

回热式低温制冷研究进展

胡剑英, 罗二仓

中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室, 北京 100190

摘要 很多特殊的物理现象伴随着低温而出现, 低温技术正逐渐渗透到社会生活中的很多领域。回热式制冷作为两类主流低温制冷技术之一, 主要包括斯特林制冷机、G-M 制冷机、脉冲管制冷机 3 种结构形式。前两种结构技术成熟, 但在寿命或效率方面有一定的不足; 脉冲管制冷机可靠性和效率均较高, 近年来发展最为迅猛。热声理论从声波与固壁相互作用的角度解释了回热式制冷的工作机制, 正逐步发展成为研究回热式制冷的统一的理论工具, 同时也使一种新的回热式制冷机结构——热声制冷机诞生。其中, 双作用热声制冷可能存在较大的发展前景。目前回热式制冷正呈现多热点的发展趋势。回热式制冷在不断拓展应用的同时也在不断深化内在的科学问题研究, 改进自身结构, 孕育新的发展的机会。

关键词 回热式; 低温; 制冷机

中图分类号 TB61*8

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.015

Progress in regenerative cryocoolers

HU Jianying, LUO Ercang

Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Many physical phenomena are accompanied with low temperature. Cryogenic technologies have been applied in many fields. Regenerative cryocooler is one of the two mainstream cryocoolers. It mainly includes three configurations: Stirling cryocooler, G-M cryocooler and pulse tube cryocooler. The first two configurations have been well studied. Their disadvantages are short lifetime or low efficiency. Pulse tube cryocooler possesses high reliability and high efficiency, and has attracted much attention. Thermoacoustic theory explains the working mechanism of regenerative cryocoolers from the viewpoint of interactions between the pressure wave and solid surface, gradually becoming a universal theoretical tool for regenerative refrigerators. It also gave birth to thermoacoustic cryocoolers. The so-called double-acting thermoacoustic cryocooler possesses high efficiency and high reliability. It may be a good choice for future applications. Now, quite a few hotspots have arisen in the study of regenerative cryocoolers. Various research has been carried out in this field in the hope of improving the configuration and expanding the applications of regenerative cryocoolers.

Keywords regenerative; cryogenic; cryocooler

在科学研究和工业生产中通常把低于环境的温度划分为普冷和低温两个区间, 0~120 K 范围称为低温温区, 120 K 到室温范围则被称为普冷温区^[1]。很多特殊的物理现象诸如超导电性、迈纳斯效应、热燥降低、生物活性降低、冷凝等伴随着低温出现, 而这些物理现象又引出许多奇妙而又意义重大的应用, 已经渗透到军事、能源、环境、运输、医疗、通信等很多领域, 成为推动社会发展不可缺少的支柱力量。

由于低温的广泛应用, 产生低温环境的低温制冷机也随之蓬勃发展。按照换热器的不同可以将低温制冷机主要分为间壁换热式制冷机和回热式制冷机^[2]。间壁换热式制冷机的换热器为间壁结构, 其中冷、热流体的流道是彼此分隔的, 热量是通过分隔体的壁面进行传输的, 流道中的流体是连续流动的, 具体结构形式主要包括 J-T 节流制冷机、布莱顿循环制冷机。回热式制冷机的换热器为回热式结构, 冷热流体周

收稿日期: 2014-06-27; 修回日期: 2014-08-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB227303); 国家自然科学基金项目(51276187); NSFC-云南联合基金项目(U1137606)

作者简介: 胡剑英, 研究员, 研究方向为回热式制冷, 电子信箱: jyhu@mail.ipc.ac.cn; 罗二仓(通信作者), 研究员, 研究方向为热声热机, 电子信箱: ecluo@mail.ipc.ac.cn

引用格式: 胡剑英, 罗二仓. 回热式低温制冷研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 99-107.

期性地交替流经回热填料间的微小流道,并与回热器填料换热,回热器填料在每半个周期中起着储存(或者释放)热量的作用,从而实现冷热流体间的热量交换。回热式制冷机主要包括斯特林制冷机、脉冲管制冷机、G-M制冷机。回热式制冷机按照其驱动方式又可以分为斯特林型和埃里克森型。斯特林型通过活塞往复运动改变容积来产生压力波,这种方式流动损失非常小,效率较高,压力波动幅值通常在平均压力的20%以下,频率在30 Hz以上,斯特林制冷机和斯特林型脉冲管制冷机均属于这种类型。埃里克森型则通过旋转阀交替连通高低压气库使制冷机内获得压力波动,由于存在旋转阀处节流效应,这种结构的效率较低,工作频率通常在几Hz,但高低压气库的压力可以相差数倍,G-M制冷机和GM型脉冲管制冷机均属于这种类型。

图1^[9]给出了低温技术的主要应用。可以看到,布莱顿循环制冷、节流制冷主要应用于大型气体液化、高能粒子加速器、受控热核反应、超导储能等大型低温系统。回热式制冷因为工作气体在同一流道内进行吸、放热,因此结构相比于间壁式换热式制冷机更加简单、小巧,在制冷量要求较小、紧凑型要求较高的场合具有非常好的适用性,广泛应用于低温电子、红外器件、超导滤波、低温泵、核磁成像,强电超导等场合。可以说回热式制冷的应用更加广泛和丰富,是低温制冷机中的重要组成部分,因此近年来越来越受到重视。

