

15 K 热耦合两级脉管制冷机低温段回热器 长径比理论及实验研究

殷旺^{1,2}, 伍文婷^{1,3}, 惠贺军^{1,2}, 刘少帅¹, 蒋珍华¹, 吴亦农¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 200083, 上海; 2. 中国科学院大学, 100049, 北京;
3. 上海理工大学能源与动力学院, 200093, 上海)

摘要: 为了提高脉管制冷机的制冷量和效率, 解决液氢温区以下多级脉管制冷机效率低下的问题, 对关键部件之一的低温段回热器尺寸进行了设计优化。针对 15 K 两级脉管制冷机, 首先采用数值模拟仿真的方法研究了低温段回热器尺寸对制冷机内部各项损失以及性能的影响, 获得了等效长径比的最优值 3.81; 然后研制了等效长径比分别为 3.81、6.80 的两种低温段回热器进行实验对比。实验结果表明, 制冷机低温段回热器等效长径比为 3.81 时, 制冷机性能更好, 且在 30 Hz 下, 可以在 15 K 获得制冷量 0.91 W, 此时各级总输入电功为 386 W, 整机的比卡诺效率达到 4.45%。该研究可为制冷机低温段回热器的设计优化提供参考, 对多级脉管制冷机的效率提升具有一定的指导意义。

关键词: 脉管制冷机; 回热器; 长径比; 比卡诺效率

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202212019 **文章编号:** 0253-987X(2022)12-0184-08

Theoretical and Experimental Study on the Length-Diameter of the Regenerator in the Low Temperature Section of a 15 K Thermal-Coupled Two-Stage Pulse Tube Cryocooler

YIN Wang^{1,2}, WU Wenting^{1,3}, HUI Hejun^{1,2}, LIU Shaoshuai¹, JIANG Zhenhua¹, WU Yinong¹

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

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

3. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To improve the cooling capacity and efficiency of the pulse tube cryocooler and solve the problem of low efficiency of the multi-stage pulse tube cryocooler below the liquid hydrogen temperature area, the regenerator in the low temperature section is optimized in size. First, for the regenerator in the low temperature section of the 15 K two-stage pulse tube cryocooler, the influence of the regenerator size on the internal losses and performance is studied by numerical simulation, and it is obtained that the length-diameter ratio has an optimal value of 3.81. Then two kinds of regenerators with the length-diameter ratio of 3.81 and 6.80 are developed for experimental comparison. Experimental results show that the cryocooler has a better performance at the ratio of 3.81 and can obtain a maximum cooling capacity of 0.91 W at 15 K at 30 Hz. The

收稿日期: 2022-06-22。 作者简介: 殷旺(1996—), 男, 博士生; 刘少帅(通信作者), 男, 副研究员。 基金项目: 中国科学院率先行动“引才计划”B类资助项目; 国家自然科学基金资助项目(51806231); 中国科学院战略性先导科技专项资助(B类)项目(XDB35000000)。

网络出版时间: 2022-08-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220801.1458.002.html>

total input power is 386 W and the rCOP reaches 4.45%. The research provides a reference for the design optimization of a regenerator in the low temperature section of the cryocooler and has guiding significance in improving efficiency of the multi-stage pulse tube cryocooler.

Keywords: pulse tube cryocooler; regenerator; length-diameter ratio; rCOP

现今 15 K 温区具有极其广泛的应用,包括冷却空间红外探测器、低温电子元件,为 J-T 制冷机提供前级预冷等。其中斯特林型脉管制冷机由于具有高效、紧凑、高可靠性等优势^[1-4],在 15 K 温区应用中得到了广泛应用。回热器是脉管制冷机中承担冷热流体间周期性换热的关键部件,Radebaugh 等^[5] 首先通过理论分析给出了脉管制冷机内损失机理的分析,认为回热器内产生了大量的压降损失、换热损失以及实际气体效应带来的损失等,对回热器效率产生了极大影响。对于工作在液氢温区以下的脉管制冷机来说,低温段的回热器效率低下已经是限制制冷性能的关键因素,合理地设计回热器的结构尺寸和改善回热填料以减少损失、提高制冷机效率成为多级脉管制冷机的研究热点之一。为了能够工作在液氢及以下的温区,斯特林型脉管制冷机往往采用多级结构^[6-9],其中低温段回热器对脉管制冷机内部的损失分布影响较大,作为关键部件影响整机在低温端的制冷量和效率^[10]。

