

文章编号: 1672-8785(2017)07-0037-05

热耦合同轴型双级高频脉管 制冷机实验研究

蒋燕阳^{1,2} 蒋珍华¹ 朱海峰^{1,2} 刘少帅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: 空间探测技术对小型低温制冷机提出了在不同温区同时供冷的要求, 而双级高频脉管制冷机则是一种极具潜力的解决方案。介绍了一种热耦合双级高频脉管制冷机, 其两级冷指均采用同轴型结构以提升制冷机结构的紧凑性。在室温惯性管调相的方式下, 获得了 22.03 K 的最低无负载温度; 当总的输入电功为 413 W 时, 两级可同时获得 8 W@80 K 和 1 W@30 K 的制冷量。针对不同预冷温度下的性能特性开展了实验研究, 得到了低温级冷指效率的变化规律。

关键词: 热耦合; 双级脉管; 预冷温度

中图分类号: TK123 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.07.006

Experimental Study of a Thermally-Coupled Two-Stage Coaxial Type High Frequency Pulse Tube Cryocooler

JIANG Yan-yang^{1,2}, JIANG Zhen-hua¹, ZHU Hai-feng^{1,2}, LIU Shao-shuai¹, 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: Space exploration missions require cryocoolers to provide cooling power in different temperature regions. The two-stage high frequency pulse tube cryocooler is a potential solution. A thermally coupled two-stage high frequency pulse tube cryocooler is presented. To improve the compactness, its two cold fingers are both shaped in coaxial type. The no-load temperature of 22.03 K is achieved in the phase shifting with only a room temperature inertance tube. For a total input electric power of 413 W, both 8 W@80 K and 1 W@30 K can be obtained at two stages. Experimental study is carried out for its cooling performance at different precooling temperatures. The changing rule of the efficiency of cold fingers at low temperature stages is obtained.

Key words: thermally-coupled; two-stage pulse tube; precooling temperature

0 引言

脉管制冷机冷端不存在运动部件, 具有可

靠性高、寿命长、结构简单等特点。由于利用间隙密封技术可实现压缩机的无油润滑, 基于线性压缩机驱动的脉管制冷机已经逐渐在空间红

收稿日期: 2017-03-14

作者简介: 蒋燕阳 (1990-), 男, 上海人, 博士研究生, 主要从事双级高频脉管制冷机研究。

E-mail: jyyl01008@126.com

外探测、超导器件冷却以及低温气体液化等场合得到了广泛应用。目前,单级脉管制冷机的典型工作温区一般为 $50 \sim 80 \text{ K}$ 。更低的制冷温度会使其效率迅速下降。但越来越多的空间探测任务不仅要求更低的制冷温度,而且还具有同时冷却探测器以及相关光学器件的多温区需求。因此,采用双级甚至多级结构的脉管制冷机逐渐成为了低温制冷机领域的研究热点。

2003 年,美国洛克希德·马丁公司先进技术中心研制出了一台 35 K 两级脉管制冷机。当运行频率为 42 Hz 、输入电功为 100 W 时,该制冷机实现了 19.8 K 的最低无负载温度,并在 35 K 下获得了 0.79 W 的制冷量^[1]。2005 年,德国吉森大学研制出了一种采用两级 U 型冷头布置的气耦合两级高频脉管制冷机,其第二级调相方式为双向进气与惯性管联合调相。在充气压力为 2.1 MPa 、运行频率为 35 Hz 、输入电功为 250 W 的工况下,该制冷机获得了 19.6 K 的最低无负载制冷温度^[2]。2007 年,中国科学院理化技术研究所上述气耦合两级的基础上研制出了

一种将第一级改为同轴型布置的气耦合脉管制冷机。当运行频率为 35 Hz 、输入电功为 250 W 时,该制冷机获得了 16.1 K 的最低无负载制冷温度^[3]。2010 年,浙江大学制冷与低温研究所研制出了一台采用低温惯性管调相的热耦合双级脉管制冷机。当第二级输入 150 W 电功时,该制冷机获得了 23.7 K 的最低温度,并获得了 $0.5 \text{ W}@33.9 \text{ K}$ 的制冷量^[4]。2008 年,欧洲原子能署采用 G-M 制冷机预冷第二级同轴型脉管冷指,并将调相方式改为主动活塞调相,最终获得了 10.1 K 的最低无负载温度^[5]。可以看出,采用同轴型冷头的双级脉管制冷机近些年来正逐渐受到人们的青睐。

