

# 脉管制冷机结构、理论及实用化等方面的进展

高成名 何雅玲 陈钟硕 陶文铨 吴明

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049)

**【摘要】**文中对脉管制冷机的发展作了较为详细的回顾,分析了各种结构、各种理论的特点及其应用范围,指出不足和需要改进的地方。分析了脉管制冷机的发展前景和方向,分析指出实用化和微型化以及将脉管制冷机应用于普冷领域是脉管制冷机今后发展的主要方向。

**关键词:** 评述 脉管制冷机 制冷机 低温工程

## 1 脉管制冷机在结构上的发展

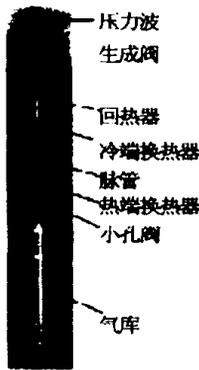


图 1 脉管制冷机

脉管制冷机(如图 1 所示)是制冷机中一种比较新颖的低温制冷机,最早由美国 Gifford 教授和 Longworth 提出。Gifford 教授注意到与气体压缩机相连的铅管在其封闭端会变热,而当采用回热器将管子与压缩机相连时,则可以使得管子的一端制冷而另一端变热,这就是最基本的脉管制冷机,如图 2 所示。当时,单级的脉管制冷机达到 150K,二级的达到了 120K,经过改进后分别达到 124K 和 79K。但由于其效率太低,这些研究并没有得到充分地重视,六十年代末及整个七十年代,脉管制冷机还只是处在探索性研究开发阶段,这就是第一代脉管制冷机。

1981 年,美国 NASA 的 Kittel 博士对在太空中应用单一运动部件的脉管制冷机的可行性进行了论证,并指出: (1)

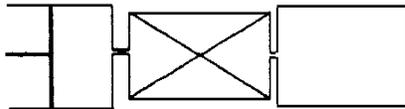


图 2 基本型脉管制冷机结构图

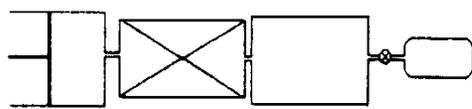


图 3 小孔型脉管制冷机结构图

与斯特林制冷机相比,具有更高的可靠性和更低的代价; (2) 与其他现行的需要储存制冷剂的制冷机相比,脉管制冷机可以在很大程度上减少质量、降低费用、延长寿命; (3) 脉管制冷机由于不存在低温运动部件从而提高了寿命,消除了以前冷头部件的颤动; (4) 脉管制冷机与 Stirling 制冷机的原理相似,因此可以从所有的现行太空斯特林制冷机的各种技术中得到启发。这使得脉管制冷机最终成为大家研究的重点。

\* 本文得到 973 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000026303)和国家自然科学基金重点资助项目(59636190)的资助

本文于 2000 年 11 月 15 日收到,修改稿于 2001 年元月 30 日收到。

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

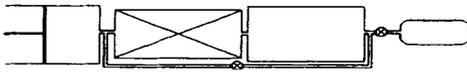


图 4 双向进气型脉管制冷机结构图

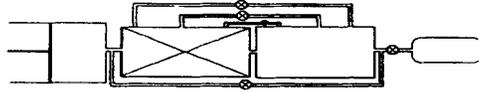


图 5 多路旁通脉管制冷机结构图

1983 年, 前苏联的 M ikulin 博士在热端加入一个小孔和气库, 从而改善了压力波和质量流量波之间的相位匹配关系, 很大程度上提高了脉管制冷机的效率。这是脉管制冷机发展史上的第一次历史性突破, 被誉为第二代脉管制冷机。研究结果表明: 对于单级小孔型脉管制冷机能够达到低于 80K 的温度; 而对于多级的小孔脉管制冷机, 1994 年日本的 M atsubara 教授在一台三级小孔型脉管制冷机上达到了 3.6K 的低温<sup>[1]</sup>, 这是脉管制冷机第一次实现液氦温度。

