

高等学校教材

低温制冷机

(第二版)

西安交通大学 边绍雄 主编

机械工业出版社

750541
B.2-2
21

高等学校教材

低温制冷机

(第二版)

西安交通大学 边绍雄 主编



机械工业出版社

本书所阐述的小型低温制冷机包括机械式制冷机、磁性制冷机、稀释制冷机和其他制冷机等。在机械式制冷机中详细讨论了斯特林型和吉福特-麦克马洪型等各类低温制冷机的原理、结构与设计计算以及最新发展。

本书是高等院校有关专业师生的教材，而且为研究、生产与使用单位提供了小型低温制冷机设计、制造和使用方面的最基本的资料。因此亦可作为科研与生产及使用单位的工程技术人员的参考书。

低温制冷机

(第二版)

西安交通大学 边绍雄 主编

*

责任编辑：檀庆华 版式设计：乔玲

封面设计：郭景云 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $15^{1/4}$ ·字数 365 千字

1983 年 11 月北京第一版

1991 年 10 月北京第二版·1991 年 10 月北京第四次印刷

印数 14,601—16,600·定价：4.35 元

*

ISBN 7-111-02846-5/TB·134 (课)

(2)

前 言

本书是在1983年出版的高等学校试用教材《小型低温制冷机》的基础上,根据高等学校流体动力机械教材分编审委员会1984年6月制定的“制冷设备与低温技术”专业教学计划及审定的修改大纲修订的。

本书内容为温度低于100 K的各种小型低温制冷机的热力学原理(包括温度为mK级的低温制冷机原理、传热学原理、以及各种小型低温制冷机的结构、计算和应用等。本书是高等工业学校“制冷设备与低温技术”专业的选修课教材,也可供低温制冷专业的研究生及具有一定基础的工程技术人员自学或参考使用。

本书共分七章,系统地介绍了目前广泛应用的机械式低温制冷机、磁制冷机、稀释制冷和吸附制冷等的原理、特性和应用。在机械式低温制冷机中详细讨论了斯特林型和吉福特-麦克马洪型等两大类低温制冷机的结构以及设计计算方法,并且结合作者多年来的工作和最近的发展,较详尽地介绍了分置式制冷机的结构和计算、磁性制冷机的结构与计算以及稀释制冷机的结构与计算,有些章节还附有实例,以便读者了解有关内容。本书取材除了综合参考国内有关单位在低温制冷机方面的科研成果外,还本着“洋为中用”的方针,对大量的国外资料 and 各类低温制冷机的性能和规格进行了选择性的介绍,力求资料可靠、数据完整,以便读者能系统全面地了解小型低温制冷机的现状和发展趋向。

本书由西安交通大学边绍雄、高香院、万威武编写。边绍雄为主编,负责起草和修订编写大纲,并在其主持下按下列分工编写:绪论、第一章的6~7节、第三章和第五章的2节由边绍雄编;第一章的1~5节、第二章和第五章的1节由万威武编;第四章、第六章和第七章由高香院编;最后由边绍雄统稿。

本书由上海机械学院韩鸿兴教授主审。

本书内容广泛,所涉及的方面十分宽广,而且由于低温制冷机发展迅速,加以编者水平有限,谬误之处在所难免,恳切欢迎读者批评指正。

编者

1990年7月

本书主要符号表

符号	量的名称	单位名称	单位符号
A	面积	平方米	m^2
	常数	—	—
A_c	流通面积	平方米	m^2
A_F	迎风面积	平方米	m^2
A_f	传热面积	平方米	m^2
A_{ff}	肋片面积	平方米	m^2
B	磁感应强度	特斯拉	T
C	热容	焦耳每开尔文	J/K
	水当量	焦耳每时开尔文	J/(h·K)
C_e	居里常数	—	$cm^3 \cdot K/g$
c_H	定常磁场强度比热容	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)
c_m	定常磁矩强度比热容	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)
c_p	定压比热容	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)
c_v	定容比热容	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)
COP	总效率		
D	直径	米, 厘米	m, cm
D_h	水力直径	米, 厘米	m, cm
E	能量	焦耳	J
E_x	焓	焦耳	J
E_{x1}	机械焓	焦耳	J
F	力	牛顿	N
F_f	摩擦力	牛顿	N
F_R	法向力	牛顿	N
F_t	切向力	牛顿	N
G	重力	牛顿	N
H	磁场强度	安培每米	A/m
I	电流	安培	A
	焓	焦耳	J
I_e	惯性矩	四次方米	m^4
K	总的传热系数	瓦特每平方米开尔文	W/($m^2 \cdot K$)
J	磁极化强度	韦伯每平方米	Wb/ m^2
L	潜热	焦耳	J
	自感	亨利	H
	周界长	米	m
NTU	传热单元数		
Nu	努塞尔数		
P	功率	瓦特	W
Q	热量	焦耳	J
	冷量	瓦特	W
Q_e	热量流率	瓦特每平方米小时	W/($m^2 \cdot h$)
R	摩尔气体常数	焦耳每摩开尔文	J/(mol·K)
Re	雷诺数		
R	电阻	欧姆	Ω
S	熵	焦耳每开尔文	J/K
T	热力学温度	开尔文	K
	周期	秒	s

