

# 磁性荧光多功能复合微球的制备和应用

闫翠勤\*

(天津大学药物科学与技术学院,天津 300072)

**摘要:**综述了荧光磁性复合微球主要的结构类型、制备方法及应用领域。将制备途径归纳为一步聚合法和分步修饰法2大类,评述了2种途径的优缺点。提出了当前研究工作中仍旧存在的问题,并对今后的研究发展方向进行了展望。

**关键词:**荧光;磁性;复合微球;制备

**中图分类号:** TB34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2015)09-0053-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2015.09.012

## The preparation and applications of magnetic and fluorescent multi-functional composite microspheres

YAN Cui-qin\*

(School of Pharmaceutical Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** This paper reviews the main structural types, preparation methods and applications of fluorescent magnetic composite microspheres. We generalized the preparation approaches into "a step polymerization method" and "stepwise modification method", and review the advantages and disadvantages of these two approaches. In addition, current research work presented problems still exist, and the developments of future research directions are discussed.

**Key words:** fluorescent; magnetic; composite microspheres; preparation

在实际应用中,单一功能的纳/微米微球无法应对更为复杂的应用要求,不可避免地受到一定限制。多功能复合微球与单一实体相比具有更加多元化的性能,特别是荧光磁性复合微球同时具有磁性和荧光,可在外加磁场下发生移动并且利用其荧光信号实现示踪标记,已经成为生物、医学和环境科学等领域的研究热点,在生物成像、靶向给药、生物化学检测、细胞筛选分离等方面有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。正因为这些重要的应用,使得如何制备磁响应性理想,荧光强度高的双功能复合微球具有重要的意义。本文中系统地综述了荧光磁性复合微球的结构分类、制备方法及其在应用方面的进展,指出了目前该领域存在的不足,并对今后的研究热点进行了预测。

### 1 荧光磁性复合微球的结构分类

磁性荧光复合微球的研究尚属发展阶段,分类困难,尚无定论。按照微球的结构将其分为以下4种类型(图1):荧光实体和磁性粒子均匀地呈弥散状包埋在载体材料中,如图1(a),通常是聚合物或硅胶基质;内核为荧光实体,外壳包覆磁性粒子,如图1(b);内核为磁性粒子,外壳包覆荧光实体,如图1(c);内核为磁性粒子,以化学键的形式键合荧光实体,如图1(d)。磁性纳米颗粒与荧光实体(有机染料、量子点、稀土配合物)之间距离过近可能发生

电子能量转移,而使荧光淬灭<sup>[6]</sup>。所以在制备复合微球之前要充分考虑这点,设计合理的微球结构。为保证荧光强度,就要保证足够的荧光实体装载量,图1(a)和图1(b)是设计荧光磁性微球的首选结构类型。

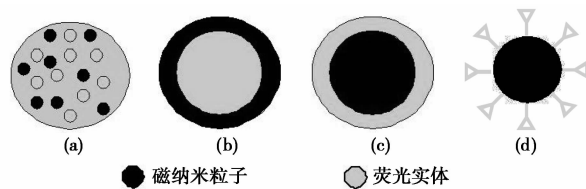


图1 荧光磁性复合微球主要结构类型

### 2 荧光磁性复合微球的制备方法

磁性荧光微球的制备方法有很多,本文中按其功能化的过程将其归纳为2大类,一步聚合法和分步修饰法。

#### 2.1 一步聚合法

一步聚合过程是事先合成粒径均一且足够小的荧光实体和磁纳米粒子,再在聚合物或硅胶微球的形成过程中,掺杂在反应体系中,最终包埋在基质中,所得微球结构如图1(a)。本课题组冉晓华<sup>[7]</sup>在无皂乳液聚合制备微球的过程中,加入KPS、St的同时,一并加入油溶性磁流体和疏水性荧光染料,制备了球形圆整、粒径为几百纳米的双功能化聚合物微

球,但单分散性较差。Yi 等<sup>[8]</sup>使用反相微乳液的方法,较好地控制了粒径的均一性,选用聚氧乙烯酚醚和 Igepal CO-520 作为表面活性剂,将 CdSe 量子点和  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 磁纳米粒子分散在环己烷中作为油相,氨水溶液作为水相,通过超声乳化形成稳定的 W/O 型微乳液,然后加入正硅酸乙酯 (TEOS),水解 48 h 后,即可获得 SiO<sub>2</sub> 包覆的磁性荧光复合微球。Shi 等<sup>[9]</sup>以 CTAB 作为模板,形成一个花束结构,油酸修饰的磁流体和稀土铕配合物在静电作用下吸附到 CTAB 模板上,TEOS 在尿素作用下水解-聚合为纳米硅粒子有序地排列在模板的可用空间,最后高温煅烧,得到了具有多孔结构的荧光磁性纳米硅球 (如图 2)。

