

文章编号: 2095-4980(2022)01-0090-07

超导单光子探测器用 1~2 K 制冷机热力学优化

张涛^{1,2}, 赵帮健^{1,2}, 谭军¹, 赵永江^{1,2}, 谭涵^{1,2}, 薛仁俊^{1,2}, 党海政^{*1,2,3}

(1.中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.上海量子科学研究中心, 上海 201315)

摘要: 对工作在1~2 K的超导纳米线单光子探测器(SNSPD)用多级脉冲管预冷焦耳-汤普逊(JT)的复合制冷机制冷性能进行了系统的热力学优化研究。阐述了该复合制冷机的结构设计和工作机理; 基于热力循环分析提出了焓流模型, 同时建立了适用于3 K以下温区的实际流体质量流量模型, 并将二者结合, 分析复合制冷机的性能; 探讨了理想情况下净制冷量随末级预冷温度和上游压力的变化特性, 应用所提出的模型通过离散参数拟合方法对二者进行优化。发现对于He-4和He-3工质, 多级脉冲管末级最优预冷温度分别为11 K和8 K; 以He-4为工质, 该复合制冷机能在2.2 K的温度下提供85 mW以上的制冷量; 以He-3为工质, 能在1.0 K提供18.5 mW的制冷量, 该性能能够满足SNSPD的实际应用需求。

关键词: 超导纳米线单光子探测器; 1~2 K复合制冷机; 热力学优化

中图分类号: TB661

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020541

Thermodynamic optimization on the 1–2 K hybrid cryocooler used for cooling Superconducting Nanowire Single Photon Detectors

ZHANG Tao^{1,2}, ZHAO Bangjian^{1,2}, TAN Jun¹, ZHAO Yongjiang^{1,2}, TAN Han^{1,2}, XUE Renjun^{1,2}, DANG Haizheng^{*1,2,3}

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

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

3.Shanghai Research Center for Quantum Sciences, Shanghai 201315, China)

Abstract: The systematic thermodynamic optimization on the cooling performance of the hybrid cryocooler composed of multi-stage pulse tube and Joule-Thomson(JT) working at 1–2 K for cooling the Superconducting Nanowire Single Photon Detectors(SNSPD) is carried out. The structure design and working mechanism are described. An enthalpy flow model is proposed based on the thermodynamic cycle analysis, and a real fluid mass flow model for the temperature region below 3K is established. The two models are combined to analyze the hybrid cryocooler performance. The variations of the gross cooling capacity with the last stage precooling temperature and upstream pressure under ideal conditions are discussed and the proposed model is utilized to optimize the two variables by discrete parameter fitting method. For He-4 and He-3 working fluids, the optimal last stage precooling temperature of the multi-stage pulse tube is 11 K and 8 K, respectively. The results show that the hybrid cryocooler with He-4 as the working fluid can provide more than 85 mW cooling capacity at 2.2 K, and that with He-3 as the working fluid can provide 18.5 mW cooling capacity at 1.0 K. The performance of the hybrid cryocooler can meet the requirement of the practical applications of SNSPD.

Keywords: Superconducting Nanowire Single Photon Detectors; 1–2 K hybrid cryocooler; thermodynamic optimization

近年来,我国在空间量子信息技术领域取得了飞速发展^[1-2],其中单光子探测器在量子密钥分发和空间量子通信等方面发挥着重要作用。基于低温超导体的超导纳米线单光子探测器(SNSPD)以其暗计数低、探测效率高、

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52076210); 上海市市级科技重大专项资助项目(2019SHZDZX01)

*通信作者: 党海政 email:haizheng.dang@mail.sitp.ac.cn

速度快、抖动小等优点在上述领域具有广泛的应用前景^[3-4]。但 SNSPD 需大约 2 K 的温度才能正常工作,且温度的进一步降低对其系统探测效率的提升有显著影响,如 NbN-SNSPD,当温度为 2.1 K 时,波长 1 550 nm 处系统探测效率超过 90%^[4]。如此低的制冷温度对低温系统提出了更为严峻的挑战。

一些多级机械制冷机,如商用两级 Gifford-McMahon(GM)制冷机可持续提供约 2.2 K 的最低无负荷温度,但由于其冷端存在运动部件,导致了振动、磨损、噪声等诸多问题,其连续运行时间仅约为 8 000 h,且极易对探测器产生干扰。此外,大质量和大输入功率也限制了其在空间中的应用。与 GM 制冷机相比,脉冲管制冷机在冷端没有任何运动部件,具有高可靠、长寿命、低振动等显著优势^[5-6]。由线性压缩机驱动的脉冲管制冷机^[7]可在热端实现更长时间的连续运行,可以满足空间应用的需求。但对于超过 20 Hz 以上高频运行的脉冲管制冷机,由于其固有的回热式循环形式以及氦气工质在低温下的非理想气体特性,即使采用多级结构也难以达到 2 K 温区。T Nast 等于 2008 年报道了一台最低无负荷温度为 3 K 的四级脉冲管制冷机^[8];2020 年, H Z Dang 等也对一台四级脉冲管制冷机进行了详细的理论和实验研究,其最低无负荷温度为 3.3 K^[9-10]。

