

稀 释 制 冷

——一种获得极低温度的新方法

阎 守 胜

(北京大学物理系)

长期以来,人们要得到液体氦(He^4)温度以下($<1\text{K}$)直到毫开(mK,即千分之一开尔文)范围的温度,只有用顺磁盐绝热去磁的方法。这种方法不能连续制冷,只能在较短的时间内维持所得到的低温,冷却能力也很低,给实验工作带来了很大的限制。五十年代末期,由于从核反应中能够得到较多 He^3 的同位素 He^3 ,人们可以利用 He^3 液体的蒸发得到稳定的温度约 0.3K 。在对 He^3 - He^4 溶液性质进行研究的基础上,1965—1966年期间,发展起一种能够得到mK温度的 He^3 稀释制冷机。这种方法简单可靠,冷量(即冷却能力)大,能长时间(几天到一月)地连续工作,能够得到稳定可调节的温度,具有绝热去磁方法无可比拟的优点。这种制冷机的出现是获得极低温技术的一个重大进步。它也使很多物理学的研究课题能够伸展到它们以前从未达到过的极低温范围,已经应用在原子核及基本粒子物理研究方面,例如弱相互作用(β -衰变)实验中提供大量的极化核,宇称、时间反演不变性、核自旋与散射的关系、裂变过程等实验,穆斯堡尔效应谱等。在固体物理研究方面有:固体的热、电、磁性质及超导电性,低温高压下固体的热、磁性质。以及其它方面例如:液体或固体的超声吸收,低温下热力学起伏现象,低温温度计,绝热压缩制冷、顺磁盐和核的绝热去磁制冷的起始预冷以获得更低温度。量子液体

及固体— He^4 、 He^3 及其混合液的研究,导致最近在 2.6mK 发现 He^3 有可能成为超流的新相变。将来还会有更多的应用。因此 He^3 稀释制冷机为我们提供了一个新的研究工具。这种方法受到普遍的重视,发展很快。本文对它的原理和结构做一个简单的介绍。

1956年发现, He^3 - He^4 混合液在极低温下有相分离现象。图1是 He^3 - He^4 液体的相图,表示在不同的温度和成分下溶液的状态。 $x = n_3/(n_3 + n_4)$ 是 He^3 的浓度。 n_3 、 n_4 分别为溶液中 He^3 和 He^4 的克分子数。 $x = 0$ 表示溶液是纯的 He^4 , $x = 1$ 表示溶液是纯的 He^3 。在两相区以上,依赖于在 λ 线的左边或右边,溶液或者是超流的,或者是正常的。 Q 点相应的温度为 0.87K ,是能够发生相分离的最高温度,类似于气体液化的临界温度。在相分离区,溶液分成两相,一相是富 He^3 的溶液,称为浓相,一相是稀 He^3 的溶液,称为稀相。由于 He^3 原子较轻, He^3 - He^4 溶液的密度随 He^3 原子浓度的增加而减小,所以浓相浮在稀相的上面,两相之间有一个清晰可见的相分界面(图2)。每相的浓度由相分离曲线中相应的点给出, Q 点左面一支给出稀相的浓度,右面一支给出浓相的浓度。例如 0.5K 时,两相浓度分别为图1中 D 、 C 两点相应的浓度。稀相浓度 $x_D \sim 0.2$,浓相浓度 $x_C \sim 0.9$ 。在稀释制冷机中,发生相分离的部分,通常温度低于 0.1K 。由图1可看出,在这个温度范围,浓相成分 $x_C = 1$,是纯的 He^3 。稀相主要是超流的 He^4 ,溶有少量的 He^3 , He^3 的浓度变化很小,在接近 0K 时为 0.064 。一直到绝对零度,稀相中还溶有一定数量的 He^3 原子,这是稀释制冷机中要用到的一个很重要的事实,原因是此时单个 He^3 原子和超流 He^4 的结合能要比和纯 He^3 液体的结合能更低。

