

基本型脉管制冷机的全三维数值模拟计算

丁文静 何雅玲 陶文铨

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

摘要 建立了基本型脉管制冷机的三维物理和数学模型, 在可压缩流动程序的基础上, 开发了基本型脉管制冷机的三维非稳态可压缩交变流动与传热耦合计算的数值模拟计算程序。考察了截面平均参数在一个周期内随时间的变化情况, 详细分析了脉管内的流场和温度场以及其他各主要参数的变化, 对脉管制冷机的工作过程和制冷机理有了进一步的了解和认识, 为脉管制冷机的结构改进和实用化奠定了一定的基础。

关键词 脉管制冷机; 三维; 流场; 温度场

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)05-0737-04

THREE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF THE BASIC PULSE TUBE REFRIGERATOR

DING Wen-Jing HE Ya-Ling 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 Three-dimensional physical and numerical model of the pulse tube and heat exchangers in the basic pulse tube refrigerator (PTR) was set up in this paper. The compressible and oscillating fluid flow and heat transfer phenomenon in the pulse tube was numerically investigated using a self-developed code. Some cross-section average parameters variations such as velocity, temperature and pressure waves etc during one cycle were revealed. The variations of velocity and temperature distributions in the pulse tube were also analyzed in detail for the further understanding of the working process and refrigeration mechanism of PTR.

Key words basic pulse tube refrigerator; three dimensional; flow field; temperature field

1 引言

脉管制冷机由于无常规回热式制冷机的低温运动部件, 从根本上解决了冷腔振动、磨损等问题, 可望实现长寿命运行, 目前已成为最具有发展前途的小型低温制冷机之一^[1]。

数值模拟是研究脉管制冷机的有效理论分析方法之一, 目前文献上报道的大都是建立在一维数值模拟基础上的理论分析^[2~3]。实际上, 脉管制冷机内工质的流动过程是交变流动过程, 热力、传热、流动相互耦合, 制冷机理复杂, 应被表征为二维甚至三维的数理模型更为合理。例如, 其内部存在的 DC 流、二次流等现象, 就无法用一维数学模型进行解释。为了更深入研究脉管制冷机的制冷机理, 进一步提高整机制冷性能, 建立脉管制冷机的多维模型是十分必要的。目前美国 NASA 的 Ames 研究中心, 已

建立了简化的脉管制冷机二维物理模型, 其计算结果与实验结果较为吻合^[4], 但是其研究的方法和理论从未公开。日本、韩国、德国、法国、荷兰等发达国家^[5~7]也将脉管制冷机的研究列为关键基础技术。在我国, 脉管制冷机理论模型还停留在一维阶段, 理论和试验之间的误差仍较大。

本文首先在可压缩程序的基础上, 开发了适用于脉管制冷机的全三维可压缩交变流动数值计算程序, 然后通过计算分析了脉管制冷机内的速度、温度及其他各主要参数的变化, 分析了一维模型无法揭示的二次流现象, 并通过脉管内温度滞后现象的讨论揭示了脉管制冷机的制冷机理。

2 物理模型

基本型脉管制冷机主要由压缩机、回热器、冷

收稿日期: 2006-01-25; 修订日期: 2006-07-16

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (No.50425620)

作者简介: 丁文静 (1978-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要从事计算传热学、低温制冷机的研究。

端换热器、脉管和热端换热器所组成。脉管制冷机内的流动是可压缩交变流动，流动过程和制冷机理都比较复杂，所以本文计算模型做如下简化处理：

(1) 在计算模型中未考虑回热器的影响，这样并不影响对脉管制冷机基本工作过程的模拟计算，又大大简化了计算过程。

(2) 计算区域的进口赋予正弦压力波作为压力的边界条件，如式 (1) 所示。

$$p_{in} = p_{av} + p_d \sin(\omega\tau + \phi) \quad (1)$$

式中， p_{av} 是不随时间变化的平均压力， p_d 是动态压力的幅值。

(3) 进口压力的变化能迅速影响全场，即压力在脉管内的传播不需要时间。由于压力波是以当地音速传播的，所以相对于速度（一般小于 10 m/s）而言，脉管内压力波的传播是基本不需要时间的。

