

课程 · 教材 · 评价

“物质的聚集状态”的解读拓展与教学启示*

苑凌云^{1,2**} 岳文虹² 邓 阳¹

(1. 华中师范大学化学教育研究所 湖北武汉 430079; 2. 同煤一中 山西大同 037003)

摘要 物质的性质与物质的聚集状态密切相关,高中化学3种版本的新教材中均新增了与“物质的聚集状态”相关的反映学科发展新成就的内容,以完善学生知识体系。以不同的分类标准对“物质的聚集状态”进行全面解读与拓展,试图厘清教材中等离子体、液晶、准晶、离子液体、纳米材料、超分子等概念的内涵及联系,并在此基础上总结其对教学的启示,以期为中学教学提供参考。

关键词 新教材 物质的聚集状态 分类标准

DOI: 10.13884/j.1003-3807hxjy.2023010062

物质是由微粒聚集而成的,物质的性质、用途不仅与微粒的种类、排布方式和相互作用有关,还与物质的聚集状态有关。《普通高中化学课程标准(2017年版2020年修订)》中新增加了对“物质的聚集状态”的内容要求:“知道在一定条件下,物质的聚集状态随构成物质的微粒种类、微粒间相互作用、微粒聚集程度的不同而有所不同。知道物质的聚集状态会影响物质的性质,通过改变物质的聚集状态可能获得特殊的材料”^[1]。人民教育出版社、山东科学技术出版社、上海科学技术出版社出版的3版新教材选择性必修2中也随之新增了“物质的聚集状态”的相关内容,包括等离子体、液晶、准晶、离子液体、纳米材料、超分子等,不同程度地介绍了以上聚集状态的结构特征及性质、应用等方面的内容,以彰显学科发展新成就,拓展学生科技前沿视野。但由于各版本教材叙述详略不齐、视角各异,这部分内容又是新增且陌生的前沿科学知识,因此教师在处理时往往无从下手、照本宣科。为了帮助教师更好地理解以上概念的内涵及关联,充分挖掘教材知识背后的历史价值、理性价值、社会价值等,本文在对各版本教材进行优势整合的基础上,结合若干专业书籍和论文,以不同的分类标准对“物质的聚集状态”进行全面解读与拓展,试图厘清概念间的关系,加深教师对这部分内容的理解和认识,以应用于实际教学,进一步落实“宏观辨识与微观探析”的化学学科核心素养和“结构决定性质”的化学学科

基本思想。

1 以微粒的有序程度为标准划分物质的聚集状态

1.1 物质的“四种”聚集状态

物质是由原子、分子、离子等基本微粒构成的,这些微粒在一定温度、压强下聚集在一起所形成的相对稳定的状态叫作物质的聚集状态。通常情况下,人们习惯以组成物质的微粒的有序程度为标准将其划分为固、液、气三态^[2]。

1.1.1 固态

构成固体的微粒以一定的取向占据某个位置,微粒只在其平衡位置做微小的振动,呈现出一种高度有序的状态,见图1。固体微粒间的距离很小,相互作用力很大,因此,固体通常是坚硬且不易形变的。

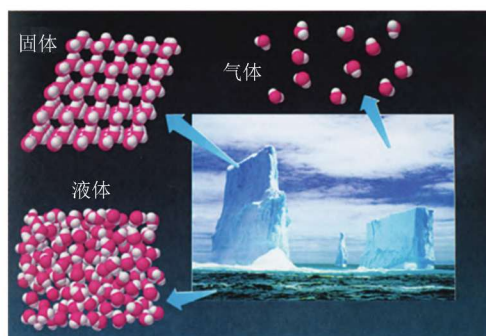


Fig. 1 Solid, liquid and gas states of water^[3]

图1 水的固、液、气三态^[3]

1.1.2 液态

液态时微粒的无序程度增加,此时粒子既没有

* 华中师范大学中央高校基本科研业务费项目(项目编号:CCNUTEH2021-04, CCNUTEI2022-05)

** 通信联系人, E-mail: ylydatong@163.com

确定的取向也没有固定的位置,以近乎无序的方式自由扩散。液态时微粒间的相互作用力比固态时要弱,但依然可以使微粒靠近在一起并维系一定的距离,见图 1。因此,液体通常有一定的体积但没有固定的形状,可以流动。

液态物质中,有一类比较特殊的液体——离子液体。“离子液体是指全部由离子构成、在室温或近于室温下呈现液态的物质,也被称为室温离子液体、室温熔融盐(熔点一般小于 100 °C)、有机离子液体等”^[4]。离子液体一般由有机阳离子和无机阴离子构成,阳离子通常为季铵离子、带烃基侧链的含氮环状有机胺正离子等,阴离子通常为 AlCl_4^- , PF_6^- , BF_4^- 等(如图 2 所示)。由于离子液体所含阴、阳离子体积很大但不匹配,很难在空间规则地堆积成晶体,因此离子之间的静电作用力较小,熔点很低。此外,像 NaCl 这类由无机离子构成的离子晶体,由于其阴、阳离子间的静电作用力较大,熔点较高,例如 NaCl 在 804 °C 以上才会呈现液态,被称为高温无机熔盐。

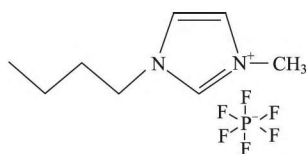


Fig. 2 1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate^[5]

图 2 1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐^[5]

离子液体因由有机阳离子和无机阴离子构成,因此具有独特的性质:(1)有良好的导电性,可作为燃料电池的电解质;(2)易溶解大量无机物质和有机物质,可以用作溶剂。而且相较传统有机溶剂,由于离子液体中阴、阳离子间的静电作用力较强,因此几乎不挥发,节能环保^[6]。

