

## 石墨烯的功能与应用——规模制备和能源相关应用

王斌<sup>1</sup>, 智林杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 国家纳米科学中心, 纳米科学卓越创新中心, 纳米系统与多级次制造重点实验室, 北京 100190

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

## Graphene: Functions and Applications——Batch Production and Energy-Related Applications

Bin Wang<sup>1</sup>, Linjie Zhi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CAS Key Laboratory of Nanosystem and Hierarchical Fabrication, CAS Center for Excellence in Nanoscience, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China.

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.

Emails: wangb@nanocr.cn (B.W.); zhilj@nanocr.cn (L.Z.).

Published online: April 7, 2021.

2004年曼彻斯特大学报道了首个具有明确结构的石墨烯材料<sup>1</sup>, 其优异的物理化学性质引起了科学界和工业界的持续关注。经过十几年的探索, 石墨烯的规模化制备和应用已取得了长足的进步, 尤其是在能源存储和转化等领域展现出了广阔的应用前景。本专刊收集了国内部分科学家在相关领域的研究成果, 分成两期在2022年第1期和第2期印刷出版。上一期围绕高质量石墨烯的生长、性质调控和新功能器件的开发展开了讨论, 本期则聚焦在石墨烯的规模化制备和在能源相关领域的实际应用方面。

刘忠范团队在高质量石墨烯的化学气相沉积生长(CVD)方面有长期的积累, 并实现了石墨烯晶圆的批量制备。基于此, 从使用规范和应用场景出发, 他们<sup>2</sup>介绍了石墨烯晶圆的标号化制备需求, 提出按照石墨烯的品质进行等级分类, 形成面向应用的技术标准, 并重点论述了CVD规模化制备技术, 分析了未来可能的发展方向, 对石墨烯切实走进人们的生活提出了期望。除二维形态外, 石墨烯也可以形成一维纤维材料, 而根据结构的不同可以将石墨烯纤维分为两大类: 一类是通过片层的紧密有序堆积形成一维宏观材料, 另一类是利用CVD的方法将石墨烯沉积在其它的纤维材料上, 形成复合功能材料。刘忠范团队对这两种石墨

烯纤维的发展现状分别进行了总结。首先介绍了通过湿法纺丝、限域水热等组装方法制备石墨烯纤维的过程<sup>3</sup>, 详细阐述了其性能及提升策略, 并对此类纤维的应用方向进行了归纳和展望。其次, 他们介绍了模板法CVD生长石墨烯复合纤维的技术<sup>4</sup>, 如在石英纤维、光纤等材料上进行沉积的过程控制和相应的力、电、光学性质, 及其在智能传感、光学器件、柔性电极等领域的应用。

石墨烯规模化制备技术的日趋成熟推动了其在多个应用领域研究的快速发展, 如催化、储能、散热、光电转换、功能涂料等。其中, 能源问题是人类生存的根本问题。在2020年9月第75届联合国大会上, 习近平总书记向全世界做出“力争于2030年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”的承诺。发展绿色储能技术和二氧化碳的高效还原技术是实现低碳经济的两个重要手段。

在储能电池方面, 宋怀河等<sup>5</sup>从石墨烯的实用化角度出发, 研究了石墨烯包覆天然球形石墨用作锂离子电池负极材料时, 乙炔黑导电剂的添加对其电化学性能的影响。在此过程中, 石墨烯不仅作为活性物质, 也可作为导电剂来使用, 而乙炔黑则发挥桥连作用, 与石墨烯协同形成更加高效的导电网络, 提高了电池的容量。何海勇等<sup>6</sup>则采用

还原氧化石墨烯对剥离石墨进行包覆, 剥离石墨的大层间距的特点有利于钾离子的快速脱嵌过程, 同时也抑制了剥离石墨的堆叠, 增强了石墨基负极在钾离子电池中的稳定性。吴明铂等<sup>7</sup>综述了近年来表面化学修饰的石墨烯、石墨烯基复合材料以及柔性材料等在锂硫电池正极中的研究现状, 展望了石墨烯作为硫载体在锂硫电池正极中的发展前景。范壮军等<sup>8</sup>从石墨烯基的超级电容器器件出发, 系统总结了石墨烯薄膜的简易制备方法, 综述了通过结构调控和表面修饰等方法来优化石墨烯薄膜电化学性能的策略, 并对石墨烯薄膜应用所面临的挑战和未来的发展进行了总结和展望。