(4) 假设冷、热端换热器为理想换热器。

通过上述简化处理，本文脉管制冷机的计算模型可简化为图 1 所示。

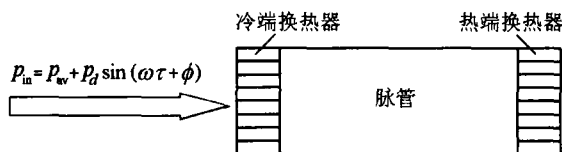


图 1 脉管制冷机三维数值计算的简化模型

3 控制方程

$\theta-r-z$ 是三维圆柱轴对称坐标系的三个坐标。

θ 为圆周方向坐标， r 为径向， Z 坐标是从脉管冷端指向热端的轴向坐标。三维圆柱轴对称坐标系下的非稳态控制方程以及各方程的广义源项分别如下。

三维非稳态流动的连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho V_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

θ 、 r 、 Z 三个坐标方向的动量方程及能量方程的通用表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \phi)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho V_\theta \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho V_r \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z \phi) = \\ \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Gamma r \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\frac{\Gamma}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + S \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) 中 ϕ 为通用变量，代表 u, v, w 和 T ， Γ 为广义扩散系数， S 为广义源项，具体表达式如表 1 所示。

表 1 动量方程和能量方程的源项表达式

$$\theta \quad S_U = \frac{1}{3r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\mu \text{div} V) + \frac{2\mu}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{\mu V_\theta}{r^2} - \frac{\rho V_\theta V_r}{r} + \rho g_\theta \quad (4)$$

$$r \quad S_V = \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} (\mu \text{div} V) - \frac{2\mu}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{\mu V_r}{r^2} + \frac{\rho V_\theta^2}{r} + \rho g_r \quad (5)$$

$$Z \quad S_W = \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \text{div} V) + \rho g_z \quad (6)$$

$$T \quad S_T = \frac{1}{c_p} (\beta T \frac{Dp}{D\tau} + \phi) \quad (7)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} (\frac{\partial \rho}{\partial T})_p, \phi \text{ 为粘性耗散系数}$$

本文在 SIMPLEC 程序的基础上，开发了适用于脉管制冷机的全三维可压缩交变流动数值模拟计算程序。计算中边界条件设置如下：

对于温度： $Z=0, T_c = \text{const}; T_{\text{冷端换热器}} = \text{const}; T_{\text{热端换热器}} = \text{const}; r=R, \frac{\partial T}{\partial r} = 0$ 。

对于速度： $Z=L, r=R, u=v=w=0$ 。

4 计算结果及讨论

4.1 截面平均参数在一个周期内的变化

计算中取冷端换热器壁面温度 $T_c=240$ K，热端换热器壁面温度 $T_h=300$ K；计算频率为 10 Hz；计算工质为氦气。

图 2 为一个周期内截面平均压力随时间的变化图。由图 2 知，在脉管内压力波的滞后基本上观察不到，全场压力几乎相等，这和计算中所采用的进口压力变化迅速影响全场的假设相吻合。在整个脉管计算区域，压降相对于压力的绝对值是很小的量，基本可以忽略。

图 3 为一个周期内截面平均速度随时间的变化图。由图 3 可知，从脉管冷端（入口端）到热端（封闭端）截面平均速度逐渐变小，体现了脉管中流体的逐次压缩性，这与实际工况相符。

