

国外科学

GUOWAI KEXUE

第一集

科学技术文献出版社

目 录

重离子物理发展概况	(1)
低温研究概况	(8)
合成芳杂环聚合物的若干问题	(17)
稀土元素的分离提取及其应用	(42)
原子时尺度和高精度授时	(52)
昆虫激素研究进展	(74)
害虫的生物防治	(82)
生态学研究新领域——生态系统	(91)
土力学发展动向	(100)
海洋地质学基本理论问题	(113)

重离子物理发展概况

吴国华

(中国科学院兰州近代物理研究所)

重离子物理是核物理学的一个新的和重要的分支,近十几年来有了很大的发展。重离子是所有比氦核更重的原子核的总称。用加速器加速重离子来轰击原子核、原子、分子、固体晶格乃至生物细胞,从而研究它们的结构,认识它们的物理规律,这就是重离子物理的课题,重离子物理是一门综合性科学。五十年代起重离子物理就诞生了,各种新建的或改建的重离子加速器开始运转,几年前美苏英法等国可以加速的最重离子已达到Xe,72年苏联可加速的最重离子为W¹⁸⁴,美国为Ta¹⁸¹。最近报导西德新建成的全粒子直线加速器 UNILAC已经加速到U²³⁸,到目前为止,已经可以加速从质子到铀等2—3百种离子,能量高达每核子10兆电子伏。这就为重离子物理领域的研究工作提供了良好的条件。

重离子物理的研究主要分两个方面:基础研究和应用研究。基础研究包括发现新的核反应机制,研究原子核反应的新机制,合成新核素,寻找新能源。应用研究的范围很广,虽然才刚兴起,却已显示出它是一种很有前途的改造自然和造福人类的新工具。可以预计八十年代重离子物理的研究将进入新的高潮,它的发展可能使原子能科学技术发生又一次新飞跃。

一、核物理基础研究

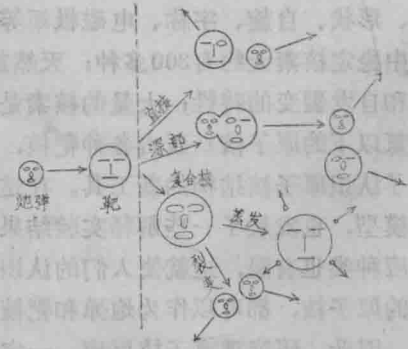
半个多世纪以来,人们对原子核已作了大量研究,测量了各种原子核的质量、电荷、大小、形状、自旋、宇称、电磁矩等物理量。到目前为止,人们已经发现了近2000种核素,其中稳定核素大约有300多种;天然放射性核素有几十种,人们已经研究了它们的 α 、 β 、 γ 衰变和自发裂变的特性;大量的核素是用人工方法合成的。从三十年代开始,用加速的轻离子(氦以下的原子核)轰击各种靶核,合成了许多自然界不存在的新核素。这些轻核反应也提供了认识原子核结构的新工具。在这些实验的基础上成功地建立了核结构的壳模型和集体运动模型,也发展了一些解释实验结果的核反应理论。但是这些轻离子的种类有限,能引起的反应种类也有限,这就使人们的认识受到局限。如果一切天然原子核,以及寿命足够长而可用的原子核,都可以作为炮弹和靶核的话,那么反应的类型和反应产物的种类将会大大增加,因此,研究重离子核反应,一定会揭示出不同于轻核反应的崭新的反应机制,将会合成更多的新核素,从而把人们对于核结构和核反应的认识提高到一个新水平。

1. 探索新的核反应机制

在两核碰撞过程中,炮弹和靶核之间存在着排斥的库仑力和离心力以及吸引的核力,这种排斥和吸引的对立统一支配着核碰撞过程。在轻核反应中,轻炮弹的电荷少质量小,带进反应中的角动量也小,在一般情况下,反应过程可以分为直接过程和复合核过程。当两核擦

边碰撞时,入射炮弹只和靶核表面少数几个核子发生作用,交换少数核子和能量,这类过程叫直接反应,光学模型和DWBA方法已能成功地描述它们。当碰撞的两核接触形成一个具有一定寿命的复合核,再通过蒸发中子、质子、 α 粒子和放射光子等退激发达到稳定的基态,也可以通过裂变方式退激而形成二个新核素,这就是复合核反应,可以用统计理论来描述。人们对于轻核系统的直接反应和复合核反应作了大量实验研究,理论处理也较成熟。从五十年代开始,人们改进加速器陆续加速碳、氮、氧等重离子,随后又加速了氖、氩,七十年代初加速氪、氙等重离子,最近已加速到铀。用这些重炮弹轰击各种靶核,人们观察到许多新现象,首先是观察到很大一部分相对运动的动能变成核内部激发能,例如 $\text{Ar} + \text{Th}$ 和 $\text{Kr} + \text{Bi}$ 反应,测量反应后产物的总动能与反应前相比,发现损失近一、二百兆电子伏,这种在轻核反应中所没有的巨大的能量损失是重离子反应中最先观察到的主要新特征之一。同时也观察到反应产物的质量分布、电荷分布,角分布都明显地具有“弛豫”的特征,即反映出系统由非平衡到达统计平衡这一过程的特征。这些特征既不同于直接反应的特征,也不同于复合核反应的特征,而是介乎二者之间的,是一种新的核反应机制所产生的。人们把这种反应过程叫做深部非弹性散射(也有人叫强阻尼碰撞,准裂变等)。近几年来,从实验到理论广泛地开展了这方面的研究工作。

重炮弹电荷多、质量大,带进反应中的角动量也大,当它与靶核接触时,虽然全被核力吸引暂时粘合在一起,形成一个象哑铃形的中间复合体,但在尚未融合成一个整体(复合核)之前,强大的排斥力又把它们撕裂开了。在粘合到分开的时间内(互作用时间,也叫中间复合体的寿命)两核相互作用,交换核子、能量、角动量等等,经历着从非平衡态向平衡态的过渡,在尚未到达平衡时两核就已分开,所以反应产物的能量、角动量、电荷、质量、角分布都反映出弛豫的特征,与互作用时间的长短有关,既非由反应的初始条件唯一地确定,也或多或少地保留有初始条件的特点。深部非弹性散射是指从直接反应(互作用时间 $\leq 10^{-21}$ 秒)到复合核反应(复合核寿命约为 $10^{-18} - 10^{-15}$ 秒)之间的整个中间过程,不同的产物是在不同的互作用时间内产生的,这就提供了研究不同弛豫阶段弛豫特征的可能性。前几年主要是研究能量耗散,电荷和质量分布,角分布等,作了大量的、系统的实验,理论上发展了经典动力学模型、扩散模型、半经典模型、哈福方法等来处理,但很不完善。目前的实验工作除了在上述几个方面更精细测量外,开始测量角动量的转移。通过多重性的测量来确定由相对运动转移到核内部自旋的角动量。最精细的探测技术是对每个事件进行多到30个参数的多参数测量。这是用位置灵敏电离室、平行板探测器和多丝正比室组合进行符合测量。实验已经指出上述这些物理量的弛豫并不是独立的,而是互相紧密联系的,必须进一步研究它们之间的关系,这类过程的微观性质仍然是不清楚的,弛豫的机制也要进一步研究。



