

核绝热去磁制冷

林 熙[†]

(北京大学量子材料科学中心 北京 100871)

2023-06-23 收到

[†] email: xilin@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230805

Refrigeration by adiabatic nuclear demagnetization

LIN Xi[†]

(International Center for Quantum Materials, Peking University, Beijing 100871, China)

摘 要 温度是最基本的物理量之一, 在科学研究中, 将研究对象放置在低温环境中是一个非常常见的方法。更低的温度有助于发现低能量尺度的量子多体系统的新演生现象, 也有助于在更低的热噪声下实现更高的实验分辨率。低温实验工作者有两个基本任务, 一个是在低温环境下发现新的物理, 另一个是提供低温环境和创造新的低温环境。在液氦或者干式制冷提供前级预冷环境的基础上, 核绝热去磁等制冷原理被提出和使用。低温设备的无液氦消耗化, 是与氦液化和稀释制冷同等重要的低温制冷突破。氦于1908年被液化, 20世纪60年代中国有能力液化氦; 同个时期, 稀释制冷机被发明, 中国近期正在发展稀释制冷技术。文章讨论了核绝热去磁制冷的基本原理, 回顾了干式核绝热去磁技术的出现背景, 并介绍了这种设备的一次搭建尝试。这次在中国的尝试, 成功地实现了世界最低温度的无液氦消耗制冷机。

关键词 低温物理, 制冷, 核绝热去磁, 极低温

Abstract Temperature is one of the most fundamental physical quantities, and low temperature environments serve as a typical approach for frontier scientific explorations. Lower temperature environments help to discover novel phenomena in low-energy scale quantum many-body systems, and to achieve higher experimental resolutions at lower thermal noise levels. There are two basic missions for low temperature experimentalists: discovering new physics at low temperatures, and maintaining low temperature environments or creating better ones. Precooling by liquid helium or cryogen-free methods, refrigeration principles such as adiabatic nuclear demagnetization have been proposed and verified. The process of cryogen-free, is as important as the liquefaction of helium and the dilution refrigeration for low temperature refrigeration. In 1908, helium was first liquefied while China was able to achieve stable ~ 4 K environments in the 1960s. During that time, dilution refrigerators were invented elsewhere. China is investing on how to build them nowadays. This article covers the principles of adiabatic nuclear demagnetization and introduces what has led to the cryogen-free adiabatic nuclear demagnetization technique. Additionally, it describes a successful attempt to build such a refrigerator in China, which is the lowest temperature cryogen-free refrigerator in the world.

Keywords low temperature physics, refrigeration, adiabatic nuclear demagnetization, ultra-low temperature

1 引言

1898年之后，人们开始了解氦元素的存在，包括杜瓦在内的一批科研人员开始对这个新元素降温。1908年，昂内斯实现了氦的液化，这个历史性时刻深远地影响了直到今日的前沿科学探索。

氦被液化之后，氦的蒸发制冷是获得更低温度的显然手段。氦元素有 ^4He 和 ^3He 两种同位素。地球上氦的主要成分是 ^4He ，大气中的 ^3He 仅是 ^4He 的约百万分之一。 ^4He 的蒸发制冷可以提供1 K的低温环境； ^3He 在低温下的蒸气压高于 ^4He ，其蒸发制冷可提供300 mK的低温环境。习惯上，人们把低于1 K或低于300 mK的环境称为极低温，可以理解为，极低温环境是无法简单依靠 ^4He 获得的低温环境。

如果说氦的液化是低温物理学上第一座里程碑，则稀释制冷的出现是第二座里程碑，它在液氦的基础上将人类能稳定获得的环境温度又降低了3个数量级。 ^3He 和 ^4He 的混合液在足够高的温度下可任意比例混合，在足够低的温度下发生相分离， ^3He 原子从高浓度相进入低浓度相时，在稀释的过程中吸收热量，这个制冷方法被称为稀释制冷。稀释制冷的概念由理论物理学家伦敦于1951年提出，并于1965年被其他人实现^[1, 2]。20世纪70年代之后，成熟的商业化稀释制冷机开始出现。稀释制冷机通常可提供50 mK以下的极低温环境，如今尖端的商业化稀释制冷机可以稳定地获得10 mK以下的极低温环境。已搭建的稀释制冷机中，最低温度约2 mK。

稀释制冷是当前最主流的极低温制冷技术，它的供应已经普遍商业化。1 mK以下的极低温环境不再能依靠商业化获得，其设备搭建和运转依赖于专业的科研人员，世界上能获得1 mK以下环境温度的科研机构屈指可数。核绝热去磁制冷是获得极限低温制冷环境的手段，它可将宏观物体降温到10 μK 量级。

2 绝热去磁过程与电绝热去磁制冷

绝热去磁制冷也被称为磁制冷，它利用了磁矩体系的熵可以同时由温度和外磁场调控的特点。利用熵或者焓可以同时由温度和另外一个外部参量调控的降温方法历史悠久，这个外部参量可以是绝热膨胀中的体积，可以是等焓膨胀中的压强，也可以是绝热去磁中的磁场。

