

小孔阀辅助调相气动推移活塞型脉管制冷机的模拟研究

毕文俊, 鲁斯曼, 张晓青

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 气动型功回收推移活塞的运动特性主要取决于制冷机的工况参数和结构参数, 通常在额定工况达到最佳匹配。然而, 在实际运行中容易出现偏离额定设计工况的情况, 导致整机制冷性能恶化。为此, 采用小孔阀辅助调相的方法, 在脉管热端增设一个小孔阀气库结构, 模拟分析了在偏离额定工况时小孔阀开度对整机制冷性能的调节特性。模拟结果显示, 在一定阀门开度内, 小孔阀具有优化相位关系, 减小回热器损失, 提高整机效率的能力。

关键词: 热力学; 动力学理论; 复杂流体; 流动; 脉管制冷机; 推移活塞; 数值模拟

中图分类号: TK 123

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-09

Numerical investigation of displacer-type pulse tube refrigerator with orifice

BI Wenjun, LU Siman, ZHANG Xiaoqing

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The motion characteristics of the gas driving work-recovery displacer are primarily determined by the operating parameters and geometric parameters of the refrigerator, typically achieving optimal match under rated conditions. However, deviations from the rated conditions frequently occur in practical operation, leading to deterioration of the cooling performance. To address this, an orifice was added to the hot end of the pulse tube for auxiliary phase shifting. The regulation characteristics of the orifice opening on the cooling performance under off-design conditions were simulated and analyzed. The simulation results indicated that, within a certain range of orifice openings, the orifice can optimize the phase relationship, reduce losses in the regenerator, and enhance the efficiency.

Keywords: thermodynamics; kinetic theory; complex fluids; flow; pulse tube refrigerator; displacer; numerical simulation

引言

由于传统脉管制冷机依赖于双向进气与惯性管等调相方式, 存在脉管热端膨胀功无法回收以及

理论效率低等缺陷, 声功回收型脉管制冷机已逐渐成为脉管制冷机技术发展的研究热点。目前常见的型式包括双活塞式、环路结构、多级串联式、阶梯活塞型和推移活塞型^[1]。其中, 推移活塞型通过在

收稿日期: 2025-12-29 修回日期: 2026-04-23

通信作者: 张晓青(1964—), 女, 博士, 教授, zhangxq@mail.hust.edu.cn

第一作者: 毕文俊(2002—), 男, 硕士研究生, bwj20020202@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51976066)

引用本文: 毕文俊, 鲁斯曼, 张晓青. 小孔阀辅助调相气动推移活塞型脉管制冷机的模拟研究[J]. 化工学报, DOI: 10.11949/0438-1157.20251471

Citation: BI Wenjun, LU Siman, ZHANG Xiaoqing. Numerical investigation of displacer-type pulse tube refrigerator with orifice[J]. CIESC Journal, DOI: 10.11949/0438-1157.20251471

室温端引入活塞组件,同时实现了膨胀功的回收与相位控制^[2]。相较于其他几种型式,推移活塞型脉管制冷机结构更为紧凑,众多学者对其进行了广泛研究^[3-6]。

根据推移活塞的驱动方式,推移活塞型脉管制冷机可分为主动推移活塞型和气动推移活塞型两种。主动型是通过直线电机精确控制推移活塞的运动状态,但需要引入直线电机运动部件。2018年,曾焯平等^[7]通过实验深入研究了主动调相电机的调相能力及其对整机性能的影响,验证了主动调相压缩机应用的可行性。牛津大学^[8]采用主动推移活塞型式,通过直线电机精确调节推移活塞与压缩活塞之间的相位,在不同相位下分别获得了最大制冷量和最佳相对卡诺效率。2020年,Deng^[9]采用主动推移活塞型式,在不同制冷温度下均获得了良好的制冷性能。而气动型推移活塞的运动依靠内部的气动特性工作,无需直线电机,但其运动特性取决于制冷机运行工况和结构参数及多物理场的复杂耦合,因此设计气动推移活塞时需要进行更多的迭代过程^[10]。在理想情况下,气动型能够达到与主动型相同的声功回收和相位调节效果^[11]。2023年,Pu Zheng^[12]基于Deng的实验参数,构建了不同推移活塞型式的数值模型,模拟结果也证明了在有推移活塞杆情况下,气动型与主动型的理想制冷性能几乎一致。

然而,在采用数值模拟进行制冷机设计时,回热器丝网的实际填充情况难以预估,在实际丝网填充过程中,并不能做到像模拟分析假设时的均匀分布,而是存在疏密相间的情况,甚至在压紧丝网过程中出现边缘间隙^[13,14]。即便只有很小间隙,也会形成低阻流道,削弱回热器换热有效性;随着尺度减小,这类结构缺陷的影响更加显著^[15]。同轴型冷头气体流动的实际有效长度也难以在Sage中预测^[16]。粘性力和活塞阻尼受推移活塞装配状态的影响,存在一定的随机性^[17],另外密封间隙的均匀性也很难在装配时保证一致性^[18]。因此,在实际运行中可能达不到设计时的预估相位关系和制冷性能。主动型推移活塞利用电机驱动控制,能够在制冷机实际运行中精确控制推移活塞运动状态,进而调节整机相位至最佳值。然而,气动型推移活塞由于缺乏电机驱动调整推移活塞的运动状态,在整机运行偏离最优点时,缺乏及时调整相位的能力,可能导致制冷性能严重恶化。对此问题,同济大学朱绍伟

