

72 Hz 大冷量空间脉冲管制冷机

王乃亮^{1,2}, 赵密广^{1*}, 陈厚磊¹, 梁惊涛¹

1. 中国科学院理化技术研究所空间功热转换技术重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院大学 北京 100049

* 联系人, E-mail: mgzhao@mail.ipc.ac.cn

2018-01-25 收稿, 2018-04-04 修回, 2018-04-19 接受, 2018-12-05 网络版发表

国家自然科学基金(51776213)、国家重点基础研究发展计划(613322)和国家重点研发计划(2016YFB0500500)资助

摘要 空间应用对低温制冷机的体积与重量有着较高的限制, 然而目前10 W级以上的空间制冷机重量均较大, 不能满足空间应用的需求, 因此轻量化脉冲管制冷机的研制工作迫在眉睫. 相关研究表明, 提高制冷机的运行频率, 是实现制冷机轻量化的一种有效途径. 为了提高制冷机的运行频率, 本文首先从理论上分析了蓄冷器长度、蓄冷器填料、充气压力等因素对制冷机运行频率及制冷效率的影响规律. 随后加工了35 mm及45 mm长度的脉冲管制冷机的冷指, 并通过实验对制冷机的蓄冷器填料、充气压力等进行了优化. 最终成功研制了一台72 Hz同轴型大冷量脉冲管制冷机, 其在250 W输入电功下, 具有12 W@80 K的冷量, 相对电功卡诺效率可达13.2%, 整机效率较高.

关键词 12 W@80 K, 同轴, 脉冲管, 72 Hz

目前, 搭载在航天卫星上的红外探测器件, 均需要依靠低温制冷机将其冷却到液氮温区附近, 以提高探测器件的灵敏度与探测范围. 脉冲管制冷机作为新一代空间低温制冷机, 具有结构简单、运行寿命长、冷指振动小、抗电磁干扰、可靠性高等优势, 尤其在红外探测领域具有广阔的应用前景. 近年, 航天红外探测器件逐渐朝着大面阵、长线列、多光谱的方面发展, 红外探测器件需求的冷量逐年攀升. 为了应对这种需求, 低温制冷机也逐渐朝着大冷量的方面发展. 然而, 对于目前常用的脉冲管制冷机而言, 随着制冷机制冷量的增加, 其体积逐渐变大, 整体变得更加笨重. 空间应用对低温制冷机的体积与重量有着较为严苛的限制, 这种笨重的制冷机已经不能满足空间应用的需求. 因此, 空间应用对于轻量化的大冷量脉冲管制冷机的需求变得更加迫切.

美国国家标准局(NIST) Radebaugh 等人^[1]曾提

出采用更高的工作频率, 可以在保证脉冲管制冷机高效率的前提下, 缩小制冷机的体积重量. 之后, 国内外逐渐兴起了对空间百赫兹脉冲管制冷机的研究. 空间百赫兹脉冲管制冷机的主要研究成果集中在小冷量领域, 2007年NGST(Northrop Grumman Space Technology)报道了一台100 Hz微型化脉冲管制冷机, 扫气体积0.65 cm³, 整机重782 g, 制冷性能为1.1 W@77 K^[2]. 2009年, NGST的Petach等人^[3]研制了一台工作频率为100 Hz的脉冲管制冷机, 当输入功率为50 W时, 在77 K下具有1.3 W制冷量. 2012年中国科学院上海技术物理研究所研制了微型同轴脉冲管制冷机, 整机重量2.2 kg, 运行频率75 Hz, 当输入功率为80 W时, 在80 K具有2.5 W制冷量^[4,5]. 2017年中国科学院理化技术研究所空间功热实验室, 研制了质量为1.6 kg微型化脉冲管制冷机, 45 W电功率输入, 在80 K可获得2.1 W制冷量^[6]. 另外在非空间脉冲管

引用格式: 王乃亮, 赵密广, 陈厚磊, 等. 72 Hz 大冷量空间脉冲管制冷机. 科学通报, 2018, 63: 3968–3974

Wang N L, Zhao M G, Chen H L, et al. Study of a 72 Hz high-capacity pulse tube cryocooler for space applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 3968–3974, doi: 10.1360/N972018-00107

