

斯特林型脉冲管制冷机的最新进展^{*}

侯宇葵, 靖 葳, 袁 巍, 周 远, 梁惊涛

(中国科学院 理化技术研究所低温技术试验中心, 北京 100080)

摘 要:介绍了斯特林型脉冲管制冷机在理论分析和实用化方面的进展。与斯特林制冷机相比, 由于低温端没有运动部件, 脉冲管制冷机在寿命、可靠性和振动等方面有明显的优势, 同时直流现象的发现和它对它的抑制, 以及双向进气、长颈管等调相机构的应用, 使得斯特林型脉冲管制冷机的效率也可以达到或超过斯特林制冷机, 从而使斯特林型脉冲管制冷机在空间、红外器件和超导器件冷却等方面有广泛的应用。

关键词:脉冲管制冷机; 直流; 斯特林制冷机; 双向进气; 红外; 超导

中图分类号: TB6

文献标识码: A

文章编号: 1006—7086(2002)02—0063—08

RECENT DEVELOPMENT OF STIRLING TYPE PULSE TUBE CRYOCOOLER

HOU Yu-kui, JING Wei, YUAN Kun, ZHOU Yuan, LIANG Jing-tao

(Cryogenic Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China)

Abstract: The recent advances in Stirling type pulse tube cryocooler are reviewed. Compared with Stirling cryocoolers, pulse tube cryocoolers has advantages of life, reliability and vibration because of no moving parts in the cold head. With the understanding of the D C flow and the applying of the double-inlet and inertance tube, the efficiency of the pulse tube cryocooler is matching or exceeding that of Stirling cryocoolers. Stirling type pulse tube cryocooler will have a great use in cooling infrared sensors and superconductors for space and military applications.

Key words: pulse tube cryocooler; D C flow; Stirling cryocooler; double-inlet; infrared; superconductor

1 引 言

几乎所有自然界的物质在低温下(液氮温区、液氦温区乃至更低)可以获得常温下所不具有的特殊性质^[1], 如超导电性、(氦)超流性、磁有序态(Magnetic Ordering)、量子霍尔效应(Quantized Hall Effect)等, 这些性质导致了一些新的应用, 如红外探测器、强磁体、MRI、天文物理辐射探测器等, 当然这些应用需要液氮温区至 mK 温区的低温环境, 低温环境的获得不可避免地需要低温制冷技术。

实验室研究用低温技术一般使用低温恒温器^[1,2], 但随着商业及军事应用的发展, 这种方式在经济性、长寿命、可靠性、方便性等方面不能满足实用化的要求, 这样低温制冷机作为一种使用简单、方便灵活的冷源而得到了迅速的发展, 与使用低温恒温器相比, 它省去了诸如储运、充注等麻烦, 可以广泛应用于^[2~6]红外探测器、高速计算机中半导体芯片和高温超导体等的冷却。其中对红外探测器的冷却是目前低温制冷机的主要应用领域, 而对高速计算机中半导体芯片和高温超导器件冷却是低温制冷机的一个重要发展方向。

空间及地面红外探测器对低温制冷机的需求约在 50 年前开始出现, 要求在液氮温区有从 0.1 W 到 2.0 W 的制冷量, 从 20 世纪 70 年代开始使用的斯特林制冷机是冷却红外器件的主要低温制冷机, 目前,

^{*} 收稿日期: 2002—01—11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(批准号: 50176052)。

作者简介: 侯宇葵(1968—), 男, 湖南省安仁县人, 博士, 从事低温制冷技术研究。

全世界约有十几万台斯特林制冷机在空间、军事领域发挥作用。随着空间技术的发展,对低温制冷机的要求越来越严格,斯特林制冷机的缺点日益突出,由于排出器的存在,引起了诸如磨损、振动、电磁干扰和寿命不长等方面的问题,同时磨损又导致制冷工质污染、制冷性能降低等问题,这些缺陷是斯特林制冷机所固有的,几乎不可解决。为此,研究新的替代低温制冷技术很有必要,脉冲管制冷机便得到了各国的重视。

脉冲管制冷机技术始于20世纪60年代。按其驱动方式的不同,可分为两大类,即GM型脉冲管制冷机和斯特林型脉冲管制冷机,后者是斯特林制冷机的一个变种^[2~6]。它取消了斯特林机在低温端的运动部件(即排出器)。这一改变不仅减小了制造难度,而且也大大减小了冷端换热器的振动,同时还有利于提高可靠性和延长寿命。更为难得的是,脉冲管制冷机可以利用其他制冷机的成熟技术,如线性压缩机、蓄冷器等。脉冲管制冷技术从20世纪80年代中期以来得到迅速发展,与其他制冷机相比,脉冲管制冷机的优势有:结构简单、制造容易、成本低、可靠性高、冷端无机械振动源、电磁干扰小。正是脉冲管制冷机这些显著的优点使得它成为近几十年来最热门的小型低温制冷机,同时也是适合空间应用的新一代制冷机。美国从20世纪90年代初开始研制空间用小型斯特林型脉冲管制冷机,在效率方面已经可以和斯特林制冷机相媲美,按照他们的计划,在20世纪末开始陆续已有脉冲管制冷机发射升空^[7,8]。

