

纳米颗粒组装研究进展与展望

闵凡一¹, 朱 焜², 米 霜³, 何建明³, 刘 欢³

(1. 中国科学院化学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002;
3. 中国科学院成都有机化学研究所, 成都 610041)

摘要:近十几年来, 纳米颗粒组装作为一种纳米材料的加工制备技术已经取得极大的进展, 并日趋发展成为一种较成熟的技术。本文中, 我们将不局限于某种具体的纳米颗粒, 而是依照不同的组装方法进行分类, 并对一些近期具有代表性的组装工作(如溶液方法、补丁粒子、液晶组装和纳米颗粒的表面构筑等)进行介绍。除了介绍该领域所涉及的研究思路和方法, 本文目的还在于梳理该领域各个研究方向及其相互联系, 展望纳米颗粒组装在未来的发展方向。

关键词:纳米颗粒; 组装; 研究进展

引言

在过去的二三十年间, 人们在纳米领域的研究取得了许多突破性进展, 从基础的纳米尺度理论研究, 到纳米材料合成与制备, 以及微观的表征手段都有显著进展。同时, 人们也认识到, 在纳米颗粒的物质组成以及形貌结构特征之外, 纳米颗粒的堆积组装方式也会在很大程度上影响纳米材料的诸多性能^[1]。

纳米颗粒组装是在纳米颗粒合成的基础上, 更进一步地对纳米材料进行加工排列, 进而得到人们所期望的具有特定组装结构的纳米材料聚集体。纳米颗粒的组装作为一种“自下而上(bottom-up)”的微纳材料制备方法, 具有适用材料范围广泛, 技术手段多样, 成本低廉, 简单易行等特点。纳米颗粒组装这一领域也在过去十几年间取得了长足发展, 无论是无机纳米材料^[2~4], 有机物或者高分子的纳米颗粒^[5~7], DNA^[8~10]和蛋白质等生物分子^[11,12], 抑或复合纳米材料的组装^[13,14], 都有代表性的成果问世^[15]。

同时, 纳米颗粒的组装技术也在迅速发展。纳米颗粒的组装技术纷繁复杂, 但大致可以分为四类^[16]: 化学方法、物理方法、溶液方法以及外加力场的方法。化学方法主要包括补丁粒子方法和模版法; 物理方法则包括刮涂法、旋涂法以及表面结构的构筑; 溶液方法有液滴蒸发和沉积的方法; 施加外场则主要是通过施加电场或者磁场来调控纳米颗粒的组装行为。

鉴于篇幅有限, 本文只能挑选一些最常用的方法及其具有代表性的工作来进行介绍。在介绍这些工作的基础上, 本文还展望了纳米颗粒组装研究今后的发展方向。

1 溶液方法

溶液方法是纳米颗粒组装领域最为经典的一种方法。因为纳米颗粒的合成绝大多数时候是液相合成方法。在溶液中, 纳米颗粒经过可调控的成核生长过程, 得到单分散的纳米颗粒。在组装的过程中, 纳米颗粒本身的形状、颗粒表面的性质、颗粒所处的分散介质以及表界面的状态都会对组装过程产生影响^[15]。

胶体光子晶体是过去十年间有关纳米颗粒液相组装的重要研究领域之一^[17~19]。由于很多纳米颗粒的尺度恰好处在可见光波长亚微米尺寸范围内, 再加上光子晶体应用广泛^[17], 所以该领域一直也是研究热点。2019 年, 韩国 Suh 等^[20]对胶体光子晶体组装中应用广泛的界面提拉法进行了系统研究, 并指出在

界面提拉过程中,溶剂挥发速度的不均匀导致了组装结构断裂,无法获得大面积有序结构。在此基础上,他们又继续研究了如何能利用界面提拉的方法获得范围大于 $100\mu\text{m}$ 的纳米颗粒有序组装结构,得出结论是:在一定范围内时,增加纳米颗粒的粒径、分散液浓度和环境温度,有利于改善纳米组装体的有序程度并减少缺陷。一般光子晶体的组装对象均为球形纳米颗粒,而非球形的纳米颗粒由于颗粒本身的各向异性,通常会呈现更丰富的组装结构。2018 年, Lee 等^[21] 研究发现,在液滴蒸发诱导多面体纳米颗粒组装的过程中,所得材料的表面层与内部的组装结构之间存在显著差异(见图 1)。他们认为这是由于液滴蒸发过程中,马兰戈尼(Marangoni)对流的存在使得液滴中存在两个显著不同的组装区域,这两个区域中的液体流速和流向都有显著差异,从而造成堆积形貌上的区别。与该研究相类似,2016 年, Shi 等^[22] 在研究双金字塔形的金纳米颗粒的溶剂蒸发诱导组装时,得到了四种不同的有序组装结构。进一步研究发现,这四种结构中只有一种是热力学稳定的状态,其它则都是未达到热力学稳定状态的亚稳态或者非稳态。溶液蒸发诱导是纳米颗粒组装中的一种普适方法,近年来还有一些利用溶剂蒸发诱导组装纤维素纳米材料的研究工作^[23,24]。需要注意的是,蒸发诱导组装是由动力学因素主导的一个过程,很多情况下并不能得到热力学最稳定结构^[15,16,22]。最显著的例子当属“咖啡环效应”^[25,26],即溶液干燥之后固体颗粒向液滴边缘聚集的现象。在化学和物理等领域中针对该效应已经有不少相关研究^[27~29]。

