

文章编号: 1672-8785(2013)06-0001-09

空间用斯特林型脉管制冷机的应用现状研究

曹永刚^{1,2} 陈 曦¹ 吴亦农²

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 由于具有效率高、可靠性强和寿命长等优点, 斯特林型脉管制冷机在空间应用方面具有明显优势, 近年来也逐渐成为人们研究的热点领域。通过对国内外斯特林型脉管制冷机在空间应用中的最新研究进展进行分析, 展望了斯特林型脉管制冷机的应用前景和发展趋势。最后阐述了百赫兹脉管制冷机的研究现状及其关键技术。

关键词: 脉管制冷机; 空间应用; 温度; 制冷量; 百赫兹

中图分类号: TB651 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.06.001

Review of Key Technologies of Stirling-type Pulse Tube Cryocoolers for Space Application

CAO Yong-gang^{1,2}, CHEN Xi¹, WU Yi-nong²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Stirling-type pulse tube cryocoolers have become a research hotspot in recent years because of their obvious advantages of high efficiency, high reliability and long lifetime in space applications. The recent research advance in the Stirling-type pulse tube cryocoolers for space application at home and abroad is analyzed. The application prospect and development trend of Stirling-type pulse tube cryocoolers are described. Finally, the current status and key technologies of 100-Hz pulse tube cryocoolers are reviewed.

Key words: Stirling-type pulse tube cryocooler; space application; temperature; cooling capacity; 100-Hz

0 引言

自 20 世纪 50 年代以来, 低温研究工作者一直在积极寻求可维持数年以上的空间冷源, 以保证空间红外探测器的长寿命工作。其中有两种回热式低温制冷机 (即斯特林制冷机和脉管制冷机) 得到了较为深入的研究并在实际应用中发挥了重要作用^[1]。

与斯特林制冷机相比, 脉管制冷机由于其

冷端完全取消了运动部件而具有结构简单、制造容易、成本低、冷头振动和电磁干扰小、可靠性强以及预期寿命长等一系列显著优点, 因而成为近 20 年来回热式低温制冷机研究中的一大热点^[2]。从 20 世纪 80 年代末开始, 脉管制冷机技术的突飞猛进及其自身结构所赋予的优点引起了以美国为代表的西方发达国家空间技术主管部门的强烈关注, 并促使他们对其进行了持续的研发投入^[3]。1998 年 1 月, 美国成功地在

收稿日期: 2013-04-18

作者简介: 曹永刚 (1987-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事脉管制冷机方面的研究。

E-mail: cyg603@126.com

其军事卫星上用两台脉管制冷机冷却了红外探测器,这标志着高频脉管制冷机在空间技术领域真正实现了实用化^[4]。截至 2009 年 7 月,美国 NGAS 公司已有 11 台脉管制冷机实现在轨运行,而且其中有两台已经连续工作超过 11.5 年^[5]。这些技术成就引领了世界范围内的技术发展潮流,使斯特林型脉管制冷机逐渐成为新一代回热式空间制冷机的代表机型。

1 空间用斯特林型脉管制冷机的研究现状

牛津型线性压缩机的发明使制冷机能够达到超过五年的寿命。这为研制具有紧凑性和低质量的制冷机指明了方向。随着技术的不断进步,脉管制冷机的制冷温度和制冷量都满足了应用需求。1992 年,Chan C K 等人研制了一种具有 1 W@80 K 制冷量且效率与斯特林制冷机相同的斯特林型脉管制冷机。从那时起,斯特林型脉管制冷机便开始引起人们的关注。斯特林型脉管制冷机的工作频率通常在 30 ~ 60 Hz 之间,并可在 30 ~ 150 K 内提供制冷量^[6]。由于冷端没有运动部件,斯特林型脉管制冷机具有可靠性高、振动小以及寿命长等优点。因此,斯特林型脉管制冷机已经成为用于冷却红外探测器的一种最有潜力的制冷机,其主要研究机构包括美国的 Sunpower 公司、NGAS 公司、Lockheed Martin 先进技术研究中心、国家标准技术研究院(NIST)、Gedeon Associates 和加利福尼亚理工学院,法国的液化空气公司和 CEA/SBT,荷兰的 Thales Cryogenics BV 公司,日本的住友会社以及我国的中国科学院理化技术研究所、中国科学院上海技术物理研究所和浙江大学等。

1.1 国外斯特林型脉管制冷机的空间应用研究

在过去的六十多年里,红外探测系统已经与低温制冷技术密切结合起来。低温制冷是许多探测器正常工作的必要条件。几十年来,空间低温制冷已经成为一种通过降低有效载荷的质量和功耗来保证探测器正常工作的有效方法。焦平面阵列所采用的材料及其应用与工作温度

直接相关,如表 1 所示。目前在空间应用中,可见光波段大都采用无定形硅,短波红外(SWIR)波段和长波红外(LWIR)波段采用 HgCdTe,而超长波红外(VLWIR)波段则采用 Si:As^[6]。

