第 30 卷第 5 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.30, No.5
2009 年 5 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS May, 2009

30 K 单级高频同轴脉冲管制冷机

荀玉强[1,2] 杨鲁伟[1] 蔡京辉[1] 梁惊涛[1] 周 远[1]

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要 介绍了一套实用型单级高频同轴脉冲制冷机工作在深低温区的性能特性。输入功率为 200 W 时，冷头无负荷最低温度可达到 29.35 K，输入功率为 235 W 时，冷头无负荷温度可稳定在 28.55 K。这是目前国内无多路旁通的单级高频脉冲管制冷机获得的最低温度，国际上位于先进行列。200 W 输入条件下，35.6 K 可提供 0.5 W 制冷量，为 30~40 K 温区相关的小冷量应用提供了一种简单有效的方法。

关键词 脉冲管制冷机；高频；单级；同轴；双向

中图分类号：TB61 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-231X(2009)05-0734-03

30 K SINGLE-STAGE HIGH FREQUENCY COAXIAL PULSE TUBE CRYOCOOLER

XUN Yu-Qiang[1,2] YANG Lu-Wei[1] CAI Jing-Hui[1] LIANG Jing-Tao[1] ZHOU Yuan[1]

(1. *Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing* 100190, *China*;

2. *Institute of Mechanics, CAS, Beijing* 100190, *China*)

Abstract This paper introduces a single-stage high frequency coaxial pulse tube cryocooler(PTC) that could reach temperature below 30 K. With 200 W electrical input power and 46 Hz driving frequency, this PTC has achieved a no-load temperature of 29.4 K and provides a cooling power of 0.5 W at 35.6 K. By increasing the input power to 235 W, a no-load temperature of 28.6 K can be obtained.

Key words pulse tube cryocooler; high frequency; single-stage; coaxial; double-inlet

0 引 言

脉冲管制冷机是小型低温制冷机的一种，主要为相关的低温应用场所提供有效的冷源，可使低温电子器件和传感器获得更好的性能和效率。高频脉冲管制冷机较之于 G-M 型具有效率高、体积小、重量轻等优势，是脉冲管制冷机研究和应用的一个重点，在国际上得到了最大程度的重视和发展。

在 30~40 K 温区的应用是高频脉冲管制冷机研究的一个重要方向。为达这一温区，一是采用多级的结构，二是优化单级的方案。由于高频条件下的换热远不如低频时理想，阻力也明显要大很多，已有的单级很难达到 30 K 温区，但单级结构简单且效率较高。本文介绍的就是一个单级达到 30 K 以下温区的实用型高频脉冲管制冷机例子。

1 制冷机性能

制冷机系统由压缩机和脉冲管冷指组成。采用 Leybold Polar SC7 压缩机；脉冲管冷指为同轴结构；通常充气压力 2.5 MPa；制冷机热端安装有水冷系统，亦可采用风冷。主要优化方式为双向优化。

实验中使用 Pt100 铂电阻温度计测量温度。在标准的测量中，铂电阻温度计 PT100 主要测量 70 K 以上的温度，标定精度可达 0.02 K。在低温下对 Pt100 和 Cernox 温度传感器进行了比较：在制冷温度高于 20 K 的情况下，二者的区别在 1.0 K 以内，在制冷温度高于 40 K 的情况下，差别在 0.5 K 以内。据此，这里认为 Pt100 测量误差在 1 K 左右。

图 1 给出了制冷机的优化过程。风冷、无双向、输入功率 200 W 时，冷头的无负荷温度为 46.6 K；采用水冷，冷头温度可降至 40.6 K；加装双向并进行优化后，温度为 29.4 K；压缩机功率增至 235 W 时，冷头温度即达到 28.6 K 的最低温度。

图 2 给出了制冷量曲线。0.5 W 热负荷，压缩机输入 150 W 时，冷头温度能稳定在 38.9 K；而当

收稿日期：2008-12-29; **修订日期**：2009-04-09

基金项目：国家自然科学基金 (No.50890181; No.50676100)

作者简介：荀玉强 (1980-)，男，河南南阳人，博士后，主要从事低温制冷技术的研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