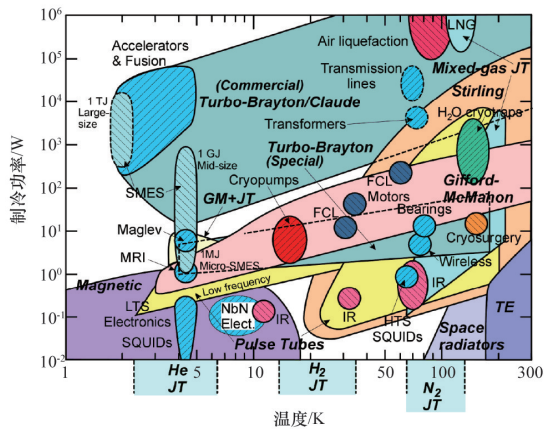
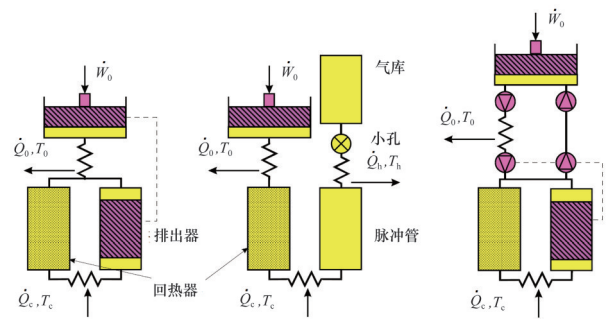


图1 不同制冷技术的主要应用温区与领域
Fig. 1 Cooling temperature and applied fields of different cooling technologies

1 传统回热式制冷机的发展

回热式制冷机的核心部件均为回热器,不同之处在于斯特林制冷机通过压缩和膨胀活塞(排出器)调节回热器内相位,脉冲管制冷机主要通过小孔气库、惯性管、双向进气获得理想声场,G-M制冷机虽然也是通过排出器调相,但压力波的产生方式不相同(图2)。正是因为这些结构上的差异以及统一的研究理论的缺乏,回热式制冷机的发展历程、应用也各有不同。



Q_0 —室温热量; Q_c —低温热量; Q_1 —脉管热端热量; T_0 —室温温度;
 T_c —低温温度; T_1 —脉管热端温度; W_0 —制冷机声功率

图2 3种主要的回热式制冷机

Fig. 2 Three typical regenerative cryocoolers

1.1 斯特林制冷

1816年,斯特林提出了由2个等温压缩和膨胀过程与2个等容回热过程组成的闭式热力学循环,称为斯特林循环^[4],将其逆循环用于制冷,就构成了斯特林制冷机。斯特林制冷机采用往复运动的活塞产生压力波,没有流动损失,因此其效率非常高,结构也非常紧凑,是最早应用于空间制冷的主动式制冷机之一。由于空间应用对寿命的要求比较高,斯特林制冷机的发展主要是围绕如何提高其运行寿命展开。

早期传统的斯特林制冷机为整体式结构,并且压缩机和排出器由旋转电机通过曲柄连杆机构驱动,密封形式为非金属弹性环的接触密封。这种斯特林制冷机振动和噪音较大,尤其是运动部件的磨损、制冷工质的污染使得制冷机的工作寿命受到限制,通常小于1年,图3为Stirling Cryogenics公司的曲柄连杆式斯特林制冷机(<http://www.stirlingcryogenics.com/products/Cryocoolers/1Stage-Cryocoolers/SPC1-Cryogenerator/>)。1964年,Beale提出了自由活塞斯特林结构,使活塞与气缸之间的摩擦大为减小(<http://www.sunpowerinc.com/about/history.php>)。Phillips进一步提出了线性谐振压缩机概念,同时将排出器的运动由机械传动改为气动^[5]。英国牛津大学进一步提出将摆线悬臂梁型板状弹簧支撑技术应用于斯特林制冷机的设想,以保证活塞和回热器运动组件的完全非接触,消除磨损,实现间隙密封技术,使斯特林制冷机的可靠性和寿命大大提高^[6,7]。板弹簧柔性支撑具有结构简单、可靠、质量轻等优点,难点在于气缸、活塞组件或板弹簧组件的对准和组装、间隙控制与准直等方面。1991年,采用该结构的斯特林制冷机首次成功应用于美国的高层大气研究卫星ISAMS,空间飞行寿命达15800 h^[8]。目前,板状弹簧支撑技术已经广泛应用于各种直线电机当中,产品级斯特林制冷机寿命已经达到 10^5 h以上(<http://www.sunpowerinc.com/about/history.php>)。图4为德州仪器公司的自由活塞斯特林制冷机。采用柔性板簧支撑技术的斯特林制冷机的制冷量通常在10 W以内的量级,而曲柄连杆结构的斯特林制冷机可以达到数kW量级。



图3 Stirling Cryogenics 公司的曲柄连杆式斯特林制冷机
Fig. 3 Stirling cryocooler driven by cranked compressor produced by Stirling Cryogenics

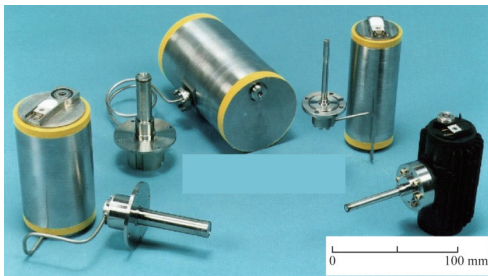


图4 德州仪器公司的自由活塞斯特林制冷机
Fig. 4 Free-piston Stirling cryocooler produced by Texas Instruments

随着寿命的大幅度提高,斯特林制冷机已被广泛应用。据统计,截止到1998年,全球用于红外冷却的斯特林制冷机就已经达到了14万台^[3]。然而斯特林制冷机的膨胀活塞始终运行在低温下,对材料和工艺的要求都非常高,在民用领域受到很大限制。近年来兴起的脉冲管制冷机采用热缓冲管替代了斯特林机中低温下的运动部件——排除器,容易获得更长的使用寿命,因此研究重点开始转移到脉冲管制冷机。目前脉冲管制冷机的效率已经可以和斯特林制冷机相媲美,并且已经开始在空间上获得应用,有逐渐取代斯特林制冷机的趋势。

