

文章编号: 1672-8785(2024)08-0024-09

回热器丝网参数对斯特林制冷机性能的影响

韩春生¹ 王 峰² 韩蓬磊¹ 饶启超¹

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 回热器为斯特林制冷机的关键部件, 其参数直接影响制冷机的工作效率, 不锈钢丝网为回热器填料。分析了回热器丝网参数对斯特林制冷机性能的影响。利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真得出回热器内流场分布、压力分布规律。利用流量测试系统得出空隙率与流量之间的关系。空隙率越大, 回热器内部流量越大, 降温时间有所增加。通过试验研究了不同空隙率、丝网数量对性能的影响。结果表明, 当丝网数量相同、回热器空隙率为 0.61~0.78 时, 空隙率增大, 制冷机降温时间随之增加; 当回热器丝网数量为 600~800 时, 制冷机降温时间随着回热器丝网填充数量的增加而降低。

关键词: 斯特林制冷机; 回热器丝网; 试验; 计算流体力学

中图分类号: TB66 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.08.004

The Influence of Cryocooler Wire Mesh Parameters on the Performance of Stirling Cryocooler

HAN Chun-sheng¹, WANG Feng², HAN Peng-lei¹, RAO Qi-chao¹

(1. North China Research Institute of Elector-Optics, Beijing 100015, China;

2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: The cryocooler is the key component of Stirling refrigerator, its parameters directly affect the working efficiency of the refrigerator, and the stainless steel wire mesh is the filler of regenerator. In this paper, the influence of wire mesh parameters on the performance of Stirling refrigerator is analyzed. The flow field distribution and pressure distribution in the regenerator are obtained by computational fluid dynamics (CFD) simulation. The relationship between the void ratio and flow rate is obtained by means of flow measurement system. The larger the void ratio is, the larger the internal flow rate of the regenerator is, and the cooling time increases. The effect of different void ratios and numbers of meshes on the performance is studied by experiments. The results show that when the number of meshes is the same and the void ratio of regenerator is 0.61~0.78, the cooling time of refrigerator increases with the increase of void ratio. When the number of regenerator wire meshes is 600~800, the cooling time of the refrigerator decreases with the increase of the

收稿日期: 2023-09-28

作者简介: 韩春生(1995-), 男, 天津人, 硕士, 主要从事数字孪生技术、红外探测技术、低温与制冷技术等方面的研究。E-mail: hancs2035@163.com

number of regenerator wire meshes filling.

Key words: Stirling cryocooler; cryocooler wire mesh; experiment; computational fluid dynamics

0 引言

斯特林制冷机作为制冷型红外探测器的关键部件, 被广泛应用于宇航、机载、车载等红外探测设备及各类红外手持热像仪中。近年来, 我国斯特林制冷机技术发展迅速, 但仍和发达国家有一定差距。因此, 开发快启动、大冷量、小型化制冷机技术对于红外探测领域具有重要意义。

回热器是斯特林制冷机快速换热的重要部件之一。回热器内部以不锈钢丝网作为填料, 结构紧凑、换热面积大, 是典型的多孔介质。通过回热器的传热量要比制冷机的冷量大^[1], 回热器参数差异直接体现在制冷性能上^[2]。为了提高斯特林制冷机的制冷效率, 本文以回热器为研究对象, 利用数值模拟获得回热器内流场分布、压力分布规律, 并通过试验分析了空隙率、丝网数量等回热器结构参数对制冷机性能的影响。

1 回热器作用机理

斯特林制冷机是采用逆向斯特林循环工作的低温制冷机^[3]。斯特林循环由两个等温过程和两个等容过程组成。斯特林制冷机的工作原理如图 1 所示, 分为等温压缩过程 1、等体积放热过程 2、等温膨胀过程 3、等体积吸热过程 4。斯特林制冷机的主要组成如图 2 所示^[4-5]。

斯特林制冷机的回热器套筒材料为聚醚醚酮, 内部填充不锈钢丝网, 并以杜瓦组件的内壁作为汽缸, 随着推移活塞做往复运动, 如图 2 所示^[5]。其作用是快速交替换热并贮存冷量, 使回热器的冷、热端维持设定的温差; 内部氦气工质在压差驱动下通过回热器, 完成换热^[6]。回热器内的不锈钢丝网周期性地积累上一次循环所得冷量并将其传递给下一循环的工作气体, 以提高能量的利