2009 年,Yan 等^[11]设计制造了一台两级热耦合 U 型脉管制冷机,该制冷机低温段回热器的长径比为 8.47,第二级取得了 14.2 K 的最低温度,回热器整体尺寸较为细长。2018 年,Zhu 等^[12]设计制造了一台两级热耦合同轴型脉管制冷机,同轴型回热器采用等效半径计算^[13]长径比为 7.76,最低温度达到 18.8 K。2021 年,Wu 等^[14]在文献[12]的基础上设计制造了一台两级热耦合同轴型脉管制冷机,等效长径比为 6.9,最低温度达到 15.29 K,低温段回热器的长径比有所减小,制冷机无负荷温度降低。2019 年,Wu 等^[15]设计制造了一台两级气耦合同轴型脉管制冷机,等效长径比为 5.57,最低温度达到 5.7 K,回热器的长径比小,制冷机的无负荷温度也达到了两级脉管制冷机目前的最低温度。由此可见,低温段回热器尺寸将对液氢温区制冷机性能产生影响。

为了提高制冷机在 15 K 温区的制冷量和效率,本文以热耦合同轴型两级脉管制冷机为基础,通过模拟计算和实验对比的方法研究了低温段回热器尺寸对制冷机整机的影响,得到了在 15 K 获得较优性能的回热器尺寸,并对其进行了频率相关的实验

研究。

1 理论分析

对于两级脉管制冷机来说,低温段回热器是影响制冷机整机性能的关键因素之一,由于低温下回热器的损失急剧增加,这部分损失占比极大,对其进行合理的设计是必要的。对回热器进行理论分析可得^[16]

$$Q_c = [E_h - \Delta E] \left[\frac{z_c T_c}{z_h T_h} \right] \left[1 - \frac{H + Q_{reg} + Q_{cond} + Q_{pt}}{E_c} \right]$$

(1)

式中: T_c 、 T_h 分别为冷端、热端温度; z_c 、 z_h 为气体压缩因子; E_c 、 E_h 为脉管制冷机冷端声功、热端声功; ΔE 为回热器中流动阻力导致的声功损失。由式(1)可知,净制冷量 Q_c 可表示为冷端声功减去各项损失,这些损失包括实际气体引起的附加焓流损失 H 、回热器不可逆换热损失 Q_{reg} 、导热损失 Q_{cond} 和脉管膨胀损失 Q_{pt} 。对于低温段回热器来说,回热器的结构尺寸对温度梯度分布和各项损失的影响较大,需要经过合理的设计来提高脉管制冷机低温段的效率。

表 1 对一些可调研的低温段回热器尺寸进行了整理,其中回热器的长径比对制冷机的性能影响较大^[17-18]。较短的回热器会导致轴向导热和换热损失小幅增加,但流阻大幅度降低,有利于提高低温区下回热器效率,从而提升制冷机性能。回热器的直径则通过影响质量流来影响流阻,适当增加可以降低

表 1 低温段回热器尺寸参数

Table 1 Parameters of regenerator in low temperature section in some research

来源	长度 /mm	等效直径 /mm	长度与等效 半径之比	最低温度 /K
文献[11]	50.0	11.80	8.47	14.20
文献[12]	54.3	14.00	7.76	18.80
文献[14]	50.0	14.49	6.90	15.26
文献[19]	50.0	10.32	9.69	13.20
文献[20]	44.0	11.80	7.46	8.87
文献[15]	30.0	10.78	5.57	5.70

低流阻损失和换热损失,从而提高回热器的整体效率。

2 低温段回热器长径比影响分析

2.1 低温段回热器长径比模拟计算方法

使用回热器设计软件 Regen 3.3 对低温段回热器的性能进行计算。Regen 3.3 计算机程序由 NIST 开发^[21],通常用于模拟计算回热器内部的氦流和热传递。在低温段回热器中,回热器的尺寸和回热填料将共同影响回热器性能。计算中为了消除回热填料的影响,首先将回热器的总体积与填料的混填比例保持不变,即回热器的长度和截面积的乘积不变,丝网和磁性颗粒填料的规格和填充长度比不变,只考虑回热器自身尺寸的变化对性能的影响。由于 Regen 3.3 软件计算回热器的特性,可以通过冷端参数的设定来保持回热器冷端的声功一定,进而分析回热器内各项损失和冷端制冷量的关系。

