

钯纳米粒子及其团聚体特殊红外性能的 CO 分子探针红外光谱

姜艳霞 陈卫 廖宏刚 金兰英 孙世刚*

(固体表面物理化学国家重点实验室, 厦门大学化学系, 厦门 361005. * 联系人, E-mail: sgsun@xmu.edu.cn)

摘要 以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为稳定剂, 用乙醇还原氯钯酸制备分散的钯纳米粒子(Pd_n). 从分散于电极表面的 Pd_n 出发, 以 $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 的扫描速度, 在 $-0.25 \sim 1.25 \text{ V}$ 间循环扫描 30 min 可以制备团聚体 Pd_n^{ag} . 固/气和固/液界面透射和反射 CO 分子探针红外光谱研究结果指出, 吸附在 Pd_n 上非对称和对称桥位上的桥式吸附态 $\text{CO}(\text{CO}_B)$ 在 1964 和 1905 cm^{-1} 给出两个红外吸收谱峰, 但 CO 吸附在 Pd_n^{ag} 上仅在 1963 cm^{-1} 给出一个方向倒反的异常红外谱峰. 此外, CO 谱峰的半峰宽由 Pd_n 上的 14 cm^{-1} 变为 Pd_n^{ag} 上的 24 cm^{-1} . Pd_n 形成团聚体 Pd_n^{ag} 后, Pd 纳米粒子间相互作用增强, Pd_n 和 Pd_n^{ag} 红外光学性质的显著差别初步归因于纳米粒子之间的相互作用.

关键词 钯纳米粒子 团聚体 CO 吸附 特殊红外光学性能

纳米材料具有小尺寸效应、量子效应、表面效应以及宏观量子隧道效应等使其表现出许多不同于块体材料的独特性能. 纳米材料的研究已成为当今极为活跃的多学科交叉的前沿领域, 在基础科学研究和实际应用上都引起了人们的极大兴趣和广泛关注^[1-4]. 红外光谱是对表面结构非常敏感的谱学方法, 经常用于从分子水平上研究表面和界面的性质. 1980 年 Hartstein 等^[5]首次报道了表面增强红外吸收现象(SEIRA), 即当对硝基苯甲酸(PNBA)等分子吸附在岛状的金或银纳米薄膜上, 其红外吸收显著增强. 孙世刚研究小组于 1996 年在电沉积制备的铂纳米薄膜上发现了异常红外效应(AIREs)^[6,7], 即与 CO , SCN^- , CN^- 等物种吸附在本体金属电极表面相比, 相同物种吸附在相应的纳米薄膜材料上表现出红外谱峰方向倒反, 强度显著增强和半峰宽增大的异常红外光谱特征. 随后发现 Pd, Rh, Ru 等铂族金属及其合金 PtPd, PtRu 等纳米薄膜材料均具有异常红外效应^[8]. 姜艳霞等以 Y 型分子筛的超笼作模板通过“瓶中造船”制备孤立的 Pd 纳米粒子, 只表现出谱峰强度显著增强, 半峰宽增大的增强红外吸收特征^[9,10]. 近来陈卫等^[11]合成了从分散态到不同程度的聚集态 Pt 纳米粒子, 研究发现分散态 Pt 纳米粒子具有增强红外吸收, 而团聚态 Pt 纳米粒子表现出异常红外效应. 本文报道以 CO 为探针分子, 用透射和反射红外光谱研究固/气和固/液界面上分散的 Pd_n 及其团聚体 Pd_n^{ag} 的红外光学性能, 其研究结果对深入认识低维纳米材料的

结构和性能的关系, 揭示 AIREs 产生的条件和有关规律具有重要意义.

