

微型气动斯特林制冷机随机丝绒孔隙率的特性研究

黄泽华^{1,2}, 李 瑛¹, 蒋珍华², 朱海峰³, 陈 雷², 刘少帅², 吴亦农²

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海

³南通智能感知研究院, 江苏 南通

Email: 740480934@qq.com

收稿日期: 2021年3月9日; 录用日期: 2021年5月5日; 发布日期: 2021年5月12日

摘 要

本文基于一台百赫兹气动斯特林制冷机, 引入了一种随机烧结丝绒填料。通过REGEN与一维设计软件对回热器填料进行参数模拟, 研究随机烧结丝绒的孔隙率对回热器内回热损失和流阻损失的影响, 同时搭建实验台对不同填料参数的蓄冷器进行实验研究, 验证本文对随机丝绒在不同温区的特性分析。实验表明, 高温区随机烧结丝绒回热器具有较高的制冷效率, 在制冷温度为180 K, 输入功7.8 W时可以提供1.5 W制冷量, 而在低温区, 由于回热能力的不足, 使得随机烧结丝绒型斯特林制冷机性能有明显的衰减, 通过使用低孔隙率的随机丝绒可以增强在低温区的回热能力。

关键词

斯特林制冷机, 随机烧结丝绒, 孔隙率, 实验研究

Study on the Porosity Characteristics of Randomly Sintered Screen in a Miniature Pneumatic Stirling Refrigerator

Zehua Huang^{1,2}, Ying Li¹, Zhenhua Jiang², Haifeng Zhu³, Lei Chen², Shaoshuai Liu², Yinong Wu²

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

³Nantong Academy of Intelligent Sensing, Nantong Jiangsu

Email: 740480934@qq.com

Received: Mar. 9th, 2021; accepted: May 5th, 2021; published: May 12th, 2021

文章引用: 黄泽华, 李瑛, 蒋珍华, 朱海峰, 陈雷, 刘少帅, 吴亦农. 微型气动斯特林制冷机随机丝绒孔隙率的特性研究[J]. 建模与仿真, 2021, 10(2): 319-328. DOI: 10.12677/mos.2021.102033

Abstract

This paper is based on a 100 Hz pneumatic Stirling cryocooler, a new type of randomly sintered screen packing was introduced. By using REGEN and one-dimensional software to simulate the parameters of the regenerator packing, studying the influence of the porosity of randomly sintered screen on the regenerative loss and pressure drop loss, and building an experimental bench to carry out experimental research on the regenerator with different packing to verify the characteristics of randomly screen in different temperature. Experimental results show that the cooling efficiency of the randomly sintered screen regenerator is high in the high temperature area, and it can provide 1.5 W cooling power at 180 K while the input PV work is 7.8 W, in the low temperature area, the performance of the randomly sintered screen Stirling refrigerator has a significant attenuation due to the lack of regenerative capacity, the regenerative capacity in the low temperature area can be enhanced by using randomly sintered screen with low porosity.

Keywords

Stirling Cryocooler, Randomly Sintered Screen, Porosity, Experimental Study

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着红外探测技术和高温超导材料的发展,低温技术在超导、医疗、航天等领域的应用越来越广泛,使得低温制冷机拥有了广阔的应用前景。斯特林制冷机目前广泛应用于红外系统中,低温环境对于降低热噪声并提高探测器的信噪比,灵敏度和分辨率至关重要[1]。近些年,得益于高工作温度红外探测器件技术研究取得的重要突破,短波探测器工作温度提升至 150~200 K,中波探测器工作温度提升至 110~130 K [2],对制冷机的制冷需求降低,使得气动斯特林制冷机的微型化成为可能。国外诸如美国的 Cobham [3]公司、德国的 AIM [4]公司、法国的 Thales [5]公司、以色列的 Ricor [6]等公司都对微型线性斯特林制冷机展开了研究。国内的微型斯特林制冷机发展起步较晚,在制冷机性能指标上与国外公司相比还有一定差距,对于斯特林制冷机的理论与实验研究有待进一步发展。

作为回热式低温制冷机的关键部件之一,蓄冷器回热效率的高低直接决定了制冷机制冷性能的优劣。传统微型斯特林制冷机的回热器基本使用编织丝网作为填料,填充过程比较繁琐,生产成本较高,不利于制冷机的批量规模化量产。与编织丝网相比,随机烧结丝绒丝径与孔隙率可单独连续性调节,可以定制满足蓄冷器回热所需的最佳填料参数,由于不需要精密的编织,生产成本得以大幅降低。