稀相中的 He^3 原子是在超流的 He^4 中运动的。在极低温下,例如温度低于 0.5K ,超流 He^4 基本上是

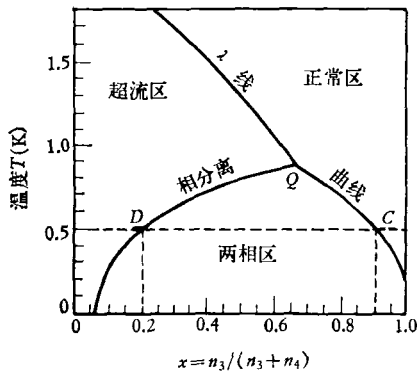


图1 He^3 - He^4 溶液相图

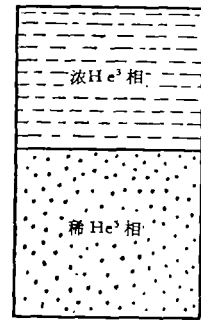


图2 相分离示意图

完全有序的，它倾向于维持这种比较稳定的完全有序状态，排斥和其它粒子散射而引起有序度的降低。因此， He^3 原子的运动就是自由无阻的，好像 He^4 液体根本不存在一样，我们可以简单地把它处理为“真空”。这类似于大家熟知的由于理想的周期排列的晶格点阵对自由电子不产生散射，因此，在研究金属电学性质时，常常简单地把晶格部分看成是一个盛放自由电子气体的容器一样。

稀相中的 He^3 原子，由于浓度低，原子之间距离很大，相互作用可以忽略，能够近似地看成是理想气体。由于 He^3 原子的自旋是半整数，遵从费米统计，因此是一个理想的费米气体，类似于金属中的自由电子气体。这样，在极低温下， He^3 - He^4 混合液分成两相，很像是一个上下颠倒着放置的液体，纯 He^3 液体在顶上，下面是 He^4 原子的气体，相当于和 He^3 液体平衡的“蒸气”。

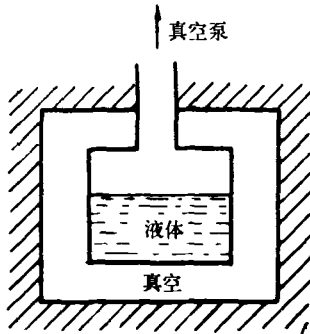


图3 蒸发制冷示意图

为了更容易了解稀释制冷的原理，我们先介绍一下通常的蒸发制冷。蒸发制冷是一种最简单的制冷方法。给定某一液体，让此液体处在绝热的环境下，用真空泵来抽走它的蒸气(图3)，液体分子蒸发，吸收热量(即潜热)，从而液体温度下降。如果让液体温度不变，它就能吸收外界热量，即具有冷冻能力。在极低温下，制冷量，即吸热速率为：

$$\dot{Q} = L_0 \dot{n}, \quad (1)$$

L_0 是液体在 0K 时的潜热， \dot{n} 是从蒸发器抽走此物质的速率。从低温的标准看， L_0 一般是足够大的。 \dot{n} 的大小则决定于抽气机所能建立的压力差。这个压力差，即使用最大的抽气机，也不能超过液体在该温度下的饱和蒸气压。低温下，液体的饱和蒸气压正比于 $e^{-L_0/kT}$ ， k 是波尔兹曼常数。因此， \dot{Q} 是随温度按指数规律减小的。在所有的物质中， He^3 的 $L_0/k = 2.5\text{K}$ 最小，即在低温下蒸气压最高。但当温度 $T < \frac{1}{10} \frac{L_0}{k} \approx 0.25\text{K}$ 时，蒸气压也就太低了，约 0.24 微米水银柱高。式(1)中的 \dot{n} 就太小，提供的冷量就不能使液体温度进一步降低了。实际上液体 He^3 减压降温的极限温度约为 0.3K。

He^3 - He^4 稀释制冷机的工作很像 He^3 液体的蒸发

制冷机，不过上下是颠倒着的，液体在上，“蒸气”在下。稀释制冷机之所以能够得到低得多的温度，因为和蒸发制冷不同，这里 He^3 “蒸气”的浓度，或相应的“蒸气压”(实际上是渗透压)，如前所述，在温度趋近于绝对零度时，并不趋近于零，而是还有相当的数量，浓度趋于一常数值为 6.4%，它向纯液体 He^4 扩散的渗透压为 10.6 毫米水银柱高。我们只要设法使稀相中的 He^3 原子数目减少，为了保证稀相中 He^3 一定的浓度，浓相中的 He^3 原子就会不断地通过相界面溶解到下部的稀相中去，这个过程相当于液体的蒸发。由于每克分子 He^3 原子气体的熵比液体 He^3 的熵大四倍，这个过程是吸热即制冷的。吸热速率

