

文章编号: 1672-8785(2017)09-0033-06

直线型脉管制冷机的回热器压降研究

张 晨^{1,2} 蒋珍华¹ 张安阔¹ 邓伟峰¹ 杨 森^{1,2} 吴亦农¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 设计了直线型脉管制冷机的低温回热器, 搭建了该回热器的低温在机交变流动压降实验平台, 开展了压降和冷端压比变化规律实验研究, 比较了输入功、频率、制冷温度和充气压力对回热器压降的影响。结果表明, 脉管制冷机的运行频率越小, 制冷温度越低, 回热器的压降越大; 充气压力为 3.0 MPa 时的回热器压降大于 3.2 MPa 时; 回热器的冷端压比越大, 比卡诺效率越高; 通过增加回热器的冷端压比可提高脉管制冷机的效率。

关键词: 回热器; 压降; 冷端压比; 实验研究

中图分类号: TB6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.09.006

Study on Pressure Drop of an In-line Pulse Tube Cryocooler Regenerator

ZHANG Chen^{1,2}, JIANG Zhen-hua¹, ZHANG An-kuo¹, DENG Wei-feng¹, YANG Sen^{1,2}, WU Yi-nong¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An in-line pulse tube cryocooler regenerator is designed. An experimental platform for in-line low temperature oscillatory flow pressure drop is established for the regenerator. Experimental study is carried out for the pressure drop and the change rule of pressure ratio at the cold end. The influences of input power, frequency, cooling temperature and initial pressure on the pressure drop of the regenerator are analyzed. The results show that the lower the operating frequency of the cryocooler is, the lower the cooling temperature is and the greater the pressure drop of the regenerator is. The pressure drop under the initial pressure of 3.0 MPa is greater than that under the initial pressure of 3.2 MPa. The higher the pressure ratio at the cold end is, the higher the relative Carnot efficiency is. By increasing the pressure ratio at the cold end of the regenerator, the efficiency of the pulse cryocooler can be improved.

Key words: regenerator; pressure drop; pressure ratio at cold end; experimental study

0 引言

空间探测包括对地探测和深空探测。工作在低温环境下的光子探测器是对地探测的主要有效载荷, 其中多数中/长波红外探测器所需的

工作温度在 30 ~ 100 K 之间^[1]。作为一种小型低温制冷机, 脉管制冷机可提供该温区的制冷效果, 而且由于具有低温端无运动部件、结构简单、振动小、可靠性高以及寿命长等优点, 目前

收稿日期: 2017-04-07

作者简介: 张晨 (1989-), 男, 浙江金华人, 博士研究生, 主要从事脉管制冷机优化设计及 CFD 仿真模拟研究。

E-mail: zhangchen_0579@163.com

已广泛应用于空间红外探测领域^[2]。作为脉管制冷机的核心部件,回热器占脉管制冷机总损失的 40% 以上^[3],因此其性能优劣会直接影响脉管制冷机的效率。回热器的压降是影响脉管整机功率输出和制冷量大小的关键因素。

总体说来,回热器压降研究可以分为三个阶段:早期较多集中在稳态流动条件上,比如 Kays W M 等人^[4]在稳态条件下测量了回热器的压降,王惠龄等人^[5]整理了稳态流下磷青铜和不锈钢丝网的压降实验数据;中期主要集中在交变流动条件上,比如巨永林等人^[6]研究了小孔开度对回热器交变流动平均压降的影响,Cha J J^[7]搭建了一个脉管制冷机回热器轴向与径向压降实验平台,并整理了交变流动回热器丝网填料的压降实验数据;后期则集中在低温交变流动状态上,比如 Nam K 等人^[8]研究了低温环境下频率对回热器压降的影响。

由此可见,目前关于脉管制冷机低温在机交变流动压降的研究还少有报道。因此,本文基于 REGEN 软件设计了一种直线型脉管制冷机回热器,搭建了一个回热器低温在机交变流动压降实验平台,并研究了回热器冷热两端的压降与频率、制冷温度以及输入功之间的变化关系。

