

单级脉管制冷机多点取冷实验研究

张安阔^{1,2}, 谢芳¹, 余文辉², 韩一楠¹, 熊超², 谢晶¹

(1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2. 上海超立安科技有限责任公司, 上海 200240)

摘要: 单级脉管制冷机往往只考虑了冷头的制冷性能, 其冷指冷头、室温端由于大温度梯度的存在所产生的制冷效用却常被忽略。为最大限度利用该类制冷机的制冷潜力, 同时探究其多温区应用可能, 由此开展了实验研究。基于一台 8W@80K 单级同轴型脉管制冷机, 采用冷指外部及冷端分别添加负载的方式, 模拟不同温区环境。通过热负荷的调控, 获得了脉管制冷机不同负载方式下的制冷性能。基于实验数据的对照, 分析了不同输入功下, 制冷机中间制冷量、冷端制冷量等重要参数间的影响机制, 并讨论了其潜在联系。实验结果表明, 中间制冷温度、中间制冷量一定时, 单级脉管制冷机多温区应用是可行的。

关键词: 脉管制冷机; 单级; 多点取冷

中图分类号: TB651

文献标志码: A

文章编号: 1001-8891(2025)04-0523-07

Experimental Study on Multi-point Cooling of Single-Stage Pulse Tube Cryocooler

ZHANG Ankuo^{1,2}, XIE Fang¹, YU Wenhui², HAN Yinan¹, XIONG Chao², XIE Jing¹

(1. College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai CLA Cryogenic Technology Limited Liability Company, Shanghai 200240, China)

Abstract: In single-stage pulse-tube cryocoolers, only the cooling performance of the cold head is often considered, whereas the cooling effects at the cold and hot ends of the cold finger, due to the existence of large temperature gradients, are often neglected. Experimental studies were conducted to maximize the cooling potential of this type of cryocooler and to explore its applicability in multitemperature scenarios. The experiment was based on an 8W@80K single-stage coaxial pulse-tube cryocooler, with separate loads applied to the external and cold ends of the cold finger to simulate different temperature zones. The cooling performance of the pulse-tube cryocooler under different load conditions was measured by regulating the thermal load. Based on a comparison of the experimental data, the influence mechanism between key parameters, such as intermediate and cold-end cooling capacity, under different input powers was analyzed, and their potential interrelations were discussed. The experimental results showed that multi-temperature applications of single-stage pulse-tube cryocoolers are feasible when the intermediate cooling temperature and capacity remain constant.

Key words: pulse tube cryocooler, single-stage, multi-point cooling

0 引言

脉管制冷机冷指无运动件, 具有振动低、可靠性高、结构简单、电磁干扰小、寿命长等特点, 在红外探测、高温超导、低温医疗、低温电子学等诸多领域具有诱人前景。红外探测器作为脉管制冷机的最大应用平台, 为实现高质量成像, 降低信噪比, 芯片部分一般要

求冷却至 40~90K 温区, 光学系统为了避免漏热对芯片部分的干扰, 需同时冷却至 120~200K 温区。为达到上述冷却要求, 目前, 两级脉管制冷机是比较好的选择。2006 年, 为冷却红外焦平面及光学器件, Lockheed Martin 报道了一台两级脉管制冷机在 55K、140K 下获得了 1.5W、8W 制冷量^[1]。2017 年, 蒋燕阳等通过双压缩机驱动设计了一台两级同轴型脉管制冷机, 压缩

收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2025-04-07.

作者简介: 张安阔 (1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事空间小型低温制冷机研究。E-mail: zhangankuo@126.com.

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (24ZR1428800)。

机输入 280 W、123 W 电功, 获得了 8 W@80 K、1 W@30 K 的制冷性能^[2]。2018 年, 朱海峰等实现了两级脉管制冷机整机效率的提高, 在 336 W 电功输入下, 具有 8.03 W@80 K、1.47 W@30 K 制冷量^[3]。

作为脉管制冷机的一个重要研究方向, 两级脉管制冷机的出现很好地解决了较低温区下一些关键设备所需的低温区同步冷却要求, 然而由于其自身结构特性, 存在设计原理复杂、级间温度影响大、加工制造难度高等问题, 导致机器研制难度高、工程周期长、成本不易控制、结构不紧凑, 较高温区下竞争能力明显偏弱。因此人们持续寻求可替代方案, 如采用单压缩机驱动双冷指结构。2012 年, NGAS 通过集成直线与同轴型冷指制成一台双冷指脉管制冷机, 53 K、183 K 下可提供 1.9~2.3 W、5.1~8 W 制冷量^[4]。2019 年, 刘少帅等采用该结构成功获得了双冷指 20 W@170 K、3.3 W@60 K 制冷性能^[5]。该类结构脉管制冷机研制难度相对下降、成本易控、布置灵活, 并且能够显著降低级间温度影响^[6], 但依然存在结构不紧凑、整机质量与体积难以有效缩减等问题。

