



稀释制冷机及其中的热交换问题

付柏山 廖奕 周俊

Dilution refrigerator and its heat transfer problems

Fu Bai-Shan Liao Yi Zhou Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 230202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211760

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211760>

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

专题: 纳米工程和热物理

稀释制冷机及其中的热交换问题*

付柏山¹⁾ 廖奕¹⁾ 周俊^{2)†}

1) (南方科技大学量子科学与工程研究院, 深圳 518055)

2) (南京师范大学物理科学与技术学院, 量子输运与热能科学中心, 南京 210023)

(2021年9月21日收到; 2021年10月9日收到修改稿)

在低温物理和量子信息科学等学科的研究中, 持续保持稳定的 mK 级低温是至关重要的. 稀释制冷机是用来获得极低温的制冷装置, 它利用了超流态 ^4He 与其同位素 ^3He 的混合溶液在超低温下的相分离效应. 热交换器的性能是决定连续循环工作制冷机性能的关键因素. 在极低温下, 氦与金属之间存在巨大的界面热阻(即卡皮查热阻), 利用多孔的烧结金属颗粒来提高接触面积, 可以有效地解决热交换问题. 因此, 研究极低温下金属颗粒与液氦之间的热交换, 并以此为指导研制高性能的银粉烧结换热器具有重要的应用价值.

关键词: 稀释制冷机, 界面热阻, 换热器

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.70.20211760

1 引言

很多前沿的科学研究工作需要极低温条件下进行, 因此研制能获得极低温的制冷设备是非常重要的. 稀释制冷机是可以连续稳定工作的一种制冷设备, 它为极端环境的物理实验研究提供了可靠的支撑, 特别是在当今迅速发展的量子科学(如量子超导计算、量子输运、量子传感、量子材料)以及航空航天、医疗、天文等领域发挥着重要的作用. 在极低温下, 液氦具有很多量子特性, 例如超流动性和极高的热导率. 特别地, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合液在一定条件下会发生分相, London^[1] 根据这一现象提出了分相制冷原理, 1965年 Das 等根据这一理论制成了 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 稀释制冷机, 目前的稀释制冷机最低可达到大约 2 mK 的低温^[2]. 稀释制冷机经历了从间歇式制冷到连续式制冷的发展过程^[3,4]. 早期的稀释制冷机, 按照有无制冷剂可分为“湿式”和“干式”两种, 湿式是利用液氮及液氦来提供预冷, 干式则是利用机械制冷机来提供预冷^[5].

2 稀释制冷机

稀释制冷机的工作原理是以 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 溶液的相图为基础的, 如图 1 所示. 图中 $X = n_3/(n_3+n_4)$ 是 ^3He 的浓度, n_3 和 n_4 分别是溶液中 ^3He 和 ^4He 的克分子数. 以一定比例混合的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 气体经过预冷后, ^4He 气体首先液化, 在温度低于 3.19 K 时 (1 atm, 1 atm = 1.01×10^5 Pa) ^3He 也被液化, 进一步降温至 2.17 K 后出现超流态液氦. 当温度低于临界温度 $T_c = 0.87$ K 时, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的混合液将出现分相, 密度较小的 ^3He 浓相会浮在上层, 而密度相对较大的 ^3He 稀相会沉到下层. 值得注意的是, 在温度降至接近 0 K 时, 浓相中的 X 可以接近 100%, 但稀相中的 X 却不是 0, 而是 6.4%. 出现这一有限浓度的原因是 ^3He 原子和超流 ^4He 的结合能要比纯 ^3He 液体的结合能更低. 稀释制冷机的工作温度即在两相区(即图 1 中横虚线所示), 对给定工作温度, 稀相的浓度为 X_1 , 浓相的浓度为 X_2 .

稀释制冷机的核心部分主要由蒸馏室、连续换热器、中间冷板、银粉烧结换热器以及混合室等

* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 11890703)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhoujunzhou@njnu.edu.cn

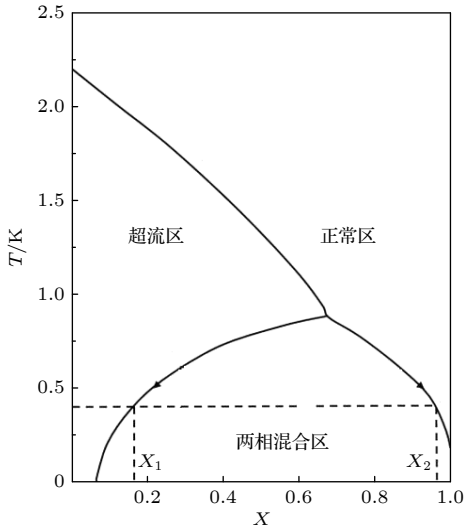


图 1 ^3He - ^4He 溶液相图, X 为 ^3He 的浓度

Fig. 1. Phase diagram of ^3He - ^4He solution, where X is the concentration of ^3He .

