

微型斯特林制冷机的研究进展

陈永生*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

1 引言

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。由于与这些技术相关的许多科学仪器在低温条件下性能更好、运行速度更快、效率和灵敏度更高, 因此推动了低温技术中的一个重要分支——小型低温制冷机的蓬勃发展, 其应用从国防、军事、宇航部门向交通、信息、医疗、电子等商业领域渗透。在许多场合, 如气象卫星上的红外辐射计、遥感卫星上的红外探测仪、导弹制导系统、医学领域中的核磁成像仪和低温医疗冷刀等, 均需要可靠、简便的小型低温制冷机提供稳定的低温冷源。这些场合对制冷机的制冷温度、冷量、振动、电磁干扰、能耗、重量、寿命等指标提出了苛刻的要求。

斯特林制冷机是逆向斯特林循环工作的制冷机。斯特林循环是由 O. R. Stirling 于 1816 年提出的^[1], 由两个等温过程和两个等容回热过程组成, 最初用于热力发动机。19 世纪 60 年代 A. Kirk 利用逆向斯特林循环进行制冷, 获得成功^[2]。但是由于当时生产力水平低下, 整套制冷设备的经济性比较差, 未能得到推广, 直到 20 世纪 60 年代才得到大力发展。1954 年荷兰 Philips 实验室研制成实用的逆向斯特林循环制冷机, 该机在 77K 时获得 580mw 的冷量^[3]。

20 世纪 70 年代末, 英国牛津大学成功研制出牛津型斯特林制冷机^[4,5]。由于采用了线性电机驱动方案、动态非接触密封、板弹簧支撑、污染控制等关键技术, 制冷机的性能得到了突

破性的提高, 为斯特林制冷机的进一步发展开创了广阔的道路。美、英、法、德、日等发达国家纷纷加入了斯特林制冷机研发的行列。

斯特林制冷机的热力过程是变质量过程, 而且每一个工质微团在每一次循环中所经历的循环过程并非完全相同^[6], 因此对斯特林制冷机的研究, 国外的重点是在整机的研制上, 理论研究是作为产品开发过程中的辅助手段, 但两者的重要性是相互结合的。

2 微型斯特林制冷机发展概论

为满足航天、军事技术对小型低温制冷机的迫切需求, 发达国家投入了大量资源进行制冷机的研制。由于牛津型斯特林制冷机在性能上的重大突破, 满足了可靠性要求, 因此在 20 世纪 80 年代初, 各国纷纷选择斯特林制冷机作为研制的重点。经过近 20 年的努力, 微型斯特林制冷机的性能得到了进一步提高, 制冷温度可满足低温超导的需求, 结构从整体式发展到分置式, 发展了电磁、气动等多种驱动方式, 寿命达到了 5 至 10 年^[7]。

下面对国外主要研制单位研制斯特林制冷机所采取的研制路线、关键技术、最新成果进行简单的介绍。

2.1 Hymatic (英国)

Hymatic 公司具有 40 年的 JT 制冷器开发经验, 这对其研制高可靠性、长寿命、低成本的斯特林制冷机极有参考价值。1989 年, Hymatic

* 2001 级硕士研究生

公司开始与牛津大学进行密切合作, 研制微型斯特林制冷机^[8]。

Hymatic 公司在牛津型斯特林制冷机的基础上, 首先集中精力开发 500mW@200K 制冷机。为研究间隙动密封直径对制冷机性能的影响, Hymatic 公司制作了 8 台不同尺寸的制冷机进行数据测试, 找到了密封直径的最佳值; 然后, 根据此数据设计了 6 台制冷机, 验证制冷机的性能稳定性, 选择 2 台进行寿命实验, 2 台进行振动测试。获得成功后, 在英国 GEC Marconi Infra-Red 公司与 HTS 项目的资助下, Hymatic 公司分别进行了 500mW@80K、2W@60K (5W@80K) 制冷机的研制^[8-9]。

目前, Hymatic 公司已经开发成功了 500 mW、5W、200mW 制冷量的三个系列产品, 多次被应用于航天项目中。制冷机效率均超过 4%, 寿命测试超过 25,000 小时。Hymatic 公司整体式微型斯特林制冷机结构如图 1 所示^[8]。

