

层-层组装聚合物中空微胶囊*

高长有 沈家骢

浙江大学高分子科学与工程学系, 杭州 310027

摘要 基于聚电解质阴阳离子静电作用的层-层(LBL)组装微胶囊以可被去除的胶体颗粒为模板, 采用经典的 LBL 组装技术获得壳层, 脱出模板得到聚合物中空微胶囊. 采用现代分析技术对微胶囊的许多化学和物理性能进行了研究. 通过与其他功能物质的整合, 赋予微胶囊在多个领域的重要应用价值. 文中笔者以近年来在该领域取得的一些研究成果为基础, 重点介绍层-层组装中空微胶囊的制备、基本性能与潜在应用.

关键词 微胶囊 层-层组装 聚电解质 胶体

微胶囊是通过成膜物质将囊内空间与囊外空间隔离以形成特定几何结构的物质, 其内部可以是填充的, 也可以是中空的^[1, 2]. 传统微胶囊尺寸通常在微米至毫米级, 壁厚在亚微米至几百微米. 1966年 Iler 建议采用交替沉积制备自组装薄膜的方法, 其后为 Mallouk 等进一步发展^[3, 4], Decher 又提出了基于聚合物阴阳离子静电作用的层-层(LBL)自组装概念^[5]. 将自组装技术应用于胶体颗粒, 就得到了聚合物 LBL 超薄膜为壳层的微粒, 从而将 LBL 技术从二维扩展到三维空间^[6]. 1998年, Möhwald 等采用可被去除的胶体颗粒作为组装的模板, 通过 LBL 技术将聚电解质沉积到该胶体颗粒上, 然后将作为模板的胶体颗粒溶解或分解, 制备了一类全新结构的聚合物中空微胶囊^[7, 8]. 这种方法不仅拓宽了自组装技术的研究与应用范围, 而且得到的微胶囊显示出独特的结构与多变的性能, 在基础研究与实际应用方面都具有重要的价值. 本文介绍笔者近年来在该领域取得的一些研究成果, 兼评国内外的最新进展, 总结了层-层组装中空微胶囊的制备、基本性能与潜在应用.

1 层-层组装聚合物中空微胶囊的制备技术

层-层组装聚合物中空微胶囊的制备首先以可被

溶解、分解或氧化的胶体颗粒为模板, 例如颗粒表面带有正电荷的微交联三聚氰胺-甲醛树脂(MF), 采用 LBL 技术先组装上一层与颗粒表面电荷相反的聚合物如荷负电的聚苯乙烯磺酸钠(PSS), 然后再沉积荷正电的聚阳离子如聚烯丙基铵盐酸盐(PAH). 当组装到所需层数后, 将作为模板的胶体颗粒去除, 就得到了中空的聚电解质微胶囊^[7], 如图 1 所示.

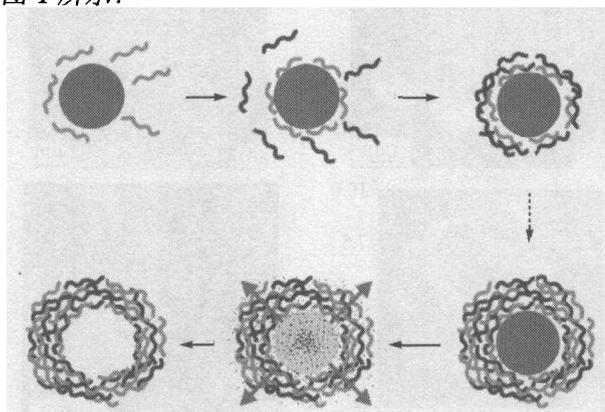


图 1 层-层组制备聚电解质中空微胶囊过程示意图

高长有等采用激光共聚焦显微镜(CLSM)跟踪了在酸性条件下 MF 核的分解过程^[9], 发现了核分

2003-09-28 收稿, 2003-11-06 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 90206006)

E-mail: cygao@mail.hz.zj.cn

解过程中胶囊的膨胀及核分解完成后胶囊的收缩现象. 这一发现揭示了微胶囊在制备过程中, 囊壁受到了渗透压导致的三维方向的张力作用. 能量转移(FRET)^[9]发现微胶囊的原始组装结构基本被保留下来. 单粒子散射(SPLS)测量发现, 微胶囊质量中含有约4%的MF降解产物. MF的残留会影响微胶囊的许多物理性能, 如渗透和沉积等. 高长有等采用外加渗透压导致微胶囊变形的客观方法来区分完好与破损的微胶囊, 系统研究了MF核分解条件对所得微胶囊完整性的影响^[10].

