

贵金属核壳纳米粒子最新研究进展

杨晓峰, 董相廷, 周艳慧, 王进贤, 刘桂霞

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 贵金属核壳纳米粒子具有独特的光、电和催化性质, 使其在材料科学、生物物理、分子电子学以及基于表面增强效应的荧光工程学领域具有极其广泛的应用前景。本文综述了贵金属核壳纳米粒子的制备方法及应用, 并对贵金属核壳材料的发展进行了展望。

关键词: 核/壳粒子; 贵金属核/壳纳米粒子; 应用

中图分类号: TQ 13; TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0368-05

核/壳型纳米粒子是近年来备受关注的一类多功能新型材料, 通过对裸核粒子包覆, 大大提高核粒子的稳定性和分散性, 改变或增强它们的原有性质, 为开发纳米材料多方面的潜在应用提供良好的契机^[1]。贵金属核壳纳米粒子是以贵金属作为核或壳(其中贵金属主要包括 Pt、Pd、Ag、Au)所形成的核壳材料, 通过调节核壳尺寸和化学成分可明显改变其性质, 实现对多功能纳米粒子性质的可控合成。由于贵金属团簇或胶体纳米化后, 展现出很多新的光学和物理学性质, 使得贵金属核壳材料在材料科学、生物物理、分子电子学以及基于表面增强效应的荧光工程学领域具有极其广泛的应用前景, 如用作催化剂、生物和化学传感、临床免疫实验、磁性生物分离、表面增强拉曼散色(SERS)研究和用作敏化标记等^[2-12]。根据贵金属核壳材质不同, 可将贵金属核壳纳米材料分为以下几类: 贵金属/贵金属^[13-15]、金属/贵金属^[16,17]、贵金属/非金属^[18-23]和非金属/贵金属^[24-29]等。本文综述了贵金属核壳纳米粒子的制备方法和应用。

1 贵金属核壳纳米粒子的制备方法

目前, 贵金属核壳纳米粒子的制备方法主要有模板法、金属种子还原法、溶胶-凝胶法、化学还原法、化学还原和溶胶-凝胶相结合法、微波多元醇法, 激光辅助合成法、渗滤法、热处理法和光化学法等。

1.1 模板法

Lou^[30]等采用简单的模板技术合成多核 Au(或 Pt)/SiO₂ 壳的中空纳米胶囊, 贵金属 Au 或 Pt 纳米粒子位于壳的内表面上, 通过纳米粒子的自组装过程得到一

些二聚体、三聚体、四聚体的超结构空心壳材料; 将多核 Au/SiO₂ 中空粒子分别浸在盐酸、硝酸、王水中, 首次研究了在微米空间内的 Ostwald 熟化过程。结果发现, 氯是非常有效的中间配体, 为限制晶体生长的研究提供良好的条件。得到的 Au/SiO₂ 和 Pt/SiO₂ 的多核-壳中空粒子的 TEM 照片如图 1 所示。球形 SiO₂ 粒子粒度均匀, 分散效果好, 许多 Au(Ag)纳米粒子位于 SiO₂ 粒子的内表面上。该法与以往的方法相比其优点在于, 所制备出的 PS/Au 纳米粒子具有均一性和稳定性, Au 纳米粒子均匀地沉积在 PS 纳米模板表面上, 这为制备中空球提供良好的条件。以往通常用有机溶剂甲苯和四氢呋喃去除 PS 模板, 它的缺点是效率低, 容易破坏壳层, 作者选用热处理的方法大大地克服了这些缺点。

1.2 金属种子还原法

金属种子还原法是制备磁性核壳纳米粒子的一种有效的方法, 通常是以磁性纳米粒子溶液(如 Co 和

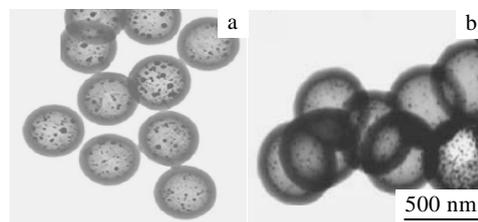


图 1 多核中空 Au/SiO₂ 球的 TEM 照片(a)和多核-壳中空 Pt/SiO₂ 粒子的 SEM 照片(b)

