

温度计量测试丛书(二)

低温技术

DIWEN JISHU

张开达 张长贵 编著
戴 乐 山 审



计 量 出 版 社

温度计量测试丛书 (二)

低温技术

张开达 张长贵 编著 戴乐山 审

计量出版社

1985·北京

内 容 提 要

本书以阐述低温实验技术中的基本原理与实验方法为主,介绍了典型、通用的实验装置,给出了一些常用低温液体的主要技术参数及图表,可供从事计量、物理、材料、制冷、化学、生物及医疗等有关低温实验工作的科技人员参考,也可作为大专院校有关专业选修课的参考书。

温度计量测试丛书(二)

低 温 技 术

张开达 张长贵 编著 戴乐山 审

责任编辑 窦绪昕

—*

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 787×1092 1/32 印张 5 1/4

字数 123 千字 印数 1—10 000

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

统一书号 15210·396

定价 1.05 元

《温度计量测试丛书》编委会

主任委员 王良楣

副主任委员 凌善康

委 员 (以姓氏笔划为序)

石质彦 师克宽 朱国柱 陈锡光

陈守仁 汪时雍 张立儒 周本濂

赵 琪 崔均哲 秦永烈 窦绪昕

戴乐山

《温度计量测试丛书》出版前言

本丛书是根据计量出版社关于按学科分类组编丛书的总体规划，由温度计量测试丛书编辑委员会配合计量出版社组织编写的。

党的“十二大”确定了到本世纪末力争使我国工农业总产值翻两番的宏伟目标，并决定把农业、能源、交通、教育、科学作为经济发展的战略重点。计量是现代化建设中一项必不可少的技术基础，在计量测试科学领域中，温度的计量与测试又是一个非常的重要的方面。温度是一个基本的物理量，它与其它许多物理参数有着密切的关系，因而在工农业生产、科学研究和日常生活中，都离不开温度的准确测量和精密控制。广泛传播温度及温度测量仪表的基本知识，介绍国内外测温技术的先进经验，交流各项成果，培养技术人才，促进各项工作，为早日实现四个现代化创造条件，这就是组编本丛书的宗旨。

应该看到，目前，在基层企业中，受过计量测试训练的技术人员严重不足，很多职工渴望增长专业知识和提高操作技能，尤其是近年来，大批青年技术人员参加工作，这是发展计量测试科学的一支新生力量，但是他们深感知识不足，迫切需要系统地学习一些计量基础知识，熟悉各类仪器仪表的原理、特性、检定和使用方法，以便更快地掌握专业技术，提高生产效率。这套丛书主要是针对这部分人员编写的，当然也可作为温度计量短训班的教材及中等学校师生有关工程技术人员和科研工作者的参考书。

本丛书计划分成16分册，每一分册独立地、深入浅出地加以阐述，将陆续出版与读者见面。本丛书在组编过程中得到广大计量工作者和工矿企业技术人员的关心与支持。在此一并致谢。丛书编委会热忱地期望我国广大科学工作者共同促进本丛书的编辑出版工作，努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

限于我们的经验和水平，本丛书可能存在不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

温度计量测试丛书编辑委员会

序 言

低温技术是一门古老而又不断向前发展的学科。从氮气被液化的1878年到现在已经有一百多年的历史，即使从1908年卡默林·昂尼斯将氮液化算起也已经有七十多年了。但在五十年代以前，低温仪在为数不多的几个实验室里作为揭示物性的手段。直至五十年代末，液氧、液氢作为火箭燃料先后成为现实；同时由于第二类超导体的发现，使超导技术的大规模应用成为可能，从而促进了低温技术的新发展，使之成为尖端科学和国民经济建设中不可缺少的一门新学科。目前，低温已广泛地用于物理、超导技术、石油化工、宇航工程、原子能科学和医学等许多科学技术领域；与此同时，低温技术也已迅速地渗透到计量科学——这门被人们誉为科技与工农业生产中“眼睛”的学科。

