

用于 mK 吸附制冷机的气隙式热开关的传热性能研究

席肖桐¹ 陈六彪^{2,3} 杨彪^{2,3} 张志健^{2,3} 郭璐娜¹ 吴冬夏¹

(1 天津商业大学天津市制冷技术重点实验室 天津 300134; 2 中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室 北京 100190; 3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 高性能气隙式热开关的开发对提高 mK 吸附制冷机的制冷性能至关重要。本文通过理论计算,分析了结构尺寸以及冷、热端温度对气隙式热开关传热性能的影响,并开展了相关实验研究。结果表明:气隙式热开关导通状态的传热性能主要取决于间隙内的气体导热,减小间隙尺寸可提高气体导热温度梯度,当间隙尺寸减小至 0.1 mm 时,工作在 4~10 K 范围内的热开关的导通热阻降至 15 K/W,理论开关比高达 1 100;热开关的隔热性能主要受支撑管的热导率及壁厚尺寸影响,其中壁厚的影响最为显著;提高工作温度,热开关的导热性能增强,隔热性能变差。基于计算结果,最终开发出开关比为 822 的气隙式热开关。

关键词 mK 制冷技术;氦吸附制冷机;气隙式热开关;传热性能

中图分类号:

文献标识码:

Heat-Transfer Performance of Gas-Gap Heat Switch for mK Sorption Cooler

Xi Xiaotong¹ Chen Liubiao^{2,3} Yang Biao^{2,3} Zhang Zhijian^{2,3} Guo Luna¹ Wu Dongxia¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China; 2. Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract The development of high-performance gas-gap heat switches is crucial for improving the refrigeration performance of mK sorption coolers. The effects of structural dimensions as well as cold- and hot-end temperatures on the heat-transfer performance of gas-gap heat switches were calculated and analyzed in this study, and relevant experimental studies were conducted. The results show that the heat-transfer performance of the gas-gap heat switch in the ON state primarily depends on the thermal conductivity of the gas in the gap, reducing the gap size can improve the temperature gradient of the gas in the gap, and the thermal resistance of the heat switch operating in the 4~10 K range is reduced to 15 K/W. Additionally, the theoretical switching ratio can reach 1 100 when the gap size is reduced to 0.1 mm. The thermal insulation performance is primarily affected by the thermal conductivity and wall thickness of the support tube, with the wall thickness exerting the most significant effect. Additionally, increasing the operating temperature can enhance the thermal conductivity of the heat switch but deteriorates its thermal-insulation performance. Based on these findings, a gas-gap heat switch with a switching ratio of 822 is developed.

Keywords mK refrigeration technology; helium sorption cooler; gas-gap heat switch; heat transfer performance

近年来,随着我国科学技术的不断发展,一些先进的物理领域研究以及深空探测对极低温制冷机(mK 制冷机)的需求日益增多^[1-3]。例如量子计算机,其内部的量子芯片需要工作在几十 mK 以下来维持量子态的相干性,并且连接线缆也需工作在低温环境中降低系统热噪声^[4]。由于宇宙微波背景辐射的温度约为 2.7 K,因此用于空间天文观测的辐射热探测器、微量热器与超导量子干涉仪等低温探测器件

也需要工作在 mK 温区以提高探测精度^[5-6]。

目前,常用的极低温制冷技术包括绝热去磁制冷、稀释制冷以及氦吸附制冷机^[7-12]。相较于前者,氦吸附制冷机的结构简单、体积小、质量轻,且运行不依赖重力,无电磁干扰,非常适用于空间探测。图 1 所示为氦吸附制冷机的典型结构。