制冷机领域,国内也成功研制了数台百赫兹大冷量脉冲管制冷机.2009年,浙江大学吴英哲等人^[7]研制的高频单级直线型脉冲管制冷机,运行频率为120 Hz,500 W电功输入,在78.6 K获得8 W制冷量.但是该整机相对卡诺效率仅为4.4%,整机质量较重,约为11 kg.2012年,中国科学院理化技术研究所热声组设计了100 Hz直线型脉冲管制冷机,其在183 W输入电功下,80 K取得12.4 W的制冷量,整机相对卡诺效率为18.4%,整机质量为8.9 kg.虽然整机效率较高,但是该制冷机采用单缸压缩机驱动,振动较大,难以应用到空间领域^[8].2017年昆明物理研究所采用redlich动磁式直线电机,研制了一台10 W@80 K同轴型脉冲管制冷机,其运行频率为62 Hz,输入电功率为210.3 W,比卡诺效率可达12.66%^[9].

总体来看,在空间应用脉冲管制冷机领域,主要的研究成果集中在5 W以下的小冷量方面,而10 W级以上轻量化整机鲜有报道.虽然国内也开展了大冷量的轻量化制冷机的研究,但大多不是面向空间应用的,不符合空间应用标准.因此为了满足空间应用对10 W级以上的轻量化制冷机的需求,亟需开展空间大冷量脉冲管制冷机的轻量化研究工作.本实验室开展空间脉冲管制冷机研究数十年,已成功在航天卫星上搭载了数台脉冲管制冷机.本文将沿用成熟的空间制冷机研制技术,基于实验室自主研发的大冷量脉冲管制冷机,采用提高频率的方法,开展了空间大冷量脉冲管制冷机轻量化的研究.为了提高制冷机的运行频率,本文首先分析了脉冲管制冷机的蓄冷器长度、蓄冷器填料、充气压力等对频率的影响规律,随后对高频大冷量冷指进行了设计,并通过实验对脉冲管制冷机进行了相关的优化工作.

1 冷指设计

脉冲管制冷机主要由压缩机、冷指及调相机三部分构成.其中压缩机是一种压力波发生器,压缩机的输出PV功可由下式得到:

$$W_{PV} = \frac{1}{2} P \dot{V} \cos \theta = \pi f P_m V \cos \theta, \quad (1)$$

其中 f 为运行频率, P_m 为工质的压力波幅值, $\dot{V}$ 为工质的体积流率幅值, V 为压缩机扫气体积, θ 为压力波与体积流率的相位差.根据式(1)可以知道,当 P_m 与 θ 变化不大时,压缩机的输出PV功仅与其运行频率和扫气体积有关,如果提高了运行频率,那么就可以在

压缩机PV功不变的前提下,降低压缩机的扫气体积.一般而言,压缩机的体积、重量与其扫气体积成正比^[10],因而通过提高运行频率,降低压缩机的扫气体积,就可以达到减轻压缩机质量的目的.高频的压缩机必须匹配高频的脉冲管冷指,否则整机性能就会恶化.冷指的高频化主要难点在于以下两点:其一,换热时间缩短,单位体积换热量增加,增加了设计蓄冷器的难度;其二,蓄冷器内质量流与压力波之间的相位关系恶化,增加了调相的难度.因此,下文将通过理论分析与实验研究相结合的方式,进行超高频冷指设计与优化工作.

1.1 蓄冷器长度设计

冷指是脉冲管制冷机的主要制冷部件,而蓄冷器又是冷指的核心部件,因此冷指的设计重点在于蓄冷器的设计.图1为脉冲管制冷机蓄冷器的内部相位分布图^[11].根据该图可知,蓄冷器热端质量流量与冷端质量流量存在如下关系:

$$\dot{m}_h = \dot{m}_c + \frac{\dot{P} V_{rg}}{RT_r} = \dot{m}_c + \frac{i 2 \pi f P V_{rg}}{RT_r}, \quad (2)$$

其中 $\dot{m}_h$ 和 $\dot{m}_c$ 分别为热端与冷端的质量流量, $\dot{P}$ 为压力变化率, V_{rg} 为蓄冷器体积, T_r 为蓄冷器平均温度.

