

文章编号: 0253-4339(2010)03-0021-09

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2010.03.021

行波热声发动机的实验研究进展

陈 茂 巨永林

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 基于热声效应发展起来的热声发动机是一种新型的完全没有机械运动部件, 可利用低品位热源的环保发动机。近年来, 行波热声发动机由于热声转换效率高而受到各国学者的广泛关注。针对近十年来行波热声发动机的实验研究进展与典型样机进行了介绍, 并对热声发动机的性能参数作了分析与总结, 最后展望了行波热声发动机的发展趋势和应用前景。

关键词 热工学; 热声效应; 行波; 发动机

中图分类号: TB652; TK122

文献标识码: A

Development of Experimental Study on Traveling-wave Thermoacoustic Heat Engines

Chen Mao Ju Yonglin

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract The thermoacoustic heat engine on the basis of the thermoacoustic effect is regarded as a new type of promising and environment-friendly machine because it has no mechanical moving components and can run with low quality heat sources. In recent years, the traveling-wave thermoacoustic heat engine has attracted much attention due to its inherent high efficiency. In the present paper, the development of experimental study and the prototypes of traveling-wave thermoacoustic heat engines in the last decade are stated. The influence of the key parameters on the engine performance is discussed. In addition, the development trend and application prospect of traveling-wave thermoacoustic heat engines are presented.

Keywords Pyrology; Thermoacoustic effect; Traveling wave; Heat engine

温室效应和臭氧层破坏成为全球性问题, 寻找高效、对环境友好的热机成为迫切的需求^[1], 在过去的三十年里, 热声学成为该领域探究的重点之一。以热声效应为基础的热声机械, 无运动部件, 使用低品位热源, 用氮气或氦气作为工质, 具有可靠性和稳定性高, 可实现废热再利用及环保等优点, 因此应用前景十分广阔。从声学角度讲, 热声效应是由于声场中的固体介质与振荡流体之间的相互作用, 使得距固体壁面一定范围内产生沿着或逆着声传播方向的时均热流和时均功流^[2]。按能量转换方向的不同, 热声效应可分为热能产生声功、声功产生热能两类。前者为热声发动机(亦称热声驱动器或热声压缩机), 后者为热声制冷机或热声热泵。按照热声板叠或回热器所处声场的类型, 热声机械又可分为驻波型热声机械和行波型热声机械。

从二十世纪八十年代到二十世纪末, 人们在热声方面的关注主要集中在驻波型热声机械上^[3-8]。驻波中压力与速度的相位差接近90°, 驻波

发动机只能依靠不可逆的传热过程来实现热向声功的转换, 限制了驻波发动机的效率。而行波中压力与速度的相位一致, 回热器中发生的是类似Stirling热机的热力循环, 本征可逆使得行波发动机理论上能达到卡诺循环的效率^[9]。驻波热机的研究较行波热机的研究要早, 理论上相对成熟, 但由于行波发动机内在可逆的优势, 目前很多研究单位已逐渐把行波热机作为研究的重点。

文章介绍了近十年来行波热声发动机的实验研究进展与典型样机, 并对热声发动机的性能参数作了分析与总结, 最后展望了行波热声发动机的发展趋势和应用前景。

1 研究进展与典型样机介绍

1979年, Ceperley意识到Stirling机回热器中工质振荡过程中压力与速度的相位同行波的相位是一致的, 以此为基础提出了行波型热声机械的概念^[9], 为提高热声机械的效率提供了新的思路。

1998年, Yazaki等首先实现了这一类型的驱动器, 在回路中观察到行波形式的自发气体振荡^[10], 但效率很低, 以一个大气压的气体为工质时的压比仅为1.02, 主要是由于低声阻抗导致高速时的粘性损失所致。

1999年, 美国Los Alamos国家实验室Backhaus和Swift成功研制了一台行波热声发动机^[11-12], 由环路和一段谐振管直路构成, 见图1所示。这是Ceperley的设想和现代热声理论结合的成果。表1列出各主要部件的结构及功能。

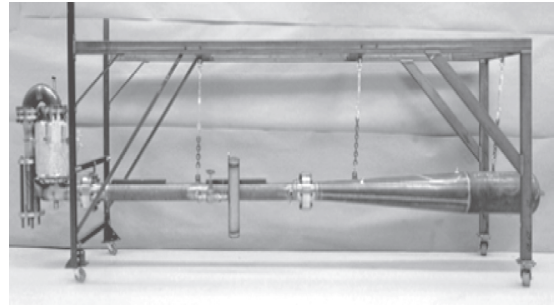


图1 Los Alamos实验室的行波热声发动机
Fig.1 The traveling-wave thermoacoustic heat engine in Los Alamos National laboratory

表1 Los Alamos实验室的行波热声发动机的主要部件及功能

Tab.1 Main components and their functions of the traveling-wave thermoacoustic heat engines in Los Alamos National laboratory

部件	结构	功能
回热器	120目不锈钢丝网	核心部件, 热声效应的发生场所
主冷却器	壳管式换热器, 工质走管程, 冷却水走壳程	主冷却器和加热器在回热器两端建立必需的温度梯度
加热器	加热管	
次冷却器	壳管式换热器, 工质走管程, 冷却水走壳程	抵挡沿热缓冲管管壁的漏热和来自加热器的热辐射
导流器	22目铜丝网	使进出热缓冲管的气流分布均匀以防射流
反馈管	一段弯管	在环路与直路的连接处,
声容	两段体积较大的90° 不锈钢弯头	部分反馈回热器热端出来的声功至回热器冷端
喷射泵	孔板装置	抑制Gedeon流
热缓冲管	带锥度的一段管	抑制Rayleigh流
谐振管	锥形管、直管、谐振腔的组合	强化自激振荡

