

50 mK 多级绝热去磁制冷机的实验研究*

李珂^{1) #} 王亚男^{1) #} 刘萍^{1) 2)} 禹芳秋^{1) 2)} 戴巍^{1) 2) †} 沈俊^{1) 2) ‡}

1) (中国科学院理化技术研究所, 低温工程重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2023 年 7 月 6 日收到; 2023 年 7 月 28 日收到修改稿)

随着近年来凝聚态物理、空间观测与量子技术的不断发展, 极低温制冷需求也日益增多. 绝热去磁制冷具有不依赖重力、结构紧凑、成本较低等特点, 可同时满足空间和地面应用. 本文设计并研制了一台 50 mK 多级绝热去磁制冷机. 该机为三级串联架构, 由一台 GM 型脉管制冷机提供 4 K 预冷; 采用钐钴石榴石和十二水合硫酸铬钾作为制冷工质; 研制的主动式/被动式气隙热开关, 用以控制级间传热; 针对磁屏蔽、恒温控制等构建了多个数值模型进行辅助设计. 目前该机获得的最低制冷温度为 38 mK, 100 mK 时制冷量约 71 mJ, 温度波动 10.6 μ K. 本研究为后续开展 50 mK 连续绝热去磁制冷奠定了重要基础.

关键词: 绝热去磁制冷, 极低温, 多级**PACS:** 07.20.Mc, 07.05.Tp, 44.10.+i, 41.20.Gz**DOI:** 10.7498/aps.72.20231102

1 引言

极低温制冷技术通常是指获取 1 K 以下温度的技术, 在前沿物理、空间探测、量子技术等领域有着重要应用. 一方面, 极低温制冷能够提供极端实验环境, 探索和发现极低温下的物理规律, 例如 ^3He 超流、量子反常霍尔效应; 另一方面, 极低温制冷也是诸多先进仪器和尖端科技的关键支撑技术, 如单光子探测器、超导量子计算机等.

目前主要的极低温制冷技术有三种: 吸附制冷、稀释制冷和绝热去磁制冷 (adiabatic demagnetization refrigeration, ADR). 吸附制冷虽具有体积小、可靠性高的优点, 但热效率低, 制冷温度下限较高, 约 250 mK, 远高于后两者 (10 mK 以下); 稀释制冷具有可连续制冷、冷量大、无电磁干

扰等优点, 自 20 世纪 60 年代起, 逐渐取代更早出现的绝热去磁制冷成为主流. 但稀释制冷机需要依赖重力实现相分离, 无法满足空间应用. 随着 20 世纪 90 年代空间科学对探测器分辨率的要求不断提高, 亟需发展空间可用的极低温制冷技术, 而无需依赖重力运行的 ADR 几乎已成为唯一选择. 美国 NASA^[1-4]、欧洲 ESA^[5-7]、日本 JAXA^[8,9] 等国际机构均开展了绝热去磁制冷相关研究, 其中以美国 NASA 技术最为代表性. 2001 年 Shirron 等^[10] 提出了基于恒温级可连续运行的 ADR 架构, 解决了绝热去磁制冷循环本征不连续难题, 拓展了 ADR 的应用场景. 凭借着结构紧凑、无需稀缺 ^3He 工质、易于维护和操作等优势, 用于地面实验的商业 ADR 设备也在国际上相继出现, 如美国 FormFactor 公司^[11] (原 HPD 公司) 与德国 Entropy 公司^[12] 等.

* 国家重点研究计划 (批准号: 2021YFC2203303)、中国科学院仪器设备研制项目 (批准号: GJJSTD20190001) 和中国科学院理化技术研究所所长基金 (批准号: 2022-DW) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: cryodw@mail.ipc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: jshen@mail.ipc.ac.cn

目前国内的极低温 ADR 技术研究很少, 成熟度低. 20 世纪 80 到 90 年代, 中国科学院万邵宁和容锡荣^[13]、冉启泽和李金万^[14]曾进行过绝热去磁的低温实验, 以十二水合硫酸铬钾 ($\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, CPA) 为制冷工质, 利用 ^4He 减压蒸发作为预冷, 获得 21 mK 最低温. 但尚未发展出可循环运行、温度可控的绝热去磁制冷机. 此后随着极低温设备的大量进口, 我国极低温制冷技术的相关研究几近停滞.