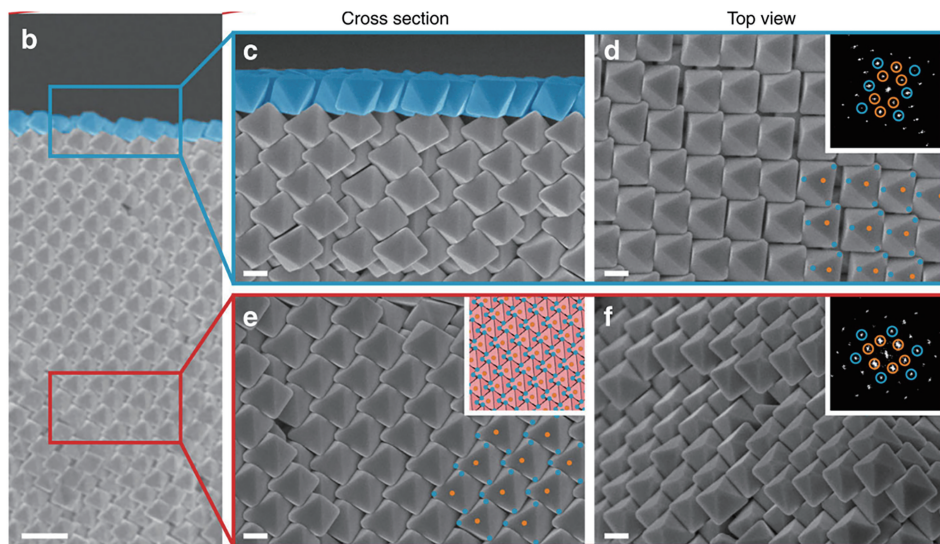


图 1 液滴蒸发得到的外层与体相的纳米颗粒具有不同的排列方式(比例尺: $4\mu\text{m}$)^[21]

Figure 1 Particles in different region have different assembly structure within a drop after evaporation (Scale bar: $4\mu\text{m}$)^[21]

2 补丁粒子(Patchy Particles)

补丁粒子是由具有不同形状、化学特性、光电以及力学特性的区域构成纳米粒子或胶体粒子,由于具有典型的各向异性特征,所以在自组装过程中能形成更为复杂或有序的结构。

Benyettou 等^[30]将磺化后的聚苯乙烯胶体补丁粒子表面用葫芦脲[7](CB[7])进行修饰,并选择 DPV2⁺(二苯基紫精)作为刚性桥接配体连接两个分别位于不同粒子上的 CB[7]大环。实验证明 DPV2⁺在水溶液中与两个 CB[7]的苯环以外部结合方式连接。借助于 DPV2⁺与 CB 之间的疏水/离子电荷相互作用,悬浮液中形成了三元 DPV2⁺⊂(CB[7])₂ 复合物,实现了短线性和支链状结构的自组装(图 2)。这种合成方法具有高度的方向性和可逆性,在调节和控制颗粒相互作用到所需目标结构方面具有很大优势。

Gong 等^[31]提出了一种称为胶体融合的新方法,通过动力学和表面润湿过程控制,设计混合动力液-

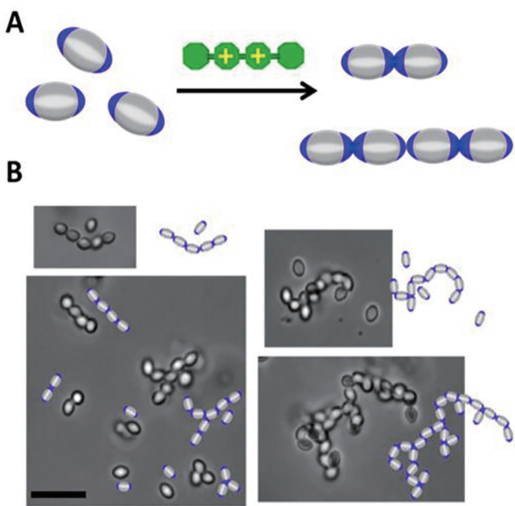


图 2 (A)示意图表示双补丁粒子的自组装;(B)由多个 DPV2 + 连接的双补丁粒子组成的链状结构的显微照片^[30]。比例尺:4 μ m。

Figure 2 (A) Illustration for self-assembly of patchy particles; (B) SEM image for chain structures composed of several patchy particles^[30]. Scale bar: 4 μ m.