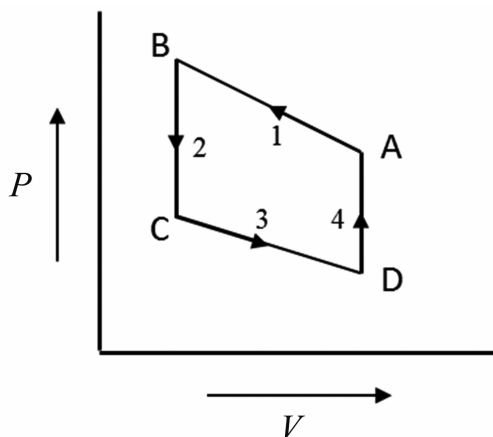


图 1 斯特林循环工作过程

用率。在该过程中, 回热器丝网与工作气体之间的换热始终为非稳态交变换热^[7]。因此, 只有保证回热器有足够的换热面积和填充率, 才能保证制冷机在获得足够制冷量的同时消耗较少的功率。

2 回热器数值模拟

我们选择某型斯特林制冷机回热器为研究对象(基本尺寸见图 3), 探讨网格尺寸、模型、空隙率等因素对斯特林制冷机性能的影响, 并通过模拟回热器内部流场来研究压力、速度等分布规律。

回热器填料空隙率的定义为回热器填料空容积与回热器全部体积之比, 与目数、丝径相关。回热器空隙率的估算公式如下^[8]:

$$\varphi = 1 - \frac{\pi}{4} \frac{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{1}{d_w/B}\right)^2}}{1 + \frac{1}{d_w/B}} \quad (1)$$

式中, φ 为空隙率, d_w 为丝径, B 为孔间距。

回热器空隙率对制冷机降温时间有着直接影响。为了探讨回热器空隙率对斯特林制冷机性能的影响, 本文选取六种不同类型的丝网(见图 4), 利用式(1)对试验用回热器的空隙率进行计算(结果见表 1)。

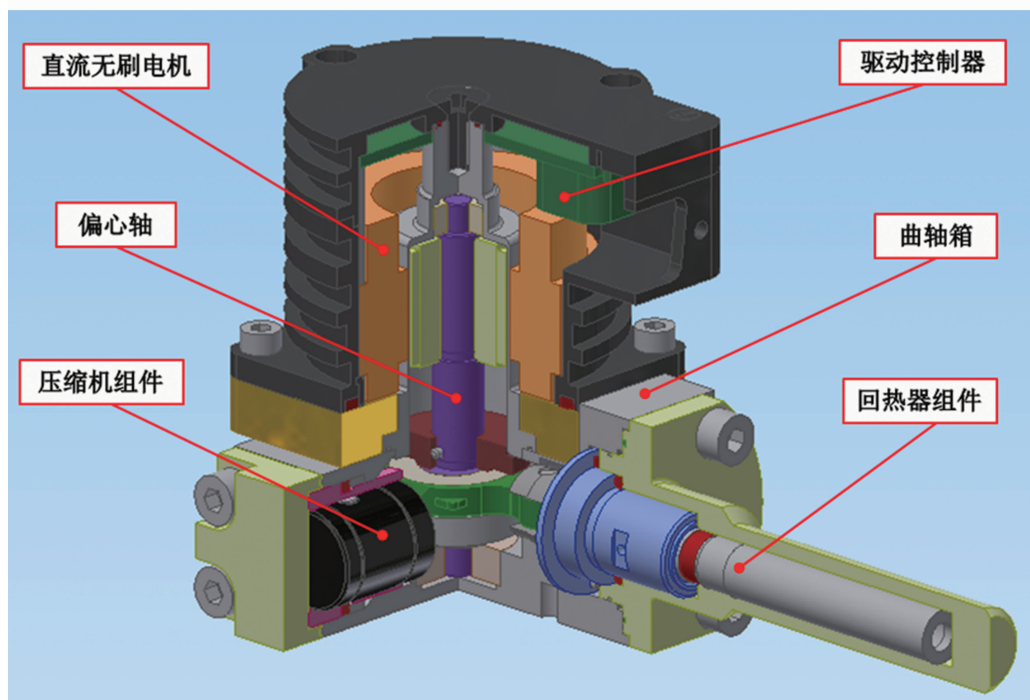
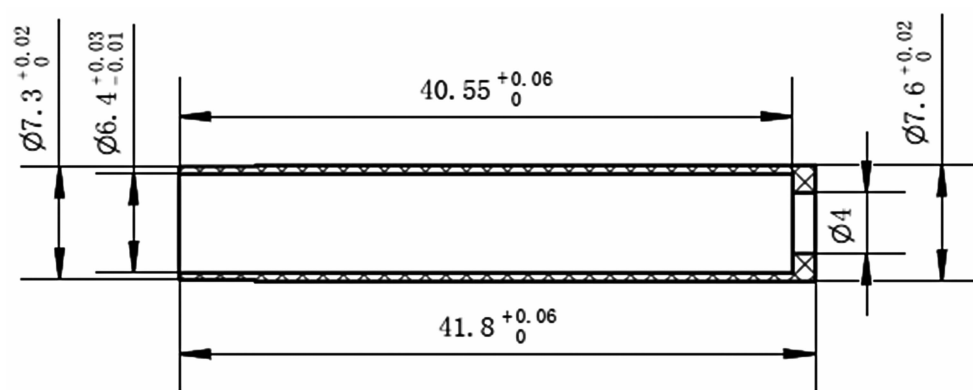
图 2 斯特林制冷机的基本结构^[5]