根据初步计算的结果,回热器的总填充体积确定为 $8.5 \times 10^3 \text{ mm}^3$,丝网和 Er_3Ni 颗粒填料按 1:3 的长度比进行填充^[22]。在回热器长度变化时(此时回热器截面积随之改变),各填料的填充总体积不变,换热能力相差不大,以此消除填料带来的影响。回热器的温度跨度为 $80 \sim 15 \text{ K}$ 不变,且在充压 2.0 MPa 、频率 30 Hz 下,回热器冷端参数固定在压比为 1.25、相位为 -22.9° 、质量流为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$,此时回热器冷端的声功恒定为 4.65 W 。在此基础上计算了不同截面积/长度比例下,回热器的性能及各项损失。

2.2 长径比对回热器各项损失影响分析

在模拟计算中改变回热器长度,由于总填充体积不变,回热器截面积等效半径确定,此时对应的等效长径比随之变化,具体的数值如表 2 所示。因为总的冷端声功不变,可以通过计算回热器不可逆损失、导热损失、实际气体损失、脉管膨胀损失占冷端声功的比例,来分析回热器的损失情况,如图 1 所示。由图 1 可以看出:在一定范围内,随着回热器长径比的增加,导热损失减小,但由于数值占比较小,总体变化都不大;回热器不可逆换热损失明显减小,而实际气体损失则明显增大。总体来说,冷端声功中的各项损失之和随着回热器长径比的增大呈现先减小后增大的趋势,这说明合理的回热器长径比设计将使这部分的损失降低。同时,除损失外剩余的部分为回热器冷端的制冷量,呈现先增大后减小的趋势。

表 2 回热器尺寸参数

Table 2 Parameters of regenerator in low temperature section

参数	数值					
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
长度/mm	30	34	38	42	46	50
截面积/mm ²	283.3	250.0	223.7	202.4	184.8	170.0
等效半径/mm	9.49	8.92	8.35	8.03	7.67	7.36
等效长径比	3.16	3.81	4.55	5.23	6.00	6.80

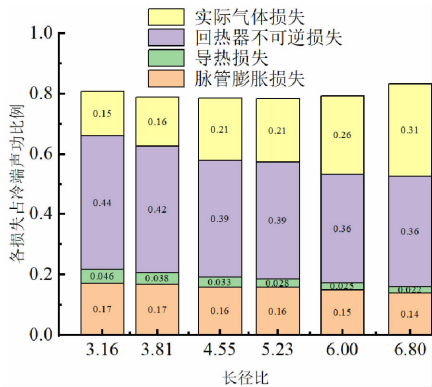


图 1 各项损失占冷端声功比例

Fig. 1 Proportion of various losses in acoustic power of cold end

2.3 长径比对压降损失影响分析

在相同的温度跨度和回热器总体积下,回热器长径比的增大意味着长度增加、截面积减小、温度梯度减小,低温段回热器的压降损失变化如图 2 所示。由图 2 可知,随着低温段回热器逐渐变得细长,压降损失将大幅增长,回热器热端到冷端的声功损失也大幅增加,为了获得相同的冷端声功,需要热端提供更高的声功,严重影响整段回热器的效率。