该类制冷机主要由吸附泵、泵管及蒸发/冷凝器组成,三者构成一个封闭体系,内部充注一定量的氦

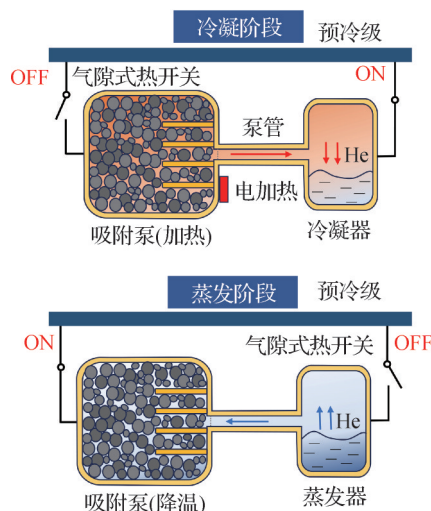


图1 氦吸附制冷机结构

Fig.1 Structure of helium sorption cooler

气。在工作过程中,加热吸附泵后,脱附出来的氦气会在低温的冷凝器内冷凝为液体,随后降低吸附泵温度,氦气被吸附泵内的多孔材料吸附,蒸发器内液氮上方的压力降低,促进液氮蒸发获得低温^[13]。可以看出,吸附泵与蒸发/冷凝器的温度调控是mK吸附制冷机工作状态切换的关键。

热开关是一种通过改变热阻来实现两物体之间导热(ON)与隔热(OFF)状态切换的部件,可有效控制物体温度,目前已在mK制冷系统中得到广泛应用。热开关一般可分为机械式、超导式和气隙式等。机械式热开关是利用金属与磁性材料在不同温度和磁场中的形变效应或是主动操作进行导热与隔热控制,但其接通需要较大的作用力,导热状态的传热性能受两端面接触状态的限制,无法调节,在空间应用受限。超导式热开关的工作原理是超导材料转变为超导体后热导率会发生明显变化,因此通过改变材料外部的磁场可控制两部件之间的传热性能,但应用温区受限,系统复杂,且无法实现完全绝热。气隙式热开关是通过改变冷/热端间隙内的导热气体的热导率(与气体压力相关)来实现导热与隔热,结构如图2所示。主要由冷端、热端、外侧的支撑管以及吸附泵组成。冷/热端使用无氧铜等高热导率材料制成,通常设计成同心圆柱结构以增大传热面积,强化传热。外侧采用不锈钢等低热导率的材料来进行密封与支撑。冷端、热端与支撑管之间存在间隙,间隙内充入导热气体。吸附泵内填充多孔吸附材料,通过改变吸附泵温度(调整多孔材料对导热气体的吸附量)就可调整热开关间隙内的气体压力实现工作状态切换。这类热开关无运动部件,结构简单,质量轻,在ON状态可通过改变吸附泵的温度对整体的传

热性能进行调整,常被应用于绝热去磁制冷、稀释制冷以及氦吸附制冷系统中^[14-16]。

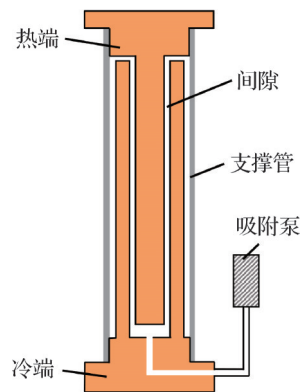


图2 气隙式热开关结构

Fig.2 Structure of the gas gap heat switch

目前气隙式热开关的研究集中在不同种类(氦气、氦气、氢气等)充注气体的热开关实验性能测试与结构设计方面。例如M. J. DiPirro等^[17]总结绝热去磁制冷机中气隙式热开关的开发工艺要求、导热气体的选择以及吸附泵的开启温度设计参数。I. Catarino等^[18]开发了工作在17~40 K的温度范围内的氦气隙式热开关,其在20 K时的开关比为220。D. Martins等^[19]实验测试了不同碳吸附剂对⁴He的吸附特性,通过建立计算模型进一步分析了相应气隙式热开关的驱动性能。J. Franco等^[20]基于结构材料热膨胀差,设计开发了一种间隙尺寸可达17 μm的气隙热开关。

气隙式热开关的工作性能对mK吸附制冷机的制冷效率影响显著。本文基于吸附制冷机的实际运行工况,通过分析热开关的热阻分布,研究工作温度与结构尺寸对其导热性能的影响,探究影响其导热与隔热性能的主要因素。随后根据计算结果,开展相关的实验研究,为气隙式热开关的性能优化提供方向。

1 气隙式热开关的理论分析

1.1 总传热模型

图3所示为气隙式热开关的热阻分布^[16]。其中 T_h 与 T_c 为冷端与热端的温度(K),相对应的热阻分别为 R_{c1} 与 R_{c2} , R_s 为外侧支撑管的热阻, R_g 为冷/热端壁面间隙内气体的热阻, R_r 为冷/热端之间的辐射热阻,单位均为K/W。

