年在澳大利亚建造了第一个 35t 的商用转炉, 类似的高炉很快在全球得到使用, 以满足快速增长的汽车工业的钢材需求。氧气的其他用途是医疗业和军工业。

20 世纪 50 年代, 我国的空分设备来自苏联援建。改革开放以后, 欧美和日本企业进入我国低温空分市场, 气体分离设备行业所产大中型空分设备的主要应用领域以钢铁为主, 约占 80%。空气分离行业近年发展较快, 一年中制造的空分设备制氧能力总量从 2000 年的 15 万 m^3/h 上升为 2013 年的 300 万 m^3/h 左右。

1.2.2 低温液体的生产和储运

低温技术的另一种重要应用就是低温液体的生产和储运, 如液化天然气 (LNG)、液氧、液氮、液氢、液氦等, 现以液化天然气和液氢的应用为主进行介绍。

相对煤炭和石油, 天然气是比较环保的能源。1941 年, 第一家大型天然气 (主要成分是甲烷) 液化工厂建于俄亥俄州的克利夫兰, 它的产量是 75t/d (气体 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$, 液体 $177 \text{ m}^3/\text{d}$), 用来满足三座 2700 m^3 容量的液体球形储气罐的庞大需求。当时液化天然气的工厂的效益不好, 直到 1952 年一台船装的液化器在路易斯安那州投入使用, 它的产量为 114t/d, 但由于储存液化天然气的容器设计非常糟糕, 沿密西西比河进行液化天然气船运并没有得到批准。20 世纪 50 年代末英国从路易斯安那州船运液化天然气穿越大西洋到达英国, 这次成功的船运带来了液化天然气贸易的繁荣。2016 年我国 LNG 行业产量约 700 万 t, 进口 LNG 量约 2600 万 t, 且进口量以两位数的增长速度在不断增长。

液氢是一种低密度液化气体 (密度为 0.07 kg/L), 由于它与所有的氧化剂都有高度的反应活性, 而且燃烧生成物的分子量低, 所能提供的比推力比其他任何化学燃料都高。目前, 大型空间飞行器的火箭发射一次就需要数十吨液氢, 为了提高氢的密度和气化潜热, 以缩小储槽体积和减少储存损失, 可通过低温过程将液氢制成氢浆、氢胶或氢浆凝胶来加以解决。

20 世纪 60 年代美国已具有日产数百吨液氢的生产能力。围绕安全用氢的一整套技术较为成熟, 但如何制取廉价液氢, 特别是从水制氢, 进而液化、储存、输运和管理等仍有待深入研究。在美国有多处数千立方米的液氢储槽, 液氢储运中的两相流、温度分层、水击机理等研究工作都是用氢安全的基础。如美国“土星 5 号”的液氧加注配套 3200 m^3 的储槽, 在输液时因水击而造成管阀严重破裂。在液氢储运过程中, 空气和氧易在液氢中沉积, 形成爆炸物。为了防止固氧累积过多, 液氢容器在连续加注 5~10 次后, 应加热升温到 100K, 以便升华并排除固氧。

部分科学家预计液氢还可能成为取代汽油的无污染燃料。通过低温蒸馏的方法还可以从大量的液氢中分离出所需要的重氢——它是原子能工业的重要原料, 美国的首枚氢弹实际上是一只高 6m, 直径大约 2m 的大型液氚杜瓦瓶, 顶部装有核裂变炸弹用来触发系统。

1.2.3 制造低温环境

低温技术应用的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、低温生物医学、红外技术等需要。

1. 低温技术在武器装备中的应用

随着现代武器装备的“光电化”,对军用微型低温制冷机的需求量将不断增加。美国“战斧”式巡航导弹采用红外末端制导,采用低温节流制冷机冷却到 80K 温度。美国每辆“布雷德利”战车上就配有 8 台斯特林制冷机; F16、F17 战斗机和轰炸机的红外吊舱,都装备有微型斯特林低温制冷机作冷源。美军绝大多数坦克、重要武器、反坦克导弹火控系统都配备有夜视瞄准设备,仅美军第 4 机械化步兵师就装备了几千套夜视仪,美国的 F-117 隐形轰炸机、英国的“旋风”对地攻击机等都装备有先进的热成像装置,这些都由小型低温制冷机提供冷源。俄罗斯的苏-27 及苏-30 战斗机,都带有红外搜索与跟踪及夜视设备,俄制 S-300 地空导弹系统,也使用了快速反应 J-T 低温制冷机和斯特林低温制冷机等。