课题组^[19]提出在脉管热端加设小孔阀气库结构,作为调节装置与推移活塞协同工作,辅助调相,并对其进行了详细的理论研究。随后,该课题组对单级、两级小孔阀辅助调相进行了系列实验研究^[20],证明了在单级气动推移活塞脉管制冷机上增设小孔阀辅助调相,在一定范围内能够有效提高制冷量,且几乎不影响整机效率。目前,研究多聚焦于推移活塞结构参数优化调相性能^[21-24],针对辅助推移活塞调相的研究分析较少^[25],对其优化整机性能的机理尚不清晰。为此,本文将针对小孔阀辅助调相气动推移活塞型脉管制冷机进行模拟研究,以揭示其调相机理和影响规律,为设计和应用提供有效方法。

1 数值模型建立

1.1 物理模型

图1展示了气动推移活塞型及小孔阀辅助调相型脉管制冷机的结构示意图,其中气动推移活塞型系统(图1(a))主要由直线压缩机、级后冷却器、回热器、冷端换热器、脉管、热端换热器以及推移活塞构成。直线压缩机采用对置结构设计,旨在有效降低压缩机在工作过程中产生的振动干扰。图1(b)为所研究的小孔阀辅助调相型系统,在图1(a)结构基础上,于脉管热端位置设置了一个小孔阀气库的结构。

1.2 小孔阀辅助调相型脉管制冷机的Sage模型建立及模型验证

1.2.1 小孔阀辅助调相型脉管制冷机Sage模型 根据小孔阀辅助调相型脉管制冷机的物理模型,使用Sage商业软件^[26]搭建整机一维数值模型,如图2所示。

1.2.2 模型验证 目前针对小孔阀辅助调相气动推移活塞型脉管制冷机的公开实验数据仍较为缺乏,因此本文无法对含小孔阀气库结构的完整模型进行直接实验验证,只能对其基础构型,即关闭小孔阀后得到的气动推移活塞型脉管制冷机模型(图1(a)),进行部分验证。在后面章节的研究分析中,会对图1两种结构的性能进行对比分析。

(1)验证样机描述利用2019年陈曦等人设计的一款气动推移活塞型脉管制冷机作为验证样机,该制冷机的结构、工况和性能数据来自于公开的文献^[27]。此外,公开文献中提供了该制冷机的建模信

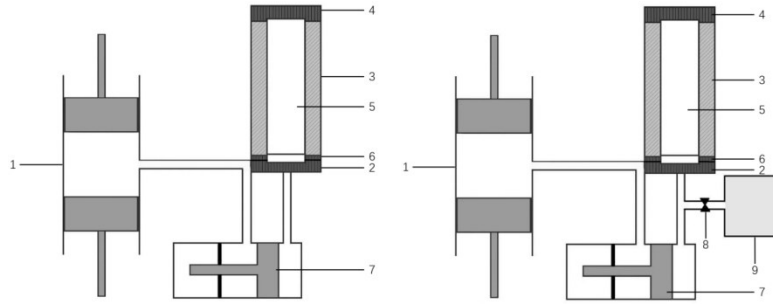


图1 脉管制冷机结构示意图:(a)气动推移活塞型;(b)小孔阀辅助调相型

Fig.1 Schematic of the pulse tube refrigerator: (a) gas driving displacer type; (b) orifice-assisted phase-shifting type

