印制式平面型碳基超级电容器的构型研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.0008

冯天才　冷　娴　张传香

湖南工业大学
包装工程学院
湖南　株洲　412007

摘　要：为了系统性地研究平面型超级电容器构型参数的影响，采用活性炭功能油墨，通过丝网印刷法构筑了具有不同叉指参数特征的碳基平面型超级电容器，并测试了其电化学储能性能。研究表明，叉指间距为 1 mm，叉指数目为 2 的印制式超级电容器在功率密度为 0.1 mW/cm^2 的条件下，能量密度达 6.46 μWh/cm^2。当叉指数目增加至 16，相同功率密度下的能量密度为 2.03 μWh/cm^2，但具有更佳的倍率性能。器件的几何构型参数将改变其有效电极面积占比、电解质离子扩散路径及电极电阻，从而影响其电容储能特性，研究结果可为平面叉指型超级电容器的结构设计及优化提供参考。

关键词：活性炭；丝网印刷；超级电容器；构型
中图分类号：TS805；TM53　　**文献标志码**：A
文章编号：1674-7100(2025)03-0088-09
引文格式：冯天才，冷　娴，张传香 . 印制式平面型碳基超级电容器的构型研究 [J]. 包装学报，2025，17(3)：88-96.

1　研究背景

当今电子工业的发展方向为微型化、便携化和高度集成化，其对新型能源器件的需求日益增长。超级电容器作为一类重要的电化学储能系统，在功率密度、低温稳定性和循环寿命等方面较锂离子电池更具优势，在能量密度方面较传统电容器表现更佳 [1-3]。超级电容器常见的器件构型有三明治构型、纤维状构型和平面（叉指）构型等。传统三明治构型，因含有隔膜结构（20~30 μm）而存在短路风险，且一般体积较笨重，不能适应元器件的柔性化需求。纤维状构型的超级电容器构筑过程繁琐，不适合量产。平面（叉指）构型无需隔膜，叉指电极提供的大量开放性边缘促进了离子的扩散，有助于实现高频响应和高功率输出；此外，这种构型易于整合至柔性电路，可满足柔性化、便携式电子元件和智能包装系统的供能需求 [4, 5]。

平面（叉指）型超级电容器的常见构筑方法有光刻法、激光直写法、等离子体刻蚀技术、电解或电泳沉积策略、真空抽滤法和印刷制造法等 [6-8]。构筑方法的适用性与所用材料的微观结构、物化特性和产品的精度要求等相关。传统光刻法的产品精度高，可满足高端应用需求，但制造过程需要洁净工作空间，且设备及原材料昂贵，制造步骤较繁琐。激光直写法制备叉指型器件的精度可达微米级，较传统三明治型器件具有更优异的储能和倍率特性 [9]。印刷制造法可通过多种印刷技术实现 [10]，如凹版印刷 [11, 12]、柔性版印刷、丝网印刷 [13-15]、喷墨 [16, 17] 和 3D 打印 [18] 等。印刷制造法是近年来的研究热点，具有节约耗材、工艺技术成熟、可室温构筑和可大面积商业化量产

收稿日期：2024-11-12
基金项目：国家自然科学基金青年项目（52004087）
作者简介：冯天才，男，硕士生，主要研究方向为纳米功能材料的设计、合成与应用，E-mail：15994503569@163.com
通信作者：冷　娴，女，讲师，博士，主要研究方向为功能材料及印刷电子，E-mail：lengxian@hut.edu.cn

