

文章编号:1674-2869(2012)1-0001-06

# 热声理论的研究进展

吴 锋<sup>1</sup>, 李 青<sup>2</sup>, 郭方中<sup>3</sup>, 舒安庆<sup>1</sup>

(1. 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190;

3. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**简要介绍了热声振荡的基本原理和特点,在具有偏置温差的热声核声通道中熵波和振荡流体的相互作用会产生热声效应—热声自激振荡或热声泵热.热声效应在热声热机(制冷机)、热声空调、混合物分离、太阳能利用等领域具有十分诱人的应用前景.回顾了热声理论的研究进展,主要包括热声网络模型、参数激励机理、特征时间研究、热力学优化、格子气模拟以及非线性热声理论等方面的一些最新成果.重点介绍了辛群在热声网络中的应用.系统中等温流体管道内工质运动的传输矩阵为辛矩阵,而存在温度梯度的热声回热器中气体工质微团的传输矩阵可以通过变量代换,将传输矩阵转换为辛矩阵,使整个热声系统网络传输都可用辛矩阵传输来表示.对热声理论研究的发展趋势进行了展望,提出了一些有待解决的问题和研究思路.

**关键词:**热声效应;自激振荡;热声装置;研究进展

**中图分类号:** TB61 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2012.1.001

## 0 引 言

热声系统是一个非常奇妙的能产生热声效应的系统,它既简单又复杂.说它简单,是因为系统中只是波(驻波、行波或混合波)在运行;说它复杂,是因为它的启振模态、运行机理以及非线性行为等等仍有许多未解之谜.

所谓热声效应<sup>[1-3]</sup>,是在一定条件下,热能与声能相互转换的现象.它是系统第一介质(可压缩流体)的声振荡与第二介质(固体壁)之间由于热相互作用而产生的时均能量效应.广义的说,它是振荡过程与扩散过程的相互作用与耦合;狭义的说,它是热能与有序声能的直接转换.

1777年,Byron Higgins最早记载了热声现象.在一根两端开口大管中的适当位置放置燃烧着的氢火焰,可以激发出风琴管的声音,被称为“歌焰”.而对热声现象的系统研究则始于19世纪,但是直到近几十年才取得突破性进展<sup>[4-6]</sup>.热声热机(制冷机)就是利用热声效应的能量装换装置.它最突出的特点是无运动部件,这一特点彻底改变了人们对动力机械的传统观念.热声热机(制冷机)由于其结构简单、寿命长、无污染、无运动部件、可利用太阳能及其它低品位能源等诸多优点而倍受动力工程领域和低温工程领域的青睐.美

国于20世纪70年代中开始研究热声热机(制冷机),日本于80年代末跟进.现在美国、日本等国都已开始应用研究阶段.我国于60年代开始军用斯特林制冷机研制,90年代初开始立项进行热声原理研究.在21世纪初,我国的小冷量、长寿命自由活塞斯特林制冷机已开始在航天器上试用,热声谐振管的研究也获得很大进展,一些新的热声热机和热声制冷机的实验装置不断出现<sup>[7-8]</sup>.

对热声理论的研究是从对热声回热器的研究开始的.常用的理论有“定常流模型”、“交变流动模型”、“相移模型”、“线性热声模型”、“短板边界层近似模型”、网络模型、非线性热声理论<sup>[9]</sup>等,常用的计算方法有Delta-E程序<sup>[10]</sup>、CFD模拟<sup>[11-13]</sup>、格子气自动机模型<sup>[14-15]</sup>等.本文拟对热声理论相关方面的研究状况做一简要介绍.

## 1 网络模型

在对斯特林热机回热器的研究中,华中科技大学郭方中<sup>[16-18]</sup>教授的研究小组首次提出了等温回热器的网络模型,运用流体网络阻、感、容等概念以及热动力学理论和网络方法分析研究了回热器中流体的流动特性.中科院低温中心的肖家华<sup>[19-21]</sup>根据固体壁面与外热源的热接触情况将热声效应划分为“等温热声效应”、“绝热热声效

收稿日期:2011-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51176143)

作者简介:吴 锋(1955-),男,湖北松滋人,教授,博士,博士生导师.研究方向:热动力装置优化.

