

以氦-4为唯一工质的1.8 K复合制冷机及其应用验证

党海政^{1,2,3,4,*}, 张涛^{1,3}, 赵帮健^{1,3}, 赵永江^{1,3}, 谭军¹, 谭涵^{1,3}, 薛仁俊^{1,3}, 张成俊⁵, 吕超林⁶, 李浩⁵, 尤立星⁵, 吴时光^{1,3} and 翟钰佳^{1,3}

Citation: [科学通报](#) **67**, 896 (2022); doi: 10.1360/TB-2021-1305

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-1305>

View Table of Contents: <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/67/9>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[以氦-3为工质的回热式气体制冷机性能分析](#)

Chinese Science Bulletin **55**, 3426 (2010);

[Experimental research on the J-T orifice of a space 4.5 K hybrid J-T cooler](#)

Chinese Science Bulletin **63**, 1839 (2018);

[13 K热耦合二级Stirling型脉管制冷机](#)

Chinese Science Bulletin **50**, 2046 (2005);

[Performance of a linear compressor driven JT cryocooler at liquid helium temperature](#)

Chinese Science Bulletin **65**, 750 (2020);

[采用复合吸附剂-氦的多功效热管型高效吸附制冷机](#)

Chinese Science Bulletin **50**, 2180 (2005);

以氦-4为唯一工质的1.8 K复合制冷机及其应用验证

党海政^{1,2,3,4*}, 张涛^{1,3}, 赵帮健^{1,3}, 赵永江^{1,3}, 谭军¹, 谭涵^{1,3}, 薛仁俊^{1,3}, 张成俊⁵, 吕超林⁶, 李浩⁵, 尤立星⁵, 吴时光^{1,3}, 翟钰佳^{1,3}

1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 上海量子科学研究中心, 上海 201315;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 上海铂钎制冷科技有限公司, 上海 201802;
5. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;
6. 赋同量子科技(浙江)有限公司, 嘉兴 314100

* 联系人, E-mail: haizheng.dang@mail.sitp.ac.cn

2021-12-14 收稿, 2022-02-17 修回, 2022-02-18 接受, 2022-02-22 网络版发表

国家自然科学基金(52076210)、上海市“量子信息技术”市级重大科技专项(2019SHZDZX01)、上海市产业协同创新项目(2019-jmrh2-kj2, 2021-cyxt2-kj09)和上海市科技创新行动计划(18511110102, 19511106802)资助

摘要 量子信息技术和深空探测等领域的蓬勃发展, 对2 K以下温区高可靠、长寿命、小型轻量化、高制冷效率低温制冷机的需求日益迫切, 高频脉冲管耦合Joule-Thomson(JT)的复合制冷循环是实现这一目标的重要手段. 目前国际上以该循环获得2 K以下温区的成功实践, 均是在脉冲管分系统使用氦-4而JT分系统使用氦-3作为循环工质的情况下获得的. 氦-3在地球上存量稀少、价格高昂, 是阻碍这一循环在更广范围内实用化的关键瓶颈. 本文对以氦-4为唯一工质的四级高频脉冲管耦合JT的复合制冷循环开展了理论与实验研究, 分析了基于该循环获取2 K以下温度的关键难点和可行性, 从采用间隙密封的直流线性压缩机的低压压力和多级间壁式回热器的低压侧压降损失入手, 理论预测出在40 kPa系统充气压力下可实现1.1 kPa的压缩机吸气压力和438.6 Pa的低压侧总压降, 从而能获得1.54 kPa的饱和蒸气压, 此时采用氦-4节流可实现1.78 K的制冷温度. 同时, 在氦-4超流态工况下, 分析了小界面温差的Kapitza热导对冷头蒸发器内超流氦热传递的影响, 并给出了在此基础上JT循环参数优化的限制条件. 设计出的制冷机的无负荷温度经过16.5 h从300 K降至1.8 K, 且在360 h连续运行时间内温度波动不超过±6 mK, 验证了理论的正确性和工质在超流状态下制冷温度的稳定性. 随后开展了与实际超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD)的耦合联试, 对SNSPD器件的系统探测效率和暗计数率的实际测试表明, 所研制复合制冷机在采用氦-4为唯一工质条件下, 依然可以为SNSPD提供1.84 K的工作温度以及良好的电环境, 使其保持稳定可靠的工作状态. 上述理论和实验突破不但将为SNSPD的未来空间应用提供可靠保障, 而且也将为彻底打破该类复合制冷循环在更广领域内的实用化瓶颈铺平道路.

关键词 复合制冷循环, 四级高频脉冲管, Joule-Thomson, 氦-4, 1.8 K, 超导纳米线单光子探测器

低温制冷机是指能够在120 K(或-153.15°C)以下温区获取有效制冷量的机械式制冷设备. 按照循环原理和热交换方式的不同, 它可分为间壁式和回热式两

大类.

间壁式制冷机使用间壁式换热器, 在循环中, 单向流动的冷、热流体被固体壁面分隔成两个单独的流道,

引用格式: 党海政, 张涛, 赵帮健, 等. 以氦-4为唯一工质的1.8 K复合制冷机及其应用验证. 科学通报, 2022, 67: 896-905

Dang H Z, Zhang T, Zhao B J, et al. A hybrid cryocooler achieving 1.8 K with He-4 as the only working medium and its application verification (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 896-905, doi: [10.1360/TB-2021-1305](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1305)

通过壁面进行热量交换。常用间壁式制冷机有Joule-Thomson(JT)、Brayton和Claude三种。间壁式制冷机要保证工质的单向流动,当采用闭式循环时,须在压缩机和膨胀机的进、出口分别设置单向阀控制气流方向。有阀压缩机影响了能量转化效率,所以在约40 K以上温区,间壁式制冷机的制冷效率要低于回热式制冷机。

回热式制冷机使用回热式换热器(回热器),在循环中,冷、热流体共用同一通道并在其中往复振荡,分别与回热填料进行热量交换。常用回热式制冷机有斯特林、Gifford-McMahon(GM)和脉冲管制冷机三种。实用化斯特林制冷机于1954年进入应用领域,20世纪80年代后,其应用扩展到太空。GM制冷机于1956年发明,它采用油润滑压缩机并引入旋转阀,可以实现较大制冷量和较低制冷温度,但它体积较大、振动干扰大,活塞易磨损,制冷效率低,油润滑有潜在污染,因而在重量、体积、能耗、振动、噪声、制冷效率、工作寿命等方面存在劣势。