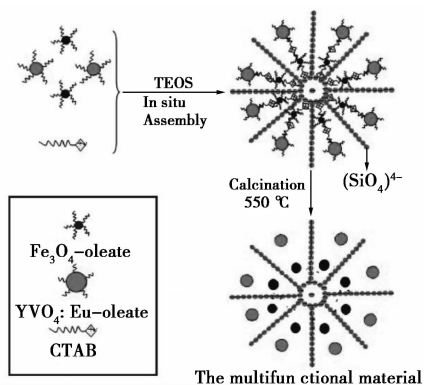


图 2 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub>:Eu<sup>3+</sup>@SiO<sub>2</sub> 微球制备示意图

一步聚合法的优点是操作过程相对简单,但是由于磁性粒子与荧光物质的存在打破聚合体系平衡,使得聚合产生微球的粒径难以控制、分布较宽,形貌较差,磁性粒子与荧光物质的包覆不均匀且含量低<sup>[10]</sup>。

## 2.2 分步修饰法

分步修饰法是制备磁性荧光双功能化微球最常见、最有效的方法,通常是对现有的磁性微球或荧光微球的制备方法进一步修饰。纳米级的微球通常以 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 为磁核,再进行荧光修饰,而亚微米、微米级荧光磁性微球则需先合成单分散、易修饰的微球为基球,而后再在这个空白载体上分步修饰荧光和磁性。键合法的荧光物质装载量一般较低,种晶生长法往往是量子点与磁性纳米颗粒直接连接,导致两者之间相互影响增大,所以 2 种方法所得复合颗粒整体的荧光性能较差,在此不再赘述。下面重点介绍以下几种方法。

### 2.2.1 原位合成法

原位合成法是指首先制备适当的载体微球,载体微球的表面或内部需要富含羧基、氨基等强极性

基团,可与金属离子之间形成离子键、络合配位键等强烈相互作用,然后加入催化剂通过化学反应在聚合物表面或内部生成纳米级的功能性材料。

Jiang 等<sup>[11]</sup>以 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 粒子作为磁核,为了防止荧光淬灭,提供配合金属 Zn 的-COOH,首先在其表面修饰柠檬酸,加入 Zn(Ac)<sub>2</sub>,24 h 后加入硫代乙酰胺,即在磁球表面生成了量子点 ZnS,成功制备得到 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnS。

原位合成法优点在于磁化或荧光化过程中,微球的粒径和粒径分布不变,可保持基球的良好单分散性,且每个微球磁性能或荧光性能保持一致,其局限性在于要求载体微球表面或内部必须含有特定的功能基团或易修饰得到,这点限制了它的适用范围。

### 2.2.2 层层自组装

层层自组装法制备磁性荧光微球主要是磁纳米粒子和荧光粒子进行表面改性携带电荷,通过静电作用交替吸附在带电荷的模板微球表面形成功能化涂层。

Hong 等<sup>[12]</sup>利用己二酸修饰磁纳米粒子使其表面带负电,在静电相互作用下,带正电的 PAH 和带负电的 PSS 交替沉积到磁性纳米颗粒的表面,聚合电解质层提供带正电荷表面进而吸附带负电荷的 CdTe 完成磁球的荧光化。该法所得复合微球荧光强度随着聚合电解质隔层厚度的增加而增强,当达到 21 层时荧光强度取得理想效果,此时聚合物层对磁性的屏蔽作用不容忽视。近年来,Wang 等<sup>[13]</sup>(如图 3)和 Ren 等<sup>[14]</sup>尝试在磁核与量子点或者稀土配合物之间使用碳膜作为新的隔层材料,碳膜相对传统的聚合物和硅层可以有效阻隔磁核与荧光实体,减小荧光的淬灭程度。