近年来, 国际形势日益严峻, 大量先进技术装备和科研仪器遭到禁运, 为保障我国在凝聚态物理、空间探测、量子技术等领域相关科研的顺利进行, 本课题组^[15]自 2019 年开展绝热去磁制冷机的自主研究, 并成功搭建国内首台可循环运行、制冷温度可控的绝热去磁制冷机, 最低制冷温度 460 mK. 之后又构建了一台采用钆镓石榴石 ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, GGG) 与十二水合铁铵矾 ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, FAA) 为制冷工质的两级 ADR 系统, 制冷温度进一步降低至 150 mK^[16], 但距离国际主流商业 ADR 仍有一定差距. 为此, 基于上述研究搭建了一台多级绝热去磁制冷系统. 本文将从技术原理、系统架构、关键部件以及实验结果等多个方面进行详细介绍.

2 ADR 结构及工作原理

2.1 ADR 基本结构及制冷循环

ADR 的基本结构如图 1(a) 所示, 磁热模块、超导磁体和热开关是三个基本部件. 磁热模块由磁热材料和热总线组成, 前者的磁热效应, 即磁熵随外界磁场变化而导致的吸放热, 是 ADR 冷量的来源; 后者则负责强化传热, 并将热量传递给热沉或

冷头. 超导磁体用来提供变化的磁场, 以激发材料的磁热效应. 热开关用来控制热量传递和断开, 是实现制冷循环的关键. 结合图 1(b), 具体的循环过程下.

1) $a \rightarrow b$: 热开关维持断开状态, 施加磁场, 磁热模块温度升高, 直至达到热沉温度 T_h .

2) $b \rightarrow c$: 闭合热开关, 控制励磁速率, 磁热模块开始向热沉等温放热, 直至达到最大磁场 B_{high} .

3) $c \rightarrow d$: 切断热开关, 降低磁场, 磁热模块温度降低, 直至目标制冷温度 T_c .

4) $d \rightarrow a$: 控制去磁速率, 进入恒温去磁过程, 直至磁场降低至 B_{low} , 之后进入下一个循环.

由上可知, 对负载的冷却主要由 $d \rightarrow a$ 过程完成, 且一旦磁场去磁至 B_{low} , 则必须进入 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 过程完成再生, 因此 ADR 制冷循环本质上属于非连续制冷. 此外, 理想的 ADR 制冷循环是由两个等温和两个绝热过程构成的卡诺循环, 这也是 ADR 制冷效率较高的原因之一.

2.2 多级 ADR

图 1(a) 为最基本的单级 ADR 结构, 要获得更低的制冷温度, 主要面临两个问题: 1) 为避免磁热材料进入磁有序状态导致无磁熵可用, 必须选用磁有序转变温度更低的材料, 但这类材料的磁熵变密度也较低; 2) 机械制冷机能提供的预冷温度通常为 3—4 K, 悬挂机构、热开关等部件会引入较大的漏热, 导致系统比功率降低甚至无法达到预期制冷温度. 为解决上述问题, 目前通常采用多级 ADR 架构, 如图 2 所示. 该架构将多级 ADR 串联, 利用上一级 ADR 为下一级提供预冷, 通过控制各级磁场与热开关的运行时序实现逐级冷却, 具体工作过程参见 4.1 节.

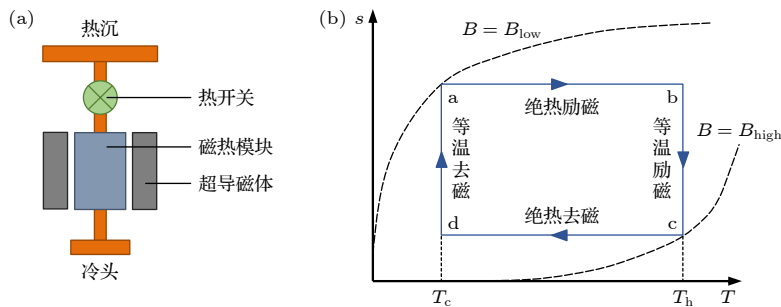


图 1 ADR 基本结构与工作原理 (a) 结构示意图; (b) ADR 制冷循环

Fig. 1. Schematic and principle of ADR: (a) Schematic diagram; (b) refrigeration cycle of ADR.

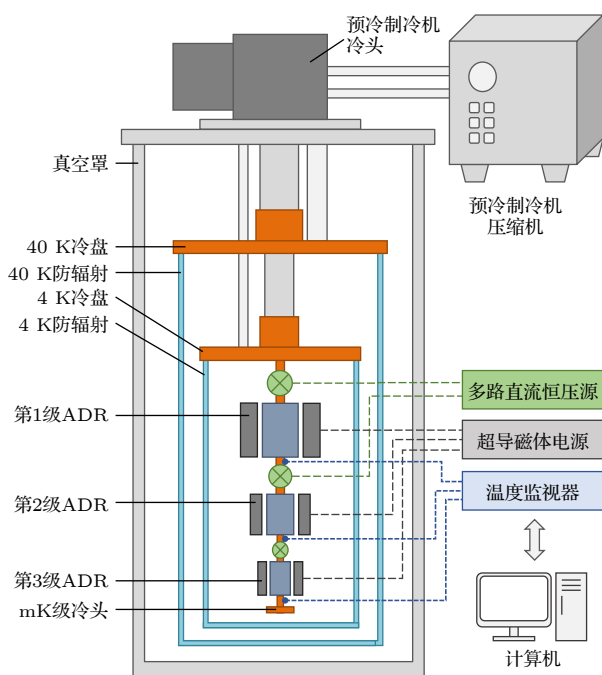


图2 多级ADR结构示意图

Fig. 2. Schematic diagram of multi-stage ADR.