1.1.3 气态

气态时微粒的无序程度进一步增加,粒子间距离非常大,相互作用几乎可以忽略不计,见图 1。因此,气体没有固定的形状,自发地充满容器,易流动,易压缩。

气、液、固三态由于微粒间相互作用的差异,使得微粒以不同的有序程度进行排布,并表现出迥异的宏观特性。例如,人们习惯上将三态划分为凝聚态(固态和液态)和气态;有时又把气态和液态合称为流体,固态称为“非流体”。不同的分类方法派生出不同的理论系统,在物质三态的基础上,人们逐渐建立了“流体力学”“凝聚态物理”等研

究方向。其中,液态是发生化学反应的核心系统。正如浙江大学彭笑刚所言:“如果没有溶液(液态体系),化学将无法在科学世界里拥有一级学科的地位。”液态相较于固态而言,微粒间相互作用略弱,具有一定的灵活性和多样性,有较强的能力溶解更多的物质,提供发生化学反应的场所;液态相较气态而言,微粒间相互作用又强得多,能够给体系提供可以利用的能量(热能),还可以提供介质熵发生各种化学变化。因此,理解物质三态本质的关键在于厘清其微粒间的相互作用^[7]。

1.1.4 物质的第四态——等离子体

随着温度的升高,大多数物质会实现固态→液态→气态的转化,倘若温度继续升高至 10^4 K 甚至 10^5 K,此时构成物质的微粒运动已相当剧烈,以至于能够把束缚在原子中的电子撞击出来,成为自由电子;同时,原子失去电子变成带正电的离子。这样,物质就变成了一团由电子、带正电的离子和原子或分子等组成的混合物,无序程度进一步增加。研究表明,只要被电离的气体成分超过 0.1%,其中电子和离子之间的库仑力就会使其性质发生本质变化,这种全新的物质状态常被称为“物质的第四态”,它可以看作是一种特殊的气体。由于这种聚集状态中电子的负电荷总数和离子的正电荷总数在数值上是相等的,故称为“等离子体”^[8]。

除高温外,高压、外电场、紫外线、X 射线、 γ 射线等条件都可以使气体电离转变为等离子体。在宇宙中,大部分发光星球的内部及周围的温度和压强都极高,且在闪电、恒星辐射(X 射线、 γ 射线)等条件下,都会使气体发生电离,因此等离子体是茫茫无际的宇宙空间内最为普遍存在的物质聚集状态。只有在行星和分散的星际物质中才存在人们常见的固态、液态、气态的物质^[3]。

由于等离子体含有带电粒子,因此具有良好的导电性,可以用于制造等离子体光源(如霓虹灯)、等离子体显示等。它们的原理都是使特殊气体在通电的作用下发生电离,形成等离子体。在高压电场的作用下,电离产生的带电粒子被加速,与气体原子之间发生剧烈碰撞,一部分动能转化为光能,以光子的形式发射出来,从而达到发光或显示的目的。此外,被激发的粒子从激发态回到基态的过程中也会以光的形式释放能量^[3]。例如,霓虹灯是氖灯(neon light)的音译,氖气电离时会发出红色光,其他气体会发出其他颜色的光,见图 3。



Fig. 3 Plasma gas luminescence

图 3 等离子体的气体发光

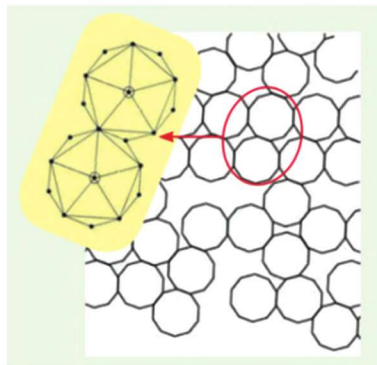
另外, 等离子体通常具有很高的温度, 具体而言, 典型等离子弧的温度可以达到 $10\,000\sim 20\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且喷速可接近声速^[8]。因此, 等离子体可用于铭刻电脑芯片表面传递信息的沟槽, 等离子束可用于切割金属或代替手术刀进行外科手术。等离子体的高温特性还可以促使发生某些化学反应, 例如, 等离子体特种垃圾焚烧炉可以使有毒物质在高温下快速裂解, 转化为可燃性气体, 再经过二次燃烧就可以无害化处理^[3]。

1.2 物质的 2 种过渡聚集状态——准晶和液晶

物质世界的发展与变化是有规律的, 任何事物都是质和量的统一体, 而度即是事物保持自己质的限度和范围。在度的范围内, 物质的质不发生变化。例如, 在常压下, 水维持液态的 2 个度即 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 突破这 2 个度, 液态水就失去了其液态的质, 转变为固态的冰和气态的水蒸气了。通常而言, 量变有 2 种形式, 一种是数量的增减, 一种是构成事物的各个成分在空间排列秩序上的变化^[9], 相变主要是第二种量的积累引起的质变。通常, 人们为了研究的简便将物质世界抽象为纯粹的极端情况, 实际上, 很多物质处于这些极端情况中的过渡状态, 质与量的辩证统一观点要求人们以动态、连续的眼光看待物质的发展变化过程, 厘清事物度的界限, 准确把握事物量与质的本质关联。准晶即为晶态和非晶态的过渡状态, 液晶则为晶态和液态的过渡状态。

1.2.1 准晶

按照固体中微粒排列的有序程度可以将固体分为晶体和非晶体。晶体中, 构成物质的微粒呈周期性有序排列, 具有平移周期性; 非晶体中, 构成物质的微粒无序排列。1982 年, 以色列科学家谢赫特曼 (D. Shechtman) 用电子显微镜测定自己合成的铝锰合金时, 发现其具有正二十面体的对称结构, 投影于平面为正十边形 (如图 4 所示), 是以一种不重复、非周期性的方式排列。这种排布具有

