

文章编号: 1672-8785(2024)06-0042-06

分置式斯特林制冷机耦合间隙对探测器性能的影响

李振雷 谢 萌 饶启超 韩蓬磊

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 分置式斯特林制冷机作为红外探测器组件的重要组成部分, 在实际应用中对红外探测器组件的性能影响较大。其中, 分置式斯特林制冷机与杜瓦耦合时的耦合间隙是对红外探测器组件的性能影响最大的因素之一。因此针对二者的耦合间隙对探测器性能的影响进行了实验研究。当芯片温度为 75 K 且制冷机的冷头温度为 70 K 时, 模拟仿真冷指与杜瓦的变形量, 耦合间隙变形为 0.0096 mm。低温环境对制冷机冷指与杜瓦变形的影响较小, 可以忽略冷指与杜瓦变形对耦合间隙的影响。实验结果表明, 红外探测器组件的降温时间随耦合间隙的增大而逐渐增大。随着时间的逐渐增大, 不同耦合间隙对应的直流电流也各不相同。同一时刻下, 耦合间隙越小, 直流电流就越小。二极管电压随着时间的增加呈现出逐渐增大并逐渐平稳的状态。在达到控温状态前, 同一时刻下, 耦合间隙越小, 二极管电压越大。

关键词: 分置式斯特林制冷机; 耦合间隙; 降温时间; 直流电流; 二极管电压

中图分类号: TB66 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.06.005

The Influence on Detector Performance of Coupling Gap in Split Stirling Cryocooler

LI Zhen-lei, XIE Meng, RAO Qi-chao, HAN Peng-lei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: As an important part of infrared detector assembly, split Stirling refrigerator has great influence on the performance of infrared detector assembly in practical application. Among them, the coupling gap between dewar and Stirling refrigerator is one of the most important factors affecting the performance of infrared detector. Therefore, the effect of the coupling gap on the performance of infrared detector is studied experimentally in this paper. When the chip temperature is 75 K and the cold head temperature of the refrigerator is 70 K, the deformation of the cold finger and dewar is simulated, and the coupling gap deformation is 0.0096 mm. The low temperature environment has little influence on the deformation of the cold finger and dewar of the refrigerator, and the influence of the deformation of the cold finger and dewar on the coupling gap can be ignored. The experimental results show that the cooling time of the infrared detector module increases with the increase of the coupling gap. With the gradual increase of time, the corresponding DC currents of different

收稿日期: 2023-07-25

作者简介: 李振雷(1996-), 男, 山东临沂人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为红外探测技术、制冷与低温技术。E-mail: lee_zl123@163.com

coupling gaps are also different. At the same time, the smaller the coupling gap is, the smaller the DC current is. The diode voltage gradually increases and becomes stable with the increase of time. Before reaching the temperature control state, the smaller the coupling gap is at the same time, the larger the diode voltage is.

Key words: split Stirling cryocooler; coupling gap; cooling time; DC current; diode voltage

0 引言

在斯特林制冷机中, 分置式斯特林制冷机具有体积小、制冷温度低、制冷量范围广等优点, 在低温与超低温领域应用广泛^[1-2], 目前已普遍适用于军事和航空航天领域。特别是在红外领域的应用与实践中, 国内外专家学者通过大量研究对分置式斯特林制冷机不断进行更新与迭代^[3-9]。

分置式斯特林制冷机与芯片、杜瓦共同组成了红外探测器组件。在实际应用中, 红外探测器组件性能受到诸多方面影响, 分置式斯特林制冷机主要为探测器提供低温工作环境^[10-13]。随着红外技术的不断创新, 很多学者针对分置式斯特林制冷机进行了优化和分析。

