

文章编号: 1672-8785(2017)07-0042-06

自由室温活塞型脉管制冷机 调相机构设计和实验研究

周志坡^{1,2} 蒋珍华¹ 朱海峰^{1,2} 杨 森^{1,2} 张安阔¹ 吴亦农¹

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 采用自由室温活塞取代惯性管及气库作为脉管制冷机 (Pulse Tube Cryocooler, PTC) 调相机构, 不仅可以减小调相机构的体积, 还可以提高其制冷性能。为了研究自由室温活塞对脉管制冷机性能的影响, 设计加工了一台自由室温活塞脉管制冷机, 并进行了实验研究。结果表明, 在输入功不变的情况下, 运行频率增大时, 压缩活塞和自由室温活塞的位移相位角增大, 压缩活塞与自由室温活塞的扫气容积之比增大; 充气压力增加时, 位移相位角增大, 扫气容积比减小。研究结果对自由活塞型脉管制冷机的设计及优化具有重要指导意义。

关键词: 自由室温活塞; 调相机构; 充气压力; 工作频率

中图分类号: TB6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.07.007

Phase Shifter Design and Experiment Study of a Free Warm Piston Pulse Tube Refrigerator

ZHOU Zhi-po^{1,2}, JIANG Zhen-hua¹, ZHU Hai-feng^{1,2}, YANG Sen^{1,2}

ZHANG An-kuo¹, WU Yi-nong¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To use a free warm piston instead of both an inertance tube and a buffer as the phase shifter of a Pulse Tube Cryocooler (PTC) not only can reduce the volume of the phase shifter, but also can improve the performance of the PTR. To study the influence of the free warm piston on the performance of the PTC, a free warm piston PTC is designed and studied experimentally. The results show that for a constant input power, when the working frequency increases, the displacement phase difference between the compressor piston and the free warm piston increases and the swept volume ratio of the compressor piston over the free warm piston increases. When the charging pressure increases, the displacement phase difference increases and the swept volume ratio decreases. The results are of great significance to the design and optimization of free warm piston PTCs.

Key words: free warm piston; phase shifter; charging pressure; working frequency

收稿日期: 2017-03-23

作者简介: 周志坡 (1991-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事红外探测用低温机械制冷机研究。

E-mail: zhouzhipozu@163.com

0 引言

脉管制冷机冷端因为没有运动部件, 与斯特林制冷机相比, 它的运行寿命长、可靠性高、冷指处振动小, 目前被广泛应用于红外探测器、超导等领域。自 1964 年 Gifford 和 Longsworth^[1] 发明基本型脉管制冷机以来, 人们已经研究出多种类型的脉管制冷机。1994 年, Kanao 等^[2] 首次利用惯性管作为一台高频脉管制冷机的调相器, 目前该方法应用最广。然而惯性管无法自由调节冷端换热器处速度波和压力波的相角差, 而且当惯性管入口处的声功很小时, 调相作用很小, 甚至无法达到调相所需的角。主动调相可以实现更大范围的相位调节, 达到调相所需的角。1988 年, 日本大学 Matsubara^[3] 等提出移动活塞式脉管制冷机, 通过在脉管热端处添加移动活塞, 用主动调相的方式实现了更大范围的相位调节以提升制冷性能。1992 年, Ishizaki Y 等^[4] 进一步对热端移动活塞结构进行了实验研究, 无负荷制冷温度最低达到 23.5 K, 是当时世界上报道的单级脉管制冷机制冷温度的最低记录。2001 年, 英国牛津大学的 Brito and Peskett^[5,6] 对自由室温推移活塞做了数值模拟和实验分析研究, 由于实验条件的限制, 制冷温度未能达到 80 K。2015 年, 王晓涛等^[7] 提出了一种斯特林 / 脉管复合型制冷结构, 其脉管热端活塞为气动型驱动活塞。在 290 W 输入功下可获得 26.4 W@80K 的制冷量, 整机的相对卡诺效率高达 24.2%。

