

# 碳纳米管负载 NiCo 催化剂的制备及析氧性能研究

闫蕊, 刘志琪, 任浩, 吕凤圆, 吴明雄, 张建鹏, 李亚雯, 王凯\*

(太原工业学院材料工程系, 山西太原 030008)

**摘要:**以碳纳米管(CNTs)为载体,通过调控水热反应时间及温度负载 NiCo 颗粒,制备 NiCo/CNTs 复合催化剂。利用碳纳米管独特的中空管状结构、高比表面积以及良好的导电特性来负载高活性的 NiCo 颗粒,开发高性能析氧催化剂。利用激光拉曼、扫描电子显微镜、X 射线衍射和电化学测试研究了水热反应温度与时间对 NiCo/CNTs 复合催化剂形貌、晶型结构及电化学性能的影响。结果表明,在 130℃、24 h 与 150℃、8 h 条件下制备的 NiCo/CNTs 复合催化剂的综合性能较为优异。

**关键词:**碳纳米管;NiCo 催化剂;氧析出反应;分散性

中图分类号:TQ31

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)05-0188-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.05.036

## Preparation of carbon nanotube supported NiCo catalyst and study on its performance in oxygen evolution

YAN Rui, LIU Zhi-qi, REN Hao, LV Feng-yuan, WU Ming-xiong, ZHANG Jian-peng, LI Ya-wen, WANG Kai\*

(Department of Materials Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

**Abstract:** Carbon nanotubes, with unique hollow tubular structure, high specific surface area and good electrical conductivity, are used to load NiCo particles with high activity to develop high performance oxygen evolution catalysts. NiCo/CNTs composite catalyst is prepared by loading NiCo particles on carbon nanotubes (CNTs) through regulating the time and temperature of hydrothermal reaction. Raman laser, scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) and electrochemical test are employed to study the influences of reaction temperature and time on the morphology, crystal structure and electrochemical performance of NiCo/CNTs composite catalyst. It is shown that NiCo/CNTs composite catalysts prepared at 130℃ for 24 h and 150℃ for 8 h have better overall performance.

**Key words:** carbon nanotube; NiCo catalyst; oxygen evolution reaction; dispersity

水作为世界上最丰富的自然资源,在开发利用方面有一定的局限性。通过电解水来制备氢气和氧气是获取清洁能源的一种有效方法<sup>[1-2]</sup>,而电解水的全过程由阴极析氢和阳极析氧 2 个半反应组成,但是高效催化剂的选择是关键。

氧析出反应(OER)是电解水过程中一个非常重要的半反应,是一个缓慢且反应机理复杂的过程,开发合适的催化剂可提高电解水的效率、降低制备成本且对环境没有污染<sup>[3-4]</sup>。目前,贵金属及其相关的氧化物是高效的催化剂<sup>[5-6]</sup>,这些催化剂在较低的电流密度下的过电位依旧很高;此外,贵金属的资源储备量非常有限,使得贵金属无法作为最优催

化剂而实现量产。

因此,寻找贵金属催化剂的替代物如过渡金属基催化剂变得非常必要<sup>[7-9]</sup>,如 Ni-和 Co-基过渡金属催化剂。Xu 等<sup>[10]</sup>以 Ni-MOF 纳米片为前驱物,通过改变温度来调控 Ni-N 掺杂石墨烯复合材料的微观结构,在碱性条件下,该复合材料表现出优异的 HER、OER 综合反应性能。谢毅等<sup>[11]</sup>通过一种新型的快速加热方式来制备多孔 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米片,在原子表面暴露着较多的活性位点,因此具有较高的电催化活性,电催化电流可以达到 341.7 mA/cm<sup>2</sup>。Jin 等<sup>[12]</sup>利用新颖的高温高压水热连续流动合成技术成功地制备了 2D CoNi-LDH 片状材料。该方法实

收稿日期:2021-12-15;修回日期:2022-03-16

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2020L0652);山西省高等学校大学生创新创业项目(S202114101045);山西省基础研究计划资助项目(20210302124226)

