

高等学校试用教材

小型低温制冷机

西安交通大学边绍雄 主编



机械工业出版社

小型低温制冷机

西安交通大学边绍雄 主编

*

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)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $14 \frac{3}{4}$ · 字数 356 千字
1983 年 11 月北京第一版 · 1983 年 11 月北京第一次印
印数 0,001-8,000 · 定价 1.90 元

*

统一书号: 15033 · 5451

前 言

本书是根据原第一机械工业部一九七八年四月在天津召开的“高等学校一机部对口专业座谈会”的精神，及由西安交大、上海机械学院、华中工学院审阅通过的编写要求和大纲编写的。本书内容为温度低于 80 K 的小型低温制冷机的热力学原理，小型低温制冷机的结构，应用范围以及设计计算等。本书是作为高等工业学校“制冷及低温技术”专业的选修课教材，也可供有关专业的研究生及工程技术人员自学或参考之用。

本书共六章系统介绍了目前广泛应用的各种小型低温制冷机的不稳定热力学原理、性能、应用及其发展；详细讨论了斯特林及吉福特-麦克马洪等两大类低温制冷机及主要部件的结构特点和设计计算方法，有些章节还附有例题。本书取材立足于国内，书中综合参考了国内有关单位在低温制冷机方面的教学和科研成果资料，并本着“洋为中用”方针对大量的国外资料和国外有关公司生产的低温制冷机的主要性能指标与规格均作了选择性的介绍，便于读者更系统全面地了解低温制冷机的现状和发展。

本书由西安交通大学边绍雄副教授任主编、高香院同志负责编写大纲的起草及参加了全书统稿和校订工作。边绍雄编写了本书的绪论和第二章的 6~9 节，高香院编写了第一章、第三章、第五章和第六章，万威武同志编写了第二章的 1~5 节和第四章。

本书由上海机械学院韩鸿兴副教授和沈志光同志主审。责任编辑是机械工业部教材编辑室郝育生同志。

本书内容涉及面较广，国内系第一次编写。由于低温制冷机尚在不断发展。限于编者水平，谬误之处在所难免，恳切欢迎读者批评指正。

编者
一九八二年

本书主要符号表

符 号	意 义	单 位 (中文)	单 位 (代号)	备 注
A	面积	米 ²	m ²	
A_c	流通面积	米 ²	m ²	
A_F	迎风面积	米 ²	m ²	
A_f	传热面积	米 ²	m ²	
A_{ff}	肋片面积	米 ²	m ²	
B	宽度	米 (或厘米)	m (或cm)	
C	热容量	焦/开	J/K	
	水当量	焦/小时·开	J/h·K	
c_p	定压比热	焦/公斤·开	J/kg·K	
c_v	定容比热	焦/公斤·开	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	J	
E_x	焓	焦	J	
E_{x1}	机械焓	焦	J	
E_{xq}	热量焓	焦	J	或 E_{x0}
E_{xh}	动能焓	焦	J	
E_{xp}	势能焓	焦	J	或 E_{xpot}
F	力	牛	N	
F_f	摩擦力	牛	N	
H	高度	米	m	
	磁场强度	安/米	A/m	或奥斯特Oe
	焓	焦	J	
I	电流	安	A	
J	惯性矩	厘米 ⁴	cm ⁴	
K	总的传热系数	瓦/米 ² ·开	W/m ² ·K	
L	长度	米 (厘米)	m (cm)	
	潜热	焦	J	
	自感系数	亨	H	
M	质量	千克 (公斤)	kg	或 m
M_s	质量流率	千克/米 ² ·时	kg/m ² ·h	或千克/米 ² ·秒; kg/m ² ·s
M_0	质量流量	千克/秒	kg/s	
N	功率	瓦	W	
NTU	传热单元数			
P	压力	千帕	kPa	
Q	热量	焦	J	或 q (焦/千克, J/kg)
Q_s	热量流率			

符 号	意 义	单 位 (中 文)	单 位 (代 号)	备 注
<i>R</i>	气体常数 半径 电阻 法向力	焦/千克·开 米(厘米) 欧 牛	 <i>m</i> (cm) Ω N	或 <i>r</i>
<i>Re</i>	雷诺准则数			
<i>St</i>	斯坦特准则数			
<i>Nu</i>	努谢尔特准则数			
<i>Pr</i>	普朗特准则数			
<i>s</i>	比熵	焦/千克·开	J/kg·K	
<i>S</i>	熵	焦/开	J/K	
	相对死容积			
<i>T</i>	温度 周期 切向力	开 秒 牛	K s N	
<i>U</i>	内能	焦	J	
	周界长	米(厘米)	<i>m</i> (cm)	
<i>V</i>	容积	米 ³	m ³	
<i>W</i>	功	焦	J	
	无因次参数			
<i>x</i>	位移	米(厘米)	<i>m</i> (cm)	
<i>z</i>	气体压缩性系数			
<i>z</i>	液化系数			
<i>Z</i>	行程	米(厘米)	<i>m</i> (cm)	
<i>a</i>	加速度 导温系数 温度适应系数	米/秒 ² 米 ² /秒 米(厘米)	m/s ² m ² /s <i>m</i> (cm)	
<i>b</i>	宽度	米(厘米)	<i>m</i> (cm)	
<i>C_s</i>	音速	米/秒	<i>m</i> / s	
<i>d</i>	直径	米(厘米)	<i>m</i> (cm)	
<i>e</i>	比焓	焦/千克	J/kg	
<i>f</i>	频率 摩擦系数	赫	Hz	
<i>g</i>	重力加速度	厘米/秒 ²	cm/s ²	
<i>h</i>	高度 比焓	米(厘米) 焦/千克	<i>m</i> (cm) J/kg	
<i>k</i>	绝热指数			
<i>m</i>	级数			
<i>n</i>	转速 多变指数	转/分	rpm	
<i>q_f</i>	单位面积热流量	瓦/米 ²	W/m ²	
<i>r</i>	潜热	焦/千克	J/kg	