出于性能与制造工艺的考虑,国内对随机烧结丝绒型回热器的研究还较为少见。在国外,一些斯特林制冷机的研究单位对随机丝网型回热器进行过相关探索。Sangkwon Jeong [7]等使用了一种由耐高温非金属材料填充的随机丝网回热器,通过对蓄冷器两端的压力、质量流量和气体温度的动态测量,测量了蓄冷器的摩擦系数及损失,并提出一种振荡流模型来计算回热器内的压降。在回热器的研究方面,张文君[8]等对 60 K 斯特林制冷机的回热器填料和冷端换热器进行模拟和实验分析,讨论了填料孔隙率和目数变化下的回热器效率,以及回热器冷端换热器空体积和局部损失对制冷机整机性能的影响。刘冬毓[9]等

分析了回热器丝网目数对空隙率、比传热面积和当量直径的影响, 通过计算分析回热器中的回热损失和流阻损失, 以达到丝网的优化选型。本文基于一台微型气动斯特林制冷机进行一维建模, 对斯特林制冷机关键部位蓄冷器及相关参数进行数值模拟, 结合实验研究随机烧结丝绒在不同孔隙率下的回热器损失特性, 探究不同温区下高频制冷的回热器填料参数对制冷性能的影响。

2. 回热器理论分析

为了描述氦气工质在回热器内的阻力特性和回热特性, 引入两个无量纲数瓦伦西数(Valensi)数和贝克利数(Pe_ω), 其相关表达式如下:

$$Va = 2 \left(\frac{d_h}{\delta_v} \right)^2 \quad (1)$$

式中, d_h 为丝网的水力直径, 而粘性渗透深度 δ_v 的表达式为:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (2)$$

其中 ν 为流体的运动粘度, ω 为交变流动的周期, 从上述公式可以看出瓦伦西数(Va)与水力直径和粘性渗透深度比值的平方成正比, 丝网的丝径与孔隙率决定其水力直径, 而粘性渗透深度则受交变流动的频率与工质特性的影响, 当瓦伦西数(Va)较大时, 表明相对于粘性扩散的时间, 交变流动周期很短, 流体的流速大于流体粘性的扩散速度。而在瓦伦西数(Va)较小时, 交变流动周期相比较长, 流体工质受阻力的影响更加明显[10]。相似的还有贝克利数(Pe_ω):

$$Pe_\omega = 2 \left(\frac{d_h}{\delta_k} \right)^2 \quad (3)$$

其中, 热扩散率 δ_k 的表达式为:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (4)$$

式中 a 为热扩散系数, ω 为交变流动的周期, 可以看出贝克利数(Pe_ω)与水力直径和热扩散深度比值的平方成正比, 而热扩散系数的平方则与流体交变流动的周期成反比。同理, 贝克利数(Pe_ω)也反映了交变流振荡频率与热扩散时间的相对大小。

在设计回热器填料的参数时, 应使工质的热渗透大于丝网的水力直径, 以保证气体工质与填料的换热, 同时又要要求工质粘性渗透深度小于丝网的水力直径, 以减少压降损失[11]。

3. 模拟分析

本文采用的微型气动斯特林制冷机, 结构为气动分置式, 其结构示意简图如图 1 所示, 膨胀机与压缩机各自独立, 通过连管相连。压缩机采用动磁式对置活塞布置, 膨胀机蓄冷器活塞由阶梯轴杆支撑柱, 调节柱弹簧的工作长度来控制系统的刚度, 排出器活塞的行程和相位, 达到较优的制冷性能[12]。

3.1. 不同温区下孔隙率对回热器损失的影响

制冷机主要包括了流阻损失、不完全换热损失和导热损失, 本文主要讨论回热器内部的损失影响。模拟填充的随机烧结丝绒材料为不锈钢, 回热器损失基于 NIST [13]开发的数值模拟软件 Regen3.3 进行仿真计算, 回热器结构参数保持固定, 其中回热器长度为 40 mm, 热端温度设置在 300 K, 冷端温度分别设置为 110 K 和 180 K, 充气压力 3.5 MPa, 压比为 1.2, 频率 120 Hz, 冷端相位角为 -30° , 对不同随机