1.2 G-M 制冷机

当室温高压气体绝热冲入一个刚性容器时,容器中的压力和温度将升高,若在充气同时对容器中的气体进行冷却,使其保持原来的温度,然后将该容器中的气体向低压空间放气,气体的压力和温度降低,产生冷量,连续实现该过程就可以获得稳定的低温。G-M 制冷机利用回热器的蓄热功能,通过旋转阀控制制冷机内压力的交替变化,通过排出器控制工作气体在回热器内的运动时序,从而连续实现该制冷过程。G-M 制冷机最早出现于20世纪60年代^[9],由于其采用了普通制冷用的标准压缩机,使成本大为降低,很快成为商品,20世纪80年代开始作为低温泵用来冷却真空系统中的木炭吸附剂到15 K。半导体生产工业中高真空环境的需求为

G-M 制冷机的发展提供了巨大的市场机遇,使 G-M 制冷在可靠性和成本控制等多方面获得了改进。因为半导体生产车间每隔1~2年进行整体维护,正好与 G-M 制冷机的维护周期接近,所以 G-M 制冷机的维护并不会影响半导体车间的生产。20世纪80年代末,为了减少 MRI 设备中的用于冷却超导磁体的液氮的蒸发量,G-M 制冷机被用来冷却其中的防辐射屏。20世纪90年代,4~20 K 温区高热熔稀土材料的发现使得 G-M 制冷机的最低制冷温度可以降低到4 K 以下,因此这种制冷机可以直接取代液氮作为 MRI 设备的冷却系统^[10]。G-M 制冷机工作频率很低,一般为1 Hz 左右,非常有利于减少回热器内的阻力和换热损失,可以使制冷机获得更低的制冷温度,适用于更低温区的场合。G-M 制冷机作为一种商业上极易获得的制冷机产品^[3],制冷温度覆盖范围很广,因此在很多研究项目中,即使所需的制冷温度并不是很低,G-M 制冷机也被用来作为临时的低温获得设备,例如早期的一些超导输电项目^[11]。图5为日本住友公司的 G-M 制冷机。

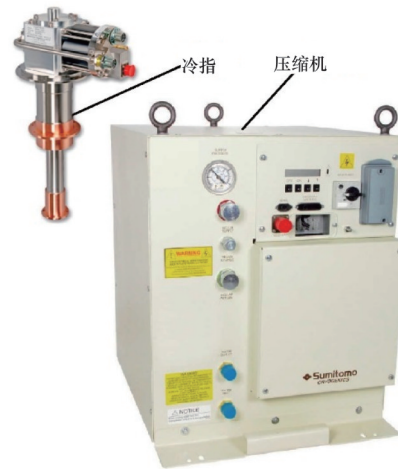


图5 住友公司的 G-M 制冷机
Fig. 5 G-M cryocooler produced by Sumitomo

为了达到一定的功率密度,G-M 制冷机的驱动压比通常比较高,无法直接用直线压缩机产生压力波进行驱动,而是在室温端通过专门的氢气压缩机产生高低压两个气源,旋转阀不断地跟高低压气源进行切换,从而产生压力波驱动制冷机工作。旋转阀在高低压气源之间的切换不可避免地要引入节流损失,因此,G-M 制冷机与其他回热式制冷方式相比,在液氮温区制冷效率并不高。此外 G-M 制冷机需要有较大的氢压缩机、复杂的滤油结构,需要定期的维护,这也是实际应用的较大障碍。

1.3 脉冲管制冷机

脉冲管制冷机与斯特林制冷机相比,采用一根热缓冲管替代了排出器,同时利用气体的流动特性对回热器内的声场进行调相。由于回热器的性能主要受到相位的影响,因此根据调相机构的改进,脉冲管制冷机可以大致分为基本型、小孔型、双向进气型和惯性管型4个发展阶段。

20世纪50年代,研究者在研究 G-M 制冷机时发现,当一

根管子内存在交变压力波时,封闭端会发热,沿着轴向可形成很大的温度梯度。进一步装入回热器、水冷器后,可以获得制冷效应,由此发明了基本型的脉冲管制冷机^[12],由于其采用G-M制冷机中的压力波发生器,因此也被称为G-M型脉冲管制冷机。为了消除气体经过旋转阀门时的节流损失,采用无阀压缩机代替有阀压缩机和旋转阀,利用活塞在汽缸内往复运动产生的压力波直接驱动脉冲管内工质压缩和膨胀产生制冷效应,形成通常所说的斯特林型脉冲管制冷机^[13]。

由于基本型脉冲管制冷机制冷温度高,制冷效率十分低下,导致在其诞生后的20年间几乎被人们遗忘。1984年,在基本型脉冲管制冷机的脉管热端增加了一个气库,并在热端换热器和脉管之间设置了节流小孔,可以大大提高制冷机的性能^[14]。之后,小孔被转移到热端换热器与气库之间,并用针阀替代,以调节进出气库的气量,获得了60 K的无负荷制冷温度^[15]。

小孔型脉冲管制冷机的成功重新激发了各国学者对脉冲管制冷机的研究兴趣。1990年,双向进气的概念被引入小孔型脉冲管制冷机,它使得部分工作气体直接从压缩机进入脉管热端,这样可以调节脉管热端的相位关系,同时提高脉管内的压力幅值^[16]。目前,双向进气已经成为G-M型脉冲管制冷机必不可少的组成部分,因为小孔阀不能使回热器获得所需的理想相位,必须使用双向进气作为辅助的调相机构。采用双向进气和小孔联合调相的G-M型脉管制冷机已经可以获得1.27 K的最低制冷温度^[17]。

小孔和双向进气结构的研究成果使得人们认识到脉冲管制冷机中压力波和质量流之间的相位关系是影响其制冷性能的关键参数。为使回热器损失最小,要求在回热器冷端质量流滞后于压力波,而工作在高频工况下的惯性管正好能够利用工质的质量惯性为脉冲管制冷机提供这种相位关系,因此在斯特林型脉冲管制冷机中,惯性管成为一种最为广泛使用的调相方式^[18]。相比于小孔和双向进气联合调相的方式,惯性管型结构避免了环路结构而无须担心直流对制冷性能的影响。目前多级结构的斯特林型脉冲管制冷机的最低制冷温度已经低于4 K^[19],在液氮温区的最高相对卡诺效率超过了20%^[20]。图6为中科力函(深圳)热声技术有限公司的脉冲管制冷机。



图6 中科力函(深圳)热声技术有限公司的小型脉冲管制冷机
Fig. 6 Pulse tube cryocooler produced by Lihan Thermoacoustic Technologies Co. Ltd.

