

# 热声制冷的研究现状

金 滔 王本仁 张淑仪

(南京大学声学研究所, 近代声学国家重点实验室 南京 210093)

2001 年 8 月 24 日收到

**摘要** 本文在介绍热声制冷各研究方向的基础上, 对其发展现状进行了详细的综述, 并对今后的发展进行了展望。

**关键词** 热声, 制冷, 驱动源

## Advances in thermoacoustic refrigeration

JIN Tao WANG Benren ZHANG Shuyi

(Lab of Modern Acoustics and Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** After a short introduction of thermoacoustic refrigeration, a detailed review is presented on the advances in this field. And a prospect of the recent focus is also proposed as a conclusion.

**Key words** Thermoacoustics, Refrigeration, Driving source

## 1 引言

热声效应简言之是热与声之间相互转换的现象。从声学角度来说, 它是由于声场中的固体介质与振荡的流体之间的相互作用, 使得距固体壁面一定范围内沿着(或逆着)声传播方向产生一个时均热流, 并在这个区域内产生或者吸收声功的现象<sup>[1,2]</sup>。按能量转换方向的不同, 热声效应可分两类: 一是用热来产生声, 即热驱动声振荡; 二是声驱动热量传输, 或称热声制冷(泵热)效应。热声现象早在 200 多年前就已经被发现, 热声研究也有 100 多年的历史。而热声制冷的概念直到 20 世纪 80 年代初才被提出, 是一种新型的制冷方式<sup>[3-5]</sup>。

热声制冷消除了传统制冷方式中的运动部

件, 无需滑动密封和润滑, 从根本上解决了振动、磨损等问题, 具有结构简单、运行可靠和寿命长等优点; 而且采用无公害的惰性气体为工质, 可以屏弃使用对环境有害的氟里昂工质, 对保护环境将起到很大的作用, 因而在空间技术、电子器件冷却乃至家用领域有着巨大的应用潜力。因此在将近 20 年的时间里这一领域得到了巨大的发展。

本文将介绍热声制冷技术的发展现状, 并指出近期的研究热点。

## 2 热声制冷简介

图 1 给出了热声制冷的基本原理示意图<sup>[2]</sup>, 其中板叠左端为热端, 右端为冷端。首先, 我

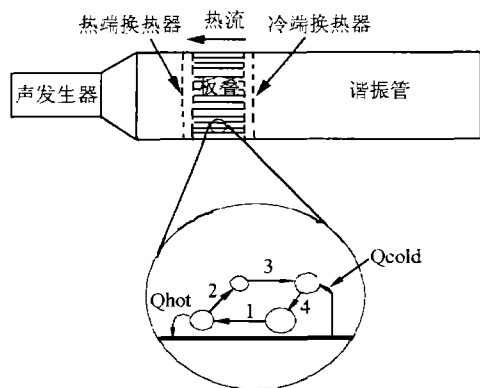


图 1 热声制冷原理示意图

们来考察一下单个气团的热力过程。过程 1 气团在压力波的作用下自右向左运动, 由于压缩气团温度升高, 并高于热端板叠温度, 因而过程 2 向板叠放热, 于是体积继续减小; 然后, 过程 3 气团向右运动, 此时气团膨胀, 温度降低, 且低于冷端板叠的温度, 因而过程 4 从冷端板叠吸热, 总体效果是气团从冷源吸热, 而向热源放热, 构成一个制冷循环。实际上, 把沿整个板叠长度方向上的气体看作一个传递热量的气团链, 这样就可以实现从板叠的冷端到热端的热量传递过程。

热声制冷效应显然依赖于系统中声波的存在, 因而首要工作是产生声波。产生声波的方式很多, 目前在热声制冷领域普遍采用的有电磁驱动 (包括扬声器和线性电机等)、热声驱动 (包括电加热、燃气和废热等) 和太阳能驱动等。需要说明的是, 太阳能也是先转化成热能的, 因而实质上应包含在热声驱动一类内, 这里为突出太阳能作为一新驱动源, 特独列一类。于是, 按不同驱动源, 依次讨论如下三类热声制冷: (1) 电驱动热声制冷, (2) 热驱动热声制冷, (3) 太阳能驱动热声制冷。