图 4 为脉管制冷机轴向不同截面上平均温度随时间的变化曲线。从图 4 可知，脉管截面平均温度沿轴向的分布具有以下特点：(1) 在靠近冷端位置，温度随时间变化平缓，在靠近热端区域温度变化幅度较大。(2) 脉管冷端温度在一个计算周期内，有时高于冷端换热器温度，有时低于冷端换热器温度；从数值上可以看出，温度低于冷端换热器的幅值较大，高于冷端换热器温度的幅值较小，这也是产生周期制冷量的必要条件。(3) 就常规流动而言，在压缩过程中，工质应该在热端换热器内放出热量；在膨胀过程中，脉管冷头工质温度应该低于冷端换热器设定温度，此时在冷端换热器内有冷量产生。而实际上在脉管制冷机压缩过程的起始阶段，脉管热端温度仍低于热端换热器设定温度，没有热量传

出; 在膨胀过程的起始阶段, 脉管冷端温度反而高于冷端换热器温度, 也没有冷量在冷端换热器产生。由图 4 可以清楚地看出, 在脉管内压缩放热和膨胀吸热效果具有滞后性, 其压缩和膨胀效果大约滞后 $1/4$ 个周期才能体现出来。

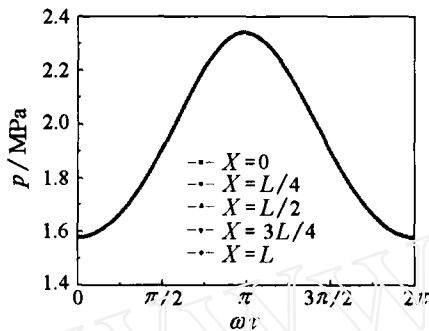


图 2 不同截面上平均压力的瞬时变化

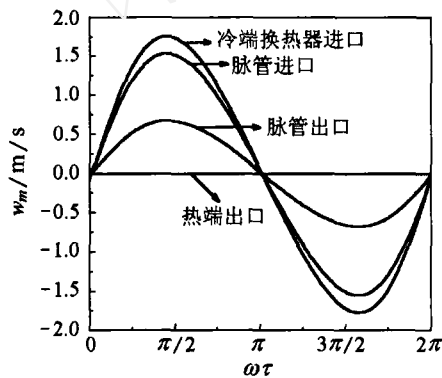


图 3 脉管内不同截面平均速度的变化规律

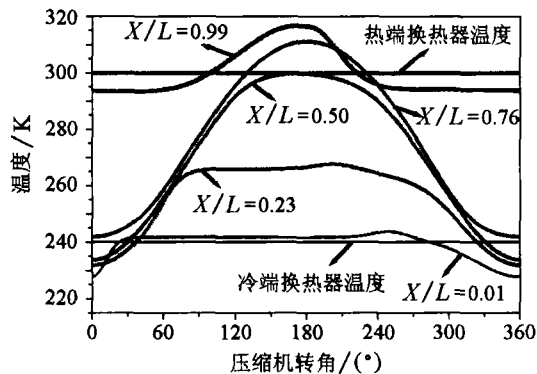


图 4 一个周期内脉管轴向不同截面上平均温度随时间的变化曲线

4.2 纵截面速度场的分布

图 5 给出了脉管纵截面周期平均质量流量的分布。由图 5 可看出, 脉管周期平均质量流量并不等于零, 在全场存在较复杂的流动分布, 具体存在以下特点: (1) 壁面处速度和常规流动不同, 常规流动壁面处速度较小, 而在脉管内的交变可压缩流动中壁面处存在相对较大的轴向流速; (2) 全场明显存在多个较大的回流区, 称为二次质量流动, 这是

引起脉管内流体扰动的主要原因; (3) 脉管的轴向中间位置是反向流速的交汇点, 即周期静流量滞止点, 也是能量损失的最大部位; (4) 轴向速度沿径向的分布比较复杂, 不同轴向位置分布不同, 在同一轴向位置, 轴向速度沿径向也多次改变流向; (5) 壁面处周期平均质量流量和中心区域反向, 且数值上相差较大。综上所述, 脉管可压缩交变流场的分布非常复杂, 不仅存在二次流动, 还存在多处速度的转向区域, 使流体扰动大大加强, 严重破坏了脉管内流动的层流特性, 不利于保持脉管冷热端的温度梯度, 也不利于脉管制冷机制冷效果的发挥。在实际应用中应采取结构改进等措施来避免这种现象。