长期以来,我国小型低温制冷技术一直落后于西方发达国家,目前我国只有“风云”系列气象卫星应用辐射制冷技术^[9],小型斯特林制冷技术处于正在研究的阶段。由于脉冲管制冷技术被认为是取代斯特林制冷机的“第二代空间低温制冷技术”,因此我们有可能跃过斯特林制冷机阶段,直接研制具有先进水平的空间用斯特林型脉冲管制冷机,以促进我国国防事业的发展^[10]。

2 斯特林型脉冲管制冷机的理论研究最新进展

脉冲管制冷机内部工质进行复杂的交变运动过程,其工作机制涉及到热力学、流体动力学和传热学甚至声学等多方面的问题,描述脉冲管制冷机运动的方程具有强烈的非线性效应。从20世纪60年代开始,先后发展了表面泵热理论、焓流调相理论、热声理论和数值计算方法来对脉冲管制冷机性能进行模拟。进入20世纪90年代后,各国学者对脉冲管制冷机的内部工作过程进行了详细的研究,大大提高了脉冲管制冷机的效率,分述如下。

2.1 脉冲管制冷机的调相理论和长颈管

Radebaugh等的焓流调相理论认为,脉冲管制冷机冷端的压力波和体积流速之间的相位差是影响制冷量的关键因素之一,当不考虑脉冲管制冷机中蓄冷器的损失时,得出的结论是:冷端的压力波和气流的体积流速同相时,制冷机的制冷性能最佳,而相位差为 90° 时制冷效果最差,这是脉冲管制冷机发展早期人们对脉冲管制冷机中相位关系的认识。但考虑脉冲管制冷机中蓄冷器的损失时,最佳相位关系有所变化。Radebaugh等的分析研究表明,整个蓄冷器内的体积流速波的幅值的平均值最小时,才能使蓄冷器中的损失最小,这种情况只有在脉冲管(蓄冷器)冷端的气体流速波滞后于脉冲管中的压力波时才可能发生。Radebaugh等认为滞后约 30° 时制冷机的综合性能最佳,此时脉冲管热端的体积流速波约滞后于压力波 60° 。这种相位关系与斯特林制冷机非常相似。

双向进气型脉冲管制冷机^[11]直接将一股气流经双向进气阀从压缩机出口引至脉冲管热端,从而使脉冲管热端的气体体积流速可以滞后于脉冲管中的压力波。因而双向进气有可能使脉冲管冷端的气体体积流速与压力波同相,甚至使体积流速落后于压力波,与此同时,直接参与制冷的气体体积,不断减少,即理论制冷量减少;双向进气流程的采用还会导致直流现象的产生,使制冷机运行工况不稳定,并带来新的制冷量损失。

为提高脉冲管制冷机的制冷效率,理想的调相机构应该能使相位关系调节到理想状态,同时不减少参与制冷的气体体积,并且不产生直流现象,长颈管(Inertance Tube)便是满足这种要求的调相机构。长颈管是一条细长小管(如图1所示),是适用于斯特林型脉冲管制冷机的非常巧妙的一种调相机构,它具有较强的调相能力且不产生直流现象^[12~18]。

可以从管内气体工质的运动方程出发来分析长颈管的调相机理。假设管内为一维流动,气体工质为

理想气体。动量守恒方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{f_r}{2r_h \rho_0 A^2} \dot{m} \frac{d\dot{m}}{dt} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\dot{m}}{A} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{1}{\rho_0} \left[\frac{d\dot{m}}{dt} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中 黑体字表示随时间变化的复变量; $\dot{m}$ 为质量流量; x 为横坐标(设从压缩机至气库为正方向); p 和 $\dot{p}$ 分别为动态压力及其时间变化率; f_r 为 Darcy 摩擦因子; r_h 为水力半径; ρ_0 为平均压力下的密度; A 为管截面积。

在式(1)中,右边第一项表示流阻;第三项与管截面积变化有关,只有在管截面积发生突变时才重要;第二项是加速度项,在低频或质量流量较小的情况下,该项通常可以忽略,这时压力降与质量流量(或体积流速)同相,而在高频情

况下,此项不能忽略,这时压力降增加了一个超前质量流量率在 90° 的分量(与加速度同相),在它的作用下,可以在长管的一端得到质量流量(或体积流速)滞后于压力波的相位关系。因此这个分量可以产生我们所期望的效果,它是由所谓的交变流动惯性作用而得到的,只有在高频情况下这个作用才明显,类似于电学中的感抗项。

