



# 小型低温制冷机原理

陈国邦 汤珂 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 小型低温制冷机原理

陈国邦 汤珂 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了小型低温制冷机的基础知识,分析了理论低温制冷循环的热力学原理,探讨了各种实际损失对制冷性能的影响,给出了制冷机设计方法和典型实例,论述了若干新型低温制冷方法的开发研究进展,指出了小型低温制冷技术在现代科学技术和国防工业中的重要作用和应用要求。重点介绍了近20年来在开发采用磁性回热材料的液氮温区低温制冷机、小孔型脉管制冷机和采用热声驱动的脉管制冷机以及交变流动的低温回热器设计等新型低温制冷技术方面所取得的最新成就,展示了小型低温制冷技术的发展前景。

全书共分6章:第1章是小型低温制冷机导论;第2章介绍吉福特-麦克马洪循环制冷机;第3章介绍斯特林循环制冷机;第4章介绍脉管制冷机;第5章介绍低温制冷机回热器;第6章介绍间壁换热式低温制冷机(节流制冷器、布雷顿循环制冷机与波利斯制冷机)。

本书适合从事低温制冷技术研究开发、运行操作和营销管理的有关技术人员阅读参考,也可供高等院校师生作为高年级本科生、研究生和博士生的选修课教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

小型低温制冷机原理/陈国邦,汤珂著. —北京:科学出版社,2009  
ISBN 978-7-03-025838-0

I. 小… II. ①陈…②汤… III. 低温-制冷机-理论 IV. TB651

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第190266号

责任编辑:刘宝莉 闫井夫 / 责任校对:刘亚琦  
责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年1月第一次印刷 印张:24 1/2

印数:1—2 500 字数:478 000

定价:62.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

## 序 言

随着空间技术、信息技术和生命科学等现代科学和工业技术的快速发展,对小型低温制冷机的品种和质量的需求正在不断增加,广大科技工作者对有关低温制冷机的基本知识和各种制冷机的工作特点及应用技术了解的要求十分迫切。陈国邦教授和汤珂博士撰写的《小型低温制冷机原理》一书适应了广大读者的这种要求,在这部新书即将出版之际,特此表示祝贺。

陈国邦教授从事低温制冷技术的研究和教学已经 40 余年,1985 年以来,他及其领导的团队在小型低温制冷机研究开发中做出了出色的工作,在国内外产生广泛的影响。《小型低温制冷机原理》一书即是对过去工作的全面总结和在此基础上的拓展,将理论研究成果与研发实验中碰到的问题进行深入的剖析,从而为研究同行们带来新的启迪。

该书介绍了低温制冷机的基础知识,分析了理论低温制冷循环的热力学原理,探讨了各种实际损失对制冷性能的影响,给出了制冷机设计方法和典型实例,论述了若干新型低温制冷方法的开发研究进展和突出成就,指出了小型低温制冷技术在现代科学技术和国防工业中的重要作用和应用要求,展示了小型低温制冷技术的发展前景。

该书内容深入浅出,循序渐进,配有大量图表和例题,以满足普及和提高两方面的需求;该书融入了作者多年的研究成果,在叙述小型低温制冷机基本原理的同时,也具有很好的前沿性;该书内容在学术上有显著的创新性,在探讨新型低温制冷机原理及交变流动的低温回热器设计等方面具有显著特色。

该书具有很高的学术价值和应用价值,其出版对国内相关知识的传播和普及起到很好的承上启下的作用。望该书能带给广大读者及时和有价值的帮助。



中国科学院院士  
2009 年 7 月

## 前 言

低温制冷技术是用人工的方法制造温度低于 120K(-153℃)人造环境的专门技术。在现代科学技术和现代工业的工艺过程中,常常采用低温液化气体作为制冷剂,将需要冷却的材料、工件或仪器浸泡在沸点为 77K(-196℃)的液氮或沸点为 4.2K(-269℃)的液氦中冷却,以获得正常的工作条件或满意的工作性能。例如,现代医院普遍应用的大型诊断医疗仪器超导磁共振成像仪中的超导磁体必须预冷到液氮温度,才能正常工作;某些气体工业需用的低温阀门部件在精密加工前必须经过浸泡液氮的热处理,以保证阀门材料金相组织的持久稳定。在另一方面,有些器件、仪器和材料需要提供低温冷却条件,但他们在给定的低温环境下所需的制冷量很小,不需要大量低温液体的储运;有的工作地点则远离低温液化气体的产地,不便于采用低温液体来冷却。例如,用于空间技术和国防军工的红外探测器和夜视仪。在这些情况下,可以采用不用低温液体的传导冷却法,即通过小型低温制冷机冷头对被冷却对象的热传导,来实现所需的冷却要求。