因此,整个气隙式热开关的总热阻如式(1)所示:

$$R = \frac{R_s \left(R_{c1} + R_{c1} + \frac{R_r R_g}{R_r + R_g} \right)}{R_s + R_{c1} + R_{c1} + \frac{R_r R_g}{R_r + R_g}} \quad (1)$$

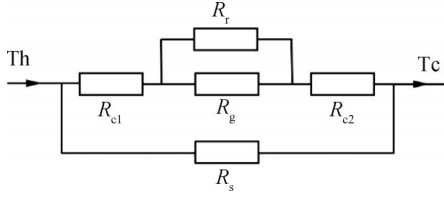


图3 气隙式热开关的热阻网络

Fig.3 The thermal resistance of the gas gap heat switch

在气隙式热开关工作时,这5部分热阻的大小关系如下,其中冷/热端的导热热阻基本相当,并且值最小,OFF状态下热开关间隙内的气体热阻最大。

$$R_{c1} \approx R_{c2} \quad (2)$$

$$R_{c1} < R_{g(ON)} \ll R_s \ll R_r \ll R_{g(OFF)} \quad (3)$$

基于上述关系,简化后可获得气隙式热开关在ON和OFF状态的总热阻与开关比:

$$R_{ON} = R_{c1} + R_{c2} + R_{g(ON)} \quad (4)$$

$$R_{OFF} = R_s \quad (5)$$

$$\frac{R_{OFF}}{R_{ON}} = \frac{R_s}{R_{c1} + R_{c2} + R_{g(ON)}} \quad (6)$$

由式(6)可知,气隙式热开关导通时,间隙内气体导热起主要作用,而OFF状态性能则主要由外侧的支撑管决定。

1.2 热阻模型

1.2.1 间隙内的气体热阻 R_g

气体的导热性能与气体的平均自由程和特征长度有关,可通过克努森准数 Kn 进行区分。

当 $Kn > 10$ 时,气体处于自由分子区,即高真空状态,此时气隙式热开关起到隔热(OFF)作用,间隙内气体的热阻如下^[16]:

$$R_{g(OFF)} = \frac{1}{\Omega \alpha p A} \quad (7)$$

式中: Ω 为与气体种类以及温度有关的常数,对于不同温度下的氦,其值为0.028; α 为热适应系数,与气体种类、温度以及壁面有关,目前只能通过实验获得; p 为压力,Pa; A 为传热面积, m^2 。

当 $0.01 < Kn < 10$ 时,气体处于过渡区。当其从自由分子状态向连续介质状态转变过程中,气体分子与壁面之间的碰撞对其传热能力的影响逐渐下降。

当 $Kn < 0.01$ 时,气体处于连续区,也称黏性区,此时气隙式热开关为导通状态(ON),在该范围内,间隙内气体的导热遵循傅里叶定律:

$$q = -\lambda(T) \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

如使用 $\bar{\lambda}_{gas}$ 表示气体的平均热导率($W/(m \cdot K)$),则相应的热阻如下:

$$R_{g(ON)} = \frac{d}{A \bar{\lambda}_{gas}} \quad (9)$$

式中: d 为间隙尺寸,m。

1.2.2 支撑管热阻 R_s

在气隙式热开关中,支撑管主要起到密封、支撑以及隔热作用,是影响气隙式热开关OFF状态性能的主要因素,该管通常采用低热导率的材料制成,相应的热阻可根据傅里叶导热定律获得^[10]:

$$R_s = \frac{l_s}{A \bar{\lambda}_s} \quad (10)$$

式中: l_s 为支撑管长度,m; $\bar{\lambda}_s$ 为支撑管的平均热导率, $W/(m \cdot K)$ 。

1.2.3 热/冷部件热阻 R_{c1} 和 R_{c2}

在气隙式热开关中,热量要先从热端顶部沿轴向传递,随后再通过间隙内气体传递到冷端,因此冷/热端热阻是限制热开关ON状态传热性能的主要因素,其计算如下^[16]:

$$R_{c1} \approx R_{c2} = \frac{l}{2A_{cu} \bar{\lambda}_{cu}} \quad (11)$$

式中: l 为冷/热端长度,m; A_{cu} 为横截面积, m^2 ; $\bar{\lambda}_{cu}$ 为冷端和热端的平均热导率, $W/(m \cdot K)$ 。