组成, 此外还包括真空腔、保持连续工作的抽吸循环气体处理系统, 如图 2 所示. 混合室下面稀相部分是与蒸馏室相通的, 在外部抽吸泵的作用下, 由于 ^3He 与 ^4He 饱和蒸气压的不同, 大量 ^3He 将被抽走. 与此同时, 在渗透压的作用下, 为了维持 ^3He 的浓度平衡, 混合室中的 ^3He 原子不断进入蒸馏室, 进一步破坏了两相分界面之间的动态平衡. 为了维持平衡, ^3He 原子从周围环境中吸收热量, 提高自身的能量, 从低焓值的浓相进入到高焓值的稀相, 从而完成从环境吸热降温的目的. 被蒸馏室上面的抽吸泵抽走的气体 (主要是 ^3He) 在过滤液氮阱中净化或增压再送回到稀释制冷机中, 通过换热器的降温又补充入混合室上面 ^3He 浓相中. 于是 ^3He 蒸气在蒸馏室上面不断被抽走, 经过换热冷却被送回混合室, 之后越过两相界面进入稀相, 最后在渗透压的作用下回流到蒸馏室的底部液体中, 至此完成整个稀释制冷机的工作循环 (如图 2 所示). 为了让稀释制冷机可靠地工作, 须要精准调控蒸馏室的温度和整个循环过程的混气流量. 稀释制冷机的制冷量 Q 主要由循环流量 n 与混合室冷板温度 T 决定, 其表达式为

$$Q = 84nT^2. \quad (1)$$

(1) 式表明制冷量与循环流量成正比, 但提高循环流量会导致大流量的室温混合气体被送回进入制冷机, 加大了制冷机的换热器的设计难度. 因此, 制冷机的设计需要合理地平衡制冷量和混合室温

度这两个重要参数, 仅强调一个指标对稀释制冷机都是不合理的.

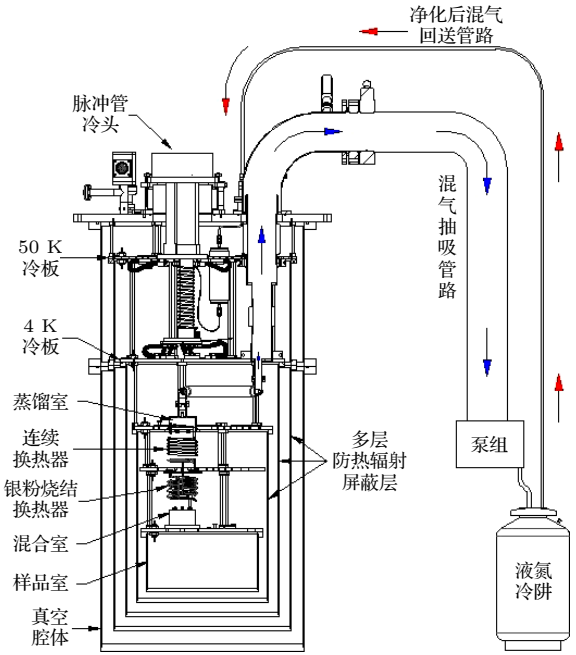


图 2 稀释制冷机原理图, 箭头方向表示 ^3He 流动方向

Fig. 2. Schematic diagram of dilution refrigerator (direction of arrows represent the flow direction of ^3He).

3 银粉烧结换热器

稀释制冷机的实物照片如图 3 所示, 其核心换热器是应用于极低温区的银粉烧结换热器, 其性能将决定制冷机能获得的最低温度. 众所周知, 当两种温度不同的物质接触时, 热量会从高温物质流向低温物质, 热流密度 (J) 的大小正比于温差 (ΔT):

$$J = \frac{\Delta T}{R_K}, \quad (2)$$

其中系数 R_K 称为界面热阻, 也被称为卡皮查热阻, 以此纪念前苏联著名低温物理学家 P. L. Kapitza, 它是单位温差下单位时间内通过单位面积的热量. 近年来, 关于界面热阻的研究取得了极大的进展^[6-11]. 稀释制冷机的工作温度在 1 K 以下, 此时实验测量和声学不匹配模型 (acoustic mismatch model, AMM) 都表明 R_K 大致正比于 T^3 , 也就是说随着温度的降低, 热阻会变得非常大^[12], 从而导致常规换热器在极低温下无法使用. 人们通过烧结金属颗粒的方法, 将金属与液氦的接触面积提高了几个数量级, 例如百纳米直径颗粒的比表面积可以达到 $10^7 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (或 $1 \text{ m}^2/\text{g}$). 银是所有金属中导电性和

