

最新

低温制冷技术

陈国邦 等著

机械工业出版社

最新低温制冷技术

陈国邦 桥本巍洲[日] 郭方中 著
周远 吴沛宜 张亮 李瑞

机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

内 容 介 绍

本书根据最近十年来国内外低温制冷机的研究进展,介绍了当代制冷技术的成就和水平;叙述了低温制冷技术在现代科学技术、工业和民用等领域的应用前景;对目前正在开发的新型制冷机,例如磁制冷机及磁性材料的应用、分置式斯特林制冷机、低功率塑料制冷机、脉冲管制冷机、吸附式制冷机以及微型节流制冷机的理论和实验,做了全面的论述和深入的讨论;同时也对新型低温制冷机的研究方法、工艺特点和发展规律进行了探索。

本书内容丰富、信息性强。可供从事低温制冷技术研究的科研工作者、工程技术人员阅读,也可供高等院校制冷与低温专业的研究生作为选修课教材,以及作为高年级大学生的教学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

最新低温制冷技术 / 陈国邦等著. —北京: 机械工业出版社, 1994.6

ISBN 7-111-03989-0

- I. 最…
- II. 陈…
- III. 低温—制冷—技术
- IV. TB66

出 版 人: 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)
责任编辑: 蒋有彩 陆叶 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张媛
封面设计: 郭景云 责任印制: 路琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年6月第1版·1994年6月第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·14印张·365千字

0 001—3 500 册

定价: 18.00 元

代 序

在当今科学技术的发展中，低温技术常常起着关键的作用，这已是众所周知的。在科学实验、仪器分析、信息技术等方面，则常需用各种小型低温制冷机。例如在信息科学技术方面，为了能够探测微弱的远红外辐射或电磁信号，需用 100K 以下直至液氮温度的低温探测器；为了高速传递和处理大量的微弱信号，需要采用低温（及超导）电子学技术以极大地降低噪声水平，降低电子元、器件的损耗，提高集成化规模等。

仅将传统低温制冷机的结构参数缩小来实现小型化，并不能达到实用目标。近年来，针对空间和地面上各种应用场合下需要机械结构轻巧、运行可靠而热工性能指标要求高的特点，已研究发展了几种新型低温制冷机。为了提高和完善其性能，以求付诸实用，有必要深入了解它们的工作机理（这种研究已突破低温制冷技术的传统理论框架），创新与完善工艺条件，任务是艰巨的。但是，出于信息技术发展的需要，任务又是急迫的。国内、外的低温制冷机研制者都在努力着，并取得不小的进展。因此，本书的出版对于低温技术工作者和关心低温技术发展的人们是很有价值和及时的。

这本书是经浙江大学陈国邦教授和东京工业大学桥本巍洲教授倡议，由陈教授主编，邀请了七位专家撰写的。这些专家们活跃在有关的研究领域中，或开拓了新方向，或深化了机理研究，改进了工艺设计，因此在论述各种新型制冷机的研究进展中有一定的独到见解。阅读这些论述，既可了解有关技术的原理和发展概况，又可能得到某些启发，有助于读者形成自己的创见。

本书的编写包含了撰稿人和主编两年多的努力，其中包括了长期致力于日中友好活动的桥本巍洲教授的贡献。张祉佑教授又

对全书原稿做了原则性的和具体仔细的审阅，提供了中肯的修改意见。我衷心祝贺这本书的出版发行，并对各位专家的辛勤奉献表示敬意。

洪朝生

1993年6月

于中国科学院低温技术实验中心

序 言

1990年，浙江大学陈国邦教授应日本学术振兴会的邀请，作为客员教授来东京工业大学我的研究室工作了三个月。在此期间，陈教授提出由日本和中国两国研究者共同编写本书的计划。

从1908年卡麦林-翁纳斯（H.K. Onnes）液化氦气成功，以及随后的超导电性的发现，低温工程带着辉煌的成果走过80多年的发展历程，进入了如今的青年时期。在日本，磁悬浮列车、核磁共振成像仪、超导发电机等大型金属超导磁体的应用器械，已经实用化或已进入实用化的研究阶段。最近，约瑟夫逊效应计算机等新的研究也进行得相当活跃。