本文对斯特林脉管制冷机调相机构进行了重新设计, 并采用自由室温活塞作为脉管制冷机的调相机构, 搭建了测试自由室温活塞型脉管制冷机性能的测试平台。实验研究了不同制冷温度、频率及充气压力对制冷机性能的影响。压缩活塞位移与自由活塞位移相位 (位移相位差) 和压缩机扫气容积 / 气动活塞扫气容积 (扫气容积比) 是设计自由气动活塞的两个关键影响因素。因此本文对其在不同制冷温度、频率及充气压力下的变化规律进行了实验研究。

1 理论分析

理想情况下, 脉管制冷机制冷量的计算公式为

$$Q_c = \langle P\dot{V} \rangle = \frac{1}{2} |P| |\dot{V}| \cos \varphi = \frac{1}{2} RT \frac{|P|}{P_0} |\dot{m}| \cos \varphi \quad (1)$$

式中, P 、 \dot{V} 、 \dot{m} 分别表示瞬时波动压力、体积流率、质量流; φ 表示压力波和质量流之间的相位角, R 为气体常数, P_0 为充气压力, T 为温度。 φ 为 0 时, 压力波与质量流同相位, 制冷量最大; φ 为 90° 时, 制冷量为 0; 可见压力波与质量流之间的相位角对制冷量有关键性的影响。

对于高频脉管制冷机, 一般地认为在回热器的中央处质量流与压力波同相位, 回热器的流动损失最小, 制冷机的综合性能最佳, 此时回热器热端的质量流超前压力波为 30° 左右, 冷端的质量流滞后压力波约为 30°, 脉管热端的质量流滞后压力波约为 60°^[8]。为了实现此相位关系, 必须对调相机构进行优化设计。

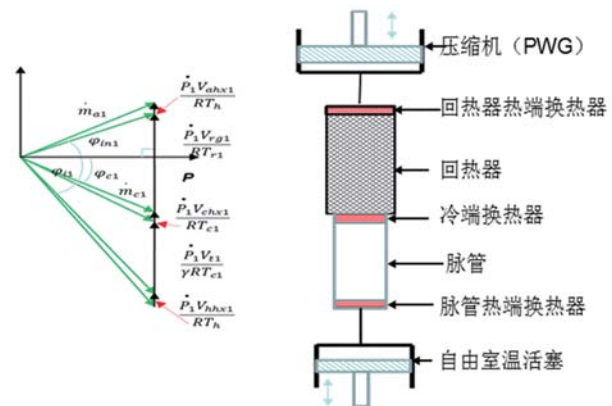


图 1 自由室温活塞型制冷机的相位关系图

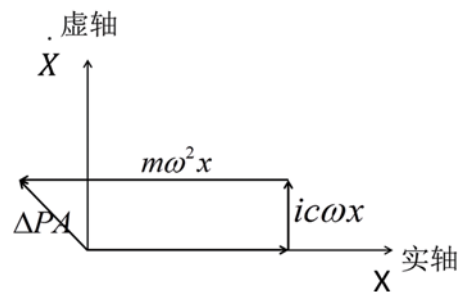


图 2 自由活塞的受力矢量关系图

图 1 为典型的自由室温活塞型脉管制冷机整机的相位关系图。压缩机和冷指部分的结构参数已确定,因此只有通过设计调相机构参数,才能使整机的相位关系达到合理分布。本文所设计的自由室温活塞作为制冷机的调相机构连接于脉管热端,使得脉管制冷机在低温下无运动部件,由压缩机所产生的周期性压力波驱动。自由活塞的受力关系如图 2 所示。图 2 中, K 为自由室温活塞支承弹簧的弹簧刚度, ω 为角频率, A 为活塞截面积, ΔP 为压差, m 为自由室温活塞的动子质量, c 为阻尼系数, x 为自由室温活塞的位移。自由室温活塞及其支承弹簧组成一个受迫振动系统,形成的阻尼力能产生合适的相位差,使整机达到合理的相位分布。为了产生合适的相位差,须对动子的质量、活塞的截面积与支承弹簧的刚度进行合理的设计。