导热性最好的金属之一, 银的熔点低密度大, 比其他金属更易烧结, 所以目前普遍采用的是烧结银粉换热器^[13], 实物如图 3 所示. 用直径为数百纳米的银颗粒进行烧结, 烧结物内分布有众多的孔隙, 尺寸一般在微米或者亚微米级别, 目前尚无有效的检测方法. 考虑到³He 原子必须通过狭窄的连接通道在相邻的孔隙之间运动, 多孔结构形成的孔洞和通道的大小也是需要考虑的重要因素. 为了使热交换面积较大并且流动阻力较小, 需要寻找最佳的烧结结构.



图 3 超低温稀释制冷机系统及其关键换热部件: 连续换热器和银粉烧结换热器 (图片由南方科技大学量子科学与工程研究院提供)

Fig. 3. Ultra-low temperature dilution refrigerator system and its key components: Continuous heat exchanger and sintered Ag powder heat exchanger. (Image courtesy of Institute for Quantum Science and Engineering, Southern University of Science and Technology).

从理论的角度看, 烧结银粉换热器中除了比表面积的增加以外, 还涉及传热机理的变化. 当温度降低至 1 K 以下, ³He 会从普通液体逐渐转变成费米液体^[14], 常用的声学不匹配模型并不适用, 需要考虑³He 液体的量子效应, 因此必须采用朗道费米液体理论. 实验测量发现, 当温度低于 10 mK 时, 纯³He 液体与烧结银颗粒之间的界面热阻会显著降低^[15](如图 4 所示), 而且温度依赖关系会显著偏离 T^{-3} 关系, 这对提升换热器的效能是有利的. 这一转变的主要原因是烧结后互相连接金属颗粒发生弹性形变时会产生低能振动模式, 即软声子模式, 该模式和³He 准粒子的相互作用会提供额外的界面导热通道^[16]. 除此以外, 银颗粒在制备过程中

往往会受到污染, 表面的局域磁性杂质 (如各种形式的氧原子和氧离子) 会和³He 的核自旋发生自旋-自旋耦合, 该耦合效应可以提供另一个导热通道. 界面热阻的磁场依赖实验已经证实了该磁性导热通道的存在^[17,18].

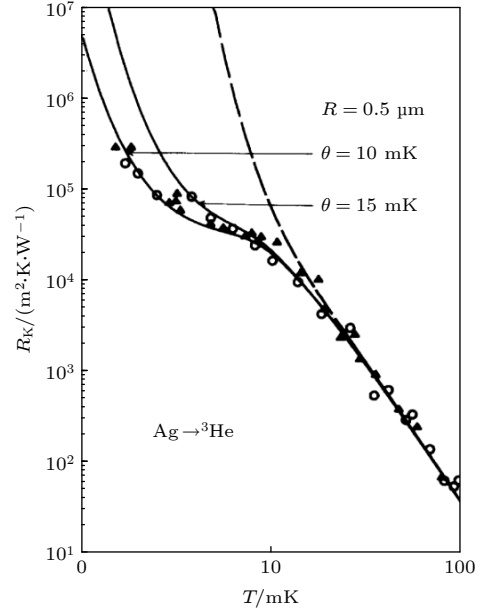


图 4 金属纳米颗粒与³He 液体之间的界面热阻. 圆点为实验值, 虚线为单金属颗粒计算值, 实线为考虑烧结颗粒中软声子模式后的计算值, 摘自文献^[16]

Fig. 4. Interfacial thermal resistance between metal nanoparticles and liquid ³He. The dot is the experimental value, the dashed line is the calculated value of single metal particles, and the solid line is the calculated value after considering the soft phonon mode in the sintered particles, which is extracted from the Ref. ^[16].

