

泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂制备及电催化偏二甲肼研究

周婉婷, 吕晓猛*, 贾 瑛, 沈可可
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为了解决电化学方法处理偏二甲肼 (Unsymmetrical Dimethylhydrazine, UDMH) 污染时, 常用的碳基电催化剂贵金属含量较高、价格昂贵的问题, 采用化学浸渍法制备泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂, 分析了氧化石墨烯浓度、PdCl₂ 浓度和 pH 值对催化剂性能的影响, 运用扫描电子显微镜、X 射线能谱和 X 射线衍射表征了催化剂的表面形貌和结构特征。将复合催化剂应用于构建 UDMH-质子交换膜燃料电池, 测试了电池的性能。结果表明: 大比表面积的氧化石墨烯浓度变化是影响复合电极电催化性能的主要因素; 在氧化石墨烯浓度为 1 mg/mL、PdCl₂ 浓度为 0.2 mol/L、pH=3 的条件下, UDMH 氧化峰电流密度最大; 所制备的燃料电池可获得最大开路电压 0.9 V、最大功率密度 0.61 mW/cm² 的性能输出。

关键词: 化学浸渍法; 石墨烯/钯复合催化剂; 偏二甲肼; 电化学性能

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-081-007

Preparation of Nickel Foam Loaded Graphene/Palladium Composite Catalyst and Application on Electrocatalytic UDMH

ZHOU Wanting, LYU Xiaomeng*, JIA Ying, SHEN Keke
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: In existing electrochemical treatment for unsymmetrical dimethylhydrazine (UDMH), the commonly used carbon-based electrocatalysts have high precious metal content and are expensive. To solve the problem, nickel foam loaded graphene/palladium composite catalysts were prepared by chemical impregnation method. Furthermore, effects of the main factors such as graphene oxide concentration, PdCl₂ concentration and pH were analyzed. Simultaneously, the surface morphology and structure of the catalyst were characterized by SEM, EDS and XRD. Additionally, the prepared composite catalyst was applied to construct a UDMH proton exchange membrane fuel cell (UDMH-PEMFC). The performance of the UDMH-PEMFC was tested. Results showed that the variation of graphene oxide concentration with a large specific surface area was the main influencing factor on the electrocatalytic performance of the composite electrode.

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金 (52370186)

第一作者: 周婉婷 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事特种能源理论与技术研究。E-mail: 3078538137@qq.com

***通信作者:** 吕晓猛 (1982—), 男, 教授, 主要从事特种能源理论与技术研究。E-mail: 705069515@qq.com

引用格式: 周婉婷, 吕晓猛, 贾瑛, 等. 泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂制备及电催化偏二甲肼研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 81-87.

The maximum current density of the UDMH oxidation peak was achieved at a graphene oxide concentration of 1 mg/mL, a PdCl₂ concentration of 0.2 mol/L as well as pH=3. The prepared fuel cell could have a performance output with a maximum open-circuit voltage of 0.9 V and a maximum power density of 0.61 mW/cm².

KEYWORDS: chemical impregnation; graphene/palladium composite catalyst; UDMH; electro-chemical properties

偏二甲肼（Unsymmetrical Dimethylhydrazine, UDMH）是一种在航天发射和军事领域应用广泛的液体推进剂，拥有较高的能量比冲和较好的稳定性，但其高毒性、致癌性使其成为威胁人员安全和环境安全的较大隐患。传统处理 UDMH 废水的常用方法有物理处理法、化学处理法、生物降解法及各种方法的联合^[1-6]，以上方法存在处理浓度低、时间较长、能源消耗较大、催化剂不易回收而造成二次污染等问题。

基于质子交换膜燃料电池的电化学方法催化处理 UDMH 污染，在将高能 UDMH 的化学能转化为电能的同时，有望实现高效降解 UDMH 污染，具有同时实现电能输出和污染处理的优势。吕晓猛等开展了以碳粉为基材的贵金属电催化剂催化 UDMH 的相关研究^[7-11]，制备了高效核壳结构的贵金属催化剂，构建利用负载在玻碳电极上 Pt 催化 UDMH 的燃料电池等。但是在催化剂的载量降低、分散性提高、活性提升等方面还需进一步研究。本文在前期研究基础上，选用孔径率高、比表面积大的泡沫镍负载石墨烯，制备了低贵金属含量的泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂，研究了氧化石墨烯浓度、PdCl₂ 浓度和 pH 值等主要因素的影响，并且对复合电极催化 UDMH 性能进行了研究。