2 自由室温活塞的设计

图 3 为弹簧刚度固定在 3500 N/m 时,不同活塞截面积的动子质量对制冷系数 COP 的影响。数值模拟中,冷头温度固定在 84 K 不变,充气压力为 3.2 MPa,工作频率为 50 Hz。根据图 3 可知,不同的活塞截面积时均可获得最优动子质量,使 COP 达到最大,且最大 COP 值基本相同。最优动子质量随着活塞截面积的增大而增大,活塞的截面积越大,动子质量的变化对整机 COP 变化的影响越小。

图 4 是在活塞截面积保持不变、不同动子质量下制冷机 COP 随弹簧刚度的变化。由图 4 可知,最优的弹簧刚度随着动子质量的增大而增加;每组动子质量对应最优弹簧刚度时制冷机 COP 取得的最大值;制冷机达到最优性能时制冷系数 COP 基本相同。如图 4 所示,在相同动子质量和活塞截面积时,弹簧刚度的变化对整机 COP 的影响很小(相比于动子质量和活塞截面积的变化)。在模拟弹簧刚度范围内,整机 COP 只改变了 1.5%。弹簧刚度变化对整机相位变化的影响很小,而动子质量和活塞截面积的改变会使整机相位发生变化,从而导致整机 COP 发生变化。

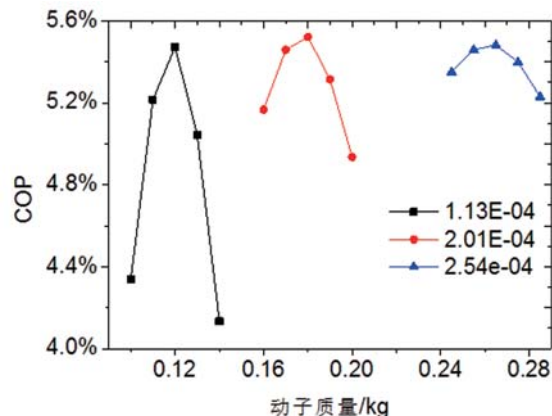


图 3 不同的活塞截面积时 COP 随动子质量的变化

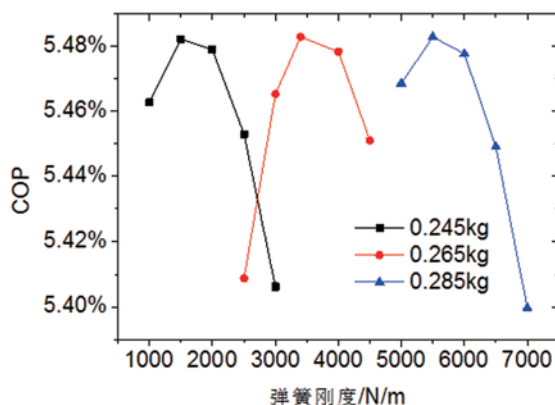


图 4 不同的动子质量时 COP 随弹簧刚度的变化

根据图 3 和图 4, 可通过选取合适的动子质量、弹簧刚度以及活塞截面积获得制冷机的最佳性能。本文研制的自由室温活塞采用板弹簧, 活塞的截面积为 2.54×10^4 , 弹簧刚度为 3400 N/m, 动子质量为 0.265 kg。在此设计条件下, 用数值模拟软件分析冷指处的相位关系, 得到的结果是, 回热器热端处的质量流领先压力波 28.31° , 冷端处的质量流落后压力波 29.88° , 脉管热端处的质量流落后压力波 62.38° , 各处的相位角与理想值相差不大。此时压缩活塞与自由室温活塞的位移相位角为 110° , 扫气容积比为 2.98。

