

1.6 kg 小型同轴脉冲管制冷机实验研究

邢恩春^{1,2}, 陈厚磊², 唐清君², 荀玉强², 蔡京辉², 梁惊涛²

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

摘要:小型脉冲管制冷机在空间以及军事领域有广泛的应用前景,通过提高制冷机的工作频率可减小制冷机的体积与质量。研制了1台重1.6 kg的脉冲管制冷机并进行了实验优化。采用实验室研制的小型直线压缩机驱动,惯性管气库、双向进气作为调相机构,在输入电功45 W,冷端温度80 K时可获得2.12 W的制冷量,相对卡诺效率13.0%。由于运行频率高,冷指尺寸小,冷指降温时间短,2 min降温到80 K,并且冷头温度受重力影响较小。

关键词:小型;同轴;脉冲管制冷机

中图分类号: TB651

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2017)04-0217-06

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2017.04.006

INVESTIGATION ON THE 1.6 kg MINIATURE COAXIAL PULSE TUBE CRYOCOOLER

XING En-chun^{1,2}, CHEN Hou-lei¹, TANG Qing-jun², XUN Yu-qiang², CAI Jing-hui², LIANG Jing-tao²

(1. University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. Technical Institution of Physics and Chemistry, Beijing 100190, China)

Abstract: Increasing the drive frequency can yield a more compact pulse tube cooler, which is very attractive for many applications, especially for the space and military applications. In this paper, experimental study has been carried out for a coaxial pulse tube cryocooler which is driven by self-designed linear compressor and uses an inertance tube with a reservoir and double-inlet valve as the phase shifter. The pulse tube cryocooler has achieved cooling capacity of 2.12 W at 80 K with the input power of 45 W, around of 13% relative Carnot efficiency is achieved at 80 K when the reject temperature is 300 K. Because of the low mass and the high operating frequency, the temperature of the cold end can decrease to 80 K from 300 K in two minutes and the gravity has little effects on the temperature.

Key words: miniature; coaxial; pulse tube cryocooler

0 引言

脉冲管制冷机由于冷端没有运动部件,具有结构简单、振动小、寿命长、可靠性高等优点,在航空航天以及低温超导领域得到了广泛的应用。脉冲管制冷机多为针对空间应用设计,为保障制冷机的寿命和可靠性,体积质量一般较大,目前国内的空间脉冲管制冷机质量一般在5 kg以上,远大于地面军用斯特林制冷机1~2 kg的质量。

近年来,美国对脉冲管制冷机开展了小型化研究。美国学者Radebaugh等提出通过提高频率,并配合较高的充气压力与更小水力直径的回热填料,可以在减小制冷机体积与质量的同时保持较高的

制冷机效率,并通过Regen3.2模拟计算了回热器性能随频率的变化曲线,指出选取合适的运行条件及回热器尺寸,1 000 Hz超高频下的回热器同60 Hz回热器效率相差不大^[1]。

2009年NGST报道了其研制的小型同轴脉冲管制冷机,整机质量857 g,冷指外径11.2 mm,长度48 mm,在49 W电功输入下,冷指无负荷最低温度47 K、77 K可获得1.3 W的制冷量^[2]。

2014年NGST报道了研制的小型化脉冲管制冷机的最新结果,该制冷机整机质量900 g,在51 W电功输入时,冷指的最低无负荷温度38 K左右,150 K可以获得5 W的制冷量^[3]。同年Lockheed Martin公

收稿日期:2017-03-10

基金项目:国家重大基础研究项目(613322)

作者简介:邢恩春(1989-),男,山东滨州人,主要从事超高频脉冲管制冷机。E-mail:1058848097@qq.com。

司报道了研制的小型同轴性脉冲管制冷机,该制冷机整机质量328 g,在10 W的电功输入下,冷指的最低无负荷温度在90 K左右,150 K可获的0.85 W的制冷量^[4]。

2009年浙江大学报道了1台工作频率120 Hz的高频、大冷量直线型脉冲管制冷机,该制冷机最低无负荷温度为49.6 K、78.5 K可提供8.0 W的制冷量^[5]。2012年理化所热声组王晓涛等^[6]又报道了研制的同轴型脉冲管制冷机,该制冷机冷指在40 W声功输入下,冷指的无负荷最低温度49.3 K、77 K可获得2.8 W制冷量。