Fig.1 (a) TEM images of Au/silica multicore hollow silica spheres; (b) SEM images of Pt/silica multicore-shell hollow particles

收到初稿日期: 2008-01-31; 收到修改稿日期: 2008-04-21

基金项目: 吉林省教育厅科技计划项目(200408)和吉林省科技厅科研计划项目(20040125)

作者简介: 杨晓峰, 女, 1979 年生, 博士生, 长春理工大学化学与环境工程学院, 吉林 长春 130022, 电话: 0431-5317264, E-mail: yangxiaofeng1406@yahoo.com.cn

Fe 等) 为种子溶液, 在其表面通过还原反应形成贵金属包覆壳层。该方法与以往制备磁性核壳纳米粒子常用方法(真空沉积和反胶束法)相比, 所制备出的核壳粒子粒度分布窄, 克服以往方法中由于粒度分布宽对磁性的影响。

Bao 等^[31]在非极性溶剂甲苯中, 利用十八胺的弱还原作用在 Co 种子表面还原有机金的化合物 $[(C_6H_5)_3P]AuCl$ 制备具有磁光性质的 Co/Au 核壳纳米粒子。在弱还原剂十八胺和非极性溶剂的作用下更容易制备出均匀且结晶良好的壳层, 同时 Au 做壳层可提供良好的生物兼容性和近红外光学活性。

Dai 等^[32]在 Pt/Co 种子溶液中, 用 $NaBH_4$ 还原 $HAuCl_4$ 溶液制备三元金属 Pt/Co-core Au-shell 纳米粒子, 热处理后得到面心四方相的核壳纳米粒子。SQUID 研究显示, 所合成的磁性复合粒子在室温下是顺磁性的, 退火处理后粒子的矫顽力显著提高了 510×79.6 A/m。

Ban^[26]等首先在 NMPO(1-methyl-2-pyrrolidinone) 溶剂中, 用 Na 还原 $FeCl_3$, 得到黑褐色的 Fe 核粒子溶液, 加入一定量的 4-苯吡啶保护剂继续反应一段时间, 将含有 $HAuCl_4$ 的 NMPO 溶液滴加到核粒子溶液中, 用核粒子表面的自身还原作用还原 Au^{3+} , 形成 Au 包覆 Fe 纳米粒子。SQUID 的分析结果表明, Au 的包覆并没有影响核粒子的磁性, 包覆后核壳纳米粒子的表面等离子共振吸收峰发生明显的红移现象, 由 520 nm 红移到 680 nm。

1.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是制备贵金属/氧化物(其中氧化物为 ZrO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 和 SiO_2 等, 贵金属为 Au、Ag 等)^[33-38]型核壳纳米粒子的常用方法, 通常是利用化学还原法合成出贵金属的核, 然后将它作为种子, 在其表面水解金属有机盐, 制备出贵金属/氧化物核/壳纳米粒子。该种方法的优点在于, 氧化物壳层易于控制, 通过控制反应条件可得到不同厚度的壳层。

Hideki 等^[36]人在 CTAB 和水合肼的溶液中加入 $AgNO_3$ 溶液, 室温下还原出 Ag 粒子, 然后加入乙醇-TTIP 溶液, 通过 TiO_2 在 Ag 粒子表面的溶胶-凝胶反应制备出 Ag/ TiO_2 核壳纳米粒子。

1.4 化学还原法

化学还原法是制备氧化物/贵金属(其中氧化物为 SiO_2 、 SnO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 和 Fe_4O_3 等, 贵金属为 Au、Ag、Pd 等)^[24,39-41]型核壳纳米粒子的常用方法, 与溶胶-凝胶方法不同的是, 它是氧化物为核的反向包覆过程。制备过程中通常先利用有机物对氧化物表面进行表面修饰, 使其表面带有一些易于连接贵金属的官能团, 然后通过化学键将贵金属固定在氧化物的表面, 再用化学还原法制得氧化物/贵金属型核壳纳米粒子; 也

