

文章编号:0253-9950(2009)03-0134-06

基于 Pt/C/FN 疏水催化剂的 常温氢氧复合反应

胡 胜,杨 亮,熊亮萍,羊衍秋,杨通在,何玉晖

中国工程物理研究院 核物理与化学研究所,四川 绵阳 621900

摘要:用高压微波加热法制备了 $w(\text{Pt})=10\%$ 的 Pt/C 催化剂,得到 Pt 的粒径 $d=(2.1\pm 0.7)$ nm,再将 Pt/C 催化剂与聚四氟乙烯(PTFE)一起负载于泡沫镍(FN),制备疏水催化剂 Pt/C/FN。用 Pt/C/FN 催化常温氢氧复合反应,研究了温度和 H_2 流速对 H_2 转化率的影响。与商用亲水催化剂 Pt/ Al_2O_3 相比,Pt/C/FN 催化剂活性明显更高。潮湿及干燥条件下测试了 Pt/C/FN 疏水催化剂的活性,潮湿条件下其活性仅有少量下降。富氧条件下考察了 CO 对 Pt/C/FN 疏水催化剂活性的影响,CO 对 H_2 转化率的影响较小。

关键词:氢氧复合;疏水催化剂;Pt/C/FN;常温

中图分类号:TQ032.41 文献标志码:A

Recombination of H_2 and O_2 Catalyzed by Hydrophobic Pt/C/FN Catalyst at Ambient Temperature

HU Sheng, YANG Liang, XIONG Liang-ping, YANG Yan-qiu, YANG Tong-zai, HE Yu-hui

Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract: Pt/C ($w(\text{Pt})=10\%$) catalyst was prepared by microwave heating method at high pressure, and the average size of Pt particles was (2.1 ± 0.7) nm. Then polytetrafluoroethylene (PTFE) and the Pt/C catalyst were supported on foamed nickel (FN) to obtain hydrophobic Pt/C/FN catalyst. The effects of reaction temperature and H_2 flow rate on the catalytic activity of the Pt/C/FN catalyst were determined for the recombination reaction of $\text{H}_2\text{-O}_2$ at ambient temperature. The catalytic activity of the hydrophobic Pt/C/FN catalyst is found to be remarkably higher than that of the commercial hydrophilic Pt/ Al_2O_3 catalyst. Its catalytic activity decreases little under moist environment, compared with dried condition. The influence of CO on its catalytic activity was examined under excess O_2 . The H_2 conversion is influenced by CO slightly.

Key words: recombination of H_2 and O_2 ; hydrophobic catalyst; Pt/C/FN; ambient temperature

核反应堆、常规及核动力潜艇等装置由于反应堆失控,温度急剧上升,可能产生大量氢气^[1-3]。基于安全考虑,需要设计一种复合装置,使 H_2 在

开始形成时就与 O_2 复合,避免危险的发生。聚变实验研究^[4]中,放射性气体很容易泄露进入操作环境,危害操作人员的身体健康,也会污染大

收稿日期:2008-01-18;修订日期:2008-03-20

基金项目:中国工程物理研究院发展基金资助项目(2007B2007)