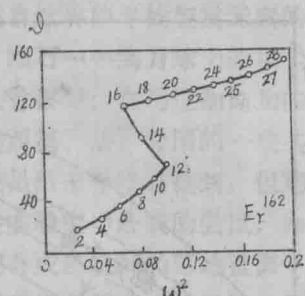
图一 反应机制

在反应机制的研究方面,除了引起很大兴趣的深部非弹性散射之外,也在进一步研究重核系统的弹性和准弹性碰撞。复合核反应,库仑裂变,以及关联核子转移等等。在重离子反应中,炮弹和靶核可以交换几十个核子。实验发现,有些核子集团,特别是 α 集团,转移几率很大,这些实验将有助于研究核的集团结构。

近两年来，已经把氦和铁等炮弹加速到每个核子1000兆电子伏的高能，此时炮弹的飞行速度接近光速，这些炮弹与靶核的相互作用必将出现新的现象，开创了所谓相对论重离子碰撞的新领域。美国正集中一批科学家在劳伦斯伯克利实验室的Bevatron上开展这方面的研究工作。

2. 原子核高激发态高角动量态的研究

重离子物理最引人入胜的方面是高角动量态核。我们知道通常的原子核都是处于一种能量最低的稳定状态，叫做基态。轻核反应只能使原子核处于低激发态和低角动量态。重离子引起的反应却能使核处于高激发和高角动量态。1972年从稀土区偶偶核转动能谱的实验数据中发现，在一定角动量值时能谱发生压缩，在核转动惯量 I 和转动角速度平方 ω^2 的图上就表现出回弯。(图二)当 I 小时， I 随 ω 的增加而慢慢增加，当 $I = 12$ 时出现 I 的突变，这



(图上的数值表示角动量 I 值)

图二

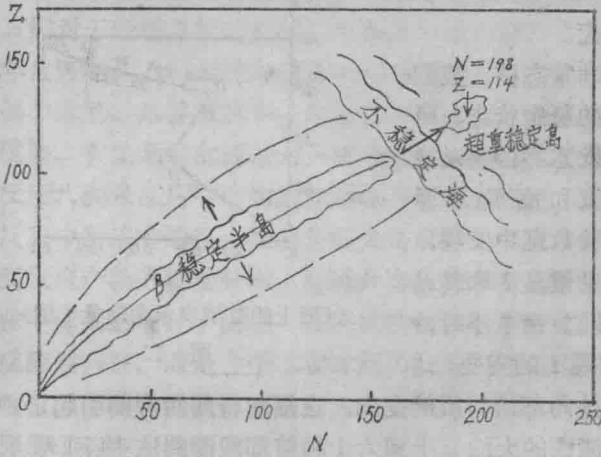
说明：原子核转动速度率量的增加引起了核内部结构质的变化。这幅新奇的回弯图引起了广泛的注意，到目前为止，对于稀土区和过渡区的大约五十到六十种核都观测到这种回弯现象，有的核，如 $\text{Er}^{158}\text{Te}^{122, 124, 126}$ 等甚至出现二个回弯。对于这些新的实验结果，理论上先后提出了几种可能的解释。早在1960年莫特逊 (Mottelson) 和凡拉丁 (Valatin) 就提出 CAP (柯来奥来力反对对力) 效应。原子核内的中子或质子都是成对的填充的，这样成对的核子结合得比较紧密，在偶偶核中中子和质子都是成对的，这时核的能量最低、转动惯量最小，一般叫做超流相，当核转动时，柯来奥来力就要破坏那些成对结合的核子，开始时使对关联减弱，最后导致所有对崩溃，这时核就从超流相变到正常相，发生相变。这时转动惯量就会发生突变。有趣的是这个 1960 年的预言在 1972 年就被实验上新发现的回弯图证实了。CAP 效应解释了一些实验结果，但并不完善。1972 年斯蒂芬斯 (Stephens) 和西蒙 (Simon) 提出了转动排列模型。原子核可以看成是由一个核心和外面的一对或几对核子组成的。当转动愈来愈快时，外面的一对核子拆对，并沿着排动轴方向排列，此时就发生转动能谱的突变，也可以解释一些实验结果，主要是稀土区的一些核，特别是偶偶核的回弯图。到 1974 年左右发现许多过渡区核也有回弯现象，而这些核的位能面具有二个以上的极小值，这就使人们提出形状相变的解释：核原来处于扁椭球形状，当原子核转动达到某一角动量时，可以突然变成长椭球。从扁椭球变成长椭球，转动惯量突然增加。这些理论描述各有优点与缺陷，目前还没有建立起一个统一的更能说明回弯现象本质的理论。

高自旋态核谱学是当前研究的重要课题之一，除了上述的研究之外，主要研究的内容还有：全融合反应的角动量极限，转晕线陷阱态的研究，测量高自旋态的磁矩，研究重的振动核和转动核的库仑激发等等。可供使用的离子愈来愈重，对高自旋态进行探测和鉴别技术的改进，这些都大大提高了在实验中能观察到的角动量范围。重离子反应可以使原子核具有高达 60 个甚至上百个单位的角动量。对于一个中等质量的原子核，这就相当于每秒钟可转 5×10^{20} 圈。在这样高速旋转之下，原子核内部结构将发生怎样的变化呢？核是否会散裂？某些核结构理论工作者曾预言：这样高速转动的原子核可以处于一种能量上相当稳定的状态，叫做“超晕态”。预言是否可靠，有待今后实验来验证。

3. 新核素的合成与寻找

众所周知，原子核是由中子与质子组成的。对于稳定的原子核来说中子数与质子数之比

是一定的。在钙以下的轻核中比值为1，核愈重，比值就大于1，对铀接近1.6。这是因为重核质子数多，库仑排斥力就增加，所以必须有更多的中子以增加核力使核保持稳定。在以中子数N为横轴，质子数Z为纵轴的图上（图三）有近300多个天然稳定核素处在一条线上，这条线就叫做 β 稳定线。在这条线附近的一些核素虽然也要 β 衰变，但寿命都比较长，这就形成一个 β 稳定半岛。