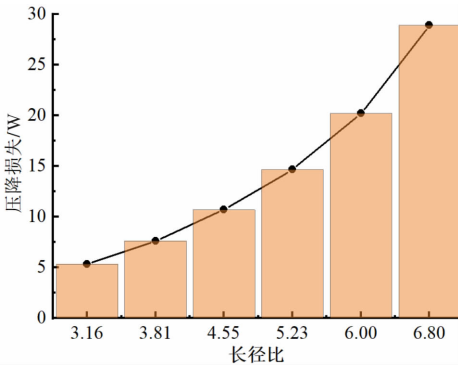


图 2 各长径比下压降损失

Fig. 2 Pressure drop at each length/equivalent radius

2.4 长径比对回热器制冷量及效率影响分析

低温段回热器的效率定义为回热器冷端获得的制冷量与回热器热端的声功之比^[16],即

$$\eta_{reg} = \frac{Q_c}{E_h} \tag{2}$$

式中 η_{reg} 为回热器效率。

低温段回热器的制冷量和效率的理论计算结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,随着回热器长径比在一定范围内增加,冷端制冷量先缓步增加,之后迅速下降。这说明长径比的取值过大将不利于回热器冷端取冷,效率大幅降低。长径比在 3.81~5.23 范围内(回热器长度对应为 34~42 mm),制冷量达到最大值。效率也随长径比先增大后减小。由于长径比的增加将使热端声功需求加大,所以在长径比 3.81 处获得最大效率为 3.3%。

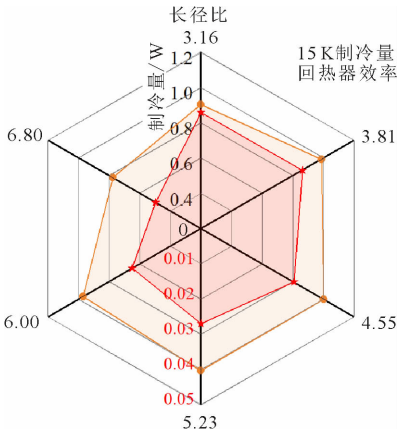


图 3 各长径比下回热器的制冷量和效率
Fig. 3 Cooling capacity and COP of regenerator at each length/equivalent radius

综上所述,模拟结果显示存在最优的回热器长径比为 3.81,使得低温段回热器的效率达到最优,此时冷端声功一定情况下,回热器内不可逆损失、导热损失、实际气体损失、脉管膨胀损失的总和较小,回热器的制冷量较高,而效率达到最大值。

3 实验结果与讨论

3.1 实验装置

本研究所搭建的两级脉管制冷机的基本结构原理图和实验装置图如图 4 所示。该两级脉管制冷机为热耦合结构,两级冷指均采用同轴型结构,并且都采用对置线性压缩机进行驱动。为了在液氢温区以下取冷,二级脉管选用丝网与磁性填料混合填充的形式。单级脉管的冷端与第二级脉管的回热器中端通过一段铜制热桥进行热连接,以实现预冷效果。

第一级采用室温的惯性管气库进行调相,第二级则采用一台线性压缩机进行主动调相^[23]。

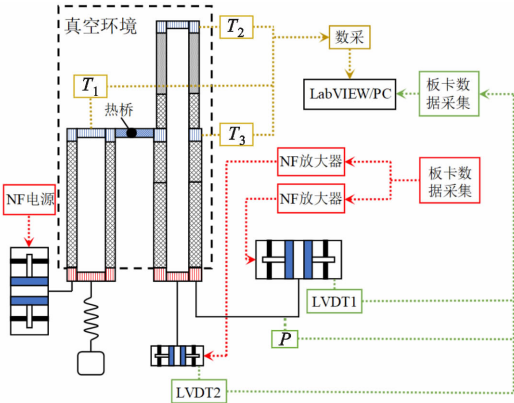


图 4 两级脉管制冷机结构示意图和实验装置图
Fig. 4 Schematic diagram of structure and experimental setup of two-stage pulse tube cryocooler

驱动模块使用信号发生器和 NF 放大器电源实现压缩机活塞的正弦运动。信号发生器可以调节两压缩机活塞的初始相位,实现调节第二级主压缩机和调相压缩机的活塞相位差,以获得最佳的调相效果。

第二级主压缩机和调相压缩机的位移和相位由两个位移传感器(LVDT)分别进行测量。一个 Endevco 压力传感器测量主压缩机出口处的压力波动。二级冷头温度 T_2 使用 Cernox 温度传感器测量,标定范围为 1.2~330 K,15 K 的灵敏度约为 10 mK。一级冷头温度 T_1 和中间换热器温度 T_3 使用 Pt100 温度计测量,数据采集程序基于 LabVIEW 软件平台开发。

