

频谱很宽,频率很高.目前在加强研究灵敏度能够和压电换能器相当的检测超声用激光干涉仪,这样可以组成遥发遥收超声的系统,对恶劣环境下或生产线上的待测对象,对薄膜材料、异形材料等都将是—种独特的超声检测手段.在原理研究上,对激光超声的产生机理和声学特性都已经有了相当的了解,但还有不少工作要做.在应用上,激光超声有许多优势,但却存在激光设备比较复杂和庞大等问题,在十分需要的场合,这也许可以承受,但为了普及,设备需要简化.

由于频率可以高达 100 GHz 以上,激光超声已挤入开展了多年的超声研究固体物理的领域,这在过去是采用非常薄的压电换能器和微波技术艰难地进行的.这方面的工作刚开始,但内容既包含超声和物质的相互作用,也包含光和物质的相互作用,将—定的前途.

参 考 文 献

- [1] R. J. Dewhurst et al., *Ultrasonics*, **25**(1987), 315.
- [2] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst and S. B. Palmer, *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**(1981), 1362.
- [3] H. L. Telschow and R. J. Conant, *J. Acoust. Soc. Am.*, **88**(1990), 1494.
- [4] Fang Qiping, Bai Yuhai, Ying Chongfu, *Chinese J. Acoustics*, **14**(1995), 289.
- [5] Bai Yuhai et al., *Ultrasonics*, **32**(1994), 323.
- [6] 李志淳,激光超声的热弹激发理论,博士学位论文,同济大学声学研究所,1994年9月,上海.
- [7] J. A. McDonald, *J. Nondestructive Evaluation*, **9**(1990), 223.
- [8] 张鹏智,热的波动模型下固体中激光超声的热弹激发,博士学位论文,中国科学声学研究所,1996年2月,北京.
- [9] Cheng Jianchun, Zhang Shuyi, *J. Appl. Phys.*, **74**(1993), 5718.
- [10] O. B. Wright and V. E. Gusev, *IEEE Trans. UFFC*, **42**(1995), 331.

脉冲管制冷研究进展*

梁 惊 涛

(中国科学院低温技术实验中心,北京 100080)

摘 要 简要介绍了脉冲管制冷机的产生和发展,特别是近年来所取得的突破性进展,揭示了脉冲管制冷原理,并且指出了脉冲管制冷机的应用前景.

关键词 脉冲管, 制冷, 低温, 低温制冷机

Abstract The invention and development of the pulse tube refrigeration, and particularly the breakthroughs achieved in recent years, are briefly reviewed. The principles and potential applications of pulse tube refrigerators are also described.

Key words pulse tube, refrigeration, cryogenics, cryocooler

在许多热工设备中,存在着一个有趣而又常令人烦恼的物理现象,即在内部存在着周期性气体压力波动的连接管道上,往往会沿轴向建立起一个可观的温度梯度.这一现象于 60 年代初被当时正从事制冷机研究的美国 Gifford 教授及其学生 Longsworth^[1]注意到,并由此想到,能否利用这一现象来制成—种新型的

制冷机?他们对—根—端封闭的薄壁圆管从其开口端交替地充放气,使其内部产生周期性的压力波动,于是热便由管子的开口端传输到封闭端,以致于封闭端热得烫手,而开口端温度降

* 本文作者获国际制冷学会首届卡皮查奖(1995年8月于海牙).
1995年11月16日收到.

到了 0℃ 以下. 他们在管子冷端加一个蓄冷器, 把产生的制冷量贮存起来, 并用来预冷进气, 在管子的热端加上一个冷却器, 将其温度保持在室温, 这样就制成了一台新型的制冷机, 他们称之为脉冲管制冷机. 这种制冷机不同于其他机械式制冷机, 它在低温下完全没有运动部件, 因此具有结构简单、振动小、成本低、可靠性高和寿命长等一系列优点, 但是其制冷效率相对较差, 单级无负荷温度最低仅能达到 124 K 左右, 要达到液氮温度(77 K)需要两至三级, 因此在随后的 20 年中并没有引起人们的注意. 在最近 10 年中, 出现了一系列突破, 脉冲管制冷机得到迅猛发展, 已成为国际低温制冷领域的热门前沿课题, 脉冲管制冷技术也已发展成为一种具有广泛用途的高新尖端技术. 中国科学家在脉冲管制冷这 10 年左右的飞跃发展中, 起到了国际公认的重要作用.