符 号	意 义	单 位(中 文)	单 位(代 号)	备 注
r	比例系数			
t	时间	秒	s	
	摄氏温度	度	°C	
v	比容	米 ³ /千克	m ³ /kg	
w	容积比			
α	曲轴转角	弧度	rad	
	放热系数	瓦/米 ² ·开	W/m ² ·K	
	节流效应			
β	曲柄角	弧度	rad	
	角加速度	弧度/秒 ²	rad/s ²	
δ	间隙	米(厘米)	m (cm)	
	压力参数			
ε	制冷系数			
	黑度			
σ	应力	千克/厘米 ²	kg/cm ²	
ζ	局部阻力系数			
η	效率			
	粘度	牛·秒/米 ²	N·s/m ²	
θ	半周期	秒	s	
	相角	弧度	rad	
	卡诺系数			
λ	导热系数	瓦/米·开	W/m·K	
ν	运动粘度	米 ² /秒	m ² /s	
ξ_0	冷量损失系数			
ξ_r	焓损系数			
ρ	密度	千克/米 ³	kg/m ³	
τ	温度比			
φ	角度	弧度	rad	
ψ	空隙度			
ω	角速度	弧度/秒	rad/s	
Γ	对比热容			
Λ	对比长度			
Π	对比周期			

下 标

符 号	意 义	符 号	意 义	符 号	意 义
<i>A</i>	振幅	<i>fl</i>	流体的		初始的
<i>a</i>	环境的	<i>g</i>	气体的	<i>opp</i>	对称的
<i>ac</i>	实际的	<i>H</i>	高压的	<i>opt</i>	最佳的
<i>add</i>	附加到推移活塞	<i>h</i>	热的	<i>out</i>	出口的
<i>adp</i>	附加到压缩活塞	<i>i</i>	时间的	<i>p</i>	活塞的
<i>av</i>	平均的	<i>id</i>	指示的		压力的
<i>b</i>	球形的	<i>in</i>	进口的	<i>pn</i>	气动腔的
<i>c</i>	压缩机的	<i>is</i>	等温的	<i>Q</i>	流量的
<i>ca</i>	卡诺循环的	<i>ix</i>	<i>i</i> 截面X方向	<i>QE</i>	膨胀腔流量的
<i>cac</i>	压缩机实际的	<i>iy</i>	<i>i</i> 截面Y方向	<i>Qjoin</i>	连接管流量的
<i>ch</i>	充气的	<i>iz</i>	<i>i</i> 截面Z方向	<i>R</i>	回热器的
<i>co</i>	冷端的, 冷却期	<i>j</i>	循环次数	<i>Rav</i>	回热器平均的
<i>coac</i>	冷端实际的		冷缸级数		
<i>cond</i>	导热的		导热体数	<i>sE</i>	冷腔气体的
<i>conv</i>	转化的	<i>join</i>	连接的		质量流率的
<i>coR</i>	回热器冷端的	<i>L</i>	固体的	<i>s</i>	系统的
<i>coca</i>	卡诺循环冷量		低压的	<i>sh</i>	穿梭的
<i>CR</i>	曲柄销的		功的	<i>su</i>	吸入的
<i>cr</i>	临界的	<i>Li</i>	液力的	<i>tot</i>	总的
<i>cy</i>	汽缸的	<i>lin</i>	线形的	<i>tr</i>	传动的
<i>d</i>	死隙	<i>m</i>	填料的	<i>W</i>	壁面的
	推移活塞		质量的		水的
<i>E</i>	膨胀腔的		多级的		功率的
<i>e</i>	翅的	<i>max</i>	最大的	<i>Wa</i>	波动腔的
<i>eac</i>	实际的翅	<i>min</i>	最小的	<i>X</i>	X方向的
<i>el</i>	电机的	<i>mix</i>	混合的	<i>Y</i>	Y方向的
<i>em</i>	空的	<i>mR</i>	折合填料	<i>Z</i>	Z方向的
<i>emR</i>	回热器空的	<i>non</i>	无因次		
<i>f</i>	流动阻力	<i>O</i>	油的		

