

用于亚开温区的极低温绝热去磁制冷机

王昌 李珂 沈俊 戴巍 王亚男 罗二仓 沈保根 周远

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

Wang Chang Li Ke Shen Jun Dai Wei Wang Ya-Nan Luo Er-Cang Shen Bao-Gen Zhou Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 090702 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202237

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202237>

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

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>

室温磁制冷技术的研究进展

Progress of room temperature magnetic refrigeration technology

物理学报. 2017, 66(11): 110701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.110701>

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>

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>

亚波长间距理想导体球阵列近区时间反演电磁场的快速求解

Fast solution of near-field time reversal electromagnetic field of sub-wavelength perfect conducting ball arrays

物理学报. 2018, 67(8): 084101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172508>

用于亚开温区的极低温绝热去磁制冷机*

王昌^{1)2) #} 李珂^{1) #} 沈俊^{1)2)3) †} 戴巍¹⁾²⁾ 王亚男¹⁾罗二仓¹⁾²⁾ 沈保根³⁾⁴⁾ 周远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 100190)

3) (中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000)

4) (中国科学院物理研究所, 磁学国家重点实验室, 北京 100190)

(2020 年 12 月 30 日收到; 2021 年 2 月 1 日收到修改稿)

随着空间观测、量子技术等前沿科研领域的发展, 亚开温区的极低温制冷需求日益增加. 本文设计并研制了一台极低温单级绝热去磁制冷机. 该制冷机由 GM 型制冷机提供约 3 K 热沉, 以钇镨石榴石为磁热工质, 由超导线圈提供最大为 4 T 的磁场, 通过绝热去磁, 实验最低温度可达 470 mK. 在恒温控制模式下, 可在 1 K 下提供 2.7 J 冷量, 温度波动小于 0.5 mK, 绝热去磁制冷的第二热力学效率为 57%; 在 0.8 K 下, 制冷量为 1.2 J. 该制冷机将作为 50 mK 温区三级绝热去磁制冷系统中的第一级, 在 1 K 下提供 0.7 mW 制冷功率. 本研究为进一步开展极低温多级连续绝热去磁制冷奠定了基础.

关键词: 亚开温区制冷, 极低温, 绝热去磁**PACS:** 07.20.Mc, 07.55.-w, 07.57.-c**DOI:** 10.7498/aps.70.20202237

1 引言

亚开温区 (sub-Kelvin) 制冷, 是指获取低于 1 K 温度并提供冷量的制冷技术. 该温区制冷的意义包括: 1) 利用物质在极低温下的极小比热, 构成探测器, 从而实现高分辨率、高灵敏度的测量, 如用于空间观测的单光子探测器, 工作温区通常低于 100 mK^[1]; 2) 降低系统热噪声、提高信噪比, 从而观测微弱信号. 如某些引力波探测器工作在 100 mK^[2]; 3) 为特殊物理现象提供条件. 如玻色-爱因斯坦凝聚 (2 mK)^[3]、量子相干性 (20 mK)^[4] 等.

常用的亚开温区制冷技术包括稀释制冷

(dilution refrigeration, DR)、吸附制冷 (sorption refrigeration, SR) 和绝热去磁制冷 (adiabatic demagnetization refrigeration, ADR). 三种技术的对比如表 1 所列^[5].

ADR 是最早出现的亚开温区制冷方式^[6-8], 但由于单级制冷不连续, 在 20 世纪 60 年代逐渐被稀释制冷机替代. 20 世纪 90 年代以来, 随着空间技术的发展, 亟需发展可在无重力条件下运行、高效紧凑的极低温制冷机, ADR 再次进入学者的视野. 尤其是可连续制冷的 CADR (continuous ADR) 的出现^[9], 使绝热去磁制冷再次成为最具发展潜力的极低温制冷技术, 其连续工作原理主要包括基于恒温级的串联结构和交替运行的并联结构. 目前国际领先的 ADR 技术以美国宇航局、欧洲航天局、

* 国家自然科学基金 (批准号: 51925605) 和中国科学院科研仪器设备研制项目 (批准号: GJJSTD20190001) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: jshen@mails.ipc.ac.cn

表 1 常见亚开温区制冷技术对比
Table 1. Comparison of commonly used sub-Kelvin refrigeration technology.

