

仪器与测量

基于脉管制冷机预冷的 1 K 大冷量低温系统*

刘旭明¹⁾²⁾ 查奎帆¹⁾²⁾ 马帅¹⁾²⁾ 韩丽明¹⁾²⁾谢晓霖¹⁾ 郭伟杰¹⁾²⁾ 潘长钊^{1)2)†}

1) (深圳国际量子研究院, 深圳 518048)

2) (深圳鲲鹏酷领科技有限公司, 深圳 518048)

(2025 年 2 月 15 日收到; 2025 年 3 月 15 日收到修改稿)

1 K 低温系统是进一步实现 mK 温区及更低温度的基础, 广泛应用于量子计算、凝聚态物理研究、低温科学仪器等领域. 目前国内的 1 K 低温系统大多使用 GM (Gifford-McMahon) 制冷机进行预冷, 系统在实现更低振动控制、更低电噪声干扰、更低预冷温度和更高液化效率等方面存在一定难题, 而基于脉管制冷机预冷的 1 K 系统在解决这些问题方面具有先天优势. 本文发展了一台全国产化的 4 K GM 脉管制冷机, 获得了 2.14 K 的最低制冷温度, 并可同时提供 1.5 W@4.2 K 和 45 W@45 K 的制冷量. 将其作为预冷制冷机, 设计并搭建了 1 K 低温系统, 最终获得了 1.1 K 的最低制冷温度, 并可在 1.6 K 提供 100 mW 的制冷量. 本研究为后续开展更大冷量稀释制冷技术奠定了重要基础.

关键词: 脉管制冷机, GM 型, 1 K 系统, 稀释制冷**PACS:** 07.20.Mc**DOI:** 10.7498/aps.74.20250181**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250181

1 引言

极低温制冷技术通常是指能够获取 1 K 及以下温度的机械式制冷技术, 目前广泛应用于量子计算、凝聚态物理研究、低温科学仪器等领域^[1-6]. 1 K 温区作为关键温度区域, 能够为多个领域提供稳定且必要的低温环境^[7-9]: 在基础研究领域, 1 K 温区是研究低温物理中量子现象 (如量子霍尔效应、拓扑相变等) 的理想条件; 在技术应用领域, 1 K 温区是一些量子器件 (如超导量子干涉仪、单光子探测器等) 实现高灵敏度工作的必要条件; 在极低温技术领域, 1 K 温区是稀释制冷机等制冷技术的前级预冷阶段, 是进一步实现 mK 温区及更低温度

的基础. 因此, 开发高效、稳定的 1 K 低温系统对于推动低温科学和先进技术发展至关重要.

近年来, 国外在 1 K 低温系统领域取得了显著进展, 特别是在系统效率、低振动设计、系统智能化与模块化方面. 例如, Cryomech, Bluefors, Oxford Instruments, Quantum Design 等公司已开发出集成式 1 K 系统, 并广泛应用于量子计算、精密测量等领域^[10-12]. 在这些系统中, 4 K GM (Gifford-McMahon) 脉管制冷机被用来作为预冷制冷机来对整个系统进行预冷. 在国内, 1 K 低温系统的研究近年来也取得了长足进步, 多家科研机构围绕 1 K 制冷机的国产化、低噪声、高效热交换等关键技术展开深入研究^[13-15]. 但由于近年来国外 4 K GM 脉管制冷机产品被全面禁运, 这些系统大多使

* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFF0721303)、广东省基础与应用基础研究基金 (批准号: 2024A1515012045) 和深圳市科技计划 (批准号: RCBS20221008093120048) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pancz@iqasz.cn

用国产 4 K GM 制冷机进行预冷. 但由于 GM 制冷机自身回热器结构和排出器振动的原因, 使得 1 K 系统在实现更低振动控制、更低电噪声干扰、更低预冷温度和更高液化效率等方面存在一定困难, 相应的解决方案包括采用主动振动补偿、可调流阻设计等, 但系统工程复杂, 成本较高. 脉管制冷机在解决这些问题方面具有先天优势, 这也是国外 1 K 系统发展基于脉管制冷机的主要原因. 因此, 开展基于国产脉管制冷机预冷的 1 K 低温系统, 具有重要的战略价值和现实意义^[16-26].