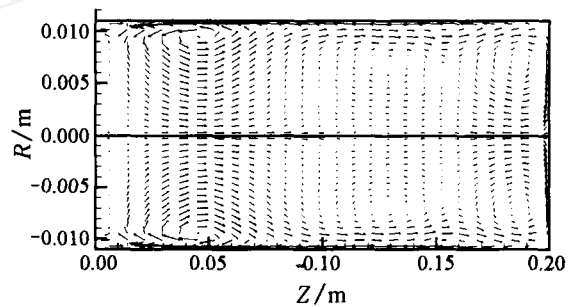


图 5 纵截面周期平均质量流量分布图

4.3 纵截面温度场的分布

图 6 为一个周期内不同计算时刻纵截面温度场的分布情况 (τ 表示计算时间, t_0 表示计算周期, k 为整数)。由图 6 可以看出, 一个周期脉管内温度的分布随轴向位置和时间都非常复杂, 具体来说有以下主要特点。

由图 6(a) 可知, 在靠近冷端换热器附近, 温度梯度很大, 这是因为冷端换热器采用了理想换热器模型, 流体由脉管出口进入冷端换热器时, 温度瞬时由 228 K 达到 240 K, 此时冷端换热器内有冷量产生。脉管靠近热端大约 $1/3$ 计算区域的流体温度梯度较大, 逐渐由冷头温度 240 K 升高到热端换热器温度 300 K。

由图 6(b) 可知, 在 $\tau = kt_0 + t_0/4$ 时刻, 脉管在靠近冷热端换热器的区域具有较大的温度梯度, 在脉管中间部分温度梯度较小。此时, 脉管中工质的温度还未高于热端换热器温度, 工质的热量还没有通过热端换热器向外传出。但此时流体已被压缩了 $1/4$ 个周期, 工质的压缩放热效果还未体现出来, 称这种现象为脉管内压缩放热的温度滞后现象。

由图 6(c) 可知, 在 $\tau = kt_0 + t_0/2$ 时刻, 在靠近脉管热端大约 $1/2$ 的区域, 流体的温度均高于热端换热器的温度, 最高温度达到 320 K, 即工质通过热端换热器向外界散热。

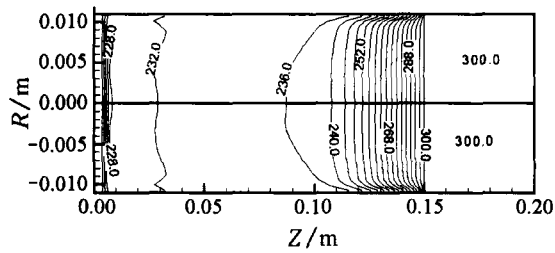
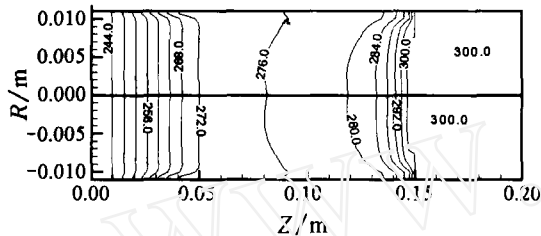
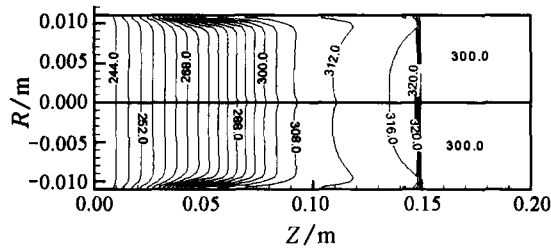
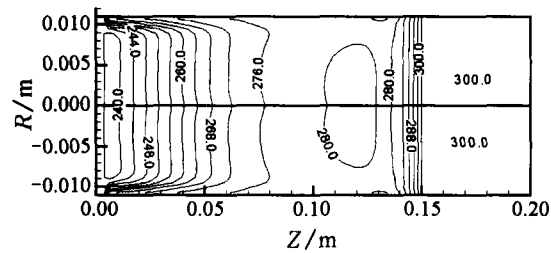
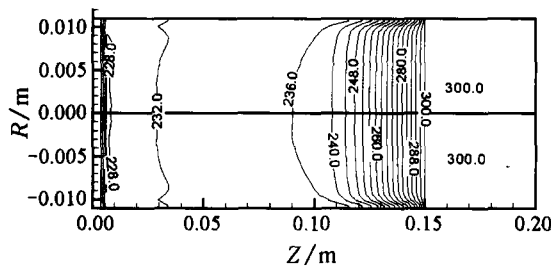
(a) $\tau = kt_0$ (b) $\tau = kt_0 + t_0/4$ (c) $\tau = kt_0 + t_0/2$ (d) $\tau = kt_0 + 3t_0/4$ (e) $\tau = kt_0 + t_0$