	原理	适用温区	优点	缺点
DR	氦3从其浓相进入稀相时吸收热量	5 mK—1 K	制冷温度低 冷量大 可连续制冷	依赖重力 依赖稀缺氦3
SR	工质饱和温度和饱和蒸汽压的对应关系, 蒸发制冷	300 mK—1 K	结构简单 可靠性高	最低温下限较高 热效率低 依赖稀缺氦3
ADR	磁热材料的磁熵随外加磁场变化	2 mK—1 K	内禀高效 不依赖重力 工质易得	单级制冷不连续 可能有电磁干扰

美国加州大学、英国伦敦大学等为代表^[10], 技术路线包括单级 ADR、dADR(单磁体多级 ADR)、多磁体多级 ADR.

我国的极低温绝热去磁制冷研究很少. 在 20 世纪 80 年代, 有学者对极低温下的绝热去磁现象进行了研究^[11], 采用铬钾矾 ($\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, CPA) 工质, 利用氦 4 减压蒸发预冷, 最低温度可达 21 mK, 在 25 mK 下可维持 6 h, 但尚未发展出可循环运行、制冷温度可控的绝热去磁制冷机. 后由于稀释制冷机的发展和极低温设备的进口, 我国极低温绝热去磁制冷技术的研究出现滞缓.

本研究研制了一台用于亚开温区的 ADR, 阐述了其制冷原理、构成和运行性能; 对其制冷循环的热力学参数进行了分析; 最后, 讨论了 ADR 的优化和未来发展方向. 该制冷机是国内首台可循环运行的绝热去磁制冷系统, 对我国实现极低温制冷设备的自主研制有着重要意义.

2 ADR 原理和基本构成

ADR 基于磁热效应, 即磁性材料由于磁熵(磁矩的无序程度)随外界磁场发生变化而产生的温度变化或吸放热效应. 当施加磁场时, 各磁矩取向趋于一致, 磁熵降低, 对外放热, 或在绝热条件下, 磁熵转变为晶格熵, 温度升高; 当撤去磁场时, 磁熵增加, 对外吸热, 或在绝热条件下, 晶格熵转变为磁熵, 温度降低. 为构建可持续运行的制冷机, 还需建立完整的制冷循环. 图 1 所示为 ADR 的基本构成, 包括磁热模块 (salt pill)、磁体、热开关、热沉和冷头.

磁热模块是 ADR 的冷量来源, 由磁热工质和传热结构两部分组成. 磁热工质一般为顺磁材料, 以保障磁熵随外界磁场有较大幅度的改变. 当温度

低于某一临界温度 (居里温度或奈尔温度) 时, 工质将从顺磁态转变为铁磁或反铁磁态, 磁矩出现自发有序, 磁熵急剧降低, 制冷能力降至几乎为 0. 因此, 这一临界温度决定了工质的制冷温区下限. 另一方面, 临界温度越低意味着磁矩间相互作用越弱, 磁性离子越稀疏, 例如在小于 0.1 K 温区通常使用含有结晶水的水合盐工质, 其磁熵密度较低, 即单位制冷量较小. 因此, 在选择磁热工质时应综合考虑制冷温区和磁熵密度, 一般选择制冷下限略低于目标制冷温度的工质. 此外, 还需考虑工质的热导率、稳定性、腐蚀性等^[12]. 常用的亚开温区磁热工质如表 2 所列^[5,13–17].

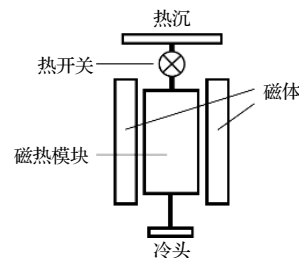


图 1 ADR 的基本构成

Fig. 1. Basic components of ADR.

表 2 ADR 中常用的磁热工质
Table 2. Commonly used magnetocaloric materials (MCM) in ADR.