作者简介:闫蕊(1985-),女,博士,副教授,研究方向为石墨烯基聚合物以及氧还原、氧析出电催化剂的研究,ruiyan1127@163.com;王凯(1986-),男,博士后,副高级工程师,研究方向为新型炭材料的电化学性能研究,通讯联系人,wangkaityuan@126.com。

现了产物制备过程的可控性,为单一金属催化剂的工业化指明了方向。Jin 等<sup>[13]</sup>采用电沉积技术制备了一种三维同轴 Ni-Co 氢氧化物纳米管阵列,该样品在析氧性能方面表现优异,在碱性条件下表现出良好的电催化活性。

笔者以碳纳米管为载体,通过调控水热反应的时间及温度来负载 NiCo 颗粒,制备了不同的 NiCo/CNTs 复合电解水催化剂,通过将碳纳米管独特的中空管状结构、高比表面积和高导电特性和 NiCo 催化剂的高电催化活性有效耦合,获得综合性能优异的电解水催化剂。利用激光拉曼、扫描电子显微镜、X 射线衍射和电化学测试研究了不同的水热反应温度与时间对 NiCo/CNTs 复合催化剂形貌、晶型结构及析氧性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 原料及仪器

原料:碳纳米管(工业级),深圳金百纳纳米科技有限公司生产;NiCl<sub>2</sub>(分析纯),北京化工厂生产;CoCl<sub>2</sub>(分析纯),国药集团化学试剂有限公司生产;尿素(分析纯),天津市天力化学试剂有限公司生产;柠檬酸钠(分析纯),天津市申泰化学试剂有限公司生产;无水乙醇(分析纯),天津市大茂化学试剂厂生产。

仪器:扫描电子显微镜(JSEM-7200E型),日本 JEOL 公司生产;X 射线衍射仪(TD-3700),丹东通达科技有限公司生产;电化学工作站(CHI-760E型),上海辰华仪器有限公司生产;显微拉曼光谱仪(inVia Reflex),上海泉田机电有限公司生产;高速离心机(HC-3018),安徽中科中佳科学仪器有限公司生产。

### 1.2 NiCo/CNTs 复合材料的制备

(1)称取 40 mg 的 CNTs 加入到 100 mL 的烧杯中,量取 20 mL 去离子水以及 10 mL 无水乙醇加入烧杯,称取 67.2 mg 的尿素加入到烧杯中,再称取 24 mg 柠檬酸钠加入烧杯中。

(2)分别配制 1 mol/L 的 CoCl<sub>2</sub> 溶液和 1 mol/L 的 NiCl<sub>2</sub> 溶液,移取一定量的 CoCl<sub>2</sub> 溶液和 NiCl<sub>2</sub> 溶液,依次加入到上述烧杯中,获得混合溶液。

(3)将烧杯用塑料薄膜封住,放入超声波清洗机中超声处理 30 min,使其充分分散。然后将上述混合溶液转移至水热釜中。

(4)将水热釜置于真空干燥箱中,并于一定温度下反应一定时间。

(5)最后将冷却后的混合液移入离心管,置于高速离心机中离心处理 10 min,多次清洗后移入表面皿,在 80℃ 下放入鼓风干燥箱进行干燥。

(6)将干燥后的块状物研磨,分别装入玻璃瓶中,得到试样。

### 1.3 NiCo/CNTs 复合材料的表征

利用 TD-3700 型 X 射线衍射仪对样品的晶体结构进行测试,测试角度为 5~90°,工作电压为 40 kV,管电流为 150 mA,扫描速率为 4°/min;利用 JSEM-7200E 型扫描电子显微镜对样品的微观形貌进行测试;利用 in-Via Reflex 显微拉曼光谱仪对样品进行拉曼光谱测试。