1 实验

以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为稳定剂, 用乙醇还原氯钯酸合成钯纳米粒子 Pd_n ^[12]. $15 \text{ mL } 2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯钯酸、 21 mL 水、 14 mL 乙醇和 0.0667 g PVP 混合均匀后回流 3 h 制得分散的 Pd_n . 将一定量 Pd_n 胶体溶液滴于 CaF_2 窗片上干燥后即得到 Pd_n 薄膜, 用于透射红外光谱研究. 玻碳(GC)表面用 $5 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 粉末仔细研磨, 用超声波水浴除去表面研磨杂质, 用超纯水冲洗干净后自然晾干, 将一定量 Pd_n 胶体溶液滴于 GC 表面, 待溶剂挥发后再滴涂溶解了聚氯乙烯(PVC)的二氯乙烷溶液, 使 Pd_n 固定于 GC 表面, 记为 Pd_n/GC . 以 Pd_n/GC 为工作电极, 铂黑为对电极, 饱和甘汞电极(SCE)为参比电极, 所有实验均在室温下进行. 以 $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 的扫描速度, 电位在 $-0.25 \sim 1.25 \text{ V}$ 循环扫描 30 min 使 Pd_n 团聚, 相应的电极记为 $\text{Pd}_n^{\text{ag}}/\text{GC}$. 电化学实验在 CHI-660A 上进行(上海辰华仪器厂). JEM-100CX- 型透射电子显微镜和 LEO1530 型扫描电子显微镜分别用于 TEM 和 SEM 表征. 固/气界面上透射及反射红外光谱实验和固/液界面上电化学原位红外反射光谱实验均在配有 EverGlo™ 红外光源的 Nexus 870 傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪(Nicolet)上进行.

2 结果与讨论

2.1 Pd_n和Pd_n^{ag}/GC的形貌表征

图1(a)为Pd_n的透射电子显微镜图像. 从图1(a)可以看出, Pd_n呈球形, 近乎单分散状态, 其粒子的平均直径约为3 nm, 对于这种单分散样品, 粒子间相互作用可以忽略. 图1(b)为Pd_n^{ag}/GC的扫描电子显微镜图像. 在图1(b)中可以看出由许多小粒子组成的团聚体Pd_n^{ag}, 平均尺度约为17 nm.

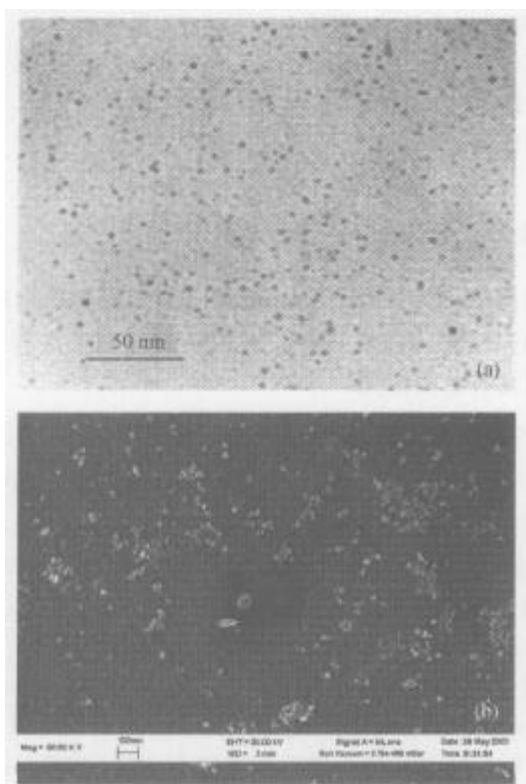


图1 Pd_n的TEM(a)和Pd_n^{ag}/GC的SEM(b)图像

2.2 电化学循环伏安研究

将Pd_n/GC电极置于0.1 mol·L⁻¹硫酸溶液中, 以扫描速度为50 mV·s⁻¹, 记录在-0.25~1.25 V电位区间内循环扫描第一周的循环伏安曲线(CV), 如图2实线所示. 在-0.14和-0.06 V分别可以观察到负向的氢吸附峰和正向的氢脱附峰, 在0.62 V观察到一个正向的氧化峰, 可归属于表面不可逆吸附物种的氧化; 当电位超过0.80 V后仍然可以观察到一个氧化电流平台, 归属于Pd_n/GC表面氧的吸附, 当负向电位扫描时在0.40 V观察到一个很小的负向电流峰, 归属于Pd_n/GC上吸附态氧物种的还原. 随着扫描周数的增加0.62 V处的正向氧化峰电流逐渐减小, 同