多级架构中, 各级 ADR 可采用该温区下最佳的磁热材料. 其中, 高温级 ADR (制冷温度通常在 1 K 附近) 可采用磁有序转变温度虽高但磁熵密度更大的稀土氧化物、氟化物, 如 GGG 与 $\text{Dy}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (DGG) 等, 以获得更大的制冷量; 而低温级 ADR 则采用磁有序转变温度更低的水合物顺磁盐, 如 CPA, FAA 等, 以获得更低的制冷温度. 同时, 由于第一、二级 ADR 的存在, 4 K 热沉与 mK 级冷头间的漏热得到抑制. 此外, 多级架构还可进一步衍生出具备连续制冷能力的 ADR 技术, 从而解决 ADR 制冷循环本征不连续的难题^[10].

3 整机架构及关键部件

3.1 系统架构

图2为整机系统架构, 主要包含以下4部分.

1) 预冷系统: 主要包括一台 4 K GM 型脉管制冷机, 负责吸收第 1 级 ADR 高温侧释放的热量, 并冷却一级和二级防辐射屏, 阻挡外界环境的辐射漏热.

2) 真空系统: 主要包括真空罩、高真空分子泵以及真空管件, 保证系统内的真空度, 避免残余气体导致的漏热.

3) 测控系统: 主要包括用于监测磁热模块温

度的氧化钨温度计及其配套测温仪; 可编程控制的超导磁体电源; 驱动热开关的多路直流恒压源; 以及采用 Labview 语言编写的测量控制软件. 测控系统所要实现的功能有: ① 通过发送特定时序指令, 完成 ADR 自身的制冷循环控制; ② 控制各级 ADR 运行时彼此之间的时序配合; ③ 通过 PID 控制器, 实现 mK 级冷头的恒温控制.

4) ADR 核心: 由三级 ADR 串联构成, 下文将详细介绍分部件.

3.2 关键部件

3.2.1 磁热模块

如前文所述, 多级 ADR 的一大优势在于各级 ADR 可采用其工作温区下性能最佳的磁热材料. 对于本制冷机, 第 1 级 ADR 设计制冷温度在 0.7—0.8 K, 可看作高温级 ADR, 故选择磁熵密度较大, 磁有序转变温度 0.38 K 的 GGG; 第 2 级和第 3 级 ADR 属于低温级 ADR, 选择磁有序转变温度更低 0.009 K 的 CPA 作为磁制冷工质.

由于两种材料在稳定性和热导率上的巨大差异, 导致磁热模块结构存在较大不同, 如图3所示. 对于 GGG, 由于其形态稳定, 热导率相对较高, 因此, 热总线形式简单, 无需额外的强化传热结构, 直接与 GGG 复合粘接即可, 如图3(a)所示; 对于 CPA, 由于是水合物, 其稳定性差、热导率低, 故采用了图3(b)所示的特殊结构. 该结构包含两部分, 外围的 G10 外壳和端盖用来密封 CPA, 防止其失水导致失效; 内部有若干均匀分布铜线, 用来强化磁热模块内部的晶体传热. 通过合适的生长方法和参数优化后, 目前 CPA 填充率约 97%.

3.2.2 热开关

热开关位于各级磁热模块之间以及磁热模块和热沉之间, 用来控制热量传递. 理想的热开关应在 OFF 状态时近似绝热, 在 ON 状态时具有较高的热导, 即具有较大的开关比; 同时开关动作速度快, 开关驱动机构不会引入寄生热. 目前最常见的热开关主要有机械式、超导式和气隙式. 机械式由于驱动机构复杂, 仅适用于磁热模块和热沉之间; 超导式在 OFF 状态下很难实现有效绝热. 因此本系统中的三个热开关均采用了气隙式热开关, 具有结构简单、无运动部件、开关比大等优点.