长颈管中流体运动各参数间的关系类似于电路中电压、电流之间的关系式,其中压差类比于电压,体积流速类比于电流,对于层流流动,阻抗 R 和感抗 L 分别为

$$R = \frac{8\mu l}{\pi r^4} \quad (2)$$

$$L = \frac{\rho_0 l}{\pi r^2} \quad (3)$$

式中 μ 为黏性系数; l 为管长; r 为管半径。

图2是长颈管型脉冲管制冷机热端调相机构(参见图1,包括长颈管和气库)的电路模拟图(忽略长颈管的容性效应)。图中 C_r 为气库的容性。调相机构的抗性 Z 可表示为

$$Z = \frac{\Delta p}{U_{\text{hot}}} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_r} \quad (4)$$

式中 $\Delta p = p_{\text{pt}} - p_r$, 为脉冲管和气库之间的动态压力差; U_{hot} 为脉冲管热端气体的体积流速; $\omega = 2\pi f$, 为角速度, f 为制冷机的运转频率。下标“pt”、“r”、“hot”分别为“脉冲管”、“气库”和“热端”。

由于气库容积很大,可假设气库中没有压力波动,这样压力差 $\Delta p = p_{\text{pt}}$, 即压力差等于脉冲管中的动态压力;同时还忽略式(4)中右边第三项,故式(4)可简化为

$$Z = \frac{p_{\text{pt}}}{U_{\text{hot}}} = R + j\omega L \quad (5)$$

根据式(2)、式(3)、式(5),可推导出脉冲管中压力波与体积流速之间的最大可能的相位差为

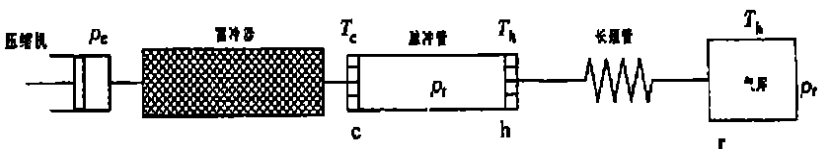


图1 长颈管型脉冲管制冷机示意图

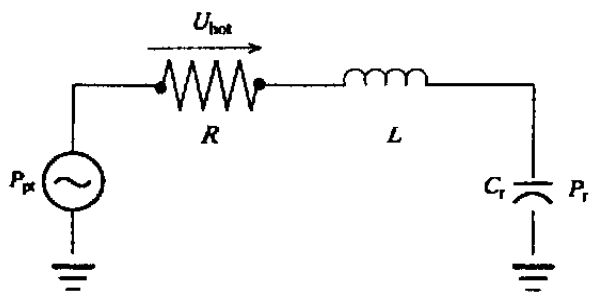


图2 电路模拟图

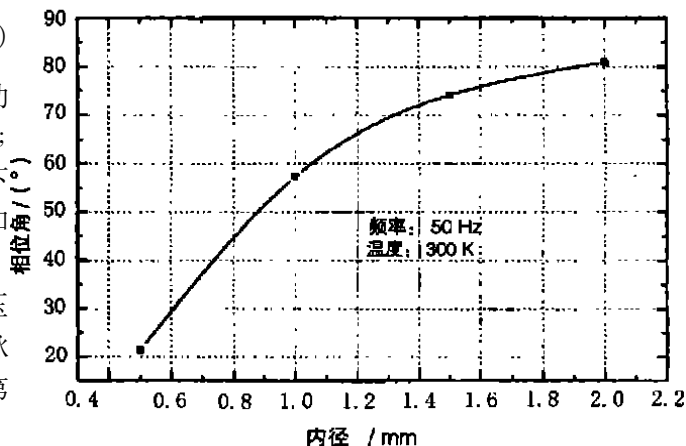


图3 不同管直径长颈管所能达到的最大调相能力
(相位角为正表示压力波超前体积流速波)

$$\varphi=\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}=\tan^{-1}\frac{\rho\omega d^2}{32\mu}$$

(6)

式(6)可表示为图 3。从图中可见,似乎只要选择合适的管径,即可得到 0~90°间的任何相位角,实际上由于式(6)忽略了气库和长颈管本身的容抗,并且管内流动有可能不是层流,实际的相位差不会调至最大值。

2.2 直 流

所讨论的直流是宏观直流,是指一周期内进出制冷机各横截面的气体工质质量流量不相等,有朝一个方向的净流量(如图 4 所示),在回热器、脉冲管和双向进气阀所组成的封闭通道中形成稳定的环流。

