

文章编号: 1672-8785(2024)11-0028-06

斯特林制冷机热真空环境 散热设计与分析

饶启超 耿利红* 刘志勇 李建国

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 斯特林制冷机表面温度对红外探测器性能有直接影响, 使斯特林制冷机散热设计优化在热真空环境下显得尤为重要。为了优化热真空环境应用的斯特林制冷机散热条件, 基于 Ansys 计算平台进行了斯特林制冷机热真空环境的热仿真分析, 设计了斯特林制冷机水冷散热工装, 并对其进行了仿真模拟计算和试验研究。结果表明, 制冷机内的温度最高位置为驱动板。设计了以铜为材质的沟槽结构的制冷机水冷散热工装, 采用该散热工装后可有效降低制冷机表面温度。在外界环境温度不变的条件下, 提高散热工装的进液口温度时, 制冷机电机外壳温度和散热工装温度升高, 散热工装进出液口的温度差逐步缩小。

关键词: 斯特林制冷机; 热真空; 散热设计; 仿真; 试验

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.11.004

Design and Analysis of Heat Dissipation in Thermal Vacuum Environment of Stirling Cryocooler

RAO Qi-chao, GENG Li-hong*, LIU Zhi-yong, LI Jian-guo

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

Abstract: The surface temperature of Stirling cryocooler has a direct effect on the performance of infrared detector, so the optimization of the cooling design of Stirling cryocooler is particularly important in the thermal vacuum environment. In order to optimize the heat dissipation conditions of Stirling cryocooler applied in thermal vacuum environment, the thermal simulation analysis of the thermal vacuum environment of Stirling cryocooler based on the Ansys calculation platform is carried out, and the water-cooled heat dissipation fixture of Stirling cryocooler is designed. The simulation calculation and experimental research are carried out as well. The results show that the driving plate is the highest temperature position in the cryocooler. A water-cooled heat dissipation fixture with groove structure made of copper is designed, which can effectively reduce the surface temperature of Stirling cryocooler. Under the condition of constant external environmental temperature, the temperatures of Stirling cryocooler motor shell and the water-cooled heat dissipation fixture increase when the inlet temperature increases. Moreover, the temperature differences between inlet and outlet of the water-cooled heat dissipation fixture gradually decrease.

Key words: Stirling cryocooler; thermal vacuum; heat dissipation design; simulation; experiment

收稿日期: 2024-04-05

作者简介: 饶启超(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事低温制冷研究。

*通讯作者: E-mail: xhgeng@163.com

0 引言

斯特林制冷机具有结构紧凑、制冷温区广、制冷工质闭式循环等特点, 可为红外探测器提供红外芯片材料所需的低温环境, 保证红外探测器良好的工作性能。红外探测器组件的制冷机是高集成度的机电产品。工质在制冷机的压缩腔内压缩产热, 驱动元器件和电机定子会因自身电阻产生热量, 使制冷机表面温度升高。斯特林制冷机表面温度对红外探测器性能有直接影响, 一般要求制冷机表面温度不高于环境温度 10°C ^[1], 因此要充分考虑制冷机的散热技术。

随着可靠性和寿命的提升, 斯特林制冷机已成为各国空间应用最多的小型机械低温制冷机^[2]。空间应用的斯特林制冷机散热没有对流换热, 只有传导和辐射换热, 因此其散热条件比地面常压环境要恶劣很多。本文进行了斯特林制冷机热真空环境的热仿真分析, 设计了斯特林制冷机水冷散热工装, 并对其进行了仿真模拟计算和试验研究, 以优化热真空环境下的斯特林制冷机散热条件, 从而为空间应用的红外探测器热真空环境散热提供参考。

1 热真空环境热仿真分析

为斯特林制冷机热真空环境散热工装设计提供数据支撑, 采用经过验证的热真空环境热

仿真模型^[3], 针对热真空环境使用的斯特林制冷机进行热仿真分析。图 1 所示为热真空环境下使用的斯特林制冷机探测器组件的三维简化模型。红外探测器所用斯特林制冷机主要包含曲轴箱、电机定子、电机外壳、驱动板等。