图三

这条线就叫做 β 稳定线。在这条线附近的一些核素虽然也要 β 衰变，但寿命都比较长，这就形成一个 β 稳定半岛。

几十年来人工合成的新核素已有上千种，已经揭示了许多新的特性，提供了许多新的用途，但这些核素多半还在稳定半岛附近。重离子物理提供了新的前景，可以一方面研究远离 β 稳定线的新核素，向半岛的上下二侧扩展。另方面向半岛的尖端方向发展，近几年来合成了从98号元素直到107号元素，并且预言了与半岛隔海遥遥相望的超重稳定岛。

远离 β 稳定线核素的研究可以大大地拓广我们对核结构性质的认识。最近新发展的一些实验装备和技术：在线质谱仪，速度选择器，氦气喷嘴法等，成为这类研究的有力工具。这方面研究的主要内容有：（1）远离稳定线的球形闭壳核，最近已经合成了 ${}_{50}\text{Sn}_{83}^{133}$ ，这是双幻核，实验已经证实它是球形核。但 ${}_{50}\text{Sn}_{100}^{150}$ ，却至今没有合成。这也是一个双幻核，但又是一个缺中子很多的核，在决定原子核的稳定性方面究竟这二种因素中那一种更主要？这方面的研究必将加深我们的认识，检验和发展核结构理论。（2）新形变区域的研究，早已发现有四个形变区，例如 $50 \leq Z \leq 82$ ， $82 \leq N \leq 126$ 范围的形变区内，四极形变大约为0.25—0.3，而在 $Z=82-114$ $N=82-126$ 的范围内可能存在另一个新的形变区，这个形变区中形变的大小应该也接近0.3左右。正在用重离子反应合成这个区域中的新核素并研究它们的性质。（3）形变闭壳的研究，早在60年代末单粒子能级的计算就指出当形变核的长短轴之比为整数之比时，会重新出现能级间并，出现形变壳，并且计算了形变时的幻数。实验上正在寻找这些形变闭壳核并研究它们的性质。（4）形状共存：1972年发现许多核的位能面都存在二个极小，出现形状共存，Os、Ir、Pt、Hg、Gd等同位素中都发现有形状共存现象，象 O^{16} ， Ca^{40} 这些基态为球形的核，当受激时也分别在四极形变为0.65和0.47处有第二个位能极小，可见位能第二极小出现在相当大的形变处，也许重离子反应可以提供达到如此大的形变。

和稳定半岛隔海遥遥相望的一个小岛就是六十年末曾经轰动一时的核物理学家预言的“超重稳定岛”。随着原子序数Z增加到90以上，库仑排斥力愈来愈大，而核力是具有饱和性和短程性的，即使增加更多的中子也难以维持排斥和吸引的平衡，原子核就变得愈来愈不稳定。钷 239 的半寿命近25000年镅 246 还有36小时，106号元素则不到1秒钟，依此类推，更重的元素似乎就难以合成了。但这只是事情的一方面，还有另一方面可以使核稳定的因素：双幻核，已有的核证明双幻核是特别稳定的，例如 O^{16} ， Ca^{40} ， Pb^{208} ，因此理论家们就期待 Pb^{208} 后面的一个新双幻核 ${}_{114}^{298}$ 应该也是特别稳定的。以它为中心，大约有近100个核的寿命可能用目前的实验技术探测出来，这些核组成超重稳定岛。理论工作者还预言了岛上

核素的性质，这些核素的半寿命最长的可达 10^9 年以上，它们裂变时比铀、钚等核燃料释放的能量更高，发射的平均中子数更多，宜于制造效率高、体积小、放射性沾污少的新能源。这样一来，国际上立即掀起了一股寻找超重核的热潮。由于预言有些核的半寿命长达 10^9 年以上，则在地球上应能找到它们，因此，在70年代初期掀起了在自然界中寻找超重元素的热潮。从天上到地下，从最古老的矿石、海底的锰瘤、宇宙射线、陨石……到月球上的灰尘等等，采用多种方法进行探测，迄今为止尚未找到。1976年美国人曾报导：在马达加斯加的一种黑云母矿石中发现了天然存在的超重元素，轰动了世界。但是西德、法、美国的一些其它实验室当即进行了类似的实验，却没有发现。在自然界中的寻找虽然至今没有找到，但想象力是丰富的，带动了实验技术的发展。与寻找同时积极开展了在实验室中合成的尝试，由于重离子核反应也许是合成超重核最有希望的途径，于是国外都把合成超重列为筹建重离子加速器的一个重要目的。十年来美、苏、法、西德等采用各种核反应进行了合成的实验，例如美国贝尔克莱实验室用直线加速器加速中子元素 Ca^{48} 轰击 Cm^{243} ；西德丹姆斯达德实验室用每个核子6.8—7.5兆电子伏铀轰击铀靶，在目前实验精度范围内（截面可测到 10^{-32} 厘米²，寿命可测到10毫微秒），没有探测到超重核。尽管如此，世界各国仍然在进行这方面的研究工作，试图寻找最好的核反应对（炮弹和靶核），最佳的轰击能量等。超重元素是否存在，能否合成，都是对现有核结构和核反应理论的严峻考验。

目前的重离子大多是低能的（每核子能量6—10兆电子伏），但高能重离子物理也引起人们的注意。1974年李政道等根据近年来实验和理论研究预言：可能存在一种和我们今天所知道的原子核大不相同的非常稳定的原子核，它包含的核子数很大，它的密度也大得多，结合能要大几十倍，因此一旦分裂，将释放出惊人的能量。李政道等预言用高能重离子碰撞可能形成这种“反常核”。美国已拥有世界上第一台高能重离子加速器“贝伐拉克”，计划把铀加速到每核子27亿电子伏，正准备作这类高能重离子碰撞实验。如果真能产生这种反常核，那将是核物理的又一重大飞跃。

二、重离子物理在其它科学技术领域中的应用

1. 受控热核反应中的重离子束引爆

为了解决能源问题，人们把希望寄托在受控热核反应上。受控热核反应是用电磁方法约束等离子体，然后设法把很大的能量在极短的时间内传给氘氚小球，使之发生内爆，从而达到热核反应所需要的密度和温度。主要的引爆方式有三种：激光、电子束、重离子束，它们各有其优缺点以及所要克服的困难。目前人们更加重视重离子束引爆方式，用重离子束引爆可以更容易把能量传给氘氚小球。但是，要把带电离子都集中在氘氚小球上比较困难，因为用于引爆的重离子束流很强，空间电荷的排斥力很大，有人提议采用高能低电荷态重离子束来克服这一困难。同时正在研究束流冷却技术，以便让更多的重离子都能在极短的时间内打在氘氚小球上。另一个方案是用高能重离子加速器把重离子加速并把它们装入储存环内，然后用很多脉冲磁铁将束流一段段引出，这些被引出的束流再沿半径方向分布的束流输运系统同时轰击位于中央的氘氚小球。期待在不久的将来即可实现受控热核反应，为人类提供能源。