### 1.4 电极的制备及电化学性能的测试

配制 1 mol/L 氢氧化钾溶液备用,之后在玻璃板上放 1 片抛光布,用 1 粒抛光粉将玻碳电极(GCE)表面打磨光亮。配制 4 mg/mL 的溶液:称取试样 4 mg,配制成 1 mL 的混合溶剂。混合溶剂为:一定微量的去离子水、无水乙醇、膜溶液。用移液枪移取 15 μL 置于工作电极的金属表面中心。工作电极用 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 抛光粉打磨,采用 8 字法打磨至电极表面光洁。

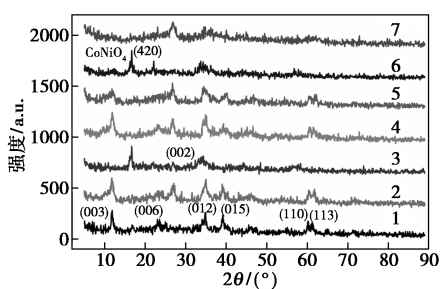
所有的电化学测试均在上海辰华 760E 电化学工作站并利用三电极体系来测试。其中,三电极体系是以烧杯为电解池,以 1.0 mol/L KOH 碱性溶液为电解液,NiCo/CNTs 复合材料为工作电极,Hg/HgCl<sub>2</sub> 为参比电极,铂片为对电极。

对试样进行 LSV、CV、AC 的测试。线性扫描伏安曲线(LSV)是以 5 mV/s 的扫描速率在 0.3~1 V 以及 0~1 V 的电势范围内测量得到。电化学阻抗(AC)的测试范围为 10 MHz~100 kHz。循环伏安稳定性测试在 0~1 V 的电势范围内,以 50 mV/s 的扫描速率连续循环测试 6 段得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 测试分析

不同反应温度及时间下的 CNTs 负载 NiCo 催化剂样品的 XRD 图如图 1 所示。通过 MDI JADE6 对其晶面及 NiCo/CNTs 复合物组成进行分析,结果表明,样品中所对应的晶面为 PDF#40-0216 水合碳酸镍钴 Ni<sub>0.75</sub>Co<sub>0.25</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>0.125</sub>(OH)<sub>2</sub>·0.38H<sub>2</sub>O 的(003)、(006)、(012)、(015)、(110)和(113)。在 130℃、8 h 和 150℃、8 h 下,在 2θ=16.68°处出现明显的 Co<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub> 的特征衍射峰(420)。



1—120-5NiCo; 2—120-5-NiCo/碳纳米管;  
3—130-8-NiCo/碳纳米管; 4—130-12-NiCo/碳纳米管;  
5—130-24-NiCo/碳纳米管; 6—150-8-NiCo/碳纳米管;  
7—150-24-NiCo/碳纳米管

图 1 不同反应时间及温度下的 NiCo/CNTs 复合材料的 XRD 图

### 2.2 样品的微观形貌

不同温度和时间下制备的 NiCo/CNTs 复合催化剂的 SEM 图如图 2 所示。

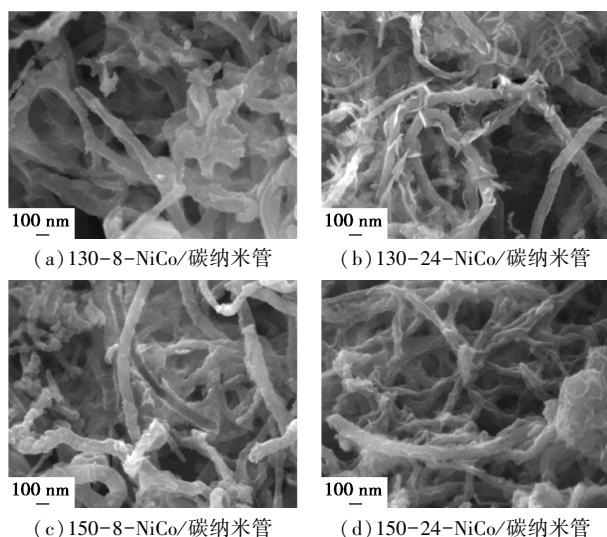
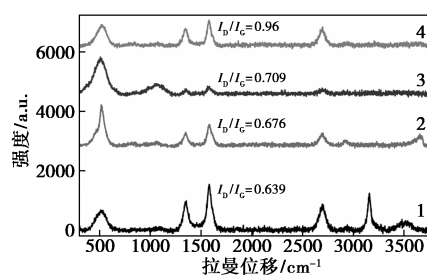


