

冷凝泵型稀释制冷机实验研究*

俎红叶¹⁾²⁾ 程维军¹⁾²⁾ 王亚男¹⁾ 王晓涛¹⁾ 李珂¹⁾ 戴巍^{1)2)†}

1) (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)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2022 年 11 月 25 日收到; 2023 年 2 月 6 日收到修改稿)

极低温 (< 1 K) 环境对于凝聚态物理、天文观测和量子计算等前沿领域具有重要意义, 其中稀释制冷是应用最广泛的极低温制冷技术. 针对小冷量应用的冷凝泵型稀释制冷机利用冷凝泵实现³He 的低温循环, 无需复杂的机械泵组和连接气路, 具有结构紧凑、操作便利、成本低等优势, 从而成为新的研究热点. 本文围绕冷凝泵型稀释制冷机, 介绍了其制冷原理和系统架构, 设计并搭建了预冷系统、稀释低温系统和测量系统, 并对整机进行了实验研究. 辅助多测温点测量系统, 通过多次实验总结了稀释低温循环过程, 由吸附制冷机预冷、稀释循环启动和稀释制冷三个阶段组成, 并且分析了系统启动和运行特性. 经过测试, 实验最低温度可达 108 mK. 该制冷机可以很方便地拓展低温平台的制冷温区, 为凝聚态物理、材料、医学研究等前沿领域提供重要支撑.

关键词: 极低温, 稀释制冷, 冷凝泵型稀释制冷机, 低温循环**PACS:** 07.20.Mc, 07.05.Fb, 07.57.-c**DOI:** 10.7498/aps.72.20222257

1 引言

极低温制冷是指制冷温度低于 1 K 的制冷技术, 广泛用于凝聚态物理、天文观测和量子计算等领域, 至今已经有 20 余项诺贝尔物理学奖成果来自极低温区, 如超流³He、量子霍尔效应等. 目前主流极低温制冷技术有吸附制冷 (最低温度 200—300 mK)、绝热去磁制冷和稀释制冷 (DR)^[1]. 稀释制冷利用³He 原子在极低温下从³He 浓相穿过相界面进入稀相时熵增实现制冷, 能够在几百 mK 到几 mK 的温区连续制冷, 冷量较大且无电磁干扰, 目前已成为应用最广泛的极低温制冷方式.

稀释制冷技术于 1951 年由 London 等^[2]首次提出, 1965 年第一台稀释制冷机问世^[3]. 此后, 随着低温物理研究需求的不断增加, 稀释制冷机不断发展且成功商业化. 目前稀释制冷机的最低温度

为 1.75 mK, 冷量可达 20 μ W@10 mK^[4]. 关于稀释制冷机的发展历史在文献^[5]中有比较详细的介绍. 近年来, 在量子计算研究的催化下稀释制冷机的销量大幅增加, 而我国全部依赖进口. 前沿研究领域对极低温日益增长的需求推动了我国自主研发稀释制冷机的进程, 目前国内多家科研单位开展了稀释制冷的研究工作, 如中国科学院物理研究所、中船重工鹏力公司和中国科学院理化技术研究所等, 其中中国科学院物理研究所研制的常规稀释制冷机最低温低于 10 mK^[6].

常规稀释制冷机在 mK 温区具有较大冷量, 但需要无油机械泵组和复杂气路, 存在系统较为复杂、占地面积较大、工质室温-低温循环过程消耗大量泵功^[7], 以及需要大量³He 等问题. 鉴于上述问题, 针对小冷量应用的低温循环稀释制冷机逐渐成为新的研究热点^[8]. 该结构采用低温泵实现³He 的循环, 不需要室温气体循环泵及复杂的气体连接部

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFC2203303) 和国家自然科学基金 (批准号: 52176027) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cryodw@mail.ipc.ac.cn