相比之下,应用氦气工质在低温下节流制冷效应的回热式焦耳-汤普逊(JT)制冷机更易于获得 2 K 以下的制冷温度,并产生探测器所需的冷量。类似于高频脉冲管制冷机, JT 制冷机冷端也没有任何运动部件。此外,为其提供高低压力的直流压缩机结构也类似于脉冲管所用的线性压缩机。因此,以多级脉冲管为预冷级、JT 制冷机为最终 2 K 制冷级的复合制冷机能够以更高效、可靠的方式满足 SNSPD 的应用,特别是空间应用。2009 年, M Petach 等开发了一台三级脉冲管预冷 JT 复合制冷机,使用 He-3 工质,最低温度达到 1.7 K^[11-12];2019 年, H Z Dang 等也报道了类似的复合制冷机,用于冷却 SNSPD,预计可实现 1.6 K 的低温^[13]。但前面的这些研究主要集中在对该类复合制冷机的结构设计及实验结果,缺乏内部机理的深度分析,因此本文针对 SNSPD 用 1~2 K 多级脉冲管预冷 JT 复合制冷机展开研究。

1 结构设计

图 1 和图 2 分别为三级脉冲管预冷 JT 复合制冷机和四级脉冲管预冷 JT 复合制冷机的结构图。前者由一台气耦合型三级脉冲管制冷机和 JT 循环回路组成,二者又以热耦合的形式连接在一起,三级脉冲管冷指和 JT 回路中均使用 He-4 作为工质,以获取 2 K 的制冷温度;后者由一台四级脉冲管制冷机和 JT 循环回路组成,二者同样以热耦合的形式连接,均使用 He-3 为工质,以获取 1 K 的低温。

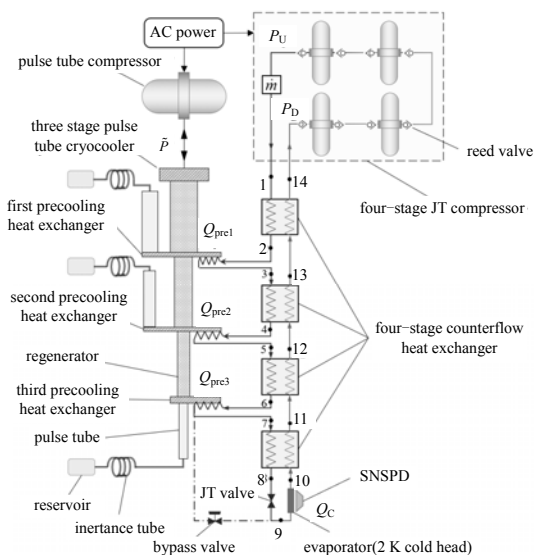


Fig.1 Schematic of the three-stage pulse tube precooling JT hybrid cryocooler
图 1 三级脉冲管预冷 JT 复合制冷机结构图

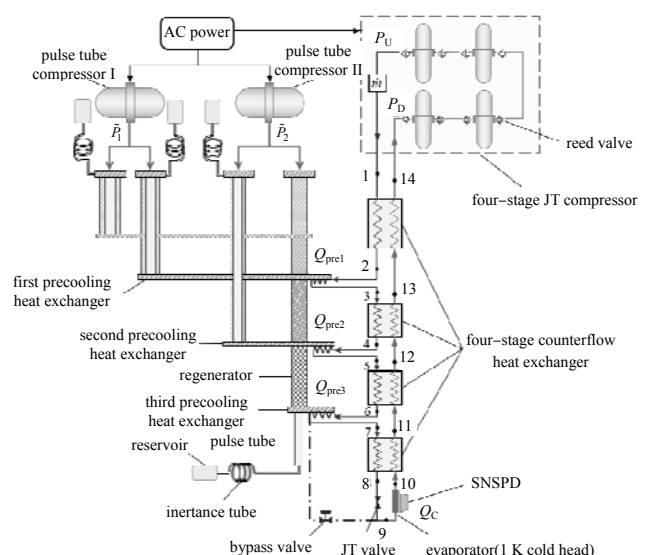


Fig.2 Schematic of the four-stage pulse tube precooling JT hybrid cryocooler
图 2 四级脉冲管预冷 JT 复合制冷机结构图

如图 1 所示,在三级脉冲管预冷 JT 复合制冷机中,作为前级预冷的三级气耦合型脉冲管制冷机由一台往复线性压缩机和三级脉冲管冷指组成,前者为后者提供高频交变振荡气流。三级脉冲管冷指包括蓄冷器、脉冲管、惯性管、气库等多个部件,三级冷头直接作为预冷换热器,为 JT 循环回路提供 3 个预冷温度,由高到低分别为 T_{pre1} 、 T_{pre2} 和 T_{pre3} 。JT 循环回路包括四级 JT 压缩机、四级间壁式逆流换热器、旁通阀、节流阀以及蒸发器等部件。