图 3 回热器基本尺寸

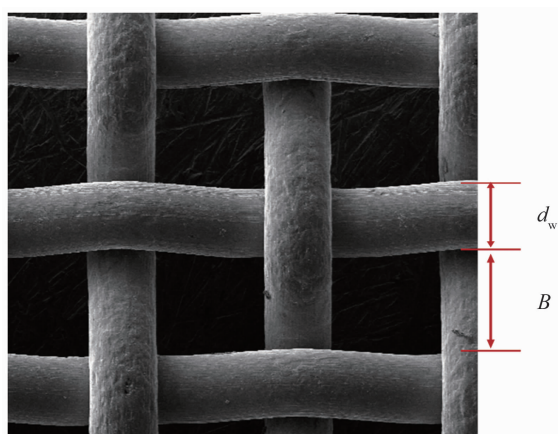


图 4 丝网示意图

表 1 回热器空隙率计算结果

丝网规格	d_w/mm	B/mm	空隙率 V
500 目 $\times$ 0.025 mm	0.025	0.027	0.58
350 目 $\times$ 0.020 mm	0.020	0.054	0.78
350 目 $\times$ 0.025 mm	0.025	0.049	0.72
400 目 $\times$ 0.024 mm	0.024	0.041	0.69
400 目 $\times$ 0.030 mm	0.030	0.036	0.61
450 目 $\times$ 0.024 mm	0.024	0.033	0.64

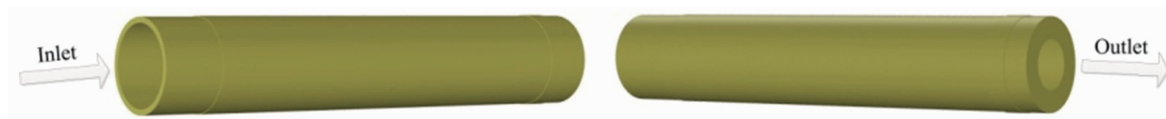


图 5 回热器示意图



图 6 回热器网格划分

表 2 回热器网格尺寸及扭曲度

网格编号	最小尺寸/mm	最大尺寸/mm	网格数量/个	压降/MPa	扭曲度
1	0.07	0.5	86125	1.28	0.863
2	0.06	0.4	99253	1.39	0.814
3	0.05	0.3	112598	1.43	0.802
4	0.04	0.2	133886	1.5	0.796
5	0.02	0.1	157983	1.5	0.795
6	0.01	0.05	182564	1.5	0.799

2.1 网格划分及无关性分析

本文采用 ANSYS SCDM 绘制三维构体, 用 ANSYS Fluent Meshing 划分网格, 网格采用多面体网格。为消除网格数量对计算精度的影响, 对不同数量网格进行无关性分析。构体和网格划分分别如图 5 和图 6 所示。

为了考察网格数量对回热器内部压降的影响, 设置不同尺寸的网格(见表 2)。扭曲度均小于 0.9, 满足计算要求。当网格数量增大至 133886 时, 压降趋于稳定。此后再增加网格数量, 压降也不再变化(见图 7)。因此, 为了节省计算量同时满足计算要求, 此回热器模拟计算网格选用 133886 个。