随着现代科学技术、通信技术、超导技术和半导体工业的快速发展,对小型低温制冷技术的需求日益迫切,同时对制冷机的紧凑性、高效率、便携性和可靠性的要求越来越高。几十年来,低温工作者们为了开发适应要求的新型制冷机,探索能获得深低温制冷和长寿命运行的新颖制冷技术,进行了不懈的努力。令人欣慰的是,自 1985 年以来,我国在采用磁性回热材料的 4K 级低温制冷机、小孔型脉管制冷机及热声制冷等方面的研究中取得了多项突破性进展,在国内外产生了重大的影响。显然,精炼和提高低温制冷研究的理论和实验成果,推广和普及新型制冷方法的基础知识,促进和加强国内外信息资料的交流,是一项重要任务。但是,我国目前缺少介绍小型低温制冷机原理的书籍。1983 年边绍雄主编的《小型低温制冷机》和吴沛宜等编著的《变质量系统热力学及应用》早已销完,且没能赶上低温制冷机最迅速发展的辉煌年代。1990 年高香院编写的《现代低温泵》只限于介绍与主题相关的制冷机,没有涉及 1985 年之后发展的新型制冷技术。

1992 年,在洪朝生院士的鼓励 and 指导下,作者等撰写出版了《最新低温制冷技术》,几位作者都是活跃在低温制冷科研和教学第一线的教授,该书内容比较丰富,反映了 20 世纪 90 年代前后制冷机研究的突破性进展,但限于篇幅和为了避免在内容上与《小型低温制冷机》一书的重叠,省略了对基础理论的论述,因而对许多读者造成不便。虽然该书曾先后多次印刷,并于 2003 年再版,发行量超过万册,但早在 3 年前就已经完全销完。现在,在市场上很难找到低温制冷机的书籍了。于是,

广大读者对小型低温制冷机新书的期盼也愈加强烈,他们希望手上有一本既有理论基础知识,又有研究进展信息的专著。作者也一直希望将前辈们传承的与多年教学和科研中积累的有关小型低温制冷机原理的资料整理成书,并将近年取得的一些研究成果融入其中,使之起到承上启下的作用,借此回报广大读者长期以来的支持、帮助和关爱。在科学出版社刘宝莉编辑的帮助下,今天终于愿望成真。

本书由陈国邦和汤珂共同撰写而成,介绍了小型低温制冷机的基础知识,分析了各种理想制冷循环的热力学原理,探讨了各种实际损失对制冷性能的影响,给出了制冷机的设计方法和典型实例,论述了新型低温制冷方法的开发研究、突破性进展与应用前景。全书内容重点在于“小型低温制冷”和“回热式气体制冷”两个方面,以便与国外有关低温制冷机的书籍接轨。特别是详细叙述了近20年来在开发采用磁性回热材料的液氮温区制冷机、小孔型脉管制冷机和采用热声机驱动脉管制冷以及交变流动的低温回热器设计等低温制冷新方法和新技术方面所取得的成就,展示了小型低温制冷技术的重要性及发展远景。

在本书撰写过程中,上海交通大学王如竹和张鹏教授、西安交通大学何雅铃和厉彦忠教授、中国科学院低温中心吴剑锋、罗二仓和梁惊涛研究员等对本书撰写计划和提纲给予了支持和推荐并且对本书提要内容进行了审查和帮助。在本书的写作过程中,作者系统地普查了近30年来有关低温制冷机的文献和书籍。在这些国内外著作中,许多丰富多彩的论述与深入浅出的分析,使作者受益匪浅,于是从中吸取精华,多次引用,使书稿质量得以提升。在此对上述同行表示深切的感谢和崇高的敬意。本书的写作还参考了浙江大学金滔和颜鹏达以及上海交通大学陈楠的博士学位论文;研究生高威利、林小钢、张珂和雷田等为本书图稿的扫描和复制花费了大量时间,在此一并感谢。本书的研究工作还得到多项国家自然科学基金的支持,在此也表示深深的谢意。谨以此书献给祖国国庆60周年!