名称	化学式	最低工作温度/K
GGG ^[13]	$\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	0.38
DGG ^[14]	$\text{Dy}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	0.6
GLF ^[15]	GdLiF_4	0.48
YbGG ^[16]	$\text{Yb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	0.054
MAS ^[5]	$\text{Mn}(\text{SO}_4)_2(\text{NH}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.17
FAA ^[5]	$\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{NH}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0.026
CPA ^[5]	$\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0.009
CCA ^[17]	$\text{CrCs}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0.01
CMN ^[5]	$\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	0.0015

表 3 ADR 中常用的热开关^[18]
Table 3. Commonly used heat switches in ADR.

	适用温区	开关比	寄生热来源	优缺点
机械式	不受限制	—	机械能损耗	可完全断开 结构复杂、耐用性差
超导式	≤ 0.5 K	>100	剩余导热 涡流产热	温区下限低 需额外磁场
气体式	≥ 0.2 K	≈ 1000	剩余导热	结构简单、可被动驱动 较低温区失效
磁阻式	≤ 20 K	>1000	剩余导热 涡流产热	适用温区广、开关比大 需额外磁场

热开关位于磁热模块和热沉之间,起到控制热量传递的作用.当热开关断开(OFF状态)时,磁热工质与热沉绝热;当热开关闭合(ON状态)时,磁热模块与热沉间传热导通.ADR中常用的热开关类型如表3所列,主要考虑因素包括温区、开关比和寄生热等.在某些应用场景中,磁热模块与负荷间也存在热开关.

磁场用于控制磁热材料的磁熵和温度的变化,ADR所需磁场大小一般为0.1—4 T,通常使用超导磁体.

理想的 ADR 循环如图2所示. 1) ab 段,等温磁化.磁热材料被预冷至热沉温度后(a 点),保持热开关闭合,施加磁场并控制磁化速率使其等温磁化,直至达到最大磁场(b 点),实际过程中等温磁化温度略高于热沉温度. 2) bc 段,绝热去磁.断开热开关,逐渐减小磁场,使工质在绝热条件下降温至目标温度,此时仍剩余一定磁场(c 点). 3) cd 段,等温去磁.在有负荷状态下,继续去磁并控制去磁速率,以进行等温制冷,直至磁场为0(d 点). 4) da 段,绝热磁化.当去磁完全后,需对材料磁化再生,保持热开关断开,施加磁场,使工质在绝热条件下升温至等温磁化温度(a 点),从而进入下一循环.上述循环由两个绝热过程和两个等温过程构成,本质上属于逆卡诺循环.因此,ADR是一种内禀高效的制冷技术.

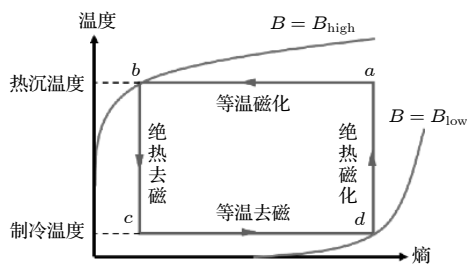


图 2 ADR 制冷循环
Fig. 2. Refrigeration cycle of ADR.

3 实验系统

3.1 实验装置

该制冷机包括预冷模块和 ADR 模块两部分,如图3和图4所示.

预冷模块采用 GM 型脉管制冷机(1 W@4 K,表示 4 K 下可提供 1 W 制冷功率,下同)提供预冷热沉,最低预冷温度小于 3 K.在制冷机冷头和冷盘间采用柔性热连接,以减小振动的影响.通过高真空、低热导支撑结构、低发射率的冷屏等减少各级间的漏热.

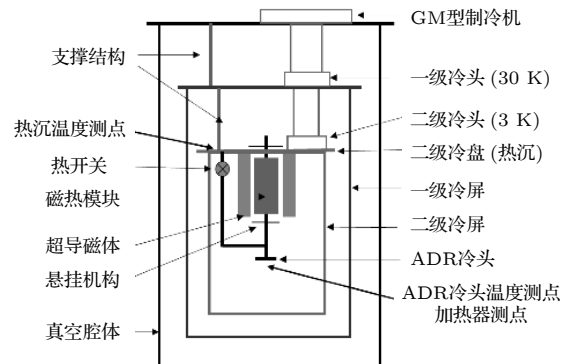


图 3 制冷系统示意图
Fig. 3. Schematic diagram of refrigeration system.