件, 系统小巧紧凑、操作便利且成本低. 根据低温泵的不同主要有吸附泵型^[9,10]和冷凝泵型^[11,12]两种类型. 吸附泵型稀释制冷机通过对吸附床冷却提供低压环境来吸附蒸馏室的³He 气体, 对其加热至 40 K 来解吸气体以实现³He 循环. 双吸附泵结构^[10]的制冷温度可达 8 mK, 能够在 110 mK 提供 60 μ W 的冷量. 尽管吸附泵形成的高低压差和循环流量大于冷凝泵, 但是循环本征不连续, 且交替加热和冷却使得系统的效率较低, 增加了系统的漏热, 近些年针对该结构的研究很少. 冷凝泵型稀释制冷机直接利用低于蒸馏室温度的冷凝器对蒸发的³He 气体进行液化, 稀释循环内部无吸附床参与, 循环本征连续, 且结构更为简单. 因此本文针对冷凝泵型稀释制冷机展开研究. 冷凝泵型于 1972 年提出, 20 世纪 90 年代后国际上此类研究逐渐增多, 主要研究单位包括卡迪夫大学^[12]、法国原子能和替代能源委员会^[11]、曼彻斯特大学^[8,13–15]及 Chase 公司^[16]等. 如果单独采用管套管换热器, 系统最低温低于 50 mK^[11], 可提供的冷量为 7 μ W @100 mK^[12]; 若与烧结换热器同时使用, 最低温可达 12.1 mK^[17]. 近几年 Chase 公司开始研制商业产品, 通常在 100—150 mK 温区提供几微瓦的冷量. 但是当前研究主要集中于系统架构和实际性能, 仍存在温度波动、系统启动困难等问题, 目前未见对稀释低温循环的深入研究.

本文研制了一台冷凝泵型稀释制冷机, 阐述了其制冷原理及系统架构; 设计并搭建了预冷系统、低温稀释系统和测量系统; 对预冷系统和整机系统开展实验测试和性能分析. 该实验系统是国内首套低温循环稀释制冷系统, 能够为凝聚态物理、材料、天文观测等前沿领域提供重要支撑.

2 冷凝泵型稀释制冷机制冷原理及基本构成

在极低温下, ³He 和 ⁴He 均为量子流体. ⁴He 为玻色子, 满足玻色-爱因斯坦分布, 当温度降低至 T_λ 时, 发生超流态转变, 比热发生突变, 并呈现出新的性质 (He-II). He-II 可用双流体模型描述, 由处于基态的超流体部分和处于激发态的普通流体部分组成. 超流体部分不携带熵且黏度为 0. 对于超流氦而言, 化学势梯度和重力是其加速运动的驱动力, 这是静压、渗透压、喷泉压和重力的综合作

用. ³He 为费米子, 满足费米-狄拉克分布, 遵循泡利不相容原理, 即不会有大量粒子堆积在基态. 当温度高于费米温度时, 可看作常规流体; 当温度远低于费米温度时, 理论上比热正比于温度^[1]. ³He-⁴He 混合物中的 ³He 可以看作弱相互作用的费米气体, 遵循常规黏性流体的动量方程, 超流 ⁴He 可以看作支撑 ³He 的超流体背景, 混合物的动力学性质是二者的耦合作用.

稀释制冷机利用 ³He-⁴He 混合物的性质实现制冷. 当温度低于 867 mK 时, ³He-⁴He 混合物发生相分离, 浓相在上, 稀相在下, 稀相流体为饱和状态. 当 ³He 穿过相界面从浓相进入稀相时吸热, 混合室制冷量等于进出口流体的焓差^[1]:

$$Q_{mc} = \dot{n}_3 [H_{3,d}(x_s, T_{mc}) - H_3(T_i)], \quad (1)$$

式中, \dot{n}_3 (mol/s) 为 ³He 流量, $H_{3,d}$ 和 H_3 (J/mol) 分别为单位摩尔 ³He 在稀相和浓相中的焓, T_{mc} (K) 为制冷温度; x_s 为 T_{mc} 对应的饱和浓度, T_i (K) 为混合室入口温度.

冷凝泵型稀释制冷系统由蒸馏室 (still)、换热器 (heat exchanger)、混合室 (mixing chamber) 和冷凝泵 (condensation pump) 组成, 如图 1 所示. 整机系统由一台两级 GM 型脉管制冷机提供 40 K 和 4 K 预冷. 冷凝泵由一台吸附制冷机提供预冷 (~400 mK), 液化的 ³He 通过冷凝泵出口管路进入换热器, 冷却后流入混合室. 在混合室制冷后的

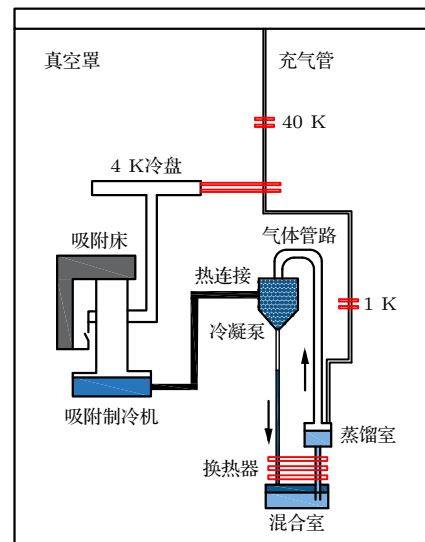


图 1 冷凝泵型稀释制冷机示意图 (浅蓝色为稀相, 深蓝色为浓相, 箭头为流动方向)

Fig. 1. Schematic of condensation-pump dilution refrigerator (Light blue shows the dilute phase, dark blue shows the concentrated phase, and the arrow shows the direction of flow).