时氢的吸脱附电流以及表面氧的吸附和表面吸附态氧物种的还原电流均逐渐增加. 电位循环扫描30 min以后Pd_n/GC形成其团聚体Pd_n^{ag}/GC, CV曲线如图2虚线所示. 从图中可以观察到-0.14和-0.06 V氢的吸脱附电流峰, 正向电位扫描中高于0.48 V开始生成Pd氧化物以及在负向电位扫描中于0.32 V给出了Pd氧化物的还原电流峰. 与Pd_n/GC上的CV比较, 我们可以观察到在Pd_n^{ag}/GC上, 位于0.62 V的峰消失, 氢的吸脱附峰、Pd上氧的吸附电流及表面氧物种的还原电流峰均增加. 结果表明在开始进行循环伏安扫描时, Pd_n/GC电极表面存在某种不可逆吸附物种占据了表面活性位, 待其氧化脱附后电极表面活性位增加, 使得氢的吸脱附及Pd_n/GC表面氧吸附和表面氧物种的还原电流增加, 在此过程中电极表面由分散的Pd_n形成团聚体Pd_n^{ag}. PVP是通过其上的羰基部分键合到Pd纳米粒子中的Pd原子上来实现对Pd纳米粒子的稳定分散作用^[13-15], 因此我们推测这种不可逆吸附的物种为稳定剂PVP上的羰基, 在电位扫描过程中随着扫描周数的增加, 稳定剂被逐渐氧化, 在界面电场的扰动下分散态Pd_n彼此靠近, 进而形成团聚态纳米粒子Pd_n^{ag}, 使其粒子之间的相互作用增强. 在我们用红外光谱对Pd_n的研究中检测到了位于1648 cm⁻¹附近的羰基峰, 而当分散的Pd_n形成团聚体Pd_n^{ag}后, 羰基谱峰的强度明显减小.

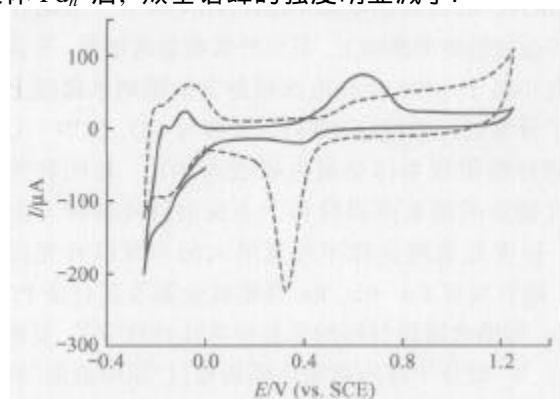


图2 Pd_n/GC(实线)和Pd_n^{ag}/GC(虚线)的循环伏安曲线
0.1 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液, 50 mV·s⁻¹

在-0.25~0.10 V进行循环扫描的同时通入CO 20 min, 使CO在Pd_n^{ag}/GC表面达到饱和吸附, 然后通N₂ 10 min除尽溶液中的CO. Pd_n^{ag}/GC电极上吸附态CO(CO_{ad})氧化的CV曲线如图3所示. 可以看出, CO的吸附抑制了氢的吸脱附, 升高扫描电位上限时,

CO_{ad} 被氧化, 在 0.72 V 给出氧化电流峰, CO_{ad} 氧化后在第 2 周的 CV 中又观察到氢的吸脱附电流峰. 与吸附在本体 Pd 电极上 CO_{ad} 的氧化峰(0.62 V)相比, CO_{ad} 在 Pd_n^{ag}/GC 电极上氧化电位升高 0.10 V. 可能的原因是由于 PVP 占据了 Pd_n^{ag}/GC 上部分表面活性位, 抑制了氧在其上的吸附. 我们对以相似方法制得的铂纳米粒子 Pt_n (2.5 nm)^[11] 在同样的电化学条件下扫描, 发现 Pt_n 不会产生明显的团聚现象. 因此我们推断这种经电化学扫描发生的纳米粒子团聚现象与金属的本征性质有关.