Hymatic 公司在牛津型斯特林制冷机线性电机驱动、间隙动密封、板簧支撑等技术的基础上, 着重进行了加工与装配工艺的探索: 精心选择低放气率材料; 充气前, 整机在接近真空、温度达 100 °C 的环境下烘烤去气; 在洁净间进行装配。Hymatic 制冷机有三道静态压力密封, 采用电子束焊接; 充气后的最后一道密封采用金属-金属冷压焊, 证实在 600bar 的压力下仍有长时间的可靠性; 制冷机漏率小于 0.4×10^{-10} mbar

L/s^[8]。

2.2 Cryotechnologies SA (法国)

Cryotechnologies SA 创建于 1989 年, 是法国乃至欧洲低温制冷机市场的翘楚, 集低温制冷机的设计与生产制造于一体, 斯特林制冷机生产量已达到每周约 40 台, 产品实现系列化: 有直线电机驱动与旋转电机驱动, 有整体式与分置式, 制冷机 80K 时制冷量从 250mW 到 3W 不等。其前身是从事 JT 制冷器生产的 Intertechnique SA (1971 年创建) 与法国第一家从事旋转电机驱动的斯特林制冷机研制的 ABG-Semca (1982 年创建)。1990 年, SIGNAAL-USFA 被 Thomson-CSF 合并, 与 Cryotechnologies SA 成为姐妹公司, 并肩开发线形电机驱动的微型斯特林制冷机^[10]。

近 10 年来, Cryotechnologies SA 在微型斯特林制冷机的理论与实验研究中取得了重大进展, 对制冷机的一系列工艺问题进行了卓有成效的探索^[11]:

2.2.1 制冷机效率得到较大提高

制冷机的效率在 1990 年约为 1.5%, 而现在整体式制冷机效率不低于 5%, 分置式制冷机效率不低于 2.5%。Cryotechnologies SA 通过选择回热器回热材料、研究填料的排列方式、调整相位差、考虑充气压力的影响, 提高了系统的热力循环效率; 研究分置式制冷机的热接触方式, 设法减少冷指热损从而减少了制冷机的耦

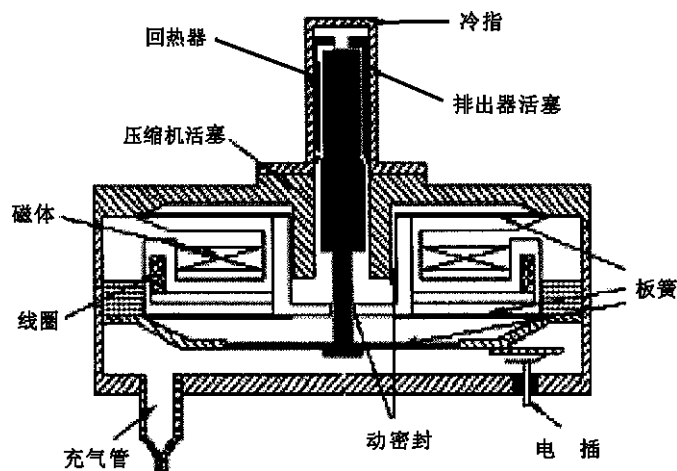


图 1 Hymatic 整体式微型斯特林制冷机结构示意图

合热损; 研究杜瓦集成一体式结构, 实践证明, 该结构应用于分置式斯特林制冷机时效率提高近 100%^[12]; 通过选用 BLDC 电机、选择高磁化磁体、减小驱动电路内损, 提高了驱动机构的效率。

2.2.2 轻量化、微型化研究

这使制冷机的外形尺寸减为 1990 年时同性能制冷机的一半。其主要措施有: 法兰连接改用胶合或激光焊连接; 使用多层 PCB 提高驱动电路的集成度。

2.2.3 制冷机的可靠性保证

间隙密封取代了橡胶密封; 摩擦系数小的硬涂层 (Rulon) 替代了软涂层 (如 PTFE); 静态氦气密封采用新型的金属密封; 对机械结构 (如支撑系统、平衡系统等) 进行了重新设计, 采用双对置活塞压缩机; 研究了脉冲管冷指与压缩机的耦合。