^3He 经由换热器稀相管路进入蒸馏室. 给蒸馏室加热, 由于 ^3He 和 ^4He 饱和蒸汽压的不同, 蒸发出的气体中绝大部分是 ^3He , 然后通过气体管路进入冷凝泵, 完成循环. 系统于 40 K 冷盘 (与脉管制冷机一级冷头相连)、4 K 冷盘 (与脉管制冷机二级冷头相连) 和 1 K 冷盘 (与吸附制冷机 ^4He 冷头相连) 处布置管路热沉, 充气管路由室温引入后, 经冷盘预冷后与蒸馏室相连. 稀释循环本征连续, 但整机是否连续取决于预冷制冷机是否连续. 系统循环流量受限于冷凝泵处预冷制冷机的温度和冷量, 通常可以实现的 ^3He 流量较小, 导致冷量也相对较小.

整机系统无外界驱动力, 蒸馏室-冷凝泵的气体驱动力来源于二者温度对应的饱和蒸汽压差; 冷凝泵-混合室-蒸馏室中 ^3He 液体流动产生的黏性压降与浓、稀相液柱高度对应的重力势能差平衡 [18]:

$$\Delta p_c + \Delta p_d = \rho_c g h_c - \rho_d g h_s + p_{cp} - p_s, \quad (2)$$

式中, p_{cp} (Pa) 为冷凝泵压力; p_s (Pa) 为蒸馏室压力; Δp_c 和 Δp_d (Pa) 分别为 ^3He 在浓相和稀相中的黏性压降; ρ_c 和 ρ_d (kg/m^3) 分别为浓相和稀相的密度; h_c 和 h_s (m) 分别为浓相液柱高度和蒸馏室液面高度.

在系统设计时, 蒸馏室的高度应尽可能接近混合室; 冷凝泵和混合室之间应该有足够高的液柱来克服流动阻力. 换热器的数值计算 [19] 可以辅助判断部件的相对位置, 当制冷温度为 100 mK, 冷凝泵温度为 380 mK, 流量为 $7 \mu\text{mol}/\text{s}$ 时, 若 $h_s = 50 \text{ mm}$, h_c 应大于 95 mm 才能保证液体从冷凝泵经混合室流入蒸馏室.

3 实验台设计与搭建

3.1 冷凝泵预冷制冷机

冷凝泵的预冷制冷机采用 Chase Cryogenics 的两级吸附制冷机 [20], 两级分别充注 ^4He 和 ^3He , 其中 ^3He 室温充注量 5 L, 每级由吸附床、吸附床热开关和冷头组成. 简而言之, 吸附制冷机通过吸附床低温吸附提供较低的压力, 从而实现减压蒸发制冷. 受限于 ^4He 和 ^3He 的物性, 两级冷头分别可以提供 800 mK 和 300 mK 附近的最低温.

3.2 稀释部件与系统设计

本文冷凝泵型制冷机的设计目标为 100 mK 提供 $\sim \mu\text{W}$ 级制冷量. 考虑到吸附制冷机的冷量和流体压降, 系统的最大设计流量为 $7 \mu\text{mol}/\text{s}$. 换热

器采用管套管换热器, 材料为 $\text{Cu}_{70}\text{Ni}_{30}$, 优化设计相关计算已经发表在文献 [19] 中. 这里采用优化后的尺寸: 稀相外径 1.4 mm, 浓相外径 0.6 mm, 壁厚 0.1 mm, 换热器长度 583 mm.

在低温下由于卡皮查热阻的存在, 液氦和固体之间存在一定的温差. 在实际运行中, 需要尽量降低冷凝泵的液固温差和混合室的液固温差, 本系统中冷凝泵内部的表面积为 71.7 cm^2 , 当换热量为 $80 \mu\text{W}@380 \text{ mK}$ 时, 液固温差小于 0.3 mK. 混合室冷盘采用线切割结构, 表面积为 41 cm^2 . 冷凝泵和混合室冷盘的示意图如图 2 所示. 在循环开始前, 通过充气管将混合物充入稀释低温系统. 因充气管的温度高于蒸馏室, 在充气管与蒸馏室的连接处布置一个直径 0.2 mm 的小孔以抑制超流氦液膜的爬升.

