

19—20 世纪之交电磁学的发展和影响(II)

宋 佰 谦

(广西社会科学院数量经济研究所 南宁 530022)

3 X 射线的发现和上一世纪之交的 X 射线研究

我们在文章的上一部分已经讨论上一世纪之交电磁学的两个主要理论——洛伦兹电子论和爱因斯坦相对论电磁学的产生过程,现在让我们来研究一下世纪之交的重大电磁学实验发现及其对开启物质的深层次研究的影响.先让我们看看 X 射线的发现和 X 射线研究.

3.1 X 射线的发现

关于波粒二象性的争论在 19 世纪末已经开始,不过当时主要是针对阴极射线到底是带电粒子还是电磁波动.从 1859 年的普吕克(J. Plücker) 1869 年的希托夫(J. W. Hittorf)和 1879 年克鲁克斯(W. Crookes)的每一个十年,都有不少关于阴极射线可以被磁场偏转的报道.克鲁克斯已经十分肯定地认为阴极射线是负电粒子流.然而,赫兹一个实验却使物理学家特别是德国物理学家的注意力转移到了阴极射线“以太”波动论的一边,因为他在实验中没有看到阴极射线被电场偏转.而他在另一个实验中实际上接触到了 X 射线,但他竟不知是一种新射线,仍以为是阴极射线穿透金属层后产生的效应.这个实验是说:在一个用金属片将阴极区和阳极区隔开的管中,阴极射线发射时也能使阳极区产生辉光.勒纳(P. Lenard)在 1893 年更接近了这种射线,但他也没能意识到走到了伟大发现的边缘.他在实验中发现,他那个带有铝箔窗口的射线管在放电时,在管的窗口外 8cm 之内中出现了辉光,他认为是“硬阴极射线”穿透铝箔所致^[15].有意思的是,使勒纳始料不及的正是这个未被本人充分认识和利用的实验,倒反成了伦琴发现 X 射线和汤姆孙发现电子的重要线索.

从 1894 年起,伦琴(W. K. Roentgen)开始研究勒纳现象.他肯定勒纳的发现,但不同意勒纳的解释.经过将近两年反复实验,他在 1895 年圣诞期间发现了他命名为“X 射线”的新射线.他在实验中看

到:一个作了光屏蔽的放电管能使涂有氰亚铂酸钡的荧光屏闪烁.他立即意识到存在一种穿透力比阴极射线更强的射线.他又发现,这种射线能穿透 1000 页厚的书、几厘米厚的硬橡胶,以及装有水、二氧化碳等溶液的云母容器.他连接发表了 3 篇实验报告,分别介绍了实验过程和结果,讨论了 X 射线的性质及它使气体放电等问题^[16].他因发现 X 射线获得了 1901 年诺贝尔物理学奖.

伦琴的发现首先引起了医学界的重视.在其后几年对 X 射线投注力量最多的不是科学界,而是医学技术界.各种医用 X 射线管及靶极材料相继出现了,而关于 X 射线的物理性质的研究仍停留于伦琴的水平,甚至伦琴关于 X 射线是一种电磁纵波的认识也被带进了 20 世纪.

3.2 X 射线的早期研究和波粒二象性之争

1903 年,汤姆孙(J. J. Thomson)用电子论解释 X 射线散射,指出物质发射 X 射线的二级辐射是因为 X 射线是一种电磁波动,当它照射物体时会激发物体中的电子,使之振动,而电子振动又会产生新的 X 射线.他发现,在偏振 X 射线入射情况下,散射光强度正比于 $(1 + \cos^2 \phi)$, ϕ 是散射方向与入射方向的夹角.按照这一关系,在入射光方向上散射光最强,而且是前后对称的^[17].英国物理学家巴克拉(C. G. Barkla)根据可见光经两次反射形成偏振光这一经验,在 1906 年使 X 射线经过两块石墨散射后获得了偏振 X 射线,从而证明 X 射线属于横向波动,而不是伦琴所认为的纵向波动^[18].1908 年,他进一步发现, X 射线经石墨散射后处于偏振面上的散射光最强,且在入射的方向和其反向的散射光强度对入射光强度的比例,依据入射光的“硬度”不同而处于 1.45—1.85 之间,证明汤姆孙上述公式是基本正确的.巴克拉认为,他的这个实验构成了 X 射线属于电磁波动的强有力证据^[19].