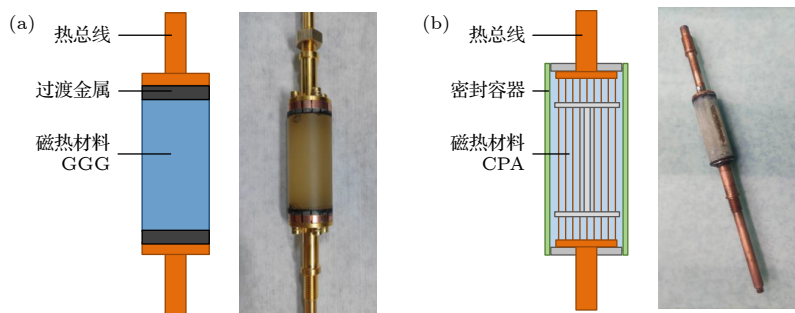


图 3 磁热模块结构示意图和实物图 (a) GGG 磁热模块; (b) CPA 磁热模块

Fig. 3. Schematic diagram and photo of salt pills: (a) GGG salt pill; (b) CPA salt pill.

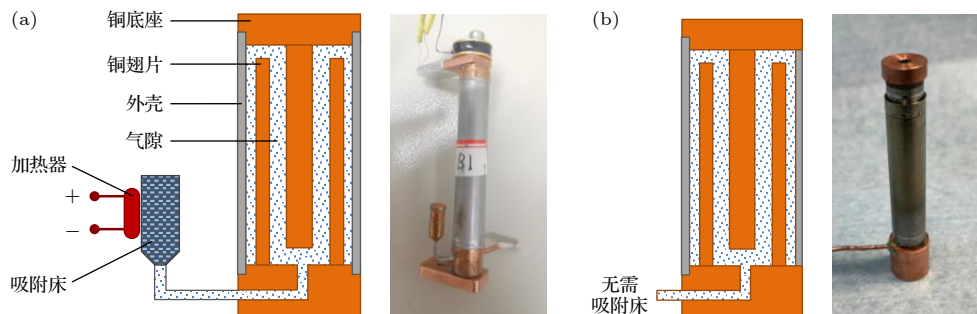
图 4 气隙式热开关示意图与实物图 (a) 主动式气隙热开关^[17]; (b) 被动式气隙热开关Fig. 4. Schematic diagrams and photos of gas-gap heat switches: (a) Active gas-gap heat switch^[17]; (b) passive gas-gap heat switch.

图 4(a) 为主动气隙式热开关结构示意图。通过电加热片给活性炭吸附床加热, 释放气体分子, 气隙中的压力升高, 热开关导通; 停止加热, 吸附床通过弱热连接被 4 K 热沉冷却, 吸附气隙中气体分子, 气隙压力降低, 热开关断开。本制冷机的第 1 级和第 2 级 ADR 均采用主动气隙式热开关, 但主动气隙式热开关的电加热片以及与 4 K 冷盘的弱热连接会引入寄生热。因此, 对于工作温区更低、对漏热更敏感的第 3 级 ADR, 采用了被动气隙式热开关, 如图 4(b) 所示。被动气隙式热开关取消了电加热片和吸附床, 利用铜翅片作为吸附表面、磁热模块自身的温度变化作为激励, 驱动气体的脱附和吸附, 实现开关通断。经测试, 所研制的被动式热开关在 0.3 K 温区下, ON 状态热导约为 3.9 mW/K, OFF 状态热导为 3.5 μ W/K, 开关比可达 1000 以上。

3.2.3 超导磁体和磁屏蔽

本制冷机中各级 ADR 所用的超导磁体均由 NbTi 多芯超导导线绕制而成, 中心最大磁场强度分别为 4, 2 和 1 T, 并各自装有二极管失超保护器。为降低引线漏热, 采用了 YBCO 高温超导导线。考虑到 ADR 的大多数应用场景对环境磁场有一定要

求, 因此, 在超导磁体外围设置有磁屏蔽。前期对磁屏蔽效果进行了实验测试, 并与数值仿真的优化设计进行了对比。图 5 显示, 在距离 4 T 磁体的相同位置, 数值计算和磁强计测量结果分别为 0.51 mT 和 0.58 mT。

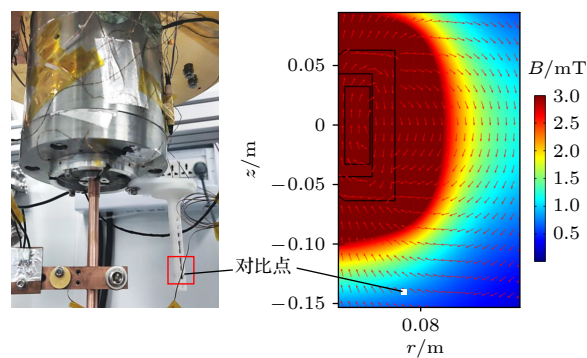


图 5 磁屏蔽的数值仿真与实验测试装置

Fig. 5. Numerical simulation and experimental measurement of magnetic shielding.

