

# 雷尼镍气体扩散电极(GDE)的氢氧化(HOR)极化行为

陈世奇<sup>1</sup>, 马弼华<sup>1</sup>, 朱 丁<sup>2</sup>, 陈云贵<sup>2</sup>

(1. 四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 新能源与低碳技术研究院, 四川 成都 610065)

**[摘要]** 本文解析了雷尼镍 GDE 在不同电流密度下的 HOR 阳极极化行为。直流内阻(DCIR)与电化学阻抗(EIS)分析表明:欧姆降与电化学极化共同构成了雷尼镍 GDE 放电伊始时的电位损失;驰豫分析表明:浓差极化统治了雷尼镍 GDE 放电过程中的电位损失。上述“电流-HOR 极化”关系有助于镍基 GDE 更好地设计、制作并应用于碱性燃料电池、阴离子膜燃料电池与镍-氢气电池。

**[关键词]** 氢扩散电极; 雷尼镍; 氢氧化反应; 电化学性能

**[中图分类号]** TM911.4

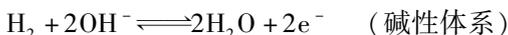
**[文献标志码]** B

**[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0007-08

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.002

## 0 前言

氢能作为下一代能源之一,具有清洁无污染、能量密度高的特点。氢能转换为电能由含电催化剂的 GDE 实现<sup>[1-2]</sup>:



其中,酸性 GDE(如质子交换膜燃料电池正/负极)需用贵金属催化剂,成本高;碱性 GDE(如碱性燃料电池负极)可采用镍基催化剂,成本低廉,故近年来吸引了很多研究者的注意。如 Hu 等人<sup>[3]</sup>通过 Ni(OH)<sub>2</sub> 于 NH<sub>3</sub> 气氛还原,制备了纳米级 Ni<sub>3</sub>N/C 催化剂,其 HOR 催化活性与 20wt% Pt/C 水平相近。Zhuang 等人<sup>[4]</sup>曾借助磁控溅射研究了 NiCu 合金催化剂,发现 Cu 原子占比为 0.4 时效果最优,可达 Ni 活性的 4 倍。Yu 等人<sup>[5]</sup>借助微波加热的方法,制备了 Ni<sub>4</sub>Mo 及 Ni<sub>4</sub>W 合金,在碱性体系下, Ni<sub>4</sub>Mo 催化

剂的活性可以达到 Pt/C 的 1.4 倍,动力学交换电流密度可达 3.41 mA cm<sup>-2</sup>,是目前所报道的镍基催化剂活性最高值。除了以上合金化手段, Sun 等人<sup>[6]</sup>将一种 Ni-MOF 在 Ar 气氛退火,增强了 Ni 的亲氧性,得到了 HOR 催化活性十数倍于纯镍的高活性催化剂。

然而,上述镍基催化剂的活性虽足够高,但不具备大规模生产的潜力。而雷尼镍作为一种具有海绵状孔道结构的骨架镍催化剂<sup>[7]</sup>,具备活性反应位点多、H<sub>2</sub> 吸附能力强、低温催化活性好的优点。更重要的是,雷尼镍基催化剂可通过镍铝合金的碱溶法大规模制备<sup>[8]</sup>,有望广泛用作于碱性燃料电池、阴离子膜燃料电池和镍-氢气电池等。因此,本文将阐明商用雷尼镍基氢气扩散电极(NiH33, Gastak 公司)实际放电时的 HOR 极化行为,为后续电极的优化与电池的设计提供有参考和指导。

## 1 实验部分

### 1.1 物理表征

本文使用的仪器包括辽宁丹东方圆仪器有限公司的 DX-2700B 型 X 射线粉末衍射仪和美国赛默飞公司的 Nicolet 6700 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)。X 射线衍射仪采用 Cu K $\alpha$  辐射源,以步进式扫描方式进行测试,扫描速率为 0.03° s<sup>-1</sup>,扫描角度范围为 10°~90°。FTIR 用于氢扩散负极添加剂的化学成分鉴定,透过和反射红外光谱检测范围分别为 4 000~400 cm<sup>-1</sup>和 4 000~640 cm<sup>-1</sup>。此外,

**[收稿日期]** 2023-01-26

**[第一作者]** 陈世奇(1997—),男,河南安阳人,博士研究生,主要研究方向为新型水系电池体系的开发。

**[基金项目]** 四川稀土科技及产业演化历史与未来创新性发展路径(2022JDR0098);三维多孔碳材料的可控制备及其性能研究基金(2019LF1004)

**[引用格式]** 陈世奇,马弼华,朱丁,等. 雷尼镍气体扩散电极(GDE)的氢氧化(HOR)极化行为[J]. 有色设备,2023,37(3):7-14.

SEM 测试采用日本日立公司生产的 SU8200 冷场发射扫描电子显微镜 (FESEM), 该设备配备了 Oxford X-Max 大面积电制冷能谱探测系统。催化剂和氢扩散负极的比表面积计算采用美国麦克公司生产的 ASAP 2020 系列快速比表面积及中孔/微孔分析仪。

