

一种空间极低温吸附制冷机的设计与实现

罗宝军, 王兆利, 闫 涛, 梁惊涛

(中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

摘 要: 针对极低温吸附制冷技术的热沉制冷系统, 系统分析了极低温吸附制冷的特性, 研究了热沉温度对极低温吸附制冷性能的影响, 研制了一台极低温吸附制冷机样机, 工质气体为氦 4, 在 1.5W@4.2K G-M 制冷机基础上实现了 50 μ W@0.8K 的制冷性能, 验证了基于机械制冷系统的更高热沉温度技术的可行性, 这一成果为深空探测和载人空间站相关研究提供了技术支撑。

关键词: 极低温; 吸附制冷; 热沉温度; 氦 4; 深空探测

中图分类号: V444.3^{*6} 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2015)07-0855-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.07.016

Design and Implementation of a Space Sub-Kelvin Sorption Cooler

LUO Bao-jun, WANG Zhao-li, YAN Tao, LIANG Jing-tao

(Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to match a suitable heat sink cooling system, characteristics of sub-Kelvin sorption cooling are analyzed. The effect of heat sink temperature on the performance of sorption cooler is then studied. A prototype of sorption cooler is designed and investigated. Based on a pre-cooler of 1.5W@4.2K G-M refrigerator, performance of 50 μ W@0.8K is obtained for the sorption cooler with ⁴He as the working fluid. The experimental results validate the technical feasibility of a higher heat sink temperature obtained by proposed mechanical cooling system, and the research results will also provide technical support of sub-Kelvin cooling for China's deep space exploration and manned space station program.

Key words: Sub-Kelvin; Sorption cooling; Heat sink temperature; Helium 4; Deep space exploration

0 引 言

随着空间科学计划的开展, 深空探测和载人空间站等领域中的相关研究都需要空间极低温 (<1 K)^[1-6]。例如: 载人空间站空间应用相关学科任务中的低温或极低温下物质在相变点附近的性质研究^[7]、空间天文任务中的针对各种科学目标的高灵敏度巡天观测研究^[8], 这些研究的顺利开展都离不开空间极低温技术的支持^[9], 且温度越低, 相关探测器的背景噪声越小、灵敏度越高。

传统的超流氦制冷系统最低温度仅能达到 1.4 K 左右^[10]。目前具备实现低于 1 K 制冷温度的末端制冷技术有吸附制冷、绝热去磁制冷和稀释制

冷^[1-3,10], 其中极低温吸附制冷作为一种主动式制冷技术, 采用氦 3 作为工质可以获得最低 220 mK 左右的制冷温度, 具有可靠性高、寿命长、无干扰和重量轻等特点, 是空间极低温温区非常重要的制冷技术之一^[2,10]。

然而极低温吸附制冷并不能从 300 K 直接获得低于 1 K, 而是需要一个非常低的热沉温度, 例如: 世界唯一在轨极低温吸附制冷机采用了一个超流氦杜瓦 (低于 1.7 K) 作为前级热沉系统^[2]。由于超流氦制冷系统是利用携带的超流氦蒸发获得制冷效应, 属于被动式制冷, 其寿命由携带液体量的多少决定, 具有寿命短、体积大和重量重等缺点^[11]。随着空间任务对系统寿命的要求越来越长, 采用主动式

制冷作为极低温吸附制冷的热沉系统已成为未来的发展趋势。然而,机械制冷很难达到低于 1.7 K 的热沉温度,因此,研究基于 1.7 K 以上热沉温度的极低温吸附制冷性能具有非常重要的价值。

文献[12]介绍了基于脉冲管制冷机预冷的极低温吸附制冷研究,利用脉冲管制冷机为极低温吸附制冷提供一个 2.6 K 的热沉温度;文献[13]介绍了基于 4 K 脉冲管制冷机预冷的极低温吸附制冷研究;文献[14]介绍了同样基于 4 K 热沉温度的极低温吸附制冷研究。可以看出,这些研究仅给出了特定热沉温度下极低温吸附制冷的性能,但是没有直接给出热沉温度对极低温吸附制冷机性能的影响。

由于缺乏热沉温度对极低温吸附制冷性能的定量认识,上述研究都很难科学全面地指导极低温吸附系统的设计。基于此,本文分析了极低温吸附制冷系统的特性,计算了不同热沉温度下吸附制冷机的性能,并设计了一台原理样机,在 4.2 K G-M 制冷机热沉系统基础上开展了试验研究。

