

# 双金属氮化物 $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 的制备及其析氧性能研究

晁锐, 杨阳\*, 贾妍, 李继凯, 张登娥  
(陕西科技大学化学与化工学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 利用化学气相沉积法在氨气( $\text{NH}_3$ )氛围下合成了镍铁双金属氮化物( $\text{Ni}_3\text{FeN}$ )纳米颗粒,  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  在碱性介质中的析氧反应(OER)表现出良好的催化活性。 $\text{Ni}_3\text{FeN}$  在电流密度为  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$  时的过电势为 287 mV, 相较于  $\text{Ni}_3\text{N}$  性能提升了 173 mV, 塔菲尔斜率为  $60 \text{ mV}/\text{dec}$ , 催化剂在 8 h 的稳定性测试中仅衰减 2.4%。电化学性能测试结果表明,  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  具有良好的活性和稳定性, 与单金属氮化物相比, 双金属氮化物催化剂的本征活性得到了提升。

**关键词:** 双金属氮化物; 非贵金属催化剂; 析氧反应; 电解水

中图分类号: O643.36

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)08-0175-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.08.032

## Preparation of $\text{Ni}_3\text{FeN}$ for oxygen evolution reaction

CHAO Rui, YANG Yang\*, JIA Yan, LI Ji-kai, ZHANG Deng-e

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Nickel-iron bimetallic nitrides ( $\text{Ni}_3\text{FeN}$ ) nanoparticles are synthesized via chemical vapor deposition method in ammonia atmosphere. The prepared  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  shows good catalytic activity in oxygen evolution reaction (OER) in an alkaline medium. At a current density of  $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , the overpotential of  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  in OER is 287 mV, Tafel slope is  $60 \text{ mV}\cdot\text{dec}^{-1}$ , and  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  attenuates 2.4% only in 8 h of stability test. Electrochemical performance test results indicate that  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  exhibits good activity and stability, and shows higher intrinsic activity than mono-metallic nitrides.

**Key words:** bimetallic nitride; non-precious metal catalyst; oxygen evolution reaction; water splitting

电解水制氢具有制备无污染、原料来源广、产品纯度高、产氢效率高等优点,使其在新能源领域有着更为广阔地应用前景<sup>[1-4]</sup>。电解水制氢主要分为阴极处的析氢反应(HER)和阳极处的析氧反应(OER)<sup>[5-7]</sup>,但由于其缓慢的动力学和较高的反应能垒,要求开发耐用且具有优异活性的催化剂来克服动力学障碍以促进反应动力学。迄今为止,贵金属 Pt、 $\text{IrO}_2$  和  $\text{RuO}_2$  被认为是电解水制氢的最佳催化剂<sup>[8]</sup>,但高价格和稀有储量限制了其长期的商业应用。因此,近年来研究人员一直致力于开发高活性、耐用、低成本的非贵金属电催化剂,以促进电解水的工业化发展。其中,过渡金属基电催化剂具有价格便宜、物种丰富以及高催化活性等优点,有望成为贵金属基催化剂的重要替代品。用于电解水析氢的过渡金属化合物主要包括过渡金属氮化物<sup>[9-10]</sup>、

过渡金属碳化物<sup>[11-12]</sup>和过渡金属磷化物<sup>[13]</sup>等。

在上述过渡金属基催化体系中,过渡金属氮化物具有独特的物理化学特性,且当金属原子与氮原子键合时会改变主体金属的 d 带结构,使金属的 d 带收缩,从根本上改变催化位点的活性<sup>[14-15]</sup>。Gao 等<sup>[16]</sup>研究表明,  $\text{Ni}_3\text{N}$  泡沫镍在较宽的 pH 范围内表现出 HER 性能,因为由于 Ni-N 的协同效应,其  $\Delta G_{\text{H}}$  较小。Chen 等<sup>[17]</sup>合成了包裹在碳中的铁镍/合金纳米球( $\text{FeNi}_3\text{-N}$ ),优化后的催化剂在表面表现出双相氮化物,这是由于金属原子在硝化过程中不同的原子迁移现象引起的,其在碱性介质中表现出优异的 OER 性能。氮化镍在高温制备过程中容易团聚,导致比表面积较低、孔隙率高,单金属氮化物催化剂在 OER 性能上仍具有一定的限制,需要通过添加其他金属来进一步增加 OER 电催化性能。