Cryotechnologies SA 双对置活塞压缩机、气动型、1W 冷量的斯特林制冷机结构如图 2 所示^[10]。

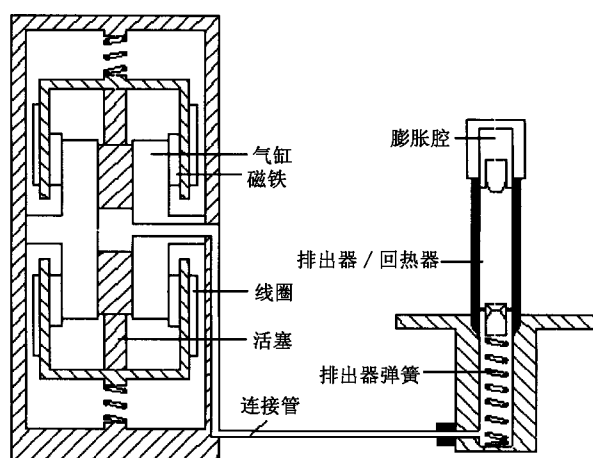


图 2 Cryotechnologies 双活塞对置斯特林制冷机结构示意图

2.3 Sunpower (美国)

Sunpower 在自由活塞式斯特林发动机和制冷机以及线性压缩机领域具有领先地位, 有 30 多项技术获得美国专利, 有 100 多项工艺、技术受相关国外专利的保护。

Sunpower 设计、生产的 M77 型斯特林制冷机在 NASA-Goddard 组织的空间应用可靠性实

验中获得了圆满成功, “寿命测试达到 10,000 小时, 无工质污染现象, 可应用于 HESSI”^[13]。据 Sunpower 在相似条件下的测试表明, M77 型制冷机的寿命超过 40,000 小时^[14]。M77 型斯特林制冷机的设计特点如下^[14]:

(1) 气体轴承技术。压缩机的振子在线形电机驱动下运动, 同时被无刷电机驱动作旋转运动, 在活塞和汽缸间形成气体轴承, 正常运行中不摩擦, 活塞汽缸间的硬化处理表面则可承受启停阶段的短暂摩擦。

(2) 平衡电机。在对振动要求非常之高的条件下, 该电机被驱动, 成为主动平衡机构; 否则, 电机不被驱动, 而成为一个被动平衡机构。

(3) 活塞行程控制。通过调整输入电压, 可以方便、连续地调整压缩机的活塞行程, 实现对制冷机的输出 (如制冷量、制冷温度等) 的调控。

Sunpower 注重产品的商业化开发, 努力将斯特林制冷机的空间应用与地面应用相结合, 从而降低成本, 实现批量生产与销售。最近推荐的 M87 型是 M77 型的改进, 预计每台售价为 2,000 美元^[14]。

2.4 Lockheed (美国)

Lockheed 从 1987 年开始与英国伯明翰的 Lucas 合作, 在牛津型斯特林制冷机的基础上开发、设计微型斯特林制冷机, 采用的关键技术有: 柔性支撑、间隙密封、动力平衡块等。1994 年开始独立研究, 其主要的方向集中于以下四个领域^[15]。

(1) 开发一种有效的理论分析模型预测系统的性能, 对制冷机的设计具有指导作用。

(2) 开发满足航天要求的电控制器, 提供精确的温度控制, 同时要使引入的振动最小。

(3) 研制 2.5W@60K 的制冷机。

(4) 运用模块化设计, 研究多种系统结构, 满足不同用户的需求。

Lockheed 提出了双驱动斯特林制冷机的三种结构模式: (1) 双压缩机与双排出器完全对

置; (2) 双压缩机对置, 单排出器加平衡块; (3) 单压缩机, 单排出器, 各有主动式平衡电机。工程实践证明, 这三种模式在对制冷机的振动控制上均有良好的效果。

2.5 技术发展基本概况

除了上述研究单位, 在微型斯特林制冷机的研制中开发出成型产品的还有美国的 Magnavox、斯特林工艺公司, 以色列的 Ricor, 德国的 AEG INFRAROT-MODULE GmbH (AIM), 英国的 BAe, 日本的日立公司等^[16-19]。

综观近 20 年来微型斯特林制冷机的发展, 国外研制单位所采用的关键技术主要有:

(1) 无磨损技术。牛津型制冷机的板弹簧支撑加间隙密封技术被广泛采用; 气体轴承技术在 Sunpower 公司获得了巨大成功; 日立公司仍

在进行电磁轴承技术的研究。

(2) 减振技术。采用双对置活塞压缩机或者使用主动平衡器与被动平衡器。

(3) 直线电机技术。目前广泛采用的是动圈技术, 但动磁技术可使电机线圈与工作气体隔离, 避免污染, 因此得到了愈来愈多的关注, 而且已有成功的应用。

(4) 密封技术。电子束焊接与激光焊接密封技术逐渐成为静态密封的主流, 而动密封主要采用间隙密封。

(5) 杜瓦集成技术。制冷机的冷指与杜瓦的连接采用集成一体式结构, 消除冷量在传递过程中的损失。

表 1 为微型斯特林制冷机研制的最新概况。

表 1 微型斯特林制冷机研制概况

研制单位		型号	制冷能力 (W@K)	功耗 (W)	重量 (kg)	MTTF (h)
英国	Hymatic	Cooler 039	0.5@80	10.5	1.6	41,735
		Cooler C0013	0.25@80	8	0.45	25,383
法国	Cryotechnologies	UP 7088	1.6@80	50	≈3	5,500
		LSF 9189	3@80	100	≈5	>20,000
		LS 2-5	0.5@80	15	1.2	5,500
美国	Sunpower	M77	4@77	100	3.5	>40,000
	Magnavox	MX 7058	1.3@80	55	1.8	4,000
德国	AIM	SL 200/SAD I	3@80	90	3.5	>7,000
		SL 035	0.5@80	30	1.3	>2,000
		SL 200/SAD II	1.4@80	55	2.0	>7,000
以色列	Ricor	K529H	1@80	25	0.78	4,000
日本	住友	SRS-2110B	1@80	55	2.55	17,181

3 基本技术研究的进展

微型斯特林制冷机的内部工作机理涉及到热力学、流体力学、传热学、多孔介质理论等多方面的问题, 内部流动过程极为复杂, 理论分析难以考虑周全各种不可逆因素, 因此对微型斯特林制冷机的理论研究基本上一直滞后于整机的研制和实验研究^[20]。

但是, 设计和制造微型斯特林制冷机需要理论的指导, 甚至要在理论的指导下找到制冷机性能优化的途径, 因此, 从斯特林制冷机问世之初, 就有研究者对其进行不懈的理论探索。

对斯特林制冷机的理论分析主要有两个方向, 一是对制冷机的热力过程进行简化处理, 构建简洁、明白的数学模型, 二是借助计算机的帮助, 进行数值分析。当然, 有时候两者是互

相结合的。

3.1 简化处理, 构建模型

将复杂的物理现象进行简化处理, 提出合适的数学模型, 以便能进行数学求解, 得出有益的结论, 这是常用的研究方法。

斯特林循环是理论模型, 现实的情况与之相去甚远。迄今为止, 研究者们提出了以下几种简化假设和相应的数学模型。

3.1.1 等温汽缸模型

Schmit 于 1861 年提出了等温汽缸模型^[21], 其基本出发点为: (1) 压缩腔和膨胀腔的工作容积大小按正弦或余弦规律变化; (2) 压缩腔和膨胀腔内进行的是定温的压缩或膨胀过程 (故称为等温汽缸模型); (3) 考虑整机的死容积影响; (4) 工质遵循理想气体性质; (5) 热力过程是理想的, 不考虑任何热力学不可逆损失; (6) 只考虑机器的稳定运行工况。

在以上假设条件下, 利用简单的气体过程方程、状态方程以及质量守恒和压力平衡方程, 任选三个独立变量后整机的性能就被完全确定下来。

此法虽然比较理想化, 但得出了一些有益的结论, 并提供了一套定量计算的公式^[6]: (1) 实际斯特林机内部热力过程是十分复杂的、周期性的不稳定过程; (2) 提高或改变平均压力和转速是增大或调节制冷量的有效方法; (3) 死容积越大, 压比越小, 制冷量越小; (4) 理论上最佳相位差为 90° 。

3.1.2 绝热汽缸模型

上世纪 60 年代末 70 年代初, 美国学者 Qvale、Smith 等人提出了五部件物理模型, 认为整机由膨胀腔、冷凝器、回热器、水冷却器和压缩腔组成^[22]。这样, 工质与外界的热交换发生在毗邻汽缸的水冷却器和冷凝器, 而两只汽缸被认为是绝热的, 这就是制冷机绝热汽缸模型。

该模型的计算分两步: 首先在不考虑热力学不可逆损失的情况下计算机器的基本工况; 然后计算各种损失, 并对基本工况进行修正。

为了简化数学分析, 该方法选择压力变化和质量变化为独立变量, 而把所需的活塞的排量作为计算的结果, 使基本工况及不可逆损失的计算都较为简便。

模拟计算的结果表明, 该模型比等温模型更接近于实际的制冷机热力过程。

3.1.3 绝热 - 等温模型

1990 年, 印度的 M. D. Atrey 等人提出了一种绝热 - 等温模型^[23]。他们认为: 压缩腔的热力过程近似于绝热过程, 而在膨胀腔中由于压缩腔中气体的快速流入而保持一种等温状态, 因而膨胀腔的热力过程近似于等温过程。