直流现象会降低脉冲管制冷机的制冷性能,主要表现为^[19]:(1)回热器(或脉冲管)中温度分布偏离线性分布,对于回热器来说实际上是减小了其有效性,从而使其中气体和固体填料间的换热不充分,降低了回热器的效率;(2)回热器和脉冲管中的温度梯度增加,引起与温度梯度有关的轴向导热损失和穿梭损失增加;(3)最主要的是直流分量直接将热量从高温端传递至低温端,引起有效制冷量减小,此损失为^[20]

$$Q_{DC}=M_{DC}C_p(T_h-T_c)$$

(7)

式中 Q_{DC} 为直流引起的冷量损失; M_{DC} 为直流的大小; C_p 为定压比热; T_h 和 T_c 分别为热端温度和冷端温度。

直流分量引起的损失可以有相当大的数量级,据估算,当直流分量的大小为 10^{-3} g/s,且冷端温度在 100 K 以下时,该损失超过 1 W。

直流现象最早由 Gedeon 提出^[21],他从理论上分析了回热式制冷机中可能出现的直流现象。直流分量是一个二阶小量,而至今为止只有巨永林等^[22]用热线风速仪对其进行了直接的测定,并认为多路旁通流程可以抑制直流的产生。Charles 和 Kotsubo^[23]通过测量蓄冷器和脉冲管管壁的温度分布间接地验证了直流的存在,他们以非对称阻力元件作为双向进气阀,改变阻力元件的朝向及开度分别得到了不同方向和幅值的直流分量,并获得了不同的管壁温度分布,由此间接地证明了直流的存在,同时还分析了直流所产生的冷头温度波动现象及对制冷性能的影响。Charles 认为非对称阻力元件的使用可以抑制低频脉冲管制冷机中直流的产生,而长颈管则对高频制冷机有效,Kotsubo 建议用非对称阻力元件。Chen 等^[24,25]在两级脉冲管制冷机中采用第二小孔结构使制冷机的制冷性能得到提高,他们将这种提高归功于第二小孔抑制了制冷机中的直流分量。Olson 等^[26]则用锥形脉冲管从根本上消除直流。

直流是一种二阶效应,产生的主要原因有:(1)由于密度的差异,一个周期内制冷机中进出各阻力元件(如双向阀和回热器等)的质量流量不平衡引起了直流的发生;(2)交变流动的气体工质和脉冲管(或回热器)管壁的黏性、热作用会产生瑞利流;(3)由于阻力元件的结构不对称使一个周期内通过它的压力降不对称,朝一个方向的压力降与相反方向的压力降的差异会使所对应的质量流不平衡,这种原因产生的直流可以是正方向,也可以是负方向。原因(1)、(2)产生的直流称为脉冲管制冷机中的“固有直流”,将原因(3)产生的直流称为“人为直流”。

固有直流分量具有固定的方向,即:脉冲管—蓄冷器—双向阀—脉冲管;而人为直流的方向可以控制。以非对称喷嘴^[27]为例,非对称喷嘴的不对称性指从正常方向流动(参见图 5 中箭头方向)的阻力比反向流动时要小,从而在一个周期内会产生朝某一方向的净流动,这种方法产生的直流方向可以控制。利用这个条件,通过改变非对称喷嘴的朝向,来产生人为的直流方向。如果这个人为的直流方向与固有

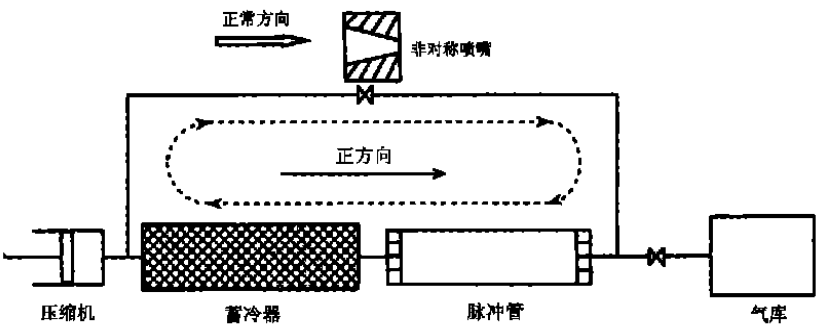


图 4 双向进气脉冲管制冷机中固有的直流现象

的直流方向相同,则脉冲管制冷机中的直流总会在这个方向加强;如果人为直流方向与固有直流方向相反,则两者会互相抵消一部分。非对称喷嘴的正向、反向流量系数与其内部结构如喉部直径、斜面的锥度等有关。因此,最优的非对称喷嘴在获得最佳的双向进气开度(喉部直径)的情况下,通过改变斜面的锥度可能会产生完全抑制直流现象的发生。

