

声致冷和声制冷机

戴根华

(中国科学院声学研究所,北京 100080)

本文介绍声致冷的基本原理、有关的数量关系和美国 Los Alamos 实验室推出的一台实验声制冷样机及其性能。

氟里昂即氯氟碳烃化合物,作为制冷剂,是冰箱和空调器中不可缺少的“血液”,它为人们的电气化起过重要的作用。但是,由于全世界大量使用和排放氟里昂,使得地球臭氧层变得稀薄了,温室效应日益明显,人类赖以生存的生态环境受到危害,因此前年生效的国际《控制消耗臭氧层物质蒙特利尔议定书》对氟里昂的使用作了严格限制。欧美国家宣布,到本世纪末将全部停止氟里昂的生产和使用。

氟里昂的禁用,给科学技术带来了新的课题。出路有两条,一是寻找氟里昂的最佳代用品(如 F134A),二是开发新的制冷技术。也许这是近年来声致冷研究重新活跃起来的一个推动力。

一、声致冷原理

使热从热端转移到冷端并对外作功的热机(heat engine)叫发动机(prime mover);吸收外加的功并使热从冷端转移到热端的热机叫热泵(heat pump)或制冷机(refrigerator)。那种利用声的机械能来实现热的转移的效应叫做热声效应,相应的制冷技术就是声制冷。

即使是声强很低的情况,例如讲演人周围建立起来的声场中,原来就有热声效应引起的局部的温度振荡和热流。但是,这些量都很小,前者约为 10^{-4}°C ,后者约为 10^{-6}W/m ,所以人们不易感觉到,更不用说利用了。为了产生有显著致冷作用的热声效应,除声强要足够高以外,还需要下列条件:

1. 有两种工作介质,可压缩的(气态或液态的)第一介质和与第一介质发生热相互作用的(固态的)第二介质;

2. 两种介质之间有一定的热弛豫,使第一介质的运动和温度保持合适的相位差;

3. 在两种介质相对运动的方向上存在热力学不对称性。

图1是声制冷机基本原理图,它由声源、第一介质、第二介质和声共振器组成。声源可以是一个低频活塞式声发生器或改装的中频扬声器,它们应能在10多个大气压下工作,产生的交变压强为0.35个大气压(185dB)以上。声源还是一个热汇。第一介质采用一些可压缩的有较大热膨胀性的气体(或液体),例如 ^4He ,工作压力为10个或10个以上的大气压。第二介质是最重要的部件,对它的要求是热附面层厚度大,热容大,纵向热传导率小,一般靠特殊的几何布置来实现,如不锈钢薄片或塑料布叠层结构。声共振器是为了在其内部建立起声驻波场,这样声源的输出功率不是太大而波腹处的声压级却可以很高。