可以通过简单的静电作用, 将含有贵金属的离子吸附在氧化物的表面, 通过进一步的化学还原反应制备出氧化物/贵金属型核壳纳米粒子。Prashant 等^[39]采用此方法合成具有核壳结构的 TiO_2/Au 、 SnO_2/Ag 纳米粒子。研究表明, 这一结构的纳米粒子会直接影响金属和半导体纳米团簇的光物理和光催化性质, 并能提高表面电荷迁移速度。Jennifer 等^[8]利用化学还原法合成 $\gamma-Fe_2O_3/Au$ 和 Fe_3O_4/Au 纳米粒子。结果表明, 复合粒子的表面等离子体共振峰发生了蓝移, 由 570 nm 移到 525 nm。

Xu 等^[41]采用化学还原法合成出磁性核/壳 Fe_3O_4/Au 和 $Fe_3O_4/Au/Ag$ 纳米粒子。研究表明, 随着壳层厚度的不同, 核壳纳米粒子的等离子性质发生红移和蓝移, 这种纳米粒子不仅具有很好的磁性和等离子性质, 而且贵金属的包覆使磁性核粒子具有更好的稳定性和多功能性。得到的 Fe_3O_4 、 Fe_3O_4/Au 的 TEM 照片如图 2 所示。包覆前后粒子均为球形, 且分散很好, 从对应的照片可以看出, Fe_3O_4 和 Fe_3O_4/Au 粒子在己烷中具有很好的溶解性, 利用 CTAB 和柠檬酸钠对核壳粒子进行表面修饰后, 得到了完全水溶性的核壳纳米粒子。

本实验室利用化学还原法成功地合成出 CeO_2/Au 核壳结构纳米粒子, 所得的核壳粒子为球形, 无团聚, 平均粒度为 15 nm。

1.5 化学还原和溶胶-凝胶相结合法

化学还原和溶胶-凝胶相结合法是科研工作者最近发展起来的一种制备多壳层的核壳纳米粒子的制备新方法(即 core/shell/shell), 利用这两种方法可实现氧化物和贵金属间的反复包覆。Shi 等人^[42]通过将化学还原法和溶胶-凝胶法相结合, 成功地制备出 $SiO_2/Au/SiO_2$ 型多壳层的核壳纳米粒子, 这种结构的粒子能够提高 Au 纳米粒子的稳定性以及高温下热聚合稳定性。图 3 分别给出 SiO_2 纳米粒子、 SiO_2/Au 核壳纳米粒子和 $SiO_2/Au/SiO_2$ 型核壳纳米粒子的 TEM 照片。由图可见, 与裸体 SiO_2 核相比, SiO_2/Au 核壳纳米粒子表面明显存在很多小的金纳米粒子, 粒径约为 40 nm;

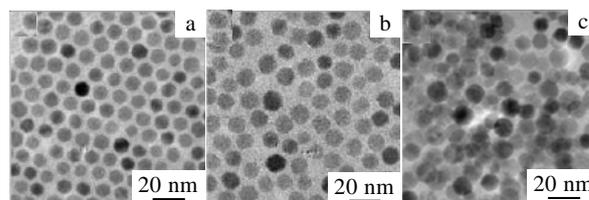


图 2 不同纳米粒子的 TEM 照片

Fig.2 TEM images: (a) bare Fe_3O_4 nanoparticles; (b) Fe_3O_4/Au core/shell nanoparticles in hexane; and (c) water-soluble Fe_3O_4/Au core/shell nanoparticles

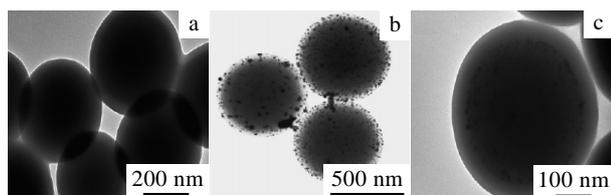


图 3 不同纳米粒子的 TEM 照片

Fig.3 TEM images: (a) SiO₂ nanosphere; (b) SiO₂/Au; and (c) SiO₂/Au/SiO₂ nanoparticles

