

制冷技术进展及其物理原理

张 伟 张立德

(中国科学院固体物理研究所 合肥 230031)

1997年的诺贝尔物理学奖刚刚授予了从事激光制冷等工作的三位作者。实际上,1996年和1997年连续两年的诺贝尔物理学奖都授予了与低温有关的工作。迄今为止,低温方面的研究工作已先后获得了八项诺贝尔物理学奖;还有其他一些工作如 de Hass von Alphen 效应、单电子隧穿振荡效应、AB 效应等重大科研成果的取得,都与低温有着密切关系。低温在科学研究中的重要性由此可见一斑。低温不仅在科学研究中而且在改造我们的世界观上也有着重要意义。因为低温的获得,人们得以观察到超流超导等新的物质形态和物理现象,先后提出了二流体,库珀对等全新的物理概念。这些成就的取得,极大地丰富了人类的思想。在某种程度上可以这样说,我们获得的低温越低,我们对物理规律和大自然本质的认识才能越深。人们一直致力于低温方面的研究,特别是近年来,由于低温技术的发展及与之相关的重大研究成果的取得使低温方面的工作再次成为研究热点。各国竞相加大投入,重点支持。在我国就已建起如中国科学院低温中心等多个低温研究基地。

低温技术如此重要,那么,如何获得低温?它涉及哪些物理原理?目前又能获得什么水平的低温?本文以制冷技术的进展为线索,介绍几种主要的制冷方法及其物理原理,旨在和大家共同学习、研讨。

在具体介绍获得低温的方法之前,这里先交代一下温度的概念。温度,宏观而言,指物体的冷热程度;微观而言,是微观粒子无序热运动的动能量度。在这一概念里,“无序”和“动能”是两个关键点。一个系统的无序度和微观运动动能越低,其温度就越低。实际上,低温的获得(制冷)也就是围绕如何降低系统的无序度和微

观运动动能两方面的工作进行的。根据各种制冷原理,目前主要的制冷方法大致可分为四类共八种,如表1。由于各种制冷方法受其原理和技术的限制,其制冷水平各不相同。

表1 四类八种制冷方法

绝热膨胀法	a. 绝热自由膨胀 b. 绝热节流膨胀
物相转化法	c. 蒸发冷却法 d. 压缩固化法 e. 稀释制冷法
绝热去磁法	f. 顺磁性盐绝热去磁法 g. 绝热核去磁法
激光制冷法	

1 绝热膨胀法 绝热的气体体积膨胀时可引起气体分子动能的减少,从而温度降低。绝热膨胀法主要包括绝热自由膨胀法(a)和绝热节流膨胀法(b)。

绝热自由膨胀法是由法国采矿工程师 Cailletel 于 1877 年在一次实验时无意中发现的。当时,他本想加高压液化乙炔气,但加压中途,玻璃管破裂,裂缝中出现了液滴,经反复实验,确定那是乙炔液滴。原来,在近似绝热的状态下,乙炔气体体积膨胀,对外做功,这使得乙炔气体的内能减少,温度降低,很容易就液化了。这也是一般绝热自由膨胀制冷的物理原理,如图 1。绝热节流膨胀法也是实验规律的总结。焦耳和汤姆孙(亦称开尔文)发现,在绝热状态下,气体从高压端经棉球或多孔塞有“节制”地流到低压端后,其温度会改变,即节流过程中体积变化引起了温度的变化(或降低或升高),这一现象也称为焦耳—汤姆孙效应。通常,人们利用它的降温功能。节流过程中,为什么其温度既可能降低也可能升高?同是绝热膨胀,为什么节流膨胀和自由膨胀差别如此之大?

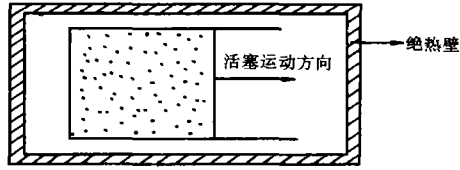


图1 气体分子绝热自由膨胀

这两个问题可以这样理解: 气体膨胀, 分子间距增大 (如图 2), 如果分子间距由 r_a 增大到 r_b 则分子势能减小, 如果分子间距是由 r_b 增大到 r_c , 则分子势能增大. 势能的减少可导致动能的增加, 势能的增加可能来自动能的减少, 从而可能引起温度的上升或下降. 因此, 利用气体的节流膨胀可获得低温. 虽然同是绝热膨胀过程, 但由于绝热自由膨胀对外做功而节流过程对外不做功, 所以前者是单调降温过程而后者既可能升温也可能降温. 对这两种过程进行数学处理可得气体的温度随其压强而变化的情况与其体积 (V)、温度 (T) 和膨胀系数 (α) 及等压热容 (C_p) 之间的关系为