绝热去磁的制冷原理如图1所示。在初始状态下，当外界磁场为零时，磁矩的取向混乱无序。当外界的磁场足够大时，能级间隔最终显著大于热扰动的能量，低能级被占据的可能性增大，磁矩取向更有序，熵的大小随着磁场增加而趋近于零。在固定温度条件下增加制冷剂处磁场的过程被称为等温磁化。之后，操作者在磁矩绝热条件下减小外磁场，从而获得更低的温度。绝热去磁的名称也正是来自这样的降温过程。

绝热条件下的磁场减小和温度降低对磁矩的熵都有影响，我们以没有相互作用的磁体系为例讨论磁场 B 和温度 T 与熵 S 的关系。在这样的体系中，能级 E_m 占据概率与 $e^{-E_m/(k_B T)}$ 相关，其配分函数可以仅写为磁场与温度之比 B/T 的函数，同理

可得熵也只是 B/T 的函数。当系统处于绝热条件时， S 值不变，因此 B/T 的值不变，初态和末态的磁场与温度之比为一个恒定值，记为

$$\frac{T_f}{B_f} = \frac{T_i}{B_i}, \quad (1)$$

式中的下标 i 和 f 分别代表初态和末态。也即是说，在绝热条件下减小磁场时，制冷剂的温度也成比例下降，从而提供了一个比预冷环境更

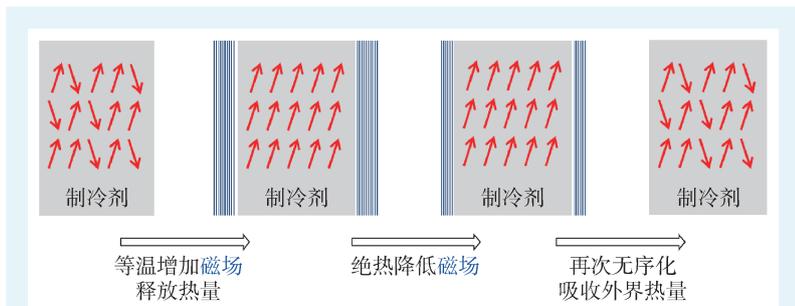


图1 制冷剂中磁矩排列与绝热去磁过程的关系。绝热去磁引起制冷剂的温度降低之后，制冷剂在制冷过程中吸收的热量将使磁矩的分布再次无序化

低的温度。公式(1)是绝热去磁制冷过程最重要的结论。制冷剂内部磁场 B_{int} 对于末态磁场的实际大小也有影响，以上的讨论忽略了内部磁场的存在，末态磁场无法真正减少到零，绝热去磁在原理上无法获得绝对零度。

等温磁化过程中(图2中的OP过程)，制冷剂释放的热量正比于 $T_i(S_1 - S_2)$ ，如果想维持等温条件，则绝热去磁系统外部需要具备吸收热量的能力，因此需要一个提供预冷环境的前级制冷(图3)。前级制冷、热开关和可调控的外界磁场是绝热去磁制冷的三个最基本的工作条件。

绝热去磁制冷最早由德拜和吉奥克(Giauque)于1926年和1927年独立提出^[3, 4]，在1933年前后被不同实验室的科研人员独立实现^[5-8]，并成为了人们当时获得1 K以内温度的主流手段。绝热去磁制冷中的制冷剂通常为具有非零磁矩的顺磁盐，利用顺磁盐绝热去磁的制冷方式被称为电绝热去磁。基于液氦提供的低温环境，该制冷方式可提供低至毫开尔文温区的低温环境。20世纪50年代³He蒸发制冷出现之后，电绝热去磁不再是300 mK以上温区的优先制冷选择。20世纪60年代稀释制冷出现以后，电绝热去磁被其替代，不再是主流的制冷手段。电绝热去磁被取代的原因在于其工作原理不提供连续的制冷能力，而只是提供一个有限的总制冷量，而且，其常规制冷剂顺磁盐在低温下的导热能力差也限制了该制冷方式的受欢迎程度。

人们将绝热去磁过程中的制冷剂从顺磁盐变为金属，从而利用核自旋的自由度获得更低的温度，这样的制冷方法被称为核绝热去磁。电绝热去磁与核绝热去磁的对比见表1，两种制冷方式都利用了熵可以同时由温度和磁场调控的物理特性。由于不同温区下比热、热导和边界热阻的巨大差异，采用这两种制冷方法的设备有显著差别。尽管名称相似，它们在低温物理领域被认为是两种截然不同的制冷手段。核绝热去磁的制冷原理依然有降温不连续的缺点，但它是当前宏观物体获得最低温度的制冷手段，人们依靠它可以探索1 mK附近和1 mK以下温区的物理问题。