潘奇等^[14]利用热动力学设计计算出了整机的几何尺寸及运行参数, 并经实验研究了充气压力、运行频率、膨胀机弹簧刚度对制冷性能的影响。符鸣等^[15]通过实验分析了斯特林型压缩机活塞偏置的影响因素。实验结果表明, 压缩机内部处于真空状态时, 不会出现活塞偏置现象。当压缩机充入气体运行时, 活塞则会发生偏移, 并且随充气压力变化。王青峰等^[16]通过模拟对比研究了线性压缩机气体轴承中节流孔直径、空中心距等参数对气体轴承承载力和耗气量的影响。

作为红外探测器组件重要组成部分, 分置式斯特林制冷机的内部与外部尺寸间隙对整机系统影响较大。孙浩等^[17]研究了斯特林制冷机在不同翻转姿态情况下对探测器组件输出非均匀性的影响, 并提出了优化耦合尺寸以及驱动控制器的方法。倪贤灿等^[18]对气动分置式斯特林制冷机间隙密封进行了优化。通过研究发现, 与单段式间隙密封和三段式间隙密封相比, 双段式间隙密封结构性能可达到最优。王

正等^[19]研究了推移活塞的装配状态对分置式斯特林制冷机性能的影响。结果表明, 影响制冷机性能的推移活塞阻力的主要来源是摩擦力, 与粘性力同量级的摩擦力对分置式斯特林制冷机性能影响较小。陈曦等^[20]对斯特林制冷机进行优化设计后发现, 适当减小热端换热器的狭缝宽度和数量, 可以有效提高斯特林制冷机性能, 且冷端换热器没有热端换热器的优化潜力大。

在实际应用过程中, 分置式制冷机耦合间隙是影响探测器性能的一个重要因素。本文详细介绍了不同耦合间隙对红外探测器组件的降温时间、电流、二极管电压产生的影响。图 1 为分置式斯特林制冷机的示意图。

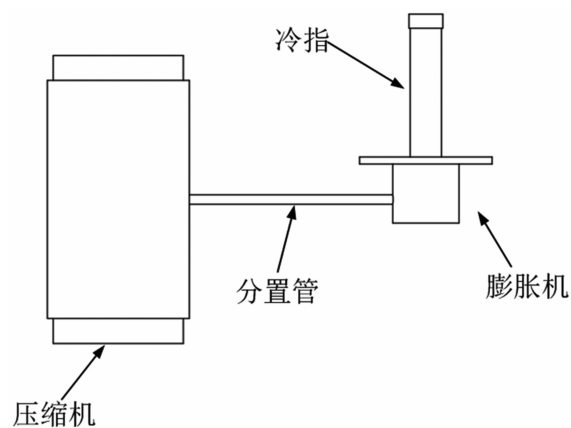


图 1 分置式斯特林制冷机示意图

1 制冷机耦合间隙对探测器组件的影响

分置式制冷机与杜瓦采用插入式耦合方法, 冷指的冷头与杜瓦底部存在间隙, 如图 2 所示。在杜瓦深度确定的情况下, 通过改变冷指长度来改变耦合间隙的大小, 在冷指冷头端增加不同厚度的钢箔片可得到不同长度的冷指。冷指冷头端增加钢箔片前后的对比如图 3 与图 4 所示。在插入式耦合方法中, 分置式制冷机与杜瓦之间最佳的耦合间隙可