脉冲管制冷机是回热式制冷机的重大革新^[1-3]。它在冷端取消了斯特林和GM制冷机所必需的运动排出器,实现了冷端的低振动、低干扰、无磨损和长寿命。根据驱动源的不同,常用脉冲管制冷机又分为斯特林型(或称高频)和GM型(或称低频)两种。低频脉冲管制冷机使用与GM制冷机相类似的频率为几赫兹的氦压缩机,因而热端也继承了其结构松散、工作寿命短和制冷效率低的缺点。高频脉冲管制冷机则使用频率高于20 Hz的线性压缩机。以线性压缩机的优秀代表牛津型压缩机为例,由于采用间隙密封和板弹簧支撑技术,理论上可彻底消除活塞与气缸之间的接触磨损以及由此产生的无用功耗^[4-6],因此高频脉冲管制冷机有望在冷、热两端同时实现长寿命、小型轻量和高制冷效率,近30年来一直是回热式制冷领域的研究热点。脉冲管循环的结构特点还赋予了它由单级扩展到多级时可靠性和寿命基本不受影响的独特优势:斯特林和GM制冷机的冷端都包含运动排出器,级数增加意味着运动部件增加,泄漏、磨损、疲劳和污染等失效机理也变得更加复杂,由于这些运动部件还处于低温区,问题更为棘手;而脉冲管循环的冷端是完全被动部件,扩展到多级时不存在上述问题,这也是航天、国防等对高可靠和长寿命有苛刻要求的特殊领域在20 K以下温区的多级循环常采用高频脉冲管循环的一大主因。目前高频脉冲管循环在液氦(4.2 K左右)以上温区已日趋成熟并在诸多领域得到了广泛应用^[1,7-9]。

但是,随着应用需求的进一步拓展,出现了一个无法回避的问题,即受限于回热式循环本身的工作原理,在液氦以下(特别是3 K以下)温区,以单纯的脉冲管循环已很难获得有效制冷。而近年来,对2 K及以下温区的高可靠、长寿命、小型轻量化、高制冷效率低温制冷机的需求却日益迫切,典型如:(1)在量子信息领域,单光子探测器是光子通信系统的核心部件之一,较之广泛应用的基于半导体的近红外单光子探测器件,基于超导体的超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD)在暗计数、探测效率、速度、抖动等方面有着显著优势^[10],但与前者可以在常温工作不同, SNSPD需要苛刻的2 K左右工作环境;(2)在深空探测领域,空间望远镜、类地行星探测卫星等深空探测手段以甚长波红外线、X射线等为主要探测目标,相关探测系统要么需要直接的2 K左右低温环境,要么需要以2 K左右低温环境作为mK温区制冷的前级预冷^[7,9]。

为此,人们又把目光转向间壁式循环,虽然其在40 K以上的制冷效率不能与回热式循环相比,但在10 K以下(尤其是4 K以下),工质的非理想等焓膨胀却显示出独特的制冷优势。于是,以回热式循环作为预冷(获取20 K以下)而间壁式循环作为终端(获取2 K以下)的复合制冷方式便被提出并付诸实施。如前所述,预冷级以多级高频脉冲管循环的优势最为明显,而未级的间壁式循环则多采用JT循环,其理由一是JT循环结构简单,二是它也有一个类似于脉冲管循环的优点,即冷端无运动部件,可以较容易实现终端的低振动、高可靠、长寿命和小型化。

1 国内外研究现状

国际上以多级高频脉冲管耦合JT的复合制冷循环获取1~2 K温区的研究,可以追溯到美国国家航空航天局于2001年启动的先进低温制冷机技术发展计划(Advanced Cryocooler Technology Development Program, ACTDP)^[7,9]。诺斯罗普·格鲁门空间系统公司(Northrop Grumman Aerospace Systems, NGAS)的三级高频脉冲管耦合JT的技术路线在激烈竞争中最终胜出,该方案中,脉冲管分系统采用氦-4而JT分系统采用氦-3作为循环工质^[8]。使用氦-3工质是为了较易获得更低温度,因为氦-4在2.17 K附近进入超流状态,其热力过程变得难以控制^[8,11],而氦-3在约2.6 mK才进入超流态。NGAS利用该方案在2007年获得了1.7 K低温,相关机型先后被

詹姆斯·韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST, 已于2021年12月25日发射升空)、“X星云”计划(Constellation-X)、国际X射线天文台(International X-ray Observatory, IXO)和宇宙膨胀实验探针(Experimental Probe of Inflationary Cosmology, EPIC)等深空探测计划所选用(复合制冷机为相关探测系统提供1~6 K级制冷或为其要求mK级制冷末级提供从常温到2 K左右的预冷),服务于其红外天文观测任务,并被直接用于冷却SNSPD等低温超导器件^[8,12]。ACTDP计划也带动了国际范围内20余年来极低温区空间制冷机的研究和应用,使其成为整个低温制冷领域的学科前沿和研究热点之一。

在国内,中国科学院理化技术研究所的相关团队曾采用两级高频脉冲管耦合JT的循环方案开展了复合制冷机的研究,但由于两级脉冲管分系统可获得的预冷温度不够低等原因,终端的实际无负荷温度尚未突破2.17 K(氦-4超流转变温度)^[13]。也有其他国内团队提出过类似复合制冷循环方案设想,但实验中预冷分系统采用GM制冷机替代,仅侧重于对JT分系统的研究,且实际终端温度尚在4.2 K以上^[14]。本研究团队于2018年提出以四级高频脉冲管耦合JT的复合制冷循环方案^[15],并在2020年以纯粹的四级高频脉冲管循环成功获取3.3 K^[16],较大幅度低于NGAS方案的10~18 K预冷温度^[8,12];之后对相关技术路线进一步深化^[17],在2021年实验获取了1.52 K^[18],优于NGAS于2020年的最新报道结果1.7 K^[19]。

需要指出,目前国际、国内上述复合制冷循环获得2 K以下温区的成功实践,均是在JT分系统内使用氦-3作为循环工质的情况下获得的。氦-3在地球上存量稀少(从大气和天然气中获取的氦中,氦-3含量仅为 $1/10^6 \sim 1/10^7$)、价格高昂,在特殊领域(如航天等)的少量使用尚可勉强接受,而更广泛应用就变得很不现实。近年来,随着量子信息技术以及深空探测领域的蓬勃发展,对2 K及以下温区的制冷需求量日益增大。可以设想,如果在JT分系统中也能以成本相对低廉的氦-4替代氦-3作为循环工质(亦即整个循环中以氦-4为唯一工质),则这一复合制冷循环在更广领域内的实用化瓶颈将有望得到根本解决。