其中, 四级 JT 压缩机由 4 台往复式线性压缩机组成, 每台压缩机的前后均设置簧片阀, 以使交变振荡气流转变为单向气流。经过四级压缩, 为 JT 循环提供近百倍的稳定高低压。四级间壁式逆流换热器采用管套管形式, 对高低压气流进行高效换热, 换热效率均大于 97%。旁通阀用于加速循环回路的冷却, 蒸发器作为 2 K/1 K 冷头, 直接为 SNSPD 提供所需制冷温度和制冷量。

如图 2 所示, 四级脉冲管预冷 JT 复合制冷机在结构布置与上述三级脉冲管预冷 JT 复合制冷机相似, 不同的是, 作为前级预冷的热耦合型四级脉冲管制冷机结构更为复杂, 包含 2 台脉冲管压缩机、4 个冷指及 4 个冷头。由于所耦合的 JT 循环回路使用 He-3 作为工质, 为获取 1 K 低温, 采用后 3 个温度较低的冷头作为预冷换热器。

2 热力循环分析

在 2 K 和 1 K 的复合制冷机中, JT 制冷机均直接产生最低温并提供制冷量, 因此, 本文重点针对 JT 循环回路进行热力学优化分析。

2.1 焓流模型

图 3 为压焓图, 展现了单位质量流量工质在 JT 制冷机内的热力循环过程。其中数字 1~14 与图 1 和图 2 中的各位置相对应。由于 He-4 和 He-3 工质的压焓特性相似, 因此该循环同时适用于两种制冷机的热力过程分析。

JT 回路中的高低压, 即上下游循环压力分别为 P_U 和 P_D , 三级预冷温度由高到低分别为 T_{pre1} , T_{pre2} 和 T_{pre3} , 环境温度为 T_H , 制冷温度为 T_C 。流经循环回路的 He 工质在相应位置处的焓值分别为 $h_1 \sim h_{14}$ 。 $h_{1D}, h_{3D}, h_{5D}, h_{7D}$ 为与高压侧位置同温度的低压侧焓值。四级间壁式逆流换热器内的理想回热量分别为 $\delta h_1, \delta h_2, \delta h_3$ 和 δh_4 。稳态工况时, 质量流量为 \dot{m} 的 He 工质经过四级间壁式逆流换热器和三级预冷换热器降温至节流前温度 T_8 , 经过节流过程等焓膨胀进入两相区 9 点, 温度降为 $T_C (=T_{10})$, 压力由 P_U 降到制冷温度所对应的饱和蒸汽压 P_D 。在蒸发器中, 产生的液相部分作为制冷量冷却探测器, 汽化后的饱和蒸汽再经过四级间壁式逆流换热器冷却来流的高压高温气体, 最终回温到 T_{14} 。焓流模型的建立基于以下几点假设: a) 循环过程中 P_U 和 P_D 均保持不变, 即无流动压降; b) 无外部漏热损失; c) He 工质经过预冷换热器冷却后, 温度与脉冲管冷头温度相同, 即有 $T_3 = T_{pre1}, T_5 = T_{pre2}, T_7 = T_{pre3}$; d) 四级间壁式逆流换热器的效率均为 100%。

针对单位质量流量的工质, 根据热力学第一定律, 得到各预冷换热器中的单位预冷量和单位制冷量表达式:

$$q_C = h_{7D} - h_7 \quad (1)$$

$$q_{pre3} = (h_{7D} - h_7) - (h_{5D} - h_5) = q_C - (h_{5D} - h_5) \quad (2)$$

$$q_{pre2} = (h_{5D} - h_5) - (h_{3D} - h_3) = q_C - q_{pre3} - (h_{3D} - h_3) \quad (3)$$

$$q_{pre1} = (h_{3D} - h_3) - (h_{1D} - h_1) = q_C - q_{pre3} - q_{pre2} - (h_{1D} - h_1) \quad (4)$$

容易发现, 单位制冷量与三级单位预冷量之间存在如下关系:

$$q_C = q_{pre1} + q_{pre2} + q_{pre3} + \Delta h_{T_H} \quad (5)$$

式中 Δh_{T_H} 为环境温度下氦气的等温节流效应, 为一负值。两侧均乘质量流量可得:

$$Q_C = Q_{pre1} + Q_{pre2} + Q_{pre3} + \dot{m} \Delta h_{T_H} \quad (6)$$

式(6)表明, JT 循环回路产生的制冷量在数值上等于各级预冷换热器所获得的预冷量之和减去一个与常温端相关的余项, 这也说明 JT 制冷机的制冷量本质上来源于预冷制冷机。

对第四级逆流换热器、节流阀、蒸发器所组成的末级制冷端进一步分析。式(1)表明, 单位制冷量是上游压力和第三级预冷温度的二元函数。受高低压侧回热量能量守恒的制约, 热平衡条件下单位制冷量由式(7)决定:

$$q_C = \begin{cases} \Delta h_T & (\Delta h_T < q_L) \\ q_L & (q_L < \Delta h_T) \end{cases} \quad (7)$$