### 3 电驱动热声制冷机

热声制冷效应实际上跟基本型脉管制冷有一定相似之处, 脉管制冷机中把一低频、大振幅的压力振荡作用在管内气体, 从而产生可观

的制冷量<sup>[6]</sup>。受 Ceperley 关于声学斯特林发动机论文的影响, Los Alamos 国家实验室在 Wheatley 领导下率先开展了热声制冷机的研究<sup>[3,7]</sup>, 于 1983 年前后开始设计并试验热声制冷机。由于在样机完成之前 Wheatley 不幸逝世, 进一步的实验工作转移到了海军研究生院, 由 Hofler 继续进行该项研究, 他在完成博士论文期间研制成了世界上第一台电声驱动热声制冷机 (图 2), 在环境温度为 20°C 时, 达到了 -80°C 的最低制冷温度<sup>[4]</sup>。

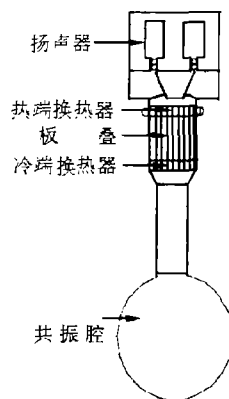


图 2 Hofler 研制的电驱动热声制冷机

此后, 海军研究生院开展了旨在提高效率的实用化研究, 并于 1992 年制成了安装在“发现号”航天飞机上的空间热声制冷机 (Space Thermoacoustic Refrigerator, STAR)<sup>[8]</sup>, 板叠的直径和长度分别为 3.8cm 和 7.9cm, 由频率为 400Hz 的电动扬声器驱动, 在 50°C 温差下获得 3.0W 制冷量, 相对卡诺效率 COPR 为 16%。1995 年, 他们又开发成功一台用于冷却海军舰船上雷达电子系统的热声制冷机 (SETAC, Shipboard Electronics Thermoacoustic Cooler)<sup>[9]</sup>, 如图 3 所示。其制冷量是 STAR 的近 100 倍, 创造了用热声方法承受 419W 有效热负荷的纪录, 输入的扬声器声功为 216W。

此外, 很多研究单位也相继开展了这一方面的研究工作。宾州大学的热声研究始于由 Garrett 等人对从海军研究生院转移过来 SE-

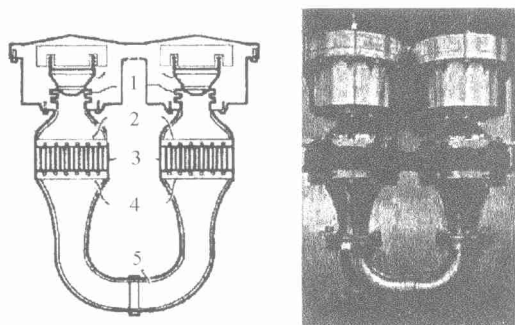


图3 Garrett 等的 SETAC 热声制冷机

1 扬声器 2 热端换热器 3 板叠 4 冷端换热器 5 谐振腔

TAC 的深入测试和改进工作<sup>[10]</sup>。目前在电声驱动热声制冷方面的工作主要有大振幅驱动以及大制冷量热声制冷机的研制,如图4所示的 Frankenfridge 热声制冷机中的最大压比(峰值/均值)达6%<sup>[11]</sup>。

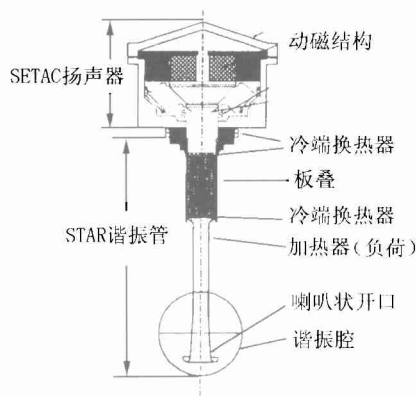


图4 Garrett 等的 Frankenfridge 热声制冷机

约翰·霍普金斯大学的研究侧重于对热声系统的数值模拟和优化设计<sup>[12,13]</sup>。他们在分析影响热声转换过程的众多变量的基础上,归纳出一系列无量纲量,大大简化了优化设计过程,这对于热声系统这样含有众多影响因素的复杂系统来说具有非常重要的意义。此外,还开展了利用全息干涉测量技术进行热声板叠及其附近温度场和流场的分析研究<sup>[14]</sup>。