1990 年, 西安交通大学吴沛宜教授领导的课题小组提出的双向进气脉管制冷机是脉管制冷机发展史上又一次重大改进。其方案就是在脉管的热端和压缩机的出口之间连接一个气体调节阀, 用以调节进入脉管的气体量, 见图 4 所示, 该方案达到 42K 当时世界脉管制冷的最低制冷温度<sup>[2]</sup>。1992 年第七届国际制冷会议上, 中科院低温中心的周远教授领导的研究小组进一步提出了多路旁通脉管制冷机, 如图 5 所示。1993 年中科院低温中心的蔡京辉实验验证了双向进气和多路旁通的调相作用<sup>[3]</sup>。目前双向进气阀结构的调相作用已经得到全世界各国学者的认同。1995 年王超博士对该结构进行单级实验, 达到了 23.8K 的制冷温度。双向进气脉管制冷机被誉为第三代脉管制冷机。

这期间还有以回收部分功、减少阻力以及调相为目的的脉管制冷机。如 1967 年 Gifford 等提出的用无阀压缩机直接驱动的脉管制冷机; 1988 年第五届国际制冷机会议上, 日本的 M atsubara 提出了移动活塞式脉管制冷机, 随后他又提出了双活塞脉管制冷机的构想, 1991 年和 1992 年日本有好几家公司的研究人员对双活塞脉管制冷机进行了研究<sup>[4]</sup>; 1993 年西安交大吴沛宜教授领导的研究小组研制出了一种双活塞结构的双向进气可逆脉管制冷机<sup>[5]</sup>; 1994 年合肥低温电子所的陈登科提出了四阀式脉管制冷机结构以及双阀双小孔脉管制冷机结构<sup>[6]</sup>; 1993 年第四届中日低温会上, 日本 M atsubara 等也提出了四阀结构的脉管制冷机。许多实验表明: 四阀式脉管制冷机及其变型具有更低的制冷温度和较大的制冷量, 但由于四个阀的开度都存在一个最佳值, 结构比通常的脉管制冷机要复杂, 调节困难, 制冷量和制冷性能与四个阀的配合有很大的关系。

除这些以外, 还有以下一些结构上的改进方案。如 1996 年第 9 届国际低温制冷机会上, 朱绍伟博士提出了声阻管结构的脉管制冷机; 1997 年 NASA 提出的惯性感应管结构的脉管制冷机<sup>[7]</sup>; 1996 年西安交大的许名尧提出的变截面脉管制冷机的专利; 1997 年美国 O lson 等采用热声学的方法对另外一种变截面脉管制冷机进行了研究, 1998 年和 1999 年 Sw ift 等人在其提交的 N T I S 中对这种变截面脉管制冷机的性能和机理进行了分析, 提出采用这种结构可以抑制住脉管中的声流损失, 从而提高制冷效果; 中科院周远教授领导的研究小组提出了以喷嘴、孔板或毛细管结构取代小孔阀和双向进气阀<sup>[8]</sup>的方案等等。

过入八十年代后, 关于热声制冷机的研究进一步得到了深化。1998 年美国 N I S T 的 Sw ift 教授将热声压缩机与脉管制冷机结合, 提出了热声驱动的脉管制冷机, 并获得了 90K 的制冷温度<sup>[9]</sup>。由于该机构中以热声振荡器(热声压缩机)取代原来的机械式压缩机, 从而最

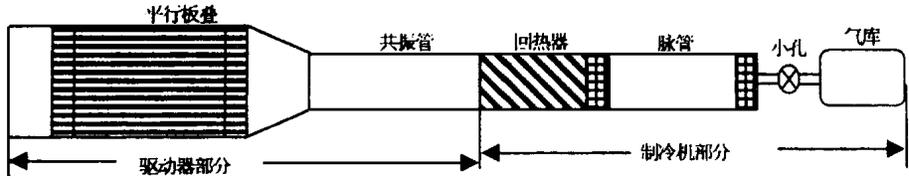


图 6 热声制冷机的装置示意图

终取缔了脉管制冷机中的运动部件, 使得其具有更高的可靠性和运行寿命。图 6 所示的是 Swift 教授与 Cryenco 公司合作开发的应用于天然气液化的热声制冷机的装置示意图, 该制冷机已研制出样机。热声脉管制冷机具有很大的潜力, 是将来太空中应用的最佳选择, 但其性能还有待进一步改善。