## 1.2 电化学测试

所有的电化学测试均在常温下进行, 控制测试环境为恒氢压条件。如图 1 所示, 恒电流充放电 (GCD)、循环伏安测试 (CV)、电化学阻抗谱测试 (EIS) 均使用三电极体系测试, 参比电极为 50% SOC 的烧结镍电极 ( $\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{NiOOH}$ ), 对电极为烧结镍电极, 电解质为 6 M KOH + 0.4 M LiOH 的混合电解液。GCD 测试在蓝电设备上 (Land-CT2001A, 蓝河, 武汉), CV 及 EIS 测试在电化学工作站中进行 (DH7000, 东华, 江苏)。

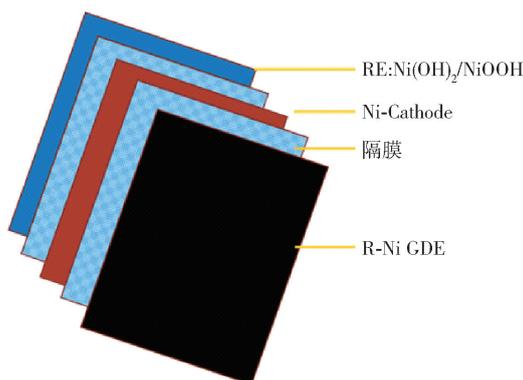


图 1 电池测试组装示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 物理表征及分析

图 2 展示了气体扩散电极 NiH33, 其厚度为 0.45 mm, 由催化层和集流体两部分组成。集流体采用稳定性较高的镍网, 可以最大程度地减少欧姆极化的影响。催化层呈黑色, 在灯光下呈现出磨砂质感, 厚度为 0.2 mm, 面密度约为  $98 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。根据商业说明书, NiH33 气体扩散电极主要由雷尼镍催化剂和聚四氟乙烯 (PTFE) 构成。在燃料电池运行时, 它可以形成稳定的三相界面, 但没有给出具体参数。因此, 首先对其成分进行了分析。由于 PTFE 具有耐酸和耐碱的特性<sup>[3]</sup>, 我们将催化层从 NiH33 剥离, 并将其放入烧杯中, 并加入硝酸和盐酸进行溶解以去除催化层中的镍。剩下的物质即为 PTFE, 根据定量分析, 镍的含量约占总质量的 91.6%。



图 2 气体扩散电极 NiH33 实物图

气体扩散电极的三相界面受到亲疏水孔率比例的影响, 因此我们设计了浸泡实验来确定 NiH33 的亲疏水孔率。并使用 KOH 电解液作为极性溶剂, 正葵烷作为非极性溶剂, 通过浸泡相同体积的 NiH33, 发现极性孔率和非极性孔率的占比分别为 14.2% 和 23.6%。更多的非极性孔可以提高 NiH33 的抗水淹性能。以上的分析数据如表 1 所示。

表 1 NiH33 电极解析表

物性参量	数值	物性参量	数值
GDE 厚度/mm	0.45	雷尼镍含量/%	91.6
CL 厚度/mm	0.2	PTFE 含量/%	8.4
雷尼镍面载/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.098	极性孔率/%	14.2
PTFE 面载/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.009	非极性孔率/%	23.6
雷尼镍体载/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	4.9	镍网方阻/ $(\text{m}\Omega/\text{sq})$	286
PTFE 体载/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.45	CL 方阻/ $(\text{k}\Omega/\text{sq})$	53.6

为进一步确定 NiH33 成分, 对 NiH33 及 PTFE 膜进行 XRD 与红外光谱表征。如图 3 (a) 所示, NiH33 中含量最高的物相即为镍 (JCDs No. 70 - 1849), 峰位分别在  $43.3^\circ$ 、 $51.7^\circ$  和  $76.3^\circ$ , 对应 (111)、(200) 和 (220) 晶面<sup>[9]</sup>。同时观察到雷尼镍表面存在氧化镍 (JCDs No. 89 - 7390)<sup>[10]</sup> 的特征峰。除镍与氧化镍的峰之外, 约在  $17.5^\circ$  处出现了 PTFE (JCDs No. 54 - 1595)<sup>[11]</sup> 的弱峰, 与 PTFE 膜 XRD 图谱吻合。此外, 红外光谱图谱 (图 3 (b)) 进一步证实了 NiH33 中除了镍外, 仅含有适量的 PTFE 纤维。这一成分既能增强 NiH33 的机械强度, 又能提供一定的疏水效果, 维持三相界面的稳定存在。

雷尼镍的催化效果主要得益于其较高的比表面积。进行了氮气吸脱附测试对雷尼镍粉末进行表征 (图 4 (a)), 结果显示其比表面积达到  $32.86 \text{ m}^2/\text{g}$ ,