一般认为在蓄冷器入口处,质量流量领先压力波30°的相位角时,蓄冷器整机性能较好^[12].根据公式(2)可知,当其他参数不变时,如果单独提高制冷机的运行频率,公式(2)右边第二项增加,这将会使得热端质量流量 $\dot{m}_h$ 和冷端质量流量 $\dot{m}_c$ 之间的相位

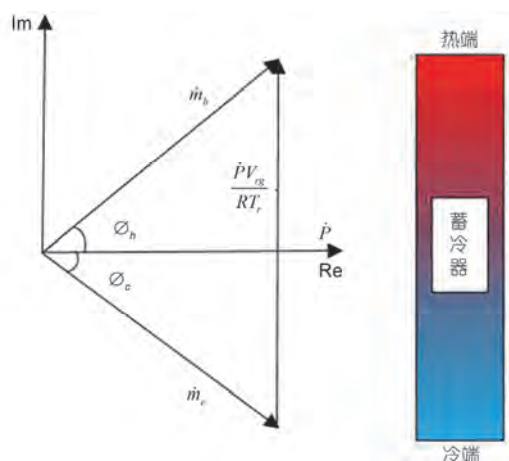


图1 (网络版彩色)蓄冷器中质量流与压力波相位关系图

Figure 1 (Color online) Phasor diagram representing conservation of mass in the regenerator

差变大,从而增大了蓄冷器中的平均质量流量的幅值.质量流量的幅值大小与蓄冷器内工质的压降损失成正比,因此,质量流量幅值的增大将会增加蓄冷器内工质的压降损失.另外质量流与压力波的相位角也会因此相应增大,相位角大于 30° 的最优相位角,这也会一定程度上增大蓄冷器的换热损失.

为了消除由频率提升而带来的不良影响,可以通过减小蓄冷器的体积,使得公式(2)右边第二项不变.在实际应用中,一般通过减小蓄冷器的长度来达到减小蓄冷器体积的目的.因此,为了提升脉冲管制冷机冷指的运行频率,需要缩短蓄冷器的长度.

1.2 充气压力设计

初始充气压力是脉冲管制冷机制冷性能的重要因素之一,其不仅影响制冷机冷指的泵热能力,而且对压缩机的输入功率也有影响.对式(1)进一步推导可得压缩机 W_{PV} 关于初始充气压力 P_0 的关系式:

$$W_{PV} = \pi f \left(\frac{P_r - 1}{P_r + 1} \right) P_0 V \cos \theta, \quad (3)$$

其中 P_r 为压比, P_0 为初始充气压力.从公式中可以看出,当减小压缩机的扫气体积 V 时,为了保证总输出功率 W_{PV} 不变,那么除了提高运行频率外,也可以适当提高初始充气压力.

另外对式(2)进一步推导可得公式(4).为了抵消频率提升而带来的损失,需要保证公式(4)的值不变^[12].

$$\frac{\dot{P}V_{rg}}{\dot{m}_1 RT_r} = K \frac{f}{P_0 \left(\frac{P_r - 1}{P_r + 1} \right)^2} = \text{constant}, \quad (4)$$

其中 K 是综合系数.从公式中可以看出,当压比不变,运行频率升高时,为了保持该项数值不变,那么就需要适当地提升充气压力.即脉冲管制冷机运行频率提升时,适当地提高充气压力能够提升整机的制冷性能.

1.3 蓄冷器填料设计

相关研究表明,为了保证工质与填料的充分换热,必须保证工质的热渗透深度要大于或相当于回热器填料的水力直径^[13].氦气热渗透公式为

$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{f \rho \pi c_p}}, \quad (5)$$

式中 ρ 为工质密度, k 为导热系数, c_p 为定压比热容.从

式(5)可知,氦气的热渗透深度随着频率的增加而减小,当工质的热渗透深度小于回热器填料的水力直径时,工质与填料的换热损失增加,制冷机的效率降低.因此,提高冷指的运行频率的同时,需要选择水力直径更小的填料.

综合以上分析可知,为了提高脉冲管制冷机冷指的运行频率,在常用40 Hz左右冷指基础上,我们需要缩短蓄冷器的体积、提高初始充气压力以及选用水力直径更小的填料.