选用模拟计算中的 Case2、Case6,即低温段回热器长径比分别为 3.81、6.80 两种情况,分别进行实验研究验证。图 5 为不同低温段回热器长径比的



图 5 Case2、Case6 低温段回热器实物图
Fig. 5 Physical diagram of Case2 and Case6 regenerator

第二级脉管的实物图,左侧为 Case2,低温段回热器较短较粗;右侧为 Case6,低温段回热器较细较长。使用图 4 所示的实验台装置系统对两种情况开展实验研究。

3.2 低温段回热器长径比对整机性能影响

将低温段回热器置于二级脉管整机之中,考虑对整机性能的影响情况。采用一维模拟计算软件可以对热耦合两级脉管制冷机进行整机模拟计算,从而总体分析低温段回热器尺寸对整台制冷机性能的影响。模拟过程中设定频率为 30 Hz,充压 2.0 MPa,二级总输入声功为 130 W,并令包括低温段回热器总填充体积、填充比例在内的其他结构、运行参数都保持不变,仅改变低温段回热器的长度和截面积,由此计算出整机的性能随回热器长径比的变化情况,如图 6 所示。整机比卡诺效率(考虑一级提供预冷)的计算公式^[24]为

$$\eta_r = \frac{Q_c(T_h - T_c)}{E_1 + E_2}$$

(3)

式中: η_r 为整机比卡诺效率; T_h 、 T_c 分别为制冷机热端、冷端温度; E_1 、 E_2 分别为一级、二级需要输入的声功。

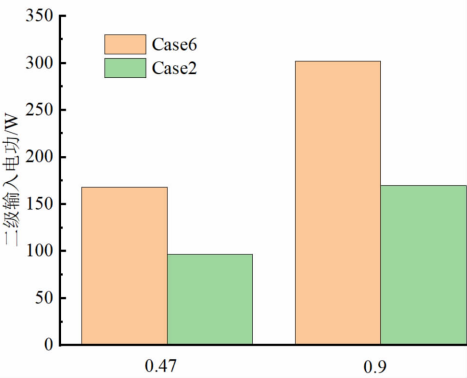
由图 6 可以看出,随着低温段回热器长径比的增加,在输入功一定的情况下,整机在第二级 15 K 获得的制冷量先增大后减小,当长径比为 3.81 时制冷量达到最大值 1.02 W,这与 2.4 节中 Regen 的结果基本一致。整机第二级需要第一级提供的预冷量则随着低温段回热器长径比的增大持续上升,这也与 Regen 的相关计算结果相互印证,正是由于长径比的增加导致低温段回热器包括压降损失在内的声功损失大幅度增加,在冷端获得声功近似的情况下,热端所需声功大幅度上升,一级需要提供的焓流也

就增大。整机比卡诺效率也因此呈现先略有上升,之后迅速减小的趋势,总体来说仍旧在长径比 3.81 处取得最大值 8.25%。

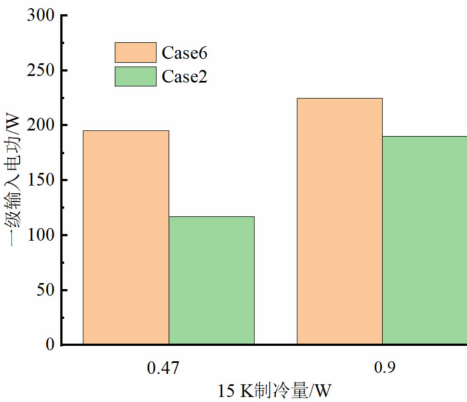
同时,将 Case2、Case6 两种情况的两级脉管制冷机实际实验结果与整机模拟结果进行对比分析。二级主压缩机电功输入为 170 W 附近时,根据经验按电声转化效率计算的输入声功约为 130 W,此时 Case2 两级脉管制冷机在 15 K 获得 0.9 W 制冷量,Case6 两级脉管制冷机则获得 0.47 W 制冷量,实验结果和模拟结果在趋势上具有一致性,具体数值差异源于整机模拟计算中忽略的实际情况与损失,如冷热端换热器的换热损失、换热不充分、连管带来的损失、导流部件损失等。

3.3 不同长径比回热器的制冷机整机性能对比

参照对低温段回热器长径比的计算研究,以 Case2、Case6 为依据,制造了两款回热器并耦合两级脉管制冷机进行实验对比,分别测得其在 15 K 获得相同制冷量 0.47、0.9 W 下所需要的输入电功,如图 7 所示。由图 7 可以看出,使用 Case2 回热器



