

渐缩型锥形脉管制冷机的二维数值研究

赵春风 何雅玲 丁文静 杨卫卫 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 本文开发了二维可压缩交变流动的 SIMPLEC 计算程序, 对渐缩型锥形脉管制冷机进行了二维数值研究, 研究了锥度对脉管制冷机性能的影响。数值计算结果表明, 对渐缩型锥形脉管, 存在一最佳锥度, 此时的制冷效果最好, 当锥度大于最佳锥度时, 制冷效果反而变差。另外本文还从脉管内流场的分布及二次流的角度揭示了锥形脉管能提高制冷机性能的原因及内在机理。一定锥度下的锥形脉管不但可以改变脉管内二次流的大小, 还改变了脉管内二次流的分布情况, 使脉管冷热端的二次流分布变得不均匀。这是一定锥度下的锥形脉管可以改善脉管制冷机制冷效果的主要原因。

关键词 锥形脉管; 二次流; 数值研究

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2006)02-0199-03

TWO DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF TAPERED PULSE TUBE REFRIGERATOR

ZHAO Chun-Feng HE Ya-Ling DING Wen-Jing YANG Wei-Wei TAO Wen-Quan

(State Key Lab of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Two-dimensional numerical simulation of the viscous compressible oscillating flow was carried out for the uniform cross-section and tapered pulse tubes by using a compressible SIMPLEC algorithm code developed by the authors. Effects of the taper angle on the performance of the pulse tube refrigeration were studied. The results showed that there was an optimum taper angle for tapered pulse tube refrigerator. With this optimum taper angle, the refrigerator performance can be improved a lot. But when the taper angle becomes larger than the optimum value, the cooling performance becomes inferior to that of the circular tube. The inherent mechanism of how the tapered pulse tube affects the performance of pulse tube refrigerator was also studied from the view point of second flow distribution in the pulse tube. Compared to the uniform cross-section pulse tube, the values of second flow in tapered pulse tube change a lot and the distribution of second flow becomes uneven as well. This is the main reason that the performance of tapered pulse tube can be improved compared to uniform cross-section pulse tube.

Key words tapered pulse tube; second flow; numerical simulation

1 前言

脉管制冷机是通过对一根绝热空管进行周期性的充气 and 放气过程来获得制冷效果的。与其他低温制冷机如斯特林或 G-M 制冷机相比, 脉管制冷机具有相对较大的脉管空容积及更加复杂的泵气系统, 从而在脉管空腔内带来了一些附加流动: 如二次流、DC 流、自然对流等。这些附加流动影响了脉管内气体工质的层流运动, 削弱了脉管制冷机的制冷效果。抑制上述附加流动是提高脉管制冷机性能的一种比较有用的方法。

1993 年, Lee 等首次提出了锥形脉管结构^[1]。

Olson 等通过理论分析指出锥形脉管可以抑制二次流, 并得到了一最佳锥度^[2]。He 等对锥形脉管制冷机进行了一维数值研究和实验研究^[3]。Baek 等通过求解线性化的二维控制方程研究了锥形脉管对二次流的抑制作用^[4]。Shiraishi 等用可视化方法观测了锥形脉管制冷机内的二次流^[5]。文献 [2,4] 仅给出了壁面附近二次流的大小。文献 [5] 虽直接观测了脉管内的二次流, 但由于所取锥度范围的局限性一些实验结果与文献 [3] 相悖。本文开发了二维可压缩交变流动的 SIMPLEC 计算程序, 对渐缩型锥形脉管进行了研究, 在较宽的锥度范围内研究了锥度

收稿日期: 2005-12-10; 修订日期: 2006-01-09

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (No.50425620)

作者简介: 赵春风 (1981-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事低温制冷机和强化传热方面的研究。

对制冷量的影响, 并从场的角度研究了渐缩型锥形脉管对二次流的影响, 找出了锥度影响渐脉管制冷机性能的内在机理。

2 物理模型及数值求解方法

本文的计算模型如图1所示。采用二维圆柱坐标系, 对脉管及冷、热端换热器全场进行数值模拟。等截面脉管的长度 L_p 为 88 mm, 半径为 5 mm。渐缩型锥形脉管的长度和容积分别与等截面脉管的长度和容积相同。

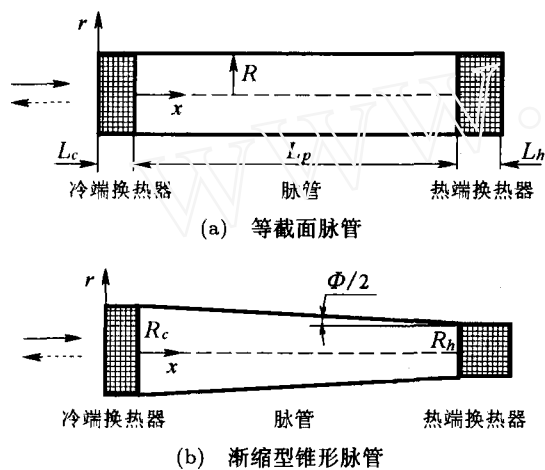


图1 计算模型

描述脉管内可压缩交变流动的控制方程为:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} (\mu \operatorname{div} V) - \frac{\mu v}{r^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \operatorname{div} V) \quad (3)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v T)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} = \frac{1}{c_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{c_p} \left(\beta T \frac{DP}{D\tau} + \phi \right) \quad (4)$$

