

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.09.015

聚丙烯还原氧化镍制备 Ni-C 微粉催化电极材料的研究

魏贤¹, 张文帝², 叶锦涛¹, 王远明¹, 李承泽¹, 喻思航¹, 洪澜¹

(1. 苏州大学 钢铁学院, 江苏 苏州 215000; 2. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819)

摘要: 利用聚丙烯(PP)与氧化镍(NiO)粉末混合物(质量比 1:2.3~1:2.7)在氩气气氛下加热制备 Ni-C 微粉析氢电极催化材料。重点探究质量比对 Ni-C 微粉制备过程及其催化性能的影响。采用同步热分析仪(TG-DSC)监测反应过程, 利用 XRD 和 SEM-EDS 确定反应固相产物的物相组成及微观形貌, 析氢催化性能及稳定性由电化学工作站(Parstat 3000A)测试获得。结果表明, 混合粉末在加热过程中 PP 发生熔化和裂解反应, 其裂解产物还原 NiO。当温度高于 1 073 K 时, 固相产物由镍、碳单质组成。固相产物中镍单质的含量随初始 NiO 含量的增加而增大。由 PP:NiO=1:2.6 及 1:2.7 两样品制备的 Ni-C 微粉在高过电位下以及低过电位下均拥有较好的析氢效果及稳定性, 1 000 次循环伏安测试后仍保持了良好的析氢催化效果。

关键词: 聚丙烯; 氧化镍; 镍碳微粉; 析氢催化剂; 裂解

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2021)09-0090-07

Fabrication of Ni-C Micro Powders as Electro-catalyst from Reduction of Nickel Oxide by Polypropylene

WEI Xian¹, ZHANG Wen-di², YE Jin-tao¹, WANG Yuan-ming¹,
LI Cheng-ze¹, YU Si-hang¹, HONG Lan¹

(1. School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Ni-C micro powders as electro-catalyst for hydrogen evolution were fabricated from mixtures of polypropylene (PP) and NiO (mass ratio from 1:2.3 to 1:2.7) by heating in Ar to 1 073 K. TG-DSC was employed for monitoring pyrolysis of PP+NiO mixtures, and XRD and SEM-EDS were utilized for analyzing composition and morphology of solid products of PP+NiO pyrolysis. Catalytic property of as-obtained solid pyrolysis products was tested by electrochemical workstation (Parstat 3000A). The results show that PP decomposes when heated and its decomposition products can reduce NiO, resulting in final solid products of Ni-C micro powders at 1 073 K, in which nickel content rises with increasing of initial NiO content in PP+NiO mixtures. Ni-C micro powders from pyrolysis of PP:NiO=1:2.6 and 1:2.7 exhibit the best catalytic performance and reliable stability under high over potential and low over potential. Good stability of catalytic performance can be observed after 1 000 cyclic voltammetry tests.

Key words: polypropylene (PP); nickel oxide; Ni-C micro powders; electro-catalyst for H₂ evolution; pyrolysis

收稿日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774206)

作者简介: 魏贤(1999-), 男, 云南曲靖人, 本科生; **通信作者:** 洪澜(1968-), 女, 满族, 辽宁人, 博士, 教授

由于日渐严重的能源及环境污染问题,可再生的清洁能源日益受到广泛关注^[1],其中密度低、热值高、制取简单的氢能因诸多优势而备受瞩目^[2]。目前主要的制氢方式有水煤气法、石油裂解和电解水法等^[3]。水煤气法、石油裂解法属于化学法,而电解水法属于电化学法。相较于化学法,电化学法具有操作更简单、产物更纯净的优势,因此电解水法在工业中得到了广泛的应用。而在电解水制氢的过程中需要借助能够降低析氢过电位的析氢催化剂以减少制氢的能耗^[4-5]。迄今为止的研究显示,铂、铑等贵金属及其合金的析氢催化性能最佳。但由于存在贵金属价格高昂、储量稀少、在碱性环境中容易失去活性等问题^[6],因此需发掘高性能、低成本的替代品^[7]。

价格相对低廉的过渡族金属镍与铂具有相似的外围电子排布,具有与铂相似的析氢催化能力^[8],加之金属镍在碱性环境中比较稳定^[9],因此金属镍作为贵金属析氢催化剂的替代品潜力巨大^[8]。氢气的制备成本可以通过在电解析氢过程中使用镍基析氢催化剂得到大幅度降低^[10-12]。此外镍基催化剂的活性位点及比表面积还可以利用加入少量非金属元素如碳、磷和硫等得到进一步增加,进而使其催化效率得到改善^[13]。其中镍基催化剂 Ni-Co-Fe、Ni₂P 和 Ni-C 等的性能已得到验证^[14],尤其是 Ni-C 微粉催化剂因具有稳定的化学性质而被认为极具潜力。目前 Ni-C 微粉催化剂的制备方式主要是以镍为中心制备 Ni-MOF 或利用碳纳米管与金属镍共同制备^[15],步骤繁多、效率较低^[16-18]。

