

文章编号: 1672-8785(2021)03-0031-05

斯特林制冷机回热器的热损失理论分析及实验研究

辛光磊 任博文

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 回热器是斯特林制冷机的核心部件, 其性能优劣对斯特林制冷机的性能有决定性影响。对斯特林制冷机回热器的各项热损失(主要包括有限传热损失、流动压降损失、空容积损失等)进行了理论分析, 并通过实验研究了增加丝网数量和采取不同丝网填充方式对回热器性能的影响。结果表明, 增加丝网数量可以有效提高制冷机的性能, 采取冷端布置 400 目丝网和热端布置少量 100 目丝网的混合丝网布置方式达到的效果最好, 为斯特林制冷机的回热器性能优化提供了依据。

关键词: 斯特林制冷机; 回热器; 热损失; 丝网填料混合布置

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.03.006

Theoretical Analysis and Experimental Study of Heat Loss of Stirling Cryocooler Regenerator

XIN Guang-lei, REN Bo-wen

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

Abstract: The regenerator is the core component of the Stirling cryocooler, which has a decisive influence on the performance of the Stirling cryocooler. The heat loss of the Stirling cryocooler (including finite heat transfer loss, pressure drop loss and empty volume loss, etc.) is analyzed theoretically, and the effect of increasing the number of meshes and different filling modes on the regenerator performance is also studied experimentally. The experimental results show that increasing the number of meshes can effectively improve the performance of cryocooler, and the mixed arrangement with 400 meshes at the cold end and a small amount of 100 meshes at the hot end has the best effect, which provides a basis for the performance optimization of Stirling cryocooler.

Key words: Stirling cryocooler; regenerator; heat loss; mesh mixed arrangement

0 引言

作为红外探测器组件的重要组成部分, 斯

特林制冷机的主要作用是为红外探测器提供低温工作环境, 从而保证红外探测器的灵敏度和

收稿日期: 2020-09-24

作者简介: 辛光磊(1992-), 男, 内蒙古赤峰人, 助理工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为斯特林制冷技术。
E-mail: m15122107747@163.com

分辨率。旋转集成式斯特林制冷机具有结构紧凑、重量轻以及制冷效率高等优点,被广泛应用于机载、车载、弹用等项目的红外武器装备。

旋转集成式斯特林制冷机主要由直流无刷电机、曲轴箱、偏心轴组件、压缩活塞组件以及推移活塞组件等零部件组成(见图 1)。电机转子与偏心轴连接成一体,通过偏心轴带动压缩活塞组件和推移活塞组件进行简谐运动,使氦气实现逆向斯特林循环(包括等温压缩、定容放热、等温膨胀和定容吸热 4 个过程),从而获得冷量。工质在定容放热过程中将热量传递给回热器填料,温度降低,压力减小;工质在定容吸热过程中从回热器填料中吸热,温度升高,压力增大。回热器也称蓄冷器,是一种再生式换热器。通过回热器的换热量要比制冷机的冷量大 10~50 倍,因此回热器的性能优劣对制冷机的制冷量和制冷效率等性能有决定性影响^[1]。

旋转集成式斯特林制冷机的回热器存在多种不可逆损失,导致制冷效率下降和制冷量减少。回热器损失主要包括有限传热损失、空容积损失、流动压降损失以及轴向导热损失等。本文对回热器的主要热损失进行理论分析,同时研究各种热损失的主要影响因素,并结合实

验讨论回热器最优布置。

1 热损失理论分析

1.1 有限传热损失

在回热器中,由于工质与填料的换热面积和换热系数有限,两者之间总存在换热温差,形成了不可逆换热过程的热损失(称为有限传热损失)。回热器效率是表示回热器换热完善程度的指标。它是从逆流换热器引用过来的,只考虑传热过程不可逆所造成的损失。根据考培奇-伦登的稳流回热器理论^[2],当对比热容 $\Gamma=C_r/C \rightarrow \infty$ (实际应用上 $\Gamma > 10$) 时,回热器效率的计算公式可简化为

$$\eta_r = \frac{NTU}{NTU+1} = 1 - \frac{1}{NTU+1} \quad (1)$$

式中, NTU 为回热器的传热单元数,其计算公式可简化为

$$NTU = \frac{\alpha A_f}{2C} \quad (2)$$

式中,常数 α 为对流换热系数; A_f 为换热面积; C_r 为填料的水当量; C 为工质的水当量。

由式(1)和式(2)可知,在工质的水当量确定的情况下,可以通过增大换热面积和强化换热过程(即提高换热系数)来增加传热单元数,从而提高回热器的效率。强化换热的措施主要包括增加工质流速、改变工质物性(如提高工