1 实验研究

如上所述, Gifford 和 Longsworth 所提出的基本型脉冲管制冷机, 其脉冲管热端是封闭的. 20 年来人们一直没有对它提出疑问. 到了 80 年代初期, 苏联学者 Mikulin 等^[2]首先想到将脉冲管热端开一小孔, 让部分气体可以通过它进入一个容积较大的缓冲气库, 这样既可以改善冷却器的热交换, 又可以增大参加膨胀的气量. 这一思想导致了脉冲管制冷机性能的飞跃. 他们用空气做工质, 初步实验单级达到了 100 K 左右. 这种改进后的脉冲管制冷机称为带小孔脉冲管制冷机. 在图 1 中, 针型阀 V1 和 V2 均关闭时为基本型脉冲管制冷机, V1 开启、V2 关闭时为带小孔脉冲管制冷机.

美国国家标准局(NBS)Radebaugh 博士很快注意到了这一结果并开展脉冲管制冷机研究. 他利用单级带小孔脉冲管制冷机于 1986 年首次达到了 60 K 的最低温度^[3]. 这被认为是脉冲管制冷机所能达到的极限(传统上认为, 脉冲管的制冷效率不可能很高). 此后, Radebaugh 转而研究脉冲管制冷机的小型化和蓄冷

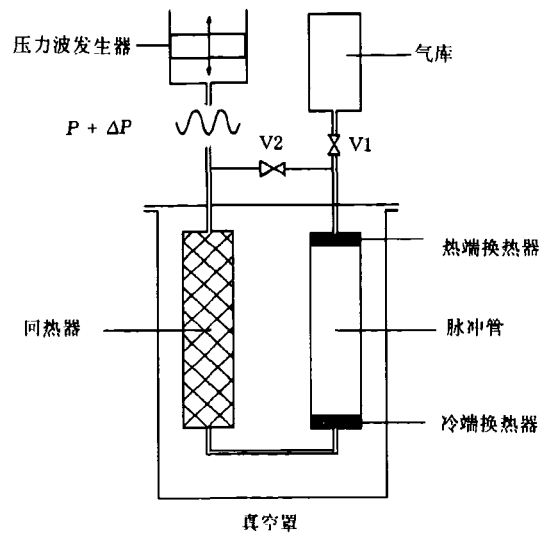


图 1 脉冲管制冷机结构示意图

器的结构材料等应用问题.

中国科学院低温技术实验中心于 1986 年开始脉冲管制冷机研究, 成为当时世界上开展这项研究工作的几个实验室之一. 在洪朝生院士的关心支持下和周远研究员的带领下, 经过深入的理论分析和大量的实验工作, 终于确认脉冲管制冷机是一种大有潜力的低温制冷机, 完全有可能获得更低的制冷温度和更高的制冷效率. 经过不断的改进, 终于在 1989 年初在世界上首次获得了单级脉冲管制冷机达到 49 K 这一最低温度的实验结果^[4]. 这一重要结果在国际权威杂志发表后, 影响了国际低温界. 它再次打破了人们对于脉冲管制冷机的偏见, 使人们认识到了脉冲管制冷机的潜力. 从 1990 年开始, 世界上从事脉冲管制冷机研究的单位从几家发展到几十家, 其中包括 NASA, TRW, JPL 以及休斯公司等著名的高技术研究开发单位, 脉冲管制冷机研究进入了一个新的阶段, 成为世界性的热门课题.