其中, β 为容积膨胀系数, 对于理想气体, $\beta = 1/T$; ϕ 为粘性耗散系数。

对于上述计算模型, 边界条件的设置如下: 脉管入口(左端)压力为正弦变化, $p_{in} = p_0 + p_d \sin(\omega\tau -$

$\pi/2)$, 入口温度为 T_c ; 计算区域的右端为封闭端; 上壁面绝热; 冷热端换热器中的气体工质的温度分别保持为定值 T_c 和 T_h 。

对于图1所示的计算区域, 沿 x 和 r 方向分别划分为 200 和 80 个网格, 一个周期划分为 360 个时层。判断迭代收敛的指标有两项: 时层收敛和周期收敛要求。有关数值计算方法参考文献 [6]。

3 计算结果及讨论

图2给出了系统压比为 2.1、制冷温度 240 K、系统频率为 10 Hz 时, 制冷量与锥形脉管锥度间的关系。从图上可以看出, 在相同运行参数下, 不同锥度的渐缩型锥形脉管其制冷量不同, 且存在一个最佳值。对本文所研究的渐缩型锥形结构, 最佳锥度约为 0.105 rad。在一定的锥度范围内, 增大锥度可以改善脉管制冷机的制冷效果, 但当锥度过大时, 制冷效果反而比等截面的要差。这也与 Olson 的实验结果 [2] 定性吻合。

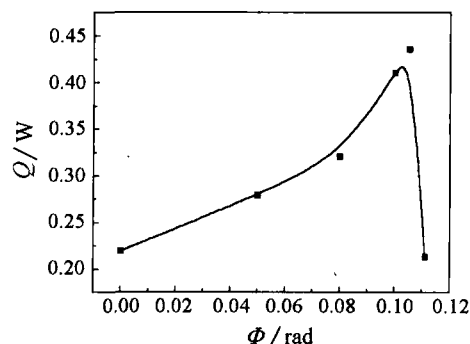


图2 锥度与制冷量的关系

图3给出了不同锥度下脉管内周期平均的流量分布情况。图中各节点的流量是将一个压缩与膨胀周期内各节点的质量流量周期平均后得到的时均值。在脉管的不同位置处, 各节点的时均流量的大小和方向均不相同, 在脉管内形成了一些复杂的漩涡, 此即为二次流。二次流影响了脉管内气体工质的层流运动, 削弱了脉管制冷机的制冷效果。从场的角度来看, 本文认为二次流对脉管制冷机性能影响的大小不仅取决于二次流的大小, 而且与分布的均匀度有关。二次流数值上越小, 对制冷越有利。在二次流大小相同的情况下, 分布越不均匀, 对制冷越有利, 这是因为当二次流在脉管内分布的不均匀时, 部分区域内的二次流被加强, 部分区域内被削弱, 这样二次流只是破坏了局部区域的温度梯度, 对脉管整场的影响相对较小。在评价二次流对脉管制冷机性能影响时, 上述两方面应综合考虑。

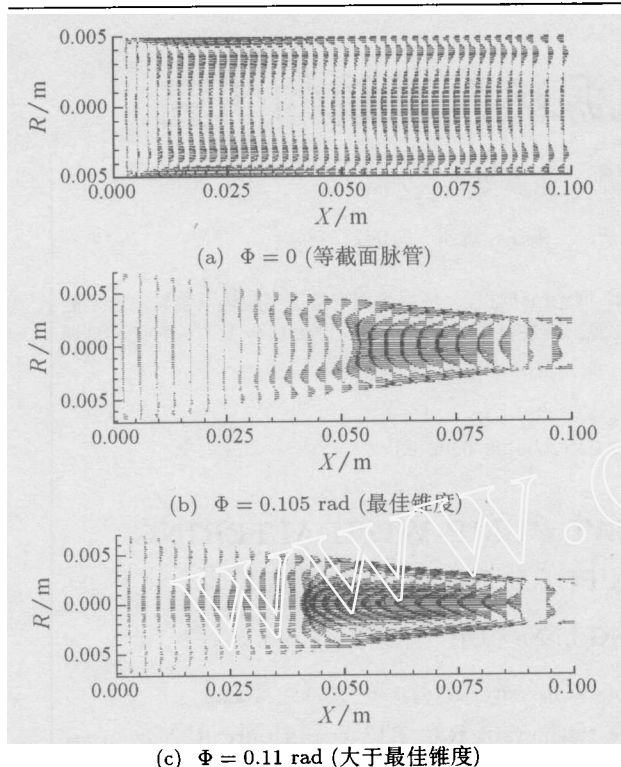


图3 脉管内时均流量分布情况(二次流)

