

文章编号:0253-4339(2013)04-0001-04
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.04.001

液氢温区单级高频多路旁通型脉冲管制冷机

陈六彪^{1,2} 周强^{1,2} 金海^{1,2} 王俊杰¹ 周远¹ 朱文秀¹

(1 中国科学院低温工程学重点实验室 理化技术研究所 北京 100190; 2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 为了确保制冷机的工作温度降到液氢温区且具有稳定性,开展了仅采用长颈管,不使用双向进气进行调相的单级高频多路旁通型脉冲管制冷机的实验研究。首先用数值计算的方法获得了多路旁通开度是否最佳的判据,然后进行了实验。结果表明:研制出的制冷机在充气压力 1.73MPa,输入电功 220W 时,无负荷最低制冷温度能够降到 23.6K,为目前所报道的在没有双向进气时单级高频脉冲管制冷机获得的最低温度。在达到稳定状态后,制冷机性能稳定,温度波动幅值小于 0.1K。在 220W 输入电功下,能够在 29.2K 获得 0.516W,34.3K 获得 1.0W 的制冷量。

关键词 脉冲管制冷机;实验研究;多路旁通

中图分类号:TB651 **文献标识码:**A

Single-stage High Frequency Multi-bypass Pulse Tube Cryocooler
Operating in Liquid Hydrogen Temperature

Chen Liubiao^{1,2} Zhou Qiang^{1,2} Jin Hai^{1,2} Wang Junjie¹ Zhou Yuan¹ Zhu Wenxiu¹

(1. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100190, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract In order to get the cooling temperature to the liquid hydrogen temperature and guarantee the temperature stability at the same time, experimental investigation on single-stage high frequency multi-bypass pulse tube cryocooler (PTC) without double-inlet is carried out. A criterion that determines whether the opening of the multi-bypass is optimum or not, is achieved by numerical simulation firstly. At present, the cooler has reached the lowest temperature of 23.6K with an electric input power of 220W, which is the reported lowest temperature for single-stage high frequency PTC without double-inlet. The fluctuations are below 0.1K after reaching its stable state, which is much smaller than that of other double-inlet PTCs. The cooler typically provides 0.516W at 29.2K and 1.0W at 34.1K with the input power of 220W.

Keywords pulse tube cryocooler; experimental research; multi-bypass

高频脉冲管制冷机的发展不仅追求制冷温度的进一步降低,而且对制冷机的运行稳定性也提出了更高的要求。双向进气^[1]的引进显著改善了脉冲管制冷机的性能,但由于双向进气中存在着的闭合回路会诱发直流问题,导致制冷机性能的不稳定^[2-3],限制了它在一些温度稳定性要求高的场合的应用^[4-6]。目前,在一些要求获得 30K 以下制冷温度的应用场合,一般采用多级结构。多级结构有气耦合和热耦合两种,但不论是气耦合还是热耦合,多级结构一般都需要两套调相设备,由于多级形式这种复杂的结构,较大的体积和较高的生产成本限制了其进一步的发展

和应用。周远提出的多路旁通方案是获得更低温的一个有效途径^[7],多路旁通结构是从蓄冷器中段分离出一股气流直接进入脉冲管的中段,结构上有点类似于二级结构,但多路旁通型脉冲管制冷机只采用一个压缩机驱动,只需要一套调相设备,这相对于多级结构制冷机来说,系统简单,结构紧凑,比较易于工程化。因此在实际工程化应用中,为了进一步降低制冷机温度,同时能够确保制冷机的温度稳定性,在采用双向进气不合适的环境下,开展单级结构的高频多路旁通型脉冲管制冷机的研究就显得尤为重要。

为了确定多路旁通的最佳开度,首先通过数值计

基金项目:国家自然科学基金(51176198)及中国科学院科研装备项目(YZ2009-48)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51176198) and Equipment for Science Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. YZ2009-48).)

收稿日期:2012 年 9 月 4 日

算,从理论得到判断多路旁通开度是否最佳的判据。在多路旁通开度最优化后,对制冷机的性能参数进行了测试和分析。

1 数值计算

数值计算采用 DeltaEC6.2 软件,DeltaEC6.2 是由美国 Los Alamos 国家实验室的 Bill Ward 和 Greg Swift 等人编写的一套热声模拟计算程序。用户给定各个模块后,DeltaEC 针对不同模块的一维方程进行积分,由当地参数求得每个模块对应的压力、温度和体积流值,并结合整个装置中两个部件相连接点的匹配得到整个装置的压力、温度和体积流值。对于阀门,小孔这类元件,用户通过阻抗值这个参数来定义孔或阀的流动阻力,DeltaEC 是默认其为对称元件的^[8]。