1997 年第九届国际低温制冷机会议上, Yuan J 和 Pfothenauer J M 提出的用于超导体

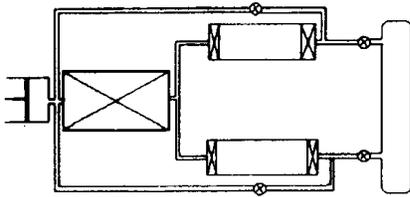


图 7 并联二级脉管制冷机结构

冷却的单级回热并联脉管结构的脉管制冷机, 如图 7 所示。实验表明: 并联结构中的每一个脉管的性能与非并联结构时的一样, 但并联后总的效果会有所降低。并且实验还表明: 对于每一个脉管的两端可以设置不同的温度, 而气体的混合所带来的损失与因共用回热器所减少的损失相当, 而一个最佳的并联脉管结构的脉管制

冷机中的每一个脉管存在一个匹配问题。1999 年第十届国际低温制冷机会议上, Olson J R,

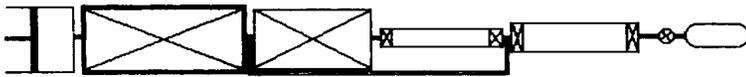


图 8 串联二级脉管制冷机结构

Kotsubo V 等开发出一种应用于太空的具有串联结构的二级脉管制冷机, 如图 8 所示。当外界温度为 295K 时, 这个两级的制冷机中第一级温度为 56K 时制冷量可达到 0.6W, 第二级温度为 35K 时制冷量为 0.32K。当两级中均无热负荷时, 这两级分别可以达到 23K 和 48K 的最低制冷温度, 同时在中间微细管中, 也发现了 DC 气流, 这导致了第二级的部分制冷量的损失, 也导致了第二级制冷温度的不稳定。Yang L W, Liang J T 等人对两种二级同轴结构的脉管制冷机进行了实验研究, 结构如图 9 所示。实验表明: (1) 对于全部采用同轴结构的二级脉管制冷机, 所达到的最低制冷温度为 75.7K; (2) 第一级采用同轴而第二级采用 U 形布置的脉管制冷机, 最低制冷温度可达到 25K, 当制冷温度为 33K 时, 制冷量可达到 0.5W。Matthew P. Mitchell 等人采用双涡流管做换热器, 并将这种换热器应用于脉管制冷机中, 如图 10 所示。实验采用网状填料式的热端换热器时, 得到了 133K 的无负荷温度, 而采用双涡流管结构回热器时, 当采用泡沫材料绝热时, 在小孔型脉管制冷机上得到的 122K 的低温, 在声阻管结构脉管制冷机上得到了 97K 的最低制冷温度。在 2000 年北京国际低温会议上中科院低温中心周远教授提出了一种第二级脉管具有类似串联结构的多级脉管制冷机的构想, 如图 11 所示, 并指出这种结构有利于改善脉管制冷机的性能。