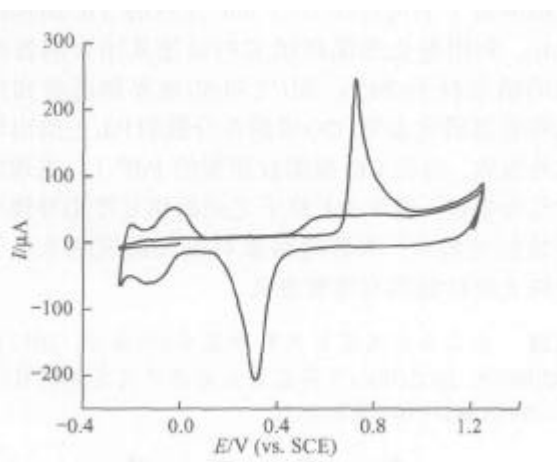


图 3 Pd_n^{ag}/GC 电极上吸附态 CO 氧化的循环伏安曲线
1 mol · L⁻¹ H₂SO₄ 溶液, 50 mV · s⁻¹

2.3 Pt_n 和 Pt_n^{ag} 的红外光学性能

() 固/气界面红外透射和反射红外光谱研究. 将 Pd_n/CaF₂ 安装在透射红外光谱池上, 通 N₂ 除去透射池中的空气, 并采集背景谱 R_B, 然后向光谱池中通 CO 5 min 后采集样品谱 R_S, 结果谱图以吸收光谱给出, 即 $A = -\log(R_S)/(R_B)$. 每张谱图由 500 次干涉图累加平均得到, 光谱分辨率为 2 cm⁻¹, 结果谱如图 4(a)所示. 可以观察到 4 个吸收峰: 气态 CO (CO_g) 的红外吸收给出中心位于 2120 和 2173 cm⁻¹ 的 P 和 R 吸收谱带, 具有精细结构; 在 1964 和 1905 cm⁻¹ 附近出现两个对应桥式吸附态 CO 的红外谱峰, 其半峰宽均为 14 cm⁻¹. 根据文献[16], 我们将其分别归属于 Pd_n 上边缘位和平台位上 CO 的桥式吸附(CO_B), 即 CO 吸附在非对称(CO_B^{as})和对称 CO_B^s 桥位上^[17]. 很明显 1905 cm⁻¹ 处的谱峰强度高于 1964 cm⁻¹ 处的谱峰强度, 表明平台位上具有更多的吸附物种. CO_B^s 和 CO_B^{as} 与 CO_g 的吸收峰方向相同, 表明 CO 吸附在 Pd_n

上给出正常的增强红外吸收. 将 Pd_n/GC 和 Pd_n^{ag}/GC 安装在反射红外光谱池上, 按同样的采谱方法得到结果谱. 图 4(b)为 CO 在 Pd_n/GC 上吸附的反射 FTIR 谱图, 与 CO 在 Pd_n/CaF₂ 上吸附的透射 FTIR 谱图(图 4(a))一致, 即 CO 吸附在 Pd_n 上, 其反射红外谱和透射红外谱给出同样的结果. 这表明电极基底、红外入射角度和偏振光等因素对结果谱峰的形状没有影响. 图 4(c)为 CO 在 Pd_n^{ag}/GC 上吸附的反射 FTIR 谱图, 从图 4(c)中除看到位于 2120 和 2173 cm⁻¹ 的向上的 CO_g 吸收峰外, 还观察到位于 1963 cm⁻¹ 向下的 CO_B^{as} 谱峰, 其半峰宽为 24 cm⁻¹. CO_B^{as} 和 CO_g 吸收峰方向相反, 半峰宽增加表明 CO 吸附在 Pd_n^{ag}/GC 上给出异常峰. 将 Pd_n/GC 经电化学扫描制得的团聚体 Pd_n^{ag}, 其粒子尺度不均匀, 与 Pd_n/GC 相比, Pd_n^{ag}/GC 上不同表面位的数量增多, 可能引起 CO 谱峰的非均一性增宽^[17]. 以上固/气界面反射和透射红外光谱结果充分说明铂纳米粒子的红外光学性能强烈地依赖于表面结构, 与红外光谱的透射或反射模式无关.