相比上述结构, 单级脉管制冷机结构紧凑、技术成熟、制冷量斜率大^[7], 但一般只用于单一温区制冷, 其多温区制冷能力却被忽视。基于热力学第二定律, 结合制冷机冷指温度梯度大特性, 可知在较高温区, 单级脉管制冷机具备一定的多温区制冷潜能, 如若采用该结构, 在特定场合, 则能够有效规避使用两级脉管或双冷指结构所带来的不便。

为了探究单级脉管制冷机是否存在多点制冷能力, 同时揭示其多温区应用特性, 本文根据一台 8 W@80 K 单级同轴型脉管制冷机, 搭建了实验测试平台, 通过对负载的调控, 达到了制冷机多温区运行目的, 综合实验数据, 系统分析了不同输入功下冷端制

冷量、中间制冷量对制冷机制冷温度等重要参数的影响规律。

1 实验装置介绍

图 1、2 所示为本文搭建的单级脉管制冷机性能测试系统示意图与实物图, 该系统主要包括驱动模组、制冷模组、真空模组、加热模组、散热模组以及测试模组等部分。其中驱动模组主要为交直流变频电源; 制冷模组主要包括一台对置式线性压缩机、单级同轴型脉管冷指和气库-惯性管型调相机构 3 部分; 真空模组包含有真空罩和真空泵; 加热模组包括直流电源、陶瓷加热片和加热丝; 散热模组主要为水冷机组; 测试模组则由铂电阻以及六位半数字万用表构成。

通过控制交直流变频电源, 实现压缩机往复直线运动, 经由连管为脉管冷指提供正弦压力波。冷指部分包括有热端换热器、蓄冷器、脉冲管、冷头等, 往复穿梭振荡的气体工质通过与冷指内固体介质相互换热, 在冷头处迭代膨胀产生冷量^[8], 同轴型结构保证了器件与冷头的耦合方便。调相机构包含惯性管及气库, 起调节整机相位作用, 惯性管置于气库内实现了制冷机整机紧凑化设计。

为确保性能测试的准确可靠, 冷指需置于真空罩内, 保持真空度不大于 10^{-4} Pa, 以降低测试环境中非必要换热对冷头冷量的影响。为防止制冷机过热运行, 影响其内部结构的稳定, 采用 20℃ 循环冷却水散热。温度传感器为 PT-100 型铂电阻, 布置方式如图 1 所示, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别对应铂电阻 1~4 处的温度, 用于监测冷指冷头及其他位置的温度状态。冷头处固定陶瓷加热片, 铂电阻 3 的两侧紧密缠绕加热丝, 二者均由直流电源加热, 借助热平衡法获取整机制冷量。