2 回热式制冷的普适理论——热声学

由于机械结构和出现的历史时机不同,各种回热式制冷机的研究发展都比较独立,各自有不同的理论工具来解释其工作机制。例如脉冲管制冷机研究历史上就出现过表面泵热理论、焓流理论、向量分析法、热力学非对称理论等多种理论^[15,21-23]。这些理论有些具有一定局限性,有些较为先进,对理解制冷机的工作机制和提高制冷效率起到了重要的促进作用,但这些理论通常只针对一种制冷机,难以将各种回热式制冷机进行统一的研究,直到热声理论的出现。

19世纪中期,人们发现带温度梯度的空管内会产生自激的声波振荡,Rayleigh^[24]对这种现象进行了定性解释:只要参与热过程的工质的运动与热交换之间具有合适的相角,对做声振动的介质,若在其最稠密时向其提供热量,而在其最稀疏时吸取热量,声振动就会得到加强(热能变成声能形式的机械能,发动机);反之,若在其最稠密时吸取热量,而在其最稀疏时向其提供热量,声振动就会衰减(声能变为热流,制冷机)。1969年,Rott^[25]对Taconis振荡产生了浓厚兴趣,开始了热声振荡的理论研究,并于1980年发表“Thermoacoustics”一文,奠定了现代线性热声理论的基础。此后,Swift^[26]进一步发展了Rott的理论,发布了热声数值模拟程序DeltaEC,并搭建了多个热声发动机和制冷机系统,极大地推动了热声热机向实用化阶段的发展。2002年,Swift出版了《Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators》,标志着热声理论的成熟。

热声理论从声波振荡的角度出发,通过研究声波传播过程中气体与固体壁面之间的热相互作用来解释回热式制冷机的基本工作机制。气体微团以回热器为热载体,在低温处吸收热量,在高温处释放热量,通过接力的方式将热量从低温换热器内逐步搬运到室温换热器,因此回热器是热功转换发生的主要场所,其他部件的功能则主要是为了在回热器内获得合适的声场特性,实现高效的热功转换效率,不同的制冷机只是因为其实现理想声场的手段不同而在机械结构上呈现出较大的差异。从流体力学方程出发,热声理论获得了声波与固体壁面相互作用的基本方程,将这些基本方程应用于回热器、换热器、管道等,可以很好地指导斯特林制冷机、G-M制冷机、脉冲管制冷机等的设计以获得更高的制冷性能,从理论上将各种回热式制冷机统一起来。

热声理论的研究促使回热式制冷机发展了一个新的分支——热声制冷机。早期的热声制冷机回热器内的流动损失较大、效率较低,内部接近为驻波声场,因此也称为驻波热声制冷机。图7为宾州大学设计的驻波热声制冷机^[27]。1999年,Swift等^[28]在研究脉冲管制冷机结构的基础上,提出了一种可回收声功的制冷机,被称为行波热声制冷机,如图8所示。由于可实现行波相位,这种制冷机的回热器在通过相同的声功时,流动损失达到最小,理论效率与斯特林制冷机相等。虽然理论效率高,但是行波热声制冷机的入口为驻波相位^[29],

非常不利于声功输入,因此行波热声制冷机的研究目前也开始趋于平淡。

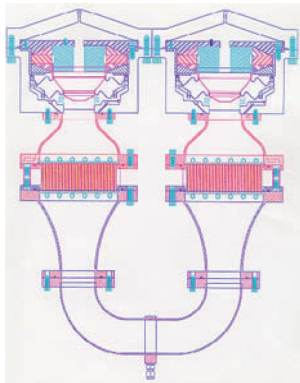


图7 扬声器驱动中的驻波热声制冷机

Fig. 7 Standing-wave thermoacoustic cooler driven by louder speakers

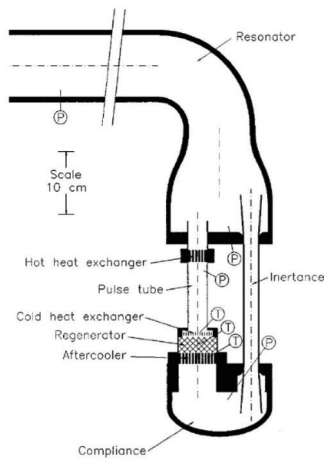


图8 Swift等设计的行波热声制冷机

Fig. 8 Traveling-wave thermoacoustic cooler designed by Swift et al

2011年,罗二仓等^[30]分析传统回热式制冷机的不足时,提出了一种新的制冷机结构——双作用热声制冷机,结构如图9所示。双作用热声制冷机由多个基本单元组成,每个基本单元包括一台热声转换器和一台直线压缩机。热声转换器主要由水冷器、回热器、冷头、热缓冲管、层流化元件组成,相比于传统脉冲管制冷机,层流化元件替代了原来的次水冷器,去除了惯性管等调相机构,结构更加简单;直线压缩机与传统的直线压缩机主体结构基本相同,但增加了膨胀腔和膨胀活塞。多个基本单元首尾相连构成一个环路。通过控制输入每个压缩机的电流相位,调节热声转换器两端的体积流相位差,从而在回热器内获得所需的声场。系统工作时,压缩机通过压缩活塞向热声转换器输出声功,在回热器内大部分声功被用来泵热产生制冷效应,剩余声功经过热缓冲管回到另一个基本单元中的膨胀腔,再通过膨胀活塞反馈给压缩