2.3 斯特林型脉冲管制冷机的效率

图5 非对称喷嘴(箭头为正常方向)
示意图

斯特林型脉冲管制冷机有取代斯特林制冷机的趋势,影响这一进程的最大障碍便是效率问题。从理论上来说,脉冲管制冷机的效率要比斯特林制冷机的效率低,尽管如此,在实际应用中脉冲管制冷机的效率依然可以达到或超过斯特林制冷机。主要原因在于:(1)温度越低斯特林制冷机和脉冲管制冷机理论效率间的差异越小;(2)空间用微型斯特林制冷机一般采用分置式结构,这种结构丧失了整体式制冷机的主动调相机构,也是采用被动调相;(3)斯特林制冷机的排出器在冷腔运动时有附加摩擦损失和泵气损失;(4)对脉冲管制冷机内部工作过程的深入了解使得调相机构得到加强,内部损失进一步减小。

Raydebaugh 统计了各种不同低温制冷机的效率。他发现 G-M 型脉冲管制冷机的效率比 G-M 制冷机要差些,但斯特林型脉冲管制冷机可以达到并超过斯特林制冷机的水平。因此,斯特林型脉冲管制冷机的应用研究有相当吸引力;斯特林型脉冲管制冷机寿命长、可靠性高,其最具有潜力的应用场合是空间应用,在这方面的实用化研究成果也最为显著。

3 斯特林型脉冲管制冷机的实用化研究进展

斯特林型脉冲管制冷机的主要应用领域是空间及军事方面的红外探测技术和超导技术。国外主要研究机构分布在美国、欧洲、日本等。其中美国在空间斯特林制冷技术方面进展迅速,欧洲和日本则在超导用制冷机方面投入较大。

3.1 斯特林型脉冲管制冷机在美国的进展

为保证其空间技术优势,美国在斯特林型脉冲管制冷机实用化研究方面的投资最多,主要的投资者为:DoD (The Department of Defence)、NASA 和 BMDO (Ballistic Missile Defence Organization)等。项目管理者主要为:JPL、AFRL (Air Force Research Laboratory)和 LMMS (Lockheed Martin Missile and Space)等。主要的研制者为:TRW、NIST 和 LMMS 等,产品研制成功后交项目管理者共同进行系统实验,实验项目包括振动、长寿命、电磁兼容、与器件耦合和热端散热等。可以说美国脉冲管制冷技术是最先进的。

3.1.1 TRW 的斯特林型脉冲管制冷机研究进展

TRW 在 1991 年就研制成 1 cm^3 线性压缩机驱动的空间微型脉冲管制冷机。该机在 1992 年获得 72 K 的低温,在 77 K 时有 280 mW 的制冷量,80 K 时的制冷量为 530 mW,输入功率 17.80 W (环境温度为 287 K)。其性能水平接近同规格的斯特林制冷机^[28],已有 2 台制冷机于 1997 年发射升空,用于冷却 HSI (Hyper Spectral Imager)和 LEISA (Linear Etalon Imaging Spectral Array)焦平面,HSI 装备于 Lewis 飞行器,发射后未能达到预期目的^[29]。1996 年,对该机的冷头进行了改进,输入功率 22.17 W,65 K 时的制冷量达 200 mW。该机的水平可与斯特林机相媲美,被用来冷却 Hyperion 中 HgCdTe 焦平面。Hyperion 装备于 EO-1 飞行器,是 HSI 的改进型号,计划于 2001 年升空^[30]。

TRW 随后又开发了 2 W、60 K (TRW6020)和 0.3 W、35 K (TRW3503)2 种脉冲管制冷机,他们都由同样的对置式 10 cm^3 线性压缩机驱动,其中 TRW6020 的比功耗(输入功率/制冷功率)已低于斯特林制冷机^[31]。TRW3503 被用来冷却 AIRS 中的红外探测器(NASA 项目),压缩机输入功率为 82 W 时,可在 55 K 时提供 1.63 W 制冷量。该制冷机已在 JPL 与 AIRS 仪器耦合,完成了系统水平的实验,完全满足各种要求^[32]。TRW6020 被应用于 MTI (Multispectral Thermal Imager)仪器中,这是 AFRL 的项目,并已完成系统测试。TRW3503 经过进一步改进后应用 EOS TES (Tropospheric Emission Spectrometer)仪器中, TES 制冷机在 65 K 提供超过 2 W 的制冷量,其比功耗为 38 W/W,比相同条件下 TRW3503 的比

功耗降低约 5 W/W, EOS 飞行器约在 2003 年发射。

1999 年, TRW 报告了最新研制的 IMAS 脉冲管制冷机^[33,34], 这是为冷却 The Integrated Multispectral Atmospheric Sounder 探测器的制冷机。该机在 55 K 提供 0.5 W 制冷量, 比功耗为 50 W/W, 比相同工况下 TRW3503 的功耗几乎降低了 1/2。不仅如此, IMAS 脉冲管制冷机的体积和质量也大大减小, 冷指的质量只有 TRW3503 的 1/3。这种制冷机被称为第二代脉冲管制冷机, 其性能大幅度提高的关键在于压缩机性能的提高。IMAS 脉冲管制冷机所用压缩机的扫气体积最大为 6.5 cm³, 其移动线圈和线性马达采用了新的设计, 在减小质量的情况下其驱动力和活塞行程不减。