3 实验装置简介

图 5 为自由室温活塞型脉管制冷机的实验装置图。整个系统包括三个部分, 一是压缩机部分, 采用直径为 20 mm 的对置式线性活塞压缩机, 为系统提供不同功率和频率的压力波;

二是冷指部分, 包括回热器热端换热器、回热器、冷端换热器、脉管以及脉管热端换热器; 三是调相机构, 与惯性管型脉管制冷机不同, 脉管制冷机热端用自由室温活塞代替惯性管与气库, 以提供质量流与压力波之间合适的相位角, 由直径为 18 mm 的线性活塞压缩机 (截面积为 $2.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) 改装而成。利用线性差动式位移传感器测量压缩活塞的位移和自由室温活塞的位移相位角, 测量值可以准确地在示波器中显示出来。制冷机的冷头温度 TC 由 Pt-100 型电阻式温度传感器测量。在冷头上紧贴加热片, 通过用直流电源进行加热模拟热负荷。将整个冷指置于真空罩内, 真空度需保持在 10^{-4} Pa 以下。

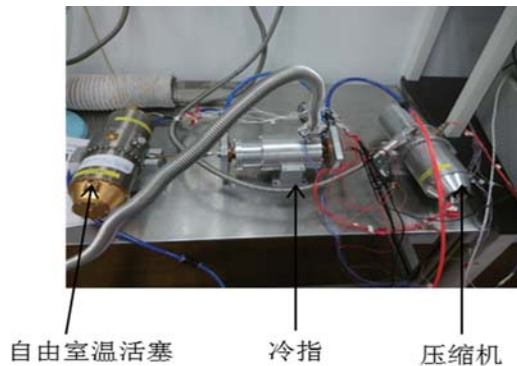


图 5 自由室温活塞脉管制冷机的实验装置图

4 实验结果与分析

本制冷机是基于一台现有的压缩机及制冷机的参数, 通过设计优化调相机构使它们相匹配的。回热器热端的水冷温度为 300 K, 压缩机的冷却方式为强制风冷。

4.1 频率对制冷机性能的影响

图 6 是充气压力为 3.2 MPa 时, 制冷机在固定输入功和冷头温度不变的条件下, 不同频率时制冷量的变化情况。制冷量和 COP 随运行频率的增加先增加后下降, 最优频率在 50 Hz 附近, 制冷量和 COP 均达到最大值。由图 7 可得, 压缩机与气动活塞之间的位移相位差随着频率的增大逐渐增大, 当运行频率从 44 Hz 增大到 56 Hz 时, 位移相位差增大了近 38° 。由此可见, 运行频率的改变对位移相位差的影响极大; 频率增

大时, 压缩活塞的位移基本不变, 扫气容积比随之逐渐增大。为了分析频率的改变对制冷机综合性能的影响, 借助数值模拟软件, 可清楚地看到制冷机内部的相位关系图。分别取三个不同频率 (44 Hz、50 Hz、56 Hz), 当频率从 44 Hz 变到 56 Hz 时, 回热器入口的质量流基本不变, 回热器入口的质量流与压力波相位角增大, 冷端的质量流逐渐变小, 冷端的质量流与压力波相位角差值增大。为了减少回热器的损失, 回热器中央处的质量流应该与压力波同相, 此时制冷机的效率最高。图 8 显示的是相位关系及质量流的大小, 分别取三个不同位移相位角, 经三角关系公式计算, 可得图 9 所示的相位关系变化图。频率为 44 Hz 时, 质量流与压力波在回热器入口处同相位, 如图 9 长划线所示。频率为 56 Hz 时, 质量流与压力波在回热器出口出同相位, 如图 9 圆点线所示。频率为 50 Hz 时, 冷端质量流落后