2 实验装置介绍

脉冲管制冷机实验装置如图2所示.压缩机采用本实验室自主研发的大功率的直线动圈式压缩机.压缩机与制冷机冷指部分通过圆管相连接.冷指热端由水冷机提供的 10°C 循环水冷却.冷指放置在 10^{-3} Pa的真空罩中,以减小辐射漏热.冷头温度由铂电阻温度计测量.制冷量通过测量冷头80 K时的加热片的功率来获得.调相部分将采用惯性管加气库的结构.

依据理论分析结果及实验室自研的13 W@80 K大冷量脉冲管制冷机,开展了超高频大冷量脉冲管制冷机冷指的设计工作.设计制冷机主要尺寸与运行参数如表1所示;蓄冷器外径尺寸与13 W@80 K大冷量脉冲管制冷机一致,均为28 mm,且匹配相同的压缩机.蓄冷器长度缩短至了45 mm及35 mm.

3 实验结果与分析

3.1 优化蓄冷器长度

上文的理论分析指出,为了提高冷指的最佳运行频率,需要缩短蓄冷器的长度.本文在自主研发的13 W@80 K大冷量脉冲管制冷机基础上,加工设计了相同外径,长度更短的蓄冷器——45 mm蓄冷器与

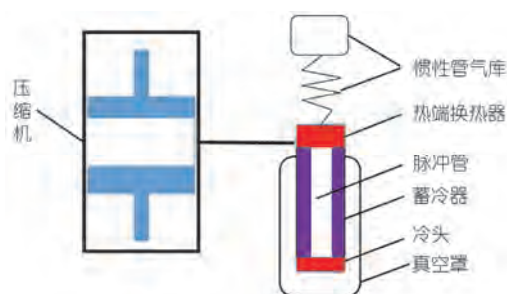


图2 (网络版彩色)脉冲管制冷机实验装置示意图

Figure 2 (Color online) Schematic of the experimental apparatus

表 1 制冷机主要尺寸与运行参数

Table 1 The main parameters of PTC

部件	数值	部件	数值
压缩机扫气容积	10 cm ³	调相机构	惯性管+气库
蓄冷器直径	28 mm	充气压力	4 MPa
蓄冷器长度	35~45 mm	接管	内径3 mm, 长10 cm

35 mm蓄冷器. 将新加工的短蓄冷器匹配同一冷指热端, 蓄冷器中均填充500目不锈钢丝网, 匹配同一压缩机, 得到的实验结果如图3所示. 可以看到随着蓄冷器长度由60 mm缩短到35 mm, 制冷机最佳运行频率由38 Hz上升至72 Hz. 从该实验结果可以看出, 当蓄冷器长度缩短时, 冷指需匹配更高的运行频率, 以保证蓄冷器内部相位角处于合理范围. 因此, 缩短蓄冷器的长度, 成为了提高制冷机的最佳运行频率一种有效手段. 但是从该图中可以看出, 随着蓄冷器长度逐渐缩短, 制冷机的制冷能力逐渐降低了. 这说明研制超高频的冷指, 并不是简单地缩短蓄冷器的长度就够了. 冷指频率的提升, 对制冷机其他参数也提出更高的要求, 需要进一步优化其他参数以提高制冷机的效率.

3.2 优化充气压力

图4展示了3种频率下制冷机在2.5~4.0 MPa充气压力范围内制冷性能. 从该图中可以看出, 不同频率的制冷机所对应的最佳充气压力是不同的. 38 Hz的制冷机最佳充气压力在3.0 MPa左右, 52 Hz的制冷机最佳充气压力约为3.5 MPa. 72 Hz的制冷机最佳充气

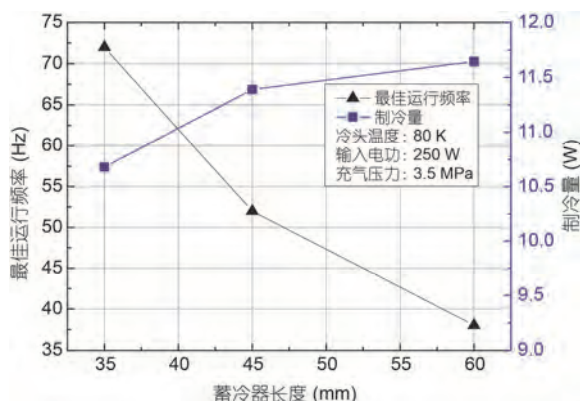


图 3 (网络版彩色)不同长度冷指的制冷量与最佳运行频率图

Figure 3 (Color online) The cooling performance and optimal frequencies of different pulse tube cryocoolers