1 极低温吸附制冷系统的特性分析

极低温吸附制冷技术是基于液体的饱和温度与饱和蒸汽压一一对应(图 1),且吸附剂(活性炭)对吸附质(氦 3 或氦 4)在不同温度下吸附率 X 不同,通过周期性加热和冷却活性炭,使氦气交替解吸和吸附,实现吸附床对气体的压缩和抽气,从而具有以下优点:1)无机械运动部件,可靠性高、寿命长;2)无振动和电磁干扰;3)重量轻和体积小。从图 1 还可知,相同饱和蒸汽压下氦 3 的饱和温度比氦 4 低或者相同饱和温度下氦 4 的饱和蒸汽压比氦 3 低一个量级,因此对于同一制冷装置,氦 3 的制冷温度比氦 4 低 340 mK 左右,最低制冷温度可达到 220 mK 左右(氦 3 作为工质气体)。

图 2 是极低温吸附制冷机结构示意图,它由吸附床、泵管、蒸发器和热开关构成。图 3 为适用于极低温吸附制冷机的气隙式热开关结构示意图,由低温泵、支撑筒、热端和冷端构成,通过加热或冷却吸附泵实现热端和冷端之间的热导通或热断开。

对于极低温吸附制冷机,其工作时依次执行两个过程:冷凝过程和制冷过程。冷凝过程中,吸附床与热沉之间的热开关断开、蒸发器与热沉之间的热开关闭合,吸附床被加热,活性炭的吸附率下降,氦

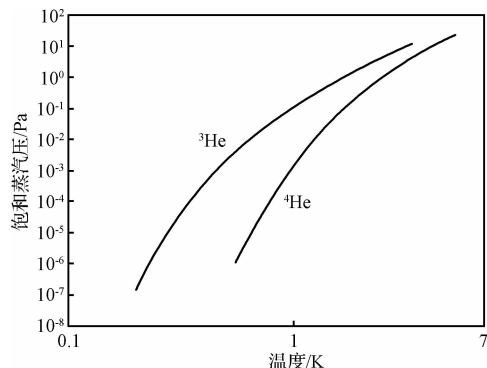


图 1 氦 3 和氦 4 的饱和蒸汽压

Fig. 1 Saturated vapor pressure of ^3He and ^4He

气从活性炭表面解吸出来,流向蒸发器并在蒸发器内冷凝为液体;制冷过程中,吸附床与热沉之间的热开关闭合、蒸发器与热沉之间的热开关断开,吸附床被冷却,活性炭的吸附率增大,氦气被吸附,蒸发器内压力降低、饱和温度降低,制冷机产生制冷效应。当蒸发器内的液体完全蒸发后需重新开始冷凝过程,因此该类制冷机属于间歇制冷(间歇制冷是极低温下制冷机工作的普遍形式)。

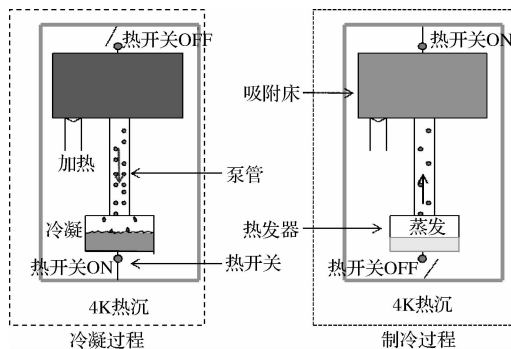


图 2 极低温吸附制冷结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sub-Kelvin sorption cooler

由于氦 4 和氦 3 的临界温度分别是 5.2 K 和 3.3 K,因此,为了实现氦 4 和氦 3 的冷凝,热沉温度必须分别不高于 5.2 K 和 3.3 K,这就要求必须采用其他制冷技术实现复叠,复叠制冷是空间小于 1 K 制冷技术的普遍技术方案^[2-3,15-16](见图 4),而极低温吸附制冷的热沉制冷技术可以采用超流氦杜瓦或者 4 K 温区机械制冷技术。