Fig. 4 Icosahedral structure and two-dimensional arrangement of aluminum manganese alloy^[3]图 4 铝锰合金的正二十面体结构及其二维排列方式^[3]

明显的规律性, 却又具有晶体所不允许的宏观对称性 (如图 5 所示), 与当时人们对晶体的认识完全不同, 因此引起了科学界的普遍质疑。和谢赫特曼处于同时期的英国数学家彭罗斯基于数学的观点, 提出了用非周期性的图案铺满整个平面的构思, 确证了其确实并不属于晶体, 而是一种新型材料。人们将这种有序程度介于晶体和非晶体之间的新的聚集状态称为“准晶”, 亦称为“准晶体”或“拟晶”。彭罗斯因此于 1988 年获得数学界最高奖项之一“沃尔夫奖”, 谢赫特曼也因其突破性的发现获得了 2011 年诺贝尔化学奖^[3,6], 体现出不同学科的国际间跨领域合作对推动科学进步的重要意义。

现在, 各类准晶因其优异的性能被开发为多种有用的材料。例如, 由于准晶具有硬度高、耐磨损、表面不粘等特性, 可用于制作煎锅表面涂层等。

此外, 准晶在许多领域的研究中所呈现的准晶图样还具有很高的艺术欣赏价值, 见图 5、6^[10]。

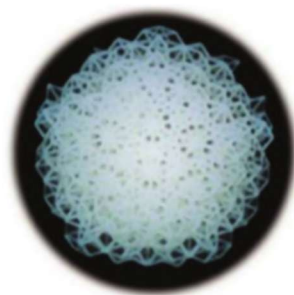


Fig. 5 Structure of quasicrystalline polymer

图 5 准晶聚合物结构

不仅如此, 现实生活中, 西班牙的阿尔罕布拉宫 (Alhambra Palace) 和伊朗 Darb-iImam 清真寺里的非周期性镶嵌图样 (如图 7 所示) 均体现了准晶与建筑艺术的跨界融合之美。

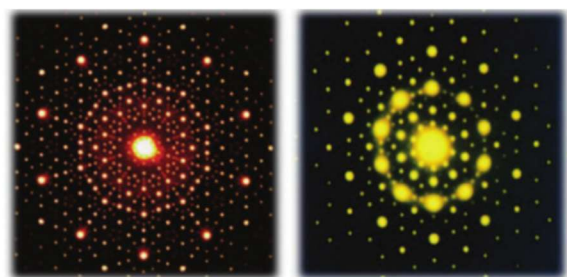


Fig. 6 Quasicrystal diffraction pattern

图 6 准晶衍射图样



Fig. 7 Quasicrystal pattern in architecture

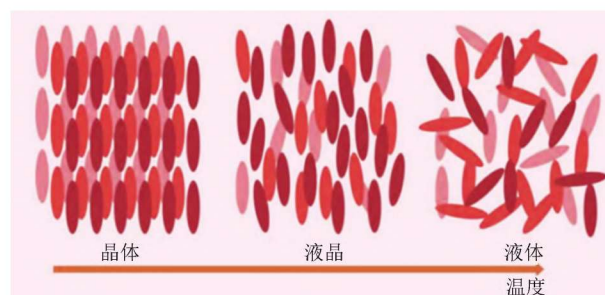
图 7 建筑中的准晶图样

1.2.2 液晶

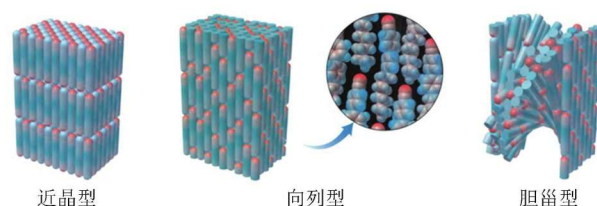
1888 年,奥地利植物学家莱尼茨尔 (F. Reinitzer) 在加热苯甲酸胆固醇酯时发现,当温度升高至 145.5 °C 时,固体会熔化为浑浊黏稠的液体,继续加热至 178.5 °C,液体开始澄清透明。当时,莱尼茨尔并不能解释这一现象,他把样品与观察记录寄给德国物理学家莱曼 (O. Lehmann),莱曼利用自制的偏光显微镜对上述浑浊态的样品进行观察,发现其不同方向上对光的折射率不同,具有晶体由于各向异性导致的特有的双折射性,但从外观上看它又具有液体的流动性,他将这种介于晶态和液态之间的过渡状态称为“液晶”^[11]。莱曼是利用偏光显微镜进行研究的第一位物理学家,这一重要的技术进步显著地影响了科学的进程,使得莱曼成为液晶领域中最重要贡献者之一。同时,液晶的发现又是一次国际性多学科合作的成功尝试。

那么,液晶的微观结构是怎样的呢?前文提到,固体分子以一定的取向占据确定的位置,这种特性可以称为“位置有序性”和“取向有序性”。对于某些固体,在加热时这 2 种有序性会同时完全丧失,分子可以随意地移动和转动,转变为各向同性的液体。但如果构成固体的分子呈现出明显取向的棒状或盘状,升温时会有 2 种途径变为液体:一

种是分子的取向有序性先遭到破坏,此时微粒间的距离仍然比较紧密,因此物质外观仍以固态存在,称为“塑晶”,塑晶到更高温度时才会失去位置有序性转变为液体;还有一种途径是物质保持取向有序性,先失去位置有序性,由于微粒间距离变大且可以随意移动(图 8),这种外观具有液态的可流动性、物理性质却表现为晶体各向异性的状态即为“液晶”^[12]。