从SiO₂/Au核壳纳米粒子和SiO₂/Au/SiO₂型核壳纳米粒子的比较中可以看出,表面变得光滑,完全看不见金纳米粒子的存在,充分说明SiO₂完全包覆在了SiO₂/Au核壳纳米粒子的外面。

Jeong等人^[43]在-10℃下,将氧化铁纳米粒子、胂和硒酸连续加入到EG溶液中,利用过量的胂还原硒酸得到 α -Se胶体,低温低速率的反应促使氧化铁纳米粒子包覆在 α -Se胶体的外面,升高反应温度, α -Se胶体表面变软,紧紧粘住氧化铁纳米粒子,继续反应,氧化铁纳米粒子被“嵌”在 α -Se胶体的内部,除去剩余的胂并加入PVP和PtCl₂,一步还原反应得到 α -Se/Pt核壳纳米粒子,进一步利用Stöber溶胶-凝胶法,在 α -Se/Pt胶体外面包覆一层无定型的SiO₂。得到的 α -Se/Pt和 α -Se/Pt/SiO₂TEM照片如图4所示。所得的核壳粒子粒度很均一,表面光滑。

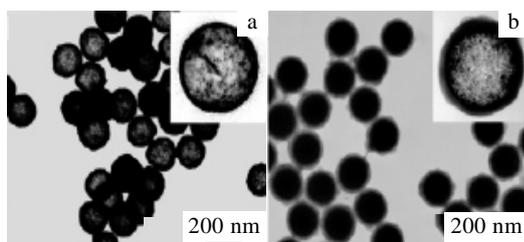


图 4 不同胶体粒子的 TEM 照片

Fig.4 TEM images of colloids (a) α -Se/Pt; (b) α -Se/Pt/SiO₂

1.6 微波多元醇法

微波多元醇法是近年来发展起来的一种新方法,通过微波加热和多元醇还原法相结合能够快速制备出双金属纳米粒子,得到贵金属/贵金属型核壳纳米粒子。Masaharu等^[44]采用微波多元醇法合成Au/Ag核壳纳米晶体,并研究晶体结构和生长机制。具体做法是:将HAuCl₄·4H₂O溶于EG溶液中,加入聚合物表面活性剂PVP,在微波辐射作用下加热2min,得到Au核;将上述溶液冷却到室温,按一定的[AgNO₃]/[HAuCl₄]

加入AgNO₃溶液,继续用微波辐射加热,最后得到Au/Ag核壳纳米晶体。晶体结构和生长机制研究表明,聚合物表面活性剂PVP在Au和Ag单晶上吸附点的不同是形成不同形状的Au核和Ag壳的重要因素。

1.7 激光辅助合成法

激光辅助合成法是制备磁性核壳纳米粒子的新方法,目前应用还不是很普遍,此种方法的优点在于,制备出的粒子具有长期抗氧化性。Zhang等^[45]采用激光辅助合成法制备超顺磁性的Fe/Au核壳纳米粒子。首先在搅拌下加热含有油酸的辛基醚溶液,注入一定量的Fe(CO)₅通过湿化学法合成单分散的Fe核纳米粒子;将含有Fe核纳米粒子的环己烷溶液加入到含有Au粉-水-辛烷的溶液中,用阳离子表面活性剂CTAB作液相稳定剂,正丁醇作助表面活性剂,混合液再用激光辐射,使其反应生成Fe/Au核壳纳米粒子。所制备的核壳粒子在室温下具有超顺磁性和长期抗氧化性,与其他的铁氧化物和磁性材料相比,具有很高的饱和磁化强度,有望应用于医学诊断中。

1.8 扩散法

扩散法是一种物质在另一种物质表面生长,在一定的反应条件下,进一步扩散到另一种物质内部形成复合材料的方法。由于扩散过程与电子轨道杂化过程密切相关,近年来金属扩散到半导体材料内部形成块体材料引起广泛研究。Taleb Mokari等^[46]在室温下用扩散法合成Au/InAs金属-半导体杂化纳米粒子。