2 热沉温度对制冷机性能的影响

极低温吸附制冷技术作为一种液体蒸发制冷技术,其制冷温度取决于液体的饱和蒸汽压,具体而

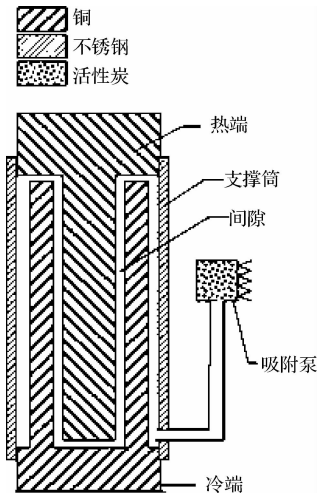


图 3 气隙式热开关结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gas-gap heat switch

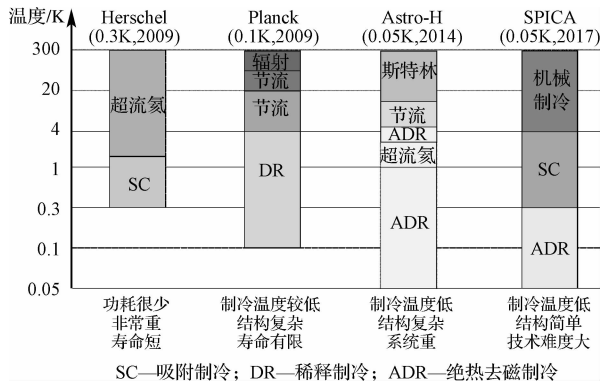


图 4 获取极低温制冷温度的技术路线

Fig. 4 Refrigeration roadmap of space <1K temperature

言,取决于蒸发器内的压力,该压力下氦气的饱和温度为制冷机的制冷温度,其制冷量为

$$Q = mL \quad (1)$$

式中: m 为制冷温度下蒸发器内液体量, L 为制冷温度下氦工质的蒸发潜热。因此,对于具体的制冷温度,制冷量 Q 仅由液体量 m 决定。

同时,极低温吸附制冷技术是一种减压降温制冷技术,其制冷效应是利用一部分液体的蒸发带走剩余液体质量的焓实现温降,因此最终能用于制冷的液体量 m 为:

$$m = m_0 \eta = m_0 \exp\left(\int_{T_{cool}}^{T_{hs}} \frac{C_p(T)}{L(T)} dT\right) \quad (2)$$

式中: m_0 为冷凝过程中液体量, η 为得液率, T_{hs} 为热沉温度, T_{cool} 为制冷温度, C_p 为液体的比热容, L 为蒸发潜热。 C_p 和 L 可以按下式计算:

$$C_p = -293.4 + 1231.8T - 1514T^2 + 255.3T^3 + 420T^4 \quad (1K \leq T < 1.6K) \quad (3)$$

$$L = 206.3 - 588.3T + 681.3T^2 - 342.6T^3 + 63.6T^4 \quad (1K \leq T < 1.6K) \quad (4)$$

$$C_p = 726149 - 1655547T + 1414321T^2 - 537143T^3 + 76875T^4 \quad (1.6K \leq T < 2.1K) \quad (5)$$

$$L = 23.3(1.6K \leq T < 2.1K) \quad (6)$$

$$C_p = 13976059 - 22723968T + 13857533T^2 - 3755667T^3 + 381667T^4 \quad (2.1K \leq T < 2.6K) \quad (7)$$

$$L = 23(2.1K \leq T < 2.6K) \quad (8)$$

$$C_p = 83797 - 97637T + 43188T^2 - 8418T^3 + 621T^4 \quad (2.6K \leq T < 4.2K) \quad (9)$$

$$L = 22039 - 3316T + 2629.9T^2 - 454T^3 \quad (2.6K \leq T < 4.2K) \quad (10)$$

由式(2)可知, η 取决于热沉温度,热沉温度越高,制冷过程得液率越小;反之,热沉温度越小,制冷过程得液率越大。

对于给定充气量的制冷机,通过推导获得冷凝过程中的液体量 m 仅与冷凝温度即热沉温度相关:

$$m_0 = k\rho_{273K}V - \rho(T_{hs})V \quad (11)$$

式中: k 为死容积系数, ρ 为气体密度, V 为制冷机容积。

根据式(2)和式(11),可获得热沉温度对氦4极低温吸附制冷机性能的影响(见图5),纵坐标 $Q_c(T_{sink})/Q_c(2.5K)$ 为各温度下制冷机的冷量与2.5K热沉温度时冷量的比值,其中 T_{sink} 为热沉温度。由图可知,热沉温度越低,制冷冷量越高。