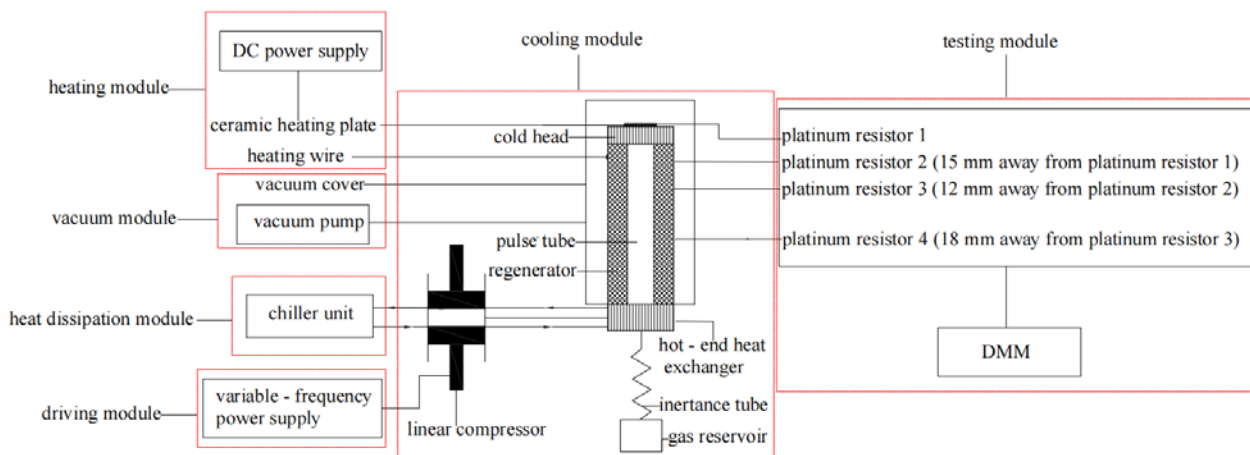


图 1 单级脉管制冷机性能测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the performance test system for a single-stage pulse tube cryocooler

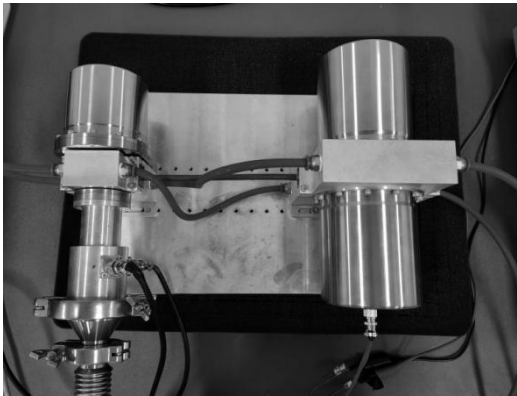


图2 单级脉管制冷机实验装置实物

Fig.2 Photo of the single-stage pulse tube cooler experimental device

2 实验结果与分析

2.1 制冷机基本性能及运行参数的确定

充气压力 3.2 Mpa、运行频率 50 Hz 时，图 3 给出了制冷机空载时， T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 随时间变化的曲线，可知，100 W 输入功下，铂电阻 1、2、3、4 点的最低温度随着与冷头距离的增加而升高，制冷机运行 25 min 后，冷头处温度 T_1 最低为 50.4 K， T_4 为 4 点中的最大值，为 231.4 K， T_2 、 T_3 位于二者之间，分别为 124.7 K 和 190.2 K，4 点之间最大温差为 181 K，冷指处具有极大的温度梯度。图 4 是频率变化与制冷机性能的关系曲线，保持输入功率 100 W、冷端制冷量 4 W，可以看出，制冷机冷端温度随频率的增加先降低后上升，最优频率为 49 Hz 附近。图 5 是不同温区下制冷机的制冷量曲线，运行频率 49 Hz、充气压力 3.2 MPa，冷端温度 60 K 下最大可获得 4 W 制冷量，80 K 时具有 8 W 的制冷性能。

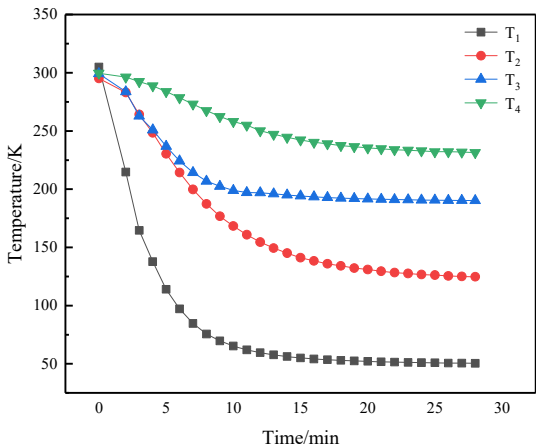


图3 脉管制冷机降温曲线

Fig.3 Cooling curves of pulse tube cryocooler

2.2 冷端制冷量变化的影响

冷端制冷量是制冷机在不同温区下制冷性能的直观表现。输入功一定时，冷端制冷量的改变势必引起冷指内部温度梯度的变化，然而单级脉管制冷机的多点取冷应用却极依赖于冷指温度的稳定，因此在一定输入功率下探究单级脉管制冷机冷端制冷量的变化与其多温区应用的影响关系是十分必要的。