聚丙烯(PP)是一种由丙烯通过加聚反应制得的聚合物,在高温下会裂解为小分子碳链有机物,控制其裂解条件可以生成固相碳及气相烷烃或氢气^[19-21],从而作为还原剂参与反应^[22]。为解决 Ni-C 微粉催化剂制备流程繁琐的问题,本研究提出利用 PP 的热裂解产物还原氧化镍(NiO)制备 Ni-C 微粉析氢催化剂,通过调整两者之间的配比及温度条件优化性能,提供一种简单易行高效的 Ni-C 析氢催化剂的制备方法。

1 试验方案

将 PP 微粉($D_{98}=50\ \mu\text{m}$)与 NiO 微粉($D_{98}=1\ \mu\text{m}$)以 1:2.3~1:2.7 的质量比称重后在卫星球磨机中混合 2 h,以获得均匀的 PP+NiO 混合物,备用。

采用同步热分析仪(Labsys Evo TG-DSC)检测 PP+NiO 混合物在加热过程中的变化。试样的初

始质量约 6 mg,坩埚为高纯刚玉材质,气氛为氩气,升温速率 10 K/min,温度最高为 1 273 K。记录升温过程中质量和热量的变化,分析各温度条件下获得的固相产物的成分及微观形貌,据此确定后续 Ni-C 微粉析氢催化剂的制备条件。

称取 2~3 g 样品,利用台式压片机(FYD-30T)压成圆形片后置入石英坩埚,在氩气气氛保护下以 10 K/min 升温至 1 073 K(由上述同步热分析仪试验结果确定),保温 30 min 后自然冷却,将固相产物取出用于析氢催化性能的测试。

反应固相产物的微观形貌观察及物相分析分别利用场发射扫描电子显微镜联动能谱仪(SEM-EDS, SU5000 及 Oxford)、X 射线衍射仪(XRD, Rigaku)完成。Ni-C 微粉的析氢催化性能的测试由电化学工作站(Parstat 3000A)分析完成,在 1 mol/L 的 NaOH 水溶液中采用三电极体系,铂电极作为对电极,饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,玻碳电极(直径 3 mm)负载 Ni-C 微粉作为工作电极。负载量为 6 μL ,成分为 4 mg Ni-C 微粉+750 μL 去离子水+150 μL 异丙醇+100 μL Nafion(0.5%,质量分数)的悬浊液^[23]。

2 试验结果与讨论

2.1 PP+NiO 混合物加热裂解过程分析

为明确反应机制提供辅助依据,与 PP+NiO 混合样品类似,进行了纯 PP 的热裂解过程分析测试。采用失重率(质量变化量占初始质量的百分数)表示升温过程中的反应进程。

加热过程中的典型重量及热流变化如图 1 所示,PP+NiO 混合物(PP:NiO=1:2.5)与纯 PP 的热裂解过程差异明显。由图 1a 可知,纯 PP 的热裂解过程为一段式,640 K 开始,760 K 结束。反应结束后失重率接近 100%,几乎所有产物均以气相形式逸出,这与文献结果^[24]相吻合。PP+NiO 混合物(PP:NiO=1:2.5)的失重过程为两段式,两段反应温度区间分别为 670~755 K 及 755~1 065 K。PP:NiO=1:2.5 样品的起始反应温度较纯 PP 升高约 30 K。第一阶段的失重温度范围与纯 PP 的热裂解温度范围基本相同,表明在此阶段 PP 的热裂解占主导;温度继续上升至高于 760 K 后,失重过程持续进行直至 1 065 K 左右。两个阶段的热裂解过程全部结束后混合物的总失重率为 44.5%,高于混合物中 PP 的初始含量 24.8%,充分说明混合物的失重并非完全由 PP 的裂解决定。

反应过程中热流随温度变化的曲线如图 1b 所示。纯 PP 分别在 437 K 和 729 K 时出现两个吸热峰,分别对应 PP 的熔化和裂解反应。PP : NiO = 1 : 2.5 样品在 435、710、740、925、1 025 K 时出现较强的吸热峰。其中 435 K 处吸热峰对应 PP 的熔化,表明 NiO 的存在并未影响 PP 的熔化过程;710、