在这种活跃的研究形势下，为了有效地产生和保持金属超导体的低温环境，改进低温制冷技术和提高低温制冷效率已成为推广超导技术的必不可少的基本要求，这也是当今低温工程中最重要研究课题之一。本书就是以开拓未来制冷领域新技术及提高制冷效率的新方法为中心，以图能够部分地回答这个时代对低温工程的要求。

我本人从事把具有高熵密度的稀土磁性材料应用于低温工程的研究已有近13年的经历。之所以从事此研究课题，主要是由于大学的教育工作。十多年前我开始兼任应用物理和能源科学这两个专业的教官。我本来的专业是磁性物质的相转变研究，这个“兼任教官”成了我进行“磁性物质应用”研究的出发点，促使我考虑如何把磁性物质与能量转变相联系。哪个领域能成为研究对象？哪些应用是可能的？所得到的结论是磁性物质在低温工程中的应用。因为从理论研究者的眼光来看，我感到在制冷技术领域，对新型功能材料的有效利用还留有很大的机会和很广的天地。

虽然还没有得到完全满意的成果，但在从此以后的“磁制冷”、“磁性蓄冷材料”的研究中，有幸地得到了许多我个人认为是非常感兴趣的结果。这次受陈教授的邀请，担任本书第一、二章的执笔，能把这些研究结果在中国发表，使我感到十分荣幸。还有，第二章的一部分有关磁性蓄冷材料的内容是由李瑞君担任写作的。李瑞君来自浙江大学，从进修生到研究生，在我的研究室工作了六年半，取得了理学博士学位，成绩显著，是非常值得喜悦的。

参加本书的写作，令我感到十分高兴，不仅仅是因为自己的研究能够有机会对世间起到一定的作用，并且还有进一步的理由。在45~50年前，我曾经在中国东北的长春市，随着做技术工作的父亲度过了小学时代。长春的风土人情，对我少年时期的成长产生了很大的影响。对我个人来说，在中国的体验确实已成为我人生基础的一部分。从这个意义上来说，希能允许我把长春作为心中的第二故乡。对这次能有为中国贡献微力的机会，从心中感到有幸和光荣。这也是我欣然接受参加本书写作的重要理由。

本书还有许多第一流的从事低温工程研究的中国专家参加写作，衷心祝愿本书能被充分地参考利用，能为中国低温工程的发展起到极大的作用和影响。

桥本巍洲
1992年2月
于东京工业大学

前 言

低温制冷机在现代科学技术的许多部门获得重要的应用。因为许多科学仪器在低温条件下会有更好的性能和效率，更高的运行速度或灵敏度。有些测量元件的工作机制，就是利用物质在低温下存在或发生的特有现象，它们必须冷却到某一特定低温区才能正常工作。例如空间技术中的光电遥感元件的冷却，电子工业中超洁净低温冷凝真空泵，超导核磁共振成像装置中超导磁体的冷却，都需要封闭循环的低温制冷机。

几十年来，人们在开发符合要求的制冷系统、改善制冷机的关键部件以及开发新型低温制冷机方面，做出了很大的努力。现在，吉福特-麦克马洪循环制冷机（G-M）和斯特林循环制冷机（St）在空间技术和现代工业中得到广泛应用。但是，对低温制冷机的高效率、长寿命以及更低制冷温度的要求，激励低温工作者以更高的热情和更大的兴趣进行新型低温制冷技术的研究，因而“空间低温技术”、“国际低温制冷机会议”等定期的国际性学术活动应运而生，低温制冷机已成为低温技术的一个重要分支。

最近十多年来，磁制冷机及磁性材料的应用、长寿命分置式斯特林制冷机、低功率塑料制冷机、脉冲管制冷机、吸附式制冷机、微型 J-T 制冷机以及热声制冷技术等，成为国内外研究者的热门课题。这些制冷机虽然大多还没有产品，有些甚至还处于原理性试验阶段，但显然是现代低温技术的巨大进展。为了满足我国国防建设和经济建设对信息技术的迫切要求，为了赶上国外工业国家的发展速度，其根本的办法只能是学习和独创相结合。本书力图在这一方面做一点贡献。因此，本书将不单纯介绍国外已发表的资料，而是注意将我国自己的研制成果和国外的研制成果结合起来，着重于基本研究方法和发展规律的探索，以此来引