表 1 焦平面阵列材料的工作范围

材料	光谱波段(μm)	工作温度(K)
Si	< 1	300
PtSi	1 ~ 5	60 ~ 90
InSb	< 6	35 ~ 90
PbSe	1 ~ 5	220
HgCdTe SWIR	< 3	150 ~ 220
HgCdTe MWIR	2 ~ 6	100 ~ 120
HgCdTe LWIR	6 ~ 14	35 ~ 40
Si:As	6 ~ 28	8 ~ 12
QWIPs	各种 1 μm 波段	40 ~ 80
PbS	1 ~ 3	220 ~ 300

1.1.1 单级斯特林型脉管制冷机

2007 年,法国的液化空气公司、CEA/SBT 以及荷兰的 Thales Cryogenics BV 公司联合为欧洲空间局研制了一种针对 40 ~ 60 K 制冷需求的同轴型脉管制冷机,以解决未来地球观测任务中将会遇到的问题。该制冷机的回热器采用分层填充方法,其冷端丝网目数比热端丝网目数多以加强换热,法兰和换热器均采用铝合金,脉管采用钛合金,而且其外部采用金箔覆盖以减少辐射热损失。整机质量不足 5.1 kg。当压缩机的输入功率为 155 W、运行频率为 55 Hz 时,该制冷机在 50 K 下具有 2.3 W 的制冷量^[7]。

结合线型压缩机和脉管方面的设计经验以及半波惯性管技术, Sunpower 和 Gedeon Associates 一直致力于研发高效的斯特林型脉管制冷机。2007 年,他们在日本 Smach 公司的资助下开发了 CPT60 型单级同轴脉管制冷机。当热端温度为 310 K、输入功率为 100.2 W 时,该制冷机在 60 K 下可获得 2.1 W 的制冷量,其相对卡诺效率达到 8.7 %^[8]。图 1 所示为 CPT60 型单级同轴脉管制冷机的密封装配模型。

由于辐射制冷装置的体积和质量在微型卫星应用上具有局限性,法国国家空间研究中心



图 1 CPT60 型单级同轴脉管制冷机的密封装配模型

与法国 Absolut System 公司及液化空气公司进行合作, 共同为微型卫星设计能满足输入功率、体积、质量以及寿命等各方面要求的斯特林型脉管制冷机。在原有 80 K 小型脉管制冷机的基础上, 他们开发了热端温度为 273 K、制冷量为 2.5 W@150 K 的制冷机^[9]。图 2 为 150 K 脉管冷指的 CAD 结构图。

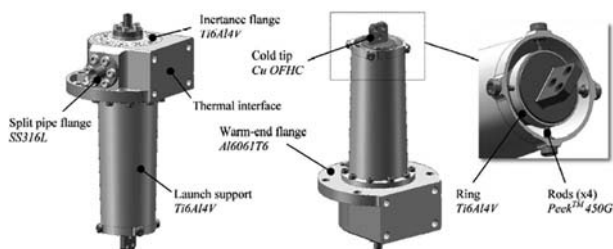


图 2 150 K 脉管冷指的 CAD 结构图

雪崩光电二极管红外探测项目的改革目的是为了开发出一种在低温环境下工作的高灵敏度 HgCdTe 雪崩二极管。该项目的第一次验证工作将在结合红外波前传感器和红外边缘传感器的天文望远镜上进行。法国 Absolut System 公司为该项目提供了一个具有 1.5 W@77 K 制冷量的同轴脉管制冷机^[10]。

长期低温推进储藏器需要靠机械制冷维持于零或者很低的蒸发率。大的低温槽, 比如火星在轨氧气与甲烷燃料贮藏室, 需要制冷机提供非常高的制冷量。若要将飞行器送往另外一个星球, 低质量也是一个非常苛刻的要求。美国

Lockheed Martin 先进技术中心研制的一台高密度、低质量、大冷量空间制冷机则能满足这样的要求。该制冷机的总重量为 7 kg, 可在热端温度为 300 K 时提供 20 W@70 K 的制冷量。这么大的制冷量同时可以用来冷却光学器件及高热负荷设备^[11]。图 3 所示为大冷量脉管制冷机的冷指原型图及其压缩机。

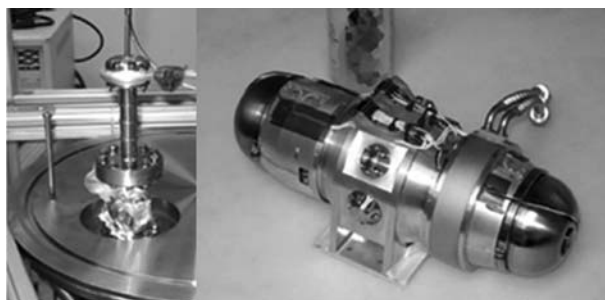


图 3 大冷量脉管制冷机的冷指原型图及其压缩机

1.1.2 斯特林型两级脉管制冷机

两级制冷机能够比单级制冷机达到更低的温度。对于地球观测来说, 像单级制冷机那样运行在同一温区 (50 ~ 80 K) 的两级制冷机已经被证实是一种实用技术。它可以和探测器一起工作在不同温度下, 或者用其第一级来冷却光学与电子器件。