丝绒孔隙率下的回热器损失进行对比分析。图 2 为 110 K 温区下回热器不同孔隙率的回热损失和流阻损失占总损失的比值，从图中可以看出，回热损失随孔隙率的增加逐渐增大，压降损失则随孔隙率增加而减小，在低温区回热损失占较大比重。而高温区下的回热器损失占比如图 3 所示，与低温区相比流阻损失占比增大，同时回热损失的占比有所降低。

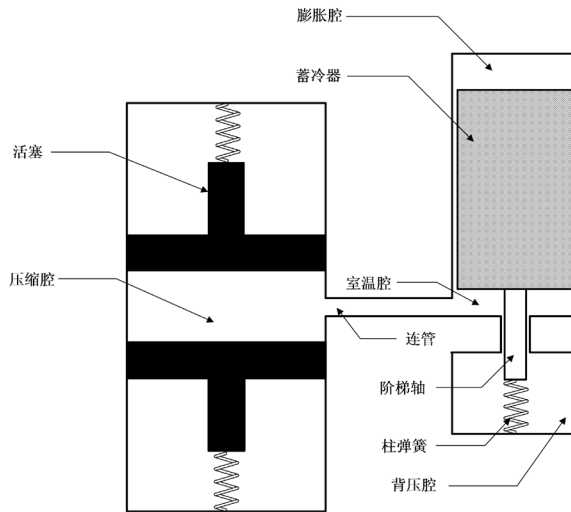


Figure 1. Schematic diagram of cryocooler
图 1. 制冷机原理简图

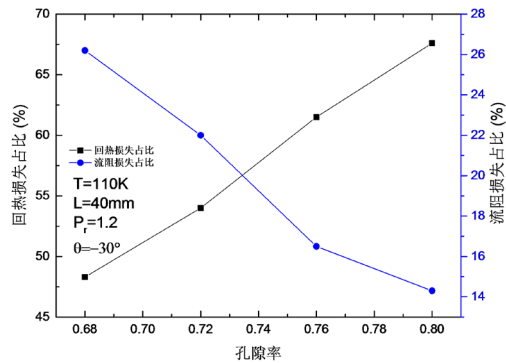


Figure 2. Regenerative loss and pressure drop loss of 110 K with different porosity
图 2. 110 K 不同孔隙率下的回热损失和流阻损失

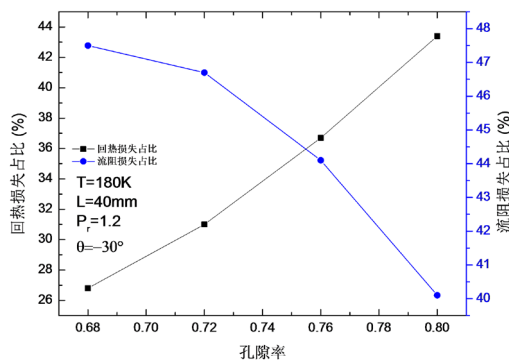


Figure 3. Regenerative loss and pressure drop loss of 180 K with different porosity
图 3. 180 K 不同孔隙率下的回热损失和流阻损失

3.2. 随机丝绒孔隙率对制冷机冷端压比的影响

制冷机整机是基于中国科学院上海技术物理研究所的热动联合仿真平台进行设计、制造和测试，其基本结构与运行参数如表 1 所示。

Table 1. The basic structural parameters of the cryocooler

表 1. 制冷机基本结构参数

部件	几何结构	数值
回热器	直径/mm	5.5
	长度/mm	40
柱弹簧	刚度/(N/m)	1500
阶梯轴杆	直径/mm	4.2
排出器	动子质量/g	8.1
压缩活塞	直径/mm	6.5
压缩机	冲压/MPa	3.5
	频率/Hz	120

在斯特林制冷机的运行过程中，由于气体与内部结构的摩擦，凡是气体流过的地方都存在流阻损失，而回热器的流阻损失较大的比重。由于压降损失的影响，流体经过回热器会导致压力降低，使得膨胀腔的压比小于压缩腔，冷头的制冷量下降。

不同孔隙率下随机烧结丝绒影响其回热器内的空容积，通过一维设计软件模拟分析其对膨胀机冷端压比的影响。在压缩机结构不变的情况下，固定压缩活塞行程，即压缩机的扫气容积相同，制冷机冷端压比受孔隙率的影响如图 4 所示，当回热器填料的孔隙率增大时，回热器内的空容积增大，压比减小。在最佳的丝径范围内，选择孔隙率较低的随机烧结丝绒，能够提高压比，增大蓄冷器两端压差，提高制冷机的冷量。