固团簇在添加增塑剂后演变成具有一系列表面形态的补丁粒子。他们通过混合硅氧烷基乳液液滴与聚苯乙烯球的致密悬浮液来组装 LCCs(liquid-core colloidal clusters)。图 3 说明了补丁粒子融合、溶解和形成空穴的过程。通过荧光显微镜发现,随着四氢呋喃(THF)的加入,四面体 LCCs 轮廓逐渐变成球形,核心材料被挤出空隙并到达粒子的表面,并最终形成了四个液体补丁。进一步荧光标记发现胶体融合后壳粒子并不是均匀分散在球体上,而是被限制在特定区域内。加入表面活性剂可以使球体发生溶解,留下部分核心材料形成间隙通道。总之,这项工作引入了一种概念上新颖的、可伸缩的胶体合成方法,使用几何约束和界面张力很大程度上取代了化学调控。通过控制复合团簇的塑化,定量地制备出四面体对称的均匀补丁粒子。利用这些粒子不同的物理与化学性质,可以组装出更为复杂的复合结构。

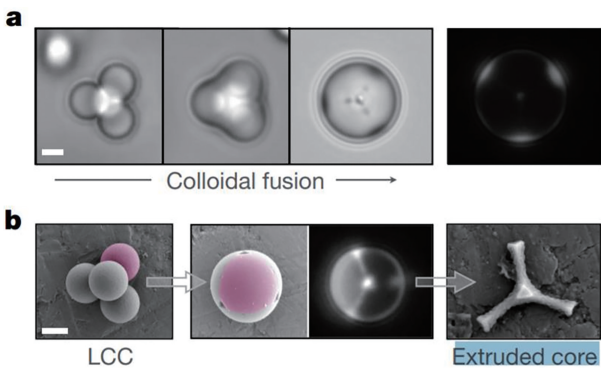


图 3 (a)胶体粒子融合过程荧光显微镜图像;(b)溶解后形成的通道 SEM 图像^[31]。比例尺:1 μ m。

Figure 3 (a) Fluorescence microscope image for the fusion process; (b) Chanel structure when colloid particles are dissolved^[31]. Scale bar: 1 μ m.

3 液晶组装

液晶分子已经在微电子、环境、能源等诸多领域得到广泛研究和重视。依据液晶形成的纳米级层次结构自组装可分为两种形式:第一种是以不同形态自组装的液晶分子为模板并引进纳米粒子,通过后者

与液晶分子之间的相互作用,实现纳米粒子的组装。近年来研究较多的是银纳米线、碳纳米管等,通常这种以液晶分子为模板的纳米粒子组装材料会具有特定的光电性能。第二种是液晶分子本身在合成过程中通过获得嵌段结构进行自组装,这种又叫做超分子排列/超分子结构。它不仅能够提高材料合成的稳定性,并且可以引进区域选择性效应,是一种新兴的纳米结构材料合成策略。

2018 年,Mohd 等^[32]使用层状溶致液晶(LLLC)作为宿主通过原位(in-situ)技术组装银纳米颗粒,制备了 HDTABr/1-戊醇/水的混合物,该体系在较低含水量下具有严格排列的层状织构,将水替换为 AgNO₃ 溶液也具有相似的层状织构。通过电子显微镜观察,纳米颗粒几乎是单分散的,且纳米银颗粒尺寸随着 AgNO₃ 浓度增加而从 4nm 增大到 11nm。同一年,Marco 等^[33]探究了一系列 RNA 短链自组装的条件和在高浓度溶液中液晶微区的相变条件,并展示了超分子态 RNA 具有的模板效应,继而实现了短链相互连接形成几百个碱基对的长链。这样的自组装具有浓度依赖性和温度依赖性,如图 4 所示,即提高浓度和降低温度有利于组装体的形成。此外,高亲水性分子聚乙二醇(PEG)的加入有助于液晶相的形成,且加入的浓度越高增强效果越明显。