美国空军动力实验室和美国航空航天局 (NASA) 兰勒研究中心制造的空间用对地同步成像傅里叶变换光谱仪中的焦平面必须工作在 60 K 以下, 而且其光学元件及干涉仪必须在 150 K 以下才能正常工作。为满足这种需求, Lockheed Martin 先进技术研究中心设计了一台两级脉管制冷机。整个制冷机系统的质量约为 8.8 kg。当压缩机的输入功率为 180 W、运行频率为 53 Hz、热端温度为 300 K 时, 一级制冷量为 8 W@140 K, 二级制冷量为 1.5 W@55 K。图 4 所示为 Lockheed Martin 先进技术研究中心研制的两级脉管制冷机^[12]。

为了满足 NASA 为美国国家气象局研制对地同步环境卫星先进基线成像仪 (ABI) 的需求, NGAS 研制了一台空间用两级脉管制冷机。该制冷机是日本在轨先进气象成像仪的高效制冷机的一个衍生体, 包括一台压缩机、一个直线型冷指和一个同轴型冷指。其中, 直线型冷指和压缩

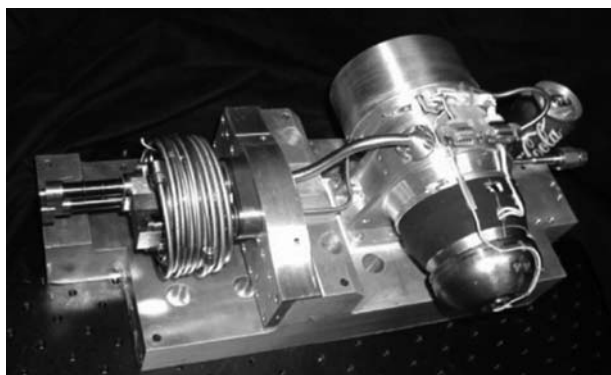


图 4 Lockheed Martin 先进技术研究中心研制的两级脉管制冷机

机被装配在一起,同轴型冷指经连接管与压缩机远距离相连。直线型冷指为探测器提供低温环境,同轴型冷指用于冷却光学元件以及另外一个探测器。这种制冷机的总体尺寸为 370 mm×350 mm×130 mm,总重量为 5.5 kg。图 5 为该制冷机的实物图。当热端温度为 300 K、压缩机的输入功率小于 186 W 时,直线型冷指在 ≤ 53 K 的温度下具有 1.9 ~ 2.3 W 的制冷量,同轴型冷指在 ≤ 183 K 的温度下具有 5.1 ~ 8.0 W 的制冷量。当压缩机的输入功率为 170 W 时,直线型冷指和同轴型冷指的无负荷最低温度分别为 37 K 和 54 K^[13]。

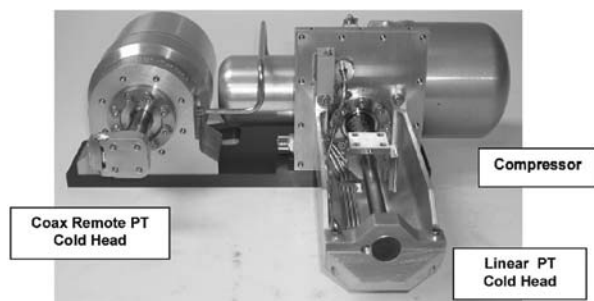


图 5 美国气象卫星用脉管制冷机的实物图

为满足低轨观测任务的制冷需求(能够在二级提供 2 W@70 K 制冷量的同时提供一级 6 W@140 K 的制冷量),CEA/STB、法国液化空气公司以及 Thales 低温公司在法国国家空间研究中心的资助下研制了一台两级高频脉管制冷机。为了充分利用欧洲空间局在制冷机领域所取得的成果,该制冷机采用了 ESA LPTC 工程中开发的压缩机。当充气压力为 3.0 MPa、运行频

率为 57.5 Hz、热端温度为 285 K、压缩机的输入功率为 136 W 时,该制冷机可以获得 2 W@67 K 和 6 W@131 K 的制冷量,能够满足应用需求。图 6 为这种两级脉管制冷机的实物图^[14]。