1—直线压缩机;2—级后冷却器;3—回热器;4—冷端换热器;5—脉管;6—热端换热器;7—推移活塞;8—小孔阀;9—气库

息^[28-30]。因此,该样机非常适合用于本研究的验证和比较。

图3为该样机的物理模型示意图,制冷机主要由以下部件组成:压缩机、冷端换热器、回热器、脉

管、热端换热器、级后冷却器、膨胀腔、推移活塞、次压缩腔、背压腔和板弹簧。该样机的主要结构参数列于表1中。

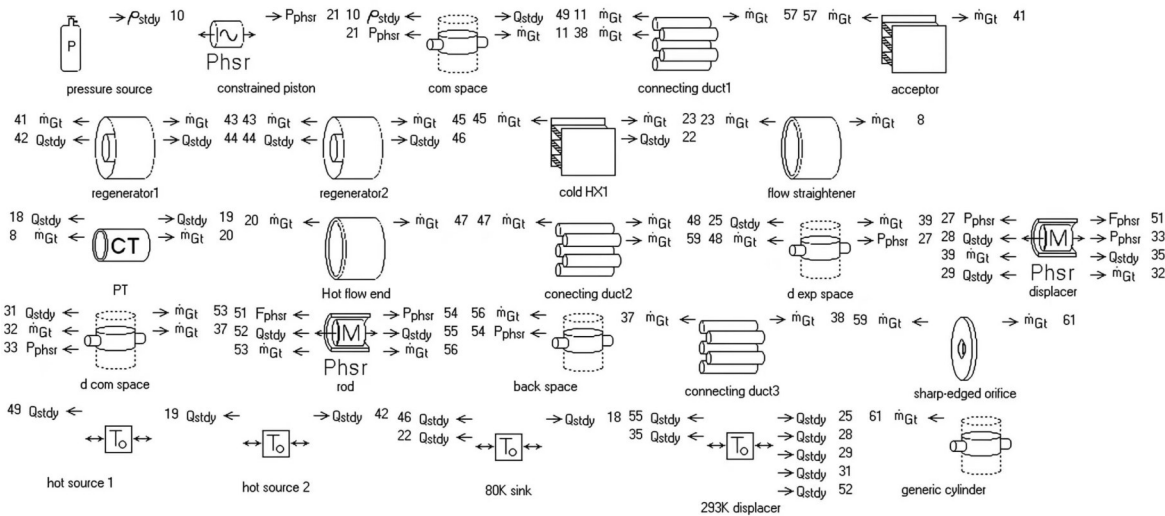


图2 小孔阀辅助调相型脉管制冷机Sage模型

Fig.2 Sage model of orifice-assisted phase-shifting type pulse tube refrigerator

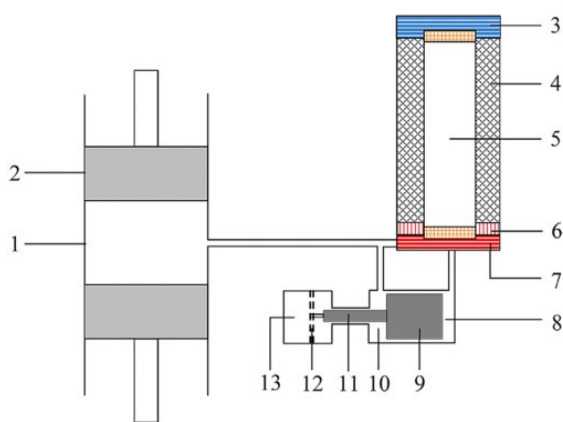
(2)气动推移活塞型脉管制冷机的模型验证基于建立的小孔阀辅助调相型脉管制冷机一维数值模型,在关闭小孔阀时,模型可简化成气动推移活塞型制冷机模型,由于便于利用实验数据进行验证和比较,因此据此模型进行模拟计算。在充气压力为3.2 MPa、运行频率为60 Hz、制冷温度为170 K时,获得在不同制冷量下,制冷机的压缩活塞与推移活塞位移幅值、输入电功率及相对卡诺效率的计算结果,并与文献^[27]的实验结果进行比较,具体如图4所示。

从图4(a)可以看出,压缩活塞与推移活塞的位移幅值随制冷量变化的模拟计算与实验数据吻合较好。随着制冷量需求增大,压缩活塞和推移活塞

的位移幅值也逐渐增加。

从图4(b)可以看出,输入电功率的实验结果总是大于仿真结果,随着制冷量的增加,两者的差异变得更加明显。当制冷量较大时,比如制冷量为30 W时,压缩活塞位移为2.6 mm,此时,实验中的电功率比模拟值高出约18%,主要原因是实验中压缩机的效率随着活塞位移的增加而略有下降,而模拟中压缩机的效率参考该样机的模拟分析文献假设不变为0.68^[29]。

从图4(c)可以看出,相对卡诺效率的实验值保持在20%左右,而模拟计算值在22%左右,原因主要是:一维模型忽略了径向温度梯度和速度分布的影响,忽略了多维流动对制冷性能的影响;模拟中

图3 验证样机结构示意图^[27]Fig.3 Schematic of the validation prototype^[27]

注:1—压缩腔;2—压缩活塞;3—冷端换热器;4—回热器;5—脉管;6—热端换热器;7—级后冷却器;8—膨胀腔;9—推移活塞;10—次压缩腔;11—推移活塞杆;12—板弹簧;13—推移活塞背压腔

表1 样机的主要结构设计参数

Table 1 Key design parameters of the prototype

部件	参数/单位	数值
压缩活塞	压缩活塞直径/mm	26
	压缩活塞振幅/mm	0-6
回热器	回热器外径/mm	26
	回热器长度/mm	47
脉管	脉管外径/mm	12.8
	脉管长度/mm	57
推移活塞	推移活塞直径/mm	22
	推移活塞质量/g	63.6
	推移活塞杆直径/mm	12
	阻尼系数/N·s/m	5
板弹簧	板弹簧刚度/N/m	3600

将脉管与回热器之间的同轴关系分离,忽略了由于轴向同位置温差而产生的径向导热损失。

结果表明,所建立的 Sage 一维模型对制冷机性能预测情况较好,验证了模型的可靠性。

2 结果与讨论

在小制冷量情况下,实验相对额定设计点的微小偏移会带来更加显著的性能恶化,因此,考虑在 80 K 制冷温度下,模拟分析偏离设计点时制冷机性能的变化,以及加设小孔阀气库结构后对制冷机性能的影响情况。