图2是组装了4.5双层PSS/PAH的MF微粒和去除MF后得到的中空微胶囊的扫描电子显微镜(SEM)(图2(a))、原子力显微镜(AFM)(图2(c))和CLSM(图2(d))图像. 去核的方法取决于所用核的性质, 如MF通常可在 $\text{pH} \leq 1.7$ 的酸性条件下分解或被二甲基甲酰胺溶解脱除; 红细胞可用次氯酸钠将细胞内容物氧化脱除; 二氧化硅颗粒可用氢氟酸腐蚀去掉等. 图2表明, 作为模板的MF可被成功脱除, 得到中空微胶囊. 该微胶囊在溶液中能够良好分散, 为后续有许多应用打下了基础.

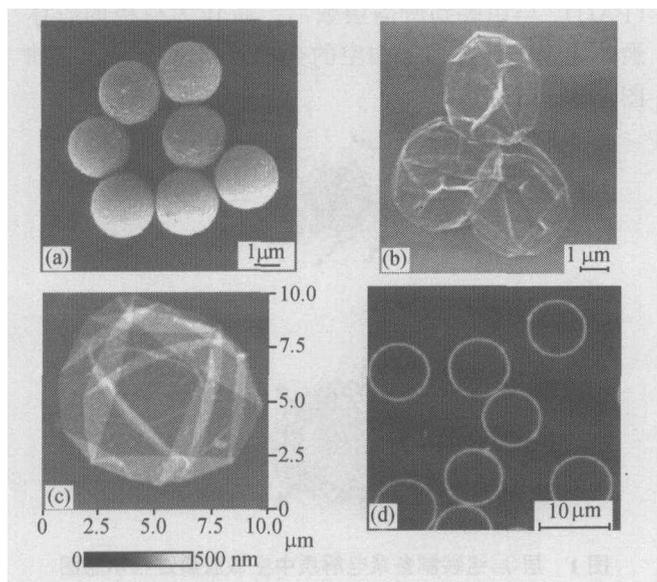


图2 (a)表面组装(PSS/PAH)₄PSS后的MF胶体颗粒, (b)脱除MF后得到的中空微胶囊的SEM图像, (c)(PSS/PAH)₅微胶囊的AFM图像, (d)(PSS/PAH)₅微胶囊在溶液中的CLSM图像

图(b)和图(c)中, 干燥后出现的褶皱是微胶囊的典型形态结构

多种具有电荷的物质, 如合成的与天然的聚电

解质, 纳米微粒、蛋白质、酶、磷脂、染料、金属离子和表面活性剂等, 都可被组装到中空微胶囊中, 从而制备出具有多种性能与功能的微胶囊. 该微胶囊在材料科学、生命科学、电子科学与技术、生物医学工程学、催化科学与技术等许多领域都具有潜在的重要的应用价值.

2 层层组装聚电解质中空微胶囊的基本物理性能

迄今为止, 已采用多种方法如 CLSM, AFM, SPLS, SEM, 透射电子显微镜(TEM), 石英微天平(QCM), 核磁, 荧光, 红外和元素分析等研究了微胶囊的各种性能, 如机械性能、热性能、表面形态结构、电性能、光性能、渗透性能与包埋性能等.

2.1 微胶囊的机械性能

高长有等采用渗透压引起的完好微胶囊的变形测定出临界压力, 再根据微胶囊的几何参数计算出囊壁材料的弹性模量^[11]. 其原理是在微胶囊溶液中混入PSS, 随着溶液中PSS浓度的增大, 渗透压变大, 在临界点时微胶囊出现内凹变形. 由于微胶囊存在多分散性, 每个具体微胶囊的临界渗透压存在差异, 因此通过测定一批微胶囊在一系列不同浓度聚电解质溶液中的变形比率, 然后求得该批微胶囊发生变形的临界渗透压. 由此计算得到囊壁(PSS/PAH多层膜)的弹性模量为500~750 MPa. 该值与聚碳酸酯(490 MPa)、中等抗冲强度的ABS(500~580 MPa)和浇铸型环氧树脂(650~780 MPa)相当. 说明由大量离子键交联形成的PSS/PAH聚电解质膜具有相当高的机械强度.