荷兰艾因霍温技术大学于2000年研制的电声驱动的热声制冷机获得了近70°C的温降,如图5所示<sup>[15]</sup>。其中电声系统是由大功

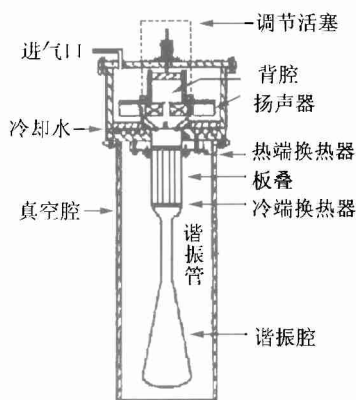


图5 艾因霍温技术大学的热声制冷机

率商用扬声器改装而成,其中调节活塞用来调整后腔的容积,进而使系统处于谐振状态。

国内许多单位也相继开展了热声制冷方面的研究。在机理研究方面,中科院低温中心对热声效应进行了详细的研究,并将热声理论推广扩充到一般声场,进而对回热器进行了热声机理分析<sup>[16]</sup>。中科院声学所在长期从事非线性声学研究的基础上提出了热声系统中的非线性理论框架<sup>[17,18]</sup>,将有助于理解由大振幅导致的非线性现象。此外,中科院声学所还对电动声源热声制冷机的声场进行了计算<sup>[19,20]</sup>。南京大学声学所也进行了热声制冷机的场方程进行了改进计算<sup>[21]</sup>。华中科技大学则采用网络模型对热声系统进行了模拟分析<sup>[22]</sup>。

此外,同济大学和浙江大学曾先后开展了 Hoffer 型电声驱动热声制冷机的实验研究工作,均获得过10°C左右的温降<sup>[23,24]</sup>。华中科技大学近来还开展了开式循环热声制冷机的研究工作<sup>[22]</sup>。

最近, Garrett 等还提出采用直线电机驱动的压力波发生装置<sup>[25]</sup>,因其并非在宽频程中工作,而只在窄频率范围内运行,可望实现高达85%的转换效率,这是针对以往的驱动源一般为音频或变频扬声器诸如电声转换效率较低、输出声功率较小的缺点而提出,可望极大地解决电声转换环节的损失问题,而且声功率输出可达千瓦级,进而能驱动相当大制冷量的热声制冷机。

## 4 热驱动热声制冷机

### 4.1 热声驱动热声制冷机

1988 年, Swift 在“热声发动机”一文中提到的名为“ The Beer Cooler ”的热声制冷机(如图 6 所示)可归入此类<sup>[2]</sup>。整体结构与上述电驱动热声制冷机非常相似,属谐振式系统,只是其中声发生器被热声驱动器取而代之。系统除球腔外总长为 370mm,其上部为热声驱动器,下半部分为热声制冷机。当输入功率为 160W 时,加热温度达到 400°C,此时制冷温度降至 0°C 以下;当系统的输入功率为 380W 时,最低制冷温度可达到 -11°C,而在 -6°C 的制冷温度下有 10W 的制冷量。

不过此后这种机型并没有得到更大的发展,人们更多地开始关注结构类似但利用太阳能驱动的热声制冷机(将在稍后进行介绍)。

### 4.2 热声驱动脉管制冷机

与上述的热声驱动热声制冷机不同,热声驱动脉管制冷系统并非属于完全谐振机构,其中驱动器部分是在谐振状态下运行,产生的声波输入到脉管制冷机,而后者则运行于非谐振状态。