在澳大利亚长期从事物理教学的英国物理学家布拉格(W. H. Bragg)对此提出不同看法,认为 X 射线和 γ 射线类似,是由 α 射线和 β 射线粒子组成

的中性“粒子对”，而不是光的波动。理由是（1）勒纳在1902年发现紫外线照射金属所发射的电子数目与光强有关，而电子速度与光强无关^[20]。这一发现曾经作为爱因斯坦提出光量子假说的重要依据。按照光量子理论，一个光量子一次激发一个电子，光强越大，意味着光量子越多，所以激发的电子就越多，但这并不会造成所激发的电子的速度越快，因为影响发射速度的是入射光的频率或“硬度”。布拉格通过 γ 射线实验发现，从金属发射出 β 射线粒子的速度仅与 γ 射线的“硬度”有关，而与强度无关，从而表明 γ 射线进而X射线是粒子。（2）如果X射线是波，那么在它传播过程中强度会逐步减弱，但布拉格没有发现这种现象。他在用X射线照射云雾室时反而看到气体离化呈现锯齿状轨迹。（3）如果X射线是光波，那么它二次散射的频率应当与入射线频率相等，然而依佛（A. S. Eve）早在1904年已经发现二级发射与原级光的“硬度”不同。（4）布拉格发现X射线和 γ 射线的散射强度不是前后相等的，表明散射不服从于汤姆孙的散射定律，从而证明X射线不是光的波动^[21, 22]。巴克拉则认为，既然X射线是粒子，那么为什么它还具有光的速度。这场波粒论争迫使巴克拉去寻找汤姆孙关于X射线散射前后对称的理论，与实验结果差异的原因，结果在1909年发现了特征X射线。他在这项研究中还区分了K和L两个系列单色X射线，并将它们与散射物质的元素对应起来。他因这项发现获得1917年诺贝尔物理学奖^[17]。

1908—1910年间，沃尔特（B. Walter）、波尔（B. Pohl）和科克（P. P. Kock）相继进行X射线狭缝干涉实验，虽然狭缝不够小（当时还不知道X射线的波长），但仍然看到了不太清晰的干涉条纹的散开。1912年，X射线波动论的重要支持者索末菲（A. Sommerfeld）理论测算得到X射线的波长为 10^{-9} cm数量级，表明用一般尺寸的光栅是很难观察到X射线的干涉和衍射的（这正是伦琴未能证明X射线具有这类性质，从而误以为X射线是电磁纵波的原因所在）。劳厄（M. von Laue）立即抓住这一重要数据，认为可以用晶体作为三维光栅来观测X射线的衍射。1912年，他在福里德里赫（Friedrich）和尼平（Knipping）协助下用硫化锌晶体作光栅进行实验，取得成功，由此开创了用X射线研究晶体及用标准晶体测定X射线波长的技术。他因这项实验获得1914年诺贝尔物理学奖。1913年，布拉格的儿子W. L. 布拉格将劳厄的三维光栅计算简化为二维，

得到布拉格公式： $n\lambda = 2d\sin\phi$ ， λ 是波长， ϕ 是入射线与晶面的夹角， d 是晶格常数^[23]。同年，W. H. 布拉格用X射线研究晶体结构时发现劳厄把硫化锌当作简单立方晶格晶体是不正确的，它实际上是面心立方晶格。布拉格父子还发明了分光计。他们因在X射线研究方面的成就而在1915年获得了诺贝尔物理学奖^[24]。

自从索末菲介入X射线研究后，X射线的波动论曾一度占有优势，但布拉格未曾放弃中性“粒子对”观点，并多次用书信与索末菲交换过意见。这场波—粒论争直到康普顿效应发现后才告一段落。

4 电子的发现和电子发现之后电子论的应用

早在1874年斯通尼（J. Stoney）估计一价电子的电量大约是 3×10^{-10} cgs 静电单位，他把它当作“电的自然单位”。1891年，他创造“电子”（electron）一词表示这个“电的自然单位”。然而，洛伦兹创立电子论时没有使用“电子”而使用“电粒子”，直到1899年后才逐步接受这个名词，在1904年出版及1915年再版的《电子论》一书中就全面使用了“电子”。据J. J. 汤姆孙的儿子G. 汤姆孙回忆，他的父亲J. J. 汤姆孙也是在很晚的时候才使用“电子”一词的^[25]。这说明要把电子与从化学知识中获得的“电的自然单位”联系起来，还有待于用电磁学方法从物质的深层次上积累新的知识。

