

文章编号:0253-4339(2025)02-0067-07

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.02.067

百瓦级高效推移活塞型脉管制冷机实验研究

吴彦康 陈曦 郑朴 周振东 叶天 张华

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要 推移活塞型脉管制冷机采用推移活塞进行相位调节和声功回收,潜在制冷效率高。针对制冷温度在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,当前研究缺乏同时满足大冷量和高效率的推移活塞型脉管制冷机。设计了1台应用于低温冷库的百瓦级制冷量的推移活塞型脉管制冷机,并实验测试其制冷性能,重点关注推移活塞运动和压缩机效率。基于验证后的数值模型,分析脉管冷指与压缩机的耦合关系及冷指内部相位关系。结果表明:当充气压力为 3.0 MPa 、运行频率为 64.9 Hz 、水冷温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、输入电功为 500 W 时,该推移活塞型脉管制冷机可在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提供 160.3 W 制冷量,相对卡诺效率为 22.2% 。此时推移活塞领先压缩活塞 59° ,冷指内部相位分布合理,压缩机与冷指耦合良好,压缩机效率为 78% 。该制冷机为目前 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 制冷温度附近效率最高的推移活塞型脉管制冷机。

关键词 脉管低温制冷机;低温冷藏;制冷性能实验;推移活塞;压缩机

中图分类号:TB61⁺1; TB651

文献标识码:A

Experimental Study on a Hundred-Watt Highly-Efficient Displacer-Type Pulse Tube Cryocooler

Wu Yankang Chen Xi Zheng Pu Zhou Zhendong Ye Tian Zhang Hua

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

Abstract Displacer-type pulse-tube cryocoolers use a displacer for phase adjustment and recovery of acoustic power, leading to high refrigeration efficiency. Despite their potential, there is limited research on highly efficient displacer-type pulse-tube cryocoolers with large cooling capacities near $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. This paper presents the design of a 100-watt displacer-type pulse-tube cryocooler for low-temperature freezers and evaluates its performance, focusing on displacement motion and compressor efficiency. A validated numerical model was employed to analyze the coupling between the pulse tube and compressor and the internal phase relationship of the cold finger. Results show that under operating conditions of a 3.0 MPa charging pressure, 64.9 Hz frequency, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ cooling water temperature, and 500 W input power, the cryocooler achieved a cooling capacity of 160.3 W at $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a relative Carnot efficiency of 22.2% . The displacer led the compressor piston by 59° , the internal phase distribution of the pulse tube was optimal, and the compressor exhibited a high efficiency of 78% . This cryocooler is the most efficient displacer-type pulse-tube cryocooler in its temperature range.

Keywords pulse tube cryogenic cryocooler; hypothermic storage; refrigeration performance test; displacer; compressor

低温冷库在生物医疗和食品保鲜领域具有重要作用,转化医学和精准医学的发展急需建设大量 $-86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冷库以储存组织和细胞,mRNA疫苗只有在 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下保存才能维持稳定性,金枪鱼等海产品也需要在低温环境下存放以保证食品品质^[1-2]。当前低温冷库大都采用传统复叠式制冷或混合工质节流制冷技术^[3-4],该技术成熟但具有能耗高、体积庞大、低温油堵、噪音大、制冷剂不环保等技术缺陷。受节能环保要求影响,低温冷库本就面临较

大的技术革新压力,而“双碳”目标的宣布,又对低温冷库的制冷效率提出了更高要求。

斯特林型低温制冷机包括斯特林制冷机和斯特林型脉管制冷机,具有工作温区广、控温精度高、绿色环保、可靠性高等特点,应用于低温冷库优势显著^[5]。张安阔等^[6]设计了一座容积为 8 m^3 的 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冷库,采用2台斯特林制冷机提供冷源, 500 W 输入电功下单台斯特林制冷机在 $-86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可提供 180 W 制冷量。然而,斯特林制冷机中存在运行于低温

基金项目:国家自然科学基金(52376012)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52376012).)