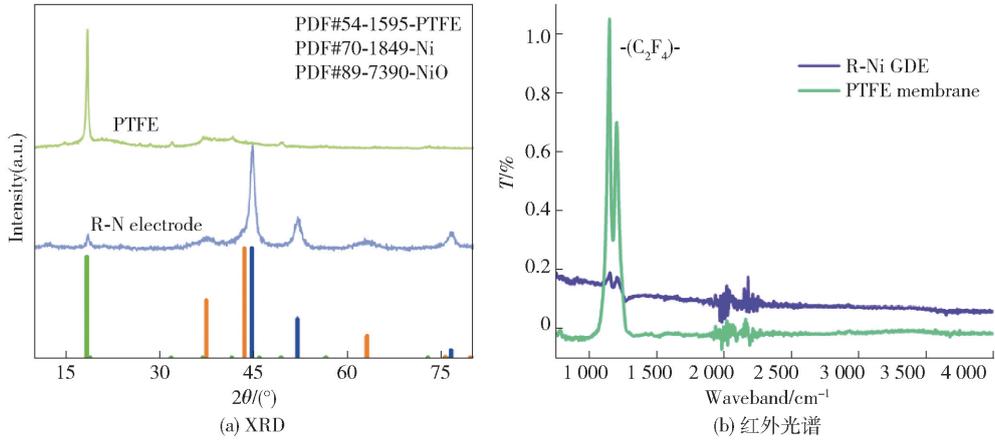


图3 NiH33 及 PTFE 膜的 XRD 与红外图谱分析

相比于相同尺寸的光滑镍颗粒,雷尼镍的比表面积提高了 35 倍(以  $8 \mu\text{m}$  为例,图 4(b))。此外, NiH33 电极在带有集流体和 PTFE 的情况下仍保持着  $9.83 \text{ m}^2/\text{g}$  的比表面积。图 4(a,c) 呈现明显的回滞环,表明催化剂和电极具有介孔结构<sup>[12]</sup>。孔径分布图(插图)显示雷尼镍的孔径主要集中在  $0 \sim 2 \text{ nm}$

和  $10 \sim 20 \text{ nm}$  区间。图 4(d) 展示了孔径与孔容曲线,清晰显示了纳米级孔的较大体积。

图 5 展示了不同尺度下 NiH33 极片的扫描图片。图 5(a) 和图 5(b) 显示了 NiH33 极片的两侧,背侧集流体镍网直径约为  $144 \mu\text{m}$ ,而 NiH33 正侧的催化剂颗粒大小在几微米到几十微米之间变化。

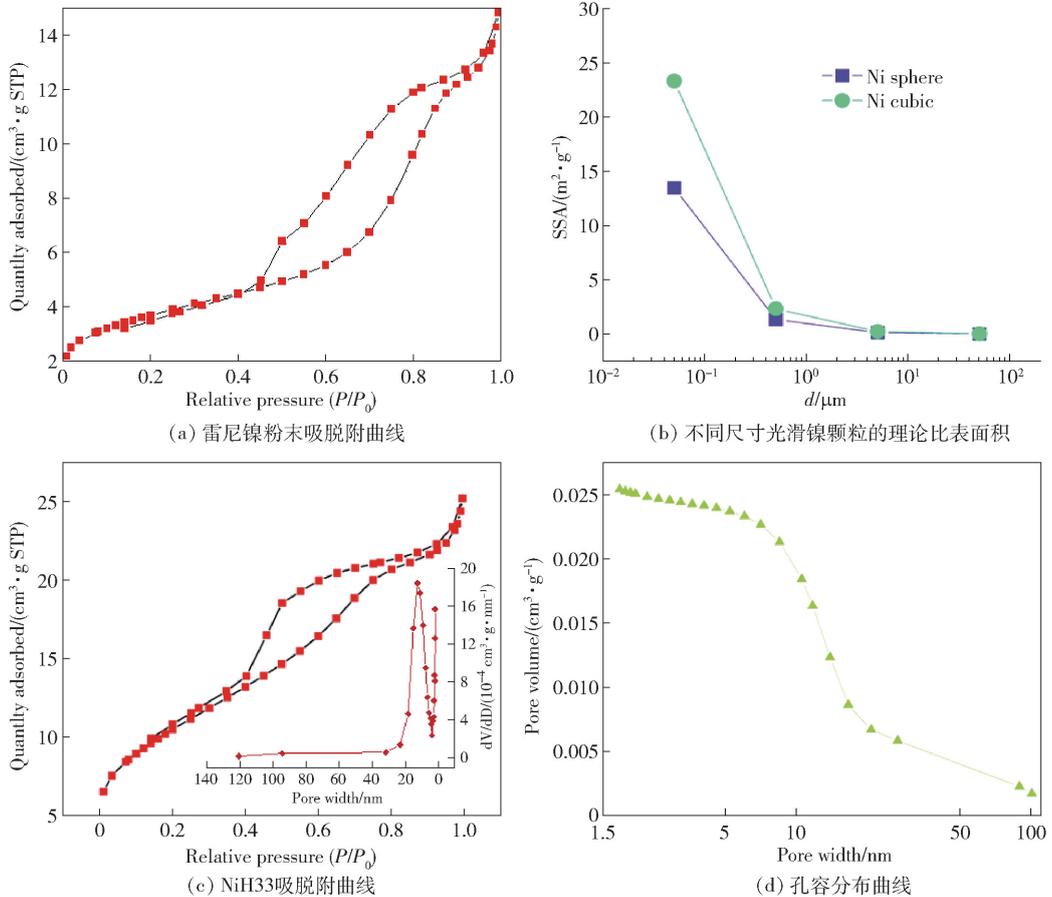


图4 雷尼镍催化剂及电极的 BET 分析

PTFE 主要以纤维的形式存在于电极中间(图 5(c~d)),这些纤维相互交联,形成了三维立体的疏水网络,能够阻止电解液淹没电极并保持三相界面的有效性。这些亚微米级的 PTFE 纤维主要可能来自电极冷轧制备过程中,PTFE 颗粒被不断拉伸形成纤维状结构。