Fig. 8 Molecular arrangement of liquid crystal materials^[4]图 8 液晶材料分子排列示意图^[4]

上述这种通过温度改变出现的液晶称为“热致液晶”,通常为单一成分的纯化合物或均匀混合物。由于液晶分子中的取向有序性可以表现为不同的程度和方式,所以液晶又可以进一步分为近晶型液晶、向列型液晶和胆甾型液晶(如图 9 所示)等。可以看出,近晶型液晶的排列与晶体极为接近,分子间有较大作用力,不易受到外界电磁场等的干扰。向列型和胆甾型液晶排布有序性明显下降,极易受电磁场和机械力等的作用改变排列方式,其中由于胆甾型液晶呈现出逐层扭转螺旋形结构,因此还具有极强的旋光性等光学性质。

Fig. 9 Internal molecule arrangements of three liquid crystals^[3]图 9 3 种液晶内部分子的排列状况^[3]

热致液晶最重要的用途是制造液晶显示器,液晶的显示功能与液晶材料内部分子的排列方式密切相关。液晶显示器的材料通常选用向列型液晶和胆甾型液晶的混合物,没有外加电场时液晶分子呈逐层扭转的螺旋形排列,施加电场后分子沿电场方向排列(如图 10 所示),排列方式的差异导致材料的旋光性能发生变化,从而达到控制显示的目的^[3]。

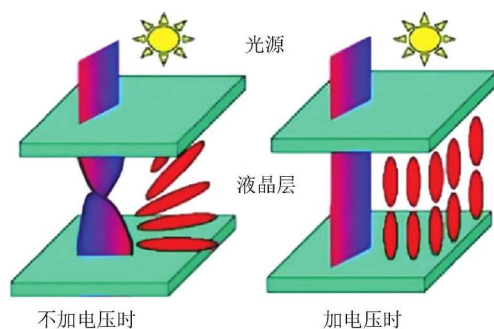


Fig. 10 Schematic diagram of LCD display principle

图 10 液晶显示原理示意图

除了热致液晶外, 还有溶致液晶。“溶致液晶是两种或两种以上组分形成的液晶, 其中一种是水或其他极性溶剂, 在一定浓度溶液中出现的液晶相”^[11]。溶致液晶的溶质通常是双亲性分子, 即一端为亲水极性基团, 一端为疏水非极性基团。当双

亲性分子溶于水时, 其亲水端倾向于与水接触, 疏水端倾向于靠拢在一起, 形成常见的球状、棒状或层状的胶束 (图 11)。当双亲性物质的浓度增大到一定程度时, 水溶液中棒状或层状胶束的比例增加 (类似于棒状或盘状的分子), 这些胶束在一定条件下保持取向有序性排列, 此时即为液晶。比如, 有时聚集在肥皂盒底部的黏稠物就是一种由肥皂双亲性分子和水混合形成的溶致液晶相。此外, 溶致液晶还广泛存在于生命系统中, 生物膜即为天然的溶致液晶结构。生命科学认为, 倘若没有生物膜流动性和有序性的结合 (液晶的典型特征), 就无法在细胞表面进行有效的物质和信息传递, 那么生命过程中的新陈代谢、消化吸收、知觉反应等生命现象也就不复存在。现在, 溶致液晶被广泛应用于生物工程、医疗卫生等生命研究领域。

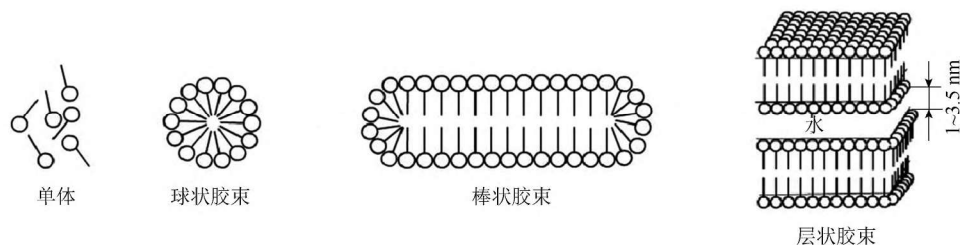


Fig. 11 Micelles with different shapes

图 11 不同形状的胶束

2 以微粒的尺度为标准划分物质的聚集状态——纳米材料

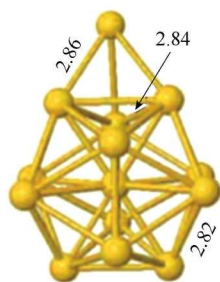
人类对客观世界的探索, 起始于宏观物质, 溯源于微观粒子。随着科技的发展和人类认识的进步, 人们逐渐意识到在宏观领域和微观领域之间, 还存在许多既不同于宏观物质, 也不同于微观粒子的现象, 即物质微粒聚集的尺度也会对物质的性质产生巨大影响, 习惯上称这一领域为“介观领域”, 纳米材料即是介观领域研究的对象之一。纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺寸或由它们作为基本单元构成的材料^[13], 它包含原子团簇、纳米微粒、纳米管 (如: 碳纳米管)、纳米薄膜 (如: 石墨烯)、纳米碳球 (如: 富勒烯)、纳米固体等^[14]。由于纳米材料尺寸极小、表面积极大, 使得表面能急剧增加, 位于表面的粒子性质非常活泼。例如, 原子团簇、纳米微粒等纳米材料由于其热力学不稳定性, 往往需要对表面进行修饰, 才能较稳定地存在于环境中。