740 K 处吸热峰与纯 PP 的裂解对应;925、1 025 K 处的吸热峰处于 PP : NiO = 1 : 2.5 样品的第二段失重区间。

以上结果均表明 NiO 与 PP 之间发生了相互作用,具体反应过程将依据固相产物的成分测定予以明确。

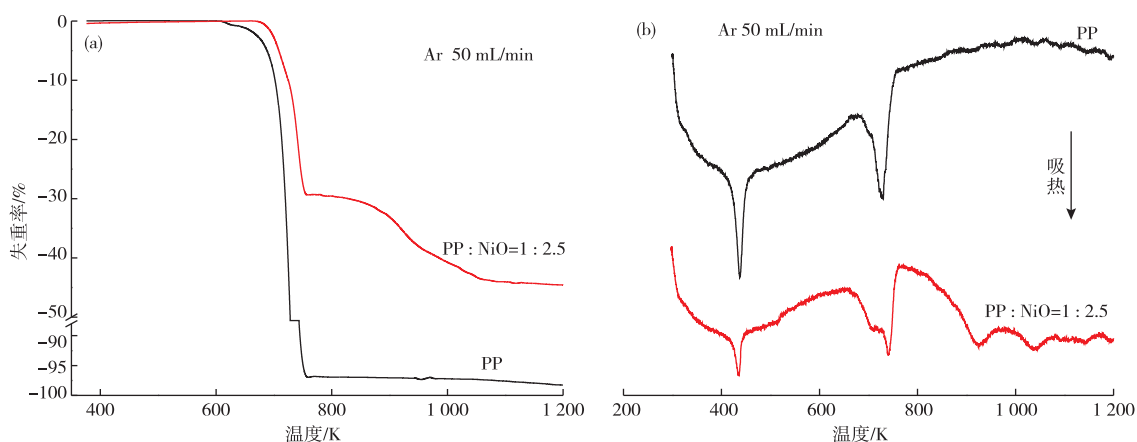


图 1 纯 PP 及 PP : NiO = 1 : 2.5 混合物样品的失重率(a)和热流(b)曲线

Fig. 1 TG-DSC results of pure PP and PP : NiO = 1 : 2.5 mixture:

(a) Weight loss ratio, (b) Heat flow

图 2a 为 PP + NiO 混合物在不同反应温度下固相产物的 XRD 分析结果。随着反应温度的升高,原混合物中的 PP 与 NiO 衍射峰逐渐减弱直至最终消失,而碳及金属镍的衍射峰逐渐增强。这充分说明 PP 与 NiO 之间发生了化学反应,固相产物为金属 Ni 及固相 C。与纯 PP 裂解完成后产物几乎均为气相产物相异,与 NiO 共存的 PP 中有部分碳元素转化为固相碳。

图 2b 是不同配比 PP + NiO 混合物在 1 073 K

反应结束后固相产物的 XRD 谱,碳衍射峰的细节如图中左上角处所示。由图 2b 可知,本研究测试的所有配比的混合物反应结束后的固相产物均为金属镍及固相碳。需指明的是, NiO 含量高的样品,反应结束后固相产物碳的衍射峰强度略有减弱,而金属镍的衍射峰强度略有增强,说明固相产物中镍含量随原料混合物中 NiO 含量的增加而增多,与此相反,固相产物中碳含量随原料混合物中 NiO 含量的增加而减少。

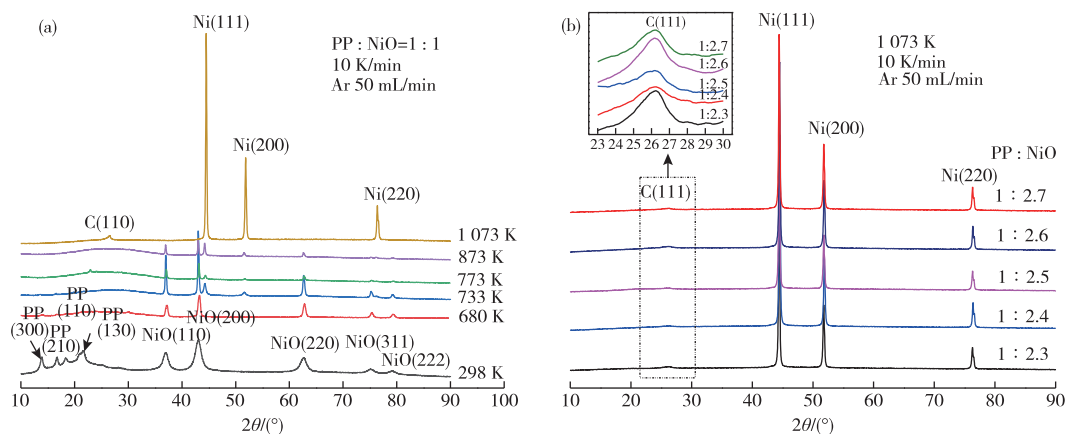
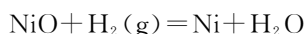