2. 束箔光谱学

束箔光谱学是光谱学中一个新发展的分支。束是指离子束，箔是指薄膜，让高速离子通

过一层薄膜（一般常用厚约 $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜）离子与薄膜中的原子发生碰撞，因而激发或电离，通过薄膜后的离子束中含有不同程度激发或电离的离子，这些离子辐射光子而退激，测量这些光谱就可以了解各种电离状态下离子的物理化学性质。

束箔光谱学有它独特的优点：（1）可以研究多重电离离子的光谱。光谱学的其它方法很难产生多重电离离子，这是束箔光谱学独占的领域。（2）束流与薄膜的相互作用时间约为 10^{-14} 秒，离子或原子就在这个时间范围内受到激发，以此作为起点来测量原子的能级寿命，可以相当精确。原子能级寿命的精确数据，无论对于激光利用和等离子体诊断中选择合适的原子，还是确定天体中元素的丰度，都是必不可少的。（3）离子束通过分析器后才通过箔，所以离子的纯度很高，可以免除杂质谱线的干扰。（4）离子的种类可变，研究的元素范围可以非常广。离子的能量可变，不同能量的离子束通过箔后的电离或激发状态不同，便于选择实验所需要的状态。（5）束流与箔的相互作用时间很短，所以可以同时激发很多能级，在退激时发生相干，可以研究相干性空间取向排列。

自1964年美国巴士金提出以来，束箔光谱学发展很快，提供了很多数据。如果进一步探索测量几乎剥光的高 Z 值类氢离子的兰姆谱线，通过箔后束流的极化效应等等，必将获得更多新的知识。

3. 半导体技术

从60年代后期开始，离子注入技术作为飞速发展的半导体工业的一个得力助手登上了舞台。离子注入技术就是把重离子作为一种微量“杂质”注入到单质材料中，使其表面硬化，耐磨、防腐或金属化等。它能精密控制掺杂过程，具有大面积均匀，处理温度低等优点。目前，离子注入技术已普遍用于生产各种半导体材料和器件（包括集成电路），也已经开始用于光学玻璃形成光导结构等其它方面。

4. 星球光谱与星球结构的研究

在天体演化的过程中，例如某些星球（超新星）的爆炸过程中，要产生许多核反应，这些反应的产物大都是高电离态重离子。因此，测量宇宙射线中重离子的能谱，可以研究星球光谱，进而研究星球的内部结构，研究星体的演化进程以及产生能量的机制。

在天体的重离子能谱中，发现对各种不同的重离子在每个核子能量为几百兆电子伏能区附近，都有一峰值，其中铁离子的成份比较突出，它的生物效应也最值得重视。过去没有办法产生这种高能量高电离态的重离子，今后不久也许可以用新型高能重离子加速器获得，可以在实验室中模拟天体中的重离子反应，将星球物理的研究推进到一个新阶段。

5. 固体物理的新探针

重离子在固体内与晶体介质产生超精细相互作用，使激发核级联跃迁过程的角关联受到扰动，从而揭示出物质结构的许多微观特性。它和传统的穆斯包尔效应相比，虽然精密度差一些，但具有灵敏度高、不受低温限制、研究对象广泛（甚至可以研究液体、气体的结构）等显著优点。现在已采用这种“扰动角关联方法”来研究超导体的内磁场分布，分析抗铁磁性材料的微观结构，区分合金结构的细微差别等等。

离子进入晶体时，如果入射方向沿着晶格平面或行列（夹角小于某一临界角度）时，离子在进程中碰到晶格原子的几率就小，就好像从晶格的沟道里通过一样，显然能量损失会小些，射程要长些。这种现象叫沟道效应。利用它可以探查晶格缺陷，了解杂质的分布，测定晶体内部的电磁场，研究磁性材料中核自旋的极化值，确定最佳的掺杂条件等等。

与沟道效应相联系有阻塞效应，如果带电正离子就是从晶格原子处放射或散射出来的，

那么这些正离子在晶轴或晶面方向上将受到晶体点阵原子的阻碍，沿此方向测得的离子数就比其它方向大大减弱，这就叫阻塞效应。利用它可以测量复合核的寿命等。

6. 材料试验的新工具

反应堆的结构材料和覆盖材料经常受到强中子的辐照，时间长了材料性质就会恶化，甚至严重影响组件的寿命和反应堆的运行。选择耐辐照材料就成为一个重要问题。目前辐照损伤的机制尚不十分清楚，只得采用模拟实验来选择材料。通常用中子辐照来模拟，这不仅需要建造专门的材料试验反应堆，而且实验周期很长，几乎和反应堆本身的寿命相近。1969年国外首先提出可用重离子来模拟中子辐照损伤。重离子质量大、电荷多，使材料原子离开正常位置的能力要比快中子大好几千倍。因此实验周期就会缩短很多。

7. 重离子束治癌

放射医学的历史至今已有80多年了，最早用的是X射线，尔后用钴⁶⁰的 γ 射线，近十多年来采用快中子，疗效正在不断提高。要是采用重离子辐照，效果就可能会更好。它具有下述优点：（1）重离子杀伤缺氧癌细胞所需的最低剂量与杀伤有氧细胞的差不多，而X射线则是三倍，也就是说重离子对人体正常组织的伤害比X射线要小得多。（2）一定能量的重离子在人体内有一定的射程，而在射程的末端附近放出的能量要比起始端多好几倍，这就特别适用于治疗深部位肿瘤。可以根据肿瘤的部位来选择重离子能量，使辐照效果集中在癌组织上，对健康组织伤害较小。重离子束的这些优点是X射线、 γ 射线、快中子所比不上的，重离子束治癌将成为癌症病人的福音。

低温研究概况

韩 军 朱 贤

(七机部兰州510研究所)

一、引 言

低温技术研究开始于十九世纪末。

1877年液化了氧,得到了 -183°C 的低温,开始发展深冷技术。接着1883年液化了氮,1892年又液化了空气。到1898年詹姆斯·杜瓦采用减压液空予冷节流膨胀第一次得到了液氢。1908年奥纳斯液化了氦,得到 -269°C 的低温。从此所有的“永久性”气体都得到了液化。

二十世纪初期,应用了液化空气的技术发展了制氧工业,但是氢、氦温度仍属于实验室的范围。

1950年用绝热去磁法得到了 0.00114K 的低温,后来又用核去磁进一步达到 10^{-6}K ,从而使低温技术向超低温方向发展。近年来又制成 $\text{H}_2^3-\text{H}_2^4$ 稀释致冷机,可长时间保持在毫度 K 温区,给物理学研究开辟了一个新的、极为重要的领域。

二十世纪五十年代,由于空间科学技术、固体物理与固体材料、器件研究的迅速进展,国外液氢生产及氦液化逐步发展到工业规模,低温技术研究达到了突飞猛进、日新月异的阶段。

对超导、超流这类低温问题的研究,正在揭开物理学的一个新的方面。广泛的说,低温物理就是处于凝聚态的物质中能量量子化的物理学,由于热骚动的掩盖,常温下这些量子效应往往难于研究。