为打破国外技术封锁, 保障我国在量子科技等领域的发展, 本课题组于 2021 年开展液氦温区大冷量 GM 脉管制冷机研究, 并于 2023 年报道了一台自研的脉管制冷机冷头, 使用美国压缩机和旋转阀, 获得了 3.1 K 的最低温度, 并可在 4.2 K 提供 0.8 W 制冷量^[27]. 基于此, 我们发展了全国产化的脉管制冷机系统, 并优化提升了其制冷性能. 更进一步地, 我们将其作为预冷制冷机, 设计并搭建了全国产 1 K 低温系统. 本文将从基本原理、系统设计、关键部件及实验结果等多个方面对该系统进行详细介绍.

2 基本原理及系统设计

2.1 基本原理

1 K 低温系统的基本原理是通过液氦蒸发循环实现制冷, J-T(Joule-Thomson) 流阻为其关键部件, 如图 1 所示, 假设工质通过 J-T 流阻发生绝热膨胀, 因此工质进出流阻前后的焓值相等. 假设经过脉管制冷机预冷, 进入 J-T 流阻前的工质为过冷液相, 流出 J-T 流阻后的工质, 其中一部分在蒸发室中以液态形式存在, 另一部分则转变为气态被干泵抽离. 基于能量守恒, 以上过程可表示为

$$h_{\text{inlet}} = fh_{2,l} + (1-f)h_{2,g}, \quad (1)$$

其中, h_{inlet} 为进入 J-T 流阻工质氦的比焓, 单位为 J/kg; $h_{2,l}$ 为膨胀后液态氦的比焓, 单位为 J/kg; $h_{2,g}$ 为膨胀后气态氦的比焓, 单位为 J/kg; f 为膨胀后保持液态的氦的质量分数, $1-f$ 为膨胀后转变为气态的氦的质量分数.

由上述方程可解得液态氦的质量分数 f :

$$f = \frac{h_{\text{inlet}} - h_{2,g}}{h_{2,l} - h_{2,g}}. \quad (2)$$

假设膨胀后的气态氦被立即抽离, 其对制冷量的贡献可忽略不计. 同时, 外界热负荷仅引起蒸发室内液态氦的相变, 而不会导致液体温度的升高. 在稳态条件下, 系统的制冷量可由以下关系式计算:

$$\dot{Q} = f\dot{m}(h_{2,g} - h_{2,l}) = \dot{m}(h_{2,g} - h_{\text{inlet}}), \quad (3)$$

其中, \dot{Q} 为制冷量, W, \dot{m} 为工质的质量流量, 单位为 kg/s. 由此表明, 1 K 低温系统的制冷能力取决于工质氦的质量流量及其在相变过程中释放的汽化潜热. 使用脉管制冷机预冷可以最大程度释放工质氦气的液化显热和潜热, 将其液化至更低的过冷温度. 增大流阻有利于获得更大压差, 实现更低的制冷温度, 但也限制了工质流量的增大, 不利于系统获取更大的制冷量, 因此设计时需要综合考虑. 此外, 当制冷温度足够低, 还会出现超流爬膜现象 (superfluid creeping film), 表现为超流氦会沿着容器壁面蠕动, 直至铺满容器表面. 对于 1 K 系统而言, 超流爬膜会导致: 部分液体不参与蒸发室的蒸发制冷, 降低制冷效率; 爬膜在蒸发室与较高温度的部件间产生热连接, 增大系统热负载, 因此在设计时也要避免该现象.

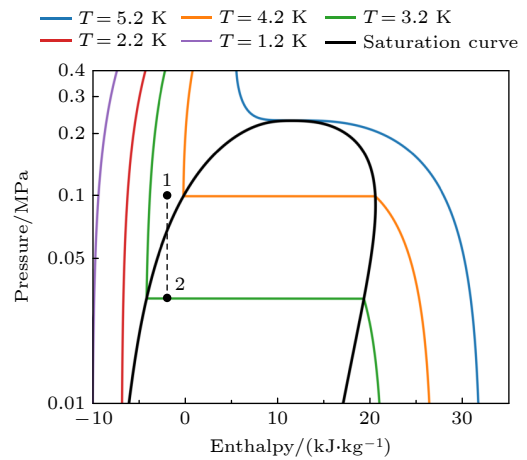


图 1 工质氦 4 压焓图

Fig. 1. The pressure-enthalpy diagram of the helium-4.