本文针对一台采用室温惯性管调相的热耦合同轴型双级高频脉管制冷机,开展了不同频率、预冷温度和输入功率下的性能特性实验,并对实验现象及结果进行了分析。

1 实验系统

图 1 所示为双级脉管制冷机的实验测试系

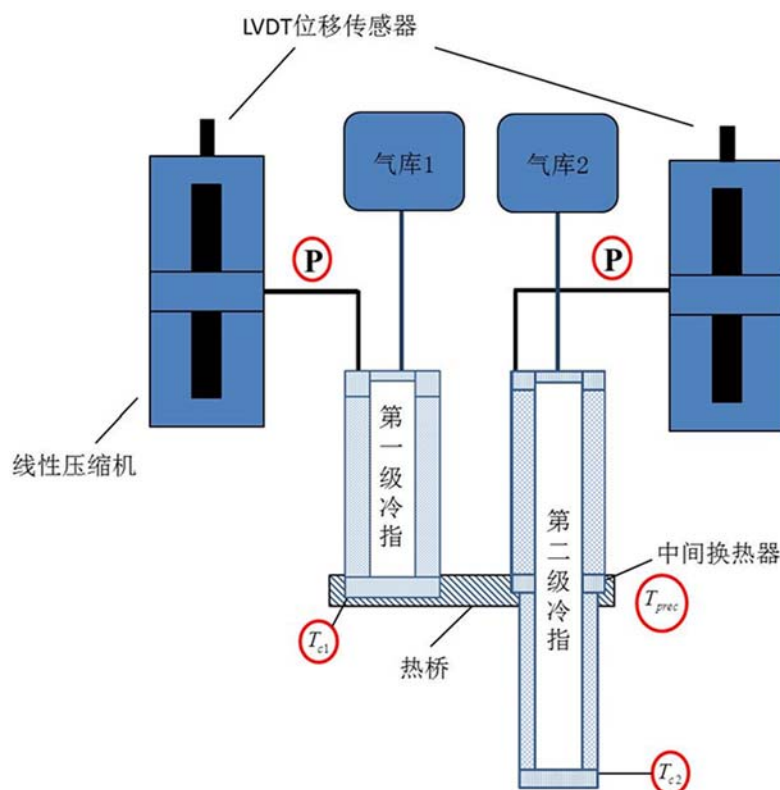


图 1 双级脉管制冷机的实验测试系统

统。该制冷机采用热耦合方式, 其两级冷指均为同轴型结构。第一级冷头通过热桥与第二级中间换热器相连, 在运行状态下向第二级冷指提供预冷量。为了降低传热温差和减少热力学第二定律损失, 采用紫铜薄板作为热桥。由于提前对热桥在 80 K 温区的传热温差进行了标定, 实验中可通过测定热桥两端的温度差得到二级冷指的预冷量。

两级脉管冷指由中国科学院上海技术物理研究所自行研发的两台对置型线性压缩机分别驱动。单台压缩机的最大输入功率分别为 300 W 和 200 W, 压缩机端部均设有可采集活塞位移信号的 LVDT 位移传感器。

在一级冷头、冷链两端、中间换热器以及二级冷头五个位置上布置了温度测点。在二级冷头处, 采用美国 Lake Shore 公司生产的 Cernox 型负电阻系数温度传感器以保证深低温区的测温精度; 在其余的温度测点上, 采用四线制铂电阻温度传感器。在两个冷指入口连管处布置了可采集动态压力信号的恩德福克压力传感器。结合 LVDT 位移传感器所采集的压缩机活塞位移信号, 可获得冷指入口的声功。

2 实验结果与分析

热耦合型双级脉管制冷机的低温级相对独立, 其制冷性能的主要影响因素包括二级输入功率 W_{e-2nd} 和预冷温度。若将热桥视作二级冷指的一部分, 则预冷温度可用一级冷头的温度 T_{c1} 表示。下面通过实验研究这两种因素对二级冷指在 30 K 下的制冷性能的影响。实验中, 两级冷指的充气压力在 3.2 Mpa 上保持不变。

图 2 所示为第一级冷头温度为 80 K 时二级脉管冷指的最低无负载温度与二级输入电功之间的关系。显然, 随着输入电功的增加, 二级脉管冷指的无负载温度先呈下降趋势, 直至在某一特定输入功率下达到最小值; 然后, 当输入功率继续增大时, 无负载温度开始反向上升。运行频率 f 是脉管制冷机重要的运行参数之一。由图 2 可知, 随着 f 从 50 Hz 增大到 53 Hz, 二级冷指获得无负载最低温度时的输入电