1 理论分析

回热器的工作条件恶劣,温度变化率极高,有时可达到 3000 K/s,故对回热器填充材料的要求非常高^[9]。回热器的填充材质需要导热性良好、耐热耐压性强、热容量大、稳定性好、吸水率和放气率低。为了设计出高效回热器,在保证回热器有良好换热能力的情况下,不仅要降低回热器内部的流动阻力,而且还要求回热器内部具有较大的流通面积,并在实际的回热器设计中要对工质流动与换热进行优化处理。因此,在选取回热器的填料材质时,一般选用不锈钢、铜丝网或薄纹薄板堆叠而成。本文采用不锈钢丝网作为回热器填料。图 1 为不锈钢丝网填料的局部照片。图 2 所示为不锈钢丝网的几何结构,其中 D_w 为丝径(单位为英寸), n 为丝网目数。

选取回热器材料时,目前较为普遍的方法

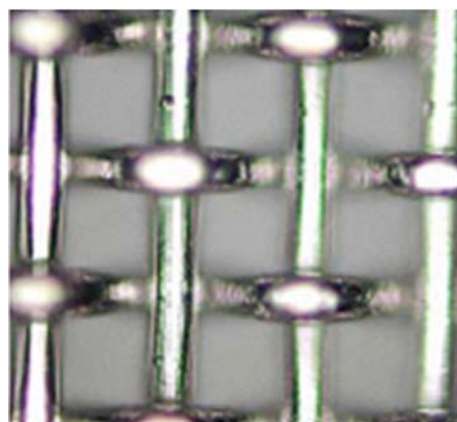


图 1 不锈钢丝网材料

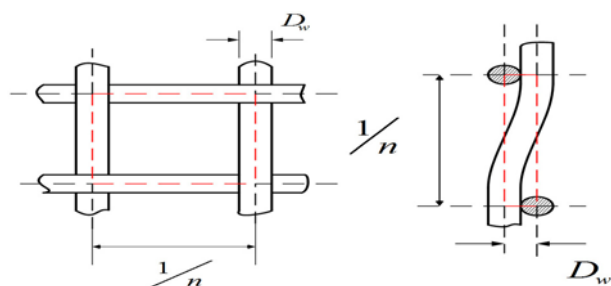


图 2 不锈钢丝网的几何结构

是比较填料的当量直径以及工质气体的热渗透深度和粘性深度。

回热器的当量直径的表达式为

$$D_h = \frac{\varphi D_w}{1 - \varphi} \quad (1)$$

式中, φ 为孔隙率,其定义为

$$\varphi = 1 - \frac{\pi n D_w}{4} \quad (2)$$

工质气体的热渗透深度 δ_k 和粘性深度 δ_μ 的表达式分别为

$$\delta_k = \sqrt{2\kappa/\omega\rho c_p} \quad (3)$$

$$\delta_\mu = \sqrt{2\mu/\omega\rho} \quad (4)$$

式中, k 为导热率,其单位为 $W/(m \cdot K)$; ρ 为工质密度,其单位为 kg/m^3 ; c_p 为定压比热容,其单位为 $J/(kg \cdot K)$; μ 为动力粘性系数,其单位为 $Pa \cdot s$; ω 为角频率,其单位为 rad/s 。