2.2 系统设计

基于脉管制冷机预冷的 1 K 低温系统基本结构如图 2 所示. 其中, 1 为干泵, 用于实现气路循环, 关键因素为其抽速; 2 为储气罐, 内充工质氦 4 气体, 根据理论制冷量计算其容积为 50 L; 3 为自研脉管制冷机, 二级回热器上通过真空钎焊绕制不锈钢盘管, 再通过银焊焊接至铜柱表面, 并螺栓

固定在 4 K 冷头上. 预冷制冷机关键因素为其在 4 K 温区和 40 K 温区的制冷性能. 相比先前的报道, 我们进一步使用国产大排量氦气压缩机和自研旋转阀, 并重新设计了冷端换热器结构和室温端调相机构, 得以大幅提升其制冷性能; 4 为减振法兰, 以进一步降低系统振动; 5 为热桥, 使用铜辫子实现软连接; 6 为冷阱, 内填活性炭, 用于过滤工质气体中的杂质; 9 为逆流换热器, 使用管套管结构; 10 为自研组合式热开关, 该热开关在传统气隙式热开关的基础上加上了钢片和氧化铝垫片. 钢的延展性好, 能够填补固体表面缝隙, 使得在连通时增强导热, 而在极低温区, 钢和氧化铝会逐渐进入深度超导状态, 其热导率大大降低, 能够有效减小热开关断开状态下的残余漏热; 11 为 J-T 流阻, 其主体是用直径 0.15 mm 的不锈钢丝插入内径 0.2 mm 的不锈钢管, 通过改变长度使其达到合适阻抗, 实验测量流阻阻抗约为 $3.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 符合

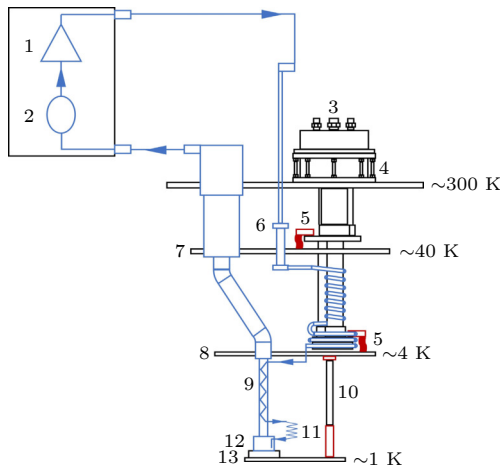


图 2 基于脉管制冷机预冷的 1 K 低温系统结构示意图
Fig. 2. Schematic diagram of the 1 K cryogenic system pre-cooled by a pulse tube refrigerator.

经验值; 12 为蒸发室, 根据储气罐容积换算液体体积设计其容积约 80 cc. 使用 CF16 波纹管来对蒸发室进行抽气, 内设刀口防超流结构, 设计时需要综合考虑刀口法兰内径及其距液面的高度. 为了下一步能够适配 9 T 低温超导磁体, 该样机设计了更大的冷盘尺寸和冷却空间, 其中, 7 为一级冷盘, 直径超过 450 mm; 8 为二级冷盘, 直径超过 360 mm; 13 为 1 K 冷盘, 直径超过 220 mm. 更大冷盘尺寸和空间, 也导致了系统需要设置更大的辐射屏和承载更多的信号控制及输出线缆, 这对自研脉管制冷机的预冷性能提出了更高要求. 图中吊杆、防辐射屏、多层绝热材料等均未示出.

3 整机架构及关键系统

图 3 为整机系统实物照片, 主要包含以下 4 个关键系统.

1) 4 K 预冷系统. 包括一台自研的 4 K GM 型脉管制冷机, 主要用于对泵送回来的工质氦气进行预冷和液化, 并负责冷却一级和二级防辐射屏, 阻挡外界环境的辐射漏热.