3 样机研制与试验结果

3.1 系统设计

对于极低温吸附制冷系统,还需要综合考虑极低温制冷技术特性和前级制冷技术特性。因此基于图5,针对我国未来空间0.05K制冷温度需求提出了适合我国的基于极低温吸附制冷的空间0.05K制冷路线(见图6),通过采用脉冲管制冷或节流制冷等机械制冷技术为极低温吸附制冷提供4.5K左右的前级热沉温度,然后通过一级绝热去磁制冷实现空间0.05K的制冷温度,从而实现全温区全主动式制冷技术复叠,满足空间任务对制冷温度、寿命和

重量等方面的要求。

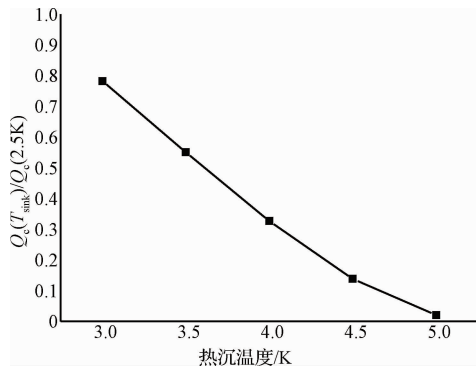


图 5 热沉温度对制冷冷量影响分析

Fig. 5 Effect analysis of heat sink temperature on the performance of cooling

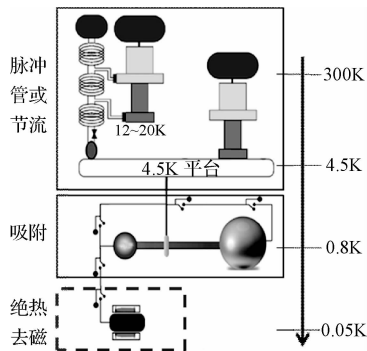


图 6 提出的空间 0.05K 制冷路线

Fig. 6 Proposed refrigeration roadmap of space 0.05K temperature

3.2 样机研制

图 7 为研制的极低温吸附制冷机,吸附剂为活性炭,由于氦 3 价格昂贵,充气工质气体为氦 4。作为原理样机,为方便试验研究各种特性,制冷机设计成可拆卸结构。为满足极低温下的密封要求充气压力受到了限制,同时由于试验过程中曾发生过充气压力过高事故,为安全起见,选择较低的充气压力(5.5 MPa)。根据式(2)和式(3),较低的充气压力意味制冷机冷量较低,经理论计算,5.5 MPa 充气量可以提供 1 J@0.8 K 的制冷能力,完全能满足相关特性的试验要求。图 8 为研制的气隙式热开关,冷端和热端均为无氧铜,冷端与热端间隙为 0.25 mm,支撑筒为 0.1 mm 厚的不锈钢管。

蒸发器温度计采用 Cryocon 公司的 R500,温度测量范围为 0.05 ~ 40 K,吸附床温度计采用 Lakeshore 公司的硅二极管温度计 DT-670,温度测量

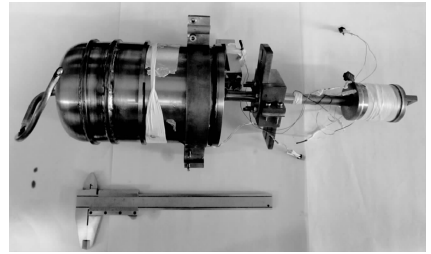


图 7 极低温吸附制冷机样机

Fig. 7 Prototype of sub-Kelvin sorption cooler

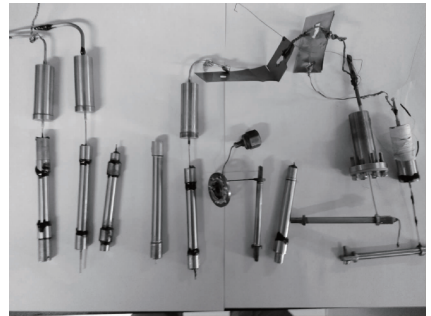


图 8 气隙式热开关样机

Fig. 8 Prototype of gas-gap heat switch

范围为 1.4 ~ 500 K,温度采集仪为 Lakeshore controller 340。

鉴于本试验室的 4.5 K 脉冲管制冷机和节流制冷机仍在研制中^[17-18],因此本试验中的前级制冷采用了一台 1.5 W @ 4.2 K G-M 制冷机,利用 G-M 制冷机的二级冷头作为极低温吸附制冷机的热沉进行降温试验。