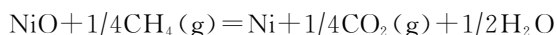
图 2 PP + NiO 混合物在不同反应温度(a)和配比(b)下固相产物的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of solid products at various temperatures(a) and mixing ratios(b)

由热力学计算软件 HSC6.0 计算得知,PP 在惰性气体保护下加热裂解会产生氢气、甲烷和乙烷等气相挥发分,同时 PP 中的碳元素由于 NiO 的存在易转变为单质碳。这些裂解产物均具有还原能力,可以使 NiO 还原为单质镍。NiO 与氢气、甲烷和碳发生还原反应的标准吉布斯自由能变化 ΔG^0 (J/mol)^[25] 如下。



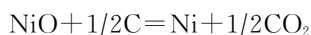
$$\Delta G^0 = -11.7 - 0.03T$$



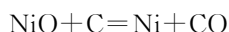
$$\Delta G^0 = 35.88 - 0.086T$$



$$\Delta G^0 = 62.93 - 0.114T$$



$$\Delta G^0 = 37.95 - 0.086T$$



$$\Delta G^0 = 121.2 - 0.172T$$

在标准状态下,氢气还原 NiO 的反应可以从低温开始自发进行。 CH_4 还原 NiO 反应的吉布斯自由能随温度的升高而逐渐降低,温度高于 417.2 K 后反应可自发进行。而碳还原 NiO 的反应则需较高的温度(>704.6 K)。在本研究的反应温度区间内,三种裂解产物 H_2 、 CH_4 、C 还原 NiO 的反应均可进行,还原产物为单质 Ni。因此图 1 中 PP+NiO 混合物裂解过程的第一失重阶段对应于 PP 的裂解及其裂解产物 H_2 、 CH_4 等还原 NiO,均为吸热过程。第二失重阶段则由碳还原 NiO 所引起,热流变化为吸热。过量的碳留存于固相产物中使 PP+NiO 混

合物的最终固相产物为金属 Ni 与单质炭的混合物,固相产物中 Ni 及 C 的含量取决于 PP+NiO 混合物的配比,PP 初始含量愈高则固相产物中的 C 含量愈多。

2.2 固相产物的析氢催化性能分析

利用三电极体系测试了 PP+NiO 混合物加热裂解后固相产物 Ni-C 微粉的析氢催化性能。图 3a 为不同配比样品加热至 1 073 K 后获得的固相产物 Ni-C 微粉与石墨粉(Graphite)、玻碳 GC 电极和 Pt 片(2 cm²)的 LSV 曲线,图 3b 为塔菲尔(Tafel)曲线。由图 3 可知,玻碳电极和纯石墨粉的析氢催化能力几乎可忽略不计,而固相产物 Ni-C 微粉具有较强的析氢催化性能。随着初始 PP+NiO 混合物样品中 NiO 含量的升高,过电位逐渐下降。如表 1 所示,当电流密度为 20 mA/cm² 时,由 PP : NiO = 1 : 2.7 混合物获得的 Ni-C 微粉析氢过电位为 307 mV,析氢能力最佳。由 Tafel 曲线可知,本研究制备的 Ni-C 微粉的斜率均低于 Pt 片,且随着 PP+NiO 混合物样品中 NiO 含量的增加,即热解后固相产物 Ni-C 微粉中 Ni 含量的升高,斜率下降(即析氢催化能力增强)。其中由 PP : NiO = 1 : 2.6 混合物样品所得 Ni-C 微粉的斜率最小,仅 131 mV/dec,远小于 Pt 片的 258 mV/dec。但是由于本研究中 Ni-C 微粉的起始电位较高,导致在低电流密度下析氢过电位较 Pt 片的大。综合而言,PP : NiO = 1 : 2.6 和 1 : 2.7 两样品制备的 Ni-C 微粉分别在高过电位下以及低过电位下拥有较好的析氢效果。