2 复合制冷循环流程与结构布置

本研究提出的以氦-4为唯一工质获取2 K以下温度的复合制冷循环的系统结构及循环流程如图1所示。该

复合制冷循环由四级高频脉冲管分系统和JT分系统组成,二者通过热耦合连接。

四级高频脉冲管分系统由脉冲管压缩机、脉冲管、蓄冷器、惯性管、气库等部件组成,共包括四级冷指。其中,前两级冷指为同轴型热耦合,由一台压缩机驱动,其调相机构处于室温;第三、四级冷指分别为同轴型和直线型,由另一台压缩机驱动,第四级气库耦合在第三级冷头上形成自预冷结构;两台压缩机均为牛津型对置式动圈型交流线性压缩机^[4],为四级脉冲管分系统提供正弦压力波;四级脉冲管的冷头温度分别设定为80、40、20和10 K,第一、二、四级冷头分别为JT分系统提供前级预冷,其中第一、四级冷头还同时用作一级和二级冷屏的冷源。

JT分系统由四级JT压缩机组、四级逆流换热器(counter-flow heat exchanger, CHEX)、三级预冷换热器(precooling heat exchanger, PHEX)、旁通阀、JT阀、超流抑制器、蒸发器等部件组成。四级JT压缩机组包括4台与脉冲管压缩机类似的线性压缩机,但是在进气和出口均设置单向的簧片阀,将交流的正弦压力波转变为直流;三级PHEX分别布置在脉冲管分系统的第一、二、四级冷头上,四级CHEX用于使低压侧冷流体和高压侧热流体进行充分换热;旁通阀位于JT分系统末级的旁通回路中,与末级CHEX并联,用于实现蒸发器的快速降温;高压流体在经过JT节流后进入两相区,其中液相部分保持在蒸发器内,而气相部分进入低压侧循环,经过四级CHEX回到JT压缩机组的吸气口完成循环;在蒸发器前设置有超流抑制器,用于抑制超流状态的氦-4流体沿蒸发器壁面的反重力爬升。

3 理论分析

利用氦-4节流获取2 K以下温度,第一个核心问题是需要实现节流后的极低饱和蒸气压。具体而言,2.0 K对应的氦-3饱和压力为20.0 kPa^[20],而氦-4的相应值为3.13 kPa,有近一个数量级的降低。第二个核心问题是,氦-4在此温度下已经处于超流状态,需要考虑此特殊工况下工质的热力学特性。

针对第一个核心问题,为了获得节流后不高于3.13 kPa的低压,需要解决以下两个难点:(1)如图2所示,压缩机吸气口压力 P_D 是整个JT循环压力的最低点,要实现蒸发器出口处压力 P_C 不高于3.13 kPa,考虑 P_C 和 P_D 之间的压降, P_D 还要低于3.13 kPa。如此低压对压缩机的极限吸气压力提出了挑战,特别是对于采用间隙

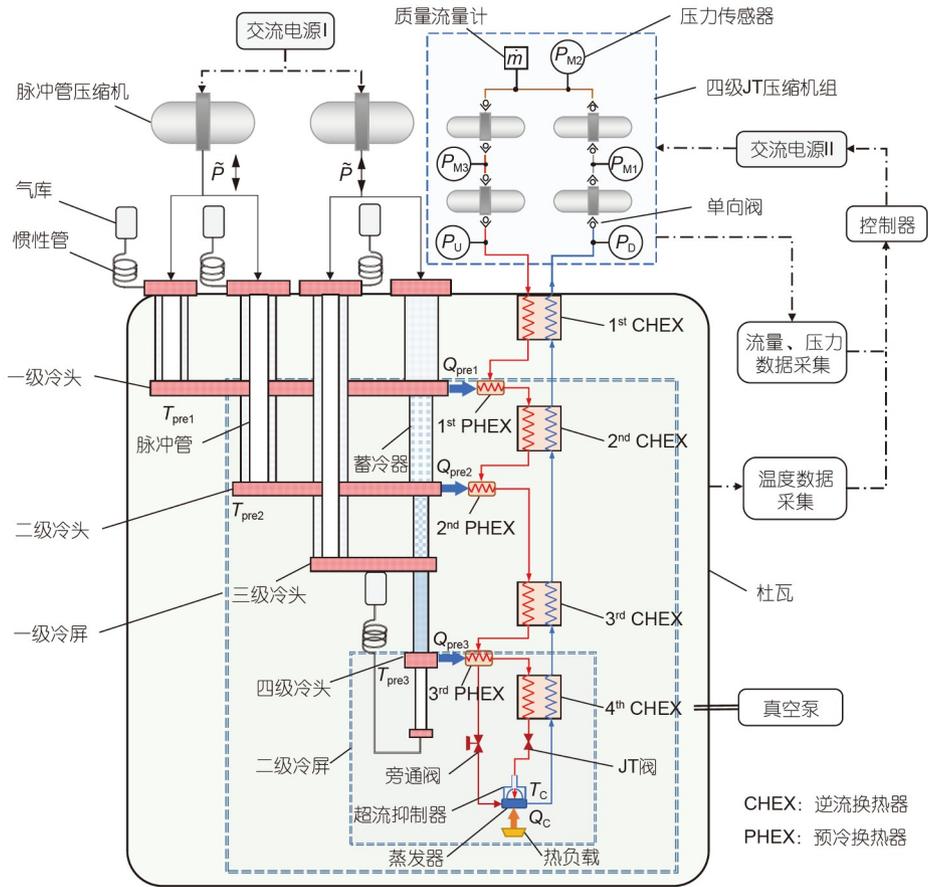


图 1 复合制冷循环系统结构及循环流程示意图
Figure 1 Schematic of the system structure and cycle flow of the hybrid cryocooler