4 整机实验结果

图 6 为整个实验装置以及内部主要结构图。为使结构更加紧凑同时便于安装维护, ADR 核心采用了相对独立的结构设计。三级 ADR 采用平行布

置以节省纵向空间, 并放置于一块单独的冷盘之上, 该冷盘通过 3 根铜棒与 4 K 冷盘连接并传热。

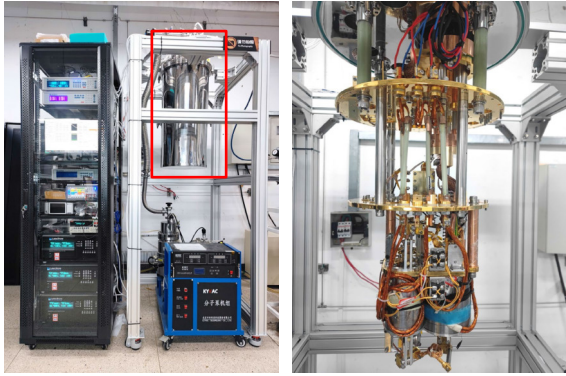


图 6 多级 ADR 系统实物图
Fig. 6. Photos of multi-stage ADR.

4.1 不确定度分析

实验中通过交流电阻桥 (Lake shore 372) 和电阻型温度计 (Lake shore RX102B) 来测量温度. 根据仪器使用手册查到, 在 20—300 mK 温区, 总不确定度为 4 mK^[18]. 实验中采用电加热片模拟制冷机的热负载, 因此, 电加热功率即为制冷机的制冷功率, 其可通过测量电流和加热片电阻值得. 电流使用数字万用表 (Keithley 2700) 测量, 不确定度为 0.1 μ A^[19]; 加热片阻值采用 Lake shore 372 测量, 不确定度为 2.1 Ω ^[18]. 根据误差传递法则可知, 制冷功率的不确定度约为 10 nW.

4.2 多级 ADR 的运行时序

多级 ADR 的制冷时序要比单级 ADR 复杂, 为便于理解, 以最低温实验为例, 结合图 7 介绍本制冷机的运行过程.

1) 准备阶段: 启动预冷制冷机, 使 4 K 冷盘和超导磁体温度降低至 4 K 附近; 对三个超导磁体励磁至电流上限; 开启主动热开关 1 和 2.

2) a \rightarrow b: 三个磁热模块被冷却至热沉温度, 准备过程结束.

3) b \rightarrow c: 切断热开关 1, 此时 ADR 核心与 4 K 热沉之间绝热.

4) c \rightarrow d \rightarrow e: 超导磁体 1 电流逐渐降低至 0, ADR1 进行去磁, 温度降低, 预冷 ADR2 和 ADR3, 直至三者温度接近.

5) e \rightarrow f: 断开热开关 2, 此时 ADR2, ADR3 与 ADR1 之间绝热.

6) f \rightarrow g: ADR2 进行去磁, 预冷 ADR3, 直至 ADR2 温度达到 200 mK; 期间调整去磁速率避免二者温差过大.

7) g \rightarrow h: ADR3 开始去磁, 当温度达到 150 mK 附近时, 热开关 3(被动式) 自动断开, 直至磁场接近 0 时, 获得最低制冷温度, 38 mK.

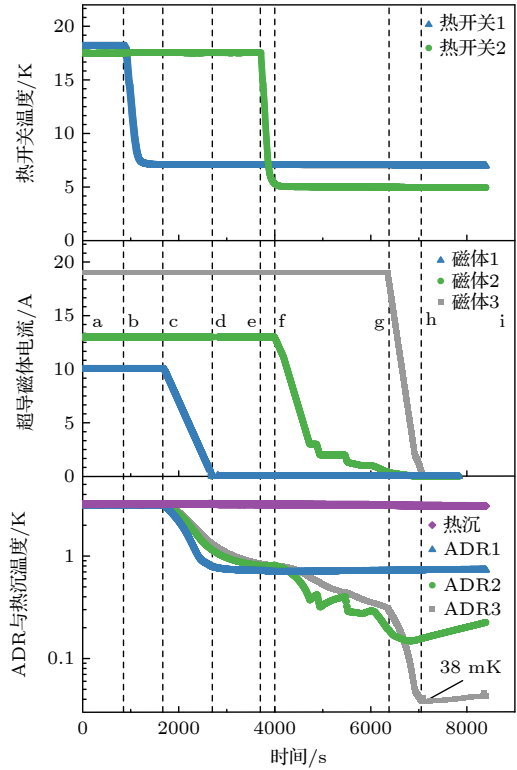


图 7 多级 ADR 运行时序及降温过程

Fig. 7. Operation sequence and cooling process of multi-stage ADR.