数值模拟的步骤和具体参数可查阅文献[9],图 1 是数值计算结果,阻抗值越大,意味着阀或孔的开度越小。从图中可以看到,在多路旁通开度小于其最佳值时,双向进气是能够进一步降低制冷机温度的,此时,双向进气存在着一个最佳开度。当多路旁通开度大于或等于其最佳开度后,制冷温度随着双向进气开度的增大而单调上升。因此可以通过逐渐增大多路旁通的开度,逐步减少双向进气的进气量,直到双向进气完全关闭时获得的温度最低来确定多路旁通的最佳开度。

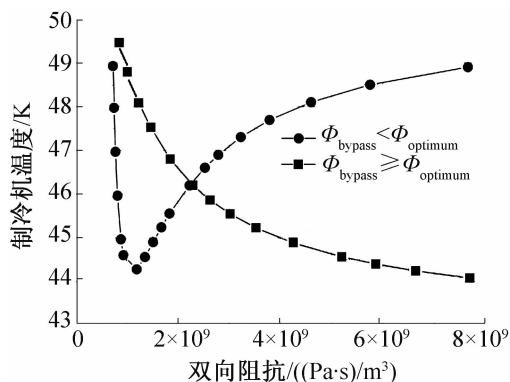


图 1 双向进气与多路旁通关系数值计算结果
Fig. 1 Simulation results of the relation of double-inlet and multi-bypass

2 制冷机结构及实验装置

为了结构紧凑,方便用户使用,制冷机采用同轴结构,脉冲管和压缩机直接耦合成一体,长颈管盘藏在气库里,气库置于压缩机上。其结构如图 2 所示。对于同轴结构的脉冲管制冷机,多路旁通通过在脉冲管上打孔实现。脉冲管热端安置已经调试的比较对称的双向针阀,用来判断旁通孔开度是否最佳。压缩

机型号为 TC2221,由中科院理化所制冷和低温工程中心提供,频率在 35 ~ 50Hz 可调,输入功率小于 320W。压缩机前腔和背腔安装 JYB-G 压力传感器和 PCB 压力传感器,用以测量平均压力和动态压差。脉冲管冷端安装铍铁温度计,精度为 0.1K。多路旁通处安装 PT100 温度计测量旁通处的温度。压力和温度由 NI 板卡采集后传送到计算机,通过 Labview8.6 编制的程序显示和存储。

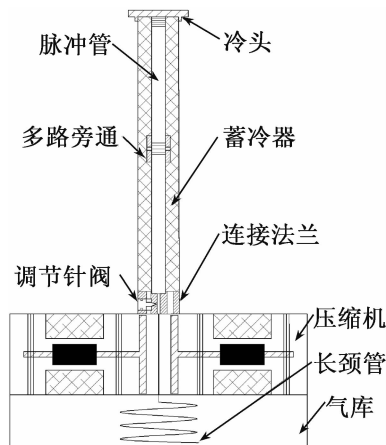


图 2 单级同轴脉冲管制冷机结构示意图
Fig. 2 Schematic of the single-stage coaxial pulse tube cryocooler

3 实验结果与讨论

实验过程先参照上述数值计算结果对多路旁通孔开度大小进行优化,在旁通孔取得最佳值以后,对制冷机的性能参数进行了测试和分析。

3.1 旁通孔开度的优化

旁通孔开度实验优化过程如图 3 所示,图中开度从左到右依次增大,开度 1 最小,开度 4 最大。从图中可以看到,实验结果与数值计算结果相类似。在开度 1 时,双向进气使制冷温度降低了 5.5K,在较大的开度 2 时,无双向进气时制冷温度有进一步的降低,但同时双向进气只使制冷温度降低了 0.8K,当旁通孔开度增大到更大的开度 3 时,无双向最低温度达到了最低值 23.6K,此时打开双向进气阀(5°),双向进气开始恶化制冷机性能,制冷温度反而上升了 1K,当多路旁通孔继续增大到开度 4 时,无双向最低温度升至 37.4K,此时打开双向进气阀,制冷温度也同样迅速上升,制冷机性能显著变差。因此,最终确定开度 3 为多路旁通的最佳开度。

