

基于两种理论的新型脉管结构—锥形脉管

高成名,何雅玲,陈钟颀,陶文铨,吴明
(西安交通大学 能动学院热工教研室,陕西 西安 710049)

摘要: 结合热力学和热声学两方面的理论,对脉管制冷机中的脉管的结构进行分析与研究,发现脉管的结构与其内工质的压力和温度的分布有很大的关系,只有使脉管的结构和工质的压力和温度的分布相匹配时,才能够使脉管制冷机的性能达到最佳。在此基础上,提出了两种锥形的脉管结构,并进行了数值模拟和实验上的验证。

关键词: 制冷机;脉管制冷机;锥形脉管;低温工程

中图分类号:TB651

文献标识码:A

文章编号:1006-7086(2001)01-0041-04

A NEW STRUCTURE OF PULSE TUBE BASED ON TWO THEORIES —TAPERED PULSE TUBE

GAO Cheng-ming, HE Ya-ling, CHEN Zhong-qi, TAO Wen-quan, WU Ming

(The School of Power and Energy Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Combined the theories of thermodynamics and thermoacoustics, the structure of the pulse tube – one of the most important components in the pulse tube cryocooler – was analyzed. The function of the structure of pulse tube in the distribution of the gas temperature and pressure along the tube has been found. Two kinds of the tapered pulse tube structures have been proposed accordingly in this thesis and have been investigated numerically. It has been found that there is an optimum cone angle for the tapered pulse tube cryocooler. When the pulse tube cryocooler works on this optimum cone angle, the performance can be improved. The convergent and the divergent tapered pulse tubes were submitted and validated in the numerical simulation and the experiment.

Key words: cryocooler; pulse tube cryocooler; tapered pulse tube; cryogenics

符号说明

A 为截面积; b 为系数; C 为音速; D 为直径; L 为管长; m 为质量; p 为压力; R 为气体常数; T 为温度; V 为容积; w 为角速度; x 为轴向坐标; y 为径向坐标; k 为绝热指数; θ 为锥度。

1 引言

脉管制冷机自问世以来,特别是80年代初期当脉管制冷机的制冷温度可以达到80 K温区的时候,脉管制冷机就越来越被人们所重视。在后来的发展中,脉管制冷机在结构型式上的发展经历了以下一些阶段:基本型、小孔型、双向进气型、多路旁通型、多级型以及最近两年才提出的单级回热并联结构、串联的二级结构、采用长颈管取代小孔进行调相的结构、二级同轴结构、采用双涡流管做换热器的结构以及将第二级脉管做成类似串联的多级结构等。所有这些新型结构的提出都是为了同一个目的:尽可能的提高制冷量,降低制冷温度,改善制冷机的性能。从这些改进中也可以发现一个问题,那就是制冷机的性能改善

收稿日期 2000-11-10

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(59636190),973国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000026303)。

作者简介:高成名(1977-),男,湖北省大悟县人,硕士,主要从事制冷机的数值模拟和实验研究。

了,但是结构却非常复杂,而且制冷机性能的好坏还与结构的调节有很大的关系,使得运行起来也相当复杂,这样就加大了难度。

1997年,本课题组提出了一种变截面脉管制冷机结构^[1],作者对这种结构作了进一步的研究,提出了锥形结构脉管制冷机的模型,并从理论上对锥形脉管进行了详细的分析。

2 锥形脉管制冷机的理论基础

锥形脉管的提出是基于两种不同的理论基础,其一是热力学理论,采用进出口流量的关系来分析得出理论计算值;其二则是目前最新提出的热声理论。根据这两种理论,均可以发现只有当 A 和 T 、 p 满足一定的关系时,制冷机的效果才能够达到最佳。为了简化设计、计算和实验,并没有取 A 和 T 、 p 的分布完全一致,而是采用渐缩和渐扩的锥形脉管结构。

2.1 脉管制冷机的热力学分析

现有的脉管均为一根等截面的圆管,如图 1(a)所示。由文献[2]可知,从回热器流入脉管的流量可分为 3 部分:一部分为制冷分量,与压力同相;一部分为不制冷分量,与压力导数同相;还有一部分是不定相,由温度的导数所决定。如果是升温过程,则属于制冷分量,否则属于不制冷分量。取脉管中任意微元为分析对象,假设脉管内气体为理想气体且压力和温度均匀,并随时间变化,则有

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{out}} &= \dot{m}_i - \frac{dm}{dt} = \\ \dot{m}_i - \frac{d}{dt} \left(\frac{pV}{RT} \right) &= \\ \dot{m}_i - \frac{A\Delta x}{R} \frac{d}{dt} \left(\frac{p}{T} \right) &= \\ \dot{m}_i - \frac{A\Delta x}{RT} \frac{dp}{dt} + \frac{A\Delta x}{RT^2} p \frac{dT}{dt} &= \\ \dot{m}_i - \frac{A\Delta x}{RT^2} \left(T \frac{dp}{dt} - p \frac{dT}{dt} \right) &= \\ f(T, p, A) & \end{aligned} \quad (1)$$