图 4 制冷系统实物图
Fig. 4. Photo of refrigeration system.

在高于 0.5 K 温区, 通常使用磁离子密度较高的稀土金属氧/氟化物作为磁热工质, 如 GGG, DGG, GLF. 由于 GGG 单晶具有较高的热导率, 有利于热量和冷量的取出, 且较易制备, 因此本制冷机选择 GGG 单晶作为 1 K 温区的制冷工质. 该制冷机使用的 GGG 单晶直径为 30 mm、长为 50 mm (质量为 252 g, 约 0.75 mol). 在 4 K 温区, GGG 单晶具有较高的热导率^[19], 约为 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. 因此该磁热模块不需额外强化传热结构, GGG 直接与复合热连接黏接即可. 磁热模块由低热导率的凯夫拉线 (Kevlar) 悬挂在超导磁体中, 通过热连接分别与热开关和冷头连接.

该制冷机使用的热开关为主动气隙式热开关, 通过加热或冷却吸附床, 使气体脱附或吸附, 实现开关通断. 该热开关在吸附床为 20 K 时完全导通, 4 K 下热导约为 $20 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$; 当温度低于 12 K 时完全切断, 其开关比大于 100.

超导磁体由 NbTi 多芯超导线绕制成, 磁热工质所在区域中心最大磁场为 4 T, 径向平均磁场为 3.88 T, 轴向平均为 3.44 T. 为削弱磁场对其他部件的干扰, 采用软磁材料作为磁屏蔽. 本装置中, 在最大磁场时, 冷头 (与磁体距离 10 cm) 处的磁感应强度为 0.5 mT.

3.2 误差分析

温度测量的总精度受以下因素影响^[20]:

$$\begin{aligned} \text{总精度} = & \left\{ \text{测量分辨率}^2 + \text{电子精度}^2 + \text{自热误差}^2 \right. \\ & \left. + \text{标定误差}^2 + \text{插值误差}^2 \right\}^{1/2}. \end{aligned}$$

本系统在 1 K 温区采用氧化钨电阻温度计, 在磁屏蔽条件下, 磁场对其干扰可忽略, 测量分辨率为 $50.2 \text{ m}\Omega$ ($143 \text{ }\mu\text{K}$). 采用电桥法 (Lakeshore 372) 测量, 电子精度为 $0.9 \text{ }\Omega$ (2.6 mK). 采用极小电压激励 ($200 \text{ }\mu\text{V}/1.9 \text{ pW}$), 使传感器的自热误差减小为 $1.2 \text{ }\mu\text{K}$. 标定误差为 $\pm 4 \text{ mK}$, 插值误差为 $\pm 0.2 \text{ mK}$. 因此温度测量的总精度为

$$\begin{aligned} & \left\{ (143 \text{ }\mu\text{K})^2 + (2.6 \text{ mK})^2 + (1.2 \text{ }\mu\text{K})^2 \right. \\ & \left. + (4 \text{ mK})^2 + (0.2 \text{ mK})^2 \right\}^{1/2} = 4.8 \text{ mK}. \end{aligned}$$

4 结果分析

4.1 ADR 的热力学分析

制冷温度、制冷量和制冷效率是衡量制冷机性

能的基本参数. 在 ADR 中, 这些参数的分析以磁热工质的熵为基础. 如图 2, 在绝热去磁过程 (bc) 中, 磁热工质的总熵 S 不变, 其可达到的最低温度取决于初始温度和磁场变化,

$$S(B_1, T_1) = S(B_2, T_2), \quad (1)$$

其中 (B_1, T_1) 和 (B_2, T_2) 分别为绝热过程起始和结束状态的磁感应强度和温度. 在等温磁化 (ab) 和等温去磁 (cd) 过程中, 放热量 Q_h 、制冷量 Q_c 以及制冷效率的计算依赖于过程的熵变 ΔS :

$$Q_h = T_h \Delta S_{ab}, \quad (2)$$

$$Q_c = T_c \Delta S_{cd}, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{\frac{Q_h - Q_c}{T_c} \frac{T_h - T_c}{T_h}}, \quad (4)$$

其中 T_h 和 T_c 分别为热沉温度和制冷温度, ε 为第二热力学效率. 因此, 磁热工质的熵与温度和磁场的关系是 ADR 热力学分析的关键.