(续)

符号	量的名称	单位名称	单位符号
U	内能	焦耳	J
V	容积	立方米	m^3
W	功	焦耳	J
a	加速度	米每二次方秒	m/s^2
	热扩散率	平方米每秒	m^2/s
	温度适应系数		
b	宽度	米, 厘米	m, cm
c	声速	米每秒	m/s
e	比焓	焦耳每千克	J/kg
f	频率	赫兹	Hz
	摩擦因子		
g	重力加速度	米每二次方秒	m/s^2
h	高度	米, 厘米	m, cm
h	比焓	焦耳每千克	J/kg
l	长度	米, 厘米	m, cm
m	质量	千克	kg
	级数		
n	转速	转/每分	r/min
	循环流率	摩尔每秒	mol/s
	多变指数		
p	压力	帕斯卡	Pa
q	热流密度	瓦特每平方米	W/m^2
q_s	质量流率	千克每平方米小时	$kg/(m^2 \cdot h)$
q_m	质量流量	千克每秒	kg/s
qv	体积流量	立方米每秒	m^3/s
r	半径	米, 厘米	m, cm
	比潜热	焦耳每千克	J/kg
	比例系数		
s	比焓	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)
	行程	米, 厘米	m, cm
	间距	米, 厘米	m, cm
	相对死容积		
t	时间	秒	s
	摄氏温度	摄氏度	°C
u	比内能	焦耳每千克	J/kg
	速度	米每秒	m/s
v	比容	立方米每千克	m^3/kg
x	位移	米, 厘米	m, cm
y	容积比		
z	曲轴转角	弧度	rad
	放热系数	瓦特每平方米开尔文	$W/(m^2 \cdot K)$
	节流效应	开尔文每千帕斯卡	K/kPa
	角加速度	弧度每二次方秒	rad/s^2
β	曲柄夹角	弧度	rad
δ	间隙	米, 厘米	m, cm
	压力参数		
	厚度		
ϵ	制冷系数		

(续)

符号	量的名称	单位名称	单位符号
ϵ	黑度		
σ	应力	帕斯卡	Pa
	表面张力	牛顿每米	N/m
ζ	局部阻力系数		
η	效率		
θ	角	弧度	rad
	卡诺系数		
n	定熵指数		
	传热系数	瓦特每平方米开尔文	W/(m ² ·K)
λ	导热系数	瓦特每米开尔文	W/(m·K)
μ	动力粘度	帕斯卡秒	Pa·s
ν	运动粘度	二次方米每秒	m ² /s
ζ_0	冷量损失系数		
ρ	密度	千克每立方米	kg/m ³
τ	温度比		
φ	相位角	弧度	rad
ψ	空隙度		
Γ	对比热容		
Π	对比周期		
A	对比长度		

下角标

符 号	角 标 名 称	符 号	角 标 名 称
A	振幅	E	膨胀腔的
a	环境的	e	烟的
ac	实际的	eac	实际的烟
ad	附加的	el	电机的
add	附加到推移活塞	em	空的
adp	附加到压缩活塞	emR	回热器空的
av	平均的	f	流动阻力
b	球形的	fl	流体的
c	压缩机的	g	气体的
ca	卡诺循环的	H	高压的
cac	压缩机实际的	h	热的
ch	充气的	i	时间的
co	冷端的、冷却期		状态的
$coac$	冷端实际的	id	指示的
$cond$	导热的	in	进口的
$conv$	转化的	is	等温的
$cool$	冷却的	ir	不可逆的
COR	回热器冷端的	ix	i 截面 x 方向
$coca$	卡诺循环冷量	iy	i 截面 y 方向
CR	曲柄销的	iz	i 截面 z 方向
cr	临界的	j	循环次数
cy	气缸的		冷缸级数
d	死隙		导热体数
	推移活塞		

(续)