$$\dot{Q} = \dot{n}_3 T [S_d - S_c] \approx 10 \dot{n}_3 RT^2 \quad (2)$$

式中 $R = 8.31 \times 10^7$ 尔格/克分子·开，是普适气体常数。 S_d, S_c 分别为稀相和浓相每克分子 He^3 的熵。 \dot{n}_3 是 He^3 “蒸发”的速率(克分子/秒)， T 为相界面的温度。在稀释制冷机中，一般称包含相界面的室为混合室或稀释室。因此 T 也就是混合室的工作温度。式(2)中 T^2 因子的出现，是由于像自由电子气体一样， He^3 液体或气体的熵都是和温度成正比的。从式(2)看出，虽然温度下降，冷量也减少，但远比蒸发制冷中指数形式的减少为慢(图4)。因此它可以得到更低的温度。

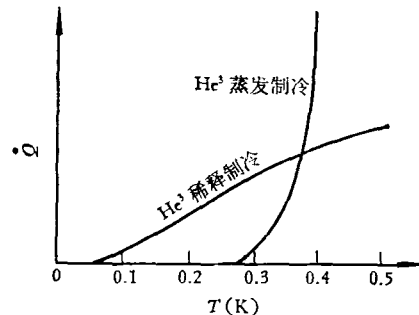


图4 He^3 蒸发制冷和稀释制冷冷量 (\dot{Q}) 和温度 (T) 的关系

怎样才能使稀相中的 He^3 原子数不断减少呢？可以用一根管子，像图5那样，从混合室中的稀相引出，向上通到第二个室，此室包含有稀相的自由表面，我们把它称做蒸馏器或蒸发器。蒸馏器的温度一般选在 0.6—0.7K。在这个蒸馏器温度下 He^3 的蒸气压要比 He^4 的高得多。 He^3 的蒸气压约为 70 微米水银柱高，而 He^4 只有 0.3 微米水银柱高。这样，尽管此时稀相中 He^3 的平衡浓度只有约 1%，但在蒸气中几乎全部都是 He^3 。用真空泵不断地把蒸馏器中蒸气压高的 He^3 抽走，在稀相中，从混合室到蒸馏器就建立起一个浓度梯度，混合室里稀相中的 He^3 原子就会不断地扩散过来，从而使浓相中的 He^3 原子不断通过相界面“蒸发”，补充到稀相中去。

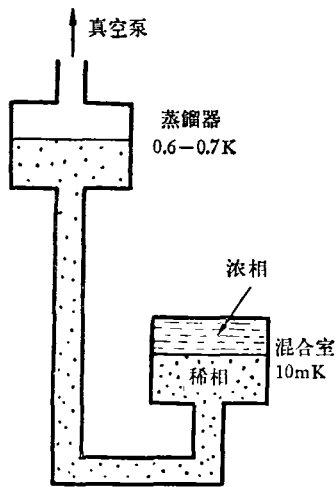


图5 稀释制冷示意图

在图5中,当浓相(纯 He³ 液体)消耗完时,制冷过程就停止了。通常称这种工作方式为单循环式。如果要长时间地保持极低温度,就要采用连续循环的方式。图6是连续循环的稀释制冷机的略图。稀释制