将斯特林制冷机探测器组件的 CAD 模型简化后导入 Ansys Workbench, 建立热仿真计算的几何模型, 并进行网格划分^[4]。在 Steady-state Thermal 模块中建立斯特林制冷机探测器组件的热仿真模型^[3]。在热仿真计算中忽略制冷机内部气体的对流换热、摩擦损失和其它耗散损失, 只考虑制冷机探测器组件与周围热真空环境的传导和辐射换热。制冷机的主要机体材料采用 7A04 铝合金, 机体表面的法向发射率取 0.2^[5]。制冷机压缩产热、驱动元器件和电机定子发热量通过附加热载荷形式模拟实际发热过程。斯特林制冷机在工作过程中的压缩产热 q_1 为 $9.81 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^3$, 电机定子发热 q_2 为 $3.19 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^3$, 驱动元器件发热 q_3 为 $6.22 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^3$ ^[3]。根据实际热真空环境试验要求, 设定环境温度为 60°C , 制冷机工作温度为 -196.15°C 。根据此边界条件和热载荷进行制冷机红外探测器组件的热仿真计算。

图 2 为斯特林制冷机探测器组件的温度分布云图。可以看出, 热真空环境中, 在不加散

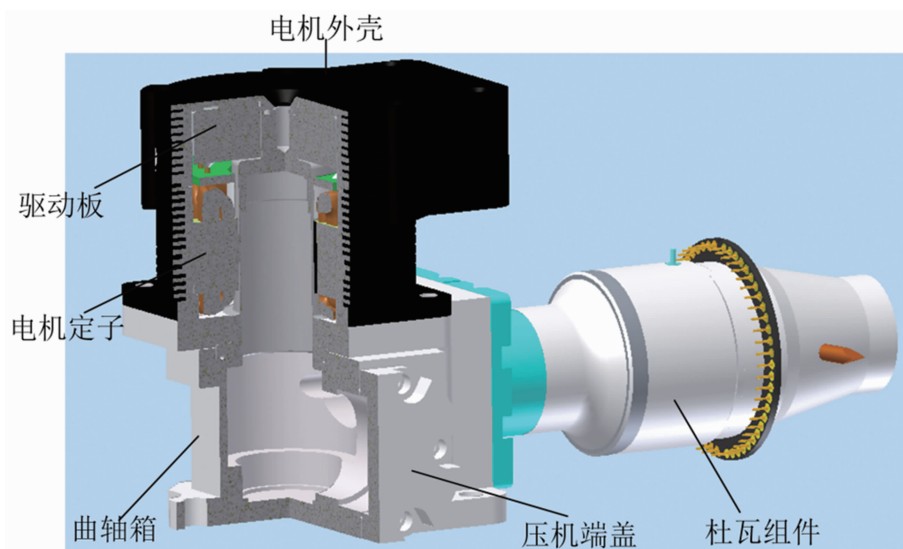


图 1 斯特林制冷机探测器组件的三维简化模型

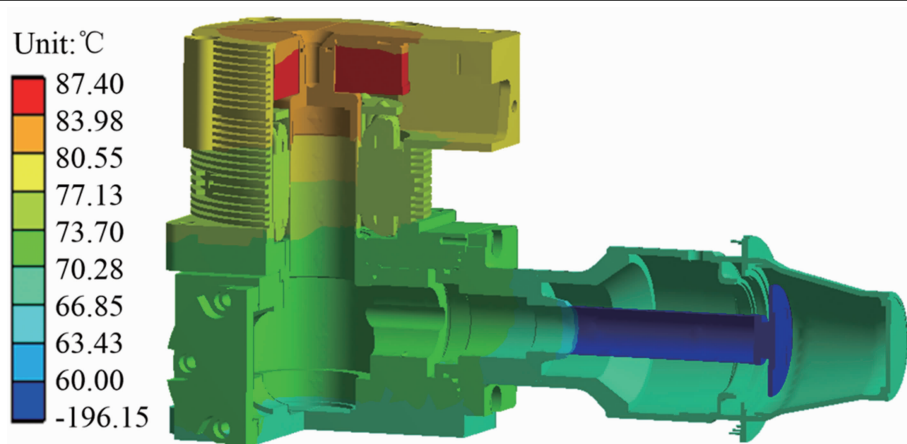


图 2 斯特林制冷机探测器组件的温度分布云图