符号	角标名称	符号	角标名称
<i>j</i>	状态的		压力的
<i>join</i>	连接的		磁场的
<i>L</i>	固体的	<i>pn</i>	气动腔的
	低压的	<i>Q</i>	流量的
	功的	<i>QE</i>	膨胀腔流量的
<i>Li</i>	液力的	<i>Qjoin</i>	连接管流量的
<i>lin</i>	线形的	<i>R</i>	回热器的
<i>m</i>	填料的	<i>Rav</i>	回热器平均的
	质量的	<i>SE</i>	冷腔气体的质量流率
	多级的	<i>s</i>	系统的
	平均的	<i>sh</i>	穿梭的
<i>max</i>	最大的	<i>su</i>	吸入的
<i>min</i>	最小的	<i>tot</i>	总的
<i>mix</i>	混合的	<i>tr</i>	传动的
<i>mR</i>	折合填料	<i>W</i>	壁面的
<i>non</i>	无量纲		水的
<i>o</i>	油的	<i>wa</i>	功率的
<i>0</i>	初始的		波动腔的
<i>opp</i>	对称的	<i>x</i>	<i>x</i> 方向
<i>opt</i>	最佳的	<i>y</i>	<i>y</i> 方向
<i>out</i>	出口的	<i>z</i>	<i>z</i> 方向
<i>P</i>	活塞的		

上角标

符 号	角 标 名 称	符 号	角 标 名 称
<i>L</i>	长度	<i>I</i>	同位数 1
<i>0</i>	初始截面	<i>II</i>	同位数 2
<i>n</i>	指数	<i>3</i>	超流态
		<i>4</i>	正常态

目 录

本书主要符号表

绪论	1
----------	---

第一章 斯特林制冷机

§ 1-1 斯特林制冷循环	9
§ 1-2 双作用和多级斯特林制冷机	18
§ 1-3 斯特林制冷机中的损失	22
§ 1-4 斯特林制冷循环的其它分析方法	31
§ 1-5 斯特林制冷机的设计及参数优化	34
§ 1-6 分置式制冷循环	43
§ 1-7 斯特林制冷机的结构、设计、密封与 润滑	61

参考文献	79
------------	----

第二章 维勒米尔制冷机

§ 2-1 维勒米尔制冷机的特点和工作 循环	82
§ 2-2 维勒米尔制冷机的热力计算	85
§ 2-3 维勒米尔制冷机的结构	89
§ 2-4 维勒米尔制冷机的设计	95
§ 2-5 分置式维勒米尔制冷机	97

参考文献	98
------------	----

第三章 磁性制冷机

§ 3-1 绪言	100
§ 3-2 磁性制冷的热力学原理	100
§ 3-3 磁性制冷循环	104
§ 3-4 磁性制冷机的热力计算	110

参考文献	113
------------	-----

第四章 吉福特-麦克马洪及索尔文

制冷机	114
-----------	-----

§ 4-1 制冷原理及系统介绍	114
§ 4-2 理想循环及热力计算	119
§ 4-3 实际循环的各种损失、制冷量、 耗功	131
§ 4-4 最佳热力参数的选择	142
§ 4-5 总体结构及技术特性	146
§ 4-6 气缸及推移活塞	155
§ 4-7 驱动机构及阀门	158

参考文献	164
------------	-----

第五章 低温制冷机的换热器

§ 5-1 回热器	166
§ 5-2 换热器	187

参考文献	197
------------	-----

第六章 超低温制冷机

§ 6-1 氮稀释制冷机	199
§ 6-2 氮抽气制冷及 ³ He、 ⁴ He恒温器	204
§ 6-3 ³ He绝热压缩制冷	208

参考文献	209
------------	-----

第七章 其它制冷机

§ 7-1 封闭节流系统制冷机	210
§ 7-2 脉管制冷机	223
§ 7-3 固体制冷	226
§ 7-4 辐射制冷	229
§ 7-5 解吸制冷	230
§ 7-6 布雷顿循环	231

参考文献	233
------------	-----

绪 论

最近 30 年是航天技术、红外技术、原子能技术、超导技术以及低温电子学、低温物理、低温医学和低温生物学等现代科学技术迅速发展的年代。低温技术中一个重要的分支——低温制冷机随着上述科学技术的发展而高速发展。低温制冷机的制冷温度范围从 120 K 到小于 1 K，制冷量从几毫瓦到几十瓦，甚至千瓦级。主要的应用范围有红外技术中红外元件的冷却，如气象卫星上用来精确测定海水表层温度分布、云层分布、云层温度差的红外辐射仪；用于测定物质的比辐射率以确定宇宙星体构造的红外分光光度计；探测地层中矿藏分布和资源的红外多光谱扫描仪；防空预警系统中导弹制导系统的红外探测器等均需有 38~80 K 的低温。而超导量子干涉仪(SQUID)的问世，对于生物磁学、计量科学、地球物理以及军用反潜技术和空间技术产生了深远的影响，由于 SQUID 体积小、所需冷量仅为毫瓦级。因此采用分置式斯特林制冷机就引起了各国物理学家和军事部门的强烈兴趣和广泛注意。而时速接近于 500 km/h 的磁浮超导列车已相继在日本和联邦德国问世。低温制冷机是超导列车上的关键设备之一。低温医学中的核子共振成像仪和低温热象仪以及低温微型冷刀已成为诊断疾病和手术方面的有效手段。而低温制冷机为这类医疗设备的广泛使用提供了可靠的基础。原子能技术、半导体材料的提炼加工中需要洁净的超高真空，而低温真空泵可提供 1.33×10^{-10} Pa 的超高真空。