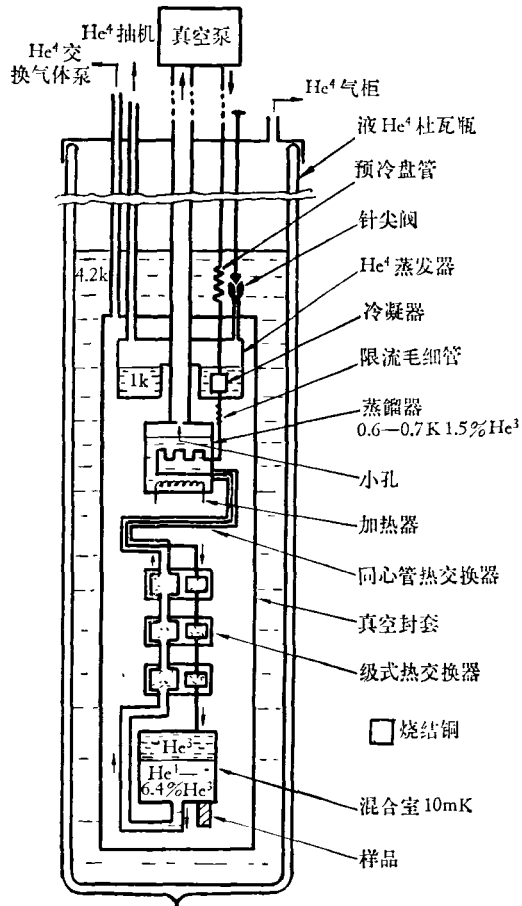


图6 He³ 稀释制冷机略图

冷机的主要部分包在真空封套中,放在液氮杜瓦瓶里。工作时,先在套中充以氦(He⁴)气,作为热交换气体,使稀释制冷机的主体冷到4.2K,然后再抽成高真空,使制冷机主体绝热。真空泵使几乎是纯的 He³ 在整个系统里循环,通常循环的速率是 10⁻³~10⁻⁴ 克分子/秒,相当于每分钟 14~140 厘米³ 常温常压下的 He³ 气体。在真空泵的排气口, He³ 气体被压到 20—200 毫米水银柱高。此气体先在液体 He⁴ 中预冷,然后在近 1 K 的减压 He⁴ 槽中液化,槽中的液体可通过上端针尖阀补充。限流毛细管的作用是维持一个压力差,使在它上端的压力至少要等于 He³ 气体的凝聚压。He³ 液体通过限流毛细管压力下降,并在蒸馏器和热交换器中进一步冷却,直到温度接近于混合室的温度,流入混合室上部的浓 He³ 相。在混合室中,浓 He³ 相中的 He³ 原子不断通过相界面溶到稀相,产生制冷效果。实验样品就放在这个部位,根据实验的特殊要求,混合室的形状,大小,材料有时要采用不同的设计。稀相中的 He³ 原子通过热交换器,在蒸馏器中被加热蒸发,抽回到泵中,重新压缩,完成循环。蒸馏器上端的小孔,是用来减少由于超流 He⁴ 的爬行膜现象引起的 He⁴ 过多的蒸发,即使这样,抽走的 He³ 蒸气中仍含有 10% 的 He⁴。蒸馏器的温度要适当,温度太低, He³ 的蒸发量,亦即整个系统中 He³ 的循环量太小。温度太高,会使较多的热漏到混合室中去。一般都选在 0.6—0.7K。在蒸馏器中,由于 He³ 蒸发也产生制冷,一部分可用来冷却上下的管道,测量引线等,另一部分要用加热器补偿,以维持蒸馏器稳定的温度。

热交换器设计和制作的好坏,是整个制冷机性能好坏的关键。如果热交换效率较差,回流的 He³ 液体带着太多的热量下来,混合室就不能达到较低的温度。这也正是单循环的工作方式能够得到更低温度的原因。因为这时不要再补充液体 He³, 没有这部分液体带下来的热量。在连续循环的制冷机中,用 50—100 厘米长,简单的同心管热交换器(或其它普通的热交换器),即把两根管子套在一起,然后盘成螺旋状,纯 He³ 液体走中心的细管,稀溶液在两管之间的环状空间(图7),混合室可以达到 40—50 mK。要想得到更低的温度,问题就比较复杂了。主要是在极低温下出现了很高的卡皮查界面热阻,使液体和管壁的传热变得很差,从而大大降低了热交换效率。卡皮查界面热阻和 $1/(AT^3)$ 成正比, A 是界面的面积, T 是温度。显然,要得到好的热交换效率,就需要大大地增加热交换的面积,简单的同心管式热交换器热交换面积(内管表面积)太小就不能使用了。通常是用多孔的烧结铜粉来做,先把两截短铜管并排焊在一起,填入颗粒大小为 30—50 微米的铜粉,然后烧结。成品空隙度约为 40—50%,每立方厘米内热交换面积可高达数百平方厘米。有时为了减小流阻,在每个管子中心再开一个 1—2 mm 的通道