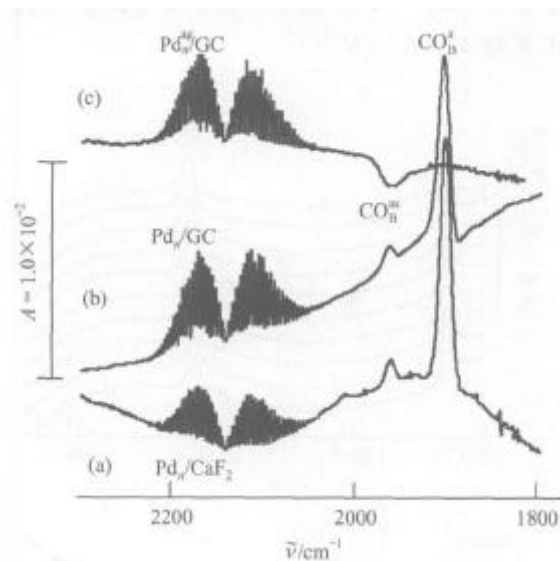


图 4 固/气界面上 CO 在 Pd_n/CaF₂, Pd_n/GC 和 Pd_n^{ag}/GC 上吸附的透射和反射 FTIR 谱图

() 固/液界面电化学原位红外反射光谱研究. 向溶液中通入 CO 气体并将电极电位控制在 CO 不氧化的电位区间, 使 CO 在 Pd_n^{ag}/GC 上吸附. 达到饱和后, 再通 N₂ 除去溶液中的 CO, 红外光谱研究在不含 CO 的溶液中进行. 首先在 CO 稳定吸附的电位区间逐步改变研究电位 E_S, 采集一系列单光束谱 R(E_S), 最后电位升高到 1.00 V 使 CO 全部氧化为 CO₂, 并取这个电位为参考电位 E_R, 采集单光束谱 R(E_R). 结果

谱图为电位差谱, 表示为: $\Delta R/R = (R(E_S) - R(E_R))/R(E_R)$. 由于在 E_S 下只有 CO_B , 而在 E_R 下 CO_B 全部氧化成 CO_2 , 并进入电极/红外窗片之间的溶液薄层, 因此结果谱图中应给出负向的 CO 单极谱峰和正向的 CO_2 单极谱峰, 此时 CO 的谱峰强度和位置代表 CO_B 在该电位下红外吸收的信息.

图 5(a) 为 CO 吸附在 $\text{Pd}_n^{\text{ag}}/\text{GC}$ 上的电化学原位多步电位阶跃傅里叶变换红外光谱 (MS-FTIR). 从图中除观察到位于 2345 cm^{-1} 正向的 CO_2 谱峰外, 还可看到与之同向的位于 1958 cm^{-1} 附近的 CO_B^{as} 吸收峰, 其半峰宽为 24 cm^{-1} . CO_B^{as} 与 CO_2 的谱峰方向相同, 表明 CO 吸附在 $\text{Pd}_n^{\text{ag}}/\text{GC}$ 上产生异常峰. 与本体 Pd 上 CO_B 的红外吸收^[9] 相比较, 通过计算得到 CO 吸附在 $\text{Pd}_n^{\text{ag}}/\text{GC}$ 上的红外吸收增强因子为 4.8. 图 5(b) 给出 $\text{Pd}_n^{\text{ag}}/\text{GC}$ 电极上 CO_B^{as} 红外吸收峰的波数 $\tilde{\nu}_{\text{CO}_B^{\text{as}}}$ 随电极电位 E_S 的变化关系, 即 Stark 效应. 从图 5(b) 中可以看出随电位升高, CO_B^{as} 吸收谱峰线性蓝移, 其 Stark 系数为 $27 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, 远小于在本体 Pd 上 CO_B 的 Stark 系数 $47 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ ^[18].