从应用低温制冷机的各个领域尤其是宇航、军事部门的要求来看，对它的要求就相当特殊。

(1) 制冷温度 根据不同的要求而不相同。如红外元件中能探测 8~14 μm 红外波的碲镉汞(HgCdTe)需要 77 K 的低温，而要探测 10~130 μm 红外辐射波的锗掺镓(Ge:Ga)则需要 3 K 的低温。常用的锗掺汞(Hg:Ge)则要求 38 K 的低温。

(2) 制冷量 根据不同的用途和要求，制冷量可从几毫瓦到几百瓦，甚至达到千瓦级的水平。而且制冷量的偏差对于宇航、空间技术和军用的制冷机来说，要求相当严格。如冷量偏大则相应地表明所配备的制冷机的体积、重量和功耗偏大，不符合这些部门的要求。同样也不容许制冷量偏小，否则所配备的红外元件就无法保持正常工作所需要的低温。

(3) 起动时间 通常对地面使用的民用制冷机没有严格的要求。但对于军用的制冷机来说，则必须要求制冷机能在规定的时间内达到正常工作的低温。如导弹中使用的微型低温制冷器，要求在发现敌方目标后能立即起动，最短的时间内达到正常工作温度，以便发射和攻击目标。如果起动时间较长，则就要失掉战机。目前最短的起动时间即从室温降低到 77 K 的低温仅需 3 s 钟。美国 U-2 侦察机使用的斯特林制冷机开机后 3 min 后即可达到正常工作温度。

(4) 可靠性和不维修时间 通常应用部门均要求低温制冷机能可靠运转，而对于不维修时间一般不做严格要求。但用于宇航和卫星的低温制冷机，由于受到体积和重量的限制，制冷机使用场合的散热条件比较差，通常使用的摩擦材料是干摩擦自润滑材料，制冷机零部件材料的安全系数均取的较小，而转速又比较高，因此可靠性问题就十分突出，要求制冷机

有很高的可靠性。相应地,对制冷机的不维修使用时间要尽可能长。

(5) 重量和体积 宇航、空间及战车上使用的低温制冷机其重量和体积因使用场合的限制而有严格要求。如军用分置式斯特林制冷机,其制冷温度为 77 K 时冷量为 1 W,而冷头质量只有 1.25 kg。响尾蛇导弹所用的微型焦-汤节流型制冷器的质量仅有 6 g。该制冷器的气源——气瓶则放在飞机上以满足导弹对附加质量的限制。同样对于制冷机的体积也有要求,尽可能不超过所规定的空间。

(6) 能量消耗 对于地面使用的制冷机来说,能量消耗一般不受到严格的限制。而卫星和军事上使用的制冷机,由于星载和机载的重量受到限制,相应的能供应的功率也有限,因此对制冷机的能量消耗就有严格的限制。

(7) 振动和噪声 对于低温电子学使用的低温制冷机来说,要求振动小、噪声低,否则就会影响到机组的电讯功能和降低电子放大器的性能。

上述这些要求通常是相互矛盾的,因此只能根据用途,在满足主要要求的前提下具体分析、综合考虑其余的要求,从而使制冷机的设计具有较佳的水平。

目前广泛使用的低温制冷机可分为五大类:

一、固体或液体低温制冷器

固体制冷器是利用固体制冷剂,例如固体氢(约 10 K)向高真空空间升华而获得低温;利用固体二氧化碳约可获得 120 K 的低温。这类低温制冷器已广泛用于空间技术。液体低温制冷器是利用液体—液氮—气化制冷获得 77 K 的低温。而利用³He 减压气化的办法则可获得 0.5 K 的低温。这种制冷器通常用于军用或宇航部门。

二、焦-汤节流膨胀制冷器

焦-汤节流膨胀制冷器是利用焦-汤节流效应来获得低温。但微型节流制冷器直至 50 年代方始实现。最早由英国海曼特克(Hymatic)工厂生产,采用高压氮气作为工质,能使红外元件在 2 min 内从 338 K 温度降低至 77 K。这种制冷器的特点是轻巧、紧凑、降温速度快,主要用于红外自导的空对空导弹。也有采用压力达 40 MPa、以氮气为工质、起动时间小于 3 s。用于军用的焦-汤节流制冷器通常采用开式循环且通常均为微型或小型低温制冷器。

为了获得更低的温度、微型节流制冷器采用氮、氦或氢双级节流,利用第一级氮气节流的冷量冷却第二级高压氦或氢,然后高压氦气节流可获得 30 K 的低温。由于节流循环效率较低,因此如在二级节流温度下(30 K)仅制取 0.35 W 冷量时,氮、氦两个压缩机共要消耗 1040 W 功率。这种低温节流制冷器就必须用闭式节流循环。