图 2 不同条件下制备的 NiCo/CNTs 复合催化剂的 SEM 图

由图 2 中可以看出, NiCo 负载于 CNTs 上, 其表面具有点状或团状物质, 在反应温度为 130℃、反应时间为 8 h 下制得的样品表面可以看到较多光滑的 CNTs, NiCo 颗粒负载量较少, 只能在局部区域看到; 而 130℃、24 h 下制备的样品中出现了体积相对较大的块状结构, 表面负载也较为均匀。在 150℃、8 h 下制备的样品中, NiCo/CNTs 复合较为均匀, 暴露的活性位点较多, 催化活性有所提高<sup>[14-15]</sup>; 而在更长的反应时间下 (24 h), NiCo 颗粒团聚更加明显, 具有更多的团簇状形貌。

### 2.3 激光拉曼测试分析

不同反应温度与时间的 NiCo/CNTs 复合催化剂的拉曼光谱图如图 3 所示。



1—130-8-NiCo/碳纳米管; 2—130-24-NiCo/碳纳米管;  
3—150-8-NiCo/碳纳米管; 4—150-24-NiCo/碳纳米管

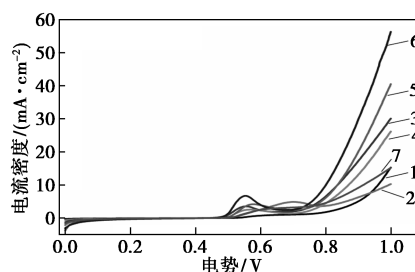
图 3 不同条件下制备的 NiCo/CNTs 复合催化剂的拉曼谱图

从图 3 中可以看出, 相同反应温度 (130℃) 下, 反应时间为 24 h 的试样的 NiCo 峰值要比反应时间为 8 h 的峰明显, 而且 24 h 的  $I_D/I_G$  比 8 h 的要高, 说明随着时间的延长, 生成晶体变多、缺陷大, 从而使其电催化活性提高。而在相同的反应时间下, 曲线 1、曲线 3 为反应时间为 8 h 的拉曼光谱, 结果表明, 反应温度越高其峰值越明显,  $I_D/I_G$  的比值也随之增大, 晶体缺陷变大, 活性位点增多, 其催化活性越好<sup>[16-17]</sup>。

在拉曼光谱图中, 最前端的高强度峰值是因为 NiCo 化合物在 CNTs 上团聚堆叠, 也可能是由于 NiCo 产生了新的化合物  $Co_2NiO_4$  所导致, 这与 X 射线衍射分析结果一致。

### 2.4 电化学性能的测试

本实验中用到的参比电极饱和甘汞电极的标准电极电位为 0.241 2 V, 而水电解的电位为 1.228 V, 所用到的电解液为 1.0 mol/L KOH (pH = 14), 所以可以用公式  $\eta(V) = E - 0.1594$  来计算极化曲线的阳极过电位。公式中的 0.1594 为饱和甘汞电极析氧起始的理想状态下的电位。不同反应时间与温度下制备的 NiCo/CNTs 复合催化剂的极化曲线如图 4 所示。



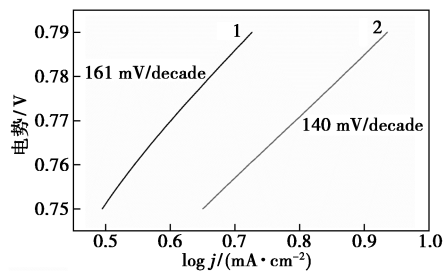
1—120-5NiCo; 2—120-5-NiCo/碳纳米管;  
3—130-8-NiCo/碳纳米管; 4—130-12-NiCo/碳纳米管;  
5—130-24-NiCo/碳纳米管; 6—150-8-NiCo/碳纳米管;  
7—150-24-NiCo/碳纳米管