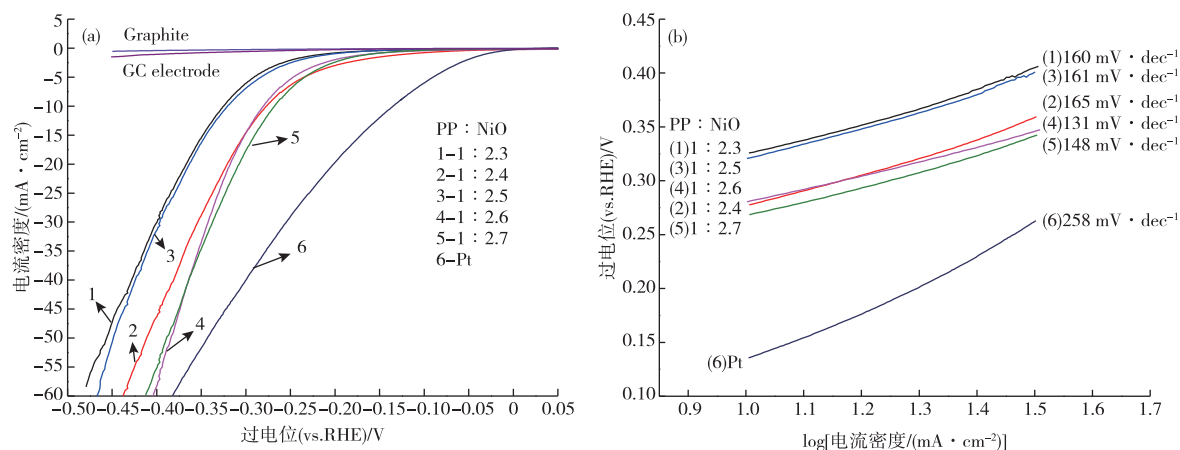


图3 不同配比固相产物析氢催化曲线 LSV(a)和 Tafel 曲线(b)(1 073 K)

Fig. 3 LSV curves(a)and Tafel curves(b)of hydrogen evolution using solid products(1 073 K)as electro-catalyst

表1 PP+NiO 混合物的固相产物与
Pt 片的析氢催化测试结果

Table 1 Results of hydrogen evolution of solid
products from PP+NiO pyrolysis and
Pt plate as electro-catalyst

样品 PP : NiO	20 mA/cm ² 时过电位/mV	Tafel 斜率/(mV · dec ⁻¹)
1 : 2.3	366	160
1 : 2.4	320	165
1 : 2.5	363	161
1 : 2.6	317	131
1 : 2.7	307	148
Pt	202	258

Ni-C 微粉的微观形貌如图 4 所示。可以看出, Ni-C 微粉呈颗粒状, 亮白色的金属 Ni 单质以球型或椭球型等不规则的形状包裹于暗灰色的炭单质内, 金属 Ni 单质的颗粒尺寸随 PP+NiO 混合物中 NiO 含量的增加而逐渐增大。Ni-C 微粉的析氢催化有效成分为金属 Ni, 炭单质在 Ni-C 微粉中隔离金属 Ni 以降低镍单质的团聚程度、提高其比表面积, 从而有益于金属 Ni 的析氢催化性能。因此, 随着 PP+NiO 混合物样品中初始 NiO 含量的增加, 固相产物中镍的含量增大, 析氢催化能力随之增强; 但同时 Ni-C 微粉中碳单质含量的减少将导致其对镍单质的隔离作用减弱, 生成的金属 Ni 颗粒粒度增大反而不利于析氢催化性能的提高。两种因素综合的结果导致由 PP : NiO=1 : 2.6 混合物样品制得