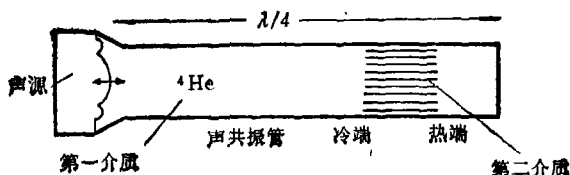


图1 声制冷机基本原理图

在实现泵热和致冷的过程中,第二介质起关键作用。图2所示是代表一小块第二介质的

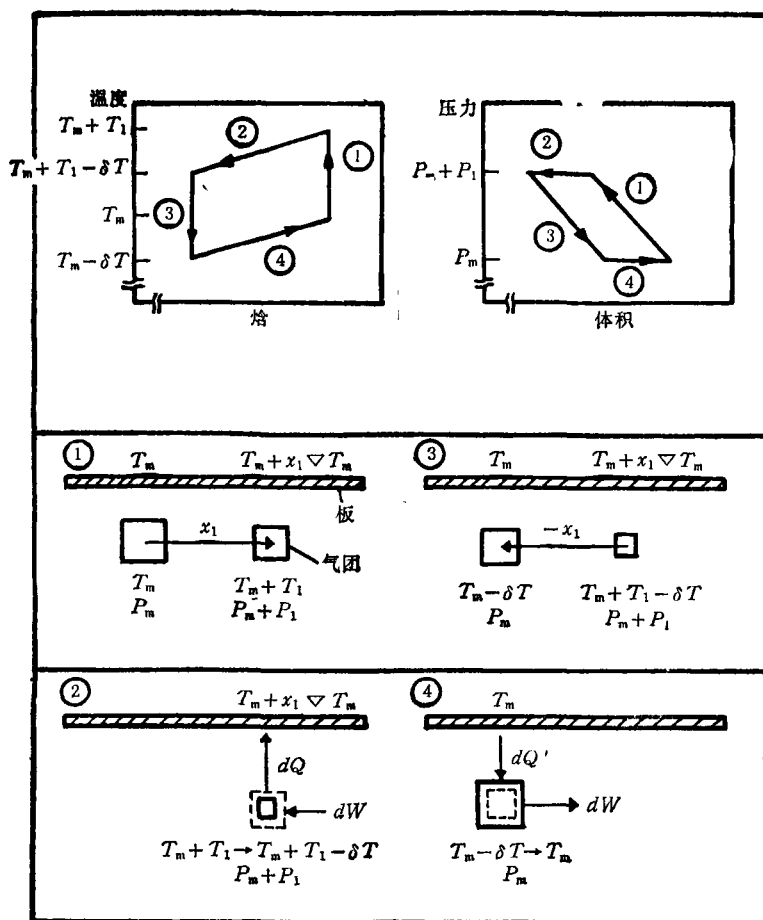


图2 短板与小气团的热作用循环过程

短板与代表第一介质的气团热相互作用的循环过程。作如下几点假设：(1)短板长度比声波波长短，距离声压和质点速度的节点又很远，因而可认为声压和质点速度在短板长度内是均匀的；(2)气团的平均温度与短板的相同；(3)声源发出的是方波形式的声信号，热作用的循环过程可用两个可逆的绝热过程和两个不可逆的等压过程表示。又由于短板材料的热容大，因而具有时不变的平均温度分布。气团在声波作用下向右快速运动时是绝热的，无时间发生热量交换，但到达 x_1 后，气团继续受后面气体挤压，结果压力增加为 $P_m + P_1$ ，温度上升为 $T_m + T_1$ ，即过程1。由于此时 x_1 处的气团温度比邻近的板的温度高，因而有热量 dQ 流向板，气团温度减低 δT ，同时吸收外加的功 dW ，即过程2，这是等压过程。板并不传导热量，仅起

存贮热量的作用，存贮在这里的热量 dQ ，将在下一个周期被现在所讨论的小气团右边的那个小气团继续向右转移。 x_1 处的气团在声波作用下快速向左返回时又是绝热的，到达原处时其压力恢复为原值 P_m ，而温度则降低为 $T_m - \delta T$ ，即过程3。由于此时气团温度较之邻近的板的温度低，因而上一个周期从左边转移来此的热量 dQ' 从板流向气团，导致气团温度增加 δT 而恢复为原值，同时对外作功 dW' ，即过程4，这也是一个等压过程。四个过程构成一个完整的循环过程。如果不考虑任何机理的能量损耗，那么 $dQ = dQ'$ ， $dW = dW'$ 。这样，每完成一个循环，净作用是热量 dQ 从低压处转移到了高压处。通常， δT 和 dQ 都是小量，因此必须有一系列的气团，以合适的相位接力式地工作，才能将足够的热量泵向声压波腹处而产

生显著热声效应,就是说,第二介质的整体长度和宽度都必须足够大。对于正弦式的声信号,如气团在短板的热附面层内,这些讨论也是适用的。由此可见,第二介质的引入的直接结果是,沿短板方向有定向的热流,热从低温端被泵向了高温端,而低温端得以致冷。这里需要强调的是,这种定向的热流只发生在第二介质的热附面层内。热附面层外的第一介质在声波作用下,只有绝热的温度振荡和压力振荡,如前所述,这种振荡的振幅很小。