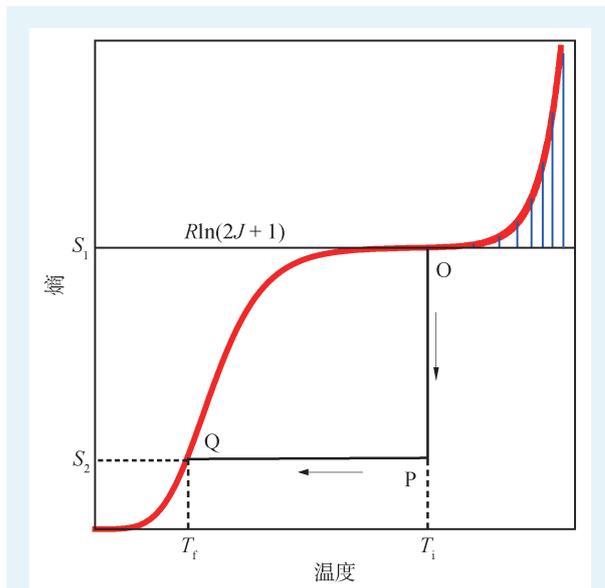


图2 绝热去磁制冷剂的熵与温度关系示意图。OP过程为等温磁化，PQ过程为绝热去磁。蓝色阴影处区域用于示意来自晶格的熵，这部分熵不参与绝热去磁制冷过程

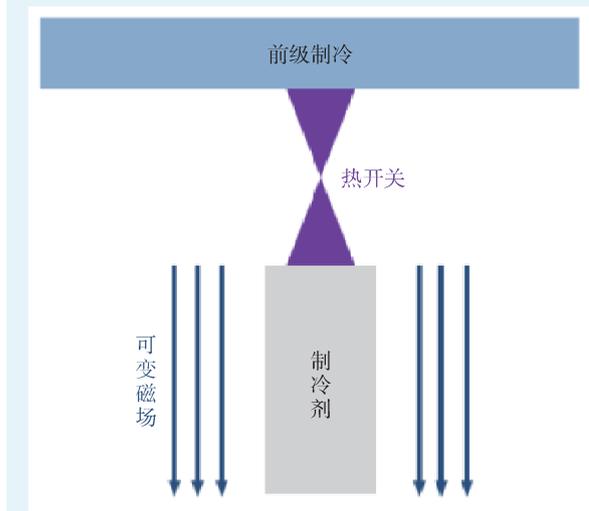


图3 绝热去磁制冷机的基本结构示意图

3 核绝热去磁制冷简介

所谓的核绝热去磁，指的是用核自旋作为制冷剂的绝热去磁制冷。绝热去磁制冷的低温极限与内部磁场 B_{int} 线性相关，也与磁矩大小的平方线性相关。核磁矩比原子磁矩小3个数量级，如果用金属铜替代顺磁盐，操作者对铜核自旋的绝热去磁能够获得远低于对顺磁盐磁矩绝热去磁的温度^[9]。由于核自旋可以来自金属，这也解决了顺

表1 电绝热去磁与核绝热去磁的对比

	电绝热去磁	核绝热去磁
主要制冷温区	~ 4 K 至 ~ 0.4 K	~ 4 mK 至 ~ 40 μ K
熵的载体	原子磁矩	核自旋
常规制冷剂	顺磁盐	铜、PrNi ₅
常规制冷剂的理论降温极限	0.1 mK 量级	10 nK 量级
常见前级制冷	液氮(~ 4 K) 干式制冷(~ 3 K) 液氮蒸发(1 K 至 2 K)	稀释制冷(~ 10 mK)
常见初态磁场	~ 1 T	~ 10 T
常见隔热类型	机械热开关 气体热开关	超导热开关

磁盐在低温下导热能力差的缺点。尽管核绝热去磁的制冷原理与电绝热去磁一样，但在可以获得的温区和设备搭建上有着非常显著的差异。

戈特(Gorter)于1934年和库尔蒂(Kurti)于1935年分别独立地提出基于核自旋的绝热去磁制冷方法^[10]。1949年，利用氟的化合物作为制冷剂的核绝热去磁被实现了，该制冷尝试的初态温度为1.2 K、末态温度为0.17 K，但不具备实际使用价值。1970年前后，真正具有制冷能力的核绝热去磁制冷机才逐渐出现^[11]。这个制冷手段提供的温度区间对于当时的科研人员而言过于陌生，以至于早期的搭建者们也不确定该制冷方法是否真的可行。如今，利用核绝热去磁制冷，人们可以获得1 mK以下的温度。

中国科学院物理研究所搭建了中国第一台液氮预冷的核绝热去磁制冷机，历时八年。近年来，依托在怀柔的综合极端条件实验装置，中国科学院物理研究所团队又搭建了一台液氮预冷的核绝热去磁制冷机。而随着无液氮消耗稀释制冷机的逐步普及，北京大学在没有现成设计先例的情况下，开始研制无液氮消耗的核绝热去磁制冷机，于2020年实现了90 μ K的极低温^[12]，历时十年。这也是目前世界上温度最低的无液氮消耗制冷机。这三套设备提供了国内开展实验研究最极限的低温环境。在实验室中，我们无法获得比大自然更高的温度、更大或更小的质量和空间、更长或更短的时间，唯独在低温这个参数边界上，我们早已突破了大自然设定的边界，而核绝热去磁制冷机提供了人类的宏观制冷极限。