在已报道的产生红外谱峰方向倒反的体系中, 如以电沉积方法制备的铂族金属及其合金的纳米薄膜^[8]和以 Nafion 为稳定剂的 Pt_n 团聚体^[11], 前者由于在电沉积过程中粒子之间有重叠, 而后者由于 Nafion 很好的成膜特性使其粒子边缘有交叠. 在本文的 Pd_n^{ag} 中纳米 Pd 粒子之间也存在相互作用, 导致产生异常红外效应.

3 结论

本研究工作以 PVP 为稳定剂, 利用乙醇还原氯铂酸制备了平均直径为 3 nm 左右的 Pd 纳米粒子 (Pd_n), 利用电化学循环伏安扫描使其团聚制备团聚态的纳米粒子 (Pd_n^{ag}). 固/气和固/液界面透射和反射红外光谱研究表明: CO 吸附在分散的 Pd_n 上给出增强红外吸收, 而当 CO 吸附在团聚的 Pd_n^{ag} 上, 表现出异常红外效应. 纳米 Pd 粒子之间的相互作用导致产生异常红外效应. 本研究结果对深入认识纳米粒子的特殊光学性能具有重要意义.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 20173045, 90206039, 20021002)及国家重点基础研究发展规划(批准号: 2002CB211804)资助项目.

参 考 文 献

- 1 黄惠忠等. 费伦主编. 纳米材料分析. 北京: 化学工业出版社, 2003
- 2 Lue J-T. A review of characterization and physical property studies of metallic nanoparticles. *J Phys Chem Solids*, 2001, 62: 1599~1612
- 3 Haruta M, Date M. Advances in the catalysis of Au nanoparticles. *Appl Catal A-Gen*, 2001, 222: 427~437
- 4 Brust M, Kiely C J. Some recent advances in nanostructure preparation from gold and silver particles: a short topical review. *Colloid Surface A*, 2002, 202: 175~186
- 5 Hartstein A, Kirtly J R, Tsang T C. Enhancement of the infrared-absorption from molecular monolayers with thin metal overlayers. *Phys Rev Lett*, 1980, 45(3): 201~204
- 6 Lu G Q, Sun S G, Chen S P, et al. Abnormal optic properties of dispersed platinum layer in FTIR reflection spectroscopy for CO adsorption. In: Wieckowski A, Itaya K, eds. *Electrode Processes*. New Jersey: The Electrochemical Society, Inc, 1996. 436~445
- 7 Lu G Q, Sun S G, Cai L R, et al. *In situ* FTIR spectroscopic studies of adsorption of CO, SCN^- , and Poly (o-phenylenediamine) on electrodes of nanometer thin films of Pt, Pd, and Rh: The abnormal infrared effects (AIREs). *Langmuir*, 2000, 16: 778~786
- 8 Sun S G. Abnormal infrared effects of nanometer-scale thin film material of platinum group metals and alloys at electrode-electrolyte interfaces. In: Wieckowski A, Savinova E R, Vayenas C G, eds. *Catalysis and Electrocatalysis at Nanoparticle Surfaces*. New York: Marcel Dekker Inc, 2003. 785~826
- 9 Jiang Y X, Sun S G, Chen S P, et al. Novel phenomenon of en-