2.1 原子团簇

通常把含有几个到几百个原子、离子或分子通

过化学或物理结合力组合在一起的聚集体称作“簇”, 其尺度小于 1 nm。原子团簇的性质取决于其所包含的原子数, 仅仅通过调节团簇的大小, 物质的特性就有极大的不同^[15]。例如在合成氨反应中, 10 个铁原子的团簇比 17 个铁原子的团簇催化效能高出 1 000 倍。因此, 原子团簇的性质既不同于单个原子, 也不同于宏观物质, 可以把它看成是介于原子与宏观物质之间的过渡状态, 或者说, 是物质凝聚的初始状态。

2005 年, 卡斯尔曼 (A. Castleman) 和坎纳 (Khanna) 研究团队在 *Science* 上合作报道了由 13 个 Al 原子构成的 Al_{13} 簇具有与氯原子相似的电负性, 首次以实验的形式证实了某些特定尺寸的原子簇可以模拟元素周期表中单个原子性质的理论^[16]。次年, 他们又相继在 *Science* 上报道了氧气氛围中的 Al_{13} 簇具有类似稀有气体的化学惰性, Al_{14} 簇 (如图 12 所示) 具有与碱土金属相似的性质^[17]。这种金属原子簇与某些原子性质间的对映关系, 也被称为第三维周期律。具有与某种原子相似性质的金属簇, 亦被称为该原子的超原子, 如上述提到的

Fig. 12 Microstructure of cluster Al_{14} 图 12 原子簇 Al_{14} 的微观结构

Al_{13} 可以被称为卤素超原子或超卤素。另外, 研究表明, WC 、 ZrO 原子团簇与贵金属原子 Pt 、 Pd 具有相似的性质, 可作为相关重要化工产品的廉价替代物, 降低生产成本^[3]。超原子概念的提出, 拓展了当前元素周期表的界限, 为原子团簇代替原子作为结构单元合成新物质提供了思路。

2.2 纳米微粒

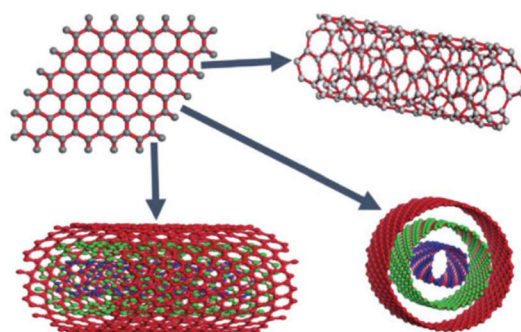
纳米微粒的尺寸处于 $1\sim 100\text{ nm}$, 原子数目大约为 $10^3\sim 10^5$ 个, 大于原子团簇, 小于通常微粒^[18]。常见的纳米微粒有陶瓷颗粒、金属颗粒等, 它们与传统宏观尺度的材料具有明显不同的特性。例如, 宏观尺度的金的熔点为 $1\,064\text{ }^\circ\text{C}$, 颜色为“金色”; 2 nm 尺寸的金颗粒的熔点仅为 $327\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 将其分散在水或其他溶剂中可以得到红色、粉色、蓝色等不同颜色的金的胶体^[3]。此外, 纳米金颗粒还具有独特的化学性质。例如, 胶体金对蛋白质有很强的吸附功能, 且不破坏其生物活性, 常用于快速免疫检测等, 此前抗原检测新冠病毒的方法即是利用胶体金和新冠病毒抗体的结合物作为关键性标记物来完成检测的。

2.3 纳米管

纳米管的代表物即碳纳米管。碳纳米管是一种由石墨烯围绕中心轴按照一定螺旋角卷曲而成的无缝、中空纳米纤维材料, 它可以是单壁碳纳米管, 也可以是数层到数十层的同轴圆管形成的多壁碳纳米管 (如图 13 所示)。碳纳米管具有纤维长、韧性高、强度大、质量轻、易导电等优点, 有“超级纤维”的称号^[3], 未来有望应用于超细高强度纤维、超导线材、大规模集成电路等领域^[14]。

3 以微粒的种类及相互作用为标准划分物质的聚集状态——超分子

化学是在原子和分子水平上研究物质及其相互转化的学科, 达芬奇曾言: “在大自然创造的物种基础上, 用自然之物与自然之和諧, 人类将创造无

Fig. 13 Carbon nanotube rolled from graphene^[3]图 13 石墨烯卷出的碳纳米管^[3]

限的物种。”过去, 化学家合成新物质的思路主要是通过精确的模式打开或组成原子间的共价键, 以合成全新的、按照人类意志排列组合的分子。随着科学技术的发展, 人们慢慢发现, 客观世界中面对的通常是多个分子构成的聚集态, “从某种意义上来说, 分子结构只是间接影响物质的性能, 而聚集态才是直接影响其性能的因素”^[11]。分子通过非共价键的相互作用聚集在一起而形成的复杂有序且具有特定功能的分子集合体系即为“超分子”。其中, 超分子定义中的“分子”是广义的, 包括离子; 非共价键相互作用主要指范德华力、疏水作用、氢键以及分子与金属离子形成的弱配位键等。其中, 分子与金属离子形成的弱配位键属于离子-偶极相互作用。例如, 人教版教材中冠醚识别碱金属离子, 就是冠醚中氧原子的孤电子对被碱金属离子的正电荷吸引, 通过氧原子与阳离子的静电作用形成的超分子。需要说明的是, 分子间非共价键的相互作用是普遍存在的, 但通常情况下这种作用力较小, 且不具有选择性, 因此无法形成具有特殊功能的超分子^[4]。