1.9 热处理法

热处理法为首先利用合适的保护剂分子分别对核壳粒子表面进行修饰,再利用热引发核壳粒子不同界面间发生聚合反应制备核壳纳米粒子的方法。Park等人^[9]利用热处理法合成尺寸和表面性质可控的Fe oxide/Au核壳纳米粒子,制备过程中金和磁性纳米粒子在保护剂的包覆环境中,通过热引发不同粒子间的聚合反应制备出核/壳型纳米粒子。该方法的优点在于,能够非常有效地控制粒子尺寸及粒子的表面性质,所制备出的Fe oxide/Au纳米粒子分散性好,为开拓蛋白质与Au表面的连接反应和Fe oxide核的磁性生物分离提供良好的条件,大大提高了实际应用的可能性。

1.10 光化学法

虽然化学还原法是制备贵金属核壳纳米粒子的一种常用方法,但为了更系统研究它们的性质以及充分利用它们的潜在价值,如何实现核壳和纳米壳的可控合成就显得尤为重要。光化学法是一种简单的制备核壳纳米粒子的方法,它的优点在于,通过光源的调节可随时终止反应,较大程度上实现贵金属核壳纳米粒

子的可控合成。Hua Tan等人^[47]利用UV灯光解吸附在Ag核表面的CSe₂, 制备出Ag/Ag₂Se核壳纳米粒子及Ag₂Se中空纳米粒子。

2 贵金属核壳纳米粒子的应用

2.1 催化方面

CeO₂纳米粒子具有很强的储放氧的能力, 在催化领域应用很广泛, 若在其表面分散一些Au纳米粒子则可大大提高催化活性, 这种催化剂对CO、甲醇的氧化和低温水煤气反应都具有高活性^[48,49]。

同样可利用Au的优异性能, 在其表面包覆SiO₂、TiO₂后, 陶瓷壳层不仅提高粒子的力学稳定性, 而且作为催化剂壳层中的多孔结构更利于反应物和产物的扩散, 将其作为催化剂用于NaBH₄还原K₃[Fe(CN)₆]反应中, 实验结果表明, 金杂化的陶瓷中空壳层结构大大提高反应的催化效率^[4]。

2.2 生物方面

金纳米棒结构中的特殊几何形状使它在生物传感、成像和诊断应用中占据很大的优势。Wang等^[38]采用改良的Stöber方法在Au纳米棒上均匀地包覆一层SiO₂, 将其自组装在PVP修饰的硅片上形成均匀的Au_{rod}/SiO₂膜, 膜上的氨基基团能与羊抗人体免疫球蛋白形成共价连接, 为IgG的颜色探测提供良好的反应模型。更可观的是, 用肉眼观察或通过光吸收的变化均可监测到Au_{rod}/SiO₂膜上的蛋白质识别过程。

2.3 荧光工程学方面

通过在Ag贵金属纳米粒子表面包覆一层厚度不同的SiO₂壳层, 不仅可以获得具有良好分散性和光学稳定性的荧光纳米粒子, 而且可以充分利用其金属增强荧光和单个纳米粒子的传感特性。金属增强荧光是一种成熟的技术, 通过荧光物质与金属的相互作用可大大增强荧光效果, 提高光稳定性, 降低单分子荧光光谱的闪烁, 并随着体系辐射衰减速率的增加减少荧光寿命, 同时由于荧光共振能量的转移增加传输距离。利用这种核壳进行不同的荧光探测实验: 有机荧光和镧系杂化探测(非共价连接)、有机荧光共价连接探测。结果表明, 核壳结构的荧光纳米粒子与荧光纳米粒子相比其荧光信号增强20倍, 粒子的可探测性提高200倍^[10]。

3 展望

随着纳米科学与技术的不断发展, 虽然纳米材料的制备技术与应用已经取得相当可观的结果, 但是仍不能满足人们对纳米材料多方面的应用需求, 开发具有多功能性的核壳材料已经成为科研工作者亟待解决