活塞。可以看到,双作用热声制冷机的主要部件与传统脉冲管制冷机类似,继承了传统脉冲管制冷机紧凑、长寿命的特点,同时它可以实现传统脉冲管制冷机所不能实现的相位关系和声功回收,因此其潜在效率比传统脉冲管制冷机更高,根据计算,整机效率可以达到30%以上^[31]。在制冷量要求较小且效率要求不高的场合,双作用热声制冷机采用了多套压缩机和热声转换器,相比于传统回热式制冷机不具备优势,但是目前单台脉冲管制冷机的最大制冷量为1 kW左右,在制冷量超过1 kW的应用场合需采用多套设备,此时双作用热声制冷机的劣势不复存在,反倒因为其取消了惯性管和气库,结构显得更加简单紧凑了,非常值得深入研究。

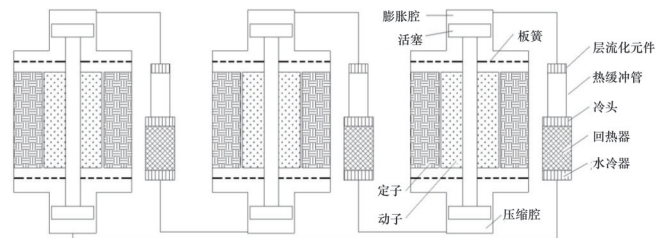


图9 双作用热声制冷机结构示意图

Fig. 9 Schematic of the double-acting thermoacoustic cryocooler

热声制冷的发展虽然暂时还没有形成具有产品价值的新型制冷机结构,但是热声理论却极大地促进了回热式制冷机的发展。基于热声理论设计的热驱动低温制冷机分别在2005年和2007年突破液氮和液氢温度^[32,33];2010年和2014年,以热声理论为指导优化设计的脉冲管制冷机达到了20%的相对卡诺效率^[20,34];借助于热声理论,传统回热式制冷机的调相机理也被更加清楚、准确地揭示^[35]。这些新的进展充分说明热声理论的先进性和普适性。

3 回热式制冷的发展趋势

G-M制冷机技术成熟,早已有相关的产品面世,曲柄连杆型斯特林制冷机存在寿命缺陷,因此这两种制冷机的研究趋于平静。小型自由活塞斯特林制冷机的技术也较为成熟,正在拓展其应用领域。脉冲管制冷机发展较晚,目前还主要应用于航空、军事等少数领域,部分机制性的问题还尚未研究清楚,是目前小型低温制冷机研究的焦点。

3.1 向普冷区发展

在普冷温区,由于传统蒸汽压缩式制冷采用的氟利昂工质对大气环境的破坏作用,人们正力图寻找新的制冷方式以满足环保、安全的要求。回热式由于采用自然界天然存在的气体氦气、氮气等为工质,不会对环境产生任何破坏作用,是理想的选择。2004年美国宾州大学研制出了一台电驱动的同轴行波热声制冷机,在-24.6℃是获得120 W的制冷量,并计划将其发展为新一代保存冰激凌的制冷机^[36]。2006年中国的罗二仓等^[37]研制成功热驱动双行波环路室温热声制冷机,

该制冷机在 -22°C 可获得 250 W 的制冷量, 制冷系数接近 2。2013 年, Stirling Ultracold 公司推出了采用自由活塞斯特林制冷的工作温度为 -80°C 冷柜产品(图 10), 相比于传统的蒸汽压缩式制冷机, 该制冷机节能近 50% (<http://stirlingultracold.com/>)。除此之外, 将斯特林制冷技术应用于室温热泵的研究工作也在进行 (<http://www.lihantech.com/>)。需要指出的是, 蒸汽压缩式制冷在室温温区的应用已经非常成熟, 脉冲管制冷机因为不能回收声功, G-M 制冷机因为旋转阀的节流效应, 二者在室温温区的效率较低, 因此实际应用的价值不高。



图 10 Stirling Ultracold 的斯特林机冷柜

Fig. 10 Free-piston Stirling freezers produced by Stirling Ultracold

3.2 向超低温区发展

4~20 K 温区的制冷有着非常广泛的应用, 目前该温区的小型低温制冷机主要由 G-M 制冷机和 G-M 型的脉管制冷机所主宰, 但这两种制冷机因为都是用氦气压缩机和旋转阀来产生压力波, 效率较低。20 K 以下温区脉管制冷机中惯性管耗散的声功比例已经微乎其微, 即使不回收声功, 其效率也与斯特林制冷机基本相等, 同时因为脉管制冷机调相更方便, 结构更简单, 因此研究者一直在努力将斯特林型的脉管制冷机应用于该温区。2005 年德国吉森大学率先研发出了突破液氢温度的斯特林型两级脉管制冷机, 随后多家研究单位开展了相关的研究工作^[38,39]。2013 年, 中国科学院理化技术研究所采用多路旁通的方式在单级脉管制冷机上获得了 15.5 K 的最低温, 在 250 W 输入电功时在 20 K 可获得 0.38 W 制冷量(图 11), 制冷效率已经与 G-M 制冷机相当^[40]。2006 年美国的 Lockheed Martin 公司通过四级脉管制冷机结构, 并用氦 3 为工质首次突破了液氢温度, 达到了 3.8 K 的最低制冷温度^[19]。浙江大学通过三级脉管制冷机结构也获得了接近 4 K 的温度^[41]。回热器的填料如何在良好的换热(需要较小的填料水力半径)和较低的流动阻力损失之间进行平衡以及惯性管如何在小功流情况下提高调相能力, 是

脉冲管制冷机深低温区进一步提升效率需要深入研究的问题。



图 11 中国科学院理化技术研究所的多路旁通脉冲制冷机

Fig. 11 Multi-bypass pulse tube cryocooler designed by TIPC

3.3 向大制冷量发展

随着高温超导技术在强电领域的应用逐步接近实用化阶段, 以节能为目的的强电超导技术对为其提供低温环境的制冷机提出了更高的要求, 不但要求制冷机具有较长的使用寿命, 而且要有较高的效率^[42]。脉冲管制冷机被认为是能够满足这些需求的候选者, 但是强电超导设备一般要求制冷机在液氮温区提供 100~1000 W 量级的制冷量, 因此提高脉冲管制冷机的制冷功率是目前回热式制冷机的另一研究热点。脉冲管制冷机功率的增大通常伴随着回热器长径比的减小, 回热器呈现出扁平的饼状特征。因为回热器的轴向方向存在较大的温度梯度, 流动方向上微小的扰动都可能使回热器内的冷热气流发生混合, 横截面上温度分布不均匀, 从而导致制冷机的效率急剧下降。回热器内流动与温度分布不均严重地限制了大功率制冷机效率的提高, 制冷功率在 100 W 以上脉冲管制冷机的整机相对卡诺效率一般在 15% 以下。国外报导的大功率脉冲管制冷机的最高相对卡诺效率为 19%, 可以在 80 K 制冷温度时提供 300 W 的制冷量, 但该制冷机的冷指还是采用直线设计, 非常不利于实际应用^[43]。如图 12 所示, 2014 年, 胡剑英等^[34]通过对回热器和脉管等进