从2008年开始研制超高频小型同轴脉冲管制冷机。采用研制的频率为100 Hz的同轴型冷指匹配谐振频率50 Hz的压缩机,该制冷机在运行频率80 Hz,80 W电功输入下,80 K可获得2 W的制冷量^[7]。在此基础上研制了谐振频率为100 Hz的小型压缩机,质量从4.5 kg减小至1.2 kg,整机质量为1.6 kg。

1 小型同轴脉冲管制冷机样机

小型脉冲管制冷机主要包括压缩机、冷指、调相机构。压缩机主要提供不同功率及频率压力波,冷指是产生冷量的主要部件,包括蓄冷器热端换热器、蓄冷器、冷端换热器、脉冲管,调相机构主要调节整个系统的压力波、体积流相位及两者之间相位差。当压缩机连接交流电源时,压缩机内部的音圈电机带动活塞做直线往复运动,利用活塞的往复运动驱动工质流动,当气体流过冷指时,冷指通过系统内往复穿梭震荡的可压缩流体质工与固体介质之间相互换热时产生制冷效应。图1和图2分别是制冷机的示意图与实物,表1是制冷机的外形参数。

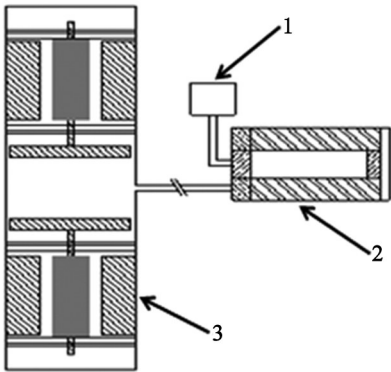


图1 同轴型脉冲管制冷机示意图
Fig.1 Schematic of the pulse tube cryocooler
1. 气库;2. 冷指;3. 压缩机

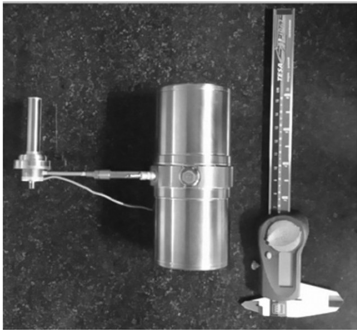


图2 同轴型脉冲管制冷机实物图
Fig.2 Photo of the pulse tube microcoole

表1 制冷机的主要参数
Table1 Key parameter of the PT microcooler

脉冲管 制冷机 质量/kg	压缩机 外壳直 径/mm	压缩机 外壳长 度/mm	冷指直 径/mm	冷指长 度/mm	气库体 积/cm ³
1.6	54	124	12	45	30

2 实验方法及条件

实验装置主要包括充气系统、真空系统、水循环系统以及温度采集系统。充气系统主要为制冷机提供高纯氦气。水循环系统的主要作用是维持制冷机冷指热端温度恒定。真空系统主要用于维持冷指所处的真空环境减少冷指与环境之间的换热损失。温度采集主要采用PT100铂电阻温度计进行测量。实验中制冷量的测量采用热平衡原理,在冷指冷端布置加热块,通过控制加热丝两端的电压控制制冷机冷端的加热量。实验中采用四线制进行温度测量来减小测量误差以及使用四线制来模拟制冷机冷端热负荷。图3为实验装置示意图,实验中气体工质为氦气,制冷机运行频率70~130 Hz,充气压力4.2 MPa,冷指外径12 mm,长度45 mm,循环冷却水温15℃。

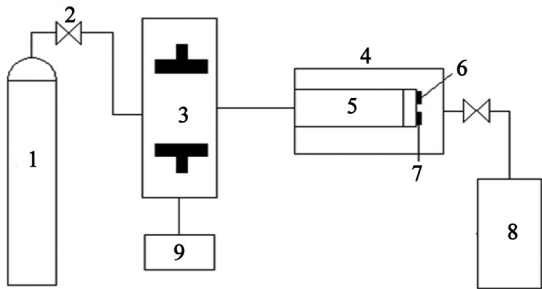


图3 实验装置示意图
Fig.3 Schematic of the experimental apparatus
1. 氦气;2. 阀门;3. 压缩机;4. 真空罩;5. 冷指;6. 温度计;7. 加
载热负荷;8. 真空泵;9. 电源