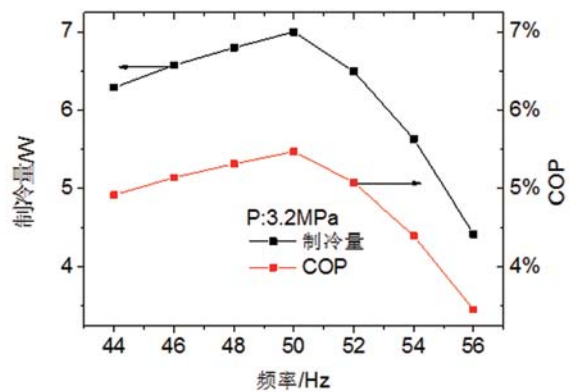


图 6 制冷量与 COP 随频率的变化

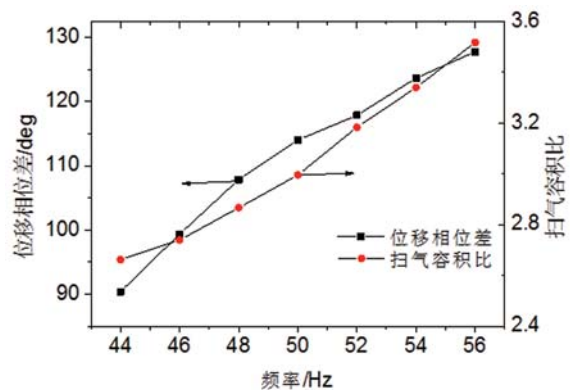


图 7 位移相位差与扫气容积比随频率的变化

压力波约 30°，质量流与压力波在回热器中央处同相，如图 9 实线所示，此时制冷机的效率最高。

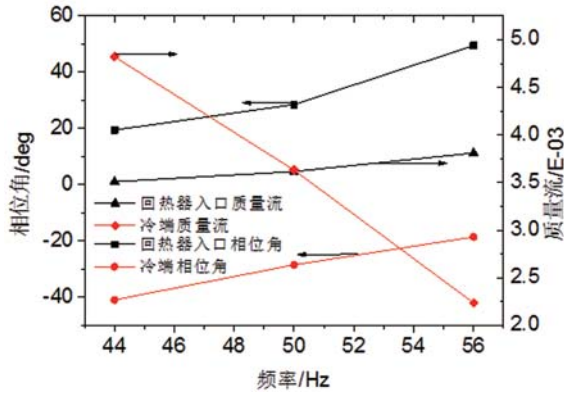


图 8 质量流、压力波与质量流相位角随频率的变化

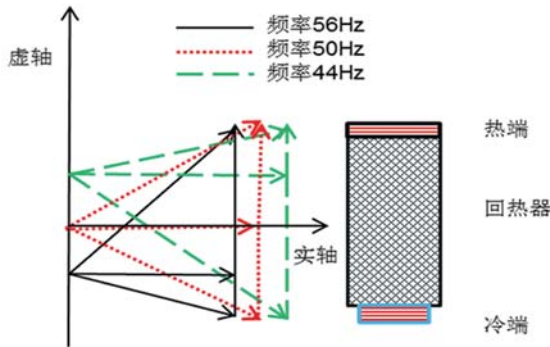


图 9 回热器冷热端相位关系分布图

4.2 充气压力对制冷机性能的影响

图 10 是自由室温活塞型脉管制冷机整机 COP 随充气压力和频率的变化趋势。由图 10 可知，充气压力为 3.4 MPa、频率为 54 Hz 时 COP 最大。而充气压力为 3.2 MPa 时，整机的最优频率为 50 Hz；充气压力增高，最优频率增大。充气压力为 3.4 MPa 时，整机 COP 低于 3.2 MPa。充气压力增大时，压缩机偏离了谐振状态，压缩机的效率降低。在相同的输入电功下，压缩机出口的 PV 功减少，制冷性能下降。相同的制冷温度和频率时，位移相位角的变化很小。压力增大时，自由室温活塞所受的气体力增大，压缩活塞的位移减小，气动自由活塞的位移增大，扫气容积减小。