4 核绝热去磁制冷中的温度、熵、比热和平衡时间

核绝热去磁的结果不仅可以冷却核自旋体系本身，还可以作为制冷手段冷却其他物体。前者我们称之为“降温”，后者称之为“制冷”。与核自旋可以降温到小于纳开尔文对比，宏观物体仅能被核绝热去磁冷却到微开尔文量级。低温物理学更关心制冷，因为对于绝大部分的科研人员，制冷比降温更加重要。或者说，低温设备更看重制冷剂冷却其他宏观物体的能力。

在核绝热去磁制冷中，我们需要明确温度的定义。两个热平衡的系统具有相同的温度，或者说，温度这个态函数反映了系统的热学宏观性质。所谓的系统，通常指的是大量分子组成的宏观物体，如气体、液体和固体。可是在足够低的温度下，固体中声子、电子和核自旋之间交换能量的速度过于缓慢，哪怕固体处在宏观性质不随时间变化的平衡态，声子、电子和核自旋的平均热运动的状况也不一致。也就是说，它们三者的热运动状况无法用一个整体的温度去表征，而是需要分别用晶格温度 T 、电子温度 T_e 和核自旋温度 T_N 描述(图4)，对于存在漏热的真实体系，这三者的温度并不相等。由于极低温下晶格比热远远小于核自旋和电子的比热贡献，我们可默认晶格与电子的温差远远小于电子与核自旋的温差。换言之，为了简化问题的分析，我们认为核绝热去磁制冷剂中的晶格温度与电子温度近似相等，但电子温度和晶格温度高于核自旋的温度(图5)。

核绝热去磁中的熵默认对应核自旋温度，在实验能获得的常规参数区间内近似记为公式：

$$S_N = R \ln(2I + 1) - \frac{\lambda B^2}{2T_N^2}, \quad (2)$$

其中 R 为气体常量， I 为核总角动量， B 为总磁场， T_N 为核自旋体系的温度， λ 并不是通常定义的核居里常量 λ_N ，而是一个与核居里常量成比例的系数。 λ 值越大，制冷剂的总制冷量越大。与之对应，核自旋体系的单位摩尔比热近似为公式：

$$C_N = \frac{\lambda B^2}{T_N^2}. \quad (3)$$

也就是说，在常规实验参数范围内，随着末态磁场的减少，制冷剂的比热迅速减少，制冷剂的实际制冷能力下降，因而核绝热去磁制冷的末态磁场不应该选择零外场。图5的示意曲线中已考虑(3)式所描述的制冷剂比热随温度和磁场变化的规律。

核自旋体系的平衡时间被称为自旋—自旋弛豫时间 τ_2 。对于金属，核自旋的热平衡时间非常短，远远小于常规测量的等待时间，我们可以认为核自旋的温度随着磁场同步改变，也就是对于核自旋而言，(1)式总是在外磁场远大于内部磁场时成立。核自旋与晶格通过电子进行热量传递，我们不严格区分电子和晶格之间的温差，核自旋、电子和晶格的平衡由自旋—晶格弛豫时间 τ_1 统一表征。金属的自旋—晶格弛豫时间 τ_1 满足公式：

$$\tau_1 T_e = \kappa, \quad (4)$$

其中 T_e 为电子温度， κ 为科林格(Korringa)常量。 κ 值越小，制冷剂的热平衡时间越短。核绝热去磁制冷过程中， τ_1 远远大于 τ_2 。

在核绝热去磁制冷的末态，我们可以通过如下物理图像定性理解公式(4)。晶格通过电子实现与核自旋的热平衡。因为核自旋的磁能级间距小于热运动的能量，热平衡的效率依赖于费米面附近的电子数量，这部分电子的数量与电子的温度 T_e 成正比，因此自旋—晶格弛豫时间 τ_1 与电子的温度成反比。由于真实系统中一定存在漏热，退磁过程中的电子温度和核自旋温度的温差是非单调的关系(图5)。在给定外界漏热量大小不变的前提下，电子温度关于磁场 B 存在一个理论极小值。由于实际设备中无法避免的漏热，尽管表1中核绝热去磁的理论降温极限为10 nK量级，但是真正可以为宏观物体制冷提供的温度极限仅在10 μ K量级。与之对比，影响电绝热去磁制冷实现理论极限的障碍主要在于顺磁盐的热导率过于低。

诚然，能够被孤立降温的系统，比如核自旋、或者可数的原子，自身就是一个极佳的研究对象。但是，我们根据以往的历史可知，低温不知不觉还成为了一种研究方法，它为其他科学分支提供了研究环境。仅仅将某一个孤立系统不停地降温到新极限也许可以获得特定的物理知识，但为所有的研究对象提供普适的新低温环境肯定将拓宽

人类的认知。当前，人们仅能在微开尔文以上的温区研究宏观体系。

5 核绝热去磁制冷中的制冷剂

优秀的核绝热去磁制冷剂应该具备5个特点： λ 值大、 κ 值小、末态磁场下不是超导体、导热能力好、加工和冶炼方便。综合考虑后，铜是核绝热去磁最合理的制冷剂。铜的内部场为0.36 mT，便于退磁后建立足够小的 B_f/B_i (末态磁场和初态