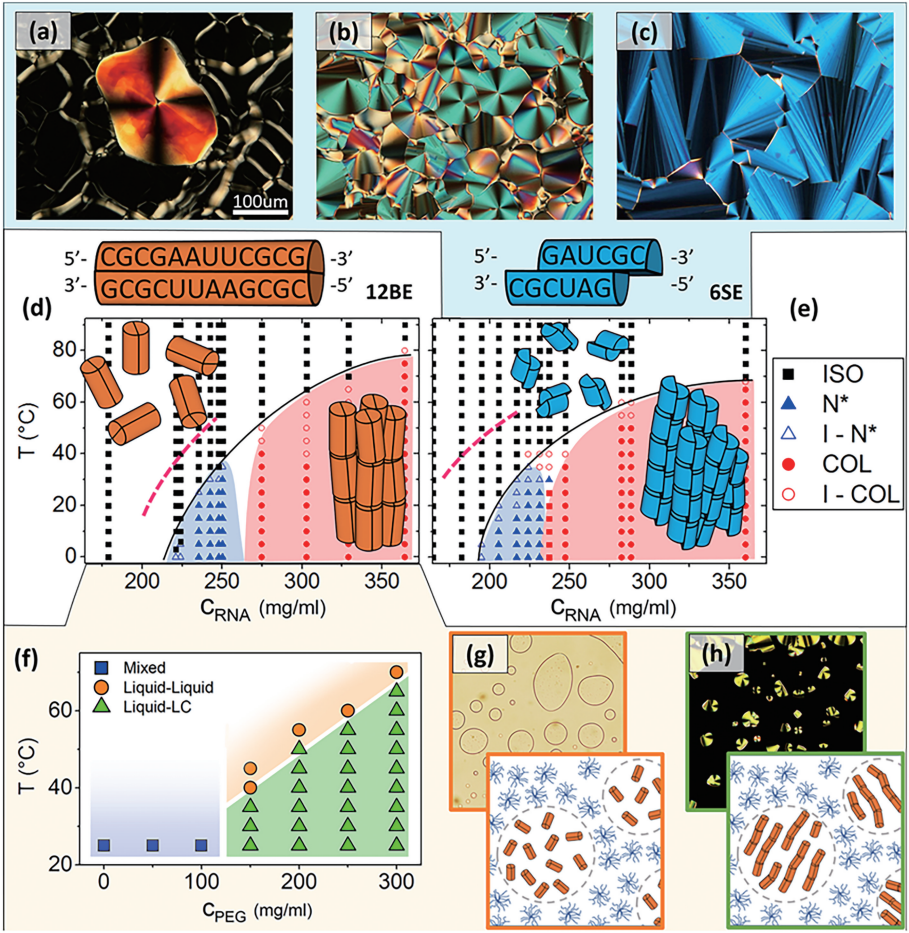


图 4 (a,b,c)偏振显微镜下混合相的自组装 RNA 在不同浓度下的形貌;(d,e)两种 RNA 短链的浓度-温度相图;
(f)加入 PEG 的条件下 PEG 浓度-温度的相图;(g,h) (f)图中橙色和绿色区域的结构示意图^[33]

Figure 4 (a, b, c) Various self-assembly structure of RNA at different concentration;
(d, e) Concentration-Temperature phase diagrams for two different RNA chains; (f) Phase diagram
when PEG is added; (g, h) Assembly structures in orange region and green region in (f)^[33]

在 2017 年,Tan^[34]通过静电相互作用由双十八烷基咪唑鎓阳离子(记为 L⁺)获得杂合分子 L₄[SiW₁₂O₄₀].在混合溶剂(氯仿/甲醇体积为 4:1)中,L₄[SiW₁₂O₄₀]的自组装聚集体在光学显微镜下

呈现多层囊泡,并在 SEM 中表现出微米尺寸的花状聚集体,并可以自组装成有序的一维层状结构。 $L_4[SiW_{12}O_{40}]$ 显示出与咪唑阳离子类似的典型的热致液晶行为。2018 年,Guan 等^[35]将偶氮苯液晶基元引入 PISA(聚合诱导自组装)体系,结合液晶有序排列构建了聚合诱导多级自组装体系,得到了长方体、短带状等多种各向异性形貌纳米粒子,并研究了纳米粒子的形貌演化过程。其中纳米粒子形貌经历了长方体、短带状、片层、椭囊泡的逐步演化,如图 5 所示。该研究实现了各向异性形貌纳米粒子的高效构筑,拓展并丰富了各向异性聚合物纳米粒子的形貌种类,提供了一种制备各向异性形貌聚合物纳米粒子的新思路。

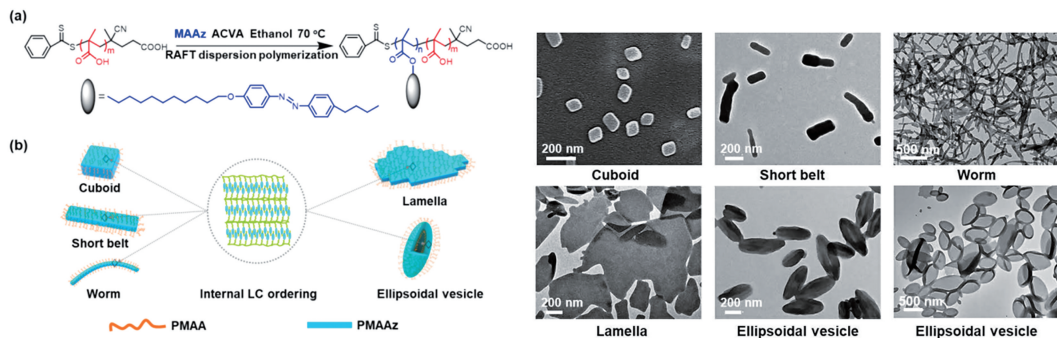


图 5 左图(a)通过乙醇中的 RAFT 分散聚合制备 PMAA-*b*-PMAAz 的合成路线;左图(b)各向异性形态的形成方式;右图是 PMAA-*b*-PMAAz 各向异性纳米粒子形貌图^[35]

