

热声效应及其实验

马 彬¹, 陈 润¹, 王 飞¹, 蒋仁钢², 曹正东¹

(1. 同济大学应用物理系; 2 同济大学通信工程, 上海 200092)

摘要: 利用热声效应可以制造经济的热力发动机, 包括热力泵和致冷机。文章介绍一种基于热声效应原理设计而成的台式热声致冷实验系统, 该系统非常简单, 由一些常见的装置构成。实验结果表明, 在启动声致冷系统的几分钟内, 温差即可达到 10°C 以上, 实现了声致冷, 从而有效地说明了热声致冷机的功效。

关键词: 热声效应; 热声堆; 热波穿透深度

中图分类号: TB559 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3630(2005)01-0026-03

Thermoacoustic effect and demonstrations

MA Bin¹, CHEN Run¹, WANG Fei¹, JIANG Ren-gang², CAO Zheng-dong¹

(1. Department of Applied Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Communication Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The thermoacoustic effect can be applied to produce powerful and reasonably efficient heat engines including heat pumps and refrigerator. This paper focuses on the design of an inexpensive tabletop thermoacoustic refrigerator for demonstration of the thermoacoustic effect. This thermoacoustic system has been built and tested. Experimental results show that temperature difference of more than 10°C can be achieved after running for several minutes. It is clearly shown that the thermoacoustic refrigeration is very effective.

Key words thermoacoustic effect; stack; thermal penetration depths

1 引 言

热声致冷, 即声波致冷, 是 80 年代提出来的致冷原理和方法, 热声致冷在冷却红外探测器件、超导电子学器件等低温固体电子器件的微型低温制冷领域具有特殊的优点, 同时在普通制冷领域具有成为替代氟利昂制冷的潜在能力, 因而受到广泛的关注。

目前的热声机包括以下几种主要类型: 1 共振型驻波热声制冷机和行波热声制冷机; 2 回热式制冷机; 3 脉冲管制冷机; 4 液体介质制冷机等。

通常所说的“热声致冷机”, 一般是指 W heatley 等人在 80 年代发展起来的利用较高频率驻波声场产生的热声效应来工作的“内在不可逆热声热机或自然热机”。而本文介绍的是共振型驻波热声制冷机。

本文研制的声致冷系统结构非常简单, 有助于人们对声致冷现象和基本原理的了解。

2 原 理

声致冷机的实质是消耗外界提供的功从低温热源吸热, 并向高温热源放出热量。在不违背热力学原理的前提下, 外界的功可以是机械能形式的, 也可以是电能、磁能等。声能是一种振荡形式的机械能。

热声效应则是实现声致冷的桥梁。热声效应是指在可压缩的流体的声振荡与固体介质之间, 由于热相互作用而产生的时均能量效应。产生热声效应时, 声波的纵向模和横向模都起着关键的作用。纵向传播模式维持稳定的声振荡和提供产生热声效应所需的声功流, 横向传播模式则产生流体和固体热声堆之间的动量和热量相互交换, 正是这些相互作用引起了热声效应。