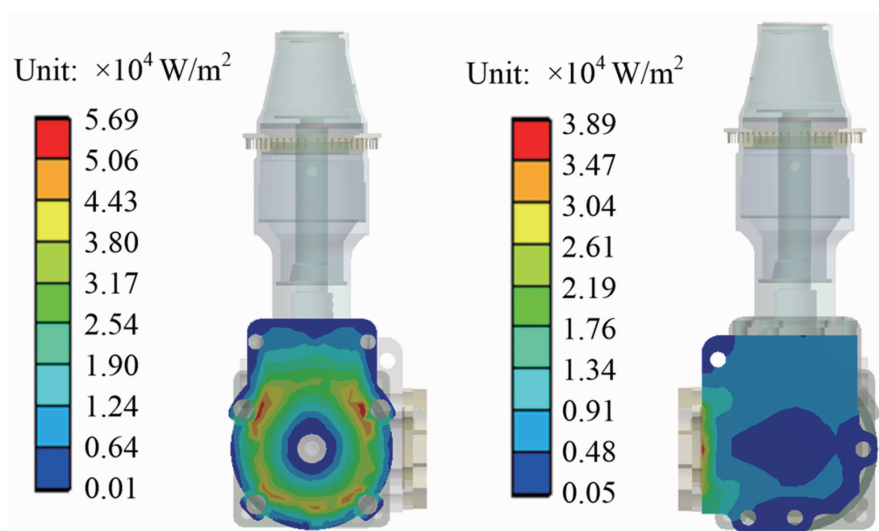


图 3 制冷机热流密度分布云图：(a)电机外壳顶面；(b)曲轴箱底面

热的情况下，制冷机最高温度为 87.4°C ，制冷机内温度最高位置为驱动板，制冷机外壳最高温度为 87.1°C ，与环境温度的差值为 27.1°C ，超过制冷机最佳工作状态的参数范围，需要对热真空环境的斯特林制冷机进行散热优化。

图 3 为制冷机电机外壳顶面和曲轴箱底面的热流密度分布云图。可以看出，在制冷机工作过程中，制冷机电机外壳顶面的热流密度大于曲轴箱底面的热流密度，制冷机电机外壳顶面的最大热流密度为 $5.69 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ ，制冷机曲轴箱底面的最大热流密度为 $3.89 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 。将此热流密度分布作为制冷机水冷散热工装的热源进行加载，并对制冷机水冷散热工装进行设计及仿真计算。

2 热真空环境散热设计及仿真分析

2.1 热真空环境散热工装设计

综合斯特林制冷机探测器组件在热真空环境下的热仿真结果和实际热真空环境试验情况，设计了制冷机水冷散热工装，如图 4(a)所示。通过水冷却组通入循环冷却工质，将斯特林制冷机工作过程中产生的热量带走。上散热板和下散热板均采用沟槽结构，如图 4(b)和图 4(c)所示。制冷机水冷散热工装与红外探测器组件组装后的总体外形尺寸为 $450 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ，制冷机水冷散热工装的材质设计为铜，冷却工质从制冷机水冷散热工装的下散热板进液，从制冷机水冷散热工装的上散热板出液。上下散热板之间通过铜管连接。