作者简介:胡 胜(1974—),男,四川广安人,博士,副研究员,核燃料循环与材料专业

气。用氢氧复合装置将气态的氚转化为水是控制氚污染大气的一条可靠途径。但在某些环境中,如核反应堆失控,除存在大量氢气外,还会有 CO 产生。

氢氧复合反应可采取高温催化和常温催化 2 种方式,后者在室温或略高于室温下进行。它工艺流程简单、能耗低、操作安全系数更高。常温氢氧复合一般选择疏水催化剂催化。邵明昶等^[5]用自制的 Pt/SDB(聚乙烯-二乙烯苯)疏水催化剂,研究了管式反应器中的常温氢氧化合过程;但贵萍等^[4]分别用 Pt/SDB 和 Pt/PTFE(聚四氟乙烯)2 种疏水催化剂,于室温下研究了它们催化含 HT 空气的氧化。由于氢氧复合为强放热反应,热量在高分子载体 SDB, PTFE 上不容易散失, Pt 在反应过程中容易因热迁移而发生团聚, SDB 载体在氧化条件下也容易因氧化而老化^[6],使催化剂活性下降。Belapurkar 等^[7]研究用于核反应堆的氢氧复合装置时,将催化剂夹在带孔的金属片之间,有利于催化剂散热,使催化剂保持在相对恒温。den Hartog 等^[8]则将 Pt/C 催化剂与 PTFE 一起,负载于钢丝网,制备疏水催化剂,催化常温氢氧复合,用于联合电解催化交换(CECE)的重水提氚工艺,并已到工业示范阶段。而目前富氢气氛条件下 CO 的选择氧化一般用亲水催化剂催化^[9]。为提高对 CO 氧化的选择性,反应温度一般较低,尽管如此,仍有相当量的氢气被氧化。

泡沫镍由相互连接的网状通孔组成,具有表面粗糙、高比表面积、高传热系数等性质,因此 PTFE 及 Pt/C 催化剂与泡沫镍结合力强,催化剂内扩散效应更小,有极好的散热性。本工作拟以泡沫镍(FN)作为惰性载体,制备疏水催化剂 Pt/C/FN,并将它与商用亲水催化剂 Pt/Al₂O₃ 比较,在水沸点以下考察其对氢气的复合效率,同时研究了 CO 和水直接冷却对疏水催化剂活性的影响。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

Vulcan XC-72R 炭黑,美国 Cabot 公司;乙二醇,天津科密欧试剂公司;氯铂酸,贵研铂业股份有限公司;Pt/Al₂O₃,上海摩力克分子筛有限公司,φ=2~3 mm, ω(Pt)≥1.5%。

ETHOS TC 型微波工作站, Milestone 公司;

JEM-3010 型透射电镜(TEM),日本 JEOL 公司; 6890N 型气相色谱仪,美国 Agilent 公司。

1.2 Pt/C 催化剂制备及物化性能表征

采用高压微波加热法^[10-12]制备 Pt/C 催化剂。称取 0.3 g 炭黑,加入 30 mL 乙二醇溶剂中,再加入氯铂酸的乙二醇溶液,超声分散,调节 pH 值至碱性。利用微波加热,快速升温至 195 ℃ 以上,维持 190 ℃ 反应 30 min。反应在微波工作站上进行,压力 1~2 MPa。冷却,过滤,去离子水洗涤,105 ℃ 干燥得 Pt/C 催化剂。

用 TEM 分析 Pt/C 上 Pt 粒径大小及分布,加速电压 300 kV。随机选择 Pt/C 催化剂上 200 个以上 Pt 粒子,用 Photoshop CS 软件测量 Pt 粒径大小。用下式计算 Pt 粒子平均直径。

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

标准偏差计算如下式:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}}$$

用 s 表征 Pt 粒子直径偏离平均值的程度,即 Pt 粒子分布范围的大小,其中 \bar{d} 表示 Pt 粒子平均大小, d_i 表示单个 Pt 粒子直径, n 表示总 Pt 粒子数, s 表示标准偏差。

1.3 Pt/C/FN 疏水催化剂的制备及常温氢氧复合催化性能表征

1.3.1 疏水催化剂的制备 按文献^[8]称取 0.2 g Pt/C 催化剂,加入 PTFE 乳液中,PTFE 与 Pt/C 催化剂的质量之比为 1.2 : 1,经研磨、超声分散,采用自然浸渍法将 Pt/C 与 PTFE 的悬浮液负载于泡沫镍载体上,再干燥、程序升温处理后得疏水催化剂。