从宏观层面, 磁热工质的总熵可通过测量比热 $C_B(B, T)$ 由下式间接获得^[12]:

$$S(B, T) = \int_0^T \left(\frac{C(T', B)}{T'} \right) dT'. \quad (5)$$

但在某些情况, 比热难以测量, 这时可以由磁化强度 $M(B, T)$ 和至少一组已知的磁感应强度 (B_1) 下的总熵数据 $S(T)_{B_1}$ 获得总熵:

$$\begin{aligned} S(B, T) &= S(T)_{B_1} + \Delta S(B, T)_{B_1} \\ &= S(T)_{B_1} + \int_{B_1}^B \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{B'} dB'. \end{aligned} \quad (6)$$

下文将基于上述过程推导出的总熵测量值 $S(B, T)$ ^[13], 对 ADR 的热力学参数进行分析.

另一方面, 在微观层面, 磁热工质的总熵 S 由晶格熵 S_l 、磁熵 S_m 和电子熵 S_e 三部分构成:

$$S = S_m(B, T) + S_l(T) + S_e(B, T), \quad (7)$$

式中, B 为磁感应强度, T 为温度. 其中: 晶格熵来源于晶格的热振动, 在温度远小于德拜温度时, 与温度的 3 次方成正比; 电子熵来源于传导电子的热运动, 在温度远小于费米温度时, 与温度成正比; 磁熵主要来自于核外电子绕核旋转和自旋产生的磁矩 (另外还包括核自旋磁矩), 其与磁场和温度的关系可由统计力学推导得到^[5].

$$\frac{S_m}{R} = x \cdot [\coth(x) - (2J+1) \cdot \coth(x \cdot (2J+1))] + \ln\left(\frac{\sinh(x \cdot (2J+1))}{\sinh(x)}\right), \quad (8)$$

式中, J 为磁性原子的总角量子数, 取决于材料本身; x 反映了磁场和温度对磁熵的影响, $x = \frac{\mu_B g B}{2k_B T}$, 其中 μ_B 为玻尔磁子 (9.27×10^{-24} J/T), k_B 为玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K), g 为兰德因子 (表征原子中电子自旋磁矩和轨道磁矩相互影响的参数, 取决于材料本身). 在亚开温区, 晶格熵和电子熵的量级远小于磁熵, 可忽略不计. 因此, 在缺乏实测物性的情况下, 也可由磁熵随温度和磁感应强度的变化近似为总熵变化, 以此分析 ADR 的热力学参数. 后文将给出两种理论分析方法的结果以及和实验的对比.

4.2 ADR 的实际工作过程

图 2 描述了理想的 ADR 循环, 但由于换热温差、工质内温度梯度等因素的存在, 实际过程与理想过程存在一定差异, 因此有必要对实际的循环过程进行考虑. 图 5 描述了 ADR 实际运行时首次循环和周期制冷循环的热力学过程, 图 6 记录了对应过程中工质温度 (测点位于冷头)、热开关和磁场的变化情况. 具体运行过程如下:

1) 首次制冷. 当工质被预冷至热沉温度后 (图 5 中 a 点), 保持热开关闭合, 以较快速率磁化, 使工质升温至等温磁化的目标温度 (图 5 中 b 点); 继续磁化并控制磁化速率, 使工质在该温度下等温磁化至最大磁场 (图 5 中 c 点); 在最大磁场下, 保持热开关闭合, 使工质恢复至热沉温度 (图 5 中 d 点);

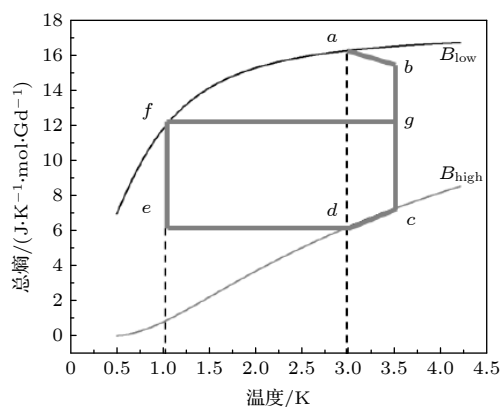


图 5 ADR 的实际循环

Fig. 5. Thermodynamic cycle of ADR.

