

声功回收连管对脉管制冷机性能的影响

周子佳^{1,2}, 张 华¹, 丁 磊^{1,2}, 蒋珍华^{2*}, 刘少帅², 吴亦农²

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 声功回收型脉管制冷机拥有更高的理论效率, 其主要原因是回收了脉管热端的膨胀功。声功回收装置出口至压缩机出口之间的连管, 对声功回收有着重要影响。通过理论分析, 计算了连管阻抗对脉管制冷机性能的影响; 建立了一维整机模型, 通过改变连管结构参数, 模拟了声功回收连管对脉管制冷机性能的影响, 以及对回热器冷热端相位角的影响。研究发现, 相同管径下连管越短, 脉管制冷机性能越好。选择不同长度的连管进行了实验验证。结果表明, 在相同的制冷能力下, 随着声功回收连管长度的增加, 压缩机输入的电功率明显增大。

关键词: 脉管制冷机; 声功回收; 连管; 数值模拟

中图分类号: TB651⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2020)03-0227-07

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2020.03.009

Impact of Connecting Tube on the Performance of Pulse Tube Refrigerator with Acoustic Power Recovery

ZHOU Zijia^{1,2}, ZHANG Hua¹, DING Lei^{1,2}, JIANG Zhenhua^{2*}, LIU Shaoshuai², WU Yinong²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: Work recovery pulse tube refrigerator (WRPTR) with a displacer as phase shifter has higher efficiency. The main reason is that the expansion power at the heat end of the pulse tube is recovered. The connecting tube between the outlet of the displacer and outlet of the compressor has a significant impact on acoustic power recovery. Through theoretical analysis, the impedance of the acoustic power recovery connecting tube of the pulse tube refrigerator is calculated. The effect of the impedance on the cooling performance is also analyzed. Based on a 1-D simulation model, by changing the length of the connecting tube, the effect of the connecting tube on the cooling performance of the pulse tube refrigerator and the phase angel of regenerator was simulated. It is shows that the WRPTR have the better cooling performance with the shorter connecting tube which has the same inner diameter. Finally, different length of the connecting tube is selected for experimental verification. The results show that with the increase of the length of the connecting tube, the input electric power of the compressor increases obviously under the same refrigeration capacity.

Key words: pulse tube refrigerator; acoustic power recovery; connecting tube; numerical model; experiment

0 引言

脉管制冷机相对于斯特林制冷机具有简单、可靠及长寿命等特点, 在空间应用方面扮演着较为重

要的角色^[1-3]。脉管制冷机从最初的基本型脉冲管制冷机^[4]、小孔型脉冲管制冷机^[5-6], 发展到双向进气型^[7]、惯性管气库型脉管制冷机等^[8-10]。效率逐步提

收稿日期: 2020-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51806231); 上海自然科学基金(18ZR1445600)

作者简介: 周子佳, 硕士研究生, 主要从事脉管制冷机研究。E-mail: zijia3000@163.com。

通信作者: 蒋珍华, 教授, 主要从事空间小型低温制冷机研究。E-mail: jiangzhenhua@mail.sitp.ac.cn。

引用本文: 周子佳, 张华, 丁磊, 等. 声功回收连管对脉管制冷机性能的影响[J]. 真空与低温, 2020, 26(3): 227-233.

ZHOU Z J, ZHANG H, DING L, et al. Impact of connecting tube on the performance of pulse tube refrigerator with acoustic power recovery[J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(3): 227-233.

高。但由于其理论效率低于斯特林制冷机,就有了诸如惯性管气库等调相方式的发明和改进。为了提高脉管制冷机的效率,其中一种解决方案是用室温排出器作为调相方式^[11-12],即利用声功回收活塞作为脉管制冷机的调相方式。相比于主动调相压缩机,结构简单,可靠性高;相比于惯性管调相,在满足调相的前提下,还可以有效地回收利用来自脉管热端的膨胀功,从而提高脉管制冷机的效率。

2001 年, Brito 等^[13-14]从数值模拟和实验两方面研究了室温端推移活塞脉管制冷机(Free Warm Expander Pulse Tube, FWEPT)的损失机理、结构以及运行工况优化等问题,推导了推移活塞的运动方程,分析了影响相位角的关键参数。实际上,由于外部电机可以控制室温端推移活塞的运动,这种新的调相结构可以将推移活塞和压力波的相位角调至任何角度。但这种结构本身会引起较大的空容积,带来较大的回热器损失。