上 标

符 号	<i>L</i>	0	<i>n</i>
意 义	长度	初始截面	指数

目 录

前言

本书主要符号表

绪论 1

第一章 小型低温制冷机的热力学基础 5

§ 1-1 非稳态、非稳定流热力学基础 5

一、基本概念 5

二、基本能量方程 6

三、典型热力过程的分析 7

§ 1-2 焓 18

一、焓的基本概念及定义 18

二、焓在 $h-s$, $T-s$ 图上的表示及 e_x-h 图 20

三、焓在不可逆过程中的变化 24

四、稳定流系统的焓平衡方程、焓流图及焓效率 24

五、对几个不可逆过程的分析 25

六、非稳态、非稳定流热力系统中的焓平衡 29

第二章 斯特林制冷机和维勒米尔制冷机 31

§ 2-1 斯特林制冷循环 31

一、斯特林制冷循环 31

二、热力计算方法 33

三、循环计算——等温模型 34

四、循环计算——绝热模型 40

§ 2-2 多级斯特林制冷机 45

一、双级斯特林制冷机原理 45

二、多级斯特林制冷机的热力计算 47

三、双级斯特林制冷机一级温度 T_{co_1} 和容积 V_{co_1} 的选择 49

§ 2-3 斯特林制冷机的参数选择和总体设计 51

一、参数选择 51

二、总体结构设计 52

§ 2-4 维勒米尔制冷机 56

一、理想循环 56

二、VM 制冷机的热力计算 58

三、多级 VM 制冷机 61

四、VM 制冷机的设计参数 63

§ 2-5 制冷机中的损失 64

一、回热损失 64

二、流阻损失 65

三、穿梭损失 66

四、泵气损失 67

五、轴向导热损失 68

六、冷头热漏损失 70

七、换热器换热损失 72

八、其它损失 72

§ 2-6 换热器 73

一、水冷却器 74

二、冷量换热器 79

三、换热器的结构设计 80

§ 2-7 主要零部件的结构与设计 81

一、活塞 82

二、汽缸 86

三、连杆 88

四、曲轴 89

§ 2-8 密封和润滑 92

一、密封 93

二、润滑 94

§ 2-9 斯特林及 VM 制冷机的变型与发展 96

一、菱形机构驱动型斯特林制冷机 96

二、分置式斯特林制冷机 100

三、电磁振动式制冷机 109

四、液氦温度级斯特林制冷机 112

例题 斯特林制冷机热力计算实例 115

第三章 吉福特-麦克马洪及索尔文制冷机 121

§ 3-1 制冷原理及系统介绍 121

§ 3-2 理想循环及热力计算 127

一、吉福特-麦克马洪制冷机 127

二、索尔文制冷机 134

§ 3-3 实际循环的各种损失、制冷量、耗功 139

一、损失分析	139	二、换热和流动阻力实验数据	182
二、实际制冷量、耗功、制冷系数和 焓效率	146	§ 4-4 回热器损失	187
§ 3-4 最佳热力参数的选择	147	一、有限传热损失	187
一、压比 p_H/p_L 及低压 p_L 的选择	147	二、填料温度波动损失	187
二、循环时间 t 的选择	149	三、流动压降损失	187
三、膨胀机级数的选择	150	四、壁效应损失	188
四、确定膨胀腔容积 V	151	五、工质偏离理想气体的损失	198
§ 3-5 总体结构及技术特性	151	六、气流入口温度变化对损失的影响	198
一、G-M 制冷机的总体结构及技术特性	152	七、轴向导热损失和空容积损失	198
二、SV 制冷机的总体结构及技术特性	156	§ 4-5 低温回热器的设计	198
§ 3-6 汽缸及推移活塞	160	一、填料的选择	198
一、汽缸	160	二、回热器的结构设计	191
二、推移活塞	161	第五章 其它低温制冷机	195
三、汽缸和推移活塞之间环形间隙的 确定	161	§ 5-1 封闭节流系统制冷机	195
§ 3-7 驱动机构及阀门	163	一、节流系统的作用原理和工质	195
一、机械驱动	163	二、封闭节流系统的循环及系统	197
二、气力驱动	166	三、封闭节流系统的型式及结构特征	201
第四章 低温回热器	171	四、微型封闭节流制冷系统的技术特性	202
§ 4-1 低温回热器的特点及分类	171	五、微型封闭节流制冷系统的主要设备	203
§ 4-2 回热器理论	172	§ 5-2 逆布雷顿循环制冷机	211
一、回热器的热力、流动工况——温度、 压力和流量的变化	172	§ 5-3 脉管制冷	214
二、回热器的效率	174	一、脉管制冷的原理	214
三、基本微分方程	175	二、脉管制冷的系统与工作过程	214
四、考培奇-伦登和豪森的解法	176	三、脉管制冷的热力计算	215
五、雷-史密斯和克维尔-史密斯的解法	177	四、典型脉管制冷设备的结构及性能	216
六、其它方法	181	§ 5-4 固体制冷	217
§ 4-3 回热器的换热和流动阻力	181	§ 5-5 辐射制冷	219
一、回热器计算参数和常用准则数	181	第六章 小型低温制冷机的综合性能比 较、选用及发展	222
		一、综合性能比较及选用	222
		二、发展	227