该行波热声发动机的热声转换效率高达30%, 相对卡诺效率41%, 比当时的驻波发动机高出50%, 可以同内燃机(0.25~0.40)和活塞式斯特林发动机(0.20~0.38)^[13]相媲美。

这主要归功于: 1) 回热器处于行波相位。2) 引入驻波支路, 明显增加回热器声阻抗, 降低速度振幅, 减少粘性耗散。3) 采用喷射泵和带锥度的热缓冲管抑制Gedeon流和Rayleigh流。将行波和驻波两种波形巧妙结合是提高热声效率的有效方法, 因此行波-驻波混合热声发动机, 简称行波热声发动机成为人们关注的热点。

2002年后, Yazaki和Ueda等在测量行波热声发动机声场的基础上, 相继提出热声回路中存在合适的位置点放置第二回热器, 形成热声制冷机^[14-16]。

2003年, Gardner和Swift等考虑到带有环路的行波热声发动机会出现制约发动机性能的直流^[12,17], 提出级联式热声发动机的构想^[18], 利用驻波和行波各自的特性, 免除环路的同时又能实现行波相位, 即利用驻波发动机作为级联发动机的初级,

取代原行波发动机的反馈端, 成为直线形的发动机。图2是级联式发动机的示意图。

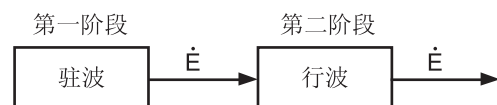


图2 级联式发动机示意图

Fig.2 Schematic of the cascade thermoacoustic heat engine

2004年, Sugita等在行波热声发动机上引入固体排出器^[19]作为谐振器, 使得发动机的结构更为紧凑。他们在回热器冷端用线性压缩机提供压力波, 热端安置声功接收装置, 当回热器冷热端温度分别达到355K和576K时, 输入声功和接收声功分别为6.68W和10.61W, 声功放大率为1.6。

荷兰能源研究中心Tijani等^[20]在2008年也设计了一台行波热声发动机, 谐振管由渐扩管、等直径管、渐扩管、等直径管四段构成, 见图3所示。装置产生190W的声功, 转换效率22.5%, 相对卡诺效率36%, 压比1.153。

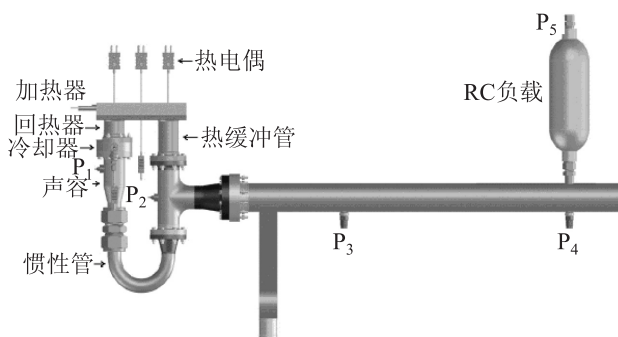


图3 Tijani等设计的行波热声发动机
Fig.3 The thermoacoustic heat engine designed by Tijani et al.

总的来说，国外在热声方面的研究较国内起步早。但近十年来，国内一些高校和研究所纷纷开始热声发动机或制冷机实验方面的研究工作，其中，中科院理化所和浙江大学制冷研究所在这方面开展了大量工作，并取得了出色的成绩。

2000年，中科院刘海东、罗二仓等研制了一台半波长的行波热声发动机，分别以氦气和氩气作工质，观察到了频率跳变现象^[21-23]，以氦气作工质，压力1.56MPa，热端气体温度615℃时得到压比1.083。2002年，他们还研制成同轴型行波热声发动机^[24]。2005年在CFD数值模拟的基础上提出了采用锥形谐振管的新改进，研制了“聚能型发动机”，见图4所示。该装置能抑制非线性波的产生，减少粘性耗散，使得热声转换集中于基频模式，提高整个系统的共振品质因子，可以明显提高压比到1.3^[25-26]。

2006年，罗二仓、于国瑶等又对上述“聚能型发动机”谐振管的长度和锥度进行了改进^[27]，压比达到1.4以上，而且起振温度只有73℃，便于利用低品位热能。

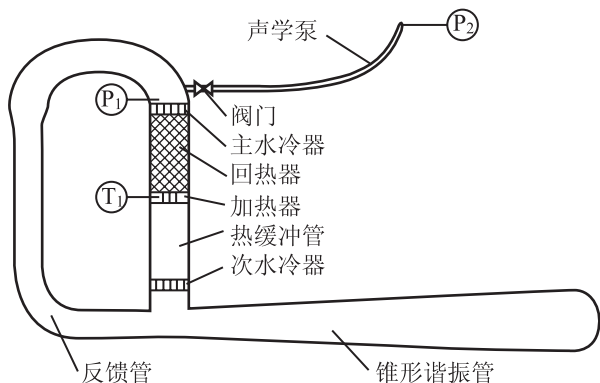


图4 罗二仓等人的聚能型发动机
Fig.4 The energy-focused thermoacoustic heat engine designed by Luo Ercang et al.