发新思路。

本书的编著采用了中国科学院学部委员洪朝生教授的建议，作为高水平学术著作介绍低温制冷技术的新发展。这样，在内容上不再重复一般的基础知识。读者若需要可另看一些参考书籍，例如西安交通大学边绍雄主编的“小型低温制冷机”（机械工业出版社，1983年）和 G.Walker 编著的“Cryocoolers”（Plenum Press, 1983）。本书的编著还得到日本东京工业大学应用物理系桥本巍洲教授的支持。由于他在磁制冷和磁性材料应用方面做出了卓越成就，因此请他编写本书的一、二章书稿。

本书由陈国邦主编，著者分工如下：第一、二章桥本巍洲，其中第五节由李瑞执笔，第六节由陈国邦改写；第三章郭方中；第四章周远；第五章陈国邦；第六章吴沛宜；第七章张亮。第一、二章的日文书稿由李瑞翻译成中文。主编适当地将各章内容略加修改，使格式尽可能趋于一致，但也不强求一致，以免失去各作者的特点。

西安交通大学张祉佑教授对本书稿进行了仔细的审阅，并提出了宝贵的意见。本书的撰写过程还得到科学院低温技术实验中心、华中理工大学、西安交通大学和浙江大学有关领导和同行的关心和支持，特别是主编工作得到浙江大学能源系徐航、屠传经教授以及制冷与低温研究所李式模、黄志秀、郑建耀、张法高等老师的支持和鼓励。在日文的校译方面，还得到能源系王志勤和物理系焦正宽教授的帮助，在此一并向他们表示谢意。

由于水平有限，书中谬误和不妥之处在所难免，恳请读者指正。

陈国邦

1992年春节于杭州求是园

目 录

代序

序言

前言

第一章 磁性材料基础	1
第一节 热力学基础	1
一、内能和熵	1
二、热容和熵	3
第二节 磁性物质的基础	5
一、局域自旋	5
二、理想的顺磁性和自旋温度	9
三、理想顺磁物质的磁矩	11
四、磁熵	12
第三节 磁性物质的热容和熵	14
一、磁性相互作用和分子场近似	15
二、磁热容和磁熵	22
三、晶格系统及电子系统的热容和熵	25
四、具体例子	29
参考文献	33
第二章 磁性物质在制冷技术中的应用	35
第一节 磁制冷原理	37
一、磁制冷的原型—绝热去磁冷却	37
二、磁制冷循环	39
第二节 磁制冷的效率和特点	51
一、磁制冷循环的相互比较	51
二、磁制冷和气体制冷的比较	53

第三节 卡诺循环磁制冷机	57
一、卡诺循环磁制冷机的主要构成	57
二、卡诺循环磁制冷机	65
第四节 埃里克森循环磁制冷机	75
一、Brown 的室温磁制冷机	76
二、埃里克森循环磁制冷机的研究现状	79
第五节 磁性蓄冷材料	83
一、磁性蓄冷材料的必要性和选择条件	83
二、磁性蓄冷材料的候选物质	87
三、磁性蓄冷材料的比热容和热导率	91
第六节 磁性蓄冷材料在低温制冷机中的应用	97
一、斯特林循环制冷机	97
二、吉福特-麦克马洪循环制冷机	100
三、索尔文制冷机	108
参考文献	110
第三章 分置式斯特林制冷机	113
第一节 分置式斯特林制冷机循环	113
一、分置式斯特林制冷机的工作原理	113
二、分置式斯特林制冷机产品当前水平	117
第二节 冷端温度 70K 以上的斯特林制冷机回热器中的 实际过程	121
一、整机实验结果的启发	121
二、交变流动回热器实际流动过程的实验结果	124
第三节 分置式斯特林制冷机整机实际过程	133
一、整机系统中的压力分布	135
二、压力波形状	136
三、排出器的行程和相位角	137
四、冷腔温度对整机系统参数的影响	137
五、排出器安装质量的影响	140
六、排出器运动的中心点漂移	140