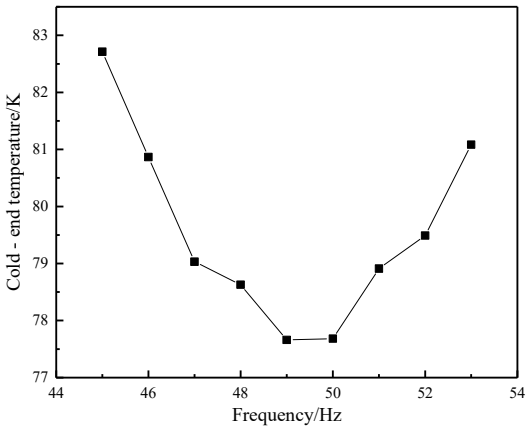


图4 冷端温度与运行频率的关系

Fig.4 Relationship between the cold end temperature and the operating frequency

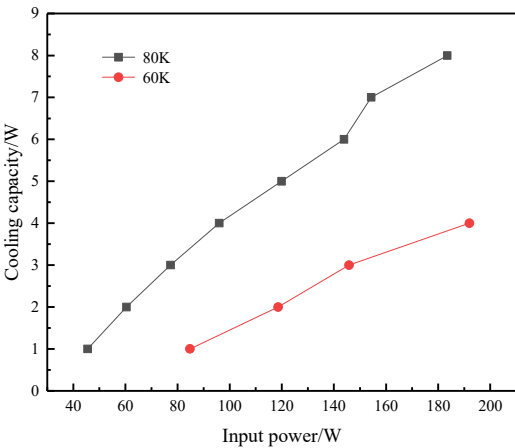


图5 制冷机制冷量曲线

Fig.5 Cooling capacity curves of pulse tube cryocooler

实验时，保持控制中间制冷量分别为 1 W、2 W、3 W、4 W，输入 100 W 电功，观察制冷机冷指温度 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 随冷端制冷量的变化情况。图 6~图 9 分别给出了 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 随冷端制冷量变化的趋势，可以看出，在中间制冷量一定的情况下，随着冷端制冷量逐渐增加，除 T_3 外， T_1 、 T_2 、 T_4 均呈现出近似线性的上升，中间制冷量为 1 W 小冷量时， T_1 上升 17 K 左右， T_2 波动与 T_1 相近，整个过程中， T_3 基本保持稳定，波动小于 2 K，热端 T_4 涨幅则超过 8 K。中间冷量为 4 W 较大冷量时， T_1 上升 13 K， T_2 上升 11 K， T_3

涨幅依旧低于 2 K, T_4 涨幅大于 9 K。综合图 6~图 9 知, 中间冷量不变时, 冷端制冷量的变化对于冷端温度 T_1 的影响最大且优先于其他位置, 对于中间温度 T_3 , 其数值基本保持稳定, 不受冷端制冷量变化影响。中间冷量增加时, 能够降低冷端温度 T_1 受冷端制冷量变化的影响。从图 7~图 9 中可以看到尽管 T_3 靠近于热端, 温度变化的敏感性较低, 其变化不如 T_2 明显, 但热端 T_4 的改变却在某种程度上表明了中间制冷量一定时, T_3 的稳定是可靠的。

图 10 是不同中间制冷量下冷指温度及功率因数随冷端制冷量的变化, 可以清楚的看到图 6、图 8 中 T_1 、 T_3 随冷端制冷量的变化对比, 中间制冷量的增加无法影响 T_3 随冷端制冷量的变化趋势, 但却使得 T_1 、 T_3 整体温度上迁, 在中间制冷量较小为 1 W 时, 功率因数随冷端制冷量增加基本没有变化, 总体保持一个较高水平, 中间制冷量增至 4 W, 功率因数随冷端制冷量增加而缓慢下降, 降幅有限, 压缩机偏离其谐振状态, 声功转化效率略微下降。

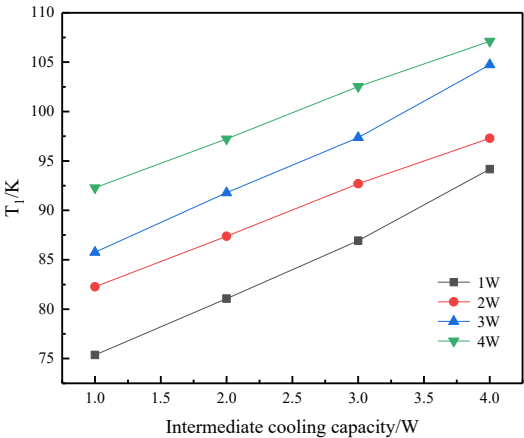


图 6 中间制冷量及冷端制冷量对 T_1 的影响
Fig.6 The effect of intermediate and cold end cooling capacity on T_1