图 12 500 W, 80 K 的大容量脉冲管制冷机

Fig. 12 High capacity pulse tube cryocooler with 500 W cooling power at 80 K

行优化设计出了一台 500 W 冷量(80 K)的脉冲管制冷机。该制冷机冷指采用同轴化设计,压缩机活塞采用气浮设计,整体尺寸为 420 mm×690 mm×780 mm,质量仅为 180 kg,在制冷量小于 370 W 时,相对卡诺效率高于 20%,这是目前报道的最高效率的同轴脉冲管制冷机。抑制流动与温度分布不均仍然是进一步增大脉冲管制冷机的功率所面临的难题。

3.4 热驱动化

虽然直线压缩机作为回热式制冷机的主要驱动机构,其寿命已可达到 10 年以上,但人们没有停止寻找寿命更长、结构更简单的新的驱动器。热声发动机是随着热声理论发展起来的一种完全无运动部件的将热能转化为声波的能量转换装置,将其与回热式制冷机相结合就构成了一种完全无运动部件的新型制冷装置。Radebaugh^[44]首先获得了 90 K 的低温。之后 Swift^[45]开始了行波热声发动机驱动脉冲管制冷机进行天然气液化研究,目前该结构的制冷温度已达 18.1 K^[33],图 13 为其结构示意图。热声发动机的尺寸与频率密切相关,频率低意味着更大的系统与更低的功率密度。为了减小系统尺寸,更便于实际应用,高频热声发动机驱动的制冷机受到了人们的关注。2007 年,300 Hz 的热声发动机驱动的脉冲管制冷机制冷温度突破了 77 K^[46]。高频率通常意味着更多的流动损失,因此效率不易提升,热驱动的回热式制冷基本还处于研究阶段。由于热声发动机和制冷机采用氦气等惰性气体为工质,因此热驱动的回热式制冷在室温温区的研究也在开展^[37]。

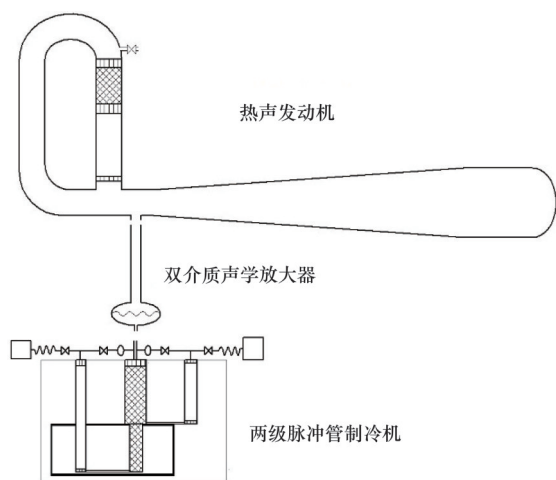


图 13 制冷温度达到 18.1 K 的热驱动制冷机

Fig. 13 Heat-driven thermoacoustic cryocooler with lowest temperature of 18.1 K

4 需深入研究的科学问题

从热声学的观点来看,回热式制冷是声波与固体壁面之间相互作用的结果,因此回热式制冷系统最基本的两个科学问题就是流动和换热的问题。另外,压力波的产生涉及到压

缩机的电声转化,所以压缩机的电声转换特性是回热式制冷涉及的另一个科学问题。

交变流动传播与换热特性通常交织在一起,难以分开研究。现行热声理论通过一定的简化假设已经对规则流道内的小振幅流动换热有了比较深入的了解,但对非规则流道则仍然存在数学上的解析困难^[47,48],声波在传播过程中基频与高频之间的相互作用^[49],极低温情况下热容的非线性变化对换热的影响也较为复杂(<http://cryogenics.nist.gov>),如何理清其中的内在规律以指导系统设计需要进一步的深入研究。随着交变流动系统压力波动的增大,湍流流动开始出现,由于流动速度的周期性变化,流动可能还在层流和湍流之间不断转换,这些流动特征对流动传播的影响目前主要是基于 Iguchi 假设研究^[50],虽然基于此假设的研究结果与实验在某些情况下出现较好的一致性,但其机制是否与 Iguchi 假设一致却还没有得到充分证实^[51];湍流对于交变换热的影响研究则更加稀少。突变截面对流动的均匀性的影响早已引起广泛关注^[52,53],这些研究试图总结出适用范围较广的规律,特别是突变截面能量与压降的损失的相关规律,但似乎都遇到了较大的困难。

回热式制冷机系统的效率由两部分构成,一是冷指的声冷转换效率,二是压缩机的电声转换效率,虽然电声转换效率不涉及热力学问题,但是构成一个高效完整的回热式制冷系统不可回避的问题。特别是国内对直线压缩机的研究力量一直比较薄弱,已经成为国内回热式制冷应用进入世界领先行列的最大障碍。压缩机的电声转换其实包括两个过程:电功先转换为磁功,磁功再转换为声功。电磁转换采用商用模拟软件可以进行良好的优化设计,需要深入研究的是如何将电磁转换过程中的各种损失进行简化的解析表征;磁声转换的环节则较为复杂,涉及板簧支撑部件等的机械阻尼、活塞间隙的泄漏损失、活塞漂移等问题,当活塞采用气浮支撑方式时则进一步涉及到小孔和气膜内的单向周期性流动与损失等问题。有学者提出通过提高频率来进一步提高回热式制冷系统功率密度的思路,这也需要在压缩机的研究上先进行验证^[54]。

5 结论

科学技术的进步对小型低温制冷提出了新的需求,从而为回热式制冷机提供了难得的发展机遇和新的市场前景。新的制冷理论使得回热式制冷机的工作原理得到科学的揭示,性能得到不断提升,应用得到不断的扩展。相信回热式制冷将进一步为科技和社会的发展发挥更加重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] 陈光明, 陈国邦. 制冷与低温原理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Chen Guangming, Chen Guobang. The theory of refrigeration and cryogenics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2009.