首先有必要简单介绍一下脉管制冷机。脉管制冷机一般由蓄冷器、脉管、冷热端换热器、导流器以及调相机构等组成,如图 7 所示<sup>[5,6]</sup>。工作原理是利用高低压气体对脉管空腔的充放气过程而获得制冷效果的。蓄冷器是一个效率极高的换热器,它的作用是累积上一次循环所得的冷量,并传递给下一次循环流入的气体使之温度逐渐降低。脉管制冷机由于在低温端没有运动部件,具有运行可靠、振动小和寿命长的优点,这是它相比于传统低温制冷机的最大的特点。

虽然热声驱动技术已有相当长的历史,但同脉管制冷机联用则只是近十年的事。与一般的脉管制冷机不同,热声驱动脉管制冷机是以热声压缩机代替机械式压缩机作为驱动源进行制冷。脉管制冷机采用热声压机驱动,具有两

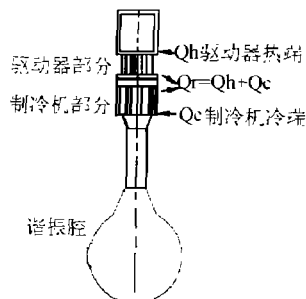


图 6 啤酒制冷机 (The Beer Cooler)

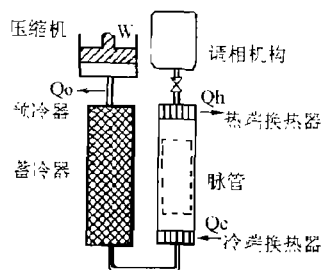


图 7 小孔型脉管制冷机结构简图

个突出的优点: (1) 结构简单、性能可靠、振动小,可望实现长寿命运行; (2) 热能驱动,对于电能短缺或热能富集的场所非常有利,从而拓宽了它的应用领域,增强了实用性,如用于天然气的液化等。与机械式压缩机相比,具有清洁、低噪音以及可利用低品位热能等优点。

1990 年, Swift、Martin 和 Radebaugh 等联合开展了热声驱动器 (TAD) 代替机械压机来驱动小孔型脉管制冷机的研究,一举达到 90K 左右的低温<sup>[26]</sup>,这是第一台完全无运动部件的低温制冷机,如图 8(a) 所示。工作过程如下: 首先通过热声驱动器加热器的加热和冷却器的冷却在热声板叠两端产生一温度差,当温度梯度达到临界温度梯度后,谐振管内就会自发发生振荡,产生一压力波;然后,利用热声谐振管中的压力波输入脉管进行制冷。该研究成果获得了美国“R&D100”年度奖。

他们还与 Tektronix 公司合作建成了一台小型的热声驱动小孔型脉管制冷机,达到了 -126°C 的最低制冷温度<sup>[27]</sup>,其中驱动器的谐振频率为 350Hz。

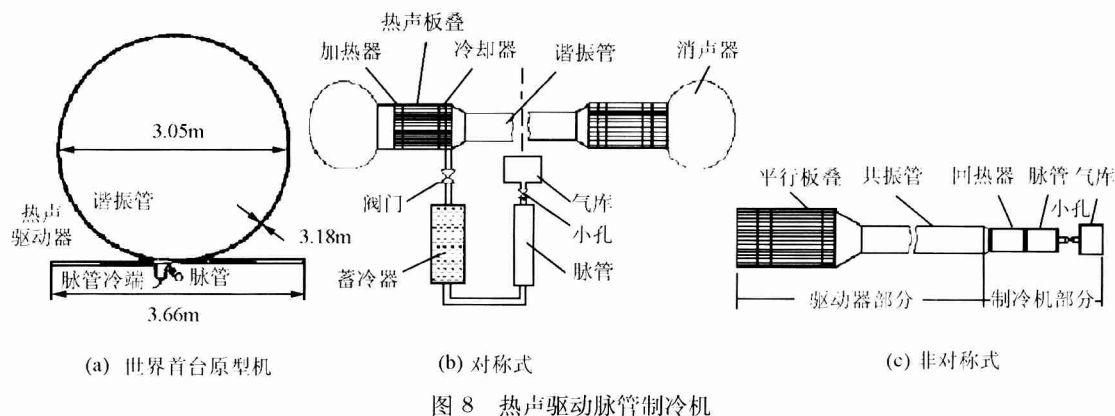


图 8(a) 系统采用了如图 8(b) 所示的对称加热型结构, 而许多其他系统则采用如图 8(c) 的非对称加热型结构, 把脉管制冷机设置在谐振管的另一端, 图 9 给出的热声天然气液化装置就属于这种结构 [28]。