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

陈国邦 汤珂

2009年7月1日于浙江大学求是园

# 目 录

序言

前言

<b>第 1 章 小型低温制冷机导论</b> .....	1
1.1 低温制冷机及性能参数定义 .....	1
1.1.1 小型低温制冷机 .....	1
1.1.2 制冷温度与制冷量 .....	1
1.1.3 输入功率与制冷系数 .....	2
1.1.4 比质量与预冷时间 .....	4
1.1.5 运行寿命 .....	5
1.1.6 机械振动与电磁辐射 .....	6
1.1.7 成本 .....	6
1.2 低温制冷机分类 .....	7
1.2.1 按制冷温度分类 .....	8
1.2.2 按制冷量分类 .....	8
1.2.3 按换热器分类 .....	9
1.2.4 低温制冷机流程 .....	11
1.3 回热式低温制冷循环 .....	14
1.3.1 卡诺制冷循环 .....	14
1.3.2 雷特林格循环 .....	15
1.3.3 洛伦兹循环 .....	17
1.3.4 回热式低温制冷循环图谱 .....	22
1.4 低温制冷机的需求与应用 .....	23
1.4.1 红外器件 .....	23
1.4.2 低温电子器件 .....	25
1.4.3 磁共振成像仪超导磁体冷却 .....	29
1.4.4 低温冷凝真空泵 .....	34
1.4.5 空间低温制冷技术应用 .....	36
参考文献 .....	38
<b>第 2 章 吉福特-麦克马洪循环制冷机</b> .....	40
2.1 G-M 制冷机 .....	40

2.1.1	G-M 制冷机的工作原理及过程	40
2.1.2	G-M 制冷机实际循环的热力性能	49
2.1.3	G-M 制冷机的设计要点	59
2.2	SV 制冷机的制冷原理及过程	72
2.2.1	机械驱动的 SV 制冷机	72
2.2.2	气动型 SV 制冷机	74
2.3	磁性回热材料与 4K 温区低温制冷机	80
2.3.1	磁性回热材料的重要性和选择条件	81
2.3.2	实用磁性回热材料的比热容和热导率	83
2.3.3	磁性回热材料在 G-M 制冷机中的应用	87
2.3.4	磁性回热材料在索尔文制冷机中的应用	91
2.3.5	关于 G-M 制冷机制冷量的讨论	92
	参考文献	94
<b>第 3 章</b>	<b>斯特林循环制冷机</b>	<b>97</b>
3.1	整体式斯特林循环制冷机	97
3.1.1	制冷循环原理	98
3.1.2	制冷循环计算	103
3.1.3	实际损失	124
3.1.4	整体式斯特林制冷机的开发与应用	131
3.2	分置式斯特林循环制冷机	136
3.2.1	工作原理	136
3.2.2	热力分析	139
3.3	斯特林循环制冷机的基本设计参数与关键技术	144
3.3.1	基本设计参数	144
3.3.2	操作参数	146
3.3.3	长寿命高效斯特林制冷机的关键技术	147
3.3.4	故障和寿命	161
3.4	维勒米尔制冷机	163
3.4.1	热力工作过程	163
3.4.2	热力计算	166
3.4.3	应用	174
	参考文献	175
<b>第 4 章</b>	<b>脉管制冷机</b>	<b>177</b>
4.1	基本型脉管制冷机	177
4.1.1	结构特点	177