利用电催化技术将二氧化碳转化为小分子燃料或高附加值化学品是构建人工碳循环的绿色能源技术之一。邱介山等<sup>9</sup>评述了石墨烯基材料在该领域的研究进展, 详述了石墨烯基电催化剂的构筑方法, 探讨并梳理了石墨烯的点/线缺陷、表面官能团、掺杂原子构型、金属单原子种类、材料表面性质等与还原反应的本征构效关系。智林杰等<sup>10</sup>通过热解含镍金属的有机框架材料和二脒二胺制备了高载量镍单原子(7.77%, w)负载的超薄氮掺杂碳纳米片, 其在较宽的电压窗口内(-0.77到-1.07 V vs. RHE)产生一氧化碳的选择性都高于90%, 且具有优良的稳定性。该结果表明, 采用有机框架材料为前驱体制备二维碳纳米片可以实现高效负载金属原子的功能性催化材料, 对高选择性的二氧化碳还原催化剂的结构设计和制备有指导意义。

尽管石墨烯的高质量制备和结构、功能控制还存在许多困难与问题, 但是石墨烯在许多领域的实际应用却也在快速发展。特别是利用石墨烯中存在的结构缺陷导致的特殊功能, 使其在催化、电化学转化、光电转化、电热转化等领域具有良好的应用前景。石墨烯通过化学改性、结构优化、多组分复合等手段更是可以有针对性地优化其在实际使用中的性能, 从而在二次电池、超级电容器、太阳能利用、导热散热、防护涂层、过滤净化、生物传感等领域发挥重要作用。这些应用研究在学

术界和产业界正在受到越来越多的重视, 其中的有些研究成果正在逐渐实现商业化应用, 相信在不远的将来会逐步走进人们的生活。

## References

- (1) Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A. *Science* **2004**, *306*, 666. doi: 10.1126/science.1102896
- (2) Jiang, B.; Sun, J. Y.; Liu, Z. F. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2007068. [姜蓓, 孙靖宇, 刘忠范. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2007068.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202007068
- (3) Jian, M. Q.; Zhang, Y. Y.; Liu, Z. F. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2007093. [蹇木强, 张莹莹, 刘忠范. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2007093.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202007093
- (4) Cheng, Y.; Wang, K.; Qi, Y.; Liu, Z. F. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2006046. [程熠, 王坤, 元月, 刘忠范. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2006046.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202006046
- (5) Liu, X. W.; Niu, Y.; Cao, R. X.; Chen, X. H.; Shang, H. Y.; Song, H. H. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2012062. [刘学伟, 牛莹, 曹瑞雄, 陈晓红, 商红岩, 宋怀河. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2012062.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202012062
- (6) Wang, J.; Yin, B.; Gao, T.; Wang, X. Y.; Li, W.; Hong, X. X.; Wang, Z. Q.; He, H. Y. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2012088. [王键, 尹波, 高天, 王星懿, 李望, 洪兴星, 汪竹青, 何海勇. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2012088.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202012088
- (7) Zhang, M. D.; Chen, B.; Wu, M. B. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2101001. [张梦迪, 陈蓓, 吴明铂. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2101001.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202101001
- (8) Jiang, M. H.; Sheng, L. Z.; Wang, C.; Jiang, L. L.; Fan, Z. J. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2012085. [姜美慧, 盛利志, 王超, 江丽丽, 范壮军. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2012085.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202012085
- (9) Du, Y. D.; Meng, X. D.; Wang, Z.; Zhao, X.; Qiu, J. S. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2101009. [杜亚东, 孟祥桐, 汪珍, 赵鑫, 邱介山. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2101009.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202101009
- (10) Huang, X. X.; Ma, Y. J.; Zhi, L. J. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2022**, *38* (2), 2011050. [黄小雄, 马英杰, 智林杰. 物理化学学报, **2022**, *38* (2), 2011050.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202011050