

第 2 版

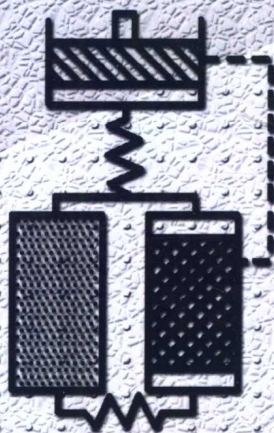
最新

低温制冷技术

Advanced Cryogenic Refrigeration Techniques

Second Edition by Chen Guobang

陈国邦 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

最新低温制冷技术

第 2 版

陈国邦 等著

著者：郭方中 张 亮 周 远 罗二仓 王如竹
陈国邦 王维扬 桥本巍洲（日） 李 瑞
陈光明 邱利民



机 械 工 业 出 版 社

本书是第2版,对初版书中的部分内容进行了调整和删除,增加了最新研究成果及应用。书中对目前正在开发的新型制冷机,例如长寿命斯特林循环制冷机、采用磁性蓄冷材料的4K温区的吉福特-麦克马洪循环制冷机、脉管制冷机、节流制冷机、吸附式制冷机、热声压缩机和热声制冷机、磁制冷机,以及空间制冷技术等理论和实验,做了全面的论述和深入的讨论;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工作的科研人员、工程技术人员阅读,可作为高等院校制冷与低温专业研究生的选修课教材,高年级大学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

最新低温制冷技术/陈国邦等著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2003.1

ISBN 7-111-03989-0

I. 最… II. 陈… III. 低温-制冷技术 IV. TB66

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第086319号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:蒋有彩 版式设计:冉晓华 责任校对:韩晶

封面设计:张静 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年1月第2版第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·18印张·480千字

6 501—10 500册

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

第 2 版代序

《最新低温制冷技术》第 1 版出版以来已经过了近十年时间。在这期间，小型低温制冷技术的研究和应用在国内外又取得了不小的进展。现在写出了第 2 版新稿，自然是值得低温技术工作者和关心低温技术应用的各界人士高兴的事。我对各位作者和主编的热诚和辛勤工作深感敬佩。

陈国邦教授在“第 2 版前言”中，对新版编写的指导思想和内容组织已作了很好的说明，其中包括加强了技术应用内容。现在我国低温技术界在努力深化技术研究、寻求开创新技术途径的同时，也已更加重视低温新技术的实用化问题，以求在解决我国社会和经济发 展需求上作出重要贡献。我祝愿在未来的十年里，低温技术界通过广泛接触社会各方面的潜在用户，热心介绍低温技术的潜力，探讨和开辟适合国情的多种用途，与多方面新技术工作者积极合作，坚持不懈地完善低温器件工艺和系统集成，开创出自主发展技术的光明道路。

洪朝生

2002 年 6 月 14 日

第 1 版代序

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

第 1 版序言

1990 年，浙江大学陈国邦教授应日本学术振兴会的邀请，作为客座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。对这次能有为我国贡献微力的机会，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，能为我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

第 2 版前言

我们在 20 世纪 90 年代初编著了《最新低温制冷技术》一书, 1994 年由机械工业出版社作为高技术书出版发行。该书是在中国科学院院士洪朝生教授推荐和指导下撰写而成的, 反映了 1985 年以来国内外低温制冷技术的研究进展和成就, 其中包括我国在低温制冷机研究中取得的显著成绩, 特别是以各作者承担的国家自然科学基金项目和 863 高科技项目的研究为基础, 介绍了进行低温制冷技术研究的入门方法和开发经验。该书的出版对于低温技术工作者和关心制冷技术发展的人们是很有价值和及时的, 出版后受到读者的欢迎和广泛引用, 期间曾于 1996 年重印一次。

近年来, 采用磁性蓄冷材料的 G-M 制冷机、长寿命的分置式斯特林制冷机及脉管制冷机的研究, 已经为高科技和现代工业提供新型的低温制冷机产品。例如: 4K 温度级的 G-M 制冷机在国外已形成系列商品, 新型的 4K 级脉管制冷机也已有产品供应。我国在低温制冷技术的研究中, 取得了令人瞩目的成绩, 如辐射制冷机已在空间技术中成功应用, J-T 节流制冷器在红外器件冷却中获得了重要应用, 特别是在脉管制冷技术的研究中, 若干成果达到国际先进水平, 在国际学术界占有一定的地位。有些新型的制冷方法, 例如吸附式制冷、热声压缩机驱动的脉管制冷、采用混合工质的微型节流制冷, 以及采用光磁效应的制冷技术等, 虽然目前尚处于原理性研究阶段, 但它们的提出和开发显然是现代低温制冷技术的巨大进展, 这些新机种已成为国内外研究者的热点课题。