近来微型节流制冷器有了新的进展。如美国斯坦福大学利用光刻技术在小块硅片上或石英片上刻蚀出宽度为 100 μm,深度为 50 μm 的通道制成换热通道和节流孔,制成集成块形式微型节流制冷器,以获得 77 K 的低温。现已有液氮温度级的节流制冷器的产品。

美国国家标准局为小型超导设备开发了两种微型节流低温制冷器:一种是利用四种不同的工质,分别为 CF₄、N₂、H₂和 He,节流后第一级温度可达 160 K,第二级可达 84 K、第三级可达 23 K、最后一级节流后可获得 4.2 K 的低温。另一种是利用多级低温制冷机(如斯特林制冷机、吉福特-麦克马洪循环制冷机等)预冷节流气体,最后氮气节流获得液氮级温度。

三、热电制冷器(亦称半导体制冷器)

热电制冷器是利用珀尔帖效应来制冷。1834 年珀尔帖发现,当一块 N 型半导体和一块

P型半导体联结成电路,通电时,就发生能量转移的现象,在半导体的一个接头放出热量,而另一个接头上吸收热量。利用热电制冷器可获得的最低温度为 $150\sim 170\text{ K}$ 。这种制冷器的最大缺点是在制冷温度低于 190 K 时,制冷器的效率就很小。

四、辐射制冷器

辐射制冷器是利用宇宙空间的低温热汇 ($2\sim 4\text{ K}$) 吸收温度较高物体放出的辐射热以获得低温。因而这种制冷器是被动式制冷系统,不需要动力、并可长期利用,能制取 $80\sim 150\text{ K}$ 的低温,而且冷量很小,只有几十毫瓦的冷量。由于这种系统是被动式的,因此只能用于宇宙空间,而且辐射制冷器通常是针对某一具体飞行系统设计的。因而只适用于所提的对象,其应用范围受到限制。

五、绝热去磁制冷机

绝热去磁制冷机是利用顺磁物质绝热去磁后温度降低这一原理。1933年首次进行的绝热去磁的实验,达到了 0.25 K 的低温。在60年代以前这种制冷机属于低温物理范畴,并且是间断制冷。但在1966年冯琼斯(J. R. Van Juns)利用这一原理,采用一台双级 20 K 的斯特林制冷机作为热源,并利用斯特林循环,在一台磁性制冷机上连续获得 4 K 的低温。由于当时的相关技术尚未有足够的发展,如对顺磁盐的研究不够充分,空间技术尚在发展,对于这类制冷机未给予充分的重视。因而亦未能推广应用。直至70年代末空间技术和卫星技术迅速发展,要求有相应的低温制冷机来满足红外、天文等部门的需要,而宇宙空间则是一个大的冷背景,在宇宙空间中很容易获得 20 K 的低温,因此工作温度为 $20\sim 4\text{ K}$ 的磁性制冷机就得到了迅速的发展。目前国际上已研制出热开关型磁性制冷机、往复式磁性制冷机和旋转式磁性制冷机三大类。而从温度类别来划分,则可分成 $0.1\sim 1.5\text{ K}$ 、 $1.5\sim 4.2\text{ K}$ 、 $4.2\sim 20\text{ K}$ 、 $20\sim 77\text{ K}$ 等四大类。第一类主要用于冷却天体探测用的超电导辐射热测量计;第二类用于超流氦;第三类用于氦气的再冷凝或是一般氦级温度制冷,目前制冷量为 0.5 W 至数瓦;第四类用于氢液化,该类制冷机的热源通常是液氮。目前也用于高温超导器件。由于磁性制冷机的工作温区相当广,用途也不相同,最主要的是磁性制冷机的效率还有待提高,故目前尚未能广泛推广。但无疑的,这种制冷机将越来越会被重视和发展。

六、脉管式制冷机

脉管式制冷机由吉福特提出并与朗斯沃斯 (Longsworth) 一起进行试验的。其原理是高压气流经层流化换热器进入一端封闭的变压管内,在变压管端部利用气流本身的速度增压,压缩热量则由端部换热器内的介质带走,然后冷的压力气体沿变压管返回流动同时降压膨胀产生低温。因此,在整个低温区内没有任何运动部件,这是该制冷机的优点,但其缺点是温降小,因而效率较低。但在1986年美国国家标准局公布了利用回热器和孔板及贮气器的单级脉管制冷机研制成功。该机的最低温度为 60 K ,在 80 K 时可获得 12 W 的冷量,该机的运行频率为 6 Hz ,效率可达卡诺循环的 60% 。1989年国内编者所在单位公布发明了双向进气的脉管式制冷机,温度达到了 42 K 的低温。因而目前对脉管式制冷机引起了巨大的兴趣。