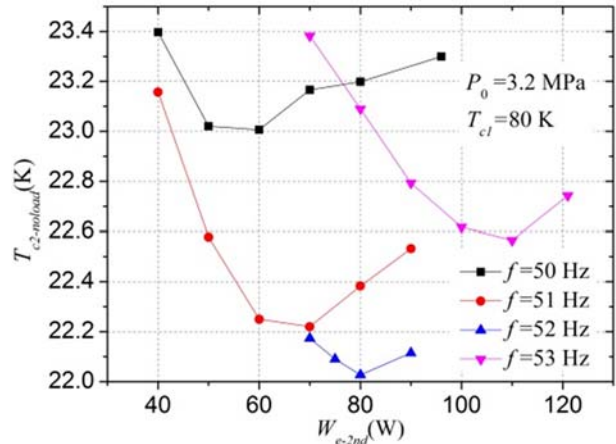


图 2 最低温度随二级输入电功的变化曲线

功 W_{e-2nd} 逐渐由 60 W 增至 110 W。当 f 为 52 Hz、输入电功为 80 W 时, 二级冷指获得了 22.03 K 的最低温度。

除最低温度外, 该制冷机在 30 K 温区内的制冷性能也是实验关注的重点。采用热平衡法测定了 30 K 温区内二级冷指制冷量随输入功率的变化曲线 (见图 3)。其中, 运行频率 f 为 52 Hz, 第一级冷头的温度为 80 K 且不存在额外的热负载。可以看出, 当二级制冷量增大时, 二级冷指对压缩机的输入功提出了更高的要求, 即图 3 中的曲线斜率陡增。经分析认为, 这是因为回热器内质量流的增大导致二级脉管冷指回热器的损失加剧, 从而极大地限制了二级冷指制冷能力的提升。与此同时, 第一级冷指的输入功率也在逐渐增加。这部分功率可提供更多的预冷量, 以维持预冷温度的稳定。为了在两个温区内同时获得冷量, 可进一步增加第一级的输入功。当 W_{e-1st} 为 283 W 时, 一级冷量达到 8 W@80 K。此时二级冷量为 1.0 W@30 K, 二级输入功 W_{e-2nd} 为 130 W, 两级压缩机的总功耗为 413 W。一级冷指在 80 K 下的制冷量随输入功基本呈线性变化 (见图 4)。

热耦合双级脉管制冷机二级冷指的预冷温度可以作为额外的一个可控输入条件, 而且预冷温度的变化会同时对两级冷指产生影响。为了定量分析双级脉管制冷机的预冷温度特性, 我们通过改变一级输入功 W_{e-1st} 来调控预冷温度。