在实用研究方面, 洛斯 - 阿拉莫斯国家实验室与 Cryenco 公司 (现属 Praxair 公司) 开展了热声天然气液化器的合作开发 [28], 于 1997 年建成日产 1900 升的模型机 (制冷量达 7kW) (见图 9), 燃烧 60% 的天然气能液化其余 40% 天然气。计划的第二阶段目标是日产 38000 升, 且效率提高至燃烧 30% 的天然气来液化其余 70% 天然气的水平, 该项目已经建成并处于改进测试阶段。热声天然气液化系统对缺少电能或者水源的天然气开采地 (尤其是沙漠地带) 有非常高的用价值。

浙江大学也开展了热声驱动脉管的研究, 在驱动器与脉管匹配讨论的基础上提出了一套驻波型热声驱动脉管的实验方案, 经过系统的改进, 最低制冷温度达到了  $-155.4^{\circ}\text{C}$  [29]。

针对驻波型热声驱动器热声转换效率较低这一不足, 人们最近又提出了采用行波型驱动器作为驱动源, 如图 10 所示 [30,31]。原先热声板叠 (Stack) 中的内在不可逆热力循环被回热器 (Regenerator) 中的可逆 Stirling 循环过程所替代, 在效率上具有极大的优势。实验模型机已实现高达 0.30 的效率, 远高于以往其它无运动部件的热机, 甚至可以同普通内燃机 (效率在 0.25-0.4 间) 和活塞驱动的 Stirling 热机应用声学

(效率在 0.20-0.38 间) 相媲美。

洛斯 - 阿拉莫斯国家实验室正在同荷兰的 Stork 公司和美国的 Praxair 气体公司等合作开发行波型热声天然气液化器 [32]。

中科院低温中心最近利用以氮气为工质的行波型驱动器驱动脉管制冷机获得了  $74^{\circ}\text{C}$  的温降 [33]。

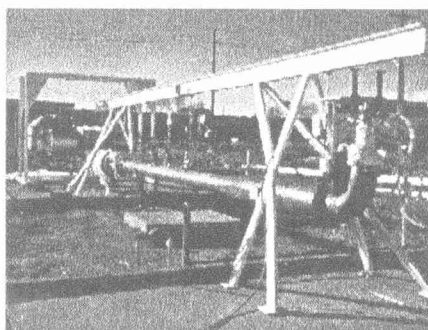


图 9 热声天然气液化装置

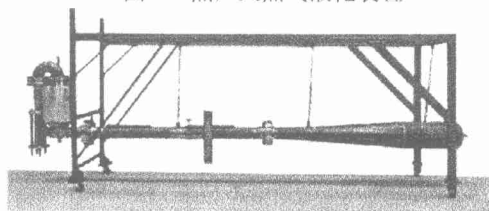


图 10 行波型热声斯特林驱动器

## 5 太阳能驱动的热声制冷机

这种制冷机在最近几年才出现, 是人们探索热声机械中利用不同能源的结果。1998 年,

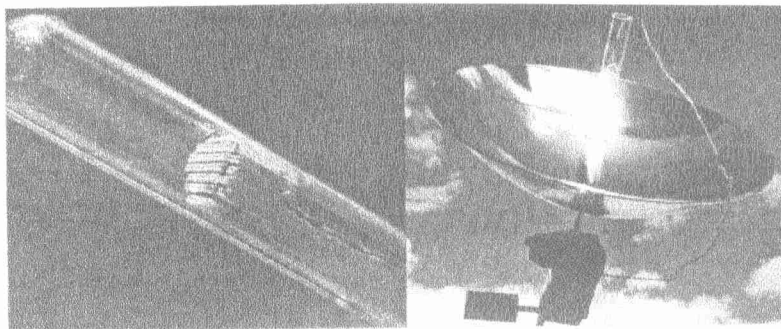


图 11 Garrett 等人的太阳能热声驱动器 (“声激光器”)