超分子科学通过寓于分子中的特征基团和结构以实现分子间的识别和自组装, 从而表达出人类所期待的功能。超分子体系类似于一个分子社会, 社会中各个分子成员之间的键合、作用、反应等联系即为非共价键的相互作用, 这个高度有序的自组装体系通力完成了许多重要过程, 比如高选择性的识别、传递和调控等等。类似于计算机程序设计, 人类的工作在于通过传统的化学合成将信息 (即能产生分子间相互作用的特征基团) 存贮于分子结构中, 这时分子就能够按照人类预先设定的程序 (即基团之间的相互识别和自组装) 进行分子间的加和与定向组合, 最终形成各种各样的超分子体系。

在设计超分子体系时, 人类往往可以从生命科学中的许多超分子实例中汲取灵感。例如, 生物体

中 DNA 的双螺旋结构是由 DNA 中的 2 条分子链在氢键作用的基础上组装而成的超分子；细胞膜中的磷脂双分子层是通过疏水端相互作用形成的双层膜超分子。生物大分子之间的识别与自组装过程构建了复杂有序的生命系统，承担着人体所必需的生命活动，因此，生命是自组装过程的最高体现。化学家对超分子自组装体系的介入，实现了人类对物质及其变化的认识从必然王国走向自由王国的历史性变革。

对超分子的研究改变了传统制造业的研究思路。过去，人类按照“自上而下”的思路设计物质，卓有成效地从大块物质出发制造出越来越微型化的器件。但是，传统加工技术限制了“微型化”的继续发展。据此，化学家们为制造业提供了一种截然相反的思路，即从分子水平出发构造各种分子器件，再由分子器件构建分子机器，从而完成“自下而上”的制造过程。通过分子自组装过程制造的分子机器多为纳米级别的尺寸，因此又可以称为纳米机器，它们是一类通过光照、化学能、电能等外界刺激将能量转化为可控运动的超分子体系^[19]。

法国科学家索维奇 (Jean-Pierre Sauvage) 迈出了创造分子机器的第一步，他的研究团队首先实现了 2 个环状分子的自连接 (称为“索烃”，如图 14 所示)，并成功构建了一种其中一个环能在接受能量后受控绕另一个环旋转的索烃，这是分子机器的最初雏形^[20]。

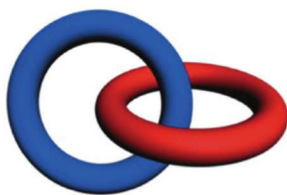


Fig. 14 Hydrocarbon

图 14 索烃

随之，美国科学家斯托达特 (Sir J. Fraser Stoddart) 制备了轮烷——将一个环状分子以机械作用套在一个轴上 (如图 15 所示)，它可以利用一个分子推动另一个分子运动，实现了对分子运动的控制^[21]。

围绕着以轮烷为基础的研究，斯托达特研究团队随后陆续研发出多种分子机器雏形，如“分子电梯” (如图 16 所示)，它可以将自己从表面上抬高 0.7 nm^[22]。

随后，荷兰科学家费林加 (Bernard L. Feringa) 在研究索烃、轮烷等机械互锁结构的基础上，

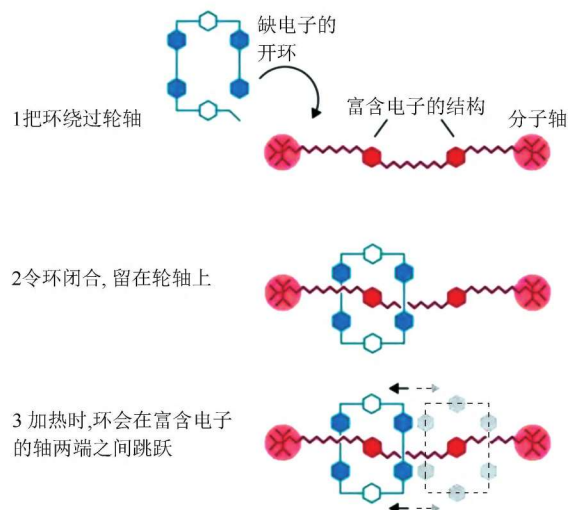


Fig. 15 Cycloalkane moving on the axle in a controlled way

图 15 以可控的方式在轮轴上移动的轮烷

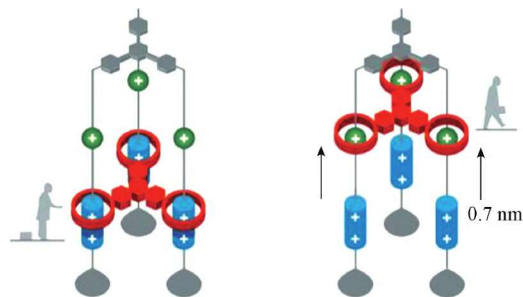


Fig. 16 Molecular elevator

图 16 分子电梯

开发出了分子马达，并制造了第一个具有特定功能的分子机器^[23]。

3 位科学家的一系列研究实现了通过人为设计让超分子的结构和运动可控，因此 3 人共同获得了 2016 年诺贝尔化学奖。现在，科学家们已经研制出了各种各样的分子器件和分子机器，如分子车轮、分子钳、分子导线、分子开关、分子车、分子大脑等。另外，除了通过分子识别、自组装构造超分子体系之外，科学家们又开始研究超分子体系的组装与解组装的可逆过程，用于仿生研究或模拟生物功能。总之，具有特定结构和功能的超分子体系的发现，为 21 世纪化学、材料科学和生命科学的发展开拓了一条崭新的研究道路和发展方向。