至于低温技术则是尖端科学、经济建设必不可少的基础工具。

因此,低温不仅是物理学的一个分支,同时又具有基础技术的特点,当前已发展成为物理和技术兼备的完整的学科体系。

二、低温与近代科学技术的关系

低温技术广泛的渗透到各个科学技术领域,互相促进以求新的发展,互相利用以解决新的课题,在一篇短文中是无法一一详述的,本文只能就以下几个主要方面作一简要介绍。

1. 与空间科学技术的关系

人类要想发展洲际导弹和进行宇宙航行,首先要有理想的火箭。液氢—液氧是优良的火箭推进剂,其比冲比煤油—液氧约高30%,且其生成物是水,无毒、不污染环境。美国1958

年10月正式宣布液氢作为火箭燃料,1963年人马星座首次成功。从1965年2月至1972年12月,美国向月球探索所发射的17个阿波罗宇宙飞船都是采用土星系(液氢——液氧发动机)运载火箭的。

七十年代美国空间科学的重点已转入航天飞机(或称空间渡船),就是用可多次使用的轨道飞行器将各种有效载荷送到宇宙空间并回收它们,其使用寿命可达10年,回收100次左右。国外近期设计的这种航天飞机的推进系统,要装200吨液氢、1200吨液氧。

为了提高液氢的密度和汽化潜热以缩小贮槽体积和减少贮存损失,同时克服因液氢在贮箱中的晃动而引起的飞行不稳定,也是通过低温过程将液氢制成氢浆、氢胶或氢浆凝胶来加以解决的。液氢还可以用于未来的核子火箭和等离子体火箭发动机作为工作流体,核子火箭发动机的比冲高达1000秒以上。

要使用液氢——液氧作为推进剂,需要研究和解决火箭低温材料苛刻的选材和评价、各种低温传感器、低温液体流态、液面及流量控制、绝热、输送、预冷、泵压等一系列低温技术问题。

广阔的宇宙空间是处于低温和真空之中,离地面90公里高空,温度就降到 -100°C ,外层空间是既冷又黑的黑体辐射,一般同步卫星的轨道温度低达4K,轨道远点真空度达 10^{-15} 托。这样低的温度和压强会引起电子器件、金属及非金属材料性能上奇异的变化。没有空间环境模拟研究工作,人类在地球上未作好进入宇宙空间的充分准备之前,宇航员是不能冒然离开哺育人类的这个摇篮的,在空间环境模拟研究中,低温技术身兼创造超高真空环境和冷环境二职。实践证明,低温泵抽气是环模工作的最好手段,它能获得极大的抽速(10^6 升/秒)它那既冷又黑的表面用来模拟太空环境所产生的热沉(Heat Sink),是非常接近的。

成功的进入宇宙空间之后,继之要求新的远距离通信系统。反导弹、反卫星系统以及侦察、通信、气象、资源等各种卫星都必须应用遥感技术,红外照象装置及地面低噪声接收设备。为降低红外本底噪声,提高系统的分辨率,展宽频带和加快响应速度,就得将红外装置置于深低温下工作。对于卫星通信,低温可以降低噪声,提高接收机的灵敏度,从而降低发射机的功率。这对于卫星和飞船的有限电源来说是极其有意义的。

有鉴于此,所以高度可靠、重量轻、启动快、运转稳定、寿命长的微型致冷机就受到国外很大的重视。微型致冷技术是航天技术和战略武器发展中提出来的,作为航天技术和战略武器所必须的冷源,应用前景十分广阔,研究工作非常活跃。

飞行器上所有的仪器设备,无一不需要能源,燃料电池是中期和短期飞行(尤其载人飞行)最理想的大功率能源。燃料电池的反应剂氢和氧,就是通过低温过程以液态装入氢氧容器的。其副产品是水,经处理后可作宇航员用水和温控介质使用。为了减轻飞行器的重量,宇航员生命维持气体,也是通过低温过程,超临界贮存而装入飞行器的。

航天技术是近代科学技术的集中,它总是尽可能地采用一切新技术来武装自己,对于先进的低温超导技术当然也不例外。飞行器在地球捕获辐射带和行星际空间飞行,会受到各种高能带电粒子的危害,例如使仪器的性能降低或失败,使太阳电池的功率衰退,使人体受到过量的辐照等等。采用超导磁体作为屏蔽,既能使空间飞行器,尤其载人系统免受高能辐射效应的损害,又能基本上解决常规的屏蔽方法引起的大重量问题。此外利用低温超导特性研制的超导陀螺仪,其精度也将远远超过普通陀螺仪。

2. 与物质结构研究的关系

低温技术对原子核物理的发展起了十分重要的作用,构成了一门称为超低温核物理学的

新分支。并借之首次从实验上证实了著名的宇称不守恒理论。同样它对于被誉为当前基础研究三大前沿之一的基本粒子物理学也起着很重要的作用。原子和原子核两个层次的突破,已经使工业和国防等部门发生了革命性的变化,对物质微观结构新的层次认识上的突破,必将对生产力的发展产生更深远的影响。因此基本粒子物理学现在是物理学中最基本也是最重要的领域。高能加速器及其附属的探测器是基本粒子研究必不可少的实验工具,而低温和超导技术则是这些实验工具得以完善的重要技术条件。其重要性已经到了高能加速器如不采用超导技术就无法进一步发展的程度。

国外目前已制成磁场能量几亿焦耳的超导磁体用于超高分辨率高能粒子探测器中,并正在研制超高能量(一万亿甚至十万亿电子伏特)加速器中用的超导脉冲磁体。一些先进的实验室也已经在加速器中采用了超导高频谐振器。

由于氢仅由一个质子和一个电子组成,极少产生干扰,因此,液氢气泡室是高能物理领域中一种主要的粒子探测器,它能高精度的探测在各方面发生相互作用的全部带电粒子,用照相机拍摄粒子所形成的轨迹,根据轨迹可算出带电粒子的质量和速度,从而确定是什么粒子。

在高能加速器中粒子所能达到的能量高低以及寿命长短,都和加速器内的真空度有密切关系。国外由于使加速器的真空度达到 10^{-12} 托,而获得了迄今能量最高的二万亿电子伏特高能粒子。为得到这种大容积的超高真空,没有大抽速的低温泵是难以想象的。