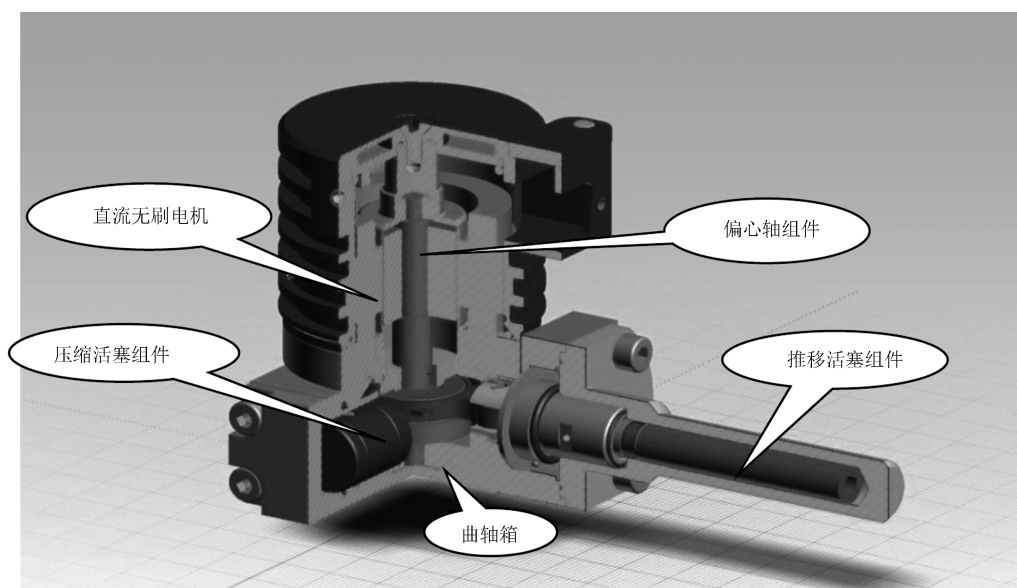


图 1 旋转式斯特林制冷机的基本结构

质的导热系数和体积比热容^[3])。在斯特林制冷机内部, 通过压差推动工质(高纯度氦气)在回热器中往复流动。因此, 通过增加工质流速、改变工质物性来强化斯特林制冷机中氦气与回热器工质的换热是不可取的。对于有限传热损失来说, 增大换热面积是提高回热器传热效率的主要方法。

1.2 空容积损失

在斯特林制冷机中, 由于空容积(包括回热器空容积、气缸间隙、死角等)的存在, 压比下降, 冷量减小。这项冷量损失称为空容积损失。根据斯特林循环热力计算的施密特等温模型, 冷腔的制冷量为

$$Q_{av} = \frac{\pi n}{60} P_{av} V_0 \frac{\delta \sin \theta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} \quad (3)$$

式中, n 为转速; P_{av} 为平均压力; V_0 为冷腔最大容积; θ 为最小压力相角; δ 为压力参数。

压力参数 δ 的计算公式为

$$\delta = \frac{\sqrt{\tau^2 + \omega^2 + 2\tau\omega \cos \phi}}{\tau + \omega + 2s} \quad (4)$$

式中, τ 为室温腔温度与冷腔温度之比; ω 为室温腔最大容积与冷腔最大容积之比; ϕ 为冷腔超前于室温腔的相位角; s 为相对死容积, 即死容积与冷腔最大容积之比。

平均压力 P_{av} 的计算公式为

$$P_{av} = P_{\min} \sqrt{\frac{1+\delta}{1-\delta}} \quad (5)$$

压比为

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{1+\delta}{1-\delta} \quad (6)$$

可以看出, 空容积越大, 压力参数越小, 压比和平均压力越小, 制冷量也随之减小。回热器的空容积是斯特林制冷机空容积的主要组成部分。例如, 采用丝网状填料时, 大量丝网之间存在间隙, 其空隙度 $\psi > 0.6$ 。回热器空容积通常是冷腔容积的 3~10 倍, 因而对冷量的影响很大。所以在回热器的设计中, 应尽可能减小填料的空隙度, 提高丝网填充率, 从而减少死容积。