浙江大学在行波热声发动机方面开展的研究也较深入。2000年，邱利民等研制的行波热声发动机，以氦气为工质，充气压力2.0MPa，加热功率4kW，压比达到1.19^[28]。2005年，通过采取措施抑制Gedeon直流，以氦气为工质，在1.56MPa的工作压力下最大压比达到1.302^[29]，同年还通过外加压力扰动的方法降低了行波热声发动机系统的起振温度，为热声发动机采用低品位热能提供了启发^[30]。2007年孙大明等提出在发动机上设置两处R-C负载，可以增加声功输出，提高焓效率^[31]。邱利民、孙大明等还提出双向驱动行波发动机、带旁通的行波发动机、用多个谐振管增大声功等做法^[32-34]。另外，金滔等也早在2001年成功自主研制了行波热声发动机^[35]，以氦气和氩气做工质，分别获得了66Hz和23Hz的振荡，之后还进行了相关性能分析^[36]。2007年还考察了环路直流抑制装置-膜片对系统起振和消振温度的影响^[37]，发现膜片的位置靠近主冷器冷端时，在较高压力下可获得较低的起振温度和更优的压比。

另外，华中科技大学^[38-40]、东南大学^[41]、北京航空航天大学^[42]、西安交通大学^[43]等研究单位也开展了相关工作。

2 性能参数

人们对热声机械关注的主要性能参数有频率、压比、起振温度、转换效率等。下面逐一简单介绍。

2.1 频率

现有的行波热声发动机的尺寸普遍较大，要实现几十赫兹频率，谐振管通常需要若干米。频率除了与工作介质有关外，一般还与系统的轴向尺寸关联较大。采用氦气做工质时的频率较用氩气时的要高。谐振管越长越细，频率越低。

目前对于驻波和行波发动机的频率，仍较多采用近似计算方法：

$$f = \frac{c}{nL} \quad (1)$$

式中， f 是谐振频率， c 是声速， L 是谐振管的长度，对于不带谐振腔的近1/2波长声学系统， n 取2；对于带大谐振腔的近1/4波长声学系统，取4。这种方法简单，但缺乏足够的精度，尤其对于小尺寸的系统，因为系统的整体尺寸变小后，径向尺寸对频率也有明显影响^[44-45]。胡剑英，凌虹等^[45]曾通过传输矩阵

$\begin{bmatrix} P_{out} \\ U_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AC \\ BD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{in} \\ U_{in} \end{bmatrix}$ 计算热声发动机的频率。

戴巍^[46]也曾通过数值计算得到一系列频率下的体积流速分布曲线,如果在体积流速节点处即封闭端,出现拐点,那么认为此时的频率是有效的。对于没有明显封闭端的系统,比如行波发动机系统或更复杂的热声驱动的热声制冷双环路系统,提出一种假想的带封闭端短管,作为体积流速的节点边界条件。根据文献,他们的频率计算值与实验值误差在1%之内,准确性较高。

2.2 压比

定义压力振荡的最大值与最小值之比 $\frac{p_0 + p_1}{p_0 - p_1}$ 为压比,其中 p_0 为平均压力, p_1 为压力振幅,通常在主冷器上方最大。压比与系统的结构,工质种类,加热功率,平均压力等有关。在结构一定、加热温度和平均压力相同的条件下,氮气作工质能达到的最大压比大于氢气。等截面谐振管改为恰当的锥形管会减少非线性波的产生,增加压比。结构和平均压力一定,增加加热功率,压比增大。增大平均压力,压力振幅会有所增加,但压比的增加还需看两者增加量的相对大小。

目前国内外报道的行波热声发动机中,装置本身压比最高的为中科院于国瑶、罗二仓等报道的聚能型热声发动机,为1.40^[27],如果采用“声学泵”^[47]放大压比,可以至1.47左右。“声学泵”实际上是一段一端开口与行波发动机压力腹点区相连接、另一端封闭的空管子,见图4中所示。其声学原理是1/4波长系统的封闭端会产生远高于开口端的压比。虽然合适的声学泵可以显著放大压比,便于与脉管制冷机等耦合,但目前还没有实现声学泵的优化,管子的形状、长度等会对压比产生影响,基于线性理论的模拟结果与实验结果仍有很大的差距。2009年孙大明等在他们的行波热声发动机装置的环路上连接一种新型的亥姆霍兹谐振管^[48],见图5所示,将压比从1.22提高到1.49。该新型的亥姆霍兹谐振管与“声学泵”类似,只是封闭端采用了谐振腔,谐振腔体积大,压比放大效果在管子短时有一定优势,但在腔体体积一定改变管长的情况下所能达到的最大压比放大效果不及长的不带腔体的管子。

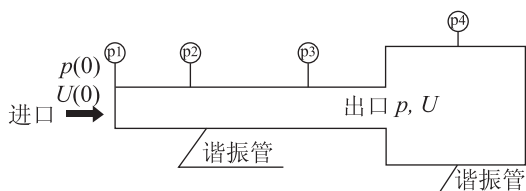


图5 孙大明等提出的新型亥姆霍兹谐振管
Fig.5 The novel Helmholtz resonator designed by Sun Daming et al

2.3 起振温度

热声发动机的关键是在回热器两端产生足够的温度梯度,只有超过了临界温度梯度,系统才开始自激振荡,此时回热器两端的温差即为起振温差。一般热声发动机系统里,回热器冷端接近室温。起振温度即回热器热端温度,决定了热声发动机是否可以利用低品位热源。目前,热声发动机的起振温度大多数还比较高,罗二仓等的聚能型发动机^[27]的起振温度相对较低,只有73℃。准确预算行波发动机的起振温差还是较为困难的。胡剑英、罗二仓等^[49]曾在这方面进行了理论探索,认为回热器温度线性分布,利用回热器冷端温度梯度得出整个回热器上的起振温差:

$$\Delta T_{cr} = l \times \left(\frac{dT_0}{dx} \right)_{cr, cold}^w, \quad (2)$$

$$\left(\frac{dT_0}{dx} \right)_{cr}^w = \frac{\gamma - 1}{a_0 \beta_0} \omega \frac{g_{\omega k} + \frac{1}{\gamma - 1} |Y_a|^2 g_{\omega \mu}}{R_e [Y_a f_{WT}]}$$