层层自组装法对反应物质和基体材料的限制较少,适应性很强,反应条件较温和,但存在操作相对烦琐的缺点。

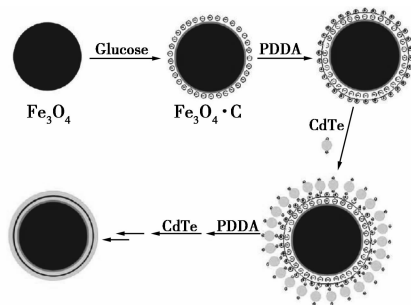


图 3 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@C@CdTe 核/壳型微球的制备示意图

### 2.2.3 溶剂溶胀法

溶剂溶胀法是指微球被氯仿等有机溶剂溶胀,然后将纳米荧光或磁性材料加入分散体系,最后再将溶剂挥发使得微球恢复初始结构,从而使纳米微粒进入微球内部的方法。

Gao 等<sup>[15]</sup>以正丁醇为溶剂,其溶胀作用使得 QDs 和 MNPs 纳米粒子渗透至微球的内部固定在多孔微球网格或位点上,并在外面包覆高分子层使得纳米粒子能够稳定在微球内部,所得微球具有很高的荧光亮度和磁性能。Dong 等<sup>[16]</sup>将磁性氨基化 PGMA 微球用  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  (体积分数 80%) 和乙醇 (体积分数 20%) 混合液溶胀 1 h,加入适量异硫氰酸荧光素 (FITC) 持续振荡一段时间后溶剂挥发除尽,离心洗涤除去多余染料,成功制得氨基化磁性荧光多功能微球。

溶剂溶胀法制备复合微球的重现性好,成本低,能够保持微球的规整度和单分散性。但要求所修饰的载体微球有溶胀的性能,并且也需要有合适的溶胀剂使其溶胀不溶解,溶胀剂易通过自然挥发或者旋蒸等手段去除。

### 2.2.4 包覆法

包覆法是目前为止最为成熟的一种制备复合颗粒的方法,通常是以  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁球为内核,然后将荧光实体包覆在外壳从而形成核/壳结构复合微球。 $\text{SiO}_2$  和聚合物作为外壳的首选材料具备以下特点:结构稳定,生物相容性好,易表面修饰,以便与特定的目标分子偶联。

Stober 法是包覆硅层的有效方法,其原理是将种子微球分散在一定比例的醇/水溶液中,用氨水催化 TEOS 的水解和缩合,生成  $\text{SiO}_2$  包裹在种球表面。Deng 等<sup>[17]</sup>将 FITC 与氨基硅烷化试剂偶联形成的 APS-FITC 在 Stober 的包覆过程中与 TEOS 共水解、缩聚在磁核的表面,成功包覆了荧光硅层(如图 4)。

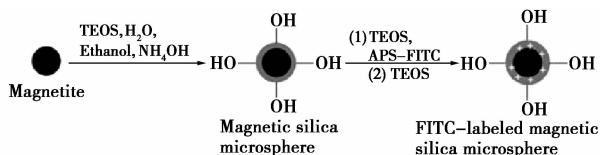


图 4 FITC 标记的磁性微球的制备流程示意图

Tu 等<sup>[18]</sup>采用乳液聚合法制备了兼具高磁响应和荧光性能的聚合物微球。他们首先用溶胶-凝胶法对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒进行表面改性,加入 MPS 在磁核表面引入双键,提供聚合反应的位点,将乙烯基苯

基-羟乙基-二甲基氯化铵 (DVMAC) 作为配体引入到 CdTe 量子点表面,然后再加入引发剂、单体共聚成荧光磁性微球,化学键的固定作用使得量子点聚合在聚合物的壳层中(如图 5)。闫凯等<sup>[19]</sup>合成了以丙烯酸为第一配体 (AA), 邻菲罗啉 (Phen) 为第二配体,  $\text{Eu}^{3+}$  为中心离子合成的可聚合型荧光单体,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{P}(\text{St}-\text{co}-\text{GMA})$  作为种子,同样在无皂乳液聚合体系中合成了含稀土磁性荧光微球。

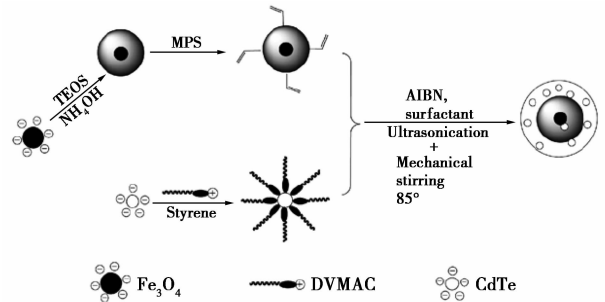


图 5 荧光磁性双功能聚苯乙烯微球的制备流程示意图

包覆法制备荧光磁性复合微球的主要优点是复合微球结构稳定,表面易进行官能团化修饰,为后续应用带来方便。然而,外壳的存在具有一定程度的屏蔽作用,进而影响复合微球的荧光性能和磁响应性。