$$(\partial T / \partial P)_s = V T \alpha / C_p \quad (1)$$

$$(\partial T / \partial P)_H = V (T \alpha - 1) / C_p \quad (2)$$

这样, 两种方法的优缺点也就一目了然. 绝热自由膨胀单调降温, 且在相同气压降时温度降

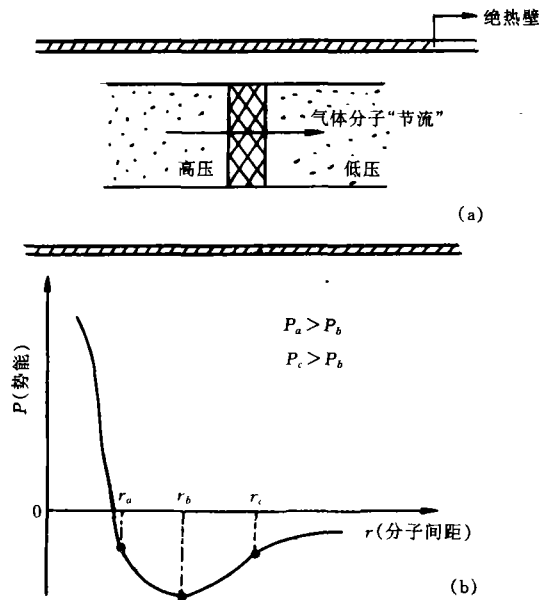


图2 气体分子绝热节流过程 (a) 及其分子势能随分子间距的变化 (b)

落大, 但由于活塞运动会摩擦生热, 影响降温效果. 而绝热节流膨胀过程中不涉及活塞运动, 因此不会生热, 但绝热自由膨胀法的优点却正是它的缺点. 由于这两种方法的优缺点互相补充, 通常将它们结合起来使用, 可获得约 2K 左右的低温.

2 物相转化法 物相转化法通常利用物相变化时伴随有潜热变化及物相转化温度易受外界影响的特点, 通过降低物相转化温度并及时消除相变潜热来达到降温目的. 物相转化法主要包括蒸发冷却法 (c)、压缩固化³He 法 (d) 和稀释制冷法 (e). 蒸发冷却法一般以液态³He 或⁴He 为原料, 通过抽气机带走热量并降低液氮的蒸汽压使液氮在更低温度下沸腾 (液体的饱和蒸汽压越低, 其沸点会越低), 这样, 就降低了温度. a、b、c 三种方法都是获得高于 1K 低温的有效方法, 将这三种方法联合使用, 可获得低至 0.3K 的低温. 由于有些实验要求温度特别低, 如³He 超流相的出现, 理论预计温度是 10^{-6} K, 但当时连获得 10^{-3} K 的低温技术都不成熟, 这就需要制冷技术有突破. 后来, 美国康奈尔大学的 Oscheroff 等人通过改进实验装置利用压缩固化³He 法获得了低至 1mK 的低温, 并终于获得了³He 超流相 (他们也因此获得了 1996 年度的诺贝尔物理学奖). 其中的压缩固化法就是本文要介绍的第四种方法. 通常, 物质的液态比固态无序, 因此, 物质由液态变为固态时要放出热量, 使其所处的环境温度升高. 但³He 液态却比固态有序 (见附录), 因此, 固化³He 会使其从外界环境吸热, 并使环境温度降低. 由于仪器自身性能和固化的³He 间相互摩擦生热会妨碍进一步降温, 这种方法目前只可获得约 1mK 左右的低温. 除此之外, 稀释制冷法也可获得 mK 量级的低温. 稀释制冷法的原理与绝热自由膨胀和蒸发冷却类似 (见图 3). 只是此时的³He 液被稀释在⁴He 超流相中. 由于超流相相当于真空 (高热导、无粘滞等特性), 因此,³He 稀释于⁴He 超流相中的过程相当于绝热自由膨胀, 会放热降温 (放出的热量被抽走). 另外, 由液相变为气相时, 混合态中³He 的相变潜

热和比热比纯 ^3He 高许多,抽走混合相中的 ^3He 能带走更多的热量,从而有效降温.由于系统在 mK 量级低温时,蒸汽压趋于零,抽气机不能有效工作,故稀释制冷法一般只能降温至 mK 量级.