2.2 微胶囊的热稳定性

作为反应或包埋/释放的载体, 微胶囊在许多场合下都要经受高温的处理, 因此其结构对温度的响应性能非常重要. 微胶囊的热稳定性体现在其宏观形状的保持能力, 尺寸及壁厚的变化, 甚至破坏. 微胶囊对热的反应与其囊壁组成密切相关, 而模板的影响较小. PSS/PAH微胶囊的尺寸与模板的尺寸一致; 在热处理后, 表现为尺寸的减小与囊壁厚度的增大, 而其宏观形状基本不变^[12]. 而 PSS/

聚二烯丙基甲基铵盐酸盐(PDADMAC)微胶囊在去核过程引起的膨胀不能完全被消除,其尺寸总是大于模板;在热处理后体积发生进一步膨胀^[13~15]. PSS/PDADMAC微胶囊对离子强度的响应也表现出与PSS/PAH微胶囊不同的性能.无论是小分子电解质还是聚电解质都能导致PSS/PAH微胶囊渗透性能的改变及内凹变形,但没有观察到明显的体积收缩现象.然而,即使将PSS/PDADMAC微胶囊与弱电离性能的蛋白(白蛋白)混合,也会导致其直径变小.而在强电解质NaCl溶液中,则降低的程度更大;若同时热处理,则进一步降低.

2.3 微胶囊的电性能

层状自组装微胶囊的囊壁是由带电络合物形成的,因此也呈一定的导电性能. Georgieva等采用电致旋转(electrorotation)技术定量研究了微胶囊的电性能^[16].通过改变本体溶液的电导率估算出红细胞为模板的(PAH/PSS)₅微胶囊的电导率约为1 S/m,大约与0.1 mol/L的NaCl溶液相当.该电导率的产生说明在聚电解质多层膜中存在自由的未缔合的离子,其含量约为10%左右.反离子在多孔聚电解质多层膜中的迁移产生了导电性.需说明的是,因去核时的强氧化作用,红细胞为模板的微胶囊的囊壁结构与组装时存在非常大的差异,因此该电导率不能与PAH/PSS多层膜直接对应.聚电解质微胶囊外可复合一层磷脂双分子层,以调控微胶囊的性能如渗透性能和电性能^[17,18].

2.4 微胶囊的表面形态结构

Leporatti等采用原子力(或称扫描力)显微镜研究了PSS/PAH微胶囊在干燥后的表面形态结构.水溶液中球状PSS/PAH微胶囊干燥后形成了多角形结构,其间分布着非常有特征的皱褶^[19].高长有等对PSS/PDADMAC微胶囊的研究发现,干燥后的微胶囊呈现出相似的多角形结构,但表面更粗糙^[15].通过进一步的放大可观察到颗粒状微区结构.其粗糙度和微区尺寸比PSS/PAH微胶囊大.

2.5 微胶囊的渗透调控性能

囊壁的通透性能对微胶囊的物质包埋与释放至关重要.除与囊壁的化学组成相关外,目前已发现pH、盐和磷脂复合等都可改变微胶囊的通透性能.

迄今最常用的囊壁组成材料是强聚电解质PSS和弱聚电解质PAH. Shiratori等发现对于弱聚电解质,pH值的改变会影响到质子化与去质子化的程度,因而分子链上的电荷密度也会改变^[20].分子间不同的排斥状态决定了聚电解质在囊壁中的伸展或收缩状态,进而影响到囊壁的通透性能. Sukhorukov等观察到了pH对PSS/PAH微胶囊通透性能的调节现象^[21]. Ibarz等发现PSS/PAH微胶囊在不同离子强度的溶液中表现出不同的通透性能^[22].以红细胞为模板或其他囊壁组成的微胶囊也观察到了同样的现象,只是发生转变的盐浓度不同^[23].离子强度对通透性的调节机理尚不清楚,推测是盐浓度的提高使离子键强度降低,聚电解质沿囊壁方向产生收缩,已存在的微孔扩大因而使通透性提高.此外,溶剂对囊壁的通透性能也具有一定的调控能力^[24].

