

# 2019年新型炭电极材料热点回眸

司知鑫<sup>1</sup>, 吴晓东<sup>1,2</sup>, 冉锐<sup>2</sup>, 翁端<sup>1,2\*</sup>

1. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055

2. 清华大学材料学院, 北京 100084

**摘要** 2019年, 非金属及金属掺杂和负载的炭电极材料在水分解、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>合成、燃料电池、金属-空气电池等领域的应用研究是一个热点, 主要集中在非金属掺杂炭材料和单原子金属(M)-N-C材料的制备、原理及相关催化反应机制。采用含掺杂元素的有机前驱体高温热解法, 正在成为重要的相关材料制备方法。

**关键词** 炭电极材料; 炭材料; 能源与环境材料

炭材料由于比表面积大、孔结构发达、表面基团丰富、化学和热稳定性好, 作为高性能催化剂或者催化剂载体具有显著优势。相对于SiO<sub>2</sub>、 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和沸石等氧化物载体, 炭材料可以负载更高载量的高分散活性组分。另外, 炭材料的非金属改性相对于氧化物载体更加容易, 基于N、S、P、B等非金属改性的碳材料与过渡金属离子的相互作用更强, 因此更容易制备高载量的单原子金属催化剂。炭材料本身具有显著的催化活性和优异的选择性, 但无金属炭催化剂的催化效率仍需要提高。重要的是, 改变炭材料的石墨化程度, 或对炭材料进行金属掺杂或者负载, 可以显著提高炭材料的导电性, 降低电催化反应的过电位, 这种灵活性使炭基催化剂在新能源与环境催化领域的应用前景广阔, 如产氢反应(HER)、氢氧化反应(HOR)、产氧反应(OER)以

及O<sub>2</sub>还原反应(ORR)等。这些反应对于水分解(water splitting)、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>合成、燃料电池以及金属-空气电池等至关重要。

2019年, 新型炭电极材料领域研究主要集中在: (1) 无金属炭电极材料; (2) 单原子金属掺杂或者负载的炭基催化剂。就新型炭电极材料的制备方法而言, 采用含掺杂元素的有机前驱体高温热解法越来越凸显出重要性。

## 1 非金属掺杂炭材料

### 1.1 能源存储材料

氧化石墨烯具有高比表面、亲水和吸附能力强的特点, 氮掺杂可以在氧化石墨烯结构中引入Lewis碱性位和孔洞, 使离子在氧化石墨烯表面的

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-01-08

基金项目: 深圳市基础研究项目(JCYJ20170817161720484)

作者简介: 司知鑫, 讲师, 研究方向为亚纳米尺度金属催化材料、新型碳材料, 电子信箱: si.zhichun@sz.tsinghua.edu.cn; 翁端(通信作者), 教授, 研究方向为能源与环境材料, 电子信箱: duanweng@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 司知鑫, 吴晓东, 冉锐, 等. 2019年新型炭电极材料热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 108-114; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.01.009

吸附和扩散更加容易。氮掺杂石墨烯通常采用 Hummers 法或者金属催化法合成的氧化石墨烯在  $\text{NH}_3$  气氛进行热处理的方法制备, 耗能大且无法实现批量化。清华大学的翁端研究团队<sup>[1]</sup>采用浓氨水-水热的办法, 在  $200^\circ\text{C}$  处理无定型的沥青活性炭, 制备了高比表面的多孔氮掺杂氧化石墨烯, 具有显著的低能耗和可批量化生产的优势, 应用于超级电容器后, 获得了  $138 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$  ( $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$  时) 的性能; 通过材料制备机理分析, 发现水热环境可以促进一些高活性的碳原子与水发生水煤气反应进而去除部分  $\text{SP}^3$  碳原子, 生成氧化石墨烯微单元; 同时,  $\text{NH}_3$  可以将氧化石墨烯微单元边缘的含氧基团还原并生成  $-\text{NH}_2$ , 进而与  $-\text{COOH}$  基团反应生成具有平面结构的酰胺键, 由此诱导氧化石墨烯微单