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-05-29

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-131)

作者简介: 晁锐(2000-),女,硕士生,研究方向为电催化剂, 1292532364@qq.com; 杨阳(1989-),男,博士,副教授,研究方向为电催化剂, 通讯联系人, yyang399@sust.edu.cn。

因此,设计具有双金属优异 OER 活性的过渡金属氮化物必不可少。

笔者利用化学气相沉积法在  $\text{NH}_3$  氛围下合成了  $\text{Ni}_3\text{FeN}$ , 由于氮的刻蚀作用, 硝化后形成了孔洞, 这有利于质量和电荷的转移。通过物理表征和电化学性能测试等研究了  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  电催化剂具有优异的 OER 性能。

## 1 实验部分

### 1.1 药品与仪器

试剂:六水合硝酸镍 [ $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ]; 四水合氯化亚铁 ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ); 尿素 ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ); 无水乙醇 ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ); Nafion 溶液 (5%); 氢氧化钾 (KOH); 氨气 ( $\text{NH}_3$ , 99.999%); 氧气 ( $\text{O}_2$ , 99.999%)。

仪器: X 射线衍射仪 (D8 Advance), 德国布鲁克公司生产; 扫描电子显微镜 (Thermo Scientific Apreo 2C), 美国赛默飞世尔科技公司生产; X 射线光电子能谱仪 (Thermo Fischer Escalab Xi+), 美国赛默飞世尔科技公司生产; 管式炉 (OTL-1200X), 合肥科晶材料技术有限公司生产; 电热鼓风干燥箱 (DHG9030A), 上海一恒科学仪器有限公司生产; 离心机 (TD5Z), 湖南凯达科学仪器有限公司生产; 电化学工作站 (CHI 760E), 上海辰华仪器有限公司生产; 旋转圆环圆盘电极装置 (AFMSRCE), 美国 PINE 公司生产。

### 1.2 样品的制备

采用一步水热法制备 NiFe LDH。将 0.174 g  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.059 g  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  溶于 20 mL 超纯水中充分溶解, 再加入 0.270 g  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  形成混合溶液, 混合均匀放入聚四氟乙烯内衬中, 并用不锈钢反应釜密封,  $120^\circ\text{C}$  在鼓风干燥机中反应 6 h, 自然冷却至室温后, 用超纯水和乙醇离心 3 次, 离心得到的固体粉末干燥过夜, 即得到 NiFe LDH。用相同方法制备  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ , 不同之处在于配置前驱体溶液时不加入铁源。

采用化学气相沉积法制备  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  纳米颗粒。将 20 mg NiFe LDH 粉末置于管式炉中, 在  $\text{NH}_3$  气氛下以  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率升温至  $400^\circ\text{C}$  后保持 3 h。待管式炉自然冷却降至室温后取出催化剂, 即制备出  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  纳米颗粒催化剂, 为黑色粉末。  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  通过上述方法转化为相应的氮化物, 即  $\text{Ni}_3\text{N}$ 。

### 1.3 电化学性能测试

首先制备悬浮液, 将 5 mg 催化剂粉末分散在 600  $\mu\text{L}$  超纯水、400  $\mu\text{L}$  无水乙醇和 20  $\mu\text{L}$  Nafion

(质量分数为 5%) 溶液中, 超声处理 30 min 使其分散均匀。移液枪移取 5  $\mu\text{L}$  悬浮液滴涂在玻碳电极 ( $0.196 \text{ cm}^2$ ) 上, 红外灯烤干后用作工作电极, 其负载量约为  $0.13 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 。

电化学测试是在 CHI 760E 电化学工作站 (上海辰华仪器公司生产) 的三电极体系中进行。对电极采用铂丝电极, 参比电极为  $\text{Hg}/\text{HgO}$  电极。整个测试过程中持续通入  $\text{O}_2$ , 以保证电解液始终处于氧饱和状态。用 pH 计对 1 mol/L KOH 电解液测试 3 次取其平均值, 测得 pH 为 13.95。所有电位都使用可逆氢电极 (RHE) 进行了转换。电位转换的方程为:

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{Hg}/\text{HgO}} + 0.059\text{pH} + 0.098$$