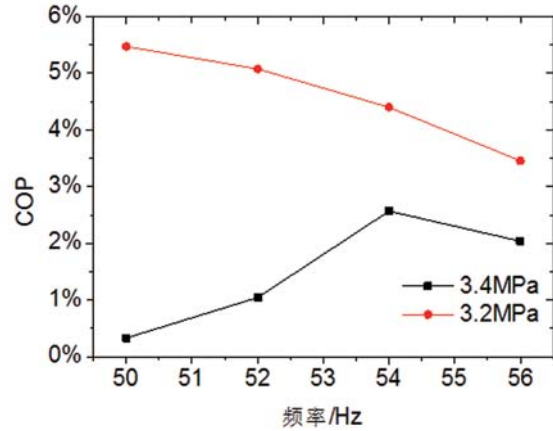


图 10 不同充气压力及频率下 COP 对比

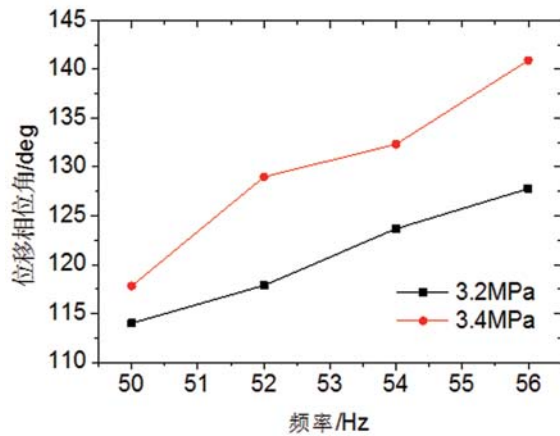


图 11 不同充气压力及频率下位移相位角对比

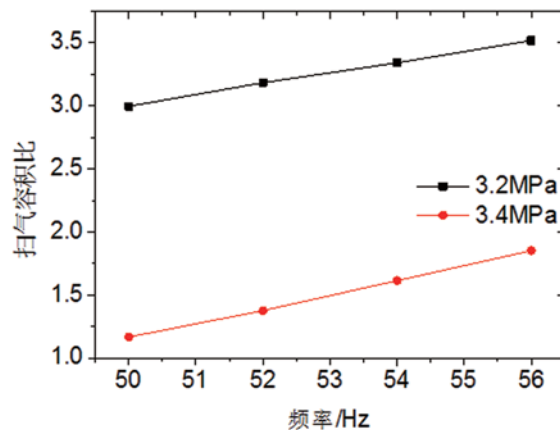


图 12 不同充气压力及频率下扫气容积对比

4.3 惯性管型与自由室温活塞型脉管制冷机的制冷性能对比

图 13 为自由室温活塞型脉管制冷机与原惯性管型脉管制冷机 (最优惯性管的直径小于 4.5 mm) 的对比。针对设计的 84 K 温区，相同实验

状况及相同输入功条件下, 自由室温活塞型的制冷量为 7.1 W@84K, 惯性管型的制冷量为 5.4 W@84K, 制冷性能提高了约 30%。制冷温度从 80 K 上升至 200 K, 自由室温型脉管制冷机的性能均优于惯性管型脉管制冷机。制冷量随着制冷温度的增加而增大; 比卡诺效率随着制冷温度的增大先增加后减小。由图 14 可知, 在输入功不变的情况下, 制冷温度由 80 K 增大到 220 K 时, 制冷机中氦气的平均温度逐渐升高, 位移相位角逐渐增大, 由 115° 增大到 125°。温度升高, 气动活塞的行程增大, 扫气容积比减小, 由 3.1 减小到 2.4。