七、吸附制冷机

吸附制冷机是一种利用气体在常温下被固体吸附剂吸附,而在高温下解吸,周期性进行制冷的制冷系统。而且利用三组固体吸附剂后则可获得连续制冷。早在1971年,普拉斯特等人利用 LaNi_5 和 H_2 匹配在一台样机内采用液氮预冷,获得了 20 K 的低温。而在1986年,美国加州理工学院发表了利用活性炭和氮气匹配制成吸附式制冷机获得了 118 K 的低温,冷量

达到 0.5W。

八、闭式循环制冷机

闭式循环制冷机是一种利用气体回热循环的机械式制冷机，它有多种类型，是目前广泛使用的制冷机。目前普遍采用的制冷循环有下列几种：

(1) 斯特林制冷循环 该循环于 1816 年由斯特林 (Stirling) 提出，最初用于热力发动机。1860 年柯克 (Kirk) 利用逆向斯特林循环制冷获得成功。但由于当时生产水平很低，整套制冷设备的经济性比较差，未能推广。1954 年荷兰飞利浦实验室研制成实用的逆向斯特林循环制冷机。该机在 77 K 时可获得 580W 的冷量。1959 年曼杰尔 (Meijer) 提出了菱形驱动方案，目的是使斯特林循环制冷机冷头的振动减小。以后飞利浦实验室研制出菱形驱动的样机，温度为 77 K，冷量为 2W，冷头振动只有 3~4 μ m (指轴向振动)。1963 年飞利浦实验室在单级斯特林制冷机的基础上研制出制取 20 K 低温的两级斯特林制冷机，冷量达 80W，最低温度可达 12 K。由于当时制冷机采用曲柄连杆机构，而润滑措施是采用滑油润滑，因此润滑油难免要进入气缸和回热器，降低回热器效率，使制冷机的温度上升，冷量下降，最后影响制冷机寿命。为此飞利浦实验室于 1965 年研制成橡胶展-卷膜，利用这种卷膜来隔离润滑油与工作气体的接触，由于展-卷膜是由油压支承，而油压又随气缸内气体的压力而改变。因此展-卷膜只承受气液之间的压差，因而有一定的寿命。在此基础上研制成 V 型液压驱动斯特林制冷机，该机在 77 K 时可获得 20kW 的冷量。该机的转速为 500r/min，效率达到卡诺循环效率的 41.6%，而常用的单缸斯特林制冷机的效率仅为卡诺循环效率的 27.6%。由于这种制冷机的结构太复杂，故未广泛推广。1970 年美国飞利浦实验室研制出温度为 7.8 K 的三级斯特林制冷机，回热器填料采用硫化锗材料，该机在 11 K 时冷量为 0.5W，输入功率为 700W。1971 年飞利浦实验室又提出一种采用不平衡回热器的斯特林制冷机。它的特点是从通常的斯特林制冷机的冷腔内引出一股低温气体，这股气体经过逆止阀和机外的换热器与另一节流系统相联系。这样就提高了冷量的利用率，用于液化器特别有利。如将一台通常的两级斯特林制冷机加以改装后，可利用的冷量从原来的 50W 提高到 85W。

1973 年美国陆军夜视室的霍恩 (Horn) 等人研制出一台冷腔与压缩腔分别配置的分置式斯特林制冷机 (Split 循环)。1979 年美国低温机器公司 (CTI) 提供正式商品，该机冷头的重量只有 1.36kg，在 77 K 时冷量为 1W。1976 年飞利浦实验室还研制出一种利用洛伦兹力驱动电磁型斯特林制冷机，该机在 77 K 时有 1W 的冷量，整机需要的功率为 125W。整机的振动为 10 μ m。1979 年美国标准局齐默尔曼 (Zimmerman) 等人宣布研制成多级分置式制冷机，温度可达 6 K。同时还研制出液氮温度的单级斯特林制冷机，冷头最低温度可达 3.1 K。突破了以往认为斯特林循环不可能获得液氮的禁区，实现了单组份氮气两相斯特林循环。

1982 年加拿大米特列 (Ken Myrtle) 发表了采用锥形推移塞的无磁制冷机，其特点是采用理论上无穷多级膨胀，运转频率为 0.63Hz。而在 1986 年荷兰和德国分别发表了采用计算机控制膜压机作为压缩腔，并采用气动活塞驱动制冷机的锥形推移活塞，在推移活塞的顶锥部掺有 50% 的细铅粉，达到了 7.7 K 的低温。

(2) 维勒米尔循环 (VM 循环) 维勒米尔 (Vuilleumier) 于 1918 年提出。1938 年范尼瓦 (Vannervar) 和 1951 年特考尼斯 (K.W. Taconis) 提出了类似的设计，但直至 1964 年方始由切利斯 (F..F. Chellis) 和霍金 (Hogen) 研制成实用的 VM 制冷机。它是