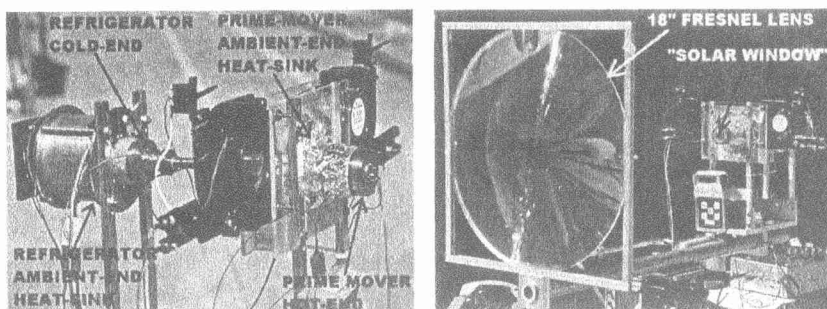


图 12 Hofer 等的太阳能驱动热声制冷机及太阳能聚光器实物照片

美国宾州大学的 Garrett 等率先建立了太阳能热声驱动器的模型机,他们还形象地称之为“声激光器”,如图 11 所示<sup>[34]</sup>。

美国海军研究生院的 Adef 和 Hofer 等于 2000 年报道了他们研制成的一台以太阳能为驱动力的热声制冷机,如图 12 所示,系统总长仅为 0.318m。其中驱动器利用太阳能作为动力,然后用由驱动器产生的声功来实现制冷<sup>[35]</sup>。当热端最高温度为 450°C 时,在 5°C 的冷端下获得 2.5W 的制冷量,此时温降为 18°C。结果也证明了太阳能热声驱动热声制冷机的方案是可行的,在实用性、简单性和可靠性方面具有很大的潜力。

最近,美国宾州大学的 Garrett 等也建立了一太阳能驱动的热声制冷机<sup>[36]</sup>,在温降为 25°C 下,目标制冷量为 10~60W,此时的热量输入为 150~600W。太阳能集热器是由一卫星电视接收器改装而成的,在 2m 直径区域内

粘上镀铝的聚脂薄膜,并配有计算机控制马达驱动进行太阳跟踪系统,从而能实现 600W 的太阳能输入到板叠的热端,其中板叠由直径为 11cm 的陶瓷材料构成。

无论是热驱动还是太阳能驱动,都会遇到热源温度与临界起振温度之间的矛盾。对此,可以分别从提高热源温度和降低系统的起振温度方面来考虑,譬如对太阳能装置我们期望通过改进集热器的性能来提高聚焦温度,而象工业废热等场合则只能通过后一方法来解决。

## 6 结束语

总的说来,热声制冷的研究已取得了巨大的进展,向人们展示了极大的优越性和广泛的应用前景。基于目前的热声系统效率偏低的事实,提高效率无疑是近期研究的关键。为此,理论和工程方面都还有待更深入的研究,可以

说该研究领域具有广阔的发展前景。

在理论方面,目前比较完善的线性小振幅热声理论难以解释大振幅振荡导致的非线性现象,如高阶谐波、自激振荡模式、振幅饱和、瑞利声流和二阶稳定直流等,需要发展和完善非线性热声理论来迎接这些挑战。而在实验样机方面,关键之一在于从驻波工作模式或者无声功回收模式过渡到行波且具有功回收模式的工作机制上来,其中行波方式尤为值得深入探讨。工程研究方面则有更多的工作尚待解决,目前各种型式的热声热机都还远没有达到它所能达到的最佳工况,例如在电驱动热声制冷中,若能大幅提高声发生器的电声转换效率,那么就有可能和常规制冷机一争高低。