图 4 NiCo/CNTs 复合催化剂的电化学性能测试结果

从图4中可以看出,NiCo无论有无碳纳米管为载体,曲线平滑且均保证在电流密度为 $10\text{ mA/cm}^2$ 有着较低过电位。根据 $10\text{ mA/cm}^2$ 下的电流密度进行计算得出,当反应条件为 $150^\circ\text{C}$ 、8 h时,所得样品的测试电位为 $0.80\text{ V}$ ,阳极的过电位为 $0.6406\text{ V}$ ,生成的片层 $\text{Co}_2\text{NiO}_4$ 活性高,催化活性最好; $130^\circ\text{C}$ 、24 h时所得样品的测试电位为 $0.834\text{ V}$ ,过电位为 $0.6746\text{ V}$ ,催化活性较优,其原因是在该反应温度及时间下,生成的片层 $\text{Co}_2\text{NiO}_4$ 活性较高。

$130^\circ\text{C}$ 下,8 h与12 h所得样品催化剂的催化活性较差,虽然8 h的试样也形成了片层 $\text{Co}_2\text{NiO}_4$ ,12 h生成的化合物与24 h的相似,但是反应时间太短,反应温度低,反应不完全而降低了催化活性。而 $150^\circ\text{C}$ 下24 h反应所得样品催化活性差的原因是反应时间过长,导致其反应生成 $\text{Ni}_{0.75}\text{Co}_{0.25}(\text{CO}_3)_{0.125}(\text{OH})_{0.38}\text{H}_2\text{O}$ ,活性降低。

塔菲尔曲线的计算公式为 $\eta = a + b \log i_0$ , $130^\circ\text{C}$ 、24 h和 $150^\circ\text{C}$ 、8 h条件下制备的NiCo/CNTs复合催化剂的塔菲尔曲线如图5所示。



1— $130^\circ\text{C}$ -24 h-NiCo/碳纳米管;2— $150^\circ\text{C}$ -8 h-NiCo/碳纳米管

图5  $130^\circ\text{C}$ 、24 h和 $150^\circ\text{C}$ 、8 h条件下制备的NiCo/CNTs复合催化剂的塔菲尔曲线

由图5可知,在水电解的过程中,随着电流密度的增大,相应的过电位也呈现出增大的趋势。在 $130^\circ\text{C}$ 、24 h的反应条件下所得试样的斜率为 $161\text{ mV/dec}$ ;而在 $150^\circ\text{C}$ 、8 h的反应条件下所得试样的斜率为 $140\text{ mV/dec}$ ,催化活性明显提高<sup>[18-19]</sup>。

### 3 结论

以碳纳米管为载体,采用水热合成法将NiCo颗粒负载于碳纳米管上制备NiCo/CNTs复合催化剂材料,并利用SEM、激光拉曼、XRD对试样的微观结构、晶型结构等进行表征。对所有试样的析氧性能包括极化曲线、电流密度在 $10\text{ mA/cm}^2$ 的过电位以及Tafel曲线进行了研究。结果表明,反应时间和时间对所生成的催化剂微观形貌、晶型结构和活性位点数量等都有影响,从而影响电催化活性。 $150^\circ\text{C}$ 、

8 h条件下制备的试样的过电位为 $0.6406\text{ V}$ ,在所制的所有试样中其催化活性最佳; $130^\circ\text{C}$ 、24 h条件下制备的试样的过电位为 $0.6746\text{ V}$ ,催化性能较好。