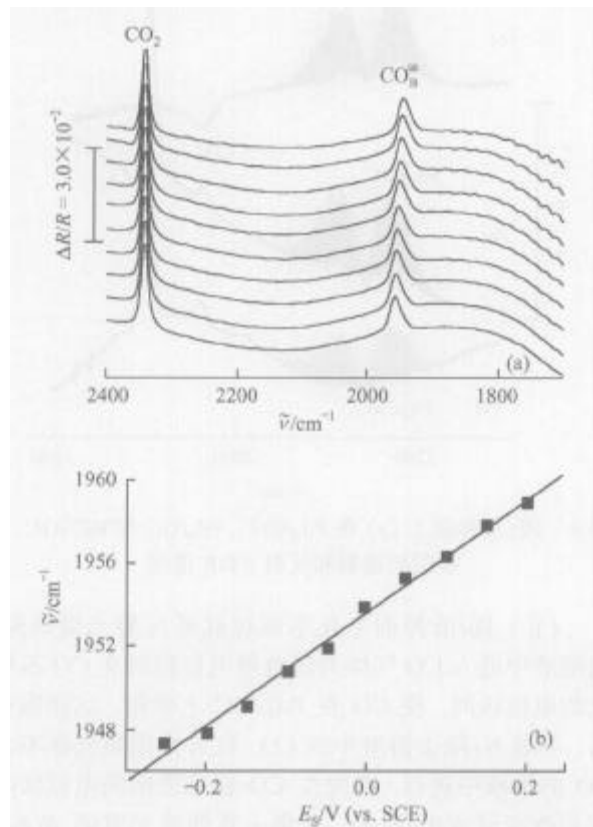


图 5

(a) CO 吸附在 $\text{Pd}_n^{\text{ag}}/\text{GC}$ 上的 MS-FTIR 谱图. E_S 以 0.05 V 的步长从 -0.25 V 增加到 0.20 V (从上到下); (b) $\text{CO}_B^{\text{as}}/\text{GC}$ 上 CO_B^{as} 红外吸收峰的波数随电位的变化

- hancement of IR absorption of CO adsorbed on nanoparticles of Pd confined in supercages of Y-zeolite. *Chem Phys Lett*, 2001, 344: 463~470
- 10 姜艳霞, 孙世刚, 陈声培, 等. CO 在载钯分子筛薄膜电极上的增强红外吸收. *高等学校化学学报*, 2001, 11(22): 1860~1863
 - 11 Chen W, Sun S G, Zhou Z Y, et al. IR optical properties of Pt nanoparticles and their agglomerates investigated by *in situ* FTIRS using CO as probe molecule. *J Phys Chem B*, 2003, 107: 9808~9812
 - 12 Li Y, Boone E, El-Sayed M A. Size effects of PVP-Pd nanoparticles on the catalytic Suzuki reactions in aqueous solution. *Langmuir*, 2002, 18: 4921~4925
 - 13 Teranishi T, Hosoe M, Tanaka T, et al. Size control of monodispersed Pt nanoparticles and their 2D organization by electrophoretic deposition. *J Phys Chem B*, 1999, 103: 3818~3827
 - 14 Teranishi T, Miyake M. Size control of palladium nanoparticles and their crystal structures. *Chem Mater*, 1998, 10: 594~600
 - 15 Reetz M T, Winter M, Tesche B. Self-assembly of tetraalkylammonium salt stabilized giant palladium clusters on surfaces. *Chem Commun*, 1997, 147~148
 - 16 Wolter K, Seifert O, Kuhlbeck H, et al. Infrared spectroscopic investigation of CO adsorbed on Pd aggregated deposited on an alumina model support. *Surface Science*, 1998, 399: 190~198
 - 17 Hoffmann F M. Surf infrared reflection-absorption spectroscopy of adsorbed molecules. *Surf Sci Rep*, 1983, 3: 107~192
 - 18 Ding N, Jiang Y X, Sun S G. Novel IR properties of Pd nanoparticles confined in supercages of Y-Zeolite in CO adsorption at electrochemical solid|liquid interfaces. In: Cahay M, Leburton J P, Lockwood D J, et al, eds. *Quantum Confinement : Nanostructured Materials and Devices*. New Jersey: The Electrochemical Society, 2001. 34~52