3. 与电子技术的关系

低温和电子学两个学科的相互渗透,已经形成了一个相当活跃的低温电子学领域,为电子学的进一步发展开辟了广阔的前景。低温电子学的特点,不仅在于任何电子器件随着温度的下降其噪声温度也都随之下降。因此可以制成冷参量放大等低噪声接收系统,用以满足卫星通信、飞船跟踪及射电天文学研究的需要,而且在于利用超导体的某些特性,特别是约瑟夫逊效应,创建全新的超精密低温电子器件。目前这一方面相当活跃,其中较主要的研究项目有超导存储器、超导红外辐射计、超导天线、超导参量放大器等等。在所有上述这些项目中超导器件的优越性都是巨大的。现已制成可探测 10^{-11} 高斯弱磁场的量子干涉仪,它把地磁测定、潜艇探测和极低频通信提高到了一个新的水平。

国外当前研制中的超导电子电路,其开关速度可达微微秒(10^{-12} 秒)数量级,而功耗仅为晶体管电路的万分之一,所以它将使信息处理器件引起大的改观,成为新一代计算机的理想器件。此外超导隧道器件的应用使电压基准的保存工作也有了重大改善。在微波接收技术方面,超导射频检测器、超导混频器、升频器、倍频器、分频器都正在研制中并已得出相当理想的阶段性成果。这些器件除了具有低噪声和多用途的优点外,还能在以往常规器件无能为力的毫米波、亚毫米波和远红外工作,填补所谓的“空白频段”。

4. 与电工技术的关系

电工技术与低温超导技术的关系更为密切。有人说过:“在原则上,一切电工器件乃至电机,都可以在超导的基础上“重新发明”,也就是都可以利用超导体的特性重新进行研究,由于近年来这方面进展很快,已经有人认为世界将正走向“超导电工”的时代。

超导磁体能产生极强的磁场、体积小、重量轻而且耗电极少,即使用液氮冷却,其消耗的电功率也比常规磁体小100倍之多。利用超导特性研制的电机与电器重量和体积成数十倍的减小。国外已建成的5000瓩超导交流发电机,功耗比普通电机减少2/3,体积缩小80%以上。据认为,超导磁体是建造单机容量高达500万瓩交流发电机唯一可能途径。

随着电力需要的增大和发电站的大型化,输电容量越来越大,为了克服随之而产生的大量输电损耗,发展了低损耗的地下低温电缆和无损耗的超导电缆。以地下超导电缆为例,其输电能力要比超高压架空电缆高出20倍以上,虽然每隔一段距离就需设置一个真空站和低温站,但当输电容量达到5000兆瓦时,超导输电就显得十分有利,输电容量越高,就比相同容量的架空输电便宜得越多,且大量节约占地面积。

另外,超导储能器的前景也十分广阔,这种储能器在超导持续电流状态下工作,因此能不消耗功率地长期储备供随时脉冲放电。近年来在激光装置中已经得到了应用,目前正在进一步研制可存储几千万度电力的超导储能器,用它作为脉冲电源可制成大功率激光装置,实现所谓死光武器,这种武器能以每秒30万公里的速度射向目标。

上述呈现超导电性的超导体,虽具有许多重大用途,但现有超导材料都必须在低温条件下工作。

5. 与交通运输的关系

低温技术与国民经济大动脉——交通运输也有不解之缘。车轮与轨道系统对于高速列车的发展有很大限制,为了高速大量运输,目前很多国家都在利用超导磁悬浮研究时速500—1000公里的高速列车。这种列车在底部安装了一组超导磁体,使向着轨道面产生强磁力线,在轨道面上设有铝制的闭路环,行驶时,列车磁体的磁通与环切割,从而产生大电流,该电流的磁场与列车磁体间的作用使列车悬浮起来,日本已经建成正式的实验线路,试验已获成功。

6. 与能源研究的关系

世界对于能源的需求量越来越大,科学界预计到2000年对能源的需要量将增加四倍,而地表易于开采的矿藏资源已所剩不多。因此,开发新的能源就具有极大的重要性,目前已开展了用液氢作为燃料的研究工作,氢是唯一无污染的燃料,而且来源丰富,国外主要研究用液氢代替石油作为汽车和飞机的燃料,也有人探索用作家庭民用燃料。

受控热核聚变能是解决人类长远能源的重要途径,单从海水里提取的聚变燃料(氘、氚)就足够人类100亿年之需。对此,低温和超导技术的重要性在于:

(1) 发生热核聚变反应必须要在在一亿度以上的高温之下,使等离子体的密度保持在高于 10^{14} 个粒子/厘米³和一秒钟以上的持续时间,为达此目的,要用到超大型的超导磁体。

(2) 低温分离法是大量提取氘的可能途径之一。

7. 与其他领域的关系

低温分离法制取的氧、氮等气体在钢铁工业、化肥工业中有很重要的应用,此外随着科学的发展,低温技术在生物学及医学中也有广泛应用而且发展甚快,限于本文篇幅,不再一一赘述。

三、低温研究概况

前面谈了低温和当代科学技术的密切关系,我们再来谈谈低温研究目前的进展状况和展望一下发展的趋势。

(一) 低温的获得

低温获得方面当前的进展状况是:

除空分装置早已实现了大型化之外,氢、氮的液化及制冷技术也基本上实现了大型化。

与大型制冷技术遥相呼应，微型制冷技术向着高度可靠、重量轻、耗功小、运转稳定、寿命长的方向发展很快。国外目前已研制出各种型号数十种。

毫K数量级的超低温技术已进入实用阶段。

兹分别简述如下：

1. 大型液化——致冷设备

在确定液氢作为火箭燃料之后，美国在1959年开始大规模生产液氢，1964年就建成了日产60吨的世界上最大的液氢厂，72年以后，由于阿波罗发射计划终止，使一批液氢厂停产，目前随着航天飞机和用液氢作燃料的高超音速运输机计划的开始，又在扩建新的液氢工厂，估计在1980年以后，液氢的总需要量约为8000吨/日。因此，今后的发展趋势主要是为了使液氢用于航空站而准备更大规模的生产液氢，从而要对液化效率与经济性有关的若干问题以及设备的自动化开展研究工作。具体说来，这些问题是原料氢来源、原料氢纯化、以及液化工艺条件的最佳化。诸如正—仲氢转化的最佳温度；采用氢透平膨胀机和透平压缩机并不断提高它们的效率；高效换热器的研制等等。预计今后对于一个日产2500吨的厂子，其液氢的成本约可降到0.18美元/公斤，而汽油为0.27美元/公斤。

在氢致冷技术方面，由美国低温技术公司和瑞士苏尔寿公司联合设计的一台大型氢致冷装置和一台最大的氢液化器于1977年建成。制冷机的制冷能力3.5K时900W。液化器的能力超过3000升/小时。随着超导应用研究规模的不断扩大，氢液化——制冷装置必将向更大型化发展。研究工作主要的是围绕着保证大型装置长期可靠的运行，并进一步提高效率，降低能耗而进行的。当前，大型氢液化致冷装置正朝着采用容量大，稳定性高，和运转周期长的透平膨胀机的方向发展，其转速一般为10万转/分—50万转/分。氢透平膨胀机的主要研究课题是气体轴承和提高膨胀比。由于透平膨胀机的长期运行可靠性很高。往复式压缩机就成为氢液化——致冷设备事故的重要原因。因此，也开展了新型旋转式压缩机的研制，旋转式压缩机的特点是可靠性高、容量大。因此，是今后的发展方向。