4.1.2 制冷原理 .....	178
4.2 调相型脉管制冷机 .....	181
4.2.1 调相器 .....	181
4.2.2 制冷原理 .....	191
4.2.3 热力学性能 .....	200
4.3 G-M型脉管制冷机 .....	210
4.3.1 脉管制冷机的构型及级间耦合方式 .....	211
4.3.2 G-M型液氦温区脉管制冷机 .....	214
4.3.3 混合工质脉管制冷 .....	230
4.4 斯特林型脉管制冷机 .....	237
4.4.1 直线电机 .....	237
4.4.2 直线压缩机的支承 .....	241
4.4.3 调相机构 .....	247
4.4.4 高频脉管制冷机的典型结构 .....	251
4.5 热声驱动器 .....	257
4.5.1 驻波型热声驱动器 .....	257
4.5.2 行波型热声驱动器 .....	268
4.5.3 驻波-行波级联型热声驱动器 .....	278
4.5.4 热声转换理论 .....	278
4.6 热声驱动脉管制冷机 .....	285
4.6.1 热声驱动器与脉管制冷机的匹配 .....	285
4.6.2 热声驱动脉管制冷机的典型装置 .....	291
参考文献 .....	294
<b>第5章 低温制冷机回热器</b> .....	<b>301</b>
5.1 回热器的特点及其在低温制冷机中的应用 .....	301
5.1.1 低温回热器的基本特性 .....	301
5.1.2 回热器填料的传热与流阻特性 .....	306
5.1.3 回热器填料的热物性 .....	308
5.2 回热器的设计计算方法 .....	309
5.2.1 回热器的传统计算方法 .....	309
5.2.2 回热器的模拟计算方法 .....	314
5.2.3 热声回热器计算 .....	324
参考文献 .....	327
<b>第6章 间壁换热式低温制冷机</b> .....	<b>328</b>
6.1 节流制冷器 .....	328

---

---

6.1.1	节流膨胀原理 .....	328
6.1.2	基本型式及热力性能 .....	333
6.1.3	换热器与节流喷嘴 .....	338
6.1.4	节流工质 .....	345
6.1.5	节流器的工作特性 .....	349
6.1.6	气瓶与压缩机 .....	355
6.2	超小型节流制冷器与混合工质节流制冷机 .....	360
6.2.1	超小型节流制冷器 .....	360
6.2.2	混合气体节流制冷 .....	364
6.3	布雷顿循环制冷机与波利斯制冷机 .....	369
6.3.1	布雷顿循环制冷机 .....	369
6.3.2	波利斯制冷机 .....	374
	参考文献 .....	378

# 第 1 章 小型低温制冷机导论

小型低温制冷技术在现代科学与工业的许多领域获得了广泛的应用,这是因为一些仪器设备在低温下工作能获得更高的效率和灵敏度、更快的运行速度;而另一些仪器设备必须在给定的低温条件下才能正常工作。例如,超导器件的工作机制就是利用材料在其临界转变温度下产生相变而出现的超导现象。低温制冷机适用于需小型冷却要求的场合,具有紧凑、快速、便携、高效等特点,自 20 世纪 50 年代以来获得迅速发展,成为低温工程领域不可分割的一个分支。

在详细讨论各种低温制冷机的工作原理、关键技术及运行应用之前,需要对各种低温制冷机的一些共同术语有一个普遍性的了解,本章将之作为导论予以介绍,内容包括低温制冷机及性能参数定义、低温制冷机分类、回热式低温制冷循环以及需求和应用等 4 节。

## 1.1 低温制冷机及性能参数定义

### 1.1.1 小型低温制冷机

小型低温制冷机是一种能提供温度低于 120K( $-153^{\circ}\text{C}$ )直至 1K 附近的小型机械式制冷设备,在 1~120K 温区内能提供的制冷量处于从几毫瓦到接近 1kW 的范围。

### 1.1.2 制冷温度与制冷量

在工程中经常用实测的有效制冷量来评价低温制冷机的性能,这是因为实际制冷机从低温位向高温位逆向泵热的过程中,需要克服多种不可逆损失,这些损失需要用制冷机的理论制冷量来补偿。为了准确理解制冷量的含义,在定义制冷量的同时,要求定义获取该制冷量的温度,其原因在于不同温度下制取相同的冷量所消耗的能量是大不相同的。例如,在液氮温度(4K)下制取 1W 制冷量所需要的理论功(74W),大约是在 120K 温度下制取 1W 冷量所需用的理论功(1.5W)的 50 倍。上面数据是根据理想的卡诺热力学循环计算而得,计算时假设环境温度为 300K。而实际输入制冷机的功,要比计算的卡诺值大 2 倍以上。在多数情况下,实际耗功值比理想值要大 10~100 倍。图 1.1 所示为单位制冷量需用的理想功耗随制冷温度变化的计算结果,说明制冷温度是评估实际制冷量的一个重要标准<sup>[1]</sup>。