根据最新资料, TRW 最新开发成功了一种效率更高的脉冲管制冷机^[35], 这种制冷机采用了 Oxford University 开发的高效线性压缩机^[36]。该制冷机在 95 K 时的比功耗为 10 W/W, 卡诺效率 24 %, 单位制冷量质量小于 0.43 W/kg, 是迄今为止最好的脉冲管制冷机。

3.1.2 LMMS 和 NIST 的脉冲管制冷机

Lockheed Martin Advanced Technology Center 从 1987 年开始发展空间斯特林低温制冷机, 于 1994 年开始研制空间脉冲管制冷机, 由于是要替代斯特林制冷机, 所以脉冲管制冷机的研制是直接按斯特林制冷机的标准设计的。已开发的制冷机有: (1) The Lockheed Martin Mark III 制冷机^[37], 由扫气体积为 5 cm³ 的高效线性压缩驱动, 在 60 K 时有 2.4 W 的制冷量, 比功耗为 29 W/W; 在 80 K 时有 4.7 W 的制冷量, 比功耗为 15 W/W, 卡诺效率达 18 %, 最低制冷温度为 32 K。(2) 空间用二级脉冲管制冷机^[38], 采用二级结构的目的是为了简化系统, 由 1 台制冷机满足 2 种温度要求。一级冷头在 56 K 时提供 0.60 W 制冷量, 二级冷头在 35 K 时提供 0.32 W 的制冷量, 由扫气体积为 10.9 cm³ 线压缩机驱动。(3) 为满足高温超导器件而开发的 2 种脉冲管制冷机^[39], 一种是大功率, 要求在 77 K 时提供 10.00 W 制冷量; 另一种是小功率, 在 77 K 提供 0.50 W 制冷量。这两种制冷机正处于开发阶段。(4) 与 DRS Infrared Technologies 合作研制了一种应用于冷却 Gamma 射线分光仪的脉冲管制冷机^[40], 要求达到 1.75 W、80 K 的目标, 实际达到了 1.60 W、80 K, 比功耗为 23 W/W。脉冲管为 U 形结构, 为提高强度, 蓄冷器和脉冲管采用了加强筋结构。

NIST (National Institute of Standards and Technology) 的低温技术研究组在 Raydebaugh 的指导下对脉冲管制冷机机理方面的研究作了很大贡献, 同时在脉冲管制冷机实用化方面的工作也相当出色。最近研制成功的脉冲管氧液化器^[41], 是为载人登火星而准备的设备, 以期在火星上可以就地液化氧气, 供宇航员生存以及飞行器燃料之需。脉冲管氧液化器按照航天飞行的要求设计, 由一扫气体积为 15.5 cm³ 的对置式线性压缩机驱动, 脉冲管制冷器部分采用同轴式结构, 其调相机构为两段不同管径的圆管组成的长颈管。在 90 K 时可提供 18.8 W 制冷量, 输入 PV 功为 222 W, 以最大 2.7 g/min 的速率生产液氧。从 1999 年开始, NIST 为大型天文探测 NARO (National Radio Astronomy Observatory) 项目的 Millimeter Array Sensor 冷却而进行线性压缩机驱动的两级脉冲管制冷机的研究^[42]。该制冷机要求在 10 K 时提供 2 W 制冷量, 用来预冷下一级的 J-T 制冷器, 以便在 3.8 K 时获得冷量来冷却 Superconductor—Insulator—Superconductor (SIS) radio frequency detectors, 脉冲管制冷机的研制正在进行。

3.2 斯特林型脉冲管制冷机在我国及其他国家的进展

“九五”期间, 中科院低温中心开展了空间外探测器用微型脉冲管制冷机研究^[43~45]。脉冲管制冷器采用同轴和多路旁通结构, 采用低温中心研究的轮式弹簧线性压缩机, 制冷功率达到 250 mW/85 K 以上, 输入功率 29 W, 重量小于 3 kg, 连续工作寿命达到 1 100 h 以上。在长寿命实验期间, 制冷机冷端温度波动为 ±1 K, 基本平稳。在连续工作约 1 200 h 后, 制冷量小于上述指标, 即认为制冷机失效, 停机后分析检测的结果表明, 冷量下降主要是由于工质污染。