元长大为大片的多孔氮掺杂石墨烯。

钠离子电池具有和锂离子电池相似的存储原理, 具有低成本、能量密度高的优点, 在未来大型电动设备上的应用前景广阔。由于  $\text{Na}^+$  的半径 ( $1.16 \text{ \AA}$ ) 大于  $\text{Li}^+$  的半径 ( $0.90 \text{ \AA}$ ), 因此在锂离子电池上广泛应用的石墨电极需要改性才能用于钠离子电池。Qiao 等<sup>[2]</sup>采用 Zn 催化  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  在  $800^\circ\text{C}$  条件下热分解的方法, 制备了高 N 掺杂量 (19.3%) 且层间距 ( $0.45\sim 0.51 \text{ nm}$ ) 可调的少层石墨烯 (图 1<sup>[2]</sup>), 该材料应用于钠离子电池获得了不错的倍率性能 ( $56.6 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $40 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 和耐久性 ( $211.3 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ , 2000 cycles); 其中, 吡咯 N 由于具有垂直于石墨烯片层的孤对电子, 可以调控石墨烯层间距, 进而有利于  $\text{Na}^+$  的吸附和脱附。

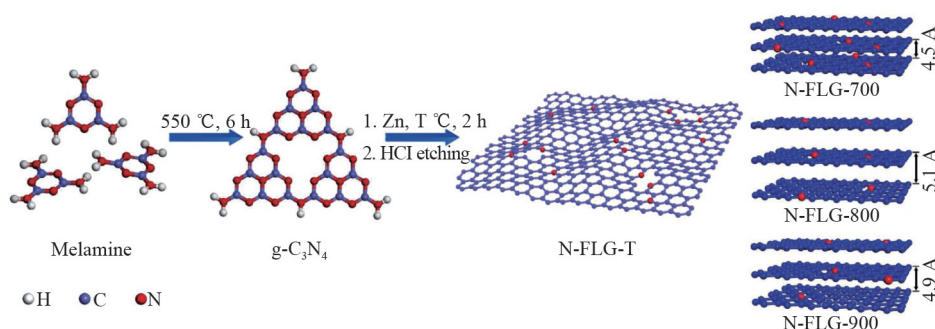


图1 N-FLG-T合成路线示意

## 1.2 能源催化材料

Dai 等<sup>[3]</sup>于 2009 年首次报告了氮掺杂碳纳米管阵列在碱性介质 ORR 催化反应中的电催化活性优于 Pt 催化剂, 由此引发了无金属炭电极的研究热潮。用于石墨烯掺杂的非金属元素通常为 O、N、S、P、B 等, 这些元素的掺杂可以在炭材料表面引入 Lewis 碱性基团, 同时通过碳原子与杂质原子的相互作用产生有利于  $\text{O}_2$  吸附和削弱  $\text{O}-\text{O}$  键的活性位<sup>[4]</sup>。值得注意的是, Zhang 等<sup>[5]</sup>报道了不含可提供额外活性的 N、S、P 等杂原子的富缺陷的炭材料同样是  $\text{CO}_2$  电催化还原的优良催化剂, 其中八边形和五边形  $\text{SP}^2$  碳缺陷是最主要的活性位点, 而非之前报道的炭材料边缘缺陷位点。这些结果意味着杂原子掺杂石墨烯材料的催化活性可能来源于由杂

质原子和掺杂引起的碳缺陷的协同作用。Sofer 等<sup>[6]</sup>制备了高纯无缺陷石墨烯, 研究证明, 这些无缺陷石墨烯无任何电催化活性, 从而证实了缺陷才是无金属炭电极的活性位。Dai 等<sup>[7]</sup>通过先 N 掺杂然后 Ar 等离子体刻蚀去除 N 原子的方法制备了具有五元碳环的高度取向热解石墨, 研究结果表明, 炭材料边缘位置的五元碳环具有比吡啶氮更优异的 ORR 性能。

从来源丰富的生物质材料中制备新型碳材料具有重要的经济和环保意义。Peng 等<sup>[8]</sup>采用木材为原料, 首先用酶溶解纤维素的办法在原木表面造孔, 然后经  $\text{N}_2$  气氛下碳化, 继而与  $\text{NH}_4\text{Cl}$  混合在惰性气氛下热解制备具有高机械强度的氮掺杂等级孔结构 3D 炭材料 (图 2)。该材料具有很好的导电