式中: Δh_T 为温度 T_{pre3} 时的等温节流效应; q_L 为液化部分的潜热。式(7)表明, 对于某一末级预冷温度, 存在最优上游压力使单位制冷量取得最大。

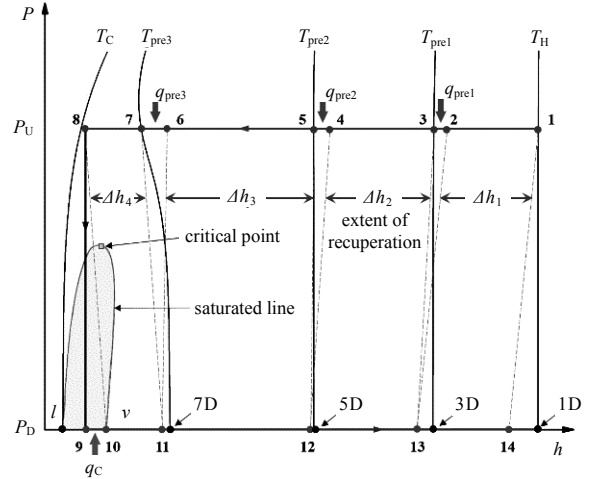


Fig.3 Thermodynamic cycle of the JT cooler in the Pressure-Enthalpy ($P-h$) plane

图 3 JT 制冷机热力循环压焓图

图 4 和图 5 分别为对应 He-4($T_c=2.2$ K)和 He-3($T_c=1.0$ K)工况下的最优上游压力 $P_{U,opt}$ 、最优单位制冷量 $q_{C,opt}$ 随末级预冷温度的变化图, He-4 和 He-3 循环的下游压力分别为 5.33 kPa 和 1.16 kPa。由于 He-4 和 He-3 工质的最大转变温度分别为 43 K 和 34 K, 临界温度分别为 5.2 K 和 3.3 K, 因此在计算过程中, 二者的预冷温度变化范围分别限定在 5~40 K 和 4~34 K。在该温度范围内, 每隔 1 K 的预冷温度进行一次离散参数计算。

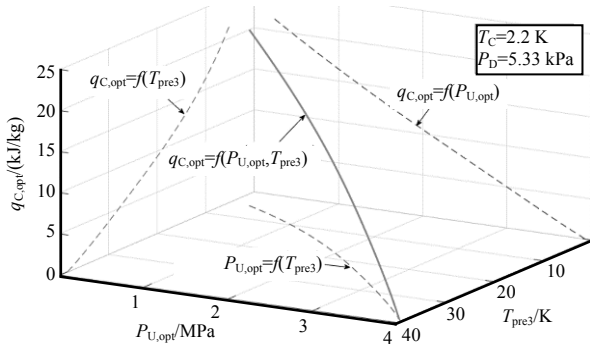


Fig.4 Variations of the optimal specific cooling capacity and optimal upstream pressure with the last stage precooling temperature for He-4 at $T_c=2.2$ K

图 4 He-4 工质在 2.2 K 制冷温度工况下最优单位制冷量与最优上游压力随末级预冷温度的变化

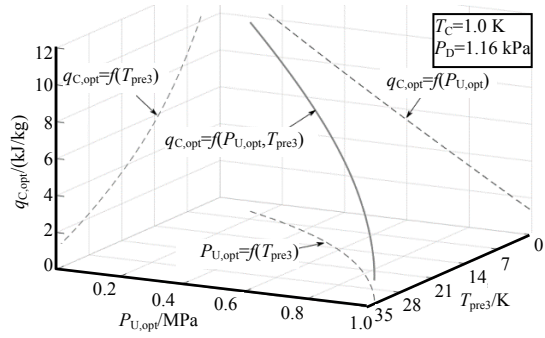


Fig.5 Variations of the optimal specific cooling capacity and optimal upstream pressure with the last stage precooling temperature for He-3 at $T_c=1.0$ K

图 5 He-3 工质在 1.0 K 制冷温度工况下最优单位制冷量与最优上游压力随末级预冷温度的变化

对于 He-4 和 He-3 工质, 最优单位制冷量和最优上游压力随末级预冷温度的变化呈现相同的规律, 随着末级预冷温度的降低, 最优上游压力也降低, 对应的最优单位制冷量也越大。上游压力的减小意味着高温端四级 JT 压缩机排出压力的降低, 因此末级预冷温度对 JT 压缩机的设计存在间接影响, 降低末级预冷温度对复合制冷机整体性能的提升具有极为重要的作用。为便于计算, 同时保证计算精确度, 两种工质最优上游压力与末级预冷温度的关系均采用 4 次方函数拟合:

$$P_{U,opt} = a_0 + a_1 T_{pre3}^1 + a_2 T_{pre3}^2 + a_3 T_{pre3}^3 + a_4 T_{pre3}^4 \quad (8)$$

对于 He-4 和 He-3, 式(8)中的系数如表 1 所示。该拟合函数以连续函数的形式直接将最优上游压力与末级预冷温度联系起来, 以代替上述每隔 1 K 的离散参数计算, 形式更为简洁。其拟合的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)为 0.005, 表明此 4 次方拟合精确度良好。

