

# 热声制冷效应验证的实验设计

鄢红春, 常江, 吴浩泉

(海军工程大学理学院应用物理系, 武汉 430033)

**摘要:** 热声制冷技术是一项新的制冷技术。它具有无运动部件、运行可靠、寿命长和环保等优点。在航天、微电子、低温物理及军事等领域有着十分诱人的应用前景。热声制冷机主要由声驱动器、共振管、热声叠和换热器等部件组成。根据热声制冷原理, 利用常见的材料和仪器, 采用自制的玻璃管状热声叠, 设计了一套结构简单的扬声器驱动热声制冷实验验证装置。实验结果表明: 以空气作工质, 在无冷却措施的情况下, 在系统运行较短时间内, 实现了 13℃ 的降温及 25℃ 的温跨, 热声制冷效应十分明显。该装置可用于研究热声制冷效应的影响因素。

**关键词:** 热声; 热声制冷; 热声堆;

中图分类号: TB61

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-02-0171-03

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.02.019

## Experimental design for demonstration of thermoacoustic refrigeration

YAN Hong-chun, CHANG Jiang, WU Hao-quan

(Department of Applied Physics, College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Thermoacoustic refrigeration has been developed as a new technique with long lifetime and high reliability. It has no moving parts, and is environmental pollution free. A thermoacoustic refrigerator consists of sound driver, resonator, stacks and heat exchangers, etc. According to the principle of thermoacoustic refrigeration, a kind of inexpensive thermoacoustic refrigeration device driven by loudspeaker is designed with common materials, instruments and self-made glass-tube stacks. Experimental results show that temperature can decrease 13℃ in the resonant tube and temperature difference can reach 25℃ in the stack within 200s. The system takes air as medium without any other cooling means. It is clearly proved that the system is effective.

**Key words:** thermoacoustic effect; thermoacoustic refrigeration; thermoacoustic stack

## 0 引言

热声制冷的概念是美国 Los Alamos 国家实验室的 J.C.Wheatley 等人在 20 世纪 80 年代提出的<sup>[1]</sup>。世界上第一台采用扬声器驱动的热声制冷机是 1985 年由美国海军研究生院的 Hofler 研制成功。虽然热声制冷机目前还处在试验样机和某些特殊场合应用的阶段(如冷却航天飞机上的红外传感器及海军舰船上的雷达电子系统等), 但因其稳定性、使用寿命、环保(使用无公害的流体为工作介质)及无运动部件等方面的优势以及在普冷和低温等领域潜在的应用前景, 近二三十年来, 热声制冷机迅速成为了制冷领域一个新的研究热点<sup>[2]</sup>。

2004 年, 同济大学曹正东等研制了一套热声制冷实验装置<sup>[3,4]</sup>, 结构十分简单。我们在其基础上重新设计了一个热声堆, 用管型热声堆代替由胶卷底片组成的圆筒型热声堆, 实现了十分明显的温降 (>10℃) 和较大的温跨 (>20℃), 且热声堆制作比较简单、方便且可靠。

## 1 原理

热声效应是指由于处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沿着(或逆着)声传播方向产生的热流, 并在这个区域内产生(或者吸收)声功的现象。按能量转换的方向的不同, 热声效应可分为两类: 一是用热来产生声, 即热驱动的声振荡; 二是用声来产生热, 即声驱动的热量传输。扬声器驱动的热声制冷机是按照第二类原理来进行工作的。只要具备一定的条

收稿日期: 2012-03-02; 修回日期: 2012-06-20

基金项目: 海军工程大学理学院基础研究基金项目(LXJJJ2011009)

作者简介: 鄢红春(1964), 男, 湖北安陆人, 硕士, 副教授, 研究方向为材料物理。

通讯作者: 鄢红春, E-mail:hcyang64@163.com

件, 热声效应在行波声场、驻波声场以及两者结合的声场中都能发生。下面以驻波型热声制冷机为例简述热声制冷的基本原理<sup>[5-7]</sup>。

设在传声介质中插入一固体平板, 使板面平行于声介质振动方向。考虑一个气体微团在一定声频率下沿平板作往复运动的情况(如图 1 所示, 圆的大小形象表示气体微团体积的大小)。