收稿日期:2023-09-18;修回日期:2023-12-12;录用日期:2024-01-15

端的推移活塞,其在冷热端往复运动的过程中存在穿梭损失、泵气损失和轴向导热损失,冷头振动大,加工和装配精度要求极高,限制了斯特林制冷机的推广应用。脉管制冷机冷端无运动部件,具有结构简单、冷头振动小等特点,已有大量学者研究其在 173 K (-100 °C)附近制冷温区的应用^[7-8]。中国科学院上海技术物理研究所联合上海理工大学和海尔公司研制了多款低温冰箱用惯性管型脉管制冷机,其中一些样机的典型制冷性能为 20 W@170 K^[9]、33 W@170 K^[10]和 50 W@170 K^[11]。然而惯性管型脉管制冷机的本征效率 T_c/T_h (T_c 为冷端温度; T_h 为热端温度。)一般低于斯特林制冷机的本征效率 $T_c/(T_h-T_c)$, 主要原因是其不像斯特林制冷机那样有推移活塞将膨胀腔的膨胀功回收利用,其脉管热端声功(即膨胀功)通过惯性管等调相机构以热量形式耗散。推移活塞型脉管制冷机采用推移活塞调节相位并回收脉管热端声功,其本征效率为逆卡诺效率^[12]。Chen Xi 等^[13]研制了一台推移活塞型脉管制冷机,在 170 K 制冷温度下可提供 15 W 制冷量,相对卡诺效率为 20.8%。Guo Zhaorui 等^[14]设计了 1 台百瓦级制冷量样机,在 178.8 K 获得 120 W 制冷量,相对卡诺效率为 11.2%。上述 2 台样机或制冷量偏小,或制冷效率偏低,难以满足大冷量高效率低温冷库应用需求。

针对生物医疗和食品保鲜领域低温冷库的技术需求,本文研制了 1 台 -100 °C 百瓦级高效率推移活

塞型脉管制冷机,并实验测试其制冷性能,重点关注推移活塞运动和压缩机效率。基于实验数据验证数值模型,并分析压缩机与脉管冷指的耦合和冷指内部相位关系。最后,将该制冷机的性能与目前已公开发表的同温区下的推移活塞型脉管制冷机进行性能对比。

1 实验系统

图 1 所示为推移活塞型脉管制冷机的结构,主要由直线压缩机、脉管冷指、推移活塞调相机构、动力吸振器和连管组成。直线压缩机采用 CP4580 直线压缩机,额定功率为 1 000 W。脉管冷指包括级后冷却器、回热器、冷端换热器、脉管和热端换热器,呈直线型布置以减小流动阻力,从而提高制冷效率。3 个换热器均采用狭缝式结构,回热器内填充 150 目不锈钢丝网,脉管两端布置层流丝网。推移活塞调相机构为被动有杆型^[15],包括膨胀腔、辅助压缩腔和调相机构背压腔 3 个腔体,搭配适当刚度的板弹簧,具有相位调节和声功回收双重作用。动力吸振器由板弹簧和质量块组成^[16],紧固在调相机构端盖上,更换质量块可调整其固有频率。连管包括三通连管、进调相机构连管和功回收连管,用于连接上述主要部件。本制冷机采用低温制冷机常用的一维模拟软件 Sage 进行设计^[17-19],除直线压缩机外的部件均自行设计并加工。表 1 所示为推移活塞型脉管制冷机的主要参数。

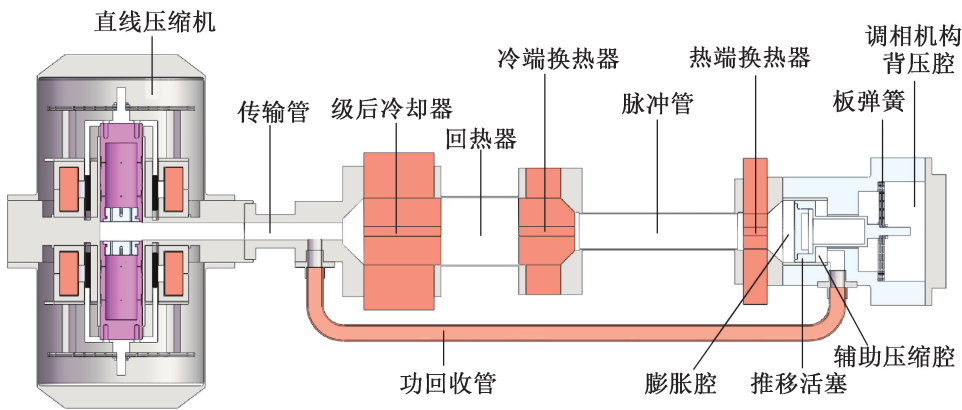


图 1 推移活塞型脉管制冷机
Fig.1 Displacer-type pulse tube cryocooler

图 2 所示为实验系统。压缩机由交流电源驱动,输入电功通过交流电源上的示数直接读取。制冷量采用热平衡法测量,数个加热电阻贴在冷端换热器外壁,通过直流电源的示数获取制冷量。冷端换热器粘贴 2 只四线制 Pt100 铂电阻,包裹珠光砂绝热,用于