断开热开关, 在绝热条件下逐渐减小磁场, 使工质降温至制冷温度 (图 5 中 e 点); 继续去磁并控制去磁速率, 使冷头在一定负荷下维持恒温制冷, 直至磁场为 0 (图 5 中 f 点), 进入再生 (recycle) 阶段.

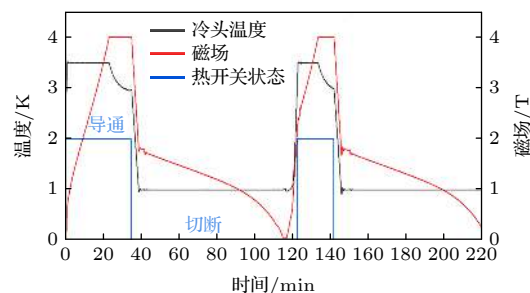


图 6 典型的 ADR 工作过程

Fig. 6. Typical running process of ADR.

2) 再生和周期制冷. 当去磁结束后, 保持热开关断开, 施加磁场使工质升温至等温磁化的目标温度 (图 5 中 g 点); 然后闭合热开关, 继续磁化并控制磁化速率, 使工质等温磁化至最大磁场 (图 5 中 c 点); 之后的过程与 1) 中 $c-d-e-f$ 过程相同. 制冷过程 ($e-f$) 和再生过程 ($f-g-c-d-e$) 构成了一个完整的周期.

4.3 制冷性能

4.3.1 最低温度

根据 4.1 节推导, ADR 在一次循环中可达到的最低温度取决于绝热去磁过程初始状态的温度和磁场 ((1) 式), 可由两种熵的计算途径分别得到. 图 7 展示了由两种理论途径计算的绝热过程中温度随磁场变化与实验值的对比, 绝热去磁的初始状

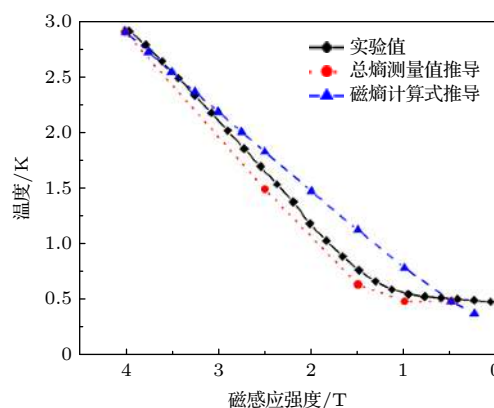


图 7 绝热去磁过程中温度-磁场对应关系

Fig. 7. T - B diagram during adiabatic demagnetization progress.

态为 4 T, 2.9 K, 其中红色点划线由 GGG 的总熵测量值^[13]及(1)式($B_2 = 0$ T)得到, 蓝色点划线由 GGG 的磁熵推导值((8)式)及(1)式得到. 与实验测量值对比发现, 采用磁熵推导式近似代替总熵计算的结果与实验值存在较大差异, 而以总熵间接测量值为依据计算工质的热力学参数的方法更为准确.

4.3.2 制冷量和制冷效率

实验中, 冷头上设有电加热片以模拟热负载, 通过测量加热片的电功率即可得到制冷机的制冷功率, 该功率与等温去磁持续时间的积分即为单周期制冷量 Q_c . 实验过程中施加的加热功率最大为 0.7 mW, 持续时间为 3850 s, 因此单周期制冷量约为 2.7 J. 当以更大功率加热时, 由于磁热模块产热和导热能力有限, 无法将冷头维持至低于 1 K.