利用循环伏安法 (CV) 分析催化剂在 1.0 mol/L KOH 中的 OER 活性, 电势扫描范围为 0.2~0.8 V, 扫描速率为 5 mV/s, 所测得的 CV 曲线均通过 95% 的  $iR$  校正后绘制。双电层电容 ( $C_{\text{dl}}$ ) 在 0.2~0.3 V (*vs.*  $\text{Hg}/\text{HgO}$ ) 下通过 CV 法测得, 扫速分别以 20、40、60、80、100、120 mV/s。取 0.25 V (*vs.* RHE) 下的电流密度  $\Delta j = (j_a - j_c)/2$  与扫描速率的线性关系得到  $C_{\text{dl}}$  值。电化学阻抗谱在 0.55 V、600~30 kHz 的频率范围内测得。最后用计时电位法在 10 mA/ $\text{cm}^2$  的电流密度下进行电化学稳定性测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的理化性质表征

通过水热反应和化学气相沉积法制备了双金属氮化物  $\text{Ni}_3\text{FeN}$ , 制备流程如图 1 所示。

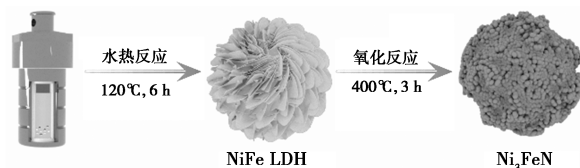


图 1  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  的制备流程

利用 X 射线粉末衍射仪对样品的晶体结构进行表征, 结果如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看出, 一步水热法合成的 NiFe LDH 纳米片的衍射峰与 NiFe LDH 的标准卡 (JCPDS#40-0215) 相匹配, 衍射峰与 (003)、(006)、(012)、(015)、(018)、(110) 和 (113) 晶面对应, 表明前驱体的合成晶体结构良好。通过水热反应和化学气相沉积法制备  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  纳米颗粒。从图 2(b) 中可以看出,  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  在  $23.6^\circ$ 、 $33.6^\circ$ 、 $41.5^\circ$  和  $48.3^\circ$  的衍射峰分别与  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  (JCPDS# 50-1434) 的 (100)、(110)、(111) 和 (200) 晶面相匹

配,表面形成的晶体结构良好; $\text{Ni}_3\text{N}$ 粉末样品在 $38.94^\circ$ 、 $42.11^\circ$ 、 $44.48^\circ$ 和 $58.51^\circ$ 处的衍射峰与标准卡片(JCPDS#10-0280)匹配良好。结果表明, $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 和 $\text{Ni}_3\text{N}$ 具有良好的结晶度和无杂质产生。

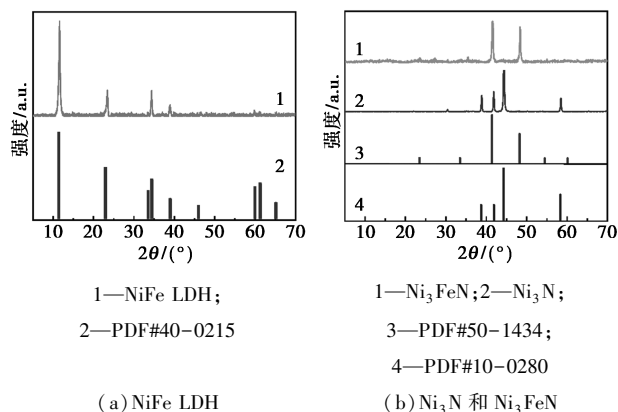


图2  $\text{NiFe LDH}$ 、 $\text{Ni}_3\text{N}$  和  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  的 XRD 图

通过扫描电子显微镜对催化剂进行形貌表征,结果如图3所示。从图3(a)中可以看出, $\text{NiFe LDH}$ 为规则的纳米花形貌,氮化后的形貌发生变化。从图3(b)中可以看出,由规则的纳米花变为纳米小球, $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 呈现出规则的纳米颗粒结构,由许多纳米颗粒堆积成不规则的纳米结构。