因此,用作回热器填料的材料的当量直径应满足:

$$\delta_\mu \leq D_h < \delta_k \quad (5)$$

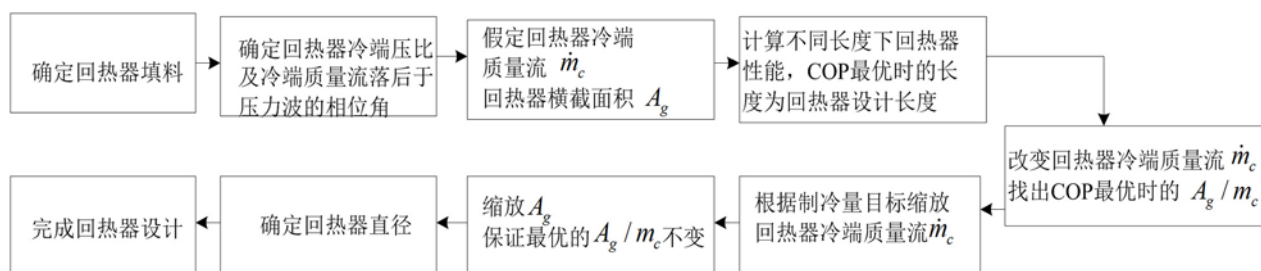
图 3 基于 REGEN 软件的回热器设计思路^[12]

表 1 丝网参数

目数	材料	丝径 (mm)	孔径 (mm)	水力直径 (mm)	孔隙率
400	不锈钢	0.026	0.042	0.00276	0.68

回热器两端压降的计算公式为

$$\Delta P = \frac{\rho u_{reg}^2 L f}{2D_h} \quad (6)$$

式中, u_{reg} 为氦气流经过回热器的速度 (m/s); L 为回热器的长度 (m); f 为回热器填料的摩擦因子。

本文基于美国国家标准与技术研究院开发的 REGEN 回热器计算软件^[10]对单级高频脉管制冷机回热器进行仿真计算。该软件在液氮温区具有良好、可靠的仿真性能^[11]。图 3 所示为回热器设计思路。REGEN 软件将回热器视作多孔介质圆管, 基于氦气一维流动的动量守恒、能量守恒和质量守恒有限差分方程, 采用热平衡法对给定回热器的冷端质量流、冷端压力波相位角、冷端压比、充气压力、频率以及回热器的几何尺寸和填料物性参数进行数值仿真求解。

表 1 列出了选定回热器的填料参数。设计时, 回热器的工况如下: 工作频率为 50 Hz, 冷端温度为 120 K, 初始充气压力为 3.2 MPa, 压比为 1.12, 冷端质量流为 6 g/s, 回热器的固体填充材料为 400 目不锈钢丝网, 频率为 50 Hz, 充气压力 3.2 MPa。按照上述方法设计的回热器的长度为 50 mm, 直径为 20 mm。

2 实验系统

脉管制冷机运行时, 其冷端温度往往在液氮温区附近, 导致压力测量的环境温度低且密封

要求高。因此, 我们选用最低测温温区可达 5.4 K 的 Kistler603B1 型动态压力传感器。图 4 为脉管制冷机冷端的压力传感器布置图。其中, 压力传感器的接口材料为不锈钢, 冷端狭缝换热器的材质为紫铜。利用真空钎焊工艺将两者焊接起来。动态压力传感器与压力传感器接口之间采取钢丝密封的方式, 以达到低温密封要求。

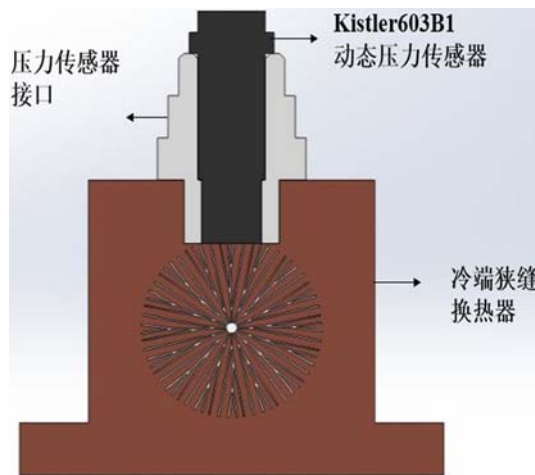


图 4 压力传感器在回热器冷端的布置图

图 5 所示为脉管制冷机回热器压降实验台。该实验台由脉管制冷机和实验测量单元两部分组成。其中, 脉管制冷机包括对置活塞式压缩机, 通过外接 NF 电源控制压缩机的输出功和频率。对于采取直线型布置的回热器和脉管, 冷热端的换热器为狭缝型, 整个冷指结构置于真空腔体内, 调相机构采用惯性管搭配气库的方式。实验测量单元由冷热端分置的压力传感器、冷端