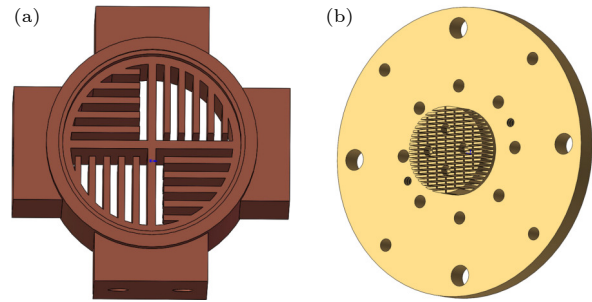


图 2 (a) 冷凝泵示意图; (b) 混合室示意图

Fig. 2. (a) Schematic of the condensation pump; (b) schematic of the mixing chamber.

稀释低温系统通过吸附冷盘固定于吸附制冷机的 ^3He 冷头处, 实验台架构如图 3 所示. 稀释低温循环系统总高 29 cm, 轮廓直径小于 15 cm. 蒸馏室与混合室垂直距离为 50 mm, 冷凝泵与混合室的垂直距离大于 230 mm, 这提供了足够的液体高度以平衡黏性压降. 各部件通过细管相连, 在 $300 \text{ K} \rightarrow 4 \text{ K} \rightarrow 1 \text{ K}$ 的降温过程中, 仅靠流体对流降温较慢. 为了加速降温, 在蒸馏室和 ^4He 冷头之间布置气隙热开关 (Chase Cryogenics 提供), 1 K 时的热导约为 $2\text{--}3 \text{ mW}/\text{K}$. 混合室对漏热更加敏感, 在混合室和吸附冷盘之间采用超导热开关, 估算两侧在 $400\text{--}100 \text{ mK}$ 时的漏热为 $0.23 \mu\text{W}$. 为防止循环结束复温过程中气路压力过高, 复温时需断开气隙热开关.

测量系统由温度传感器、低温线缆、温度测量仪和电脑采集系统组成. 为了准确获得系统的运行状态, 在混合室冷盘、冷凝泵、蒸馏室冷盘、吸附冷

盘各布置一个测温点. 因冷凝泵型稀释制冷机的稀释过程为低温循环, 直接测量流量、超流液膜爬升等流动参数十分困难, 因此通过布置额外测温点来间接判断流动状态. 在蒸馏室-冷凝泵的气体管路(总长 250 mm)中, 在距冷凝泵 24 mm 的位置处布置测温点, 如果此处温度从接近冷凝泵温度升高至接近蒸馏室温度, 说明流量逐渐增大至系统运行流量, 以此来判断系统循环是否启动. 为了判断系统运行时是否有气体或超流氦通过小孔进入充气管, 在小孔上方布置测温点, 如若该处温度接近蒸馏室温度, 则说明有流体流过.

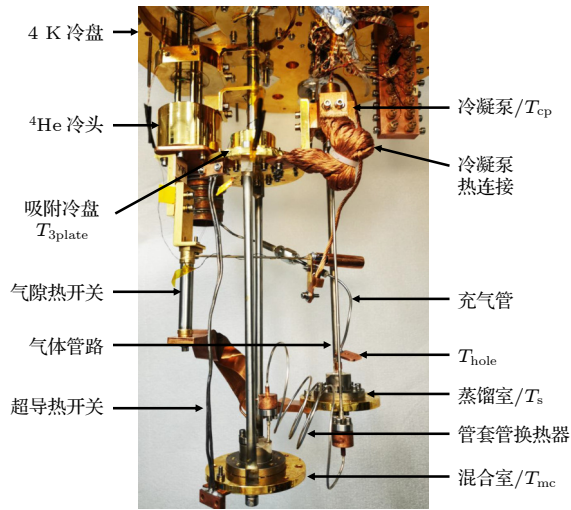


图 3 稀释低温实验系统实物图

Fig. 3. Photo of the low-temperature parts of the condensation-pump dilution refrigerator.

3.3 误差分析

温度计采用氧化钨电阻温度计, 测量仪采用 Lakeshore 372 [21] 测量. 温度测量总误差为

$$E = \sqrt{E_c^2 + E_h^2 + E_i^2 + E_m^2 + E_e^2}, \quad (3)$$

式中, E (K) 为总误差, E_c (K) 为标定误差, E_h (K) 为自热误差, E_i (K) 为插值误差, E_m (K) 为测量精度, E_e (K) 为电子精度. 当测量温度在 100 mK 温区时, 标定误差为 ± 4 mK, 插值误差为 ± 0.2 mK, 自热误差为 11.6 μ K, 测量精度为 3.7 μ K, 电子精度为 162 μ K, 总误差为 4 mK.