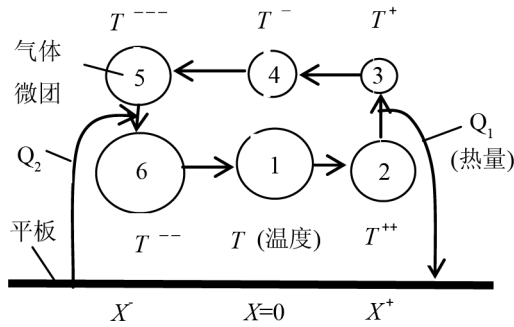


图 1 热声致冷原理示意图  
Fig.1 Principle of thermoacoustic refrigeration

设初始状态时气体和平板的温度均为  $T$ , 气团在声压作用下由位置 1( $X=0$ , 状态 1)运动到位置 2( $X=X^+$  处, 状态 2), 因过程中气团被绝热压缩, 故气团温度升为  $T^{**}$ , 于是, 将有热量  $Q_1$  由气团流向平板; 失去热量的气团体积变小, 同时, 温度降为  $T^+$  (状态 3); 随后, 气团又在声压的往复振荡作用下向左运动到位置 4 (状态 4), 因过程中气团被绝热膨胀, 故气团温度降为一个新的温度  $T^-$ ; 声压继续向左振荡使气团绝热膨胀到位置 5 ( $X=X^-$ , 状态 5), 温度降为  $T^-$ , 此时气团的温度低于平板的温度, 于是就有热量  $Q_2$  由平板流向气团, 吸热后的气团等压膨胀, 同时温度升为  $T^-$  (状态 6); 此后声波向右振荡使气团绝热压缩, 又回到位置 1 (状态 1), 完成一个热力循环。循环结果, 热量从平板  $X^-$  处转移到了  $X^+$  处。这是单个气体微团的情况。事实上, 平板附近有无数气团, 它们的运动情况相同, 所有这些都与平板进行热交换的气团连成一个振荡链, 就像接力赛一样将平板左端(冷端)的热量输送到右端(热端), 实现泵热。

## 2 实验

热声制冷实验装置由功率信号源、示波器、扬声器、谐振管、热声堆、铝塞、测温探头(热电偶)、数字式温度计等器件组成, 如图 2 所示。就制冷装置而言, 扬声器、谐振管和热声堆是 3 个主要部件。

功率信号源(可用信号发生器及功率放大器代替)产生一定频率的声振动, 推动扬声器。扬声器发

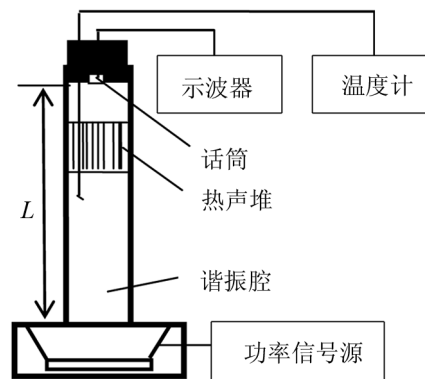


图 2 热声制冷实验装置示意图  
Fig.2 Device of thermoacoustic refrigeration

出的声波(机械能)在谐振腔内成为制冷做功的动力。本实验采用的是 1 只 40 W 的普通扬声器, 实践证明有较好的制冷效果。

谐振腔是内径为 25 mm、长为  $L=385$  mm 的有机玻璃管, 它通过一块中心有一圆孔, 其半径与谐振管相等的薄树脂板盖在扬声器上(可以用垫圈), 谐振管的长度决定了系统的谐振频率。根据声学理论<sup>[8]</sup>, 对于均匀有限长管的管内声场, 当管长为声波波长的  $1/4$  时, 管内会产生谐振现象, 此时制冷效果最为明显。若用环境温度为  $25$  °C 时空气中的声速  $c=346.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  估算, 则谐振频率为

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4L} = \frac{346.5}{4 \times 0.385} \approx 225 \text{ Hz}$$

考虑到温度、细管口径等因素对声速的影响, 实际频率略有偏差。为了准确选定工作频率, 在铝塞内安放了微型话筒, 并将话筒(可通过计算机)接在示波器上。系统工作时, 先在示波器上寻找振幅最大的谐振峰, 以此来确定实验中的谐振频率。本实验的实际工作频率为 233 Hz。

热声堆是该制冷装置的关键部分。有平板型、多孔材料型及针棒型等多种型式。制作热声堆主要考虑热渗透深度。另外, 板叠中心位置和长度也是两个很重要的参数。目前, 选板叠型式热声堆, 优化参数主要由实验确定。我们自制的热声堆是由一组内径为 0.9~1.1 mm, 长度为 120 mm 玻璃细短管构成, 为便于热电偶测温, 中间还嵌入一根内径稍大的玻璃细短管, 其结构示意图如图 3 所示。它在谐振腔内的位置可以调整。