为计算制冷的热力学第二效率((4)式), 还需测量单周期内工质向热沉的放热量 Q_h (图 5 中 $g-c-d$ 过程). 由于放热量难以直接测量, 本文采用了由加热器产热模拟磁化过程放热的方法间接测量放热量, 具体过程为: 在不运行 ADR 的情况下, 保持工质与热沉间热开关导通, 调节冷头处(即工质处)加热器加热功率, 使工质的温度变化与 $g-c$ 过程温度变化一致, 通过对加热功率进行时间积分获得加热量, 该加热量即可等效为 ADR 运行中 $g-c$ 过程的放热量. 而 $c-d$ 过程的放热量, 则可由磁热模块的总比热和 $c-d$ 段的温变计算得到. 上述方法可得, 在单个制冷周期中, ADR 在 $g-c$ 阶段放热量约为 9.2 J, 在 $c-d$ 阶段放热量约为 2.5 J. 因此 ADR 在热沉温度 T_h 为 2.9 K、制冷温度 T_c 为 1 K 下的第二热力学效率为

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{\frac{Q_h - Q_c}{T_h - T_c}} = \frac{2.7}{\frac{9.2 + 2.5 - 2.7}{2.9 - 1}} = 57\%. \quad (9)$$

在热开关切断状态下, 流向磁热模块及冷头的漏热来源包括辐射漏热、导线和悬挂机构导热、热开关剩余导热和振动产热. 总漏热功率由实验测量: 在无其他冷热源条件下, 磁热模块经过 12 h 由 0.8 K 升温至 1.9 K, 根据(5)式计算出 1 K 下漏热功率 P 为 120 μ W,

$$P = C \frac{dT}{dt}. \quad (10)$$

其中 T 为冷头温度, C 为磁热模块及冷头总热容.

5 总结与展望

本文设计并研制了一台极低温区绝热去磁制冷机, 介绍了其工作原理、结构及初步实验结果. 该机目前获得了 470 mK 最低温, 单周期制冷量 2.7 J@1 K, 预计作为 50 mK 温区三级绝热去磁制冷系统中的第一级, 提供制冷功率 0.7 mW@1 K.

未来还计划从以下两方面进行改进以提高制冷性能: 1) 提高热开关在导通状态下的热导, 降低因换热温差带来不可逆损失; 2) 提高磁热模块的传热性能, 同时优化连接、支撑、悬挂等部件, 减少振动产热和结构导热漏热. 随着空间探测和量子技术等领域的发展, 亚开温区制冷的需求日益增加. 与另外两种技术相比, ADR 具有高效、紧凑、不依赖重力、工质易得的突出优点, 是一种极具发展潜力的亚开温区制冷技术. 本文介绍的制冷机是国内首台可循环运行的绝热去磁制冷系统, 为进一步开展极低温多级连续绝热去磁制冷研究奠定了基础.

参考文献

- [1] Collaudin B, Rando N 2000 *Cryogenics* **40** 797
- [2] Coccia E 2000 *Physica B* **280** 525
- [3] Osheroff D D, Richardson R C, Lee D M 1972 *Phys. Rev. Lett.* **29** 88
- [4] Hornibrook J M, Colless J I, Lamb I D C, et al. 2014 *Phys. Rev. Appl.* **3** 024010
- [5] Pobell F 2006 *Matters and Methods at Low Temperature* (New York: Academic Press) pp203, 209, 206
- [6] De Haas W J, Wiersma E C, Kramers H A 1933 *Physica* **1** 1
- [7] Giaque W F, MacDougall D P 1933 *Phys. Rev.* **43** 768
- [8] Kurti N, Simon F 1934 *Nature* **133** 907
- [9] Shirron P, Canavan E, DiPirro M, Jackson M, King T, Panek J, Tuttle J 2001 *Cryogenics* **41** 789
- [10] Shirron P J 2014 *Cryogenics* **62** 130
- [11] Wan S N, Rong X S 1987 *Chin. J. Low Temp.* **2** 133 (in Chinese) [万绍宁, 容锡桑 1987 低温物理学报 **2** 133]
- [12] Wikus P, Canavan E, Heine S T, et al. 2014 *Cryogenics* **62** 150
- [13] Fisher R A, Brodale G E, Hornung E W, Giaque W F 1973 *J. Chem. Phys.* **59** 4652
- [14] Goshorn D P, Onn D G, Remeika J P 1977 *Phys. Rev. B* **15** 3527
- [15] Numazawa T, Kamiya K, Shirron P, DiPirro M, Matsumoto K 2006 *AIP Conf. Proc.* **850** 1579
- [16] Diego A P B, Jean-Marc D, Christophe M, Emmanuelle B, Jean-Pascal B, Mike Z, Nicolas L 2019 *Cryogenics* **2** 105
- [17] Hagmann C, Benford D J, Richards P L 1994 *Cryogenics* **34** 213
- [18] Wang C, Wang Y N, Liu Y W, Dai W, Shen J 2019 *Vacuum & Cryogenics* **25** 317 (in Chinese) [王昌, 王亚男, 刘远威, 戴巍, 沈俊 2019 真空与低温 **25** 317]
- [19] Daudin B, Lagnier R, Salce B 1982 *J. Magn. Magn. Mater.* **27** 315
- [20] Model 372 AC Bridge and Temperature Controller, Lakeshore <http://www.lakeshore.com/products/product-detail/model-372/> [2021-12-30]