二、热流、功流和效率

先看热流。由于不考虑 x 方向上的热传导作用,所以使热量转移的唯一机理是熵的输运。在热附面层内进行积分计算可得热流:

$$\dot{Q} = \frac{1}{4} \Pi \delta_x u_1 \rho_m c_p \delta T, \quad (1)$$

式中 Π 为短板的横向尺寸, δ_x 为热附面层厚度, u_1 是质点速度振幅, ρ_m 为第一介质平均密度, c_p 为其定压比热, δT 为温度振荡。温度振荡部分是声波的绝热压缩和绝热膨胀作用引起的,部分是介质的平均温度梯度引起的,用公式可表示为

$$\delta T = T_1 - x_1 \nabla T_m = T_1 \left(1 - \frac{\nabla T_m}{T_1/x_1} \right), \quad (2)$$

∇T_m 为温度梯度。在一定情况下,两种作用互相抵消,使 $\delta T = 0$, 这时的温度梯度叫做临界温度梯度:

$$\nabla T_{crit} = \frac{T_1}{x_1}. \quad (3)$$

根据热力学知识,容易推得

$$T_1 = \frac{T_m \beta}{\rho_m c_p} p_1, \quad (4)$$

式中 β 为定压膨胀系数, p_1 为声压振幅。

结合以上各式,并注意到 $x_1 = u_1/\omega$ 的关系,再定义 $\Gamma = \nabla T_m / \nabla T_{crit}$, 可得

$$\dot{Q} = \frac{1}{4} \Pi \delta_x (T_m \beta) p_1 u_1 (1 - \Gamma). \quad (5)$$

(5)式表明: 1. Γ 必须小于 1, 即温度梯度小于临界值时, 才能泵热; 2. \dot{Q} 与 $\Pi \delta_x$ 成正比, 因此除要求第二介质有足够大的几何尺寸外, 还

要求它有较大的热附面层厚度; 3. \dot{Q} 与 $T_m \beta$ 成正比, 这要求第一介质有较高的平均温度和较大的热膨胀系数; 4. \dot{Q} 与 $p_1 u_1$ 成正比, 如短板位于声压或质点速度的节点上, 则 $\dot{Q} = 0$, 这要求把短板放在合适的位置上, 如声压的波腹和节点的中间位置。

再讨论功流。在两个等压过程中, 气团要吸收功或对外作功。功流与声压振幅、体积压缩量或膨胀量及声波频率成正比。经过计算,

$$\dot{W} = -\frac{1}{4} \Pi \delta_x \frac{T_m \beta^2}{\rho_m c_p} p_1^2 \omega \Delta x (1 - \Gamma). \quad (6)$$

式中 Δx 为第二介质的长度。

(6)式表明: 1. 因 $\Gamma < 1$, 所以 \dot{W} 为负, 表示第一介质在实现泵热时吸收外加的功; 2. \dot{W} 与热附面层介质的体积 $\Pi \delta_x \Delta x$ 成正比; 3. \dot{W} 与声压振幅 p_1 的平方成正比。此外, (6)式和(5)式形式十分相似, 这是非常自然和容易理解的。

最后估计一下制冷效率, 这里叫性能系数 COP 其定义为

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}}. \quad (7)$$

由(5)式和(6)式, 得

$$\begin{aligned} \text{COP} &= \frac{\rho_m c_p u_1}{\Delta x \beta \omega p_1} = \frac{T_m}{\nabla T_{crit} \Delta x} = \frac{\Gamma T_m}{\nabla T_m \Delta x} \\ &= \frac{\Gamma T_m}{\Delta T} = \Gamma (\text{COP})_c, \end{aligned} \quad (8)$$

这里 $(\text{COP})_c$ 是温度条件相同时的卡诺循环的性能系数。因为 $\Gamma < 1$, 所以声制冷的性能系数比卡诺循环的小, 只有当 $\Gamma \rightarrow 1$ 时, 声制冷性能系数才接近卡诺循环, 但此时制冷功率也接近为零。实际的制冷性能系数与图 1 中第二介质的几何位置和第一介质的热力学参数有关。当然, 避免各种能量损失对于提高效率起重要作用, 有时起关键作用。