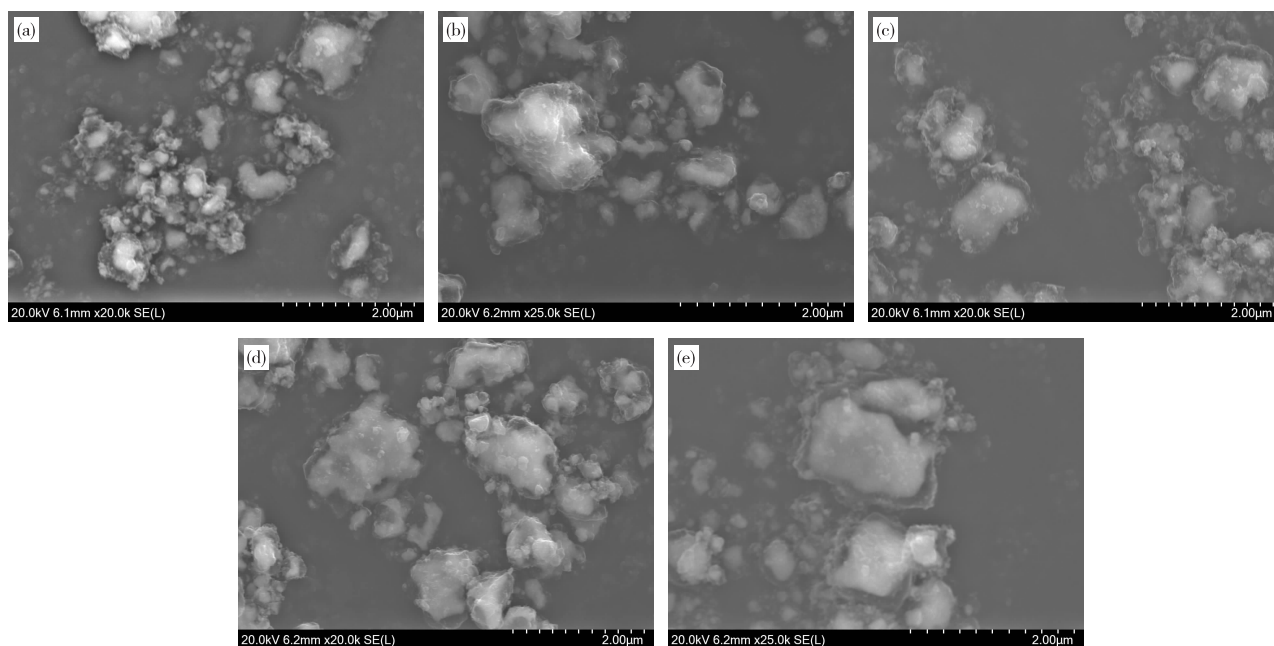
的 Ni-C 微粉的析氢催化性能最优。

Ni-C 微粉中固相 C 与金属 Ni 的共存方式可通过盐酸浸出金属 Ni 试验得到进一步验证。利用盐酸将 PP : NiO=1 : 2.5 混合物在 1 073 K 下制备的固相产物进行浸出处理以去除金属 Ni。经去离子水清洗过滤后, 利用 XRD 和 SEM 检测手段分析滤渣的物相组成和表面形貌。结果如图 5 所示。

如图 5a 所示, 经盐酸浸出后, 大部分的单质镍溶于盐酸而被去除, 滤渣的主相为碳。滤渣的微观形貌如图 5b 所示, 炭颗粒为多孔中空状, 空隙处原为金属 Ni 所处位置。进一步证实了图 4 中 Ni-C 微粉为 C 包裹 Ni 的微观结构。

由此可以得出, 在 PP+NiO 混合物热裂解过程中, 两者的相互作用主要为: PP 的组分还原 NiO 生成金属镍; NiO 的存在使 PP 中的 C 元素形成固相碳, 可以有效地隔离生成的金属镍, 抑制其颗粒长大, 提高其比表面积, 增强其析氢催化能力。

Ni-C 微粉析氢催化剂的优势之一是在碱性介质中具有良好的性能稳定性。本研究连续测试了 1 000 次循环伏安曲线。PP : NiO=1 : 2.5 混合物在 1 073 K 下制备的 Ni-C 微粉的析氢催化性能稳定性的测试结果如图 6 所示。经过 1 000 次循环后的伏安曲线与首次几乎重合, 仅在高过电位区间电流密度略有下降。结果充分说明, 由 PP+NiO 混合物制备的 Ni-C 微粉作为析氢催化剂在碱性介质中能够长时间使用。



(a)—PP : NiO=1 : 2.3; (b)—PP : NiO=1 : 2.4; (c)—PP : NiO=1 : 2.5; (d)—PP : NiO=1 : 2.6; (e)—PP : NiO=1 : 2.7