随后, 中国科学院低温技术实验中心和西安交通大学的科技人员在中国科学院低温技术实验中心获得 49 K 低温的实验装置上又联合实现了双向进气这一改进方案^[5], 即将回热器热端和脉冲管热端通过一个流动阻力元件连接起来(图 1 中 V1 和 V2 均开启的情形), 获得

了 42 K 新的最低温度. 在 1992 年中国科学院低温技术实验中心和法国核能总署低温部的联合研究中, 中法学者再创了单级脉冲管制冷机达到 28 K 的世界最低温度纪录^[6]. 这一结果充分显示了脉冲管制冷机的效率已经接近其他类型的机械式制冷机(如 Stirling 和 G-M 制冷机), 并以其发展潜力和在低温下无运动部件的独特优点, 可能在不远的将来取代传统的机械式制冷机. 科学家们已经形成共识, 即脉冲管制冷机是属于 21 世纪的低温制冷技术.

中国科学院低温技术实验中心于近两年来又提出了多路旁通改进方案^[7], 并且在同轴脉冲管研制方面很有特色, 保持世界领先地位. 中国学者在这方面的研究结果在国际上被广为引用和采纳. 迄今, 中国科学院低温技术实验中心在脉冲管方面已获国家发明专利多项, 获美国发明专利一项.

2 工作原理

随着脉冲管制冷机的迅速发展, 迫切需要建立一个既能反映其物理实质, 又能用于设计计算的理论模型. 为此笔者建立了一个完整的理论模型, 并且用大量的实验进行了验证^[8,9].

根据该模型, 脉冲管内的气体可分为两部分: 一部分为靠近脉冲管壁的外层气体, 它们较为强烈地受到管壁的热渗透和粘性影响, 称为热粘层; 另一部分气体位于脉冲管中间柱状空间内, 几乎不受管壁的影响. 这两部分气体的工作机制是不相同的.

热粘层内的气体制冷机制为表面泵热效应, 如图 2 所示. 考虑任意一个气体微元, 它在一个周期的起点位于位置 1, 其温度与管壁达到平衡. 在进气过程(1→2), 脉冲管内压力升高, 气体微团向热端移动, 同时其温度升高. 在高压稳定期(2→3), 脉冲管内压力保持不变, 气体微元将热传给与其邻近的管壁, 并稍微向热端移动, 最后与壁温达到平衡. 在排气过程(3→4), 脉冲管内压力降低, 气体微元向冷端移动, 同时温度降低. 在低压稳定期(4→1), 脉冲管内

压力保持不变, 气体微元从与其邻近的壁面吸收热量, 并稍微向冷端移动, 最终与壁温达到平衡, 回到初始状态 1, 完成一个周期. 由此可见, 在一个周期内, 该气体微元在位置 1→4 之间吸热, 而在位置 2→3 之间放热, 这样热量就从一处被传输到了另一处. 事实上, 热粘层内有无数个这样的气体微元, 它们犹如接力赛一般把热量从脉冲管的一端传输到另一端, 从而产生制冷效果.

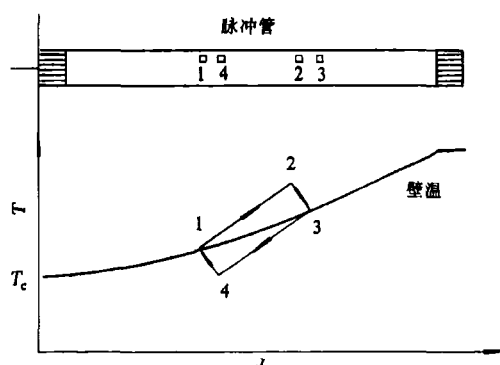


图 2 表面泵热效应示意图

脉冲管中间柱状空间内的气体的制冷机制为气体微元进出脉冲管的热力学非对称效应, 如图 3 所示. 假设进入脉冲管冷端的气体可以纵向被分为很多气体微元, 在每个微元内热力学参数均达到充分平衡. 考虑其中任意一个气体微元, 在进气过程, 它以冷端换热器壁面温度 T_c 进入脉冲管, 并随着脉冲管内压力的升高而向热端移动, 同时温度升高. 在高压稳定期, 它由于脉冲管热端气体通过小孔流向气库而继续向热端移动, 温度保持不变. 在排气过程, 该气体微元随着压力的降低而向冷端移动, 同时温度降低. 由于它在高压稳定期向热端的位移 ($x_1 \rightarrow x_2$), 它在排气过程中, 脉冲管内的膨胀过程要比它在进气过程中脉冲管内的压缩过程更长, 当它回到脉冲管冷端时, 其温度将低于它进入脉冲管时的温度 T_c , 亦即它进出脉冲管的压力温度是不对称的. 这种热力学非对称效应直接导致了脉冲管冷端换热器内制冷量的产生.