应”和“一般情形热声效应”三种情况.肖家华提出了等温热声效应和绝热热声效应的物理模型并建立了对应的波动方程,构建了回热式制冷装置相关热声理论的定性框架,在国际上最早将热声理论应用于回热器的研究工作中.邓晓辉<sup>[22]</sup>通过引入热声“源”,建立了非等温回热器的网络模型,为网络模型在热声系统中的具体应用奠定了坚实的基础.张晓青<sup>[23]</sup>建立了热声热机系统集总参数网络模型,研制设计出一种热声网络计算软件TANknetwork.涂虬<sup>[24]</sup>采用热动力学与声学理论相结合的研究方法,建立了热声回热器分布参数网络模型,并用声传播常数和特性阻抗等来表述模型中的声学参数.胡兴华等<sup>[25]</sup>将热声系统视为由主动网络与被动网络组成的热声振荡器,采用“负阻”和“反馈”分别建立了驻波和行波热声发动机的网络模型,研究了二端口驻波和行波网络的拓扑结构,并利用Nyquist稳定性判据得到了热声振荡器的起振或运行条件.

网络模型是热声热机工程研究的强有力的工具,它可以把热声热机(制冷机)系统各部件有机的联立起来.李青<sup>[26]</sup>建立了分置式斯特林制冷机整机网络模型,董凯军<sup>[27]</sup>、涂虬<sup>[28]</sup>、邹文径<sup>[29]</sup>对热声系统各部件以及整机的网络进行了描述.在热声系统网络模型的研究中,关键环节之一是量化网络,即确定网络各矩阵元的值.量化网络参数的有效方法是辨识.吴锋<sup>[30]</sup>、丁国忠<sup>[31]</sup>等以毛细管数作为辨识参数,对网络的 $H$ 矩阵进行了系统辨识,张春萍<sup>[32]</sup>等利用实验辨识方法,对热声回热器的复流容进行了研究.

目前,网络模型研究的最新进展是将辛群理论用于热声网络中,探索热声系统的辛对称特征.通过对热声系统网络传输矩阵的分析,杨志春<sup>[33,34]</sup>证明了系统中等温流体管道内工质运动的传输矩阵为辛矩阵,而存在温度梯度的热声回热器中气体工质微团的传输矩阵可以通过变量代换,将传输矩阵转换为辛矩阵,使整个热声系统网络传输都可用辛矩阵传输来表示.

在辛数学中,辛对称是一种“纠缠”(entanglement)对称,例如电和磁是一对“纠缠”.有待进一步研究的问题是:既然热声系统可以用辛矩阵来表示,那么,声和热是否也是一对纠缠?热声中的势和流呢?在热声中,频率 $\omega$ 与特征时间 $\tau$ 的乘积是一个很重要的参数,它们可能也是一对纠缠,理想回热器 $\omega\tau=1$ ，“纠缠”没有了,于是要靠机械来调节相位.但热声叠使 $\omega\tau\neq 1$ ,于是时( $\tau$ )与空( $\omega$ )得以借助谐振使无序的“热”在温

差偏置的作用下成为有序的“声”.因此同样值得思考的是,时与空是否也是一对“纠缠”呢?

辛数学的引入,不但可以加深对热声网络模型物理意义的理解,而且可以将辛群的计算方法直接应用于热声系统网络模型,从而对复杂热声网络的计算起到促进作用.

## 2 参数谐振

物质以各种运动形态向人们展现着它的存在和演化,呈现出大自然的五彩缤纷和惊人魅力.“自激振荡”就是一种奇妙的自然现象.电路中的电和磁自激振荡,化学波中的化学振荡,红旗迎风飞舞,自来水管的遛流声等都是常见的自激振荡.自激振荡有三个基本特点<sup>[35]</sup>:一是系统的自激振荡与初始条件无关,只取决于系统的内禀性质;二是自激振荡必定伴随有能量耗散,外界必须给系统泵入能量才能维持系统振荡;三是自激振荡系统是一个自治系统.热声振荡不是强迫振荡,这是因为系统并不受周期性外力作用,而是来源于系统的非线性性质.为了维持自激振荡,系统需要有能源以补偿耗散,但它并不需要外加的激振源,而是靠系统的特性将能源调制成为频率为 $\omega$ 的振荡,所以供给的能源可以是非时变的恒定值,系统具有将得到的能量调制成周期性的能力.对于一个热声系统,虽然其运行机理仍在探索之中,但其自激振荡的实质已无异议.自激振荡系统的关键部件是所谓的非线性环节.例如,所有的热机都利用工质的热胀冷缩(即体积随温度的非线性变化)来形成偏置反馈特性,它和系统的流感、流容、流阻联合起来,组成各种不同的非线性环节.热声热机的非线性环节就是热声回热器(热声叠).热声系统的这种非线性环节构成了它的一个显著特点,不需要任何可动的机械组件就可实现能量转换.