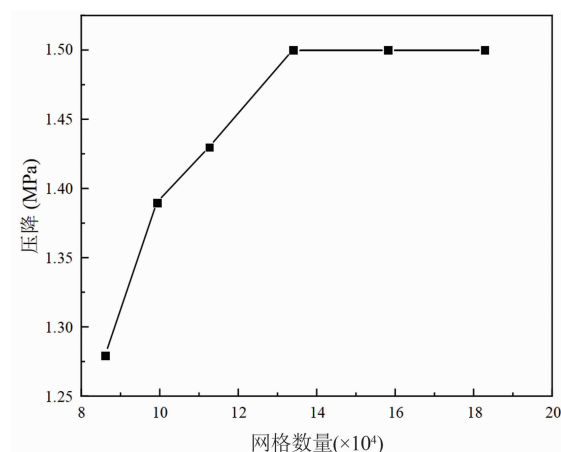


图 7 回热器压降与网格数量的关系

2.2 条件设定

回热器 CFD 数值计算的关键影响参数包

表 3 模型条件

参数	数值设定
流体空隙率	0.58~0.78
湍流模型	标准 $k-\epsilon$
压力-速度耦合	耦合算法
梯度格式	基于单元体的最小二乘法
动量离散化	二阶迎风格式
湍流动能	一阶迎风格式
湍流耗散率	一阶迎风格式

括空隙率、湍流模型、模拟方法等。表 3 列出了模型条件。本文在计算中采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。该模型适用于完全湍流状态计算，而氦气受到回热器丝网的作用，恰恰始终处于湍流状态^[9]。迭代求解方法采用 Coupled 算法，该算法是 CFD 计算中常用的求解方法，被广泛应用于多相流动计算。在模型和计算方法确定的基础上，验证不同空隙率的流场变化。

2.3 仿真结果

2.3.1 速度分布

选取表 1 中六种不同空隙率的回热器进行 CFD 数值模拟，得到的回热器内部速度差趋势如图 8 所示。可以看出，随着空隙率的增大，回热器内部速度差增大。这是由于空隙率增大，流阻随之降低，氦气工质可以在短时间内通过回热器，速度变化较小，不利于充分换热。

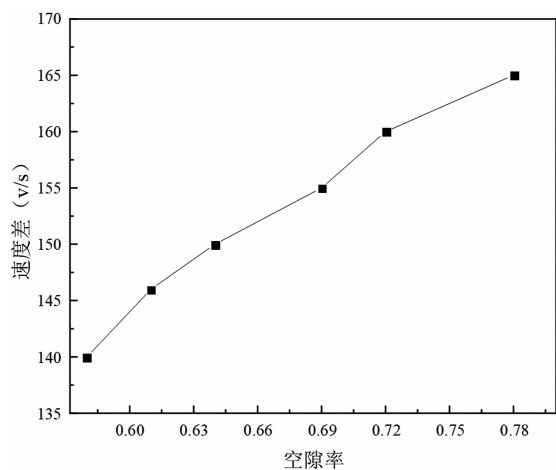


图 8 回热器内最大流速随空隙率的变化关系

以空隙率为 0.64 的回热器在入口压力 3 MPa 下的计算结果为例，速度分布如图 9 所

示。氦气从气路进入回热器入口，形成突扩管，流速跃升，之后逐渐平稳。图 10 为回热器速度流线图。可以看出，回热器入口处因流速、压力的突变而形成回流区域。

2.3.2 压力分布

空隙率为 0.64 的回热器在入口压力 3 MPa 下的总压力分布结果如图 11 所示，最高压力达到 2.15 MPa。

为进一步探究回热器内部压力分布情况，将压力显示范围缩小，分布如图 12 所示。氦气从入口流入后，由于存在压力差，入口两端压力较小，之后压力趋于平稳。在出口处，由于流道变窄，压力增大 0.1 MPa 左右。

由回热器数值模拟结果可知，空隙率越大，回热器内部速度差越小，影响回热器充分换热。氦气从回热器入口进入，因流速与压力突变而形成回流，此处压力变化较大，之后气体流动趋于平稳。

3 丝网参数对制冷机性能的影响

为探讨丝网参数对制冷机性能的影响，针对 0.7 W@77 K 型斯特林制冷机进行分析与研究，采用相同丝网规格、不同数量的回热器以及相同数量、不同丝网规格的回热器进行试验（电压为 24 V），分别测量常温（23℃）环境下的制冷机规律。

3.1 回热器空隙率对制冷机性能的影响

氦气通过回热器时受到丝网填料的阻力作用，气体流量受到入口压力、回热器空隙率的影响，进而影响回热器效率。流量与回热器空隙率的关系如表 4 所示。可以看出，相同压力情况下，回热器内气体流量随着空隙率的增大而增大。