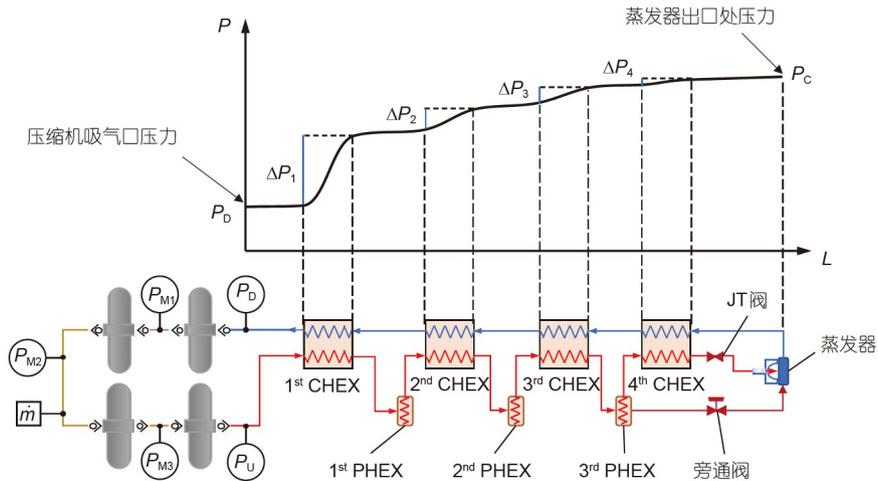


图 2 JT循环低压侧压力沿程变化示意图
Figure 2 Schematic of pressure change along the low pressure side of the JT cycle

密封技术的牛津型直流压缩机, 利用单向阀实现极低吸气压力尤为困难. (2) P_C 和 P_D 之间使用了四级间壁式

换热器, 通过它们的压降损失要尽可能小. 在保证多级换热器效率的前提下, 使低压侧的压降损失最小化是

另一大技术挑战。

3.1 压缩机低压压力分析

牛津型线性压缩机最初的设计是产生振荡的交流压力波，它主要用作斯特林或脉冲管等回热式制冷机的交流驱动源^[4-6]。这类压缩机在用作JT等间壁式制冷机的驱动源时，需要在进气和出气口均设置单向的簧片阀，如图1所示。

在质量流量一定时，影响多级牛津型线性压缩机压缩能力(压缩比及低压压力)的主要因素有两个：首先是低压级单向阀开启所需的绝对压力差。单向阀为一压差驱动型簧片结构，依靠正、反向压力差及簧片刚度决定单向阀开启与关闭状态。低压级线性压缩机所处工作压力较低，实测值为1.1~5.3 kPa范围，活塞往复运动所引起的气缸内绝对压差仅为4.2 kPa，压差绝对值过小对单向阀开启压力的设计提出了挑战。传统舌型、环形、半环形等单向阀的单悬臂结构开启压力较高^[21]，在低压级线性压缩机中出现簧片阀不能正常开启所引起的“喘息”现象^[22]，导致了低压压力高于系统设计值。经过对单向阀结构的优化，我们采用双悬臂结构将开启压力降低，使得该低压级压缩机在实测所得的4.2 kPa绝对压差下能够正常运行，降低了多级线性压缩机系统最终的低压压力。

影响多级牛津型线性压缩机压缩能力的另一个主要因素为低压级的间隙密封泄漏所引起的极限压缩比损失。由于气体间隙厚度处于微米级，间隙内的流动可视为层流，气流阻力 Z_f 可表示为^[5]

$$Z_f = \frac{\Delta P}{\mu V_{cg}} = \frac{12L_{cg}}{wt_g^3}, \quad (1)$$

其中， ΔP 为通过气隙的压力损失， μ 为气体黏度， V_{cg} 为通过气隙的体积流率， L_{cg} 为间隙长度， w 为间隙周向长度， t_g 为间隙厚度。

选取第一级压缩机整个压缩腔体内的气体工质为一个控制体积，其低压压力 P_L 为

$$P_L = \frac{V_D}{V_S + V_D} P_H + \frac{P_b(P_H - P_b)}{4\mu f Z_f (V_S + V_D)}, \quad (2)$$

其中， P_H 为高压压力即第二级吸气压力， V_D 为压缩后的余隙体积， V_S 为扫气容积， P_b 为背压腔体压力，近似有 $P_b = (P_H + P_L)/2$ ， f 为运行频率。

降低压缩机初始充气压力也有助于降低低压压力，但初始充气压力过低则会引起高压压力过小，导致节

流效应产生的制冷量不足以平衡冷端漏热，末级节流过程失衡。在实践中，选取充气压力 P_{ch} 不低于40 kPa。

图3展示了不同充气压力下 P_D 随 t_g 的变化情况。在给定的各充气压力下，当 t_g 小于11.6 μm 时， P_D 与 t_g^{-3} 近似为成正比关系。当 t_g 为5.4 μm 、充气压力为40 kPa时， P_D 的最低值可降至1.1 kPa，能实现在一定程度上低于3.1 kPa的目标；但如此小的 t_g 也对牛津型直流线性压缩机的设计制造提出了严峻的挑战(牛津型线性压缩机的 t_g 一般在10 μm 以上)。

3.2 间壁式回热器低压侧压降损失分析

根据上述分析，即使 P_D 可以降至1.1 kPa，要保证 P_C 不高于3.13 kPa，二者之间的沿程压降还要控制在2.03 kPa以下。本设计沿程有四级间壁式逆流换热器，温区分别为80~300、40~80、10~40以及2~10 K，其低压侧管道压降的微分形式 dP 表述为

$$dP = f \frac{dx}{D} \frac{\rho v^2}{2g}, \quad (3)$$

其中， dx 为沿程微分长度， f 为沿程摩擦系数， x 和 D 分别为换热器长度和当量直径； ρ 为流体密度， v 为流体流速， g 为重力常数。

JT循环回路中的质量流量^[23]为

$$\dot{m} = \Gamma \frac{\pi d^2}{4} \kappa^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{1 + \kappa} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \sqrt{\frac{MP_0^2}{RT_0}}, \quad (4)$$

其中， Γ 为偏离因子，与节流过程中的滞止压力 P_0 和滞止温度 T_0 有关，由于节流前流体速度非常小， P_0 和 T_0 近

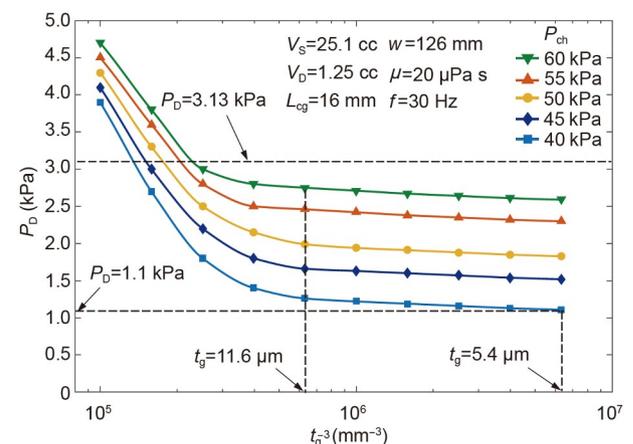


图3 不同充气压力下，间隙密封厚度对第一级压缩机低压压力的影响

Figure 3 Effect of clearance seal thickness on suction pressure of the first stage compressor under different charge pressures

似等于高压压力 P_H 和制冷温度 T_C ; d 为小孔直径, M 为流体摩尔质量, R 为普适气体常数, κ 为定压热容与定容热容之比.