沿热声回热器多孔填料行进的声波与回热器的温度梯度同相,就会使声功流加大,这个过程所用的是上一周循环储存在填料中的热量,它通过使流相工质加热膨胀,把放大的声功正反馈给回热器子系统,使它成为一个有源的器件.这个正反馈关系使回热器成为斯特林热机和热声热机的非线性环节.它使热声系统能用环境所提供的“温差”(温度梯度)激发持续的热声振荡形成热声循环.在电子器件中,放大电路的基极偏置电位能使集电极电流被放大.以此类似,热声系统的“温差”就使声谐振管中的声流得到放大.

为解释热声系统自激振荡的机理,一些研究

者提出了参数谐振理论<sup>[32,35,36]</sup>. 在电路中,通过周期性的改变电容值从而实现能量增益方式被称为“泵送”,也称参数激励. 热声回热器内流体工质和其它热力学系统一样,总是充满着热力学起伏. 正如我们大家都知道的那样,这种热力学起伏是频带很宽的噪声,系统的本征频率(系统任意一个本征频率用 $\omega_i$ 表示)必定存在于其中. 显然,具有本征频率的振荡分量出现的概率与其它频率的振荡分量出现的概率一样. 如果外界对系统持续输入简谐能量,且系统的本征频率 $\omega_i$ 和振荡频率 $\omega_p$ 恰好满足 $\omega_i = n\omega_p/2$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )的关系时,系统将产生参数谐振.

既然热声系统的非线性流容可以作为系统自激振荡的参数激励,那么用三频率参数网络模型来描述一个热声谐振管系统就是顺理成章的了. 热驱动的热声谐振管回热器子系统由三个不同本征频率的振荡回路耦合而成<sup>[36]</sup>. 第一是频率为本征声频率 $\omega_0$ 的 LC 回路,它是谐振管所造成的纵向声振荡,可在回热器中调制出横向熵波;第二是热声振荡回路,它是熵波调制过程在回热器 LC 回路中所激发的,其频率为取决于回热器填料孔隙度、流道形状及两端温差的回热器本征频率 $\omega_{TA}$ ;第三是热端换热器所提供的热声发射谱中与本征声频 $\omega_0$ 成整数(或分数)倍关系的诸频段 $\omega_i$ . 这三个频率的合理耦合就构成了三频率参数的网络,可以使系统获得压力波幅最大的热声振荡声功流. Sugita<sup>[37]</sup>等报告的热声谐振管系统就是一种工作于自激振荡的三频率参数热声系统. 它包括回热器、谐振管和变容谐振腔两个子系统,其中回热器子系统的本征频率是 24.4 Hz,谐振管和变容谐振腔的本征频率是 9.5 Hz,而整机输出的声功频率范围则是 30.3 ~ 33.8 Hz.

热声自激振荡和参数谐振是一个比较引人入胜的课题. 凡是用周期地改变网络无源参数的方法使非线性的负阻元件与谐振储能元件形成正反馈的振荡系统,让它维持定常的自激振荡,就称为参数激励. 这种自激振荡方法已经成功地用于电子技术和激光技术. 既然有受激电磁辐射振荡造成的光放大即激光,那么是否也可以有受激热声振荡的声放大?

### 3 特征时间

理论和实验研究都表明,热声系统对特征时间的响应非常敏感<sup>[32,35]</sup>. Zuber 等<sup>[38]</sup>把时间变量引入包括信息量在内的热力学系统的研究中. 信息量是负熵,而熵是热力学参数中的广延量. 从热

动力学观点来看, $\omega$  是表征热力学系统传输过程强度的时间尺度. Zuber 等人的研究策略是用系统信息流程的热力学过程方向(纵向)特征时间 $\omega$ (相对时变率)和对环境开放的传输(横向)特征时间 $\tau$ 的对比值 $\omega\tau$ 来表征整个热机系统的能量转换效应.