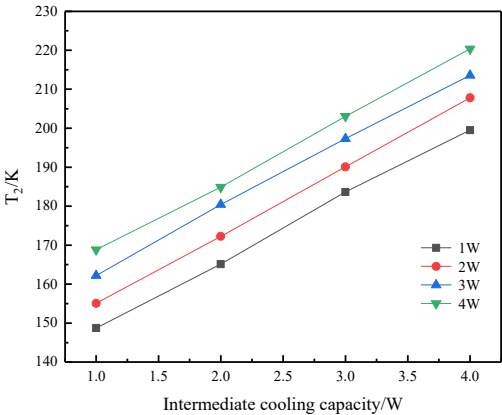


图 7 中间制冷量及冷端制冷量对 T_2 的影响
Fig.7 The effect of intermediate and cold end cooling capacity on T_2

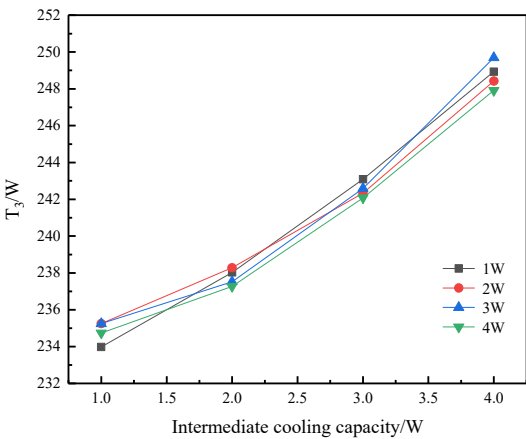


图 8 中间制冷量及冷端制冷量对 T_3 的影响
Fig.8 The effect of intermediate and cold end cooling capacity on T_3

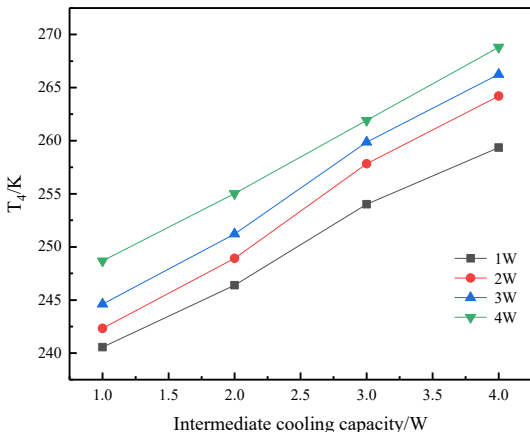


图 9 中间制冷量及冷端制冷量对 T_4 的影响
Fig.9 The effect of intermediate and cold end cooling capacity on T_4

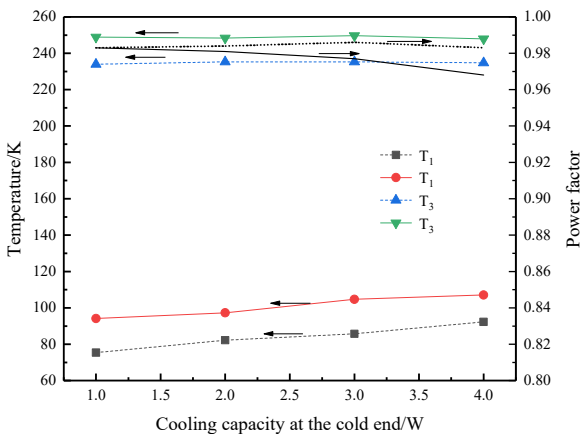


图 10 冷指温度及功率因数随冷端制冷量的变化
注: 虚线为中间制冷量 1 W, 实线为中间制冷量 4 W
Fig.10 Variation of cold finger temperature and power factor with cooling capacity at the cold end

Note: The dotted line represents a central cooling capacity of 1 W, while the solid line represents a central cooling capacity of 4 W

2.3 中间制冷量的影响

单级脉管制冷机多点取冷时,中间制冷量的变化对 T_1 与 T_3 的影响关系同样是反映其多温区应用可能的关键指标。通过调控加热丝负载进而改变冷指中间取冷量,在输入功率100W不变的实验条件下,获得了冷指中间制冷量对其制冷温度的影响。

图11所示为冷端制冷量1W下冷指各位置温度的变化,类似上述2.2节冷端制冷量变化对冷指温度影响, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 均随中间制冷量增加呈现近似线性上涨,不同的是此时 T_3 温度波动更大,总体涨幅超过11K,同时 T_1 也上升19K, T_2 变化显著,上升41K, T_4 也有较大涨幅,为20K左右。图12所示为冷端制冷量4W下冷指各位置温度的变化,随中间制冷量的增加, T_1 上涨15K, T_3 则是上升13K左右, T_2 涨幅超51K, T_4 波动不小于20K。