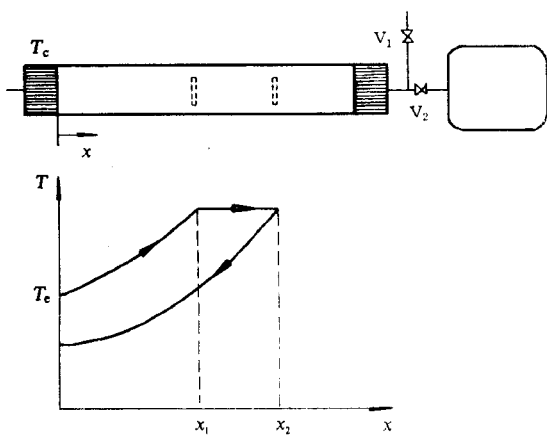


图3 脉冲管热力学非对称效应示意图

通常,上述热力学非对称效应比热粘层内的表面泵热效应产生的制冷量更大.二者之和即给出脉冲管的总制冷量.带小孔脉冲管比基本型脉冲管多了一个制冷效应,即脉冲管中间柱状空间内的热力学非对称效应,因此其性能大大优于基本型脉冲管.

3 应用前景

脉冲管制冷机低温下没有运动部件,特别适合于要求高可靠性和长寿命的场合,因此它首先在军事和航天用的红外器件冷却方面得到应用.美国将于明年进行脉冲管制冷机空

间搭载试验,1997年将实际应用于地球观测卫星(EOS).欧洲宇航局亦准备在2001年将脉冲管制冷机送入太空.在超导冷却方面,中国科学院低温技术实验中心国家超导中心的支持下,已为中国科学院物理研究所等单位研制出数台高温超导实验用的脉冲管制冷机,并将与德国和英国合作研究应用脉冲管制冷机冷却SQUID.此外,在低温电子学、低温外科、低温生物、家用冰箱和空调、冷冻冷藏、天然气液化分离以及化工尾气回收、废能利用等许多方面,脉冲管制冷机都具有广阔的应用前景.

参 考 文 献

- [1] W. E. Gifford and R. C. Longworth, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **86**(1964), 264.
- [2] E. I. Mikulin, A. A. Tarasov, M. P. Shkrebyonock, *Adv. Cryo. Eng.*, **29**(1984), 629.
- [3] R. Radebaugh, J. Zimmerman, D. R. Smith et al., *Adv. Cryo. Eng.*, **31**(1986), 779.
- [4] J. Liang, Y. Zhou, W. Zhu, *Cryogenics*, **30**(1990), 49.
- [5] S. Zhu, P. Wu, Z. Chen, *Cryogenics*, **30**(1990), 514.
- [6] A. Ravex, P. Rolland, J. Liang, *Cryogenics, ICEC, Supplement*, **32**(1992), 9.
- [7] J. Cai, J. J. Wang, W. X. Zhu et al., *Cryogenics*, **34**(1994), 713.
- [8] J. Liang, Ph.D Thesis, CEA/CENG/SBT, Grenoble, (1993).
- [9] J. Liang, A. Ravex, P. Rolland, *Proc. of 19th International Congress of Refrigeration, Vol. III a* (1995), 374.

智能材料发展概述*

姚康德 许美萱 成国祥

(天津大学材料研究中心,天津 300072)

摘 要 文章从仿生、自动调节器(automaton)和信息概念出发,讨论了智能材料的构思.由纳米空间、介相(mesophase)到超分子不同层次的材料结构分析了智能性,从相转变考察了智能材料的刺激响应性,提出了材料表面、界面环境响应性与其智能的相关性.文中展现了智能材料研究与开发的前景.

* 国家自然科学基金资助项目.

1995年4月24日收到初稿,1995年7月12日收到修改稿.