对特征时间的研究,最有效的方法之一就是所谓的“时变率相似分析”. 热机系统进行能量转换的体积 $V$ 是一个信息传输体积,它的表面积 $A$ 是系统与环境交换质量、能量与信息的传输界面. 描述系统经历弛豫过程达到新的平衡的特征参数是 $\lambda = A/V$ . 具有长度量纲的 $1/\lambda$ 是宏观系统的特征尺寸. 传输界面 $A$ 上所进行的环境与系统间的任何传输都是对系统的扰动而导致系统的响应. 对这些响应,系统需要经历弛豫过程才能达到新的平衡,它所经历的时间就是弛豫时间.

体积 $V$ 内的广延量 $B$ 的时变率就是流 $dB/dt = J$ ,比值 $J/B$ 可以用来描述系统的相对时变率.

对振荡系统,它就是振荡频率 $\omega = \frac{1}{B} \frac{dB}{dt}$ ,在定常条件下, $B$ 恒为 $B_0$ ,在线性前提下, $\omega = J/B_0$ . 显然,流入系统体积 $V$ 的流 $J$ 决定了传输的效果. 可以看出,比值 $J/V$ 的量纲是时间,即因流入 $J$ 而使 $V$ 体积达到新的平衡所需的弛豫时间 $\tau = J/V$ ,它可以理解为系统对环境的传输开放周期.

合并 $\omega$ 和 $\tau$ 给出 $\omega\tau = \frac{J}{B_0} \tau = \frac{B - B_0}{B_0}$ . 该式代表的就是(无量纲)特征时间,它实际上是传输流所造成的相对效应量,即在系统的传输开放周期 $\tau$ 中,传输流 $J$ 对系统所造成的相对效应. 定义三个重要参数:过程速度 $v_p = \omega\lambda$ ,过程作用 $A_p = v_p\lambda = \omega\lambda^2$ ,流作用 $A_r = \langle v \rangle \lambda$ ,根据相对特征时间的定义可以得出系统的特征时间: $\Omega = \omega\tau = \frac{A_p}{A_r} = \frac{\omega\lambda}{\langle v \rangle}$ .

热机系统有三个层次:宏观、介观和微观. 热声热机横向传输过程的特征尺寸是流体微团尺寸,它发生在受热区子系统,属于介观层次;而其耗散过程应属于微观层次,此层次的特征时间 $\tau_s$ 可以通过系统动量变化的特征时间 $\omega_s$ (可测值)辨识出来. 在此基础上,就可以确立宏观的横向传输的热动力学相似关系. 在宏观层次上,这种热动力学相似关系受几何结构因素影响很大,因此必须提高研究层次,即深入到介观层次及微观层次,以便收集更多信息. 介观层次的特征尺寸是过程影响所及的微团尺寸,相应地有过程位移 $\xi_p$ 和特征尺寸 $\tau_p$ ,由此可得相对效应量 $\Omega_p$ ,即无量纲特

征时间. 在微观层次, 耗散过程是分子随机行走所引起的扩散过程, 描述参数是流动位移  $\xi_f$ , 过程的模型已被还原为经典热力学. 我们可以通过所得到的介观层次传输过程效应量  $\Omega_p = \omega_{mp} \tau_p$ , 辨识出微观层次中耗散过程的特征量  $\omega_k$ ,  $\lambda_k$  和  $\tau_k$ , 从而得到微观层次的过程效应.

综上所述, 在热声自激振荡系统中, 可以把  $\omega_0 \tau_{TA}$  ( $\omega_0$  是声系统本征频率,  $\tau_{TA}$  是横向熵波弛豫时间) 作为系统的热声特征时间 (无量纲), 它决定回热器 (热声叠) 的特征尺寸即侵入层厚度  $\delta$  和谐振管的长度, 因此是一个重要的设计参数.

## 4 热力学优化

有限时间热力学也称“热力学优化”, 是现代热力学理论的一个新的分支, 是研究在有限时间内发生的带有热现象的过程的最优效果, 在有限时间内运行的带有热现象的装置和系统的最优性能的一门科学.

热声系统是一个开放的系统, 利用有限时间热力学对热声系统进行研究已取得一定的成果<sup>[39]</sup>. 武汉工程大学热声课题研究小组利用有限时间热力学对热声系统的自激振荡机理<sup>[40]</sup>、生态学优化性能<sup>[41]</sup>、火用效率优化<sup>[42]</sup>、回热器熵产<sup>[43]</sup>、最优频率特性<sup>[44]</sup>等进行了深入的研究.