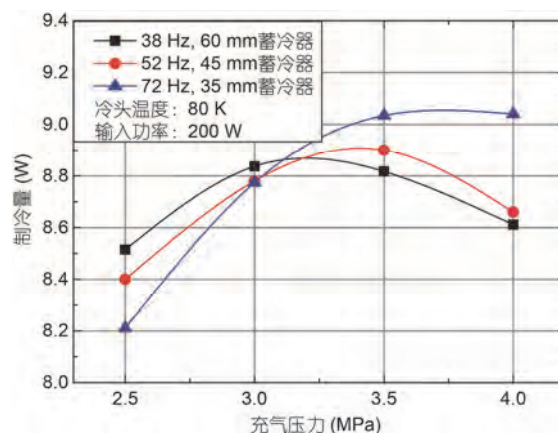


图 4 (网络版彩色)充气压力对不同频率制冷机的性能影响

Figure 4 (Color online) The cooling capacity at 80 K vs. charge pressure

压力在3.5~4 MPa之间. 该实验结果证明, 当制冷机最佳运行频率较高时, 其对应的最佳充气压力也是较高的. 这主要因为一方面, 较高的充气压力代表着较大的工质密度, 以保证在较短的蓄冷器中, 也具有充足的做功工质, 以获得足够的制冷量. 另一方面, 适当的提高充气压力, 也能够一定程度上优化蓄冷器内的相位关系, 以抵消频率提升而带来的负面影响. 然而, 充气压力并不是越高越好, 充气压力越高, 质量流量越大, 进而蓄冷器内压力损失也就越大. 对于不同的制冷机, 均存在一个最佳的充气压力, 使得整机性能达到最佳.

3.3 优化蓄冷器填料

不锈钢丝网是目前液氮温区脉冲管制冷机常用的蓄冷器填料, 一般不锈钢丝网的目数越高, 则其水力直径越小. 通常, 脉冲管制冷机运行频率低于50 Hz时, 其最佳的不锈钢丝网目数为300~500目左右^[14~15]. 而当制冷机运行频率高于50 Hz时, 情况将有所不同. 本文选取了35 mm蓄冷器, 分别填充400~635目不锈钢丝网, 通过实验研究了不同目数不锈钢丝网对制冷机整机性能的影响规律. 图5为此3种制冷机的制冷曲线图.

从图中可以发现, 随着蓄冷器填充丝网目数的提高, 制冷机的制冷量逐渐提升, 该72 Hz冷指所需的最佳丝网为635目不锈钢丝网. 而我们研制的38 Hz冷指所需的最佳不锈钢丝网为400目与500目. 出现这个差别的主要原因在于, 工质氦气的热渗透深度随着频率的提升而降低, 制冷机运行频率越高

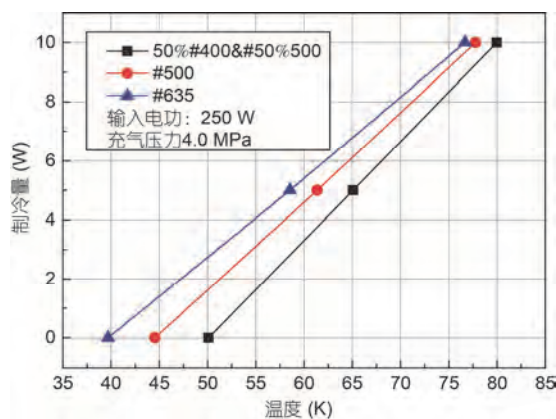


图5 (网络版彩色)蓄冷器填充不同丝网的制冷机的制冷性能对比
Figure 5 (Color online) The cooling capacity at 80 K vs. cold temperature

时,就需要水力直径更细的丝网来加强换热.换言之,当脉冲管制冷机的运行频率较高时,较低目数的不锈钢丝网已经不能满足其换热需求,需要选用较高目数的丝网以达到更好的换热效果.