三、一个实验制冷机及其性能

1986年, 美国 Los Alamos 实验室的研究人员成功地推出了一台声制冷实验样机, 它是向实用化迈出的重要一步。样机的重要特点是第二介质的位置选择在靠近声源一端, 这样就

避免了介质环流运动而造成的制冷量的损失。其次还选用亥姆霍兹声共振器代替 1/4 波长管声共振器,进一步降低了能量的粘滞损耗。

样机工作于 540—590Hz 的频率范围,平均压力 10 个大气压,平均温度 255K。图 3 表示其性能的详细测试结果: (1) T_h (热端温度)维持 26°C 时, T_c (冷端温度)与 T_h 的差值和声压相对值 p_1/P_m 的关系; (2) p_1/P_m 为 0.03 时, $T_c - T_h$ 与制冷量 Q_c 的关系。它能达到的最低温度为 198K,在 246K 时,制冷量为 3W,性能系数为卡诺循环的 12%。这个初步的实验样机的性能看来令人满意。

目前声致冷原理已用于红外传感、雷达及其他低温仪器。由于声制冷机没有作往复运动的零部件,因而工作稳定,振动小,它在空间失重状态的制冷设备上,在潜艇低振动制冷设备上都有应用前景,但是,现在所能达到的制冷功率较小,效率也较低。如采用液态丙烯作为第一介质,因其较大的热膨胀系数和较小的体积压缩率,在高压下工作时制冷功率和效率都会显著提高,不仅可以替代传统的氟里昂的制冷机,

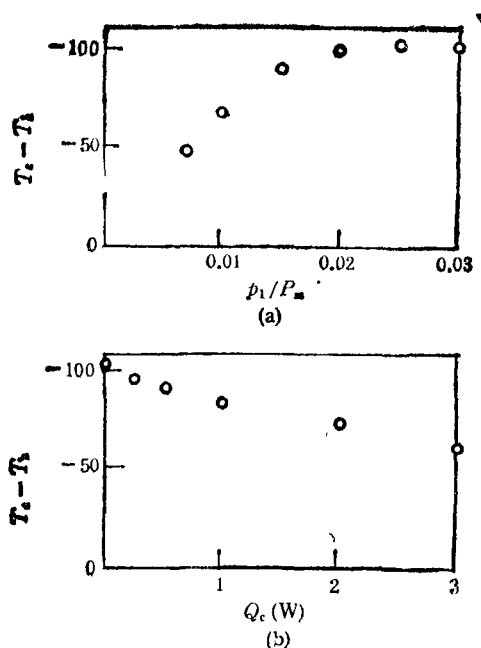


图 3 样机的热声特性

使环境得到保护,而且扩大声致冷的应用范围。

- [1] G. W. Swift, *J. Acoust. Soc. Am.*, 84-4 (1988), 1145.
 [2] John C. Wheatly et al., *Los Alamos Science No.* 14 (1986).

Thermoacoustic Refrigeration and Cryocooler

Dai Genhua

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract

The principle and simple quantitative results of the thermoacoustic refrigeration effect are described. The experimental acoustic cryocooler developed in the Los Alamos National Laboratory of the U. S. A. and its performance are presented as an example.

(上接第59页)

究的比例最大(表 3)。这也从一个方面看出我国物理学研究人才较多。

再从物理学期刊看,1989年,我国被“SCI”选用的期刊有九种,其中三种属物理学杂志[《中国物理》(选择《物理学报》等刊物的论文在美国出版)、《中国物理快报》、《理论物理通讯》],而《中国物理快报》是1989年被新增选的。在我们统计的世界六大检索体系收录的我

国期刊中,被四种以上检索体系收录的期刊有15种,其中属于物理的有三种;如果将《半导体学报》和《红外研究》计入,则占15种的1/3。说明,我国物理学期刊在世界上受到瞩目。

但是,从我国1000多种中文科技期刊上发表的论文的统计看,在各学科中,物理学并不领先,我们认为,要重视同国际的交往,但好的研究成果也应在国内发表,以达到国内同行的更好交流,并起到提高我国刊物的质量的目的。