常温环境下的降温时间随空隙率的变化规律如图 13 所示。由图可知，回热器空隙率为 0.58~0.64 时，制冷机降温时间随空隙率的增大而提高。回热器空隙率为 0.64~0.72 时，制冷机降温时间增速放缓，趋于平稳。当空隙率由 0.72 增大至 0.78 时，降温时间陡然上升。这是由于空隙率较大时，氦气介质在回热

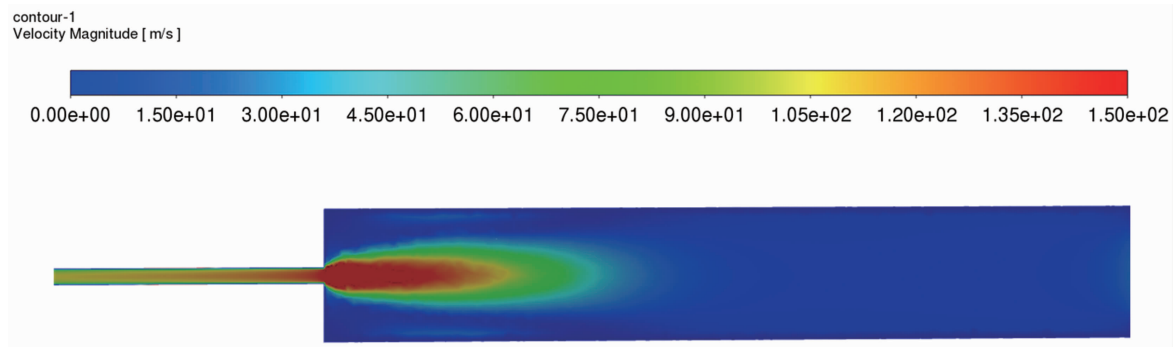


图 9 回热器速度分布图

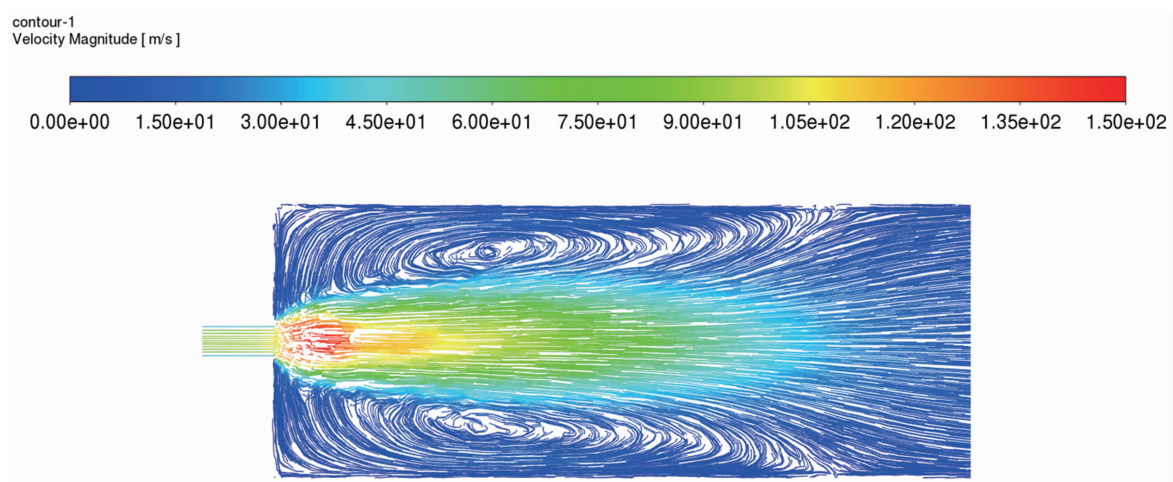


图 10 回热器速度流线图

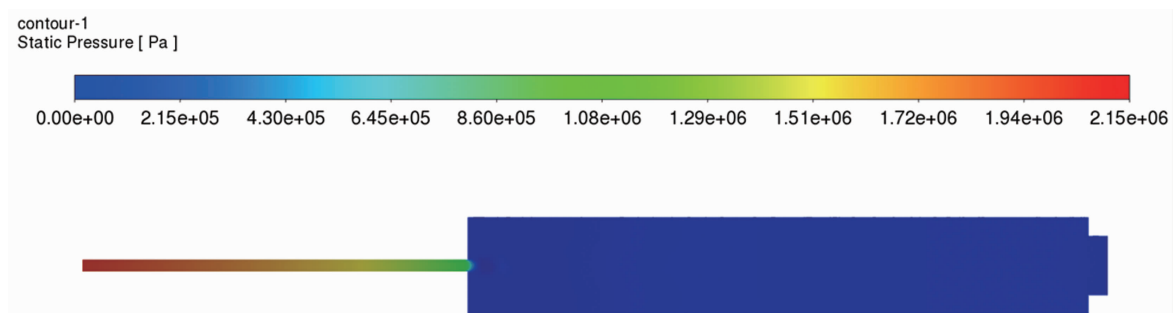


图 11 回热器压力总分布图

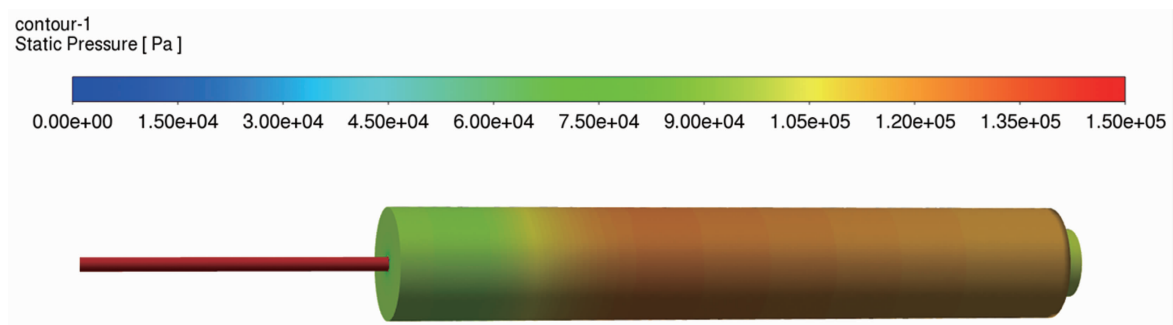


图 12 回热器压力局部范围分布图

表 4 回热器流量测试结果

压力/MPa	500 目× 0.025 mm (V= 0.58 g/min)	350 目× 0.020 mm (V= 0.78 g/min)	350 目× 0.025 mm (V= 0.72 g/min)	400 目× 0.024 mm (V= 0.69 g/min)	400 目× 0.030 mm (V= 0.61 g/min)	450 目× 0.024 mm (V= 0.64 g/min)