3 实验结果与讨论

3.1 调相机构对制冷机性能的影响

根据焓流相位理论脉冲管制冷机的制冷量取决于脉冲管内部的焓流以及蓄冷器内部的损失。合理的调相机构将使得制冷机回热器与脉冲管内部的压力与体积流率处于合理的范围,从而增大焓流减少回热损失,提高制冷机的制冷量。通常惯性管、气库以及双向进气能够发挥较好的调相作用,调相机构的改变使得脉冲管热端阻抗幅值与压力体积流率间的相位差发生改变,一方面影响了制冷机的性能;另一方面也会改变制冷机的阻抗,影响压缩机的效率。

3.1.1 惯性管对冷指性能的影响

惯性管型调相机构是一种被动型的调相机构,利用细长管内气体的惯性效应调节气体压力波与体积流率之间的相位差。采用组合式惯性管作为调相机构,实验中压缩机的输入功率为 45 W,表 2 给出不同内径以及长度的惯性管组合方式。

表2 惯性管组合方式

名称	组合方式
Case1	$\Phi 1\text{ mm}\times 0.2\text{ m}+\Phi 2\text{ mm}\times 1.5\text{ m}+\Phi 3\text{ mm}\times 1\text{ m}+30\text{ cm}^3$
Case2	$\Phi 1\text{ mm}\times 0.1\text{ m}+\Phi 2\text{ mm}\times 1\text{ m}+\Phi 3\text{ mm}\times 1\text{ m}+30\text{ cm}^3$
Case3	$\Phi 1\text{ mm}\times 0.2\text{ m}+\Phi 2\text{ mm}\times 1\text{ m}+\Phi 3\text{ mm}\times 1\text{ m}+30\text{ cm}^3$
Case4	$\Phi 1\text{ mm}\times 0.4\text{ m}+\Phi 2\text{ mm}\times 1\text{ m}+\Phi 3\text{ mm}\times 1\text{ m}+30\text{ cm}^3$
Case5	$\Phi 1\text{ mm}\times 0.6\text{ m}+\Phi 2\text{ mm}\times 1\text{ m}+\Phi 3\text{ mm}\times 1\text{ m}+30\text{ cm}^3$

Case2~Case5 为内径 1 mm 惯性管长度由 0.1 m 增加到 0.6 m, Case1~ Case2 为内径 2 mm 惯性管长度由 1 m 增加到 1.5 m。从图 4 中可以看出随着惯性管长度的增加,冷指的最佳运行频率降低,当内径为 1 mm 的连管由 0.1 m 变为 0.6 m 时,运行频率降低 20 Hz。当内径 2 mm 的惯性管由 1 m 变为 1.5 m 时,运行频率降低 5 Hz。当调相机构采用 Case3 与 Case4 时,冷指的最低温度分别为 51.1 K、50.7 K。当调相机构采用 Case1 时,冷指最低温度为 48.8 K。

图 5 是不同组合惯性管下冷指的性能曲线。当热端调相机构选择 Case1 时,冷指 80 K 制冷量为 2.01 W,当采用 Case3 与 Case4 时,冷指 80 K 制冷量分别为 1.82 W、1.83 W。当热端调相机构采用 Case2 时,冷指的单位制冷量温升为 14.75 K/W,采用 Case5 时,冷指的单位温升制冷量 17.06 K/W,增加 2.31 K/W。从冷指的制冷量以及单位制冷量的

温升都可以看出惯性管对微型脉冲管制冷机的影响较大,合适的惯性管组合对于提升脉冲管制冷机性能有较大作用。

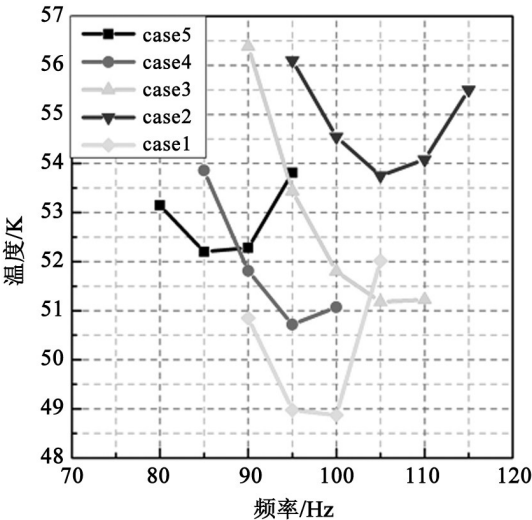


图4 不同频率下惯性管对冷指温度的影响曲线
Fig.4 The temperatures of the cold end at the different operating frequency using different combinations of the inertance tubes