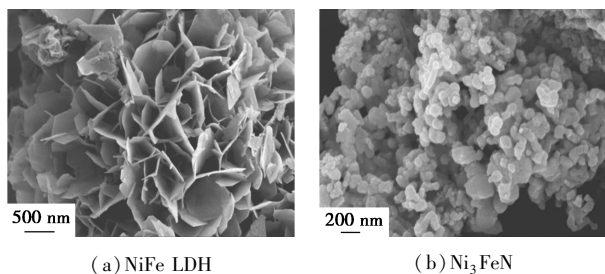


图3  $\text{NiFe LDH}$ 、 $\text{Ni}_3\text{FeN}$  的 SEM 图

## 2.2 材料元素价态分析

利用X射线光电子能谱仪分析 $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 纳米颗粒的化学元素组成,结果如图4所示。从图4(a)中可以看出, $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 中检测到Ni、Fe、N、O和C元素,O元素主要来源于催化剂被空气氧化,催化剂中含有的C主要是因为环境污染。通常C元素(C 1s, 284.6 eV)被用作校准获得的XPS能谱的能量参考。

由图4(b)中可以看出, $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 催化剂在855.6 eV和873.7 eV处的Ni 2p精细谱分别归属于 $\text{Ni}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Ni}^{2+} 2p_{1/2}$ <sup>[18]</sup>,表明 $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 纳米颗粒与空气接触而在氮化物表面形成氧化物;在852.8 eV和870.1 eV处的峰归属于 $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 中的Ni—N键<sup>[17]</sup>,表明氮化物的形成;在861.1 eV和879.2 eV处的

峰则为Ni 2p的2个卫星峰<sup>[19]</sup>。

从图4(c)中可以看出, $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 催化剂在710.9 eV和723.7 eV处的Fe 2p精细谱分别对应 $\text{Fe}^{3+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Fe}^{3+} 2p_{1/2}$ ,证实了Fe以高价化合态( $\text{Fe}^{3+}$ )存在<sup>[20]</sup>;而位于707.4 eV和719.4 eV处的峰对应于Fe—N键<sup>[21]</sup>,714.4 eV和727.5 eV处的峰均为卫星峰。

从图4(d)中可以看出,在397.3 eV处的N 1s峰与 $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 中N—M结合能的典型峰有关,可能是N—Ni或N—Fe,进一步表明氮化物的形成;399.7 eV处的弱峰对应于N—H基团,表明N—H基团存在于催化剂表面,这是因为 $\text{NH}_3$ 不完全氮化导致的;402.6 eV处的峰归属于N—O键<sup>[22]</sup>,样品暴露在空气中被氧化。结果表明,金属与N成键表明氮化物的形成,但由于在空气条件下在 $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 表面存在少量氧化物<sup>[23]</sup>。因此,XPS表征结果进一步表明成功制备了双金属氮化物 $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 。