从式(1)可知,对任一微元体,管内的温度分布与面积有一定的对应关系,而这个对应关系与压力场和温度场又有直接的关系。第二项不制冷分量和第三项不定项的共同效果是否制冷则由 $f(T, p, A)$ 符号所决定,也就是 A 和 T 及 p 之间要满足一定的条件,才能使得制冷的项达到最大。如果为负时,则为制冷效果,此时希望该项越大越好,即温度较低的区域,面积应设计的尽可能大,由此提出渐缩的脉管结构,如图 1(b)所示;反之,则为不制冷效果,则希望该项越小越好,由此提出了渐扩的脉管制冷机,如图 1(c)所示。根据分析,采用等截面圆柱管,面积 A 为常数,这显然与脉管内的压力和温度的分布不匹配,对于改善脉管制冷机的性能显然是不利的。为了使得脉管截面积与压力和温度的分布相匹配,作者提出了锥形脉管的两种结构——渐缩型和渐扩型的脉管结构。

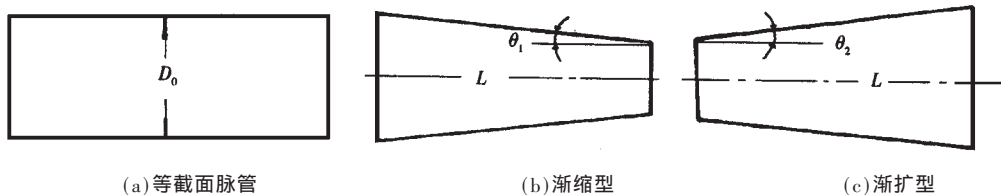


图 1 脉管的几种结构(左端为脉管冷端,右端为脉管热端)

L : 脉管长度; θ_1 、 θ_2 : 锥度; D_0 : 基本直径。

2.2 脉管制冷机的热声理论

对于脉管制冷机而言,脉管中的气体可以看成是一种轻微可压的长活塞,通过该活塞可实现冷端换热器和高温端的小孔之间的压力和速度波动。理想情况下脉管中的气体运动是一个绝热过程,但是在脉管中由于气体的重力及管端的喷射导致产生稳定的或波动的对流换热,从而使得热量从高温端向低温端

通过对流换热、导热等进行热交换,减少了系统的制冷量。考虑到对流是由于流动所驱动的,而在热声学理论中,流动是由于振动现象所驱动的稳定对流的标志。在脉管中,脉管壁的振动边界层中也具有驱动能力,而且在这个边界层中,粘性和换热现象都存在。

为了克服由于脉管壁的流动边界层所引起的热声流现象,最重要的是得出由于热声流现象所导致的脉管壁面的二次流的流量计算公式^[3-5]。考虑到工质是理想气体,则:

$$p = \rho RT, \quad \rho C^2 = kp$$

所用假设如下

$$T(x, y, t) = T_m(x) + \operatorname{Re}[T_1(x, y)e^{i\omega t}] + T_{2,0}(x, y)$$

$$p(x, t) = p_m + \operatorname{Re}[p_1(x)e^{i\omega t}] + p_{2,0}(x)$$

$$u(x, y, t) = \operatorname{Re}[u_1(x, y)e^{i\omega t}] + u_{2,0}(x, y)$$

若采用如图 1(b)所示锥形结构脉管,则取锥度为 θ ,通过推导,可以得出壁面边界层流动的流量计算公式如下

$$m_{2,0} = \frac{|p_1| \langle |u_1| \rangle}{C^2} \left[\left(\frac{3}{4} + \frac{(k-1)(1-bpr^2)}{2pr(1+pr)} \right) \cos \theta + \left(\frac{3}{4} + \frac{(k-1)(1-b)\sqrt{pr}}{2(1+pr)} \right) \sin \theta \right] + \frac{\rho_m \langle |u_1| \rangle^2}{\tilde{\omega}} \left[\frac{3}{4} \frac{dA/dx}{A} + \frac{(1-b)(1-\sqrt{pr})}{4(1+pr)(1+\sqrt{pr})} \frac{dT_m/dx}{T_m} \right] \quad (2)$$

式中的系数 $b = 0.68$ 。

为了抑制脉管中热声流所引起的负面效应,就必须抑制二次流的存在,也就是说式(2)应该等于零才可以真正做到抑制,这样就不难得出

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = - \frac{w |p_1|}{kp_m \langle |u_1| \rangle} \left[\left(1 + \frac{2(k-1)(1-bpr^2)}{3pr(1+pr)} \right) \cos \theta + \left(1 + \frac{2(k-1)(1-b)\sqrt{pr}}{3(1+pr)} \right) \sin \theta \right] - \frac{(1-b)(1-\sqrt{pr})}{3(1+pr)(1+\sqrt{pr})} \frac{dT_m/dx}{T_m} = f(p, u_1, T, \theta) \quad (3)$$