一台直接从热源取得热量驱动膨胀腔的推移活塞以制取冷量的制冷机。在 77 K 时有 2W 冷量，最低温度可达 10 K。由于 VM 制冷机转速低，轴承载荷小，因而寿命长、振动小、噪声低，因此目前认为它是卫星上应用的最有前途的一种制冷机。1973 年美国休斯 (Hughes) 公司研制成用钷 238 放射性同位素作为热源的 VM 制冷机，它能分别制取 25 K 和 75 K 两个温度，相应的冷量有 2W 和 3W。由于 VM 制冷机本身有热力发动机，故不需额外功率即能运转，仅在启动时需很小的外功来拖动。

由于分置式制冷机的发展，因而在 VM 制冷机方面也于 1980 年制成了 VM 分置式制冷机的商品。这种 VM 分置式制冷机仍然采用热压缩机代替斯特林分置式制冷机的机械式压缩机，推移活塞由气体驱动，因此该机具有斯特林分置式制冷机和 VM 制冷机的优点，但亦具有二者的弱点。

(3) 吉福特-麦克马洪循环 (G-M 循环) G-M 循环是 1959 年由吉福特-麦克马洪 (Gifford-Mcmahon) 二人提出并研制成 G-M 制冷机。该机的特点是利用西蒙 (Simon) 膨胀原理 (即绝热放气制冷)。压缩机是用管道和阀门与制冷机相联结。制冷机由气缸、回热器及推移活塞等组成。推移活塞的作用是使气体从冷腔推移到热腔或是相反。因此通常称为浮塞。单级 G-M 制冷机可达到 23 K 的低温，两级 G-M 制冷机可获得 50 K 和 12 K 两种温度，相应的冷量为 18W 和 5W。三级 G-M 机可达到 6.5 K 低温。G-M 制冷机的特点是转速低，通常是 50~150 r/min，因此振动小，不维修寿命长。所以广泛用于地面卫星接收站，用来冷却参量放大器等电子元件。

(4) 索尔文 (SV) 循环 该循环是 1886 年由索尔文 (E. Solvay) 提出的。主要是针对斯特林循环将压缩过程、膨胀过程与传热过程集中在单机内所造成的缺点如振动大、工质易污染等问题而提出的。该循环将上述过程分开在三个部件内进行，彼此用软管相连。由于结构复杂没有推广使用。直至 70 年代初制成了采用波动腔利用气体压差推动浮塞后，制冷机才正式应用。单级样机达到 22 K 的低温，双级机的最低温度可达 12 K。

1970 年美国对 SV 循环制冷机进行了改进，于 1980 年以商品形式出售具有松弛活塞 (Slack Piston) 的改进型 SV 机。该种制冷机由于在推移活塞上加了一个松弛活塞，使排气过程在理论上可处于等容排气。故理论上可以比原有的 SV 机增加 6% 的制冷量。

(5) 布雷顿 (Brayton) 循环 最初亦用于热力发动机。逆向布雷顿循环可用来制冷 (简称布雷顿循环)。单级循环适用于 77~150 K 的温度范围。两级循环适用于 20 K，最低温度可达 12 K。布雷顿循环由压缩机、膨胀机及换热器组成。从理论上分析，循环有最佳压比，相应的功率及机器重量为最小。最佳压比通常在 2.5~3 左右。由于布雷顿循环采用透平压缩机。而透平压缩机单级压比通常在 1.1~1.5 范围，因而布雷顿循环用于小型制冷机就有困难。1964 年美国采用旋转往复机构，应用布雷顿循环制成旋转往复式布雷顿制冷机 (简称 BR 制冷机)。整机重量小于 4.5 kg，功耗小于 350 W。在 77 K 时可制取 2W 冷量。该机与节流系统相配合后，可制取 3.6 K 低温，冷量可达 1W。但此时功耗增至 1310 W。总重量为 56 kg。80 年代以来，将微型透平用于布雷顿循环已获得成功。制冷量在 4.2 K 时为 1W。由于采用了气体轴承，因而这种采用微型透平的布雷顿制冷机已用于空间技术。工质不仅可采用氦气，也可采用氖气。而且研究尚在深入进行，以达到更小型、长寿命的目标。

(6) 稀释制冷循环 这是利用 ^3He 在 ^4He 中稀释能降温的原理来制冷。由 H. 伦敦 (London) 在 1951 年提出，并于 1964 年由达斯等人首先制成的。稀释制冷机最低能达到 2 mK

级的低温。由于制冷机操作简单,实验时不需要接近磁性材料,也不需要磁体,并能连续制冷,而且低温温度稳定可靠,因此在低温材料与物性研究领域内受到欢迎,得到广泛的应用。