在空间脉冲管制冷机技术的基础上, 低温中心又研制出其他方面应用的脉冲管制冷样机。对于直径为 9 mm 的冷指, 当输入功率为 47 W 时, 最低温度可达到 61 K, 80 K 时的制冷功率为 500 mW。将冷指外径从 9 mm 缩小到 8 mm; 输入功率为 51 W 时, 最低温度达到 62 K, 80 K 时的制冷功率为 450 mW; 而当输入功率为 38 W 时, 80 K 时有 350 mW 的制冷率。这样的制冷能力已经能够满足一些

红外器件冷源的要求。

法国 CEA/STB 的脉冲管制冷技术研究组 ESA (European Space Agency) 开发了一种小型斯特林脉冲管制冷机,其最低制冷温度为 53 K,80 K 时制冷量达 1.7 W,比功耗为 23 W/W。CEA/STB 的研制重点是 G—M 型脉冲管制冷机。

近年来,随着线性压缩机技术的发展,大功率线性压缩机已能满足商业化应用的需求,因此由这种压缩机驱动的大制冷量脉冲管制冷机逐步成为高温超导冷源的首选。最近德国 Giessen 大学报道了最新开发的大功率斯特林型脉冲管制冷机,其制冷机采用长颈管和双向进气作为调相结构,最低温度可达 34.3 K,80 K 时制冷量为 5.2 W(输入功率 180 W)。该机还在进一步改进中。

4 总 结

与斯特林制冷机相比,由于低温端没有运动部件,斯特林型脉冲管制冷机在寿命、可靠性和振动等方面有明显的优势,同时直流现象的发现和对他抑制,以及双向进气、长颈管等调相机构的应用,使得斯特林型脉冲管制冷机的效率也已达到或超过斯特林制冷机,从而使斯特林型脉冲管制冷机在空间、红外器件和超导器件冷却等方面有广泛的应用。

参考文献:

- [1] GUSTAV KLIPPLING, INGRID KLIPPING. Cryogenics—origin development and challenges[C]. Proceeding of Beijing International Conference on Cryogenics, Beijing China, 2000. 1~18.
- [2] RAVEX A. Recent developments in cryocooler[C]. 20th International Congress of Refrigeration, IIR/IIF, Sydney, 1999. 617~631.
- [3] RAY RADEBAUGH. Advances in cryogenics, Proc[C]. ICEC16/ICMC, Japan, 1996, Elsevier Science, oxford 1997. 33~44.
- [4] RADEBAUGH R. Pulse tube cryocoolers for cooling infrared sensors[C]. Proceeding of SPIE Bjom F. Andresen, 2000. 363~379.
- [5] RAVEX A, PONCET J M, CHARLES I, BLEUZE P. Development of low frequency pulse tube refrigerators[J]. Adv Cryo-Eng, 43:1957~1964.
- [6] RAVEX A, CHARLES I, DUBAND L, *et al*. Pulse tube developments at CEA/STB[J]. Advances in Cryogenic Engineering 2000, 45:9~17.
- [7] GLAISTER D S, DONABEDIAN M, CURRAN D G T, *et al*. An overview of the performance and maturity of long life cryocoolers for space applications [J]. Cryocooler, 1999, 10:1~19.
- [8] ROSS R G JR. JPL Cryocooler development and test program: A 10—year overview [C]. Proceeding of the 1999 IEEE Aerospace Conference, Colorado, 1999. 34~39.
- [9] 王维杨, 董德平, 全海勇. 太阳同步轨道辐射制冷技术的发展[J]. 真空与低温, 1998, 4(2):74~77.
- [10] LIANG J, ZHOU Y. Study on miniature pulse tube cryocooler for space application[J]. Cryogenics, 2000, 40:229~233.
- [11] ZHU S, WU PP, CHEN Z. Double inlet pulse tube refrigerator—an important improvement [J]. Cryogenics, 1990(30):514~518.
- [12] KANAO K, WATANABE N, KANAZAWA Y. A miniature pulse tube refrigerator for temprerature below 100K[J]. Cryogenics, 1994, 34:167~170.
- [13] Godeshalk K M, JIN C, KWONG Y K, *et al*. Characterization of 350Hz thermoacoustically driven orifice pulse tube refrigerator with measurements of the phase of the mass flow and pressure[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1996, 41:1411~1418.
- [14] ZHU S W, ZHOU S L, YOSHIMURA N, *et al*. Phase shift effect of the long neck tube for the pulse tube refrigerator[J]. Cryocooler, 1997, 9:269~278.
- [15] GARDNER D L, SWIFT G W. Cryogenics use in of inertance in orifice pulse tube refrigerators[J]. Cryogenics, 1997, 37:117~121.
- [16] ROACH PAT R, KASHANI ALI. Pulse tube coolers with an inertance tube: theory, modeling and practice [J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1998, 43:1895~1902.

