

超低温致冷

于志战 译

前 言

极低温的获得不仅仅以绝对零度为目标,而且对 2.6 毫 K 时液 ^3He 的超流转变^[1], 1.1 毫 K 时固 ^3He 核自旋系的有序化^[2] 这样一些基础物理中重要现象的发现来说也是重要的。

这些现象得以证实正是取决于能长期可靠地维持毫 K, 微 K 温度这一实验技术上的进展。以前, 为了获得低于 1 K 的温度, 应用顺磁性盐的绝热去磁法^[3]。而现在用 ^3He — ^4He 稀释致冷装置取代它即能获得 2~3 毫 K 的温度。而且维持这样的低温达半年以上正在成为可能。因此, 以这种稀释致冷机为基础, 同时可采用波麦朗邱克冷却^[4]、核绝热去磁法等, 使用前一方法能大约获得 1 毫 K 的低温, 用后一方法能获得几十微 K 的低温。

1. ^3He — ^4He 稀释致冷装置

1.1 混合液的特性及 ^3He 循环式稀释致冷法

若 ^3He 、 ^4He 混合液的温度降低, 则分离成两个相。其相图如图 1 所示。在三相点 0.86 K 以下范围为 ^3He 稠密相 (c 相) 和 ^4He 稠密相 (即 ^3He 稀薄相、d 相) 双相共存区。从图可知, 随着温度降低, 相成为纯液 ^3He , 而在 d 相, 0.1 K 和接近绝对零度时分别成了 7% ^3He 或 6.4% ^3He 的混合液^[5]。接近绝对零度时, 大约有 6.4% 的 ^3He 混入液 ^4He 中的这一现象在致冷机的研制上是极为重要的。

稀释致冷机有两种型式, 先将 ^3He 循环系统示于图

2。主要问题在于真空室内部的绝热。

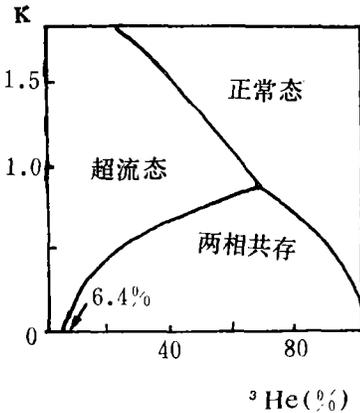


图 1 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合液相图

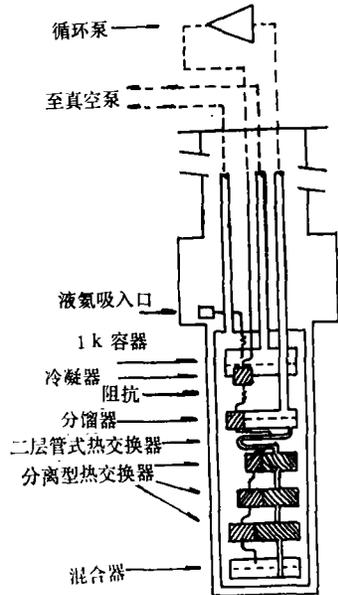


图 2 稀释致冷装置系统图

把真空室放入液⁴He中，液⁴He通过毛细管被引入1K容器，在这里减压气化，容器保持在1.1~1.5K的温度。气³He大约以100托的压强从外部流入低温恒温器。先被液⁴He冷却至4.2K，再在1K容器上的冷凝器里被液化。液化的³He再在分馏器处被冷却，而冷凝器和装在分馏器处的热交换器间有一定的热阻，为的是保持冷凝压强。被冷却到分馏器温度的液³He流向位于后面的对流型热交换器，在进入该热交换器之前再设置一个微小热阻，它的作用是使温度为分馏器温度的热交换器中保持不致产生³He气泡那样大小的压强。对流型热交换器，高温端用双层管式，低温端用分离型，由它们将低温液³He导入混合器。混合器在其内部正好能形成相分离面来预先确定其容积，然后封入氦气。³He原子通过该相分离面从c相向d相扩散，与此同时产生致冷效果。