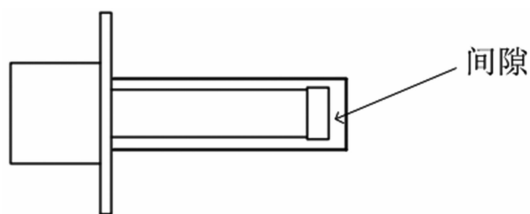


图2 耦合间隙示意图

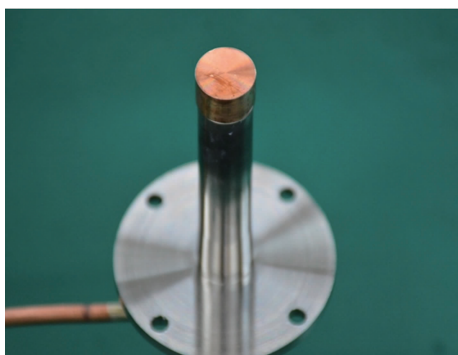


图3 冷指增加钢箔片前

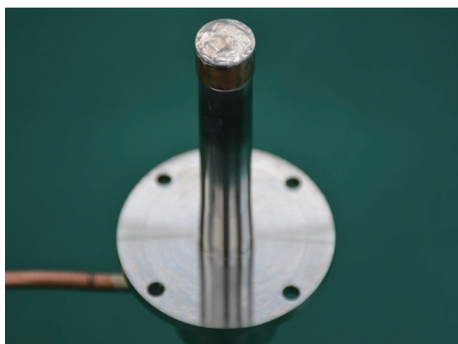


图4 冷指增加钢箔片后

以使制冷效率得到很好的提升。

1.1 冷指与杜瓦变形对耦合间隙的影响

在制冷机工作过程中，产生的低温环境会使制冷机冷指与杜瓦产生变形，进而对耦合间隙产生影响。为了研究低温环境对耦合间隙的影响，对制冷机冷指与杜瓦部分的变形进行仿真模拟。仿真边界条件如下：膨胀机温度为 -10°C ，外壳温度为 10°C ，芯片温度为 75K ，制冷机冷头温度为 70K 。仿真结果如图5与图6所示。

通过仿真可知，制冷机冷台下凹 0.0068mm ，杜瓦冷台上凸 0.0028mm ，耦合间隙变形 0.0096mm 。通过仿真可以发现，低温环境对制冷机冷指与杜瓦变形的影响较小，可以忽

略冷指与杜瓦变形对耦合间隙的影响。

1.2 实验方案

实验采用的杜瓦深度(包括法兰厚度)为 68.86mm ，制冷机冷指不增加钢箔片时的初始长度为 60.48mm ，过程中的密封圈厚度忽略不计，冷指长度采用增加钢箔片的方式：每次增加 0.05mm ，依次获得8组不同耦合间隙尺寸(见表1)。线性制冷机耦合杜瓦后如图7所示。

表1 不同耦合间隙尺寸

杜瓦深度/mm	制冷机长度/mm	耦合间隙/mm
60.86	64.48	0.38
60.86	60.53	0.33
60.86	60.58	0.28
60.86	60.63	0.23
60.86	68.68	0.18
60.86	60.73	0.13
60.86	60.78	0.08
60.86	60.83	0.03

制冷机工作时直流电压设置为 28V ，控温二极管电压值设置为 1.058V ，对应温度为 75K 。制冷机工作环境温度为常温 23°C ，无散热设施。采用上述方案研究制冷机耦合间隙对探测器组件性能的影响。实验结果分析主要从降温时间、输入电流、二极管电压值等方面加以讨论。

2 结果与讨论

制冷机开机运行后，采用降温时间(制冷机启动到开始控温时的时间)、输入电流、二极管电压值等参数分析耦合间隙对探测器组件性能的影响。降温时间和输入直流电流可直观体现不同耦合间隙的优劣，二极管电压值用于监控探测器的到温情况。

图8所示为直流电流随时间的变化规律。可以看出，降温时间随耦合间隙的增大而增加。当耦合间隙为 0.03mm 时，降温时间最短为 $6'35''$ ；当耦合间隙为 0.38mm 时，降温时间最长为 $7'27''$ 。随着耦合间隙的增大，冷量传递的热阻逐渐变大，使降温时间不断增加。对于