2.1 结构参数敏感性分析

通常影响整机制冷性能的因素较多,在设计、零部件制造、装配过程等环节都会产生一定偏差。

为了评估制冷机设计对上述不可避免的偏差的鲁棒性,并识别出对性能影响最敏感的关键参数,以指导更经济的公差设计,进行结构参数的敏感性分析显得至关重要。

受限于活塞材料选择和制造工艺等,活塞质量往往不能精确达到期望值,该验证样机的推移活塞实际质量与模拟设计值相比,偏差达 27.2%^[27]。在制冷机其他参数不变的情况下(如表 1),考察推移活塞质量对制冷机制冷量和相对卡诺效率的影响,模拟结果如图 5 所示,可以看出,随着推移活塞质量的增加,制冷量和相对卡诺效率均先升高后降低,且不能同时达到最佳,在设计时需要做折衷选择。

推移活塞与气缸之间的环形间隙所产生的机械阻尼,与板弹簧刚度共同构成了调相系统的动力学基础。其阻尼系数的大小直接影响着推移活塞的运动幅值与相位,从而对制冷机的制冷性能产生影响。在制冷机其他参数不变的情况下(如表 1),考察阻尼系数对制冷机制冷量和相对卡诺效率的影响,模拟结果如图 6 所示,可以看出随着阻尼系数的增加,制冷量和相对卡诺效率均先升高后降低,存在一个最优阻尼范围。

2.2 小孔阀气库的调节特性及制冷性能优化

综合考虑推移活塞质量制造偏差、阻尼系数随工况变化、回热器填充情况不稳定等因素,模拟中通过改变相关参数的方式,模拟实际运行偏差带来的制冷性能偏移。

表 2 展示了最优设计点与模拟偏离点的压缩机输入电功率、制冷量和相对卡诺效率对比。研究发现,在偏离气动活塞最优设计点时,会对制冷性能造成较大的影响,且对于这种在实际过程中难以及时改变的参数,需要采用其他方式调节制冷机的匹配情况。

图 7 展示了设置小孔阀气库结构后,制冷量与相对卡诺效率随小孔阀开度的变化规律。可以看出,随着小孔阀逐渐开启,制冷量和相对卡诺效率均呈现先上升后下降的态势,且在孔径为 0.6 mm 时,制冷性能达到最优。相较于小孔阀关闭状态,制冷量从 4.17 W 增至 5.99 W,提升了 43.65%;相对卡诺效率则从 11.58% 提升至 13.80%,提升了 19.17%。

图 8 展示了小孔阀开度对输入电功率及冷端声功的影响特性。结果表明,随着小孔阀孔径的逐步增大,输入电功率呈持续上升趋势。然而,冷端声

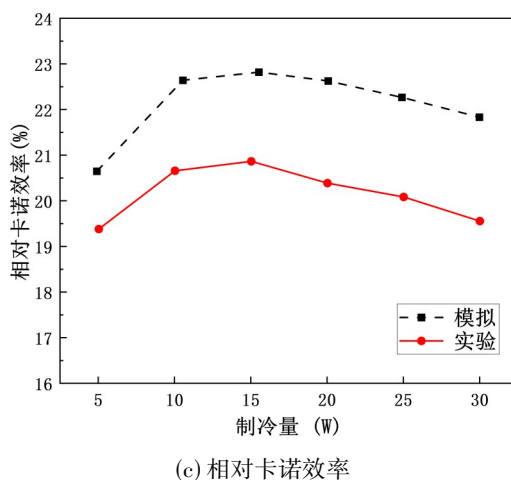
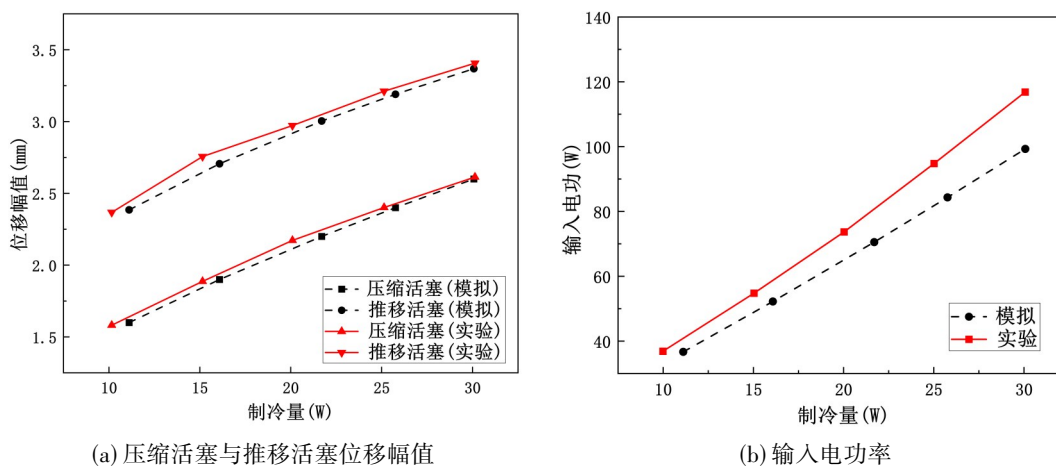


图4 样机模型仿真计算与实验测试参数随制冷量的变化

Fig.4 Variation of simulated and experimental parameters with cooling capacity for the prototype model