1.2.4 辐射热阻 R_r

对于气隙式热开关中同心圆柱结构的冷/热面,高温壁面与低温壁面间的辐射热阻如下^[10]:

$$R_r = \frac{T_h - T_c}{X_{c,h} A_c \sigma (T_h^4 - T_c^4)} \quad (12)$$

式中: A_c 为处于温度 T_c 的辐射面面积, m^2 ; σ 为黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; $X_{c,h}$ 为角系数。

1.3 结果分析

基于气隙式热开关传热模型进行计算分析,冷端环形圆柱的外径为10.7 mm,内径为8 mm,热端直径根据间隙尺寸获得。外侧支撑管材质为304不锈钢薄壁管,其内径为11.3 mm,长度为50 mm,内部充入⁴He气体。

图4所示为气隙式热开关冷端温度为4 K和不锈钢管壁厚为0.2 mm时,热端温度在10~50 K范围内不同间隙尺寸对热开关性能的影响。由式(8)可知,间隙越小,气体导热的温度梯度越大,传热效果更好。计算结果表明,当热端温度为30 K时,间隙尺寸从0.075 mm增至0.5 mm,气隙式热开关的ON状态热阻从5.91 K/W增至33.6 K/W,增至原来的5.7倍,热开关导热性能显著降低,开关比也从1 099降至196。当冷端温度一定时,间隙尺寸的改变对热开关ON状态热阻的影响会随着热端温度的升高而减弱,主要原因为间隙内气体的热导率会随着温度的升高

而增大。因此当气隙式热开关应用在较高温区时,可适当选择较大的间隙尺寸,反之在低温区要选择较小的间隙尺寸。

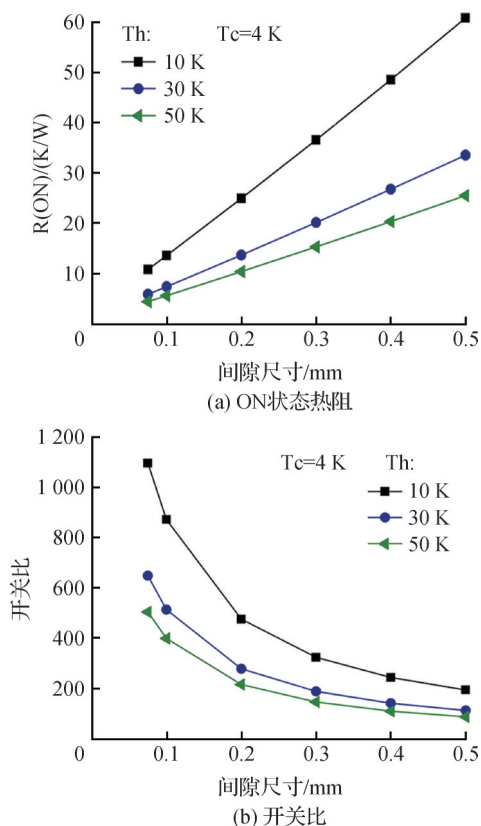


图4 间隙尺寸对气隙式热开关性能的影响

Fig.4 Influence of the gas gap size on the performance of the gas gap heat switch

不同冷端温度对热开关性能 ON/OFF 状态的热阻的影响如图 5 所示。当间隙尺寸为 0.1 mm 和不锈钢支撑管壁厚为 0.2 mm 时,随着冷端温度的升高,热开关在 ON/OFF 状态的热阻随之减小。当热端温度为 10 K,冷端温度从 4 K 升至 8 K,ON 状态的热阻从 13.7 K/W 降至 10.9 K/W,OFF 状态的热阻从 11 930 K/W 降至 8 759 K/W,热开关导热性能提高。这主要是由于在该温区内,氦气、无氧铜与不锈钢管的比热值会随着温度的升高而增大。当热端温度为 50 K 时,冷端温度从 4 K 升至 8 K,ON 状态的热阻从 5.7 K/W 降至 5.3 K/W,OFF 状态的热阻从 2 276.2 K/W 降至 2 103.3 K/W。对比可知,随着热端温度的降低,冷端温度的变化对热开关不同状态的热阻影响越明显。