了解热声效应就要具体探讨热声管中气体的运

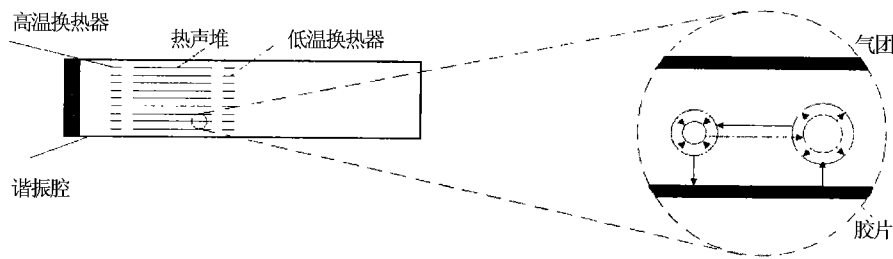


图 1 热声系统工作原理

动。假设热声管中原有声波, 气体就在声波的作用下往返振动。热声堆一般位于管子的封闭端四分之一波长以内, 热声堆相邻二层的间隔大约是两倍或更多倍的热穿透距离 (如图 1)。当声压增加时, 气团向左 (谐振腔封闭端) 振动并且被压缩, 温度增加, 此时气团温度就比其附近热声堆的温度高, 就要把热量输给热声堆。声压降低时, 气团向右振动并且膨胀, 温度降低, 但热声堆温度降低较少, 气团附近热声堆温度高于气团温度, 要向气团输热。所以气团每次振动都是从右吸取热量向左输送热量。热声堆中有无数这样的气团, 运动情况相同, 它们就像是接力赛一样, 从右端低温换热器吸热输送到左边高温换热器, 完成热力学作用。这就是热声效应的基本原理。

热声致冷机最主要的部件是管内热声堆。本系统中, 将胶卷底片每隔一小段距离粘贴一根钓鱼线, 再卷绕成一个螺旋体, 环绕中心轴构成螺旋形的相邻叠层热声堆。这样, 空气分子能够沿着热声堆的纵向 (即谐振管长度方向) 在各叠层之间进行运动。

制作热声堆主要考虑各层之间需要有一定的交换热量的穿透深度。热波穿透深度 δ_q 为时间 $t = 1/\pi f$ 中热扩散的距离, 其关系式如下:

$$\delta_q = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho c_p}}$$

式中: f 是驻波的频率, k 是导热系数, ρ 是气体密度, c_p 是每单位质量气体的等压比热。

实验中热声堆的层数若分隔得太少, 气体就不能有效地传输热量; 若分隔得太多, 则各层太封闭, 靠得太近, 气体粘滞效应就会阻碍气体分子的运动。层间距为四倍穿透深度左右时是最优化层数。

实验中采用导热性能差的胶卷和有机玻璃管是为了建立稳定的径向温度场, 采用导热性好的铝塞是为了防止管口堆热影响致冷效果。

3 实验

本文自制的热声致冷装置 (如图 2) 主要包括音频信号发生器、功率放大器、示波器、40w 音频扬声器、1/4 波长谐振管, 热声堆、铝塞、测温探头, 数字式温度计等。

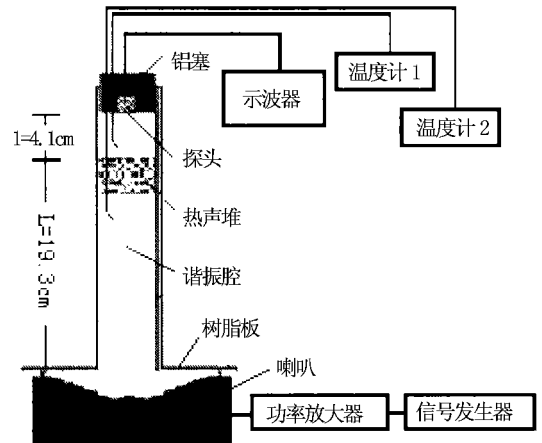


图 2 热声致冷装置

该制冷机的谐振腔为内径 25mm、长度 23.4cm 的有机玻璃管。将薄树脂板盖在喇叭上, 在板中心位置挖一与谐振腔内径相同的圆孔, 用胶水将谐振腔固定在树脂板上。要注意树脂板不要与喇叭的纸盆接触, 为此可在两者之间加一垫圈。将热声堆置于谐振管上部, 与谐振管上部管口距离 6.1cm, 之后在谐振管上部插入一个铝制塞头, 其中塞头在管中长度为 2cm。形成一个封闭的谐振管。铝塞上开一个小孔, 将测温探头分别置于热声堆的上部腔内和下部腔内, 由数字式温度计 1 和 2 读出热声堆前后的气体温度。

热声堆主要起热交换器的作用。本系统中的热声堆是用钓鱼线和宽为 35mm 的胶卷所组成的。将直径为 0.368mm 的钓鱼线每隔 5mm 用 502 胶水依次平行的粘在胶卷底片上, 之后将胶卷底片卷起, 组