图 5(e~f)解释了雷尼镍催化剂具有较高比表面积的原因:在热碱液的作用下,铝被溶出,留下了许多曲折无序的蚀孔。这些蚀孔有助于氢气的快速扩散,并表明在电极的制造过程中未对雷尼镍催化剂的微观形貌造成损伤。尽管 Al 在热碱液中具有较高的溶解度,但根据图 5(g)中的面扫描图谱分析,仍然保留了约 6%左右的 Al 元素。这是因为残留的 Al 能有效防止催化剂骨架的坍塌,延长催化剂的寿命<sup>[13]</sup>。除了 Ni 和 Al 元素外,还检测到 O、C、F

等元素,分别对应于 NiO 和 PTFE 的存在,与前文中 XRD 结果相一致。

## 2.2 电化学行为分析

众所周知,电流密度对负极的极化影响是呈正相关的,进一步而言,电流密度同时影响了氢负极及电池放电初期的电化学极化、欧姆极化与放电中后期的浓差极化。如果能明晰在碱性氢扩散负极中两种极化的极化特征,则对于氢扩散负极设计有着指导意义。

通过将电流密度从 0.2 C 逐步增加至 7 C,我们测试了负极的直流内阻。在低电流下,电压变化较小,因此选择了 0.5 C、1 C、2 C、4 C、7 C 电流密度下 3 s 内的放电曲线,并绘制了静置转放电曲线,如图 6(a)所示。随着电流密度的增加,初始电压损失明显增加。图 6(b)显示了电流和初始电压损失的统

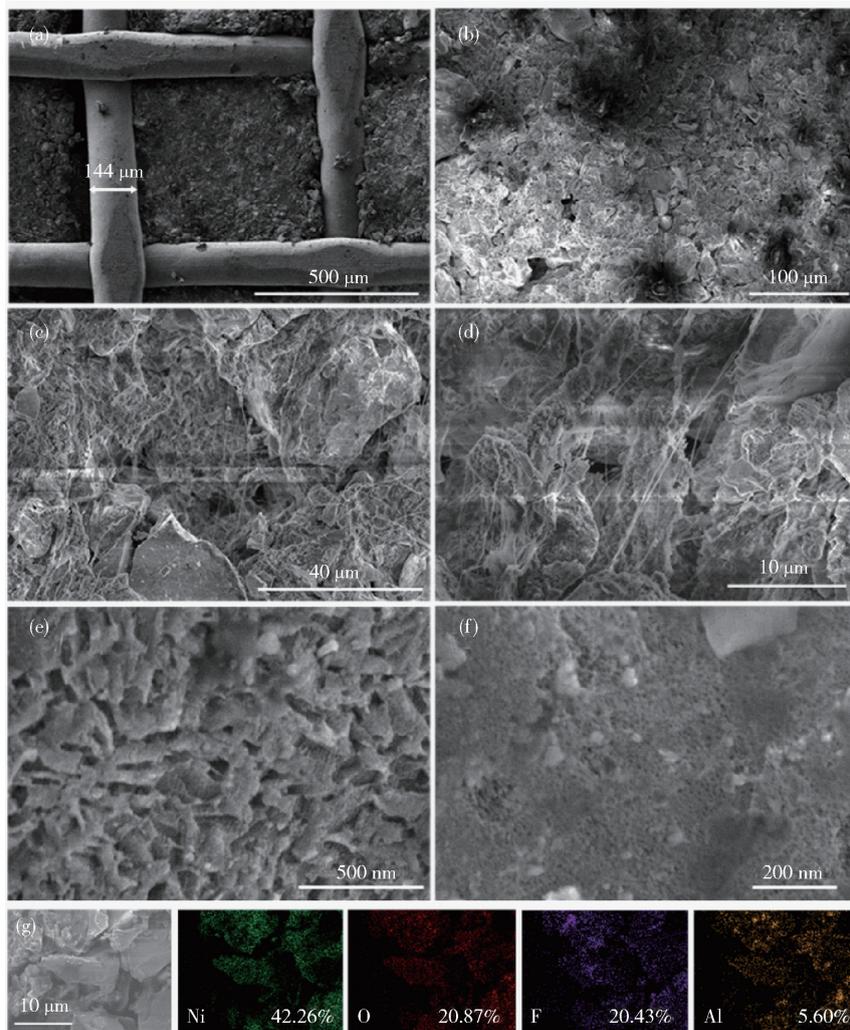


图 5 NiH33 (a~f) 表面形貌表征 (g) Ni、O、F、Al 的 EDS 能谱分析

计结果,它们呈明显的线性增加。通过将电压和电流进行拟合,我们计算得到直流内阻为  $289.1 \text{ m}\Omega$  ( $1.16 \Omega \text{ cm}^2$ )。

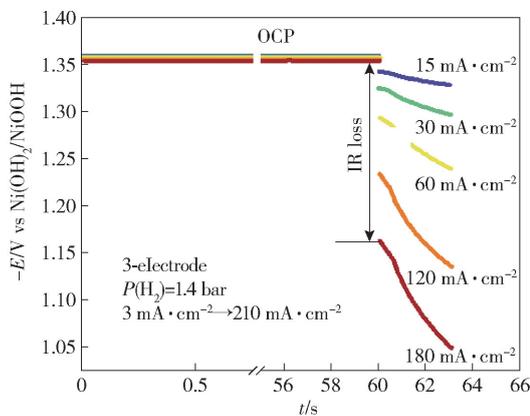
直流内阻由欧姆阻抗和电荷转移阻两部分组成。前者主要与极片的集流效果和电解质离子导电率等因素有关,而后者则受到氢负极催化活性、电极状态和三相界面等因素的影响。通过电化学阻抗谱(EIS)测试,可以区分这两个部分。