在有限时间热力学的研究中, 非平衡量子统计理论是揭示开放系统不可逆本质规律的一个强有力的工具. 吴锋等<sup>[45]</sup>把非平衡量子统计理论引入到对热声微热力学循环的研究中, 认为热声系统气体工质由热声子组成, 建立了理想玻色系统的热声微热力学循环, 研究了量子热声微热力学循环的最优性能. 结果表明<sup>[39]</sup>: 在弱简并条件下, 热声原动机量子微热力学循环的输出功率大于经典热力学循环的输出功率, 热声制冷量子微热力学循环的制冷率大于经典热声微热力学循环的制冷率; 在经典极限条件下, 量子热声系统微热力学循环回到经典的热声微热力学循环.

目前有限时间热力学进展较大的方面是所谓的“构型优化”. “构型”是相对于“分形”逆向思维的结果. 自古到今, 人们对自然界存在的各种形状都感到好奇. 为什么植物的叶子有经络? 为什么花儿有不同的花瓣? 为什么鱼儿具有流线型? 等等. 如何设计出合理的过程和结构, 从而获得最佳目标值, 这就是构形理论. 吴锋等<sup>[46]</sup>根据构型理论对驻波型热声叠进行了优化设计, 得到了一些有用的结果. 他们的工作目前仅仅限于一级优化, 根据推测, 二级优化的声通道应当是方型, 三

级、四级优化将会是什么结果呢? 这些问题都有待于下一步的工作进展.

## 5 格子气模拟和非线性热声理论

格子气方法是 20 世纪 80 年代发展起来的现代热流体计算方法, 已经在两相流、传热、声波<sup>[47]</sup>等领域得到具体应用. 直接从微观角度和基本物理定律出发来模拟系统的物理过程是格子气方法的最大优点. 采用格子气算法不用建立和求解复杂的微分方程, 而且算法简单并容易处理边界条件和使用并行算法. 在热声的研究中, 可以从格子气自动机演化方程恢复宏观热声方程, 从而采用相应热格子气模型模拟热声热机系统的压力场、温度场和速度场<sup>[47]</sup>.

随着热声研究的深入, 经典热声理论的局限性日显突出. 特别是热声系统的起振、声流、谐波耗散等非线性现象, 经典热声理论无法解释. 人们逐步认识到非线性效应才是时均非零热能与声能转换的本质, 而线性热声理论在小振幅条件下的预测只是一种近似. 于是, 自 20 世纪 90 年代初开始兴起了对非线性热声理论的研究.

1992 年, 美国 Los Alamos 实验室研究人员<sup>[48]</sup>在研究大尺度热声发动机时, 定性解释了他们所发现的一些与线性热声理论相背的现象. Gusev<sup>[49]</sup>通过建立非线性演化方程来描述热声发动机起振过程, 并得到了对热声板叠频谱特性的解析描述. Karpov S 等<sup>[50]</sup>建立了一个时域的、完全非线性的热声模型, 并对其非线性行为进行了较为系统的研究. 他们通过改变横截面积、板叠位置和流体性质等参数, 预测了热声系统的变化规律. 他们的理论可以在小振幅情况下简化为 N. Rott 的线性理论. Hamilton 等<sup>[51]</sup>用摄动方法获得了系统本征频率的渐进表达式, 建立了研究非线性热声效应的二维模型和数值方法. 最近几年, 国内一些学者对非线性热声理论也进行了较为深入的研究<sup>[52]</sup>.

## 6 展 望

热声热机 (制冷机) 用热声谐振取代机械压缩, 使得热机 (制冷机) 有可能变成无运动部件的换能器, 热功转换过程的频率大大提高, 能源技术将有一个质的飞跃. 热声装置的工程研究分别沿着两个方向发展. 一是高频率小型化, 其重量和尺寸将主要取决于微机械加工工艺 (MEMS) 的水平; 二是大振幅行波热声与热气机相结合, 构建大型能量转换平台. 为深入探寻热声机理, 促进学科发展, 以及为热声装置的设计、调相、运行参数选