将式(4)代入式(3)积分可得:

$$\Delta P = \int_0^L \frac{f\kappa d^4}{2g\rho[T(x)]D^5} \Gamma^2 \left(\frac{2}{1+\kappa} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \left(\frac{MP_0^2}{RT_0} \right) dx. \quad (5)$$

图4展示了在不同外管内径 D_{in} 条件下, 四级间壁式换热器流动阻力 ΔP_i 变化情况. 可见, 低压侧的流动阻力主要集中在第一级换热器内, 其占比达到50%以上.

根据上述分析, 当前两级换热器外管内径为6.0 mm、后两级为5.5 mm时, 计算所得四级换热器的低压管路总压降为438.6 Pa, 小于2.03 kPa的设计要求值. 结合3.1节的分析, 此时 P_C 可降至1.54 kPa, 对应的饱和温度为1.78 K. 上述结果意味着, 在所述复合制冷循环中, 利用合理的设计, 仅使用氦-4工质依然可以获得低于2.0 K的温度.

3.3 超流氦工况下的热力循环分析

针对前文提到的第二个核心问题, 在低于氦-4的超流转变温度后, 蒸发器内超流氦的形成不仅影响其与负载的传热, 还使得系统内热力循环参数分析及优化与正常状态情况下有着本质区别.

蒸发器内的液相超流氦与其周围固体表面之间存在着特殊的界面热导, 即Kapitza热导. 一般而言, 复合制冷机的热负荷为毫瓦量级, 由小热通量条件引起的固液温差 $\Delta T = T_S - T_{He}$ 远小于超流氦温度 T_{He} ($\Delta T \ll T_{He}$). 根据声失配理论^[24], 小温差界面的Kapitza热导为

$$h_K = \frac{16\pi^5 k_B^4 \rho_L c_L}{15 \hbar^3 \rho_S c_S^3} T_{He}^3 \quad (6)$$

其中, h_K 为Kapitza热导, k_B 为玻尔兹曼常数, \hbar 为约化的普朗克常数, ρ_L 和 ρ_S 分别为液体和固体的密度, c_L 和 c_S 分别为液体和固体的声速. 当固体壁面为光洁度非常好的无氧铜时, 简化的Kapitza热导可表示为^[24]

$$h_K \approx 0.9 T_{He}^3 \text{ kWm}^{-2}\text{K}^{-1}. \quad (7)$$

因此, 由铜表面通过Kapitza热导传递到超流氦的热量为

$$Q_K = h_K A \Delta T, \quad (8)$$

其中, A 为铜和超流氦的接触表面积. 为保证蒸发器能在稳定温度下为负载提供冷量, 应使 Q_K 不小于JT循环所产生的制冷量, 即满足以下条件:

$$Q_K \geq \dot{m} \times \min[q_L, \Delta h_{T_{pre}}]. \quad (9)$$

其中, q_L 为对应某一循环高压 P_U 和节流前温度 T_{BT} 下单位质量流量产生的液化潜热, $\Delta h_{T_{pre}}$ 表示相同 P_U 下对应预冷温度 T_{pre} 的积分等温节流效应^[17]. 需要注意的是, 在包含超流氦温区的JT循环冷端部分, 需保证节流前温度 T_{BT} 不低于超流转变温度 T_λ ^[25]. 根据3.2节的分析, 1.54 kPa饱和压力对应的超流氦温度为1.78 K, 在10 mW传热量和 $1.57 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 接触表面积情况下, 蒸发器壁面温度仅比超流氦温度高1.2 mK; 若节流前和预冷温度分别保持2.2和10 K, 则保证冷头温度稳定的优化高压压力为0.25 MPa, 对应的质量流量为2.46 mg/s, 具体计算方法可参见文献^[17].

4 实验结果及讨论

根据上述理论分析所设计制造的复合制冷机实物如图5(a)所示, 图5(b)给出了其低温端的细节照片. 实验中使用6个Cernox 1050温度传感器进行测温, 其中4个监控四级脉冲管冷头温度, 2个分别测量JT节流前和蒸发器的温度, 温度计测温范围为1.4~325 K.

4.1 降温过程

图6(a)为无负荷工况下制冷机的典型降温过程曲线. 实验中首先启动四级高频脉冲管制冷机, 此时旁通阀处于关闭状态; 2.3 h后启动JT制冷机, 同时打开旁通阀使蒸发器温度加速下降; 至13.5 h时第三级预冷温度降温趋缓, 蒸发器温度稳定在12 K左右, 此时关闭旁通

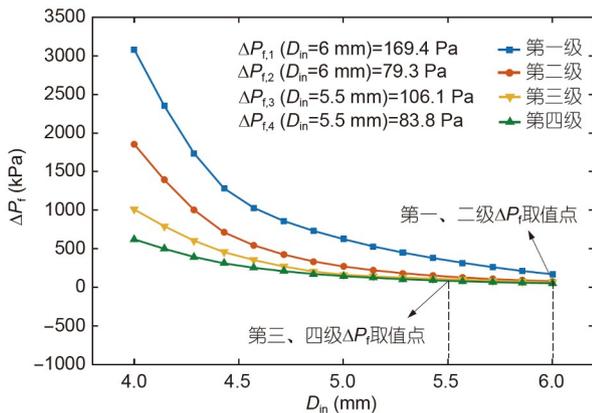


图4 间壁式逆流换热器低压侧压降随外管内径的变化关系
Figure 4 Variations of the counter-flow heat exchanger pressure drop on the low pressure side with the outer tube diameter

阀, 蒸发器温度加速下降, 至16.5 h时达到无负荷温度的最低值1.8 K, 此时三级预冷温度分别为80.6、40.5和10.2 K. 高频脉冲管和JT分系统的总输入功分别为410和48 W. 无负荷温度实验值略高于理论计算的1.78 K, 误差在可接受范围之内(相对偏差约1.12%). 为了评估制冷机在较长时间运行情况下的稳定性, 将该制冷机保持在上述工况下连续运行360 h, 监控结果如图6(b)所示, 冷头无负荷温度持续稳定在1.8 K, 最大波动不超过±6 mK, 意味着氦-4工质在超流状态下依然可以维持本复合制冷循环的稳定性.