3 物质的自沉积包埋

与其他微胶囊技术不同,模板制备的微胶囊是中空的.因此,发挥该微胶囊特殊结构特征的一个重要技术问题是如何将物质包埋到预先形成的微胶囊中.目前已经有多种方法可以实现物质的包埋,如可控沉淀、内层溶解、囊内聚合、自沉积法和膨胀-收缩包埋^[25~29]等.其中自沉积技术选择性和效率高,适用范围广,尤其适用于水溶性物质的包埋,这为微胶囊的应用创造了良好条件.

高长有等^[30,31]首次发现制备后经较长时间存放的以MF为模板的微胶囊,无论其囊壁组成是PSS/PAH还是PSS/PDADMAC,当与水溶性物质如罗丹明混合后,这些水溶性物质会自发地在微胶囊内形成高浓度富集区(图3).这种自发沉积对于以MF为模板的完整微胶囊普遍存在,与微胶囊的尺寸、壁厚和囊壁组成等无关,而与所用的核紧密相关.以碳酸镉或荧光素二乙酸酯为核观察不到这种现象;存在明显破损的微胶囊也没有自沉积.多种水溶性物质,无论是小分子还是高分子,如罗丹明、维生素B₂、PAH和葡聚糖等都可自发沉积.电中性或荷正电物质具有特别明显的自沉积现象,而荷负电的则相对较弱.

自沉积的机理被认为是囊内存在某种形式的带电物质,且最可能是PSS和MF降解产物形成的带电络合物,即PSS/MF. PSS来源于第一层聚阴离

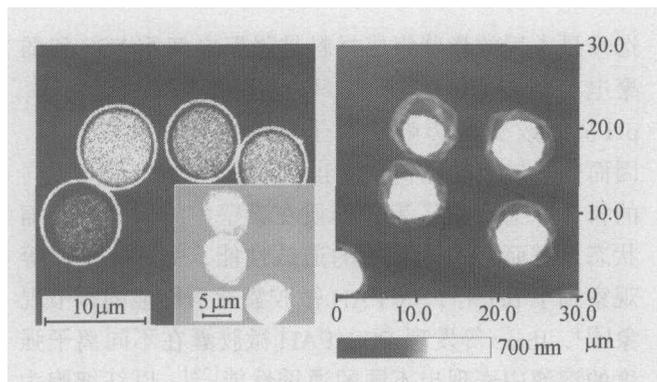


图3 (a)沉积了Rd6G的微胶囊的CLSM图像(嵌入的图为干燥后图像), (b)沉积有白蛋白的微胶囊的原子力显微镜图像

子的部分解离。ζ-电位测试由PSS和MF降解产物形成的模型PSS/MF络合物,证明是带负电的 $[-30.4 \pm 0.9] \text{mV}$ 。PSS/MF络合物的存在提供了额外的驱动力来诱导水溶性物质,尤其是带正电的物质在微胶囊内的自发沉积,且沉积的物质一定是以聚集或络合物的形式存在,这样仍能保证囊内的真实浓度低于囊外。应用光漂白后恢复(FRAP)技术证明了囊内的沉积物不是处于自由状态。

利用自沉积技术可将多种水溶性物质如蛋白、酶、DNA、多肽、维生素、纳米微粒及各种药物自发包埋在微胶囊内。例如,沉积的辣根过氧化物酶(HRP)比自由的HRP具有更好的耐温性能、耐溶剂性能和时间稳定性^[31]。抗癌药物柔红霉素、顺铂、卡铂和阿霉素等同样能够被高效率地沉积在胶囊内,胶囊内外药物的比例可达50:1。沉积的药物在生理条件下又能够被缓慢释放出来。将沉积了药物的胶囊与癌细胞共培养发现,癌细胞(HL-60)被逐渐杀死(凋亡)。

4 囊壁的功能化调控

通过改变囊壁的结构、组成或引入功能性组分,可获得具有各种功能的微胶囊。如Dai等将纳米SiO₂通过特殊的组装形式获得囊壁高度疏松和壳-壳结构的微胶囊^[32]。Sun等采用张希等介绍的紫外光交联技术^[33,34],将离子键转化为共价键,获得了一种新的交联型微胶囊^[35]。与交联结构相对照的是易溶解微胶囊。高长等有采用聚丙烯酸(PAA)和PAH为聚电解质,以MF胶体颗粒为模板,利用核