2) 1 K 气路系统. 具体如图 4 所示, 主要包括干泵、压力计、流量计、电磁阀、手阀、针阀、储气罐等. 整个实验过程分为预冷阶段、液化阶段、常规循环阶段和收气回温阶段. 预冷阶段: 1 K 系统主要通过自研的脉管制冷机进行预冷, 脉管利用氦气的西蒙膨胀原理 (绝热放气) 使得冷头降到液氦温区, 为避免冷头振动影响系统温度和测量, 冷头通过铜辫子的软连接将冷量传递给一级和二级冷盘. 而 1 K 冷盘通过自研的组合式热开关实现与二级冷盘的连接. 预冷过程伊始, 打开电磁阀 V2,

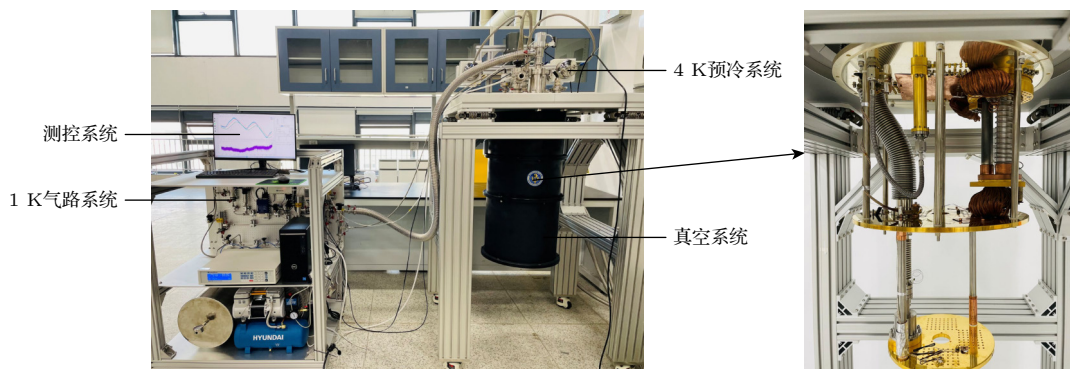


图 3 实验系统实物照片
Fig. 3. Photograph of the experimental system.

V3, V5 和 V6, 开启干泵, 待储气罐中少量工质气体进入主循环回路后, 关闭 V5, 通过循环少量氦气实现加速降温. 启动冷头压缩机, 打开热开关加热器, 当二级冷盘温度低于 4 K, 1 K 冷盘温度低于 5 K 时预冷结束, 开始液化. 液化阶段: 通过反复开关 V1 从气罐取气, 室温氦气先经过 40 K 冷阱, 少量杂质气体被吸附并进行初步预冷, 接着经过缠绕在脉管制冷机上的盘管, 利用二级回热器的冷量释放显热, 然后经过布置在二级冷头的换热器, 释放潜热实现液化. 最后经过流阻实现进一步降温, 液体累积在蒸发室里, 气体被干泵抽离. 当气罐的压力低于 500 Pa 时, 液化结束进入常规循环. 常规循环阶段: 蒸发出来的氦气不断被干泵抽离, 并通过逆流换热器对泵送回来经冷头再次液化的液体进一步预冷, 形成闭式循环. 当液氮累积到一定程度, 液面上方的饱和蒸气压维持平衡, 液面也维持稳定, 1 K 冷盘达到最低温度, 此时关闭 V1. 收气回温阶段: 当系统停机时, 关闭冷头压缩机, 关闭 V1, V6, 打开 V2, V3 和 V5, 先将氦气收回气罐, 打开手阀 V10 可以加速收气, 打开加热器可以加速升温. 当温度高于 100 K 时, 可以往真空腔里通入少量的氦气, 通过气体对流换热可迅速将室温热量传递进系统内部, 有助于加速升温. 当所有温度高于 100 K 时, 关闭所有阀门, 关闭干泵.

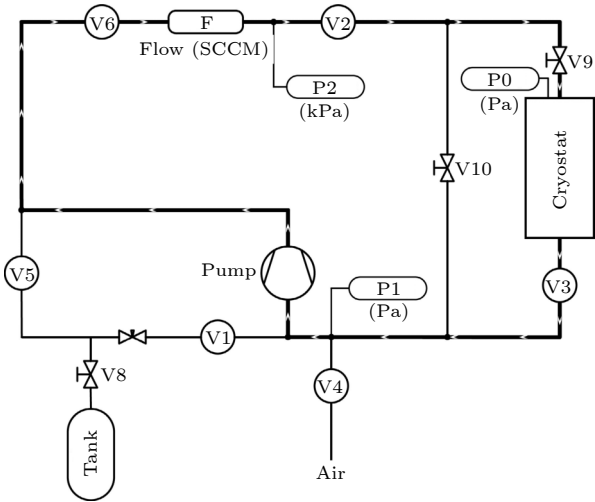


图 4 1 K 气路系统流程示意图
Fig. 4. Schematic diagram of the 1 K gas circuit system.