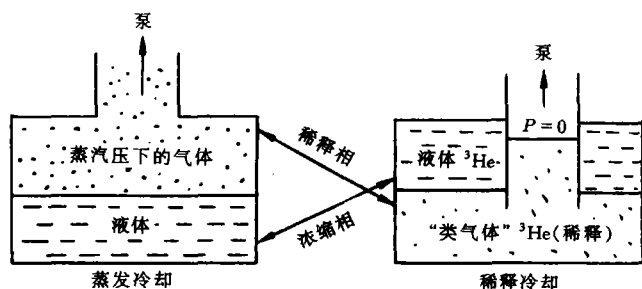


图3 稀释制冷法示意图

3 绝热去磁法 绝热去磁法是由 Debye, Gorter 等人于本世纪 20 至 50 年代发展起来的制冷方法.绝热去磁法不仅可获得 mK 量级低温,而且它还创造了低温获得中的最低纪录 50nK!绝热去磁法是基于磁有序和无序间的转变伴随有熵和热量变化的原理来获得低温的.利用绝热去磁法制冷的过程(如图 4)为:等温加外磁场,使顺磁体磁化(系统降熵放热,温度不变),然后,绝热并撤走外磁场,此时,系统的总熵不变但顺磁体由磁有序变为无序,其熵增加,使得绝热系统的其他部分的熵(无序度)减少,因此系统的温度降低.如果等温(T_i)时所加外场为 B_i ,绝热状态下撤走外场后顺磁体的有效内场为 B_f ,则系统温度可降为

$$T_f \approx (B_f/B_i)T_i \quad (3)$$

根据磁体的类别,绝热去磁法可分为顺磁性盐绝热去磁法(f)和绝热核去磁法(g).由于一般顺磁性盐和核顺磁体的有效内场不同,利用前者一般可降温至 mK 量级,而用后者通常可获得 μK 量

级的低温.50nK 的低温是在 Cu 的绝热核去磁实验中获得的.

4 激光制冷 这是刚刚获得诺贝尔物理学奖的工作.激光因为能量密度高,通常用来产生高温(如激光武器).但科学工作者冲破传统思维束缚,从物质的量子性运动本质入手,开创了激光制冷这一新方法.激光为什么能制冷?要回答这一问题,还得紧扣温度概念中的“无序”和“动能”这两个关键点.前面介绍的七种方法,或是利用降低无序度,或通过减少微观粒子运动动能达到降温目的.而激光制冷则将这两种因素都利用了.这一方法于 1975 年由 Hansch 和 Schawlow 首先提出,它主要先利用速度选择器使速度(大小和方向)一致(有序)然后利用激光的辐射压力阻尼中性气体原子的热运动使之动能减小,从而达到降温目的.下面简单介绍一下激光制冷法中气体分子有序化和动能降低过程,见图 5.图 5a 是速度选择器的原理图,其中 A 为准直管,B 和 C 为有孔的圆盘,孔 1 与孔 2 等大同轴.进入准直管的气体分子经准直管作用,会以大致相同的方向运动到孔 1;然