近年来,由于对大冷量低温制冷机的需求增大,推动了对高效脉管制冷机研究的发展。2012 年, Ki 等^[15]研究了带有声功回收调相器的脉管制冷机,在脉管热端的出口设计了一套弹簧振子(MSD)系统,不仅可实现对压力波和质量流的调相功能,而且该振子系统可将惯性管中耗散的 PV 声功回收;应用该模型在原有 8 W@50 K 惯性管型脉管制冷机基础上进行了数值模拟研究,用该振子系统代替惯性管进行调相,输入功从 410 W 减小到 405 W, COP 从 0.019 5 增至 0.022 6,而且可回收 37 W 的声功。2015 年,中国科学院理化技术研究所报道了一台高度紧凑的具有声功回收功能的脉管制冷机,采用无杆活塞(意味着压缩面和膨胀面面积相等)对系统压力波与质量流进行调相,活塞的调相能力主要依靠较大的弹簧刚度来实现,因此声功回收装置的固有频率较大^[12]。该制冷机仅需 290 W 输入功率,就能在 80 K 的制冷温度下提供 26.4 W 的制冷量,相对卡诺效率高达 24.2%。实际上,正是因为用排出器替代了惯性管进行调相,且能回收一部分声功,使制冷机达到很高的效率。2016 年,南洋理工大学的 Wang 等^[16]对一台大冷量的脉管制冷机的声功回收装置采用“质量-弹簧”模型进行了建模分析,该制冷机使用惯性管调相时,在 77 K 的制冷温度下, COP 不高于 0.103;但如果采用室温端活塞进行声功回收,其效率可提高至 0.133,相对卡诺效率达到了 38.5%。结果表明,声功回收对制冷机的效率有较明显的提升。同年,浙江大学研究者提出具有声功

回收功能的级联型脉管制冷机,通过传输管的能量传输和调相功能,将脉冲管热端的声功输送至次级冷指进行制冷。理论分析表明,制冷机的级数越多,效率越高,当级数趋于无穷大时,制冷机的效率可以逼近卡诺效率^[17-19]。最终的实验结果显示,该两级制冷机的性能比单级结构提高了 33 %,效率提升明显。

2017 年,同济大学汪明君等^[20]通过实验研究了推移活塞在室温端对脉管制冷机性能的影响。实验数据显示,当制冷机工作在 137.3 K 的制冷温度时,提供 25 W 的制冷量所能达到的最高相对卡诺效率为 12.7%。同年, Zhu 等^[21]通过模拟得到“在相同的杆径比下,推移活塞的直径不会影响推移活塞与压缩活塞之间的位移比”的结论。并进行了相关的实验测试:在带有推移活塞的制冷机中,推移活塞背面有一根杆,用以调节活塞正面和背面的气动力。实验得到了四个充气压力下的最佳运行频率,压缩活塞和推移活塞的位移相位角为 17°,回收了 9 W 的声功;当充气压力为 2.5 MPa,制冷量维持在 10.14 W 时,随着压缩机输入功的变化,脉管制冷机整机的相对卡诺效率未能超过 8%^[22]。2018 年,同济大学的 Lin 等^[23]提出了一种新型脉管制冷机调相方式—惯性管与推移活塞的结合,从数值模拟方面研究了脉管至排出器膨胀腔之间的惯性管调相和声功传输特性;建立了室温推移活塞(SP-PTR)脉管制冷机模型,通过改变频率和扫气容积比,对声功回收原理,声功回收效率和相位调节方面进行了研究:当充气压为 3 MPa,扫气容积比为 0.6,频率为 82 Hz 时,声功回收效率达 60.3%,并且压力波和质量流之间有良好的相位关系。

在声功回收型脉管制冷机的研究中,对声功回收装置的自身参数,如活塞直径,动子质量及板弹簧刚度等对脉管制冷机影响的研究较多^[16, 20]。而对于连接声功回收装置的两根连管(脉管热端出口至声功回收装置入口和声功回收装置出口至压缩机出口)的研究较少。同济大学的研究者对脉管出口至声功回收装置入口连管进行了研究,分析了调相的影响及声功回收效率。声功回收装置出口至压缩机出口连管的主要作用是传输声功回收装置回收的声功,同时由于连管的惯性效应,会对系统压力波与质量流相位角造成影响,进而影响脉管制冷机的性能。