3) 测控系统. 自主开发了一套集数据采集和控制于一体的测控板卡. 该板卡涉及压力传感器、流量计、真空计等多种设备的数据采集, 并具备对所有电磁阀开关的精确控制. 此外, 结合 Lake-

shore 温控仪, 实现了对 1 K 系统的温度监测与控制. 最终通过开发上位机测控软件, 实现了包括一键降温等智能功能. 系统中各级冷盘温度通过 Lakeshore 标定过的 CX-1030-CU-HT-1.4 L 温度计进行测量, 不确定度为 5 mK.

4) 真空绝热系统. 主要包括真空罩、高真空分子泵、真空管路、防辐射屏和多层绝热材料等, 保证系统内的真空度, 并阻挡外界环境的辐射漏热.

4 实验结果与讨论

4.1 4 K 预冷系统

图 5 给出了发展的脉管制冷机的典型制冷性能, 该样机使用国产压缩机和自研旋转阀, 整机具备阀分离和电隔离特性. 室温开机 40 min 内二级冷头温度即可降至 3 K 以下, 最终二级冷头无负荷温度为 2.14 K, 一级冷头无负荷温度为 28.8 K, 并可同时在 4.2 K 提供 1.5 W 的制冷量和在 45 K 提供 45 W 的制冷量, 性能超越美国 Cryomech PT415 RM 和日本住友 RP-182B2S 产品, 具体见表 1.

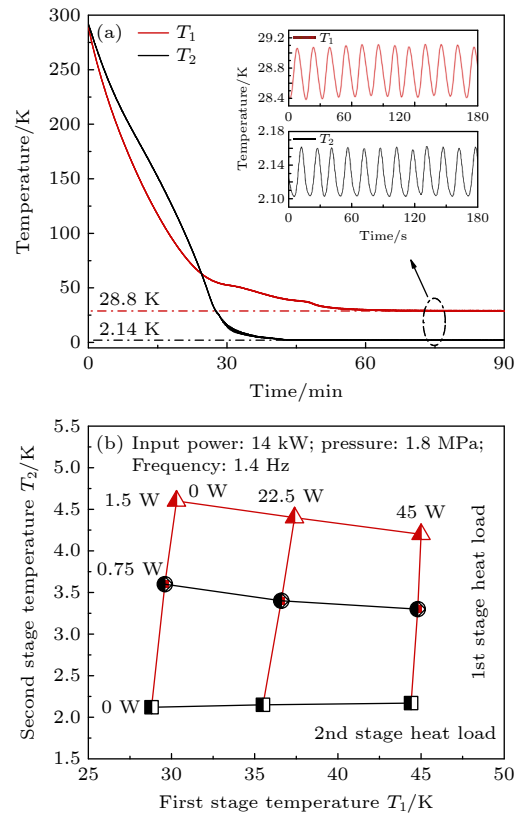


图 5 4 K 脉管制冷机典型制冷性能 (a) 降温曲线, (b) 制冷量
Fig. 5. Typical cooling performance of the developed 4 K pulse tube refrigerator: (a) Cooling curve; (b) cooling capacity.

表 1 自研脉管制冷机与国外产品比较

Table 1. Comparison between the developed prototype and foreign 4 K GM-type PTRs.

| | 时间 | 最低温度 | 一级制冷量 | 二级制冷量 | 功耗 | 备注 |
|-------------------|---------|--------|-------------|----------------|---------|-----|
| Cryomech PT415-RM | <60 min | <2.8 K | 40 W @ 45 K | 1.35 W @ 4.2 K | 9.2 kW | 阀分离 |
| 住友RP-182B2S | <60 min | <2.8 K | 36 W @ 48 K | 1.5 W @ 4.2 K | 11.8 kW | 阀分离 |
| 本文 | <40 min | 2.14 K | 45 W @ 45 K | 1.5 W @ 4.2 K | 14 kW | 阀分离 |

4.2 1 K 低温系统

基于上述脉管制冷机作为预冷级搭建的 1 K 低温系统典型制冷性能如图 6 所示. 该系统 4 K 冷盘直径超过 360 mm, 1 K 冷盘直径超过 220 mm, 具有足够大的冷却空间. 室温开机 12 h 内开始液化, 最终 1 K 冷盘的最低制冷温度为 1.1 K, 此时一级冷盘的温度为 41 K, 二级冷盘的温度为 2.7 K. 该样机可在 1.5 K 提供 67.5 mW 的制冷量或者在 1.6 K 提供 100 mW 的制冷量, 单冲程最低温度可达 1.01 K, 并可维持大于 0.5 h.