绪 论

最近二十年来，是低温技术为适应尖端技术和工农业生产的发展而迅速发展的年代。小型（包括微型）低温制冷机是低温技术在特殊条件下应用的一个分支。制冷温度范围从193K到3.1K，制冷量从几毫瓦到几十瓦、甚至几百瓦。应用范围也越来越广泛。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面温度、云层的分布、云层的温度差的红外辐射计；用于测定物质的比辐射率确定宇宙星构造的红外分光光度计；红外多光谱扫描仪可探测地面的矿藏分布；军用的红外探测器则是防空预警系统的导弹制导系统中的有效武器。而在低温电子学方面如量子放大器、参量放大器等元件均需低温制冷机提供稳定冷源才能正常运行。而要使测检灵敏度和精度极高的超导量子干涉仪和隧道结等仪表能方便使用就需要有轻便的液氮冷源。低温医学中的低温热象仪、低温微型冷刀均要求有轻便、稳定的冷源。农业方面种畜精液贮存用的低温、工业材料处理和零件的低温装配均希有小型、简便、可靠的低温冷源。超高真空技术方面采用低温泵后可达 10^{-12} 托的清洁真空。

从应用小型低温制冷机的各个领域尤其是宇航、军事部门的要求来看，它的要求和指标就相当特殊。

（1）制冷温度：根据不同的要求而不同。如红外元件中能探测 $8\sim 14\mu\text{m}$ 红外波的确镉汞（HgCdTe）需要77K的低温，而探测 $10\sim 130\mu\text{m}$ 红外辐射波的锗掺镓（Ge:Ga）要求3K的温度。而常用的锗掺汞（Hg:Ge）则要求38K的低温。

（2）制冷量：根据不同的要求和用途从几毫瓦到几十瓦。通常是地面用的制冷机没有太严格的限制，而宇航及军用的制冷机，则要求严格，如冷量偏大则相应的制冷机的体积、重量、功耗就大，不符合要求，也不容许制冷量偏小，否则元件就无法保持正常所需的低温。

（3）启动时间：对军用的制冷机有十分严格的要求。如导弹中使用的微型低温制冷机，要求在发现目标后能立即启动，短时间内达到工作温度，以便发射和攻击目标。如启动时间较长，则就失掉战机。目前最短的启动时间从室温到77K仅需3秒钟。U-2侦察机用的斯特林制冷机3分钟达到正常使用温度。

（4）不维修时间与可靠性：通常应用部门均要求低温制冷机能可靠运转。但用于卫星等特殊场合的制冷机。由于受到体积和重量的限制，材料的安全系数很小，散热差、常用的是干磨擦，转速又比较高，因此可靠性就相当重要。不维修寿命是指制冷机用于不能维修场合时能可靠运转的时间。卫星上用的制冷机的不维修寿命要尽可能长。

（5）能量消耗：对于地面用的制冷机则无严格要求。而军用和卫星用的制冷机，由于能量有限，因此对制冷机的能量消耗有严格限制。

（6）重量和体积：对空间使用和野战用的低温制冷机重量和体积是很严格的。如微型斯特林制冷机、制冷温度达77K冷量为1W，而质量仅有1.25kg。而响尾蛇导弹用的微型制冷机，焦-汤节流型制冷机的冷头仅6克重，而气瓶则放在飞机上以满足导弹对附加重量

的限制。同样对于制冷机的体积也是这样，要求尽可能小。

(7) 经济性：对地面用的低温制冷机来说则必须考虑经济性。

(8) 振动与噪音：对于低温电子学用的制冷机来说要求振动小、噪音低，否则会影响机组的电讯功能和降低放大器的效能。

上述这些要求，通常是相互矛盾的，只能根据用途，在满足主要要求的前提下适当考虑其余要求。目前低温制冷机内广泛采用的循环有焦-汤节流制冷循环（J-T 循环）、斯特林循环（ST 循环）、维勒米尔循环（VM 循环）、吉福特-麦克马洪循环（G-M 循环）、索尔文循环（SV 循环）和布雷顿循环（Brayton）。此外尚有脉管制冷（Pulse 循环）、绝热去磁制冷循环等以及采用辐射制冷与固体制冷等等。

(1) 焦-汤节流制冷循环（J-T 循环）：简称节流制冷，其原理是利用焦汤效应来获得低温。但微型节流制冷器直至五十年代方始实现。最早由英国海曼特克（Hymatic）工厂生产，采用氮气作为工质，能使红外元件在 2 分钟内从 65°C 温度冷却至 77K 。这种制冷器的特点是轻巧、主要用于空对空导弹制导。现也有采用压力达 40MPa 以氮气作为工质，启动时间可小于 3 秒钟的节流制冷器。

为了获得更低的温度，微型节流制冷器采用氮、氦或氢气双级节流，利用第一级氮气节流的冷量冷却第二级高压氦或氢，然后氦气节流以获得 30K 的低温。由于节流循环效率不高，因此仅有 0.35W 冷量时，所需的氮、氦压缩机要消耗 1040 瓦功率。近来美国斯坦福大学发表了利用光刻技术在小块的硅片或石英片上刻出宽度为 $100\mu\text{m}$ 深度为 $50\mu\text{m}$ 的管道，将整个节流制冷器制成集成块的形式。现已有液氮温度级节流制冷器产品。