表 1 式(8)中的系数值
Table1 Coefficients in Eq.(8)

| | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 |
|------|-------|-------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| He-4 | -0.86 | 0.25 | 7.24×10^{-3} | 1.63×10^{-4} | -1.46×10^{-6} |
| He-3 | -0.10 | 0.07 | -2.37×10^{-3} | 4.88×10^{-5} | -4.30×10^{-7} |

2.2 实际流体质量流量模型

流体工质经过节流阀的过程可视为一维可压缩流体绝热通过截面积很小的小孔, 由于节流前流体的速度非常小, 因此可认为其处于滞止状态, 其绝热温度和绝热压力分别为 $T_0(=T_8 \approx T_c)$ 和 $P_0(\approx P_U)$ 。流体在通过小孔时速度 V 不断增加, 总焓保持不变, 且没有熵产, 而压力的大幅下降导致其当地声速持续减小, 在到达小孔时流体速度与当地声速相等, 即马赫数为 1, 该状态一般称为临界状态, 流体达到阻塞条件并决定了其质量流量。在实际情况中, 由于节流前后的压力比远远大于临界压力比, 因此流动都会达到阻塞条件。

理想气体在阻塞条件下的质量流通密度定义为通过单位面积的质量流量:

$$G^{ID}(T_0, P_0) \equiv \frac{\dot{m}^{ID}}{A} = \kappa^{1/2} \left(\frac{2}{1+\kappa} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \sqrt{\frac{MP_0^2}{RT_0}} \quad (9)$$

式中: A 为通道的最小截面积, 即小孔面积; M 为 He 的摩尔质量; R 为普适气体常数; κ 为定压热容与定容热容之比。由于 He 工质在低温下的非理想效应十分显著, 因此实际的质量流通密度 G 需修正为:

$$G = G^{ID} \times \Gamma(P_0, T_0) \quad (10)$$

式中 Γ 为偏离因子, 与滞止压力和滞止温度有关。

将 He-4 和 He-3 的偏离因子拓展到 3 K 以下温区, 如图 6 和图 7 所示。以 He-4 为例, 对某一固定的滞止温度, 随着节流前滞止压力的升高, 偏离因子先大幅度升高再缓慢下降。在 0.1 MPa 的低滞止压力区, 滞止温度越高, 则偏离因子升高的幅度越小。对于 2.2 K 的滞止温度, 滞止压力为 0.015 MPa 时, 偏离因子达到 10 以上。一般情况下, 循环回路的上游压力, 即节流前滞止压力为 0.5~2 MPa, 此范围内, 2.2 K 滞止温度对应的偏离因子范围为 1.05~1.55, 而 3.0 K 滞止温度对应的偏离因子范围为 1.3~1.8, 因此在 0.5 MPa 以上的高滞止压力区, 偏离因子随滞止温度的上升而升高。

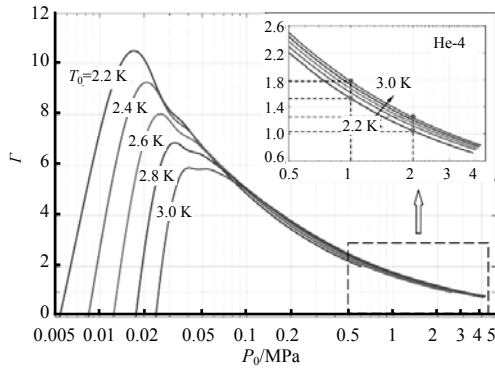


Fig.6 Deviation factor as a function of inlet stagnation pressure and temperature for He-4
图 6 He-4 工质偏离因子随滞止压力和滞止温度的变化关系

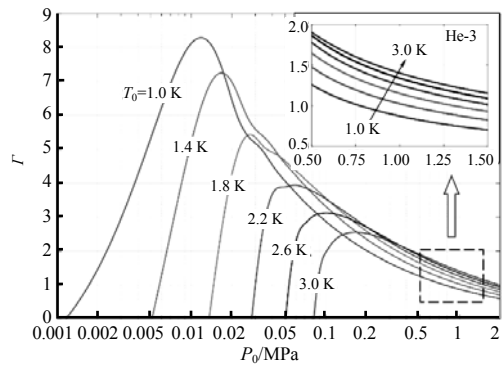


Fig.7 Deviation factor as a function of inlet stagnation pressure and temperature for He-3
图 7 He-3 工质偏离因子随滞止压力和滞止温度的变化关系

将偏离因子代入式(10),可得到对应不同制冷温度和上游压力的实际流体质量流通密度函数的图谱, He-4 的实际质量流通密度的图谱如图 8 所示。He-3 工质偏离因子的变化规律与之类似,在此不再赘述。对于不同的制冷温度,实际质量流通密度随上游压力的升高呈现相似的变化规律,在低压力区, G 受偏离因子的影响较大,因此非线性变化程度明显;在高压力区,偏离因子对 G 的影响减弱,因此 G 随上游压力的非线性变化程度减弱。