3.2 降温速率及温度稳定性

图 4 是制冷机的一个典型降温曲线,该制冷机 20min 能够降到 35K 以下,在 60min 左右达到稳定状

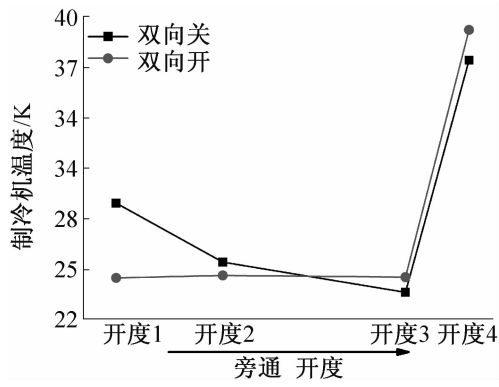


图 3 旁通孔开度实验优化过程

Fig. 3 Experimental process of the opening of multi-bypass

态。从图中可以看到,制冷机达到稳定状态后,性能比较稳定,温度波动幅值小于 0.1 K,远远小于有些采用双向进气结构的脉冲管制冷机 1~2K,甚至更高的波动幅值^[10]。

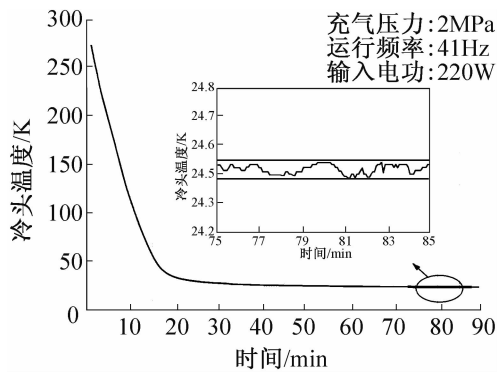


图 4 降温速率及温度稳定性

Fig. 4 Typical cool-down curve and temperature stability of the developed PTC

3.3 充气压力对制冷机的影响

由图 5 可以看到,充气压力对于制冷机的性能影响较大。随着充气压力的降低,制冷机的最低温度先有一定程度的下降,在 1.73MPa 时获得最低温度 23.6K,当压力继续下降时,温度开始上升。原因为该制冷机蓄冷器仅采用不锈钢丝网作为填料,当温度低于 60K 后,不锈钢比热迅速下降,蓄冷能力显著降低。当气体充气压力过高时,通过蓄冷器的工质质量流量增加,蓄冷器换热负担过重,不利于温度的进一步降低。当充气压力过低时,工质气体绝热膨胀产生的冷量不足已冷却蓄冷器,导致蓄冷器蓄积的冷量不足,从而也制约制冷机温度的降低。另外,过低的充气压力也会造成压缩机效率的下降。

图 6 是制冷机的制冷功率曲线,制冷量通过电加热冷头的方式测量,在 1.90MPa 的典型充气压力,220W 的输入电功下,该制冷机能够在 29.2K 提供

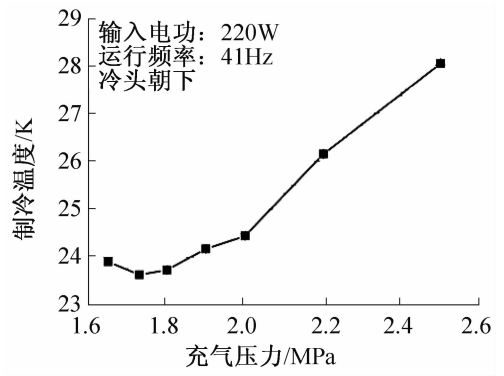


图 5 充气压力与制冷温度关系实验结果

Fig. 5 Experimental results of the relation of the filling pressure and cooling temperature

516mW,在 34.3K 提供 1W 的制冷量。从图 5 和图 6 中可以看出,较低的充气压力有助于获得较低的制冷温度,较高的充气压力有助于获得较高的制冷量,当然,相对于降低压力导致制冷温度降低而言,适当的降低压力在较低温度时也能一定程度的提高制冷量。