4.1 电子的发现和电子测量

在19世纪末人们对电子的电量是否真的等于每个化学价所对应的电量，它是否具有惯性，它的质量是多少等问题还不甚了解。物理学家对电子的物理性质的认识，主要来源于三个方面：一是舒斯特（A. Schuster）在1890年用磁场偏转阴极射线测得电子荷质比是氢离子的500倍；二是克鲁克斯在1879年和法国人佩兰（J. Perrin）在1895年用电场和磁场偏转方法发现阴极射线是带负电的粒子流（在方法上汤姆孙更受惠于佩兰），而且克鲁克斯还发现负电粒子与阴极材料无关；三是塞曼在1896—1897年间研究磁场使钠光谱线分裂时，根据光谱线分裂的宽度计算得到电子的荷质比大约是氢离子的1000倍^[26]。克鲁克斯发现阴极射线负电粒子与发射它们的阴极材料无关这一事实，表明这种电粒子可能是一种所有物质共有的东西。可以说，这一暗示对于促进物理学家寻找电子发挥了重要作用。1897

年初,汤姆孙参照佩兰的做法,用磁场偏转和磁场与电场平衡偏转两种不同方法测量电子的荷质比,其中通过后一种方法测得质荷比(m/e)处于 1.1×10^{-7} 到 1.5×10^{-7} 电磁单位(emu)之间,也就是说,用化学测量的氢离子的质荷比是他测量的电子质荷比的666—909倍;电子速度达到光速的7.3%—12%^[27, 28]。同年10月,他提高测量精度,测得电子荷质比(e/m)是氢离子荷质比的1700倍(精确值应是1837倍)。现在一般以汤姆孙在1897年的实验标志电子的发现。但当时人们还不能从电子荷质比远大于氢离子荷质比的事实中判断到底是电子的质量小于氢离子质量还是电子电量大于氢离子电量。作为一位物理学家的汤姆孙,不会不懂得具有这样大的速度的电子如果又具有大于氢离子上千倍的质量的话会是什么样的情况。更何况他从勒纳1893年那个带有铝箔窗口射线管的实验记录中直觉感到电子可能是一种小于原子的“亚原子”。这个记录是说:铝窗外的辉光大约经过“半厘米”的路程,其强度就会减半。汤姆孙认为,如果把X射线撞击空气形成“电原子”当作一连串辉光的成因的话,那么这“半厘米”就应当与分子的平均自由程相当,然而根据分子物理学气体分子的平均自由程仅为 10^{-5} cm左右,显然窗口外的辉光不是由带电的原子产生,而是由比原子小得多的某种“亚原子”产生的。于是他要对电子进行绝对测量。

也就是在汤姆孙测量电子荷质比的同时,C. T. R. 威耳孙发明了“威耳孙云室”^[29]。云室的原理是:如果用紫外线或X射线照射装有清洁空气或气体的容器,容器内气体一经膨胀就会产生云雾。这是电粒子特别是负电粒子作为凝结核使气体凝结成雾的结果(电粒子的凝结核作用这一原理也是汤姆孙的发现,时间是1888年)。由于静电排斥作用,每个雾滴中基本上只能有一个电子,这对于测定单个电子特别有利。汤姆孙依据这一原理,用X射线照射云室使云室中气体成雾,对电子进行绝对测量,测得电子电量为 3.1×10^{-10} (cgs)静电单位(或 10^{-20} 电磁单位),质量为 6×10^{-28} g。1903年,他用镭辐射代替X射线,测得电子电量为 3.4×10^{-10} 静电单位(或 1.6×10^{-20} 电磁单位),质量为 9.115×10^{-28} g^[30]。汤姆孙测量结果比实际值约低1/3。但他毕竟在电子的绝对测量中迈出了重要一步。由于这个原因和他在研究气体导电方面的成就,他于1906年获得诺贝尔物理学奖,1908年被封为骑士。

汤姆孙在电磁学上的贡献,首先是发现了电子,

其次是他明确无误地指出电子具有质量,把电磁惯量引进了电磁场,为爱因斯坦改造麦克斯韦—洛伦兹电磁理论提供了实验依据。因此,爱因斯坦后来在1922年对他给予了高度评价,指出“把惯性引进电磁过程,至少在原则上意味着改变物理学的基础。”^[31]