(2) 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 年凯尔克（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 77K 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 77K 冷量为 2W ，冷头振动只有 $3\sim 4\mu\text{m}$ （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成制取 20K 的低温两级斯特林制冷机，冷量达 80W ，最低温度可达 12K 。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，因此难免滑油要进入汽缸和回热器，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，而油压又随汽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，故而有一定的寿命。在此基础上研制成 V 型液压驱动斯特林制冷机，该机在 77K 时可获得 20kW 的冷量。该机的转速为 500rpm ，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成温度为 7.8K 的三级斯特林制冷机，回热器填料采用硫化锗材料，该机在 11K 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，^[10] 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)等人研制成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77K时冷量为1W。1976年菲利浦实验室还研制成一种利用洛伦兹力驱动的电磁型斯特林制冷机,该机在77K时有1W的冷量,整机需要的功率为125VA。整机的振动为 $10\mu\text{m}$ 。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6K。同时还研制成液氮温度的单级斯特林制冷机,冷头最低温度可达3.1K。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。

(3) 维勒米尔循环(VM循环): 维勒米尔(Vuillenmier)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77K时有2W冷量,最低温度可达10K。由于VM制冷机转速低,轴承载荷小,故而寿命长、振动小、噪音低,因此目前认为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25K和75K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。

(4) 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23K的低温,两级G-M制冷机可获得50K和12K二种温度,相应的冷量为18W和5W。三级G-M机可达到6.5K低温。G-M制冷机的特点是转速低,通常是50至150rpm.,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电子元件。

(5) 索尔文(SV)循环: 此循环是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: 振动大、工质易污染等问题而提出的。此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。直至七十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22K的低温。双级机的最低温度可达12K。

(6) 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77K至150K的温度范围。两级循环适用于20K,最低温度可达12K。布雷顿循环由压缩机、膨胀机及换热器组成。从理论分析,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至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至1.5范围,故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4.5kg,功耗小于350W。在77K时可制取2W冷量。该机与节流系统相配合后,可制取3.6K低温,冷量可达1W。但此时功耗增至1310W。总

重量为 56kg。目前国外对于布雷顿循环的研究正在进一步发展。

(7) 脉管式循环 (Pulse 循环): 该循环是由吉福特提出并与朗斯沃斯 (Longsworth) 等一起进行过试验。其原理是压缩后的气流经层流化的换热器后进入盲管, 在盲管端部利用气流本身的速度增压, 压缩热量由端部的换热器内的介质带走。然后增压后并已冷却的气流沿盲管膨胀。因此低温区内没有运动部件。缺点是温降小、效率低。如欲制取 80 K 的低温, 需要有三级脉管串联。故而尚未广泛应用。

(8) 绝热去磁制冷: 这种制冷方法用来制取 1 K 以下的温度。通常是间断制冷 属于低温物理范畴。但 1966 年冯琼斯 (J. R. Van Juns) 利用这种制冷方法制成连续制取 4 K 温度的磁性制冷机。制冷机压缩腔需要保持 20 K 的低温。故而样机是用一台两级斯特林制冷机来保证压缩腔的低温。目前宇航领域对于这种制冷机甚感兴趣。

(9) 辐射制冷: 这种制冷方法是利用宇宙空间的低温热汇 (2~4 K) 来吸收温度较高物体放出的辐射热以获得制冷。故是被动式制冷系统, 不需要动力可长期利用, 能制取 70~150 K 的低温。由于这种系统只能用于宇宙航行, 而且是针对具体飞行系统设计、故而应用范围受到限制。

(10) 固态制冷: 1962 年美国首先采用固体制冷用于航天仪器, 其原理是利用固态制冷剂 (如固体氮、氩、氧) 在高真空下升华而制取冷量。能制取 77 K 低温, 可连续使用一年。目前美苏等国的宇航部门和军事部门正在研制温度更低、时间更长的固态制冷器。

解放后, 我国的低温技术开始迅速发展, 而小型 (微型) 低温制冷机亦在空白的基础上发展起来。在自力更生、洋为中用的方针指导下, 小型低温制冷机的研制工作从六十年代开始, 至今已取得了一定的成绩, 初步满足了国民经济和国防的需要。

在斯特林循环方面。六十年代初第一台原型斯特林制冷机达到 88 K 的低温。至六十年代中期, 液氮产量为每小时 4 升的斯特林制冷机已成批生产。并开始试制红外技术中应用的微型斯特林制冷机, 这类制冷机的最低温度达 30 K。而在 38 K 时有 0.5 W 的冷量。1966 年开始研制温度为 20 K 的双级斯特林制冷机, 最低温度可达 12 K, 目前已用于氦、氩液化器。现时 VM 型制冷机、电磁驱动制冷机及分置式制冷机的研制工作已取得不同程度的成果。磁性斯特林制冷机的研究工作亦已进行。

在吉福特-麦克马洪循环方面。六十年代中期第一台原型凸轮驱动的 G-M 制冷机正式运行。目前双级 G-M 制冷机的最低温度已达 11 K。制冷机的寿命亦可达 1000 小时。

在索尔文循环方面。七十年代中期索尔文循环制冷机研制成功。最低温度达到 12 K。

在节流制冷循环方面。第一个液氮温度微型节流制冷器于六十年代初期研制成功。目前氮、氩两级节流的微型制冷器亦已投入使用。

在固体制冷和辐射制冷的研制中已取得了很多成果, 有的已用于有关部门。

为了实现四个现代化, 不论是民用还是军用, 对于小型或微型低温制冷机提出了更高更新的要求。亟需我国低温技术工作者从制冷机的品种、规格、性能和寿命等方面努力攻关, 攀登低温技术的高峰。

