有阀线性压缩机驱动液氦温区闭式JT制冷机性能

刘少帅*, 丁磊, 蒋珍华*, 董彩倩, 汤逸豪, 向振之, 吴亦农

中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

* 联系人, E-mail: liushaoshuai@mail.sitp.ac.cn; jiangzhenhua@mail.sitp.ac.cn

2019-01-20 收稿, 2019-06-30 修回, 2019-07-02 接受, 2019-11-19 网络版发表

国家自然科学基金(51806231)、上海市自然科学基金(18ZR1445600)和中国博士后科学基金(2018M630476)资助

摘要 线性压缩机驱动的液氦温区闭式JT(Joule-Thomson)节流制冷系统, 是实现深空探测目标的核心技术. 为进一步探究闭式JT循环的压缩机工况影响和制冷温度变化情况, 搭建了预冷型液氦温区闭式JT节流制冷机实验台. 实验中, 采用单向阀组与传统线性压缩机结合, 获取JT循环所需直流流动氦气工质并提供节流所需大压比. 考虑单级有阀线性压缩机压力能力, 选取10 K左右预冷温度, 测试了不同压缩机工况特性及节流孔的压力流量特性. 通过调节活塞位移和压缩机运行频率, 可以获得3.91 K的最低温度. 该闭式循环JT制冷机在4.09 K稳定工况下可以获得10.8 mW的最大制冷量, 为后续多级压缩和更低温区的闭式系统提供可靠的研究基础.

关键词 液氦温区, Joule-Thomson (JT), 线性压缩机, 4 K

超导量子干涉仪、超导辐射热计等基于超导材料的高灵敏探测装置, 以及硅基和锗基等红外探测器均需要工作在液氦左右温区. 同时液氦温区也是获得mK级更低温度的必备热沉, 因此液氦温区是空间探测任务得以实现的关键技术^[1~4].

在多级脉管或多级斯特林制冷机中, 回热器的回热材料体积比热在液氦温区急剧下降, 因此很难获取液氦温区的制冷温度或在液氦温区时效率过低^[5]. 预冷型氦JT(Joule-Thomson)节流技术利用了氦气的非理想特性, 结合航天技术中成熟的线性压缩机技术实现大压比压缩, 是目前国际上液氦温区空间应用的主要技术. 1987年, RAL(Rutherford Appleton Laboratory)和ESA(European Space Agency)两个研究机构^[6]较早地开展了两级斯特林制冷机预冷JT节流制冷机到达液氦温区的工作. 在RAL的工作中, JT节流制冷机采用两级压缩, 两台单活塞压缩机对置放置以抵消活塞运动导致的振动. 此时JT循环高压1.0 MPa, 低压0.1 MPa, 质量

流量3 mg/s, 输入功约53.5 W^[7]. 美国NGAS公司开展了液氦温区JT节流制冷机研究, 用于JWST(James Webb space telescope)项目. 采用线性压缩机驱动, 在6.2 K获得约75 mW冷量^[8~11]. 在JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)的支持下, 日本住友重工公司研制大压比线性压缩机驱动的液氦温区JT节流制冷机, 该制冷机可以在4.5 K获得20 mW制冷量. 后经过优化改进, 在输入功为145.1 W时在4.42 K获得了50.1 mW的制冷量, 该制冷机计划用于SPICA(space infra-red telescope for cosmology and astrophysics)项目^[12~14]. 国外虽然已有线性压缩机驱动的液氦温区JT节流制冷机的应用, 然而大部分的报道都集中在制冷机的应用层面. 线性压缩机驱动的闭式工作条件下, 压缩机不同的工作状态及液氦温区核心部件的温度情况相关报道较少. 而国内开展液氦温区节流制冷的单位主要有, 中国科学院理化技术研究所(简称理化所)和浙江大学两家单位. 理化所最新报道的是三级压缩机驱动的2.8 K制冷机结

引用格式: 刘少帅, 丁磊, 蒋珍华, 等. 有阀线性压缩机驱动液氦温区闭式JT制冷机性能. 科学通报, 2020, 65: 750–756

Liu S S, Ding L, Jiang Z H, et al. Performance of a linear compressor driven JT cryocooler at liquid helium temperature (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 750–756, doi: 10.1360/N972018-01283

构,总压比约33.在研究中更多地关注整机性能,并未过多研究稳定工况下的各核心位置的温度分布情况^[15,16].浙江大学以Gifford-Mcmahon(GM)作为预冷平台,测试了液氦温区开式JT制冷机在不同压力工况下的稳态制冷量特性、过载工况及失稳机理.并提出了考虑压缩机和预冷机实际性能的整机COP优化方法,暂未报道闭式JT制冷机的实验研究工作^[11,17].