成一简易的热交换装置(如图3所示)。

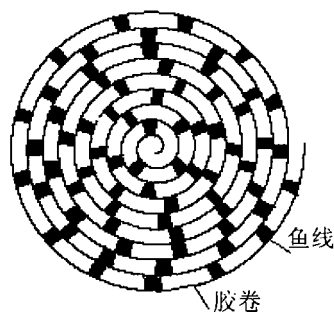


图3 热声堆

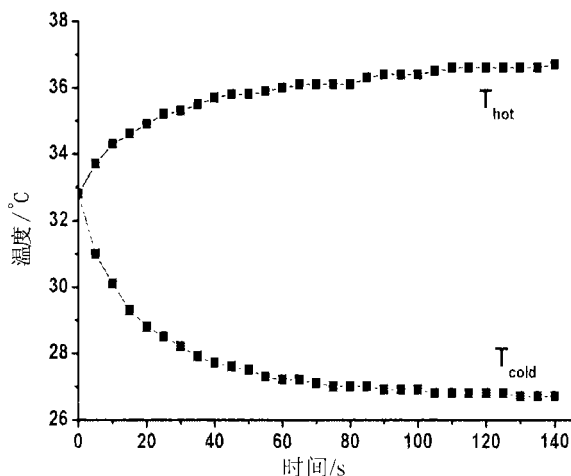


图4 温度 T 与时间 t 关系图

为了在一整卷胶卷上用 502 胶水以 5mm 间距粘上直径仅为 0.368mm 的钓鱼线,我们自制了一个简易的排线架,提高了制作核心部件热声堆的质量。

该声致冷装置的谐振腔是长度 23.4cm 的有机玻璃管,管长决定了系统的谐振频率。只有当管长为声波波长的 1/4 时,才会产生谐振现象,此时振幅最大,实验现象将是最明显的。根据公式 $f = c/\lambda$ 可以求得理论上的谐振频率,计算时要考虑室温对声速的影响 ($c = 336.1 + 0.6t [m/s]$),以及管端修正 $\Delta l = 1.7a$ (a 为末端开口半径)。然而由于受到空气流动、环境温度变化等等因素的影响,使谐振频率与

理论计算所得有一定误差。为此我们将一微型驻极体话筒作为探头放入铝塞内,使话筒与铝塞内表面齐平,话筒输出接示波器。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。本实验中采用的频率为 367Hz。

接通音频信号源,调节信号发生器的输出频率使示波器上话筒输出信号为最大,得到系统的谐振频率,然后提高功放输出,每隔 5s 同时记录两支温度计的示值。作出温度 T 与时间 t 关系图,如图 4 所示。(信号发生器输出电压为 $U = 16V$, 功放是 32W)

图中 T_{cold} 为热声堆下部的温度计示数, T_{hot} 为热声堆上部的温度计示数。系统运行 140s 后, T_{hot} 与 T_{cold} 的差值为:

$$\Delta T_{MAX} = 36.7^{\circ}C - 26.7^{\circ}C = 10.0^{\circ}C$$

已有明显的致冷效果。

4 结束语

本系统利用一些常见的装置建立的声致冷系统,在 140 秒的时间内就达到 $10^{\circ}C$ 的温差,实现了声致冷。这表明基于热声原理的声致冷和低温技术具有巨大的发展潜力,我们将对此作进一步的研究。

本实验得到同济大学声学研究所钱梦騷教授的指导和帮助,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 肖家华. 热声致冷的基本原理和应用前景 [J]. 应用声学, 1992, 12(3): 1-7.
- [2] 马大猷. 热声学的基本理论和非线性 [J]. 声学学报, 1999, 24(4): 337-349.
- [3] Swift G W. The thermoacoustic engines [J]. J Acoust Soc Am, 1988, 84: 1145-1180.
- [4] Backhaus S, Swift G W. Thermoacoustic stirling heat engine [J]. Nature, 1999, 399: 335-338.