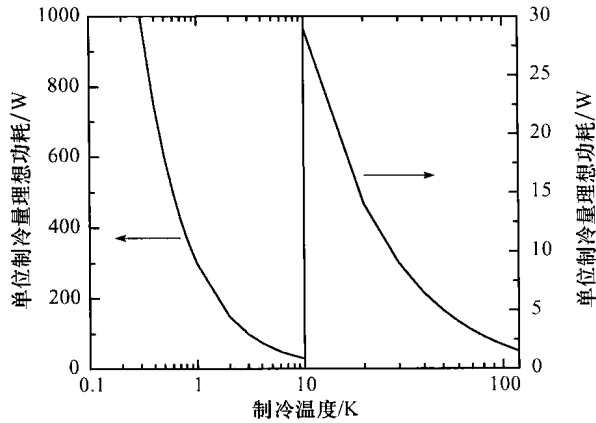


图 1.1 单位制冷量需用的理想功耗(设环境温度为 300K)

低温制冷机中气体工质的绝热膨胀会引起其温度的降低,据此可以计算出压缩气体绝热膨胀可能获得的理论最低制冷温度。采用氦-4 做工质的回热式低温制冷机的理论最低制冷温度可用氦-4 的等熵膨胀系数等于零的曲线来表示,该曲线与氦-4 的  $\lambda$  线非常接近<sup>[2]</sup>。这就是说,氦-4 的理论最低制冷温度大约在 2.2K 附近。有趣的是,当氦-4 的热力学状态已经达到其  $\lambda$  线时,绝热膨胀不会导致温度的降低,相反会导致流体温度的升高。这就是说,当氦-4 的热力学状态进入超流动区域时,氦-4 的状态由氦 I 变为氦 II,即从正常氦变为超流氦。超流氦的热力学行为非常独特,对它进行绝热压缩和绝热膨胀的结果刚好与正常氦相反,即绝热压缩导致温度的降低,绝热膨胀却导致温度的升高。

氦-3 的超流转变温度很低(2.6mK),如今,低温级采用氦-3 工质的两级吉福特-麦克马洪型脉管制冷机(简称 G-M 型脉管制冷机)的最低制冷温度已接近 1K<sup>[3,4]</sup>。采用氦-3 和氦-4 混合物的稀释制冷可获得毫开级温度,这也是现代机械制冷机所能获得的最低温度。更低温度的制取要采用绝热去磁等低温物理的方法。

### 1.1.3 输入功率与制冷系数

制冷机的制冷系数  $COP$ (coefficient of performance)被定义为低温制冷机的制冷量  $Q_c$  与净输入功  $W$  之比,即

$$COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_a - Q_c} \quad (1.1)$$

式中,  $Q_a$  为制冷机排向环境的热量。

对于制冷循环而言,制冷系数通常也称做热力学效率  $\epsilon$ 。在制冷循环的分析讨论中,通常采用热力学效率  $\epsilon$ ,以方便在不考虑制冷机的不可逆损失条件下,比

较各制冷循环本身的性能优劣。

低温制冷机所涉及的各种热力学循环都是对应的热机循环的逆向循环,我们称之为“制冷”循环。例如,卡诺制冷循环就是指逆卡诺循环,斯特林制冷循环就是指逆斯特林循环,布雷顿制冷循环就是指逆布雷顿循环。

卡诺循环的制冷系数为

$$COP_{\text{Carnot}} = \frac{Q_c}{Q_a - Q_c} = \frac{T_c}{T_a - T_c} \quad (1.2)$$

式中,  $T_c$  为制冷温度,即最低循环温度;  $T_a$  为最高循环温度,通常为室温。

卡诺制冷系数是制冷机在给定的两个温限间运行时能够获得的最大理论值。卡诺值是所有其他制冷机的参考指标。实际制冷机(或制冷循环)的制冷系数  $COP_{\text{act}}$  或  $\epsilon_{\text{act}}$  与卡诺制冷系数的比值被称为热力学完善度或制冷效率  $\eta$ , 即

$$\eta = \frac{COP_{\text{act}}}{COP_{\text{Carnot}}} \quad \text{或} \quad \eta = \frac{\epsilon_{\text{act}}}{\epsilon_{\text{Carnot}}} \quad (1.3)$$