(2003-12-15 收稿, 2004-05-14 收修改稿)

· 书 讯 ·

评《新世纪的物理化学——学科前沿与展望》

主编: 梁文平 杨俊林 陈拥军 李 灿
 出版: 科学出版社 2004 年 4 月
 定价: 65 元

《新世纪的物理化学——学科前沿与展望》一书由国家自然科学基金委员会化学部梁文平、杨俊林、陈拥军研究员和中国科学院院士李灿共同主编, 主要介绍国内物理化学研究的现状和未来展望。

这本书的素材来源于 2003 年 12 月国家自然科学基金委员会化学部在长春组织的一次全国范围的“新世纪物理化学学科前沿与发展趋势”研讨会, 会议的目的是研讨 21 世纪中国物理化学学科的研究现状和未来展望。本次讨论会云集了国内活跃在物理化学领域内的中青年专家(包括截止到那时的几乎所有物理化学学科的国家杰出青年基金获得者, 名单参见本书附录部分)以及海外华人学者共 70 余人, 就国内物理化学学科发展的方方面面展开了热烈的讨论。与会者共同感到迫切需要出版一本有关专集, 面向国内的科学管理人员、科研院所的研究人员、在读研究生以及大学高年级学生。其目的是让非本领域的相关科研人员和科学管理者对物理化学学科有所了解, 让大学高年级学生和研究生在涉足物理化学学科时对其有个基本概念, 同时为从事本领域研究的科学工作者提供一份国内物理化学研究的参考。

化学本质上是一门创造新物质的学科, 而物理化学是化学中经典的支柱性学科之一, 历史源远流长。现代物理化学的内容已经远远超出经典的、单纯的化学二级学科的范畴。它与化学其他二级学科、生命科学、材料科学、物理学、微电子学、环境科学以及计算数学日益密切交融。化学领域的每一个二级学科都有自己的全国范围的学术讨论会, 惟物理化学没有这样的二级学科全国学术讨论会, 其

原因在于物理化学涉及的学科面太广, 从事本领域研究的人员太多。实际上, 物理化学所包含的三级学科, 如催化化学、电化学、胶体化学、动力学、热力学、理论化学等等都有自己的庞大学术年会。这也从一个侧面反映了物理化学的基础性和庞大的覆盖面。

本书分十大专题: 结构化学、理论与计算化学、催化科学、分子动力学与动态学、胶体与界面科学、电化学、分子聚集体化学、复制体系的热力学、新材料与能源中的物理化学、物理化学中的方法与技术。它基本上涵盖了当今物理化学所涉及的所有主流研究方向。从学科发展来看, 既介绍了材料科学和生命科学对物理化学提出的新要求, 也介绍了物理化学为它们提供的新材料、新的分析方法和理论; 从社会生活来看, 既涉及到关系国计民生的能源、环境和材料行业, 也涉及到人们实际生活的医药和化工等行业; 从知识面来看, 既有深邃的理论知识, 也有相当篇幅的科普资料。

有些正在兴起和快速发展的物理化学新的研究方向虽然在上面的十大专题中没有单列出来, 但也散见于其中。例如, 生物物理化学、天体物理化学、材料物理化学等等均有所涉及, 可以肯定, 这些领域在不久的将来会成为非常热门的研究领域。

本书的出版非常及时, 它既是科学管理人员决策的参考书、专业人员的案头必备书, 也是研究生和大学高年级学生的科普读物。其旨恢宏, 其言洒洒, 几经斟酌, 汇于一编。既为专辑, 难免手笔不一; 成书短促, 偶有瑕疵是一定的, 当属瑕不掩玉。究竟如何, 还是由读者来评判。

(北京大学化学与分子工程学院 吴凯)