

磁制冷和激光制冷技术

周传运

制冷就是使某一空间内物体的温度低于周围环境温度并能维持这个低温的过程。制冷及低温技术有着十分重要的应用，关系到国计民生的多个重要领域，如食品储藏、航空航天、医疗卫生、科学试验等。根据制冷产生的低温环境的不同，制冷技术大体分为三类，120K 以上至环境温度以下为普通制冷，20~120K 为深度制冷，0K 以上至 20K 为低温和超低温制冷。早期制冷主要采用气体膨胀的方式来获取越来越低的低温，到 1932 年，荷兰人克西姆采用降低液氮压力的方法获得了 0.7K 的最低温度。这几乎达到了气体膨胀制冷的极限。因此促使人们探索新的方法以获取更低的温度。

1933 年美国吉奥克采用磁制冷技术达到了 0.53~0.1K 超低温，由于低温技术及低温下物质性能的研究做出的杰出贡献，吉奥克于 1949 年获诺贝尔化学奖。

1985 年美籍华人物理学家朱棣文博士和他的同事在实验室中用激光冷却的方法把温度降低到 10^{-6} K 的数量级并捕捉了原子。1997 年朱棣文和法国人克洛德·科昂-塔努吉、美国人威廉·菲利普斯共同分享当年的诺贝尔物理学奖，以表彰他们发现了用激光冷却和捕捉原子的方法。皇家科学院的新闻公报说：在室温下，空气中的原子和分子以每小时 4000km 的速度在运动，当温度下降时其速度会随之降低，但即使达到 0.15K 的低温时，其运动速度仍达到每小时 400km，只有在 0K 状态下，速度才会大大下降，如达到 $1\mu\text{K}$ 时，速度降为每秒钟 25cm。上述三位科学家的成果是用激光束将空气温度冷却到微开程度，使得对单个原子及其内部结构进行精确的研究成为可能。他们的成果大大地拓展了人们对辐射与物质之间相互作用的认识。

磁制冷技术

磁制冷技术是一种把磁性材料的磁热效应应用于制冷领域的技术，任何磁性材料都具有磁热效应 (MCE)。磁性材料随外磁场强度的变化，其自身磁熵也随之改变，同时伴随着吸热放热现象。这种磁的热效应是 1881 年首先在金属铁的外加磁场中发现的。其制冷原理可利用图 1 说明。

图 1(a)，磁工质未加外磁场 ($H=0$)，磁矩呈无序性；图 (b) 受外磁场的磁化，磁矩按外磁场取向排列 (顺磁质)，磁工质对外呈现较强的磁性。磁工质在从 (a) 向 (b) 变化的过程中，磁有序的增加使磁熵减少，因而向外放出热量；在从 (b) 向 (a) 变化的过程中，工质的磁有序减小使磁熵增大，因而会从外界吸收热量。实际中，把上两个过程连接起来，通过绝热去磁吸收热量使环境介质的温度降低，通过绝热磁化来释放吸收的热量，从而达到制冷的目的。

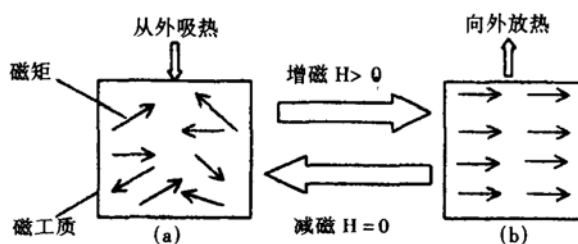


图 1 磁制冷原理

磁制冷是一项绿色环保的制冷技术，与传统的以氟氯烃为制冷工质的制冷方式相比，由于采用磁性物质为制冷工质，其 ODP=0 和 GWP=0，因此对臭氧层无破坏作用，无温室效应；同时，在热效率方面，磁制冷也高于传统的蒸汽压缩式制冷，而且没有噪声。因此，磁制冷技术具有良好的应用前景。