第一章 小型低温制冷机的热力学基础

§ 1-1 非稳态、非稳定流热力学基础

一、基本概念

工程热力学，通常是以边界面（又称控制表面）内的工质作为热力系统（也称控制体）。当热力系统满足下列条件：（1）穿过控制表面的热传导率为常数；（2）穿过控制表面所传递的比功率为常数；（3）各入口气流的状态和速度为常数；（4）各出口气流的状态和速度为常数；（5）各入口气流的质量流率为常数；（6）各出口气流的质量流率为常数；（7）各入口气流的总质量流率等于各出口气流的总质量流率。称为稳定态、稳定流。

其特点是：系统中各参数仅仅是空间坐标的函数，与时间坐标无关；此外，系统内没有质量和能量的聚积或减少。

必须指出，一个热力系统只满足上述的（5）、（6）、（7）三条件时，则仅仅是稳定流；若说一个热力系统是稳定态、稳定流，则必须满足上述七个条件。

自然界中，有些热力系统并不满足上述七个条件。例如，对一个充满工质的封闭容器加热，容器里工质的压力和温度都随着时间的增长逐渐增高，称这种情况为非稳态。又如，氨、氟液化器启动时，液化器内各点的温度都随时间的增加而不断降低，液化器内工质数量也不断增加，直至转入正常工况为止。再如，正常运转的机器设备，由于外界条件的变化或因负荷变化需要改变其各点参数时（或升高降低压力，或改变流量等），从开始改变各处参数的瞬间起，直至达到新的平衡工况为止，整个热力系统也与稳定态、稳定流热力系统不同。上述各例是处在非正常运行工况下，也有在正常工况下，机器设备中各点参数随时间的改变而变化的情况。如 St, G-M, VM, SV 等制冷机正常运转时，机器内各点的压力、流量等参数都随时间的改变而作周期性变化，即每个循环周期内，机器各点的参数都随时间的改变而变化。

综上所述，若热力系统中，各参数（ p 、 v 、 T 、 m ）不仅是空间坐标的函数，而且是时间坐标的函数，同时，系统中还有能量的聚积或减少，则称这种热力系统为非稳态、非稳定流热力系统（或称瞬变流热力系统）。研究这种热力系统的状态变化规律以及系统与外界能量交换规律的学科称为非稳态、非稳定流热力学。为了与工程热力学中常工质量热力系统相区别，对于这种工质量 M 随时间变化的热力系统，某些作者也称它为变工质量热力系统。相应的热力学称为变工质量热力学。

因此，非稳态、非稳定流热力学所研究的内容是一般工程热力学内容的延伸。所以，一般工程热力学中的许多基本概念在研究非稳态、非稳定流热力学时仍然可以借用。

研究非稳态、非稳定流热力系统时，基本出发点是：

（1）工质微团进入热力系统之前，或者从热力系统离开之后，所发生的一切变化，对于所研究的热力系统来说，它们是不属于所研究的非稳态、非稳定流热力系统范围的；

（2）工质微团进入热力系统后，即从它进入热力系统的瞬时起，就与系统中其它工质

微团处于相同的热力状态；

(3) 外界通过热力系统的边界面对系统的作用将瞬时地均匀地传递给整个系统的各个工质微团；

(4) 工质微团离开热力系统的瞬时起，就不再参与热力系统的过程变化。

通常，非稳态、非稳定流热力系统与外界的相互作用有下列三种方式：

(1) 通过热力系统界面与外界的机械作用；

(2) 通过热力系统界面与外界的热量交换；

(3) 穿过热力系统界面与外界的质量交换，以及相应的能量交换。

二、基本能量方程

能量方程的实质是能量守恒。

为了讨论的需要，图 1-1 给出一概括性的非稳态、非稳定流热力系统。图中虚线为热力系统的边界线。

dM_{in} 和 dM_{out} 分别表示在 dt 时间内流入系统和从系统中流出的质量； dQ 为热力系统和外界通过系统边界在 dt 时间内交换的热量； dW 为在 dt 时间内热力系统通过边界面和外界之间相互作用的功。 M_1 ,

E_1 表示初始瞬间系统内的工质数量和单位工质的总能量； M_2 , E_2 则表示终态瞬间系统内的工质数量和单位工质的总能量。经 dt 时间后，系统内能量的变化为：

$$d(M_s E_s) = M_2 E_2 - M_1 E_1 \quad (1-1)$$

由流入系统的工质 dM_{in} 带入系统的能量为

$$E_{in} dM_{in} = dM_{in} (u_{in} + p_{in} v_{in} + E_{kin} + E_{pin}) = dM_{in} (h_{in} + E_{kin} + E_{pin}) \quad (1-2)$$

这里： $p_{in} v_{in}$, E_{kin} , E_{pin} 分别为流入系统工质的流动功、动能和势能。

由流出系统的工质 dM_{out} 从系统中带出的能量为：

$$E_{out} dM_{out} = dM_{out} (u_{out} + p_{out} v_{out} + E_{kout} + E_{pout}) = dM_{out} (h_{out} + E_{kout} + E_{pout}) \quad (1-3)$$