1.3 流动压降损失

工质在通过回热器时会受到填料的阻力作用, 导致冷端工质的压力小于热端。工质压降导致冷腔膨胀功(冷量)减小。流阻损失为

$$\Delta Q_f = \oint \Delta p dV_{av} \quad (7)$$

式中, Δp 为气体通过回热器的流阻压降, V_{av} 为冷腔容积。

若忽略进出口局部阻力的影响, 则气体通过回热器的流阻压降的计算公式为

$$\Delta p = 4f \frac{l}{D_h} \frac{q_s^2}{2\rho_{av}} \quad (8)$$

式中, f 为阻力系数; l 为回热器长度; D_h 为当量直径; q_s 为质量流率; ρ_{av} 为气流平均密度。

由式(7)和式(8)可知, 在其他参数确定的情况下, 通过降低丝网填料的阻力系数和减小回热器的长度, 可以降低回热器热量的流动压降损失。

1.4 轴向导热损失

回热器长度一般较短。工质通过回热器后, 其温度由 T_h 降低为 T_c 。因此, 回热器的温度梯度很大, 由此产生的轴向导热损失不可忽略。回热器的轴向导热损失可由式(9)算出^[4]:

$$\Delta Q_f = \frac{A}{l} \int_{T_c}^{T_h} \lambda(T) dT \quad (9)$$

式中, A 为填料的横截面积; l 为回热器长度; $\lambda(T)$ 为填料的导热系数。填料的导热系数与填料材料、平直程度及填充率有关, 并且还是温度的函数。

综上所述, 要减小回热器的有限传热损失和空容积损失, 通常需增大换热面积, 即提高填料的填充率。而这样无疑会增加流动阻力损失和轴向导热损失。因此, 在设计回热器填料布置方式时, 必须综合考虑各种热损失来实现优化。

2 回热器丝网数量和布置方式实验研究

为了研究回热器填料布置方式对回热器

性能的影响,夏明等人^[5]使用 CFD 软件对回热器进行了仿真分析,得到了一个周期中回热器内氦气和填料的温度情况以及某一时刻回热器的压力分布。结果表明,回热器的压力损失主要发生在热端。因此,在热端采用空隙率高的填料,可以减少压力损失。罗高乔等人^[6]使用 REGEN 软件对回热器混合丝网模型进行了仿真分析。仿真结果表明,当回热器采用单一目数的丝网填充时,400 目的回热器 COP 明显优于 300 目和 500 目。这是因为 400 目丝网的换热性能是综合考虑比表面积和压力损失的最优解。对于混合丝网来说,随着高目数丝网填充比例的增加,回热器的平均压降呈逐渐上升趋势,回热损失呈逐渐下降趋势。当压降损失和回热损失达到平衡时,回热器的 COP 最佳。此时回热器丝网填充方式是从热端到冷端依次为 300 目、400 目和 500 目,并分别填充 40%、30%和 30%。

图 2 所示为华北光电技术研究所目前生产的旋转式斯特林制冷机中的回热器部件结构。在回热器内部填满约 700 片 400 目数的不锈钢丝网,再在热端填 1 片 100 目不锈钢丝网。然后用胶将热端堵头粘在回热器内,使其与端面齐平。工质氦气通过热端堵头的气体通道在回热器内往复流动,并与回热器内的丝网填料进行换热。现有热端堵头结构(见图 3)的总长度为 6 mm。

通过前面的理论分析可知,要减小回热器的有限传热损失和空容积热损失,通常需增大换热面积,即提高填料的填充率和增加丝网填料的填充数目。而这样会增加流动阻力损失和轴向导热损失。为了综合考虑各种热损失、优化设计并研究回热器丝网填充的最佳效果,通

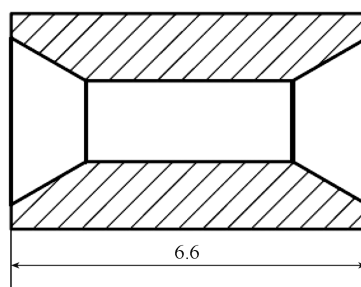


图 3 热端堵头的结构示意图

过实验分析了丝网填充数量和丝网填充方式对制冷机效率的影响。具体实验方法如下:在现有工艺的基础上,通过改变热端堵头的长短、增加不锈钢丝网的数量和改变不同目数丝网的比例,得到不同情况下制冷机的稳态效率。其中,回热器热端堵头长度和丝网填充方式如表 1 所示。

将制冷机与测试杜瓦耦合,并在常温下对制冷机进行测试。将测试杜瓦从常温 296 K 降温到 77 K,测得制冷机的稳态电流。表 2 列出了求得的制冷机的稳态功率和效率(杜瓦热耗均为 100 mW,即制冷量为 100 mW)。