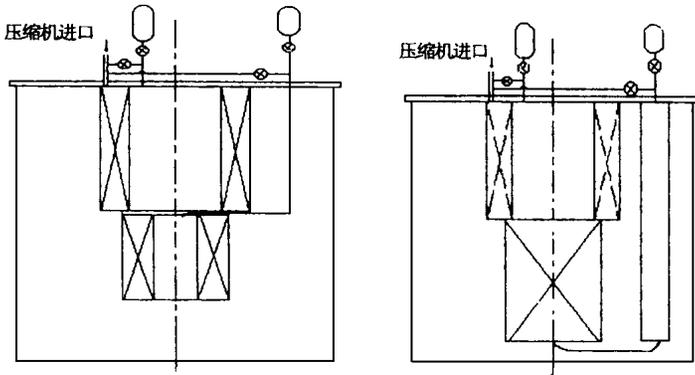
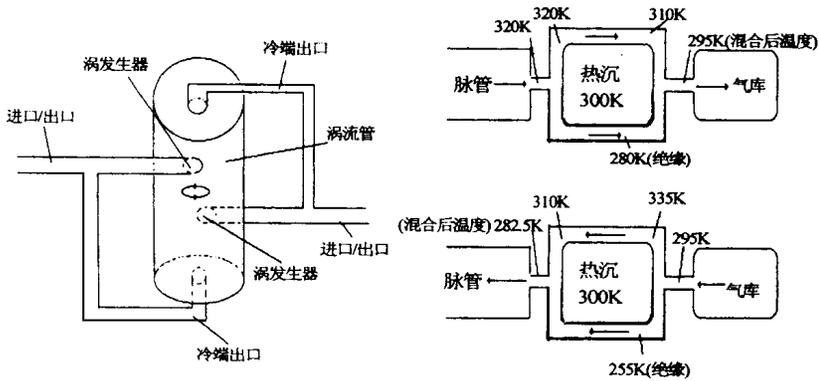


图 9 二级同轴脉管制冷机结构



(a) 双涡流管构成的热交换器

(b) 以双涡流管做热交换器的脉管结构的实例

图 10 双涡流管热交换器脉管制冷机结构

由此可知, 通过结构上的改进来改善脉管制冷机的性能一直都是人们研究的重点。在今后的研究中, 通过改进脉管结构来提高制冷量、降低制冷温度、改善制冷性能等仍然是主要的研究课题。

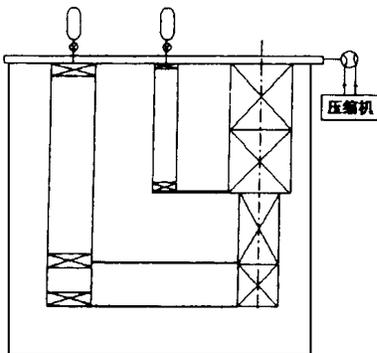


图 11 第二级脉管具有类串联结构的多级脉管制冷机结构

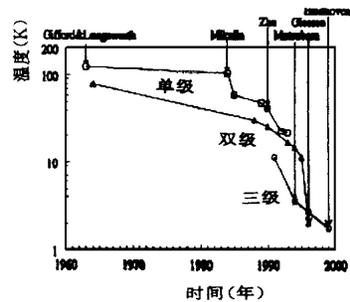


图 12 自研究以来单级、双级和三级脉管制冷机所达到的最低制冷温度(除 Eindhoven 的脉管制冷机采用<sup>3</sup>He 达到 1.78K 外, 其余的系统均采用<sup>4</sup>He 作为工质)

图 12 给出了脉管制冷机自研究以来所报告的最低制冷温度的情况。对脉管制冷机的分类,也有研究者是按表 I 的方法进行的。

## 2 脉管制冷机的微型化和实用化

微型化: 1972 年, 美国的 Lechner 和 Ackmann 首次提出微型化问题, 并且提出了同轴脉管制冷机的结构<sup>[10]</sup>, 脉管制冷机的同轴结构就是将回热器和脉管内外同轴布置, 使得结构紧凑、尺寸小, 是实现微型化的最佳结构; 这方面的介绍主要有: 1988 年英国的 Richardson 等<sup>[11]</sup>; 1989 年西安交大的周彬<sup>[12]</sup>; 1990 年中科院低温中心的王俊杰<sup>[13]</sup>、周远<sup>[14]</sup>; 1996 年中科院低温中心的王超<sup>[15]</sup>; 西安交大的许名尧<sup>[16]</sup>等都进行过同轴脉管制冷机的研究。1992 年全国第三届低温工程学术会议上, 蔡京辉等将多路旁通的思想引进到同轴脉管制冷机; 1995 年第八届国际低温制冷机会议上, 德国的 Blurock J 等将四阀结构用于同轴脉管制冷机。另外文献<sup>[17]</sup>也报道了脉管制冷机的微型化还可以用 U 型布置来实现。