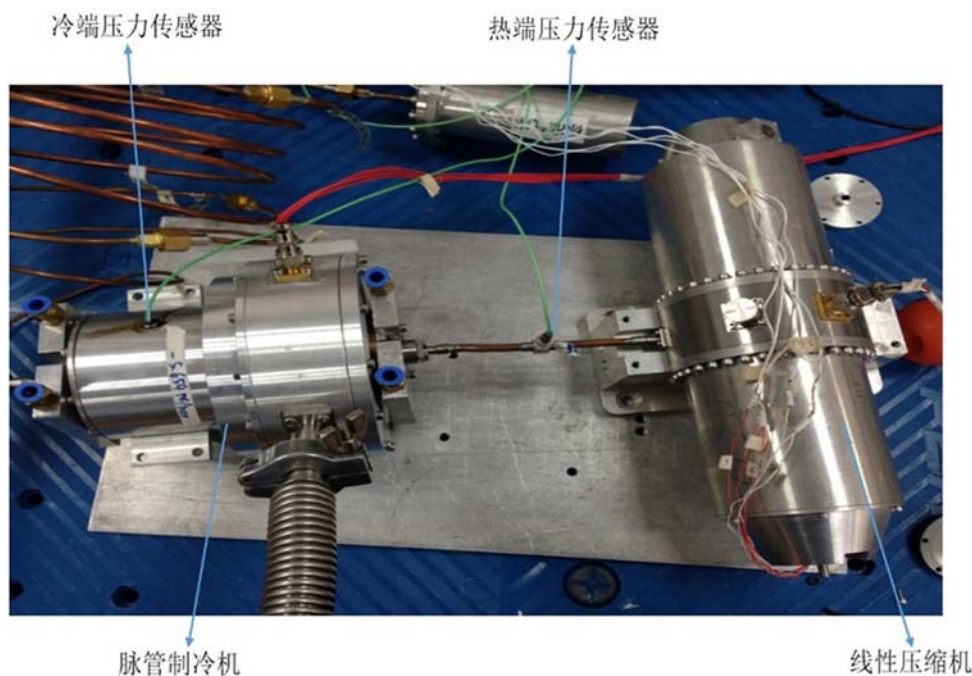


图 5 脉管制冷机回热器压降实验台

铂电阻测温计和加热片构成，并利用示波器作为数据采集仪来读取冷热端的压力波幅值。

3 实验方法与结果分析

我们对不同工况下的脉管制冷机在机交变流动回热器压降进行了实验研究。通过调节 NF 电源的频率和电压，为压缩机提供不同频率下的输入功。回热器热端换热器与脉管热端换热器采用水冷控温 (293 K)。在回热器冷端布置 pt-100 铂电阻温度计，用于实时测量回热器的冷端温度，即脉管制冷温度。利用安装在回热器冷端的额定功率为 20 W 的陶瓷加热片调节加热量 (脉管制冷机的制冷量)，进而保证回热器冷端的制冷温度固定不变。这时在回热器的冷热两端便形成了一个固定的温度梯度。在此实验条件下，我们开展了一系列回热器压降实验研究。

图 6 ~ 图 8 所示为充气压力为 3.2 MPa 时不同冷端制冷温度下的回热器冷热两端压降随输入功的变化情况。可以看出，当压缩机的输入频率为 46 ~ 54 Hz 时，冷端制冷温度和输入功固定；频率越低，氦气在回热器内部的振荡变化周期越大，回热器两端的压降越高。通过比较图 6