七、 $p-V$ 图的最优形状	142
八、排出器的位移波与输入运动信号之间的相位差	143
九、排出器驱动电机的电磁阻尼	144
第四节 分置式斯特林制冷机的网络模型	145
一、交变流动回热器的网络理论	147
二、分置式斯特林制冷机的整机网络	154
三、斯特林制冷机理论的发展	161
第五节 分置式斯特林制冷机的结构	165
一、接触式密封	169
二、非接触的间隙密封及其支承	171
三、结构的发展	176
第六节 整机的控制	181
参考文献	189
第四章 脉管制冷机	194
第一节 基本型脉管制冷机	194
一、工作原理	194
二、基本型脉管制冷机的热力学分析	195
三、可逆基本型脉管制冷机	198
第二节 带小孔和气库的改进型脉管制冷机	200
一、改进型脉管制冷机的流程和方案	200
二、改进型脉管制冷机原理若干分析模式	202
第三节 双向进气脉管制冷机的理论基础与初步实验结果	218
一、双向进气脉管制冷机的机理分析和初步实验	218
二、双向进气原理的实验分析	229
第四节 实用同轴脉管制冷机	233
第五节 改进型脉管制冷机的其他型式	238
一、压缩功耗散型脉管制冷机	238
二、液氮预冷式同轴脉管制冷机	242
三、热声驱动式改进型可逆脉管制冷机	244
参考文献	245

第五章 低功率塑料制冷机	249
第一节 塑料制冷机的特点及试验	249
一、超导电子器件的冷却要求	249
二、塑料制冷机的结构与试验	251
三、塑料制冷机中的压缩机	263
第二节 塑料斯特林制冷机的热力分析	269
一、理论制冷量	269
二、各种制冷量损失	272
三、设计计算	287
四、工质非理想性质对制冷机性能的影响	291
第三节 缝隙回热器实验研究	298
一、材料热性质的测定	299
二、改善缝隙回热器换热条件的试验	302
三、用填充剂增大回热器固体材料比热容的实验	309
四、增加缝隙回热器气相热容量的实验	313
参考文献	316
第六章 微型节流制冷机(MMR)	322
第一节 节流效应和节流制冷循环	323
一、节流效应	323
二、微型节流制冷机循环	325
第二节 微型化的换算法则	330
一、微型化及换算原则	330
二、紊流换热器换算法则	331
三、层流换热器换算法则	333
第三节 微型化技术	334
第四节 MMR 换热器的流动和传热特性	336
一、流动特性	336
二、传热特性	337
三、MMR 换热器的设计及优化	341
第五节 典型产品及应用举例	347

一、典型产品介绍	347
二、典型产品应用举例	349
三、其它产品或样品	351
第六节 节流制冷机工质	353
一、概述	353
二、纯质气体	354
三、混合气体	358
第七节 MMR 最近的进展	371
一、使用混合气体和快速冷却红外焦平面 阵列的 MMR	371
二、闭式循环 MMR	376
三、整体式低温集成电路组件和整体式电路板冷却器	378
参考文献	382
第七章 吸附式制冷机	386
第一节 吸附式制冷机的发展	387
一、高性能吸附剂的研究	388
二、部件性能的改进	389
三、提高压缩机的效率	390
四、提高整机的热效率	391
第二节 几种主要的吸附式制冷机	392
一、金属氢化物-氢制冷机	392
二、沸石分子筛-N ₂ O 制冷机	402
三、活性炭-N ₂ 制冷机	403
四、PCO-O ₂ 制冷机	412
五、吸附式制冷机的计算模型和参数优化	415
第三节 吸附制冷机的特点和应用前景	419
参考文献	429

第一章 磁性材料基础

随着超导应用技术的发展，人们对氦液化制冷机的效率、性能及功能化等提出了更高的要求。如果仍然象过去一样局限于以各种气体作为制冷工质，以铜和铅等功能材料作为气体制冷的蓄冷（回热）材料，是难以满足这些要求的。

最近，磁性材料作为新型的具有高熵密度的材料开始受到人们的重视。特别是通过外部磁场控制磁性材料的磁熵进行制冷的方式——磁制冷、以及利用磁熵急剧变化时产生的比热反常增大现象的磁性蓄冷材料，受到许多研究者的关注和期待。

与低温工程领域传统的研究对象——气体系统相比，磁性材料具有非常特异的性质。因此，本章首先对磁性材料应用于低温领域所需的热力学基础知识、磁性材料的热学和磁学特性以及与低温应用直接有关的热磁效应等进行适当介绍，然后叙述磁性蓄冷材料及其在低温制冷机中的应用。