该模型在进行理论分析时, 有下述假设:

(1) 制冷机的死容积中气体的温度为其所在腔体进口与出口温度的平均值; (2) 回热器的质量流率为压缩腔与膨胀腔流率的平均值; (3) 回热器温度为其两端温度的对数平均值。M. D. Atrey 等人在考虑不可逆损失时, 借鉴了 Miyabe、Longsworth、Zimmermann、Martini 等人的计算方法^[24-26]。

运用绝热 - 等温模型对 PPG-102 的模拟结果表明: 该模型比等温模型更接近实际斯特林制冷机的热力过程^[23]。

加拿大的 L. Bauwens 在一种层流模型中分析斯特林制冷机的不可逆损失时也指出, 在微型斯特林制冷机中, 这种绝热 - 等温模型更接近于实际情况^[27]。

3.1.4 线性网络理论

近 10 年来, 关于斯特林制冷机的线性网络理论得到了一定的发展, 其中以 B. J. Huang 和我国华中科技大学郭方中教授、原在美国 NASA 的肖家华等人的工作为代表^[28,29]。

该理论引入了电路分析中电阻、电容、电感的概念分别类比制冷机中的阻力及相位变化的影响, 电压代表压力降, 电流代表质量流量, 得到了一些定性的结果。虽然该理论尚没有形成完整的理论体系, 简化条件多, 但作为一种分析模型, 不失为一个新的思路和方法。

3.2 计算机处理方法

随着电子计算机的迅速发展和广泛应用,对于一些机理不明、过程复杂、理论推导难以进行或实效不大的物理现象,借助计算机强大的计算、处理能力进行数值分析逐渐成为一种科学研究的主流手段。

对斯特林制冷机进行数值模拟做出了突出贡献的有 Finkestein、Urieli、Organ、C. Minas 等人。他们从斯特林制冷机的热力学本质出发,吸收最新的计算方法,为微型斯特林制冷机的理论研究开创了一个新领域。

数值模拟的优点是:能接近真实地反映斯特林制冷机的整机和内部的流动、传热的动态特性,通过计算可以得到制冷机内部任一位置的气流流动的速度、温度、压力等详细信息,从而确定各参数的分布情况,对实验结果作出合理的解释,对制冷机内部的不可逆性作出合理评价并给出改进深度。

始于 Finkestein 的节点分析法是比较有代表性的方法^[30]。节点分析法的主要思想是:将整个系统划分成许多子系统,并通过各自的边界与外部进行热量、功和质量的交换。对各个子系统列出连续方程、能量方程和动量方程,然后对这些方程进行联立求解。由于这些方程都非常复杂,包括一些偏微分方程,因此采用数值方法,经过多次叠代,最后得到压力、温度和质量流量在一个周期内的瞬时值及冷量、功耗等。

Urieli 运用有限元方法对斯特林发动机的设计给出了庞大的计算程序,可以移植到斯特林制冷机上^[31]; C. Minas 则运用数值积分方法(主要是自适应步长的 Adams-Moulton 方法)进行求解,用 Fortran 编制了程序,但该模型假设气流速度沿流动截面均匀分布,并从流量直接计算而来,实质上使得动量方程已不满足守恒条件,致使收敛性方面欠妥,而且与实验值误差较大。

Organ 则长期致力于无量纲分析方法的研究^[33],试图将斯特林制冷机的性能与一些无量纲参数联系起来,为制冷机的设计提供一套

简便的方法。在进行无量纲分析过程中,Organ 对有限差分、有限元、特征线等方法的运用也作了探索。

我国已故制冷机专家吴沛宜教授等曾借助气体动力学中对可压缩、非定常、非等熵气体流动的数学描述来反映斯特林制冷机内部气体的流动过程,利用特征线分析法,在直接给出制冷机的压力波的前提下,定性分析了制冷机冷、热腔内气体微团的速度分布。特征线分析法的特点是物理过程清晰、计算量小,但只能定性反映制冷机内部气流的波动特性,有待于进一步的完善和发展。

4 微型斯特林制冷机技术研究的发展趋势

由于低温技术的迅速发展和应用领域的不断拓展,低温制冷机的研究将是一个经久不衰的课题,而目前已取得巨大进展的微型斯特林制冷机也仍将是今后制冷机研究的重点。

如前所述,由于理论研究的困难以及市场的迫切需求,对整机的研制仍是微型斯特林制冷机研究领域的重点,但理论研究也会有其自身的发展。

4.1 制冷机研制的发展趋势

微型斯特林制冷机的发展动力主要有两个,一是市场的需求及对其性能的较高要求,二是各研制单位间的激烈竞争。这促使各研制单位进一步发展与提高微型斯特林制冷机的研制水平。未来的发展趋势主要有:

4.1.1 进一步提高制冷机的制冷量和效率

多元器件和焦平面阵列技术的蓬勃发展,要求制冷机提供较大的制冷量以满足系统的需求,在 80K 时有 2W ~ 5W 的制冷量是比较合适的。但提高冷量的同时,还要受到制冷机功耗和重量的制约,而一般来说,这是一对难以解决的矛盾,因此,需要研究提高制冷机效率的途径。目前微型斯特林制冷机的效率一般为 2.5% ~ 5%,而按照斯特林制冷机的理想循环,当制冷温度为 80K、环境温度为 300K 时,其效率应

能达到 36%。改进的途径一是要对制冷机的各部件进行系统优化,包括整体结构设计、高效电机设计、高效回热器的设计、与杜瓦的耦合工艺设计等;二是要研制高效驱动电路。

4.1.2 进一步满足 4L 标准

4L 标准即少污染 (Low Pollution)、低成本 (Low Cost)、低损耗 (Low Loss)、长寿命 (Long Life),这是对制冷系统的通用要求。对微型斯特林制冷机而言,对航天应用来说,长寿命要求将是最重要的,目前希望最低寿命能达到 10,000 小时,5 至 10 年寿命的制冷机将是非常有市场的;而对地面应用来说,低成本将是最重要的。因此,研制者会根据各自的市场目标,确定合适的发展策略。总体来说,4L 标准将推动微型斯特林制冷机产品型号的系列化,并拓宽其应用方向。

4.1.3 与脉管冷指的耦合将是研究的热点

脉管制冷最早于上世纪 60 年代初由美国学者 Gifford 和 Longsworth 提出^[33]。他们对一根一端封闭的细长管交替地加压和减压,热量就由管的一端传输到另一端,在管内沿轴向建立起可观的温度梯度,这种制冷方式称为脉冲管制冷。之后由于脉冲管制冷添加了小孔和气库、双向进气、多路旁通等一系列改进方案,使得单级脉冲管制冷机最低温度可达 20K ~ 30K。脉冲管制冷具有在低温下无运动部件、调相手段多样、性能调节范围宽等优点。

脉管冷指与探测器件的耦合能更好地满足低振动的要求,因此开发适合脉管使用的压缩机是未来的一个研究热点。而微型斯特林制冷机的成功开发经验将会被成功地应用于脉管制冷机的研制上。

4.2 技术研究的发展趋势

整机研制的发展离不开理论的指导。为缩短开发周期,提高制冷机性能,探索微型斯特林制冷机的机理是研究的重要组成部分。

4.2.1 系统优化理论

如前所述,系统优化是整机研制的一个基础。主要有三个方面:对回热器性能的进一步研

究,如填料的选择、排列、数量以及气体在其中的流动状态等;对系统不可逆损失的研究,要设法弄清损失的机理,给出有效的经验公式;对系统运行时相位调节手段的研究。

优化理论的重要成果是开发实用、可行、面向对象的应用软件。美国的 D. Gedon 在模块化设计方面已进行了有益而有效的探索^[34]。

4.2.2 加速寿命实验

为测试制冷机的寿命,让它一直运行直至不能满足要求的方法是极不经济的,因此,加速寿命实验研究是未来的一个重要方向。

这是一个以实验为基础的课题,但涉及到很多的理论层面。如为确定预测的标准,就需要对影响制冷机寿命的各种因素进行系统的分析,并要以理论为指导设计出合理的实验手段。因此这是一个理论研究的热点。

乌克兰 V. Getmanets 领导的一个研究小组在加速寿命实验方面作出了重要的贡献,于 1999 年发表了一份研究报告^[35]。

5 发展我国的微型斯特林制冷机

5.1 研究现状

我国斯特林制冷机的研制也开展了多年的工作,积累了大量的技术和经验,但由于基础工业和工艺水平的限制,我国的微型斯特林制冷机的研制水平一直落后于发达国家。满足长寿命、轻质量、低功耗等性能指标的制冷机还不成熟。各研制单位虽各有自己的特长与优势,但总体上的研制水平并不高。