的问题。

近年来人们发现, 贵金属纳米粒子具有很多优良的特性, 将贵金属的独特性质与其他功能材料的性质结合起来, 有助于开发出多功能性的新材料、开拓新应用, 已经成为纳米材料研究领域的一个新的热点。目前对于各种不同组成和性能的贵金属核壳纳米粒子的制备的研究已经取得初步的进展, 但是, 如何实现对核粒子大小、壳层厚度、几何均匀性的可控合成、特性研究以及充分发挥他们的多功能性, 仍是当前科研工作的热点和难点, 还需广大科研工作者的不懈努力。

参考文献 References

- [1] Jin Zhang, Michael Post, Teodor Veres *et al.* *J Phys Chem B*[J], 2006, 110(14): 7122
- [2] Chil Seong Ah, Seol Ji Kim, Du-Jeon Jang. *J Phys Chem B*[J], 2006, 110(11): 5486
- [3] Oleg G Tovmachenko *et al.* *Adv Mater*[J], 2006, 18: 91
- [4] Isabel Pastoriza-Santos, Jorge Prez-Juste, Susana Carregal-Romero *et al.* *Chem Asian J*[J], 2006(1): 730
- [5] Kazuhiko Maeda, Kentaro Teramura, Daling Lu *et al.* *Angew Chem Int Ed*[J], 2006, 45: 1
- [6] Jianhuang Zeng, Jun Yang, Jim Yang Lee *et al.* *J Phys Chem B*[J], 2006, 110(48): 24 606
- [7] Dianping Tang, Ruo Yuan, Yaqin Chai. *Biotechnology and Bioengineering*[J], 2006, 94(5): 996
- [8] Dianping Tang, Ruo Yuan, Yaqin Chai. *J Phys Chem B*[J], 2006, 110(24): 11 640
- [9] Hye-Young Park, Mark J Schadt, Lingyan Wang *et al.* *Langmuir*[J], 2007, 23(17): 9050
- [10] Kadir Aslan, Meng Wu, Joseph R Lakowicz *et al.* *J Am Chem Soc*[J], 2007, 129(6): 1524
- [11] Jian-Feng Li, Zhi-Lin Yang, Bin Ren *et al.* *Langmuir*[J], 2006, 22(25): 10 372
- [12] Pavan Kumar G V, Shruthi S, Vibha B. *J Phys Chem C*[J], 2007, 111(11): 4388
- [13] Hao Ming Chen, Ru-Shi Liu, Kiyotaka Asakura *et al.* *J Phys Chem B*[J], 2006, 110: 19 162
- [14] Ferrer D, Torres-Castro A, Gao X *et al.* *Nano Lett*[J], 2007, 7(6): 1701
- [15] Yan Cui, Bin Ren, Jian-Lin Yao *et al.* *J Phys Chem B*[J], 2006, 110: 4002
- [16] Sung-Jin Cho, Ahmed M Shahin, Gary J Long *et al.* *Chem Mater*[J], 2006, 18(4): 960
- [17] Guangjun Zhou, Mengkai Lu, Zhongsen Yang. *Langmuir*[J], 2006, 22(13): 5900