(a) 二级输入电功对比



(b) 一级输入电功对比

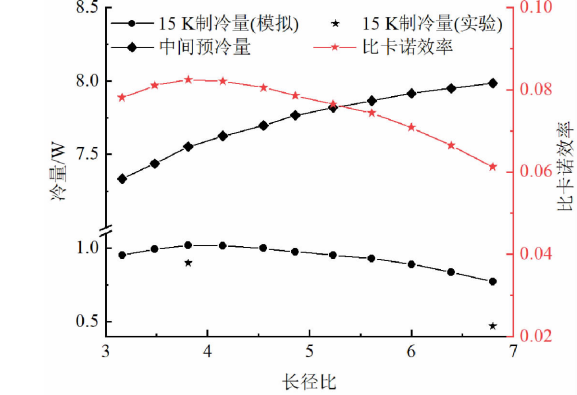


图 6 各长径比下整机模拟与实验的制冷量和比卡诺效率
Fig. 6 Cooling capacity and rCOP of cryocooler by simulation and experiment under each length/equivalent radius

图 7 两种回热器在相同制冷量下输入电功对比
Fig. 7 Comparison of input power of two regenerators under the same cooling capacity

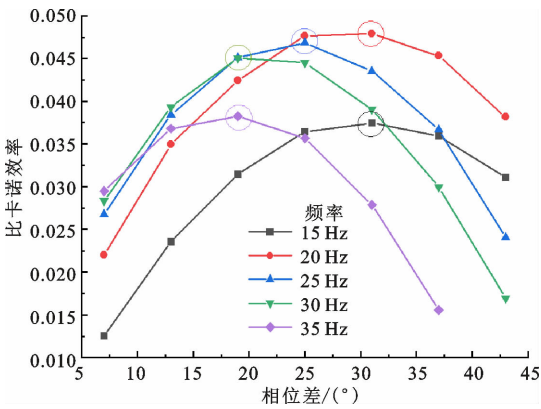
的制冷机的输入电功相对于使用 Case6 回热器的制冷机有大幅降低。当制冷机第二级在 15 K 获得 0.47 W 时二级电功由 168 W 降至 97 W,一级电功则由 195 W 降至 117 W,由式(3)计算所得的基于电功比卡诺效率由 2.33% 上升至 3.64%。当制冷机第二级在 15 K 获得 0.9 W 时二级电功由 302 W 降至 170 W,一级电功则由 225 W 降至 190 W,由式(3)计算所得的基于电功比卡诺效率由 2.97% 上升至 4.45%。

由此可以看出,Case2 中长径比较小的回热器第二级所需要的输入功率大幅度降低,制冷机性能有明显提升。此外,制冷机第二级需要第一级提供的预冷量也有一定的下降,这与图 6 模拟计算的结果一致,都有利于制冷机性能提升。

3.4 定长径比下频率特性影响研究

在 15 K 温区,受到回热填料在极低温下的热容和热渗透深度的限制,往往需要相对较低的工作频率^[25-26]。为了研究频率对填充 Er₃Ni 磁性填料的影响,对 Case2 的两级脉管制冷机开展相关实验研究,由于采用了热耦合的结构形式,可以在保持第一级运行参数和预冷状态不变的前提下,单独改变第二级的运行参数。图 8 为频率影响的实验结果,实验中保持二级充压为 2.0 MPa,压缩活塞行程为 5.0 mm,调相活塞行程为 2.8 mm,中间换热器温度为 80 K 不变。由图 8 可以看出,在不同频率下,制冷机性能总是随着第二级主压缩机与调相压缩机活塞的相位差先变好后变差,同时制冷机在不同频率下的最佳性能也随着频率的增大先变好后变差。

第二级在 15 K 获得的最大制冷量出现在 30 Hz,此时脉管制冷机获得 0.91 W 制冷量,总输入电功为 386 W,此时的整机比卡诺效率为 4.45%。最大整机比卡诺效率出现在第二级 20 Hz 时,此时脉管制冷机获得 0.74 W 制冷量,总输入电功为 294