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

所用主要试剂和仪器如表 1 和表 2 所示。

1.2 复合催化剂制备

泡沫镍电极片的预处理：将泡沫镍电极片剪成 10 mm×10 mm×1 mm 的正方形，置于丙酮中超声冲洗 20 min，取出电极片用超纯水冲洗电极片上残留丙酮，再置于 6 mol/L 的盐酸中超声冲洗 10 min，继而将电极片放于超纯水中超声冲洗 20 min，60 ℃ 下干燥 30 min 备用。

表 1 实验所涉及的试剂与材料
Tab. 1 Reagents and materials for the experiment

试剂名称	分子式	纯度	生产单位
氯化钯	PdCl ₂	分析纯	天津科密欧化学试剂公司
盐酸	HCl	质量分数 36.5%	天津光复精细化工研究所
硫酸	H ₂ SO ₄	质量分数 98%	天津光复精细化工研究所
nafion 溶液	—	质量分数 5%	Cool chemical science and technology
氢氧化钠	NaOH	分析纯	天津大茂化学试剂厂
过氧化氢	H ₂ O ₂	质量分数 30%	山西同杰化学试剂有限公司
阳离子交换膜	—	Nafion115 (40 cm×40 cm)	上海河森电气有限公司
偏二甲肼 (CH ₃) ₂ NNH ₂		质量分数 ≥ 99%	—
无水乙醇	C ₂ H ₅ OH	分析纯	天津科密欧化学试剂公司

表 2 实验主要仪器
Tab. 2 Main instruments for the experiment

仪器名称	型号	生产单位
电化学工作站	CHI660	上海辰华仪器有限公司
超声波处理器	FS-300N	上海生析超声仪器公司
温控仪	CSi32T-C24	OMEGA
热电偶	K 型	OMEGA
场发射扫描电镜	美国- <i>FEI</i> -Quanta FEG 250	<i>FEI</i>
能谱仪	EDAX Element	英国牛津
X 射线衍射仪	Bruker D8 Advance	德国布鲁克

选择改变氧化石墨烯溶液浓度、 PdCl_2 浓度和pH值探究所制备复合电极的条件, 这三者对反应的比表面积、催化剂粒径有着显著影响。取10 mL的1 mg/mL氧化石墨烯溶液, 与2 mL的0.1 mol/L氯化钯溶液混合, 然后将混合溶液放入超声处理器中超声处理10 min, 滴加1 mol/L硫酸溶液、1 mol/L NaOH溶液, 将上述混合液的pH调整为5, 后将预处理的泡沫镍电极片置于上述混合溶液中, 于干燥箱中恒温60 °C干燥6 h, 干燥完毕后取出泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂片, 超纯水冲洗表面团聚物, 放入干燥箱, 60 °C干燥30 min, 即得到泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂^[12]。分别改变氧化石墨烯溶液、氯化钯溶液的浓度和pH, 得到不同条件制备的泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂。

1.3 性能表征

运用场发射扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)、X射线能谱 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 和X射线衍射 (X-Ray Diffraction, XRD) 等手段对复合催化剂的表面形貌和结构特征进行表征, 以证明贵金属催化剂Pd的负载情况, 观察Pd负载于泡沫镍基底的形态, 检测贵金属含量。利用电化学工作站表征复合电极催化UDMH的电化学性能, 探究合适的制备条件。