目前面向空间应用的线性压缩机驱动的液氦温区JT节流制冷机的相关研究越来越多,也是未来我国面向空间应用低温系统的关键技术核心.线性压缩机驱动的液氦温区闭式JT节流制冷机的温度特性和压缩机工况影响,是进一步探究液氦温区JT制冷机理及制冷性能的关键.本研究搭建了单级线性压缩机驱动的液氦温区闭式JT节流制冷系统,研究了压缩机工况特性及节流孔的压力流量特性.在稳定工况下调节压缩机活塞位移,观察低压压力和制冷温度的变化关系.对闭式结构下制冷机性能的研究,为后续多级压缩以及整机JT节流系统的优化提供参考.

1 JT循环流程介绍

大压比线性压缩机驱动的液氦温区JT节流制冷循

环流程如图1所示.节流循环侧由大压比有阀线性压缩机、三级套管换热器、节流小孔和蒸发器组成.氦气工质由有阀线性压缩机压缩成高压气体,冷却后进入一级套管换热器(HX1).经过一级预冷进入二级套管换热器(HX2),经过二级预冷进入三级套管换热器(HX3).高压氦气进入节流小孔产生节流效应,在蒸发器侧蒸发吸热后依次进入三级套管换热器预冷来流高压氦气,最终低压氦气回到压缩机进行下一轮循环.所有低温组件均密封在真空腔室内以减少漏热,同时布置一二级冷屏减少辐射漏热损失.

三级换热器(HX3)、节流孔和蒸发器是获得液氦温区节流制冷的核心部件.国内外对于单级大压比线性压缩机的报道中,其压比一般为3~4.为获得液氦温区较好的制冷性能,氦气一般被预冷至15 K以下.图2给出了氦工质在不同工况下的压焓图($P-h$ 图).a到b过程为三级换热器内高压氦气被来流低压氦气冷却过程;b到c过程表示节流前后焓值相等;c到d过程为蒸发器中氦气蒸发过程;d到e过程为三级换热器内低压流体冷却高压流体的过程.系统的理论最大制冷量等于不同预冷温度下的等温焓差与cd两点焓差的较小值.以预冷温度为 T_1 时为例,ab之间焓差加上 q_1 等于ce之间焓

图1 (网络版彩色)线性压缩机驱动的液氦温区JT节流制冷循环示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of JT cryocooler at liquid helium temperature zone driven by linear compressor

图2 (网络版彩色) 氦气工质JT循环不同预冷工况下 p - h 图
Figure 2 (Color online) p - h diagram under different precooling conditions of helium JT cycle

差。而理论上为了将高温测a点温度冷却至b点温度, 当cd点焓差大于 q_1 时, cd点的部分焓差将用于冷却高温测

流体^[11]。本研究中所涉及的工况均为cd点焓差大于预冷温度对应的等温焓差。当高压压力为0.4 MPa, 低压压力为0.1 MPa时, 随着预冷温度的降低($T_1 \sim T_3$), 对应的等温焓差增大, 更容易获得较大的制冷量, 即单位制冷量的增加(在图中可以表示为焓差的变化 $q_1 > q_2 > q_3$)。当采用单级线性压缩机驱动时, 由于压缩机所能提供的压比较小, 因此在小压比情况下在一定程度上降低预冷温度同样可以获得液氦温区的节流制冷能力。

2 实验台简介

根据上述分析, 基于10 K左右预冷温度搭建液氦温区闭式JT节流实验装置(图3), 主要包括大压比线性压缩机、JT负载及数据采集系统三部分。采用本课题组自行研制的线性压缩机外加进排气阀片结构, 实现氦气工质的高低压直流循环。基于NI系统及自编程数据采集软件, 对JT负载侧各点温度进行监测采集。温度

图3 (网络版彩色) 液氦温区闭式节流实验系统照片。(a) 整机测试状态; (b) JT核心换热组件部分
Figure 3 (Color online) Photograph of the JT cryocooler experimental system. (a) System test; (b) core components

传感器采用PT100和Cernox两种类型, 分别用于40 K以上温区和40 K以下温区的温度测试. PT100的测温精度约为 ± 100 mK, Cernox在液氮温区的测温精度约为5 mK. 采用高精度直流电源对蒸发器进行加热, 其电流调节精度为0.1 mA, 满足mW级制冷量的精确测量.