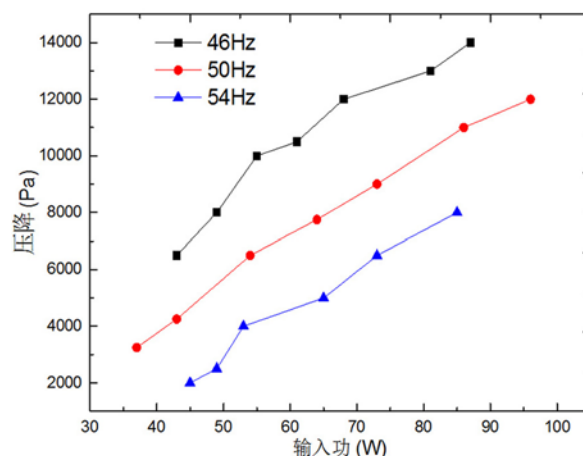


图 6 不同频率下压降随输入功的变化情况 (150 K)

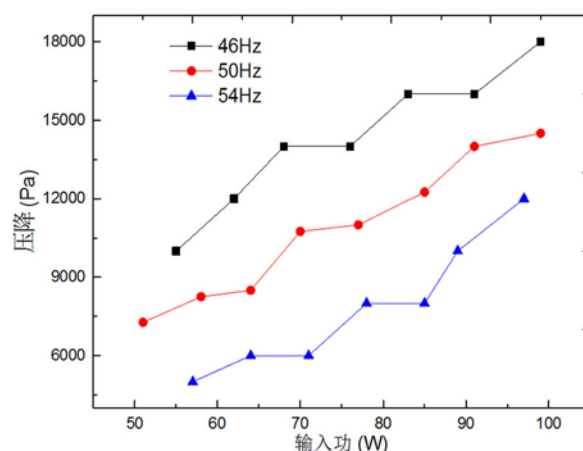


图 7 不同频率下压降随输入功的变化情况 (120 K)

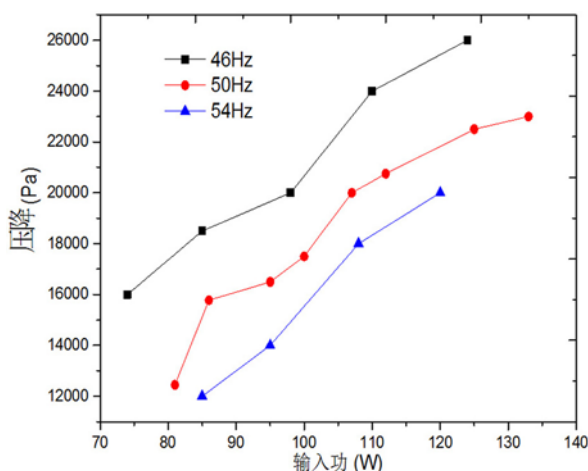


图 8 不同频率下压降随输入功的变化情况 (90 K)

~ 图 8 可知, 当三种实验工况下的热端温度均为 293 K, 制冷温度分别为 150 K、120 K 和 90 K 时, 制冷温度越低, 回热器冷热两端的温度梯度越大, 回热器冷热两端的压降越高, 回热器损失越多, 消耗的压缩机 PV 功越大; 在一定的频率范围 (此处为 46 ~ 54 Hz) 内, 高频率下回热器两端的压降较小, 故在脉管制冷机运行时, 通过选择频率高的运行工况可减少回热器损失, 以获取更高的制冷效率。

图 9 ~ 图 11 所示为脉管制冷机的运行频率为 50 Hz 时不同充气压力下回热器冷热两端的压降随输入功的变化情况。可以看出, 当充气压力为 3.0 MPa 时, 压降在三种不同的制冷温度下均大于充气压力为 3.2 MPa 时的压降。在回热器