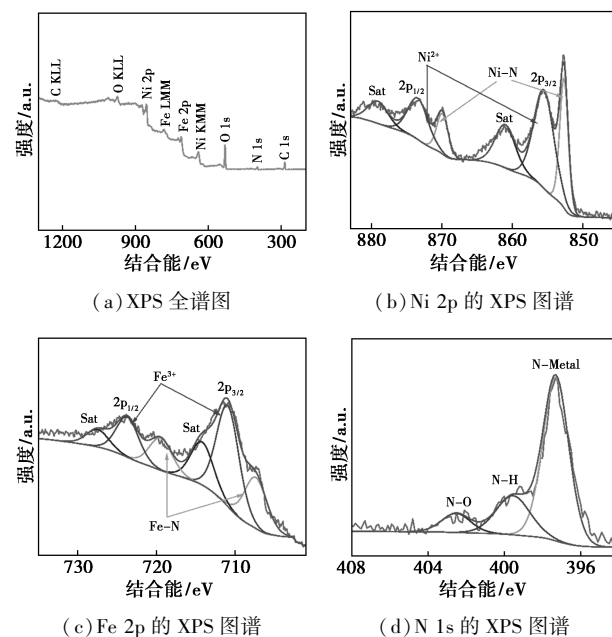


图4  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  的 XPS 谱图

## 2.3 材料的 OER 活性及稳定性表征

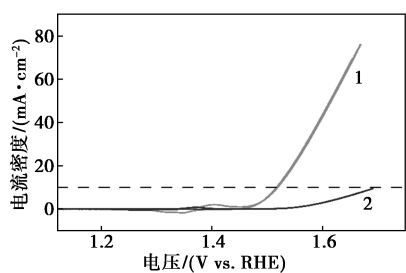
采用三电极体系在 $\text{O}_2$ 饱和的1 mol/L KOH电解液中进行电化学性能测试,结果如图5所示。从图5(a)中可以看出, $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 相比于 $\text{Ni}_3\text{N}$ 表现出更好的OER活性,10 mA/cm<sup>2</sup>的电流密度下仅需要287 mV的过电位,远高于 $\text{Ni}_3\text{N}$ 的460 mV。Tafel斜率表示电极反应过程中动力学快慢问题,由CV曲线计算获得,从图5(b)中可以看出, $\text{Ni}_3\text{FeN}$ 的Tafel斜率(60 mV/dec)远小于 $\text{Ni}_3\text{N}$ (190 mV/dec),表明

$\text{Ni}_3\text{FeN}$  具有更快的 OER 反应动力学。

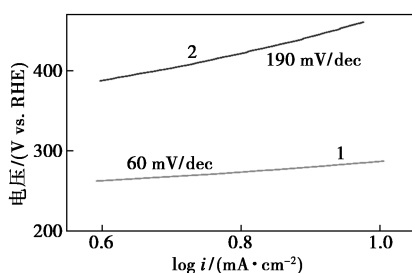
从图 5(c) 中可以看出, 双电层电容  $C_{dl}$  越高表明催化活性中心越丰富, 电催化活性越好。 $\text{Ni}_3\text{FeN}$  的  $C_{dl}$  ( $2.04 \text{ mF} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 约为  $\text{Ni}_3\text{N}$  粉末  $C_{dl}$  的 3.23 倍。 $C_{dl}$  与电化学活性表面积 (ECSA) 成正比, 用  $C_{dl}$  来估算 ECSA, ECSA 越大表明催化剂在反应过程中暴露的活性位点越多。

从图 5(d) 中可以看出, 奈奎斯特图中的半圆由电荷转移电阻 ( $R_{ct}$ ) 和相应的电容组成<sup>[24]</sup>, 主要对催化剂和电解液界面处的电荷转移过程进行描述,  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  的  $R_{ct}$  为  $3.1 \Omega$  相比于  $\text{Ni}_3\text{N}$  ( $3.5 \Omega$ ) 较小, 其中曲线半圆直径越小, 该电催化剂的电荷转移电阻越小, 电子转移速度越快,  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  催化剂的 OER 催化性能就越好。

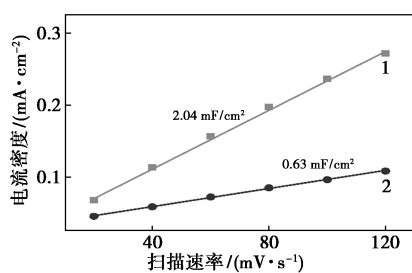
电催化稳定性是 OER 电催化剂一项重要参数。从图 5(e) 中可以看出,  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  在  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$  的电流密度下连续工作 8 h 后, 其活性仅衰减了 2.4%, 说明该催化剂具有良好的 OER 稳定性。



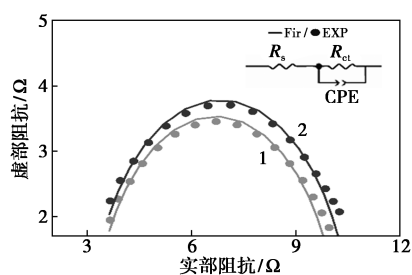
1— $\text{Ni}_3\text{FeN}$ ; 2— $\text{Ni}_3\text{N}$   
(a) 循环伏安曲线



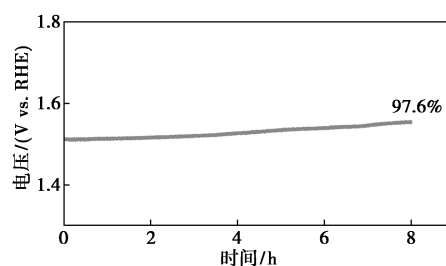
1— $\text{Ni}_3\text{FeN}$ ; 2— $\text{Ni}_3\text{N}$   
(b) 塔菲尔斜率