综上,相对一步聚合法,分步修饰法以一定的单分散微球为载体,分步修饰时微球的形貌具有可控性,可以保证每个复合微球的磁性能和荧光性能一致。

## 3 荧光磁性微球的应用领域

磁性荧光复合微球兼具磁分离、荧光标记两重特性,赋予它多元化的应用潜力,已经成为生物医学领域甚至环境领域的研究热点,在生物成像、细胞筛选及分离、纳米载药系统以及生化、化学检测等方面有着广泛应用。

### 3.1 生物成像

荧光成像和磁共振成像在生物医学领域中是 2 种重要的成像技术,而磁性荧光纳米粒子可以作为离体与在体的组织、器官、细胞成像的双功能显影剂,这样同一样本的诊断就可以实现平行检测,互相佐证,可为准确诊断提供可靠依据。

Zebli 等<sup>[20]</sup>完成了一个利用磁靶向与荧光成像完美结合的实验。他们先制备了  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{CdTe}$  磁性荧光纳米粒子,随后设计了一个装置模拟血液循环系统,使用永磁铁产生的局部磁场来特异性捕获磁

性荧光纳米粒子,通过荧光显微成像观察到纳米粒子大量聚集在肺癌细胞附近并被其吞噬。此外,通过调节磁强度成功调节了癌细胞吞噬  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{CdTe}$  的程度。磁性荧光纳米粒子除了应用于离体细胞成像外还可以用于活体成像。Bridot 等<sup>[21]</sup>将 PEG 包覆的核/壳型磁性荧光纳米粒子注入裸鼠体内,通过荧光成像观察到这种粒子可以自如地在活体裸鼠的血液循环中移动,同时不会在肝脏和肺中积累。这种拥有双模态 MRI/荧光靶向成像功能的复合纳米粒子有望进一步用于癌症的诊断。

### 3.2 细胞筛选和分离

荧光磁性复合微球表面偶联某种细胞能够特异性结合的物质,便可实现特异性结合来分离纯化靶细胞。Chu 等<sup>[22]</sup>将表皮生长因子(EGF)偶联到 MPN/CdTe 表面,成功用于标记和迅速分离表皮生长因子受体(EGFR)过量表达的人乳腺癌 MDA-MB-435S 细胞。2010 年,Dong 等<sup>[16]</sup>将制备所得的磁性荧光微球通过化学键偶联叶酸,利用叶酸与癌细胞中过度表达的叶酸受体的特异性结合的性质,实现了癌细胞的荧光监测并利用磁性将癌细胞与正常细胞进行分离。

### 3.3 纳米载药系统

磁性荧光纳米载药系统通常设计为粒径 10 ~ 200 nm 的颗粒,避免了体内网状内皮系统的拦截和巨噬细胞的吞噬,它可以穿越机体中微小的毛细血管和血脑屏障,在磁场作用下定位于靶部位,由于含有荧光标记物,使得运输的整个过程得以监控。

Qiu 等<sup>[23]</sup>在合成磁性聚合物微球时,加入邻苯二甲酸铀制备了具有磁性和荧光性的 FMCPS/SMA,并将其与肝素偶联得到 FMCPS/SMA-heparin。实验证明,这种复合微球具有很好的抗凝血活性,有望成为治疗血栓的有效的靶向药物。Li 等<sup>[24]</sup>以戊二醛为交联剂,直接将超顺磁的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子、CdTe QDs 以及亲水性药物头孢拉定聚合成壳聚糖纳米胶粒,由于 pH 会影响壳聚糖的溶胀性和渗透性,所以这种载药系统在不同 pH 环境下会有不同的药物释放行为,进而达到释药可控的目的。

### 3.4 生物和化学检测

磁性荧光纳米粒子与免疫分析相结合构建的纳米免疫复合体系,可利用其磁性组分实现生物分子的分离和富集,而同时利用荧光标记物实现对生物分子超灵敏的定量分析。同理,磁性荧光纳米粒子也常用于识别和定量 DNA 的特异性序列。Dressman 等<sup>[25]</sup>将荧光磁性颗粒直接与体内细胞中的