SEM: 测试样品直接粘在导电胶上测试, 放大倍数20万倍以内。

EDS: 测试条件与SEM一致, 测试mapping+元素含量, 主要检测元素Ni、Pd的分布与含量。

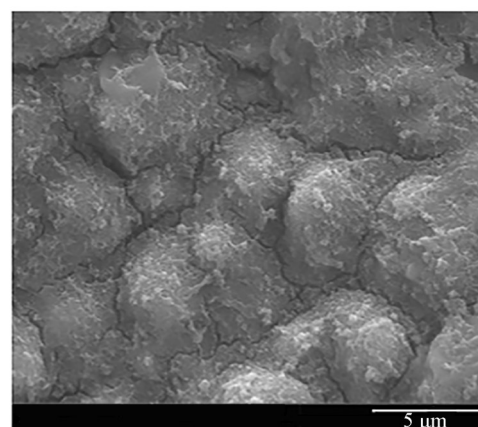
XRD: 使用Co辐射源, 选择常规测试模式, 扫描范围为 $2\theta=5^\circ \sim 95^\circ$, 选择常规扫描速率 $10^\circ/\text{min}$ 。

电催化性能: 三电极体系由工作电极、参比电极、辅助电极组成。测试阳极侧使用三口H型电解池, 工作电极为铂片电极来夹取的泡沫镍负载石墨烯/钯复合电极, 辅助电极为铂丝电极, 参比电极为饱和甘汞电极。本文中三电极测试体系下所有电极电位均参照饱和甘汞电极。

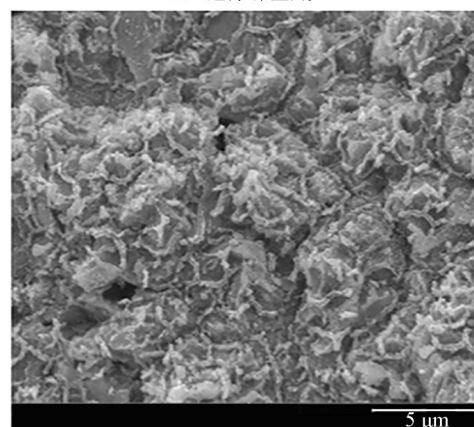
2 结果与讨论

2.1 催化剂结构与形貌

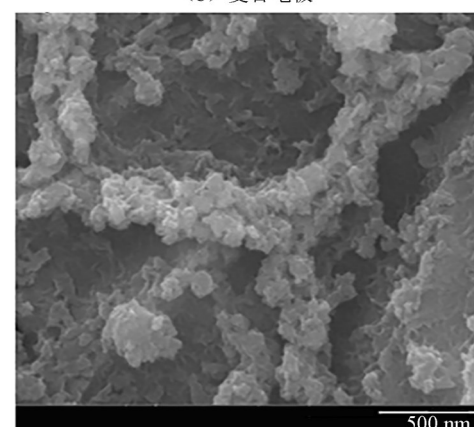
泡沫镍负载石墨烯/钯复合电极表面的SEM结果如图1所示。



(a) 泡沫镍基底



(b) 复合电极



(c) Pd的纳米颗粒

图1 复合电极表面的SEM图像

Fig. 1 SEM images of the surface of the composite electrode

由图1 (a) 和 (b) (放大倍数相同) 可看出: 泡沫镍基底表面无负载物, 伴有褶皱; 催化剂负载完成后复合电极表面被纳米形态的Pd颗粒覆盖。由图1 (c) 可见, 在更大放大倍数下, 贵金属Pd不是以单个微晶的形态分散在泡沫镍基底表面, 而是以球状微晶聚集体的形式存在, 由尺寸细小的球状颗粒堆积形成, 泡沫镍表面的褶皱

可避免金属粒子Pd的团聚；Pd与泡沫镍、石墨烯的结合，有利于电子传输及电解液渗透到电极内部参与电极反应，也便于电极材料放热排放到溶液中，可增加电极材料的热稳定性。

表3、图2和图3为复合电极表面的EDS能谱分析结果。显示催化剂Pd已成功负载在载体表面，元素检测得Pd质量分数约为8%，石墨烯质量分数约为4%，表明化学浸渍法成功实现贵金属催化剂的少量负载。