本文就声功回收装置出口至压缩机出口的连管对制冷机性能的影响进行数值模拟和实验研

究。分析了连管的调相基本原理;用一维数值模拟软件建立了整机模型,研究了连管尺寸参数对脉管制冷机性能的影响;进行了声功回收型脉管制冷机性能实验,对模拟分析进行验证。

1 理论分析

图1为声功回收型脉管制冷机(WRPTR)系统图,与传统脉管制冷机不同之处在于其利用弹簧振子系统作为调相机构,同时回收来自脉管热端的声功。其中,声功回收装置出口至压缩机出口之间的声功回收连管有两个作用,第一是传递声功;第二是调节质量流与压力波的相位差。为了便于分析,声功回收连管在此可以视为一段惯性管。

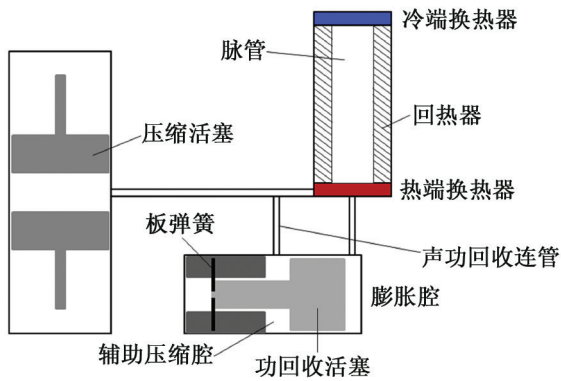


图1 声功回收型脉管制冷机系统示意图

Fig. 1 Schematic of WRPTR

基于Rott声学近似法,可以对惯性管的调相机理进行分析。图2为惯性管的基本结构,根据连续性方程和动量方程,压力和体积流率的控制方程可以表示为^[24]:

$$p_1 = -\frac{1}{i\omega C} \Delta U_1 \quad (1)$$

$$\Delta p_1 = -i\omega L U_1 \quad (2)$$

其中,管内气体的流动表现出阻力特性,工质的惯性表现出感性,内部的空容积表现出容性,声阻 R_v 、声容 C 和声感 L 可表达为:

$$R_v = \frac{\mu \Delta S}{A^2 \delta_v} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\pi \Delta x \sqrt{\mu \omega \rho_0}}{A^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{\pi D^2}{4\gamma RT} \quad (4)$$

$$L = \frac{\rho_0 \Delta x}{A} \quad (5)$$

式中: μ 为动力黏度系数; S 为表面积; A 为面积; δ_v 为热渗透深度; x 为长度; ω 为角频率; ρ_0 为密度; γ 为绝热指数; T 为温度; R 为气体常数; D 为直径。

惯性管中氦气的交变流动控制方程可以类比

到交流电路中,将压力类比为电压 U ,质量流类比为电流 I ,流动阻力类比为电阻 R 。惯性管阻抗可以表示为:

$$Z = R_v + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) i \quad (6)$$

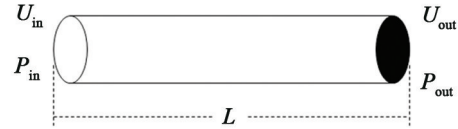


图2 惯性管结构示意图

Fig. 2 The inertance tube structure model

由式(3)~(5)可知,结构尺寸(长度及内径)会导致连管阻抗发生变化;惯性管温度的变化,会使得动力黏度 μ 和工质密度 ρ 的值发生变化,导致阻抗发生变化。本文从工程应用角度,研究连管结构尺寸对脉管制冷机性能的影响。

2 数值模拟

利用一维数值模拟软件对声功回收型脉管制冷机进行整机建模,模拟声功回收连管长度、内径对脉管制冷机性能的影响。其中,充气压力3.2 MPa,运行频率为60 Hz,关键参数如表1所列。

表1 声功回收型脉管制冷机关键参数

Tab. 1 Key parameters of WRPTR

部件	长度/mm	直径/m	备注
压缩机	—	26	最大振幅6 mm
回热器	47	26	
脉管	57	12.8	
声功回收活塞	—	22	质量60 g、最大振幅3.8 mm
声功回收活塞杆	—	12	
板弹簧	—	42	3 600 N/m