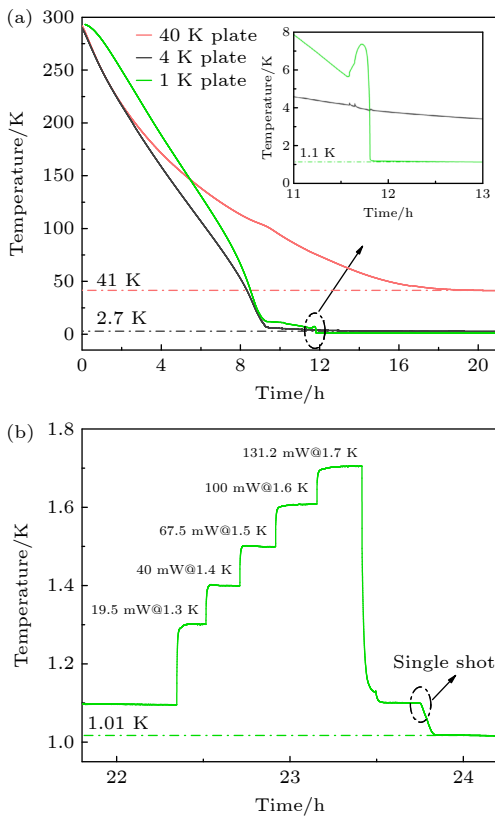


图 6 1 K 低温系统典型制冷性能 (a) 降温曲线; (b) 制冷量
Fig. 6. Typical cooling performance of the 1 K cryogenic system: (a) Cooling curve; (b) cooling capacity.

图 7 给出了系统制冷量与循环回路工质氦气的摩尔流量比值随 1 K 冷盘温度的变化曲线. 可以看出, 随着 1 K 冷盘温度由 1.1 K 升高至 1.7 K, 系统制冷量与工质摩尔流量的比值从 0 逐渐增大

至 $0.088 \text{ mW}/(\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1})$, 基本符合 (3) 式的变化规律. 这主要是因为 1 K 冷盘温度越高, 对应的饱和蒸气压也越高, 更多的气体被干泵抽离, 致使泵后压力增大. 在系统流阻保持不变下, 泵前后压差增大, 泵送的流量也会增大.

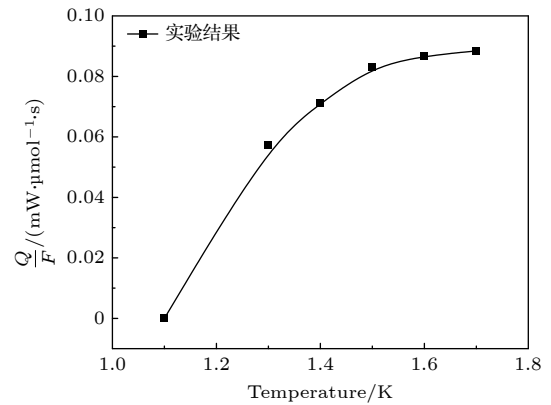


图 7 制冷量和工质流量与制冷温度关系变化曲线
Fig. 7. The relationship curve between cooling capacity, working flow and cooling temperature.

5 总结与展望

本文设计并研制了一台基于脉管制冷机预冷的 1 K 大冷量低温系统. 全国产化的脉管制冷机最低获取了 2.14 K 的制冷温度, 并可同时在 4.2 K 提供 1.5 W 的制冷量和在 45 K 提供 45 W 的制冷量, 性能超越美国 Cryomech PT415 RM 和日本住友 RP-182B2S 产品. 将其作为预冷制冷机, 搭建的 1 K 低温系统 4 K 冷盘直径超过 360 mm, 1 K 冷盘直径超过 220 mm, 最低获取了 1.1 K 的制冷温度, 并可在 1.6 K 提供 100 mW 的制冷量. 单冲程最低温度可达 1.01 K, 并可维持大于 0.5 h. 后续将进一步提高 4 K 脉管制冷机的性能, 将该 1 K 系统搭载上 9 T 超导磁体, 并将进一步开展更大冷量 mK 稀释制冷技术的研究.