图6 一个周期内不同计算时刻纵截面温度场的分布

由6(d)可知,在 $\tau = kt_0 + 3t_0/4$ 时刻,靠近冷端换热器区域的流体温度梯度较大,在脉管中间

部分温度变化平缓。此时整个脉管内没有出现高于热端换热器设定温度的流体,也没有出现低于冷端换热器设定温度的流体,但流体已经膨胀了1/4个周期,工质的膨胀吸热效果还没有体现出来,称这种现象为脉管内膨胀吸热的温度滞后现象。

由6(e)可知,在 $\tau = kt_0 + t_0$ 时刻,脉管内温度场的分布和初始时刻完全相同。说明程序的周期性收敛条件能很好地得到满足。

5 结论

本文开发了适用于基本型脉管制冷机全三维数值计算的可压缩交变流动数值计算程序,通过计算详细地分析了脉管内的流场和温度场以及其他各主要参数的变化情况,得出如下主要结论:

(1) 脉管内纵截面速度场的分布非常复杂。不仅存在二次质量流动,还出现多处流动转向区域,这种复杂的流动现象,恶化了脉管内的流动特性,不利于保持脉管内流动的层流特性和冷热端较大的温度梯度。

(2) 在脉管内的压缩、膨胀过程中,出现了高于热端换热器温度的流体区域,也出现了低于冷端换热器温度的流体,这是脉管制冷机制冷效应产生的基础。

(3) 脉管内压缩放热和膨胀吸热效应有滞后性,其效果大约滞后1/4个周期才能体现出来。

参 考 文 献

- [1] 何雅玲. 分置式斯特林制冷机及脉管制冷机性能改进的理论与实验研究: [博士论文]. 西安: 西安交通大学, 2002
- [2] Wang C, Wu P Y, Chen Z Q. Numerical Modelling of An Orifice Pulse Tube Refrigerator. *Cryogenics*, 1992, 32(9): 785-790
- [3] Ju Y L, Wang C, Zhou Y. Dynamic Experimental Investigation of A Multi-Bypass Pulse Tube Refrigerator. *Cryogenics*, 1997, 37(7): 357-361
- [4] Lee J M, Kittel P, Timmerhaus K D, et al. Steady Secondary Momentum and Enthalpy Streaming in the Pulse Tube Refrigerator. In: 8th International Cryocooler Conference. Vail, Co., 1994
- [5] Willems D W J, Dam J A M. Three-Dimensional Pulse Tube Simulations. *Advances in Cryogenics Engineering: Proceeding of the Cryogenics Engineering Conference*. Susan Breon, 2002. 934-941
- [6] Yoshikazu H, Masahide M. Numerical Study of Gas Dynamics Inside of a Pulse Tube Refrigerator. *Advances in Cryogenics Engineering*, 2000, 45: 167-174
- [7] Takao K, Hiromi K, Yasuyuki T, et al. Numerical Analysis of Heat and Fluid Flow in Pulse Tube Refrigerator. *JSME Series B*, 2003, 46(4): 572-578