1.3.2 常温氢氧复合催化活性测试 常温氢氧复合反应工艺流程简图示于图 1。疏水催化剂的常温氢氧复合催化性能测试在直径为 16 mm、高为 450 mm 的带夹套玻璃柱内进行,反应通过夹套内循环水加热。疏水催化剂和亲水的磷青铜 θ 环填料按体积比 1 : 1 混装,柱底装填磷青铜 θ 环填料作为气体分配器,催化层有效高度为 280 mm。作为对比,相同实验条件下测试亲水的 Pt/Al₂O₃ 的催化活性,2 种催化剂 Pt 装填量相同。用压缩空气和 H₂/N₂(体积比为 3.5 : 96.5) 或 H₂/CO/N₂(体积比为 2.5 : 1 : 96.5) 混合气为原料气体,经气体缓冲罐后进入催化反应柱,在

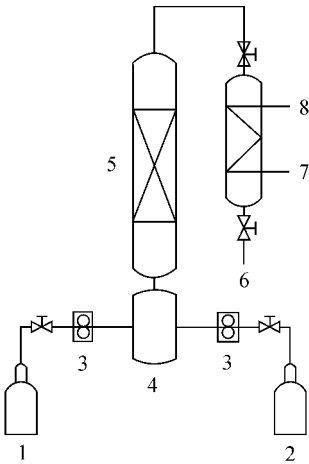


图 1 常温氢氧复合反应工艺流程简图

Fig. 1 Schematic flow diagram of the recombination of H_2-O_2 at ambient temperature

- 1——压缩空气(Compressed air), 2——压缩原料气(Compressed H_2/N_2 or $H_2/CO/N_2$ gas),
3——气体流量计(Gas flowmeter), 4——气体缓冲罐(Gas buffer), 5——反应器(Reactor), 6——气体出口(Gas outlet), 7——冷凝水入口(Cooling water inlet),
8——冷凝水出口(Cooling water outlet)

不同温度下测试催化剂的活性。在反应柱顶采集气体样,用气相色谱仪分析其中的 H_2 或 H_2 与 CO 的含量。用式(1)或式(2)表示催化剂的催化性能:

$$\eta = \frac{c(H_2)_{out}}{c(H_2)_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

$$S = \frac{c(H_2)_{in}}{c(H_2)_{out}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, η , H_2 转化率; S , 反应前后 H_2 浓度的比值; $c(H_2)_{out}$, $c(H_2)_{in}$, 分别为 H_2 出入口处浓度。

2 结果和讨论

2.1 Pt/C 催化剂的物化性能表征

高压微波加热法制备的 Pt/C 催化剂的 TEM 及金属 Pt 粒子的粒径分布图示于图 2, $w(Pt) = 10\%$ 。从图 2 可看出,由于 Pt, C 2 种元素原子序数相差较大,因此它们的衬度也有较大差异,黑色的 Pt 粒子分布在浅色的碳载体 XC-72R 上。Pt 粒子在碳黑载体表面分布基本均匀,粒子没有明显团聚,粒径主要分布在 1.0 ~ 2.5 nm,而在 2.5 ~ 4.5 nm 粒径范围也有少量分布。从不同 Pt/C 催化剂的 TEM 图中随机选择

200 个 Pt 粒子,测粒径大小, Pt 粒子的 $d = (2.1 \pm 0.7)$ nm, Pt 有较高分散度。

微波加热乙二醇还原工艺是以乙二醇为分散溶剂和还原剂,目前已广泛用于碳负载催化剂^[13-17]制备。微波加热是在电磁场中由介电损失而引起的体加热,液体物质在微波场中行为与其自身极性有着密切关系^[18]。对于高介电常数的乙二醇(介电常数 38.66)体系,在波辐射下容易被快速加热, $[PtCl_6]^{2-}$ 被快速还原,快速产生大量 Pt 的晶核,由于 Pt 的还原反应为自催化反应,因此周围尚未反应的 $[PtCl_6]^{2-}$ 在初始晶核上反应,快速被消耗,降低了大粒径 Pt 粒子生成的几率,得到的 Pt 粒子尺寸较小。同时,乙二醇对活性金属粒子有保护作用^[19],可抑制活性金属粒子的进一步长大。与文献报道不同的是,本工作在密闭带压体系下进行,反应压力最高可达 1 ~ 2 MPa,反应温度更高,升温速度更快,因此反应速度更快,制备的催化剂 Pt 粒径明显低于文献^[13, 15]报道值。