为了对比声功回收连管结构尺寸对脉管制冷机性能的影响,选择不同长度的连管进行模拟计算。根据连管的压降和平均体积流率,可以计算该连管的阻抗为:

$$Z = \frac{\Delta p}{U_m} \quad (7)$$

选择连管内径4 mm,长度分别为0.1 m、0.5 m和1.0 m(分别对应case1、2、3)。三种工况下的阻抗对脉管制冷机相位角的影响如图3所示,随着连管阻抗的增大,冷指入口相位角不断增大,连管长度从0.1 m增加到1 m,相位角从26°增加到接近60°;图4为阻抗对脉管制冷机PV功和COP的影响,从图

中可以看出, PV 功曲线随着阻抗的增加而斜率增大, 表明该连管阻抗越大, 脉管制冷机性能越差, 连管长度从 0.1 m 增加到 1 m, 相同制冷性能下 PV 功从 67 W 增加到 120 W, 增加了 79.1%。从图中可以明显看出在相同制冷量和制冷温度下, 第一种工况 (case1) 所需 PV 功最少, 并且冷指入口相位较为合理。三种工况下, 连管长度越长, 脉管制冷机性能越差。

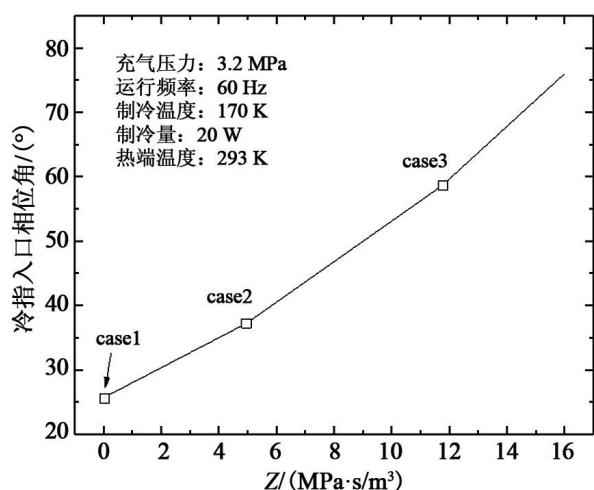


图3 阻抗对冷指入口相位角的影响曲线

Fig. 3 Phase angle vs. Z

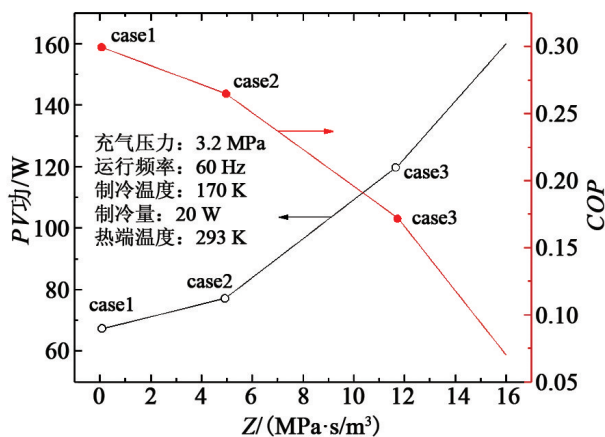


图4 阻抗对 PV 功和 COP 的影响曲线

Fig. 4 Input PV power and COP vs. Z

固定充气压力 3.2 MPa、运行频率 60 Hz 等参数不变, 调节声功回收连管长度和内径, 得到制冷量和 COP 随连管长度的变化关系如图 5、图 6 所示。在同一内径 d 时, 随着连管长度的增加, 制冷量呈下降趋势, COP 也不断减小, 当连管内径不同时, 制冷量随长度的变化趋势相同。这是由于声功回收连管长度的增加, 导致该连管阻抗增加, 使得冷

指入口相位角增大, 回热器热端压力波与质量流相位角急剧增大, 引起回热器等部件不可逆损失增大, 制冷机性能下降。从图中可以明显看出, 连管长度越短, 脉管制冷机的制冷量越大。