- [2] 陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Chen Guobang, Tang Ke. The principle of cryogenic refrigerator[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] Radebaugh R. Cryocoolers: The state of the art and recent developments [J]. *Journal of Physics Condensed Matter*, 2009, 21(16): 164219.
- [4] Walker G. Stirling engines[M]. Oxford: Oxford University Press, 1980.
- [5] 刘晓华, 纪国林, 许妙根. 斯特林制冷机中膜片弹簧的有限元分析[J]. 低温与特气, 1999(2): 28-30.
Liu Xiaohua, Ji Guolin, Xu Miaogen. The finite element analysis for the Oxford flexure bearing in Stirling cryocoolers[J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 1999(2): 28-30.
- [6] Davey G. Review of the Oxford cryocooler[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1990, 35(B): 1423-1430.
- [7] Wong T E, Pan R B, Johnson A L. Novel linear flexure bearing[C]// *Cryocoolers 7*. New York: Plenum Press, 1992: 675-698.
- [8] 朱建炳, 潘雁频. 空间制冷技术在星载红外遥感中的应用与发展[J]. 真空与低温, 2003, 9(1): 6-12.
Zhu Jianbing, Pan Yanpin. Space refrigeration technology for infrared remote sensing in satellites[J]. *Vacuum and Low Temperature*, 2003, 9(1): 6-12.
- [9] McMahon H O, Gifford W E. A new low temperature gas expansion cycle[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1960, 5: 354-367.
- [10] Kuriyama T, Hakamada H, Nakagome Y, et al. High efficient two-stage GM refrigerator with magnetic material in the liquid helium temperature region[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1990, 35: 1261-1269.
- [11] Eckroad S. Superconducting power equipment[EB/OL]. [2012-24-12]. http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/epri_sc_technology_watch_2011.pdf.
- [12] Gifford W E, Longworth R C. Pulse tube refrigerator[J]. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, 1964, 86: 264-270.
- [13] Gifford W E, Kyanka G H. Reversible pulse tube refrigeration[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1967, 12: 619-630.
- [14] Mikulin E I. Low-temperature expansion pulse tube[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1984, 29: 629-637.
- [15] Radebaugh R, Zimmerman J, Smith D R, et al. A comparison of three types of pulse tube refrigerators: New methods for reaching 60 K[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1986, 31: 779-789.
- [16] Zhu S L, Wu P Y, Chen Z Q. Double inlet pulse tube refrigerators: An important improvement[J]. *Cryogenics*, 1990, 30(6): 514-520.
- [17] Jiang N, Lindemann U, Giebeler F, et al. A He⁻³ pulse tube cooler operating down to 1.3 K[J]. *Cryogenics*, 2004, 44(11): 809-816.
- [18] Kanao K, Watanabe N, Kanazawa Y. A miniature pulse tube refrigerator for temperatures below 100 K[J]. *Cryogenics*, 1994, 34: 167-170.
- [19] Nast T, Olson J, Champagne P, et al. Overview of lockheed martin cryocoolers[J]. *Cryogenics*, 2006, 46(2/3): 164-168.
- [20] Hu J Y, Dai W, Luo E C, et al. Development of high efficiency Stirling-type pulse tube cryocoolers[J]. *Cryogenics*, 2010, 50(9): 603-607.
- [21] Gifford W E, Longworth R C. Surface heat pumping[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1966, 11: 171-179.
- [22] Storch P J, Radebaugh R. Development and experimental test of an analytical model of the orifice pulse tube refrigerator[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1988, 33: 851-859.
- [23] Liang J, Ravex A, Rolland P. Study on pulse tube refrigeration Part 1: Thermodynamic nonsymmetry effect[J]. *Cryogenics*, 1996, 36(2): 87-93.
- [24] Rayleigh L. The theory of sound[M]. Dover: Dover Publications, 1896.
- [25] Rott N. Thermoacoustics[J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1980, 20: 135-175.
- [26] Swift G W. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators[M]. Sewickley, PA: ASA Publication, 2002.
- [27] Garrett S L. Shipboard electronics thermoacoustic cooler[EB/OL]. [2006-05-01]. <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/setac.htm>.
- [28] Swift G W, Gardner D L, Backhaus S. Acoustic recovery of lost power in pulse tube refrigerators[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 105(2): 711-724.
- [29] 吴张华. 电驱动室温温区行波热声制冷机的数值模拟及实验研究[D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2006.
Wu Zhanghua. Theoretical and experimental study of electrically driven traveling-wave thermoacoustic refrigerator in room temperature range[D]. Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [30] Luo E C, Dai W, Hu J Y, et al. Single-stage double-acting traveling-wave thermoacoustic system: China & US, PCT/CN2012/073390[P].
- [31] Hu J Y, Luo E C, Zhang L M, et al. A double-acting thermoacoustic cryocooler for high temperature superconducting electric power grids [J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1166-1170.
- [32] Dai W, Luo E C, Hu J Y, et al. A Heat-driven thermoacoustic cooler capable of reaching liquid nitrogen temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(22): 224103.
- [33] Hu J Y, Luo E C, Li S F, et al. Heat-driven thermoacoustic cryocooler operating at liquid hydrogen temperature with a unique coupler[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(10): 104906.
- [34] Hu J Y, Zhang L M, Zhu J, et al. A high-efficiency coaxial pulse tube cryocooler with 500 W cooling capacity at 80 K[J]. *Cryogenics*, 2014, 62: 7-10.
- [35] Hu J Y, Ren J, Luo E C, et al. Study on the inertance tube and double-inlet phase shifting modes in pulse tube refrigerators[J]. *Energy Convers Manage*, 2011, 52(2): 1077-1085.
- [36] Matthew E P, Robert W M S, Steven L G, et al. Thermoacoustic refrigeration for ice cream sales[C]//*Proceedings of 6th IIR, Gustav Lorentzen Conference-Natural Working Fluids*. Scotland: [S.I.], 2004.
- [37] Luo E C, Dai W, Zhang Y, et al. Thermoacoustically driven refrigerator with double thermoacoustic-Stirling cycles[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(7): 074102.
- [38] Yang L W, Thummes G. High frequency two-stage pulse tube cryocooler with base temperature below 20 K[J]. *Cryogenics*, 2005, 45(2): 155-159.
- [39] Tang K, Chen G B, Thummes G. 13 K thermally coupled two-stage Stirling-type pulse tube refrigerator[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(16): 1814-1816.
- [40] Chen L B, Zhou Q, Jin H, et al. 386 mW/20 K single-stage Stirling-type pulse tube cryocooler[J]. *Cryogenics*, 2013, 57: 195-199.
- [41] Zhi X Q, Han L, Dietrich M, et al. A three-stage Stirling pulse tube cryocooler reached 4.26 K with He⁻⁴ working fluid[J]. *Cryogenics*, 2013, 58: 93-96.
- [42] 毕延芳, 洪辉, 信赢. 高温超导电力应用的低温冷却系统及制冷机[J]. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(10): 1101-1111.
Bi Yanfang, Hong Hui, Xin Ying. The refrigerating systems and cryocoolers in HTS power grid[J]. *Science China: Technologies*, 2013,