DNA 结合来识别和定量分析已经发生突变的 DNA 片段,这样通过检测胎儿少量血液细胞,就可以诊断胎儿是否患有遗传缺陷或其他疾病。

除了应用于生物学领域的检测外,近年来也有不少科研工作者将其应用于环境中的重金属离子检测。Wang 等<sup>[26]</sup>制备了 TFIC-MNPs 荧光传感器,用  $\beta$ -CD 稳定罗丹明的环状结构使其荧光淬灭,加入  $\text{Hg}^{2+}$  会使罗丹明的螺内酰胺发生开环反应,出现荧光的“turn-on”现象,利用这一原理可以高灵敏、高选择性地检测水溶液中的  $\text{Hg}^{2+}$ 。此外,其磁性能使重复利用成为可能。

## 4 结论及展望

磁性荧光复合微球作为新型的功能材料,集标记、分离和检测等功能为一体,在生物、医学、环境领域有着广泛的应用前景。但是,其研究仍处于起步阶段,很多问题亟待解决。如何简化制备过程获得真正单分散性、稳定且不团聚、生物相容性好、无毒性的磁性荧光复合微球仍是研究重点。此外,将荧光磁性复合材料与生物靶向配体、温敏、pH 敏感、光敏等其他功能性材料结合也会加强其应用性能。例如,Kojima<sup>[27]</sup>将卟啉染料成功引入纳米复合材料,卟啉染料光照条件下可将  $\text{O}_2$  转化成单线态氧,当单线态氧在细胞内产生时,能够促进化学反应,最终导致细胞凋亡,这样一种复合材料使双模态 MRI/荧光成像与光动力疗法联合成为可能。可以预测,更加多元化的荧光磁性复合材料也将会成为广大科研工作者的研究热点。

### 参考文献

- [1] Gaponik N, Radtchenko I L, Sukhorukov G B, *et al.* Luminescent polymer microcapsules addressable by a magnetic field[J]. *Langmuir*, 2004, 20(4): 1449-1452.
- [2] Gao J, Zhang W, Huang P, *et al.* Intracellular spatial control of fluorescent magnetic nanoparticles[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(12): 3710-3711.
- [3] Mandal S K, Lequeux N, Rotenberg B, *et al.* Encapsulation of magnetic and fluorescent nanoparticles in emulsion droplets[J]. *Langmuir*, 2005, 21(9): 4175-4179.
- [4] Kas R, Sevinc E, Topal U, *et al.* A universal method for the preparation of magnetic and luminescent hybrid nanoparticles[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(17): 7758-7766.
- [5] Ettenauer M, Posniecek T, Brandl M, *et al.* Magnetic fluorescent microparticles as markers for particle transfer in extracorporeal blood purification[J]. *Biomacromolecules*, 2007, 8(12): 3693-3696.
- [6] Sathe T R, Agrawal A, Nie S. Mesoporous silica beads embedded

with semiconductor quantum dots and iron oxide nanocrystals; Dual-function microcarriers for optical encoding and magnetic separation [J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(16): 5627–5632.

- [7] 冉晓华. 功能化聚合物微球的制备及其在转基因检测中的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [8] Yi D K, Selvan S T, Lee S S, *et al.* Silica-coated nanocomposites of magnetic nanoparticles and quantum dots [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(14): 4990–4991.
- [9] Shi J, Ren X, Tong L, *et al.* In situ assembly of monodisperse, multi-functional silica microspheres embedded with magnetic and fluorescent nanoparticles and their application in adsorption of methylene blue [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(42): 18642–18648.
- [10] Jańczewski D, Zhang Y, Das G K, *et al.* Bimodal magnetic-fluorescent probes for bioimaging [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2011, 74(7): 563–576.
- [11] Jiang W, Chen X, Wu J, *et al.* Synthesis and evaluation of fluorescent magnetic composites as targeted drug delivery carriers [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(3): 1237–1242.
- [12] Hong X, Li J, Wang M, *et al.* Fabrication of magnetic luminescent nanocomposites by a layer-by-layer self-assembly approach [J]. *Chemistry of Materials*, 2004, 16(21): 4022–4027.
- [13] Wang H, Sun L, Li Y, *et al.* Layer-by-layer assembled Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@C@CdTe core/shell microspheres as separable luminescent probe for sensitive sensing of Cu<sup>2+</sup> ions [J]. *Langmuir*, 2011, 27(18): 11609–11615.
- [14] Ren X, Tong L, Chen X, *et al.* Fe@C@Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> magnetic-fluorescent composites: Facile synthesis, structure and properties [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 143(3): 939–945.
- [15] Gao X, Nie S. Quantum dot-encoded mesoporous beads with high brightness and uniformity: Rapid readout using flow cytometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2004, 76(8): 2406–2410.
- [16] Dong X, Zheng Y, Huang Y, *et al.* Synthesis and characterization of multifunctional poly(glycidyl methacrylate) microspheres and their use in cell separation [J]. *Analytical Biochemistry*, 2010, 405(2): 207–212.
- [17] Deng Y, Wang C, Shen X, *et al.* Preparation, characterization, and

application of multistimuli-responsive microspheres with fluorescence-labeled magnetic cores and thermoresponsive shells [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2005, 11(20): 6006–6013.