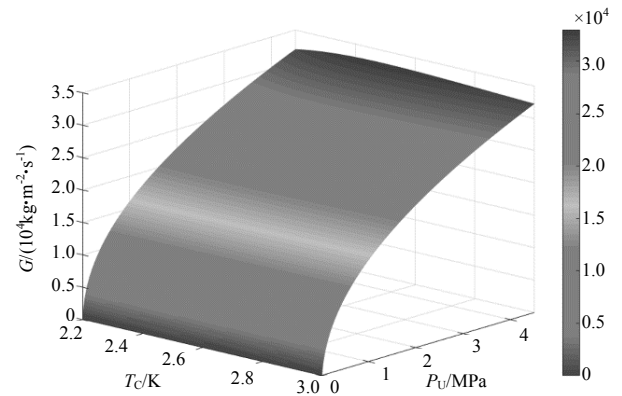


Fig.8 Real gas mass fluxes of He-4 under different stagnation states
图 8 不同滞止状态下 He-4 的实际质量流通密度

3 复合制冷机净制冷量优化

通过对 JT 循环回路的热力学分析,建立单位制冷量的焓流模型,并通过实际流体质量流通密度对理想质量流量模型进行修正,将二者结合,可得到复合制冷机的净制冷量:

$$Q_c = q_c \dot{m} = \frac{\pi}{4} d^2 G(T_c, P_U) q_c(T_c, T_{pre3}, P_U) \quad (11)$$

可见,净制冷量是关于制冷温度、上游压力、末级预冷温度、节流孔径的复合函数。

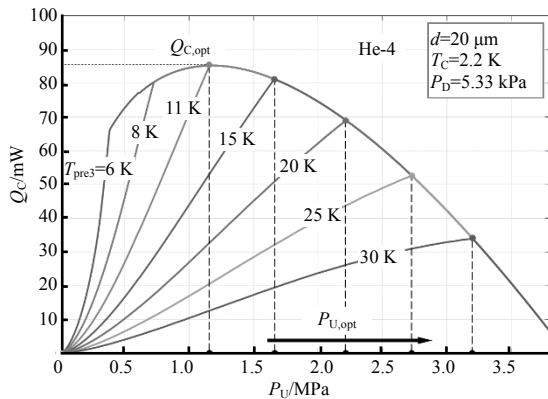


Fig.9 Relationships among the gross cooling capacity, upstream pressure and last stage precooling temperature for He-4 at $T_c=2.2$ K
图 9 He-4 工质在 2.2 K 制冷温度下的净制冷量与上游压力和末级预冷温度的关系

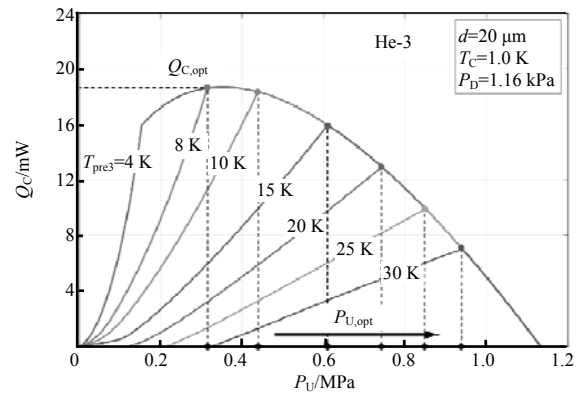


Fig.10 Relationships among the gross cooling capacity, upstream pressure and last stage precooling temperature for He-3 at $T_c=1.0$ K
图 10 He-3 工质在 1.0 K 制冷温度下的净制冷量与上游压力和末级预冷温度的关系

在 $20 \mu\text{m}$ 的节流孔径条件下,以 He-4 和 He-3 作为工质的 2 K 和 1 K 复合制冷机净制冷量随末级预冷温度和上游压力的变化分别如图 9 和图 10 所示。对于不同的末级预冷温度,2 K 和 1 K 复合制冷机净制冷量随上游压力的升高先增加后减小,总是存在某一最优上游压力值使净制冷量达到最大。计算过程中,仍采用 2.1 节提出的离散参数拟合方法,每隔 1 K 的预冷温度进行一次计算后,再进行连续性拟合,图中仅展示了部分预冷温度所对

应的净制冷量。

对于 He-4 工质, 制冷温度为 2.2 K, 当末级预冷温度小于 11 K 时, 最优净制冷量均为 85.23 mW, 这意味着 11 K 下, 末级预冷温度的进一步降低不能使净制冷量继续增加; 当末级预冷温度大于 11 K 时, 最优净制冷量随预冷温度的升高而减小, 其对应的最优上游压力则升高, 并且最优净制冷量的值与末级预冷温度为 11 K 时总制冷量变化曲线相重合。其原因在于: 对不同的预冷温度, 当上游压力大于最优上游压力时, 其单位制冷量都是由 5.33 kPa 的饱和压力所对应的潜热制冷量决定。末级预冷温度为 11 K 时, 对应优化上游压力为 1.2 MPa。