3 结果与讨论

3.1 单压缩机输出性能

高压比有阀线性压缩机是液氮温区JT节流循环中氦工质的驱动部件. 通过结构设计及进排气阀门刚度的选取, 实现死体积的减少及高低压压力的调整. 首先, 基于现有直流压缩机测试实验台, 对有阀压缩机压力和流量进行测试. 图4为该线性压缩机在几种不同充气压力下所能提供的压比和流量的关系. 同样流量下, 通过增加充气压力可以在一定程度上增大氦气的质量流量. 主要原因是由于高充气压力下的氦气密度增大带来质量流量的增加. 例如, 对于流量约为4.5 mg/s, 充气压力为0.15 MPa时, 压比约为3.7; 而充气压力为0.21 MPa时可以获得4.5的压比. 然而对于JT节流系统而言, 在增加流量和压比的同时要充分保证低压压力, 从而保障节流后所能获得的制冷温度. 因此在实际应用中需要综合考虑低压工况选取合适的充气压力. 为同时验证压缩机位于负压下工作状态, 以充气压力约为0.3 MPa开始降温, 并在降至4 K温区时通过调节氦气充气压力, 调节低压压力以稳定在约0.07 MPa.

3.2 制冷性能影响

由于氦气工质需要预冷至一定温度以下(约40 K)才会节流制冷, 制冷机性能测试过程中, 首先利用旁通结构实现蒸发器级节流部件的快速降温. 由于氦气在40 K时的节流制冷效应较弱, 因此实际运行过程中一般当制冷机温度降至20 K以下时关闭旁通结构, 打开低压侧阀门开启JT节流循环, 依靠节流制冷效应逐渐实现循环温度的降低.

图5为制冷机开机过程中, 一级冷头、二级冷头节流前和蒸发器的降温曲线. 降温过程中GM制冷机二级冷头始终维持约12 W的加热量以防止其温度降至过低, 从而引起蒸发器侧过多的液氮积聚. 由于一二级冷屏、管路结构及换热器结构等结构热容, 大约经过5 h, 一级冷头温度稳定在约37 K, 二级冷头温度稳定在约11 K. 此后, 蒸发器及节流部件依靠旁通结构加速降

图4 (网络版彩色) 压缩机在不同充气压力下的压比和流量对应关系
Figure 4 (Color online) Correspondence between pressure ratio and flow rate of compressor under different charging pressures

图5 (网络版彩色) 液氮温区闭式JT制冷机降温曲线
Figure 5 (Color online) Cooling down curves of the closed JT cryocooler

温, 约在20 h后降温速率明显增加(主要原因是由于无氧铜在约100 K时热容出现明显减小情况). 经过约26 h, 节流前及蒸发器温度降至约17 K, 此时关闭旁通打开低压侧阀门, 再次降温约4 h, 蒸发器温度稳定在4 K附近, 此时节流前温度稳定在约5.6 K.

当蒸发器温度稳定时, 调节线性压缩机功率以改变活塞运动位移幅值. 利用本课题组研发的LVDT(linear variable differential transformer)测试活塞运动情况. 观察低压压力及蒸发器温度变化情况(图6). 当活塞位移减小至约3.5 mm时, 低压压力约为0.138 MPa, 此时蒸发器温度约为4.68 K; 当活塞位移为8.5 mm时, 低压压力小于0.056 MPa, 此时蒸发器温度约为3.94 K. 氦气

图6 (网络版彩色)不同压缩机位移下低压压力和制冷温度变化情况
Figure 6 (Color online) Changing of low pressure and cooling temperature under different compressor displacements

在3.94 K对应的饱和蒸气压约为0.077 MPa(大于测量低压0.056 MPa). 主要原因是低压管路沿程压降引起的误差. 从图6中还可以看出, 当活塞位移从6.2 mm增加至7.5 mm时, 压缩机输入功率从19 W增加至34 W. 实验中测试了压缩机在60和65 Hz时的输入功率与最低温度的变化关系. 当运行频率为60 Hz时, 输入功率为50 W, 最低制冷温度为3.94 K; 当运行频率增加至65 Hz时, 输入功率增大至68 W, 此时制冷温度略微降低至3.91 K.