后来美国物理学家密立根(R. A. Millikan)改进了云室实验,在1908和1909年先后测得电子电量为 4.65×10^{-10} 和 4.891×10^{-10} 静电单位。他认为,电子的测量与光速的测量一样重要;在所有物理常数中有两个是被普遍承认应当作为绝对重要的常数:一个是光速...;另一个就是最终的基本电荷,它的知识可以确定大量的其他重要的物理量^[32]。正因如此,密立根致力于不断推进电子测量技术,在1910年、1913年和1917年先后测得电子电量为 4.891×10^{-10} , $4.774(\pm 0.0009) \times 10^{-10}$ 和 $4.774(\pm 0.0005) \times 10^{-10}$ 静电单位。

4.2 电子发现后电子论对磁学和金属传导理论研究的影响

电子发现后,电子论在物理学中的应用范围日益扩大。这里谈谈20世纪初电子论在金属电导及热导和磁学研究方面的应用。

德鲁德(P. K. L. Drude)深受汤姆孙气体放电研究的影响,在20世纪头几年对金属电导和热导作了比较深入的研究。他认为金属中存在大量自由电子,正像理想气体那样。这种状况叫做“电子气”。不加外电场和磁场时,自由电子运动杂乱无章,不能形成电流。“电子气”平均自由程极短,动能极小,金属一般不会自发生热。根据他的推导,金属电导率 ϵ 与电子电量 e 的二次方、电子的密度及平均速率和平均自由程成正比,而与绝对温度 T 成反比;热导率 κ 则只与电子密度、平均速率和平均自由程成正比。他由此建立起金属热导率对电导率的比值关系^[33]:

$$\kappa/\epsilon = (4/3)(\alpha/e)^2 T,$$

式中 α 是金属的普通常数。这一关系说明,金属热导率对电导率的比值随温度而增加,但对于同一温度,所有金属的这个比值都是相同的。

在磁学方面,20世纪初的重要成果主要是朗之万等人对居里发现的抗磁性定律和顺磁性定律及铁磁现象的电子论解释。

磁学是一门从实验发现中发展起来的学科,在居里(P. Curie)以前人们已经知道存在抗磁、磁顺和铁磁三种磁性物质。1895年,居里在博士论文“物理在不同温度下的磁性”^[34, 35]中提出抗磁性定律和顺

磁性定律. 他为了研究物质磁性与温度的关系, 研制了一个后来被称为“居里磁秤”的实验设备. 他通过对水、岩盐、石英、硒、磷、锑等物质的观测, 发现除铋等少数物质外, 大多数抗磁体的磁化率与温度无关, 且与物体的物理状态无关. 这就是居里抗磁性定律. 他通过对氧、硫酸铁等顺磁物质观测发现, 顺磁体磁化率一般与绝对温度成反比, 即 $\chi = C/T$ (χ 为磁化率, C 是居里常数, T 为绝对温度). 这就是居里顺磁性定律. 他在研究铁磁性物质时又发现, 软铁在 750°C 以下时的磁化率随外磁场强度增大而增加, 但在更高的磁场下就趋于饱和; 一旦温度超过 750°C , 铁就失去了强磁性而变为顺磁性. 后来外斯 (P. Weiss) 在 1910 年把铁磁性向顺磁性转变的温度称为“居里点”, 现在称为“居里温度”.

1905 年, 法国物理学家朗之万 (P. Langevin) 发表了“磁性的电子理论”一文. 他运用电子论解释抗磁性, 指出在不受外磁场作用时, 抗磁体分子中的电子轨道相互抵消, 抗磁体不显现磁性; 一旦外加磁场分子轨道就发生位移, 如同塞曼效应中原子旋转轨道分裂那样, 其角动量出现一个拉莫尔进动 $eH/2mc$, 产生一个与外场方向相反的附加分子磁矩 $\Delta M = -e^2 r^2 H / (4mc^2)$. 求和得到抗磁化率为