择等提供指导,未来几年可能会在如下几个方面形成理论研究的热点。

**a.** 热声自激振荡来源于系统的非线性特征。随着各种结构的高频大振幅热声装置的不断推出,非线性热声理论必将成为研究重点之一,构建一个描述热声系统的非线性动力学理论并形成与之相应的计算方法势在必行。

**b.** 以时变率相似分析方法为基础,把特征时间作为评价热声系统性能的重要指标来深入研究。在热声装置的启振或运行过程中,系统的特征时间起着何种作用?是否存在最优的特征时间?这些都需要在理论和实验两个方面来尝试或探寻。

**c.** 采用“相空间重构”、“时序分析”、“网络分析”、“有限时间热力学”等综合分析方法,利用 Delta-EC、CFD、格子气等计算程序,对各种热声系统进行动态分析和模拟。

**d.** 把热声系统作为大自然复杂系统的自组织历程的一部分,利用复杂系统的形态(Pattern)动力学观点,来揭示热声自激振荡的本质,从而促进工程热物理学的发展;结合道家哲学来探究热声耦合的自然本源,例如,道家的“刚”对应热声中的“流感”,道家的“柔”对应热声中的“流容”,而“刚柔相济”显然就是“谐振”。

热声学是一门跨学科的科学,无论是理论研究还是工程化研究都极具挑战性。它像一个极具生命潜质,又带有众多疑问的魔夹,以它特有的魅力吸引着人们不断地探索和研究。

#### 参考文献:

- [1] Rott N. Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes [J]. *Z Angew Math Phys*, 1969(20): 230.
- [2] Rott N. Thermoacoustic [J]. *Adv Appl Mech*, 1988(20): 135-175.
- [3] Swift G W. Thermoacoustic engine [J]. *J Acoust Soc Am*, 1988, 84(4): 1145-1180.
- [4] Wheatley J C, Cox A. Natural engines [J]. *Physics Today*, 1985(38): 50.
- [5] Olson JR, Swift G W. A loaded thermoacoustic engine [J]. *J Acoust Soc Am*, 1995, 98(5): 2690-2693.
- [6] Backhaus S, Swift GW. A thermoacoustic - Stirling heat engine [J]. *Nature*, 1999(399): 335-338.
- [7] 周远, 罗二仓. 热声热机技术的研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 14-26.
- [8] 赵忠明, 李青, 胡忠军. 热声机械的研究现状及展望 [J]. *流体机械*, 2009, 37(4): 79-82.
- [9] Km'pov S, Prosperetti A. Nonlinear saturation of the thermoacoustic instability [J]. *J Acoust Soc Am*, 2000, 103: 3130-3147.
- [10] Ward W C, Swift G W. Design environment for low amplitude thermoacoustic engines (DeltaE) [J]. *J Acoust Soc Am*, 1994, 95(6): 3671-3672.
- [11] 余国瑶, 罗二仓, 胡剑英, 等. 热声斯特林发动机热动力学特性的 CFD 研究——第一部分: 热声自激振荡演化过程 [J]. *低温工程*, 2006(4): 5-9.
- [12] Florian Z, Jeffrey V, Laura S. CFD simulation of thermoacoustic cooling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010(53): 3940-3946.
- [13] 王军. 热声部件声特性的数值模拟研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2010.
- [14] 张晓青, 蒋华, 胡兴华, 等. 热声振荡的格子气模拟 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(7): 85-88.
- [15] 张晓青, 吴迎文, 张稳. 热声热机声场的格子气分析 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(2): 185-188.
- [16] GUO Fang Zhong. On the theory of cyclic flow cryogenic regenerator [C]//*Proc Of INCONCRYO India*, 1985: 227.
- [17] GUO Fang Zhong, Chouym, Lee S Z. Flow characteristics of a cyclic flow regenerator [J]. *Cryogenics*, 1987(27): 152.
- [18] 陈国邦. 最新低温制冷技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [19] XIAO Jia Hua. Thermoacoustic theory for cyclic flow regenerators Part 1: Fundamentals [J]. *Cryogenics*, 1992, 32(10): 895-901.
- [20] XIAO Jia Hua. Thermoacoustic heat transportation and energy transformation Part 1: Formulation of the problem [J]. *Cryogenics*, 1995, 35(1): 15-19.
- [21] XIAO Jia Hua. Thermoacoustic heat transportation and energy transformation Part 3: Adiabatic wall thermoacoustic effects [J]. *Cryogenics*, 1995, 35(1): 27-29.
- [22] 邓晓辉. 回热器的热声机理及热声热机的设计理论 [D]. 武汉: 华中科技大学, 1994.
- [23] 张晓青. 热声热机系统的仿真与优化研究—仿真软件的研制与实验验证 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [24] TU Qiu, Wu C, LI Qing, et al. Influence of Temperature Gradient on Acoustic Characteristic Parameters of Stack in TAE [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2003(41): 1338-1349.
- [25] 胡兴华, 张晓青, 王惠龄, 等. 热声振荡器的二端口网络模型及起振条件 [J]. *科学通报*, 2008, 53(17): 2109-2115.
- [26] 李青. 低温动力机械的研制—热机研制的系统动