4.2 所研制制冷机应用于冷却实际SNSPD器件时的性能评价

为了更加客观和全面地评价所研制复合制冷机的

性能, 将该制冷机应用于冷却实际SNSPD器件, 该器件由中国科学院上海微系统与信息技术研究所(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, SIMIT)尤立星团队提供. 图7(a)给出了SNSPD封装组件与杜瓦及冷屏的耦合结构示意图, 图7(b)和(c)给出了与制冷机冷头的耦合细节. 为使SNSPD工作在稳定的低温环境中, 在SNSPD封装组件和制冷机冷头之间附加了一个特制的不锈钢热沉. 使用该材质特制热沉主要基于如下两点考虑: (1) 其在2 K以下温度的线膨胀系数足够小^[26], 以保证SNSPD封装组件与其耦合之后具有较小的形变量, 从而尽可能地避免制冷机冷头对SNSPD封装组件造成机械拉伤; (2) 其在2 K以下温度的比热容也足够小^[27], 以保证其可以较快达到稳定工作温度, 从而使SNSPD能够更快地进入工作状态.

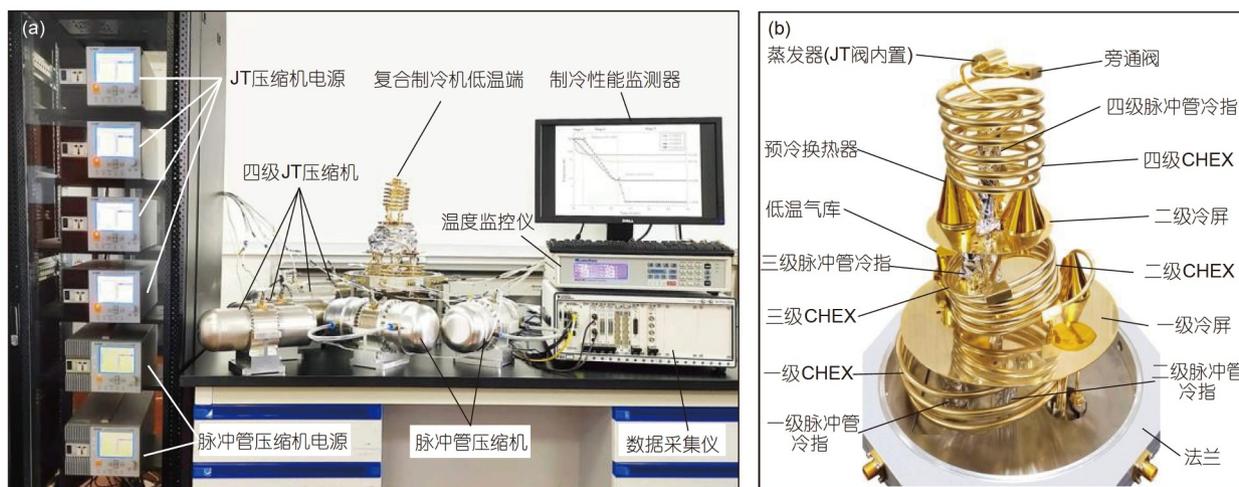


图5 复合制冷机实物图. (a) 实验系统实物图; (b) 低温端实物图
Figure 5 Photos of the actual hybrid cryocooler. (a) Experimental setup; (b) Cold ends

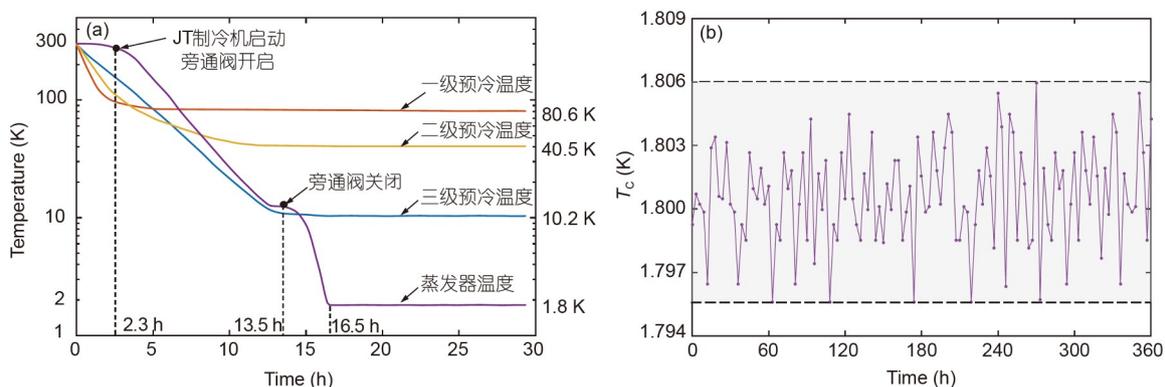


图6 复合制冷机典型降温曲线. (a) 降温过程曲线; (b) 冷头温度波动曲线
Figure 6 Typical cooling curves of the developed hybrid cryocooler. (a) Cooling process curves; (b) cold head temperature fluctuation curve

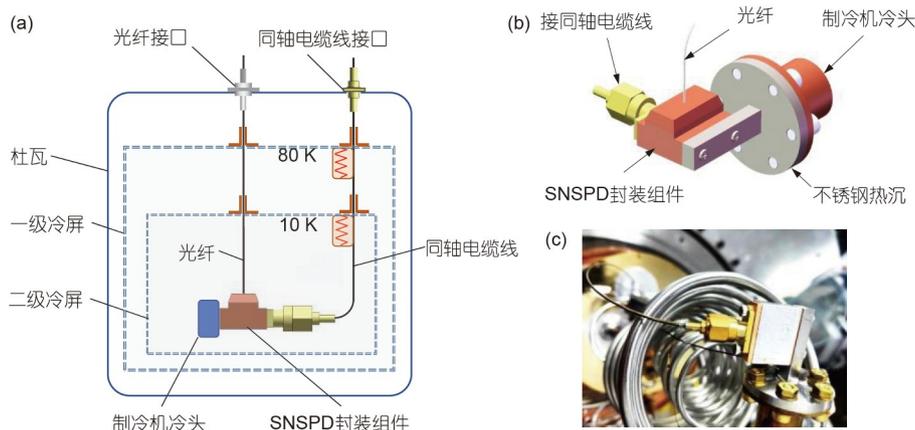


图7 SNSPD封装组件与复合制冷机的耦合。(a) 与杜瓦及冷屏耦合示意图；(b) 与制冷机冷头的热耦合细节；(c) 与制冷机冷头耦合实物图
 Figure 7 Coupling of the SNSPD package and hybrid cryocooler. (a) Schematic of the coupling with Dewar and cold shields; (b) thermal coupling with the cold head; (c) photo of the actual coupling with the cold head