如图 6(c),高频区与实轴的截距为欧姆阻抗,约  $70 \text{ m}\Omega$ 。圆弧的直径为电极的电荷转移阻抗,约为  $225 \text{ m}\Omega$ ,由于“弥散效应”,EIS 的圆弧有所偏离半圆轨迹,这可能和 NiH33 多孔电极较大的 ECSA 有关<sup>[14]</sup>。欧姆及电荷转移阻抗二者之和为  $295 \text{ m}\Omega$ ,与直流内阻测试数值相吻合,考虑到电极的面积为  $4 \text{ cm}^2$ ,则 NiH33 的内阻值约为  $1.18 \Omega \text{ cm}^2$ 。

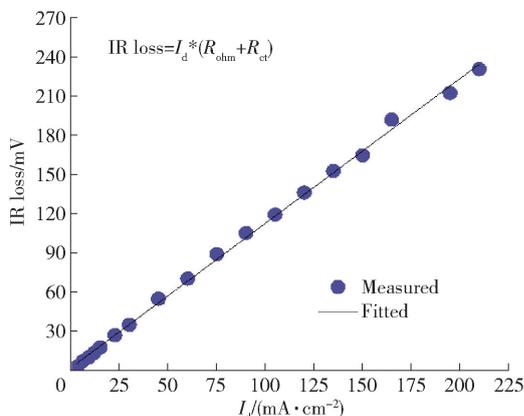
从电化学阻抗谱(EIS)数据可以清晰地看出,初始电压降主要是由于电荷转移阻抗较大所导致,占比约为  $76.3\%$ 。换言之,电化学极化在放电初期对电压损失起主导作用。我们简单地将该占比进行

外推,结果如图 6(d)所示。随着电流的增加,电化学极化对电池的影响变得更加严重。这显然不利于电池的倍率性能。因此,在后续的催化剂设计中,需要提高催化剂的活性,优化电极状态,进一步减少电池初始电压损失的问题。

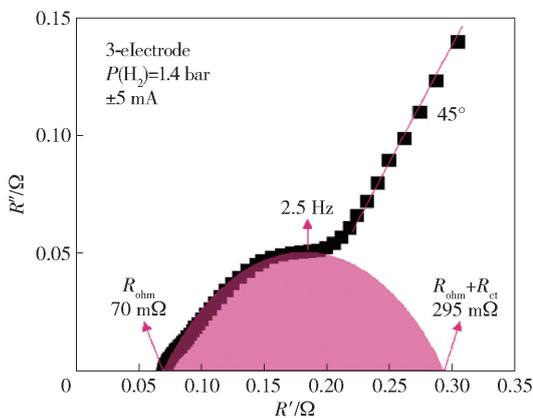
电池的充放电过程对负极而言是一个还原/氧化的过程。在放电过程中,镍催化剂不可避免地会被部分氧化,从镍转变为氢氧化镍;而在充电过程中,则会被还原。未被还原的部分会恶化电极的催化性能。图 7 展示了 NiH33 在  $0.2 \text{ C}$  电流密度下经过 1 000 次小容量充放电后的直流内阻(DCIR)。通过测试电极的直流内阻变化,我们研究了电极的耐氧化性能。在前 330 次循环过程中,电极的直流内阻缓慢变化,约增长至初始电极直流内阻的  $125\%$  左右。随后的循环过程中,电极的直流内阻明显持续增大。经过 1 000 次循环后,电极的直流内阻增大至初始内阻的  $225\%$ 。这说明随着循环过程的进行,电极的氧化程度逐渐累积增加。这一方面增加了电极的欧姆阻抗,另一方面也恶化了电极的