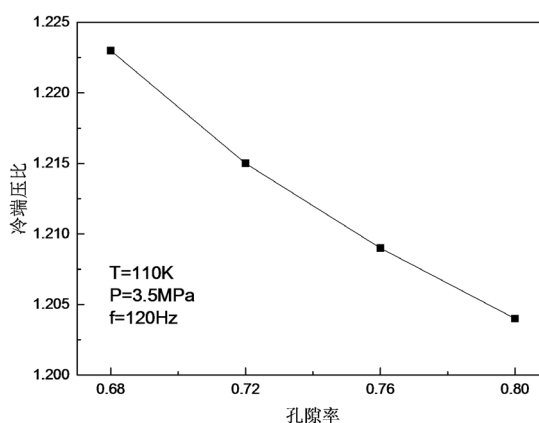


Figure 4. Cold end pressure ratio of cryocooler with different porosity

图 4. 不同孔隙率下的制冷机冷端压比

3.3. 不同温区下孔隙率对制冷性能的影响

氦气作为斯特林制冷机的工质气体，其粘性渗透深度和热渗透深度都随着温度变化，因此在制冷温区改变时回热器内的不完全换热损失和流阻损失都受填料水力直径的影响。从图 5 的模拟结果可以看出，

使用相同丝径的随机烧结丝绒，在同输入功的情况下，制冷机冷头的冷量随着制冷温区升高逐渐增大。不同孔隙率的随机丝绒在各温区的性能存在差别，在低温区低孔隙率的随机丝绒回热器冷量更高，而在高温区，高孔隙率的随机丝绒回热器有更大的冷量。这是因为相同丝径下，低孔隙率下的随机丝绒水力直径较小，有利于低温下的换热，而高孔隙率的随机丝绒流阻损失较小，因此提高了蓄冷器两端压差，从而增大推移活塞位移幅值。

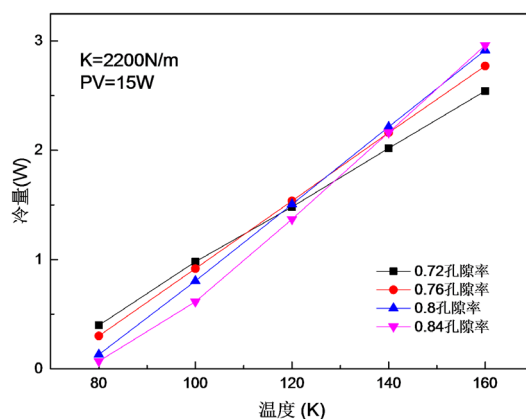


Figure 5. The cooling power at varied porosity in same temperature
图 5. 不同孔隙率下相同温区的冷量

4. 实验研究

回热器的回热能力与流阻特性与丝网密切相关，最常见的类型有金属丝网式回热器，其丝网由平纹或者斜纹编织而成。而随机丝式回热器在国内较为少见，填料采用无规则结构[14]，随机烧结丝绒的实物图及右侧放大图像如图 6 所示。

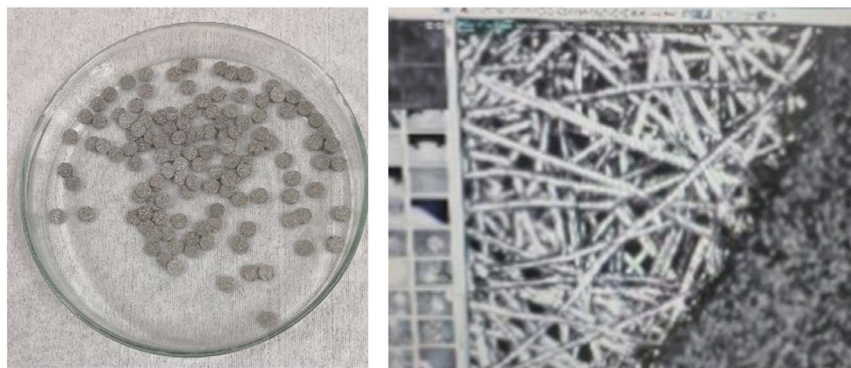


Figure 6. Picture of randomly sintered screen
图 6. 随机烧结丝绒图片

基于已有设计样机，搭建微型斯特林制冷机实验测试平台，通过调整结构参数和运行参数，对制冷温度、制冷量和电机效率等参数进行测量，对比分析回热器填料的孔隙率对制冷性能的影响。