(b)频率对整机比卡诺效率的影响

图 8 Case2 回热器制冷机的频率影响研究

Fig. 8 Research on frequency influence of Case2 regenerator cryocooler

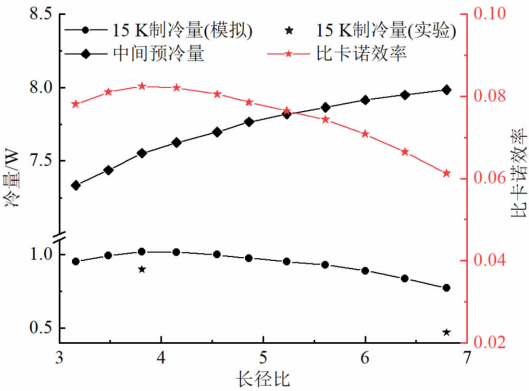
W,整机比卡诺效率为 4.79%。这说明工作频率的适当降低有利于提高使用磁性回热填料的脉管制冷机的性能,但是频率的降低使得压缩机的输入功率密度减小,可使用的声功降低,制冷量有所下降,通过合理的选择频率可以在兼顾制冷机性能的同时获得较高的制冷量。由实验结果可知,随着第二级工作频率的提升,主压缩机与调相压缩机活塞的最佳相位差逐渐减小。

4 结 论

15 K 温区制冷量在空间应用中极为重要,需要提升制冷机效率,而低温段回热器的尺寸会对多级制冷机中各项损失产生影响。针对 15 K 两级脉管制冷机的低温段回热器尺寸进行了模拟和实验研究,结果表明:在冷端声功一定的情况下,等效长径比增大过程中,回热器各项损失总和先减小后增大,冷端制冷量先增大后减小,回热器效率存在极值;低温段回热器等效长径比为 3.81 时,回热器具有最高的效率,整机可以在 15 K 获得最大制冷量 1.02 W,同时由声功计算的比卡诺效率取得最大值为 8.25%。

将低温段回热器等效长径比分别为 3.81、6.80 的制冷机进行了实验对比,在 15 K 获得相同制冷量的情况下,Case2 情况下各级压缩机所需要的输入电功明显下降,整机的效率大幅度提升。

制冷机在 30 Hz 处获得了最大制冷量,总输入电功为 386 W 时,在 15 K 获得 0.91 W 制冷量,整机由电功计算的比卡诺效率为 4.45%。在 20 Hz 处获得最大的比卡诺效率,总输入电功为 294 W 时,在 15 K 获得 0.74 W 制冷量,此时的整机比卡



(a)频率对 15 K 制冷量的影响

诺效率为 4.79%。液氢温区以下磁性填料的使用使得适用工作频率有所降低。

参考文献:

- [1] 何雅玲, 高凡, 陶于兵, 等. 脉管制冷机的整机数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 1-9.
HE Yaling, GAO Fan, TAO Yubing, et al. Numerical simulation of entire pulse tube refrigerators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(3): 1-9.
- [2] HAN Yinan, ZHANG Ankuo. Cryogenic technology for infrared detection in space [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 23-49.
- [3] DENG Weifeng, LIU Shaoshuai, JIANG Zhenhua, et al. Development of a spaceborne pulse tube cooler operating at 170 K [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 115: 1-8.
- [4] LIU Shaoshuai, JIANG Zhenhua, DING Lei, et al. Impact of operating parameters on 80 K pulse tube cryocoolers for space applications [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 99: 226-233.
- [5] RADEBAUGH R, HUANG Yonghua, O'GALLAGHER A, et al. Calculated regenerator performance at 4 K with helium-4 and helium-3 [J]. AIP Conference Proceedings, 2008, 985(1): 225-234.
- [6] 朱绍伟, 林玉哲. 阶梯推移活塞双级脉管制冷机的数值方法 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42(2): 300-308.
ZHU Shaowei, LIN Yuzhe. Numerical method of step displacer two-stage pulse tube refrigerator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(2): 300-308.
- [7] ZHI X Q, HAN L, DIETRICH M, et al. A three-stage Stirling pulse tube cryocooler reached 4.26 K with He-4 working fluid [J]. Cryogenics, 2013, 58: 93-96.
- [8] QIU L M, CAO Q, ZHI X Q, et al. A three-stage Stirling pulse tube cryocooler operating below the critical point of helium-4 [J]. Cryogenics, 2011, 51(10): 609-612.
- [9] 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(6/7): 426-431.
- [10] LIU Biqiang, JIANG Zhenhua, YING Kongkuai, et al. Theoretical model of a stirling/pulse tube hybrid refrigerator and its verification [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116587.
- [11] YAN Pengda, CHEN Guobang, DONG Jingjing, et al. 15 K two-stage stirling-type pulse-tube cryocooler [J]. Cryogenics, 2009, 49(2): 103-106.
- [12] ZHU Haifeng, JIANG Zhenhua, LIU Shaoshuai, et al. Comparison of three phase shifters for stirling-type pulse tube cryocoolers operating below 30 K [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 413-419.
- [13] 庞晓敏, 戴巍, 马素霞, 等. 液氢温区两级全同轴型脉管制冷机 [J]. 科学通报, 2021, 66(20): 2629-2634.
PANG Xiaomin, DAI Wei, MA Suxia, et al. A completely co-axial two-stage pulse tube cooler working at liquid hydrogen temperatures [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(20): 2629-2634.
- [14] WU Wenting, CUI Xiaoyu, LIU Shaoshuai, et al. Cooling performance improvement of a two-stage pulse tube cryocooler with Er-plated screen as regenerator material [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 615-622.
- [15] WU Xianlin, CHEN Liubiao, LIU Xuming, et al. An 80 mW/8 K high-frequency pulse tube refrigerator driven by only one linear compressor [J]. Cryogenics, 2019, 101: 7-11.
- [16] RADEBAUGH R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler [J]. AIRAH Journal, 2001(3): 55.
- [17] 吴明, 何雅玲, 陶文铨, 等. 最佳脉管长径比优化设计的理论分析及数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3): 230-232.
WU Ming, HE Yaling, TAO Wenquan, et al. Optimum design of the length to diameter ratio of the pulse tube by theory and numerical simulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(3): 230-232.
- [18] 朱强龙, 全加, 刘彦杰, 等. 多级斯特林型脉管制冷机中过渡蓄冷器试验优化 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 244-249.
ZHU Qianglong, QUAN Jia, LIU Yanjie, et al. Experimental optimization of the transition regenerator for multi-stage stirling-type pulse tube cryocooler [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 244-249.
- [19] PANG Xiaomin, WANG Xiaotao, DAI Wei, et al. Theoretical and experimental study of a gas-coupled two-stage pulse tube cooler with stepped warm displacer as the phase shifter [J]. Cryogenics, 2018, 92: 36-40.
- [20] WU X L, CHEN L B, ZHU X S, et al. The study on a gas-coupled two-stage stirling-type pulse tube cryocooler [C]//IOP Conference Series: Materials Science

and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2017: 012146.

[21] GARY J, GALLAGHER A O, RADEBAURH R, et al. Regen3.3 user manual [M]. USA: National Institute of Standards and Technology, 2001.

[22] 温丰硕, 刘少帅, 伍文婷, 等. 10~30 K 温区纯不锈钢丝网与混填磁性填料制冷性能对比 [J]. 化工进展, 2022, 41(1): 113-119.

WEN Fengshuo, LIU Shaoshuai, WU Wenting, et al. Comparison of pure stainless steel wire mesh and mixed HoCu₂ particle as regenerator material at 10—30 K [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(1): 113-119.

[23] 温丰硕, 刘少帅, 伍文婷, 等. 20~30 K 两级脉管制冷机相位特性对比研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1757-1765.

WEN Fengshuo, LIU Shaoshuai, WU Wenting, et al. Comparative study on phase characteristics of 20—30 K two-stage pulse tube refrigerator [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6): 1757-1765.

[24] QIU L M, NUMAZAWA T, THUMMES G. Performance improvement of a pulse tube cooler below 4 K by use of GdAlO₃ regenerator material [J]. Cryogenics, 2001, 41(9): 693-696.

[25] DIETRICH M, THUMMES G. Two-stage high frequency pulse tube cooler for refrigeration at 25 K [J]. Cryogenics, 2010, 50(4): 281-286.

[26] CHEN Liubiao, WU Xianlin, LIU Xuming, et al. Numerical and experimental study on the characteristics of 4 K gas-coupled stirling-type pulse tube cryocooler [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 204-210.

(编辑 赵炜 亢列梅)