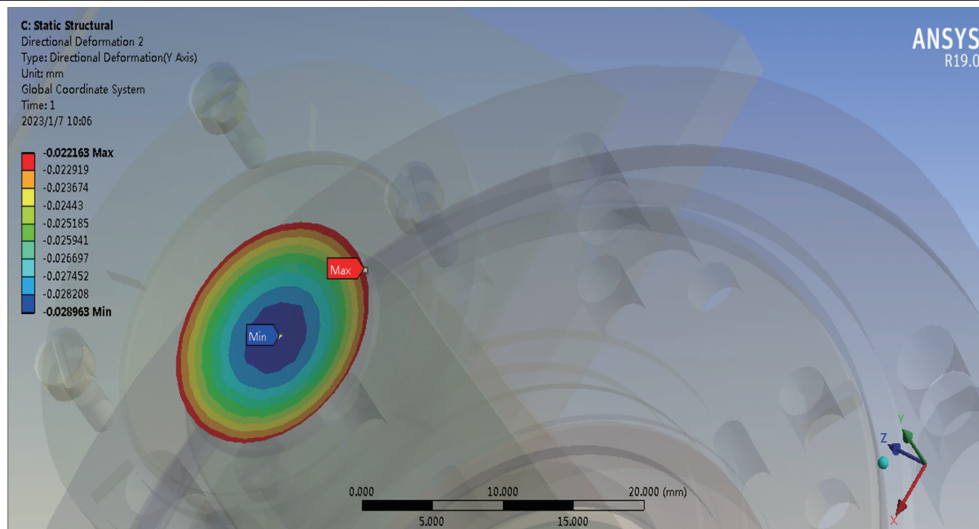


图 5 制冷机冷指变形

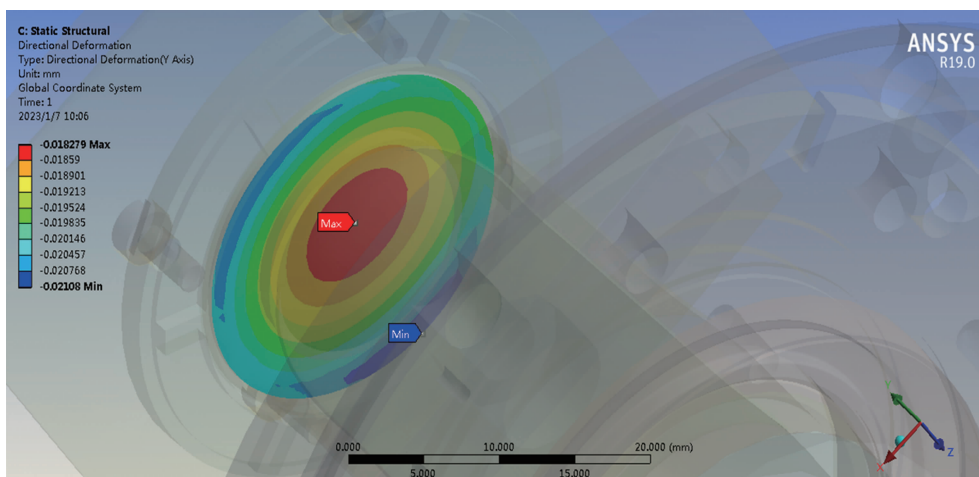


图 6 杜瓦冷指变形

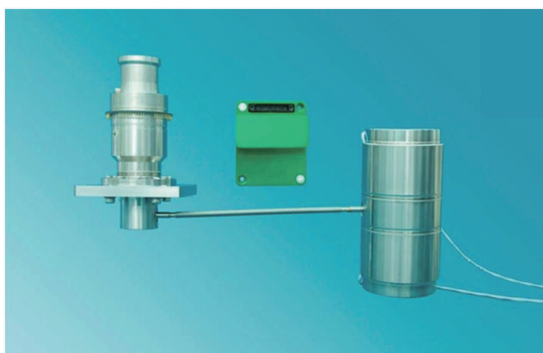


图 7 线性制冷机耦合杜瓦后的红外探测器组件

输入的直流电流, 前 100 s 的过程中直流电流缓慢增长。由于驱动内部电路设置, 对制冷机进行缓启动, 用来防止功率提升过快导致制冷机出现撞缸损坏情况。缓启动后电流逐渐增大并进入降温过程, 达到设定的制冷温度后, 制