参考文献

[1] Zhao Z Y, Wang C 2019 *Cryogenic Engineering and*

- Technologies: Principles and Applications of Cryogen-Free Systems* (CRC Press) p233
- [2] Li K, Wang Y N, Liu P, Yu F Q, Dai W, Shen J 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 190702 (in Chinese) [李珂, 王亚男, 刘萍, 禹芳秋, 戴巍, 沈俊 2023 物理学报 **72** 190702]
- [3] Zu H Y, Cheng W J, Wang Y N, Wang X T, Li K, Dai W 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 080701 (in Chinese) [祖红叶, 程维军, 王亚男, 王晓涛, 李珂, 戴巍 2023 物理学报 **72** 080701]
- [4] Wang C, Li K, Shen J, Dai W, Wang Y N, Luo E C, Shen B G, Zhou Y 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 090702 (in Chinese) [王昌, 李珂, 沈俊, 戴巍, 王亚男, 罗二仓, 沈保根, 周远 2021 物理学报 **70** 090702]
- [5] Zheng M W, Guo H W, Wei L J, Pan Z J, Zou J R, Li R X, Zhao M G, Chen H L, Liang J T 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 230701 (In Chinese) [郑茂文, 郭浩文, 卫铃佼, 潘子杰, 邹佳润, 李瑞鑫, 赵密广, 陈厚磊, 梁惊涛 2024 物理学报 **73** 230701]
- [6] Guan X, Fan J, Bian Y B, Cheng Z G, Ji Z Q 2024 *Chin. Phys. B* **33** 070701
- [7] Jahromi A E, Miller F K 2014 *Cryogenics* **61** 15
- [8] DeMann A, Mueller S, Field S B 2016 *Cryogenics* **73** 60
- [9] Cao H 2021 *J. Low Temp. Phys.* **204** 175
- [10] Bluefors and Cryomech 1 K systems products <https://bluefors.com/products/1k-systems/>
- [11] Oxford Instruments 1 K cryostats products <https://nanoscience.oxinst.com/dry-systems/products/teslatronpt>
- [12] Quantum Design 1 K measurement systems products <https://www.qd-china.com/zh/pro/detail3/1/1912091422155/1909260926498>
- [13] Wang L G, Qu Q X, Chen H, Dai N N, Zhao W Y, Jia P, Xu D, Li L F 2025 *Cryogenics* **145** 103992
- [14] Pengli 1 K cryostats products https://isite.baidu.com/site/wjzru1zo/96a2066c-8800-4095-9ec4-a0489538571f?ch=48&wid=6dfbf96df3554e288101d75dc1ec8912_0_0&uniqId=c4db65aa10714a8697008f3c034cf058
- [15] ZL Cryogenic 1 K cryostats products <http://zlcryogenic.com/display/141459.html>
- [16] Radebaugh R. 2009 *J. Phys. Condens. Matter* **21** 164219
- [17] Liu X M, Chen L B, Wu X L, Yang B, Wang J, Zhu W X, Wang J J, Zhou Y 2020 *Sci. China Technol. Sci.* **63** 434
- [18] Wang C 2016 *Cryocoolers* **19** 299
- [19] Wang C, Hanrahan T, Johnson M 2018 *Cryogenics* **95** 64
- [20] Wang C, Lichtenwalter B, Friebe A, Tang H X 2014 *Cryogenics* **64** 5
- [21] Qu Q X, Wang L G, Chen H, Dai N N, Jia P, Xu D, Li L F 2024 *Cryogenics* **138** 103797
- [22] Wu S G, Zhao B J, Tan J, Zhao Y J, Zhai Y J, Xue R J, Tan H, Ma D, Wu D R, Dang H Z 2023 *Energy* **277** 127691
- [23] Shen Y W, Liu D L, Chen S F, Zhao Q Y, Liu L, Gan Z H, Qiu M 2020 *Appl. Therm. Eng.* **166** 114667
- [24] Li X, Xu D, Wang W, Lin P, Liu H M, Nishimura A, Shen F Z, Li L F 2019 *Cryogenics* **102** 50
- [25] Uhlig K 2002 *Cryogenics* **42** 73
- [26] Wang C 2001 *Cryogenics* **41** 491
- [27] Liu X M, Pan C Z, Zhang Y, Liao Y, Guo W J, Yu D P 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 190701 (In Chinese) [刘旭明, 潘长钊, 张宇, 廖奕, 郭伟杰, 俞大鹏 2023 物理学报 **72** 190701]