3.3 试验结果与分析

试验中,首先利用 4.2 K G-M 制冷机将极低温吸附制冷机冷却到 4.2 K 左右,然后加热吸附床至 50 K 左右,吸附床解吸出氦气,氦气流入蒸发器并被冷凝为液体;然后关闭加热,接通热开关,吸附床开始降温,蒸发器开始制冷。由于吸附过程是一个放热过程,吸附床的最终温度取决于热开关的导热率。降温试验过程中,由于吸附床热开关采用的无氧铜材料纯度问题,其实际热导率远小于理论热导率,因此吸附床的最终温度只能达到 7.2 K 左右。

试验结果如图 9 所示,图(a)是极低温吸附制冷机吸附床和蒸发器的降温曲线,并将 10000 ~ 40000 s 蒸发器制冷结果曲线放大如图(b)所示。从图 9(b)可以看出,蒸发器的最低温度达到了 0.759 K,在蒸发器处加载 50 μW 的负载,温度在

0.8 K 以下维持了 3 h 40 min, 基本达到了预期, 初步验证了提出的基于 4.5 K 脉冲管制冷极低温吸附制冷技术方案可行性。由于氦 3 和氦 4 吸附制冷机在结构上几乎完全相同, 根据前面的理论分析, 采用氦 3 作为工质的样机将能实现 0.4 K 左右的最低制冷温度, 从而作为末级制冷技术可以直接满足红外、远红外和亚毫米等谱段探测的制冷需求。因此, 下一步将对氦 3 为工质气体的空间极低温吸附制冷技术进行研究; 并解决热开关无氧铜纯度导致的热导率问题, 以期获得更好的制冷性能。

50 μW @ 0.8 K 的制冷性能, 初步验证了所提基于 4.5 K 脉冲管制冷极低温吸附制冷技术方案的可行性。

参 考 文 献

- [1] Shirron P, Canavan E, DiPirro M, et al. Development of a cryogen-free continuous ADR for the Costellation-X mission [J]. *Cryogenics*, 2004, 44(6-8): 581-588.
- [2] Duband L, Clerc L, Ercolani E, et al. Herschel flight models sorption coolers [J]. *Cryogenics*, 2008, 48(3-4): 95-105.
- [3] Triqueneaux S, Sentis L, Camus P, et al. Design and performance of the dilution cooler system for the Planck mission [J]. *Cryogenics*, 2006, 46(4): 288-297.
- [4] Lämmerzahl C, Ahlers G, Ashby N, et al. Review: experiments in fundamental physics scheduled and in development for the ISS [J]. *General Relativity and Gravitation*, 2004, 36(3): 615-649.
- [5] 郑为民, 马茂莉, 王文彬. 深空探测器被动式高精度多普勒测量方法与应用 [J]. *宇航学报*, 2013, 34(11): 1462-1467. [Zheng Wei-min, Ma Mao-li, Wang Wen-bin. High precision passive Doppler measurement method and its applications in deep space explorer [J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(11): 1462-1467.]
- [6] 苏怀朋, 赵振昊, 孙永进, 等. 载人空间站空间科学应用研究 [J]. *宇航学报*, 2014, 35(9): 985-991. [Su Huai-peng, Zhao Zhen-hao, Sun Yong-jin, et al. Study on space science and technology of manned space station [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(9): 985-991.]
- [7] 中国科学院空间科学与应用总体部. 载人空间站空间应用系统: 微重力基础物理任务指南 [R]. 2011. [General Establishment of Space Science and Application, CAS. Space application systems for China's manned space station program: program guide of microgravity fundametal physics [R]. 2011.]
- [8] 中国科学院空间科学与应用总体部. 载人空间站空间应用系统: 空间天文任务指南 [R]. 2011. [General Establishment of Space Science and Application, CAS. Space application systems for China's manned space station program: program guide of space astronomy [R]. 2011.]
- [9] 朱建炳. 空间深空探测低温制冷技术的发展 [J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(6): 39-46. [Zhu Jian-bing. Development of cryogenic refrigeration technology for deep space explorations [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(6): 39-46.]
- [10] Duband L, Lange A, Bock J. Helium adsorption coolers for space [C]. *The 30th ESLAB Symposium Submillimetre and Far-Infrared Space Instrumentation*, Noordwijk, Netherlands, September 24-26, 1996.
- [11] 任小军, 王小军, 张鹏, 等. 超流氦多孔塞相分离器的流量