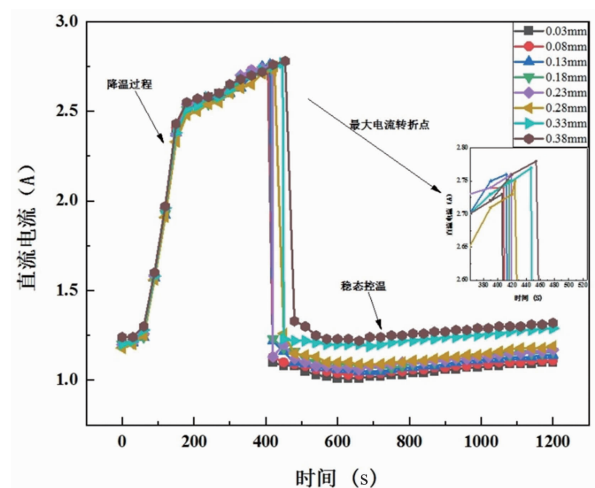


图 8 直流电流随时间的变化规律

冷机进入控温状态。达到控温状态时, 制冷机输入功率减小, 直流电流在制冷到温后存在骤

降现象，骤降后的电流称为稳态电流。

随着时间的逐渐增大，不同耦合间隙对应的直流电流也各不相同。从图 8 中可以看出，在同一时刻下，耦合间隙越小，相应的直流电流越小。耦合间隙小导致热阻变小，输入的直流电流较低时即可达到相同的制冷温度。在稳态控温过程中，直流电流存在缓慢增大的趋势。由于制冷机未安装散热装置，工作过程中制冷机温度升高，制冷机内部气缸活塞运动变差，从而使稳态电流增大以维持制冷效果。

图 9 所示为二极管电压值随时间的变化规律，二极管电压值对应于制冷温度。可以看出，二极管电压值随时间的增加呈现出逐渐增大并逐渐平稳的趋势。在达到控温状态前，同一时刻下，耦合间隙越小，相应的二极管电压值越大。同理可说明耦合间隙小导致热阻变小，从而可以达到更低的制冷温度。

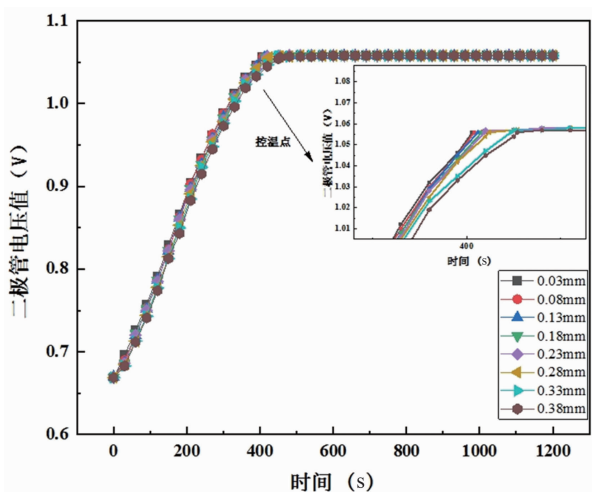


图 9 二极管电压值随时间的变化规律

3 结束语

分置式斯特林制冷机作为红外探测器组件的重要组成部分，在实际应用中对红外探测器组件的性能影响较大。分置式斯特林制冷机与杜瓦耦合时的耦合间隙是影响探测器性能的一个重要因素。本文针对二者之间不同耦合间隙对探测器性能的影响进行了实验研究，并针对低温环境对耦合间隙的影响仿真模拟了制冷机冷指与杜瓦部分的变形。通过仿真发现，低温

环境对制冷机冷指与杜瓦变形的影响较小，可以忽略冷指与杜瓦变形对耦合间隙的影响。

此外，本文采用降温时间、输入电流、二极管电压值等参数分析耦合间隙对探测器组件性能的影响。降温时间随耦合间隙的增大而增加：当耦合间隙为 0.03 mm 时，降温时间最短为 6'35"；当耦合间隙为 0.38 mm 时，降温时间最长为 7'27"。随着时间的逐渐增大，不同耦合间隙对应的直流电流也各不相同。在同一时刻下，耦合间隙越小，相应的直流电流越小。在达到控温状态前，同一时刻下，耦合间隙越小，相应的二极管电压值越大。结果表明，耦合间隙越小导致热阻越小，从而可以达到更低的制冷温度，使红外探测器组件的性能越好。