近几年来，虽然透平膨胀机的应用，发展极为迅速。并正在不断的应用于中小型装置，但在中小型氢液化致冷装置中，活塞式膨胀机的效率较透平高，所以仍被广泛应用，并在不断改进，主要的改进是围绕着提高活塞式膨胀机的连续运转可靠性而进行的。无阀膨胀机、单阀膨胀机，以及自由活塞式膨胀机等就是为此目的而发展起来的。

此外，改进节流级的制冷效率也是国外注意的一个方向。例如，现已采用以气液二相活塞式膨胀机代替节流致冷，提高了这一级的致冷量50%，或采用结构简单的引射器代替节流阀。

换热器的效率也是一个直接影响低温装置整个性能的重要因素，例如对一台120升/时的氢液化器，最后一级换热器的热端温差如果从0.5K增加到1K，所需的功率就要增加一倍。目前，高效紧凑的板式换热器已广泛用于小型氢液化器中，这种板式换热器的单位体积传热表面可高达6000米²/米³，相当于一一般换热器的5—6倍，但要使它在大型装置中广泛使用，还需要作许多工作，当前正在朝这个方向努力。

斯特林循环的菲力普致冷机的特点：压缩比低、近于恒温压缩，通道阻力低，制冷效率高。77K和20K的中型菲力普致冷机得到了很大成功，但其压缩、膨胀、换热各部份合成正体，设备复杂，可靠性降低。西德一台1.8K，300W致冷机就是采用了12台三空间菲力普，加节流压机组而成的，虽致冷效率较高，但每500小时就要4台菲力普机停车维修。

2. 微型制冷技术

随着宇航事业, 尖端武器, 军用红外技术以及低温电子学的日益发展, 对微型制冷技术提出了各方面的要求。世界各国尤其是美国, 集中了各种力量从事此项工作。目前已广泛应用于卫星、飞船、导弹、飞机以及地面侦察器等方面。它的应用使得红外探测器达到了很高的水平。可用以下几个例子来说明: 用于卫星可探测出水下40米深处潜行的潜艇, 可感知海水温度仅摄氏0.005度的变化, 可发现人群或车辆走后数小时留下的红外辐射痕迹, 可发现地面加有伪装的地下导弹发射井。用于反导系统可根据导弹与大气的摩擦发热或太阳照射导弹所放出的热量来跟踪目标, 并根据放热的不同情况来识别真假弹头, 以便对来袭目标有效拦截。

国外微型制冷机种类繁多, 按工作原理不同可分为闭合循环机械制冷、固体制冷、辐射制冷和半导体制冷等。下面仅就主要几种简介如下:

(1) 热泵式制冷机 (V—M 循环)

这种致冷机特点是振动小、寿命长、消耗功率小。可使用余热及其它能源驱动, 一般制冷量较小 (0.5~3 W 最多), 现制成的三级制冷 V—M 制冷机, 工作温度为 11.5 K, 33 K 和 75 K, 已运转 5000 小时。为了解决宇宙飞船的长期工作问题, 当前正研制用放射性同位素作为能源的 V—M 制冷机, 从而不需要使用飞船上的电源, 只消耗自身携带的放射性同位素, 其寿命可达 2~5 年, 这是发展的一种趋势。

(2) 斯特林制冷机

特点是功率消耗低, 重量和体积小, 工作温度范围宽。缺点是压机和制冷机联在一起, “冷指” 部分振动较大, 影响被冷器件的性能, 寿命也较短。目前正研制采用菱形驱动和滚动密封, 初步试验运转 11000 小时没有明显损坏, 准备用于航天器。

(3) G—M 制冷机

特点是构造简单, “冷指” 部分没有机械振动, 工作温度从 4—150 K, 冷量 1—125 W, 寿命达 10000 小时, 缺点是功耗大。因结构简单, 制冷部分重量轻、寿命长, 广泛用卫星地面站及工业和医学等部门。

(4) 逆布雷顿循环制冷机

单级气体循环可制冷到 30—50 K 左右, 制冷最低温度 19 K, 国外有作到三级制冷 5 K—3.5 W, 50 K—40 W, 150 K—200 W。这种制冷机重量轻 (单级 3 公斤左右), 功耗低, 曾在星船上作过试验。但由于对气体纯度很敏感, 运转可靠性受到限制。

(5) 辐射制冷

它是一种被动式制冷器, 不需要消耗外界能源, 因此应用于宇宙空间飞行器上冷却探测元件有一定的优越性。但它所能达到的温度不很低, 即使二级制冷也只能到 80 K。美国雨云 I、II、III 至 VI 号飞行器均采用了这种冷却器和固体制冷器作为红外辐射计的冷源。

微型制冷机的共同特点是结构简单, 由于采用了蓄冷器, 免除了低温阀门, 使得一个多级膨胀机的结构, 差不多和一个单级膨胀机一样简单, 但目前微型制冷机的效率还非常低, 其中漏热和蓄冷器冷损影响特别大, 虽效率不是微型制冷机的首要问题, 但国外近几年在解决重量、体积、寿命的同时, 广泛开展了制冷机的热平衡和冷损分析与实验研究工作。

3. 超低温技术的发展

由于低温物理研究的需要, 超低温技术得到了进一步的发展。目前称之为超低温的温度领域也在逐渐变低: 1950 年定为 4.2 K 以下, 1960 年改为 1 K 以下, 现在改到 0.3 K 以下了。

通常对液 He^4 减压可达到 1.3 K, 在专门设计的装置中减压液 He^4 也可达到 0.7 K, 对液

He^3 减压则可达0.3 K。过去虽然利用绝热去磁法能达到 10^{-3} K数量级的晶格温度和 10^{-6} K的核磁温度,但不能连续制冷,在一次绝热去磁之后,即使在严格绝热的情况下,只要几分钟就能从 10^{-3} K上升到 10^{-2} K以上,因此难于实用。近年来发展起来的 He^3 — He^4 稀释制冷机是一种连续运转的装置,因此可以获得 10^{-3} K的超低温并长期保持这一温度,从而使毫K数量级的超低温技术也进入了实用阶段。

(二) 低温绝热

随着低温技术的广泛应用和发展,低温绝热技术也在不断地发展和完善。目前性能最好的绝热方式是多层绝热和微球绝热,由于这两种绝热性能远比以往的粉末真空为好,因此又称为超绝热。