表3 复合电极EDS能谱分析结果

Tab. 3 Analysis of the composite electrode EDS energy spectrum

元素	质量分数/%	原子分数/%
C	6.30	25.11
Pd	4.15	1.88
Ni	89.55	73.02
合计	100.00	100.00

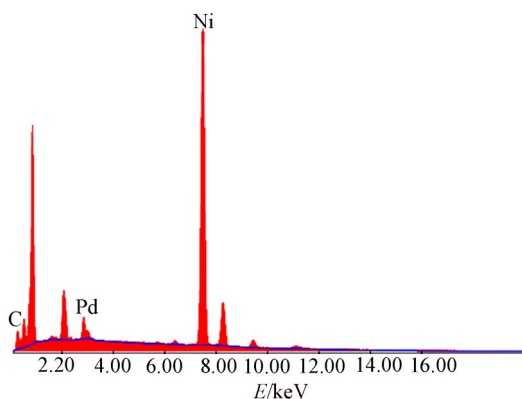


图2 复合电极表面的EDS能谱

Fig. 2 EDS energy spectrum of the surface of the composite electrode

图4是泡沫镍负载石墨烯/钯复合电极的XRD衍射图谱。可以看到，在泡沫镍载体表面负载的金属元素Pd的特征峰与Pd的标准衍射卡片（03-065-2867）相对应，其3个特征峰对应的位置分别为 47.169° 处的（1 1 1）晶面、 54.831° 处的（2 0 0）晶面， 81.261° 处的（2 2 0）晶面。衍射峰由此可推测，制备催化剂的过程中，贵金属Pd成功负载在泡沫镍表面。

2.2 主要影响因素与电催化性能

主要考察泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂过程中氧化石墨烯浓度、PdCl₂浓度和pH值等单因素的影响。结合循环伏安法研究复合催化剂对

UDMH的电化学催化响应，扫描速度 $0.05 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

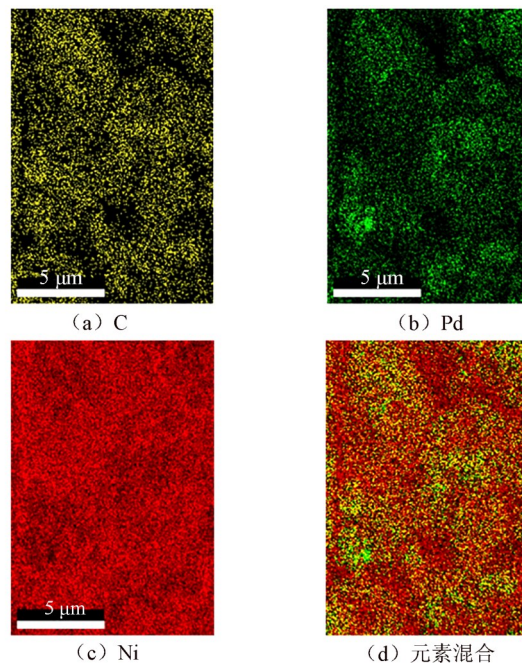


图3 复合催化剂的Mapping+元素含量测试结果

Fig. 3 Mapping and element contents of the composite catalyst

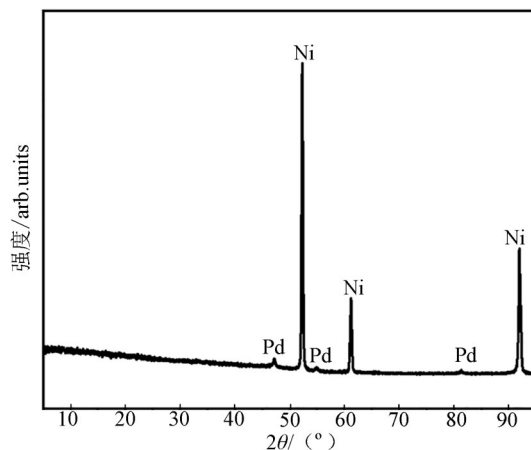


图4 复合电极XRD衍射图谱

Fig. 4 XRD diffraction spectrum of composite electrode

图5为复合电极在1 mol/L UDMH、1 mol/L NaOH等体积混合溶液中的循环伏安曲线，其中：图5（a），PdCl₂浓度为0.1 mol/L，pH值为5，氧化石墨烯浓度变化；图5（b），氧化石墨烯浓度为1 mg/mL，pH值为5，PdCl₂浓度变化；图5（c），氧化石墨烯浓度为1 mg/mL，PdCl₂浓度为0.1 mol/L，pH值变化。