外界传给系统的热量为 dQ ，系统对外界做的功为 dW ，根据能量守恒定律得：

$$(E_{in} dM_{in} + dQ) - (E_{out} dM_{out} + dW) = d(M_s E_s) \quad (1-4)$$

将 (1-1)，(1-2)，(1-3) 式代入 (1-4) 可得：

$$\begin{aligned} [dM_{in} (u_{in} + p_{in} v_{in} + E_{kin} + E_{pin}) + dQ] - [dM_{out} (u_{out} + p_{out} v_{out} + E_{kout} + E_{pout}) \\ + dW] = [dM_{in} (h_{in} + E_{kin} + E_{pin}) + dQ] - [dM_{out} (h_{out} + E_{kout} + E_{pout}) \\ + dW] = [M_2 E_2 - M_1 E_1] = d(M_s E_s) \end{aligned} \quad (1-4 a)$$

式 (1-4) 和 (1-4 a) 为非稳态、非稳定流热力系统的基本能量方程。若以单位时间质量流率为依据，则经 dt 微元时间后，式 (1-4 a) 可改写成如下形式：

$$\frac{d(M_s E_s)}{dt} = \left[\frac{dM_{in}}{dt} (h_{in} + E_{kin} + E_{pin}) + \frac{dQ}{dt} \right] - \left[\frac{dM_{out}}{dt} (h_{out} + E_{kout} + E_{pout}) + \frac{dW}{dt} \right]$$

如果系统边界面上有 j 个进口和出口，并且假定流入系统的工质携带的能量为正值，从系统流出的工质携带的能量为负值，则式 (1-4) 可写成更一般的形式：

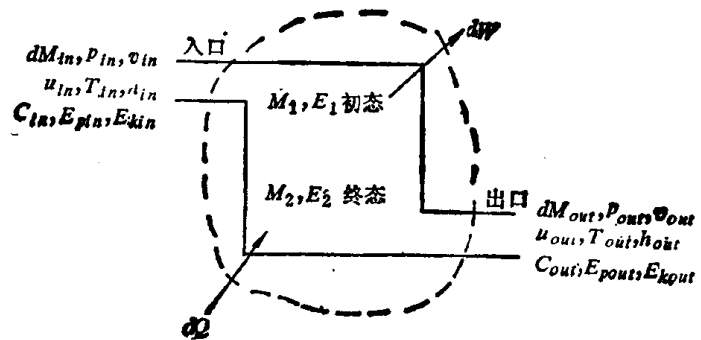


图1-1 非稳态、非稳定流热力系统图

$$\sum_j E_j dM_j + dQ - dW = d(M_s E_s) \quad (1-5)$$

这里: $E_j = (h_j + E_{k_j} + E_{p_j}) = (u_j + p_j v_j + E_{k_j} + E_{p_j})$ 。

一般热力机械设备, 其进出口工质的动能和势能变化都很小, 通常可忽略不计。这时, 基本能量方程变为:

$$[dM_{in} h_{in} + dQ] - [dM_{out} h_{out} + dW] = M_2 u_2 - M_1 u_1 \quad (1-6)$$

或

$$dQ - dW = [dM_{out} h_{out} - dM_{in} h_{in}] + [M_2 u_2 - M_1 u_1]$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \left[\frac{dM_{out} h_{out}}{dt} - \frac{dM_{in} h_{in}}{dt} \right] + \frac{d(M_s u_s)}{dt}$$

式中 u_1, u_2 ——系统内初始瞬间和终了瞬间单位工质的内能。

上述基本能量方程就是非稳态、非稳定流热力系统中热力学第一定律的数学表达式。求解该微分方程, 一般来说是复杂而困难的。但对几种特殊情况, 该方程可简化成较方便的形式。例如:

1. 只有工质流入系统, 没有工质流出系统的充气过程: 此时 $M_{out} h_{out} = 0$ 所以式 (1-6) 变为:

$$dM_{in} h_{in} + dQ = (M_2 u_2 - M_1 u_1) + dW \quad (1-6 a)$$

2. 不输出 (入) 外功的绝热充气过程; 热力系统与外界既无热量交换, 又无机械功相互作用, 即 $dQ = 0, dW = 0$; 同时也没有工质流出系统, $dM_{out} h_{out} = 0$ 。于是式 (1-6) 变为:

$$dM_{in} h_{in} = M_2 u_2 - M_1 u_1 = d(M_s u_s) = dU \quad (1-6 b)$$

3. 不输出 (入) 外功的绝热放气过程: 热力系统与外界既无热量交换, 又无机械功相互作用, 即 $dQ = 0, dW = 0$; 同时也没有工质流入系统, $dM_{in} h_{in} = 0$ 。于是式 (1-6) 变为:

$$-dM_{out} h_{out} = M_2 u_2 - M_1 u_1 = d(M_s u_s) = dU$$

即

$$dM_{out} h_{out} + dU = 0 \quad (1-6 c)$$

4. 可逆膨胀或压缩过程: 该热力系统与外界相互作用的机械功 $dW = p dV$, 所以式 (1-6) 变为:

$$[dM_{in} h_{in} + dQ] - [dM_{out} h_{out} + p dV] = M_2 u_2 - M_1 u_1 = d(M_s u_s) = dU \quad (1-6 d)$$

