

田也：镍基柔性超级电容器的快速焦耳热处理制备【CEJ, 2025】

超级电容器在高能量密度电池与高功率密度传统电容器之间架起了一座桥梁，凭借其快速充放电能力、优异的比电容、卓越的功率密度及超长的循环寿命，在电动汽车、备用电源，尤其是可穿戴电子设备领域展现出广阔的应用前景。在可穿戴电子设备中，能够同时满足电化学性能与机械柔性要求的超级电容器至关重要。因此，亟需开发具有高活性材料负载的多孔复合电极，以确保高效的电子和离子传输，同时适应电极材料在充放电过程中的体积变化。然而，传统的电极制造方法主要依赖浆料涂覆于固体集流体，这种方法存在诸多局限性：电极孔隙率受限、较厚的金属支撑体限制了柔性，以及粘结剂的加入降低了能量密度。粘结剂不仅增加了非活性组分的质量和体积，还阻碍了电子和离子在氧化还原颗粒表面及电极内部的传输，进而降低电解质的渗透性和氧化还原活性。此外，基于浆料的制造工艺通常需要使用有机溶剂，不仅增加了成本，还对环境和人类健康构成潜在威胁。

据此，课题组博士研究生田也在刘昊教授和廖立兵教授的指导下，联合西班牙加泰罗尼亚能源研究所(IREC) Andreu Cabot 教授提出了一种基于焦耳热冲击（Joule heating shock）技术的新型节能、超快速的超级电容器电极合成方法。焦耳热加热技术通过施加电流直接在材料内部产生热量，具有诸多优势：极短的处理时间、无需溶剂及催化剂，并且可直接作用于碳基底，无需特殊的气体环境。利用该策略，在一种碳纳米管纸—巴基纸（Buckypaper）基底上成功制备了硫化镍-氧化镍（ $\text{Ni}_3\text{S}_2\text{-NiO}$ ）异质结构纳米粒子，可作为柔性超级电容器的高性能电极材料，证明了超快处理方法在提升超级电容器性能方面的巨大潜力。本研究工作的亮

点如下：

1. 提供了一种快速的合成路线，无需使用有机溶剂，从而提高了该过程的可持续性。通过利用巴基纸作为基质的优异性能，制备的复合材料保持了多壁碳纳米管的结构并实现了活性材料的均匀分散，极大地促进了快速法拉第反应。
2. 通过密度泛函理论（DFT）计算， $\text{Ni}_3\text{S}_2\text{-NiO@BP}$ 展现出最佳的电导率和 OH^- 吸附能。受 Ni_3S_2 和 NiO 之间协同效应的影响，该异质结构表现出卓越的比电容和倍率特性，在 1 A g^{-1} 的电流密度下获得 2278 F g^{-1} 的电容。
3. 结合非原位 X 射线衍射（XRD）及拉曼光谱分析，证实了 $\text{Ni}_3\text{S}_2\text{-NiO}$ 在碱性电解质环境下充放电过程中的相变行为，并提出了可能的电化学反应路径。该材料提供了大量可逆氧化还原活性位点，从而有效提升了电荷存储容量并加速氧化还原动力学。
4. $\text{Ni}_3\text{S}_2\text{-NiO@BP//AC}$ 装置在 1124.8 W kg^{-1} 的功率密度下，实现了 71.55 Wh kg^{-1} 的能量密度。此外，复合电极的柔性特性确保了在机械变形下稳定的电化学性能，使其成为便携式和可穿戴电子应用的理想选择。

这项研究为碳基材料上金属硫化物的快速合成提供了一种有价值的策略，并为开发高性能、柔性超级电容器提供了新的思路，并为能源存储领域的可持续发展奠定了坚实基础。

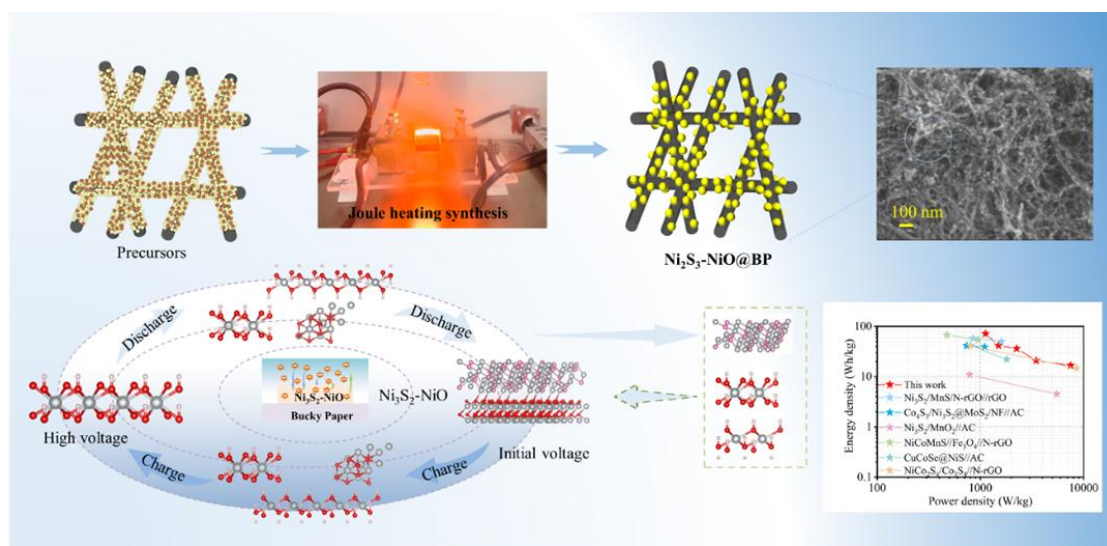


图 1 图文摘要

上述研究成果发表于材料领域国际权威期刊《Chemical Engineering Journal》
 上: Ye Tian, Shuonan Wang, Ning Liu, Qian Xue, Xueqiang Qi, Hao Liu, Andreu Cabot, Libing Liao, Rapid Joule heating processing of nickel-based flexible supercapacitors, Chemical Engineering Journal, Volume 507, 2025, 160765, ISSN 1385-8947, DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160946. [IF2024=13.4]

全文链接: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160765>