- [18] Tu C, Yang Y, Gao M. Preparations of bifunctional polymeric beads simultaneously incorporated with fluorescent quantum dots and magnetic nanocrystals [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(10): 105601.
- [19] 闫凯, 朱海娥, 周英, 等. 无皂种子乳液聚合制备含稀土磁性荧光微球及其表征 [J]. *高分子学报*, 2013, (11): 1453–1458.
- [20] Zebli B, Susha A S, Sukhorukov G B, *et al.* Magnetic targeting and cellular uptake of polymer microcapsules simultaneously functionalized with magnetic and luminescent nanocrystals [J]. *Langmuir*, 2005, 21(10): 4262–4265.
- [21] Bridot J L, Faure A C, Laurent S, *et al.* Hybrid gadolinium oxide nanoparticles: Multimodal contrast agents for in vivo imaging [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(16): 5076–5084.
- [22] Chu M, Song X, Cheng D, *et al.* Preparation of quantum dot-coated magnetic polystyrene nanospheres for cancer cell labelling and separation [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(13): 3268–3273.
- [23] Qiu G M, Xu Y Y, Zhu B K, *et al.* Novel, fluorescent, magnetic, polysaccharide-based microsphere for orientation, tracing, and anticoagulation: Preparation and characterization [J]. *Biomacromolecules*, 2005, 6(2): 1041–1047.
- [24] Li L, Chen D, Zhang Y, *et al.* Magnetic and fluorescent multifunctional chitosan nanoparticles as a smart drug delivery system [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(40): 405102.
- [25] Dressman D, Yan H, Traverso G, *et al.* Transforming single DNA molecules into fluorescent magnetic particles for detection and enumeration of genetic variations [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(15): 8817–8822.
- [26] Wang W, Zhang Y, Yang Q, *et al.* Fluorescent and colorimetric magnetic microspheres as nanosensors for Hg<sup>2+</sup> in aqueous solution prepared by a sol-gel grafting reaction and host-guest interaction [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(11): 4958–4965.
- [27] Kojima C, Toi Y, Harada A, *et al.* Preparation of poly(ethylene glycol)-attached dendrimers encapsulating photosensitizers for application to photodynamic therapy [J]. *Bioconjugate Chemistry*, 2007, 18(3): 663–670. ■

## 霍尼韦尔 UOP 中国首套丙烯和异丁烯联合生产装置成功开车

2015年8月12日,霍尼韦尔 UOP 宣布,山东京博控股股份有限公司采用霍尼韦尔 UOP 工艺技术建造的 C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> 脱氢联合生产装置成功开车。这一中国首例脱氢联合生产装置的开车将帮助满足亚洲地区对塑料、高辛烷值汽油和合成橡胶的增长需求。

霍尼韦尔 UOP C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> Oleflex 工艺装置采用催化脱氢的方式将丙烷和异丁烷分别转化为丙烯和异丁烯。该工艺采用混合脱氢的方式,将所有流程整合在一个装置中进行生产。和其他同类工艺相比,该技术已被验证是拥有最低的生产成本和最高的投资回报。

“随着中国对运输燃料和石化产品的需求量不断攀高,石化企业看到了整合生产工艺流程所能带来的切实收益,”

霍尼韦尔 UOP 中国区总经理黄志明先生表示,“本次中国首套 UOP C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> Oleflex 工艺装置的成功开车是中国石化生产的一个重要里程碑,它将帮助京博更有效地应对市场需求。”

山东京博的新建装置位于山东省滨州市,计划年产丙烯 11.6 万 t、异丁烯 10.4 万 t。除山东京博外,目前另有两家中国生产商也采用了霍尼韦尔 UOP C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> Oleflex 工艺。其中东明石化集团计划年产丙烯和异丁烯 26.5 万 t, 东营利源计划产能为 22 万 t。两家厂商同时还采用了霍尼韦尔 UOP butamer™ 工艺,将正丁烷转化为异丁烷,提高 Oleflex 装置进料的灵活性。这两家中国授权生产商预计将于 2017 年正式投产。(Shirley Fan)