同理, 对于 He-3 工质, 1.0 K 制冷温度下其最优净制冷量为 18.5 mW, 对应末级预冷温度为 8 K, 此时优化上游压力为 0.36 MPa。在保持 1.16 kPa 的下游压力和优化的 8 K 末级预冷温度条件下, 该 1 K 复合制冷机能够通过适当增高上游压力获取 24 mW@1.4 K, 29 mW@1.6 K 和 34 mW@2.2 K 的净制冷量, 如图 11 所示。

由于氦气工质的节流制冷温度仅取决于下游饱和压力, 不同工况下间壁式回热的节流制冷循环具有相似性, 因此 2 K 和 1 K 理论模型具有普适性。具体来说, 基于 He-4 工质的 2 K 模型适用于 2.2~5.195 3 K 的制冷温度, 即超流氢转变温度至临界点温度; 同理, 基于 He-3 工质的 1 K 模型适用于 1.0~3.315 7 K(He-3 临界温度)的制冷温度。表 2 为国际上已研制的复合制冷机性能与本文模型计算数据对比, 其中第一组为英国卢瑟福·阿普尔顿实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)与欧洲航天局(European Space Agency, ESA)合作, 使用 He-4 为工质的复合制冷机性能, 其制冷温度为 4.35 K^[14]; 第二组为日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)使用 He-4 为工质所研制复合制冷机原理样机性能, 制冷温度为 4.5 K^[15]; 第三组和第四组均为 JAXA 使用 He-3 为工质所研制的原理样机性能, 制冷温度均为 1.68 K^[15-16]。通过对比可以发现, 在上游压力、末级预冷温度、制冷温度和节流孔径相同的情况下, 4 组数据中理论模型的质量流量与实验值相对误差均小于 7%, 而制冷量的相对误差在 10%左右, 考虑到实际情况中换热器的效率低于模型假设的 100%(一般在 97%左右), 因此该对比证明了本文所建立 2 K 和 1 K 模型的合理性。

表 2 复合制冷机实验数据与模型理论计算数据对比

Table 2 Comparison of experimental data and model theoretical data of the hybrid cryocooler

| group | item | working fluid | upstream pressure/MPa | last-stage precooling temperature/K | cooling temperature /K | JT orifice / μm | mass flow rate/(mg/s) | cooling power/mW |
|---------------------|----------------|---------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| 1 (RAL&ESA,1995) | actual value | He-4 | 1.0 | ~17 | 4.35 | 12 | 3 | 11 |
| | modeling value | He-4 | 1.0 | 17 | 4.35 | 12 | 2.8 | 12.2 |
| | relative error | — | — | — | — | — | 6.67 % | 10.9 % |
| 2 (JAXA,2008) | actual value | He-4 | 1.999 | 17.52 | 4.5 | 24 | 8.66 | 50.1 |
| | modeling value | He-4 | 1.999 | 17.52 | 4.5 | 24 | 8.2 | 54.6 |
| | relative error | — | — | — | — | — | 5.3 % | 9.0 % |
| 3 (JAXA,2004) | actual value | He-3 | 0.62 | 13.34 | 1.68 | 20 | 2.52 | 11 |
| | modeling value | He-3 | 0.62 | 13.34 | 1.68 | 20 | 2.66 | 12.2 |
| | relative error | — | — | — | — | — | 5.56 % | 10.9 % |
| 4 (JAXA,2008) | actual value | He-3 | 0.589 6 | 11.81 | 1.68 | 20 | 2.647 | 16 |
| | modeling value | He-3 | 0.59 | 11.81 | 1.68 | 20 | 2.81 | 17.6 |
| | Relative error | — | — | — | — | — | 6.2 % | 10.0 % |

4 结论

本文对工作在 1~2 K 的 SNSPD 用多级脉冲管预冷 JT 的复合制冷机制冷性能进行了系统的热力学优化研究。详细阐述了使用 He-4 获取 2.2 K 制冷温度和使用 He-3 获取 1.0 K 制冷温度的复合制冷机的结构设计和工作机理。首先, 对大温差下多级 JT 制冷循环回路进行了系统的热力循环分析并提出了焓流模型; 其次, 特别考虑 He 工质在低温下的非理想气体特性, 应用偏离因子对理想质量流量模型进行修正, 提出了更为接近实际的质量流量模型; 最后, 将焓流模型和实际流体质量流量模型结合, 分析复合制冷机净制冷量的变化规律, 重点探讨了无热损失情况下复合制冷机净制冷量随末级预冷温度和上游压力的变化特性。在优化过程中, 均采用离散参数拟合的方