式(2)中的具体参数说明见文献[49]。但在文献[49]中没有说明该起振温差计算值与实验数据之间的差距。尽可能降低起振温度便于更广泛范围内的低品位热源得以利用,因此如何降低起振温度仍然是一个重要的研究课题。

2.4 转换效率

热声发动机效率的定义主要有以下几种:

- 1) $\eta = \frac{\dot{W}}{Q_h}$, 其中 $\dot{W}$ 是谐振管与环路连接点处的声功, Q_h 为输入系统的总加热功率。
- 2) 卡诺效率 $\eta_c = \frac{T_H - T_a}{T_H}$, 其中 T_H 、 T_a 分别是回热器两端冷热换热器的温度。
- 3) 相对卡诺效率 $\eta_R = \frac{\eta}{\eta_c}$ 。

1999年Backhaus和Swift等研制的热声发动机的转换效率30%至今仍然是较高的。据报道,罗二仓等的聚能型发动机在加热温度达到650℃,热声效率也能达到30%^[50]。近十年来,行波热声发动机的性能在热声转换效率方面,未有明显发展,主要原因可能有: 1) 行波热声发动机结构虽简单,但在降低系统的功耗散、提高回热器热端的热利用、减少漏热等方面仍存在较大的困难; 2) 目前人们较多关心热声发动机的压比、频率、起振温度等性能参数,因为热声发动机驱动制冷机可以带来高稳定性的系统,具有很好的应用前景。3) 不少学者仍然着

重研究热声发动机内的机理等基础问题。

表2归纳了典型行波热声发动机的性能参数。

表2 典型行波热声发动机的性能参数

Tab.2 Main performance parameters for some representative traveling-wave thermoacoustic heat engines

年份	研究者	工质	加热温度/℃	起振温度/℃	压比	效率/%	频率/Hz
1999	Backhaus, Swift ^[8]	氦气	725	—	1.2	30	80
2003	Ueda, Biwa, Mizutani, et al. ^[13]	空气	—	210	1.18	30	41
2007	于国瑶, 罗二仓, 戴巍, 等 ^[24]	氮气	671	73	1.4	—	23
2008	Tijani, Spoelstra, Poignand ^[17]	氦气	510	—	1.15	22.5	150

3 发展趋势

热声发动机目前有大型化和微型化两大发展趋势。大型热声发动机驱动制冷机可用于液化天然气等工业场合。图6为美国行波热声发动机驱动脉管制冷机用于液化天然气的样机。将热声发动机与脉管制冷机等耦合用于空间场合或低温电子学器件等时,则需要发动机的尺寸尽量小。微型化是热声发动机发展的另一个重要方向。大型发动机的研究较微型化发动机要广泛,前者的整体性能也要优于后者。微型化后热声发动机的频率较高,在与脉管制冷机等耦合时存在困难,在满足驱动制冷机所需压比的前提下,努力降低发动机频率十分关键。

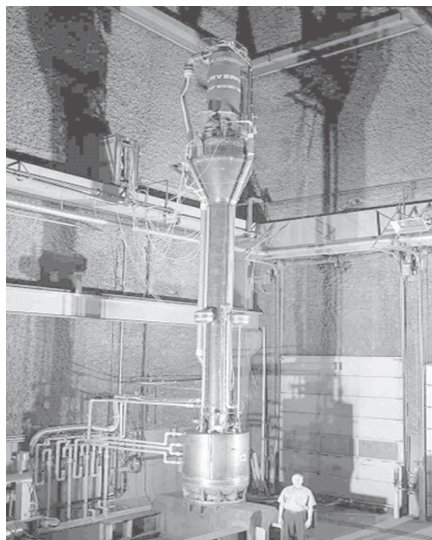


图6 行波热声发动机驱动脉管制冷机
用于液化天然气的样机

Fig.6 The prototype of the pulse tube refrigerator for liquefaction of natural gas, which is driven by the traveling-wave thermoacoustic heat engine

已有不少学者研究驻波型热声发动机的微型化。2004年, Symko等^[51]研制了微型化的热声发动机和热声制冷机,频率高达上千赫兹,面向冷却微电子线路的应用。热声发动机利用微电子线路的散热维持振动,起振温差只有25℃,显著低于常规热声发动机的起振温差,有望把起振温差降

到10℃。微型热声制冷机用扩音器驱动,能达到10℃的温降,并有1W的制冷量。戴巍等^[52]也研制出300Hz,可获得80K以下温区的微型热声驱动制冷机。但有关行波热声发动机的微型化研究相对欠缺,还需进一步从理论中寻求指导并结合实验进行研究。不过也有学者成功设计了相对小的行波热声发动机。

中科院理化所李青和华中科技大学的研究人员2003年就设计了一台小型高频的行波热声发动机^[53],长142cm,环路高36cm,研究了起振模态,振荡模态的稳定性及模态间的转换,谐振管的调相作用等。2006年李青等也提出了级联式的高频微型热声发动机^[54-55],总长1.2m左右,获得压比1.1。同年,周刚、李青等又报道了一台尺寸更小的行波热声发动机^[56],谐振管直径20mm,长只有0.35m,环路总长0.6m,氦气作工质,2MPa,加热功率637W,压比为1.116,是目前已见报道的最小行波热声发动机。他们根据线性热声理论和实验研究了小型发动机声场的分布,谐振管直径对系统频率、压力振幅、起振温度等的影响,认为微型热声发动机中的声场不能简单视为1/2波长或1/4波长的系统,频率不能简单用谐振管的长度来估计;如果纵向尺寸一定,合适的谐振管直径对于降低频率和起振温度有利。