性和丰富的离子扩散通道,可以用于OER和ORR反应的电极,应用于锌空电池可以获得高的比容量

( $801 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ )和能量密度( $955 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ )以及长的寿命(110 h)。

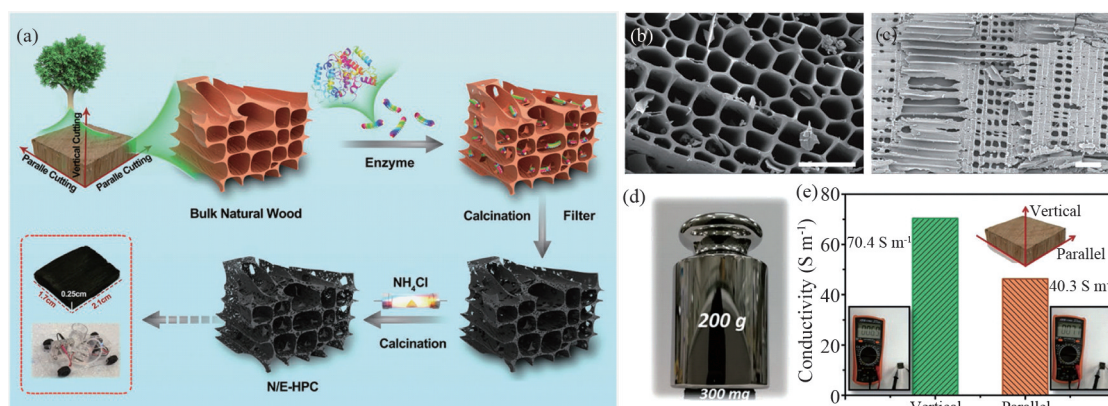


图2 将原木体转化为含氮的多孔催化剂的制备工艺示意

## 2 炭基贵金属单原子催化剂

2019年,清华大学深圳国际研究生院的司知鑫、李佳和中国科学院大学的张群等<sup>[9]</sup>报道了 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 表面Pd在光催化分解反应中的尺寸效应:随着Pd的尺寸由单原子向多原子的团簇变大,Pd- $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 催化剂的价带位置显著升高,导致 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 催化剂的禁带宽度变窄(图3);单原子 $\text{Pd}^{2+}$ 与 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 结构孔隙边缘的4个吡啶氮N配位,其光催化产氢活性相对纳米Pd粒子提高了近10倍,并确定了产氢位点为近邻Pd-N4的氮原子而非 $\text{Pd}^{2+}$ 。中国科

学技术大学Liang和中国科学院Wu的研究团队<sup>[10]</sup>以 $\text{SiO}_2$ 为模板剂、Co为催化剂,将2, 2'-二噻吩在 $800^\circ\text{C}$ 环境中热解制备了硫掺杂石墨烯,然后通过浸渍法制备单原子Pt-S-C催化剂,催化剂的电解水质量比活性( $26.1 \text{ A} \cdot \text{mg}^{-1}$ ,  $20 \text{ mV}$ )为商业Pt/C催化剂的38倍。

目前,关于贵金属单原子掺杂炭材料的配位构型及其电子结构的研究已很广泛。然而,掺杂贵金属单原子的碳原子层与层之间的协同效应容易被忽视。Yao等<sup>[11]</sup>报告了单原子Co和Pt-Co炭电极材料在酸性和碱性介质中的HER性能均优于商用Pt/