由式(3)不难看出 dA/dx 是与 p 、 u 、 T 、 θ 都有关的一个函数,因此只有当 A 满足这种关系式时,才能真正做到抑制二次流的作用。为了满足公式(3),在设计脉管时就应该考虑到 dA/dx 的变化,也就是说应该使 A 与 p 、 u 、 T 、 θ 的分布相匹配,才能达到改善脉管性能的目的。为了简化设计,基于热声学理论,给出了两种锥形脉管结构,如图 1(b)、(c)。

3 锥形脉管制冷机的计算和实验验证

针对上述两种锥形脉管制冷机,在文献[4~7]中作者采用数值计算和实验的方法进行了研究。结果发现:对于渐缩形锥形脉管,计算结果和不同课题组的实验定性一致,即:计算和实验都发现各自存在一个最佳的锥度,而且在最佳锥度以内变化时,随着锥度的增加,制冷效果会改善,制冷量、制冷系数会增加,最低制冷温度会进一步降低。对于渐扩的锥形脉管,计算结果和本课题组的实验结果相吻合,均存在最佳的锥度、最佳的运行频率。

文献[4~7]充分说明了采用渐缩和渐扩这两种脉管结构的可行性,同时从计算和实验两方面均发现,这两种锥形脉管结构的锥度都不是很大(均在 0.05 rad)。因此,在设计中如何保证其最佳的锥度是非常重要的。

4 结论

分别利用热力学和热声学的理论,对脉管制冷机中脉管的结构进行了分析,两种理论都发现采用与脉管中气体工质的压力和温度分布一致的脉管结构,脉管制冷机的性能可以得到改善。在此基础上,提出

了两种锥形脉管结构——渐缩型和渐扩型的锥形脉管结构。计算和实验研究表明,在一定条件下,这两种锥形脉管结构对于改善制冷机的性能均有利。

参考文献:

- [1] 许成名,何雅玲,陈钟欣.多截面脉管制冷机——一种新型脉管制冷机[J].工程热物理学报,1996,17(2):504.
- [2] Zhu S-W, Wu P-Y, Chen Z-Q. Double inlet pulse tube refrigerator: An important improvement[J]. Cryogenics, 1990, 30: 514 ~ 520.
- [3] EUU SOO JEONG. Secondary flow in basic pulse tube refrigerator[J]. Cryogenics, 1996 36: 317.
- [4] OLSON JR, SWIFTGW. Acoustic streaming in pulse tube refrigerator: tapered pulse tubes[J]. Cryogenics, 1990, 37: 769.
- [5] SWIFT G, ALLEN M, WOOLAN J J. Performance of a tapered pulse tube [R]. NTIS, No: DE98003368/XAB.
- [6] GAO CH-M, HE Y-L, CHEN ZH-Q. Numerical simulation of convergent and divergent tapered pulse tube cryocoolers and experimental verification[C]. JSJS6, Lanzhou, China, 2000, 8: 65.
- [7] XU M-Y, HE Y-L, Gao Ch-M. *et al.* Experimental research of non-uniform cross-sectional pulse tube cryocooler[C]. JSJS6, Lanzhou, China, 2000, 8: 264.

(上接第40页)

参考文献:

- [1] 高福成.食品的干燥及其设备[M].北京:中国食品出版社,1987.
- [2] 施俊良.调节阀的选择[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [3] 阎皓峰.新型换热器与传热强化[M].北京:宇航出版社,1991.
- [4] 杨真.TH-FD55×4食品冻干机自控系统设计及设备性能实验[C].清华大学硕士论文,2000.

会议消息

全国第六届冷冻干燥学术交流会由华中科技大学(原华中理工大学)与上海浦东冷冻干燥设备厂及上海东富龙科技有限公司共同负责组织,于2000年11月26日至28日在上海华南宾馆召开,到会60余人。会议由华中科技大学郑贤德教授主持。会上就国内外冻干技术的现状及发展趋势、冻干机理、冻干工艺、冻干设备等方面的20余篇论文进行了交流,讨论并编印出论文集。经过与会的几位专家认真研究,评选出了4篇优秀论文,分别是华中科技大学赵鹤皋等人撰写的“国产医药用冻干机面临的挑战及技术探讨”,华南理工大学程江等人撰写的“瓶装物料的冷冻干燥研究”;上海理工大学刘占杰等人撰写的“冷冻干燥过程中保护剂对脂质体粒径影响的实验研究”;东北大学郑文利等“冻干大鼠皮肤的实验研究”。

会议还组织参观了上海浦东冷冻干燥设备厂和上海东富龙科技有限公司。

(东北大学徐成海供稿)