气隙式热开关的隔热性能与支撑管直接相关,图 6 所示为冷端温度为 4 K、间隙为 0.1 mm 和不锈钢支撑管内径为 11.3 mm 的条件下,支撑管壁厚对热开关性能的影响。可以看出,随着不锈钢管壁厚的增加,热开关的隔热性能与开关比均有所下降,在热端

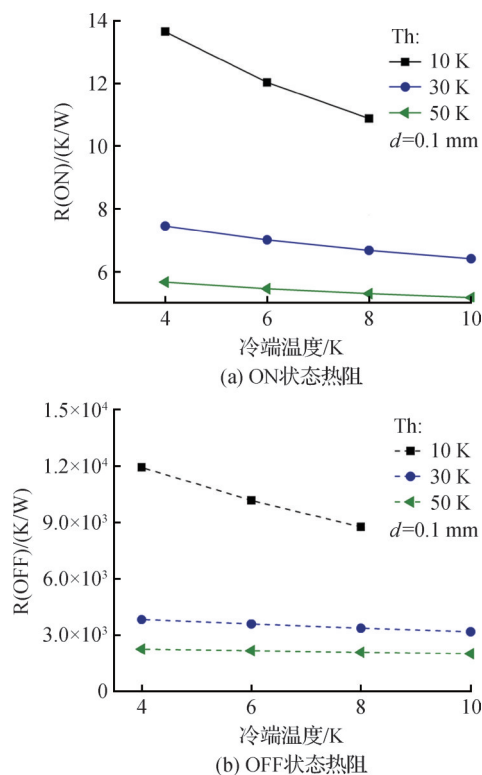


图5 冷端温度对气隙式热开关性能的影响

Fig.5 Influence of the temperature of the cold side on the performance of the gas gap heat switch

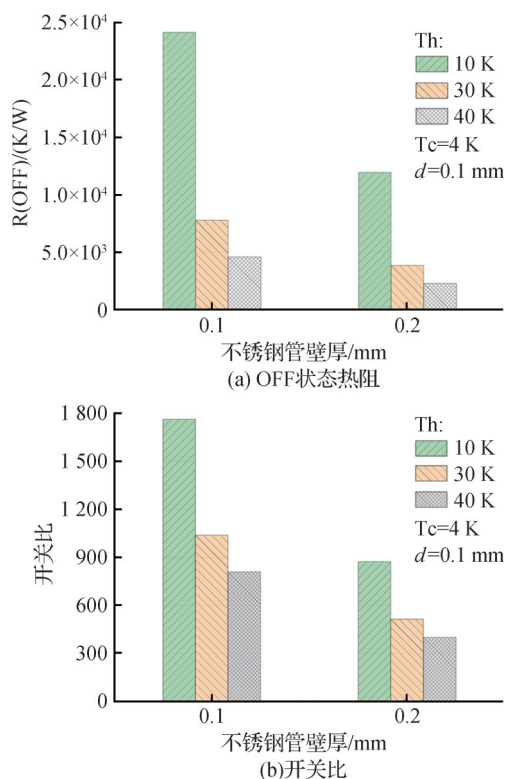


图6 不锈钢壁厚对气隙式热开关性能的影响

Fig.6 Influence of the stainless-steel wall thickness on the performance of the gas gap heat switch