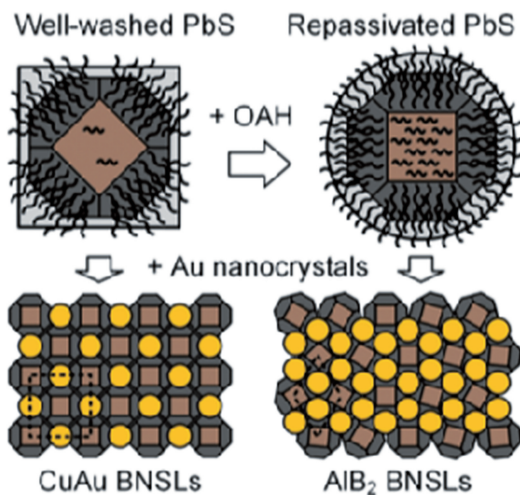
Figure 5 (a) Synthesis approach for PMAA-*b*-PMAAz; (b) Illustration for different anisotropic structures and corresponding SEM pictures are shown in the right^[35]

4 颗粒的表面构筑

对所获得的纳米颗粒表面可以进行化学改性以实现纳米粒子功能化,其中功能化最常用的方法是在纳米颗粒表面包覆一层其它物质或者配体。功能化之后可通过进一步调控并得到所需的有序组装结构。

两种尺寸相近的球形胶体纳米晶体(NCS)被碳氢化合物表面配体封端后进行自组装,实验结果表明它们能产生 20 多个不同的二元相^[15]。Boles 和 Talapin 等^[36]展示了 PbS 的配体结合平衡控制着由 PbS 和 Au 纳米颗粒形成的两种二元层状堆积结构的相对稳定性。在两种纳米颗粒的尺寸接近时,制备好的 PbS 与 Au 纳米颗粒组装成 CuAu 型二元纳米超晶格结构(BNSLs),且其与原先的 PbS 纳米颗粒的晶格具有方向一致性。然而当它们在添加油酸(OAH)然后蒸发组装时,则 AlB₂ 型的二元超晶格结构为主要的自组装产物。实验证实添加油酸与 PbS 纳米颗粒结合,配体的表面覆盖率是影响 CuAu 型和 AlB₂ 型两种二元纳米超晶格结构相对稳定性的重要因素。这种 PbS 与 Au 纳米颗粒间相互作用的各向异性可以通过在二元组装溶液中添加油酸来有效筛选。这一发现也为实现二元纳米的定向晶格组装提供了一种新策略。

胶体晶体的逐层组装(LBL)可以实现对生成的晶体厚度和结构进行精细控制。针对硬球的 LBL 组装,人们已经开发了一些方法。然而,由于微凝胶球的柔性和可变形性,这些方法并不适用于微凝胶颗粒。Liang 等^[37]提出了一种微凝胶颗粒的 LBL 组装方法。为了构建第一个单层,叠氮化物修饰的微凝胶球被组装成三维结构。随后,通过微凝胶上叠氮化物基团与基质表面上的炔基之间的光引发炔-叠氮化物反应,将靠近基质的三维结构上的第一个<111>平面原位固定到基质上,并去除未结合的颗粒导致微凝胶单层有序化。以类似方式组装第二单层,即首先组装三维结构,然后通过光引发的炔基-叠氮化物点击反应将晶体的第一个<111>平面与底层微凝胶单层原位固定。为此,用炔基改性微凝胶球代替叠氮化物改性微凝胶球组装第二层。激光共聚焦研究证实第二单层位于第一层的顶部。当三维胶体晶体的晶格常数近似于底层微凝胶单层的晶格常数时,第二层的晶格常数呈现出较高的有序性。重复这一过

图 6 OAH 影响 PbS 与 Au 纳米颗粒的组装过程^[36]Figure 6 Influence of OAH during the assembly process of PbS and Au^[36]

程导致叠氮化物改性和炔基改性微凝胶的高有序单层交替沉积到基底上。与微凝胶球在大体积分散体中自组装得到的微凝胶晶体相似,面心立方和六角形密堆积结构也在 LBL 组装结构中共存。