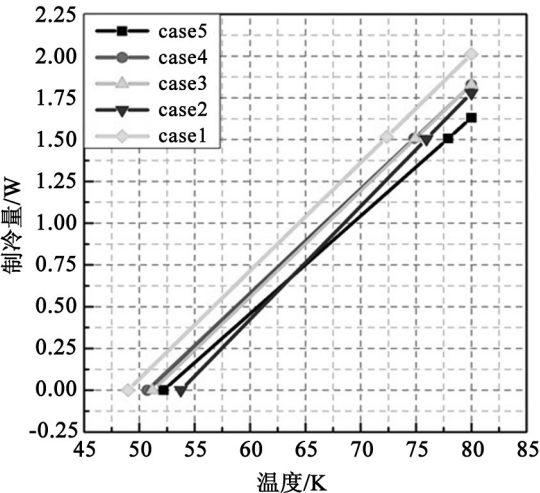


图5 不同组合惯性管下冷指的性能曲线
Fig.5 The performance of the cold end at the different tempreature using different combinations of the inertia tubes

3.1.2 气库对制冷机性能的影响

脉冲管制冷机气库体积的缩小可有效减小制冷机的体积与质量。相比较于高频脉冲管制冷机,超高频脉冲管制冷机频率提高,活塞行程减小,所需气体工质的质量减小,因此为减小气库的体积与质量提供了可能性。文章中考查了气库体积 0 cm³ 与 30 cm³ 时,冷指的性能。Case0 与 Case1 分别为惯性管连接气库体积 0 cm³ 与 30 cm³。

图 6 显示当惯性管连接气库时,冷指的最低无负荷温度约为 48.8 K。当采用纯惯性管时,冷指的最低无负荷温度约为 55.0 K。相比较于纯惯性管作为调相机构,气库的加入使冷指的最低温度降低了 6 K。当采用纯惯性管作为调相机构时,制冷机的运行频率为 115~120 Hz 冷指达到最低温度,当采用气库时制冷机的运行频率为 95~100 Hz,冷指达到最低温度。气库引入后制冷机的运行频率降低,流过冷头的气体质量增加,换热时间增加,因此冷指的无负荷最低温度降低。但随着制冷机内部气体的增加,蓄冷器内部损失也会增加,因此实验中对制冷机的制冷量进行了测量。

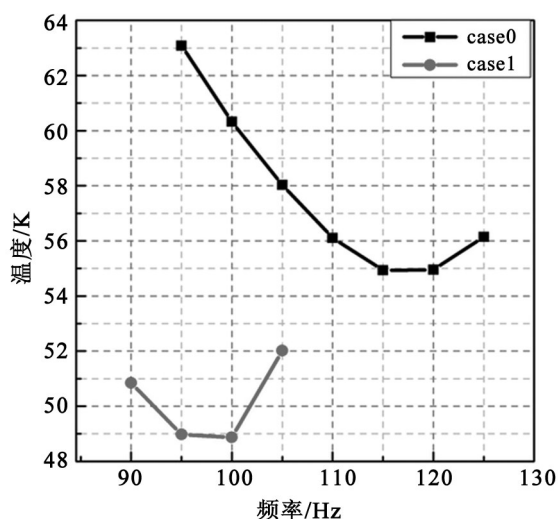


图 6 有无气库下冷指温度随频率的变化曲线

Fig.6 The temperatures of the cold end at the different operating frequency using different reservoir volume

图 7 是制冷机的性能曲线,结合图 6 可看出当采用惯性管加气库作为冷指的调相机构时,在 45 W 电功输入下,冷指 80 K 冷量由 1.5 W 增加到 2.01 W。当引入气库时,制冷机内气体工质增加,在一定范围内由于气体质量增加引起制冷量的增加大于蓄冷器内部损失的增加。因此在减轻制冷机体积与质量的时,要考率到气库对制冷机性能的影响。