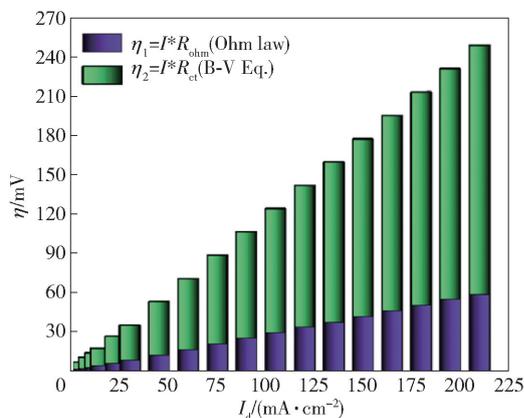
(a) 不同电流密度下的初始放电曲线



(b) 拟合结果



(c) NiH33电极的EIS曲线



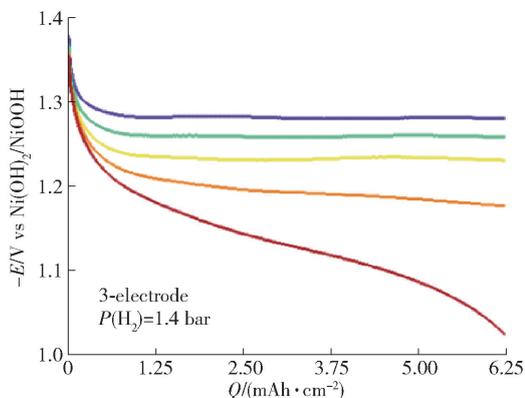
(d) 外推拟合结果

图 6 NiH33 电极初始直流内阻及其阻抗组成分析

催化性能。

电化学极化主要对负极和电芯的初始电压降产生影响。随着放电深度的增加,由氢气和水扩散所控制的浓差极化表现出更大的影响。如图 8(a) 所示,当电流从 0.5 C 增加到 0.9 C 时,每增加 0.2 C,放电平台会均匀下降。而当电流从 0.9 C 增加到 1.1 C 时,每增加 0.1 C,放电平台的倾斜程度更加明显。这表明电极受到浓差极化的影响。

在讨论浓差极化对电极的影响之前,需要先用



(a) 0.5-1C容量-电压曲线

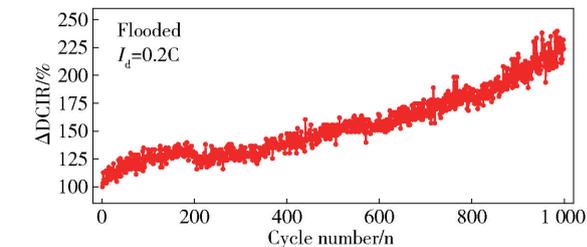
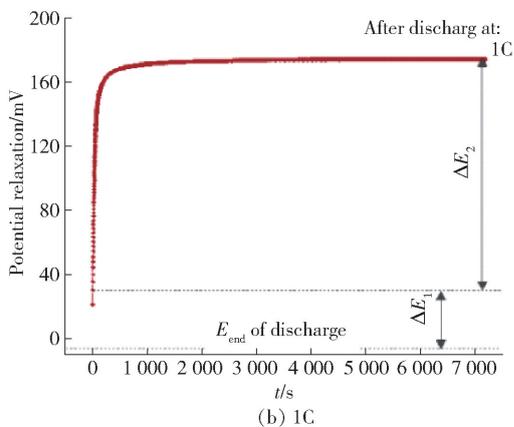
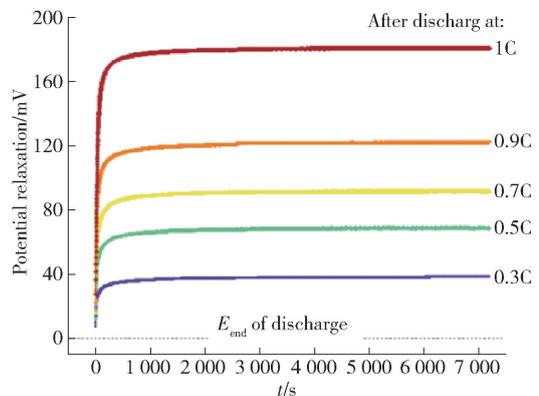