多层绝热量采用在真空夹层中设置多层高反射薄膜的方法,大大降低了辐射传热,其表观热导率高达 $1 \times 10^{-4} \text{ mw/cm} \cdot \text{K}$ 。是所有绝热方式中热导最低的一种,它广泛应用于液氢、液氮的各种贮槽和空间飞行器上的固体和辐射制冷器。在多层绝热的使用上似乎有如下两种趋势:一是广泛采用铝箔代替镀铝的塑料薄膜。可能是因为铝箔成本低,真空性能好,材料较厚,光学性能也略好的原因。此外,铝箔具有良好的热导率,与排气管连接可作为气体冷却屏。二是尽量减少多层的厚度。在真空的获得和保持方面近年来采用将活性炭或其它吸附剂粉末添加到用作多层间隔物的纤维玻璃纸中的方法,效果很好。

微球绝热是六十年代后期提出的,是一种玻璃空心微球,直径在 15μ 到 150μ ,球表面镀以高反射率的金属,与多层绝热相比具有各向同性、机械强度高、装填方便等优点。虽然理论上热导率比多层略高,但实际应用中可能优于多层绝热。

理想的低温贮存容器,除选用高效绝热材料外,还要注意绝热结构的设计,这方面也有不少进展,64年出现了气体冷却屏技术,用以回收蒸发气体中的显冷(热)。现在绝热要求高的容器,通常都采用多层绝热与气体冷却屏技术联合的方法。用液氮保护的容器正在逐渐被取代中。

低温绝热的进展使得大型的液氢、液氮贮运设备得以发展,目前世界上已有容积121立方米的液氮贮槽和3200立方米的液氢贮槽,并发展了槽车、槽船和航空贮运槽,其水平已到即使对于使用气体产品的场合,采用液态运输也比气态运输来得经济。

总的说来当然绝热性能愈高愈好,但所有高效低温绝热都以有真空夹层为前提。在某些场合,特别是火箭燃料箱中,目前大都采用聚氨脂泡沫作为绝热层,这样摆脱了真空不仅减轻了重量,而且较为安全可靠。因为对这样大表面的部件来说,万一真空发生渗漏就会发生危险。

(三) 低温超导技术

有人说在低温领域内,五十年代是研究液氢工艺的时代,六十年代似乎是发展液氮工艺的时代,而在七十年代可能已进入超导研究的时代。还有人估计超导技术在八十年代将有重大的工业应用。目前正处在重大进展的前夜。

目前超导磁场最高已达25万高斯,同时发展了扭转型精细多芯线等技术来解决超导磁体的稳定性问题。在等离子体实验,核磁共振等方面用的小型超导磁体(15万高斯),国外已有商品供应。

现已发现了近1000种超导材料,其中有好几种临界温度超过了20 K,最高的达到23.4 K。发展趋势是大力开展过渡族元素、合金、化合物的基础理论研究,探索高临界参量的超导体。

在大型超导装置很快发展的同时,小型的约瑟夫逊器件显示了在微波领域应用的广阔前景。发展动向是大力解决结的循环损伤,虽然约瑟夫逊器件的寿命在液氮温度下完全可能达到无穷大,但经受热循环时,由于金属层,氧化物绝缘层和衬底的热膨胀不同而使结易于损坏。据报道有人用合金结的方法来解决热循环稳定性问题,效果良好,这个问题正接近于解决。

(四) 低温计量和测试

在低温计量测试方面,近年来也有很大进展,主要表现在:

1. 各种低温温标的建立和完善,为国际实用温标(简写作 IPTS)向低温段的延伸创造了条件。

2. 低温技术中最实用的电阻温度计和热电偶温度计不断发展,出现了很多量程范围宽,复现性好,灵敏度高的新型低温温度计。

3. 出现了一些能满足特殊使用要求的低温温度计。

在温标方面,1968年国际权度局公布了1968年国际实用温标(IPTS-68),使得 IPTS 的下限由 90K 延伸到了 13.81K。目前,向更低温区延伸的工作正在积极进行中,已经建立起好几个 4.2—20K 或 2—20K 的临时温标,其中除了使用氦气体温度计外还有声学温度计(2—20K 美国国家标准局临时温标),磁温度计(0.9—18K 美国衣阿华州立大学顺磁温标)等,预计不久就可以将 IPTS 的下限进一步延伸,使得低于 13.81K 的低温计量有统一的标准。

在电阻温度计中,铂电阻温度计灵敏度高、线性好、性能稳定。因此在 IPTS-68 中被选作为 13.81K—630.74°C 的插补工具,国外已有商品生产,但这种温度计在 13K 以下灵敏度显著下降,故常常只用到 10K。与铂电阻相反,铈电阻温度计的灵敏度在很低温度下反而升高,而且复现性也极为满意(达 $\pm 0.001\text{K}$),可作为 1—100K 的精密测温元件。目前国际上在建立 20K 以下的热力学温标时,大都采用铈电阻温度计作为基准组。它很可能作为延伸 IPTS 到 4.2K 的插补工具。缺点是磁阻效应大,互换性也差,国外已有商品生产,有的且配有数字化仪表。另有一种铈铱电阻温度计,适用于 0.5—40K 间,精度可达 0.001K,也有希望作为延伸 IPTS-68 的插补工具。此外,还有碳电阻温度计(测温下限可达 0.01K),热敏电阻温度计(已生产出能用于液氮温区的热敏电阻),p-n 结二极管温度计(适用于 4—100K)等,特点是灵敏度都很高,但复现性较差。

低温热电偶温度计也有很大发展,现已有多种灵敏度高、稳定性好的低温热电偶,使用的温区也已延伸到 1K 左右。铜—康铜热偶仍是广泛使用的低温热偶,但它主要用在 77K 以上,这是因为它的灵敏度随温度下降而降低。另一方面,这种热偶的磁场效应较大,不适合用在磁场中。镍铬—康铜热偶在 40K 以上是当前所有低温热偶中灵敏度最高的一种,这两种热偶线的热导都很低,均匀性也较好,它可以用在从 20K 往上到 1000°C,且磁场效应很小。

金铁—镍铬热偶在 1—300K 间可保持 $10\mu\text{V/K}$ 以上的灵敏度(在 1K 以下是铜—康铜热偶的 30 倍),而且复现性好,是一种优越的低温热偶,它使低温热偶迈进了一大步,得到了广泛的应用。继金铁—镍铬之后,近年来又出现了铜铁—镍铬热偶。在 10K 以下,其灵敏度和金铁—镍铬一样高,而在 10—273K 间,其灵敏度远高于金铁—镍铬热偶,并且价格低廉,很有发展前途。另外,最近还出现了一种钼铍—金铁热偶。是以钼铍合金为基础,掺补上铈、与金铁合金制成的负极构成热偶,用来测量低温下 2—200K 宽范围温度,其性能超过所有已知热偶。

通常的低温温度计都有或大或小的磁阻效应或霍尔效应,使在磁场中测温困难,特别是