4 结 论

本文简要介绍了可以稳定维持极低温环境的稀释制冷机的工作原理和低温下使用的银粉烧结换热器中的热交换问题. 在稀释制冷机热交换器中, 烧结金属颗粒和³He 准粒子的热交换是至关重要的, 因此换热器性能直接决定了稀释制冷机所能达到的最低温度. 目前除了³He 与换热器的性能问题之外, 稀释制冷技术中的³He 冷循环也是一个挑战. 同时昂贵的³He 以及整个制冷系统体积的庞大, 限制了它们的广泛应用.

感谢日本北海道大学 Tsuneyoshi Nakayama 教授, 同济大学徐象繁教授、陈杰教授, 南京师范大学黄丹、武晓敏.

参考文献

- [1] London H 1951 *Proc. Int. Conf. on Low Temperature Physics* Oxford, UK, August 22–28, 1951 p157
- [2] Cao H 2021 *J. Low Temp. Phys.* **204** 175
- [3] Yan S S 1975 *Physics* **2** 111 (in Chinese) [阎守胜 1975 物理 **2** 111]
- [4] Wheatley J C 1968 *Am. J. Phys.* **36** 181
- [5] Zheng M W, Wei L J, Quan J, Lin P, Liang J T, Zhao M G 2020 *Low Temp. Phys. Lett.* **4** 211 (in Chinese) [郑茂文, 卫铃佼, 全加, 林鹏, 梁惊涛, 赵密广 2020 低温物理学报 **4** 211]
- [6] Deng C, Huang Y, An M, Yang N 2021 *Mater. Today Phys.* **16** 100305
- [7] Deng S, Xiao C, Yuan J, Ma D, Li J, Yang N, He H 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 101603
- [8] Xu D, Hanus R, Xiao Y, Wang S, Snyder G J, Hao Q 2018 *Mater. Today Phys.* **6** 53
- [9] Wang S, Xu D, Gurumathan R, Snyder G J, Hao Q 2020 *J. Materiomics* **6** 248
- [10] Huang Y, Feng W, Yu X, Deng C, Yang N 2020 *Chin. Phys. B* **29** 126303
- [11] Xu Y, Wang X, Hao Q 2021 *Compos. Commun.* **24** 100617
- [12] Swartz E T, Pohl R O 1989 *Rev. Mod. Phys.* **61** 605
- [13] Frossati G, Godfrin H, Hebral B, Schumacher G, Thoulouze D 1978 *Proceedings of the Ultralow Temperatures Symposium* (Tokyo: Physical Society of Japan)
- [14] Cao L Z, Yan S S, Chen Z J 1999 *Cryogenics* (Hefei: Press of University of Science and Technology of China) p89 (in Chinese) [曹烈兆, 阎守胜, 陈兆甲 1999 低温物理学 (合肥: 中国科技大学出版社) 第89页]
- [15] Nakayama T 1989 *Prog. Low Temp. Phys.* **12** 115
- [16] Nishiguchi N, Nakayama T 1983 *Solid State Commun.* **45** 877
- [17] Osheroff D D, Richard R C 1983 *Phys. Rev. Lett.* **54** 1178
- [18] Hu Y, Stecher G J, Gramila T J, Richard R C 1996 *Phys. Rev. B* **54** R9639

SPECIAL TOPIC—Nano engineering and thermophysics

Dilution refrigerator and its heat transfer problems*

Fu Bai-Shan¹⁾ Liao Yi¹⁾ Zhou Jun^{2)†}¹⁾ (Institute for Quantum Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)²⁾ (Center for Quantum Transport and Thermal Energy Science, School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(Received 21 September 2021; revised manuscript received 9 October 2021)

Abstract

In the research of cryogenic physics and quantum information science, it is essential to maintain a steady low temperature of millikelvin regime continuously. Dilution refrigerator is a widely used refrigeration device to achieve extremely low temperature. It utilizes the phase separation effect of superfluid ^4He and its isotope ^3He mixed solution at ultra-low temperatures. The performance of heat exchanger is the key factor to determine the performance of continuous cycle refrigerating machine. At extremely low temperatures, there appears a huge interfacial thermal resistance between helium and metal (Kapitza resistance), and the problem of heat exchange can be effectively solved by using the porous sintered metal particles to increase the contact area. Therefore, it is of significance to study the heat exchange between metal particles and liquid helium at extremely low temperature and to develop the relevant high-performance sintered Ag powder heat exchanger.

Keywords: dilution refrigerator, interfacial thermal resistance, heat exchanger**PACS:** 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc**DOI:** 10.7498/aps.70.20211760

* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11890703).

† Corresponding author. E-mail: zhoujunzhou@nju.edu.cn