Matsubara和戴巍等提出采用对称布置的由弹簧支撑的固体活塞代替谐振管和反馈回路惯性管,为行波热声发动机的微型化提供了新思路^[57]。

不管是大型化还是微型化都将对热声发动机本身的设计、性能优化提出更高的要求,应根据应用场合来合理设计,充分体现热声发动机的优势。

4 应用前景

作为比驻波型热机更为有效的行波型热机,在工业、民用、航天军事等方面有着广阔的应用前景。按照耦合对象的不同,目前的应用主要有两大类。

4.1 驱动制冷机

热声发动机可用来驱动脉管制冷机和热声制冷机等,实现从驱动源到冷端都没有任何运动部件的热声系统,从根本上消除了常规机械制冷机存在的机械振动和磨损问题,在天然气、石油伴生气液化分离、电子元件冷却等方面具有广阔的应用。在美国,热声驱动的低温制冷机已经开始用来液化天然气,并已经开始设计与传统天然气液化器液化能力相当的大型热声液化器^[58]。驻波型热声发动机驱动的脉管制冷机能够燃烧30%~40%的天然气来液化其余60%~70%的天然气。而行波型热声发动机驱动的脉管制冷机可望达到燃烧15%的天然气来液化其余85%的水平。中国学者在热声发动机驱动脉管制冷机方面的研究已处于世界先进水平。2005年戴巍、罗二仓等用热声发动机驱动脉管制冷机达到68.8K的低温^[59];他们还用双Stirling循环^[60],如图7所示,实现热声行波发动机驱动室温热声行波制冷机,在平均压力3.0MPa、频率57.7Hz、输入功率2.2kW的情况下,获得-64.4℃的低温,在-22.1℃时有250W的制冷量,在室温家电制冷方面有发展潜力;后来他们又研制出“二介质耦合声学放大器”,不仅降低工作频率,且提高压比,与二级脉管制冷机耦合获得了18.1K的最低温度,突破了液氢温度^[61]。

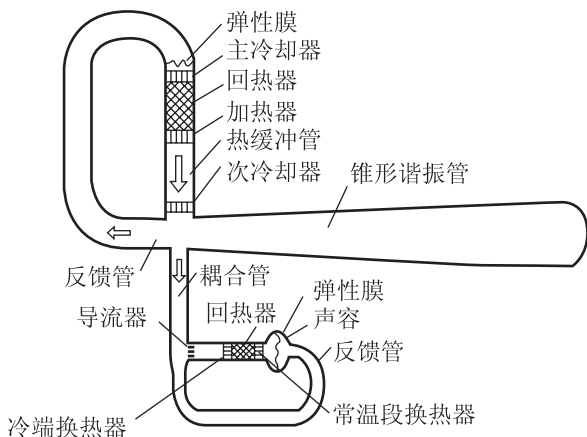


图7 双环路耦合系统

Fig.7 Thermoacoustically refrigerator with double thermoacoustic Stirling cycles

4.2 驱动发电机

热声发动机可以用来驱动发电机。2003年,Tward和Backhaus等^[62]用一台小型Stirling热声发动机与线性交流发电机结合,以放射性同位素²³⁸Pu作为热源,获得百瓦级的电能。2004年,他们又报道了类似的空间热声装置^[63],以0.18的热电转换效率

获得了39W的电功。2007年,罗二仓等^[50]将聚能型发动机用来驱动直线发电机,也获得了百瓦级的电能,成为目前国际上研制出行波热声发电原理样机的两家机构之一。

由于热声发动机热源的可选择性丰富,因此热声发动机驱动发电机,简称热声发电,可用于太阳能、余热等低品位资源丰富但地理位置偏远的地方。热声发电技术虽然有着可使用低品位热源的优势,但热电效率与传统火力发电相比还有一定的差距,并且随着水力、风力、核能等新型发电技术的发展,热声发电技术的民用发展必然要受到限制,但在太空探索等人类航天活动中可以提供电力。

如前所说,本征可逆的行波热声发动机具有无机械运动部件,可使用低品位热源等传统热机没有的特点,为其自身的发展带来很多的优势,但目前还没有能力替代传统热机,原因有几点:1)尽管报道中少数高性能的热声发动机效率可以与内燃机,活塞式压缩机等传统机器相媲美,但热声发动机的效率的整体水平仍然与传统的压缩机、热机等有着明显的差距。2)热声发动机的起振温度、稳定工作温度仍然普遍较高,限制了废热利用,大多数实验室仍是采用电加热方式来进行研究。3)很多场合,如电子冷却,太空开发等,需要微型化的热声装置,而微型化仍处于初级阶段,压比、频率等关键问题尚未解决。4)热声机理还没有完全成熟,在很多问题,如相位等方面仍有分歧。热声发动机要获得长足的发展,还必须在理论与实验的结合中进行一部深入研究。

5 结语

热声发动机是人们对自然现象长久^[64]观察累积研究的结晶,是“二十一世纪的绿色机械”。行波热声发动机由于其内在热力学可逆的优势,将会显示出更强大的发展潜力,为人类的发展做出贡献。但目前热声机械还没有进入实用化过程,热声装置的性能,尤其是在提高压比、降低频率、降低起振温度等方面仍有待改进,仍需各国学者不懈的努力才能把热声机械推向真正的实用化阶段。

(本文受上海市科学技术委员会浦江计划资助(06P14052). The project was supported by Pujiang Project of Shanghai Science and Technology Commission (06P14052).)