从图3可以看出,对于等截面脉管,脉管全场内的二次流分布比较均匀;而对于锥形脉管,脉管冷端和热端的二次流分布相差较大,即锥形脉管改变了脉管内二次流的分布的均匀度。由图3(a)和图3(b)可知,虽然锥形脉管热端附近的二次流与等截面脉管相比有所增强,但由于它只是加速了热端附近的气体工质的掺混,破坏了热端附近的温度梯度,而冷端附近由于二次流的减弱,使得冷端附近的温度梯度得以保持,所以此时的整体制冷效果优于等截面脉管的制冷效果。由图3(b)和图3(c)可知,当脉管锥度大于最佳锥度时,脉管全场内的二次流都有所增强,尤其是热端二次流增强很多,因此此时的制冷效果不如最佳锥度时的制冷效果。

为了定量的比较锥度对二次流的影响,我们定义一 \$SF\$ 数来衡量一定区域内二次流的强弱:

$$SF = \frac{\sum_x \sum_r \sqrt{(\rho u)_{tav}^2 + (\rho v)_{tav}^2}}{N}$$

式中, \$(\rho u)_{tav}\$、\$(\rho v)_{tav}\$ 分别为各节点 \$x\$ 和 \$r\$ 方向的时均流量值, \$N\$ 为指定区域的总节点数。由上式可知,一区域内的二次流越强,则 \$SF\$ 数越大。

图4给出了脉管区域内 \$SF\$ 数随锥度的变化情况。由图4可知,对于整个脉管区域, \$SF\$ 数随锥度的增加先减小,后增大,在锥度约为 \$0.06\$ rad 时达到最小值。即当锥度较小时,锥形脉管对脉管全场内的二次流有一定的抑制作用,但当锥度较大时,

脉管全场内的二次流反而增强了。当脉管锥度为最佳值 \$0.105\$ rad 时,脉管全场内的二次流并未取得最小值,反而比等截面脉管还要强。这也进一步说明了评价二次流对脉管制冷机性能影响时,仅用二次流的大小是不全面的,还应考虑二次流的分布。

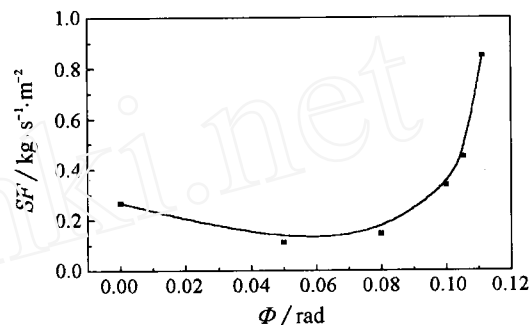


图4 脉管区域内 \$SF\$ 随锥度的变化关系

4 结 论

本文对渐缩型锥形脉管进行了二维数值研究,计算结果表明:

(1) 在相同的运行参数下,渐缩型锥形脉管存在一最佳锥度,此时制冷量最大,当锥度大于最佳锥度时,制冷效果反而变差。

(2) 脉管内存在着二次流现象,这是影响脉管制冷机制冷性能的一个不利因素。锥形脉管不但可以改变脉管内二次流的大小,还改变了脉管内二次流的分布,使脉管冷热端的二次流分布变得不均匀。这是锥形脉管可以改善脉管制冷机制冷效果的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Lee J M, Kittel R, Timmerhaus K D, et al. Flow Patterns Intrinsic to the Pulse Tube Refrigerator. In: Proc. 7th Int. Cryocooler Conf.. 1993. 125-139
- [2] Olson J R, Swift G W. Acoustic Streaming in Pulse Tube Refrigerators: Tapered Pulse Tubes. Cryogenics 37, 1997, 769-776
- [3] He Y L, Gao C M, Xu M Y, et al. Numerical Simulation of Convergent and Divergent Tapered Pulse Tube Cryocoolers and Experimental Verification. Cryogenics 41, 2001, 699-704
- [4] Baek S H, Jeong E S, Jeong S. Two Dimensional Model for Tapered Pulse Tubes. Part 3: Unsteady Components of Second-Order Mass Flux and Temperature. Cryogenics 42, 2002, 485-493
- [5] Shiraishi M, Ikeguchi T, Murakami M, et al. Visualization of Oscillatory Flow Phenomena in Tapered Pulse Tube Refrigerators. Advances in Cryogenic Engineering, 2002, 768-775
- [6] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001