1— $\text{Ni}_3\text{FeN}$ ; 2— $\text{Ni}_3\text{N}$   
(c) 双电层电容



1— $\text{Ni}_3\text{FeN}$ ; 2— $\text{Ni}_3\text{N}$   
(d) 电化学阻抗谱



(e)  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  在  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$  的计时电位测试曲线

图 5 催化剂的 OER 性能表征

### 3 结论

通过简单的水热反应和化学气相沉积法氮化处理制备出具有优异 OER 电化学性能的双金属  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  纳米颗粒, 利用 XRD、SEM、XPS 对电催化剂进行表征和分析。 $\text{Ni}_3\text{FeN}$  纳米颗粒在电流密度为  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$  时过电位为 287 mV, 主要由于  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  纳米颗粒催化剂具有大的活性表面积、较快的电子转移速率和反应动力学, 此外,  $\text{Ni}_3\text{FeN}$  长时间稳定性测试后性能没有明显的下降。Ni、Fe 元素作为过渡金属氮化物的金属源制备出的 OER 电极表现出良好的电催化性能。

### 参考文献

- [1] Gong Y X, Yao J S, Wang P, *et al.* Perspective of hydrogen energy and recent progress in electrocatalytic water splitting [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 43: 282–296.
- [2] Wang N, Song S, Wu W, *et al.* Bridging laboratory electrocatalysts with industrially relevant alkaline water electrolyzers [J]. Advanced Energy Materials, 2024, 14(16): 2303451.
- [3] Yan D, Mebrahtu C, Wang S, *et al.* Innovative electrochemical strategies for hydrogen production: From electricity input to electricity output [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(16): e202214333.
- [4] Luo Y, Zhang Z, Chhowalla M, *et al.* Recent advances in design of electrocatalysts for high-current-density water splitting [J]. Advanced Materials, 2022, 34(16): 2108133.
- [5] Liu F, Shi C, Guo X, *et al.* Rational design of better hydrogen evolution, electrocatalysts for water splitting: A review [J]. Advanced Science, 2022, 9(18): 2200307.