SNSPD工作时的主要热负荷来源于金属材质的同轴电缆线，因此在电缆线通过两级冷屏时由复合制冷机的PHEX对其进行两级预冷。

如图8所示，该复合制冷机在负载单个SNSPD器件时，制冷机冷头温度稳定在1.84 K，最大温度波动小于±7 mK；此时SNSPD器件工作稳定，无其他电学噪声干扰。作为对比，图8同时给出了该SNSPD器件在SIMIT采用2.13 K的GM低温系统内的系统探测效率(system detection efficiency, SDE)和暗计数(dark count rate, DCR)随偏置电流变化曲线。可以看出，在2.13 K工作温度下，偏置电流为15 μA时，SDE为92.2%，DCR为39.7 Hz；在本文所研制的复合制冷机(SITP)所提供的1.84 K工作温度下，偏置电流为15 μA时，SDE约为92.3%，DCR为50 Hz。

对SNSPD器件SDE和DCR的测试结果表明，所研制复合制冷机在采用氦-4为唯一工质的条件下，依然可以为SNSPD提供1.84 K的工作温度以及良好的电环境，使其保持稳定可靠的工作状态。

5 结论

本文对以氦-4为唯一工质的四级高频脉冲管耦合JT的复合制冷循环进行了理论与实验研究，分析了基于该循环获取2 K以下温度的关键难点和可行性，理论预测出基于合理设计，依据上述循环方案，在不使用氦-3工质的情况下依然可以获得1.78 K的制冷温度。随后，从采用间隙密封的直流线性压缩机的低压压力、多级

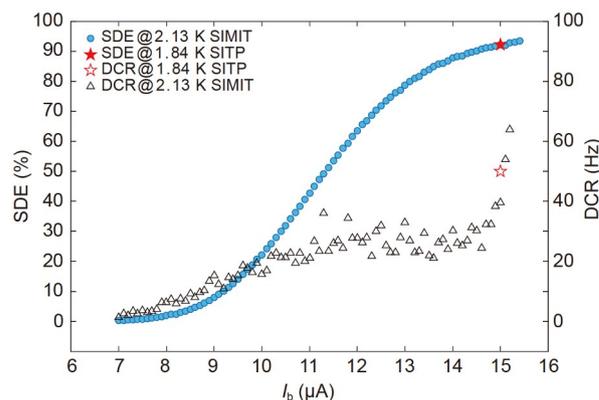


图8 SNSPD器件探测效率和暗计数随偏置电流的变化关系
 Figure 8 Variation of SNSPD device SDE and DCR with bias current

间壁式回热器的低压侧压降损失以及氦-4工质在超流状态下的热力学循环特性出发，设计制造了制冷机样机并耦合实际的SNSPD开展了实验验证。实验结果表明，样机的无负荷温度可以在16.5 h内从300 K降至1.8 K，且在360 h连续运行时间内温度波动不超过±6 mK，验证了理论分析的正确性和工质超流状态下制冷温度的稳定性；进而通过对SNSPD器件的系统探测效率和暗计数率的实验测试表明，所研制制冷机可以为SNSPD提供1.84 K的工作温度以及良好的电环境，使其保持稳定可靠的工作状态。上述理论和实验研究的突破，不但为SNSPD的未来空间应用提供了可靠保障，同时也将有力地促进该类复合制冷循环在更广领域的实用化。