表 2 是国内微型斯特林制冷机的研制情况。

5.2 几点建议

结合我国微型斯特林制冷机的实际研制情况以及我国现阶段的国情,我们建议从以下几个方面开展工作,尽快提高我国斯特林制冷机的研制水平。

5.2.1 引进与创新相结合

从国外进口先进的制冷机进行解剖与仿制,在短期内会使我国的制冷机制造水平有很

表 2 国内微型斯特林制冷机研制情况

研制单位	型式	制冷量 (W/K)	输入功率 (W)	重量 (kg)	考核寿命 (h)
电子部 16 所	直线电机、气动分置	1.75/80	100	2.3	1,000
		0.5/80	38	1.3	1,000
兵总 211 所	旋转电机、气动分置	0.5/80	35	1	1,000
上海技术物理所	牛津型	0.5/80	36	4.4	18,000

大的提高,但从长远来看,要发展我们自己先进的微型斯特林制冷机,必须有坚实的实践基础,必须以自己的探索和钻研为后劲,否则只能永远落后于先进水平,形不成自己的竞争力,也无法满足将来巨大的国内市场需求。

在引进国外的重要部件、材料、工艺、实验方法、原理和设备的基础上,要进行创新和大胆的探索,形成自己的特色。

5.2.2 重视吸收相关领域的研究成果

斯特林制冷机的研制涉及到多学科、多专业,要重视吸收国内新材料新工艺、电机技术、自适应控制技术、表面处理、密封技术、精密加工工艺等方面的最新成果,并将之与具体的制冷机研制工作相结合。

5.2.3 开展深入细致的基础研究

设计、生产高性能的制冷机必须要有坚实的基础研究。如:热力循环分析与不可逆性研究、设计优化理论、控制理论、系统仿真、空间环境模拟、实验规范等。只有这些都有了一定的深度和成熟度,我国的斯特林制冷机才有可能走出实验室,成为先进的产品,并不断拓宽应用方向。

5.2.4 国内研制单位紧密合作

由于一些现实的原因,国内各研制单位的研究成果相互保密的程度比较高,尤其是相关的一些关键技术几乎是独享的,这严重制约了我国斯特林制冷机研制水平的快速提高。如何在兼顾各方利益的基础上,确定各自的研究重点,实现关键技术的共享,需要有关主管部门和各研制单位进行探讨。

参考文献

- [1] Walker, G. Stirling Engines Oxford University Press, Oxford, UK (1980).
- [2] Walker, G. Cryocoolers Vols 1 and 2, Plenum Publishing Corporation, NY, USA(1983).
- [3] Köhler, J. W. L, Jonkers, C. D. Philips Tech. Rev Vol. 16 (1954), p.69.
- [4] Davey, G., Orłowska, A. H., Miniature Stirling Cycle Cooler, Cryogenics, Vol. 27 (1987), p.148-151.
- [5] Davey, G., Review of the Oxford Cryocoolers, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 35, Plenum Press, NY(1990), p.1423.
- [6] 吴沛宜, 马元, 变质量系统热力学及其应用, 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [7] 陈国邦等, 最新低温制冷技术, 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [8] Grier, J.F., Aubon, C. R., Cryocooler Technology, SPIE Vol. 2269(1994), p. 658-664.
- [9] Aubon, C. R., Peters, N. R., Miniature Long Life Tactical Stirling Cryocoolers, Cryocoolers Vol.9 (1997), p.109-118.
- [10] Curlier, P., Cryocoolers Technologies, SPIE Vol. 2552 (1995), p.791-802.
- [11] Martin, J. Y., 10 year update of Stirling cryogenic cooler in France, SPIE Vol. 4130(2000), p.507-514.
- [12] Curlier, P., Cryocoolers for existing and future integrated dewar cooler assemblies, SPIE Vol.3436 (1998), p.794-801.
- [13] James, E. F., Banks, I. S., Ray, R. B., Castles, S. H., Demonstration of a Low Cost Cryocooler on a Long Duration Mission, <http://www.nasa.gov>, 2001.
- [14] Unger, R. Z., Wiseman, R. B., Hummon, M. R., The Advent of Low Cost Cryocoolers, <http://www.sunpower.com/coolers/Sunpower.htm>, 2001.10.31.
- [15] Nast, T., VonSavoye, R. et al, Modular Approach to Spaceborne Stirling Cryocoolers, Cryogenics, Vol.34 (1994), p.187-190.
- [16] Keung, C. S., Narayan, R., Compact, Dual-Piston