### 参考文献

- [1] Baker R T K, Laubernds K, Wootsch A, et al. Pt/Graphite nanofiber catalyst in n-hexane test reaction[J]. J Catal, 2000, 1: 165-167.
- [2] Liang H, Meng F, Caban-Acevedo M, et al. Hydrothermal continuous flow synthesis and exfoliation of NiCo layered double hydroxide nanosheets for enhanced oxygen evolution catalysis[J]. Nano Lett, 2015, 15: 1421-1427.
- [3] Dresch S, Dionigi F, Klingenhof M, et al. Direct electrolytic splitting of seawater: Opportunities and challenges[J]. ACS Energy Lett, 2019, 4: 933-942.
- [4] Urban J J. Emerging scientific and engineering opportunities within the water-energy nexus[J]. Joule, 2017, 1: 665-688.
- [5] 何洪波. 二氧化钛基纳米复合材料修饰阳极及其光催化辅助电解水制氢性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [6] Sohrabnejad E I, Goryachev A, Exner K S, et al. Temperature-dependent kinetic studies of the chlorine evolution reaction over  $\text{RuO}_2(110)$  model electrodes[J]. ACS Catal, 2017, 7: 2403-2411.
- [7] Song J J, Wei C, Huang Z F, et al. A review on fundamentals for designing oxygen evolution electrocatalysts[J]. Chem Soc Rev, 2020, 49: 2196-2214.
- [8] Li X M, Hao X G, Abudulaa A, et al. Nanostructured catalysts for electrochemical water splitting: Current state and prospects[J]. J Mater Chem A, 2016, 4: 11973-12000.
- [9] Zhang J T, Yu L, Chen Y, et al. Designed formation of double-shelled Ni-Fe layered-double hydroxide nanocages for efficient oxygen evolution reaction[J]. Adv Mater, 2020, 32: 1906432-1906437.
- [10] Xu Y, Tu W, Zhang B, et al. Nickel nanoparticles encapsulated in few-layer nitrogen-doped graphene derived from metal-organic frameworks as efficient bifunctional electrocatalysis for overall water splitting[J]. Adv Mater, 2017, 29: 1605.
- [11] Sun Y, Gao S, Lei F, et al. Atomically-thin non-layered cobalt oxide porous sheets for highly efficient oxygen-evolving electrocatalysis[J]. Chem Sci, 2014, 5: 3976-3982.
- [12] Liang H, Meng F, Acevedo M C, et al. Hydrothermal continuous flow synthesis and exfoliation of NiCo layered double hydroxide nanosheets for enhanced oxygen evolution catalysis[J]. Nano Lett, 2015, 15: 1421-1427.
- [13] Zhao Z, Wu H, Jin Y, et al. A high-performance binary Ni-Co hydroxide-based water oxidation electrode with three-dimensional coaxial nanotube array structure[J]. Adv Funct Mater, 2014, 24: 4698-4705.

(下转第196页)

沥青芳香分明显减少,胶质和沥青质明显增多。而加入温拌剂 E26 或 DWMA 后,根据相似相容原理,吸附与其成分相近的组分,沥青中饱和分和芳香分的质量分数增加,温拌剂能更好地分散于胶质和沥青质之间,降低了沥青胶团的大量聚集,提高了温拌橡胶沥青抗老化能力。从四个组分老化前后的变化可以看出,加入温拌剂 DWMA,老化前后饱和分、芳香分、胶质和沥青质的变化较小,说明添加温拌剂 DWMA 的抗老化能力优于添加温拌剂 E26。与前面红外光谱及三大指标测定的结果相一致。

### 3 结论

(1)短期老化 5 h 后,3 种沥青针入度均减小,软化点增大,延度降低;添加 DWMA 温拌剂后,老化后沥青三大指标影响较小,说明有效提高了抗老化能力。

(2)通过红外谱分析得出,添加温拌剂 E26 和 DWMA 后,沥青内部没发生明显的化学变化,官能团的位置没有变化,只是相似者相容,吸收峰的强度有变化。

(3)老化导致胶粉改性沥青发生氧化与缩合反应;使分子间发生断裂与重组,四组分的质量分数发生了变化,通过三大指标的测试及四组分质量分数的测定发现,添加温拌剂 DWMA 的抗老化能力优于添加温拌剂 E26 和未添加温拌剂的橡胶沥青。