图4 PP+NiO 混合物 1 073 K 热裂解后固相产物的微观形貌

Fig. 4 Morphology of solid products after PP+NiO mixture pyrolysis at 1 073 K

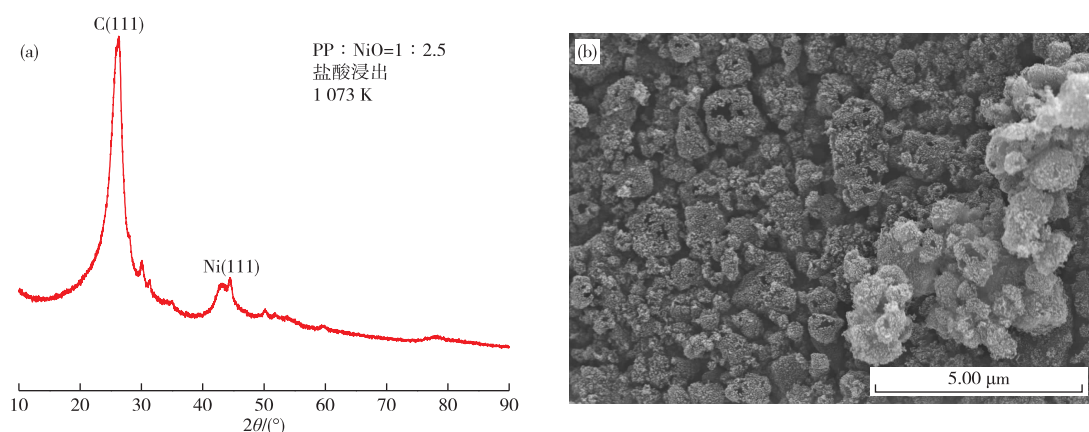


图 5 固相产物盐酸浸出滤渣的 XRD 谱(a)和 SEM 形貌(b)

Fig. 5 XRD pattern(a) and SEM morphology(b) of filter residue after hydrochloric acid leaching of solid products from PP : NiO=1 : 2.5 pyrolysis at 1 073 K

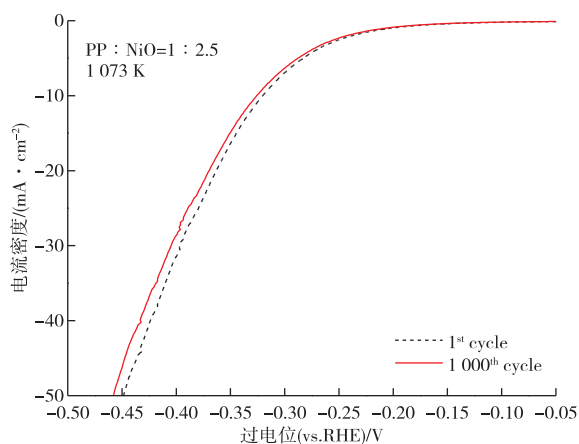


图 6 Ni-C 微粉析氢催化稳定性测试

Fig. 6 Stability test of Ni-C micro powders as electro-catalyst for hydrogen evolution

3 结论

1) 利用 PP 和 NiO 混合物在氩气气氛下加热至 1 073 K 制备 Ni-C 微粉析氢催化剂。与 PP 的一段式裂解过程相比, PP 与 NiO 混合物的失重过程为两段式, 在纯 PP 裂解结束温度 760 K 后混合物样品的失重仍持续进行至 1073 K 结束。此外 NiO 的存在使反应起始温度升高约 30 K。

2) 加热后 PP 与 NiO 相互作用生成了单质镍并使 PP 中的碳元素转变为单质炭, 反应于 1 073 K 完全结束, 最终的固相产物为金属 Ni 与单质炭的微粉混合物。单质炭抑制了金属镍在生成过程中的团聚, 限制了金属 Ni 微粉的粒度, 因此固相产物 Ni-C 微粉具有较好的析氢催化性能。在本研究测试的配比范围内, 由 PP : NiO=1 : 2.6 混合物制备的 Ni-C

微粉析氢催化效果最佳。

3) 本研究提出的制备 Ni-C 微粉析氢催化剂的方法简单, 降低了镍基析氢催化剂成本并提高了制备效率。

参考文献

- [1] COOK T R, DOGUTAN D K, REECE S Y, et al. Solar energy supply and storage for the legacy and nonlegacy worlds [J]. Chemical Reviews, 2010, 110 (11): 6474-6502.
- [2] ARMAROLI N, BALZANI V. The hydrogen issue[J]. ChemSusChem, 2011, 4(1): 21-36.
- [3] AL-SALEM S M, LETTIERI P, BAEVENS J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review [J]. Waste Management, 2009, 29(10): 2656-2643.
- [4] YANG Y M, LIU J, GUO S J, et al. A nickel nanoparticle/carbon quantum dot hybrid as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution under alkaline conditions[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(36): 18598-18604.
- [5] ZHENG Y, JIAO Y, ZHU Y H, et al. Hydrogen evolution by a metal-free electrocatalyst[J/OL]. Nature Communications, 2014, 5: 3783. <https://www.nature.com/articles/ncomms4783>.
- [6] NIE Y, LI L, WEI Z D. Recent advancements in Pt and Pt and Pt-free catalysts for oxygen reduction reaction[J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44(8): 2168-2201.
- [7] ZOU X X, ZHANG Y. Noble metal-free hydrogen evolution catalysts for water splitting [J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44(15): 5148-5180.
- [8] WANG F L, CHEN G, LIU X H, et al. Advanced