4 “物质的聚集状态”教学启示

4.1 当前教学困境

准晶、等离子体、离子液体、超分子等都是首次被选进中学化学教材的前沿概念，它们反映了学科发展新成就，是科学家们津津乐道的科研“宠

儿”。根据课标要求,本部分内容的教学重点在于让学生知道物质聚集状态的多样性及其对物质性质、用途的影响,教学难点在于学生对这些概念太过陌生,需要教师精心组织教学内容建立起它们与学生已有经验间的有效联结。但是对一线教师而言,由于不同版本的新教材对不同概念讲述的篇幅、编排都有所不同,教师们参考借鉴起来多有不便,因此实际讲述时往往照本宣科,草草略过,使知识单点化、孤立化,难以发挥它们对于发展学生学科知识、学科思维、学科观念,领会学科价值的重要载体作用。另外,自 2019 年各版本新教材发

布以来,鲜有与中学教学关于“物质的聚集状态”密切关联的权威文献可以参考。因此,为了使教师对这些陌生的新增概念具备全面细致的理解和把控,本文通过浅显易懂的语言和学生的已有经验出发,综合各版本教材优势信息以及若干专业资料,对这些概念的内涵及其联系进行深入辨析(见图 17),试图将陌生的科学概念与学生原有的经验知识进行链接与同化,建构更加系统完善的知识体系。当然,物质的聚集状态远不止上述提到的,还有更多已知、未知的物质聚集状态等待研究者们去发现、去探索。

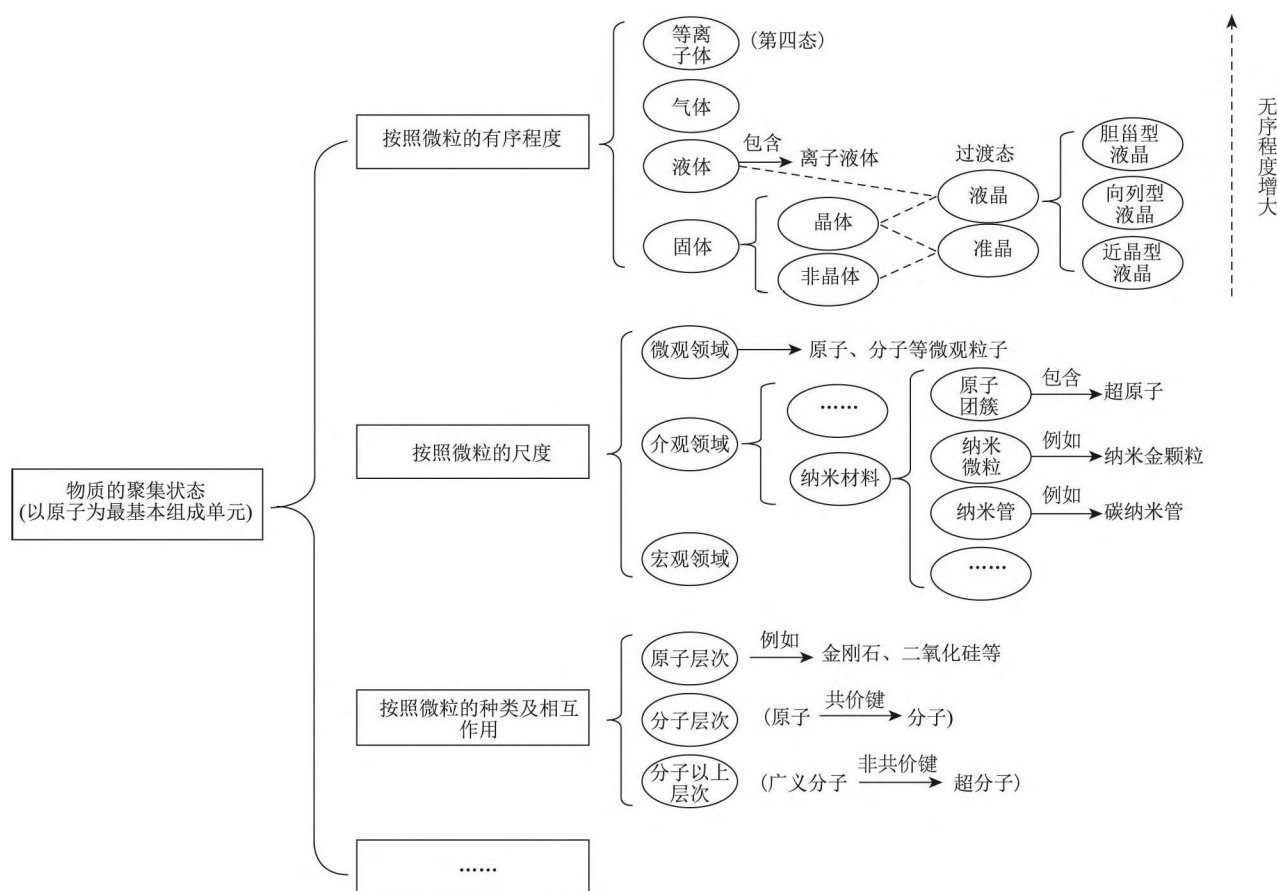


Fig. 17 Mind map of the aggregation state of matter

图 17 物质的聚集状态思维导图

4.2 教学价值剖析

等离子体等与现实生活和科技前沿密切相关的概念走进中学教材,体现了基础教育改革的时代性、先进性和实践性。过去,学生只知道物质是由原子、分子、离子构成的,结构决定性质,性质决定用途。通过“物质的聚集状态”的学习,学生意识到物质的聚集状态也会影响物质的性质,并据此开发出了一系列性能优良的新型材料。而且,通过对这些聚集状态的梳理和讲解,