2.2 Pt/C/FN 疏水催化剂活性的表征

采用自然浸渍法,将 $w(Pt) = 10\%$ 的 Pt/C 催化剂与 PTFE 一起,负载于泡沫镍,制备 Pt/C/FN 疏水催化剂。所使用的泡沫镍载体具有很好的散热性,将其在马福炉中 400 °C 加热 1 h 后取出,置于室温环境中,数秒钟泡沫镍温度就可降至 40 °C 以下。

不同反应温度及 H_2 流速条件下考察 Pt/C/FN 疏水催化剂对常温氢氧复合反应的催化活性,结果示于图 3, 4。由图 3, 4 可知, Pt/C/FN 疏水催化剂活性受反应温度影响较大,相同氢气流速时, H_2 转化率 $\eta(H_2)$ 随反应温度升高而增加,而随着 H_2 流速的增加, H_2 的转化率下降。反应温度为 95 °C 时,不同的 H_2 流速, H_2 的转化率均高于 99%。由于 Pt/C/FN 疏水催化剂在室温以下仍保持较高活性,因此工业化运行时反应物气体不需预热,以降低反应成本,起始阶段通过控制反应物流速以使 H_2 转化率达到要求。随着反应进行,放出的反应热使反应温度升高,可逐步增加反应物流速。

2.3 Pt/C/FN 疏水催化剂与 Pt/Al₂O₃ 的比较

作为对比,相同实验条件下测试商用 Pt/Al₂O₃ 的催化活性, Pt 的总使用量与 Pt/C/FN 疏水催化剂相同,结果列入表 1,用反应前后氢气的浓度比 (S) 表征氢气的反应效率。由表 1 可

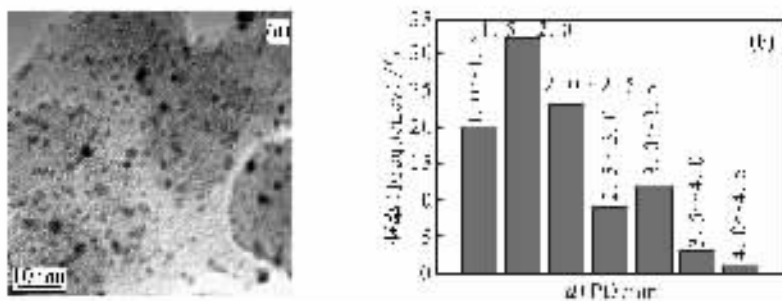


图 2 Pt/C 催化剂的 TEM(a)和 Pt 粒子的粒径分布图(b)

Fig. 2 TEM micrograph (a) and size distribution of Pt particles (b) of carbon-supported Pt catalyst

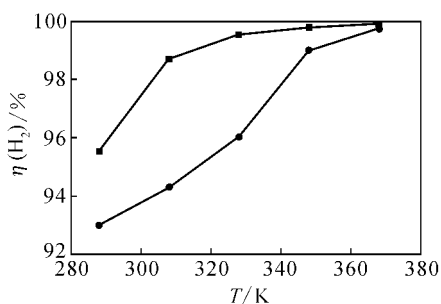
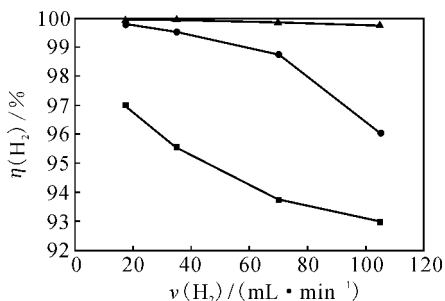