- [6] Xie W, Shao M. Alkaline water electrolysis for efficient hydrogen production [ J ]. Journal of Electrochemistry, 2022, 28 ( 10 ): 2214008.
- [7] Peng L, Wei Z. Catalyst engineering for electrochemical energy conversion from water to water: Water electrolysis and the hydrogen fuel cell [ J ]. Engineering, 2020, 6 ( 6 ): 653–679.
- [8] Peng L, Nie Y, Zhang L, *et al.* Self-assembly- and preshaping-assisted synthesis of molybdenum carbide supported on ultrathin nitrogen-doped graphitic carbon lamellas for the hydrogen evolution reaction [ J ]. ChemCatChem, 2017, 9 ( 9 ): 1588–1593.
- [9] Shi X, Wu A, Yan H, *et al.* A “MOFs plus MOFs” strategy toward Co-Mo<sub>2</sub>N tubes for efficient electrocatalytic overall water splitting [ J ]. Journal of Material Chemistry A, 2018, 6 ( 41 ): 20100–20109.
- [10] Xiong J, Cai W, Shi W, *et al.* Salt-templated synthesis of defect-rich MoN nanosheets for boosted hydrogen evolution reaction [ J ]. Journal of Material Chemistry A, 2017, 5 ( 46 ), 24193–24198.
- [11] Kuznetsov D A, Chen Z, Kumar P V, *et al.* Single site cobalt substitution in 2D molybdenum carbide (MXene) enhances catalytic activity in the hydrogen evolution reaction [ J ]. Journal of the American Chemical Society, 2019, 141 ( 44 ): 17809–17816.
- [12] Ma Y, Chen M, Geng H, *et al.* Synergistically tuning electronic structure of porous  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C spheres by Co doping and Mo-vacancies defect engineering for optimizing hydrogen evolution reaction activity [ J ]. Advanced Functional Materials, 2020, 30 ( 19 ): 2000561.
- [13] El-Refaei S M, Russo P A, Amsalem P, *et al.* The importance of ligand selection on the formation of metal phosphonate-derived Co-MoP and CoMoP<sub>2</sub> nanoparticles for catalytic hydrogen evolution [ J ]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3 ( 5 ): 4147–4156.
- [14] Ray C, Lee S C, B. Jin J, *et al.* Conceptual design of three-dimensional CoN/Ni<sub>3</sub>N-coupled nanograsses integrated on N-doped carbon to serve as efficient and robust water splitting electrocatalysts [ J ]. Journal Materials Chemistry A, 2018, 6 ( 10 ): 4466–4476.
- [15] Jia J R, Zhai M K, Lv J J, *et al.* B. Nickel molybdenum nitride nanorods grown on Ni foam as efficient and stable bifunctional electrocatalysts for overall water splitting [ J ]. ACS Applied Materials Interfaces, 2018, 10 ( 36 ): 30400–30408.
- [16] Gao D Q, Zhang J Y, Wang T T, *et al.* Metallic Ni<sub>3</sub>N nanosheets with exposed active surface sites for efficient hydrogen evolution [ J ]. Journal Materials Chemistry A, 2016, 4 ( 44 ): 17 363–17369.
- [17] Chen Q, Gong N, Zhu T, *et al.* Surface Phase Engineering modulated iron-nickel nitrides/alloy nanospheres with tailored d-band center for efficient oxygen evolution reaction [ J ]. Small, 2022, 18 ( 4 ): 2105696.
- [18] Chen Y K, Yu J Y, Jia J, *et al.* Metallic Ni<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>N porous microrods with abundant catalytic sites as efficient electrocatalyst for large current density and superstability of hydrogen evolution reaction and water splitting [ J ]. Applied Catalysis B: Environmental, 2020, 272: 118956.
- [19] Tuning electronic structure of NiFe layered double hydroxides with vanadium doping toward high efficient electrocatalytic water oxidation [ J ]. Advanced Energy Materials, 2018, 8 ( 15 ), 1703341.
- [20] Wang Y Y, Xie C, Liu D D, *et al.* Nanoparticle-stacked porous nickel-iron nitride nanosheet: A highly efficient bifunctional electrocatalyst for overall water splitting [ J ]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8 ( 29 ): 18652–18657.
- [21] Biesinger M C, Payne B P, Grosvenor A P, *et al.* Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni [ J ]. Applied Surface Science, 2011, 257 ( 7 ): 2717–2730.
- [22] Wu A, Xie Y, Ma H, *et al.* Integrating the active OER and HER components as the heterostructures for the efficient overall water splitting [ J ]. Nano Energy, 2018, 44: 353–363.
- [23] Shchukarev A V, Korolkov D V. XPS study of group IA carbonates [ J ]. Central European Journal of Chemistry, 2004, 2 ( 2 ): 347–362.
- [24] Kozejova M, Latyshev V, Kavcansky V, *et al.* Evaluation of hydrogen evolution reaction activity of molybdenum nitride thin films on their nitrogen content [ J ]. Electrochimica Acta, 2019, 315: 9–16. ■

## 巴斯夫推出 100%可回收的聚氨酯解决方案

巴斯夫推出创新的 Haptex® 4.0 聚氨酯合成革解决方案,该产品可实现 100%回收利用。通过使用创新的配方设计和回收技术,采用 Haptex® 4.0 和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 纤维制成的合成革无需层间剥离便可被整体回收,让材料的回收利用成为可能。

长期以来,由聚氨酯 (PU)、PET 等多种原材料复合而成的合成革在回收利用领域面临行业挑战。材料间的高剥离强度使得合成革各层间难以被重新分离,进行分别回收,这也一直是困扰合成革回收利用的难题。如今,Haptex® 4.0 为合成革行业中的废料提供了解决方案,帮助行业在可持续发展领域上向前迈进。

与前几代产品一样,Haptex® 4.0 符合严格的挥发性有机化合物 (VOC) 排放标准。由于在生产过程中不添加任何有机溶剂,该产品可显著简化合成革制造过程,为生产提速。

在具备环保优势的同时,Haptex® 4.0 经济性佳、耐用性好,是广泛应用的理想选择。严格的测试表明,Haptex® 4.0 具有卓越的耐热性、耐黄变特性并可承受高压灭菌环境。从鞋履服饰、汽车内饰到家具制品,Haptex® 4.0 的卓越品质和使用寿命始终如一。相较于传统皮革制品,Haptex® 4.0 在维持性能和成本的前提下,为消费者提供了一种值得信赖且经济实惠的选择。 (王蔚楠)