4.1. 随机丝绒回热器在不同温区的性能研究

为了探究制冷机不同填料下在各个温区的工作特性，测试了斯特林制冷机在三个温区的制冷性能。如图 7 所示，随着制冷量增大，输入功基本呈线性增加的趋势，随机丝网填料在中高温区的性能较优，

而在 110 K 温区，填充随机烧结丝绒的蓄冷器性能有比较明显的衰减。填随机烧结丝绒回热器的制冷机性能测试如图 8 所示，在 20 W 定输入功下，冷头无负载最低温为 93.8 K，在 138 K 可以获得 1.5 W 的冷量，此时的比卡诺效率为 9.8%。

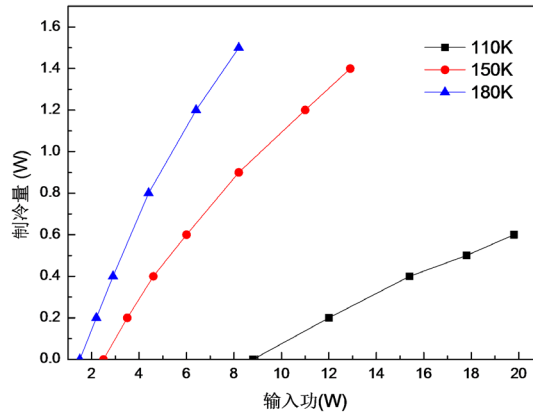


Figure 7. The input power at varied cooling power in different temperature
图 7. 各温区下不同冷量所需的输入功

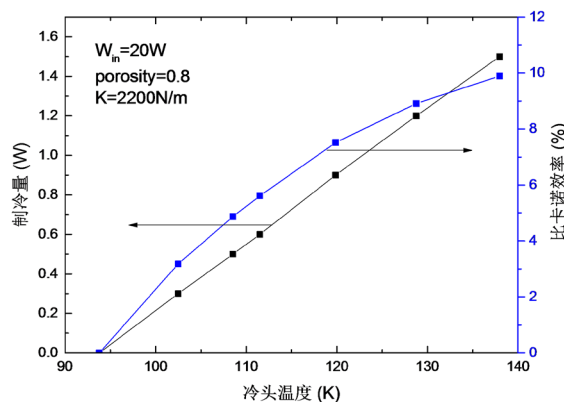


Figure 8. Performance test data with 20 W input power
图 8. 20 W 输入功下的制冷性能

4.2. 不同回热器填料参数的实验研究

在蓄冷器内，丝网的丝径与工质在流道内的换热和流阻有着紧密的联系，低温下选用水力直径较小的丝网可以获得更好的换热效果[15]。根据定义，流经回热器的有效截面积和湿周之比为水力半径，而当量直径定义为四倍的水力半径。假设回热器的横截面积为 S_r ，金属丝绒的横截面积为：

$$S_h = \frac{\pi D_w^2}{4} \quad (5)$$

D_w 为金属丝的丝径，则当量直径表达式为：

$$D_h = 4 \frac{\varphi S_r}{(1-\varphi) S_r \pi D_w} = \frac{\varphi}{(1-\varphi)} D_w \quad (6)$$

式中： D_h 为当量直径， φ 是回热器内部填料的孔隙率。实验使用的两组丝网参数如表 2 所示。

Table 2. Parameters of randomly sintered screen
表 2. 随机烧结丝绒参数

类型	丝径/ μm	水力直径/ μm	孔隙率
随机烧结丝绒	22	88	0.8
随机烧结丝绒	22	56.6	0.72

实验比较了两种不同水力直径的丝网，如图 9 所示，在 20 W 的输入功下，两种不同孔隙率的丝网冷头温度随冷量的变化。相比 0.8 的孔隙率，填充孔隙率为 0.72 的蓄冷器两端的压差更大，因此位移幅值增大，而制冷量与位移幅值成正比，故在冷头无负载的情况下，0.72 孔隙率的蓄冷器冷头温度更低。