面对新世纪低温制冷机研究的飞速发展, 本书的初版已不

能适应读者的要求。有许多最新研究成果及应用事例需要补充,有些过时的内容需要删除。因此,我们决定出版本书的第2版。再版书补充了大量新鲜内容,并将初版书中的部分内容进行调整、删除或缩减,使该书更加名符其实。由于吴沛宜教授在1994年不幸逝世,他在初版中撰写的内容将由他人继承。日本东京工业大学桥本巍洲教授已经退休多年,他与李瑞等合作的“磁性物质在制冷技术中的应用”一章中,磁性蓄冷材料及应用部分并入G-M制冷机一章,磁制冷机部分编排在再版书的最后一章。初版书中的第一章磁性材料基础和第五章低功率塑料制冷机被删除,其中具有缝隙回热器的斯特林制冷机部分并入再版书的第二章。考虑到再版书要增加热声制冷、空间制冷及混合气体制冷等内容,我们邀请了几位新作者,并将相应的内容重新进行了调整和分工。因此,初版书和再版书的内容及相应的作者将不完全相同。例如,初版书中的吸附制冷一章改由王如竹撰写,微型节流制冷由罗二仓撰写。自然,他们都继承和发展了初版书原章节的主要内容。再版书中,第一章低温制冷技术基础、第七章热声压缩机和热声制冷机、第八章空间制冷技术是新编写的内容。

再版书由陈国邦主编,著者分工如下;第一章陈光明(第一节)、陈国邦(第二、三节);第二章郭方中;第三章张亮(第一节和第三节)、李瑞(第二节);第四章周远;第五章罗二仓;第六章王如竹;第七章陈国邦;第八章王维扬(第一、四节)陈国邦(第二节)、邱利民(第三节);第九章桥本巍洲和李瑞。由于篇幅的限制,主编在编辑过程中将若干章节的书稿进行了剪裁,并将各章的内容略加修改,使格式尽可能趋于一致,但也不强求一致,以免失去各作者的风格。

本书的撰写过程得到中国科学院理化技术研究所、华中科技大学、上海交通大学、上海技术物理研究所和浙江大学等有关领导和同事的关心、支持和帮助,特别是得到浙江大学蒋宁、金