参考文献

- [1] Fitzgerald R. Traveling-wave thermoacoustic engines attain high efficiency[J]. Physics Today, 1999, 18-19.

- [2] Swift G W. Thermoacoustic engines[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1988, 84 (4): 1145-1180.
- [3] Wheatley J C, Hofler T, Swift G W. An intrinsically irreversible thermoacoustic heat engine[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1983, 74 (1): 153-170.
- [4] Wheatley J C, Hofler T, Swift G W. Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines[J]. Am. J Phys, 1985, 53 (2): 147-162.
- [5] Swift G W. Analysis and performance of a large thermoacoustic engine[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1992, 92 (3): 1551-1563.
- [6] 白焯, 金滔, 陈国邦. 热声压缩机的实验研究[J], 低温与超导, 1997, 25: (4), 10-17. (Bai Xuan, Jin Tao, Chen Guobang. Experimental study of a thermoacoustic driver[J]. Cryogenics and Superconductivity, 1997, 25 (4): 10-17.)
- [7] 金滔, 陈国邦, 应哲强. 关于热声驱动脉管匹配问题的讨论[J]. 低温工程, 1999, 109: 27-31. (Jin Tao, Chen Guobang, Ying Zheqiang. Discussion on the matching in the thermoacoustically driven pulse tube[J]. Cryogenics, 1999, 109: 27-31.)
- [8] Chen G B, Jin T. Experimental Investigation on the onset and damping behavior in the thermoacoustic oscillation[J]. Cryogenics, 1999, 39 (10): 843-846.
- [9] Ceperley P H. A pistonless Stirling engine—the traveling wave heat engine[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1979, 66 (5): 1508-1513.
- [10] Yazaki T, Iwata A, Maekawa T, et al. Traveling wave thermoacoustic engine in a looped tube[J]. Physical Review Letters, 1998, 81 (15): 3128-3131.
- [11] Backhaus S, Swift G W. A thermoacoustic-Stirling heat engine [J]. Nature, 1999, 399: 335-338.
- [12] Backhaus S, Swift G W. A thermoacoustic-Stirling heat engine: detailed study[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2000, 107 (6): 3148-3166.
- [13] Garrett S. Reinventing the engine[J]. Nature, 1999, 399: 303-305.
- [14] Yazaki T, Biwa T, Tominaga A. A pistonless Stirling cooler[J]. Appl. Phys. Lett, 2002, 80 (1): 157-159.
- [15] Ueda Y, Biwa T, Yazaki T, et al. Acoustic field in a thermoacoustic Stirling engine having a looped tube and resonator[J]. Appl. Phys. Lett, 2002, 81 (27): 5252-5254.
- [16] Ueda Y, Biwa T, Yazaki T, et al. Experimental studies of a thermoacoustic Stirling prime mover and its application to a cooler [J]. J. Acoust. Soc. Am, 2004, 115 (3): 1134-1141.
- [17] Biwa T, Ueda Y, Yazaki T. Work flow measurements in a thermoacoustic engine[J]. Cryogenics, 2001, 41: 305-310.
- [18] Gardner D L, Swift G W. A cascade thermoacoustic engine[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2003, 114 (4): 1905-1919.
- [19] Sugita H, Matsubara Y, Kushino A, et al. Experimental study on thermally actuated pressure wave generator for space cryocooler[J]. Cryogenics, 2004, 44: 431-437.
- [20] Tijani H, Spoelstra S, Poignand G. Study of a thermoacoustic-stirling engine[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2008, 123: 3541.
- [21] 刘海东, 罗二仓, 梁惊涛, 等. 高效热致声发动机的新方案探索及其热力分析[J]. 低温工程, 1999, 4: 90-94. (Liu Haidong, Luo Ercang, Liang Jingtao, et al. A proposal for high efficiency thermoacoustic engine and its thermodynamic analysis[J]. Cryogenics, 1999, 4: 90-94.)
- [22] 刘海东, 罗二仓, 梁惊涛, 等. 行波热声发动机的实验研究[J], 低温工程, 2000, 115 (3): 23-28. (Liu Haidong, Luo Ercang, Liang Jingtao, et al. Experimental study of a traveling wave thermoacoustic prime engine[J]. Cryogenics, 2000, 115 (3): 23-28.)
- [23] 孙力勇, 罗二仓, 梁惊涛, 等. 行波热声发动机的试验研究[J]. 低温工程, 2001, 121 (3): 8-12. (Sun Liyong, Luo Ercang, Liang Jingtao, et al. Experimental study of a traveling wave thermoacoustic prime engine[J]. Cryogenics, 2001, 121 (3): 8-12.)
- [24] 杨梅, 罗二仓, 李晓明, 等. 同轴型行波热声热机的实验研究[J]. 低温与超导, 2002, 30 (4): 5-8. (Yang Mei, Luo Ercang, Li Xiaoming, et al. Experimental study on a coaxial traveling wave thermoacoustic engine[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2002, 30 (4): 5-8.)
- [25] Luo Ercang, Ling Hong, Dai Wei, et al. Energy-focused thermoacoustic heat engine with a tapered resonator[J]. Chin. Sci. Bull, 2005, 50 (3): 284-286.
- [26] Luo Ercang, Ling Hong, Dai Wei, et al. Experimental study of the influence of different resonators on thermoacoustic conversion performance of a thermoacoustic-stirling heat engine [J]. Ultrasonics, 2006, 44: e1507-e1509.
- [27] Yu Guoyao, Luo Ercang, Dai Wei, et al. An energy-focused thermoacoustic-stirling heat engine reaching a high pressure above 1.40[J]. Cryogenics, 2007, 47: 132-134.
- [28] 邱利民, 孙大明, 张武, 等. 大型多功能热声发动机的研制及初步实验第一部分 热声发动机的研制[J]. 低温工程, 2003, 2: 1-7. (Qiu Limin, Sun Daming, Zhang Wu, et al. Study of a large-scale multiple-function thermoacoustic heat engine with high efficiency. Part I. Design and construction of the engine[J]. Cryogenics, 2003, 2: 1-7.)
- [29] Qiu Limin, Sun Daming, Tan Yongxiang, et al. Investigation on Gedeon streaming in a traveling wave thermoacoustic engine[J]. Advances in Cryogenic Engineering: 2006, 823: 1115-1122.
- [30] Qiu Limin, Sun Daming, Tan Yongxiang, et al. Effect of pressure disturbance on onset processes in thermoacoustic

- engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47: 1383-1390.
- [31] Sun Daming, Qiu Limin, Wang Bo, et al. Output characteristics of Stirling thermoacoustic engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49: 1265-1270.
- [32] 孙大明, 邱利民, 肖勇, 等. 多谐振管热声发动机, 中国: 200710068642[P]. 2007-10-17. (Sun Daming, Qiu Limin, Xiao Yong, et al. A thermoacoustic heat engine with multiple resonators, China: 200710068642[P]. 2007-10-17.)
- [33] 邱利民, 孙大明, 陈萍, 等. 双端驱动的混合型行波热声发动机, 中国: 200410016691.0[P]. 2005-01-5. (Qiu Limin, Sun Daming, Chen Ping, et al. A symmetrical traveling-wave thermoacoustic engine, China: 200410016691.0 [P]. 2005-01-5.)
- [34] 邱利民, 孙大明, 严伟林, 等. 具有旁通结构的混合型行波热声发动机, 中国: 200410016685.5[P]. 2005-01-5. (Qiu Limin, Sun Daming, Yan Weilin, et al. A traveling-wave thermoacoustic heat engine with a bypass, China: 200410016685.5[P]. 2005-01-5.)
- [35] 金滔, 陈国邦, M X Francois, 等. 斯特林型热声驱动器的实验研究[C]// 第五届全国低温工程大会, 2001, 10-14. (Jin Tao, Chen Guobang, M X Francois, et al. Experimental study of a thermoacoustic Stirling heat engine[C]// The Fifth National Conference on Cryogenic Engineering, 2001, 10-14.)
- [36] 金滔, 陈国邦. 行波热声驱动器的性能分析[J]. *低温工程*, 2002, 127:16-22. (Jin Tao, Chen Guobang. Performance analysis of a traveling wave thermoacoustic prime mover[J]. *Cryogenics*, 2002, 127:16-22.)
- [37] 金滔, 毛长松, 汤珂, 等. 弹性膜位置对热声斯特林发动机起消振特性的影响[C]// 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议, 2007, 504-508. (Jin Tao, Mao Changsong, Tang Ke, et al. The impact of the elastic membrane's position on the onset and damping behavior in the thermoacoustic Stirling engine[C]// Conference on Engineering Thermodynamics and Energy Utilization, Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2007, 504-508.)
- [38] 伍继浩, 李青, 郭方中. 高频行波热声热机的实验研究[C]// 第五届全国低温工程大会, 2001, 20-24. (Wu Jihao, Li Qing, Guo Fangzhong, et al. Experimental study of a high-frequency traveling-wave thermoacoustic heat engine[C]// The Fifth National Conference on Cryogenic Engineering, 2001, 20-24.)
- [39] 郭方中, 赵玲, 胡兴华, 等. 热声谐振管材质的优选设计[J]. *华中科技大学学报*, 2006, 34(5): 108-110. (Guo Fangzhong, Zhao Ling, Hu Xinghua, et al. Optimal design of the materials for thermoacoustic resonators[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2006, 34(5): 108-110.)
- [40] 张晓青, 陈宇, 郭方中, 等. 热声系统的工程优化设计[J]. *低温工程*, 2004, 3: 35-40. (Zhang Xiaoqing, Chen Yu, Guo Fangzhong, et al. Engineering optimization design of thermoacoustic system[J]. *Cryogenics*, 2004, 3: 35-40.)
- [41] 吴栋, 董卫. 行波型热声热机中回热器中工质热力学特性模拟及分析[J]. *中国科技信息*, 2008, 17: 53-54, 57. (Wu Dong, Dong Wei. Simulation of thermodynamic characteristics in thermoacoustic regenerator[J]. *China Science and Technology Information*, 2008, 17: 53-54, 57.)
- [42] 徐珊姝, 景晓东, 孙晓峰. 热声现象的一种非线性模型[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(3): 413-416. (Xu Shanshu, Jing Xiaodong, Sun Xiaofeng. The study of a nonlinear thermoacoustic model[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(3): 413-416.)
- [43] 刘迎文, 何雅玲. 热声发动机起振、消振行为的试验研究[C]// 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议, 2007, 656-660. (Liu Yingwen, He Yaling. Experimental study of the onset and offset processes of a thermoacoustic heat engine[C]// Conference on Engineering Thermodynamics and Energy Utilization, Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2007, 656-660.)
- [44] Zhou Gang, Li Qing, Li Zhengyu, et al. Influence of resonator diameter on a miniature thermoacoustic Stirling heat engine[J]. *Chin. Sci. Bull*, 2008, 53(1): 145-154.
- [45] 胡剑英, 罗二仓, 凌虹, 等. 热声斯特林发动机的频率计算[J]. *低温工程*, 2004, 6: 20-23. (Hu Jianying, Luo Ercang, Ling Hong, et al. Calculation resonant frequency of a thermoacoustic Stirling prime mover by using transmission matrix method[J]. *Cryogenics*, 2004, 6: 20-23.)
- [46] Dai Wei, Luo Ercang, Yu Guoyao. A simple method to determine the frequency of engine-included thermoacoustic systems [J]. *Crogenics*, 2006, 46:804-808.
- [47] 罗二仓, 胡剑英, 戴巍, 等. 一种大幅度提高热声发动机压比的“声学泵”[J]. *科学通报*, 2005, 50(17): 1926-1928. (Luo Ercang, Hu Jianying, Dai Wei, et al. An acoustic amplifier used to amplify pressure in a thermoacoustic prime mover[J]. *Chin. Sci. Bull*, 2005, 50(17):1926-1928.)
- [48] Sun Daming, Qiu Limin, Wang Bo, et al. Novel Helmholtz resonator used to focus acoustic energy of thermoacoustic engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29: 945-949.
- [49] 胡剑英, 罗二仓, 凌虹. 行波型热声发动机起振温差的研究[J], *低温与超导*, 2004, 32(2): 64-67. (Hu Jianying, Luo Ercang, Ling Hong. Study on the onset temperature difference of thermoacoustic Stirling prime movers[J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2004, 32(2): 64-67.)
- [50] 罗二仓. 热声技术研究进展[J]. *中国基础科学*, 2007, 9(4): 14-15. (Luo Ercang. Development of