图7为蒸发器温度稳定在4.09 K左右时, 测量不同加热量下各点温度的变化情况. 首先, 调节加热量至约7.8 mW, 三级换热器入口、节流前及蒸发器温度基本稳定约1.5 h. 继续加大蒸发器加热量至约10.8 mW, 持续稳定约6 h, 各测点温度基本保持稳定. 其次, 加大蒸发器加热量, 节流前温度及蒸发器等各测点逐渐出现失稳情况. 失稳原因主要是由于加热量过大后, 三级套管换热器低压侧低温焓差不足以冷却高压侧高温端焓差(即de点焓差小于ab点焓差), 具体失稳特性可参见文献[11]. 基于实测各点温度及高低压压力, 计算得到理

图7 (网络版彩色)不同加热量下核心部件温度变化情况
Figure 7 (Color online) Components temperatures under different cooling powers

论最大制冷量约为14.6 mW. 测试制冷量小于理论制冷量的主要原因是: (1) 温度、压力及流量存在测量误差; (2) 旁通结构的导热漏热及辐射漏热.

4 结论

搭建了单级有阀线性压缩机驱动的液氦温区闭式JT节流制冷系统, 分析了有阀线性压缩机的输出性能, 及节流循环的温度特性, 得到如下结论.

基于单级压缩机驱动的液氦温区JT节流制冷机, 由于所能提供的压比较小, 通过降低预冷温度进而获得液氦温区节流制冷性能. 充气压力对有阀线性压缩机输出性能具有很大影响, 对于流量约为4.5 mg/s, 充气压力为0.15 MPa时, 压比约为3.7. 而充气压力为0.22 MPa时, 可以获得4.5的压比. 稳定工况下, 增加活塞行程可以减小回气压力, 降低制冷温度. 在稳定工况下, 压缩机输入功率约为34 W, 高压压力约为0.26 MPa, 低压压力约为0.07 MPa, 流量约为5.8 mg/s, 该制冷机可以获得10.8 mW@4.09 K的制冷性能.

致谢 衷心感谢浙江大学甘智华教授、西湖大学刘东立博士等给予的帮助.

参考文献

- Wang B, Gan Z H. A critical review of liquid helium temperature high frequency pulse tube cryocoolers for space applications. *Progr Aerosp Sci*, 2013, 61: 43–70
- Gan Z H, Wang B, Liu D L, et al. Status and development trends of space mechanical refrigeration system at liquid helium temperature (in Chinese). *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2012, 46: 2160–2177 [甘智华, 王博, 刘东立, 等. 空间液氦温区机械式制冷技术发展现状及趋势. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46: 2160–2177]