现在运行的低温制冷机的热力学完善度范围大致为从小于 1% 到接近 50%。图 1.2 给出 140 台不同低温制冷机的效率变化范围的经验数据<sup>[1]</sup>。其中用于电子学系统的微型制冷机的热力学完善度最低,说明机器产生的几乎所有的制冷量都被消耗于补偿其本身的热损失上,因而剩余的有用制冷量非常少,一般处于毫瓦级。因此,对于那些需要较大制冷量的应用场合,应采用效率较高的较大型制冷机。从图 1.2 中也可以发现,用于商业和工业液化器的大型制冷机的效率最高,处于 20%~50% 的范围<sup>[5]</sup>。

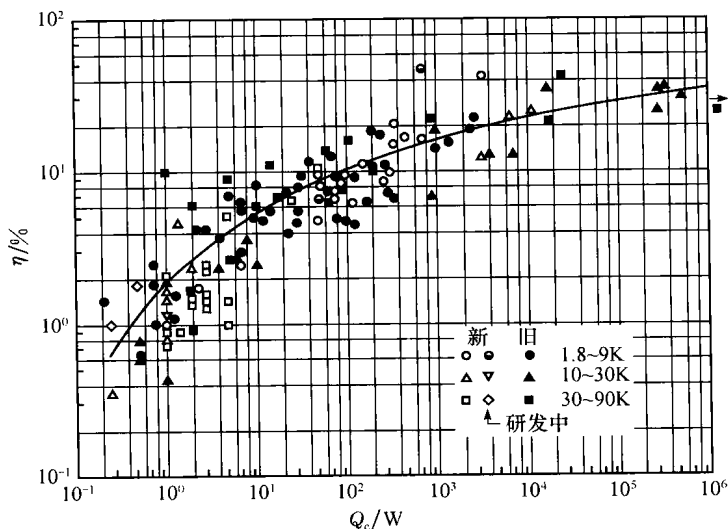


图 1.2 低温制冷机的热力学完善度  $\eta$  与制冷量  $Q_c$  的关系

图 1.3 给出各种不同制冷系统热力学完善度的比较<sup>[1]</sup>。由图可见,用于家用冰箱、空调等的蒸气压缩式制冷系统具有最高的效率,它们的制冷温度较高,工作过程伴随着工质的冷凝相变。此外,采用斯特林循环的菲利浦制冷机的效率高干图中所有其他类型的制冷机,采用焦耳-汤姆逊效应(简称 J-T 效应)的节流制冷的热力学完善度最低。

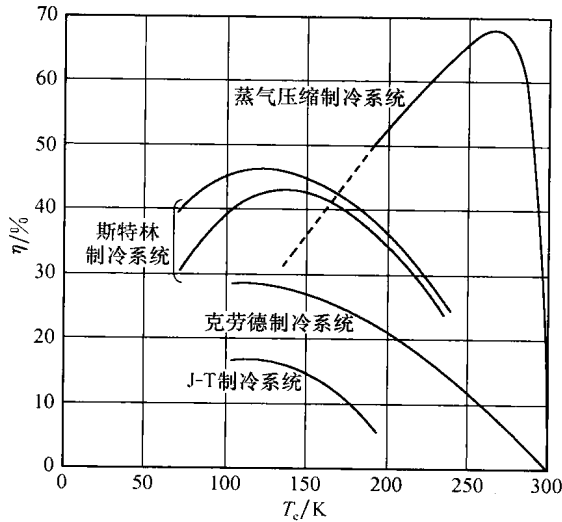


图 1.3 几种制冷系统的热力学完善度  $\eta$  与制冷温度  $T_c$  关系的比较

### 1.1.4 比质量与预冷时间

制冷系统的总质量和体积,有时是制冷机冷区的质量和体积,是一个重要的参数。被冷却的探测器冷区的质量对于红外导弹制导系统特别重要。显然,低温系统的质量和体积越小,对惯性力的反应就越快。

图 1.4 给出各种低温制冷机的比质量(单位制冷量对应的质量)与 80K 时制冷量的关系<sup>[1]</sup>。由图可见,制冷系数较高的斯特林制冷机具有较低的比质量;用于地面系统的 G-M 制冷机的比质量比用于空间技术的制冷机的比质量具有数量级的差别。