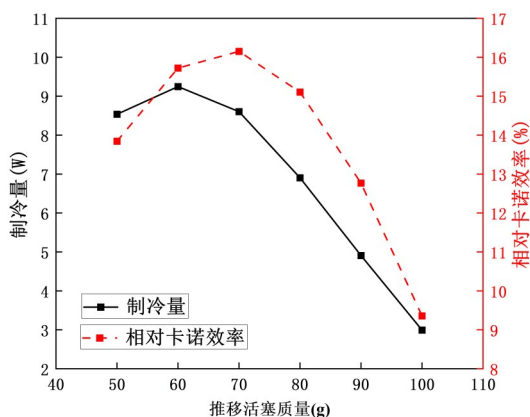


图5 推移活塞质量对制冷性能的影响

Fig.5 Effect of displacer mass on cooling performance

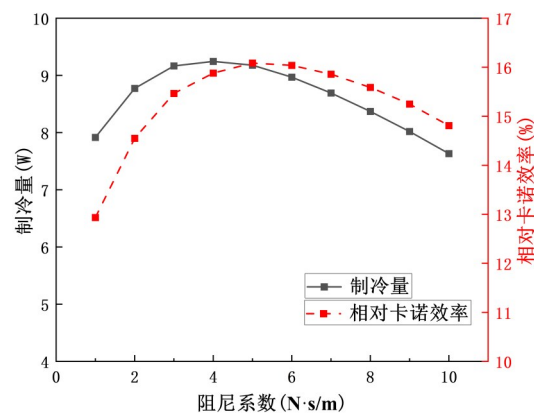


图6 阻尼系数对制冷性能的影响

Fig.6 Effect of damping coefficient on cooling performance

功并未呈现相同的趋势,当孔径增至约0.6 mm 时,冷端声功的增幅趋于饱和;孔径继续增大,冷端声功反而呈现下降趋势。该现象归因于大孔径下整机相位的迅速失谐以及伴随的不可逆损失增大,导

致输入电功率的增量无法被有效转化为冷端声功。该规律与图7中所示结果相一致,即在小孔阀直径为0.6 mm 时,系统的相对卡诺效率达到最优值。

通常,为使性能达到最佳状态,需要在回热器

表2 最优设计点与模拟偏离点的制冷性能对比
Table 2 Comparison of cooling performance at nominal and off-design points

	输入电功率/W	制冷量/W	相对卡诺效率/%
最优设计点	151.88	9.18	16.08
模拟偏离点	95.94	4.17	11.58

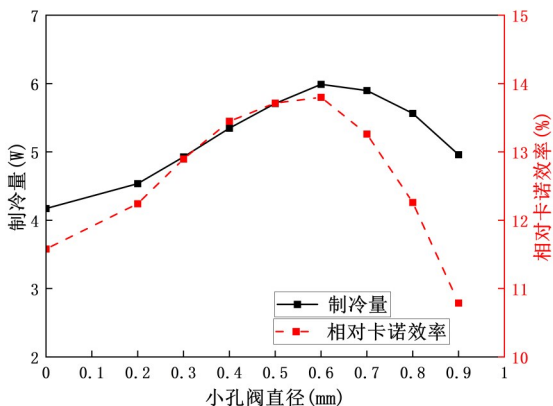


图7 小孔阀直径(开度)对制冷性能的影响
Fig.7 Effect of orifice diameter (opening) on cooling performance

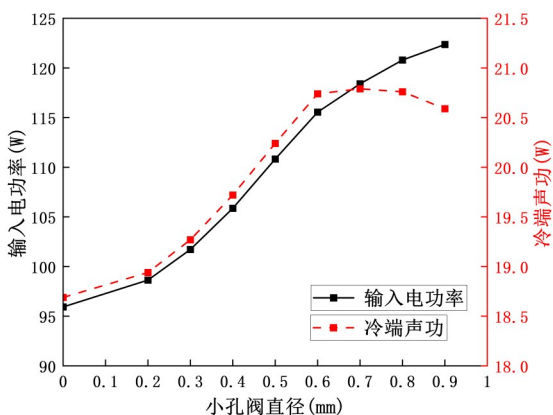


图8 小孔阀直径(开度)对输入电功率和冷端声功的影响
Fig.8 Effect of orifice diameter (opening) on input electric power and acoustic power at the cold end

中段实现质量流与压力波同相,即达到行波相位。在较为理想情况下,脉管制冷机在回热器的热端和冷端分别能达到约 $+30^\circ$ 和 -30° 的相位差,在脉管热端达到约 -60° 的相位差。图9展示了随着小孔阀逐渐打开,回热器两端质量流与压力波相位差的变化情况。当小孔阀关闭时,即无小孔阀辅助调相时,回热器两端的相位关系较差,热端质量流与压力波的相位差为 42.77° ,冷端为 -42.33° 。随着小孔阀的逐渐打开,热端和冷端的相位分别向 30° 和 -30° 靠近,当孔径达到约0.6 mm时,两端相位接近对称,从