2. 低温技术在航空航天领域的应用

空间技术极大地推进了低温技术的发展。空间技术虽然投资多、技术难度大,但对探索宇宙奥秘,了解人类的起源、生存和发展都非常重要,得到的回报也巨大,所以美国、西欧、俄罗斯、日本和中国等都十分重视航天事业。我国近 10 年来在航天领域取得了重要进展,神舟系列飞船为我国争得了荣誉,中国人也第一次进入了太空,2011 年我国实现了太空飞船对接,在不久的将来我国自主研发的空间试验站将遨游于浩瀚的太空。

实施空间计划的关键之一是获得长寿命、低振动、高效率、轻质量的低温装置,因为太空是一个高真空、约 4K 的低温环境,但航天器配置的光学测量系统等温度往往高于背景温度,易干扰视场内的目标信号,影响测量效果。降低红外传感器等光学遥测系统的温度,既可减少本身热噪声也可屏蔽或排除视场外的热干扰,以提高探测精确度和灵敏度。测量生物磁和地磁的超导量子干涉仪必须在低温下操作,所以低温技术是空间技术不可缺少的条件,必须同步发展。现已在航空航天领域使用到的低温技术及设备包括空间低温传感器、超流氦制冷、辐射制冷器、金属氢化物作热压机的吸收式节流制冷器、斯特林制冷机、脉管制冷机、逆布雷顿制冷机、磁制冷和 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 稀释制冷机等。

经过半个多世纪的稳步发展,空间低温制冷技术已日趋成熟。迈入 21 世纪后,人类的目光将不再停留于登月飞行或地球空间站了,而是希望能走向更远、更深的太空。美国航空航天局(NASA)早就开始了火星登陆计划,去探寻火星上的生命以及太阳系的诞生、演化史。诸如此类的宏大计划,又使得低温技术面临新的挑战。燃料储存、低温制冷、低温液化、零重力下的液体控制等各项技术不能再被单独地分割开来,被动式制冷技术和主动式制冷技术也不再“对立”。只采用被动式制冷,系统过于庞大;只采用主动式制冷,会产生振动及不稳定现象,所以今后的制冷系统应该是既有被动式制冷,又有主动式制冷,通过两者的最优化配置来实现一个长寿命、高可靠性、发射质量轻的系统。

3. 低温技术在生物医学领域的应用

在过去的几十年中,低温技术已用于医药、生物和食物的处理,将所有生物材料中的水分变为冰。快速冷冻与逐渐冷冻相比,通常能生成良好结构的小晶体而且较少破坏细胞结构。为了使保存的食品新鲜良好,一些冻干的食物,在真空脱水之前用液氮喷雾器来急速冷冻。

在人工辅助生殖医疗中，经常采用液氮保存精子和受精胚胎。

为外科手术提供组织和器官移植的低温储存库也需要使用低温技术。在低温外科手术中，人们已经使用液氮冷冻的尖端或插管来杀死或移去神经细胞、部分溃疡以及肿瘤。小心控制尖端温度和使用的时间，可用来除去健康器官附近的病害组织，而不损害健康器官。冷冻的处理过程可以马上止血，因此手术后的流量也大大降低。

核磁共振成像 (MRI) 可以使 CT 显示不出来的病变显影，磁共振成像的最大优点是它是目前少有的对人体没有任何伤害的安全、快速、准确的临床诊断方法。MRI 是利用收集磁共振现象所产生的信号而重建图像的成像技术，超导型 MRI 具有场强高、功耗小 (磁体基本无功耗)、磁场均匀稳定和系统信噪比高等优点，MRI 中的超导磁体一般需要通过低温技术冷却到液氮温度 (4.2K)。

4. 低温技术在其他领域的应用

在现代移动通信行业，需要低温制冷机来冷却超导滤波器到液氮温度，在使用超导滤波器系统的移动通信小区内，手机辐射功率更低、通话质量更好、通信系统的灵敏度更高。

在材料回收领域，低温粉碎可用于废电路板的回收；废旧轮胎一般采用液氮使橡胶玻璃化粉碎，实现与金属轮毂分离；手机屏分离可以采用 -150°C 的低温冷冻分离机。

量子计算机的实现原理是利用量子的纠缠态进行计算，而量子纠缠态是非常容易消失的，消失的过程称为退相干。退相干和环境关系很大，包括温度场，电场磁场等，所以极低温属于一个必备条件。

现代的大科学研究装置中同样离不开低温技术，上海同步辐射光源需要超低温和高真空技术，欧洲粒子物理研究所 (CERN) 的大型强子对撞机 (LHC) 需要将磁体冷却到 -271°C ，国际热核聚变实验堆 (ITER) 中也需要大型高真空系统、大型液氮、液氦低温系统等。