由图5（a）可知，电催化性能受特定物质的影响，掺杂在石墨烯上制备的金属催化剂具有更好的耐久性和电催化活性。

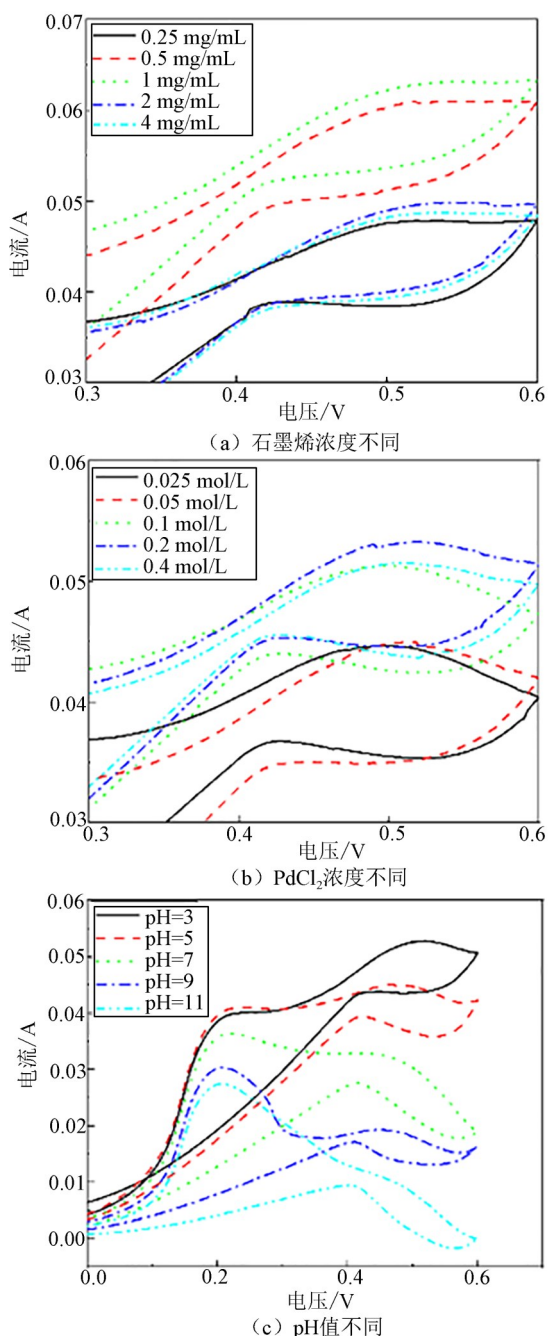


图 5 复合催化剂的循环伏安曲线

Fig. 5 Cyclic voltammogram of the composite catalyst

图 5 (a) 中循环伏安曲线在 0.5 V 时为 UDMH 的氧化峰, 观察此处可知, 当石墨烯浓度由 0.25 mg/mL 增加至 1 mg/mL 时, 氧化峰的电流密度呈上升趋势。这说明在制备复合催化剂的过程中, Pd 负载到电极表面的速率和在电极表面扩散的速率达到浸渍平衡的情况下, 氧化石墨烯浓度在一定范围内增加, 会增大比表面积, 使得电极表面和电解液充分接触, 加快了电极表面电化学反应的发生。同时, Pd 纳米颗粒在石墨烯载体表

面易于均匀分散, 逐渐增加至 4 mg/mL 时, UD-MH 氧化峰的电流密度有所下降。这说明氧化石墨烯浓度上升到一定阶段后, 增加的石墨烯无法提供更多的负载位点, 反而会发生团聚导致 Pd 负载效率的下降。综上, 氧化石墨烯最佳浓度为 1 mg/mL。

电极动力学方程为

$$i = i^0 \left[\exp \left(\frac{1-\alpha}{RT} nF\eta_a \right) - \exp \left(\frac{-\alpha}{RT} nF\eta_a \right) \right]$$

式中: i 为电池电流密度; α (对称系数) 为过渡态与氧化态物种的距离与整个反应历程的空间的比例; i^0 (交换电流密度) 为平衡时阳极方向的绝对反应电流密度; η_a 为阳极电化学极化电位; R 为理想气体常数; T 为热力学温度; F 为法拉第常数; n 为转移电子数。