测量制冷温度。冷指入口和出口分别安装压阻式压力传感器,用于测量压力波动和冷指前后的压力变化。本实验采用间接测量法测量压缩活塞与推移活塞的位移,将压电式压力传感器分别置于压缩机和调相机构背压腔处,通过背腔压力波动计算压缩活塞和

表 1 推移活塞型脉管制冷机的结构参数

Tab.1 Structural parameters of the displacer-type pulse tube cryocooler

部件	参数	数值
压缩活塞	直径/mm	50
	最大振幅/mm	6
回热器	长度/mm	55.5
	直径/mm	48
冷端换热器	长度/mm	38
	狭缝宽度/mm	0.2
	狭缝条数/条	50
脉冲管	长度/mm	113
	内径/mm	25
推移活塞	直径/mm	44
	杆径/mm	22

推移活塞位移^[20-21],测量误差分别为 4.6%和 5.2%。

2 实验结果与讨论

本文采用充气压力为 3.0 MPa 和运行频率为 64.9 Hz 对制冷机的制冷性能进行测试与深入分析。图 3 所示为输入电功为 400~500 W 时不同制冷温度下推移活塞型脉管制冷机的制冷量。制冷量随制冷温度的升高而增大,当输入电功大于 450 W 时,在制冷温度为-120~-80 °C 内制冷量均超过 100 W。

图 4 所示为 2 个周期内冷指前后压力变化,压力大致呈正弦变化趋势。冷指前后压力幅值分别为 0.259 MPa 和 0.217 MPa,冷指后压力相位滞后冷指前 1°。常温下充气压力为 3.00 MPa,当冷端温度降至-100 °C 时,平均压力降至 2.93 MPa。图 5 所示为推移活塞和压缩活塞相位差,正值表示推移活塞领先压缩活塞。在-100 °C 制冷温度下,活塞相位差在