而实现了较为理想的相位关系。

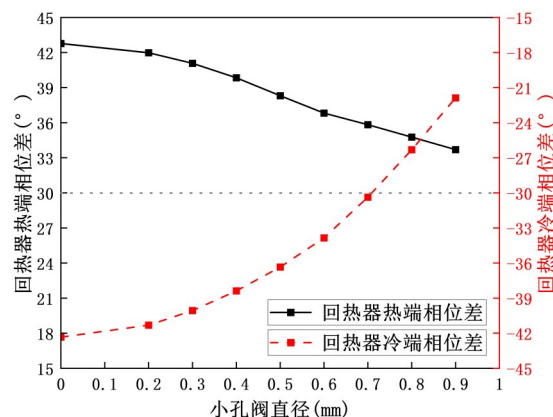


图9 小孔阀直径(开度)对回热器冷热端相位差的影响
Fig.9 Effect of orifice diameter (opening) on phase difference at cold and hot ends of the regenerator

为进一步探究小孔阀气库结构对系统调相能力的影响,在固定小孔阀开度的条件下,对气库容积进行参数分析,其对制冷性能的影响如图10所示。结果表明,随着气库容积增大,制冷量和相对卡诺效率均呈现先上升后趋于稳定的趋势。随着容积增大,气库对压力波动的缓冲作用增强,小孔阀压差趋于稳定,从而改善流量调节能力并优化系统相位关系,使制冷性能提升。当气库容积增大至一定程度后,其压力变化趋于平缓,调相作用趋于饱和,性能提升有限。因此,气库容积应在满足调相需求的前提下,结合系统紧凑性要求合理选取。

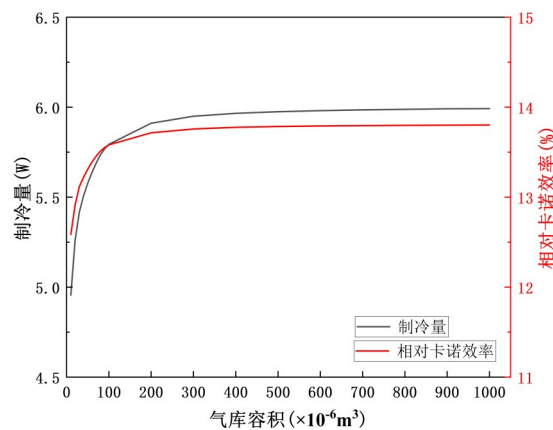


图10 气库容积对制冷性能的影响
Fig.10 Effect of reservoir volume on cooling performance

2.3 稳定性分析

上述分析表明,通过调节小孔阀开度,可以有效调节回热器相位分布,优化偏离设计点时的制冷性能。然而,性能优化若仅适用于单一静态工况,

则其应用将极为有限。因此,本研究将在增设小孔阀气库结构的基础上,将小孔阀的直径固定为0.6 mm,以推移活塞质量对制冷性能及回热器相位的影响为例,进一步探讨小孔阀结构对系统性能鲁棒性的提升作用。

图11显示了在有无小孔阀两种情况下,推移活塞质量对相对卡诺效率的影响。可以看到,随着推移活塞质量的逐渐增加,有无小孔阀两种情况下的相对卡诺效率均呈现出先增大后减小的趋势。在有小孔阀情况下,理论最佳制冷性能虽略低于无孔阀情况,但能够在更广泛的范围内保持良好的制冷性能。

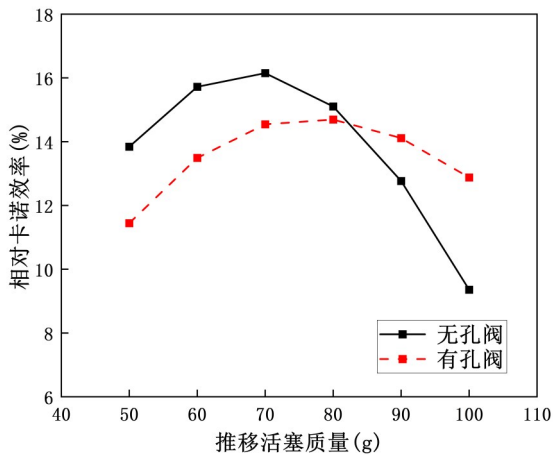


图11 推移活塞质量对相对卡诺效率的影响

Fig.11 Effect of displacer mass on relative Carnot efficiency

同样地,图12显示了在有无小孔阀两种情况下,回热器冷热端质量流与压力波相位差随推移活塞质量的变化。可以看出,在有小孔阀设置的情况下,回热器两端相位差随推移活塞质量的影响较小,冷端相位差能较好地稳定在 -30° 左右。而无小孔阀气库辅助调相的制冷机受影响更大。

为进一步揭示小孔阀辅助调相机构对系统能量传递的影响,选取推移活塞质量为70 g与90 g两种工况,对有无小孔阀条件下的声功流分布进行对比分析,如图13所示。由图可见,在相同压缩活塞幅值输入及相同推移活塞质量条件下,增设小孔阀后系统输入声功整体更高,表明小孔阀结构具备促使输入声功的能力。随着推移活塞质量增大,两种工况下的输入声功均有所降低,但小孔阀辅助型的下降幅度明显较小,表现出更好的稳定性。此外,由图13(b)可知,从热端换热器出口至膨胀腔区间存在明显的声功衰减。这是由于部分声功通过小孔