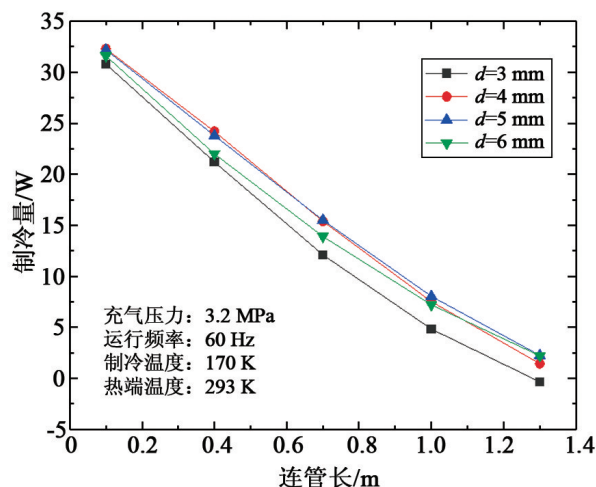


图5 制冷量随连管长度的变化曲线

Fig. 5 Cooling capacity vs. length of connecting tube

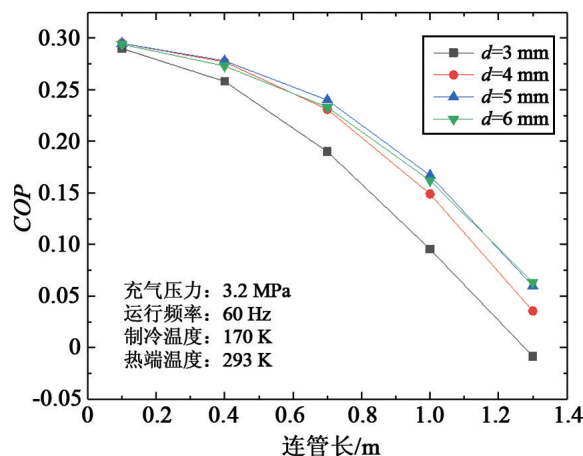


图6 COP 随连管长度的变化曲线

Fig. 6 COP vs. length of connecting tube

减少回热器损失是提高脉管制冷机效率的关键。回热器内阻力损失与质量流幅值大小成正比, 当回热器中间位置压力波与质量流相同时, 回热器内平均质量流最小, 此时制冷效率最高^[25]。结合图 7 与图 8 可知, 声功回收连管从 0.1 m 增加到 1 m, 回热器热端质量流领先压力波相位角不断增大, 连管内径越小相位角越大; 而回热器冷端相位差在 -35° 附近变化, 冷端质量流减小。为了减少回热器损失, 使系统压力波与质量流有较好的相位关系, 声功回收连管不易过长。由图 7 和图 8 所示相位关系及质量流大小, 得到三种工况下的相位关系, 如图 9 所示。