- 力学方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 1996.
- [27] 董凯军. 热声系统的网络模拟及其实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.
- [28] 涂虬. 热声器件的寻优及其与热声热机系统的匹配[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [29] Zou Wenjing, Wu Feng, Shu Anqing, et al. Study on a new traveling wave thermoacoustic engine with external excitation[J]. Asia - Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, 3: 2555 - 2558.
- [30] 吴锋, 郭方中, 李端勇. 热声回热器有源网络的系统辨识. 应用科学学报[J], 2001, 19(4): 67 - 69.
- [31] DING Guozhong. An Identified Study on the Active Network of a Thermoacoustic Regenerator[J]. Engineering, 2009, 1, 1 - 54.
- [32] 张春萍. 热声核特性参数实验研究及高频微型热声实验装置的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [33] 杨志春, 吴锋, 郭方中, 等. 热声网络的辛对称特征[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 084303.
- [34] 杨志春. 热声系统网络传输矩阵的理论和实验研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2011.
- [35] 郭方中, 李青. 热动力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
- [36] 陈熙. 热声谐振管参数激励机理研究—整机动态特性与回热器热致声谐振模态识别[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [37] Suigata H, Matsubara Y, Kushino A, et al. Experimental study on thermally actuated pressure wave generator for space cryocooler[J]. Cryogenics, 2004, 44: 431 - 437.
- [38] Zuber N. The effects of complexity, of simplicity and of scaling in thermal - hydraulics[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 204: 1 - 27.
- [39] 阚绪献. 热声系统的热力学分析与优化及外激励热声发动机的研制和实验研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2010.
- [40] LI Qing, WU Feng, GUO Fang - zhong. Thermodynamic analysis on thermoacoustic self - excited oscillation[J]. Open System and Information Dynamics, 2003, 10(4): 391 - 402.
- [41] Chen Lingen, Wu Feng, Li Qing. Exergetic efficiency optimization of a thermoacoustic cooler[J]. Proceedings IMechE, Part C: Mechanical Engineering Science, 2007, 221(11): 1339 - 1344.
- [42] Xuxian Kan, Feng Wu, Lingen Chen. Exergy efficiency optimization of a thermoacoustic engine with a complex heat transfer exponent[J]. International Journal of Sustainable Energy, 2010, 29(4): 220 - 232.
- [43] 余士成, 吴锋. 钢丝型回热器的不可逆熵产分析[J]. 吉林大学自然科学学报, 1999(3): 52 - 56.
- [44] 阚绪献, 吴锋. 驻波热声热机的最优频率特性[J]. 低温工程, 2008(4): 24 - 27.
- [45] Wu F, Chen L, Li D, et al. Thermodynamic performance on a thermoacoustic micro - cycle under the condition of weak gas degeneracy[J]. Applied Energy, 2009, 86(7 - 8): 1119 - 1123.
- [46] Feng Wu, Lingen Chen, Anqing Shu, et al. Constructal Design of Stack filled with parallel plates in Standing - wave Thermo - acoustic Cooler[J]. Cryogenics, 2009, 49: 107 - 111.
- [47] 王勇, 何雅玲, 刘迎文, 等. 声波衰减的格子 - Boltzmann 方法模拟[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 5 - 8.
- [48] Swift G W. Analysis and performance of a large thermoacoustic engine[J]. J Acoust Soc Am, 1992, 92(3): 1551 - 1563.
- [49] Guesv V. Asymptotic theory of nonlinear acoustic waves in a thermoacoustic Prime - mover[J]. Acustica, 2000(86): 25 - 38.
- [50] Karpov S, Prosperetti A. A nonlinear model of thermoacoustic devices[J]. J Acoust Soc Am, 2002, 112(4): 1431 - 1444.
- [51] Hamilton M F, Ilinskii Y A, Zabolotskaya E A. Nonlinear two - dimensional model for thermoacoustic engines[J]. J Acoust Soc Am, 2002, 111(5): 2076 - 2086.
- [52] 高凡, 刘迎文, 何雅玲, 等. 热声制冷机声场中非线性效应[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(12): 1990 - 1992.

(下转第 73 页)