2	44.31	55.92	53.54	49.35	47.21	48.24
3	64.73	78.34	72.36	68.83	66.38	67.95
4	80.91	102.40	95.73	90.31	83.42	85.19
5	96.17	118.32	109.49	105.26	101.64	103.63

器中无法充分换热，最终影响制冷机降温时间。

3.2 丝网数量对制冷机性能的影响

采用 500 目、平均丝径为 0.024 mm 的丝网进行了试验，丝网材质为 316L 不锈钢。表 5 为低温硅二极管温度计分度表，体现了二极管电压值与制冷温度之间的对应关系。

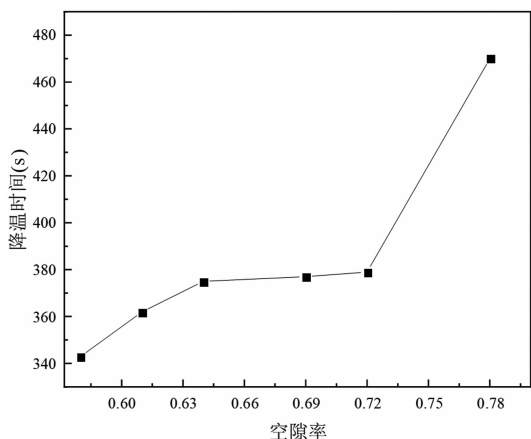


图 13 降温时间随空隙率变化的规律

表 5 低温硅二极管温度计分度表

二极管电压/V	温度/K
0.987	120.304
1.035	90.520
1.043	85.371
1.056	77.005
1.060	74.456

常温下二极管电压随时间的变化规律如图 14 所示。二极管电压与制冷温度的对应关系如表 5 所示。从图 14 中可以看出，二极管电压值随时间的增加呈现出逐渐增大的趋势，并在 343~373 s 之间逐渐趋于平稳，达到控温点。在降温过程中，同一时刻下的回热器丝网