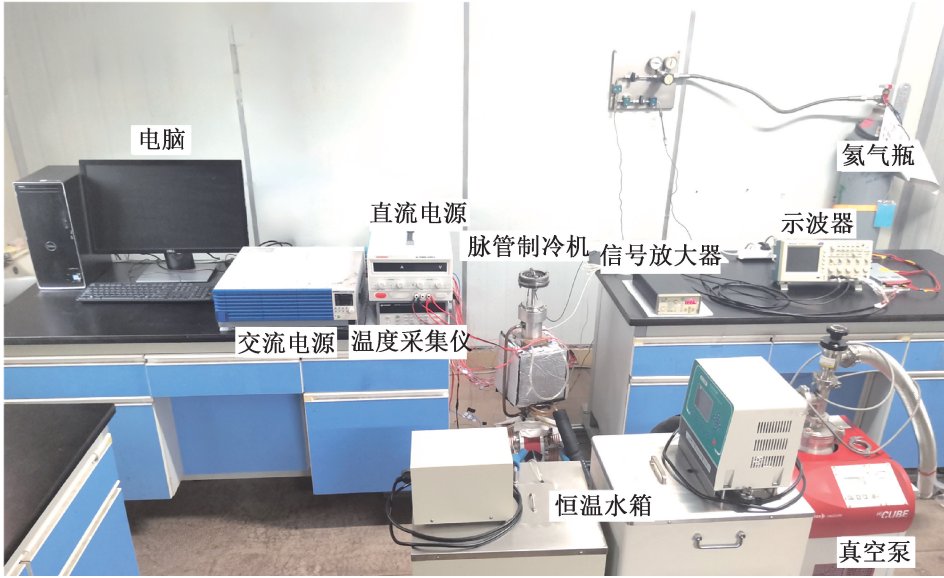


图 2 实验系统

Fig.2 The experimental system

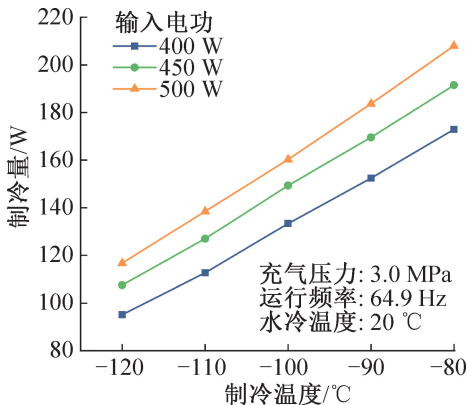


图 3 不同输入电功下的制冷量

Fig.3 Cooling capacity at different input electric powers

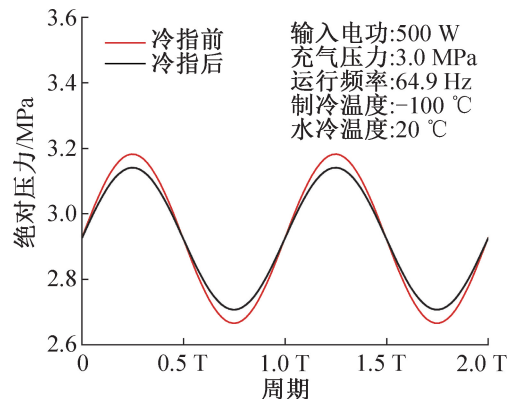


图 4 冷指前后压力变化

Fig.4 Variation of pressure before and after the cold finger

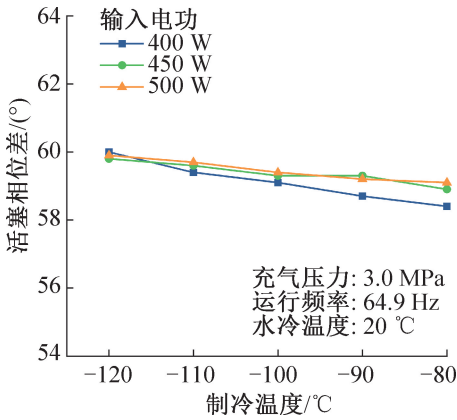


图 5 活塞相位差

Fig.5 Phase difference between the compressor piston and the displacer

59°附近,且随着制冷温度升高,活塞相位差略有减小,变化幅度在 2°以内。当调相机机构参数确定后,活塞相位差主要取决于运行频率,受制冷温度和输入电功影响较小。

图 6 所示为主压缩腔、膨胀腔和辅助压缩腔中 PV 功随制冷温度的变化。PV 功也称声功,定义为:单位时间内制冷机中通过垂直于声波传播方向上某截面处的平均声能量,表征了该截面处的气体所具有的最大做功能力。主压缩腔 PV 功基本维持在约 400 W,膨胀腔和辅助压缩腔 PV 功均随制冷温度升高而增大。由于推移活塞机械阻尼损失、间隙泄漏损失和背压腔损失,辅助压缩腔 PV 功比膨胀腔少 20~30 W。

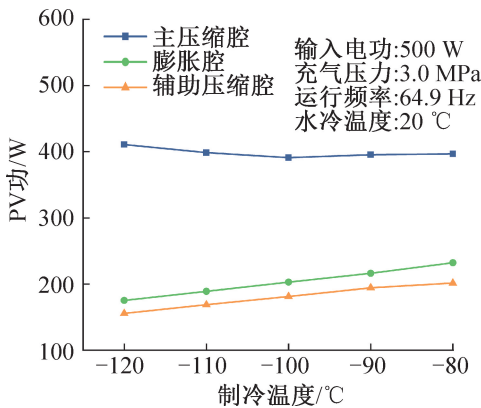


图 6 工作腔 PV 功变化

Fig.6 PV power variation of the working chambers

输入电功经直线压缩机转化为主压缩腔 PV 功,期间的主要损失为:电机线圈铜损、内外轭铁铁损、活塞阻尼损失、活塞间隙泄漏损失、气体轴承耗气损失和背腔损失。其中,电机线圈铜损 P_{Cu} 可采用实验数据计算得到^[22]:

$$P_{Cu} = I_c^2 R_c \quad (1)$$

式中: I_c 为压缩机线圈的电流有效值, A; R_c 为线圈电阻, Ω 。

除电机线圈铜损外,压缩机的其他损失测量难度较大,故通过计算主压缩腔的 PV 功 W_{PV} 反推出这部分损失的占比,计算如下^[23]:

$$W_{PV} = \frac{1}{2} p_m \dot{V}_m \cos(\alpha - \beta + 90) \quad (2)$$

式中: p_m 为压力幅值, Pa; \dot{V}_m 为体积流量幅值, m^3/s ; α 为压缩活塞的相位, ($^\circ$); β 为压力相位, ($^\circ$)。