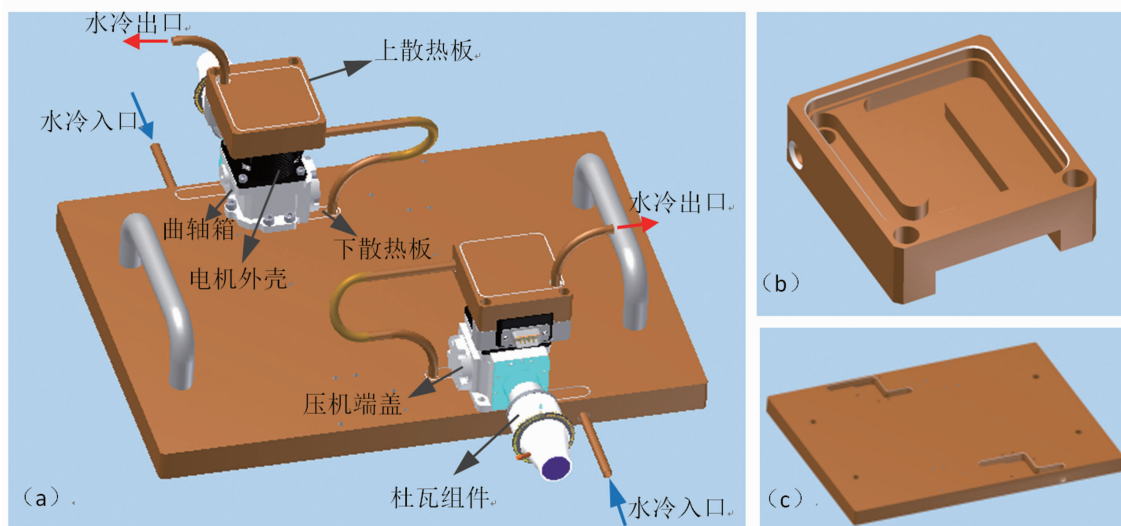


图 4 (a)制冷机水冷散热工装; (b)上散热板; (c)下散热板

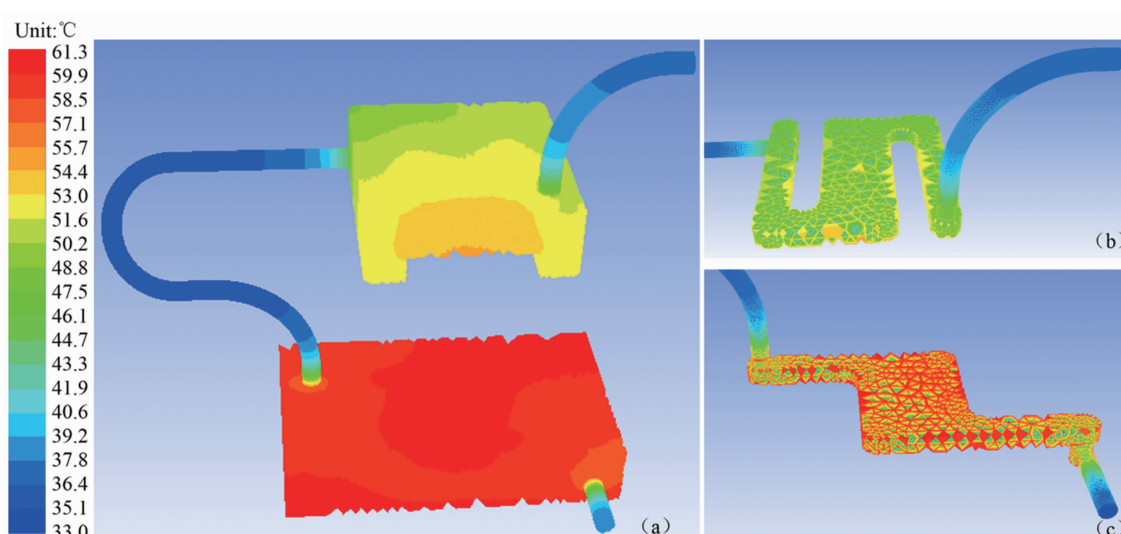


图 5 温度分布云图: (a)制冷机水冷散热工装; (b)上散热板内的冷却工质; (c)下散热板内的冷却工质

2.2 热真空环境散热工装仿真分析

将制冷机水冷散热工装的 CAD 模型简化后导入 Ansys Workbench, 建立相应几何模型并进行网格划分。在 Ansys Fluent 中建立制冷机水冷散热工装的流固耦合仿真模型。采用基于压力的求解器进行稳态计算。边界条件为速度入口、压力出口。考虑周围环境对制冷机水冷散热工装外壳的热辐射和制冷机工作过程中的产热, 其中产热量按照斯特林制冷机热真空环境热仿真计算出的热流密度值设置于上散热板和下散热板与制冷机的接触面上; 忽略下散热板底面与热真空罐支架的热阻, 即设置下散热板底面温度为 60°C 。求解时采用压力-速度

耦合的 SIMPLE 算法, 空间离散梯度格式采用基于网格单元的最小二乘法, 压力项采用二阶格式, 动量和能量离散采用二阶迎风格式。

图 5 为制冷机水冷散热工装流固耦合计算的温度分布云图。可以看出, 制冷机水冷散热工装的上散热板和下散热板之间的连接管温度较低, 而上散热板和下散热板温度较高。这是由于制冷机水冷散热工装的上散热板和下散热板均有热源加热, 使制冷机水冷散热工装温度远高于其内部冷却工质温度。因为制冷机水冷散热工装的下散热板与热真空罐支架直接接触, 所以下散热板的温度略高于上散热板。当制冷机水冷散热工装内冷却工质入口温度为

33℃时,制冷机水冷散热工装下散热板的最高温度为 61.3℃,上散热板的最高温度为 57℃,上散热板冷却工质出口温度约为 37℃。按照冷却工质 1 m/s 的流速计算,制冷机水冷散热工装内的冷却工质带走 319 W 热量,远大于制冷机最大输入功率 60 W,可有效实现斯特林制冷机的散热优化。

3 热真空环境热试验分析

图 6 为斯特林制冷机热真空环境试验的实物图。试验所用热真空罐的极限环境压力为 5×10^{-5} Pa。在热真空试验过程中,通过 PTR90 压力变送器测量热真空环境压力,压力测量精度为 $\pm 30\%$ 。通过热电偶测量制冷机探测器组件和水冷散热工装表面的温度,通过安捷伦 34465A+L4421A 数据采集仪实现温度的实时监控和记录(测温精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)。水冷机组采用 FL-02A 风冷式水冷机,冷却工质采用防冻液,水冷机组内冷却工质温度调节范围为 $-45^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 。为增强制冷机与水冷散热工装之间的传导换热,在曲轴箱底部与下散热板之间、电机外壳与上散热板之间均涂抹导热脂。设定热真空试验温度为 60°C ,测量不同冷却工质入口温度下的制冷机水冷散热工装及制冷机电机外壳表面温度(结果见表 1)。