另外,从图中可以看出,随着不锈钢丝网目数的不断提高,制冷机的最低无负荷温度逐渐降低,制冷机在较低温区的制冷能力愈加凸显.这是因为一方面高目数丝网能够填充的片数增多,增大了轴向接触热阻,减小了轴向漏热损失.另一方面,随着温度降低,氦气工质的热渗透深度下降.60 K以下的低温区需求的填料水力直径更小,因而高目数丝网将具有更好的换热效果.

3.4 脉冲管制冷性能

图6展示了72 Hz脉冲管制冷机在不同输入电功率下的制冷能力,并将其200~250 W输入功率下的制冷能力与38 Hz制冷机进行了对比.从图中可以看出,在相同输入功率时,72 Hz的脉冲管制冷机最低无负荷温度较高,但是单位温升的制冷量较大(即图中的曲线斜率较大).这主要是因为72 Hz冷指长度较短,轴向漏热更大,难以获得较低的无负荷温度;然而,蓄冷器长度缩短,减小了蓄冷器内压降损失,因而单位温升的制冷量较大.在60 K温区左右,72 Hz制冷机制冷斜率与38 Hz制冷机制冷斜率相交,即表明在60 K温区以下时,38 Hz制冷机制冷能力较高;在60 K温区之上时,72 Hz制冷机制冷能力较高.

该72 Hz大冷量脉冲管制冷机的典型性能是在250 W输入电功率下,在80 K可以获得最大12 W的制

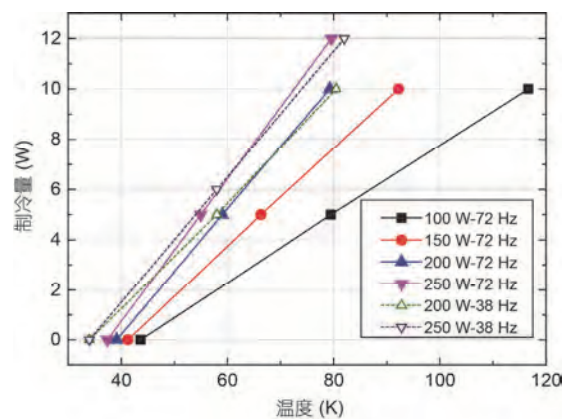


图6 (网络版彩色)72 Hz与38 Hz大冷量脉冲管制冷机制冷性能曲线图

Figure 6 (Color online) Cooling performance map of the 72 Hz and 38 Hz PTC

冷量,相对电功卡诺效率可达13.2%.在100 W输入电功率下,可以获得约5 W@80 K的制冷量,相对电功卡诺效率最高可达13.75%.说明该72 Hz同轴型脉冲管制冷机制冷效率较高,已达到国内先进水平.

本文通过实验研究获得了一台高效72 Hz大冷量脉冲管制冷机.将该制冷机与实验室自主研制的38 Hz大冷量脉冲管制冷机进行对比,如表2所示.从表中可以看出,在相同直径的前提下,将蓄冷器的长度由60 mm缩短至35 mm,可以使制冷机的最佳运行频率由38 Hz提升至72 Hz.得益于频率的提升,在相同250 W电功时,72 Hz高频制冷机所需的扫气量为 4.4 cm^3 ,仅为38 Hz低频制冷机所需扫气量 8.6 cm^3 的一半左右.但是简单地缩短蓄冷器的长度会使得制冷机整机效率变差,因此本文进一步采取了提高了蓄冷器填料的目数及初始充气压力的方法,以降低冷指高频化而带来的换热等损失.最终,通过理论分

表2 72 Hz高频冷指与38 Hz低频冷指对比

Table 2 The comparison of 72 Hz cryocooler and 38 Hz cryocooler

性能	38 Hz制冷机	72 Hz制冷机
蓄冷器直径(mm)	28	28
蓄冷器长度(mm)	60	35
最佳运行频率(Hz)	38	72
输入电功(W)	250	250
压缩机扫气体积(250W) (cm^3)	8.6	4.4
蓄冷器填料	#400 & #500	#635
初始充气压力(MPa)	3.5	4.0
80 K制冷量(W)	11.6	12