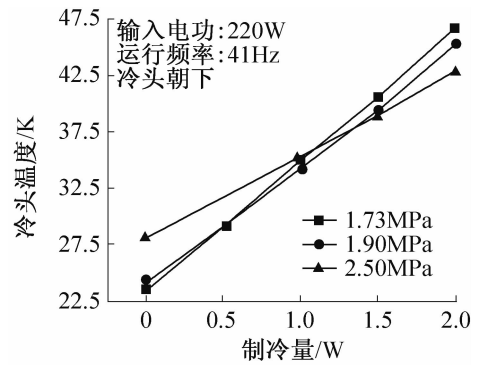


图 6 制冷机在不同充气压力下的制冷量

Fig. 6 The cooling capacity of the developed PTC with different charge pressure

3.4 运行频率的影响

图 7 是频率对制冷温度的影响曲线,制冷机在 41Hz 时取得最低温度。运行频率对制冷机的影响一方面表现在对压缩机效率的影响上,当运行频率与压

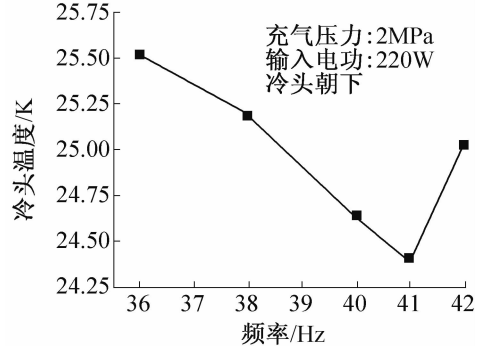


图 7 最低温度随频率变化关系

Fig. 7 Effects of the frequency on cooling temperature

缩机的谐振频率趋于一致时,压缩机效率较高。频率的影响另外一方面表现在对脉冲管的调相方面,此时,频率和长颈管关系密切,一般较高的频率对应较短的长颈管,较低的频率对应较长的长颈管^[11]。因此,为了使制冷机获得最优的整体性能,可以通过适当的调节长颈管,使得制冷机对应的最佳频率与压缩机的谐振频率趋于一致。

4 结论

研制出一台单级高频多路旁通型脉冲管制冷机,制冷机仅采用单一的长颈管和气库进行调相,获得了23.6K的最低温,这是目前所报道的单级高频脉冲管制冷机在没有采用双向进气结构下获得的最低温度。在达到稳定状态后,制冷机性能稳定,温度波动幅值小于0.1K。在220W输入电功下,能够在29.2K获得0.516W,34.3K获得1.0W的制冷量。制冷机蓄冷器仅采用不锈钢丝网做填料,当温度低于60K后,不锈钢比热迅速下降,蓄冷能力显著降低,通过更换比热更大的蓄冷材料,该制冷机温度有望进一步降低。

参考文献

- [1] Zhu Shaowei, Wu Peiyi, Chen Zhongqi. Double inlet pulse tube refrigerators: an important improvement [J]. *Cryogenics*, 1990,30(6):514-520.
- [2] Radebaugh R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler[C]//Proceedings of the institute of refrigeration: vol. 96IIR, London, 1999-2000: 11-31.
- [3] Gedeon D. DC gas flows in Stirling and pulse tube Cryocoolers [J]. *Cryocoolers*, 1997,9:385-392.
- [4] Haizheng Dang, Libao Wang, Kaixiang Yang. 10W/90K single-stage coaxial pulse tube cryocoolers [J]. *Cryogenics*, 2012, 52(4/5/6):221-225.

- [5] Haizheng Dang. High-capacity 60K single-stage coaxial pulse tube cryocoolers [J]. *Cryogenics*, 2012, 52(4/5/6):205-211.
- [6] Haizheng Dang. 40K single-stage coaxial pulse tube cryocoolers [J]. *Cryogenics*, 2012, 52(4/5/6):216-220.
- [7] Zhou Y, Han Y J. Pulse tube refrigerator research [C]//7th International Cryocooler Conference Proceedings,1993: 147.
- [8] Swift G W. Thermoacoustics: a unifying perspective for some engines and refrigerators [M]. New York: AIP Press, 2002.
- [9] Chen Liubiao, Jin Hai, et al. Numerical simulations of high frequency multi-bypass pulse tube cryocooler [C]//ICEC24-ICMC2012. In press.
- [10] Waldauf A, Thürk M, Seidel P, et al. Observation and control of temperature instabilities in a four-valve pulse tube refrigerator [J]. *Cryogenics*, 2004,44(2):75-79.
- [11] 陈厚磊,刘彦杰,杨鲁伟,等. 长颈管型脉冲管制冷机的频率特性[J]. *工程热物理学报*, 2009,30(9):1448-1450. (Chen Houlei, Liu Yanjie, Yang Luwei, et al. Frequency characteristics of inertance type pulse tube cryocoolers [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2009, 30(9):1448-1450.)

通信作者简介

王俊杰,男(1963-),中科院理化技术所研究员,中科院理化所,010-82543758, E-mail: wangjunjie@vip.sina.com。研究方向:低温制冷系统及设备、材料低温改性研究、空间应用大型低温阀门及关键部件的研究、低温流体的贮存、传输和控制研究。

About the corresponding author

Wang Junjie (1963-), male, Professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, 010-82543758, E-mail: wangjunjie@vip.sina.com. Research fields: Cryogenic system and equipments, Performance optimization of cryogenic materials, Research of the large cryogenic valve and key components for space application, Storage, transport and control of the cryogenic fluid.