- [18] Jalal Ghilane, Fu-Ren F Fan, Allen J Bard. *Nano Lett*[J], 2007, 7(5): 1406
- [19] Vassilios Tzitzios, Dimitrios Niarchos, George Hadjipanayis *et al. Adv Mater*[J], 2005, 17: 2188
- [20] Jianqiang Hu, Zhenhai Wen, Qiang Wang *et al. J Phys Chem B*[J], 2006, 110(48): 24 305
- [21] Tony Azzam, Adi Eisenberg. *Langmuir*[J], 2007, 23(4): 2126
- [22] Dongxiang Li, Qiang He, Yue Cui *et al. Chem Eur J*[J], 2007, 13(8): 2224
- [23] David B Pedersen, Shiliang Wang. *J Phys Chem C*[J], 2007, 111(3): 1261
- [24] Jun-Hyun Kim, Hae-Won Chung, Randall Lee T. *Chem Mater*[J], 2006, 18(17): 4115
- [25] Aaron E Saunders, Inna Popov, Uri Banin. *J Phys Chem B*[J], 2006, 110(50): 25 421
- [26] Zhihui Ban, Yuri A Barnakov, Feng Li *et al. J Mater Chem*[J], 2005, 15, 4660
- [27] Xiaomiao Feng, Changjie Mao, Gang Yang *et al. Langmuir*[J], 2006, 22(9): 4384
- [28] Wen-Yi Cai, Qin Xu, Xiao-Ning Zhao *et al. Chem Mater*[J], 2006, 18(2): 279
- [29] Schwartzberg A M, Grant C D, Van Buuren T *et al. J Phys Chem C*[J], 2007, 111(25): 8892
- [30] Xiong Wen Lou, Chongli Yuan, Elizabeth Rhoades *et al. Adv Funct Mater*[J], 2006, 16: 1679
- [31] Yuping Bao, Hector Calderon, Kannan M. *J Phys Chem C*[J], 2007, 111(5): 1941
- [32] Jingtao Dai, Yukou Du, Ping Yang. *Z Anorg Allg Chem*[J], 2006, 632: 1108
- [33] Sudeep P K, Takechi K, Prashant V. *J Phys Chem C*[J], 2007, 111(1): 488
- [34] Renjis T Tom, Sreekumaran Nair A, Navinder Singh *et al. Langmuir*[J], 2003, 19(8): 3439
- [35] Sreekumaran Naira A, Suryanarayanan V, Pradeep T *et al. Materials Science and Engineering B*[J], 2005, 117: 173
- [36] Hideki Sakai, Takashi Kanda, Hirobumi Shibata *et al. J Am Chem Soc*[J], 2006, 128(15): 4944
- [37] Xiaowei Teng, Donald Black, Neil J Watkins *et al. Nano Lett*[J], 2003, 3(2): 261
- [38] Chungang Wang, Zhanfang Ma, Tingting Wang *et al. Adv Funct Mater*[J], 2006, 16: 1673
- [39] Prashant V Kamat, Mark Flumiani, Amy Dawson. *Eng Aspects*[J], 2002, 202: 269
- [40] Lingyan Wang, Jin Luo, Mathew M Maye *et al. J Mater Chem*[J], 2005, 15: 1821
- [41] Zhichuan Xu, Yanglong Hou, Shouheng Sun. *J Am Chem Soc*[J], 2007, 129(28): 8698
- [42] Yan-Li Shi, Tewodros Asefa. *Langmuir*[J], 2007, 23(18): 9455
- [43] Unyong Jeong, Thurston Herricks, Edan Shahar *et al. J Am Chem Soc*[J], 2005, 127(4): 1098
- [44] Masaharu Tsuji, Nobuhiro Miyamae, Seongyop Lim *et al. Crystal Growth & Design*[J], 2006, 6(8): 1801
- [45] Jin Zhang, Michael Post, Teodor Veres *et al. J Phys Chem B*[J], 2006, 110(14): 7122
- [46] Taleb Mokari, Assaf Aharoni, Inna Popov *et al. Angew Chem Int Ed*[J], 2006, 45: 1
- [47] Hua Tan, Shuping Li, Wai Yip Fan. *J Phys Chem B*[J], 2006, 110(32): 15 812
- [48] Qi Fu, Weiling Deng, Howard Saltsburg *et al. Applied Catalysis*[J], 2005, 56(1~2): 57
- [49] Qi Fu, Adam Weber, Maria Flytzani-Stephanopoulos. *Catalysis Letters*[J], 2001, 77(1~3): 87

New Research Developments in Noble Metal Core-Shell Nanoparticles

Yang Xiaofeng, Dong Xiangting, Zhou Yanhui, Wang Jinxian, Liu Guixia

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Noble metal core-shell nanoparticles have attracted much attention due to their unique optical, electric and catalytic properties, they can be applied in material sciences, biophysics, molecular electronics and fluorescence-spectral engineering based on surface-enhancement. In this paper, a comprehensive review is presented on noble metal core-shell nanoparticles including preparation, application, and then the development trends of noble metal core-shell materials were also proposed.

Key words: core-shell particles; noble metal core-shell nanoparticles; application

Biography: Yang Xiaofeng, Candidate for Ph. D., School of Chemistry and Environmental Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, P. R. China, Tel: 0086-431-5317264, E-mail: yangxiaofeng1406@yahoo.com.cn