国内的热声制冷研究在理论和实验方面都取得了很大的进展。不过,我们在理论与实践相结合方面(尤其是工程实现方面)尚需做出更大的努力,在进一步加强理论研究的同时,尽快掌握相关关键技术是我们目前所面临的重要课题。为此,除了科技界自身的努力外,还需同工业界开展密切的合作,以及国家把它作为解决特定环境中能源应用的课题进行立项研究和开发。可喜的是,最近越来越多的研究机构正在加大对该领域的研究力度。

**致谢** 感谢审者提出的许多宝贵意见,使文章更加全面。

### 参 考 文 献

- 1 Rott N. *Adv Appl Mech*, 1980, (20): 135-175.
- 2 Swift G W. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, **84**: 1145-1180.
- 3 Wheatley J C, Hoffer T J, Swift G W, et al. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1983, **74**(1): 153.
- 4 Hoffer T J. *Proc of the 5th Int'l Cryocooler Conf*, Monterey, CA, 1988, 93.
- 5 陈国邦等. 最新低温制冷技术. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- 6 Gifford W E, Longworth R C. *Trans ASME, J Eng Ind*, 1964, **86**: 264-270.
- 7 Ceperley P H. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1979, **66**(5): 1508-1513.
- 8 Garrett S L, Adef J A, Hoffer T J. *J. Thermophysics and Heat Transfer (AIAA)*, 1993, **7**(4): 595-599.
- 9 Mckelvey D, Ballister S, Garrett S L. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, **98**(5) Pt 2: 2961.
- 10 Grant A, Garrett S L. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **103**(5) Pt 2: 2841.
- 11 Poesse M E, Garrett S L. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, **107** (5): 2480-2486.
- 12 Worlikar A S, Knio O M. *J. Computational Physics*, 1996, 127: 424-451.
- 13 Wetzel M, Herman C. *Int J Refrigeration*, 1997, **20**(1): 3-21.
- 14 Wetzel M, Herman C. *Measurement Science and Technology*, 1998, **9**(6): 939-951.
- 15 Tijani M E H. Ph.D dissertation of Technical University of Eindhoven, the Netherlands, 2001.
- 16 肖家华. 中科院物理研究所博士学位论文, 1990年12月.
- 17 马大猷. 声学学报, 1999, **24**(4): 337-350.
- 18 马大猷. 声学学报, 1999, **24**(5): 449-462.
- 19 戴根华. 物理, 1992, **21**(1): 48-51.
- 20 戴根华, 李沛滋. 应用声学, 1995, **14**(4): 6-13.
- 21 王本仁, 缪国庆. 应用声学, 1994, **13**(1): 38-43.
- 22 张晓青. 华中科技大学博士论文, 2001年8月.
- 23 袁鹏, 寿卫东. 同济大学学报, 1995, **23**(6): 687-690.
- 24 张肇刻. 浙江大学硕士学位论文, 1998年12月.
- 25 Garrett S L. *Nature*, 1999, **399**: 303-304.
- 26 Radebaugh R, McDermott K M, Swift G W, et al. *Navy Report DTRC91/003*: 205.
- 27 Godshalk K M, Jin C, Kwong Y K, et al. *Adv Cryo Eng*, 1996, **41**: 1411-1418.
- 28 Swift G W. DOE Natural Gas Conference, Houston, 1997: 1-5.
- 29 金滔. 浙江大学博士学位论文, 2001年5月.
- 30 Backhaus S, Swift G W. *Nature*, 1999, **399**: 335-338.
- 31 Backhaus S, Swift G W. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, **107** (6): 3148-3166.
- 32 Wollan J J, Swift G W. *Proc of American Gas Association Operations Conf*, Houston, 2001, 1-8.
- 33 梁惊涛, 孙力勇, 周远. 第五届全国低温工程大会论文集. 大连, 2001, 1-5.
- 34 Chen R L, Garrett S L. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **103** (5) Pt 2: 2841.
- 35 Adef J A, Hoffer T J. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, **107** (6): L37.
- 36 Chen R L, Garrett S L. *First Int'l Workshop on Thermoacoustics*, the Netherlands, April 2001: E10.