4.3 恒温控制与温度波动

ADR 的恒温控制属于测控系统功能的一部分, 用以维持去磁制冷过程中的冷头温度恒定. 当测量温度与设定值存在差异时, 由测控软件中的 PID 控制器发送指令, 调节超导磁体电源励/去磁速率. 实际中, 由于极低温制冷机的循环周期长, 系统热响应慢, 给 PID 控制参数整定带来一定难度. 为此, 建立了相关的数值仿真模型, 用以辅助加速 PID 的调参过程, 具体可参考文献 [20].

为了降低温度波动, 根据噪音来源在硬件线路接线方面改进以下三个方面.

1) 电磁噪音: 温度计的测量激励信号通常在 nA 级别, 因此需做好屏蔽. 在真空罩内部采用双绞线以减小磁通; 真空罩外部采用屏蔽线.

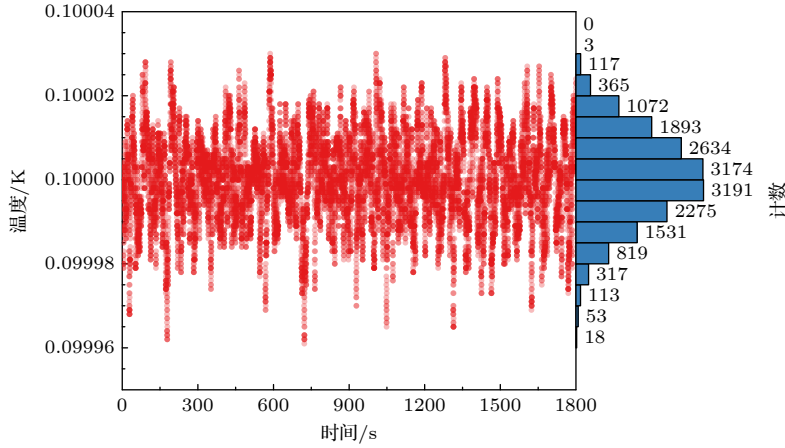


图 8 系统的温度波动

Fig. 8. Temperature fluctuation of the system.

2) 热噪音: 针对真空罩内部, 温度计自身和测量导线进行良好的热沉, 避免温度导致的测量误差, 同时还可降低导线漏热.

3) 接地: 外部采用星型单点接地, 防止形成地线环路.

系统的温度波动的测试情况如图 8 所示, 对 30 min 内共 17575 温度数据点统计分析, 可得温度波动 (RMSE) 为 10.6 μK .

4.4 制冷量与漏热

为避免混淆, 此处强调下制冷量与制冷功率的定义. 大多数制冷方式如蒸汽压缩制冷、斯特林制冷、稀释制冷等, 均为连续制冷, 制冷量常指代制冷功率, 单位为 W. 但对于 ADR 或其他非连续制冷, 制冷量 Q 和制冷功率 P 的关系为

$$Q = Pt, \quad (1)$$

其中 t 为制冷时间 (恒温去磁过程). 为测量制冷量, 在第 3 级 ADR 冷头上, 安装有电阻丝加热片, 用来模拟热负载, 而实际制冷量 Q_{act} 就等于焦耳热:

$$Q_{\text{act}} = I_2 Rt, \quad (2)$$

其中 I 通过 Keithley 2700 数字万用表测量, 电加热片阻值采用四线法通过交流电阻桥获得.

事实上, 磁热模块等温去磁时的总制冷量 Q_{total} , 还有一部分用于抵消系统的漏热量 Q_{loss} (包括热开关漏热、悬挂机构漏热、导线漏热、辐射漏热, 以及机械振动、电涡流等引起的损耗), 即

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{act}} + Q_{\text{loss}} = (P_{\text{act}} + P_{\text{loss}})t, \quad (3)$$

其中 P_{act} 为实际制冷功率, P_{loss} 为漏热功率. 显然在磁场、磁热模块等条件不变的情况下, 漏热量越小, 实际制冷量就越大, 其上限即为 Q_{total} .

在 100 mK 制冷温度下, 制冷功率分别为 1, 2, 3 μW 时, 各自的维持时间如图 9 所示, 显然制冷功率越大, 维持时间也越短. 根据 (3) 式对上述结果进行拟合, 可求漏热功率 $P_{\text{loss}} = 4.5 \mu\text{W}$, 总制冷量 $Q_{\text{total}} = 71 \text{ mJ}$; 同时也可推算出 100 mK 下的无负荷 ($P_{\text{act}} = 0$) 维持时间约为 4.3 h.