温度为 10 K 时,不锈钢管壁厚从 0.1 mm 增至 0.2 mm,相应的 OFF 状态热阻从 24 070.6 K/W 变化为

11 930.7 K/W,开关比从1 763降至874。

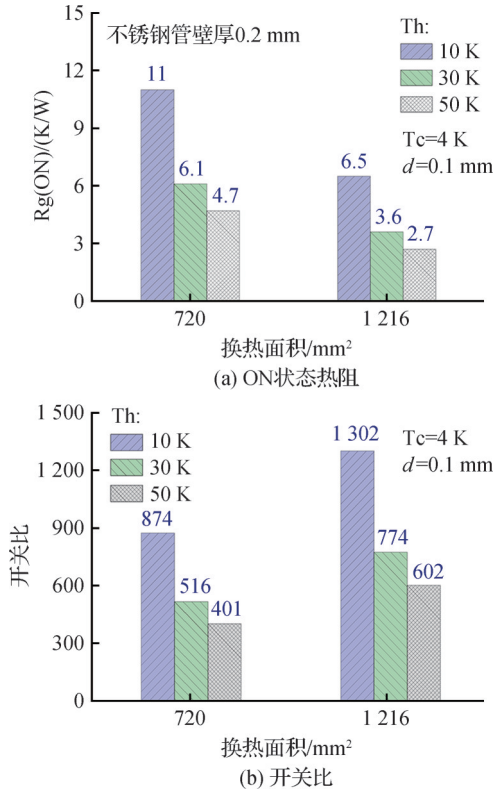


图7 传热面积对气隙式热开关性能的影响

Fig.7 Influence of the heat exchange area on the performance of the gas gap heat switch

2 气隙式热开关实验研究

基于上述计算分析,设计加工了不同尺寸的气隙式热开关,具体尺寸如表1所示。为测试热开关的传热性能,使用RDK 415D型两级GM制冷机为冷源,搭建如图8所示的测试装置。

气隙式热开关的冷端通过螺钉与低温冷头连接,吸附泵通过紫铜片与低温冷头连接,部件接触面填涂低温真空胶减少接触热阻;热开关冷端、热端以及吸附泵处各自均匀缠绕康铜加热丝,连接Maynuo的M9712直流电源进行控温,其分辨率及精度为0.1 mV/0.01 mA,最大功率300 W。

为稳定控制热开关性能测试的环境条件,采用不锈钢卷板与法兰氩弧焊成的真空罩将测试系统的低温侧围在封闭环境,利用KYKY110真空机组维持真空罩内的真空度,机组抽气速率标称为110 L/s,实验中最高真空可达 8.5×10^{-5} Pa。制冷机一级与二级冷头法兰处安装无氧铜辐射屏,并在其与热开关外侧包覆10层涤纶-镀铝箔膜复合多层绝热材料减少辐射漏热,稳定测试温度。

热开关的冷端、热端以及吸附泵3处安装中科院

低温中心计量站标定的工业级铯铁温度计,标定范围1.2~300 K,不确定度为0.1 K。铯铁温度计均采用NI-9217型板卡进行四线制测量,板卡将得到的模拟量转换成数字量,通过LABVIEW软件根据分度值实现数字信号至热力学参数的转变。在测试过程中,当温度稳定20 min后进行计数,结合直流电源显示的加热功率计算热开关的传热性能。

表1 设计加工的气隙式热开关的结构尺寸

Tab.1 The structure size of the designed gas gap heat switches

参数	1#热开关	2#热开关
冷端	外径:10.7 mm	外径:9.3 mm
	内径:8.0 mm	内径:8.0 mm
热端	直径:7.8 mm	直径:7.0 mm
不锈钢支撑管	壁厚:0.2 mm	壁厚:0.1 mm
	长度:50 mm	长度:50 mm
冷端/支撑管间隙	0.3 mm	1 mm
冷/热端间隙	0.1 mm	0.5 mm



图8 气隙式热开关性能测试装置实物

Fig.8 Photo of gas gap heat switch performance test device

图9所示为1#热开关的导热性能的计算值与实验测试值。可以看出,实际测得的ON状态的导热相较于理论值偏小,导通性能差,但随着热端温度的升高,与理论值越接近,产生差异的一个可能原因是计算中简化了模型,未考虑支撑管与辐射的热阻;OFF状态的实际导热明显高于理论值,热开关的实际隔热性能较差。原因可能在于铜部件和支撑管之间间隙小,未能保持良好的同轴度,部件之间产生了局部接触。

相较于1#热开关,2#气隙式热开关加大了各部件之间的间隙尺寸,其性能如图10所示。当冷端温度为4 K,热端温度为7.65 K时,其OFF与ON状态的

导热分别为 0.032 mW/K 与 26.3 mW/K, 相应的开关比为 822。加大部件间隙尺寸, 明显改善了热开关的隔热性能。

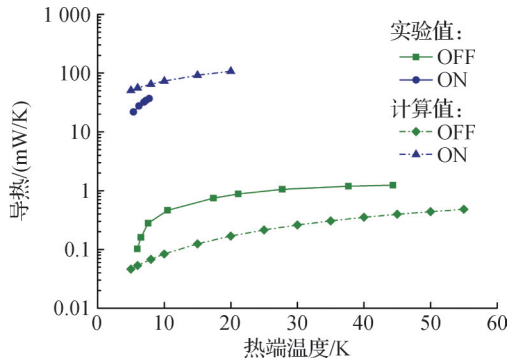


图9 1#气隙式热开关导热的计算值与实验值

Fig.9 Calculated and experimental values of thermal conductance of 1# gas gap heat switch