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

A high-capacity 1-K cryogenic system pre-cooled by pulse tube cryocooler*

LIU Xuming¹⁾²⁾ ZHA Kuifan¹⁾²⁾ MA Shuai¹⁾²⁾ HAN Liming¹⁾²⁾
XIE Xiaolin¹⁾ GUO Weijie¹⁾²⁾ PAN Changzhao^{1)2)†}

1) (*International Quantum Academy, Shenzhen 518048, China*)

2) (*Shenzhen Quantum Cooling Technology Co., Ltd., Shenzhen 518048, China*)

(Received 15 February 2025; revised manuscript received 15 March 2025)

Abstract

A 1-K cryogenic system can provide a stable and necessary low-temperature environment for some fields such as quantum computing, condensed matter physics research, and cryogenic scientific instruments. Specifically, in the field of basic research, 1 K is an ideal condition for studying quantum phenomena in low-temperature physics, such as quantum Hall effect and topological phase transition; in the field of technical applications, 1 K is a necessary condition for some quantum devices, such as superconducting quantum interferometers and single-photon detectors, to achieve high-sensitivity operation; in the field of ultra-low temperature technology, 1 K is the pre-cooling stage of refrigeration technologies, such as dilution refrigerators, and is also the basis for further achieving mK temperature ranges and lower temperatures. At present, in most of domestic 1-K systems, GM (Gifford-McMahon) cryocoolers are used for pre-cooling. These systems encounter some difficulties in achieving lower vibration control, lower electrical noise interference, lower pre-cooling temperature, and higher liquefaction efficiency. The 1-K systems based on pulse tube cryocoolers pre-cooling have inherent advantages in solving these problems. In this work, a 4-K GM-type pulse tube cryocooler is first developed by using a domestic helium compressor and a developed rotary valve, and the cold-end heat exchanger and the room-temperature phase shifters are redesigned in order to achieve a minimum cooling temperature of 2.14 K, and provide 1.5 W at 4.2 K and 45 W at 45 K cooling capacity simultaneously. With the home-made pulse tube cryocooler as the pre-cooling stage, a 1-K cryogenic system is further constructed. By designing key components such as JT flow resistance, combined thermal switch, and anti-superflow structure, a minimum cooling temperature of 1.1 K is achieved, with a cooling capacity of 100 mW at 1.6 K. This study lays an important foundation for subsequently developing dilution refrigerators with larger cooling capacity.

Keywords: pulse tube cryocooler, GM-type, 1-K system, Dilution refrigeration

PACS: 07.20.Mc

DOI: [10.7498/aps.74.20250181](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250181)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250181](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250181)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2023YFF0721303), the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2024A1515012045), and the Science and Technology Program of Shenzhen, China (Grant No. RCBS20221008093120048).

† Corresponding author. E-mail: pancz@iqasz.cn



基于脉管制冷机预冷的1 K大冷量低温系统

刘旭明 查奎帆 马帅 韩丽明 谢晓霖 郭伟杰 潘长钊

A high-capacity 1-K cryogenic system pre-cooled by pulse tube cryocooler

LIU Xuming ZHA Kuifan MA Shuai HAN Liming XIE Xiaolin GUO Weijie PAN Changzhao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 110701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250181

CSTR: 32037.14.aps.74.20250181

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250181>

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

4 K大冷量GM型脉冲管制冷机

4 K GM-type pulse tube cryocooler with large cooling capacity

物理学报. 2023, 72(19): 190701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230910>

冷凝泵型稀释制冷机实验研究

Experimental analysis of condensation-pump dilution refrigerators

物理学报. 2023, 72(8): 080701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222257>

稀释制冷技术

Dilution refrigeration technology

物理学报. 2024, 73(23): 230701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241211>

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>

50 mK多级绝热去磁制冷机的实验研究

Experimental research on a 50 mK multi-stage adiabatic demagnetization refrigerator

物理学报. 2023, 72(19): 190702 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231102>