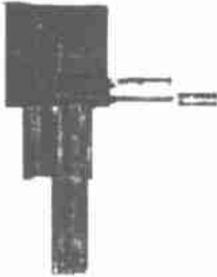


图 13 PT405 型脉管制冷机



图 14 NASA 为其卫星设计的脉管制冷机

实用化: 美国 Cryomech 公司制造的 PT4-05 制冷机(图 13)、PT60 制冷机等, 该公司制造的一些其它制冷机, 不少是通过脉管制冷机与其它型式的制冷机的结合共同完成制冷任务的(参见该公司主页)。在 NASA 的年度报告及其主页上, 也报道过 Radebaugh 等为毫米级传感器设计的脉管制冷机和为他们的卫星所研制的特种脉管制冷机(图 14), 美国 Cryenco 公司开发的热声脉管制冷机及中科院低温中心制造的低温治疗仪等也是脉管制冷机走向实用化的应用实例。目前脉管制冷机开始由实验室走向市场, 全世界第一台 4K 脉管制冷机的商用样机已由 Cryomech 公司研制出, 脉管制冷机的实用化进程还会进一步加快。

表 I 脉管制冷机的分类

分类	提出时间	脉管类型	英文缩写
第一代	1963	基本型脉管	BPTC
第二代	1984	小孔型脉管	OPTC
第三代	1988	热端膨胀机(移动活塞)型	WEPTC
	1990	双向进气型	DPTC
	1993	四阀型	FVPTC
	1994	声阻管(长颈管)型	IPPTC
	1996	主动气库型	ABPTC
	1996	内调相型	IPPTC
	1996	变截面型	NCPTC
	1997	变截面型	TPTC

## 3 脉管制冷机在理论上的发展

脉管制冷机的理论研究与实验研究相比显得不足, 其主要原因是脉管制冷机的工作过程涉及到热力学、流体动力学、传热学

等多方面的问题, 其内部流动过程极其复杂。

对脉管制冷机的理论研究基本上可以分为以下几种:

(1) 表面泵热理论。1965 年由 Gifford 和 Longworth 最初提出<sup>[18]</sup>, 该理论在解释基本型脉管制冷机上是比较成功的。1994 年 de Boer 采用该理论分析了基本型脉管制冷机的内部过程, 1996 年为他分析小孔型脉管制冷机提出了压力泵热理论<sup>[19]</sup>。这两种理论都是解释脉管泵热作用对制冷机的影响, 而这种作用对脉管制冷机的贡献只是一小部分。

(2) 焓流调相理论。1990 年 Redebaugh 经过分析得出脉管内的压力波与体积流速之间的相位差是影响制冷量的关键因素<sup>[20]</sup>。1993 年 David 等<sup>[21]</sup>对焓流调相理论进行进一步分析, 当假设压力和流速为正弦函数, 相位差为  $\theta$ , 则可以得出焓流的表达式:

$$H = |P| |\mu| \cos \theta \quad (1)$$

上式表明: 制冷量与相位之间存在一个最佳搭配问题, 从这个角度来看, 改进脉管的关键在于选择恰当的调相器, 同时基本型脉管制冷机中气体与壁面的热交换也起到了调相作用, 只是比较微弱, 效果不佳。而在其他的一些改进中, 各种阀门开度都存在一个最佳值, 也说明了这一问题。

(3) 热力学分析法。1984 年 Mikulin 曾用经典的热力学方法来研究小孔型脉管制冷机, 但由于其假设的几个过程偏离实际, 并没得到实际应用。1997 年荷兰 A. T. A. M. de Waele 教授采用经典热力学理论分析<sup>[21]</sup>指出脉管制冷机的制冷能力受到工质的体积热膨胀系数的限制, 当工质的体积热膨胀系数为零时, 制冷量也为零。在此理论的指导下, 并通过改进, 他们采用<sup>3</sup>He 作为制冷工质, 得到了世界上最低制冷温度 1.78K<sup>[22]</sup>。热力学分析法方面还有中科院低温中心的梁惊涛博士提出的热力学非对称理论<sup>[23]</sup>, 提出气体微团流进和流出脉管的温度是不对称的, 并称之为热力学不对称效应, 这也是导致脉管产生制冷量的原因。他还将脉管内部的气体分为两部分: 一部分为靠近脉管表面的外层气体, 由于该层受到管壁的热量和粘性影响较多, 称为热粘层; 另一部分气体处于脉管中间, 几乎不受管壁的影响。此时热粘层的工作机理是表面泵热效应, 其余部分的工作机理则是热力学非对称效应, 两部分的总和就是脉管制冷机的实际制冷量。将脉管内气体分为两部分的方法, Eun Soo Jeong 在分析脉管中二次流时也采用过<sup>[24]</sup>, 在较低频率时, 该理论与实验吻合较好。1999 年戴巍等在其研究中指出, 热力学非对称效应不仅仅只存在于梁惊涛博士最初所提到的气体进、出脉管时, 而且还存在于回热器的热端换热器的左边界、脉管冷端换热器的右边界、以及脉管热端换热器的左边界上。