- 43(10): 1101-1111.
- [43] Zia J H. A pulse tube cryocooler with 300 W refrigeration at 80 K and an operating efficiency of 19% Carnot[C]//Miller S D, Ross R G. Cryocoolers 14, Annapolis, Maryland: ICC Inc, 2007: 141-147.
- [44] Radebaugh R, McDermott K M, Swift G W, et al. Development of a thermoacoustically driven orifice pulse tube refrigerator[C]//Proceedings of the Interagency Meeting on Cryocoolers. Plymouth, MA: David Taylor Research Center, 1991: 205-220.
- [45] Arman B, Wollan J J, Swift G W, et al. Thermoacoustic natural gas liquefiers and recent developments[C]//Cryogenics and Refrigeration-Proceedings of ICCR. Beijing: International Academic Publishers, 2003: 123-127.
- [46] Dai W, Yu G Y, Zhu S L, et al. 300 Hz thermoacoustically driven pulse tube cooler for temperature below 100 K[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(2): 024104.
- [47] 陈燕燕, 罗二仓, 戴巍. 热声回热器流动、传热新模型及其性能的实验表征[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(3): 494-498.
Chen Yanyan, Luo Ercang, Dai Wei. New model and measurement principle on flow and heat transfer of thermoacoustic regenerator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(3): 494-498.
- [48] Tang K, Yu J, Jin T, et al. Heat transfer of laminar oscillating flow in finned heat exchanger of pulse tube refrigerator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 70: 811-818.
- [49] Luo E C, Ling H, Dai W, et al. A high pressure-ratio, energy-focused thermoacoustic heat engine with a tapered resonator[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(3): 284-286.
- [50] Iguchi M, Ohmi M, Maegawa K. Analysis of free oscillating flow in a U-shaped tube[J]. Bulletin of the JSME, 1982, 25: 1398-1405.
- [51] 胡剑英, 陈燕燕, 罗二仓, 等. 声学压力波放大器的湍流模型及实验验证[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(10): 1641-1644.
Hu Jianying, Chen Yanyan, Luo Ercang, et al. A simplified turbulent flow model and experimental verification for an acoustic amplifier[J]. Journal of Chinese Thermophysics Engineering, 2008, 29(10): 1641-1644.
- [52] 陈燕燕, 张宇坤, 戴巍, 等. 交变流动中突变截面局部损失特性分析[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(2): 186-190.
Chen Yanyan, Zhang Yukun, Dai Wei, et al. Minor losses of oscillating flow through a sudden change area[J]. Journal of Chinese Thermophysics Engineering, 2012, 33(2): 186-190.
- [53] Smith B L, Swift G W. Power dissipation and time-averaged pressure in oscillating flow through a sudden area change[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(5): 2455-2463.
- [54] Radebaugh R, O'Gallagher A. Regenerator operation at very high frequencies for microcryocoolers[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 2006, 51(B): 1919-1928.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·



中国科学技术协会

第十届中国科技期刊发展论坛在广州举行

“要充分发挥科技期刊在服务创新驱动发展战略中的重要作用,助力国家创新体系建设。牢牢把握全面深化改革和新科技革命的重要机遇,加快推动科技期刊创新发展。严格审稿关,逐步提高水平学术论文的比重,更多地反映该学科领域的科学前沿的创新成果,反映有突破性、创造性、建树性的学术新观点、新理论、新成就。要强化科技期刊数字化建设,顺应信息化大趋势;强化科技期刊国际化建设,提升核心竞争力和国际影响力;强化科技期刊集群化建设,加快推动战略转型。”中国科协党组书记、书记处第一书记尚勇在第十届中国科技期刊发展论坛开幕式致辞中强调。

2014年11月13—14日,由中国科协、国家新闻出版广电总局联合主办,主题为“全面深化改革中的科技期刊发展路径”的第十届中国科技期刊发展论坛在广州举行。来自全国各地的科技期刊编辑、管理人员及部分国际著名科技期刊组织的代表600多人参加会议。中国科协党组成员、书记处书记沈爱民主持开幕式。

在线直播见中国科协网 <http://210.14.113.38:9080/asop/login.asop?titleId=401>。