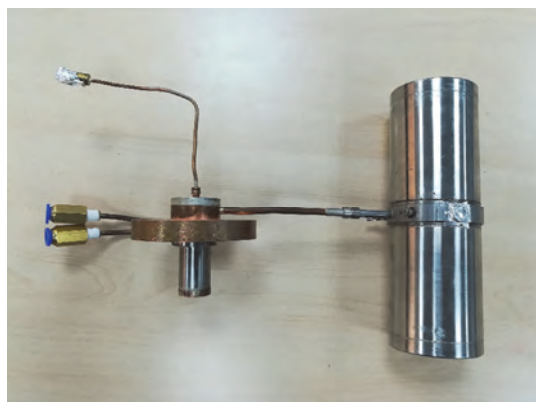


图7 (网络版彩色)72 Hz制冷机冷指实物图

Figure 7 (Color online)The photograph of 72 Hz cryocooler without phase shifter

析及实验研究,成功研制了高效率的高频72 Hz大冷量脉冲管制冷机,达到了与传统38 Hz制冷机相同的制冷水平,甚至整机效率与制冷量要略高于传统38 Hz的制冷机的冷量。图7展示了该72 Hz制冷机的实物图。

4 结论与分析

本文通过理论研究,详细分析了提升脉冲管制冷机频率的有效方法。结合自主研发的38 Hz大冷量脉冲管制冷机,设计了超高频的大冷量脉冲管制冷机冷指。并通过实验研究了蓄冷器长度、初始充气压力、与蓄冷器填料尺寸等对制冷机运行频率和制冷效率的影响规律,验证了理论分析的正确性。最终成功研制了一台可应用于空间的72 Hz大冷量同轴型脉冲管制冷机,该制冷机在250 W输入电功下,最高拥有12 W@80 K的冷量,相对电卡诺效率可达13.2%,在同类型的制冷机中,整机效率处于领先水平。同时,该制冷机沿用成熟的空间制冷机研制技术,结构紧凑、稳定性高、易于工程化,其工程样机可以达到与该实验样机相同乃至相近的效率。该高效72 Hz冷指的成功研制,解决了整机轻量化的首要难题,为空间用大冷量脉冲管制冷机的轻量化研究奠定了坚实的基础。下一阶段,我们将着手进行线性压缩机小型化的研究,以进一步降低整机的重量。

参考文献

- 1 Radebaugh R, O'Gallagher A. Regenerator operation at very high frequencies for microcryocoolers. In: Weisend J G, ed. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics Press, 2006, 823: 1919–1928
- 2 Petach M, Waterman M, Tward E, et al. Pulse tube microcooler for space applications. Cryocoolers, 2007, 14: 89–93
- 3 Petach M, Waterman M, Pruitt G, et al. High frequency coaxial pulse tube microcooler. Cryocoolers, 2009, 15: 97–103
- 4 Dang H Z. Development of High Frequency Pulse Tube Cryocoolers for Space Applications. In: Weisend J G, ed. AIP Conference Proceedings. New York: American Institute of Physics Press, 2012, 1434: 1457–1464
- 5 Cao Y G, Chen X, Wu Y N. Review of key technologies of Stirling-type pulse tube cryocoolers for space application (in Chinese). Infrared, 2013, 34: 1–9 [曹永刚, 陈曦, 吴亦农. 空间用斯特林型脉管制冷机的应用现状研究. 红外, 2013, 34: 1–9]
- 6 Xin E C, Chen H L, Tang Q J, et al. Investigation on the 1.6 kg miniature coaxial pulse tube cryocooler (in Chinese). Vac Cryogenics, 2017, 23: 217–222 [邢恩春, 陈厚磊, 唐清君, 等. 1.6 kg 小型同轴脉管制冷机实验研究. 真空与低温, 2017, 23: 217–222]
- 7 Gan Z H, Wu Y Z, Yuan Y, et al. Theoretical and experimental study on a 120 Hz single stage pulse tube cryocooler (in Chinese). J Zhejiang Univ (Eng Sci), 2011, 45: 2014–2019 [甘智华, 吴英哲, 袁园, 等. 120 Hz 单级脉管制冷机理论与实验. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45: 2014–2019]
- 8 Wang X T. Study on the operating principle of high frequency pulse tube cooler (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Science, 2012 [王晓涛. 超高频脉冲管制冷机的特性研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2012]
- 9 Xiong C, Xi Z L, Xu H, et al. Experimental performance of a 10 W/80 K high frequency coaxial pulse tube cryocooler (in Chinese). Cryogenics, 2017, (3): 34–37 [熊超, 习中立, 许红, 等. 10 W/80 K 高频同轴脉管制冷机的实验性能. 低温工程, 2017, (3): 34–37]
- 10 Gan Z H, Wu Y Z, Yuan Y, et al. Therotical and experimental study on a 120 Hz single stage pulse tube cryocooler. J Zhejiang Univ, 2011, 45: 2014–2019
- 11 Chen G B, Tang K. The Principle of Miniature Refrigerator (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009. 256–257 [陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理. 北京: 科学出版社, 2010. 256–257]
- 12 Vanapalli S, Lewis M, Gan Z, et al. 120 Hz pulse tube cryocooler for fast cooldown to 50 K. Appl Phys Lett, 2007, 90: 163
- 13 Radebaugh R. Microscale Heat Transfer at Low Temperatures. Nato Sci, 2005, 193: 93–124
- 14 Dang H Z, Wang L B, Yang K X. 10 W/90 K single-stage pulse tube cryocoolers. Cryogenics, 2012, 52: 221–225
- 15 Wang K, Dubey S, Choo F H, et al. Modelling of pulse tube refrigerators with inertance tube and mass-spring feedback mechanism. Appl Energ, 2016, 171: 172–183