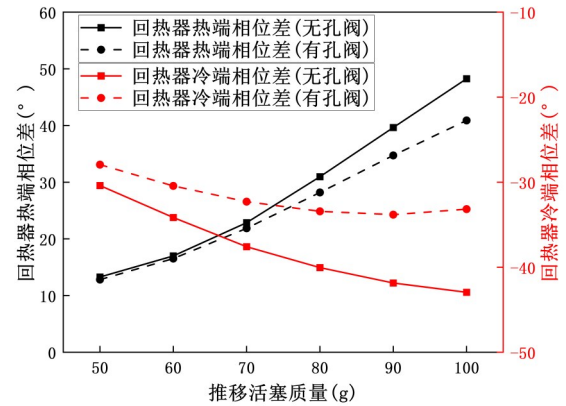


图12 推移活塞质量对回热器冷热端相位差的影响

Fig.12 Effect of displacer mass on phase difference at cold and hot ends of the regenerator

阀气库支路被分流并耗散。然而,这部分损失本质上换取了整机更优的阻抗匹配,从而降低回热器损失,实现更高的制冷性能。无小孔阀时,制冷量由8.60 W降至4.91 W,相对卡诺效率由16.15%降至12.77%;而有小孔阀时分别由7.91 W降至6.15 W和14.53%降至13.94%,性能衰减幅度明显减小。

3 结论

本文利用Sage建立了一维数值模型,对气动推移活塞型脉管制冷机在偏离设计点时的性能变化进行了模拟分析,并研究了设置小孔阀气库结构对制冷性能的优化特性。主要结论如下。

(1)在脉管热端增设小孔阀气库结构可有效调节系统相位关系。当小孔阀开度适中时,回热器两端质量流与压力波相位差接近理想相位配置,显著提升了制冷性能。

(2)小孔阀的引入增强了系统对动子质量变化的鲁棒性。在有小孔阀调节情况下,制冷性能可以在更宽泛的推移活塞质量范围内保持稳定,即降低了制冷性能对推移活塞质量的敏感性。回热器冷端相位差能够较好地维持在 -30° 附近,降低了因参数波动引起的性能不稳定性。

研究表明,小孔阀辅助调相可以有效改善气动推移活塞型脉管制冷机性能对工况和结构参数变化的敏感性,小孔阀气库调节方法简单可行,具有良好的工程应用前景。后续研究可进一步结合多参数协同优化与实验研究,以推动该技术的实际应用。