片数越大，对应的二极管电压值越大，说明在 600~800 片之间时丝网片数越多，制冷能力越强。回热器中丝网片数相差较多情况下(比如 600 片与 800 片)，丝网片数越多，斯特林制冷机的降温时间越短，回热器效率越高。

常温下电流随时间的变化规律如图 15 所示。电流可以反映斯特林制冷机的做功情况。从图 15 中可以看出，在降温过程中，同一时刻下的回热器丝网数量越大，对应的电流值越大。此外，在 600~800 片之间时，丝网数量越大，功耗越大。例如，在 300 s 时，600 片丝网的制冷机电流为 0.45 A，而 800 片丝网的制冷机电流为 0.49 A，说明丝网数量增加导致空隙率降低，流阻损失和压降损失增加，因此增加输入电流才能达到相同制冷温度。与图 14 中二极管电压随时间的变化规律相对应，丝网数量越多，越容易在较短时间内达到最大电流转折点。电流达到转折点的同时，相应的二极管电压同样达到峰值。制冷机控温后，电机由降温阶段的高速运行变为低速运转，电流也随之急速下降并达到稳定值。

4 结束语

本文构建了回热器数值模型，得出了回热器内部流场分布规律。此外，通过试验研究了不同空隙率和丝网填充数量对制冷机性能的影响。结果表明：

(1)当回热器空隙率为 0.61~0.78 时，尽管空隙率增加导致流量增加，但空隙率增加也降低了回热器的热交换能力，导致回热器热负荷增加，不利于降温时间的缩短。

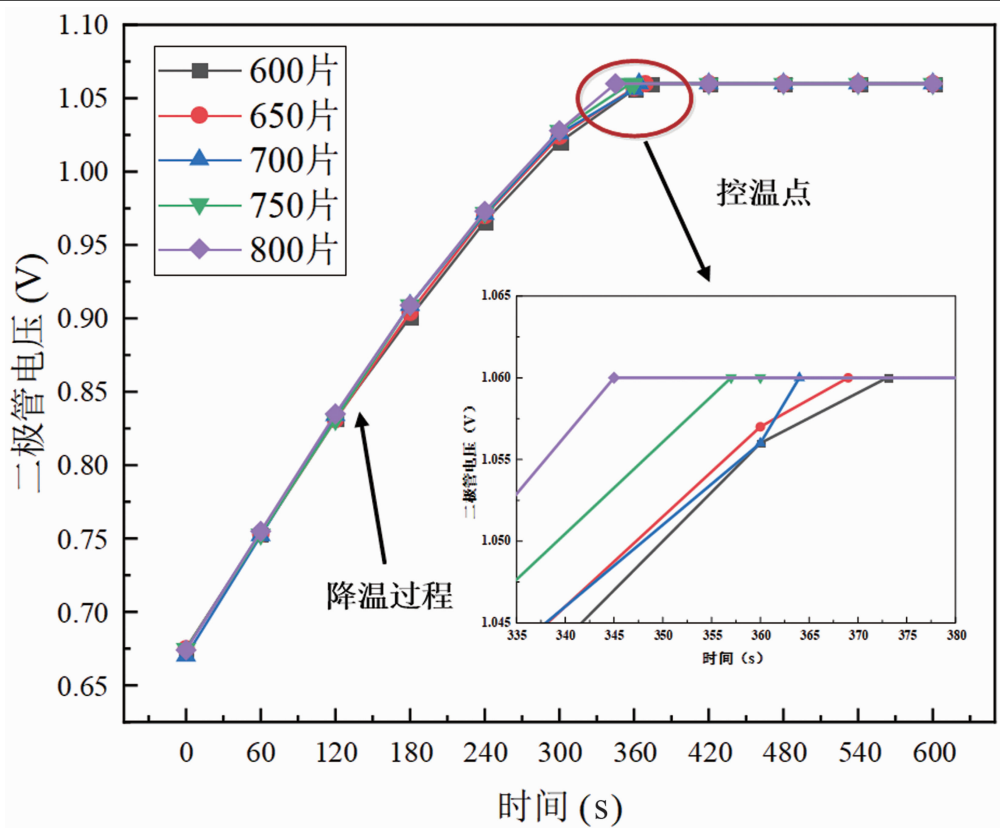


图 14 常温下二极管电压随时间的变化规律

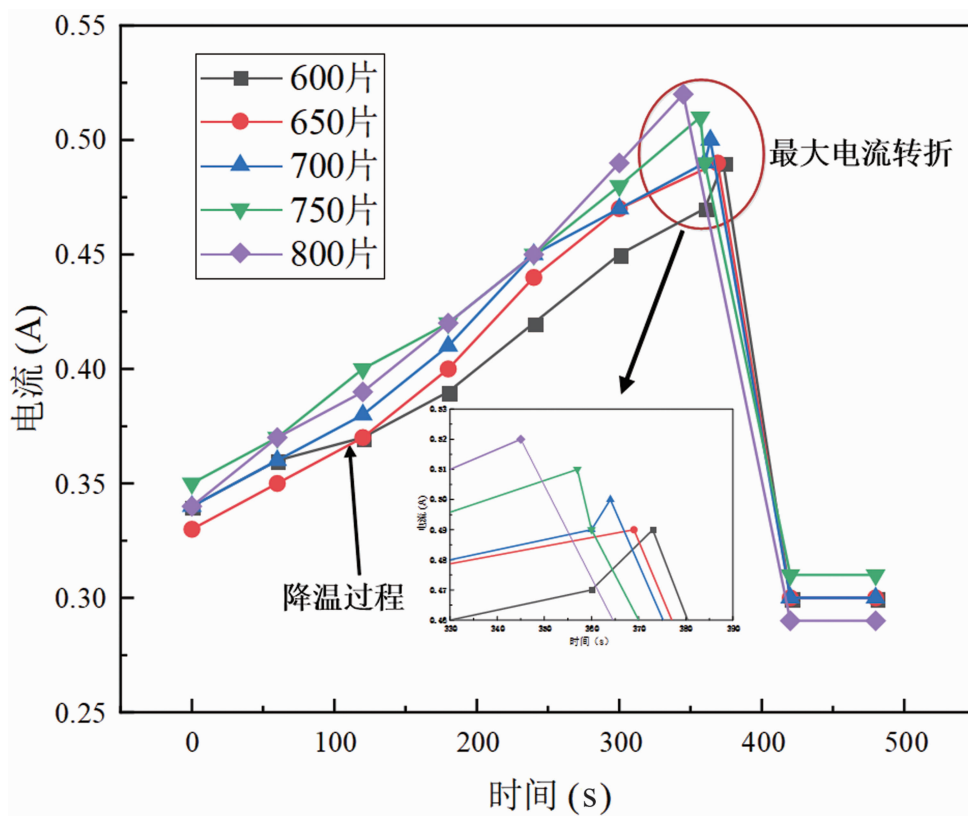


图 15 常温下电流随时间的变化规律

(2)当回热器丝网数量为 600~800 时,随着丝网填充数量的增加,制冷机降温时间缩短。

本研究在前人试验方法的基础上丰富了斯特林机回热器的数值模型,将 CFD 数值模拟与试验相结合,分析了回热器丝网参数对斯特林制冷机性能的影响。此模型和结论可用于指导回热器优化和提高制冷机效率。由于当前丝网种类繁多,未深入研究不同材料丝网对斯特林制冷机性能的影响,后续将对不同材料的丝网作进一步的探讨。