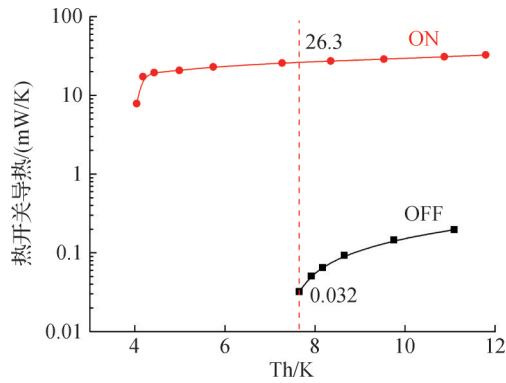


图10 2#气隙式热开关的吸附泵切换温度与导热性能

Fig.10 Switching temperature of sorption pump and thermal conductance of 2# gas gap heat switch

3 结论

为提高 mK 吸附制冷中气隙式热开关的工作性能, 基于热阻分布情况, 计算分析了不同间隙尺寸、支撑管壁厚、传热面积以及工作温度等参数对气隙式热开关导通状态(ON)与隔热状态(OFF)性能的影响。并利用 4 K 制冷机搭建了测试平台, 测试了不同结构尺寸和工作温区下热开关的实际传热性能, 得到结论如下:

1) 对于气隙式热开关, 其导通(ON)状态的性能主要取决于间隙内的气体导热, 间隙尺寸越小, 传热性能越好; 隔热(OFF)状态的性能主要取决于支撑管的隔热, 支撑管越长、壁厚越薄, 隔热性能越好。由于气隙式热开关各部件及内部气体的热导率会随着温度的升高而增大, 因此提高工作温区, 气隙式热开关的导通热阻与断开热阻均降低, 导热性能增强, 隔热性能变差。

2) 相较于理论计算值, 设计研制的 1# 气隙式热开关的实际的导通状态的热阻较大, 隔热状态的热阻较小, 整体性能有所下降。实测值与计算值之间产生差异的原因可能在于计算中忽略了辐射热阻, 以及实际装配及钎焊后, 部件之间可能存在点接触。2# 气隙式热开关加大了冷/热端之间的间隙尺寸与铜部件和支撑管之间的间隙尺寸, 隔热性能显著提升, 开关比可达 822。

综上所述, 气隙式热开关作为 mK 吸附制冷剂的核心部件之一, 其传热特性与内部气体状态和尺寸结构直接相关。为提高其工作性能, 可从吸附泵吸附量与导热气体充注量耦合调控、³He 及 ⁴He 导热气体对比筛选、先进机械加工与装配工艺以及结构设计等方面开展进一步研究, 提升 mK 吸附制冷机的工作性能。

本文受天津市企业科技特派员项目(24YDTPJC00490)和天津市教委科研计划项目(2024KJ079, 2024KJ081)资助。(The project was supported by the Tianjin Science and Technology Commissioner Program (No. 24YDTPJC00490) and Tianjin Municipal Education Commission Scientific Research Program (No. 2024KJ079 & No. 2024KJ081).)