不难看出,正是对物质的聚集状态的深入研究,为科学发展提供了新的视角,而视角的拓展往往又能引发科学领域革命性的发现。因此,化学新的分支学科不断涌现和壮大,例如纳米化学、超分子化学、等离子体化学等,并为能源、材料、生命、环境、信息等产业的发展提供了强大的推动作用。因此,“物质的聚集状态”相关概念的引入,不仅在学科认知上完善了学生原有的知识体系,也拓展了学生的思维逻辑和学科研究视

角,进一步丰富了学生的微粒观、分类观、结构观等学科观念,有效落实了化学学科核心素养。此外,化学前沿发展的新趋势和新面貌,也有利于激发学生从事与化学相关职业的热情与理想,鼓励学生关注并投身于化学事业,从而反哺于化学学科的更高质量发展。

4.3 教学实施策略

新一轮教学改革强调知识的结构化,提倡大概念统整、大单元教学。本文将教材中新增的诸多概念都统整到“物质的聚集状态”的大概念之下,并建立起系统的概念关系图,是教师开展丰富的单元主题活动的良好素材。此外,概念符号仅是知识的载体,教师在符号传递的基础上,充分挖掘知识背后蕴含的多维价值,如历史价值、理性价值与社会价值等,充分发挥知识教学的育人功能,是新课程实施背景下的必然追求。

充分挖掘知识背后的历史价值。知识是人类在实践中认识客观世界本质及其规律的历史产物,具有特定的历史背景。通过对准晶、液晶、超分子等概念进行历史探源,重现人类对自然事物和科学现象的观察、思考与合作,揭示知识的历史背景,是学生理解知识蕴含的本质、思想及情感的必要条件。

充分挖掘知识背后的理性价值。概念的创生与建构必然伴随着人类理性思维的发展,例如前文所提到的物质与量的辩证统一思想、科学论证、跨领域合作、人器协同等。教学过程中应着力挖掘人类探索客观世界时的认识思路、面对复杂问题时持有的理性判断、价值观念等,培养学生的科学思维与逻辑,有助于学生建立起众多概念间的本质联系,发展学生知识再创造的意识与能力。

充分挖掘知识背后的社会价值。实践是人类的存在方式,实践的目的在于满足人类自身的物质需求和精神需求,在这一过程中衍生的知识成果必然蕴含了人类对社会的价值憧憬和美好愿望。通过介绍不同分类标准下物质聚集状态的结构、性质及其应用,体现了知识演变、科学发展与社会进步相互促进的依存关系,彰显了科学知识在人类追求美好生活过程中的重要价值,充分体现了知识背后的德性智慧,从而引导学生通过知识学习进入社会、体悟生命、感知责任,发展学生对于科学和外部世界的感知力、求知力和创造力,实现教学的意义增值,赋予教学以人文关怀。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中化学课程标准(2017年版2020年修订). 北京:人民教育出版社,2020:40
- [2] (英)彼得·J·柯林斯. 液晶——自然界中的奇妙物相. 阮丽真,译. 上海:上海科技教育出版社,2002:1
- [3] 王磊,陈光巨. 普通高中教科书:物质结构与性质(化学选择性必修2). 济南:山东科学技术出版社,2019:6,105—113
- [4] 麻生明,陈寅. 普通高中教科书:物质结构与性质(化学选择性必修2). 上海:上海科学技术出版社,2021:60—61,82,90
- [5] 王晶,郑长龙. 普通高中教科书:物质结构与性质(化学选择性必修2). 北京:人民教育出版社,2020:88
- [6] 课程教材研究所,化学课程教材研究开发中心. 普通高中教科书教师教学用书:物质结构与性质(化学选择性必修2). 北京:人民教育出版社,2020:158
- [7] 彭笑刚. 物理化学讲义. 北京:高等教育出版社,2012:243,258
- [8] 刘小兵. 现代物理知识,2005(4):56—58
- [9] 吴倬. 马克思主义哲学导论. 北京:当代中国出版社,2002:115—116
- [10] 上海硅酸盐研究所. 有趣的准晶 [EB/OL]. (2013-05-27). <https://baike.baidu.com/reference/10943191/d747VNmrVcRDxpgwjfMbA6hhz0FDnSFTKY0Kz2rnzUjA42v5xlb4T-Nz0mKiCdHFHY9Y4hA9Gj1gWPFLjO5zZWjWyzpHqOJ9IthZJtvSppKQxbBzxYGC>
- [11] 崔英敏,吕刚. 现代物理知识,2006(3):3—6
- [12] 晏华. 超分子液晶. 北京:科学出版社,2000:1—2,68,72
- [13] 陈敬中. 现代晶体化学. 北京:科学出版社,2010:5
- [14] 曹茂盛,关长斌,徐甲强. 纳米材料导论. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001:2—3
- [15] 颜肖慈,罗明道. 界面化学. 北京:化学工业出版社,2004:196—197
- [16] Denis E Bergeron, A Welford Castleman Jr, Tsuguo Morisato, et al. Science, 2004, 304(4):84—87
- [17] Bergeron D E, Roach P J, Castleman Jr A W, et al. Science, 2005, 307(1):84—87,231—235
- [18] 颜肖慈,罗明道. 界面化学. 北京:化学工业出版社,2004:196—197
- [19] 金涌. 探索化学化工未来世界:值得为之付出一生. 北京:清华大学出版社,2016:101
- [20] Jean Francois Nierengarten, Christiane O. J. Am. Chem. Soc., 1994, 116(1):375—376
- [21] J Fraser Stoddart. Angew. Chem. Int. Ed., 2017, 56:11094—11125
- [22] Jovica D Badjic, Vincenzo Balzani, Alberto Credi, et al. Science, 2004, 303(5):1845—1849
- [23] Nagatoshi Koumura, Robert W J Zijlstra, Richard A van Delden, et al. Nature, 1999, 401(9):152—155