- [17] DUBAND L, CHARLES I, RAVEX A. Experimental results on inertance and permanent flow in pulse tube coolers[J]. Cryocooler, 1999, 10: 281~290.
- [18] MARQUARDT E D, RADEBAUGH R. Pulse Tube oxygen liquefier [J]. Advances in cryogenic engineering, 2002, 45: 557~464.
- [19] ICHARLES L, DUBAND A, RAVEX. Permanent flow in low and high frequency pulse tube coolers—experimental results [J]. Cryogenics, 1999, 39: 777~782.
- [20] GREG SWIFT. Thermoacoustics; A unifying perspective for some engines and refrigerators [C]. Condensed matter and thermal physics group, los Alamos national laboratory, 1999. 1058~1070.
- [21] GEDEON D. DC gas flows in Strling and pulse tube cryocoolers [J]. Cryocoolers, 1996: 385~392.
- [22] 巨永林, 周远. 脉冲管制冷机直流效应实验研究[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(4): 414~417.
- [23] KOTSUBO V, HUANG P, NAST T C. Observation of DC flows in a double inlet pulse tube[J]. Cryocoolers, 1999, 10: 299.
- [24] CHEN G, QIU L, ZHENG J, *et al.* Experimental study on a double-orifice two-stage pulse tube refrigerator [J]. Cryogenics, 1997, 37: 271.
- [25] CHEN G, ZHENG J, QIU L, *et al.* Modification test of staged pulse tube refrigerator for temperature below 4K[J]. Cryogenics, 1997, 37: 529.
- [26] OLSON J R, SWIFT G W. Suppression of acoustic streaming in tapered tubes [J]. Cryocoolers, 1999, 10: 307.
- [27] 周远, 巨永林, 朱文秀, 等. 采用喷嘴结构的高效微型同轴脉冲管制冷机 [J]. 真空与低温, 1998, 4(2): 150~154.
- [28] CHAN C K, JACO C. Miniature pulse tube cooler [J]. Cryocooler, 1993, 7: 113~124.
- [29] TWARD E, CHAN C K, JACO C, *et al.* Miniature space pulse tube cryocoolers [J]. Cryogenics, 1999, 39: 717~720.
- [30] Lt TOMLINSON B J. Multispectral Thermal Imager (MTI) space cryocooler development, integration and test [J]. Cryocooler, 1999, 10: 129~138.
- [31] BURT W W, CHAN C K. New mid-size high efficiency pulse tube coolers[J]. Cryocooler, 1997, 9: 224~226.
- [32] ROSS R G, Jr JOHNSON D L, COLLINS S A. AIRS PFM pulse tube cooler system-level performance[J]. Cryocooler, 1999, 10: 119~128.
- [33] CHAN C K, NGUYEN T, COLLBERT R, *et al.* IMAS pulse tube cooler development and tesing[J]. Cryocooler, 1999, 10: 139~147.
- [34] CHAN C K, TNGUYEN. Performance of TRW new generation pulse tube cooler[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 45: 65~74.
- [35] TWARD E, CHAN C K, RAAB J, *et al.* High efficiency pulse tube cooler[J]. Cryocooler, 2001, 11: 163~168.
- [36] BAILEY P B, DADD M W. High performance flight cryocooler compressor[J]. Cryocooler, 2001, 11: 169~174.
- [37] KOTSUBO V, OLSON J R, CNAST T. Development of a 2W at 60K pulse tube cryocooler for spaceborne operation [J]. Cryocooler, 1999, 10: 157~161.
- [38] OLSON J R, KOTSUBO V, CHAMPAGNE P J, *et al.* Performance of a two-stage pulse tube cryocooler for space application [J]. Cryocooler, 10: 163~170.
- [39] KOTSUBO V, OLSON J R, CHAMPAGNE P J, *et al.* Development of pulse tube cryocoolers for HTS satellite communication[J]. Cryocooler, 1999, 10: 171~179.
- [40] ROSS R G, Jr JOHNSON D L, METZGER A. Gamma-ray pulse tube cooler development and testing[J]. Cryocooler, 2001, 11: 115~162.
- [41] MARQUARDT E D, RADEBAUGH R. Pulse tube oxygen liquefier[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 2000, 45: 457~464.
- [42] RADBAUGH R, MARQUARDT E, BRADLEY P. Development of a Pulse Tube Refrigerator for Millimeter Array Sensor Cooling; Phase I, ALMA Memo #281[R]. December, 10, 1999.
- [43] LING J, ZHOU Y, *et al.* Study on miniature pulse tube cryocooler for space application[J]. Cryogenics, 2000, 40: 229~233.
- [44] JINGTAO LIANG, YUKUI HOU, YUAN ZHOU, *et al.* Development of a miniature Co-axial pulse tube refrigerator for infrared detector application[J]. SPIE 2000, 4130: 52~60.
- [45] 梁惊涛, 闫令文, 周远, 等. 高频微型脉冲管制冷机的实用化研究[C]. 第五届全国低温工程大会论文集, 2001. 6~9.