1.3 低温学术组织及资源

1. 低温相关的学术组织

制冷和低温是紧密联系的，因此一般与低温相关的学术组织也由制冷学会组织和管理，例如国际制冷学会 (www.iifir.org) 的 Section A 就主要涉及 Cryology 和 gas processing，其中 A1 负责 Cryophysics 和 cryoengineering，A2 负责 Liquefaction and separation of gases。同样，中国制冷学会 (www.car.org.cn) 每年也会组织低温技术相关的学术活动，中国制冷学会有六个专门委员会，其中第一专门委员会主要负责低温物理、低温工程以及气体液化及分离等。另外，美国国家标准局 (NIST) 提供可以查询低温工质热物性的网站 (www.nist.gov/srd)，NIST 低温技术研究组 (www.cryogenics.nist.gov) 也提供一些低温材料性质，低温制冷机设计和研究资料。美国低温学会 Cryogenic Society of America (www.cryogenicsociety.org) 网站上有各种低温相关学术资源。

2. 低温相关的学术期刊

低温学术期刊有英文和中文期刊，英文期刊有 Cryogenics、Cryobiology、Cell preservation Technology、International Journal of Refrigeration 等。中文期刊有低温工程、低温与超导、低温与特气、真空与低温、制冷学报及深冷技术等。图 1-3 为低温技术相关的学术

期刊。



图 1-3 低温技术相关的学术期刊

3. 低温相关的学术会议

低温学术会议主要包括国际会议和国内会议，主要的低温学术会议包括：

- (1) International Congress of Refrigeration (ICR)，每 4 年举行一次；
- (2) International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR)，每 5 年举行一次；
- (3) International Cryocooler Conference (ICC)，每 2 年举行一次（偶数年份）；
- (4) Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC)，每 2 年举行一次（奇数年份）；
- (5) International Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference (ICEC/ICMC)，每 2 年举行一次（偶数年份）；
- (6) International Conference on Low Temperature Physics，每 3 年举行一次；
- (7) Applied Superconductivity Conference (ASC)，每 2 年举行一次（偶数年份）；
- (8) 亚太液化天然气国际会议，每年举行一次；
- (9) 全国低温工程大会，每 2 年举行一次（奇数年份）；
- (10) 全国低温物理学术讨论会，每 3 年举行一次。

第2章 获得低温的方法

2.1 概 述

在地球上已知的最低温度位于南极，可测到的最低温度约为 -90°C ，人类从利用天然冷源到人工获得低温经历了漫长的时间。随着生产和科学技术的进步，获得低温的方法逐渐增多，基本可分为物理方法和化学方法，而绝大多数制冷方法属于物理方法。广义上讲，任何一种吸热过程都可以作为降温方法，以下对各种常见的降温方法进行简单介绍。

1. 相变制冷

相变是指物质集聚态的变化。在相变过程中由于物质分子重新排列和分子运动速度改变，就需要吸收或放出热量，这种热量称为相变潜热。物质集态变化过程的特性与物质的原始状态及转换条件有关，因此相变过程有不同的形态。相变制冷就是利用某些物质相变时的吸热效应，相变制冷总括起来有下列几种：

(1) 熔解：固体物质在一定的温度下转变成液体称为熔解（也称融化）， 1kg 这种物质在定温下熔解所需的热量称为熔解热。例如，冰融化时的吸收热为 334.9kJ/kg 。

(2) 升华：当压力低于三相点压力时，物质被加热可直接由固态转变成气态，这种现象称为升华。例如：干冰制冷就是利用这种现象。

(3) 汽化：液体转化为蒸汽称为汽化，它包括两个情况，即蒸发和沸腾。蒸发是在某种温度下液体外露界面上的汽化过程，当外界压强高于饱和蒸汽压力时液体蒸发。液体沸腾时，蒸汽小部分由液体表面产生，大部分来自液体内部。此时液体内部生成许多蒸汽泡，并迅速上升突破液体表面进入气相空间中。外界压强等于饱和蒸汽压力时液体沸腾，这时的温度称为沸点。

在现代制冷技术中，主要利用制冷工质在低压下的汽化过程制取冷量。这种汽化过程通常在蒸发器中以沸腾方式进行，但习惯上称它为蒸发过程而不称作沸腾过程，就如同不把蒸发器称作沸腾器一样。在制冷技术中常见的蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷、吸附式制冷和蒸汽喷射式制冷本质上都属于液体汽化制冷。