在热声堆上方有一个铝塞, 它将谐振管的上端口封住。铝塞上开一小细槽, 将测温探头置于热声堆的上、下部腔内, 由数字式温度计分别读出系统工作前后的空气的温度(图 2 中仅画出了测量热声堆下部腔内的温度计)。

接通信号源, 调节其输出频率使示波器上话筒

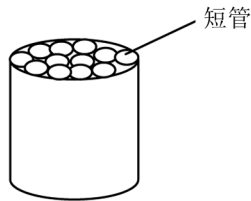


图3 热声堆结构示意图

Fig.3 Structure of thermoacoustic stack

的输出信号为最大，得到系统的谐振频率，每隔 5 s 同时记录两支温度计的示值。作出热声堆两端温度  $T$  与时间  $t$  关系图，如图 4 所示。

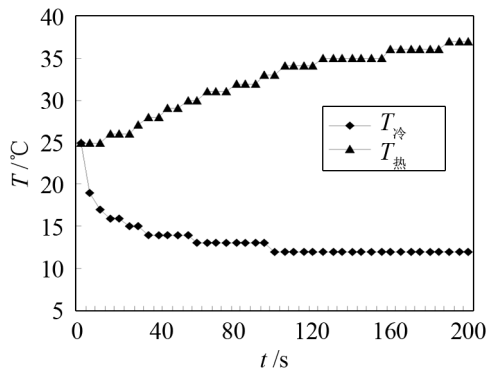


图4 热声堆两端温度随时间变化

Fig.4 Temperature vs. time at the two poles of thermoacoustic stack

由图 4 可见，系统运行 200 s 后，温度已降到稳定值 12 °C，热声堆上部温度达到 37 °C，本实验的环境温度为 25 °C。谐振腔内的温度已下降了  $\Delta T = 25\text{ }^{\circ}\text{C} - 12\text{ }^{\circ}\text{C} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若用  $T_{\text{冷}}$  为热声堆下部的温度计示数， $T_{\text{热}}$  为热声堆上部的温度计示数，则系统运行 200 s 后， $T_{\text{热}}$  与  $T_{\text{冷}}$  的差值(温跨)为： $\Delta T = 37\text{ }^{\circ}\text{C} - 12\text{ }^{\circ}\text{C} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验的重复性较好。

### 3 结束语

本实验用自制的管型热声堆，以空气作工质，

在无冷却措施的情况下，建立了一套结构简单的热声制冷效应的实验验证装置。该装置既能演示声制冷效应，也便于研究热声制冷效应的影响因素。

### 参 考 文 献

- [1] Wheatley J C, et al. An intrinsically irreversible thermoacoustic engine[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1983, **74**(1): 153-168.
- [2] 欧阳录春, 蒋珍华, 俞卫刚, 等. 扬声器驱动热声致冷机的研究进展[J]. 应用声学, 2005, **24**(1): 59-65.  
OUYAN Luchun, JIANG Zhenhua, YU Weigang, et al. Research advance of loudspeaker-driven thermoacoustic refrigerator[J]. Applied Acoustics, 2005, **24**(1): 59-65.
- [3] 曹正东, 马彬, 陈润, 等. 热声效应及其实验[J]. 物理实验, 2004, **24**(12): 7-9.  
CAO Zhengdong, MA Bin, CHEN Run, et al. Thermoacoustic effect and demonstrations[J]. Physics Experimentation, 2004, **24**(12): 7-9.
- [4] 马彬, 陈润, 王飞, 等. 热声效应及其实验[J]. 声学技术, 2005, **24**(1): 26-28.  
MA Bin, CHEN Run, WANG Fei, et al. Thermoacoustic effect and demonstrations[J]. Technical Acoustics, 2005, **24**(1): 26-28.
- [5] 袁鹏, 寿卫东. 热声制冷效应的实验研究[J]. 同济大学学报, 1995, **23**(6): 687-690.  
YUAN Peng, SHOU Weidong. Experimental study of thermoacoustic refrigerator[J]. Journal of Tongji University, 1995, **23**(6): 687-690.
- [6] Swift G. Thermoacoustic engines[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988, **84**(4): 1145-1180.
- [7] Garrett S, Hofler T. Thermoacoustic refrigeration[J]. ASHRAE Journal, 1992, **34**(12): 28-36.
- [8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.  
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Fundamentals of acoustics[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001.