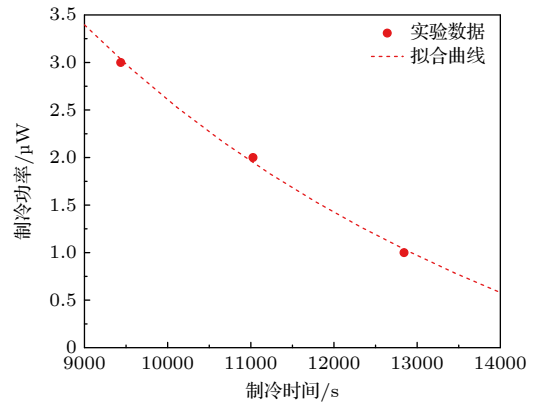


图 9 100 mK 下不同实际制冷功率的实验结果

Fig. 9. Experimental results of different actual cooling power at 100 mK.

5 总结与展望

本文设计并研制了一台多级绝热去磁制冷机, 介绍了其工作原理、系统架构、关键部件和主要实验结果. 目前, 所获得的最低制冷温度为 38 mK, 100 mK 下的制冷量为 71 mJ, 温度波动约 10 μK . 该机不仅是国内率先突破 50 mK 的多级 ADR 系

统,同时部分性能参数达到国外同类商业产品水平,为国内相关科研和尖端仪器提供了有力的技术保障. 为进一步提高整机性能,未来研究计划将从以下四个方面开展: 1) 改进磁热模块热总线结构和制造工艺,降低传热温差、提高可靠性; 2) 优化软热连接和悬挂机构,减少振动产热和漏热; 3) 优化气隙热开关设计,提高热导以缩短循环周期,并探索更低温区的超导式热开关; 4) 增设恒温级,开展连续型多级 ADR 架构的研究,并最终实现 ADR 连续制冷.

参考文献

- [1] Serlemitsos A T, Sansebastian M, Kunes E 1992 *Cryogenics* **32** 117
- [2] Serlemitsos A T, Sansebastian M, Kunes E S 1998 *Advance in Cryogenic Engineering* (Boston, MA: Springer) pp957–963
- [3] Shirron P, Wegel D, Dipirro M 2006 *Proceedings of 24th International Conference on Low Temperature Physics Orlando, Florida (USA), August 10–17, 2006* p1573
- [4] Shirron P J, Kimball M O, Dipirro M J, Bials T G 2015 *Phys. Procedia* **67** 250
- [5] Bartlett J, Hardy G, Hepburn I D, Blatt C B, Coker P, Crofts E, Winter B, Milward S, Aller R S, Brownhill M, Reed J, Linder M, Rando N 2010 *Cryogenics* **50** 582
- [6] Bartlett J, Hardy G, Hepburn I, Milward S, Coker P, Theobald C 2012 *Proceedings of SPIE Amsterdam Netherlands, September 24, 2012* p84521O
- [7] Brasiliano D A P, Duval J M, Luchier N, Eserivan S D, Andre J 2016 *International Cryocoolers Conference San Diego, California (USA) June 20–23, 2016* p479
- [8] Shinozaki K, Mitsuda K, Yamasaki N Y, Takei Y, Dipirro M, Ezoe Y, Fujimoto R, den Herder J W, Hirabayashi M, Ishisaki Y, Kanao K, Kawaharada M, Kelley R, Kilbourne C, Kitamoto S, McCammon D, Mihara T, Murakami M, Nakagawa T, Ohashi T, Porter F S, Satoh Y, Shirron P, Sugita H, Tamagawa T, Tashiro M, Yoshida S 2008 *Prococeedings of SPIE Marseille France, July 15, 2008* p70113R
- [9] Shinozaki K, Mitsuda K, Yamasaki N Y, Takei Y, Masui K, Asano K, Ohashi T, Ezoe Y, Ishisaki Y, Fujimoto R, Sato K, Kanao K, Yoshida S 2010 *Cryogenics* **50** 597
- [10] Shirron P J, Canavan E R, Dipirro M J, Tuttle J G, Yeager C J 2000 *Advance in Cryogenics Engineering*. (Boston, MA: Springer) p1629
- [11] ADR Cryostats, Formfactor https://www.formfactor.com/products/quantum-cryo/?_all_filters=adr-cryostats [2023-7-4]
- [12] Adiabatic Demagnetization Refrigerator, Entropy <https://www.entropy-cryogenics.com/products/> [2023-7-4]
- [13] Wan S N, Rong X S 1987 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **9** 133 (in Chinese) [万绍宁, 容锡棠 1987 低温物理学报 **9** 133]
- [14] Ran Q Z, Li J W 1990 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **12** 131 (in Chinese) [冉启泽, 李金万 1990 低温物理学报 **12** 131]
- [15] 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]
- [16] Wang C 2022 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王昌 2022 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [17] Yu F Q, Shen J, Dai W, Li K, Liu P, Wang C 2022 *Annual Conference of Engineering Thermodynamics and Energy Utilization of The Chinese Society of Engineering Thermophysics* (2021) Changsha, April 9–10, 2022 (in Chinese) [禹芳秋, 沈俊, 戴巍, 李珂, 刘萍, 王昌 2022 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术年会 (2021) 中国长沙, 4月9–10日, 2022]
- [18] *Model 372 AC Resistance Bridge and Temperature Controller User's Manual* Lake Shore Cryotronics, Inc., 2019
- [19] *Model 2700 Multimeter/Switch System User's Manual* Keithley Instruments, 2016
- [20] Li K, Wang C, Dai W, Shen J 2021 *Annual Conference of the Chinese Society of Rare Earths Chengdu, October 22–24, 2021* p88 (in Chinese) [李珂, 王昌, 戴巍, 沈俊 2021 中国稀土学会学术年会, 中国成都, 10月22–24日, 2021 第88页]