输入功率为 200 W 时，冷头温度能稳定在 35.6 K 。

制冷机的降温时间也是一个重要的指标参数。实验中，水冷及双向条件下，冷头无负荷温度通常可在 13 min 左右由室温降至 43 K 。

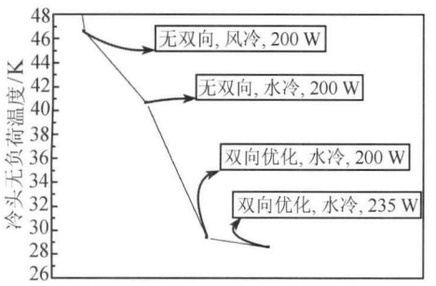

图 1　制冷机的优化过程

Fig.1　Schematic of typical optimization process

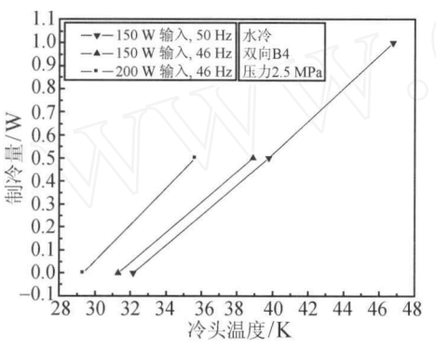

图 2　优化后的制冷机性能

Fig.2　Cooling power versus temperature

2　喷嘴双向优化

双向进气是 30 K 温区单级制冷机的优化关键。该制冷机的优化围绕双向进行了大量实验。

基于实用化及减小流动损失考虑，在实验中采用喷嘴取代针阀进行双向调节，如图 3 所示。喷嘴双向优化首先采用圆柱通孔，通孔型记做 A 型。确定基本孔径 d 后，为减少流动损失，在基本型基础上进行了多种流道界面的喷嘴设计。典型的设计包括 B 型同步增大进出口通孔，C 型不同步增大进出口通孔，D 型采用锥形进出口截面等，参见图 4 。实验中比较了多种喉部尺寸，范围从 0.3 mm 到 0.5 mm 。

图 5 是使用直径 0.3 mm 和 0.4 mm 尺寸喷嘴双向得到的制冷温度变化。可以看出，双向直径 0.4 mm 效果较好，对应温度改善约有 10 K 以上。对更大直径的喷嘴测试表明，对于本文介绍的制冷机，大于 0.4 mm 尺寸后，双向效果均开始变差。

双向进行截面改进对制冷效果的影响是很大的，在 0.4 mm 通孔基础上进行的改进实验结果参见图 6 。制冷温度最大可以相差约 5 K ，而且可能造成制冷性能下降，如图中双向 B ；但构型良好的喷嘴可以取得更好的制冷效果，如图中双向 D ，在 200 W 输入条件下，冷头无负荷温度可达到 30 K ，这也表明双向 D 在流动损失方面的减小效果最好。

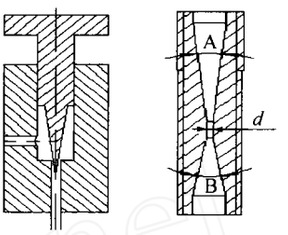

图 3　针阀 (左); 喷嘴 (右)

Fig.3　Orifice valve (left); nozzle (right)