3.1.3 双向进气对冷指性能的影响

研究表明在惯性管作为主要调相机构的高频脉冲管制冷机中,双向进气对脉冲管制冷机进一步降低温度仍然有较大的作用^[8]。对于超高频的直线型脉冲管制冷机,双相进气的引入会使进气系统结构复杂,引入阀门后会造成新的流动损失。由于同轴型脉冲管制冷机回热器热端与脉冲管热端在冷

指的同一侧,因此可以通过在脉冲管热端打孔的方式实现双向进气功能,同时避免了双向进气增加空容积对制冷机性能的影响。

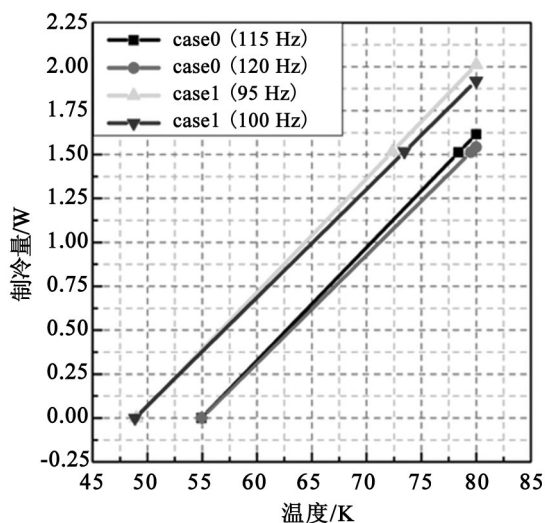


图 7 不同组气库体积下冷指的性能曲线

Fig.7 The performance of the cold end at the different temperature using different reservoir volume

选择热端调相机构 Case1、Case3、Case4,实验对比了双向进气引入前后冷指的无负荷最低温度及 80 K 制冷量。从图 8 实验结果看出,双向进气的引入,冷指的最低无负荷温度降低。Case1(双向)的最低温度 45.9 K,相比较 Case1 降低 2.9 K, Case3(双向)的最低温度 48.1 K,比 Case3 低 3.2 K, Case4(双向)的最低温度 47.7 K,相比较 Case4 降低 3.0 K。

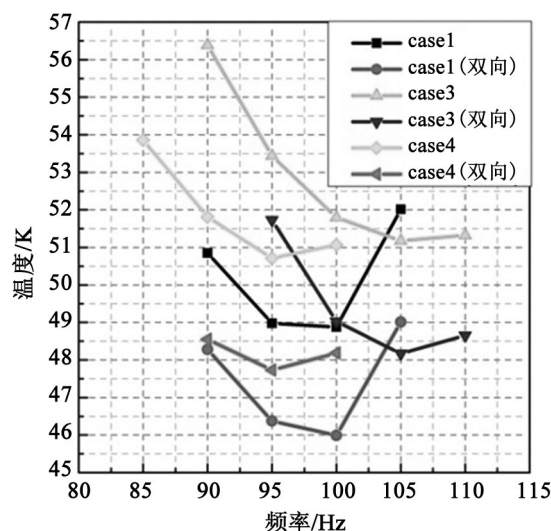


图 8 引入双向进气后冷指温度对比曲线

Fig.8 The influence of the double-inlet on the cold end temperature

从图9可以看出引入双向进气后冷指的性能有所提高。采用双向进气结构后,单位温升制冷量减小,采用Case1(双向)、Case3(双向)与Case4(双向)时,冷指的斜率分别为16.04 K/W、16.54 K/W、16.97 K/W,相比较于Case1、Case3与Case4时,冷指的斜率升高0.36 K/W、0.78 K/W、0.95 K/W,但由于冷端温度的降低,使制冷机冷量有所增加,当采用Case1时,引入双向进气后冷指80 K冷量由2.01 W增加到2.12 W。