我们受“温度计量测试丛书”编委会的委托，编写了这本《低温技术》。根据编委会的要求，本书着重于讨论低温技术在实验中的应用，因此也可定名为《低温实验技术》。按照“丛书”的特点，我们在编写中力求做到深入浅出，避免高深的数学运算。

全书共分五章：低温液体及其使用、低温获得、低温温度控制、低温恒温器和真空技术。低温温度测量已列入“丛书”第十三分册，故本册不作介绍。本书第二、第五两章由张长贵编写；其余均由张开达所撰。全书由张开达合稿。

周世勋教授和戴乐山副教授对本书的编写给予了热情的支持与帮助，借此谨表衷心的感谢。

在编写过程中,还得到复旦大学低温实验室同志的协助,在此一并致谢。

由于笔者水平有限,书中不妥之处在所难免,希读者不吝指正。

编 者

一九八二年五月于上海

目 录

第一章 低温液体及其使用	(1)
第一节 低温液体	(1)
一、液态氢.....	(1)
二、液态氦.....	(9)
三、液态氖.....	(12)
四、液态氮.....	(13)
五、液态氧.....	(15)
六、液态空气.....	(16)
第二节 实验用杜瓦瓶	(18)
一、玻璃杜瓦瓶.....	(18)
二、金属杜瓦瓶.....	(21)
第三节 低温液面指示器	(22)
一、静液压液面指示器.....	(23)
二、电容液面指示器.....	(23)
三、电阻液面指示器.....	(25)
第四节 贮存与输液	(28)
一、绝热原理.....	(28)
二、贮存容器.....	(32)
三、输液管.....	(35)
四、输液.....	(37)
第二章 低温的获得	(40)
第一节 热力学基础	(40)
一、气体状态方程.....	(46)
二、热力学第一定律.....	(43)

三、卡诺循环.....	(50)
四、热力学第二定律.....	(54)
五、温熵图.....	(55)
第二节 等焓膨胀.....	(57)
一、焦耳-汤姆逊效应.....	(57)
二、焦耳-汤姆逊系数.....	(59)
第三节 等熵膨胀.....	(63)
一、原理.....	(63)
二、膨胀机.....	(65)
第四节 克劳特循环.....	(69)
第五节 逆向斯特林循环——液氮机.....	(74)
一、循环原理.....	(74)
二、机械结构.....	(76)
三、非利浦型液氮机.....	(76)
第六节 超低温获得.....	(80)
一、 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 稀释制冷.....	(80)
二、磁冷却.....	(84)
三、帕末朗丘克冷却.....	(86)
第三章 低温温度的制控.....	(88)
第一节 正常沸点以下的低温液体温度的控制.....	(89)
一、蒸气压的控制方法.....	(89)
二、蒸气压的监视.....	(92)
三、液体消耗量的计算.....	(93)
四、减压法的极限温度.....	(94)
五、减压降温的步骤.....	(98)
第二节 中间温度的获得与控制.....	(98)
一、绝热法.....	(98)
二、漏热法.....	(99)
三、气冷法.....	(100)
四、退吸附法.....	(101)

五、致冷机冷却	(103)
第四章 低温恒温器	(106)
第一节 恒温器的常用结构	(106)
一、样品腔与测量装置的支持管	(106)
二、电流引线	(107)
三、恒温器的密封	(109)
四、恒温器内的热开关	(111)
第二节 低温恒温器的设计与分析	(112)
一、减压法恒温器: 测量电阻-温度曲线	(113)
二、气冷法恒温器: 测量电阻-温度曲线	(113)
第三节 低温恒温器实例	(118)
一、测量固体比热用的低温恒温器	(118)
二、测量固体导热系数用的低温恒温器	(122)
三、分度用的低温恒温器	(126)
第五章 真空技术	(131)
第一节 真空的获得	(131)
一、机械泵	(132)
二、扩散泵	(133)
三、抽气速率	(135)
四、超高真空的获得	(138)
第二节 真空测量	(139)
一、压缩真空计——麦克劳压力计	(139)
二、热偶真空计	(141)
三、热阴极电离真空计	(141)
第三节 检漏	(142)
一、压缩方法	(143)
二、热偶真空计法	(143)
三、电离真空计法	(144)
四、质谱检漏仪	(144)
附 录	(148)