第一节 热力学基础

一、内能和熵

依照热力学第二定律，对一个温度为 T 的系统等温地给以热量 ΔQ 时，系统中熵的变化被定义为

$$\Delta S = \Delta Q / T \quad (1-1)$$

从这个定义可以得到如下的启示：当通过某种适当的外场操作来改变固体的物理性质时，如果能够同时控制固体的熵的变化，便有可能利用这种固体进行热能和其它形式能量的变换。这就是利用固体进行热能和磁能变换的基本原理。因此，下面首先对热力学熵的概念与固体物理性质的关系，用经典热力学的知识从宏观

的角度加以考察。

如果以 $d\mathbf{x}$ 表示位移，则外力 \mathbf{f} 所作的微小功 δW 为：

$$\delta W = \mathbf{f} d\mathbf{x} \quad (1-2)$$

当然，象这样的功的定义并不只局限于力学系统。比如对气体系统加以压力，使其体积发生变化所作的功，也可以如此定义。与力学系统的不同点只是在于对“压力”（相当于力）和“体积变化”（相当于位移）必须引用系统整体的热力学平均量。

因此，与式（1-2）中的 \mathbf{f} 和 \mathbf{x} 相对应，如果用所谓的强度量和尺度量的热力学平均量 X 和 \mathbf{x} ，则热力学中的功一般就可抽象为

$$\delta W = X d\mathbf{x} \quad (1-3)$$

由式（1-3）可以得到对热力学系统施加热量 δQ 和外功 δW 时，内能的微小变化 dU 为

$$dU = \delta Q - \delta W = \delta Q - X d\mathbf{x} \quad (1-4)$$

由于 Q 和 W 的微小变化与变化的途径有关，不能以数学上的全微分形式记述，在这里分别记成 δQ 和 δW 。同时，微小的热量 δQ 与可以用全微分形式记述的熵的微小变化量 dS 之间，有如下的关系

$$\frac{\delta Q}{T} \leq dS \quad (1-5)$$

式中不等号对不可逆过程成立。

对于理想的可逆过程，式（1-4）可以写为

$$dU = T dS - X d\mathbf{x} \quad (1-6)$$

对于磁系统和气体系统，式（1-6）分别为

$$dU = TdS + BdM \quad (1-7)$$

$$dU = TdS - PdV \quad (1-8)$$

亦即如果选择表 1-1 所示的强度量和尺度量，在热力学上就可以统一地把握这些不同的系统中所发生的现象。

表 1-1 一些物理系统的强度量和尺度量

物理系统	强度量 X	尺度量 x
气体系统	压力 P	体积 V
磁系统	磁感应强度 B	磁化强度 M ^①
电介系统	电场强度 E	电极化强度 D ^②

①、② 应取负值，即 $x = -M$ 或 $x = -D$ 。

二、热容和熵

一般地，熵是温度 T 、示强变量 X 或示量变量 x 的函数，以 $S = S(T, X)$ 或 $S = S(T, x)$ 的形式给出。由此，具有熵的系统，其热容定义可以由下列公式给出。首先以上两种形式的熵 S 全微分为

$$dS(T, X) = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_x dT + \left(\frac{\partial S}{\partial X}\right)_T dX \quad (1-9a)$$

$$dS(T, x) = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_x dT + \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)_T dx \quad (1-9b)$$

将上式的两边乘以 T ，可得

$$TdS(T, X) = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_x dT + T\left(\frac{\partial S}{\partial X}\right)_T dX \quad (1-10a)$$

$$TdS(T, x) = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_x dT + T\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)_T dx \quad (1-10b)$$

(*) 在各向同性的磁介质中，磁场强度 H （单位为 A/m ）、磁感应强度 B [单位为 $T = 1N / (A \cdot m)$] 以及磁化强度 M （单位为 A/m ）之间的关系为： $B = \mu_0 (H + M) = \mu_0(1 + X_m)H = \mu H$ ，其中 $\mu_0 = 12.5664 \times 10^{-7} H/m$ ，称为真空中的磁导率； $\mu = \mu_0(1 + X_m)$ 为磁介质的磁导率； $X_m = M/H$ 称为磁化率。由此对磁系统应有 $dU = TdS + \mu_0 HdM$ ，但是由于 X_m 值一般很小，考虑到公式的简化和实际应用中的方便，我们在式 (1-7) 和以后的讨论中都将用 $B = \mu_0 H$ 近似地代替 $B = \mu H$ 。