(4) 热声理论。最早的热声理论是 1969 年 Rott 等<sup>[25]</sup>为解决低温杜瓦瓶内的热声振荡——Taconis 效应而建立的。随后 Wheatley, Swift 等出于不同的目的对热声理论进行了研究, 但都只局限于驻波声场的热声效应。中科院低温中心的肖家华博士在其博士论文中对热声理论进行了较为系统的研究, 他提出了一般声场的热声理论(包括驻波和行波声场的热声效应), 并利用热声理论对脉冲管制冷机进行了分析和计算。由于热声理论其固有的复杂性及其在回热式制冷机中的大量简化, 因此该理论还有待完善。现在美国 Swift 教授已经开发出了一套热声计算程序(DELTA E), 可广泛应用于简单管网、热声驱动器和热声制冷机的共振管以及其他复杂结构。

目前有一种观点认为在脉管的内部过程中热声和热力学非对称两种效应都存在, 只是对于不同运行频率的脉管制冷机所表现出来的主要效应不一样而已。对于低频脉管制冷机,

热力学非对称效应占主要作用;而对于高频脉管制冷机,则以热声效应为主。因此我们在研究脉管制冷机的时候不能把这两个理论人为地分开来,应该两者兼顾,择其重点,否则理论与实验不能很好的吻合。

(5) 数值模拟。这是目前比较看好的一种方法。优点是:根据物理模型,结合计算传热学、计算流体力学,可以模拟出脉管制冷机整机的性能及脉管内部的流动和传热动态特性,得到脉管制冷机内部的速度场、压力场和温度场的详细分布,而且还可以对实际实验中各种不可逆因素进行模拟,更合理的解释实验结论。不足是:计算模型的不足、计算过程中的严重耦合及为减小计算量所作的一些简化,使得计算结果与试验结论还有一定的差距。1989年西安交通大学吴沛宜、朱绍伟最先展开这方面的工作,他们采用节点分析法对脉管制冷机进行数值模拟,分析了脉管制冷机内部参数的运动过程<sup>[26]</sup>,但由于模型中忽略了回热器的压降,定量计算结果误差较大。后来王超<sup>[32]</sup>在此基础上考虑了回热器的阻力和变物性的影响,从而接近真实的模拟了脉管制冷机的内部过程。1997年王超<sup>[27]</sup>、邱利民<sup>[28]</sup>等对二级脉管制冷机进行了数值模拟。但目前的数值计算研究中主要采用的还是一维模型。近几年,NA SA 的Ames小组采用结合流体力学和热力学两方面的知识开发出了脉管制冷机的二维模型,这种模型表明脉管制冷机中存在二次流,但在一维模型中却没有发现。1994年NA SA 的Ames小组通过实验测量证实了二次流的存在。1996年Eun Soo Jeong<sup>[24]</sup>借鉴了边界层理论对基本脉管制冷机中二次流的问题进行了分析。因此,改进数值模拟的物理模型,尽量减少各种简化,使模型与实际更接近,是采用数值模拟进行研究的重点。