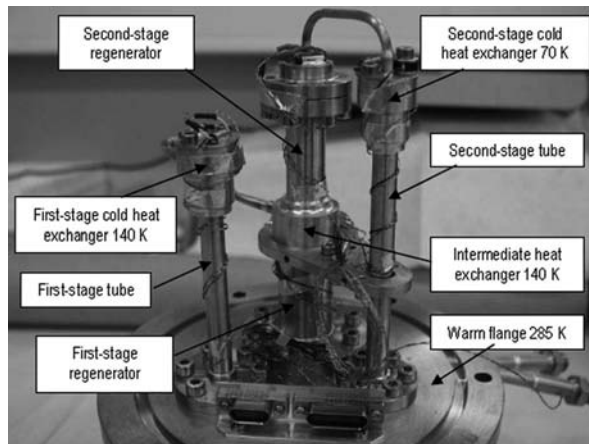


图 6 CEA/STB 研制的两级高频脉管制冷机的实物图

未来一些空间任务需要具备可将电子器件冷却到 20 K 以下的制冷条件。脉管制冷机可以在 20 K 下为这些空间应用提供几百毫瓦的制冷量。在欧洲空间局的资助下,CEA 和法国液化空气公司合作研制了能够达到这个温区的单级和两级脉管制冷机。其中,单级脉管制冷机用换热器将回热器分为两部分。在实际应用中,用辐射制冷机获得的冷量与回热器进行换热,可使回热器达到更低的温度。在实验室中,用一台 G-M 制冷机代替辐射制冷机。当单级脉管制冷机的充气压力为 2.0 MPa、运行频率为 41 Hz 时,可达到的无负荷最低温度为 12.6 K。该制冷机在 15 K 下可获得 100 mW 的制冷量。当回热器中间换热器的截留制冷量为 6 W@80 K 时,该制冷机在 19.6 K 下可获得 300 mW 的制冷量。两级脉管制冷机用一级冷指获得的冷量对回热器进行预冷。在 PV 功率为 120 W 时,第一级温度可以达到 120 K 以下,并可在 27 K 下获得 300 mW 的制冷量^[15]。

1.1.3 斯特林型多级脉管制冷机

如表 1 所示, Si:As 材料需要更低的环境温度。为满足 Si:As 红外焦平面探测器的需求,NGAS 在原有的两级脉管制冷机的基础上设计

了一种三级脉管制冷机。该制冷机用传热带连接第一级和更低温级回热器, 从而实现用上一级预冷下一级。第一级和第二级将气体工质预冷到 40 K 左右, 使第一级对二级制冷的干扰减至最小。第三级与第二级之间采用 U 型布置。当热端温度为 290 K、输入功率为 366 W 时, 该制冷机在 10 K 下可获得 250 mW 制冷量, 同时其最低温度可达到 6.4 K。当输入功率为 113.6 W 时, 第一级 151 K、第二级 59 K 和第三级 18 K 的制冷量分别为 0.296 W、0.134 W 和 0.213 W [16]。

未来的空间任务, 比如远距离天体物理任务, 不仅需要冷却到 50 mK 才能使毫米波或者 X 射线探测器正常工作, 而且还需要至少三年的续航时间。这样的温度需求通常基于一个包含开尔文制冷机、J-T 制冷机以及预冷机的全低温链。其中, J-T 制冷机可以达到 1.5 ~ 4.5 K 的制冷温度。但是为了实现高效运行, 必须先预冷到 20 K 以下。脉管制冷机以其优点成为预冷机的最佳选择之一。到目前为止, 单级高频脉管制冷机还不能达到这样低的温度, 而多级制冷是实现这些性能及高效运行的最好办法。

詹姆斯·韦伯太空望远镜中的中红外仪器需要冷却到 5 ~ 6 K, 而且还需具有 60 ~ 70 mW 的预冷。这就需要 J-T 循环进行预冷。NGAS 设计了一种满足该需求的三级脉管制冷机。图 7 为该制冷机中压缩机的装配布置图 [17]。

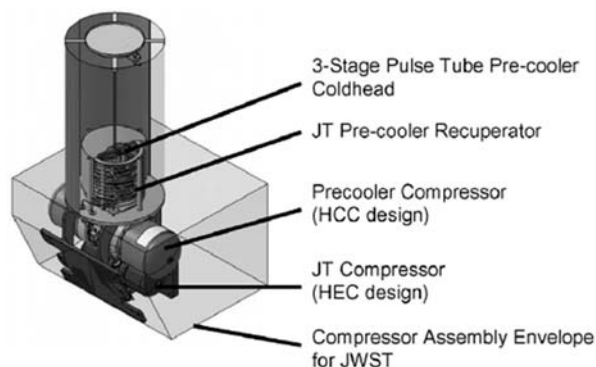


图 7 NGAS 设计的制冷机中压缩机的装配布置图

在欧洲空间局的资助下, CEA、法国液化空气公司以及荷兰 Thales 低温公司设计的三级脉管制冷机可分别达到 15 K、50 K 和 120 K 的温度。在实验阶段, 这种同轴型脉管制冷机获得的

最低温度为 6.5 K, 而且在 15 K 下具有超过 650 mW 的制冷量。这样的温度条件足以对 J-T 循环进行预冷或者将探测器冷却到 7 ~ 8 K [18-19]。表 2 列出了国外各种空间用斯特林型脉管制冷机的性能对比情况。

1.2 国内斯特林型脉管制冷机的空间应用研究

最近 5 年以来, 国内针对斯特林型脉管制冷机的研究工作逐渐兴起, 主要研究机构包括中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院理化技术研究所、浙江大学、西安交通大学、上海交通大学以及上海理工大学等。