参考文献

- [1] 张文君,高瑶,郑昱鑫,等. 60 K 斯特林制冷机回热器结构优化和试验研究 [J]. **低温与超导**, 2017, **45**(10): 28-31.
- [2] 朱强龙,全加,刘彦杰,等. 多级斯特林型脉管制冷机中过渡蓄冷器试验优化 [J]. **机械工程学报**, 2022, **58**(8): 244-249.
- [3] 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.
- [4] Hachem H, Gheith R, Aloui F, et al. Optimization of an air-filled Beta type Stirling refrigerator [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, **76**: 296-312.
- [5] 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.
- [6] 刘湘德,朱志雄,迟国春,等. 红外探测器用旋转集成式斯特林制冷机失效分析 [J]. **激光与红外**, 2019, **49**(5): 559-564.
- [7] 高瑶,张文君,张永清,等. 基于 Regen 的斯特林制冷机回热器优化设计与实验研究 [J]. **低温与超导**, 2013, **41**(8): 14-18.
- [8] 王坤,鲁雪生,顾安忠. 蓄冷器丝网填料的空隙率的估算方法探讨 [J]. **低温与超导**, 2006, **34**(2): 94-96.
- [9] 刘繁茂,蒋彭,张磊,等. 新型回热器结构设计及换热特性研究 [J]. **热科学与技术**, 2018, **17**(4): 273-282.