图4 核绝热去磁制冷中涉及四个温度的定义和关系示意图。核自旋为冷源，此处温度为核自旋温度 T_N ，自身平衡时间为 τ_2 。晶格通过电子与核自旋热平衡，三者的平衡时间为 τ_1 。晶格温度为实际意义上的环境温度 T ，电子温度记为 T_e ，样品温度为 T_s 。大部分情况下，如果样品不是导体或者导体样品不直接短路制冷机，样品和制冷剂之间通过声子导热，且存在显著的温度差和边界热阻 R_k 。本文不展开介绍样品温度与环境温度的温差

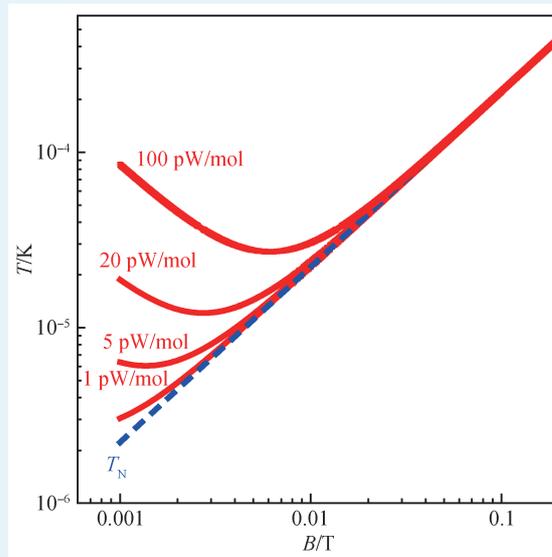


图5 退磁过程中温度随磁场的变化关系示意图。图中曲线假设了等温磁化的初态温度为20 mK、初态磁场为9 T。图中四条红色曲线代表了电子温度，也代表了晶格温度，对应着四个不同漏热条件100 pW/mol、20 pW/mol、5 pW/mol和1 pW/mol，该参数乘以制冷剂摩尔数为总漏热。蓝色虚线为退磁过程中的核自旋理论温度。退磁过程中，随着磁场和温度降低，电子温度逐渐偏离核自旋温度

磁场的比例)；铜的自发核有序温度约为 60 nK，可以为核绝热去磁制冷提供足够低的末态温度；更重要的是，铜在极低温下是足够好的导热体。与之对比，金和银在极低温下也是常规金属且导热非常好，但它们的 λ 值比铜小两个数量级，同等体积的制冷剂能提供的制冷量远小于铜。

对于铜的核绝热去磁制冷而言，当前最佳的前级预冷方式是稀释制冷技术。在实验室比较容易获得的等温磁化条件下，铜的熵改变量通常不到 10% (图 6)。对于这个现象，与其说铜作为制冷剂不够理想，不如说稀释制冷技术和常规实验室磁体不足以完全发挥铜的制冷效果。基于这个原因，以铜作为最终制冷剂的多级核绝热去磁可以提供更好的极低温环境。地球上的铜有两种同位素，分别为丰度 69.15% 的 ^{63}Cu 和 30.85% 的 ^{65}Cu 。这个比例并不是严格不变的，例如，海洋和矿物中的 ^{65}Cu 比平均数多，而土壤中的 ^{65}Cu 比平均数少。不过 ^{63}Cu 和 ^{65}Cu 的核自旋和自旋—晶格弛豫时间 τ_1 都非常接近，在核绝热去磁制冷中没必要特意区分。

增加核绝热去磁制冷效果的方法包括增加制冷剂的摩尔数、减少漏热、减少初态温度和增加初态磁场。在性价比合适的前提下，设备搭建者总是已经将这些外部参量尽量优化了。常规金属基于前文已讨论的理由，没有比铜更合适的制冷剂。具有超精细增强效应的范弗莱克(van Vleck)

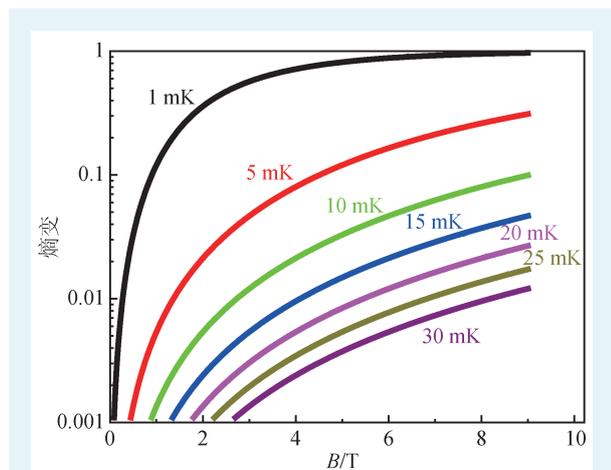


图 6 铜在指定温度下磁化后的熵相对零磁场下熵的改变比例示意图。本图曲线依照近似理论计算

顺磁材料可以在同样的外部参量下获得更大的熵改变，因而也是可行的核绝热去磁制冷剂^[9]。在这类材料中，外界磁场的效果被放大，从而在同样的等温磁化实验条件下获得更大的实际 B/T 比值，这个方案解决了铜在常规等温磁化条件下熵改变比例过低的缺点。1966年前后，利用这种材料的核绝热去磁制冷方式被提出了^[13]。这个制冷方式还是属于核绝热去磁，但是有一个专门的名称“超精细增强核制冷(hyperfine enhanced nuclear refrigeration)”。基于超精细增强效应的制冷剂的制冷温区介于绝缘的顺磁盐和导电的金属之间，在 1 mK 量级^[14]。除了可以获得比电绝热去磁更低的温度，这类材料用于制冷的另一个好处是其自旋—晶格弛豫时间 τ_1 非常短，几乎不用考虑核与电子之间的温度差。