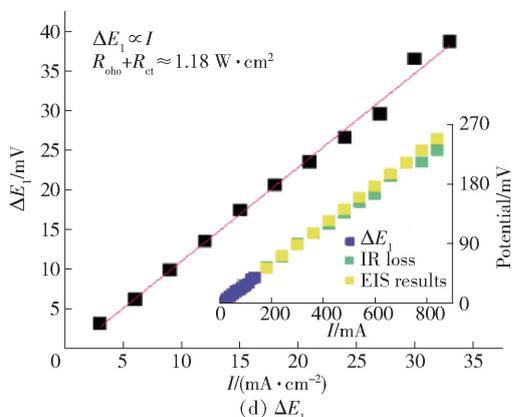
图 7 NiH33 电极在 1000 次循环过程中的直流内阻变化情况



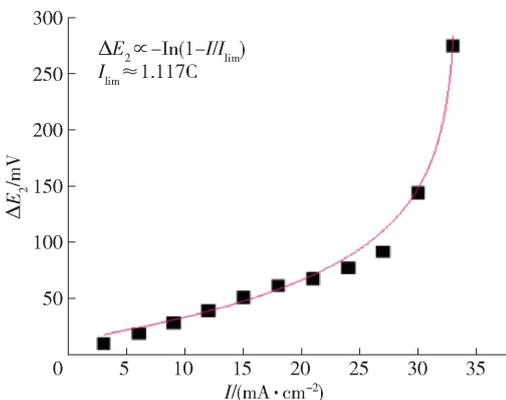
(b) 1C



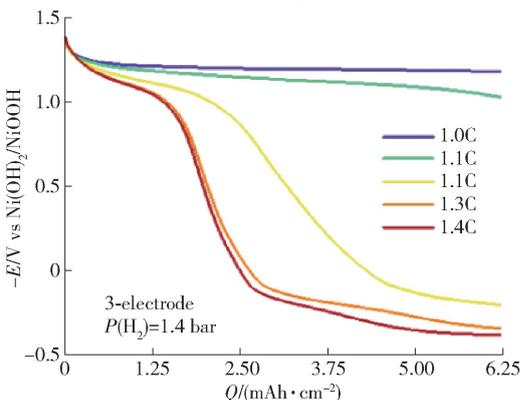
(c) 0.3-1C的弛豫过程时间-电压曲线,不同电流密度的



(d)  $\Delta E_1$



(e)  $\Delta E_2$



(f) 1-1.4C容量电压曲线

图 8 NiH33 电极深度放电过程浓差极化分析与极限扩散电流密度探究

晰一件事: 不同电流密度放电至相同深度后转静置工步的“弛豫过程”, 其本质上为极化的“逆过程”。以图 8(b) 为例, 放电最后时刻电压为  $E_{\text{end}}$ , 转静置工步后 1 s 时的电压与  $E_{\text{end}}$  差值为  $\Delta E_1$ , 稳态电压与 1 s 时电压差值为  $\Delta E_2$ , 作为极化的逆过程,  $\Delta E_1$  与放电的初始电压损失相对应, 而  $\Delta E_2$  则对应为浓差极化的逆过程。浓差极化对于电极的影响很难从放电平台的倾斜度去量化, 但是通过反向分析  $\Delta E_2$ , 并进一步拟合放电电流与  $\Delta E_2$  的关系就可以得到浓差极化对于电极及电芯的影响, 对弛豫过程的解析, 无疑对于理解氢负极的电化学行为有着重要作用。

通过比较图 8(a) 和图 8(c), 可以观察到放电平台的均匀下降与相应弛豫电压平台的均匀上升之间的对应关系。当放电曲线明显倾斜时, 弛豫电压平台显著提升。这无疑支持了通过分析放电电流与  $\Delta E_2$  之间的关系来量化浓差极化影响的观点。这种对比观察为理解浓差极化的影响提供了更多的证据。

根据图 8(d) 中  $\Delta E_1$  与放电电流  $I$  的关系, 可以观察到明显的线性关系。通过拟合数据可以得到  $\Delta E_1$  对应的内阻为  $1.18 \Omega \text{ cm}^2$ , 这与之前通过 EIS 和 DCIR 数据得出的结果相吻合, 进一步验证了极化与弛豫之间的可逆关系。与  $\Delta E_1$  不同的是,  $\Delta E_2$  与电流  $I$  的关系呈非线性增加。当电流小于  $0.9 \text{ C}$  时,  $\Delta E_2$  均匀上升。当电流超过  $0.9 \text{ C}$  时,  $\Delta E_2$  迅速增加, 并且电流出现极值 ( $I_{\text{lim}}$ )。  $\Delta E_2$  与  $(I_{\text{lim}} - I)/I_{\text{lim}}$  之间呈指数关系。通过适当的公式拟合, 可以得到 NiH33 碱性氢扩散负极的极限扩散电流  $I_{\text{lim}}$  为  $1.117 \text{ C}$  ( $33.5 \text{ mA cm}^{-2}$ )。图 8(g) 展示了更大电流下浓差极化的影响, 一旦越过极限电流密度, 负极的放电曲线急速下降, 甚至越过  $0 \text{ V}$  造成电池反极, 这对电池的损伤是极严重的。

通过将不同电流下的  $\Delta E_1$  和  $\Delta E_2$  进行比较 (如图 9 所示), 可以观察到浓差极化引起的电压损失  $\Delta E_2$  远远大于电化学极化和欧姆极化引起的电压损失  $\Delta E_1$ 。随着电流的增加,  $\Delta E_2$  的占比逐渐增加。在  $1.1 \text{ C}$  电流密度下, 浓差极化的影响已经约为电化学极化和欧姆极化之和的 8 倍。这种巨大的浓差极化效应可能与 NiH33 中较低的 PTFE 含量 (8.4%) 有关。低的 PTFE 含量导致 NiH33 的疏水性不足, 在放电过程中被生成的水所淹没, 从而使氢气的扩散更加困难。因此, 可以得出结论: 在提高碱性氢扩散负极的倍率性能时, 除了提高催化剂的活性