Ultra-low temperature adiabatic demagnetization refrigerator for sub-Kelvin region^{*}

Wang Chang^{1)2)#} Li Ke^{1)#} Shen Jun^{1)2)3)†} Dai Wei¹⁾²⁾ Wang Ya-Nan¹⁾
Luo Er-Cang¹⁾²⁾ Shen Bao-Gen³⁾⁴⁾ Zhou Yuan¹⁾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 100190, China*)

3) (*Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, China*)

4) (*State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 30 December 2020; revised manuscript received 1 February 2021)

Abstract

With the development of space observation, quantum technology and other frontier scientific research fields, the demand for ultra-low temperature refrigeration in sub-Kelvin region is increasing. Compared with dilution refrigeration and sorption refrigeration, adiabatic demagnetization refrigeration (ADR) has the outstanding advantages of high efficiency, compact, gravity independence and accessibility of working materials, which make ADR a promising technology for sub-Kelvin cooling.

A single-stage ultra-low temperature adiabatic demagnetization refrigerator is designed and developed. The thermodynamic principle and quantitative analysis are presented, from the macroscopic and microcosmic view, and operating results show good agreement with the theoretical value.

This refrigerator is precooled to 3 K by a GM-type refrigerator, with 252 g gadolinium gallium garnet (monocrystalline) used as a working medium. The maximum magnetic field of 4 T is provided by a superconducting coil. Flexible heat connection is used between the pre-cooler and ADR, so heat generated by vibration decreases. From (3 K, 4 T), the lowest temperature can reach 0.47 K by adiabatic demagnetization, which is consistent with the result drawn from the entropy data. In a constant-temperature-control mode, the demagnetization rate is controlled by a feedback loop, so the temperature can be held in the presence of a load. A cooling capacity of 2.7 J is provided at 1 K, with temperature fluctuation being lower than 0.5 mK, and the second thermodynamic efficiency of adiabatic demagnetization refrigeration is 57%. at 0.8 K, the cooling capacity is 1.2 J.

Future work on improving the performance includes the improving of the on-off ratio of the heat switch, so, the irreversible loss caused by the heat transfer temperature difference in conduction state can be reduced. Improving the heat transfer performance of the salt pill, the heat can be ejected in a shorter period.

This refrigerating machine is the first Chinese adiabatic demagnetization refrigeration system that can be operated in circulation, which is expected to be the 1st stage of a three-stage adiabatic demagnetization refrigeration system in a 50 mK temperature zone. This study lays a foundation for further developing continuous multistage adiabatic demagnetization refrigeration at ultra-low temperature.

Keywords: sub-Kelvin refrigeration, ultra-low temperature, adiabatic demagnetization refrigerator

PACS: 07.20.Mc, 07.55.-w, 07.57.-c

DOI: 10.7498/aps.70.20202237

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51925605) and the Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. GJJSTD20190001).

These authors contributed equally.

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