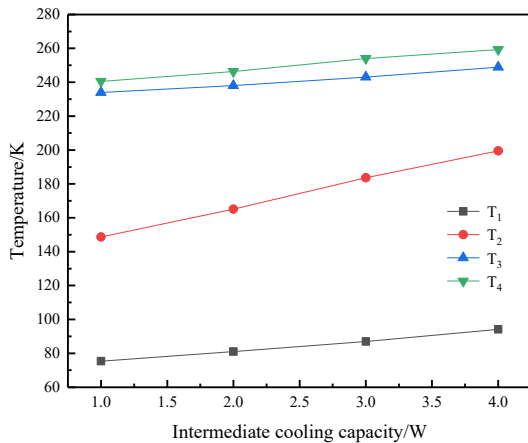


图11 冷端制冷量1W时,中间制冷量对冷指温度的影响

Fig.11 Effect of intermediate cooling capacity on cold finger

temperature at the cold end when cooling capacity is 1 W

加热丝的加热作用导致了以上现象的产生,以图11为例,在冷指中间取冷,破坏了冷指原有的温度梯度,此时在 T_3 位置形成了新的温度梯度, T_3 处冷指内外具有较大的相对温差,加热丝的热量经由同轴型冷指的外壳传入内部蓄冷器,使得蓄冷器局部温度提高,但由于蓄冷器具有较强的热容能力,热量率先被存储在 T_3 位置蓄冷器中,同时由于蓄冷器内部往复穿梭振荡的气体工质的热容及传热作用,使得 T_3 的上升被抑制在一定范围之内,故而 T_3 波动相较冷端较小,又因为 T_2 、 T_3 的降温速率快于 T_4 , T_3 位置处热量不断输入,原有温度梯度中, $T_2 < T_3$, $T_4 > T_3$,因此热量只能大量传向 T_2 ,速度快, T_2 会随之发生较明显变化并慢慢向 T_3 靠近,在原本温度梯度上, T_2 未升温时,冷端 T_1 能够维持1W@80K性能, T_2 升温明显时,输入功一定,为保持冷端制冷量不发生改变,制冷温度只能向上较大幅度迁移,随着气体工质在蓄冷器中往复

振荡,这种温度变化会逐步由冷指冷端向热端传递, T_4 由此开始升温,冷指蓄冷器温度变化稳定后,便呈现出了上述现象。中间制冷量小时,其对冷指温度梯度干扰小,随着中间制冷量的加大,作用愈发显著,冷指整体温度上迁更明显,这点可以通过图11、图12的横向对比得到验证,同时也解释了图6、图8中冷端制冷量固定时 T_1 、 T_3 的上涨。并且由图11、图12可知,中间制冷量的改变对于 T_2 、 T_3 、 T_4 而言其影响要大于冷端制冷量变化,对于冷端 T_1 影响却基本一致。热端 T_4 的大幅上升在制冷机散热不足的情况下不利于制冷机性能的发挥。

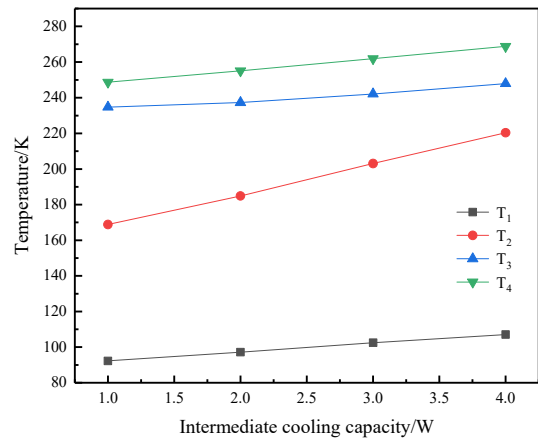


图12 冷端制冷量4W时,中间制冷量对冷指温度的影响

Fig.12 Effect of intermediate cooling capacity on cold finger

temperature at the cold end when cooling capacity is 4 W

图13为冷指温度及功率因数随中间制冷量的变化,可以看到,冷端制冷量的改变无法影响 T_3 ,但可导致 T_1 上升,冷端制冷量仅有1W时,中间制冷量增加,功率因数基本不变,增至4W时,功率因数随中间制冷量增加而下降,降幅与图10一致,这说明冷端制冷量或者中间制冷量较大时,制冷机压缩机部分仍可高效运行。