2. 气体膨胀制冷

气体在一定的初态（压力与温度）下通过膨胀机膨胀时，它的温度会降低。这种制冷方法常用在气体分离、气体液化技术和气体制冷机中。在小型回热式低温制冷机中，斯特林制冷机采用了气体等温膨胀制冷，逆布雷顿制冷机采用了气体绝热膨胀制冷。

3. 气体绝热节流制冷

非理想气体在转化温度以下，在一定的初态（压力与温度）时通过节流阀绝热节流，它的温度会降低，甚至还会液化。气体绝热节流是一个节流前后焓相等的过程，气体绝热膨胀是一个等熵过程。理论上讲，气体绝热节流不如气体绝热膨胀降温效果好，但是气体绝热节流具有结构简单、成本低、可靠性好，以及可直接实现液化的优点。

4. 绝热放气制冷

容器中一定量的气体通过控制阀向环境介质绝热放气（或用真空泵抽气）时，则残留在容器中的气体将要向放出的气体做推动功，消耗它本身的一部分热力学能，因而温度降低。G-M 制冷循环、SV 制冷循环和脉管制冷机就是利用这一原理工作。

5. 磁制冷

磁制冷的研究可追溯到 100 多年前。1881 年 Warburg 首先观察到金属铁在外加磁场中的热效应，20 世纪 20 年代 Debye 和 Giauque 在理论上提出了可以利用磁热效应（Magneto-Caloric Effect, MCE）进行制冷。

物质由原子构成，原子由电子和原子核构成。电子有自旋磁矩，还有轨道磁矩，这使有些物质的原子或离子带有磁矩。磁性材料的离子或原子磁矩在无外加磁场的情况下是杂乱无章的，当外加磁场后（又称磁化，Magnetization），离子或原子的磁矩会沿外磁场方向排列，使磁矩变得有序，从而减少材料的磁熵，磁性材料向外界放热；当降低或去掉磁场（又称去磁，Demagnetization）时，由于磁矩又趋于无序，磁熵增加，又要从外界吸收热量。也就是说，磁性材料磁化或去磁时，热力学状态发生了改变。因此，磁热效应就是指磁性材料在等温磁化时向外界放出热量，而绝热去磁时温度降低并从外界吸收热量。

6. 氦稀释制冷

为了获得 $(0.04 \sim 0.1)\text{K}$ 的低温或 1mK 的超低温，常利用氦稀释制冷方法。这种方法是利用 ^3He - ^4He 溶液在低温下的特性制冷，它的基本原理是当 ^3He 与 ^4He 的混合液在 0.87K 温度以下时分为两层，上层为 ^3He 浓溶液，下层为 ^4He 浓溶液，如果用某些方法提取下层 ^4He 溶液中所含的 ^3He 原子，则 ^3He 原子由上面的 ^3He 浓溶液溶解于下层溶液，并产生吸热反应而降低温度。它具有连续制冷、操作方便、稳定可靠、不用磁场就可获得毫开（ mK ）级低温的特点，为低温物理学研究提供了便利。现已制成能获得约 0.005K 低温的间歇式稀释制冷机，在连续制冷系统中可达到 0.01K 。

7. 涡流制冷

气体涡流制冷是一种借助涡流管的作用使高速气流产生旋涡，并分离出冷、热两股气流，而利用冷气流获得冷量的方法。涡流管是一种结构极为简单的制冷装置，它由喷嘴、涡流室、分离孔板及冷、热两端管子组成。高速气流由进气导管导入喷嘴，膨胀降压后沿切线方向高速进入阿基米德螺旋线涡流室，形成自由涡流，经过动能交换分离成温度不等的两部分。其中心部分动能降低变为冷气流，边缘部分动能增大成为热气流，且流向涡流管的另一端。这样涡流管可以同时获得冷热两种效应，通过流量控制阀调节冷热气流比例，并相应改变气流温度，可以得到最佳制冷效应或制热效应。

涡流管具有结构简单、起动快、维护方便、工作极为可靠、一次性投资和运行费用低等优点。尽管其热效率较低，但在国外仍然得到广泛的应用。如美国 NASA 研制成功了以风洞排气为工作介质的涡流管空调系统（制冷量达 281.35kW ）。我国也有采用涡流管制冷的天然气井口脱水装置，对于保证天然气输送管网的正常工作、改善井场工作和生活环境发挥重要作用。应用回热原理及喷射器降低涡流管冷气流压力，不仅可以获得更低的温度，还可以提高涡流管的经济性。根据此原理制成的涡流管冰箱能够获得 -70°C 以下的低温，若采用多级涡流管还可以获得更低的温度。