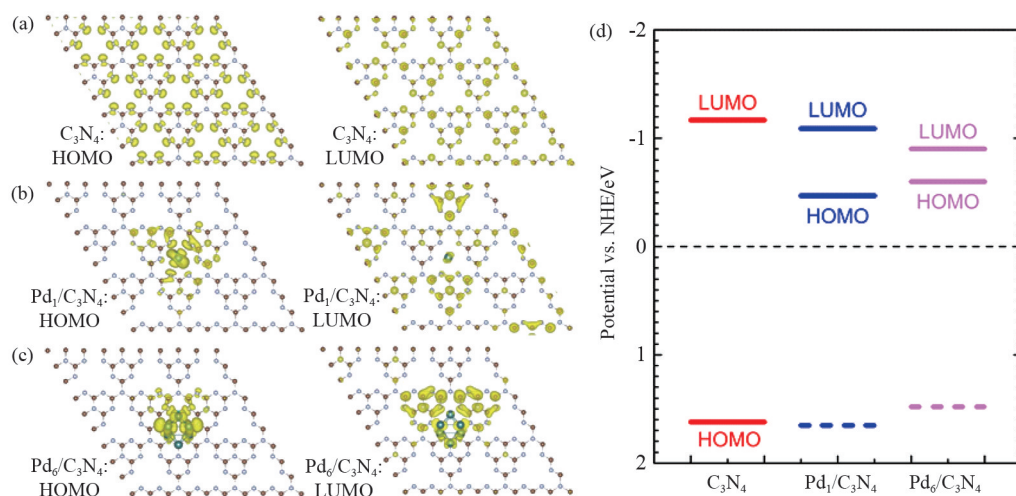


图3 最高占据分子轨道(HOMO)和最低未占据分子轨道(LUMO)的电荷密度及能带位置

C, 理论分析结果表明, 石墨内层的金属原子会诱导外层金属原子发生极化, 从而调节  $H^*$  在金属原子表面的吸附能, 使材料具有更优异的 HER 性能。

### 3 炭基过渡金属单原子催化剂

无论是氢燃料电池还是电解水电极, 贵金属占到了整个系统成本的 40% 左右, 为降低成本, 开发非贵金属的过渡金属催化剂意义重大。单原子过渡金属掺杂/负载的炭电极材料具有可以比拟商业 Pt (或者 Ir、Ru 等)/C 的催化性能, 但在实际应用环境中的稳定性仍需深入研究。

#### 3.1 水分解

利用太阳能、地热能、风能、核能等新能源产生的电进行水分解制氢是未来有望规模化生产氢的绿色途径。水分解的关键限速步骤是阳极的 OER 反应, 基于  $IrO_2$  和  $RuO_2$  的 OER 催化剂的反应过电势很低, 是目前最高效的 OER 催化剂, 但其价格昂贵。Chen 和 Hu 等<sup>[12]</sup>报道了一种首先负载单原子  $Co^{2+}$  然后原位转变为 Co-Fe 双原子的 N、O 双掺杂炭催化剂的材料制备方法。该方法首先采用  $Co^{2+}$  与 1, 10-邻菲咯啉的络合物为前驱体, 以  $Mg(OH)_2$  为模板, 制备 Co-N-C 材料, 然后将 Co-N-C 材料分散在含 Fe 的 KOH 溶液中实现 Co 和 Fe 双原子对的自动负载。这种炭负载的 Co-Fe 双原子催化剂表现出高于已报道的基于过渡金属氧化物的 OER 催化剂的最高 TOF 值。单原子 Ni-N-中空碳材料材料<sup>[13]</sup>和双原子 Co, Ni-N-中空的立方炭材料<sup>[14]</sup>等也被开发出来用于 OER。Hu 等<sup>[14]</sup>采用多巴胺包覆的 MOFs 材料在 500°C 和  $NH_3$  气氛条件下热解制备了双原子 Co, Ni-N-中空的立方炭材料, 但此方法需要用酸处理去除金属纳米颗粒。

#### 3.2 ORR

就质子膜燃料电池阳极 ORR 反应而言, Fe-N-C 催化剂是目前活性最好的非贵金属催化剂。华中科技大学 Shui 和北京航空航天大学 Xu 等<sup>[15]</sup>设计并制备了一类凹面 Fe-N-C 单原子催化剂, 该类催化剂有着高的比表面积和介孔率, 可以暴露更多

Fe-N4 基团并提高催化剂层质量传输, 在 1.0 bar  $H_2-O_2$  和 0.88  $V_{ir-free}$  的条件下, 电流密度达到 0.047  $A \cdot cm^{-2}$ 。为进一步提高炭材料表面的 Fe-N-C 催化剂表面 Fe-N4 基团的密度, Lu、Yang 和 Jiang 等<sup>[16]</sup>采用氯化血红素和双氰胺的混合物在 350°C、650°C、900°C 条件下分步热解的方法制备了氮掺杂石墨烯负载的铁单原子催化剂, 负载的铁单原子质量分数达到了 8% 左右, 催化剂性能 (起始电位为 0.950 V, 半波电位为 0.804 V) 比商业 Pt/C 催化剂更加优秀, 且稳定性更好。