体积流量幅值 \dot{V}_m (压缩机为双活塞对置布置):

$$\dot{V}_m = 4\pi f X_m A \quad (3)$$

式中: f 为运行频率, Hz; X_m 为压缩活塞位移幅值, m; A 为压缩活塞截面积, m^2 。

计算得到主压缩腔 PV 功约为 390.2 W。图 7 所示为直线压缩机主压缩腔 PV 功和各损失占比,电机线圈铜损占比 4%,其他损失占比 18%,主压缩腔 PV 功占比即压缩机效率为 78%。

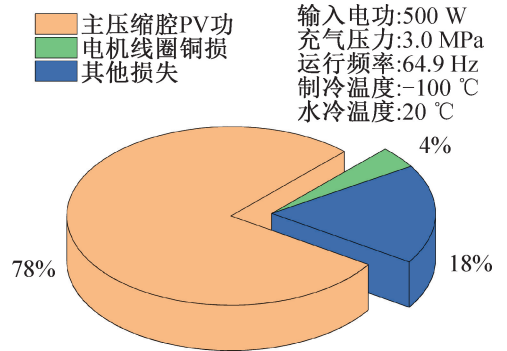


图 7 直线压缩机的能量分布

Fig.7 Energy distribution of the linear compressor

图 8 所示为一维 Sage 模拟与实验的对比。由图 8(a)可知,当输入电功为 500 W,不同制冷温度下制冷量的模拟值与实验值的相对误差均在 10%以内,且随着制冷温度的增加,模拟值与实验值的差值逐渐减小,造成该现象的原因是一维模拟未考虑多维流动对制冷性能的影响,在制冷温度较低时,较大的冷热端温差增强了回热器和脉管内部的温度和流动不均匀性,导致回热器和脉管的损失增加。相对卡诺效率的模拟值与实验值均在 -100 °C 取到最大,误差均在 2%以下。当输入电功为 500 W 时,制冷量为 160.3 W@ -100 °C,相对卡诺效率为 22.2%。图 8(b)对比了输入电功为 500 W 时冷指前后压比的模拟值和实验值,两者均随制冷温度的升高而缓慢增大。压比模拟值比实验值大约 0.02,主要原因是模拟中未考虑直线压缩机的气体轴承的耗气损失。

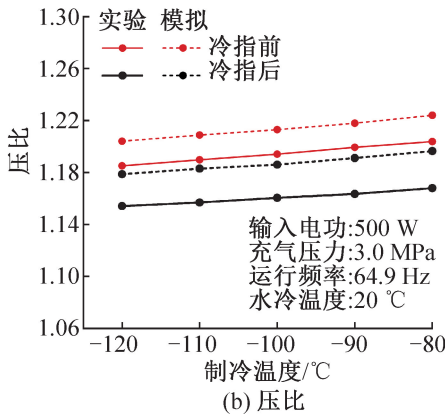
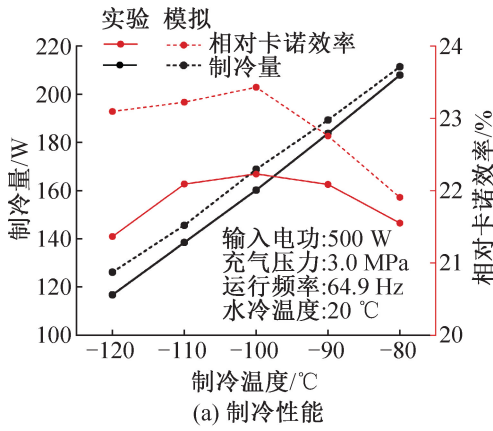
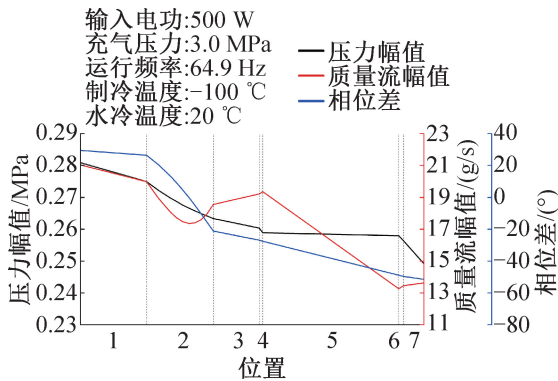