4 实验结果分析与讨论

4.1 吸附制冷机实验测试

图 4 为吸附制冷机运行温度曲线. 通过对吸附

床间歇性加热和冷却, 配合热开关操作, 令 ^4He 级率先制冷, ^3He 冷头随之降温. 当 ^3He 冷头降温至 900 mK 时, 闭合 ^3He 吸附床热开关, ^3He 级开始制冷. 经过测试, ^4He 冷头最低温 810 mK, ^3He 冷头最低温 269 mK. 稀释制冷机的运行时间取决于吸附制冷机, 而吸附制冷循环并不连续, 需要对其进行不同加热功率下平衡温度及维持时间的测试, 测试结果见表 1. 其中加热量为 ^3He 冷头的加热片实际施加的加热量, 计算制冷功率依据 ^3He 级总充注量、维持时间和平均气化潜热算出. 当 ^3He 的热负荷为 166 μ W 时, ^3He 冷头的平衡温度为 393.5 mK, 维持时间为 8.9 h.

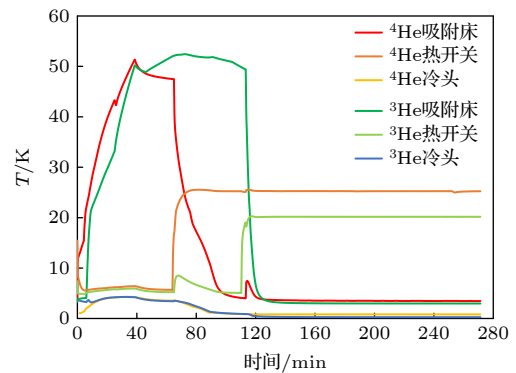


图 4 吸附制冷机温度曲线图

Fig. 4. Temperature curves of the adsorption refrigerator.

表 1 吸附制冷机测试结果

Table 1. Experimental results of the adsorption refrigerator.

加热量/ μ W	平衡温度/mK	维持时间/h	计算制冷功率/ μ W
90	366.2	16.0	100
144	387.0	10.1	164
162	393.5	8.9	166

4.2 冷凝泵型稀释制冷机实际工作过程

稀释低温系统充注混合物 3.84 L, 其中 ^3He 1.38 L. 首先通过 GM 型脉管制冷机将稀释系统降温至 4 K, 降温时间约 30 h; 然后利用吸附制冷机 ^4He 级将混合室温度降低至 900 mK, 接着开启 ^3He 级制冷以冷却稀释系统. 稀释启动过程是个较为复杂的物理过程. 在实验充注的 ^3He 浓度下, 当温度低于 670 mK 时内部混合物出现分层, 浓相在上层, 浓稀相界面可能有两处, 分别在冷凝泵侧和蒸馏室侧. 制冷时的浓稀相界面应当只有一个并处于混合室中, 如图 1 所示. 启动过程需要 ^3He 不断从

冷凝泵液化后堆积在冷凝泵出口管路中, 以提供足够的液柱高度推动³He液体流动, 并且推动⁴He流入混合室-换热器稀相管路-蒸馏室这一位置, 直至达到相对平衡状态. 此时浓稀相界面仅位于混合室中, ⁴He静止不动, 仅³He流动.

图5为稀释低温循环温度曲线图. 通过多次实验总结规律, 将低温循环分为3个阶段: 1) 吸附制冷机预冷阶段; 2) 稀释循环启动阶段; 3) 稀释制冷阶段. 混合室温度曲线与阶段划分见图6, 3个阶段的运行特点如下.

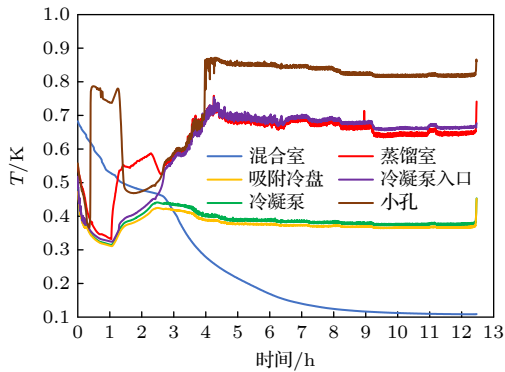


图5 冷凝泵型稀释制冷机低温循环温度曲线图
Fig. 5. Temperature curve of the cold cycle of the condensation-pump dilution refrigerator.