ORR 反应会生成  $H_2O_2$  或者  $\cdot OH$ 、 $\cdot OOH$  等自由基, 自由基会攻击高分子电解质膜的端基或者主链使电解质膜老化、变薄甚至穿孔, 尤其是存在  $Fe^{2+}$  时,  $H_2O_2$  与  $Fe^{2+}$  发生芬顿反应 (Fenton reaction), 会加速高分子电解质膜的老化。2018 年, Wang 等<sup>[17]</sup>采用化学掺杂和物理吸附相结合的两步法逐步提高 MOF 衍生的氮掺杂纳米碳载体活性位点的密度, 制备了高活性与高稳定性兼备的单原子分散的 Mn-N-C 催化剂, 其催化活性与传统的 Fe-N-C 催化剂相当 (0.8 V vs. RHE), 但具有更加优异的稳定性。2019 年, Yang 等<sup>[18]</sup>采用铜氨离子与石墨烯共同水热的方法制备了链接在石墨烯单元之间的 Cu-N4-C 催化剂; 分析认为, 水热过程中石墨烯表面的氧化物被还原, N 和 Cu 原子起到链接作用, 使得石墨烯尺寸长大, 但没有提供直接证据说明铜离子和 N 原子嫁接到石墨烯边缘起到链接作用。该催化剂的 ORR 活性达到 50.7  $A \cdot g^{-1}$  (0.80 V),  $E_{1/2} = 0.84$  V。

Chen 等<sup>[19]</sup>先制备具有联吡啶基团的 Zr 基金属有机框架材料 (如 UiO(bpdc)), 通过后处理修饰方法将金属盐前驱体配位到联吡啶基团上, 然后在惰性气氛下进行碳化并用酸刻蚀去除  $ZrO_2$  纳米颗粒, 通过以上方法制备了 Fe、Co、Ni、Cu 等多种单原子催化剂, 金属离子的 N 配位数为 5; 其中, Fe 单原子具有非常优异的 ORR 性能, 在 0.1 mol/L 的 KOH 中, 其半波电位为 0.89 V, 优于商业化 Pt/C 催化剂。

#### 3.3 $H_2O_2$ 合成

$H_2O_2$  在生物医药、医疗、化工、环境及食品等领域

域具有广泛应用,属于高附加值的化学品。传统的蒽醌氧化还原合成  $\text{H}_2\text{O}_2$  的技术路线耗能大且污染物排放严重。采用电催化、光催化或者两者结合的技术手段制备  $\text{H}_2\text{O}_2$  更为节能和环保。2019年,  $\text{H}_2\text{O}_2$  合成催化剂领域取得了众多引人注目的进展。

Wang 等<sup>[20]</sup>报道了一种将氢气和氧气分别通入由多孔固体电解质隔开的阳极和阴极直接电催化合成  $\text{H}_2\text{O}_2$  的方法,在 Pt/C 电极的  $\text{H}^+$  和炭黑电极(硝酸处理过的)生成的  $\text{HO}_2^-$  反应生成  $\text{H}_2\text{O}_2$  水溶液,在  $200 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  的电流密度下获得大于 90% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  选择性,此方法很可能会实现规模化电催化制备  $\text{H}_2\text{O}_2$  (图 4)。Siahrostami 和 Wang 等<sup>[21]</sup>通过对碳纳米管中不同过渡金属单原子配合物的氧还原途径的调控制备了 Fe-C-O 催化材料,在 0.1 mol/L 的 KOH 溶液与  $0.1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  电流密度条件下  $\text{H}_2\text{O}_2$  合成的起始电压为 0.822 V,在碱性和中性条件下  $\text{H}_2\text{O}_2$  的选择性都超过了 95%;DFT 计算模拟结果表明,不同于 Fe-C-N 催化剂的 4 电子 ORR 过程,Fe-C-O 为  $\text{H}_2\text{O}_2$  合成的催化活性位点更有利于 2 电子过程。Rossmeisl 等<sup>[22]</sup>以 ZIF-8 和 1, 10-菲咯啉为 N、C 前驱体和乙酸盐为过渡金属前驱体,在  $1050^\circ\text{C}$  环境下热解 1 h 制备了一系列单原子 M-N-C (M=Mn、Fe、Co、Ni 或 Cu) 催化材料,其中  $\text{CoN}_3$  配位结构的 Co-N-C 催化剂的  $\text{H}_2\text{O}_2$  选择性达到了 80%。该研究发现,适宜的催化剂表面  $\text{HO}^*$  结合能是催化剂具有高  $\text{H}_2\text{O}_2$  选择性的关键。