参考文献

- [1] 戴巍, 潘腾, 赵鹏, 等. 主流极低温制冷技术简介与展望[J]. 制冷学报, 2024, 45(6): 1-13. (Dai Wei, Pan Teng, Zhao Peng, et al. Brief review of sub-Kelvin refrigeration technology [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(6): 1-13.)
- [2] 席肖桐, 王珏, 郑建朋, 等. 极低温制冷技术的发展与应用[J]. 低温与超导, 2019, 47(6): 1-10. (Xi Xiaotong, Wang Jue, Zheng Jianpeng, et al. Development and application of ultra-low temperature technology [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(6): 1-10.)
- [3] Chen Zhichao, Liu Ping, Li Yanan, et al. Advances on a SPTC/JTC/ADR system for sub-Kelvin cooling [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 168: 259-263.
- [4] Guan Xiang, Fan Jie, Bian Yongbo, et al. Experimental study on vibration reduction of a cryogen-free dilution refrigerator system pre-cooled by a GM cryocooler [J]. Cryogenics, 2024, 142: 103911.
- [5] 金海, 姜春阳, 沈俊, 等. 100 mK 以下二级绝热去磁制冷机的研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(2): 319-323. (Jin Hai, Jiang Chunyang, Shen Jun, et al. Research on a two-stage adiabatic demagnetization refrigerator with minimum temperature blow 100 mK [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(2): 319-323.)
- [6] Chen Liubiao, Liu Yanjie, Jin Hai, et al. Preliminary

- architecture of integrated cooling system for the HUBS mission [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray. Online Only, USA. SPIE, 2020: 223.
- [7] Zheng Wenshuai, Shen Jun, Zhao Ya'nan, et al. Optimization research of salt pill in an ultra-low temperature adiabatic demagnetization refrigerator [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124085.
- [8] Cheng Weijun, Li Zhiheng, Wang Yanan, et al. Detailed study of a condensation-driven dilution refrigerator reaching below 50 mK [J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 173: 201–211.
- [9] 郑茂文, 赵密广, 卫铃佼, 等. 稀释制冷机 ^3He - ^4He 混合溶液非稳态制冷过程研究 [J]. 低温工程, 2022(3): 19–26. (Zheng Maowen, Zhao Miguang, Wei Lingjiao, et al. Research on unsteady refrigeration process of ^3He - ^4He mixture in dilution refrigerator [J]. Cryogenics, 2022(3): 19–26.)
- [10] Shirron P J. Applications of the magnetocaloric effect in single-stage, multi-stage and continuous adiabatic demagnetization refrigerators [J]. Cryogenics, 2014, 62: 130–139.
- [11] Zu H, Dai W, de Waele A T A M. Development of dilution refrigerators—a review [J]. Cryogenics, 2022, 121: 103390.
- [12] Lei Yilin, Hong Guotong, Quan Jia, et al. Design and development of a 4He sub-Kelvin sorption cooler [J]. Cryogenics, 2024, 141: 103876.
- [13] Xi Xiaotong, Wang Jue, Chen Liubiao, et al. Progress and challenges of sub-Kelvin sorption cooler and its prospects for space application [J]. Journal of Low Temperature Physics, 2020, 199(5): 1363–1381.
- [14] Lei Yilin, Hong Guotong, Zhao Yanan, et al. Analysis and test of 4He gas-gap heat switch for a sub-Kelvin sorption cooler [J]. Cryogenics, 2023, 132: 103687.
- [15] Vanapalli S, Keijzer R, Buitelaar P, et al. Cryogenic flat-panel gas-gap heat switch [J]. Cryogenics, 2016, 78: 83–88.
- [16] Duband L. A thermal switch for use at liquid helium temperature in space-borne cryogenic systems [M]//Cryocoolers 8. Boston, MA: Springer US, 1995: 731–741.
- [17] DiPirro M J, Shirron P J. Heat switches for ADRs [J]. Cryogenics, 2014, 62: 172–176.
- [18] Catarino I, Bonfait G, Duband L. Neon gas-gap heat switch [J]. Cryogenics, 2008, 48(1/2): 17–25.
- [19] Martins D, Ribeiro L, Lopes D, et al. Sorption characterization and actuation of a gas-gap heat switch [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 171(2): 324–331.
- [20] Franco J, Galinhas B, de Sousa P B, et al. Building a thinner gap in a gas-gap heat switch [J]. Physics Procedia, 2015, 67: 1117–1122.

通信作者简介

席肖桐,女,讲师,天津商业大学机械工程学院,17812078162,E-mail:xixiaotong@tjcu.edu.cn。研究方向:极低温制冷技术、氦吸附制冷机与低温吸附传热传质特性等。

About the corresponding author

Xi Xiaotong, female, lecturer, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, 86–17812078162, E-mail: xixiaotong@tjcu.edu.cn. Research fields: ultra-low temperature refrigeration technology, helium sorption cooler and the heat and mass transfer characteristics of adsorption in low-temperature.