本文针对实际工艺应用中的耦合间隙进行了仿真模拟与实验分析，对于耦合工艺过程及探测器组件的设计具有一定的指导意义。未来可在冷指与杜瓦材料及构造设计等方面继续深入研究。

参考文献

- [1] 孟祥麒, 祁影霞, 王子龙, 等. 斯特林超低温冰箱箱体设计及箱体内温度场分析 [J]. 制冷技术, 2015, 35(3): 34-38.
- [2] 李虎飞, 陈州旗, 王建信, 等. 基于斯特林制超低温疫苗冷链箱的设计研究 [J]. 制冷技术, 2021, 41(5): 100-104.
- [3] 任静, 罗经纬, 何世安. 分置式斯特林制冷机失效分析 [J]. 低温与超导, 2002, 30(1): 1-5.
- [4] 罗运交, 张永清. 1W/80K@60°C 分置式斯特林制冷机的研制 [J]. 低温与超导, 2003, 31(2): 1-3.
- [5] 陈国邦, 颜鹏达, 李金寿. 斯特林低温制冷机的研究与发展 [J]. 低温工程, 2006, 13(5): 1-10.
- [6] 宋金良. 小型分置式斯特林制冷机的研究概述 [J]. 红外, 2005, 26(6): 26-31.
- [7] 胥春茜, 候光泽, 刘昊. 斯特林制冷机驱动器电流检测电路的比较和应用 [J]. 低温与超导, 2020, 48(6): 31-32.

- [8] 刘婵媛. 分置式线性斯特林制冷机驱动电路 [J]. *机电产品开发与创新*, 2016, **29**(3): 105-106.
- [9] 孙皓, 陈晓屏, 乔勇. 小型斯特林制冷机的航空应用与发展趋势 [J]. *红外技术*, 2015, **37**(11): 906-910.
- [10] 张巍, 迟国春, 张国刚. 斯特林制冷机在红外系统中的应用 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(12): 1106-1109.
- [11] 蔡毅, 王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题 [J]. *红外技术*, 2013, **35**(11): 671-682.
- [12] 饶启超, 任博文, 刘沛, 等. 斯特林制冷机技术研究进展综述 [J]. *低温与超导*, 2018, **46**(2): 19-24.
- [13] 迟国春, 孙皓, 王亮, 等. 红外探测器组件制冷参数分析 [J]. *红外技术*, 2019, **41**(7): 683-688.
- [14] 潘奇, 王立保, 黄太和, 等. 1.3 W@77 K 线性分置式斯特林制冷机的研制 [J]. *低温与超导*, 2020, **48**(12): 7-12.
- [15] 符鸣, 蒋珍华, 孟祥麒, 等. 斯特林型压缩机偏置现象的影响因素分析 [J]. *制冷技术*, 2015, **35**(3): 24-27.
- [16] 王青峰, 祁影霞, 潘帅, 等. 线性压缩机气体轴承数值模拟研究 [J]. *制冷技术*, 2015, **39**(2): 29-33.
- [17] 孙皓, 郭亮, 石纲, 等. 制冷机姿态变化对组件输出均匀性的影响 [J]. *激光与红外*, 2016, **46**(6): 717-721.
- [18] 倪贤灿, 陈曦, 郑朴, 等. 气动分置式斯特林制冷机间隙密封优化 [J]. *低温与超导*, 2021, **49**(1): 1-5.
- [19] 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.
- [20] 陈曦, 张利锦, 朋文涛, 等. 气动分置式斯特林制冷机冷热端狭缝换热器的优化设计 [J]. *流体机械*, 2019, **47**(5): 69-73.