滔、甘智华和湯珂等的协助，在此一并向他们表示衷心感谢。由于水平和时间的限制，书中缺点和错误在所难免，热诚欢迎广大读者批评指正。

陈国邦

2002 年春节于杭州求是园

第 1 版前言

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

第 2 版代序

第 1 版代序

第 1 版序言

第 2 版前言

第 1 版前言

第一章 低温制冷技术基础 1

第一节 变质量热力学概要 1

第二节 用于低温制冷机的热力循环 19

第三节 低温制冷机的分类及应用 30

参考文献 40

第二章 斯特林循环制冷机 41

第一节 整体式斯特林制冷机 41

第二节 分置式斯特林制冷机 44

第三节 斯特林制冷机回热器的热声实质 71

第四节 斯特林制冷机系统的发展 83

参考文献 99

第三章 吉福特 - 麦克马洪循环制冷机 102

第一节 G - M 循环制冷机的工作原理 105

第二节 磁性蓄冷材料 117

第三节 液氮温区 G - M 循环制冷机及其应用 131

参考文献 143

第四章 脉管制冷机 147

第一节 基本型脉管制冷机 147

第二节 带小孔和气库的改进型脉管制冷机 153

第三节 双向进气脉管制冷机的理论基础与初步实验结果 173

第四节 实用同轴脉管制冷机 188

第五节 改进型脉管制冷机的其它型式 193

第六节 G - M 型脉管制冷机 200

第七节 Stirling 型脉管制冷机	220
参考文献	239
第五章 节流制冷机	249
第一节 混合工质节流制冷的工作原理	249
第二节 小型节流制冷机	284
第三节 微型节流制冷器 (MMR)	293
参考文献	313
第六章 吸附式制冷机	319
第一节 吸附制冷原理	319
第二节 吸附床与吸附式制冷系统设计	343
第三节 典型的吸附式制冷机	351
参考文献	366
第七章 热声压缩机和热声制冷机	370
第一节 热声振荡原理	370
第二节 驻波型热声压缩机	374
第三节 行波型热声压缩机	395
第四节 热声驱动的脉管制冷机	411
第五节 热声制冷机	424
参考文献	430
第八章 空间制冷技术	435
第一节 空间制冷技术的要求及特点	435
第二节 激光制冷机	438
第三节 半导体制冷	449
第四节 空间辐射制冷技术	464
参考文献	495
第九章 磁制冷机	499
第一节 磁性材料基础	499
第二节 磁制冷原理	512
第三节 磁制冷的效率和特点	526
第四节 卡诺循环磁制冷机	531
第五节 埃里克森循环磁制冷机	550
参考文献	559

第一章 低温制冷技术基础

第一节 变质量热力学概要

许多低温制冷机，例如，斯特林制冷机、吉福特-麦克马洪制冷机、索尔文制冷机、脉管制冷机等，它们的共同特点是在进行热力过程时，其工质不仅压力、温度等热力参数要发生变化，而且工质的数量也要发生变化。要分析研究这些系统的特性，必须了解变质量热力学的基本知识。

变质量热力学研究变质量热力系统热功转换的规律和方法。所谓变质量热力系统，是指热力系统在进行热力过程时，系统中工质的数量也同时发生变化。在这些系统中，工质的数量与压力、温度等参数一样，也是表征系统特性的一个参数，而且在某些情况下它是起主要作用的参数。

变质量系统热力学是工程热力学的延伸，自成体系，具有丰富的内容，本节仅介绍与低温制冷机研究有关的部分。

一、变质量系统基本方程

与常质量热力学一样，变质量热力学基本方程包括状态方程、质量方程、能量方程和过程方程。

1. 状态方程

变质量系统的状态方程为

$$f(p, V, T, m) = 0 \quad (1-1)$$

若工质为理想气体，则状态方程为

$$pV = mRT \quad (1-2)$$

式中， p 为压力； V 为体积； T 为温度； m 为质量。它们都是变量，仅 R 为通用气体常数。因此，其微分形式为

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} - \frac{dm}{m} - \frac{dT}{T} = 0 \quad (1-3)$$

2. 质量方程

所谓质量方程，是指进、出开口系的质量之差，等于系统中控制体内质量的增加，即

$$\frac{dm_{cv}}{dt} + \sum q_{m,o} - \sum q_{m,i} = 0 \quad (1-4)$$

式中， m_{cv} 为控制体内的质量； $q_{m,o}$ 为流出控制体的瞬时质量流量； $q_{m,i}$ 为流入控制体的瞬时质量流量。

对于经常用到的一维流动情况，而且在同一截面上质量流量均匀，同时考虑到工质密度 $\rho = f(p, T)$ ，则式 (1-4) 可写成

$$\frac{dq_m}{dx} = -A \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{dp}{dt} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dT}{dt} \right] \quad (1-5)$$

该式反映了通过微元控制体质量流量的变化与控制体中密度、压力和温度变化之间的关系。在低温制冷机中，工质温度下降是目的，要实现这一目的，除了要选择合适的工质，其密度变化规律尽可能符合式 (1-5) 的要求外，还要采取外部措施（例如脉管制冷机中的调相理论），使压力及流量随时间的变化符合式 (1-5) 的要求。

3. 能量方程

根据热力学第一定律，进出控制体的能量之差，必须等于控制体内部能量的增加以及对外作功之和，即

$$Q_{cv} = \frac{dU}{dt} + \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_o q_{m,o} - \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_i q_{m,i} + W_{cv} \quad (1-6)$$

式中， Q_{cv} 为单位时间内进入控制体的热量； U 为控制体中的热力学能； h 为工质比焓； c 为工质流速； g 为重力加速度； z 为高度； W_{cv} 为控制体单位时间内对外作的功。

若进出质量不止一股，则可分别对其求和。

4. 过程方程