另外目前还用到的理论研究方法:电工学类比分析、网络分析法、向量法、特征线法等,但各种方法都有其局限性。

## 4 最新发现

脉管制冷机研究中的最新发现主要有二次流、DC气流。二次流是美国NA SA 的Ames小组发现的,他们采用二维模型对脉管制冷机进行模拟的时候发现了二次流的存在,这个发现也得到了实验的验证,后来Eun Soo Jeong利用边界层理论也研究过二次流的问题。DC气流现象是1997年中科院低温中心的巨永林通过实验的方法在双向进气脉管制冷机中发现的,随后还有Gedeon和王超、杨鲁传等人分别采用热力学分析法和数值模拟等方法发现脉管制冷机中存在着DC气流。DC气流是指在一个周期内进出脉管制冷机各界面的气体工质的质量流量并不相等,存在向一个方向的净流量,从而在脉管制冷机的脉管、回热器、双向进气阀之间形成一个闭合的环流回路,由于闭合环流的存在,使得脉管制冷机的一部分制冷量被损失掉。采用各种改进技术抑制这种环流也是脉管制冷机制冷性能改善的一个方向。

## 5 结论

目前脉管制冷机的研究主要包括在结构上的改进和在理论上的更新及深化。通过对各种结构和理论的回顾,指出了各种结构的优缺点以及需要改进的地方,同时还分析了脉管制冷机的发展前景和方向。分析表明:实用化和微型化以及将低温制冷机应用于普冷领域是脉管制冷机今后发展的主要方向。

## 6 展望未来

到八十年代末, 世界上很多实验室都已经开始开发脉管制冷机, 主要集中在中国、日本、法国、德国、美国、荷兰等。经过不到二十年时间, 世界上就研究开发出了很多种不同的结构, 脉管制冷机的研究前景令人乐观。目前脉管制冷机的性能在很大程度上得到了提高, 其最低制冷温度可以达到 1.78K。而对于温度处在液氦温区的脉管制冷机的性能有的已经达到斯特林制冷机的水平, 已经有一些特制的脉管制冷机应用于卫星上了。采用脉管制冷机取代 G-M 机已经不再成为问题。

展望未来, 这种新的制冷机将会成为一种低价格、振动小、更可靠的制冷机。随着科技的发展, 低温制冷机效率的提高, 将低温制冷机应用于普冷<sup>[29,30]</sup>领域也将是一个很好的设想, 从而最终解决常用制冷工质所带来的环境污染等问题。

### 参 考 文 献

- [1] Matsubara Y, Gao J L, Novel Configuration of Three- stage Pulse Tube Refrigerator Below 4K, *Cryogenics*, 1994; 34: 259
- [2] Zhu S, Wu P, Chen Zh, A Single- stage Double Inlet Pulse Tube Refrigerator Capable of Reaching 42K, *Cryogenics*, 1990; 30: 257
- [3] Cai J H, Wang J J, Zhu W X, Experimental Analysis of Multi- bypass Principle in Pulse Tube Refrigerators, *Cryogenics*, 1994; 34: 713
- [4] Yuyama J, Kasuya M, Experimental study on refrigeration losses in pulse tube refrigerator, *Cryogenics*, 1993; 33: 947
- [5] Wang C, Wu P, Chen Zh, Theoretical and experimental studies of a double- inlet reversible pulse tube refrigerator, *Cryogenics*, 1993; 33: 648
- [6] 陈登科 双阀双小孔脉管制冷机 低温与超导, 1996; 24(1): 1
- [7] Gardner D L, Swift G W, Use of inertance in orifice pulse tube refrigerator, *Cryogenics*, 1997; 37: 117
- [8] Yang L W, Zhou Y, et al, Analytical study of the performance of pulse tube refrigerator with symmetry- nozzle, *Cryogenics*, 1999; 39: 723
- [9] Swift G W, Thermoacoustic engines, *J. Acoustic Society Am.*, 1988; 84: 1145
- [10] Lechner R A, Ackemann R A, Concentric pulse tube analysis and design, *Adv. Cryo. Engin.*, 1973; 18: 467
- [11] Richardson R N, Development of a practical pulse tube refrigerator, co- axial designs and the influence of viscosity, *Cryogenics*, 1988; 28: 516
- [12] Zhou B, Wu P, Hu Sh, Experimental results of the internal process of a double inlet pulse tube refrigerator, *Cryogenics*, 1992; 34: 24
- [13] Wang J J, Zhu W X, et al, A compact co- axial pulse tube refrigerator, for a practical application, *Cryogenics*, 1990; 30: 267
- [14] Zhou Y, Zhu W, Sun Y, Pulse tube with axial curvature, *Adv. Cryo. Engin.*, 1987; 32: 861
- [15] Wang C, Cai J H, et al, Miniaturization of a co- axial pulse tube cooler with linear drive compressor, *CEC/CMC*, 1996
- [16] Xu M, He Y, et al, Experimental research of a miniature coaxial pulse tube refrigerator using nylon tube, *Cryogenics*, 1996; 36: 131