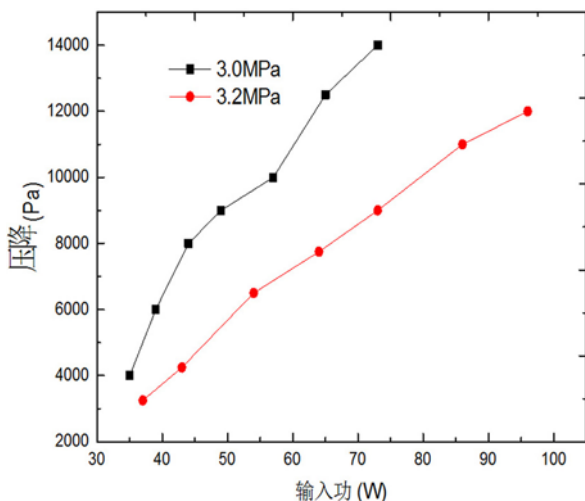


图 9 不同充气压力下压降随输入功的变化 (150 K)

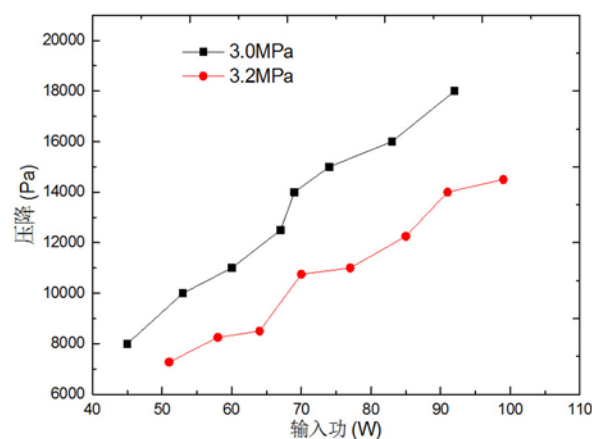


图 10 不同充气压力下压降随输入功的变化 (120 K)

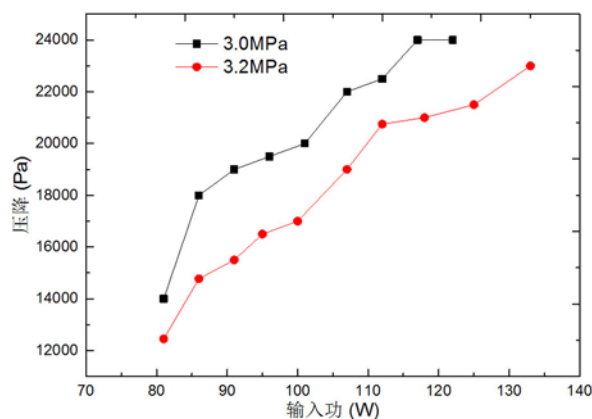


图 11 不同充气压力下压降随输入功的变化 (90 K)

设计中, 3.2 MPa 充气压力是基础工况。当给此脉管制冷机充气且压力值达到 3.0 MPa 时, 在相同的输入功条件下, 3.0 MPa 时的压降大于 3.2 MPa 时, 即回热器损失更多。因此, 该脉管制冷机在 3.2 MPa 时的效率优于 3.0 MPa 时。通过比较图 9 ~ 图 11 可知, 当热端温度固定在 293 K 时, 冷端温度越低, 回热器两端的压降越大。

图 12 所示为充气压力为 3.2 MPa、运行频率为 50 Hz、热端温度为 293 K、制冷温度为 120 K 时输入功对冷端压比和比卡诺效率的影响情况。脉管制冷机的内部氦气为交变流动, 每一部位的压力均呈波动变化, 可近似认为是正弦变化。回热器冷端的压力波波峰值与压力波波谷值的比值称为回热器的冷端压比。从图 12 中可以看出, 随着输入功的增加, 回热器的冷端压比升高, 而此时脉管制冷机的比卡诺效率也在增