外, 优化三相界面、提高电极的极限扩散电流密度以确保浓差极化的影响在可控范围内是非常重要的。

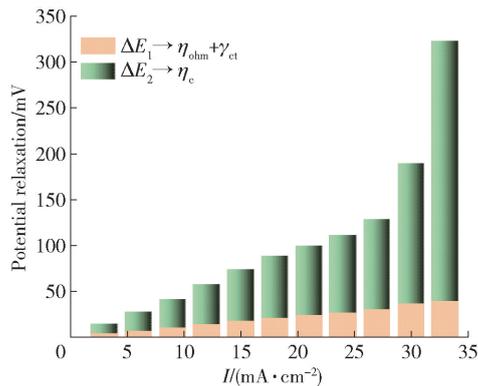


图 9 不同电流密度下的  $\Delta E_1$  与  $\Delta E_2$

### 3 结论

综上所述, 本研究采用 50% SOC 的稳定烧结镍作为参比电极, 对 NiH33 的电化学行为进行了深入研究。实验结果表明, 负极极化过程主要包括放电初期的电化学极化、欧姆极化以及放电中后期的浓差极化。随着电流密度的增加, 由电化学极化及欧姆极化导致的电压初期损失呈线性增加, 过高的电荷转移阻抗与欧姆阻抗显然不利于电极的倍率性能, 仅考虑降低初期电压损失, 需要提高催化剂的活性, 尽可能降低电极的非导电物质含量。然而, 随着放电深度的增加, 浓差极化在负极性能中发挥重要作用, 其后期引起的电压损失远远超过电化学极化和欧姆极化的损失, 在  $1.1 \text{ C}$  电流密度下, 浓差极化的影响已经约为电化学极化和欧姆极化之和的 8 倍。这种巨大的浓差极化效应可能与 NiH33 中较低的 PTFE 含量 (8.4%) 有关。低的 PTFE 含量导致 NiH33 的疏水性不足, 在放电过程中被生成的水所淹没, 从而使氢气的扩散更加困难。因此, 在提高碱性氢扩散负极的倍率性能时, 除了提高催化剂的活性外, 优化三相界面、提高电极的极限扩散电流密度以确保浓差极化的影响在可控范围内是更加重要的。这些研究结果对于促进碱性氢扩散负极技术的发展和具有指导意义, 有望推动电池技术在能源存储领域的进一步突破和创新。

#### [参考文献]

- [1] DURST J, SIEBEL A, SIMON C, et al. New insights into the electrochemical hydrogen oxidation and evolution reaction mechanism [J]. Energy & Environmental Science,

- 2014, 7(7): 2255 – 2260.
- [2] DURST J, SIMON C, SIEBEL A, et al. hydrogen oxidation and evolution reaction (HOR/HER) on Pt electrodes in acid vs. alkaline electrolytes: Mechanism, activity and particle size effects [J]. ECS Transactions, 2014, 64(3): 1069.
- [3] NI W, ANNAHSU, CHIA-SHUOCHEN, HAO MINGSC-HULER, ANDREASHU, XILE. Ni<sub>3</sub>N as an Active Hydrogen Oxidation Reaction Catalyst in Alkaline Medium [J]. Angewandte Chemie, 2019, 58(22).
- [4] WANG G, LI W, HUANG B, et al. Exploring the Composition-Activity Relation of Ni–Cu Binary Alloy Electrocatalysts for Hydrogen Oxidation Reaction in Alkaline Media [J]. Acs Applied Energy Materials, 2019.
- [5] DUAN Y, YU Z-Y, YANG L, et al. Bimetallic nickel-molybdenum/tungsten nanoalloys for high-efficiency hydrogen oxidation catalysis in alkaline electrolytes [J]. Nature communications, 2020, 11(1): 4789.
- [6] YANG F, BAO X, LI P, et al. Boosting Hydrogen Oxidation Activity of Ni in Alkaline Media through Oxygen-Vacancy-Rich CeO<sub>2</sub>/Ni Heterostructures [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2019, 58(40).
- [7] FOUILLOUX P. The nature of raney nickel, its adsorbed hydrogen and its catalytic activity for hydrogenation reactions [J]. Applied Catalysis, 1983, 8(1): 1 – 42.
- [8] SALMONES J, ZEIFERT B H, HERNÁNDEZ J, et al. Raney-nickel-iron catalysts obtained by mechanical alloying: Characterization and hydrogenation activity [J]. Studies in surface science and catalysis, 2000, 130(1): 2255 – 2260.
- [9] QIN L, MAJUMDER A, FAN J A, et al. Evolution of nanoscale morphology in single and binary metal oxide microparticles during reduction and oxidation processes [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(41): 17511 – 17520.
- [10] KARTHIKEYAN B, PANDIYARAJAN T, HARIHARAN S, et al. Wet chemical synthesis of diameter tuned NiO microrods: microstructural, optical and optical power limiting applications [J]. CrystEngComm, 2016, 18(4): 601 – 607.
- [11] ZHAO Z, MA Y, WAN H, et al. Preparation and tribological behaviors of polyamide-imide/polytetrafluoroethylene lubricating coatings reinforced by in-situ synthesized CeO<sub>2</sub> nanoparticles [J]. Polymer Testing, 2021, 96: 107100.
- [12] SVIDRYTSKI A, HLUSHKOU D, THOMMES M, et al. Modeling the impact of mesoporous silica microstructures on the adsorption hysteresis loop [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(39): 21646 – 21655.
- [13] HUBER G W, SHABAKER J, DUMESIC J. Raney Ni–Sn catalyst for H<sub>2</sub> production from biomass-derived hydrocarbons [J]. Science, 2003, 300(5628): 2075 – 2077.
- [14] CRUZ-MANZO S, GREENWOOD P. Blocked-diffusion with frequency dispersion for study of EIS in NiMH batteries [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166(6): A1176.

## Hydrogen Oxidation (HOR) Polarization Behavior of a Raney-nickel Gas Diffusion Electrode (GDE)

CHEN Shi-qi, MA Bi-hua, ZHU Ding, CHEN Yun-gui

**Abstract:** In this paper, the HOR anodic polarization behavior of Raney-nickel GDE at different current densities is analyzed. The DCIR and EIS analyses show that the ohmic drop and electrochemical polarization together constitute the potential loss at the beginning of the discharge of Raney-nickel GDE; the relaxation analysis shows that the concentration polarization rules the potential loss during the discharge of Raney-nickel GDE. The above “current-HOR polarization” relationship is helpful for the design, fabrication and application of Ni-based GDE in alkaline fuel cells, anionic membrane fuel cells and Ni–H<sub>2</sub> gas cells.

**Key words:** Hydrogen diffusion electrode; Raney-nickel; Hydrogen oxidation reaction; Electrochemical property