参考文献

- 1 Radebaugh R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler. In: Proceedings of Institute of Refrigeration, 2000
- 2 Zhou Y, Han Y J. Pulse tube research. In: Proceedings of the 7th International Cryocooler Conference. Albuquerque: Air Force Phillips Laboratory, 1993, 7: 147–156
- 3 He Y L, Huang J, Zhao C F, et al. First and second law analysis of pulse tube refrigerator. *Appl Therm Eng*, 2006, 26: 2301–2307
- 4 Davey G. Review of the Oxford cryocooler. *Adv Cryog Eng*, 1990, 35: 1423–1430
- 5 Marquardt E, Radebaugh R, Kittel P. Design equations and scaling laws for linear compressors with flexure springs. In: Proceedings of the 7th International Cryocooler Conference. Albuquerque: Air Force Phillips Laboratory, 1993, 7: 783–804
- 6 Dang H Z. Development of high performance moving-coil linear compressors for space Stirling-type pulse tube cryocoolers. *Cryogenics*, 2015, 68: 1–18
- 7 Ross R G. Space coolers: A 50-year quest for long life cryogenic cooling in space. In: Timmerhaus K D, Reed R P, eds. *Cryogenic Engineering. International Cryogenics Monograph Series*. New York: Springer, 2006. 225–284
- 8 Raab J, Tward E. Northrop Grumman Aerospace Systems cryocooler overview. *Cryogenics*, 2010, 50: 572–581
- 9 Ross R G, Boyle R F. An overview of NASA space cryocooler programs—2006. In: Miller S D, Ross R G, eds. Proceedings of the 14th International Cryocooler Conference. Annapolis: International Cryocooler Conference, 2007, 14: 1–10
- 10 You L X. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information. *Nanophotonics*, 2020, 9: 2673–2692
- 11 Wang R Z. Criterion for quantum turbulence onset after rectangular heat pulse in superfluid helium. *Cryogenics*, 1995, 35: 883–886
- 12 Banks K, Angeli G Z, Cullum M J, et al. James Webb Space Telescope Mid-Infrared Instrument cooler systems engineering. In: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Washington: SPIE, 2008, 7017: 70170A
- 13 Liu Z, Ma Y, Quan J, et al. Development of a compact 2.17 K hybrid ^4He JT cryocooler for space applications. *Cryogenics*, 2021, 118: 103347
- 14 Liu D L, Gan Z H, de Waele A T A M, et al. Temperature and mass-flow behavior of a He-4 Joule-Thomson cryocooler. *Int J Heat Mass Transf*, 2017, 109: 1094–1099
- 15 Dang H, Zhang T, Zha R, et al. Development of 2-K space cryocoolers for cooling the superconducting nanowire single photon detector. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 1–4
- 16 Dang H Z, Zha R, Tan J, et al. Investigations on a 3.3 K four-stage Stirling-type pulse tube cryocooler. Part B: Experimental verifications. *Cryogenics*, 2020, 105: 103015
- 17 Zhang T, Dang H Z. Investigations on a 1 K hybrid cryocooler composed of a four-stage Stirling-type pulse tube cryocooler and a Joule-Thomson cooler. Part A: Theoretical analyses and modeling. *Cryogenics*, 2021, 116: 103282
- 18 Dang H Z, Tan H, Zhang T, et al. A 1-2 K cryogenic system with light weight, long life, low vibration, low EMI and flexible cooling capacity for the superconducting nanowire single-photon detector. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2021, 31: 1–5
- 19 Petach M, Michaelian M, Nguyen T. Modifications to the MIRI cryocooler design to provide significant lift in the 2K to 4K range. *IOP Conf Ser-Mater Sci Eng*, 2020, 755: 012018
- 20 Sato Y, Sawada K, Shinozaki K, et al. Development of 1K-class Joule–Thomson cryocooler for next-generation astronomical mission. *Cryogenics*, 2016, 74: 47–54
- 21 Kim J, Wang S, Park S, et al. Valve dynamic analysis of a hermetic reciprocating compressor. In: Proceedings of International Compressor Engineering Conference. Purdue: Purdue University, 2006. 1–10
- 22 Bradshaw C R. A miniature-scale linear compressor for electronics cooling. Doctor Dissertation. West Lafayette: Purdue University, 2012
- 23 Maytal B Z. Real gas choked flow conditions at low reduced-temperatures. *Cryogenics*, 2006, 46: 21–29
- 24 Sciver V. *Helium Cryogenics*. 2nd ed. New York: Springer, 2012. 288–289
- 25 Jahromi A E, Miller F K. Modeling, development, and experimental validation of a Joule–Thompson superfluid refrigerator using a pulse tube cryocooler. *Cryogenics*, 2014, 61: 15–24
- 26 Ekin J W, Zimmerman G O. *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements*. New York: Oxford University Press, 2006. 572–573
- 27 Ventura G, Perfetti M. *Thermal Properties of Solids at Room and Cryogenic Temperatures*. Dordrecht: Springer, 2014. 69–70

Summary for “以氦-4为唯一工质的1.8 K复合制冷机及其应用验证”

A hybrid cryocooler achieving 1.8 K with He-4 as the only working medium and its application verification

Haizheng Dang^{1,2,3,4*}, Tao Zhang^{1,3}, Bangjian Zhao^{1,3}, Yongjiang Zhao^{1,3}, Jun Tan¹, Han Tan^{1,3}, Renjun Xue^{1,3}, Chengjun Zhang⁵, Chaolin Lü⁶, Hao Li⁵, Lixing You⁵, Shiguang Wu^{1,3} & Yujia Zhai^{1,3}

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

² Shanghai Research Center for Quantum Sciences, Shanghai 201315, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ Shanghai Boreas Cryogenics Co., Ltd, Shanghai 201802, China;

⁵ Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

⁶ Zhejiang PHOTEC Quantum CO., Ltd, Jiaxing 314100, China

* Corresponding author, E-mail: haizheng.dang@mail.sitp.ac.cn

With the rapid development of the quantum information technology and deep space exploration, there is an increasing demand for cryocoolers featuring high reliability, long operation lifetime, small scale, lightweight and high cooling efficiency, while the hybrid cooling cycle formed by the multi-stage high frequency pulse tube and the Joule-Thomson (JT) is an important approach to the problem. To date, over the world, the temperatures below 2 K with the above cycle have all been achieved by the use of He-4 in the pulse tube subsystem while He-3 in the JT subsystem. However, He-3 is rare and expensive, which is the key bottleneck of hindering the wide application of the cooling cycle. This paper makes theoretical and experimental investigations on the hybrid cooling cycle formed by the four-stage high frequency pulse tube and the JT, in which the pulse tube subsystem acts as the precooler while the JT subsystem as the final cooling stage. The distinctive feature of the hybrid cooling cycle is that in the entire system the He-4 is the only working medium. The key difficulty and feasibility of achieving temperatures below 2 K with the above hybrid system have been analyzed. Based on the suction pressure of the first stage compressor and counter-flow heat exchanger (CHEX) pressure drop on the low pressure side, it was predicted that with the charge pressure of 40 kPa, the suction pressure and the gross pressure drop can reach 1.1 kPa and 438.6 Pa, respectively, and thus a saturated vapor pressure of 1.54 kPa is obtained, which makes it feasible to achieve a no-load temperature of 1.78 K. Meanwhile, we theoretically analyzed the effect of the Kapitza conductance for a small interfacial temperature difference on the heat transfer in the cold head evaporator with He II, and then achieved the limiting condition of the parameter improvement for the JT cycle. The no-load temperature of the developed hybrid cryocooler dropped from 300 K to 1.8 K in 16.5 hours, and the temperature fluctuation was no higher than ± 6 mK during the 360 hours of continuous operation time, which validates the above theoretical analyses and the satisfactory temperature stability of the superfluid helium medium. In order to comprehensively and objectively evaluate the performance of the developed hybrid cryocooler in practical applications, the experiment of coupling it with the actual superconducting nanowire single-photon detector (SNSPD) was conducted subsequently, in which the SNSPD performance was evaluated by measuring the system detection efficiency (SDE) and dark count rate (DCR). The results indicate that the developed cryocooler can provide effective cooling at 1.84 K and the favourable electrical environment, which ensures the SNSPD to work stably and reliably. It is the first time that an operating temperature below 2 K was reported with the similar hybrid cooling cycle using He-4 as the only working medium, especially when an actual SNSPD was coupled. This breakthrough will not only make it feasible for the future space application of the SNSPD, but also pave the way to break the bottleneck of its wide application in a variety of fields.

hybrid cooling cycle, four-stage high frequency pulse tube, Joule-Thomson, He-4, 1.8 K, superconducting nanowire single-photon detector

doi: [10.1360/TB-2021-1305](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1305)