图 3 反应温度对 Pt/C/FN 疏水催化剂活性的影响

Fig. 3 Effect of reaction temperature on the catalytic activity of hydrophobic Pt/C/FN catalyst

v(H₂), mL/min: ■ — 35, ● — 105图 4 反应物 H₂ 流速对 H₂ 转化率的影响Fig. 4 Effect of H₂ flow rate on H₂ conversion

t, °C: ■ — 15, ● — 55, ▲ — 105

知,相同 H₂ 流速下,Pt/C/FN 催化剂的除氢效果明显优于 Pt/Al₂O₃ 催化剂。降低 H₂ 流速,Pt/C/FN 催化剂的除氢效果更好,而 Pt/Al₂O₃ 变化不明显。氢气与氧气在 Pt 表面氧化成水,由于反应温度在水沸点以下,因此水主要以液态形式存在。Zhang 等^[20] 分别用 Pt/氟化碳/陶瓷和 Pt/Al₂O₃ 催化剂催化苯的完全氧化,表明常温潮湿环境下,疏水性的 Pt/氟化碳/陶瓷催化剂活性更

高;Wu 等^[21] 分别用 Pt/SDB 疏水催化剂和 Pt/AC(活性炭)常温催化甲苯的完全氧化,认为载体的疏水性对催化剂活性影响较大,Pt/SDB 催化活性明显更高。Pt/C/FN 催化剂中由于加入了 PTFE 呈疏水性,可以将产物水从催化剂的微孔中赶出而保持反应通道畅通;与其不同,Al₂O₃ 载体呈亲水性,尽管 N₂ 及反应物气体可将水部分带出微孔,但 Pt 和 Al₂O₃ 表面仍会吸附水堵塞部分反应通道,使催化剂活性下降。

2.4 Pt/C/FN 疏水催化剂的抗水中毒性

氢氧复合为强放热反应,需要及时带出反应产生的大量热量,否则热量累计会导致反应温度上升,加快反应速度,增加反应放热,最终导致反应失控,烧毁催化剂。与冷却夹套等间接冷却方式相比,用水直接冷却吸热量大,便于调节反应温度。为了考察直接冷却水对疏水催化剂活性的影响,于 75 °C 测试了 Pt/C/FN 疏水催化剂在干燥和潮湿状态下的活性,结果列于表 2。由表 2 可知,采用水直接冷却,疏水催化剂活性仅有少量降低。由于催化剂的疏水性,冷却水无法进入催化剂内部,堵塞反应物和产物的进出通道,也不会影响催化剂内活性金属位点的状态,因此对氢氧复合的速率影响较小。因此可采用水直接冷却带走氢氧复合反应产生的热量。

2.5 CO 对催化剂活性的影响

核反应堆发生冷却水泄露后,产生的蒸汽与锆和石墨反应,同时生成大量 H₂ 和 CO;火药爆炸气体中,除含有 H₂ 外,还存在 CO 等气体。对此,可采用催化氧化将 CO 转化为 CO₂ 将其除去。而对氢水液相催化交换(LPCE)等反应,CO 容易使单一的 Pt 基催化剂中毒^[22],需要研究 CO 对 Pt/C/FN 催化常温氢氧复合反应活性的影响。

表 1 常温氢氧复合反应中 Pt/C/FN 和 Pt/Al₂O₃ 的催化活性比较

Table 1 Comparison between the catalytic activities of Pt/C/FN and Pt/Al₂O₃ catalysts

$v(\text{H}_2)/$ (mL · min ⁻¹)	S	
	Pt/C/FN	Pt/Al ₂ O ₃
17.5	1.6 × 10 ³	6.1
35	4.9 × 10 ²	6.1
70	2.1 × 10 ²	6.0

表 2 冷却方式对 Pt/C/FN 疏水催化剂活性的影响

Table 2 Effect of cooling means on the activity of hydrophobic Pt/C/FN catalyst

$v/$ (L · min ⁻¹)	$\eta(\text{H}_2) / \%$	
	干燥 (Dried)	潮湿 (Wetted)
1	99.93	99.86
2	99.75	99.61