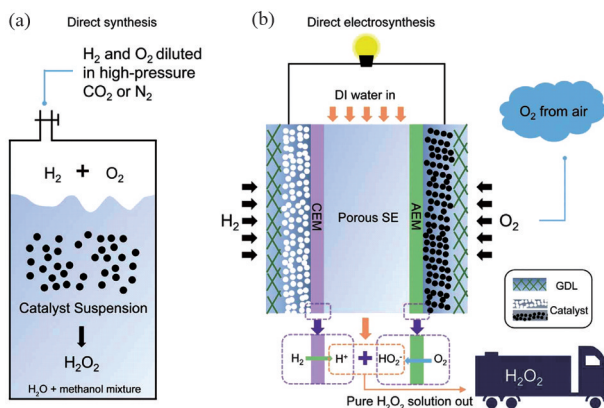


图4 用氢气和氧气合成过氧化氢的两种方法

## 4 结论

由于优异的导电性、吸附性能和催化性能,非金属和金属掺杂/负载炭材料在新能源领域显示出巨大的应用潜力。但目前,无论从材料制备原理、材料结构与性能的构效关系以及材料的实用化等方面还存在以下问题需要解决。

1) 非金属和金属掺杂/负载炭材料多采用昂贵的金属有机盐为前驱体,成本高昂,且制备过程的有害物排放量大,因此开发低成本、低污染的炭材料规模化生产工艺是非金属和金属掺杂/负载炭材料在实际应用中必须要解决的问题。此外,非金属和金属掺杂/负载炭材料的制备原理仍然不清晰。

2) 关于金属-N/S-C活性位点的报道较多,但从整个催化剂角度来看,结构均一的掺杂型炭材料的制备仍然是个问题,且杂质原子和碳原子缺陷往往同时存在,给炭材料结构与性能的构效关系研究带来困难,因此,如何制备结构清晰且活性位单一的炭材料是未来研究的重点之一。

3) 单原子金属之间、金属与炭载体、金属/非金属掺杂炭层之间的相互作用机制及其关联的催化反应机理需要深入研究,特别是金属单原子的稳定机制及在特定催化反应中的适应性。

4) 关于负载单原子金属的炭材料在具体反应中的稳定性研究成果令人鼓舞,但此类材料在真实操作环境下的全寿命稳定性考核仍然是非常重要的,未来在这方面的研究将推动新型炭电极材料的工程化应用。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu P, Si Z, Wei Lv, et al. Synthesizing multilayer graphene from amorphous activated carbon via ammonia-assisted hydrothermal method[J]. Carbon, 2019, 152: 24-32.
- [2] Liu J, Zhang Y, Zhang L, et al. Graphitic carbon nitride ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ )-derived N-rich graphene with tunable interlayer distance as a high-rate anode for sodium-ion batteries [J]. Advanced Materials, 2019, 31: 1901261-1901271.