- thermoacoustic technology[J]. China Basic Science, 2007, 9(4): 14-15.)
- [51] Symko O G, Abdel-Rahman E, Kwon Y S, et al. Design and development of high-frequency thermoacoustic engines for thermal management in microelectronics[J]. Microelectronics Journal, 2004, 35: 185-191.
- [52] Dai Wei, Yu Guoyao, Zhu Shanglong, et al. 300 Hz thermoacoustically driven pulse tube cooler for temperature below 100K[J]. Appl. Phys. Lett, 2007, 90: 0241041.
- [53] Yu Zhibin, Li Qing, Chen Xi, et al. Investigation on the oscillation modes in a thermoacoustic Stirling prime mover: mode stability and mode transition[J]. Cryogenics, 2003, 43: 687-691.
- [54] Hu Zhongjun, Li Qing, Li Qiang, et al. A high frequency cascade thermoacoustic engine[J]. Cryogenics, 2006, 46: 771-777.
- [55] Hu Zhongjun, Li Qing, Xie Xiujuan, et al. Design and experiment on a mini cascade thermoacoustic engine[J]. Ultrasonics, 2006, 44: e1515-e1517.
- [56] Zhou Gang, Li Qing, Li Zhengyu, et al. A Miniature thermoacoustic stirling engine[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 1785-1792.
- [57] Matsubara Y, Dai Wei, Onishi T, et al. Thermally actuated pressure wave generators for pulse tube cooler[C]// Proceedings of ICCR' 2003, 2003, 57-60.
- [58] Arman B, Wollan J, Kotsubo V, et al. Operation of thermoacoustic Stirling Heat Engine Driven Large Multiple Pulse Tube Refrigerators[J]. Cryocooler, 2005, 13: 181-187.
- [59] Dai Wei, Luo Ercang, Hu Jianying, et al. A heat-driven thermoacoustic cooler capable of reaching liquid nitrogen temperature[J]. Appl. Phys. Lett, 2005, 86: 224103.
- [60] Luo Ercang, Dai Wei, Zhang Yong, et al. Thermoacoustically refrigerator with double thermoacoustic Stirling cycles[J]. Appl. Phys. Lett, 2006, 88: 074102.
- [61] Hu Jianying, Luo Ercang, Li Shanfeng, et al. Heat-driven thermoacoustic cryocooler operating at liquid hydrogen temperature with a unique coupler[J]. Journal of Applied physics, 2008, 103, 104906.
- [62] Tward E, Petach M, Backhaus S. Thermoacoustic space power converter[J]. AIP Conf. Proc, 2003, 654: 656-661.
- [63] Backhaus S, Tward E, Petach M. Traveling-wave thermoacoustic electric generator[J]. Appl. Phys. Lett, 2004, 85(6): 105-107.
- [64] Putnam A A, Dennis W R. Survey of organ-pipe oscillations in combustion systems[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1956, 28(2): 246-259.

作者简介

陈茂, 女(1985-), 博士生, 上海市东川路800号上海交通大学制冷与低温工程实验室, 200240, (021) 34201604, hoodwinked@sjtu.edu.cn. 主要从事热声发动机及制冷机方面的研究。

巨永林, 男(1970-), 教授, 博士生导师, 上海市东川路800号上海交通大学制冷与低温工程研究所机动大楼A楼412室, 200240, (021) 34206532, yju@sjtu.edu.cn.

About the authors:

Chen Mao(1985-), is now studying for her doctor degree in the Institute of Refrigeration and Cryogenics in Shanghai Jiaotong University. Her major work is about thermoacoustic engines and refrigerators. Her address is Room 354, Building C, Mechanical School, Shanghai Jiaotong University, 800 Dongchuan Road, Shanghai, China. The zip code is 200240. (021) 34201604, hoodwinked@sjtu.edu.cn.

Ju Yonglin(1970-), the corresponding author. He is a professor in Shanghai Jiaotong University. His address is Room 412, Building A, Mechanical School, Shanghai Jiaotong University, 800 Dongchuan Road, Shanghai, China. The zip code is 200240. (021) 34206532, yju@sjtu.edu.cn.