这时，在d相里混入6.4%的³He，这些³He原子通过超流液，即从d相中向分馏器流去，此时通过热交换器对流的c相的³He不断冷却。在分馏器，³He通过分馏被分离排气。纯³He蒸汽压和同温度的⁴He相比，在0.7K为610倍，在0.5K为9800倍，因为高得多，所以混合液中的³He浓度即使稀薄，分离器选择性的分离³He仍是可能的，这些³He重新通入低温恒温器进行循环。

d相³He浓度在混合器为6.4%，因为在分馏器被分馏，可以认为比平衡状态浓度变小了。在此³He不是因为这一浓度差从混合器扩散入分馏器，而是靠混合液特有的渗透压差流向分馏器。关于渗透压的详细介绍参阅〔6〕。若假定混合器的温度为5毫K，³He浓度为6.4%，分馏器的温度为0.6K，浓度近乎为零，则渗透压压差为12托左右。如为热交换器热阻大的情况下，在这个压差下，³He难以流动，分馏器里³He浓度的极度减少，其结果导致蒸发气体中⁴He的比例增加，妨害了装置的致冷效率。

1.2 致冷装置本体

先介绍图2中的最为重要的热交换器。关于热交换器的设计方法请参阅〔7〕。

决定致冷机性能的是³He的循环量及热交换器的性能。尤其对于低于20毫K的场合，卡皮查界面热阻问题变得极为重要〔8〕。这个热阻是一个关系到热交换器壁和液氦间的热交换大小的量。现设器壁同液氦间的温差为 ΔT ，传热量为 Q ，传热面积为 A ，则有

$$Q = A\Delta T/R_K$$

这里 R_K 为卡皮查热阻。与 T^3 成反比，所以温度变低，则热传递变得困难。不言而喻，必须选择 R_K 小的材料，而现在解决这一问题靠加大传热面积 A 。前年我们制作的装置上，把图3所示的分离型热交换器分成六段。处高温的1、2、3段用20微米的铜粉，第4段用2微米的银粉，5、6段用700埃的超细银粉，以增大热传递面积。但是传热面积一大，则会使截面积增加或长度变长。前种情况因液体的热传导会发生热向低温部分流入，后种情况伴随着液体的流动会发生称为粘性热阻发热这样不好的影响。因此想设计2~3毫K的热交换器是极难的。

关于混合器没有特殊的问题，但是在分馏器里必须防止沿着真空抽气管壁⁴He膜上升，对此，文献〔7〕有详细的介绍。

真空室的内部，即1K容器、分馏器、双层管型热交换器、分离型热交换器及混合器等

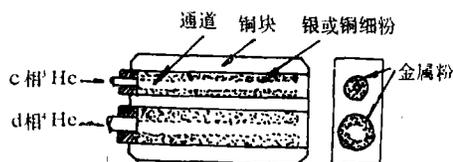


图3 中间有通道的分离型热交换器

如图4所示(图略)。混合器侧面稍下处粘有环氧盒, ^3He 经过这里从混合器流入热交换器。把用镧稀释后的铈镁硝酸盐置放其中, 由这个磁化值可以决定温度。当循环量为 270 微克分子/秒时, 能获得的最低温度是 2.8 毫K。

在这种型式的装置里, 制冷能力 Q_m 可以从流入混合器的 c 相及流出 d 相的焓平衡来求出。设 ^3He 的循环速度为 n_3 , 则 Q_m 的值为 $Q_m = n_3[96T_m^2 - 12T_{c0}^2]$ 。这里, T_m 为混合器温度, T_{c0} 为混合器前面的热交换器出口处的 c 相温度。

如前所述, 随着温度变低, 热交换器的制作变难。因而试验了采用几个混合器的方法^[10]。如图5所示, 从混合器 I 上部的 c 相处让一部分 ^3He 向相连的混合器 II 分流。由于液氦的热传导性好, 混合器 I 里一部分 ^3He 从界面向 d 相扩散时, 混合器 I 内的液体同样冷下来。因此如果让受冷的 c 相 ^3He 向混合器 II 分流的话, 此时的 c 相温度应该比热交换器出口处温度和 T_{c0} 低。这种情况下, d 相 ^3He 从混合器 I 返回热交换器途中设置阻值小的热阻 Z , I II 间的浸透压压差是 Z 和流量的乘积, 由此控制混合器 I 里 ^3He 扩散量。已有报告说, 根据实验让总循环量在混合器 I 里向 d 相扩散时为 13 毫 K。由于使用了混合器 II 而降低到 5.7 毫 K。

1.3 ^4He 循环稀释制冷机

前节对 ^3He 循环式稀释制冷机已作了介绍。然而采用让 ^4He 循环的方法也能达到足够的温度。如图6所示, 为了从混合液分离 ^4He , 应用超微漏孔。因此混合液变成非混合液, 即分离为液态 ^4He 和 ^3He , 要发热。因此用低温恒温器或 ^3He 循环式稀释制冷机使分离器温度保持恒定是必要的。一度通过超微漏孔被排向外部的 ^4He 再返回低温恒温器液化, 由减压气化了了的液 ^3He 冷却到 0.3K 左右后通过超微漏孔供给混合器, 流经超微漏孔的超流 ^4He 因不具有熵。因此可以认为不会因 ^4He 的流入而产生热量的增加。含有 ^3He 的 d 相 ^4He 向下成滴状跌落时和 c 相进行热交换。这种情况因是液-液间的热交换, 有不计卡皮查热阻能办到的特点。东北大学对这种方式进行了长期的研究, 据说已获得 3.6 毫 K^[11]。