图8 制冷性能和压比的实验与模拟对比

Fig.8 Comparison of the cooling performance and pressure ratio between experimental and simulation results

3 制冷性能分析

由于实验无法测量冷指内部质量流,故采用验证后的数值模型分析冷指内部相位关系。图9所示为模拟中脉管冷指内压力、质量流及其相位差分布。压力幅值从级后冷却器入口开始逐渐下降,在回热器中



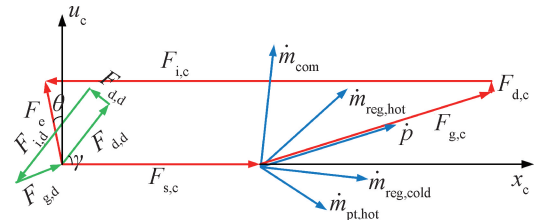
1级后冷却器;2回热器;3冷端换热器;4冷端层流丝网;
5脉冲管;6热端层流丝网;7热端换热器。

图9 脉管冷指内参数分布

Fig.9 Distribution of the operational parameters inside the cold finger

降幅最大为11.6 kPa,在脉管中降幅最小为0.9 kPa。质量流幅值在回热器内部先减小后增大,数值最小处即相位差为0的位置。相位差为正表示质量流领先压力,则回热器热端质量流领先压力27°,回热器冷端质量流滞后压力21°,质量流和压力相位相同处位于回热器中点偏向冷端。

图10所示为充气压力为3.0 MPa,运行频率为64.9 Hz时整机耦合的模拟结果,其中压缩活塞受到弹簧力 $F_{s,c}$ 、气体力 $F_{g,c}$ 、阻尼力 $F_{d,c}$ 、惯性力 $F_{i,c}$ 和电磁力 F_e 等5个力的作用;推移活塞受到弹簧力 $F_{s,d}$ 、气体力 $F_{g,d}$ 、阻尼力 $F_{d,d}$ 和惯性力 $F_{i,d}$ 等4个力的作用。图中压缩活塞所受电磁力与活塞速度 u_c 的夹角 θ 约为10°,压缩机接近谐振状态,压缩机与脉管冷指的耦合较好;推移活塞领先压缩活塞的相位角 $\gamma = 52^\circ$,与实验值的误差在15%以内;脉管冷指内压力与质量流在回热器的中部达到同相,说明回热器损失较少,冷指效率较高。因此,整套推移活塞型脉管制冷机在该工况下处于较好的工作状态。



— 压缩活塞的受力平衡; — 推移活塞的受力平衡;
— 冷指内部的相位关系; x_c 压缩活塞位移; u_c 压缩活塞速度; F_s 弹簧力; F_g 气体力; F_d 阻尼力; F_i 惯性力; F_e 电磁力; \dot{m}_{com} 压缩机出口质量流; \dot{m}_{reg} 回热器质量流; \dot{m}_{pt} 脉冲管质量流; p 压力波;下标:c表示压缩活塞;d表示推移活塞;hot表示热端;cold表示冷端。

图10 整机的受力与相位耦合图

Fig.10 Joint force-and-phase coupling diagram

通过实验测得的本推移活塞型脉管制冷机的最优性能如下:当充气压力为3.0 MPa、运行频率为64.9 Hz时,500 W输入功率下的制冷量为160.3 W @ -100 °C。表2所示为截至目前所有公开发表的-100 °C温区附近的推移活塞型脉管制冷机和部分惯性管型脉管制冷机的性能。

由于推移活塞型脉管制冷机将脉管热端的残余声功进行有效利用,因此本文设计的制冷机性能明显优于文献[11]中的惯性管型脉管制冷机。而同为推移活塞型脉管制冷机,文献[13]中提及的样机与本文设计的制冷机效率相近,且为同轴型冷指,但其制冷量较小,无法应用于大冷量需求的低温冷库中,而文献[14]中的推移活塞型脉管制冷机与本制冷机的