分解速率快于囊壁溶解速率的差异,制备了在酸性条件下能够分解和产生特殊纳米孔洞的微胶囊^[36]。再通过适度的交联则可对微胶囊的通透性能进行调节。这种特性对于微胶囊在药物包埋与控制释放、模型化细胞研究等领域非常重要。Dai等将几种具有合适激发和荧光发射波长的染料组合到囊壁上,得到了具有多步能量转移功能的微胶囊^[37]。Jung等将光致变色的偶氮离子聚合物(PAZ-6)与PSS组装,通过PAZ-6的光致E-Z-E循环变化,得到了变色的微胶囊^[38]。Ag⁺也可组装到囊壁上,光照后将银还原并沉积到囊壁上^[39]。将表面经过修饰的铁磁性微粒组装到囊壁上^[40],则可通过外加磁场来控制微胶囊的运动,因此也有利于包埋物的定位传输。将磷脂双分子层组装到微胶囊表面,则可模拟细胞的膜结构,进而可研究磷脂膜在外界条件影响下的结构和功能变化。进一步的研究可将蛋白嵌入到磷脂膜中,以模拟细胞膜的功能。

5 现状与展望

层-层组装微胶囊的研究工作在外国主要集中于德国马普胶体与界面研究所(MPIKG)Möhwald的课题组、德国莱比锡大学的Donath课题组和澳大利亚墨尔本大学的Caruso课题组,后两者都曾在MPIKG任课题组负责人。意大利热那亚大学的Di-aspro课题组也开展了这方面的研究工作^[41]。欧盟和德国为此启动了多个项目来促进该微胶囊的研究,投入的总资金近亿欧元。国内浙江大学沈家骢领导的课题组从1999年开始与Möhwald合作研究层状自组装微胶囊,在微胶囊的制备技术、微结构、基本物理性能和物质的包埋与释放方面取得了创新性研究成果,首次发现了水溶性物质的自沉积现象,制备了弱聚电解质微胶囊^[9-15, 29, 31, 36],有力地促进该微胶囊的基础研究与应用。

基于层状自组装的聚电解质中空微胶囊以其结构的易调控性、尺寸与壁厚的均一性及与其他多种功能物质的易整合等特性,从其方法学的建立到现在的短短几年时间里已得到了飞速发展,在基础研究方面取得了丰硕的成果,在应用开发方面也初露端倪。LBL中空微胶囊提供了一个强大的技术平台,通过与各个学科的结合必将将从目前的以基础研究为主向产业化过渡。未来的发展潜力巨大。