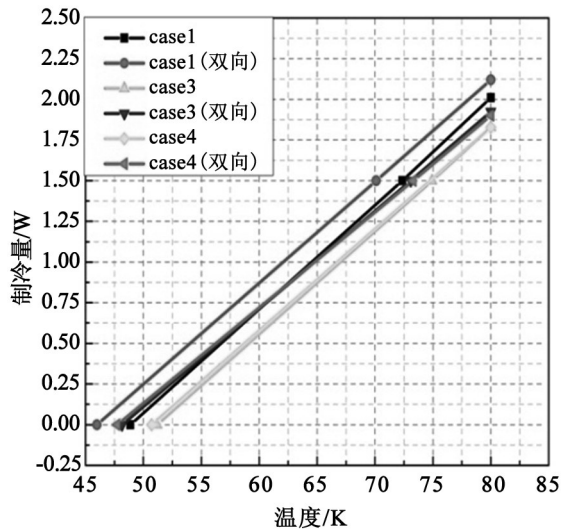


图9 引入双向进气后冷指性能对比曲线

Fig.9 The influence of the double-inlet on the performance

4 小型制冷机的使用特性

4.1 不同功率下制冷机的性能

当压缩机在特定频率工作时,随着功率的增加,压缩机活塞的行程增大,扫气量增加,压比提高,流过冷指冷头的气体质量增加,根据焓流相位理论制冷机的制冷量增加。图10为压缩机运行频率95 Hz,不同输入功率条件下,制冷量随冷头温度的变化在一定的输入功率下,制冷量随着冷头温度的上升线性增加。随着压缩机输入功率的增加,单位制冷量减小,当输入功率由45 W变为100 W时,冷指的斜率由15.48 K/W变为8.44 K/W。输入功率增加对冷头无负荷最低温度的改变不大,冷指冷头的最低温度由48.8 K变为44.1 K,但由于单位温升制冷量变大,对各个温区下的制冷量有较大的提高,45 W增加到100 W时,80 K制冷量由2.01 W增加到4.31 W。

4.2 冷指的降温曲线

高频脉冲管制冷机冷指尺寸小、质量轻、能量密度高,而同轴型脉冲管制冷机由于结构更加紧

凑,进一步减轻了冷端质量,因此冷指降温时间快。图11为同轴型脉冲管制冷机在运行频率95 Hz、输入功率45 W无热负荷条件下冷指的降温曲线,从室温300 K降至80 K降温时间在2 min内。当增加制冷机的功率,冷指的降温时间会更快,适用于需要快速降温的红外探测设备。