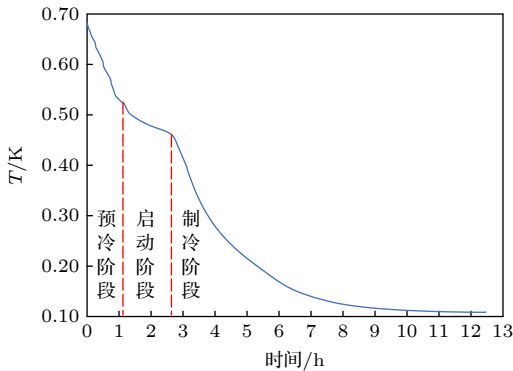


图6 混合室温度曲线
Fig. 6. Temperature curve of the mixing chamber.

1) 吸附制冷机预冷阶段: 开启吸附³He制冷后, 冷凝泵与吸附冷盘通过热连接相连, 降温较快. 蒸馏室降温相对较慢, 但因气液界面在蒸馏室中, 当蒸馏室温度高于冷凝泵时, 气体蒸发使得该处温度很快降低至400 mK以下. 混合室与吸附冷盘之间靠薄壁不锈钢管和超导热开关传热, 降温速率较慢, 且逐渐变缓.

2) 稀释循环启动阶段: 当蒸馏室低于400 mK时, 对其加热, 进入循环启动阶段. 在该阶段冷凝

泵入口温度逐渐升高, 说明通过气体管路进入冷凝泵的流量逐渐增大. 该阶段因为循环未完全启动, 有部分气体流过小孔进入充气管, 此时出现小孔温度接近甚至低于蒸馏室底部温度的情况.

3) 稀释制冷阶段: 当混合室温度降低至冷凝泵温度时, 稀释制冷效应显现, 循环正式启动. 此时冷凝泵入口温度接近蒸馏室温度, 说明有大量气体从蒸馏室进入冷凝泵. 随着循环的进行, 小孔温度上升至接近⁴He冷头温度, 说明经由小孔流入充气管的气体或超流氦很少. 在制冷阶段, 不断调节蒸馏室加热量, 使系统维持较好的运行状态. 随着温度降低, 混合室制冷量逐渐减小, 漏热的影响也更显著, 降温速率逐渐变缓. 当吸附制冷机³He液池蒸干时, 稀释循环停止.

经过测试, 冷凝泵型稀释制冷机的最低温为108 mK, 此时冷凝泵温度为378 mK, 蒸馏室温度679 mK, 蒸馏室加热量72 μ W (未考虑该处漏热). 估算循环流量为2.3 μ mol/s, 依据(1)式计算的冷量约为1.9 μ W, 据此判断混合室的总漏热为1.9 μ W左右. 而通过对混合室稀相流体和固体冷盘之间的卡皮查热阻和温差进行估算, 流体的实际温度可能已经达到100 mK, 未来将采取措施提高混合室冷盘的表面积以减小液固温差.

4.3 温度波动讨论

在稀释运行过程中, 系统出现了较为明显的温度波动, 如图7所示. 蒸馏室波动幅值为3.2 mK (标准差), 冷凝泵波动幅值为2.0 mK (标准差), 波动周期168 s (采样周期24 s). 混合室在降温过程中也出现了一定的温度波动. 温度波动的来源主要包括^[18]以下两点.

1) 重力引起的对流. 在换热器稀相管路中, 由于温度梯度的存在以及⁴He化学势守恒, 使得混合室到蒸馏室浓度逐渐减小. 浓度梯度使得稀相管路出现密度差异, 蒸馏室处密度较大, 混合室处密度较小, 因而重力引起的对流可能会使部分³He逆向流动, 造成温度波动. 实验结构(图4)中换热器的垂直螺旋结构可能会加剧波动.

2) 换热器内液体气化. 在实验系统中, 由于空间的限制采用了垂直螺旋结构, 同时部分换热器管路高于蒸馏室, 导致某些位置可能会出现压力低于饱和蒸气压的情况, 产生的气泡对流动造成干扰, 带来系统运行的不稳定性, 未来需要做进一步优化.