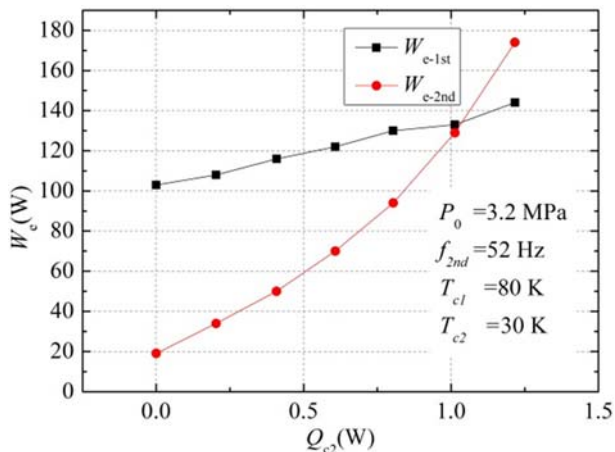


图 3 二级制冷量随两级输入功的变化曲线

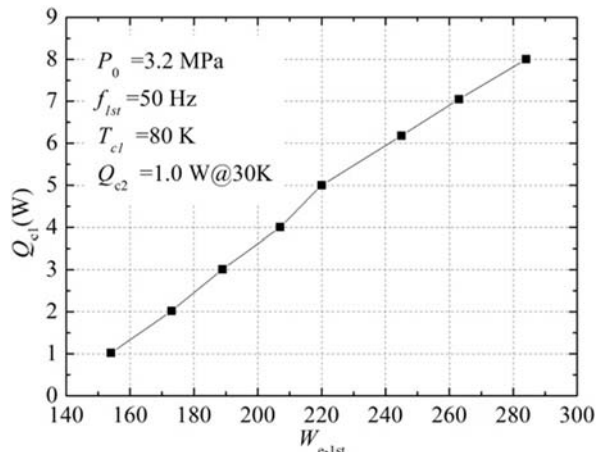


图 4 一级制冷的性能曲线

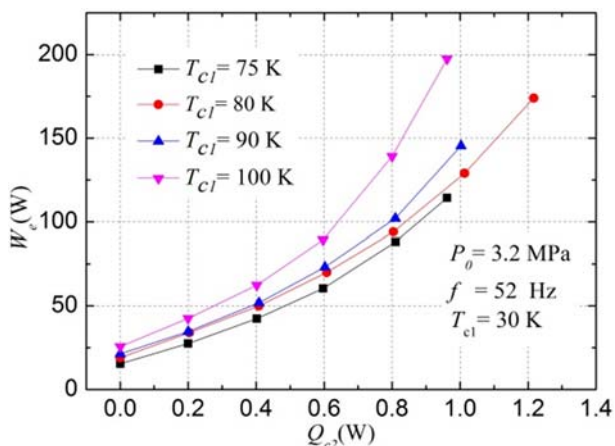


图 5 预冷温度对二级功耗的影响

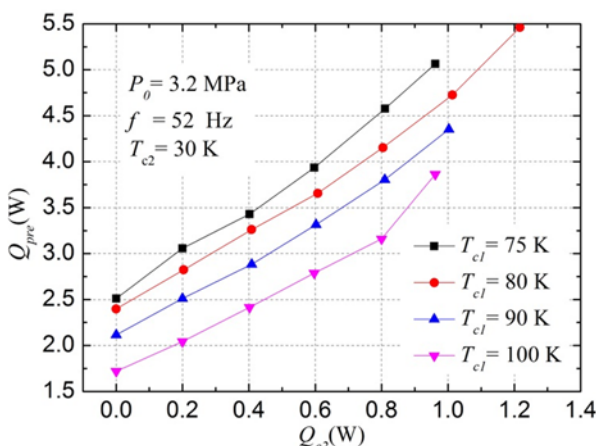


图 6 预冷温度对预冷量的影响

当二级冷头的温度 T_{c2} 保持在 30 K、预冷温度 T_{c1} 分别为 75 K、80 K、90 K 和 100K 时，二级输入功的变化曲线见图 5。可以看出，预冷温度越高，曲线的变化趋势越陡。这是因为结构参数固定时，低温段回热器的温度梯度会随预冷温度的升高而增大，造成二级冷指低温段回热器轴向导热损失的增大，从而不利于性能的提升。为了获得 0.8 W@30 K 的二级冷量，当预冷温度 T_{c1} 为 75 K 时，仅需 88.1 W 的二级输入功；而当预冷温度 T_{c1} 为 100 K 时，二级输入功 W_{e-2nd} 为 139 W，且压缩机达到 200 W 极限时，未能获得 1.0 W@30 K 的二级冷量。

图 6 所示为预冷量与预冷温度及二级冷量之间的关系。随着预冷温度 T_{c1} 的升高，获得相同二级制冷量所需的预冷量减小。这就意味着一级冷指的功耗降低，进而有助于两级脉管制

冷机整机效率的提升。预冷量 Q_{prec} 与二级制冷量 Q_{c2} 之间近似成线性增大关系；在较低的预冷温度下，曲线斜率略大。由此可见，从降低二级冷指所需预冷量的角度考虑，反而应选择较高的预冷温度。

通过以上内容可知，二级输入功率 W_{e-2nd} 和预冷温度 T_{c1} 对两级脉管制冷机效率的影响并不是单调的。在确定热耦合双级脉管制冷机效率的最优点时，必须对二级冷指效率 (COP) 随上述两个参数的变化规律 (见图 7) 进行综合考虑。其中各个工作点的一级冷指均不取冷，故二级冷指效率可按式 (1) 计算：