- Stirling Cryocoolers for IR Imaging Systems, SPIE Vol.2224 (1994), p.180-188.
- [17] Veprik, A., Meromi, A., Leshecz, A., Novel technique of vibration control for split Stirling cryocooler with linear compressor, SOIE Vol.3061 (1997), p.640-651.
- [18] Korf, H., Cabanski, W. A. et al, IR Modules and long-life Stirling Cryocoolers at AIM, SPIE Vol.3436 (1998), p.375-386.
- [19] Jones, B. G., Scull, S. R., Development and preflight qualification testing of a range of cryogenic coolers for applications from 20K to 80K, Cryogenics Vol.32 (1992), p.850-858.
- [20] 边绍雄等, 低温制冷机, 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [21] Walker, G., Stirling Cycle Machines, Oxford University Press (1973).
- [22] Rios, P. A., Smith, J. L., An Analysis of the Stirling Cycle Refrigerator, Adv. in Cryogenic Engineering Vol.14 (1968), p.370.
- [23] Atrey, M. D., Bapat, S. L., Narayankhedkar, K. G., Cyclic simulation of Stirling cryocoolers, Cryogenics Vol.30 (1990), p.341-347.
- [24] Miyabe, H., Takahashi, S., Hamaguchi, K., An approach to the design of Stirling engine regenerator matrix using packs of wire gauges Proc 17th IECEC IEEE, NY, USA (1982), p.1833-1844.
- [25] Longworth, R. C., Zimmermann, F. J., Shuttle heat transfer, Adv. Cryogenic Engineering, Vol.16 (1970), p.342-351.
- [26] Martini, W., Stirling engine design manual, NASA report, National Technical Information Services, US Department of Commerce, Spring Field, USA(1978).
- [27] Bauwens, L., Adiabatic losses in Stirling cryocoolers: a stratified flow model, Cryogenics Vol.34 (1994), p.627-633.
- [28] B. J. Huang, C. W. Lu, Linear network analysis of split-type Stirling refrigerator, Cryogenics Vol.34 (1994), p.207-210.
- [29] Q. Li, J. H. Xiao, F. Z. Guo et al, Dynamic modelling of split cycle free piston Stirling cryocooler, Cryogenics Vol.30 (1990), p.211-215.
- [30] Walker G., Cryocoolers, Plenum Press, New York, 1983.
- [31] Urieli, I., Berchowitz, D. M., Stirling Cycle Engine Analysis, Adam Hilger Ltd, Bristol, UK(1984).
- [32] Organ, A. J., Thermodynamics and gas dynamics of the Stirling cycle machine, Cambridge University Press, UK (1992).
- [33] Gifford, W. E., Longworth R. C., Pulse Tube Refrigeration, Trans. ASME, J. Eng. Ind. 86:264 (1964).
- [34] Gedeon, D., Sage:object-oriented software for cryocooler design, Cryocoolers Vol.8 (1995), p.281-292.
- [35] Getmanets, V., Pokhyl, Yu. et al, Accelerated lifetime testing of Bae-Stirling cryocooler with linear drive, Final Report, 1999.

• 简 讯 •

提供可调带隙的硅结构

可调光子带隙材料有望成为光调制器件,可应用于电信、显示和数据储存等领域。但是现有的材料呈现的不是高可调性慢响应速度,就是快响应速度低可调性。目前,美国宾夕法尼亚州立大学的研究人员已设计出一种光子晶体,它能同时提供高可调性和快响应速度。他们还设计出一种由两种绝缘材料构成的列阵结构。他们把一种材料加工成柱形并嵌入另一种材料,构成一个六边形图案。根据这两种材料的介电常数以及所嵌入的柱的直径和间距,计算结果表明,这种结构应呈现一个绝对带隙,它能同时阻止横向电场偏振光和横向磁场偏振光的传播。在硅薄膜中有气孔、硅衬底中

有正规六边形气柱的情况下,他们确定,这种绝对带隙约为波长与晶格间距相等的电磁波能量的6%。

如果晶体的两条横边相互剪切,列阵将会变形,从而改变带隙。当气孔的介电常数为1、硅衬底的介电常数为11.56时,在3%的剪应变下,绝对带隙的初始值将有73%的变化。把一个压电结构连接到薄膜上,应可达到兆赫范围的调制频率。

由于硅在1.3 μm 和1.55 μm 波长下是透明的,这种列阵应可作为调制器、光学开关和有源滤光片在电信应用中找到一席之地。目前,该校的研究人员正在把一个硅列阵嵌在一种电致伸缩的聚合物上以构成一个实际的器件。

□ 顾聚兴