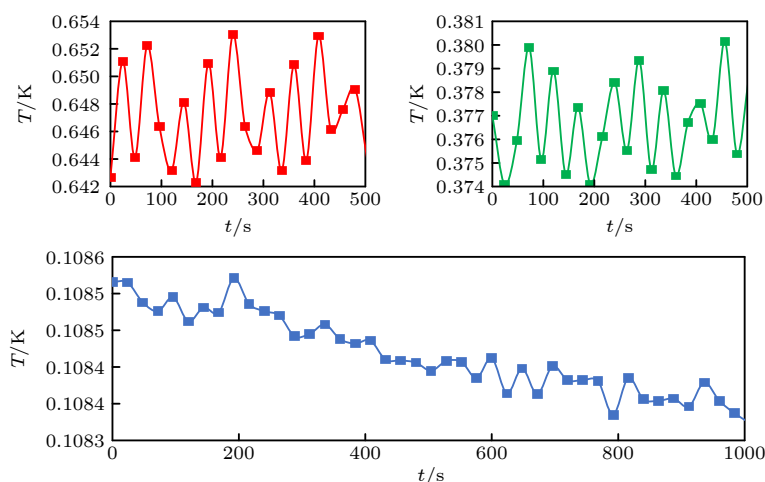


图7 温度波动

Fig. 7. Temperature oscillation.

5 总结与展望

本文研制了一台低温循环的冷凝泵型稀释制冷机,介绍了其制冷原理和系统结构,设计并搭建了预冷系统、稀释低温系统和测量系统,对整机系统进行了实验测试,目前获得了 108 mK 的最低温. 通过多次实验总结了稀释系统低温循环的三个阶段和启动运行特性,分析了温度波动及其原因. 虽然最低温离国际现有研究仍有一定差距,但是实验通过多测温点测量系统的辅助,分析了稀释低温循环的启动和运行特性,为进一步揭示低驱动力条件下冷凝泵型稀释制冷机的热力学循环机理奠定了良好的基础. 未来还计划从以下两方面进行改进以提高制冷性能: 1) 调整换热器螺旋方式和位置,抑制温度波动; 2) 增大混合室冷盘与流体间的换热面积,以减小流固温差.

随着空间探测和量子技术等领域的发展,极低温区制冷的需求日益增加. 本文研制的制冷系统是国内首台可低温循环运行的稀释制冷系统,该系统的小型模块化特征,可以很方便地拓展很多单位现有的较高温区平台,有力地支撑包括高分辨率天文望远镜、量子器件、单光子测量仪,以及 X 射线检测仪等高端设备的研制.

感谢中国科学院物理研究所姬忠庆研究员和荷兰 de Waele A. T. A. M. 教授的讨论与帮助.

参考文献

[1] Pobell F 2007 *Matter and Methods at Low Temperatures* (3rd Ed.) (Berlin Heidelberg: Springer) p467
 [2] London H 1951 *Proceedings of International Conference on Low Temperature Physics (LT2)* Oxford, UK p157

[3] Das T P, Ouboter R D B, Taconis K W 1965 *Proceedings of Ninth International Conference on Low-Temperature Physics* Ohio, US, August 31-September 4, 1964 p1253
 [4] Cousins D J, Fisher S N, Guénault A M, et al. 1999 *J. Low Temp. Phys.* **114** 547
 [5] Zu H, Dai W, de Waele A T A M 2022 *Cryogenics* **121** 103390
 [6] Ji Z, Fan J, Dong J, Bian Y, Cheng Z G 2022 *Chin. Phys. B* **31** 102703
 [7] Brisson J G 1998 *J. Low Temp. Phys.* **111** 181
 [8] May A J 2016 *M. S. Thesis* (Manchester: The University of Manchester)
 [9] Mikheev V A, Maidanov V A, Mikhlin N P 1984 *Cryogenics* **24** 190
 [10] Mohandas P, Cowan B P, Saunders J, et al. 1994 *Physica B* **194** 55
 [11] Prouvé T, Luchier N, Duband L 2008 *Cryocoolers 15* California, US, June 9-12, 2008 p497
 [12] Teleberg G, Chase S T, Piccirillo L 2006 *Proceedings of SPIE* p6275OD-1
 [13] May A J 2019 *Ph. D. Dissertation* (Manchester: The University of Manchester)
 [14] May A J, Azzoni S, Banys D, Coppi G, Haynes V, McCulloch M A, Melhuish S J, Piccirillo L, Wenninger J *ICEC-ICMC 2018, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Oxford, United Kingdom, September 3-7, 2018 p0121351
 [15] Azzoni S, May A, Chase S, Coppi G, Kenny L, Melhuish S, Piccirillo L, Suzuki A, Wenninger J 2020 *J. Low Temp. Phys.* **199** 771
 [16] Chase S T, Brien T L R, Doyle S M, Kenny L C 2018 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Oxford, United Kingdom, September 3-7, 2018
 [17] Sivokon V E, Dotsenko V V, Pogorelov L A, Sobolev V I 1992 *Cryogenics* **32** 207
 [18] Wheatley J C, Rapp R E, Johnson R T 1971 *J. Low Temp. Phys.* **4** 1
 [19] Zu H Y, Li K, Wang X T, Wang Y N, Shen J, Dai W 2022 *Cryocoolers 22* Boulder, USA, June 27-30, 2022 p365
 [20] Chase Cryogenics <https://www.chasecryogenics.com/products> [2022-09-18]
 [21] Lakeshore Model 372 AC Bridge and Temperature Controller <http://www.lakeshore.com/products/product-detail/model-372/> [2022-09-18]