2.4 输入功率的影响

上述实验均在相同输入功率下进行,通过改变输入功率,能够更好地了解单级脉管制冷机多点取冷特性,并且从上述冷端制冷量、中间制冷量变化对制冷机冷指温度影响程度来看,只改变冷端制冷量更有利于制冷机的多点取冷,故而在输入功率150W、改变冷端制冷量的情况下,研究其对冷指温度的影响。

图14给出了输入功率100W与150W、中间制冷量1W和4W下 T_1 、 T_3 的变化关系,可以看出,随着输入功率的提升,在相同实验条件下, T_1 、 T_3 具有不同程度的下降,中间制冷量为1W时, T_1 最大降低22K, T_3 则是4K,中间制冷量为4W, T_1 、 T_3 最大分别降低28K、5K,输入功率增加使得中间制冷量为4

W 时 T_1 最大值仍小于中间制冷量 1 W 下 T_1 最小值,说明输入功率的增加对于 T_1 而言能够弥补中间制冷量、冷端制冷量共同增加所带来的冷端升温效应,并且对于中间制冷温度 T_3 而言影响很小。因此,对于一个确定的中间制冷温度及制冷量,当制冷机冷端制冷量增加时,可以通过提升输入功率达到制冷机冷指冷端温度 T_1 的稳定并且对中间制冷温度 T_3 不产生不可接受的温度迁移。

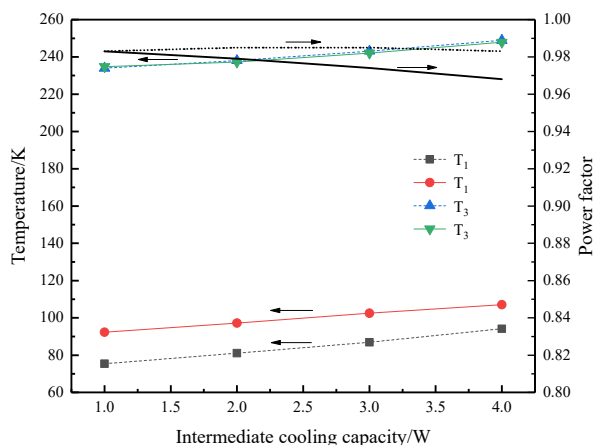


图 13 冷指温度及功率因数随中间制冷量的变化

注: 虚线为冷端制冷量 1 W, 实线为冷端制冷量 4 W

Fig.13 Variation of cold finger temperature and power factor with intermediate cooling capacity

Note: The dotted line is the cold end cooling capacity of 1 W, and the solid line is the cold end cooling capacity of 4 W

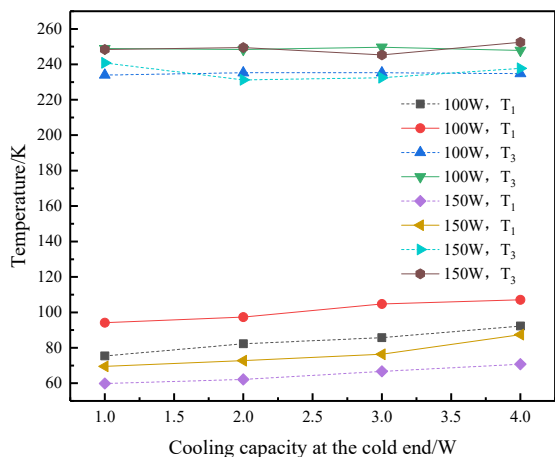


图 14 输入功率改变时, 温度与冷端制冷量的关系

注: 虚线为中间制冷量 1 W, 实线为中间制冷量 4 W

Fig.14 The relationship between temperature and the cooling capacity of the cold end when the input power changes

Note: The dotted line represents a central cooling capacity of 1 W, while the solid line represents a central cooling capacity of 4 W