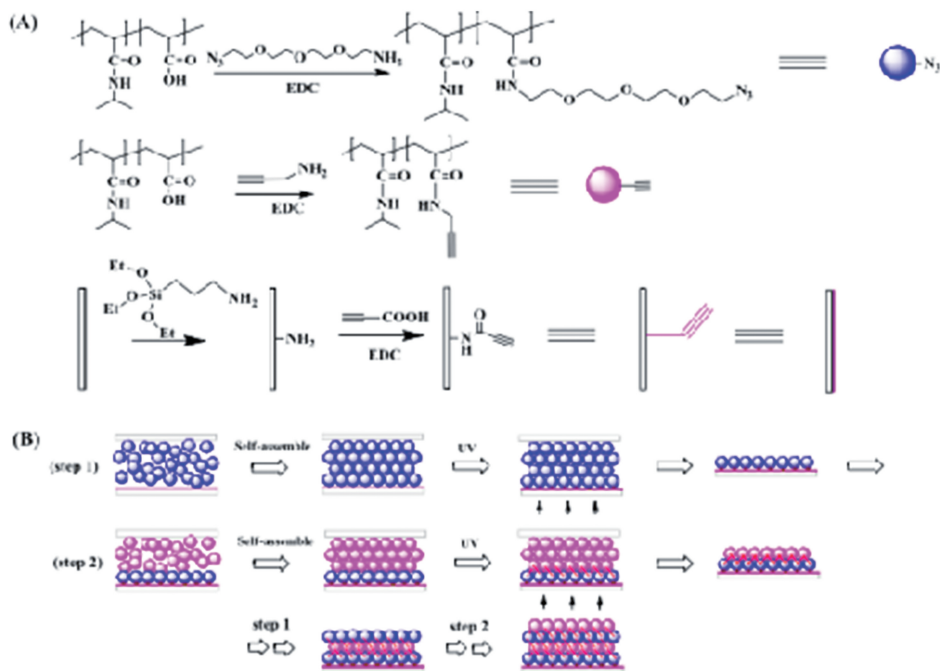


图 7 微凝胶的层层组装过程图示^[37]

Figure 7 Layer by layer assembly process for micro gel^[37]

5 模板方法

基于模板的纳米颗粒合成组装最重要的优点是可以控制纳米结构的尺寸和形态。可以使用的模板材料多种多样,并且可根据模板材料的具体类型和结构来合成多种纳米材料。模板合成的一般机制主要包括三个阶段:(1)模板制备;(2)使用模板定向合成目标材料;(3)模板去除^[38]。对于大多数纳米颗粒,

例如 SiO₂ 或半导体纳米颗粒,乳液合成是生产均匀纳米颗粒的通用且有效的方法。对于一维和二维纳米结构,例如纳米线、纳米管和纳米结构阵列,模板填充方法用于围绕相应模板形成最终产品的电沉积、气相沉积和熔体/溶胶-凝胶沉积技术。以下简单介绍几种用模板法制备纳米结构的工作。

Fornaguera 等^[39] 利用纳米乳液模板制备的聚乳酸羟基乙酸(PLGA)纳米粒子来制备荧光成像剂。选择两种模型荧光染料并将其与 PLGA 一起溶解在纳米乳剂的油相中,通过低能量相转化成分(PIC)法制备纳米乳液。然后通过溶剂蒸发纳米乳液模板并获得负载荧光染料的纳米颗粒,如图 8 所示。在本工作中设计的负载荧光染料的 PLGA 纳米颗粒是具有一定前景的新型纳米系统,有利于达到生物医学应用中长期成像的目的。Li 等^[40] 则利用 SiO₂ 纳米粒子和显示胺终端的官能化基底之间的吸引力静电相互作用,以设计一种制造 SiO₂ 纳米粒子薄膜的简单方法。静电控制吸附可以在具有均匀表面覆盖的大面积基底上施加,通过简单调节表面电荷,可以沉积多种不同纳米颗粒膜的选择方法,故可以设计最佳吸附参数来制备具有所需表面覆盖度的纳米颗粒膜。

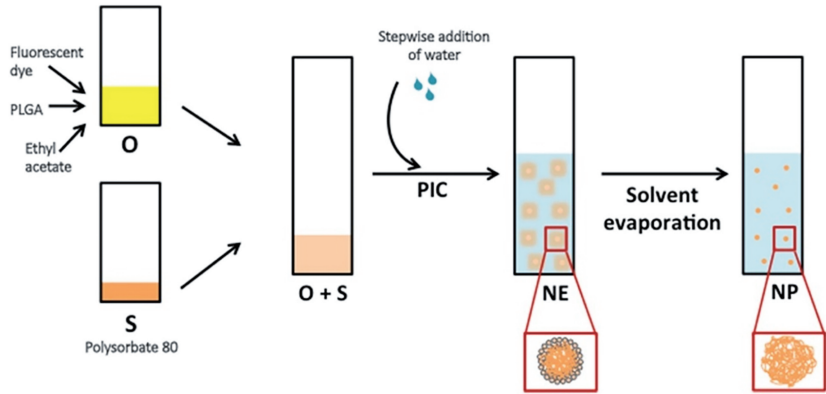


图 8 乳液模板制备负载荧光染料的纳米颗粒^[39]