参 考 文 献

- 1 Discher B M, et al. Polymersomes: Tough vesicles made from diblock copolymers. *Sci*, 1999, 284: 1143
- 2 Wong M S, et al. Assembly of nanoparticles into hollow spheres using block copolypeptides. *Nano Letters*, 2002, 2(6): 583
- 3 Iler R K. Multilayers of colloidal particles. *J Colloid Interface Sci*, 1966, 21: 569
- 4 Keller S W, et al. Photoinduced charge separation in multilayer thin films grown by sequential adsorption of polyelectrolytes. *J Am Chem Soc*, 1995, 117: 12879
- 5 Decher G. Fuzzy nanoassemblies: Toward layered polymeric multicomposites. *Sci*, 1997, 277: 1232
- 6 Chen Y T, et al. Preparation of novel core-shell nanocomposite particles by controlled polymer bridging. *J Am Chem Soc*, 1998, 120: 140
- 7 Donath E, et al. Novel hollow polymer shells by colloid-templated assembly of polyelectrolytes. *Angew Chem Inter Ed*, 1998, 37: 2201
- 8 Caruso F, et al. Nanoengineering of inorganic and hybrid hollow spheres by colloidal templating. *Sci*, 1998, 282: 1111
- 9 Gao C Y, et al. The Decomposition process of melamine formaldehyde cores: The key step in fabrication of ultrathin polyelectrolyte multilayer capsules. *Macromol Mater Eng*, 2001, 286(6): 355
- 10 Gao C Y, et al. Melamine formaldehyde core decomposition as the key step controlling capsule integrity: Optimizing the polyelectrolyte capsule fabrication. *Macromol Chem Phys*, 2002, 203 (7): 953
- 11 Gao C, et al. Elasticity of hollow polyelectrolyte capsules prepared by the layer-by-layer technique. *Eur Phys J E*, 2001, 5: 21
- 12 Loporatti S, et al. Shrinking of ultrathin polyelectrolyte multilayer capsules upon annealing: A confocal laser scanning microscopy and scanning force microscopy study. *Eur Phys J E*, 2001, 5: 13
- 13 Gao C Y, et al. Swelling and shrinking of polyelectrolyte microcapsules in response to changes in temperature and ionic strength. *Chem Eur J*, 2003, 9: 915
- 14 Gao C Y, et al. Stability and mechanical properties of polyelectrolyte capsules obtained by stepwise assembly of poly(styrenesulfonate sodium salt) and poly(diallyldimethyl ammonium) chloride onto melamine resin particles. *Langmuir*, 2001, 17: 3491
- 15 Gao C Y, et al. Surface texture of poly(styrenesulfonate sodium salt) and poly(diallyldimethylammonium chloride) micro-sized multilayer capsules: A scanning force and confocal microscopy study. *J Phys Chem B*, 2000, 104 (30): 7144
- 16 Georgieva R, et al. Conductance and capacitance of polyelectrolyte and lipid-polyelectrolyte composite capsules as measured by electrorotation. *Langmuir*, 2000, 16: 7075
- 17 Moya S, et al. Lipid coating on polyelectrolyte surface modified colloidal particles and polyelectrolyte capsules. *Macromolecules*, 2000, 33: 4538
- 18 Hanai T, et al. The influence of lipid composition and of some adsorbed proteins on the capacitance of black hydrocarbon membranes. *J Theor Biology*, 1965, 9: 422
- 19 Loporatti S, et al. Scanning force microscopy Investigation of polyelectrolyte nano- and microcapsule wall texture. *Langmuir*, 2000, 16: 4059
- 20 Shiratori S S, et al. pH-Dependent thickness behavior of sequentially adsorbed layers of weak polyelectrolytes. *Macromolecules*, 2000, 33: 4213
- 21 Sukhorukov, G B, et al. pH-Controlled macromolecule encapsulation in and release from polyelectrolyte multilayer nanocapsules. *Macromol Rapid Comm*, 2001, 22: 44
- 22 Ibarz G, et al. Smart micro- and nanocontainers for storage, transport, and release. *Adv Mater*, 2001, 13(17): 1324
- 23 Georgieva R, et al. Permeation of macromolecules into polyelectrolyte microcapsules. *Biomacromolecules*, 2002, 3: 517
- 24 Lvov Y, et al. Urease encapsulation in nanoorganized microshells. *Nano Letters*, 2001, 1(3): 125
- 25 Sukhorukov G, et al. Controlled precipitation of dyes into hollow polyelectrolyte capsules based on colloids and biocolloids. *Adv Mater*, 2000, 12(2): 112
- 26 Radtchenko I L, et al. Assembly of alternated multivalent ion/polyelectrolyte layers on colloidal particles. Stability of the multilayers and encapsulation of macromolecules into polyelectrolyte capsules. *J Colloid Interface Sci*, 2000, 230: 272
- 27 Gaponik N, et al. Toward encoding combinatorial libraries: Charge-driven microencapsulation of semiconductor nanocrystals luminescing in the visible and near IR. *Adv Mater*, 2002, 14(12): 879
- 28 Dähne L, et al. Fabrication of micro reaction cages with tailored properties. *J Am Chem Soc*, 2001, 123: 5431
- 29 Gao C Y, et al. Enhanced biomacromolecule encapsulation by swelling and shrinking procedures. *Chem Phys Chem*, 2004, 5 (1): 116
- 30 Gao C Y, et al. Spontaneous deposition of water-soluble substances into microcapsules: Phenomenon, mechanism, and application. *Angew Chem Inter Ed*, 2002, 41(20): 3789
- 31 Gao C Y, et al. Spontaneous deposition of horseradish peroxidase into polyelectrolyte multilayer capsules to improve its activity and stability. *Chem Comm*, 2002, (17): 1928
- 32 Dai Z F, et al. Novel capsules with high stability and controlled permeability by hierarchic templating. *Angew Chem Inter Ed*, 2002, 41(21): 4019
- 33 Sun J Q, et al. Fabrication of a covalently attached multilayer via photolysis of layer-by-layer self-assembled films containing diazo-Resins. *Chem Comm*, 1998: 1853
- 34 Sun J Q, et al. Covalently attached multilayer assemblies of diazo-resins and porphyrins. *Chem Comm*, 1999: 693