分别用 H₂/N₂ (体积比为 3.5 : 96.5) 和 H₂/CO/N₂ (体积比为 2.5 : 1 : 96.5) 混合气为原料气体, 过量氧气条件下测试 Pt/C/FN 对 H₂ 和 CO 常温氧化的催化活性, 结果列入表 3。由表 3

表 3 过氧条件下 CO 对 Pt/C/FN 催化常温氢氧复合活性的影响

Table 3 Effect of CO on the activity of hydrophobic Pt/C/FN catalyst for the recombination reaction in presence of excessive O₂

原料气体 (Raw gas)	反应气体 (Reaction gas)	$\eta / \%$				
		15 °C	35 °C	55 °C	75 °C	95 °C
H ₂ /N ₂	H ₂	93.75	96.99	98.76	99.52	99.75
H ₂ /CO/N ₂	H ₂	86.55	96.84	99.40	99.67	99.85
	CO	84.55	98.61	99.87	99.94	99.86

3 结 论

(1) 常温下, 高分散度的疏水催化剂 Pt/C/FN 对氢氧复合反应有较高的催化活性。与商用亲水催化剂 Pt/Al₂O₃ 相比, 前者活性明显更高。

(2) 采用水直接冷却, Pt/C/FN 疏水催化剂对常温氢氧复合反应的活性仅有少量下降。

(3) 富氧条件下, CO 对 Pt 基催化剂催化氢氧复合反应活性影响较小; Pt/C/FN 疏水催化剂可直接用于含 CO, H₂ 混合气体的常温氧化。

可知, (1) 富氧条件下, CO 对 Pt 基催化剂催化氢氧复合反应的活性影响较小, 可直接用 Pt/C/FN 疏水催化剂催化 CO, H₂ 混合气体的常温氧化; H₂ 中加入 CO, 15 °C 时, H₂ 的转化率有所下降; 35 °C 以上 H₂ 转化率没有明显变化, 75 °C 及以上 H₂ 转化率甚至略有升高; (2) 对 H₂/CO/N₂ 混合气, 相同温度下 H₂ 和 CO 转化率基本接近; 15 °C 时, CO 比 H₂ 转化率略低, 55 ~ 75 °C 范围内, CO 比 H₂ 更容易被氧化, 继续升高反应温度至 95 °C, CO 和 H₂ 转化率基本接近; (3) 随反应温度升高, H₂ 转化率逐渐增加; CO 转化率先随温度升高而增加, 至 75 °C 达最高值, 95 °C 时转化率反而有所下降。

对 LPCE 反应, CO 在 Pt 表面发生强吸附, 阻止氢气在 Pt 表面的解离吸附, 氢气与水的氢同位素交换反应无法在 Pt 表面继续进行, 因此 CO 使 Pt 基疏水催化剂催化 LPCE 反应的活性下降。而在富氧条件下, 吸附在 Pt 表面的 CO 快速与 O₂ 反应, 生成 CO₂ 脱附, 因此 CO 对 Pt 基疏水催化剂催化常温氢氧复合反应的活性没有明显影响。

参考文献:

- [1] Eckardt B, Hill A. Apparatus for the Recombination of Hydrogen in a Gas Mixture; US, 6356613[P]. 2002-03-12.
- [2] Eckardt B, Hill A. Catalyst System and Recombination Device for Recombining Hydrogen and Oxygen, in Particular for a Nuclear Power Station and Method for Operating a Catalyst System; US, 6054108[P]. 2000-04-25.
- [3] Heck R, Schwenk K H. Device for the Recombination of Hydrogen and Oxygen and Nuclear Power