Figure 8 Preparing nanoparticles with fluorescent dyes by emulsion^[39]

2017 年,Guo 等^[41] 报道了利用模板制备单颗粒纳米线。事先在硅片上刻出微米孔道,再将纳米颗粒分散液注入到孔道中,得到了纳米颗粒组装而成的一维纳米线结构。通过改变分散介质的黏度,可以调节纳米线中纳米颗粒的排列方式,如图 9 所示。同年,Li 等^[42,43] 则以气泡为模板诱导银纳米颗粒组装,制备了一种无序排列的二维纳米线阵列,这种无序阵列可以有效消除电子屏幕中常见的“莫尔条纹”现象。

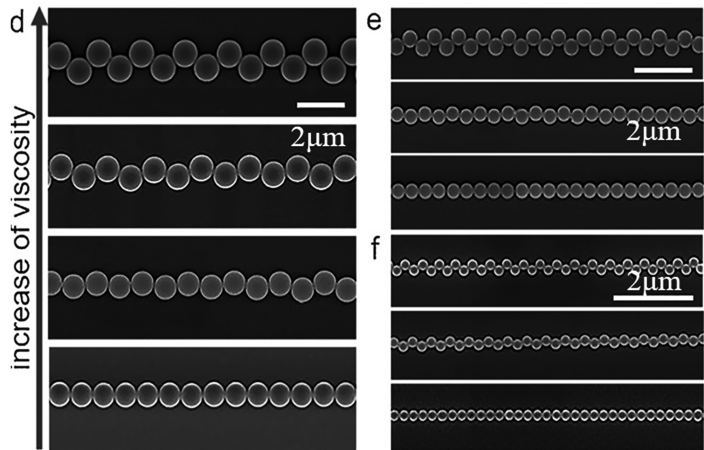


图 9 改变分散介质粘度得到不同结构的纳米线^[41]

Figure 9 Different assembly structures obtained by changing the viscosity of dispersion^[41]

6 总结与展望

在当前物质科学的研究中,各式各样的新物质新材料被源源不断地创造出来,也为纳米颗粒的组装提供了源源不断的新的研究对象,研究这些新型物质的组装行为,是该领域未来一个相当重要的发展方向。同时,还要更精确地控制纳米颗粒的组装行为,以实现能够控制几个甚至单个纳米颗粒的准确组装,使纳米颗粒的组装能够达到单粒子的精确度。通过组装一些具有诸如光电、热电性质的材料,我们可以进一步探索纳米尺度上的有序结构与外在物理性质的关联,同时为后续的器件组装提供新的思路。

参考文献:

- [1] Niederberger M. *Adv Funct Mater*, 2017, 27(47): 1703647.
- [2] Lewandowski W, Fruhnert M, Mieczkowski J, Rockstuhl C, Górecka E. *Nat Commun*, 2015, 6: 6590.
- [3] Lee Y H, Lay C L, Shi W, Lee H K, Yang Y, Li S, Ling X Y. *Nat Commun*, 2018, 9 (1): 2769.
- [4] Koczur K M, Mourdikoudis S, Polavarapu L, Skrabalak S E. *Dalton Trans*, 2015, 44 (41): 17883~905.
- [5] Abetz V. *Macromol Rapid Commun*, 2015, 36 (1): 10~22.
- [6] Zheng W, Chen L J, Yang G, Sun B, Wang X, Jiang B, Yin G Q, Zhang L, Li X, Liu M, Chen, Yang H B. *J Am Chem Soc*, 2016, 138 (14): 4927~4937.
- [7] Xiao M, Li Y, Allen M C, Deheyn D D, Yue X, Zhao J, Gianneschi N C, Shawkey M D, Dhinojwala A. *ACS Nano*, 2015, 9 (5): 5454~5460.
- [8] Hong, F, Zhang F, Liu Y, Yan H. *Chem Rev*, 2017, 117 (20): 12584~12640.
- [9] Zhang F, Jiang S, Wu S, Li Y, Mao C, Liu Y, Yan H. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10 (9): 779~784.
- [10] Jones M R, Seeman N C, Mirkin C A. *Science*, 2015, 347(6224): 1260901.
- [11] Frederix P W, Scott G G, Abul-Haija Y M, Kalafatovic D, Pappas C G, Javid N, Hunt N T, Ulijn R V, Tuttle T. *Nat Chem*, 2015, 7 (1): 30~37.
- [12] Wang J, Liu K, Xing R, Yan X. *Chem Soc Rev*, 2016, 45 (20): 5589~5604.
- [13] Xiao F X, Hung S F, Miao J, Wang H Y, Yang H, Liu B. *Small*, 2015, 11 (5): 554~567.
- [14] Xia G, Tan Y, Chen X, Sun D, Guo Z, Liu H, Ouyang L, Zhu M, Yu X. *Adv Mater*, 2015, 27 (39): 5981~5988.
- [15] Boles M A, Engel M, Talapin D V. *Chem Rev*, 2016, 116 (18): 11220~11289.
- [16] van Dommelen R, Fanzio P, Sasso L. *Adv Colloid Interface Sci*, 2018, 251: 97~114.
- [17] Hou J, Li M, Song Y. *Angew Chem Int Ed*, 2018, 57 (10): 2544~2553.
- [18] Vogel N, Retsch M, Fustin C A, Del Campo A, Jonas U. *Chem Rev*, 2015, 115 (13): 6265~6311.
- [19] Xu W, Li Z, Yin Y. *Small*, 2018, 14 (35): e1801083.
- [20] Suh Y, Pham Q, Shao B, Won Y. *Small*, 2019, 15 (12): e1804523.
- [21] Lee Y H, Lay C L, Shi W, Lee H K, Yang Y, Li S, Ling X Y. *Nat Commun*, 2018, 9 (1): 2769.
- [22] Shi Q, Si K J, Sikdar D, Yap L W, Premaratne M, Cheng W. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 967~976.
- [23] Wang P X, Hamad W Y, MacLachlan M J. *Nat Commun*, 2016, 7: 11515.
- [24] Gencer A, Schutz C, Thielemans W. *Langmuir*, 2017, 33 (1): 228~234.
- [25] Deegan R D, Bakajin O, Dupont T F, Huber G, Nagel S R, Witten T A. *Nature*, 1997, 389: 827~829.
- [26] Yunker P J, Still T, Lohr M A, Yodh A G. *Nature*, 2011, 476 (7360): 308~311.
- [27] Sun J, Bao B, He M, Zhou H, Song Y. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7 (51): 28086~28099.
- [28] Li Y, Yang Q, Li M, Song Y. *Sci Rep*, 2016, 6: 24628.
- [29] Dominguez A, Malgaretti P, Popescu M N, Dietrich S. *Phys Rev Lett*, 2016, 116 (7): 078301.
- [30] Benyettou F, Zheng X, Elacqua E, Wang Y, Dalvand P, Asfari Z, Olsen J C, Han D S, Saleh N I, Elhabiri M, Weck M, Trabolsi A. *Langmuir*, 2016, 32 (28): 7144~7150.
- [31] Gong Z, Hueckel T, Yi G R, Sacanna S. *Nature*, 2017, 550 (7675): 234~238.
- [32] Mohd Yasin S M, Johan M R. *Optik*, 2019, 176: 593~599.
- [33] Todisco M, Fraccia T P, Smith G P, Corno A, Bethge L, Klusmann S, Paraboschi E M, Asselta R, Colombo D, Zanchetta G, Clark N A, Bellini T. *ACS Nano*, 2018, 12 (10): 9750~9762.
- [34] Tan C. *J Mol Struct*, 2017, 1148: 34~39.

- [35] Guan S, Zhang C, Wen W, Qu T, Zheng X, Zhao Y, Chen A. *ACS Macro Lett*, 2018, 7 (3): 358~363.
- [36] Boles M A, Talapin D V. *ACS Nano*, 2019, 13 (5): 5375~5384.
- [37] Liang S, Guan Y, Zhang Y. *ACS Omega*, 2019, 4 (3): 5650~5660.
- [38] Liu Y, Goebel J, Yin Y. *Chem Soc Rev*, 2013, 42(7): 2610.
- [39] Fornaguera C, Feiner-Gracia N, Calderó G, García-Celma M J, Solans C. *Colloids Surf B*, 2016, 147: 201~209.
- [40] Li X, Niitsoo O, Couzis A. *J Colloid Interface Sci*, 2013, 394: 26~35.
- [41] Guo D, Li C, Wang Y, Li Y, Song Y. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56 (48): 15348~15352.
- [42] Li Z, Huang Z, Yang Q, Su M, Zhou X, Li H, Li L, Li F, Song Y. *Adv Optical Mater*, 2017, 5 (23): 1700751.
- [43] Huang Z, Su M, Yang Q, Li Z, Chen S, Li Y, Zhou X, Li F, Song Y. *Nat Commun*, 2017, 8: 14110.

Current Research Progress and Prospects for Nanoparticle Assembly

MIN Fan-yi¹, ZHU Kun², MI Shuang³, HE Jian-ming³, LIU Huan³

(1. *Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*;

2. *Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China*;

3. *Chengdu Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*)

Abstract: Nano-particles assembly has been a quite useful method for producing nanoscale materials during the past decade, which also has many meaningful results and well developments. Classified by different methods, several newly published representative results such as solution process, patchy particles, liquid crystal assembly and nano-particles surface construction, are included and briefly illustrated in this article. Apart from introducing some methods and thoughts, we also give an outlook for this research area.

Key words: Nano-particles; Assembly; Research progress