从该方程可以看出, 增强电极催化剂的活性可以提高电催化反应速度。由图 5 (b) 可知: 随着 PdCl_2 浓度由 0.025 mol/L 增加至 0.2 mol/L, UDMH 氧化峰的电流密度上升, 这说明 PdCl_2 浓度的增加使得负载到电极上的 Pd 催化剂含量提高, Pd 负载后提高了电极表面的比表面积, 增加了活性点位, 减小了催化 UDMH 反应中的电子转移势垒, 催化活性升高, 催化 UDMH 分解的效率上升; PdCl_2 浓度由 0.2 mol/L 增加至 0.4 mol/L 后, 氧化峰的电流密度稍有下降, 这说明 PdCl_2 浓度上升到一定阶段后, Pd 负载量达到了一定程度, 过多的 Pd 颗粒将前期负载的 Pd 颗粒覆盖, 反而使电极表面比表面积减小, 活性点位减少, 因而导致电流密度出现少许下降。考虑到 Pd 为贵金属, 成本较高, 从催化效率方面考虑, 0.2 mol/L 为浸渍过程中 PdCl_2 溶液的最佳浓度。

由图 5 (c) 可知, 由 pH=3 变化到 pH=11 时, 氧化峰的电流密度显著下降, 说明在制备复合催化剂过程中, 在氧化石墨烯提供的负载条件一致、氯化钯溶液浓度一致的情况下, 酸碱度的增加使得负载到电极上的 Pd 催化剂含量明显减少, 催化 UDMH 分解的效率下降。pH 值直接影响 Pd 的纳米粒子大小: 在酸性环境下, Pd 以离子形式存在于溶液中, 其沉积在泡沫镍/石墨烯骨架表面使得电极比表面积增大, 因而电极催化活性增大; 溶液呈碱性时, Pd 与 OH^- 络合发生团聚, 不利于 Pd 的负载。所以, 当酸碱度从 pH=3 变化到 pH=11 时, 电流密度呈下降趋势。

综上, 石墨烯通过改变比表面积影响催化剂

负载的活化位点, Pd 通过减小催化 UDMH 反应中的电子转移势垒影响反应效率, pH 通过改变 Pd 的纳米粒子大小来影响负载效率。单因素实验中利用化学浸渍法制备泡沫镍负载石墨烯/钯复合电极得到最佳电流密度的工艺是: 氧化石墨烯浓度 1 mg/mL、PdCl₂ 浓度 0.2 mol/L、pH=3。

2.3 复合电极用于电催化 UDMH 性能

构建催化 UDMH 的质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 体系, 将实验制备的泡沫镍负载石墨烯/钯复合电极用于该体系, 探索电池运行温度、送料体积流量、电解质 NaOH 浓度、阴极侧 H₂O₂ 和 H₂SO₄ 浓度、阳极侧 UDMN 浓度对电池性能的影响。

UDMH-PEMFC 由全电池的双极板和膜电极组成。双极板为不锈钢材质的 2 个集流板, 每个集流板都包含单一蛇形流场, 开孔率为 50%, 宽度为 0.7 mm, 深度为 1 mm。复合催化剂尺寸为 1 cm×1 cm, 将 2 片复合催化剂用 2 片聚四氟乙烯垫片固定, 将 Nafion 115 膜夹在 2 个聚四氟乙烯垫片之间组成膜电极。膜电极通过夹在燃料电池装置的 2 个双极板之间进行固定。

Nafion 115 膜的预处理: 将 Nafion 115 膜裁剪为 2 cm×2 cm 的正方形, 放入 0.1 mol/L 硫酸和 0.5 mol/L H₂O₂ 混合水溶液中, 恒温 60 °C, 放置 1 h 后取出, 用超纯水洗涤备用。

UDMH-PEMFC 初始条件: 阳极为浓度 1.0 mol/L UDMH 和 1.0 mol/L NaOH 的等体积混合溶液, 送料体积流量为 2.0 mL/min; 阴极为 2.0 mol/L H₂O₂ 和 1.0 mol/L H₂SO₄ 等体积混合溶液, 送料体积流量为 2.0 mL/min; 工作温度 60 °C。电池结构如图 6 所示, 电池性能如图 7 所示。