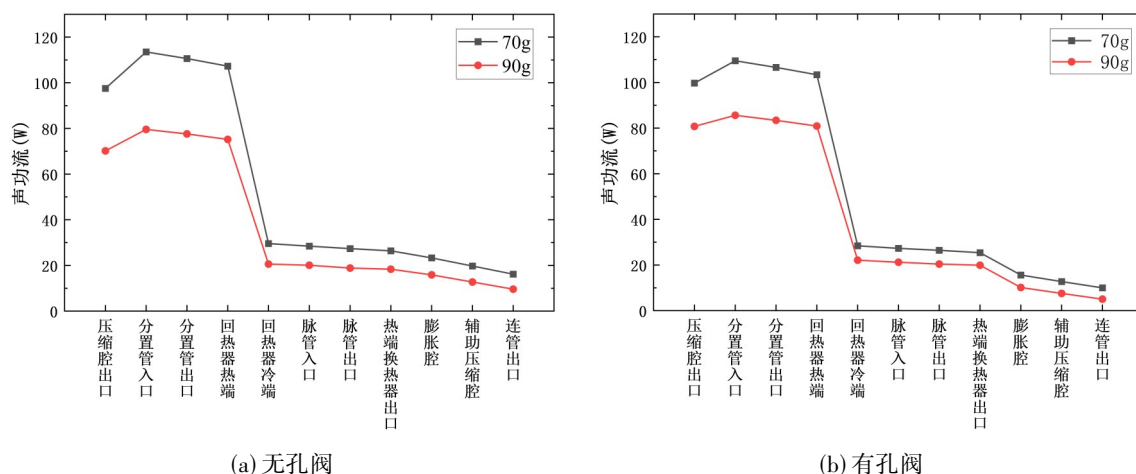


图 13 声功流分布对比分析

Fig.13 Comparative analysis of acoustic power flow distribution

参考文献

- [1] 许爽, 朱绍伟. 功回收型脉管制冷机的研究进展[J]. 低温与超导, 2023, **51**(3): 48-56.
Xu S, Zhu S W. Research progress of work recovery type pulse tube refrigerator[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2023, **51**(3): 48-56.
- [2] 刘少帅, 吴亦农, 蒋珍华, 等. 活塞调相脉管制冷技术及应用[J]. 工程热物理学报, 2024, **45**(6): 1650-1655.
Liu S S, Wu Y N, Jiang Z H, et al. Piston phase-shifted pulse tube refrigeration technology and applications[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, **45**(6): 1650-1655.
- [3] Zhu S W, Nogawa M. Pulse tube stirling machine with warm gas-driven displacer[J]. Cryogenics, 2010, **50**(5): 320-330.
- [4] Guo Z R, Lin Y Z, Zhu S W. Experimental investigation of displacer rod diameter effect on pulse tube cryocooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, **112**: 69-73.
- [5] Wang X T, Zhang Y B, Li H B, et al. A high efficiency hybrid stirling-pulse tube cryocooler[J]. AIP Advances, 2015, **5**(3): 037127.
- [6] Hui H J, Song J T, Liu S S, et al. Energy conversion efficiency improvement of a Stirling type PTR for dual temperature cooling by adopting two active work-recovery phase shifters[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, **146**: 452-461.
- [7] 曾焯平, 陈曦, 蒋珍华, 等. 主动调相方式对脉管制冷机性能的影响[J]. 化工学报, 2018, **69**(4): 1638-1645.
Zeng Y P, Chen X, Jiang Z H, et al. Influence of active phase compressor on performance of pulse tube cryocoolers[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(4): 1638-1645.
- [8] Abolghasemi M A, Liang K, Stone R, et al. Stirling pulse tube cryocooler using an active displacer[J]. Cryogenics, 2018, **96**: 53-61.
- [9] Deng W F, Liu S S, Chen X, et al. A work-recovery pulse tube refrigerator for natural gas liquefaction[J]. Cryogenics, 2020, **111**: 103170.
- [10] Abolghasemi M A, Rana H, Stone R, et al. Coaxial Stirling pulse tube cryocooler with active displacer[J]. Cryogenics, 2020, **111**: 103143.
- [11] Zhu S W, Guo Z M. Fundamental motion relation of different solid phase shifters of pulse tube cryocooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, **144**: 231-237.
- [12] Zheng P, Chen X, Wu Y K, 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.
- [13] 赵鹏, 陆志, 蒋珍华, 等. 回热器丝网填充率对 85 K 型同轴脉管制冷机性能的影响分析[J]. 低温工程, 2021(3): 17-20, 32.
Zhao P, Lu Z, Jiang Z H, et al. Effect of regenerator wire filling rate on cooling performance of coaxial pulse tube cryocooler at 85 K[J]. Cryogenics, 2021(3): 17-20, 32.
- [14] 蒋珍华. 空间脉管制冷机精细化仿真关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2022.
Jiang Z H. Research on refined simulation key technology for space-borne pulse tube cryocooler[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [15] Desai A B, Dutta R, Kant Verma S, et al. Manifestation of improvement in regenerator performance of a low and high-frequency pulse tube cryocooler using layered pattern[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, **45**: 102112.
- [16] Rana H, Abolghasemi M A, Stone R, et al. Numerical modelling of a coaxial Stirling pulse tube cryocooler with an active displacer for space applications[J]. Cryogenics, 2020, **106**: 103048.
- [17] 王正, 陆永达, 李泽昊, 等. 推移活塞的装配状态对分置式斯特林制冷机性能的影响[J]. 低温与超导, 2020, **48**(5): 17-20, 40.
Wang Z, Lu Y D, Li Z H, et al. The influence of assembly state of displacer on the performance of split Stirling refrigerator[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2020, **48**(5): 17-20, 40.
- [18] 赵鹏. 星载斯特林型脉管制冷机性能波动研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
Zhao P. Study on performance fluctuation of satellite-borne stirling type pulse tube cryocooler[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [19] 郭志敏. 微型脉管制冷机及调相器基础理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2022.

- Guo Z M. Theoretical research about micro pulse tube cryocooler and the phase shifters[D]. Shanghai: Tongji University, 2022.
- [20] Xu S, Zhu S W. Experimental investigation of displacer type pulse tube refrigerator with inertance tube or orifice[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, **164**: 49–56.
- [21] Pang X M, Wang H T, Wang X T, et al. Comparison study of three displacer type phase shifters in a two-stage Stirling type pulse tube refrigerator working around liquid hydrogen temperature[J]. Cryogenics, 2025, **150**: 104149.
- [22] Yin W, Xiang H Z, Jiang Z H, et al. Development of a novel integrated-type passive displacer with work-recovery in a 30W80K Stirling-type pulse tube cryocooler[J]. Energy, 2025, **317**: 134708.
- [23] 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.
- [24] Lin Y Z, Guo Z R, Guo Z M, et al. Experimental investigation of the connecting tube effect on a step displacer type two stage pulse tube refrigerator[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, **173**: 115229.
- [25] 杨斌, 刘知非, 朱绍伟. 大冷量多级推移活塞型脉管制冷机[J]. 低温工程, 2024(3): 87–92.
Yang B, Liu Z F, Zhu S W. Multistage displacer type pulse tube refrigerator with large cooling power[J]. Cryogenics, 2024(3): 87–92.
- [26] Gedeon D. Sage: object-oriented software for cryocooler design [M]//Cryocoolers 8. Boston, MA: Springer US, 1995: 281–292.
- [27] Chen X, Ling F, Zeng Y P, et al. Investigation of the high efficiency pulse tube refrigerator with acoustic power recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, **159**: 113904.
- [28] Zheng P, Chen X, Zeng Y P, et al. Effect of displacer on performance of Stirling-type pulse tube refrigerator with work recovery[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2021, **27**(5): 567–577.
- [29] Duan W H, Zheng P, Wu Y K, et al. Numerical investigation of a displacer-type pulse tube refrigerator with work recovery[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2022, **28**(10): 1341–1354.
- [30] Zheng P, Wang L F, Ji Y Z, et al. Back-propagation neural network modeling for a pulse tube refrigerator with passive displacer[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, **211**: 118464.