制冷机从启动至达到按设计条件稳定运转所需的时间,即预冷时间,对许多小型系统的应用来说很重要,特别是那些与武器相关的场合。快速冷却和慢速复热是一个特别具有挑战性的要求,因为这涉及对制冷机的“热质量”互相冲突的要求。有时可采用高压启动来加速冷却速率,启动后再切换到正常操作模式。

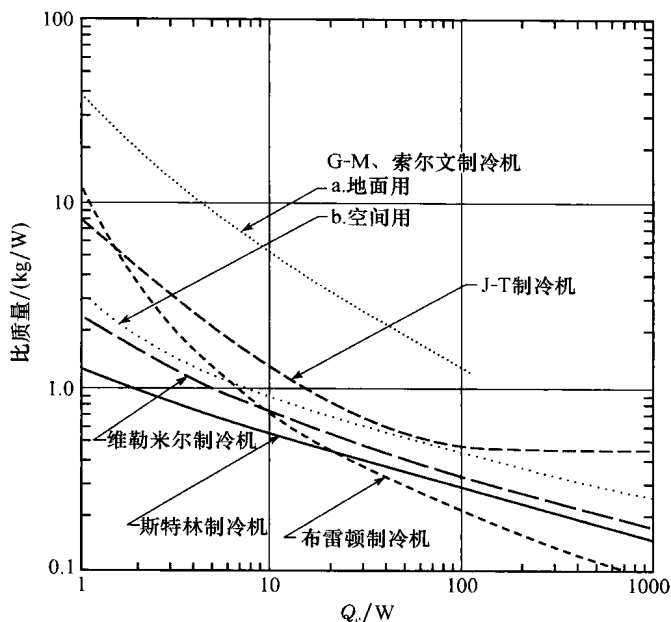


图 1.4 低温制冷机的比质量与 80K 温度制冷量的关系

### 1.1.5 运行寿命

运行寿命是低温制冷机的另一个重要特性,常用平均无故障运行时间(MTBF, mean time before failure)或平均无维修运行时间(MTBM, mean time before maintenance)来表示。通常是将一批相同类型的制冷机在相似的条件运行,测出它们在出现故障前或需要维护前的平均运行时间。可靠的 MTBF 和 MTBM 数据取决于用户和制造厂在长期实践过程中的经验积累,不可能轻而易举。目前还没有合适的机构来收集整理和出版发布有关的标准数据。制冷系统的工作寿命在很大程度上受其结构性质的影响,一些运动部件、滑动密封、轴承、活塞环等的磨损污染物对阀门和微细通道产生有害的影响。有时对部件的润滑与否,要在增加磨损和增加润滑剂污染可能性之间取得平衡。

对于空间低温制冷机来说,有一个特殊的要求,必须能经受火箭发射过程产生的高加速度和大振动的考验,并且能在任何朝向与零重力或微重力下运行。运行寿命对于空间制冷机的重要性是不言而喻的。现在,空间低温制冷机的 MTBF 要求达到 10 000h 甚至要求达到 100 000h。在地面,对于采用低温冷却的低温计算机来说,要求的运行寿命高达 50 000~100 000h,这些要求对低温制冷机的研制是一个巨大的挑战<sup>[6]</sup>。

### 1.1.6 机械振动与电磁辐射

制冷机冷头区域中的机械振动和电磁辐射性能指标经常是衡量低温制冷机的一个重要特性,有些应用场合会对机械或电磁噪声提出限制。下面几条措施有利于达到应用场合的要求:

- (1) 将膨胀机与压缩机实行物理分离,其原因在于压缩机运行时要输入功率、放出压缩热,且机械振动大;
- (2) 消除冷区的运动部件;
- (3) 在冷区采用塑料、陶瓷或其他无磁的部件和材料。

### 1.1.7 成本

成本当然是低温制冷机的一个重要指标,有时会比其他指标更显重要。一般是将制造成本和运行成本分开考虑,后者包括计划内和计划外的维修或部件调换。对于那些没有机会或不可能维修的场合(如空间系统),应考虑需满足那些苛刻的技术要求而进行的多种实验和所需要提供若干多余样本而增加的成本。