Summary for “72 Hz 大冷量空间脉冲管制冷机”

Study of a 72 Hz high-capacity pulse tube cryocooler for space applications

Nailiang Wang^{1,2}, Miguang Zhao^{1*}, Houlei Chen¹ & Jingtao Liang¹

¹ Key Laboratory of Space Energy Conversion Technologies, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

* Corresponding author, E-mail: mgzhao@mail.ipc.ac.cn

Most infrared detectors work at low temperature, which enhances their detection sensitivity and visual field. Nowadays, the cryocoolers commonly used in space detectors are Stirling and pulse tube cryocoolers (PTCs). Compared with the Stirling cryocoolers, PTCs have no moving parts in the cold finger, resulting in low vibration and long lifetimes, and after decades of development, some PTCs already have comparable efficiencies to Stirling models. Thus, PTCs have been considered as ideal substitutes for Stirling cryocoolers in the future. In recent years, with the rapid progress of aerospace applications, the structure and the function of infrared detectors have become more complicated, requiring a higher cooling capacity. However, increasing cooling power always increases of the PTC's weight, whereas many special aerospace applications have strict size and weight restrictions. As a result, miniaturization of high-capacity PTCs is required urgently in space applications.

According to the Radebaugh's research, increasing the operation frequency of PTCs can be an efficient way to minimize their size and mass because a high operating frequency can increase the energy density. Thus, many researchers and institutions at home and abroad have focused on the study of miniaturized PTCs, but most of the work is carried out on the PTCs used in space with cooling capacities under 5 W. Although some studies have been conducted on high-capacity miniature PTCs in China, none are designed for space applications. Thus, there is an urgent demand for miniaturized PTCs with cooling power above 10 W at 80 K.

To minimize the sizes and weights of PTCs, the influences of the length of the regenerators, the charging pressure, and the regenerator matrix upon the operating frequency are presented. The results show that decreasing the volume of the regenerator, increasing the charge pressure, and decreasing the hydraulic diameter of the matrix are beneficial for promoting PTC efficiency with high operating frequency. On the basis of this optimization, 35-mm and 45-mm-length regenerators are designed and manufactured. Some systematic experiments are carried out using the newly designed PTCs. The experimental results also demonstrate that the length of the regenerator, charge pressure, and hydraulic diameter of the matrix significantly impact the efficiency of PTCs with high operating frequencies. Finally, a 72-Hz high-capacity coaxial-pulse-tube cryocooler is obtained with a cooling capacity of 12 W at 80 K and an input electrical power of 250 W. It achieves around 13.2% of the Carnot efficiency at 80 K, which is high compared with the same kind of PTCs. Benefiting from our mature techniques in space-PTC design, this PTC is easy to transform into an engineering model with little difference in efficiency. The success of the design of a 72-Hz PTC cold finger solves the critical problem of ministration and can provide some theoretical and experimental guidance for the design of miniaturized PTCs for space applications.

12 W@80 K, coaxial, pulse tube cryocooler, 72 Hz

doi: 10.1360/N972018-00107