表2 脉管制冷机性能对比
Tab.2 Performance comparison of certain pulse tube cryocoolers

来源	制冷机类型	冷指类型	制冷性能	输入电功/W	相对卡诺效率/%
文献[11]	惯性管型	同轴型	50.0 W@ 170.0 K	230.0	16.5
文献[13]	推移活塞型	同轴型	15.0 W@ 170.0 K	56.0	20.8
文献[14]	推移活塞型	直线型	120.0 W@ 178.8 K	684.6	11.2
本文	推移活塞型	直线型	160.3 W@ 173.0 K	500.0	22.2

制冷量较为接近,但效率远低于本制冷机。由此可见,由于较高的压缩机效率(78%)和合理的脉管冷指内相位分布,本制冷机成为目前-100℃温区附近制冷效率最高的推移活塞型脉管制冷机,且同时具有大冷量和高效率两大特征,在低温冷藏领域具备显著优势。

4 结论

本文研制了1台-100℃百瓦级制冷量推移活塞型脉管制冷机,实验测试了其制冷性能,基于实验数据验证了数值模型,得到结论如下:

- 1)模拟结果表明,回热器冷热端压力与质量流的相位差分别为-21°和27°,脉管冷指内相位分布合理,且压缩机与冷指耦合良好。
- 2)实验结果表明,当充气压力为3.0 MPa,运行频率为64.9 Hz,水冷温度为20℃,输入电功为500 W时,该推移活塞型脉管制冷机可在-100℃提供160.3 W制冷量,相对卡诺效率为22.2%。此时推移活塞领先压缩活塞59°,压缩机效率达到78%。
- 3)本制冷机在该工况下是目前-100℃温区附近制冷效率最高的推移活塞型脉管制冷机。该大冷量高效率推移活塞型脉管制冷机可用于生物医疗和食品保鲜领域低温冷库,也可为航天领域中的大型光学系统提供冷源。

本文受上海市中央引导地方科技发展资金(YDZX20213-100003002)项目资助。(The project was supported by the Central Guidance on Local Science and Technology Development Fund (No. YDZX20213100003002).)

参考文献

[1] WANG Haidan, SONG Yulong, CAO Feng. Experimental investigation on the pull-down performance of a -80℃ ultra-low temperature freezer[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 119: 1-10.

[2] LI Dawei, BAI Tao, YU Jianlin. Thermodynamic performance optimization and analysis of an auto-cascade refrigeration cycle with vapor injection for ultra-low

temperature freezer [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 145: 425-435.

[3] 曹海山, 孟庆航, 童欣, 等. 线性压缩机驱动的混合工质微型节流制冷机[J]. 制冷学报, 2022, 43(1): 74-80. (CAO Haishan, MENG Qinghang, TONG Xin, et al. A mixed-refrigerant miniature Joule-Thomson cooler driven by a linear compressor[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(1): 74-80.)

[4] 杨易坤, 张华, 马泽昆. 微型压缩机驱动的单级与自复叠耦合系统的实验研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 13-18. (YANG Yikun, ZHANG Hua, MA Zekun. Experimental study of a single-stage and auto-cascade coupling system driven by miniature compressors [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 13-18.)

[5] BERCHOWITZ D M, KWON Y. Environmental profiles of Stirling-cooled and cascade-cooled ultra-low temperature freezers[J]. Sustainability, 2012, 4(11): 2838-2851.

[6] 张安阔, 吴明, 冯英珑, 等. 斯特林型-80℃低温冷库研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(5): 25-31. (ZHANG Ankuo, WU Ming, FENG Yinglong, et al. Research on Stirling-type low-temperature cold storage at -80℃ [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(5): 25-31.)

[7] 荀玉强, 杨鲁伟, 刘晓燕, 等. -100℃温区的高频脉冲管制冷机[C]//第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网2007年度学术交流会议论文集. 北京, 2007: 274-278. (XUN Yuqiang, YANG Luwei, LIU Xiaoyan, et al. High-frequency pulse tube refrigerator at -100℃ [C]//8th National Cryogenic Engineering Conference and the 2007 Academic Exchange Conference of Professional Information Network for Aerospace and Cryogenics. Beijing, 2007: 274-278.)