- 35 Pastoriza-Santos I, et al. Core-shell colloids and hollow polyelectrolyte capsules based on diazoresins. *Adv Functional Mater*, 2001, 11(2): 122
- 36 Gao C Y, et al. Soluble microcapsules assembled stepwise from weak polyelectrolytes using acid decomposable cores. *Adv Mater*, 2003, 15(11): 930
- 37 Dai Z F, et al. Mimicking photosynthetic two-step energy transfer in cyanine triads assembled into capsules. *Langmuir*, 2002, 18: 4553
- 38 Jung B D, et al. Photochromic hollow shells: Photoisomerization of azobenzene polyionene in solution, in multilayer assemblies on planar and spherical surfaces. *Colloids Surfaces A*, 2002, 198-200: 483
- 39 Antipov A A, et al. Fabrication of a novel type of metallized colloids and hollow capsules. *Langmuir*, 2002, 18 (17): 6687
- 40 Voigt A, et al. Novel polyelectrolyte multilayer micro- and nanocapsules as magnetic carriers. *J Magnetism Magnetic Mater*, 2001, 225: 59
- 41 Diaspro A, et al. Single living cell encapsulation in nano-organized polyelectrolyte shells. *Langmuir*, 2002, 18, 5047

我国学者对超分子自组装形成宏观管有新发现

2004年1月2日出版的美国《Science》杂志(2004, 303: 65~67)发表了上海交通大学化学化工学院颜德岳教授及其博士生周永丰、侯健的研究论文《宏观尺度多壁管的超分子自组装》。该论文报道了由一类新型的不规则结构超支化共聚物自组装得到了长度达厘米级、直径达毫米级、单臂厚度为400 nm的多壁管,将自发超分子自组装研究领域拓展到了宏观尺度。

这项研究成果是在国家自然科学基金资助下颜德岳教授课题组锲而不舍的努力而取得的,得到了自组装形貌更为完美的宏观尺度多壁管,并经多次重复,都重现了该自组装现象。在此基础上提出了令人信服的宏观自组装机理。他们提出并证明:多壁管管臂实际上是一中空膜结构,具有非均相层状结构,由疏水微区有序层和亲水微区无序层交替层叠而形成。多壁管的管臂膜外呈右手螺旋结构,内层呈左手螺旋结构。

他们所研究的超支化高分子是球形高分子,其每一维的形状类似于树,其核为超支化疏水性,其壳为多臂亲水性。

超分子自组装是近年来倍受重视的国际前沿课题。超分子自组装是分子通过分子间相互作用形成具有有序结构的聚集体。它往往表现出单个分子或低级分子聚集体所不具有的特性与功能。因此,研究不同层次有序分子聚集体内和分子聚集体之间的弱相互作用是如何通过协同效应组装形成稳定的有序高级结构;弄清分子结构与分子聚集体高级结构之间的关系和聚集体结构与性能的关系,揭示物质多层次构筑的内在规律,揭示了一些新的科学现象并提出了新的理论计算方法,能对信息、能源,生命,环境和材料科学中涉及分子以上层次的问题的认识产生飞跃。超分子自组装的研究首先从生物体系的研究受到启发:生命体系中高分子的高级有序结构对其生物活性与功能起着非常重要的作用,由许多弱相互作用点共同作用使得很复杂的生物高分子形成严格一致的分子形状和尺寸,正是这种弱相互作用对高分子三维构筑的精确控制,才使得生命过程成为可能并得以实现,而这个过程就是超分子自组装过程。前人的研究主要是通过具有规整结构的构筑单元通过超分子自组装获得纳米或微米尺度的有序聚集体。而有序体尺度越大,越难以实现高级有序结构。

这项研究结果所展示的从高分子直接自组装得到宏观有序体的过程,不仅与高分子新结构、新材料有关,而且与生命体的形成过程有关,为高分子科学、材料科学和生命起源等方面的研究提供了新的启示。另外,该工作开创了不规则结构超支化共聚物自组装的先河,为超支化聚合物和超分子自组装研究开辟了新的研究方向,同时提出和证明了宏观超分子自组装机理,不仅阐明了所观察到的实验现象,而且对其他不规则结构聚合物的自组装具有指导作用。

(董建华)