在低温区时，两种孔隙率的随机丝绒性能差异较大，从图 10 可以看出，0.72 孔隙率的随机丝绒性能明显更优。而从图 11 可知高温区两种孔隙率的随机丝绒性能较为接近，0.8 孔隙率的随机丝绒性能较优。这是因为在 110 K 低温区时，氦气的粘性渗透深度和热渗透深度都降低，此时蓄冷器内流体的阻力减小，有利于工质的往复流动。但在低温时贝克利数 (Pe_0) 较大，说明此时蓄冷器内部的回热能力降低，造成回热损失增加，而 0.72 孔隙率的丝网水力直径更小，有助于增强低温段流体工质与蓄冷器丝网之间的换热，因而冷量更高。相反，在 180 K 高温区，由于工质的热渗透深度升高，蓄冷器的回热能力有所增强，而此时瓦伦西数 (Va) 变小，增大了蓄冷器的流阻损失，填充 0.8 孔隙率的丝网水力直径更大，相较于 0.72 孔隙率瓦伦西数 (Va) 更大，减小了流体流动的阻力，故高温区时冷量更高。

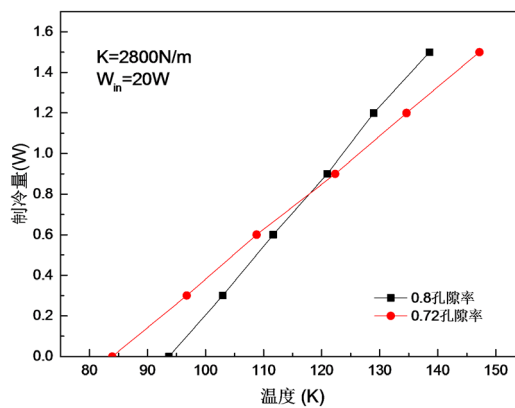


Figure 9. The temperature at varied cooling power among two kinds of screen with the same input power
图 9. 相同输入功下，两种孔隙率丝网制冷温度随冷量变化

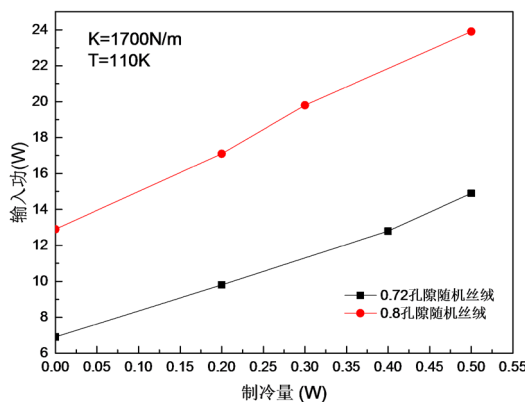


Figure 10. Electric power required for different cooling power at 110 K
图 10. 110 K 温区不同冷量所需电功

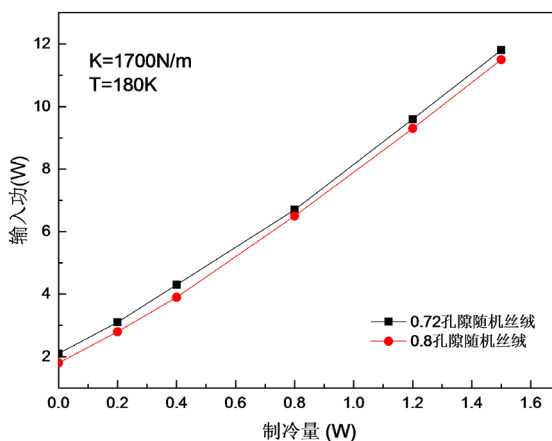


Figure 11. Electric power required for different cooling power at 180 K

图 11. 180 K 温区不同冷量所需电功

4.3. 实验与模拟的对比

经实验验证, 填充 0.8 孔隙率随机烧结丝绒的斯特林制冷机在高温区具有较优的制冷效率。经过初步优化, 制冷机运行在 180 K 温区, 在充压 3.5 MPa, 运行频率 120Hz 的工况下, 输入 7.8 W 的电功可以获得 1.5 W 的冷量。制冷机性能曲线如图 12 所示, 实验结果与模拟数据具有较高的吻合度, 但理论冷量与整机效率都略高于实验值。误差原因可能是仿真模型中空体积计算与实际模型有一定差别; 还有在模拟计算中未考虑实际运行压缩机电机产生的焦耳热和磁滞损失等, 因而使理论值与实验值有一定的差距。