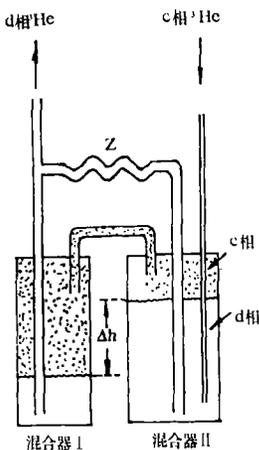


图5 复式混和器

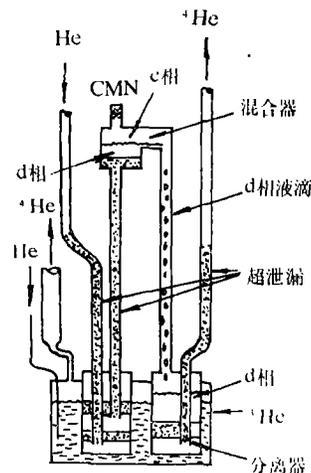


图6 ^4He 循环式稀释制冷机

2. 核绝热去磁法

应用顺磁盐的绝热去磁法所能获得的低温由它的电子自旋相互作用大小决定。如果用核

自旋磁矩,其大小同电子自旋磁矩相比较,只是它的 $1/1800$,所以核自旋间相互作用小,获得的温度可以认为较顺磁盐低。这种方案提出后,一直拖到1956年才进行了实验。当时各种条件不好,实验未能获得满意的结果^[12]。但是由于稀释制冷机及超导磁体的发展,可以认为那时的困难已基本解决了。以稀释制冷机为基础的核绝热去磁最初是由劳莱斯曼小组进行研制的^[13]。作为核冷却用物质,由于居里常数要大,柯林加常数要小等等,可以举出铈、锡、铟、铜等作为候选材料,而主要被使用的是不发生超导转变的铜。

核绝热去磁法的原理如图7所示。在混合器的底部接铜导线,中间装上热开关,下面安装铜核冷却部分。这个热开关用锡、锌、铝等超导线。这是因为同正常状态相比,当变为超导状态时,其导热率变得非常小。因此让热开关先为正常态,核冷却部分加上磁场,从1K附近往下冷,冷至10毫K前后开关转换为超导状态,成为绝热状态后进行去磁。

用于核冷却的铜为 ^{63}Cu 、 ^{65}Cu 的混合物,具有同一核自旋量子数 $I=3/2$ 其核自旋熵和温度的关系如图8所示。由图8可见,如果冷至10毫K是可能的,当磁场为8特斯拉时,其熵减少百分之几是可能的。

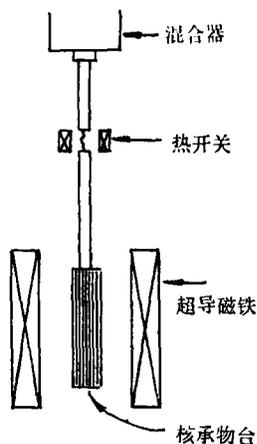


图7 核绝热去磁原理图

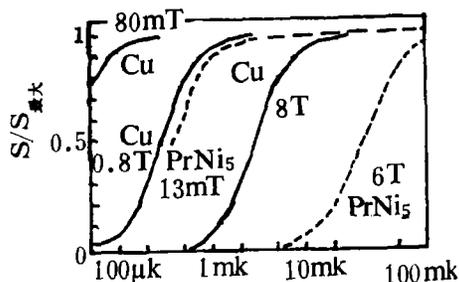


图8 铜和五镍化镨的温度与熵的关系图(T为特斯拉)

由于核绝热去磁核自旋温度 T_n 变低了,因此如果传导电子温度 T_e 不降低的话,其它物体不能冷却。这里相对于自旋~自旋弛驰时间 τ_2 来说,自旋-晶格弛驰时间 τ_1 为长。这里 τ_1 可以表示成 $\tau_1 T_e = K$, K 是称为柯林加常数的量。 τ_1 小时,由于 T_n 和 T_e 很快达到平衡,所以作为核冷却物质 τ_1 小者令人满意。超流 ^3He 实验中使用的核冷却装置剖面如图9所示(图略)从图就能明白其工作过程。