等优势[19]。Chang Q. H. 等[11]将分级多孔石墨烯微球配制成凹印油墨，分析了油墨的流变特性和动态转移机理，印制了叉指型超级电容器。该器件具有较高的 H^+ 扩散速率（9.2×10^{-10} cm^2/s）和高比电容（43.5 mF/cm^2），功率密度为 3.6 mW/cm^2 时，能量密度达 6.1 $\mu Wh/cm^2$。Feng Y. 等[14]采用水热合成法制备了 $Ni(OH)_2/NiMoO_4$ 复合材料及相应的功能油墨，通过丝网印刷的方式高效构筑了具有高稳定性的柔性固态超级电容器。该器件 5000 次充放电循环后，电容量保持率为 115%，750 组弯曲 / 释放循环后电容量保持率为 81.7%。Shi X. Y. 等[15]制备了高导电性的石墨烯油墨，采用丝网印刷的方式构筑了由 130 个微型超级电容器构成的储能模块，可输出电压超过 100 V，子单元之间无需额外的金属导线连接，且表现出良好的均一性和稳定性。P. Giannakou 等[16]采用 NiO 纳米球配制了喷墨墨水，并打印出叉指状微型超级电容器，其面积比电容和体积比电容分别高达 155 mF/cm^2 和 705 F/cm^3。喷墨法简化了器件的构筑流程，且具有设计多样性、可规模化量产和可直接整合于印制电路等特点。Li X. R. 等[18]将由 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片、MnO_2 纳米线、Ag 纳米线和富勒烯组成的假塑性纳米复合材料作为浆料，通过 3D 打印技术构筑了叉指型可拉伸微型超级电容器，结合单向凝固方法使叉指结构内部产生大量蜂窝状孔隙结构和界面区域，实现了高能量密度（19.2 $\mu Wh/cm^2$）和高功率密度（58.3 mW/cm^2）。

现有的印刷制造法构筑平面（叉指）型超级电容器的研究主要关注活性电极材料电化学性能的提升、油墨的流变学性能研究和油墨组分对器件性能的影响等方面。器件的几何构型参数，如叉指间距、叉指宽度、叉指长度和叉指数目等，对其储能特性影响显著[15, 20]，此方面仍缺少系统性的研究。本文采用活性炭功能油墨，通过丝网印刷法制备了具有不同叉指参数特征的碳基平面（叉指）型超级电容器，并研究了几何构型参数对器件电化学储能性能的影响。

2 实验部分

2.1 实验原料

活性炭，XFP01，江苏先丰纳米材料科技有限公司；乙炔黑，XC-72，卡博特（中国）投资有限公司；聚偏二氟乙烯（polyvinylidene fluoride，PVDF），HSV900，阿科玛（上海）化工有限公司；N- 甲基吡咯烷酮（N-methyl pyrrolidinone，NMP），AR，太原力之源科技有限公司；导电银浆，SCR-R60，青岛纳印新材料科技有限公司；聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜，苏州东轩塑料制品有限公司；氢氧化钾，AR，湖南汇虹试剂有限公司。

2.2 实验设备与仪器

吸气手印台，XQ460 型，瑞安市展翔机械有限公司；鼓风干燥箱，DHG-9075A 型，上海一恒科学仪器有限公司；扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM），Phenom ProX G6 型，赛默飞世尔科技公司；电化学工作站，CHI660E 型，上海辰华仪器有限公司。

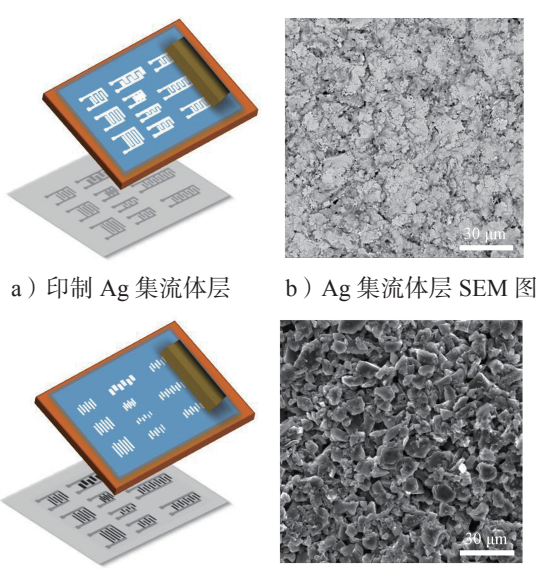
2.3 实验方法

2.3.1 活性炭电极功能油墨的制备

将活性炭、乙炔黑、PVDF 按质量比 85∶10∶5 称取一定质量，加入少量 NMP 溶剂，通过研钵研磨得到用于丝网印刷的活性炭电极功能油墨。

2.3.2 碳基平面（叉指）型超级电容器的丝印法制备

先将设计好的集流体图形、电极图形晒版至 200 目的丝网印版上。在柔性基底 PET 上先用导电银浆印制集流体层（见图 1a），干燥后的 Ag 集流体层表面呈片状堆叠（见图 1b）。采用活性炭电极功能油墨印制电极层（见图 1c），其表面呈现由不规则活性炭颗粒相互连接构成的较粗糙微观形貌（见图 1d），大量存在的粒间孔隙将有利于电解质的扩散。