Experimental research on a 50 mK multi-stage adiabatic demagnetization refrigerator^{*}

Li Ke^{1) #} Wang Ya-Nan^{1) #} Liu Ping^{1) 2)} Yu Fang-Qiu^{1) 2)}
Dai Wei^{1) 2) †} Shen Jun^{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 6 July 2023; revised manuscript received 28 July 2023)

Abstract

With the development of condensed matter physics, space observation, and quantum technology in recent years, the demand for ultra-low temperature refrigeration has increased. The adiabatic demagnetization refrigerator (ADR) has the advantages of being unaffected by gravity, compact structure, and relatively low cost, which can meet the needs of space and ground applications.

In this paper, a 50 mK multi-stage ADR is designed and developed which comprises a GM-type pulse tube cryocooler for precooling and three ADR stages connected in series. For easy installation and maintenance, the three ADR stages are placed on a separate cold plate which is connected to the 4 K cold plate via copper columns. The $\text{Dy}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) is employed as the refrigerant in the first stage, whereas $\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (CPA) is utilized for the second stage and third stage. To control heat transfer between stages and the 4 K heat sink, active gas-gap heat switch and passive gas-gap heat switch are developed, with the latter having a switching ratio over 1000.

The 4 T, 2 T and 1 T superconducting magnets are utilized in the 1st, 2nd and 3rd stage, respectively, and a numerical model is used to optimize the design of magnetic shielding. In addition, an ADR simulation model with a proportional-integral-derivative (PID) controller is constructed to assist in tuning the controller parameters in the experiment. The lowest temperature achieved in the experiment is 38 mK, with a temperature fluctuation of 10.6 μK . The durations of different cooling power (1, 2 and 3 μW) at 100 mK are also measured. It is calculated that the no-load maintenance time is about 4.3 h, the leakage heat power is about 4.5 μW , and the total cooling capacity is about 71 mJ. This refrigerator is the first Chinese multi-stage ADR that can reach a temperature under 50 mK, which lays an important foundation for subsequent research on continuous adiabatic demagnetization refrigeration.

Keywords: adiabatic demagnetization refrigeration, ultra-low temperature, multi-stage

PACS: 07.20.Mc, 07.05.Tp, 44.10.+i, 41.20.Gz

DOI: 10.7498/aps.72.20231102

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFC2203303), the Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. GJJSTD20190001), and the Foundation of Director of Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 2022-DW).

[#] These authors contributed equally.

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

[‡] Corresponding author. E-mail: jshen@mail.ipc.ac.cn

50 mK多级绝热去磁制冷机的实验研究

李珂 王亚男 刘萍 禹芳秋 戴巍 沈俊

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

Li Ke Wang Ya-Nan Liu Ping Yu Fang-Qiu Dai Wei Shen Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 190702 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231102

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231102>

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

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>

全固态磁制冷系统物理模型的研究进展

Research progress of physical model of full-solid-state magnetic refrigeration system

物理学报. 2019, 68(21): 217501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191139>

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>

磁制冷材料 $\text{LaFe}_{11.5}\text{Si}_{1.5}$ 基合金成分与磁相变温度关系的高通量计算

High-throughput computation on relationship between composition and magnetic phase transition temperature of $\text{LaFe}_{11.5}\text{Si}_{1.5}$ -based magnetic refrigeration materials

物理学报. 2021, 70(20): 207501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211085>

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>

基于三个耦合量子点的四端混合驱动制冷机

Four-terminal hybrid driven refrigerator based on three coupled quantum dots

物理学报. 2022, 71(19): 190502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220904>