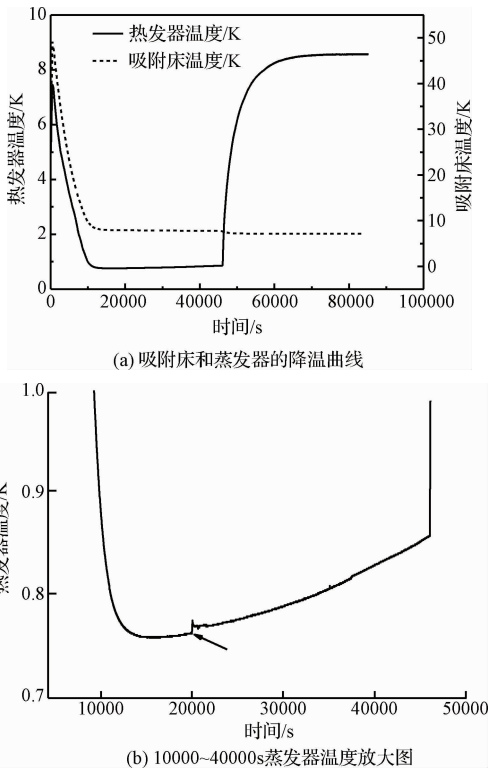


图9 极低温吸附制冷机试验结果

Fig.9 Experimental results of sorption cooler

4 结 论

1) 氦 4 和氦 3 极低温吸附制冷的最高热沉温度分别为 5.2 K 和 3.3 K, 且采用氦 3 作为工质的吸附制冷系统制冷温度比采用氦 4 的低 340 mK 左右。

2) 通过公式推导获得了热沉温度对极低温吸附制冷性能的影响, 热沉温度不仅影响制冷过程中的得液率, 也影响冷凝过程中冷凝液体量, 热沉温度越低, 得液率和冷凝液体量越大, 系统的冷量越大。

3) 研制了一台极低温吸附制冷机, 工质气体为氦 4, 在 1.5 W @ 4.2 K G-M 制冷机基础上实现了

- 特性研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(10): 1743 - 1746. [Ren Xiao-jun, Wang Xiao-jun, Zhang Peng, et al. Investigation of flow characteristics of superfluid helium porous plug phase separator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(10): 1743 - 1746.]
- [12] Devlin M J, Dicker S R, Klein J, et al. A high capacity completely closed-cycle 250 mK ^3He refrigeration system based on a pulse tube cooler [J]. Cryogenics, 2004, 44(9): 611 - 616.
- [13] Duband L, Clerc L, Ravex A. A 300 K-0.3 K pulse tube/sorption cooler [C]. Advances in Cryogenic Engineering: the Cryogenic Engineering Conference-CEC, Madison, USA, July 16 - 20, 2001.
- [14] Bhatia R S, Chase S T, Edgington S F, et al. A three-stage helium sorption refrigerator for cooling of infrared detectors to 280 mK [J]. Cryogenics, 2000, 40(11): 685 - 691.
- [15] James B L, Martinez R M, Shirron P, et al. Mechanical design of a 3-stage ADR for the Astro-H mission [J]. Cryogenics, 2012, 52(4-6): 172 - 177.
- [16] Luchier N, Duval J M, Duband L, et al. 50 mK cooling solution with an ADR precooled by a sorption cooler [J]. Cryogenics, 2010, 50(9): 591 - 596.
- [17] Quan J, Liu Y J, Liu D, et al. 4K high frequency pulse tube cryocooler used for terahertz space application [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(27): 3490 - 3494.
- [18] 周振君, 王娟, 梁惊涛. 液氦温区小型节流制冷机发展现状及趋势[J]. 低温工程, 2011(5): 6 - 11. [Zhou Zhen-jun, Wang Juan, Liang Jing-tao. Status and development trends of refrigerator range in liquid helium temperature [J]. Cryogenics, 2011(5): 6 - 11.]

作者简介:

罗宝军(1981-),男,博士,助理研究员,主要从事空间极低温制冷技术研究。

通信地址:中国科学院理化技术研究所(100190)

电话:(010)82543486

E-mail: baojunluo@foxmail.com

(编辑:牛苗苗)