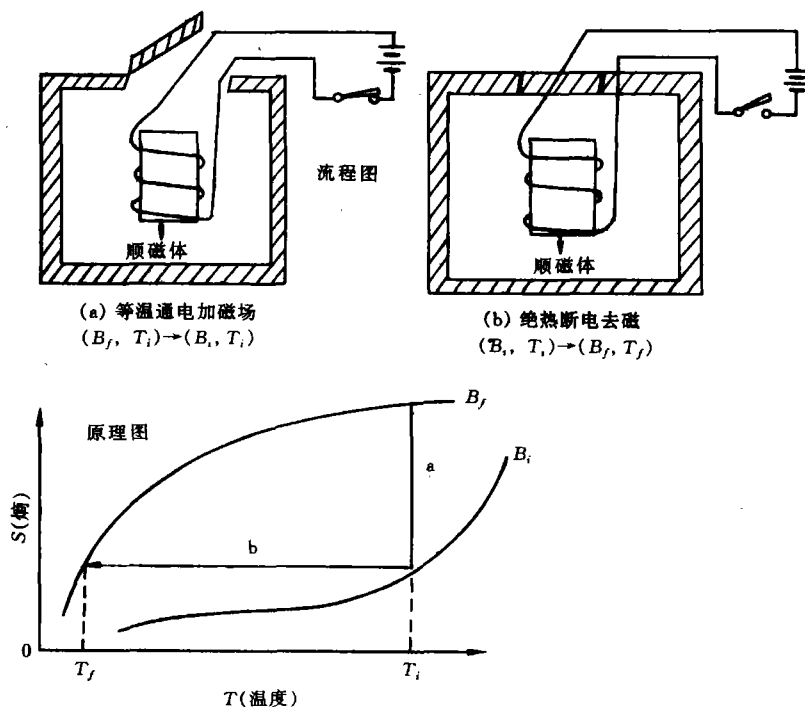


图4 绝热去磁制冷流程及原理图

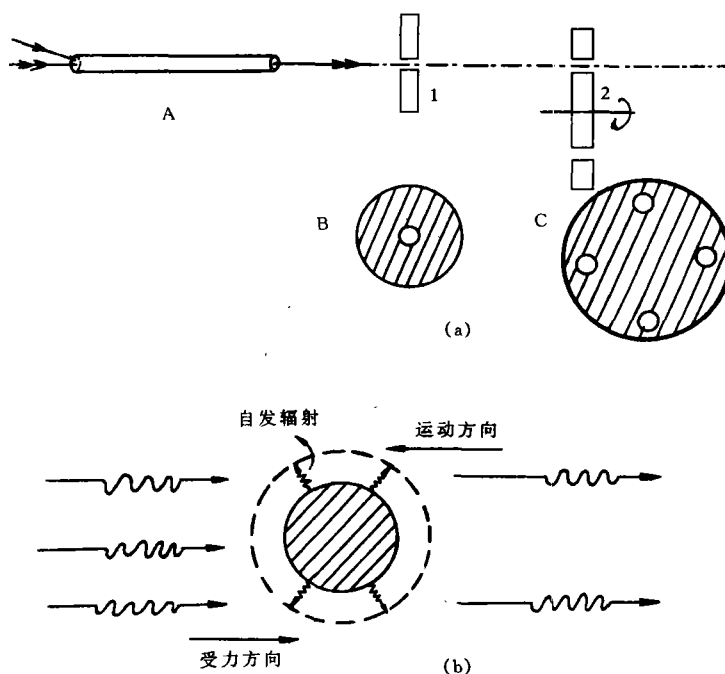


图5 (a)速度选择器“选择”分子运动速度的大小和方向
(b)激光阻尼原子运动示意图

后,只有那些运动方向与孔1和孔2轴线重合的分子才可能穿过孔2(不考虑重力作用).由于圆盘上有一系列和孔2等同的小孔,以一定的速度转动圆盘,则只有满足特定的速度(大小和方向)要求的气体分子才能通过孔2.这样,速度的大小和方向就一致(有序)了.图5b是激光阻尼分子或原子运动的示意图.激光以一定方向和符合原子能级差的频率辐照原子,原子吸收辐照能量的同时获得光子动量.随后,原子通过自发辐射方式放出光子(能量),自发辐射在各个方向的几率相同,因此,自发辐射的光子带走的总动量为零,原子便获得净动量,其运动受阻,动能随之减小.经速度选择和激光辐照后的原子运动有序,动能减少,自然就处于低温状态.目前,利用激光制冷法可使气体分子(或原子)冷却到170nK,并观察到Na、Rb等气体原子在低温下的玻色-爱因斯坦凝聚.值得特别指出的是,激光制冷法不是一般的获得低温环境的方法,它直接对被研究的对象作用,使其处于低温状态.

制冷方法多种多样,制冷技术在不断发展,

限于篇幅,不能在此一一介绍.但科学研究对低温技术的苛求没有止境,人类探索极端条件特别是极低温下的未知领域的步伐在加速,这需要我们在制冷技术上大胆创新,敢于突破,开创新的工作局面,适应人类文明进步的需要.

附录 固体 ^3He 虽然晶格有序,但由于其原子核磁矩间相互作用弱,排列无序,其熵值(无序度)也就比较高.液态 ^3He 虽然晶格无序,但因为它是费米液体,按朗道费米液体理论,原子间相互作用并不改变它作为费米液体的特征,即只有其费米面附近的原子对液态 ^3He 的熵有贡献.在低温状态下,液态 ^3He 的熵与其温度成正比.在0.3K时, ^3He 的液相的熵与固相的同为 $R\ln 2$.在低于0.3K的温度

下,随温度的降低,液相 ^3He 比固相 ^3He 的熵降得快.因此,在低温下固化 ^3He 液体能使其吸收外界环境的熵即吸收环境的热量并降低其温度.只有当温度降至2mK时,由于固态 ^3He 的磁无序开始向磁有序转变,压缩固化法才开始逐渐“失效”.

科苑快讯

美研制新型红外半导体激光器

据《科技日报》报道,美国贝尔实验室的一个科学家小组使用一种半导体涂层新方法开发红外半导体激光器.这种名为量子级联激光(Quantum Cascade Laser)的新型激光器可望应用于环境检测和医检领域.

贝尔实验室的德瑞克·卡帕索博士认为,量子级联激光器具有许多优点.同传统半导体激光器相比,这种激光器不需冷却系统,可以在室温下稳定操作.