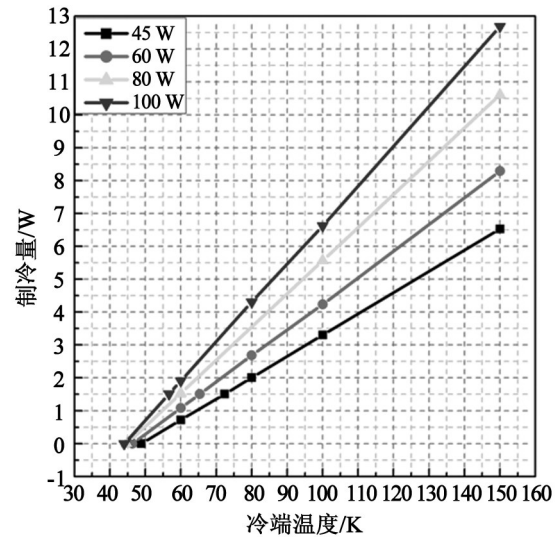


图10 制冷机的性能曲线

Fig.10 The performance of the microcooler

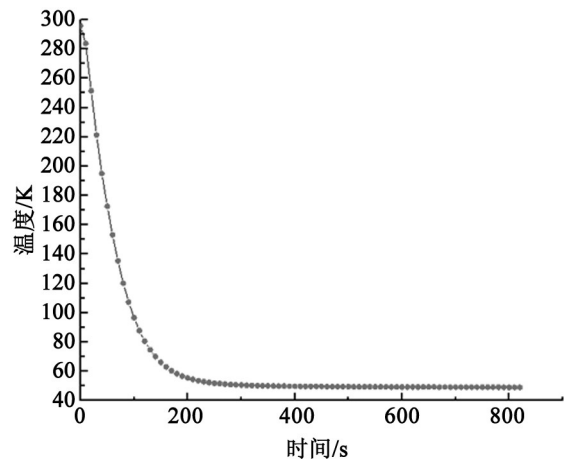


图11 冷指的降温曲线

Fig.11 A cooling-down curve of the microcooler

4.3 冷指方向对冷指性能的影响

在脉冲管制冷机中,脉冲管两端存在很大的温差,当处于重力场中,重力的作用会对脉冲管制冷机内部的流场和温度场产生较大的影响,进而影响脉冲管制冷机的性能。

脉管制冷机的方向性问题是制约其在航天、航空、军事等领域应用的因素之一。通过提高脉冲管制冷机的频率可以有效遏制方向性问题^[9],因为较

高的频率使得脉管中流动的气体具有较大加速度,从而减弱重力加速度对气体微团运动的影响;另一方面,高频脉管制冷机具有相对较小的脉管尺寸,也会从一定程度上抑制方向性问题^[10]。图 12 是冷指方向对制冷机温度的影响,制冷机在运行频率 95 Hz、45 W 电功输入下冷端热负载分别为 0 W、1.53 W。 0° 是指冷指的方向竖直向下与重力方向一致, 180° 指冷指竖直向上与重力方向相反。当负载为 0 W、1.53 W 时,冷指最低温度相差 1.2 K、0.7 K。

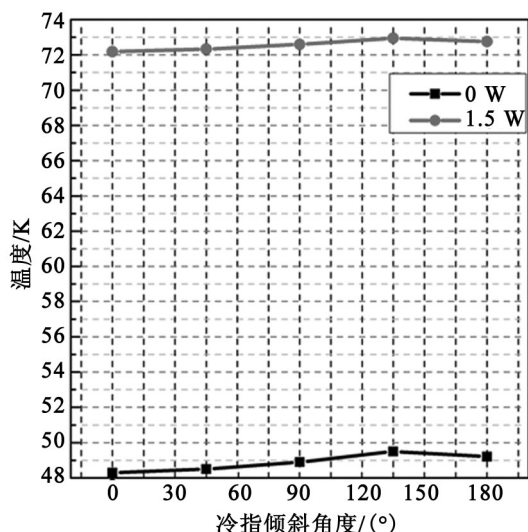


图 12 冷指方向对冷指温度的影响曲线

Fig.12 The influence of the direction on the cold end

5 结论

研制了 1 台运行频率 100 Hz 的脉冲管制冷机并进行了实验优化。通过对热端调相机构的优化,研究了惯性管以及双向进气对冷指性能的影响,确定了最佳的调相方式。采用谐振频率 100 Hz 的高频压缩机工作在 95 Hz,在 45 W 电功输入下,热端

温度 300 K 时,80 K 可获得 2.12 W 制冷量,相对卡诺效率 13%。所研制的同轴型脉冲管制冷机质量轻、降温快、重力因素对制冷机性能影响较小,从室温 300 K 降至液氮温区 80 K 小于 2 min。

参考文献:

- [1] Radebaugh R, O' Gallagher A. Regenerator operation at very high frequencies for microcryocoolers[J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 823(1): 1919–1928.
- [2] Petach M, Waterman M, Pruitt G, et al. High frequency coaxial pulse tube microcooler[J]. Cryocoolers, 2009, 15: 97–103.
- [3] Durand D, Tward E, Toma G, et al. Efficient high capacity space microcooler[C]//International Cryocooler Conference, 2014: 60–64.
- [4] Nast T C, Roth E, Olson J R, et al. Qualification of lockheed martin micro pulse tube cryocooler to TRL6[J]. Cryocoolers, 2014, 18: 45–50.
- [5] 吴英哲,甘智华,邱利民. 120 Hz 脉冲管制冷机[C]//工程热物理会议论文集, 2009: 138.
- [6] Wang X T, Yu L H, Zhu J, et al. A miniature coaxial pulse tube cooler operating above 100 Hz [J]. Cryocoolers, 2012, 17: 107–114.
- [7] 杨鲁伟, Thummes G. 单级高频脉冲管制冷机研究[J]. 工程热物理学报, 2007, V28(1): 24–26.
- [8] 徐娜娜, 陈厚磊. 超高频脉冲管制冷机的实验研究[J]. 机械工程学报, 2011(6): 156–159.
- [9] Ross R G, Johnson D L. Effect of gravity orientation on the thermal performance of Stirling-type pulse tube cryocoolers[J]. Cryogenics, 2004, 44(6): 403–408.
- [10] 侯小锋, 杨鲁伟, 梁惊涛. 大冷量高频脉冲管制冷机重力影响的理论分析及实验研究[J]. 低温工程, 2012(5): 1–5.