[8] WEI L, WANG N, ZHAO M, et al. Research of a high capacity coaxial pulse tube cryocooler working at 170 K [C]//Cryocoolers 21. ICC Press. Boulder, CO, 2021: 229-234.

[9] 刘少帅, 陈曦, 吴亦农. 脉冲管制冷机应用于中高温区性能探究[C]//上海市制冷学会2013年学术年会论文集. 上海, 2013: 57-60. (LIU Shaoshuai, CHEN Xi, WU Yinong. Experimental study on pulse tube cryocooler used

- in high temperature applications [C]//2013 Annual Conference of Shanghai Society of Refrigeration. Shanghai, 2013:57-60.)
- [10] 陈海涛, 刘占杰, 李春静, 等. 小型脉管式斯特林低温冰箱研制[J]. 低温与超导, 2015, 43(9): 11-14. (CHEN Haitao, LIU Zhanjie, LI Chunjing, et al. Development of a small cryogenic Stirling-type pulse tube cooler freezer[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2015, 43(9): 11-14.)
- [11] 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.
- [12] WANG Mingjun, XU Haojie, LIN Yuzhe, et al. Experimental investigation of pulse tube refrigerator with rod type displacer as phase shifter [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 93: 47-51.
- [13] CHEN Xi, LING Fei, ZENG Yangping, et al. Investigation of the high efficiency pulse tube refrigerator with acoustic power recovery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113904.
- [14] GUO Zhaorui, LIN Yuzhe, ZHU Shaowei. Experimental investigation of displacer rod diameter effect on pulse tube cryocooler [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 112: 69-73.
- [15] ZHENG Pu, CHEN Xi, WU Yankang, et al. Comparative study of four displacer phase-shifters in a split pulse tube refrigerator working at 170 K [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 230: 120772.
- [16] 赵千祥, 陈曦, 缪源. 斯特林制冷机无阻尼动力吸振器的优化设计[J]. 低温与超导, 2020, 48(9): 8-13. (ZHAO Qianxiang, CHEN Xi, MIAO Yuan. Optimization design of undamped dynamic vibration absorber of Stirling cooler[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2020, 48(9): 8-13.)
- [17] YAN Cungang, DAI Wei, WANG Yanan, et al. Investigation on the cool-down speed of Stirling type pulse tube cryocooler with inertance tube [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 130: 99-103.
- [18] WANG Longyi, WU Mei, SUN Xiao, et al. A cascade pulse tube cooler capable of energy recovery[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 572-578.
- [19] WANG Nailiang, ZHAO Miguang, OUYANG Yang, et al. A high efficiency coaxial pulse tube cryocooler operating at 60 K[J]. *Cryogenics*, 2018, 93: 48-50.
- [20] YOU Xiaokuan, QIU Limin, ZHI Xiaoqin, et al. Performance analysis of a linear compressor in a cryocooler [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 659-665.
- [21] 罗开琦, 孙岩雷, 罗二仓, 等. 空调制冷温区的电驱动大功率自由活塞斯特林制冷机的研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(10): 2623-2630. (LUO Kaiqi, SUN Yanlei, LUO Ercang, et al. Investigation on the electric-driven high power free-piston stirling cooler at air-conditioning temperature range[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(10): 2623-2630.)
- [22] YOU Xiaokuan, QIU Limin, ZHI Xiaoqin, et al. Study on the method of improving the input power of the linear compressor in a high capacity pulse tube cryocooler[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 96: 139-146.
- [23] 欧阳洋, 陈厚磊, 唐清君, 等. 超高频小型化脉冲管制冷机耦合匹配的理论模型与实验验证[J]. 低温工程, 2018(3): 6-13. (OUYANG Yang, CHEN Houlei, TANG Qingjun, et al. Theoretical model and experimental verification of parameter matching in high frequency miniaturized pulse tube cryocooler[J]. *Cryogenics*, 2018(3): 6-13.)

通信作者简介

陈曦,男,教授,博士生导师,上海理工大学能源与动力工程学院,13816426670,E-mail:chenxistudy@163.com。研究方向:低温制冷机,制冷压缩机,低温储能及热泵系统。

About the corresponding author

Chen Xi, male, professor, doctoral supervisor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-13816426670, E-mail: chenxistudy@163.com. Research fields: cryocooler, refrigeration compressor, low-temperature energy storage and heat pump system.