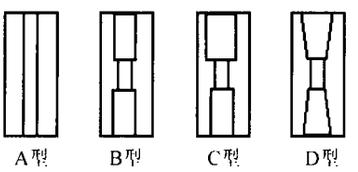

图 4　典型喷嘴设计图

Fig.4　Typical nozzle figures

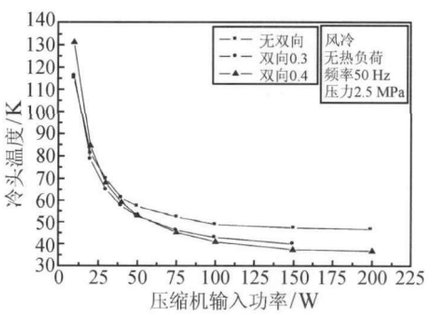

图 5　双向对制冷温度的影响

Fig.5　The influence of double-inlet

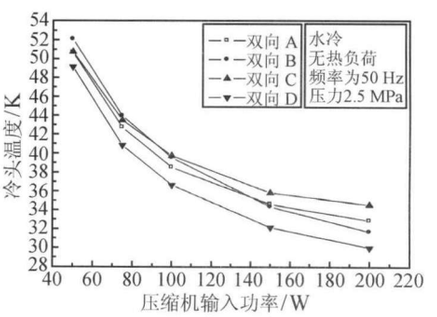

图 6　不同形状喷嘴双向对制冷温度的影响

Fig.6　PTC's performance with deferent nozzle figures

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用喷嘴双向，最大的问题在于很难实现特定截面的加工，而且与小孔可以连续调节不同，喷嘴双向很难实现连续变化，这就导致了在喷嘴优化方面的初期工作量很大。不过，喷嘴固定结构可使整机在使用中无需调节，有利于脉冲管易用性和实用性。同时实验结果也表明，采用喷嘴调相，制冷机同样取得了很好的效果。

3 与国际上有关结果比较

表1列举了目前单级高频脉冲管制冷机所能达到的最低温度[1~4]。可以看出，采用多路旁通可以得到更低的温度，如中科院理化所和Lockheed Martin均能达到23 K，但这种结构更接近于二级的情况，结构复杂，且制冷性能曲线斜率相对较低。

表1 单级高频脉冲管制冷机无负荷最低温度

Table 1 Single-stage high frequency PTC's no-load temperature

来源	结构	温度 (K)	频率 (Hz)	功率 (W)	备注
中科院理化所	同轴型	29.4	46	200	–
中科院理化所	同轴型	28.6	46	235	–
中科院理化所	同轴型	23.1	50	200	多路旁通
Lockheed Martin	直线型	23	34	173	多路旁通
NGST(TRW)	直线型	29.2	–	200	–
GIESSEN 大学	同轴型	27.1	45	200	–
GIESSEN 大学	同轴型	26.1	45	250	–

本文介绍的制冷机最低温度能达到28.6 K，与国际同类先进脉冲管制冷机相比区别不大，达到国际先进水平。表中给出了德国GIESSEN大学达到26 K的结果，这是无多路旁通的单级高频脉冲管制冷机获得的最低温度。本文的制冷温度高了2 K左右，这主要是和热端采用的水冷效果有关，德国GIESSEN大学的热端温度较本文的热端温度低10 K左右，这也是本文温度较高的一个主要原因。

实际上，本文的工作和德国GIESSEN大学的工作有很大的关联，目前的工作是GIESSEN大学工作的进一步发展，主要是对于双向进气采用固定喷嘴的结构改进取代针阀调节。相比德国GIESSEN大学原先的阀门调节，是一大进步，消除了最后的可带来制冷机不稳定的因素，使得脉冲管整机为固定结构，无需进行调解，制冷性能参数稳定，初步实现了长寿命和实用化的目标。

4 结 论

本文介绍了研制的单级高频同轴脉冲管制冷机的性能，达到了28.6 K的最低温度，这是国内报道的无多路旁通情况下高频单级脉冲管制冷机的最低温度，国际上也位于先进行列。200 W输入条件下，35.6 K可提供0.5 W制冷量，为30~40 K温区相关的小冷量应用提供了一种简单有效的方法。

该制冷机采用喷嘴型双向的优化，表明了喷嘴型双向的有效性，优化后的整机为固定结构，无需调节，初步实现了长寿命和实用化的目标。

参 考 文 献

[1] Yang L W, G Thummes. Single Stage High Frequency Pulse Tube Cooler with Base Temperature Below 30 K. In: The Eleventh Conference of Chinese Society of Engineering Thermophysics. Chongqing, 2005. 638-642

[2] Yang Jun-Ling, Hou Xiao-Feng, Yang Lu-Wei, et al. High Frequency Single Stage Multi-Bypass Pulse Tube Cryocooler for 23.8 K. Advances in Cryogenics Engineering, 2008, 53: 1108-1113

[3] Burt W W, Chan C K. Demonstration of a High Performance 35 K Pulse Tube Cryocooler. Cryocoolers8 Plenum. New York, 1995. 313 319

[4] Olson J R, Kotsubo V, Champagne P J, et al. Performance of a Two-Stage Pulse Tube Crycooler for Spaceborne Operation. Cryocoolers10, 1999. 163-170

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net