用于冷却普通长波红外探测器的制冷机一般工作在 80 K 或者更高的温度下。随着长波红外探测器的不断发展, 比如 GaAs/AlGaAs 量子阱红外光电探测器 (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP), 这些设备的正常工作需要较低的温度 (如 40 K), 这时探测器可以达到更大的截止波长。为了满足这种需求, 中国科学院理化技术研究所在 2007 年设计并制造了一台 U 型脉管制冷机。为了便于调节压力波与质量流之间的相位角, 该制冷机用惯性管及双向进气方式进行调相。在与 QWIP 焦平面阵列耦合时, 该制冷机两小时的降温效果可以达到 37.2 K, 并可使探测器在 38.5 K 下正常工作。在一定条件下, 该制冷机在 40 K 下可获得 420 mW 的制冷量, 满足了探测器在 40 K 下需要 0.3 W 冷量的要求。图 8 为脉管制冷机与 QWIP 耦合后的结构原理图 [6]。2012 年, 中国科学院理化技术研究所又研制了一台单级同轴型脉管制冷机以满足长波红外探测器的应用需求。该制冷机的回热器由不同丝网填充以增加其回热效率, 并采用

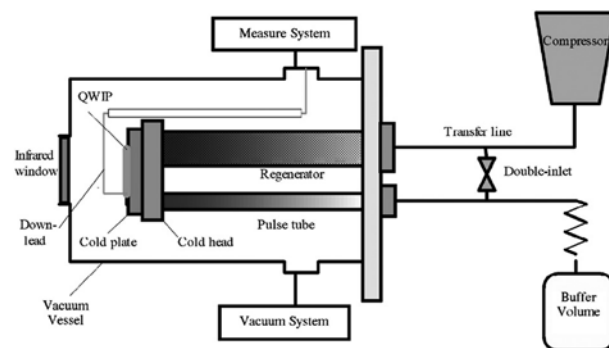


图 8 脉管制冷机与 QWIP 耦合后的结构简图

表 2 国外各种空间用斯特林型脉管制冷机的性能比较

结构	年份	单位	冷头结构	制冷量	应用场合
单级	2007	Air liquid; CEA/GBT	同轴	2.3 W /50 K	对地观测
	2007	Sunpower Gedeon Associates	同轴	2.1 W /60 K	—
	2012	法国 Absolut System	同轴	1.5 W /77 K	红外探测器 / 望远镜
	2012	Lockheed Martin 先进技术研究中心	直线型	20 W /70 K	火星低温推进储藏器
两级	2007	Lockheed Martin 先进技术研究中心	一级同轴	8 W /140 K	对地同步成像傅里
			二级直线	1.5 W / 55 K	叶变换光谱仪
	2009	NGAS	直线	5.1-8.0 W $\leq$ 183 K	美国对地同步环境卫
			同轴	1.9-2.3 W $\leq$ 53 K	星先进基线成像仪
	2009	Air liquid; CEA/GBT	一级 U 型	6 W /131 K	环地轨道观测、
			二级 U 型	2 W /67 K	冷却电子器件
	2009	Air liquid; CEA/GBT	一级 U 型	二级 300 mW /27 K	对电子器件预冷、 J-T
			二级 U 型		
三级	2007	NGAS	一、二、三 级同轴	一级 0.296 W@151 K 二级 0.134 W@59 K 三级 0.213 W@18 K	Si:As 焦平面 红外探测器
	2009	NGAS	一、二级同轴 三级 U 型	0.255 W /10 K	焦平面红外探测器
	2012	Air liquid; CEA/GBT	一、二级同轴 三级直线	三级 650 mW /15 K	J-T 制冷预冷

不同直径的惯性管进行调相。当水温为 15 ℃、充气压力为 3.6 MPa、运行频率为 54 Hz 时,该制冷机在 175 W 输入功率下可获得 29.78 K 的最低温度,而且在 40 K 下具有 1.6 W 的制冷量^[20]。

中国科学院上海技术物理研究所在辐射制冷机、低温杜瓦以及斯特林制冷机领域拥有超过 20 年的研究历史。针对不同的空间应用,我所研制了一系列的斯特林型脉管制冷机。针对 GaAs/AlGaAs QWIP,我们研制了 30~40 K 单级同轴脉管制冷机。该制冷机可在热端温度为 300 K、输入功率为 200 W 时获得 29.7 K 的最低温度,并可在 40 K 下提供 0.86 W 的冷量。针对 HgCdTe 红外探测器,我们研制了 60 K 单级同轴脉管制冷机。该制冷机可获得 33 K 的最低温度。当输入功率为 91 W 时,该制冷机在 60 K 下具有 2 W 的冷量,其相对卡诺效率为 8.8%。针对中波和短波红外焦平面阵列,我们研制了 80 K 单级同轴脉管制冷机,这也是目前最为成熟的一款机型。当热端温度为 310 K、输入功率为