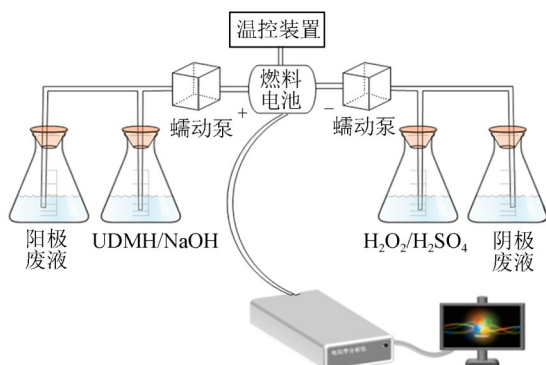
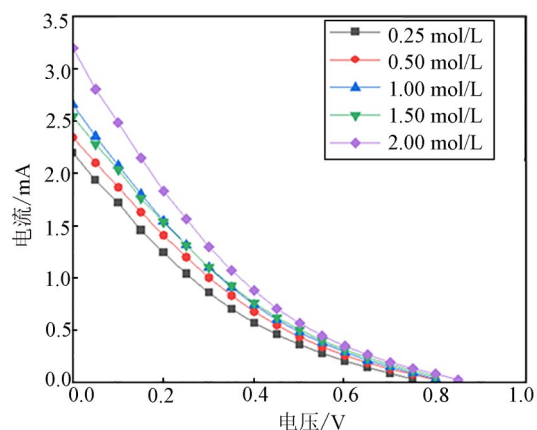


图 6 UDMH-PEMFC 结构

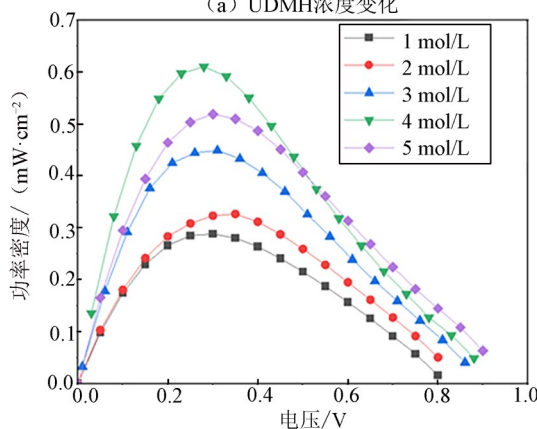
Fig. 6 Structure of UDMH-PEMFC

由图 7 (a) 可知: 改变 UDMH 浓度, 电流-

电压曲线的变化大体上保持线性趋势, 随着 UDMH 的浓度高, 使得电解液中离子浓度增加, Pd 催化 UDMH 分解的效率得到提升, 电池的开路电压功率密度随之上升, 电池的性能得到改善, 最大开路电压为 0.85 V。



(a) UDMH 浓度变化



(b) NaOH 浓度变化

图 7 UDMH-PEMFC 电池性能

Fig. 7 Performance of UDMH-PEMFC

图 7 (b) 显示: 随着 NaOH 浓度升高, 电池的功率密度提升, NaOH 浓度为 4 mol/L 时, 其最大开路电压 0.9 V, 最大功率密度 0.61 mW/cm²。造成这种情况的原因为 NaOH 浓度增大时, OH⁻ 和 Na⁺ 的浓度增大, 溶液电导率升高, 功率密度增加。在 NaOH 浓度到达 5 mol/L 时, 高浓度的 OH⁻ 会减弱偏二甲肼在水溶液中与水反应生成共轭酸 (CH₃)₂NNH₃⁺ 的反应, 抑制 (CH₃)₂NNH₃⁺ 的生成, 由此使得功率密度降低。

3 结论

本文基于泡沫镍负载石墨烯的孔径率高、比表面积大的优势, 构建了一种利用化学浸渍法制

备泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂用于电催化 UDMH 的方法, 并研究了其应用于 UDMH-PEMFC 的主要性能, 主要结论如下: (1) 在氧化石墨烯浓度为 1 mg/mL、PdCl₂ 浓度为 0.2 mol/L、pH=3 的条件下, 复合电极的电催化性能最优; (2) 将泡沫镍负载石墨烯/钯复合催化剂用于构建 UDMH-PEMFC, 可获得最大开路电压 0.9 V、最大功率密度 0.61 mW/cm² 的性能输出。研究成果为低成本高效能 UDMH 电催化方法的持续改进提供了参考。