- [3] Gong K, Du F, Xia Z, et al. Nitrogen-doped carbon nanotube arrays with high electrocatalytic activity for oxygen reduction[J]. *Science*, 2009, 323: 760–764.
- [4] Yang L, Shui J, Du Lei, et al. Carbon-based metal-free ORR electrocatalysts for fuel cells: Past, present, and future[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1804799–1804819.
- [5] Wang W, Shang L, Chang G, et al. Intrinsic carbon-defect-driven electrocatalytic reduction of carbon dioxide[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1808276–1808283.
- [6] Vlastimil M, Jan L, Stanislava M, et al. Ultrapure graphene is a poor electrocatalyst: Definitive proof of the key role of metallic impurities in graphene-based electrocatalysis[J]. *ACS Nano*, 2019, 13: 1574–1582.
- [7] Jia Y, Zhang L, Zhuang L, et al. Identification of active sites for acidic oxygen reduction on carbon catalysts with and without nitrogen doping[J]. *Nature Catalysis*, 2019, 2: 688–695.
- [8] Peng X, Zhang L, Chen Z, et al. Hierarchically porous carbon plates derived from wood as bifunctional ORR/OER electrodes[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1900341–1900348.
- [9] Liu L, Wu X, Wang L, et al. Atomic palladium on graphitic carbon nitride as a hydrogen evolution catalyst under visible light irradiation[J]. *Communications Chemistry*, 2019, doi: 10.1038/s42004-019-0117-4.
- [10] Yan Q, Wu D, Chu S, et al. Reversing the charge transfer between platinum and sulfur-doped carbon support for electrocatalytic hydrogen evolution[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4977–4986.
- [11] Zhang L, Jia Y, Liu H, et al. Charge polarization from atomic metals on adjacent graphitic layers for enhancing the hydrogen evolution reaction[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58: 9404–9408.
- [12] Bai L, Hsu C, Duncan T, et al. A cobalt-iron double-atom catalyst for the oxygen evolution reaction[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141: 14190–14199.
- [13] Zhang H, Liu Y, Chen T, et al. Unveiling the activity origin of electrocatalytic oxygen evolution over isolated Ni atoms supported on a N-doped carbon matrix[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1904548–1904555.
- [14] Han X, Ling X, Yu D, et al. Atomically dispersed binary Co-Ni sites in nitrogen-doped hollow carbon nanocubes for reversible oxygen reduction and evolution[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1905622–1905631.
- [15] Wan X, Liu X, Li Y, et al. Fe-N-C electrocatalyst with dense active sites and efficient mass transport for high-performance proton exchange membrane fuel cells[J]. *Nature Catalysis*, 2019, 2: 259–268.
- [16] Cheng Y, He S, Lu S, et al. Iron single atoms on graphene as nonprecious metal catalysts for high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *Advanced Science*, 2019, 6: 1802066–1802074.
- [17] Li J, Chen M, David A, et al. Water oxidation on a mononuclear manganese heterogeneous catalyst[J]. *Nature Catalysis*, 2018, 1: 870–877.
- [18] Li W, Min C, Tan F, et al. Bottom-up construction of active sites in a Cu-N<sub>4</sub>-C catalyst for highly efficient oxygen reduction reaction[J]. *ACS Nano*, 2019, 13: 3177–3187.
- [19] Lin Y, Liu P, Ever V, et al. Fabricating single-atom catalysts from chelating metal in open frameworks[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1808193–1808202.
- [20] Xia C, Xia Y, Zhu P, et al. Direct electrosynthesis of pure aqueous H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solutions up to 20% by weight using a solid electrolyte[J]. *Science*, 2019, 366: 226–231.
- [21] Jiang K, Seoin B, Austin J, et al. Highly selective oxygen reduction to hydrogen peroxide on transition metal single atom coordination[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3997–4008.
- [22] Sun Y, Luca S, Nastaran R, et al. Activity-selectivity trends in the electrochemical production of hydrogen peroxide over single-site metal-nitrogen-carbon catalysts[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141: 12372–12381.

## Hot research topics of carbon electrode in 2019

SI Zhichun<sup>1</sup>, WU Xiaodong<sup>1,2</sup>, RAN Rui<sup>2</sup>, WENG Duan<sup>1,2\*</sup>

1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

2. School of Materials, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** This review presents the researches of nonmetallic and metal doped or loaded carbon electrode materials in the fields of water decomposition, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> synthesis, fuel cell, and metal–air cell, all of which were very hot topics in 2019. These researches mainly concentrate on preparation method, principle of designing and related catalytic reaction mechanisms of nonmetallic or metal doped/loaded carbon materials, such as single atomic metal (M)–N–C materials. High temperature pyrolysis of organic precursors with doping elements is becoming an important method for preparation of related materials.

**Keywords** carbon electrode; carbon materials; energy and environmental materials ●



(责任编辑 王丽娜)