对于这样的制冷工作机制，当前公认最佳的制冷剂是 PrNi_5 ，多晶的 PrNi_5 等价于将外部磁场放大约 12 倍。所以 PrNi_5 对等温磁化时的初态磁场与初态温度之比 B/T 的要求比铜更低，如果采用一个不难获得的初态温度(比如 25 mK)和初态磁场(比如 6 T)， PrNi_5 的熵改变量已经接近 70%。也就是说， PrNi_5 比起铜更适合由稀释制冷提供前级预冷，它在几十毫开尔文的温度和几特斯拉的磁场这两个易获得的参数下，可以完成大部分的熵改变。然而， PrNi_5 产生极低温环境的能力不如铜，曾提供 0.19 mK 的极低温环境^[15]。

如果对比铜和 PrNi_5 ，铜的热导率好、易获得且价格合理。铜的缺点是需要更低的初态温度和更高的初态磁场。 PrNi_5 的缺点在于材料难以获得、难以加工、材料在升降温过程中容易开裂、热导率差，而且最终获得的末态温度不如铜低。在 10 mK 以上，人们不应该使用核绝热去磁制冷；在 1 mK 至 10 mK， PrNi_5 的核绝热去磁制冷是一种选择；低于 1 mK，我们应该优先采用基于铜的核绝热去磁制冷。

6 漏热来源

核绝热去磁制冷机是展示低温实验技术特点的一个典型例子：设计上对细节的极高要求和搭

建中对错误的极低容忍。一台可以安置在个人实验室的“小型”设备建立了约8个数量级的温度差异，而低温环境下的最大漏热源决定了制冷机的极限性能。核绝热去磁制冷机中的漏热源既包括常规制冷机必须面对的漏热源，也包括仅影响极低温环境的特殊漏热源。

对于常规的制冷机，必须考虑的漏热源包括支架结构的固体热传导、黑体辐射、真空腔和制冷装置中的气体和液体导热、热声振荡和交变磁场中的涡流发热。此外，实验需求引入热量，例如实验测量所使用的引线或者气路从更高温度的环境引入热量，这是独立于机械固定支架之外的额外漏热源。实验测量本身也会引入漏热。制冷机最基本的测量要求至少包括温度测量。非温度测量的漏热大小密切依赖于具体实验，差异性很大。对于常见的电输运实验，哪怕引入几十根引线，固体导热引起的漏热依然可以轻松控制在0.1 nW以内。电测量的引线还可能引入加热电子的高频辐射，或者测量回路因为变化的磁场而引入热量。

对于核绝热去磁制冷机，设计者、搭建者和使用者还需要关注如下两个漏热源。首先，制冷机的振动可能是一台核绝热去磁制冷机最主要的漏热源，它的具体数值难以估计，设备在精心设计和搭建后实际测量值可能高达10 nW。这里的振动包括了泵的振动、建筑振动、声波、常规制冷机中液氦沸腾和热声振荡引起的振动、干式制冷机中压缩机和阀门切换的机械振动。其次，宇宙射线穿过低温设备时产生热量，该数值对于实际设备约在0.02 nW至0.2 nW量级，取决于设备具体的几何结构。

以上热源的漏热量原则上不随时间改变，阻挠人们获得最极限低温环境的热源还来自于制冷机内部的含时漏热。根据核绝热去磁制冷机的使用经验，漏热量随着时间的增加而减小是普遍现象。可以说，对于已经合理设计了的核绝热去磁制冷机，内部漏热比外部漏热更需要被重视：最低温度越低的核绝热去磁制冷机，内部漏热的影响就越重要。内部漏热的来源包括正氢仲氢转变、

非晶或者不定型材料的持续放热、金属中缺陷引起的持续放热、应力引起的持续发热。

7 无液氦消耗的核绝热去磁

极低温设备的共性在于依赖不同的制冷方式构建从室温到极低温的温度梯度。不同的制冷方式提供了不同特征温度附近的制冷能力，温度越低的制冷机使用到的制冷方式越多。传统的极低温制冷机必须采用液氦作为最重要的温度锚定点，也即是需要将部分结构浸泡在液氦之中。21世纪以来，取代液氦预冷的干式制冷技术逐渐成熟，制冷无液氦消耗化成为仪器研发的主流趋势。核绝热去磁是最后一个需要实现无液氦消耗化的主流制冷技术。

低温制冷中的液氦默认指液体 ^4He 。21世纪以来，国际上的氦供应不稳定且价格持续上涨，依赖液氦提供预冷环境的传统实验难以长期稳定开展，并且实验成本持续增高。1908年 ^4He 的液化开启了全新的低温物理时代，20世纪60年代，稀释制冷机的出现让前沿科研拥有了可以长期维持的极低温环境，而21世纪初，不消耗液氦的干式制冷技术普及让低温环境下的探索不再依赖于液氦的供应，这是低温实验发展进程中第三个重要的技术节点。