附表一	常用材料的电阻率	(148)
附表二	常用材料的导热系数	(146)
附表三	金属的导热系数	(149)
附表四	常用材料的比热	(151)
附表五	铜的摩尔热容	(152)
附表六	常用材料的热膨胀率	(153)
附表七	焓单位换算表	(154)
附表八	功、热、能单位换算表	(154)
主要参考资料	(155)

第一章 低温液体及其使用

温度是表征物体冷热程度的一个物理量。究竟冷到什么样的温度才称为低温呢？从物理学角度来讲，低于德拜温度才称为低温。因为在德拜温度以下，晶格的热振动已开始被扼制。由于各种物质的德拜温度不同，所以低温的温区也就各不相同。从制冷技术的角度来讲，低于 111.7 K 才称为低温。因为，它是天然气的液化点。然而，在现代科学技术中，通常是将液态氧沸点以下的温度称为低温，因为，几乎所有的低温实验都是在液氧温度以下进行的；而且，在液氧温度以下的实验技术有许多共同性。

目前，在大多数的低温实验中均采用低温液体作为低温源。所谓低温液体就是沸点低于 90K（氧的沸点）的液化气体。试样或装置只要浸泡在低温液体中，就可进行各种低温测试工作。由于几乎所有的低温实验都应用低温液体，所以我们先来讨论一下它们的性质与使用方法。

第一节 低温液体

低温液体有：液态氢、液态氦、液态氖、液态氮、液态氧和液态空气等。表1-1列出了它们的主要物理参数。

下面逐个介绍低温液体的性质和用途。

一、液 态 氮

液态氮在低温技术和低温物理中有着非常特殊的地位。在所有气体中，它的临界温度和沸点最低，利用它可以获得

表1-1 低温液体

名称	沸点 (K) (标准大气压下)	密度 (g/cm ³)	潜 热*		临界 温 度 (K)
			(J/g)	(J/cm ³)	
液 空 (~79% N ₂ 20% O ₂)	78.8	0.87	213	185	132.42 132.52
液 氧	90.188	1.14	213	243	154.8
液 氮	77.344	0.81	199	162	126.1
液 氖	27.102	1.21	86.1	103	44.4
正常氢	20.397	0.07	451	31.6	33.25
平衡氢	20.28	0.07	446	31.2	33.0
液氦 ⁴ He	4.215	0.125	20.3	2.54	5.199
液氦 ³ He	3.20	0.059	7.5	0.44	3.55

*实际计算中常用每小时蒸发1升液体(只计算潜热)需要的热量瓦数即
0.7 W

**气体的温度高于临界温度时,任何使用压缩的方法都不能使它转变为液

***在相应的外加压力下凝固。

的 物 理 参 数

点**	三 相 点		气 (15°C)	从沸点到 280 K	比 热 (cal/g·K)	介电常数
	压 强 (大气压)	温 度 (K)	压 强 (mmHg)	液 体 积 比 气体的焓变ΔH (J/g)		
37.25~	60.15		725			
37.17						
50.1	54.361	1.10	869	174	1.49	0.406
23.5	63.146	93.9	704	217	1.44	0.48
26.2	24.561	324.8	1410	263		0.44
12.8	13.956	54.0	824	3428	1.23	
12.7	13.81	52.7	—	3720		2.4
2.26	(1.788	29.96)*** 大气压	763	1425	1.048	1.0
1.167	(0.5	30 大气压	440		1.057	

1升液体的潜热/3600 s, 具体数值如下, 液氮: 45 W, 液氢: 9 W, 液氧:

态。与临界温度相对应的液化压强称为临界压强。

mK 级的超低温，是目前主要的低温源。同时，液氦有着一些和其它液体极不相同的奇异性质。例如，它在常压下永远不会凝固，没有三相点，尤为奇妙的是能在宏观上显示“量子性质”——超流现象。因此液态氦被称为“量子液体”。在近代科学技术和基础理论研究中都占有极其重要的地位。

氦是惰性气体，有二种同位素，按其原子量的不同，分别称为 ^4He 和 ^3He 。 ^4He 的正常沸点为4.2K， ^3He 的正常沸点为3.2K。在大气中， ^4He 的含量约为 $1/10^6$ ，而 ^3He 的含量仅约为 $1/10^{12}$ ，所以，若无特殊说明，通常说的液氦是指液 ^4He 。

(一) 液态氦 (^4He) 有超流动性

液态氦 (^4He) 是一种流动性极大的无色液体。它的最奇特的性质是具有“ λ ”相变。当

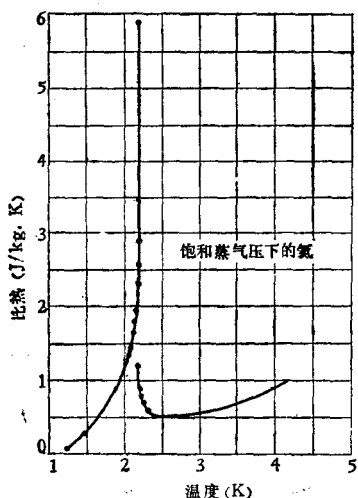


图 1-1 液态氦的比热

人们把液氦的温度降到 2.17K 附近时，发现液氦的各种性质都有异常的变化，例如比热、密度等，在 2.17 K 处都有突变，如图 1-1、1-2 所示。这种突变曲线的形状很象希腊字母“ λ ”，因此就叫做“ λ ”相变。根据热力学原理， λ 相变属二级相变。“ λ 点”所处的温度为 2.17 K。温度在 λ 点以上时，液氦的性质是正常的，称为 He-I； λ 点以下，出现超流现象，称为 He-II。现将它的主要特性简述于下：

1. 爬行膜现象：邓特和门德尔逊首先发现了一个引人

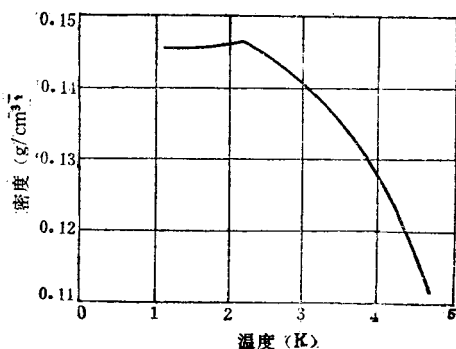


图 1-2 液态氮在饱和状态下的密度

入胜的现象，即当温度降到 2.17 K 以下时，He-II 会自动地顺着器壁以膜的形式爬上来。如果整个容器壁都处在 λ 点以下，则氮膜可顺着器壁爬出容器（图 1-3）。经测量，氮膜的爬行速度竟达到每秒 30cm 以上。

2. 粘滞系数接近于零：1937年，卡皮察做了测量液氮粘滞系数的实验。他把两个光滑的玻璃盘合成宽仅 $0.5 \mu\text{m}$ 的狭缝，让液氮在狭缝中流过。实验发现，在 λ 点以上，液氮几乎不能通过狭缝；而当温度降到 λ 点以下时，液氮就能迅速通过。经测定，He-II 的粘滞系数

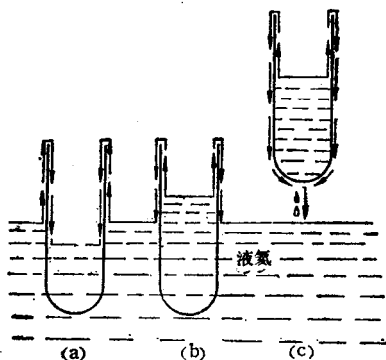


图 1-3 超流氮膜