- electrocatalytic performance of Ni-Based materials for oxygen evolution reaction [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(1): 341-349.
- [9] 杜晶晶, 李娜, 许建雄, 等. 电解水析氢电极材料的研究新进展[J]. 功能材料, 2015, 46(9): 9001-9006.
- DU J J, LI N, XU J X, et al. The progress of research on the electrode materials for hydrogen evolution in water electrolysis[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(9): 9001-9006.
- [10] MICHALSKY R, ZHANG Y J, PETERSON A A. Trends in the hydrogen evolution activity of metal carbide catalysts[J/OL]. ACS catalysis, 2014, 4: 1274-1278. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cs500056u>.
- [11] 张晓, 何小波, 李响, 等. 基于 Fe、Co、Ni 的电催化析氢催化剂的研究进展[J]. 新型工业化, 2016, 6(10): 1-9.
- ZHANG X, HE X B, LI X, et al. Recent progress in the electrocatalysts based on Fe, Co and Ni for electrocatalytic hydrogen evolution reaction [J]. The Journal of New Industrialization, 2016, 6(10): 1-9.
- [12] VIJ V, SULTAN S, HARZARDI A M, et al. Nickel-based electrocatalysts for energy related applications; Oxygen reduction, oxygen evolution, and hydrogen evolution reactions [J]. ACS Catalysis, 2017, 7(10): 7196-7225.
- [13] 方志强, 邹毅臻, 王雨晴, 等. 镍基电催化析氢催化剂的研究进展[J]. 化学研究, 2017, 28(6): 1008-1011.
- FANG Z Q, ZHOU Y Z, WANG Y Q, et al. Recent progress in Ni-related electrocatalysts for hydrogen evolution reaction[J]. Chemical Research, 2017, 28(6): 1008-1011.
- [14] 丁维平, 郭学锋, 莫敏, 等. 非晶态合金纳米管的制备及其催化性能研究进展[J]. 催化学报, 2010, 31(8): 887-894.
- DING W P, GUO X F, MO M, et al. Progress of the study on the synthesis and catalytic property of noncrystalline alloy nanotubes[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2010, 31(8): 887-894.
- [15] 徐文策, 王红霞. 非晶非贵金属催化剂的研究进展及展望[J]. 催化学报, 2017, 38(6): 991-1005.
- XU W C, WANG H X. Earth-abundant amorphous catalysts for electrolysis of water[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2017, 38(6): 991-1005.
- [16] YU Y, HUANG S Y, LI Y, et al. Nanostructured nickel phosphide as an electrocatalysis of MoS₂ for hydrogen evolution [J]. Nano Letters, 2013, 14(2): 553-562.
- [17] EFTEKHARI A. Electrocatalysts for hydrogen evolution reaction[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(16): 11053-11077.
- [18] POPCZUM E J, MCKONE J R, READ C G, et al. Nanostructured nickel phosphide as an electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(25): 9267-9270.
- [19] AL-SALEM S M, ANTELAVA A, CONSTANTINOU A, et al. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste(PSW)[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197: 177-198.
- [20] WU J L, CHEN T J, LUO X T, et al. TG/FTIR analysis on co-pyrolysis behavior of PE, OVC and PS[J]. Waste Management, 2014, 34(3): 676-682.
- [21] SADAT-SHOJAI M, BAKHSHANDEH G R. Recycling of PVC wastes[J]. Polymer Degradation & Stability, 2011, 96(4): 404-415.
- [22] 赖寒. 废弃塑料的回收利用[J]. 山东化工, 2012(2): 35-37.
- LAI H. Reuse and recovery of waste plastic [J]. Shandong Chemical Industry. 2012(2): 35-37.
- [23] 张文帝, 李泰霖, 叶霖海, 等. 聚乙烯还原氧化镍制备 Ni-C 微粉析氢催化剂的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(5): 40-45.
- ZHANG W D, LI T L, YE L H, et al. Preparation of Ni-C powder as hydrogen evolution catalyst by reduction of Ni₂O₃ with PE[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(5): 40-45.
- [24] XU F F, WANG B, YANG D, et al. Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 1106-1115.
- [25] DALTON G R, ANGELA Y L, YOUNG S L. IUPAC-NIST Solubility Database, Version 1.0; NIST Standard Reference Database 106 [DB/OL]. [2021-01-01]. https://srdata.nist.gov/solubility/sol_main_search.aspx.