或

$$\left[h_{in} \frac{dM_{in}}{dt} + \frac{dQ}{dt} \right] - \left[p \frac{dV}{dt} + h_{out} \frac{dM_{out}}{dt} \right] = \frac{dU}{dt}$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dU}{dt} = p \frac{dV}{dt} + h_{out} \frac{dM_{out}}{dt} - h_{in} \frac{dM_{in}}{dt}$$

此外, 根据质量守恒定律得:

$$dM_s = M_2 - M_1 = dM_{in} - dM_{out} \quad (1-7)$$

或

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{in}}{dt} - \frac{dM_{out}}{dt} \text{ 及 } \Delta M_s = \int_{\Delta t} dM_{in} - \int_{\Delta t} dM_{out}$$

三、典型热力过程的分析

(一) 充气 and 放气过程

1. 绝热充气过程

(1) 不输出 (入) 外功的绝热充气过程

图 1-2 为这种热力系统的示意图。一个具有绝热壁面，容积为 V 的刚性容器，通过阀门与气源相连接。开始时，该刚性容器内，有数量为 M_1 的理想气体，其压力为 p_1 ，温度为 T_1 ，内能为 u_1 。假定气源容积为无限大，故其中气体状态始终保持不变，各参数状态以下脚“0”表示。又设气源与刚性容器中的气体为同一种气体，且 $p_0 > p_1$ 。打开阀门进行充气，直到刚性容器内的工质状态从状态 1 变到状态 2 为止，关闭阀门。现在要确定充气前后，刚性容器内工质温度的变化以及充气量 M_0 。

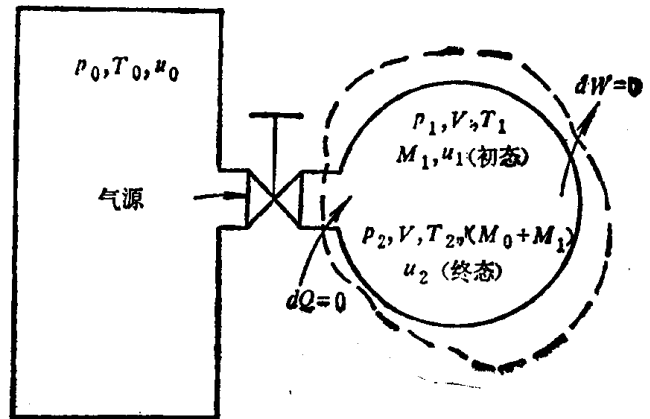


图 1-2 不输出（入）外功的绝热充气过程系统图

虚线表示热力系统的边界线。由于不输出（入）外功，且系统绝热，则可得 $dW = 0$ ， $dQ = 0$ ，由能量方程得：

$$h_0 dM_{i,n} = dU$$

由于气源工质的状态不变， h_0 为定值，所以将上式积分可得：

$$\int_1^2 h_0 dM_{i,n} = \int_1^2 dU, \quad h_0 M_0 = U_2 - U_1 = (M_1 + M_0)u_2 - M_1 u_1 \quad (1-8)$$

又因是刚性容器，故 $V_1 = V_2 = V$ 不变。且 $h_0 = u_0 + p_0 v_0$ ， $M_0 v_0 = V_0$ ，所以 $M_0(u_0 + p_0 v_0) = (M_1 + M_0)u_2 - M_1 u_1$

$$M_0 u_0 + p_0 V_0 = M_1 u_2 + M_0 u_2 - M_1 u_1$$

$$p_0 V_0 = M_0(u_2 - u_0) + M_1(u_2 - u_1) = M_0 c_v (T_2 - T_0) + M_1 c_v (T_2 - T_1)$$

除 c_v 后可得：

$$\frac{p_0 V_0}{c_v} = (M_1 + M_0)T_2 - M_0 T_0 - M_1 T_1 \quad (1-8a)$$

$$\text{又} \quad (M_1 + M_0)T_2 = \frac{p_2 V}{R}; \quad M_0 T_0 = \frac{p_0 V_0}{R}; \quad M_1 T_1 = \frac{p_1 V}{R}$$

代入式(1-8 a) 可得：

$$\frac{p_0 V_0}{c_v} = \frac{1}{R} (p_2 V - p_0 V_0 - p_1 V)$$

而 $c_v = R/(k - 1)$ ，代入上式可得：

$$k (p_0 V_0) = V (p_2 - p_1)$$

故

$$V_0 = \frac{V}{k p_0} (p_2 - p_1) \quad (1-8b)$$

于是可得：

$$M_0 = \frac{V}{R k T_0} (p_2 - p_1) \quad (1-8c)$$

充气结束，若刚性容器中的状态与气源的状态达到平衡，即 $p_2 = p_0$ ，则 (1-8 b)，(1-8 c) 式分别化为：

$$V_0 = \frac{V}{k p_0} (p_0 - p_1) = \frac{V}{k} \left(1 - \frac{p_1}{p_0}\right)$$

$$M_0 = \frac{V}{k R T_0} (p_0 - p_1)$$