压强的周期性振荡可以引起气体温度的变化，但是无法产生制冷能力；在气体压强周期性振荡时，如果气体的空间分布也存在同样周期的变化使得压缩和膨胀位于不同的位置，则可以产生温度差。当前主流的脉冲管(pulse tube)制冷、GM (Gifford—McMahon)制冷和斯特林(Stirling)制冷泛泛而言都基于这样的工作机制，它们提供的约4 K低温环境可以替代液氦作为温度的锚定点。这些制冷技术不消耗液氦，只循环使用少量氦气，因而也被称为干式制冷。脉冲管制冷因为产生的振动小，更适合在极低温设备中使用，它出现于20世纪60年代。1984年时米库林(Mikulin)提出了阻尼孔脉冲管的技术方案^[6]，从而使其在20世纪90年代获得了4 K附近的制冷能力。1994

年,商业化的脉冲管制冷机已经出现了,并在21世纪迅速普及,成为了低温制冷机中的重要部件。如今的无液氦消耗稀释制冷机已经成为了最主流的商业化极低温设备。

对比液氦预冷的核绝热去磁制冷机,由于预冷温度、机械振动和机械结构的改变,无液氦消耗核绝热去磁制冷机无法采用传统的设计方案。一个好的极低温环境,需要综合考虑每一个细节对漏热的影响,最终,最不理想的环节决定了设备的极限性能。因此,极低温设备的研制很难分别设计各个部件,然后进行最终组装,而是需要设计者从一开始就对所有部件整体考虑,并且需要搭建者和使用者非常苛刻地留意所有的装配流程和操作细节。21世纪初,一批科研人员希望实现无液氦消耗的核绝热去磁制冷机,然而领域内部没有如何搭建这类设备的现成方案和共识。

8 北京大学极低温无液氦消耗核绝热去磁制冷机

我们历时十年,于2020年在北京大学搭建了一套最低温度90 μK 的无液氦消耗制冷机(图7(a))^[12]。这套设备采用了核绝热去磁的制冷原理,制冷剂为铜,由稀释制冷机提供预冷环境,磁场来自超导螺线管磁体,隔热机制为超导热开关。

制冷剂铜棒长度743 mm,最大直径68 mm,总重量11.7 kg,即184 mol的铜。实际上在9 T磁体满电流时感受到大于8 T磁场的铜只有约95 mol,

也就是仅有约一半的铜参与了8 T以上的磁化过程。提供预冷的稀释制冷机最低温度约10 mK。一个9 T超导磁体提供退磁磁场,一个可以独立操控的12 T超导磁体为样品提供测量磁场。这套磁体与常规磁体在设计上最大的区别在于它们拥有两个小磁场区间。这里的小磁场区间,指的是当两个磁体被同时通上最大允许电流、分别获得12 T和9 T的磁场时,磁体附近依然有一片磁场仅在百高斯量级的空间。磁场影响大部分的温度测量和影响两个固体间的导热,因此小磁场区间被用于安置温度计和连接不同的块状金属。热开关的工作物质为铝,独立拥有一个工作磁场约10 mT的小超导磁体。

前文所介绍的漏热来源是设备设计背后的逻辑,本质上,所有的细节都是在争取实现从室温环境到极低温环境的理想热量分流途径。受限于文章的篇幅,本文仅介绍整体框架的减振作为例子(图7(b))。制冷机和磁体一起被放置在由空气腿支撑的光学平台上,而光学平台安置在额外搭建好的0.5 m厚水泥台上,水泥台位于一个4 m \times 4 m的坑上方。光学平台和空气腿的设计频率为垂直方向小于1.5 Hz、水平方向小于1.5 Hz。有源的振动部件不安置在水泥台上,而是尽量放在远离设备的房间角落,通过管道和电线与设备连接,然后管道和电线由房间的地面、侧面和天花板固定。连接制冷机和压缩机的管道、连接制冷机和泵的波纹管以及 ^3He 的回气管道均悬挂于天花板,并留有柔性的活动空间以释放应力。刚性

结构的稀释制冷ISO 150抽气管通过悬挂于天花板的沙箱减振。在设计整体框架时,世界上还没有干式核绝热去磁制冷机的先例,脉冲管带来的振动对极低温环境的影响无法通过经验评估,因此支撑铝块和光学平台的结合可以让整套设备的刚性存在四种可能:是否与水泥台硬连接、