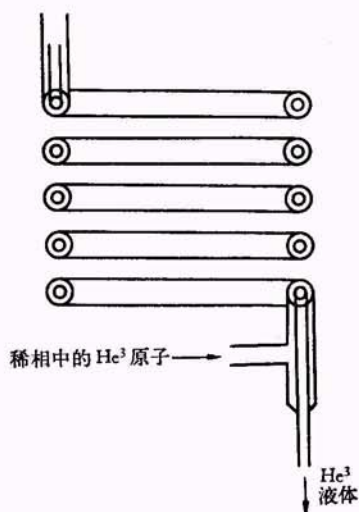


图7 同心管热交换器示意图

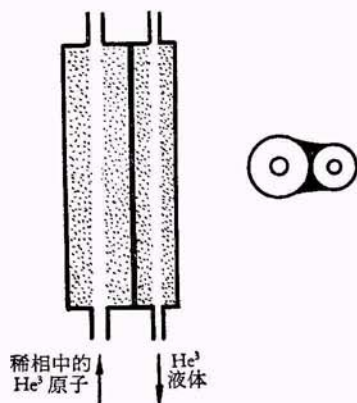


图8 烧结铜粉热交换器示意图

(图8)。为了减少沿烧结铜块向混合室的传热,通常用导热很差的细不锈钢管把3—5个这样的热交换器连接起来,成为一种级式热交换器。这种热交换器性能很好,在同心管热交换器后接上这样的热交换器,可使稀释制冷机的工作温度达到10mK。

稀释制冷机种类很多,图9给出两个典型的稀释制冷机主体部分的照片。右边一个较小,较简单,混合室直径约3厘米,只有同心管式热交换器,可达到40mK,致冷量较小,左边一个较大,混合室直径约6厘米,除去同心管式热交换器外,还有五个烧结铜粉热交换器组成的级式热交换器。He³的循环速率约为10⁻⁴克分子/秒,连续循环时可达12mK。在0.1K时可提供大于750尔格/秒的冷量。单循环工作时可达5mK。两个制冷机中,混合室和蒸馏器之间都是用石墨来支撑连接的。在极低温下,石墨的热导性能随温度变化很剧烈,一直到10K它都是很好的导热材料,有利于混合室的预冷。但在极低温下,它的热导差到可以看成是热绝缘的材料,这样既起了支撑连接的作用,

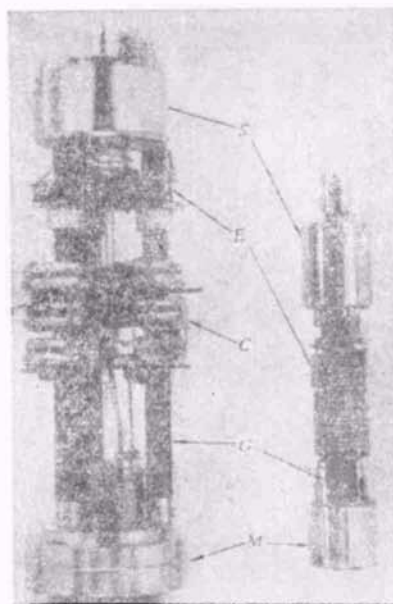


图9 稀释制冷机主体部分照片
S: 蒸馏器、E: 同心管热交换器、C: 烧结铜粉热交换器、G: 石墨、M: 混合室

用,又避免了从蒸馏器向混合室的漏热,是极低温下支撑连接中常用的材料。

稀释制冷机实际上所能达到的最低极限温度,是由一些不可避免的外界漏热所决定的。1965年做成的第一台制冷机,只能达到0.22K。几年来,进展很快。目前一般水平是连续循环工作温度为10mK,简单循环工作为5mK。已达到的最低连续循环工作温度为5.5mK,简单循环工作温度为3.5mK。稀释制冷机的出现也为我们获得更低的温度提供了很好的条件。例如在这个基础上,进一步再利用固体He³的反常性质:He³只有加压才能固化,固体比液体更无序一些,即有较高的熵。这样,使液体He³绝热加压固化,温度可进一步降低,用这种方法,现在已能达到1mK。获得更低温度的核自旋绝热去磁方法,要从10mK开始,稀释制冷机的出现,使它变得容易多了。

稀释制冷机作为mK温度范围内进行实验最有效的工具,今后会得到进一步的发展完善,会得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Wheatley, J. C., *Amer. J. Phys.*, **36** 181 (1968).
- [2] Wheatley, J. C., et al., *Physics*, **4** (1968), 1. *J. Low. Temp. Phys.*, **4** (1971), 1.
- [3] Radebaugh, R. and Siegwarth, J. D., *Cryogenics*, **11** (1971), 368.
- [4] Batts, D. S., *Contemp. Phys.*, **9** (1968), 97—114.
- [5] Huiskamp, W. J. and Lounasmaa, O. V., *Rep. Prog. Phys.*, **36** (1973), 423.