由表 2 可知,与采用原有工艺的 1#、2# 制冷机相比,3#、4#、5# 和 6# 制冷机通过减小热端堵头的长度和增加不锈钢丝网的数量,提高了回热器和制冷机的效率。400 目丝网的换热面积大,流动阻力也大。100 目丝网的换热面积相对较小,流动阻力也小。对于 3#、4#、5# 和 6# 制冷机,3# 与 4# 制冷机的回热器只增加了 80 片 400 目丝网,换热面积以及热端的压力损失最大,制冷机效率仅提高了 0.18%;5# 制冷机的回热器只增加了 20 片 100 目丝网,换热面积以及热端的压力损失最小,制冷机效率提高了 0.49%。

实验中 6# 制冷机回热器的丝网填料布置

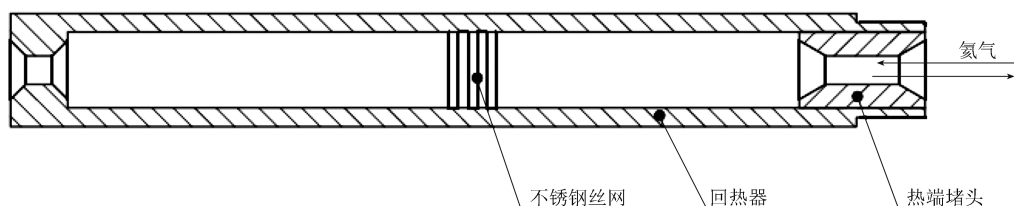


图 2 回热器部件的结构示意图

表 1 回热器热端堵头长度和丝网填充方式

序号	热端堵头长度/mm	400 目丝网数目	100 目丝网数目	填充方式
1#	6.0	700	1	现有工艺
2#	6.0	700	1	现有工艺
3#	2.0	780	1	只增加 400 目丝网
4#	2.0	780	1	只增加 400 目丝网
5#	4.0	700	20	只增加 100 目丝网
6#	4.0	740	10	100 目丝网和 400 目丝网均增加

表 2 制冷机的稳态电流和效率

序号	稳态电流/A	稳态功率/W	效率
1#	0.40	3.6	2.78%
2#	0.40	3.6	2.78%
3#	0.37	3.33	3.00%
4#	0.38	3.42	2.92%
5#	0.34	3.06	3.27%
6#	0.30	2.7	3.70%

方式最佳,即增加 40 片 400 目丝网和 10 片 100 目丝网。这种布置方式一方面通过在冷端增加 40 片 400 目丝网,较大程度地增大了丝网数量和换热面积;另一方面,通过在热端增加 10 片 100 目丝网,减小了热端的压力损失。因此,这种方式下的回热器和制冷机效率最高(效率提高了 0.92%)。由此可见,减少热端堵头长度的工艺改进,应重点考虑热端的压力损失。采取冷端布置 400 目丝网和热端布置少量 100 目丝网的混合丝网布置方式达到的效果最好。

3 结论

对斯特林制冷机的回热器各项热损失(主要包括有限传热损失、流动压降损失以及空容积损失等)和主要影响因素进行了理论分析,并通过实验研究了增加丝网数量和采取不同丝网填充方式对制冷机效率的影响。结果表明,减小热端堵头长度和增加丝网数量可以有效提高制冷机效率。在减小热端堵头长度的改进工艺的基础上,应重点考虑热端的压力损失。采取冷端布置 400 目丝网和热端布置少量 100 目

丝网的混合丝网布置方式达到的效果最好。在此基础上,下一步将重点研究采用短堵头工艺时可实现最高制冷机效率的回热器混合丝网最佳布置方式。

参考文献

- [1] 席有民. 微型整体式斯特林制冷机研制及整机工程化模型研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [2] 边绍雄. 低温制冷机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [3] 章熙民. 传热学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [4] 谢英柏, 徐周璇, 论立勇. 小型斯特林制冷机回热器热损分析 [J]. 低温工程, 2008, 15(3): 8-11.
- [5] 夏明, 赵杰, 陈晓屏. 斯特林制冷机推移活塞蓄冷器模型计算仿真 [C]. 昆明: 全国低温与制冷工程大会, 2005.
- [6] 罗高乔, 叶重, 绳春晨, 等. 斯特林制冷机混合填料回热器性能优化及试验研究 [J]. 低温工程, 2017, 24(5): 42-48.