Experimental analysis of condensation-pump dilution refrigerators*

Zu Hong-Ye¹⁾²⁾ Cheng Wei-Jun¹⁾²⁾ Wang Ya-Nan¹⁾
Wang Xiao-Tao¹⁾ Li Ke¹⁾ Dai Wei^{1)2)†}

1) (*Key Laboratory of Cryogenic Engineering, Technical Institute of Physical and Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 25 November 2022; revised manuscript received 6 February 2023)

Abstract

Subkelvin refrigeration is necessary for many frontier research fields such as condensed-matter physics, astronomical observation, and quantum computing. Dilution refrigeration utilizes the entropy increase of ^3He atoms when they flow from the concentrated phase to dilute phase to provide cooling, and has the advantages of continuous operation, large cooling power and no electromagnetic interference. It is the most widely used method among subkelvin refrigeration at present. For research scenarios requiring small cooling powers, the condensation-pump dilution refrigerator utilizes a condensation pump to achieve cold cycle of ^3He , with no need of complex ambient pump systems or gas circuits, and has become a new research topic because of its compact structure, convenient operation and low cost.

A condensation-pump dilution refrigerator is built and investigated in this work. The refrigerator consists of a mixing chamber, a continuous tube-in-tube heat exchanger, a still, and a condensation pump, and it is precooled by a GM-type pulse tube cryocooler below 4 K and an adsorption refrigerator below 400 mK. The ^3He evaporates from the still, condenses in the condensation pump and provides cooling in the mixing chamber after being precooled in the heat exchanger.

By means of the multi-temperature measuring system, the cold cycle of the dilution refrigerator can be summarized as three stages: precooling by the adsorption refrigerator, cycle start-up, and continuous dilution cooling. The operating characteristics of the system are analyzed. The experiments showed that the lowest no-load temperature reached 108 mK when the condenser temperature was 378 mK. Meanwhile, the temperature oscillation appeared, and the possible reasons are analyzed. In the future, the system performance will be improved by 1) adjusting the spiral mode and position of the continuous tube-in-tube heat exchanger and 2) increasing the heat transfer area between the cold plate and the fluid in the mixing chamber to reduce the fluid-solid temperature difference.

The refrigerator introduced in this work can easily expand many existing cryogenic platforms working at higher temperatures, and effectively support developments of high-end equipment.

Keywords: subkelvin, dilution refrigeration, condensation-pump dilution refrigerator, cold cycle

PACS: 07.20.Mc, 07.05.Fb, 07.57.-c

DOI: 10.7498/aps.72.20222257

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2021YFC2203303) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52176027).

† Corresponding author. E-mail: cryodw@mail.ipc.ac.cn



冷凝泵型稀释制冷机实验研究

俎红叶 程维军 王亚男 王晓涛 李珂 戴巍

Experimental analysis of condensation–pump dilution refrigerators

Zu Hong-Ye Cheng Wei-Jun Wang Ya-Nan Wang Xiao-Tao Li Ke Dai Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 080701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222257

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222257>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稀释制冷机及其中的热交换问题

Dilution refrigerator and its heat transfer problems

物理学报. 2021, 70(23): 230202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211760>

用于亚开温区的极低温绝热去磁制冷机

Ultra–low temperature adiabatic demagnetization refrigerator for sub–Kelvin region

物理学报. 2021, 70(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202237>

极低温散粒噪声测试系统及隧道结噪声测量

Shot noise measurement for tunnel junctions using a homemade cryogenic amplifier at dilution refrigerator temperatures

物理学报. 2019, 68(7): 070702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190114>

光子驱动量子点制冷机

Quantum dot refrigerator driven by photon

物理学报. 2019, 68(22): 220501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191091>

线性不可逆热力学框架下一个无限尺寸热源而有限尺寸冷源的制冷机的性能分析

Performance analysis of a refrigerator operating between an infinite–sized hot reservoir and a finite–sized cold one within linear irreversible thermodynamics

物理学报. 2018, 67(4): 040502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172010>

基于一维弹道导体的三端纳米线制冷机的性能优化

Performance optimization of three–terminal nanowire refrigerator based on one–dimensional ballistic conductor

物理学报. 2022, 71(2): 020501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211077>