### 参考文献

- [1] Wen Y, Liu Q, Chen L. Review and comparison of methods to assess the storage stability of terminal blend rubberized asphalt binders [J]. *Constr Build Mater*, 2020, 258: 119586.
- [2] Nanjegowda V H, Biligiri K P. Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2020, 155: 104655.
- [3] Wang G Q, Wang X Q, Lv S T. Laboratory investigation of rubberized asphalt using high-content rubber powder [J]. *Materials*, 2020, 13(19): 4437–4437.
- [4] Xia C Y, Chen M Y, Geng J G. Swelling and degradation characteristics of crumb rubber modified asphalt during processing [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 20(21): 1125–1136.
- [5] Tan Z H, Wang J J, Shi Z N. Laboratory investigation on effects of organic montmorillonite on performance of crumb rubber modified asphalt [J]. *Journal of Central South University*, 2021, 27(12): 3888–3898.
- [6] 冯新军,李旺.基于正交试验的双氧水处理废胶粉改性沥青工艺参数研究[J].*公路*,2021,66(1):273–279.
- [7] 王廷国.废胶粉改性沥青及沥青混合料的研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [8] Zhou T, Kabir S F, Cao L, *et al.* Comparing effects of physisorption and chemisorption of bio-oil onto rubber particles in asphalt [J]. *J Clean Prod*, 2020, 273: 123112.
- [9] 冷静波.温拌橡胶沥青性能改善试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [10] 曹荣吉,陈荣生.橡胶沥青及断级配混合料的试验研究[D].南京:东南大学,2019.
- [11] 黄征.温拌橡胶沥青胶结料短期热老化及其流变性能研究[D].广州:广州大学,2019.
- [12] Li B, Huang W, Tang N, *et al.* Evolution of components distribution and its effect on low temperature properties of terminal blend rubberized asphalt binder [J]. *Constr Build Mater*, 2017, 136: 598–608.
- [13] Hou X, Lv S, Chen, Z. Applications of Fourier transform infrared spectroscopy technologies on asphalt materials [J]. *Measurement*, 2018, 121: 304–316. ■
- [14] Jiande C, Feng Z, Shao J, *et al.* Interfacial interaction between FeOOH and NiFe LDH to modulate the local electronic structure for enhanced OER electrocatalysis [J]. *ACS Catal*, 2018, 8: 11342–11351.
- [15] Sören D, Fabio D, Malte K, *et al.* Molecular understanding of the impact of saline contaminants and alkaline pH on NiFe layered double hydroxide oxygen evolution catalysts [J]. *ACS Catal*, 2021, 11: 6800–6809.
- [16] Anil A K, Chia-Hui Y, Kum-Yi C, *et al.* Binder-free heterostructured NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/NiFe LDH nanosheet composite electrocatalysts for oxygen evolution reactions [J]. *ACS Appl Energy Mater*, 2020, 3: 10831–10840.
- [17] Yuan F, Zhang E, Liu Z, *et al.* Hollow CoS<sub>x</sub> nanoparticles grown on FeCo-LDH microtubes for enhanced electrocatalytic performances for the oxygen evolution reaction [J]. *ACS Appl Energy Mater*, 2021, 4: 12211–12223.
- [18] Zhou Q, Chen Y, Zhao G, *et al.* Active-site-enriched iron-doped nickel/cobalt hydroxide nanosheets for enhanced oxygen evolution reaction [J]. *ACS Catal*, 2018, 8: 5382–5390.
- [19] Yu L, Wu L, McElhenny B, *et al.* Ultrafast room-temperature synthesis of porous s-doped Ni/Fe (oxy) hydroxide electrodes for oxygen evolution catalysis in seawater splitting [J]. *Energy Environ Sci*, 2020, 13: 3439–3446. ■

(上接第 191 页)