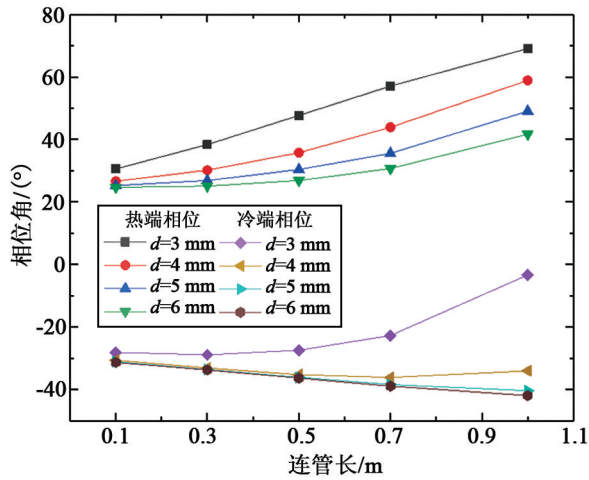


图7 相位角随连管长度的变化曲线

Fig. 7 Phase angle vs. length of connecting tube

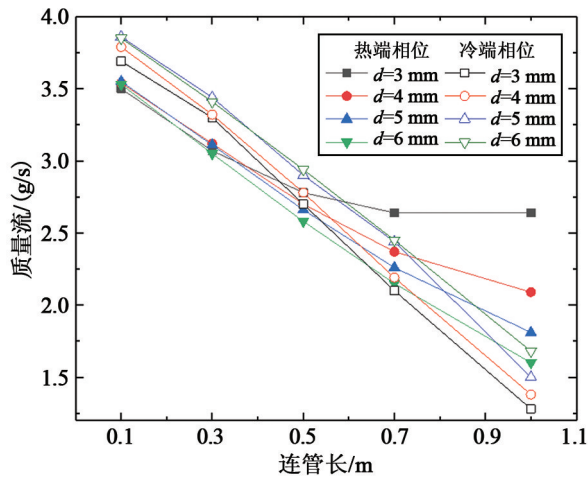


图8 质量流随连管长度的变化曲线

Fig. 8 The mass flow vs. length of connecting tube

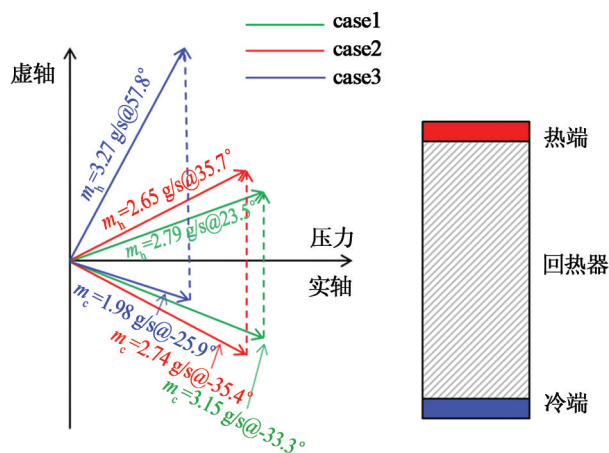
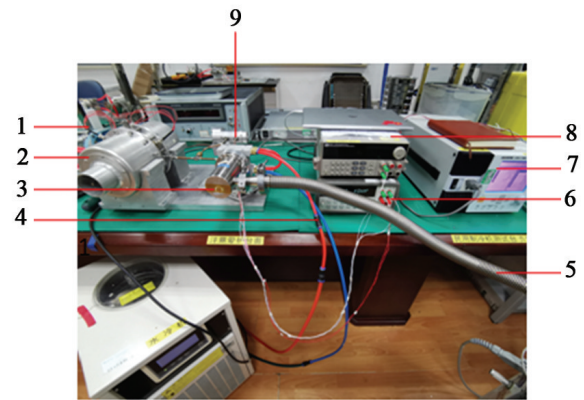


图9 回热器冷热端相位关系分布图

Fig. 9 The relationships of the mass flow relative to the pressure in the regenerator

3 实验装置

图10为声功回收型脉管制冷机实验台,驱动装置为一台活塞直径为26 mm的线性压缩机,冷指冷端换热器测温块上贴有铂电阻和加热片,铂电阻与温度采集仪连接以读取冷头温度,加热片与直流电源相连,通过热平衡法测得制冷量。冷指热端换热器通过冷水机组进行冷却,水冷温度为20℃。冷指外部包有真空罩,实验时通过分子泵抽真空模拟真空环境,从而有效地减小冷头与环境的热交换。



1. 风扇;2. 压缩机;3. 冷指;4. 水冷连管;5. 真空泵连管;6. 温度采集仪;7. NF电源;8. 直流加热电源;9. 声功回收装置。

图10 声功回收脉管制冷机实验台

Fig. 10 The experimental system

4 结果分析

在三种工况下,测试了冷指的性能曲线,如图11所示。可以看出,在相同制冷量下,工况1对应的制冷机功耗最小,即声功回收连管最短时制冷机性能最好。在20 W@170 K性能下,声功回收连管长从0.1 m增加到0.5 m,输入功率从85 W增加到97 W,增加了14.1%;连管长度继续增加到1 m时,输入功率又从97 W增加到140 W,增加了44.3%。在10 W@170 K性能下,声功回收连管长度从0.1 m增加到0.5 m,输入功率从43 W增加到48 W,增加了11.6%;连管长度继续增加到1 m时,输入功率从48 W增加到68 W,增加了41.7%。实验证明,声功回收连管越长,相同制冷量下制冷机功耗越大。而且在制冷量增加的情况下,连管增加相同的长度,输入的电功率的增幅也会变大,这对大冷量的声功回收型脉管制冷机非常不利。