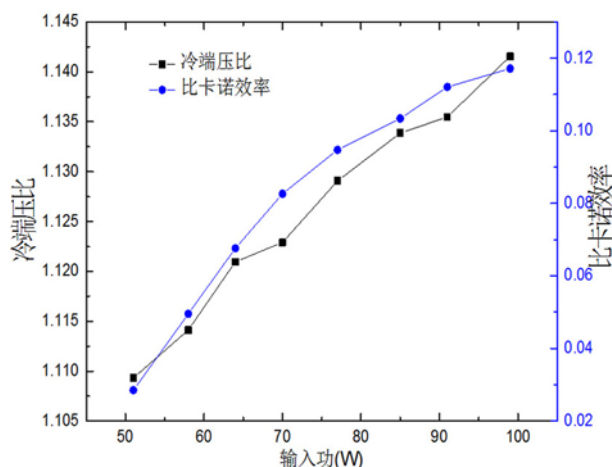


图 12 输入功对冷端压比和比卡诺效率的影响

大。回热器的冷端压比越高,表明流经回热器冷端的质量流越大,制冷效率也越高。当实际脉管制冷效应发生时,通过提高回热器的冷端压比可获取更高的制冷机效率。观察比卡诺效率这条曲线后可知,随着输入功的增加,比卡诺效率增大,但是当输入功达到 100 W 时,比卡诺效率有趋向拐点的趋势。

4 结束语

本文设计了直线型脉管制冷机低温回热器的结构尺寸和填料材质,搭建了一个回热器低温在机交变流动压降实验平台,研究了不同工况下的回热器压降变化情况,并总结了输入功、频率、制冷温度和充气压力对回热器冷热两端压降的影响规律。具体结论如下:

(1) 随着输入功的增加,回热器两端的压降增大,回热器的冷端压比增加,比卡诺效率升高并达到最优值。

(2) 当脉管制冷机的运行频率为 46 ~ 54 Hz 时,频率越低,回热器冷热两端的压降越高;同时,回热器两端的温度梯度越大,回热器压降也越高。

(3) 此回热器的压力值(初始设计)为 3.2 MPa。通过比较 3.0 MPa 和 3.2 MPa 充气压力

下脉管制冷机的回热器压降可知,3.0 MPa 时的回热器损失大于 3.2 MPa 时。

参考文献

- [1] 杨开响. 脉冲管制冷机内部交变流动热力学分析与实验研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2012.
- [2] 陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] Radebaugh R, Huang Y, O'Gallagher A, et al. Calculated Regenerator Performance at 4 K with Helium-4 and Helium-3 [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2008, **985**(1): 225-234.
- [4] Kays W M, London A L, Eckert E R G. Compact Heat Exchangers [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1958.
- [5] 王惠龄, 朱玉群, 郭方中. 网格填料中流动压降的实验研究 [J]. *低温与超导*, 1980, **8**(2): 6-17.
- [6] Ju Y, Jiang Y, Zhou Y. Experimental Study of the Oscillating Flow Characteristics for a Regenerator in a Pulse Tube Cryocooler [J]. *Cryogenics*, 1998, **38**(6): 649-656.
- [7] Cha J J. Hydrodynamic Parameters of Micro Porous Media for Steady and Oscillatory Flow-Application to Cryocooler Regenerators [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [8] Nam K, Jeong S. Investigation of Oscillating Flow Friction Factor for Cryocooler Regenerator Considering Cryogenic Temperature Effect [J]. *Cryogenics*, 2005, **45**(12): 733-738.
- [9] 姜瑞雪. 斯特林发动机回热器流动和传热特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [10] Gary J, Gallagher A O, Radebaugh R, et al. REGEN 3.3 User Manual [Z]. Gaithersburg: NIST, 2001.
- [11] Lewis M, Kuriyama T, Xiao J H, et al. Effects of Regenerator Geometry on Pulse Tube Refrigerator Performance [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1998, **43**(2): 1999-2005.
- [12] 李姗姗. 高频脉冲管制冷机相位特性的理论及实验研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2011.