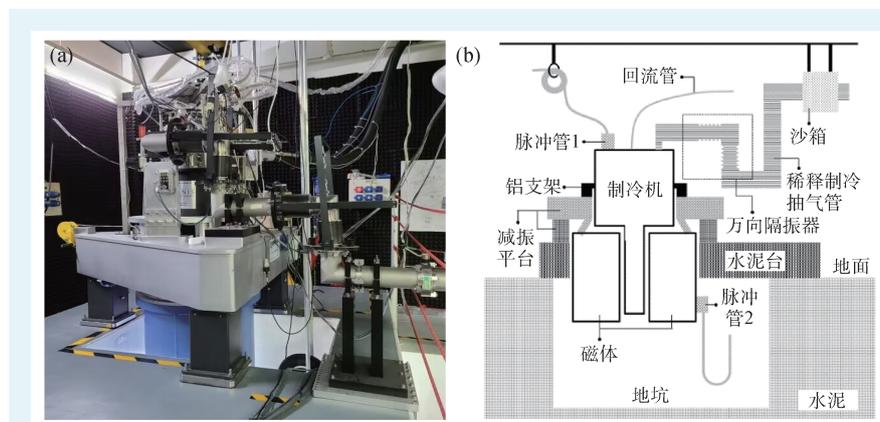


图7 无液氦消耗制冷机外观照片(a)和整体减振结构示意图(b)

磁体和制冷机是否硬连接。经实测，设备可以在空气腿不悬浮、制冷机和磁体刚性连接的最简单情况下运行。

极低温设备的研发，其指标的先进性主要体现在于能获得的温度有多低。基于无液氦消耗技术，目前全世界有四套核绝热去磁制冷机和至少几十万台其他原理的制冷机，此台设备能达到的温度最低。

9 总结和展望

低温环境是前沿探索的重要基础条件。人们在扩展低温参数空间的努力中，曾收获了许多惊喜，深化了我们对物理世界的认识。低温测量经常超出已知规律的预期，这样的例子可以一直追溯到量子力学建立之前的早期实验证据。超导、超流、整数量子霍尔效应和分数量子霍尔效应，也都是低温下的意外实验发现。此外，理论工作还频频给出了利用低温环境探索新量子物态的预测，指引了低温实验的工作方向，这样的例子包括³He超流的发现和分数统计的验证。

在当前的前沿科研中，低温实验测量已经成为了验证理论、发现新现象和了解新材料的常规研究手段。以商业化设备为例，10 mK以内的稀释制冷机已经是非常成熟的产品。与之对比，提供1 mK以下温区的核绝热去磁制冷机往往需要科研人员自行搭建。越接近绝对零度，低温设备的

搭建越困难，我们是否值得在商业化制冷设备无法直接提供的温区继续探索？个人的看法是值得。过去百年间，10 mK以上的低温环境已给人们带来足够多的物理现象，我们没有道理去怀疑更低的温度不会持续带来惊喜。

越是接近绝对零度，越精细的相互作用就有机会得以体现。从这个意义上讲，一步步尝试获得温度更低的制冷环境是一条越来越难、却又值得去开拓的可行科研路径。理论科学家列格特(Leggett)在1978年提出的低温实验动机“对奇异的新物相、对宏观真空量子隧穿的观测，以及对放大粒子物理中预言的、特别弱的相互作用的期待(prospect of exotic new phases, of observing macroscopic vacuum quantum tunnelling and of amplifying the ultra-weak interactions postulated in particle physics)”^[17]，今日看来依然还有道理。因此，新的核绝热去磁制冷机依然陆续出现，人们还是愿意为极低温环境付出精力和时间。而我们也总对逼近零温极限过程中的物理有所期待，例如，是否存在完美有序下的新宏观物态？当然，以史为鉴，更激动人心的新低温现象恐怕也不容易出现在人们的想象之中。

在制冷技术上，我们必须坦率地承认，就逼近零温极限而言，人们一直在等待核绝热去磁制冷之后的下一个突破。当前，微开尔文以下温区的宏观物性还无法通过实验手段研究。不幸或者幸运地是，毫开尔文以下的参数空间还有待人们利用核绝热去磁制冷技术仔细探索。

参考文献

- [1] Lounasmaa O V. *Experimental Principles and Methods Below 1 K*. Academic Press, 1974
- [2] Hall H E, Ford P J, Thompson K. *Cryogenics*, 1966, 6: 80
- [3] Debye P. *Annalen der Physik*, 1926, 386: 1154
- [4] Giaque W F. *J. Am. Chem. Soc.*, 1927, 49: 1864
- [5] Giaque W F, MacDougall D P. *Phys. Rev.*, 1933, 43: 768
- [6] De Haas W J, Wiersma E C, Kramers H A. *Physica*, 1934, 1: 1
- [7] Eddington A S. *Nature*, 1934, 133: 907
- [8] Kürti N, Simon F. *Nature*, 1935, 135: 31
- [9] Oja A S, Lounasmaa O V. *Rev. Mod. Phys.*, 1997, 69: 1
- [10] White G K. *Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*. Clarendon Press, 1979
- [11] Andresk K, Lounasmaa O V. *Progress in Low Temperature Physics*, 1982, 8: 221
- [12] Yan J J, Yao J N, Shvarts V *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 2021, 92: 025120
- [13] Al'tshuler S A. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1966, 3: 112
- [14] Richardson R, Smith E. *Experimental Techniques in Condensed Matter Physics at Low Temperatures*. CRC Press, 1988
- [15] Mueller R M, Buchal C, Folle H R *et al.* *Cryogenics*, 1980, 20: 395
- [16] Mikulin E I, Tarasov A A, Shkrebyonock M P. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1984, 29: 629
- [17] Leggett A J. *J. Phys. Colloques*, 1978, 39: 1264