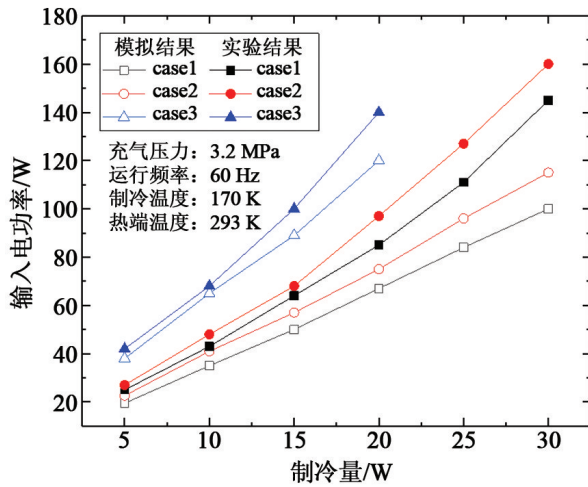


图11 声功回收脉管制冷机性能曲线

Fig. 11 Input electric power vs. cooling capacity

图12为三种情况下COP随制冷量的变化。当制冷机的制冷量为15 W时,三种情况都能获得最高的制冷效率。随着连管长度的增加,脉管制冷机COP减小。声功回收连管是用来传输回收的声功,使制冷机效率得到提升。然而若连管过长反而使得制冷机功耗增加。所以此段连管应根据实际情况尽可能地缩短或者将声功回收装置与压缩机机座结合,避免此段空体积带来的不良影响。

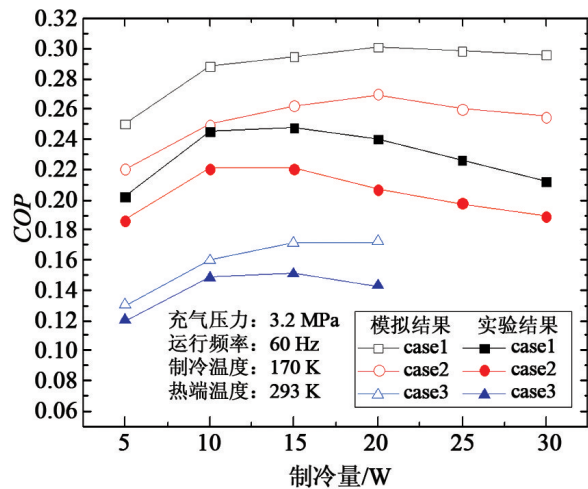


图12 制冷量对制冷机性能COP的影响曲线

Fig. 12 COP vs. cooling capacity

图13为20 W@170 K性能下,三种工况的扫频实验。可以看出,每种情况都存在最优操作频率。随着管长的增加,最优频率减小。这是因为管长的增加导致阻抗的增大,若要获得相同的制冷性能,输入的电功率会增加,而较低的操作频率会使得回热器损失减小,提高制冷机性能^[26]。

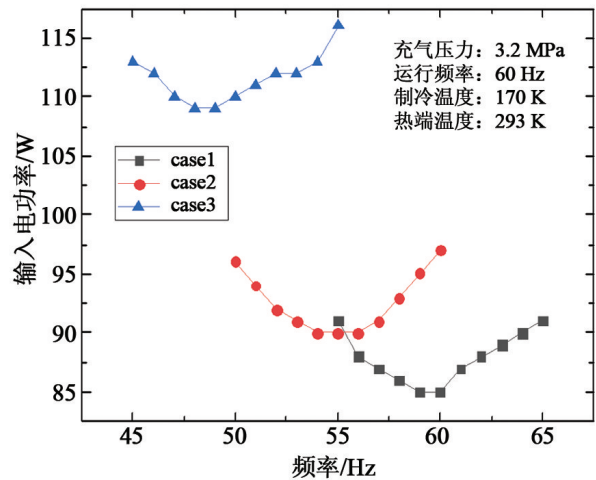


图13 频率对制冷机性能的影响曲线

Fig. 13 Input electric power vs. frequency

5 结论

本文研究了从声功回收装置出口至压缩机出口之间的连管对脉管制冷机性能的影响。结论为:(1)连管长度的增加,使得连管阻抗增大,影响了冷指入口处压力波与质量流之间的相位角,回热器损失增大,制冷性能下降。(2)实验结果与模拟吻合,即声功回收连管越长,制冷机功耗越大,性能越差。(3)为了提高脉管制冷机的效率,可以将声功回收装置与压缩机机座结合,使制冷机更紧凑,有效避免此段空体积带来的影响。

参考文献:

- [1] RADEBAUGH R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler[J]. Proceedings of Institute of Refrigeration, 2000, 96: 1999-2000.
- [2] CHAN C K, RAAB J, ESKOVITZ A, et al. AIRS Pulse Tube Cryocooler System[M]. Cryocoolers 9, Springer US, 1997.
- [3] CHAN C K, NGUYEN T, JACO C, et al. High capacity two-stage pulse tube cooler[M]. Cryocoolers 12, Springer US, 2002.
- [4] GIFFORD W E, LONGSWORTH R C. Pulse-tube refrigeration[J]. Journal of Engineering for Industry, 1964, 86 (3): 264-268.
- [5] MIKULIN E I, TARASOV A A, SHKREBYONOCK M P. Low-temperature expansion pulse tubes[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1984, 29: 629-637.
- [6] RADEBAUGH R, ZIMMERMAN J, SMITH D R, et al. A comparison of three types of pulse tube refrigerators: new methods for reaching 60 K[J]. Advances in Cryogenic Engineering,

- 1986, 31: 779–789.
- [7] ZHU S W, WU P Y, CHEN Z Q. Double inlet pulse tube refrigerators: an important improvement[J]. *Cryogenics*, 1990, 30(6): 514–520.
- [8] TOMINAGA A. Phase controls for pulse-tube refrigerator of the third generation[J]. *Teion Kogaku (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan)*, 1992, 27(2): 146–151.
- [9] KANAO K I, WATANABE N, KANAZAWA Y. A miniature pulse tube refrigerator for temperatures below 100 K[J]. *Cryogenics*, 1994, 34(1): 167–170.
- [10] ZHU S W, ZHOU S L, YOSHIMURA N, et al. Phase shift effect of the long neck tube for the pulse tube refrigerator[M]. *Cryocoolers 9*, Springer US, 1997.
- [11] MATSUBARA Y. Future trend of pulse tube cryocooler research[C]//*Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20)*, Beijing: Elsevier Ltd, 2005: 189–196.
- [12] WANG X, ZHANG Y, LI H, et al. A high efficiency hybrid stirling-pulse tube cryocooler[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(3): 037127.
- [13] BRITO M C, PESKETT G D. Numerical model of free warm expander pulse tube cooler[J]. *Cryogenics*, 2001, 41(10): 751–755.
- [14] BRITO M C, PESKETT G D. Experimental analysis of free warm expander pulse tube[J]. *Cryogenics*, 2001, 41(10): 757–762.
- [15] KIT, JEONG S. Design and analysis of compact work-recovery phase shifter for pulse tube refrigerator[J]. *Cryogenics*, 2012, 52(2/3): 105–110.
- [16] WANG K, DUBEY S, CHOO F H, et al. Modelling of pulse tube refrigerators with inertance tube and mass-spring feedback mechanism[J]. *Applied Energy*, 2016, 171: 172–183.
- [17] WANG L Y, WU M, SUN X, et al. A cascade pulse tube cooler capable of energy recovery[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 572–578.
- [18] 王龙一, 甘智华, 吴镁, 等. 一种逼近卡诺制冷效率的级联脉管法及其两级验证[J]. *化工学报*, 2016, 67(S2): 269–274.
- [19] WANG L Y, WU M, ZHU J K, et al. Study on a cascade pulse tube cooler with energy recovery: new method for approaching Carnot[J]. *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 101(1): 012182.
- [20] 汪明君, 朱绍伟. 推移活塞脉管制冷机中温区性能的实验研究[J]. *低温与超导*, 2017(6): 1–3.
- [21] ZHU S W. Displacer Diameter Effect in Displacer Pulse Tube Refrigerator[J]. *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 278: 012143.
- [22] SHI Y, ZHU S W. Experimental investigation of pulse tube refrigerator with displacer[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 76: 1–6.
- [23] LIN Y Z, ZHU S W. Numerical investigation of the new phase shifter for pulse tube refrigerator – inertancetube combining with step-piston[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 97: 42–48.
- [24] SWIFT G W. Thermoacoustic: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators[M]. *America Tthrough the American Institute of Physic*, 2001.
- [25] RADEBAUGH R. Pulse tube cryocoolers for cooling infrared sensors[C]//*Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, Infrared Technology and Applications XXVI*, 2000: 363–379.
- [26] RADEBAUGH R. Thermodynamics of regenerative refrigerators[R]. *Generation of Low Temperature and It's Applications*, 2016.