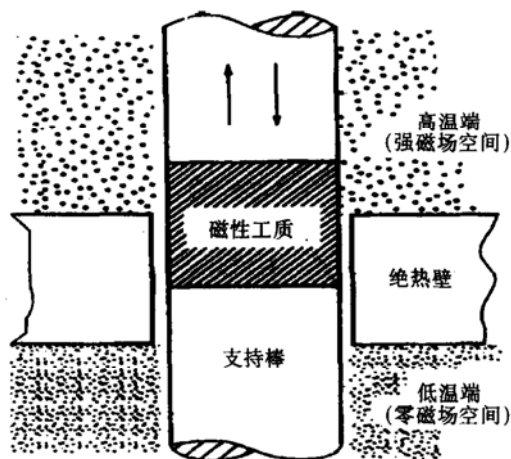


图 2 磁制冷机示意图

图 2 是工质移动式磁制冷机的示意图。在高温端和低温端之间设有绝热层，磁性工质在支持棒的带动下能够上下移动。当磁性工质移动到下方零磁

现代物理知识

场空间时,吸收该空间介质的热量,使该空间的温度降低;当磁性工质移动到上方强磁场区域时,向外释放热量。如此反复循环,就形成了两区间的温度差。目前,顺磁质通过绝热去磁的方法已能够制取0.1mK的超低温。实际中是通过先制取超低温液态氦再以此为基础来获得超低温的。例如,在1个大气压下液态氦的沸点为4.216K,先用其他制冷方法获得液氦后,再用抽气机将氦蒸气迅速抽走,使液氦在低压下沸腾,可以达到1K的低温,然后再采用磁制冷机获取超低温。目前,这种超低温磁制冷技术已相对成熟,人们更关注的是在高温或室温范围内的磁制冷技术,比如磁制冷家用冰箱空调。要实现室温磁制冷,需要在两个方面有所突破:一是在室温条件下,如何获得强磁场(这一点在低温条件下通过超导体很容易实现);二是寻找在室温条件下具有显著磁热效应的工质。在室温范围内进行制冷,需要较大的制冷量,因此磁性工质的热效应应比较显著。目前在钆硅锗合金和纳米材料方面已有所突破。

激光制冷技术

激光制冷是一种完全不同于磁制冷的办法,从上面的分析我们知道,磁制冷是依靠构成磁性工质的分子或原子的集体行为——磁热效应来实现物体的冷却,是一种宏观尺度上物质行为;而激光制冷则是通过激光光子的能量直接束缚被冷却物质的分子或原子的热运动来降低温度的,是微观对微观的物质行为。

根据量子力学理论,如果正在行进中的原子被迎面而来的激光照射,只要激光的频率和原子的固有频率一致,就会引起原子的跃迁,原子会吸收迎面而来的光子而减小动量。与此同时,原子又会因跃迁而发射同样的光子,不过它发射的光子是朝着四面八方的,因此,实际效果是原子的动量每碰撞一次就减小一点,直至最低值。动量和速度成正比,动量越小,速度也越小,温度也就越低。因此激光冷却的实质是原子或分子在激光的作用下的减速。

进一步的解释可利用图3说明。图中激光束a和激光束b相向传播,光的频率相同,都略低于原子吸收光谱线的中心频率,即比原子的共振吸收频率低一些。现在考虑一个往右方运动的原子A,这个原子是迎着激光束b运动的,根据多普勒效应,这个原子感受到的激光束b的频率升高,即激光束b的频

率进一步接近了原子的共振吸收峰值的位置。原子从激光束b吸收光子的几率增大。这个原子

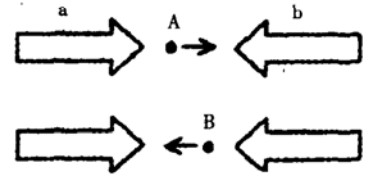


图3

的运动方向和激光束a的传播方向相同,所以它感受到激光束a的频率减小。根据多普勒效应,这个原子感受到的激光束a的频率降低,即激光束a的频率进一步远离了原子的共振吸收峰值的位置,原子从激光束a吸收光子的几率减小。这意味着原子A受到了向左推的作用力,阻止它往右运动,即原子A的速度减慢。同样,图中向左运动的原子B将受到激光束a的推力,阻止它向左运动,运动速度也减慢。那么,用上下、左右、前后三对六束这样的激光,就可以让朝各个方向运动的原子都减慢运动速度。由六束激光组成的阻尼机制就像某种粘稠的液体,原子陷入其中会不断降低速度。大家给这种机制起了一个绰号,叫“光学粘胶”。而物体的温度正是由物体分子平均动能的标志,所以这种方法能够达到制冷的目的。目前,用这个办法已经可以把原子冷却到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ K的数量级。

操纵和控制单个原子一直是物理学家追求的目标。通过激光制冷技术使人们的这一愿望得以实现,同时依靠这种新的手段,人们在分子原子物理学领域获得了一个又一个重大突破。通过冻结原子降低温度,1995年两名美国科学家康奈尔和维曼以及德国科学家克特勒分别在极为接近绝对零度的条件下首次通过实验证实了玻色-爱因斯坦凝聚(简称BEC),玻色-爱因斯坦凝聚是爱因斯坦在75年前所预言的一种特殊物质状态。这被物理学家认为是20世纪末物理学上最重要的成就。我国也于2002年由中科院院士王育竹领导的研究小组在铷原子云中实现了BEC。这项技术也可用于设计新型的原子钟,其精确度比现在最精确的原子钟(精确度达到了百万亿分之一)还要高百倍,可应用于太空航行和精确定位。另外以此为契机,人们还开始了原子干涉仪和原子激光的研究。原子干涉仪可以用于极其精确地测量引力,而原子激光将来可能用于生产非常小的电子器件。

(山东济宁职业技术学院教务科 272037)