3 结论

单级脉管制冷机多点取冷特性的揭示有助于制冷机制冷能力的深度利用。基于一台 8 W@80 K 单级同轴型脉管制冷机, 本文开展了多点取冷实验研究。单温区制冷时, 获得了制冷机的最佳运行状态, 并给出了制冷机基本性能。基于此, 进行双温区制冷, 充气压力 3.2 MPa、频率 49 Hz、100 W 电功输入下, 探究了脉管制冷机冷端制冷量、中间制冷量变化下制冷机性能的改变, 可知, 中间制冷量固定或变化, 冷端制冷量的增加均会导致冷端温度 T_1 的上升 13~17 K, 但对中间制冷温度 T_3 其影响基本可以忽略, 仅为 2 K 左右, 中间制冷量的增加一方面会造成冷指温度的整体上涨, 其影响高于冷端制冷量, T_1 上升 15~19 K, T_3 上升 11~13 K, 尤其是热端 T_4 , 增幅超过 20 K, 其大幅上升在制冷机散热不足的情况下不利于制冷机性能的发挥, 另一方面在冷端制冷量增加时会导致制冷机功率因数的小幅度下降, 较大的冷端制冷量或者中间制冷量下, 制冷机压缩机部分仍然能够实现单温区制冷时的高效运行。上述结果表明, 仅单独改变冷端制冷量时更有益于实现制冷机多点制冷目标, 基于以上结论, 研究了输入功率的改变对制冷机多点取冷特性的影响, 发现输入功率的增加能够消除中间、冷端制冷量增加所带来的冷端 T_1 升温效应, 但基本不改变 T_3 , 因此在 T_3 及中间制冷量确定时, 单级脉管制冷机的多点取冷是能够实现的, 这为其多温区应用提供了可能。

参考文献:

- [1] Elwell J D, Cantwell G W, Scott D K, et al. A geosynchronous imaging Fourier transform spectrometer(GIFTS) for hyperspectral atmospheric remote sensing: instrument overview & preliminary performance results[C]//Infrared Spaceborne Remote Sensing XIV. 2006, 6297: 62970S.
- [2] 蒋燕阳. 20 K 深低温双级脉管制冷机关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017.
JIANG Yanyang. Research on Key Technology of 20 K cryogenic temperature two-stage pulse tube cryocooler[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [3] 朱海峰. 30 K 两级脉管制冷机(火用)效率优化与耦合匹配分析[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
ZHU Haifeng. Exergy Efficiency Optimization and Coupling Analyzing of Two Stage Pulse Tube Refrigerators Below 30 K[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [4] Ramsey P G, Swanson K S. Life testing of the ABI cryocooler: two years complete[J]. Cryogenics, 2012, 52(4-6): 183-187.

[5] 刘少帅, 蒋珍华, 朱海峰, 等. 双温区高效脉管制冷机性能研究[J]. 真空与低温, 2019, 25(2): 121-125.
LIU Shaoshuai, JIANG Zhenhua, ZHU Haifeng, et al. Study on performance of an efficiency pulse tube refrigerator operating at two temperature zones[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2019, 25(2): 121-125.

[6] 朱海峰, 吴亦农, 蒋燕阳, 等. 单压缩机驱动双冷指阻抗特性研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(6): 1166-1170.
ZHU Haifeng, WU Yinong, JIANG Yanyang, et al. Investigation on impedance character of two cold fingers driven by one compressor[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(6): 1166-1170.

[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, 28(1): 24-26.
YANG Luwei, Thummes G. Single stage high frequency pulse tube cooler with base temperature below 30 K[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(1): 24-26.

[8] 张安阔, 吴亦农, 刘少帅, 等. 6 W@60 K 脉管制冷机的优化及实验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(5): 945-948.
ZHANG Ankua, WU Yinong, LIU Shaoshuai, et al. Simulation and experimental study of a 6 W@60 K PTR[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(5): 945-948.

《红外技术》第八届编辑委员会名单

荣誉主编：褚君浩 姜会林 曾 毅 曾桂林

主 编：苏君红

执行主编：姚立斌

副 主 编：姬荣斌 李 凯 朱颖峰 陈 钱

蔡 毅 何 力 金伟其 郑云峰（常 务）

编 委（以姓氏笔画为序）

马文坡 王双保 王 霞 石 峰 卢 进 史衍丽 白廷柱 白 瑜

朱颖峰 刘逸平 麦绿波 苏君红 巫广华 李云红 李 凯 李晓峰

杨 宇 吴一冈 吴晗平 何 力 邹继鑫 汪岳峰 张长泉 张若岚

张建奇 陆 卫 陈 钱 陈效双 金伟其 郑云峰 郑 凯 赵勋杰

赵 俊 胡伟达 施加林 姚立斌 顾国华 凌福日 郭 杰 唐 剑

唐利斌 唐良瑞 姬荣斌 常本康 葛宝臻 蒋亚东 曾 宇 蔡 毅

熊 平