- 3 Holmes W A, Chui T, Johnson D, et al. Cooling systems for far-infrared telescopes and instruments. Proceedings of NASA Science and Technology Conference of Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey. 2009
- 4 Liu D L, Shen Y W, Gan Z H. A critical review of precooled JT cryocoolers working at 4 K for space applications (in Chinese). *Cryogenics*, 2017, 2: 1–9 [刘东立, 申运伟, 甘智华. 空间用4 K温区预冷型JT制冷机研究进展及关键技术分析. *低温工程*, 2017, 2: 1–9]
- 5 Radebaugh R, O’Gallagher A, Gary J. Regenerator behavior at 4 K: Effect of volume and porosity. In: AIP Conference Proceedings of Advances in Cryogenic Engineering. 2002, 613: 961
- 6 Bradshaw T W, Orlowska A H. A 4-K mechanical refrigerator for space applications. European Symposium on Space Thermal Control & Life Support Systems. 1988
- 7 Jones B G, Ramsay D W. Qualification of a 4 K Mechanical Cooler for Space Applications. *Cryocoolers 8*. Berlin: Springer, 1995
- 8 Reed J, Dadd M, Bailey P, et al. Development of a valved linear compressor for a satellite borne J-T cryocooler. *Cryogenics*, 2005, 45: 496–500
- 9 Raab J, Tward E. Northrop Grumman Aerospace Systems cryocooler overview. *Cryogenics*, 2010, 50: 572–581
- 10 Liu D L, Wu M, Wang W W, et al. Development of cryogenic system for James Webb Space Telescope (in Chinese). *Cryogenics*, 2013, 6: 56–62 [刘东立, 吴镁, 汪伟伟, 等. 詹姆斯·韦伯太空望远镜低温制冷系统的发展历程. *低温工程*, 2013, 6: 56–62]
- 11 Liu D L. Thermodynamic study on mechanism of a precooled JT cryocooler working at liquid helium temperature (in Chinese). Doctor Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 [刘东立. 基于热力学的预冷型液氦温区JT制冷机理研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2017]
- 12 Sugita H, Sato Y, Nakagawa T, et al. Cryogenic system for the infrared space telescope SPICA. In: Proceedings of Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter. 2008, 7010: 701030
- 13 Lee I Y S, Suzuki H. Energy transfer and amplified spontaneous emission in temperature-controlled random scattering media. *J Phys Chem B*, 2008, 112: 4561–4570
- 14 Gan Z H, Tao X, Liu D L, et al. Development status of space cryogenic technology at liquid helium temperature in Japan (in Chinese). *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2015, 10: 1821–1835 [甘智华, 陶轩, 刘东立, 等. 日本空间液氦温区低温技术的发展现状. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 10: 1821–1835]
- 15 Quan J, Zhou Z J, Liu Y J, et al. A miniature liquid helium temperature JT cryocooler for space application. *Sci China Technol Sci*, 2014, 57: 2236–2240
- 16 You L, Quan J, Wang Y, et al. Superconducting nanowire single photon detection system for space applications. *Opt Express*, 2017, 26: 2965–2971
- 17 Liu D, Gan Z, de Waele A T A M, et al. Temperature and mass-flow behavior of a He-4 Joule-Thomson cryocooler. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 109: 1094–1099

Summary for “有阀线性压缩机驱动液氦温区闭式JT制冷机性能”

Performance of a linear compressor driven JT cryocooler at liquid helium temperature

Shaoshuai Liu^{*}, Lei Ding, Zhenhua Jiang^{*}, Caiqian Dong, Yihao Tang, Zhenzhi Xiang & Yinong Wu

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: liushaoshuai@mail.sitp.ac.cn; jiangzhenhua@mail.sitp.ac.cn

The JT cryocooler at liquid helium temperature driven by large pressure ratio linear compressor(s) is one of the core components in the deep space detectors. Also, future quantum detection technology needs to work at or below the liquid helium temperature zones. The JT cryogenics system for obtaining the liquid helium temperature zone is mainly composed of a regenerative precooling unit and a JT cooling unit. The relative technology of the regenerative precooling unit is more mature than that of the JT unit, and related research reports are also numerous. A valved linear compressor (VLC) capable of providing a large pressure ratio is a key technology in the JT cryocooler. At present, the deep space exploration projects such as JWST and SPICA have adopted the VLC. In order to study the working characteristics of VLC, a test system of a closed JT cryocooler operating at liquid helium temperature is built. The cryocooler is precooled by a GM cooler and the precooling temperature of 10 K is selected. A single-stage VLC is used in the study and the output performance is tested independently. The experimental results show that when the charging pressure is 0.15 MPa, a pressure ratio of 3.7 with the mass flow of 4.5 mg/s can be obtained. While raising the charging pressure to a value of 0.21 MPa, the pressure ratio can increase to 4.5. Based on this performance of the single-stage VLC, the theoretical cooling capacity of JT cycle is analyzed. The coupling performance test of the VLC with a JT unit is developed. After about 30 h later, the evaporator temperature can be cooled down to the liquid helium temperature zone. By increasing the piston displacement of the VLC, the dead volume of the compression chamber can be reduced, thereby improving the output performance. With the displacement increased from 6.2 to 7.5 mm by supplementing the input power of 15 W, the cooling temperature can be reduced from about 4.4 to 3.94 K. A minimum temperature of 3.91 K is achieved by further adjusting the piston displacement and the VLC operating frequency. The cooling performance at liquid helium temperature is mentioned in the paper. A maximum cooling capacity of 10.8 mW at 4.09 K can be obtained. The study can provide a reliable research basis for multi-stage compression and lower temperature zones systems.

liquid helium temperature, Joule-Thomson (JT), linear compressor, 4 K

doi: [10.1360/N972018-01283](https://doi.org/10.1360/N972018-01283)