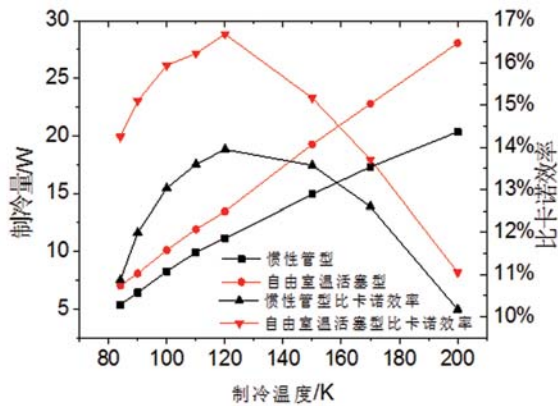


图 13 不同温度下制冷量与比卡诺效率的对比

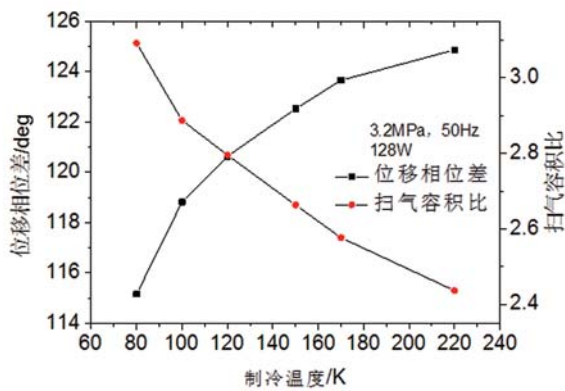


图 14 位移相位角及扫气容积比随制冷温度的变化

5 结论

验证了将自由室温活塞作为脉管制冷机的

调相机构的可行性, 并对其进行了实验研究。得到如下结论: (1) 针对设计的 84 K 温区, 在相同实验条件下, 将其与惯性管型脉管制冷机进行了对比测试, 自由室温活塞脉管制冷机的比卡诺效率提高了 30%; (2) 随着频率的增大, 位移相位差和扫气容积比增大, 最佳频率使整机 COP 达到最大。(3) 不同的充气压力对应不同的最佳工作频率, 压力增大时, 位移相位角增大, 扫气容积比减小。(4) 制冷温度从 80 K 升到 200 K, 自由室温活塞型脉管制冷机的性能均优于惯性管型脉管制冷机; 位移相位角由 115° 增大到 125° 时, 扫气容积比减小。

参考文献

- [1] Gifford W E, Longsworth R C. Pulse Tube Refrigeration[J]. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of ASME*, 1964, **86**(3):264-270.
- [2] Kanao K, Watanabe N, Kanazawa Y. A miniature Pulse Tube Refrigerator for Temperature Below 100 K [J]. *Cryogenics*, 1994, **34**:167-170.
- [3] Matsubara Y, Miyake A. Alternative Methods of the Orifice Pulse Tube Refrigerator[C]. *International Cryocooler Conference 05*, 1988.
- [4] Ishizaki Y, Ishizaki E. Experimental Performance of Modified Pulse Tube Refrigerator below 80 K down to 23 K[C]. *Proceedings of the 7th International Cryocooler Conference, New Mexico*, 1992:140-146.
- [5] Brito M C, Peskett G D. Numerical Model of Free Warm Expander Pulse Tube Cooler[J]. *Cryogenics*, 2001, **41**:751-755.
- [6] Brito M C, Peskett G D. Experimental Analysis of Free Warm Expander Pulse Tube[J]. *Cryogenics*, 2001, **41**:757-762.
- [7] Wang X, ZHANG Y, LI H, et al. A High Efficiency Hybrid Stirling-pulse Tube Cryocooler[J]. *AIP Advances*, 2015, **5**(3):037127.
- [8] Radebaugh R. Pulse Tube Cryocoolers for Cooling Infrared Sensors[C]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4130**:363-379.