图 1.5(a)为低温制冷机的成本与输入功率的关系图,是 Stobridge 在 1974 年总结的,他建议采用如下的经验公式来估算<sup>[1]</sup>:

$$C = \alpha P^{0.7} \quad (1.4a)$$

式中, $C$  是成本,单位为美元; $P$  是制冷机的输入功率,单位为 kW; $\alpha$  是成本系数,其值由于通货膨胀而逐年增大,如  $\alpha=6000$ (1974)、 $10\,000$ (1980)、 $17\,000$ (1985)、 $25\,000$ (1990),以次类推。

图 1.5(b)为低温制冷机的成本与制冷量的关系图。低温制冷机的制造成本与制冷量关系的最新计算公式如下:

$$C = 1.77R^{0.7} \quad (1.4b)$$

式中, $C$  是成本,单位为  $10^6$  美元,指 1997 年的美元; $R$  是在 4.5K 的制冷量,单位为 kW。制冷量的范围为 0.1~30kW。

对于制冷量小于 40W 的小型制冷机,制造成本比式(1.4b)的计算值高,计算式为<sup>[5]</sup>

$$C = 45R^{0.5} \quad (1.4c)$$

式中, $C$  是成本,单位为  $10^3$  美元,指 1997 年的美元; $R$  是在 4.5K 的制冷量,单位为 W。

低温制冷机的工作环境和放热方式对制冷机的制造成本有较大影响。众所周知,液体冷却法比气体冷却法高效得多,这是因为液体具有高的传热系数和大的比热容。然而,即使是地面系统,气体冷却法却由于简单易行而更具吸引力。微型低温制冷机经常采用空气冷却,特别是那些与其他发热设备安装在同一个封闭空间



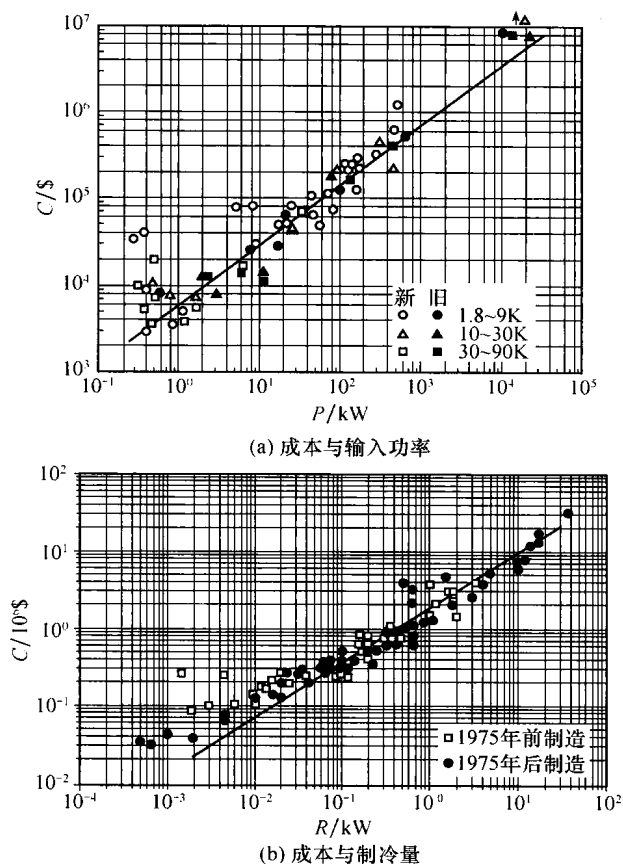


图 1.5 低温制冷机的成本与输入功率和制冷量的关系

内的制冷机,由于环境温度升高,冷却成了一个难题。在这些场合,制冷机的环境温度要求为 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$ ,而制冷温度的精度则要求保证在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

空间应用的低温制冷机的冷却放热是一个特殊的问题,这是因为机器产生的所有热量必须最终通过辐射释放,而辐射热流是温度四次方的函数,与一般的导热问题显然不同。

对于那些对输出的制冷温度精度有严格要求的情况,例如超导量子干涉器件(SQUID)的冷却,可以通过附加措施来增大冷头的热容量,例如增加冷头的质量,或安装具有在液氦温区下出现磁比热容反常的磁性材料来异常增大冷头的热容量。

## 1.2 低温制冷机分类

低温制冷机的分类方法很多,例如可以按其用途、制冷工质、机器结构来分类;