当前核绝热去磁不只是1级,而且能进行2级核绝热去磁,这就是从第1级用具有超细相互作用且能放大内部磁场的五镍化镨(PrNi_5)等物质^[15],靠它冷却第2级的铜装置只能得到48微K的电子温度^[16]。

结 束 语

在这么低的温度范围里决定热力学温度有很多的困难。国际上只规定了 ^3He 蒸汽压和温度的关系至0.2K附近。对0.2K以下的部分现在也没有什么规定。但是从铈镁硝酸盐的磁化率值,应用居里-韦斯定律导出的磁温度至6毫K附近同热力学温度很好相吻合这一点在以前的研究中已知道了,所以能分别求出铈、铍、铀等金属的超导临界温度是15~17

毫 K、21~24 毫 K、98.5~99.5 毫 K，近来根据这一温度定点来进行各温度计的核准。

在使用含有电阻式的超导量子干涉器件的交流约瑟夫逊振荡上迭加因电阻的噪声电压引起的振荡，也可以实现。从这噪声电压算出绝对温度， ^3He 的超流转变 A 点的温度亦用与这种方法确定。更低的温度，即微 K 温度依靠 ^{60}Co 、 ^{54}Mn 等放射性元素 γ 射线各向异性温度的依赖关系，或者铂的脉冲核磁共振测量驰豫时间求温度这一工作正在进行中。由于篇幅的关系，关于这些在文献〔8〕、劳莱斯曼的教科书里有详细介绍。

最后说一下，获得超低温不只是物性物理方面的问题，在核物理及普通的基础物理方面也是极其重要的。在射频超导量子干涉仪技术及超导磁体技术的帮助下，将更进一步朝微 K、毫微 K 进展下去。

参 考 文 献

- 〔1〕 D.D.Osheroff et al, Phys.Rev.Lett.28(1972)885
- 〔2〕 W.P.Halperin, Phys.Rev.Lett.32(1974)927
- 〔3〕 C.G.Garrett, Magnetic Cooling(1954)
- 〔4〕 R.T.Johnson et al, J.Low Temp.Phys.2(1970)445
- 〔5〕 D.O.Edwards et al, Phys. Rev. Lett.15(1965)773
- 〔6〕 R.Radebaugh, NBS Technical Note 362(1967)
- 〔7〕 小田祺景, 日本物理学会志 37(1982)409, 595
- 〔8〕 O.V.Lounasmaa, Experimental Principles and Methods Below 1 K (1974)
- 〔9〕 Y.Oda et al, Advanc. Cryogen. Eng. 27(1982)695
- 〔10〕 A.Th.A.M.de Waele, Proc.ICEC 6 (1976)112
- 〔11〕 N.Satoh et al, Proc.ICEC 9 (1982)LB1
- 〔12〕 N.Kurti et al, Nature 178(1956)450
- 〔13〕 P.M.Berglund et al, Proc.1970 Ultralow Temp. Symp,U.S.Naval Research Lab. Repprt No. 7133(1970)
- 〔14〕 M.Krusius et al, Cryogenics 18 (1978) 649
- 〔15〕 高柳等人, 固体物理 13(1978)437
- 〔16〕 R.M.Mueller et al, Cryogenics 20(1980)395
- 〔17〕 木村臣司, 固体物理 16(1981)45
- 〔18〕 西田信彦等人, 固体物理 16(1981)47

(译自“应用物理”51 10 (1982) 1130, 胡永年 校 原文 作者 永野 弘)

(上接57页)

苏勃尼科夫与特拉佩丝妮科娃一起研究了过渡金属无水氧化物的比热。他又与沙雷特共同完成了上述测量和无水氧化物磁性的测量。这是由顺磁态向 1933 年朗道理论研究的新抗铁磁态的过渡。

苏勃尼科夫是一个精力非常充沛、工作能力极强的人。他总是处在一种既饱满又舒畅的情绪之中，同时又是一个坚定的人。他的这些气质，以及平易近人的品格，使他所领导的实验室中具有一种良好的工作气氛。除了科学工作以外，他还肩负着大量的教育工作。1934~1937 年他是哈尔科夫大学的教授，同时主持普通物理学的讲座。

适用广泛的各种各样的实验方法，高超的测试手段和一系列出色的成果使得苏勃尼科夫组织领导的乌克兰物理技术研究所的低温研究室成为大型低温技术的研究中心之一。苏勃尼科夫的杰出工作早已成为人所共知的经典，他的名字也已经列入众所周知的低温物理先驱者的行列之中。

(赵 升)