- [17] Kanao K, et al. A miniature pulse tube refrigerator for temperature below 100K, *Cryogenics*, 1994; 34: 167
- [18] Gifford W E, Longworth R C, Surface heat pumping, *Adv. Cryo. Engin.*, 1965; 11: 171
- [19] P C T de Boer, Pressure heat pumping in the orifice pulse tube refrigerator, *Adv. Cryo. Engin.*, 1996; 37: 695
- [20] Radebaugh R, A review of pulse tube refrigeration, *Adv. Cryo. Engin.*, 1990; 35B: 1191
- [21] David et al, theory flow in orifice pulse tube refrigerator, *Cryogenics*, 1993; 33: 154
- [22] Mikulin E I, Tarasov A A, Shrebyonock M P, Low-temperature expansion pulse tube, *Adv. Cryo. Engin.*, 1984; 29: 629
- [23] A T A M de W aele, Steijaert P P, Koning J J, Thermodynamical aspects of pulse tubes II, *Cryogenics*, 1998; 38: 329
- [24] Xu M Y, A T A M de W aele, Ju Y L, A pulse tube refrigerator below 2K, *Cryogenics*, 1999; 39: 865
- [25] Liang J, Ravex A, Rolland P, Study on pulse tube refrigeration. *Cryogenics*, 1996; 36: 87- 101
- [26] Eun Soo Jeong, Secondary flow in basic pulse tube refrigerator, *Cryogenics*, 1996; 36: 317
- [27] Rott N, Damped and them ally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes, *Z Angew. Math. Phys.*, 1969; 20: 230
- [28] Wu P, Zhu S, Mechanism and numerical analysis of orifice pulse tube refrigerator with a valveless compressor, In: Chen Guobang, Thomas M F, eds *Proceeding of International Cryogenics and Refrigeration Conference*, Beijing: International Academic Publishers, 1989, 85
- [29] Steinle F, Schiefelbein K, Schikora H H, et al, Entwicklung einer Stirling- Kaeltemaschine mit verbesserter Leistungszahl Abschlussbericht (Development of a Stirling refrigerator with a higher coefficient of performance Final Report), 1997, NTIS No: DE98742320/XAB
- [30] A T A M de W aele, Pulse- tube refrigerators: principle, recent developments, and prospects, *Physica B*, 2000, 479

## Development of Pulse Tube Refrigerator on Its Structures, Theories and Utilization

Gao Chengming, He Yaling, Chen Zhongqi, Tao Wenquan, Wu Ming  
(School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049)

**ABSTRACT:** The history of the development on pulse tube refrigerator is described briefly. The characteristics on the structures of those different kinds of pulse tube refrigerators and on the theories for those pulse tube refrigerators are described in detail. At the same time, the aspects needed to be improved are pointed out. It is indicated that the utilizing, minimizing and applying of the cryocoolers for the domestic refrigeration field are the main research directions in the field of pulse tube refrigerator in the future.

**KEYWORDS:** Survey, Pulse tube refrigerator, Refrigerator, Cryogenics



**作者简介:** 高成名,男,1977年11月生。1998年7月西安交通大学毕业,目前是西安交通大学在读硕士研究生。主要研究方向:脉管制冷机的数值模拟和实验分析,斯特林制冷机的数值模拟以及其他的低温制冷机的研究。