$$\chi = M/H = -[Ne^2/(4mc^2)] \sum r^2,$$

式中 M 和 H 分别表示磁化强度和外加磁场强度, N 为阿伏伽德罗常数, e 和 m 分别是电子电量和质量, c 是光速, r 是投影到与磁场垂直的平面内的电子轨道平均半径. 这个式子说明抗磁体磁化率确实与温度无关, 且与所加外磁场大小无关, 与居里的实验定律相符. 至于抗磁体铋的磁化率为什么不遵守这一定律, 而与绝对温度接近似线性反比的规律变化, 朗之万的解释是铋金属中存在自由电子 (类似于德鲁德关于金属电导率与温度的反比关系). 朗之万还提出了两个重要思想: 一是抗磁性反映物质一种普遍属性, 是原子性质的表现, 它存在于一切物质中, 而不仅仅存在于抗磁体中; 之所以一些物质存在顺磁性, 是因为这些物质中的磁矩的叠加掩盖了抗磁性. 二是抗磁性和塞曼效应是抗磁体同一本质的两种不同表现^[35, 36].

朗之万在解释顺磁性时指出: 顺磁体中本来就存在磁性原子——“元磁矩”, 在未加外磁场时由于热力学平衡的原因, 物体内“元磁矩”相互抵消, 因此物质不显现磁性; 一旦外加磁场, “元磁矩”就会沿外场方向排列, 这时就显出磁性. 他根据电子论和统计力学推出感应磁矩等于 $n\mu L[\mu H/kT]$ (n 为单位体

积“元磁矩”数目, μ 是“元磁矩”, H 是外加磁场强度, T 为绝对温度, k 是玻尔兹曼常数, $L(\mu H/kT)$ 是 $(\mu H/kT)$ 的朗之万函数]. 在外场不太强和温度不太低时, $\mu H/kT \leq 1$, 朗之万函数等于 $\mu H/3kT$, 这时顺磁体磁化率为

$$\chi = M/H = n\mu H/3kT = C/T.$$

朗之万就这样用分子层次上的理论证明了居里顺磁性实验定律.

1907 年, 外斯提出“分子场”假说, 以此解释铁磁性, 并发展了朗之万顺磁性理论^[37]. 他认为, 在铁磁体中的分子都受到一种强的内磁场即“分子场”的作用, 分子场与磁化强度成正比, 在外加磁场时会取外磁场的方向, 结果铁磁体中每个原子轨道都受到外场与分子场叠加而成的作用场的作用. 不外加磁场时, 分子场也会使铁磁体产生磁化, 即自发磁化; 但温升至居里点后, 分子场和自发磁化就会自动消失, 铁磁性就转化为顺磁性. 根据他的理论, 铁磁性与顺磁性的区别就在于是否存在分子磁场、自发磁化及由自发磁化而形成的磁畴. 磁畴也是外斯最先提出的概念, 是指在铁磁体中由那些分子磁场取向一致的磁性分子组成的微观单胞. 在不外加磁场时, 磁畴的取向杂乱无章, 其磁性相互抵消; 一旦外加磁场, 磁畴就会在外场方向排列起来而显示出宏观磁性.

在处理高温下铁磁体的顺磁性与温度的关系时, 外斯提出如下关系:

$$\chi = C/(T - \theta_p),$$

式中 θ_p 为居里温度. 这个关系后来被称为居里-外斯定律.

1911 年, 外斯根据大量观察, 提出在所有物质中都存在一种磁矩的基本单元——“磁子” (magneton), 分子磁矩均可以表示为磁子的整数倍. 它后来被称为“外斯磁子”. 1920 年, 泡利 (W. Pauli) 将外斯磁子改称为“玻耳磁子”, 但后者大约是前者的 5 倍^[38].

随着磁学实验研究不断深化, 伴随着工业革命的迅速发展, 为适应技术应用的需要, 磁学在上一世纪之交已为一门高度交叉的学科, 它与力学、声学 and 热力学的结合, 成为那个时代的一个重要趋势. 1887 年发现的磁电横温差效应和磁电纵温差效应, 1895 年发现的磁致变声频效应或莫兰效应, 1897 年发现的旋磁致弹性效应或布拉克特效应, 1898 年发现的磁致流体双折射效应或佛克脱效应, 1907 年发现的磁致双折射效应或科顿-穆顿效应, 1915 年发现的

旋转磁化效应或巴尼特效应及磁致旋转效应或爱因斯坦-德·哈斯效应,以及1919年发现的磁化发声效应或巴克好森效应等等,这些发现不仅在当时和以后的工业实践中实现了重要的价值,而且也为磁学理论和实验研究的深化奠定了坚实的基础^[39]。