由于低温制冷机在新兴科学技术发展中的作用日益增大,因此世界各国在低温制冷机的研究方面都投入了相当大的力量,给予了高度的重视。

有关低温制冷机的国际学术活动已相当频繁。目前已有四个定期举行的国际学术会议将低温制冷机作为学术会议的一个内容:有四年一次的国际制冷大会(IRR);两年召开一次的国际低温工程会议(ICEC);低温工程与国际低温材料会议(CEC&ICMC)和国际低温制冷机会议(ICC)以及每年一次的美国七学会间能量转换会议(IECEC)。而且小型的专题讨论会更是频繁举行。我国低温制冷机会议则是两年一次定期举行。

目前许多国家都建立了有关低温制冷机研究的机构:其中有较大影响的如美国的喷气推进实验室(JPL),美国国家标准局(NBS),美国宇航局(NASA)所属的高达德空间飞行中心(GSFC),日本的日立和东芝研究室,英国的西部研究中心(WRC),英国的英国空间研究所(BAD),苏联的全苏制氧机研究所(ВНХИМАЩ)。

在低温制冷机的研究工作中,目前的动向是提高低温制冷机的可靠性和不维修寿命,努力发展寿命可达几年的制冷机以满足卫星上的要求;其次是发展新型的制冷机,如磁性制冷机、吸附制冷机和高效脉管制冷机,以满足宇航空间的需要;发展小型可靠性高的透平式液氮温度级的制冷机。再次对于低温制冷机内的热力、传热和流动等过程作进一步深入的研究,以使制冷机的优化设计建立在可靠的基础上。最后,随着高温超导体的发展和实用化,对低温制冷机的研究必将提出新的课题,如大容量液氮级低温制冷机的研究已在孕育之中。

我国的低温技术仅在解放后才开始迅速发展,而低温制冷机则是在完全空白的基础上于60年代初逐步发展起来的。

在斯特林制冷机方面,第一台原型斯特林制冷机于60年代初达到了88K的低温。到60年代中期,液氮产量为4L/h的斯特林制冷机已开始成批生产。红外技术中应用的微型斯特林制冷机开始研制,这类制冷机的最低温度达30K;而在38K时有0.5W的制冷量。1966年开始研制温度可达20K的斯特林制冷机。样机的温度最低可达12K。目前这类制冷机已用于氦、氮液化器的预冷。从80年代初开始研制电磁驱动的制冷机和分置式制冷机。原型样机单级可达33K的低温。制冷温度为77K时可有7W的制冷量。分置式无磁低温制冷机的研制工作亦已取得了成果。最低温度可达8.5K。

在维勒米尔制冷循环方面,80年代初国内已研制成功温度为77K时制冷量为1W的样机。

在吉福特-麦克马洪循环方面,第一台凸轮驱动的原型G-M制冷机正式运行。目前双级的G-M制冷机冷头的最低温度已达11K。制冷机的寿命已可达3000h。

在索尔文制冷机方面,第一台索尔文制冷机于70年代研制成功,最低温度可达12K。80年代初国内有关单位对于改进型的索尔文制冷机进行了研究,已掌握了索尔文制冷机内的推移活塞上加装“松弛活塞”后可使制冷机性能得到改善的机理。

在节流制冷器方面,第一个液氮温度级的微型节流制冷器于60年代初研制成功。已成功地用于军事部门。氦、氮两级的微型节流制冷器亦已投入使用。

在固体制冷器方面,二氧化碳、氦等制冷剂制成的固体制冷器已用于特殊场合。

在辐射制冷器方面,国内已研制出两种型号的辐射制冷器,分别用于气象卫星和近地卫星。

在脉管制冷机方面,国内亦已研制出单级式级脉管制冷机及双向进气脉管制冷机。

在稀释制冷机方面,国内科学院物理所亦已于70年代研制成功温度达20mK的制冷机。

在布雷顿制冷机方面,国内已于最近研制出用于红外技术中的、温度为14~15K、采用单级透平膨胀的制冷机。

在磁性制冷机方面,国内有关单位已对顺磁盐材料进行了大量的物性研究,目前亦已开始进行研制用于替代CFC类制冷机的磁制冷机。

总之,我国低温制冷机的研究已在各方面展开,并取得了可喜的成绩,但从满足国民经

济建设的需要来看,则不论是军用的还是民用的,甚至是宇航部门用的低温制冷机均远远不能满足,特别是作为商品生产的低温制冷机更是寥若晨星,屈指可数。急需我国低温技术工作者大力协同、团结奋斗、努力解决我国低温制冷机样机多、商品少这种不正常现象。至于提高制冷机的可靠性、长寿命等一系列关键技术,更需要我国低温技术领域的工程技术人员努力攻关,攀登技术高峰。

此外,结合目前我国的国情,低温技术应用范围狭小这一情况,我国的低温技术工作者必须做好推广、使用低温制冷机这一工作,以使我国的低温制冷机向更广和更深的领域发展。