100 W 时,该制冷机在 80 K 下可提供 5 W 的冷量。许多星载红外探测器需要在 80 K 下具有 1 W 的制冷量,但同时也要求体积小、质量轻以及能够快速降温。针对这种需求,我们研制了微型同轴脉管制冷机。该制冷机的总重量为 2.2 kg,充气压力为 3.6 MPa,运行频率为 75 Hz。当输入功率为 80 W 时,该制冷机在 4 min 内就可达到 80 K,并且在 80 K 下具有 2.5 W 的制冷量。图 9 所示为这种微型同轴制冷机的外形尺寸。针对长波红外焦平面阵列中的光学器件,我们还

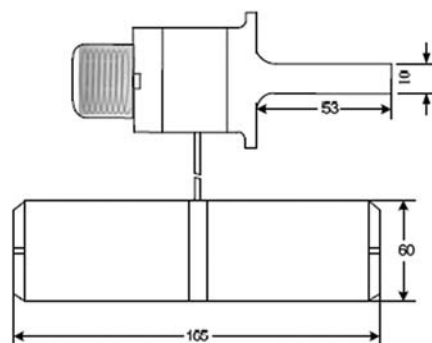


图 9 80 K 微型同轴制冷机的外形尺寸

表 3 国内各种空间用斯特林型脉管制冷机的性能比较

单位	年份	结构	制冷量	应用场合
中国科学院理化 技术研究所	2007	单级 U 型	420 mW@40 K	GaAs/AlGaAs 量子阱红外光电探测器
	2012	单级同轴型	2.5 W@80 K	长波红外探测器
中国科学院上海 技术物理研究所	2010	单级同轴	5 W@80 K	中波和短波红外焦平面阵列
	2010	单级同轴	1 W@80 K	星载红外探测器
	2011	单级同轴型	0.86 W@40 K	GaAs/AlGaAs 量子阱红外光电探测器
	2011	单级同轴	2 W@60 K	HgCdTe 红外探测器

研制了 80 ~ 150 K 单级同轴脉管制冷机^[21]。

上海理工大学与中国科学院上海技术物理研究所联合开展了斯特林型脉管制冷机的研究工作。浙江大学和西安交通大学也对斯特林型脉管制冷机的设计和调试理论进行了研究分析。表 3 列出了国内各种空间用斯特林型脉管制冷机的性能对比情况。

2 百赫兹斯特林型脉管制冷机的研究及其关键技术

航天、航空以及军事等方面的应用通常要求制冷机系统实现小型化甚至微型化,以减小火箭航空器等的载荷,提高系统的机动性和快速反应能力。但常规小型化手段仅能减小制冷机各部件的尺寸,会导致制冷量随之成比例减小。2005 年,美国国家标准技术研究院 (NIST) 的 Radebaugh R 等人率先提出选择更高的工作频率 (甚至高达 1000 Hz), 配合相应的回热器尺寸优化手段,可以大大减小低温制冷机的重量和体积^[22]。除了高频脉管制冷机固有的优点以外,百赫兹脉管制冷机还具有体积小、质量低以及快速降温等优点。在该理念的指导下,美国的 NIST 和 NGAS、中国科学院理化技术研究所、浙江大学以及法国的 CEA 和液化空气公司相继研制出了工作频率在 100 Hz 以上的高频脉管制冷机。

2.1 百赫兹脉管制冷机的研究现状

2007 年, NIST 的 Vanapalli S 等人设计并优化了一台 120 Hz 脉管制冷机。该制冷机的回热器采用 635 目的丝网,其充气压力为 3.5 MPa。

通过用两段不同的惯性管进行调相,它在 10 min 内可以冷却到 50 K。当压缩机的输入功率为 275 W 时,该制冷机在 80 K 下可获得 3.4 W 的制冷量^[23]。同年, Garaway I 等人设计了一种总体积为 137 mm³ 的最小脉管制冷机。他们设计在较小的输入功率 (5 W) 下,其冷端可以达到 146 K 并在 160 K 下具有 100 mW 的冷量^[24]。虽然这种设计给人留下相当深刻的印象,但是材料选择及装配技术使其原型机出现了微型设备身上不可避免的损失。2011 年, Garaway I 等人又设计了一台频率为 150 Hz 的脉管制冷机,其充气压力为 5.0 MPa,工作频率为 138 Hz。当回热器的热端功率为 25 W 时,该制冷机在 120 K 下具有 200 mW 的制冷量^[25]。2009 年, NGAS 的 Petach M 等人研制了一台工作频率在 120 ~ 144 Hz 内的脉管制冷机。当输入功率为 35 W 时,该制冷机在 77 K 下具有 1.8 W 的制冷量^[26]。

中国科学院理化技术研究所基于热声理论设计了一种工作频率在 100 Hz 以上的同轴高频脉管制冷机。模拟结果显示,由于回热器材料具有较低的空隙率,制冷机的性能会随着工作频率的升高而下降。实验结果表明,当声功为 40 W 时,该制冷机可获得 49.3 K 的最低温度,并且在 77 K 下具有 2.8 W 的制冷量^[27]。2010 年,浙江大学的吴英哲等人通过用 REGEN3.2 软件进行优化,设计、制造并测试了一台 120 Hz 超高频脉管制冷机。当压缩机的电功输入为 500 W 时,该制冷机在 78.6 K 下获得了 8.0 W 的制冷量。此外,他们还对现有压缩机百赫兹的特性进行了较为深入的理论分析^[28]。