致谢 在本文撰写过程中,笔者得到中国科学院物理研究所李国栋教授的关心和指导,在此谨致深切谢意。

参 考 文 献

- [15] 宋佰谦. 自然杂志, 1995, 17(6):345 [Song Bai-Qian. Nature Journal, 1995, 17(6):345(in Chinese)]
- [16] 宋德生. 物理, 1995, 24(8):491 [Son De-Sheng. Wuli (Physics), 1995, 24(8):491(in Chinese)]
- [17] Stuewer R H. Brit. J. Hist. Sci. ,1971, 5(19):260
- [18] Barkla C G. Proc Roy. Soc. , 1906, 77:247
- [19] Barkla C G. Phil. Mag. , 1908, 15:288
- [20] Lenard P. Annalen der Physik , 1902, 8:149
- [21] Bragg W H. Phil. Mag. , 1907, 8:429; 1908, 9:288
- [22] Bragg W H. Nature , 1908, 77:271
- [23] Bragg W L. Proc. Camb. Phil. Soc. Mathe. Phy. Scis. , 1913, 17:428
- [24] Law J. Dict. Sci. Biogr. , New York :Charles Scribners ' and Sons ,1978, 15:61
- [25] Thomson G. Physics Today , 1967(5):55
- [26] Zeeman P. Phil. Mag. , 1897, 43:226
- [27] Thomson J J. Phil. Mag. , 1897, 44:293
- [28] 宋德生. 物理, 1987, 16(5):311 [SONG De-Sheng. Wuli (Physics), 1987, 16(5):311(in Chinese)]
- [29] Turner G. Dict. Sci. Biogr. , New York :Charles Scribners ' and Sons ,1978, 14:420
- [30] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁:广西人民出版社, 1987, 第1版, 第25章; 1996, 第2版, 第26章 [SONG De-Sheng, LI Guo-Dong. A History of Electromagnetism. Nanning:Guangxi People Publisher, 1987, the first edition, the 25th chapter; 1996, the second edition, the 26th chapter(in Chinese)]
- [31] 爱因斯坦著, 许良英, 范岱年译. 爱因斯坦文集. 北京:商务印书馆, 1977, 1:171 [Einstein A ed. XU Liang-Yin, Fan Dai-nian trans. The Collect Papers of Albert Einstein. Beijing: Businese Publisher, 1977. 1:171(in Chinese)]
- [32] Millikan R A. Phil. Mag. , 1910, 19:209
- [33] Goldberg S. Dict. Sci. Biogr. , New York (Charles Scribners ' and Sons , 1978, 4:190
- [34] Curie P. Ann. Chim. Phys. , 1895, 5:289
- [35] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁:广西人民出版社, 1987, 第1版, 第28章; 1996, 第2版, 第29章 [SONG De-Sheng, LI Guo-Dong. A History of Electromagnetism. Nanning:Guangxi People Publisher, 1987, the first edition, the 28th chapters; 1996 the second edition, the 29th chapter(in Chinese)]
- [36] Langevin P. Ann. Chim. Phys. , 1905, 5:70
- [37] Weiss P. Journ. de Phys. , 1905, 6:661
- [38] Whittaker E T. A History of the Aether and Electricity. London :Thomas Nelson and Sons , 1950, 2:241
- [39] 李国栋. 当代磁学. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1999, 第2章、第3章 [LI Guo-Dong. Modern Magnetism. Hefei: the Publisher of the University of Sciences and Technology of China, 1999, the 2, 3th chapters(in Chinese)]

封 面 说 明

这是一幅带有烷烃链的铜酞菁分子(CuPcOC_8)的高分辨STM图像(成像条件:偏压-648mV,隧道电流398pA)。酞菁分子在烷烃链的作用下,于高定向裂解石墨(HOPG)的表面形成稳定的高度有序的单分子层膜。图中可见酞菁分子结构的对称性特点,以及穿插于分子间的烷烃链的连接形式。借此研究了分子间的相互作用和氢键的结合机制等。同时,这一吸附层又可作为一分子模板。这种构筑纳米结构的方法,为分子器件设计提供了又一新的途径。

(中国科学院化学研究所 万立骏 王琛 白春礼)