$$COP = Q_{c2} / (W_{e-1st} + W_{e-2nd}) \quad (1)$$

当二级冷量 Q_{c2} 低于 0.6 W@30 K 时，二级冷指低温段回热器内的质量流较小，其引起的

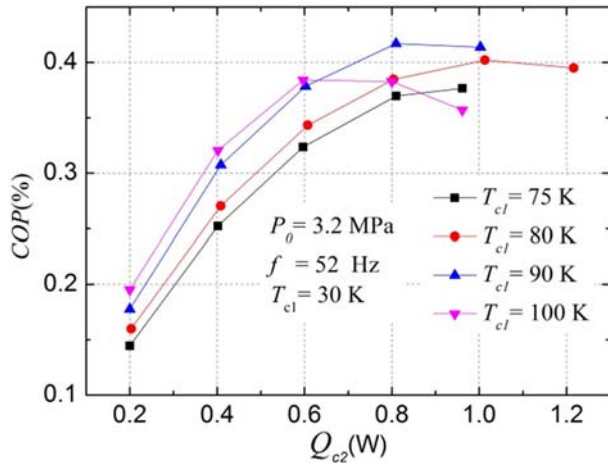


图 7 二级冷指效率的变化曲线

回热器损失不是主导影响因素。此时, 由较高预冷温度带来较低一级输入功的优势表现得相对显著。而在 Q_{c2} 大于 $0.6 \text{ W}@30 \text{ K}$ 的范围内, 二级冷指低温段回热器的损失对二级功率的影响则开始体现。在各个预冷温度下, 二级冷指效率先后达到各条曲线的最大值, 并随着冷量的进一步增大而降低; 预冷温度越低, 达到最大 COP 值时所对应的二级冷量越大。当预冷温度 T_{c1} 为 90 K 、二级冷量为 $0.8 \text{ W}@30 \text{ K}$ 时, 二级冷指效率达到最高的 0.417% 。

3 结论

(1) 实验结果表明, 低温级的无负载温度会随二级输入功率变化, 且存在一个明显的最低点; 当二级输入功率进一步增大时, 冷头温度反而上升。当运行频率 f 为 52 Hz 、二级输入

功 W_{e-2nd} 为 80 W 时, 室温惯性管调相的热耦合二级脉管制冷机达到了 22.03 K 的最低无负载温度。

(2) 对于热耦合二级高频脉管制冷机的低温级而言, 存在二级输入功率和预冷温度两个可控输入变量, 因此制冷效率的变化规律较为复杂。当二级冷量较小时, 较高的预冷温度所需的预冷量较小, 进而带来较高的 COP 值; 而当二级冷量较大时, 过高的预冷温度也会带来更大的低温段回热器损失, 进而导致 COP 值的迅速下降。最终在预冷温度 T_{c1} 为 90 K 、二级冷量为 $0.8 \text{ W}@30 \text{ K}$ 时获得了二级冷指 COP 的最高工况。

参考文献

- [1] Nast T C, Olson J, Evtimov B. Development of a Two-stage Pulse Tube Cryocooler for 35 K Cooling [M]// Ronald G. Cryocooler 12. Boston: Springer, 2003: 213-218.
- [2] Yang L W, Thummes G. High Frequency Two-stage Pulse Tube Cryocooler with Base Temperature Below 20 K [J]. *Cryogenics*, 2005, **45**(2): 155-159.
- [3] Yang L W, Zhao M G, Liang J T, et al. Investigation of Two-stage High Frequency Pulse Tube Cryocoolers [J]. *Cryocoolers*, 2007, **14**: 177-185.
- [4] Gan Z H, Fan B Y, Wu Y Z, et al. A Two-stage Stirling-type Pulse Tube Cryocooler with a Cold Inertance Tube [J]. *Cryogenics*, 2010, **50**(6): 426-431.
- [5] Charles I, Golanski L, Gauthier A, et al. 20 K Coaxial Pulse Tube Using Passive Precooling [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2008, **53**(1): 887-894.
- [6] Wang J, Zhao L, Feng C, et al. Waveform Digitization Utilizing Switched-capacitor Arrays [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2012, **23**(2):109-113.
- [7] Ritt S. Design and Performance of the 6 GHz Waveform Digitizing Chip DRS4 [C]. *Nuclear Science Symposium Conference, NSS'08 IEEE, Dresden, Germany*, 2008: 1512-1515.
- [8] Ritt S. DRS4 Datasheet [M/OL]. 2017.3.1. <http://drs.web.psi.ch/datasheets>.
- [9] Karki J. Fully-Differential Amplifiers [M/OL]. 2017.3.1. <http://www.ti.com/lscds/ti/amplifiers/op-amps>.
- [10] 徐恒梅. 激光测距系统的设计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

(上接第 36 页)

参考文献

- [1] 胡以华, 王建宇, 薛永祺. 机载激光遥感成像的激光回波波形数字化技术 [J]. *遥感学报*, 2001; **5**(2):110-113
- [2] Pfennigbauer M, Ullrich A. Three-dimensional Laser Scanners with Echo Digitization[J]. *Proc SPIE*, 2008:69500U-69500U-8.
- [3] Zhang Y, Zhao Y, Liu F, et al. High-speed Signal Sampling Technique in Lidar Application [C]. *International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging Laser Sensing & Imaging & Applications*, 2013; **8905**:610-614.