2012 年, 法国的 CEA 和液化空气公司合作设计并制造了一台工作频率为 100 Hz 的脉管制冷机。该制冷机只需 25 W 的电功就可达到 79.8 K, 并且在 120 K 下具有 0.98 W 的制冷量^[29]。

目前, 人们对百赫兹脉管制冷机的研究工作才刚刚开始, 仍有很多问题需要解决。下面对其关键技术进行分析。

2.2 百赫兹脉管制冷机的关键技术分析

虽然百赫兹脉管制冷机和传统的斯特林型脉管制冷机的工作频率都比较高(超过 30 Hz), 但是两者之间仍有许多不同之处。根据对上述文献的分析和比较可以发现, 在相对卡诺效率方面, 百赫兹脉管制冷机比传统的斯特林型脉管制冷机低很多。在斯特林型脉管制冷机中, 更高的工作频率可以使能量密度随频率成比例地增加。然而单纯依靠提高工作频率的话, 回热器中的工质气体与回热器之间无法获得充分换热, 会造成回热器的不可逆损失大大增加, 从而降低脉管制冷机的整机效率。为了保证回热器在高频下仍然具有比较客观的效率, 必须采用合适的工作参数(充气压力、质量流量和相位等)、回热器尺寸以及回热器材料。Radebaugh R 等人的研究结果表明, 同时改变运行工况和几何尺寸(减小回热器体积; 增加水力直径; 增加平均压力)可以使制冷机在较高的工作频率下保持高效率^[30]。NIST 和浙江大学设计的 120 Hz 脉管制冷机均已验证了这一理论^[31]。

线性压缩机是高频脉管制冷机系统中的一个重要部件, 其性能对于冷指实现理想的低温和制冷量十分关键。目前, 线性压缩机的谐振频率大多在 40 ~ 60 Hz 范围内, 所以要实现百赫兹斯特林型脉管制冷机在低温下的高效制冷, 就必须研制出谐振频率较高的与制冷机冷头相匹配的线性压缩机。因此, 研制百赫兹线性压缩机成为一项关键技术。

线性压缩机工作时的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K + K_{gas}}{m}} \quad (1)$$

式中, K 为机械弹簧的刚度; K_{gas} 为气体弹簧的刚度; m 为运动质量。可以看出, 谐振频率可以通过降低活塞质量 m 和增加气体弹簧刚度 K_{gas} 得以提高。降低活塞质量 m , 可以减小机械阻尼损失、焦耳热损失和涡流损失等, 使线性压缩机的损失减小。提高充气压力可使气体弹簧刚度 K_{gas} 增大, 这就增加了气流扰动的复杂性。活塞质量的减小也会使线性压缩机的结构尺寸变小, 同时提高充气压力还会使能量密度升高, 线性压缩机的紧凑性增强^[32]。因此, 高频谐振线性压缩机的研制工作正面临着如何保持高效、结构紧凑等制造方面的问题。此外, 目前线性压缩机在电机转换效率、重量以及寿命等方面仍需进一步提高。线性压缩机技术的不成熟在很大程度上会限制百赫兹斯特林型脉管制冷机的实用化进程。

3 结束语

斯特林型脉管制冷机的研究已经取得了丰硕的成果。由于具有结构紧凑、可靠性高和寿命长等独特优势, 斯特林型脉管制冷机将会替代其他类型的制冷机而成为空间技术应用领域的主要制冷机。通过对国内外斯特林型脉管制冷机在空间应用中的最新研究进展进行分析, 展望了斯特林型脉管制冷机的应用前景和发展趋势。对百赫兹斯特林型脉管制冷机系统的关键技术(包括回热器结构及效率)和压缩机的需求进行了详细介绍, 并指出了百赫兹斯特林型脉管制冷机在空间应用上的不足之处, 为以后的实用化进程指明了研究方向。

参考文献

- [1] 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 [C]. Cryocoolers, 1999, **10**: 1-31.
- [2] Radebaugh R. Development of Pulse Tube Refrigerators as an Efficient and Reliable Cryocooler [C]. Proceedings of Institute of Refrigeration, 2000: 11-29.
- [3] Radebaugh R. Pulse Tube Cryocoolers for Cooling Infrared Sensors [C]. SPIE, 2000, **4130**: 363-379.
- [4] Tward E, Chan C K, Jaco C, et al. Miniature Space Pulse Tube Cryocoolers [J]. Cryogenics, 1999, **39**(8): 717-720.