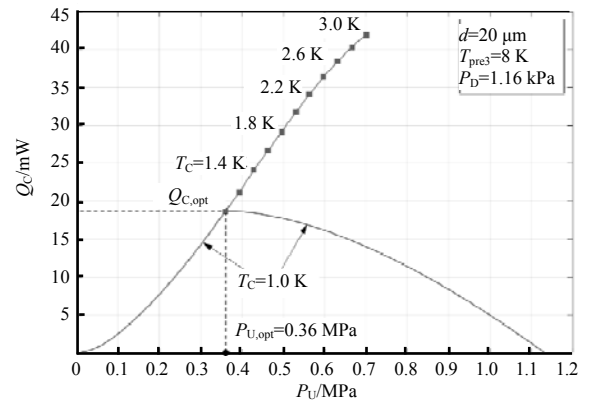


Fig.11 Relationship between the gross cooling capacity and upstream pressure for He-3 at $T_{\text{prec}}=8\text{ K}$

图 11 He-3 工质在 8 K 末级预冷温度下的净制冷量与上游压力之间的关系

式对预冷温度、高压压力等变量进行计算,从而较为准确地找到优化制冷量所对应的工况参数。研究发现,对于 He-4 和 He-3 工质,多级脉冲管预冷 JT 回路的末级最优预冷温度分别为 11 K 和 8 K,与之对应的优化上游压力分别为 1.2 MPa 和 0.36 MPa。以 He-4 为工质的复合制冷机在 2.2 K 的制冷温度下提供 85.23 mW 的制冷量,以 He-3 为工质的复合制冷机在 1.0 K 提供了 18.5mW 的制冷量。在适当提高上游压力的条件下,能够获取 24 mW@1.4 K, 29 mW@1.6 K 和 34 mW@2.2 K 的净制冷量。将理论模型计算结果与国际上已研制工程样机的实验数据进行比较,证明该理论模型在工质的临界点以下温区时是可靠的。在实际应用中,工作在 2 K 以下温区的 SNSPD 系统的热负荷非常小,可低至几百微瓦,且主要由偏置/读出引线传导引起^[17],因此这两种复合制冷机的性能均能够较好地满足 SNSPD 的应用。

参考文献:

- [1] YIN J,CAO Y,LI Y H,et al. Satellite-based entanglement distribution over 1 200 kilometers[J]. *Science*, 2017(356):1140–1144.
- [2] YIN J,LI Y H,LIAO S K,et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1 120 kilometres[J]. *Nature*, 2020 (582):501–505.
- [3] 尤立星. 超导纳米线单光子探测现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2018,47(12):1–6. (YOU Lixing. Status and prospect of superconducting nanowire single photon detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018,47(12):1–6.)
- [4] ZHANG W J,YOU L X,LI H,et al. Superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1 550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017,60 (12):120314.
- [5] RADEBAUGH R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler[C]// *Proceedings of Institute of Refrigeration*. London:[s.n.], 2000.
- [6] KITTEL P. Enthalpy,entropy,and exergy flow losses in pulse tube cryocoolers[C]// *13th International Cryocooler Conference*. New Orleans,Louisiana:Springer, 2005:343–352.
- [7] DANG H Z. Development of high performance moving-coil linear compressors for space stirling-type pulse tube cryocoolers[J]. *Cryogenics*, 2015(68):1–18.
- [8] NAST T,OLSON J,CHAMPAGNE P,et al. Development of a 4.5 K pulse tube cryocooler for superconducting electronics[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008,985(1):881–886.
- [9] DANG H Z,ZHA R,TAN J,et al. Investigations on a 3.3 K four-stage stirling-type pulse tube cryocooler. Part A: theoretical analyses and modeling[J]. *Cryogenics*, 2020(105):103014.
- [10] 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[J]. *Cryogenics*, 2020(105):103015.
- [11] PETACH M,CASEMENT S,MICHAELIAN M,et al. Mechanical cooler for IXO and other space based sensors[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2009(41):347.
- [12] RAAB J,TWARD E. Northrop grumman aerospace systems cryocooler overview[J]. *Cryogenics*, 2010,50(9):572–581.
- [13] DANG H Z,ZHANG T,ZHA R,et al. Development of 2 K space cryocoolers for cooling the superconducting nanowire single photon detector[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019,29(5). doi:10.1109/TASC.2019. 2902770.
- [14] JONES B G,RAMSAY D W. Qualification of a 4 K mechanical cooler for space applications[C]// *8th International Cryocooler Conference*. USA:Springer, 1995:525–535.
- [15] SUGITA H,SATO Y,NAKAGAWA T,et al. Cryogenic system for the infrared space telescope SPICA[C]// *Proceeding of SPIE*. 2008(7010):1–9.
- [16] NARASAKI K,TSUNEMATSU S,OOTSUKA K,et al. Development of 1 K-class mechanical cooler for SPICA[J]. *Cryogenics*, 2004,44(6–8):375–381.
- [17] KOTSUBO V,RADEBAUGH R,HENDERSHOTT P,et al. Compact 2K cooling system for superconducting nanowire single photon detectors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017,27(4):1–5.

作者简介:

张 涛(1994–), 男, 在读博士研究生, 主要从事 2 K 及以下极低温区复合制冷技术研究工作 .email:Cryotz@163.com.

党海政(1973–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型脉冲管制冷、深空探测制冷以及超导应用制冷技术等方面的研究工作。