- Plant Using the Device: US, 5473646[P]. 1995-02-05.
- [4] 但贵萍,卢瑶章,邱永梅,等. 大粒径疏水催化剂的制备及氧化氘氢(HT)的性能研究[J]. 原子能科学技术, 1999, 33(1): 12-17.
- [5] 邵明昶,胡石林,吴全锋. 常温催化氢氧化合过程研究[J]. 核化学与放射化学, 2002, 24(3): 129-133.
- [6] Hsieh C C, Lee J F, Liu Y R, et al. Structural Investigation of Catalyst Deactivation of Pt/SDB for Catalytic Oxidation of VOC-Containing Wastewater[J]. Waste Management, 2002, 22: 739-745.
- [7] Belapurkar A D, Gupta N M. Development of a Hydrophobic Catalyst for Recombining Radiolytically Generated H₂ and O₂ in Nuclear Reactors[C]// In National Symposium on Water and Steam Chemistry in Power Plants and Industrial Units. India, Mumbai, 2000: 23-25.
- [8] den Hartog J, Butler J P, Molson F W R. Ordered Bed Packing Module: US, 4471014 [P]. 1982-03-29.
- [9] Marques P, Ribeiro N F P, Schmal M, et al. Selective CO Oxidation in the Presence of H₂ Over Pt and Pt-Sn Catalysts Supported on Niobia[J]. J Power Sources, 2006, 158: 504-508.
- [10] 胡 胜,朱祖良,罗顺忠,等. 高分散度 Pt-Ir 疏水催化剂制备及氢-水液相交换催化性能研究[J]. 无机化学学报, 2007, 23(1): 91-96.
- [11] 胡 胜,肖成建,朱祖良,等. 氢水液相交换反应应用高分散度 Pt/C/FN 疏水催化剂制备及 Pt 粒径效应研究[J]. 化学学报, 2005, 65(22): 2 515-2 521.
- [12] 胡 胜,古 梅,肖成建,等. 催化剂制备方法及高温还原对 Pt/C/FN 疏水催化剂活性的影响[J]. 核技术, 2008, 31(7): 539-545.
- [13] Jiang L H, Sun G Q, Sun S G, et al. Structure and Chemical Composition of Supported Pt-Sn Electrocatalysts for Ethanol Oxidation[J]. Electrochim Acta, 2005, 50: 5 384-5 389.
- [14] Li W Z, Zhou W J, Li H Q, et al. Nano-Structured PtFe/C as Cathode Catalyst in Direct Methanol Fuel Cell[J]. Electrochim Acta, 2004, 49: 1 045-1 055.
- [15] Liang Y M, Zhang H M, Zhong H X, et al. Preparation and Characterization of Carbon-Supported PtRuIr Catalyst With Excellent CO-Tolerant Performance for Proton-Exchange Membrane Fuel Cell[J]. J Catal, 2006, 238: 468-476.
- [16] Li X, Chen W X, Zhao J, et al. Microwave Polyol Synthesis of Pt/CNT Catalysts: Effect of pH on Particle Size and Electrocatalytic Activity for Methanol Electrooxidization [J]. Carbon, 2005, 43: 2 168-2 174.
- [17] Liu Z L, Ling X Y, Su X D, et al. Carbon-Supported Pt and PtRu Nanoparticles as Catalysts for a Direct Methanol Fuel Cell[J]. J Phys Chem B, 2004, 108: 8 234-8 240.
- [18] 金钦汉. 微波化学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 14-17.
- [19] Yang J, Deivaraj T C, Too H P, et al. Acetate Stabilization of Metal Nanoparticles and Its Role in the Preparation of Metal Nanoparticles in Ethylene Glycol[J]. Langmuir, 2004 (20): 4 241-4 245.
- [20] Zhang M Q, Zhou B, Chuang K T. Catalytic Deep Oxidation of Volatile Organic Compounds Over Fluorinated Carbon Supported Platinum Catalysts at Low Temperatures[J]. Appl Catal B: Environmental, 1997, 13: 123-130.
- [21] Wu J C S, Lin Z A, Tsai F M, et al. Low-Temperature Complete Oxidation of BTX on Pt/Activated Carbon Catalysts [J]. Catal Today, 2000, 63: 419-426.
- [22] 但贵萍,杜 阳,杨 勇,等. Pt-SDB 疏水催化剂抗毒稳定性研究[C]//第七届全国核化学与放射化学学术研讨会. 北京, 2005: 171.