- [5] Raab J, Tward E. Northrop Grumman Aerospace Systems Cryocooler Overview [J]. *Cryogenics*, 2010, **50**(9): 572–581.
- [6] Wang G P, Cai J H, Li N, et al. Development of a 0.5W/50K Pulse Tube Cryocooler for an Infrared Detector [C]. *Cryocoolers*, 2007, **14**: 83–88.
- [7] Trollier T, Tanchon J, Buquet J, et al. Design of a Large Heat Lift 40 to 80 K Pulse Tube Cryocooler for Space Applications [C]. *Cryocoolers*, 2007, **14**: 75–82.
- [8] Wilson K B, Fralick C C, Gedeon D R, et al. Sunpower's CPT60 Pulse Tube Cryocooler [C]. *Cryocoolers*, 2007, **14**: 123–132.
- [9] Trollier T, Tanchon J, Icart Y, et al. 150K Pulse Tube Cooler for Micro-Satellites [C]. *Cryocoolers*, 2012, **17**: 53–60.
- [10] Tanchon J, Trollier T, Icart Y, et al. Small Scale 80K Pulse Tube Cooler for RAPID e-APD Infrared Camera [C]. *Cryocoolers*, 2012, **17**: 93–100.
- [11] Olson J R, Champagne P, Roth E, et al. Very High Capacity Aerospace Cryocooler [C]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2012, **57**: 161–167.
- [12] Jensen S M, Hansen G, Nast T, et al. Thermal/Mechanical System Level Test Results of the GIFTS 2-Stage Pulse Tube Cryocooler [C]. *Cryocoolers*, 2007, **14**: 65–74.
- [13] Colbert R, Pruitt G, Nguyen T, et al. ABI Cooler System Protoflight Performance [C]. *Cryocoolers*, 2009, **15**: 49–55.
- [14] Charles I, Coynel A, Duval J M, et al. Development of a Two-Stage High Temperature Pulse Tube Cooler for Space Applications [C]. *Cryocoolers*, 2009, **15**: 63–70.
- [15] Duval J M, Charles I, Gauthier A, et al. Experimental Results of 20K Pulse Tube Cold Fingers for Space Applications [C]. *Cryocoolers*, 2009, **15**: 71–77.
- [16] Nguyen T, Colbert R, Durand D, et al. 10K Pulse Tube Cooler [C]. *Cryocoolers*, 2007, **14**: 27–31.
- [17] Durand D, Colbert R, Jaco C, et al. NGST Advanced Cryocooler Technology Development Program (ACTDP) Cooler System [C]. *Cryocoolers*, 2007, **14**: 21–25.
- [18] Duval J M, Charles I, Butterworth J, et al. 7K-15K Pulse Tube Cooler for Space [C]. *Cryocoolers*, 2012, **17**: 17–23.
- [19] Duval J M, Charles I. Development and Experimental Results on a 15 K Pulse Tube Cold Finger [C]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2012, **57**: 1040–1047.
- [20] Zhao M G, Liu Y J, Cai J H, et al. Experimental Investigation of a 40K Single Stage High Frequency Pulse Tube Cryocooler [C]. *Cryocoolers*, 2012, **17**: 115–119.
- [21] Dang H Z. Development of High Frequency Pulse Tube Cryocoolers for Space Applications [C]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2012, **57**: 1457–1464.
- [22] Radebaugh R, O'Gallagher A. Regenerator Operation at Very High Frequencies for Microcryocoolers [C]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2004, **51**: 1919–1928.
- [23] Vanapalli S, Lewis M, Gan Z H, et al. 120 Hz Pulse Tube Cryocooler for Fast Cooldown to 50 K [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(7): 072504.
- [24] Garaway I, Grossman G. A Study of a High Frequency Miniature Reservoirless Pulse Tube [C]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2008, **53**: 1547–1554.
- [25] Garaway I, Gan Z, Bradley P, et al. Development of a 150 Hz Pulse Tube Cryocooler [C]. *Cryocoolers*, 2009, **15**: 105–113.
- [26] Petach M, Waterman M, Pruitt G, et al. High Frequency Coaxial Pulse Tube Microcooler [C]. *Cryocoolers*, 2009, **15**: 97–103.
- [27] Wang X T, Yu L H, Zhu J. A Miniature Coaxial Pulse Tube Cooler Operating above 100 Hz [C]. *Cryocoolers*, 2012, **17**: 107–114.
- [28] Wu Y Z, Gan Z H, Qiu L M, et al. Study on a Single Stage 120 Hz Pulse Tube Cryocooler [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2010: 175–182.
- [29] Lopes D, Duval J M, Charles I. Design and Characterization of Very High Frequency Pulse Tube Prototypes [C]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2012, **53**: 1487–1494.
- [30] Radebaugh R, O'Gallagher A. Regenerator Operation at Very High Frequencies for Microcryocoolers [C]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2006, **51**: 1919–1928.
- [31] Vanapalli S, Lewis M, Gan Z, et al. 120 Hz Pulse Tube Cryocooler for Fast Cooldown to 50 K [J]. *Appl Phys Letters*, 2007, **90**(7): 072504.
- [32] 植晓琴, 邱利民, 甘智华, 等. 20 K 以下温区斯特林型脉管制冷机的最新研究进展与损失机理分析 [J]. *低温工程*, 2011, **32**(2): 25–34.