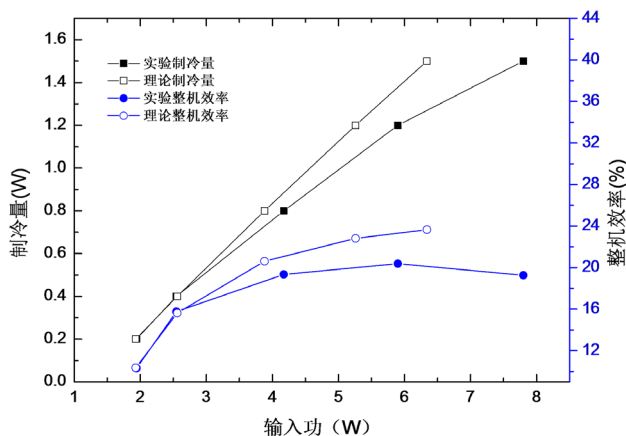


Figure 12. Comparison of simulated and experimental values

图 12. 模拟值与实验值的对比

5. 结论

本文开展了微型气动斯特林制冷机回热器填料的研究, 通过模拟和实验相结合的方法, 对比研究了随机烧结丝绒填料在两种孔隙率不同温区下的制冷机制冷性能。经过实验的验证, 模拟结果与实验数据较为吻合, 应用了随机丝绒回热器的斯特林制冷机, 在充气压力为 3.5 MPa, 运行频率在 120 Hz, 压缩机电机输入功为 7.8 W 的情况下, 可以输出 1.5 W@180 K 的冷量。而在低温区, 由于回热能力的不足, 随机烧结丝绒型斯特林制冷机的性能有明显的衰减。通过采用低孔隙率的随机烧结丝绒, 减小水力直径,

可以增强填料的回热能力，以适应更低温度下的制冷需求。实验结果表明，新型随机烧结丝绒在填充效率，控制成本方面具有不小的优势，对高温区有制冷需求的项目具有可观的应用潜力。

基金项目

上海市自然科学基金(18ZR1445600)。

参考文献

- [1] Rogalski, A. (2011) Recent Progress in Infrared Detector Technologies. *Infrared Physics & Technology*, **54**, 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.12.003>
- [2] 邓功荣, 赵鹏, 袁俊, 等. 铽基高工作温度红外探测器研究进展[J]. 红外技术, 2017, 39(9): 780-784.
- [3] <http://www.cobham.com>
- [4] <http://www.aim-ir.com>
- [5] <http://www.thales-cryogenics.com>
- [6] <http://www.ricor.com>
- [7] Jeong, S., Nam, K. and Choi, S. (2004) Study of Random Wire Type Regenerators for Stirling Cryocoolers. *AIP Conference Proceedings*, **710**, 1154. <https://doi.org/10.1063/1.1774801>
- [8] 张文君, 高瑶, 郑昱鑫, 等. 60K 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(10): 28-31.
- [9] 刘冬毓, 吴亦农, 王维扬. 2 W@80 K 星载斯特林制冷机丝网的优化选型设计[J]. 低温工程, 2006(4): 19-23.
- [10] 罗兰, 陈曦, 夏宇栋. 基于 Regen3.3 的 45K 斯特林制冷机分层结构回热器的优化[J]. 真空与低温, 2015, 21(4): 227-230.
- [11] Meijers, M., Benschop, A. and Mullie, J.C. (2001) High-Reliability Coolers under Development at Signaal-USFA. In: Ross, R.G., Ed., *Cryocoolers 11*, Plenum Publishers, New York, 1-118. https://doi.org/10.1007/0-306-47112-4_14
- [12] 陈永生. 新型空间斯特林制冷机气动膨胀机研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海技术物理研究所, 2003.
- [13] Gary, J. and Radebaugh, R. (1991) An Improved Model for the Calculation of Regenerator Performance (REGEN3.1). *4th Interagency Meeting on Cryocoolers*, Plymouth, October 1991, David Taylor Research Center Technical Report DTRC-91, 165-176.
- [14] 陈曦, 郭永飞, 张华, 等. 回热式低温制冷机用回热器结构研究综述[J]. 制冷学报, 2011, 32(3): 6-14, 28.
- [15] 黄小兰, 蒋珍华, 陈曦, 等. 斯特林制冷机分层回热器优化设计与实验[J]. 低温工程, 2014(2): 14-18.