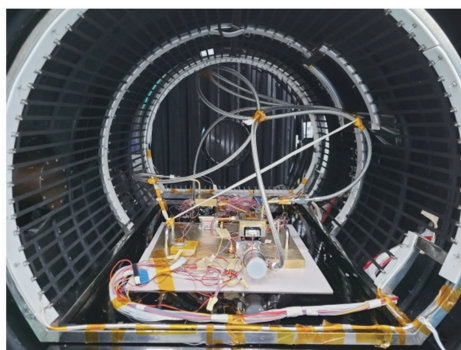


图 6 斯特林制冷机探测器组件在热真空环境下的热试验实物图

由以上数据可以看出,在外界环境温度不变的条件下,提高散热工装的进液口温度,制冷机电机外壳温度和散热工装温度升高,散热工装进出液口的温度差逐步缩小。电机外壳温度高于散热工装的温度,散热工装的出液口温度高于进液口温度,制冷机工作过程中产生的热量被冷却工质带走,从而起到对制冷机散热的的作用。当制冷机水冷散热工装的进液口温度为 32°C 时,出液口温度为 37.1°C ,上散热板顶部的温度为 29.7°C 。可以发现,制冷机水冷散热工况的出液口温度与模拟计算值基本一致,上散热板顶部温度与模拟计算值偏差略大。这主要是因为仿真模型中未考虑制冷机电机外壳与水冷散热工装的接触热阻,使模拟计算的制冷机水冷工装的上散热板顶部温度偏高。当制冷机水冷散热工装的进液口温度为 58.1°C 时,出液口温度为 59.6°C ,电机外壳温度为 61.6°C ,比环境温度 60°C 高 1.6°C ,说明采用制冷机水冷散热工装可有效降低制冷机表面温度。

4 结束语

本文基于 Ansys 计算平台,进行了斯特林制冷机热真空环境的热仿真分析,设计了斯特林制冷机水冷散热工装,并对其进行了仿真模拟计算和试验研究,以优化热真空环境下的斯特林制冷机散热条件,为空间应用的红外探测器热真空环境散热提供参考。具体结论如下:

(1)热真空环境 60°C 且不加散热的情况下,制冷机内温度最高位置为驱动板,制冷机外壳最高温度为 87.1°C ,制冷机电机外壳顶面的热流密度大于曲轴箱底面的热流密度。

(2)设计了以铜为材质的沟槽结构的制冷机水冷散热工装。制冷机水冷散热工装的流固耦合仿真计算表明,制冷机水冷散热工装内冷

表 1 制冷机水冷散热工装和电机外壳表面温度

散热工装进液口温度/ $^\circ\text{C}$	32.0	34.4	40.9	46.0	58.1
散热工装出液口温度/ $^\circ\text{C}$	37.1	38.6	42.0	47.1	59.6
上散热板顶部温度/ $^\circ\text{C}$	29.7	33.1	35.7	43.7	57.7
电机外壳温度/ $^\circ\text{C}$	38.2	38.8	43.0	47.8	61.6

却工质带走的热量远大于制冷机最大输入功率, 可有效实现斯特林制冷机的散热优化。

(3) 热真空环境下的热试验结果表明, 采用制冷机水冷散热工装后可有效降低制冷机表面温度; 在外界环境温度不变的条件下, 提高散热工装的进液口温度时, 制冷机电机外壳温度和散热工装温度升高, 散热工装进出液口的温度差逐步缩小。

参考文献

- [1] 赵文丽, 李昊岚, 孙皓, 等. HOT 器件用旋转式斯特林制冷机研究进展 [J]. 红外技术, 2023, **45**(2): 195–201.
- [2] 陆永达, 朱魁章, 杨坤, 等. 大冷量长寿命斯特林制冷机热环境适应性试验研究 [J]. 低温技术, 2012, **40**(4): 5–8.
- [3] 张巍, 耿利红, 饶启超, 等. 不同斯特林制冷机驱动盖板的探测器热仿真 [J]. 激光与红外, 2022, **52**(8): 1211–1215.
- [4] 辛光磊, 任博文. 斯特林制冷机回热器的热损失理论分析及实验研究 [J]. 红外, 2021, **42**(3): 31–35.
- [5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.