参考文献:

- [1] 王杰鹏, 童文华, 张永奎, 等. 芬顿氧化-活性炭吸附联用法处理偏二甲肼废水及其生物毒性研究[J]. 应用化工, 2023, 52(3): 789-794.
- WANG J P, TONG W H, ZHANG Y K, et al. Fenton oxidation-activated carbon adsorption combination treatment of UDMH and its biotoxicity[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(3): 789-794.
- [2] 杜思燕, 周锋, 任向红, 等. 羧基化介孔二氧化硅的制备及其对废水中偏二甲肼的吸附效能[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 128-132.
- DU S Y, ZHOU F, REN X H, et al. Preparation of carboxylated mesoporous silica and adsorption performance of unsymmetrical dimethylhydrazine in wastewater[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 128-132.
- [3] 周锋, 任向红, 强洪夫, 等. GO 增强 g-C₃N₄ 气凝胶的可见光响应及其光催化降解偏二甲肼废水[J]. 材料工程, 2021, 49(11): 171-178.
- ZHOU F, REN X H, QIANG H F, et al. GO enhanced visible-light response of g-C₃N₄ aerogel and degradation of unsymmetrical dimethylhydrazine in wastewater[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(11): 171-178.
- [4] 周振, 于亚琴, 马文, 等. 铁电极耦合过硫酸盐处理偏二甲肼废水[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(8): 88-93.
- ZHOU Z, YU Y Q, MA W, et al. Elimination of unsymmetrical dimethylhydrazine by Fe electrode coupled persulfate[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(8): 88-93.
- [5] HOU R M, JIA Y, HUANG Y Z, et al. TiO₂ reduced graphene oxide for the removal of gas-phase unsymmetrical dimethylhydrazine[J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45(1): 394-402.
- [6] WANG J P, TONG W H, WANG X Q, et al. Investigating UDMH degradation using microwave-assisted manganese oxidation: Mechanistic insights, toxicity assessment, and nitrogenous product analysis[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 327: 124849.
- [7] 郝兆文, 贾瑛, 殷立峰, 等. 电催化氧化法降解偏二甲肼废水研究[J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1261-1266.
- HAO Z W, JIA Y, YIN L F, et al. Study on degradation of UDMH wastewater by electro-catalytic oxidation[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(5): 1261-1266.
- [8] 吕晓猛, 贾瑛, 李茸, 等. 基于液体燃料电池的高浓度肼推进剂废水降解研究[J]. 应用化工, 2020, 49(7): 1609-1612.
- LÜ X M, JIA Y, LI R, et al. Study on degradation of high concentration hydrazine wastewater using liquid fuel cell[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(7): 1609-1612.
- [9] 赵梦源, 吕晓猛, 张皓哲, 等. 低 Pt 纳米电催化剂的水热合成法制备及性能研究[J]. 火箭军工程大学学报(自然科学版), 2021, 35(1): 79-82.
- ZHAO M Y, LV X M, ZHANG H Z, et al. Preparation and property characterization of low-platinum nano-electrocatalyst based on hydrothermal synthesis method[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 35(1): 79-82.
- [10] SUN X D, LI Y S, AN L, et al. Comparative performance evaluation of self-basifying direct formate fuel cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(12): F768.
- [11] ZHAO M Y, LV X M, JIA Y. Development and performance of direct unsymmetrical dimethylhydrazine fuel cells[J]. Electrochemistry Communications, 2022, 142: 107372.
- [12] 孙丽美, 温凤春, 李苏日古嘎, 等. 泡沫镍负载石墨烯/钯复合电极催化 H₂O₂ 电还原研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(2): 149-152.
- SUN L M, WEN F C, LI S R G G, et al. Electrocatalytic reduction of H₂O₂ by foam Ni supported rGO oxide/Pd composite electrode[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(2): 149-152.