a）印制 Ag 集流体层　b）Ag 集流体层 SEM 图

c）印制活性炭电极层　d）活性炭电极层 SEM 图

图 1 丝印法制备碳基平面（叉指）型超级电容器示意图

Fig. 1 Scheme of carbon-based planar (interdigital) supercapacitor fabricated by screen printing

关于平面（叉指）型器件的几何构型特征，本文

将从叉指间距（I）、叉指宽度（W）、叉指长度（L）和叉指数目（N）4 个方面进行讨论。印制电极的几何构型参数如表 1 所示。“活性电极有效面积”指实际印制的活性电极面积，“活性电极占地面积”包含了叉指间距的占地面积[21, 22]，如图 2 中的虚框所示，有效电极面积占比（A）可由式（1）计算。

$$A=S_1/S_2, \tag{1}$$

式中：S_1 为活性电极有效面积；S_2 为活性电极占地面积。

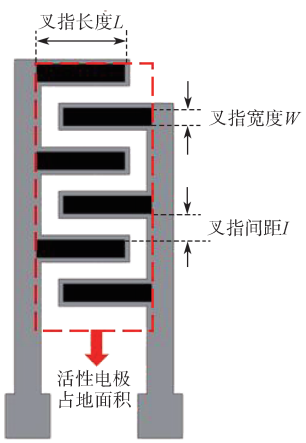


图 2　叉指电极的几何构型参数

Fig. 2　Scheme of geometric configuration parameter of interdigital electrodes

表 1　电极几何构型参数详情

Table 1　Geometric configuration parameter information of electrodes

样品编号	W/mm	N	L/mm	I/mm	S_1/cm^2	S_2/cm^2	A/%
W2N6L10I2	2.0	6	10	2	1.20	2.88	41.7
W2N6L10I3	2.0	6	10	3	1.20	3.60	33.3
W2N6L10I4	2.0	6	10	4	1.20	4.32	27.8
W2N6L10I5	2.0	6	10	5	1.20	5.04	23.8
W1N6L10I3	1.0	6	10	3	0.60	2.88	20.8
W3N6L10I3	3.0	6	10	3	1.80	4.32	41.7
W4N6L10I3	4.0	6	10	3	2.40	5.04	47.6
W2N6L6I3	2.0	6	6	3	0.72	2.40	30
W2N6L18I3	2.0	6	18	3	2.16	6.00	36
W2N6L22I3	2.0	6	22	3	2.64	7.20	36.7
W16.3N2L10I1	16.3	2	10	1	3.26	3.60	90.6
W4.8N6L10I1	4.8	6	10	1	2.88	3.60	79.5
W1.9N12L10I1	1.9	12	10	1	2.28	3.60	62.7
W1.2N16L10I1	1.2	16	10	1	1.92	3.60	51.6

注：编号中 W、N、L 和 I 后的数字为叉指宽度、叉指数目、叉指长度和叉指间距的数据信息。

2.4　电化学性能测试

采用 CHI660E 型电化学工作站，将印制的碳基平面（叉指）型超级电容器浸入电解液（2 mol/L KOH 溶液）中，测试循环伏安（cyclic voltammetry，CV）曲线、充放电（galvanostatic charge-discharge，GCD）曲线和阻抗（electrochemical impedance spectroscopy，EIS）曲线。由 GCD 曲线数据，根据式（2）~（4）可计算平面（叉指）型超级电容器的面积比电容（C_a）、能量密度（E）和功率密度（P）。

$$C_a=\frac{I\times\Delta t}{S\times\Delta V}, \tag{2}$$

$$E=\frac{1}{2}C_a\Delta V^2, \tag{3}$$

$$P=\frac{E}{\Delta t}, \tag{4}$$

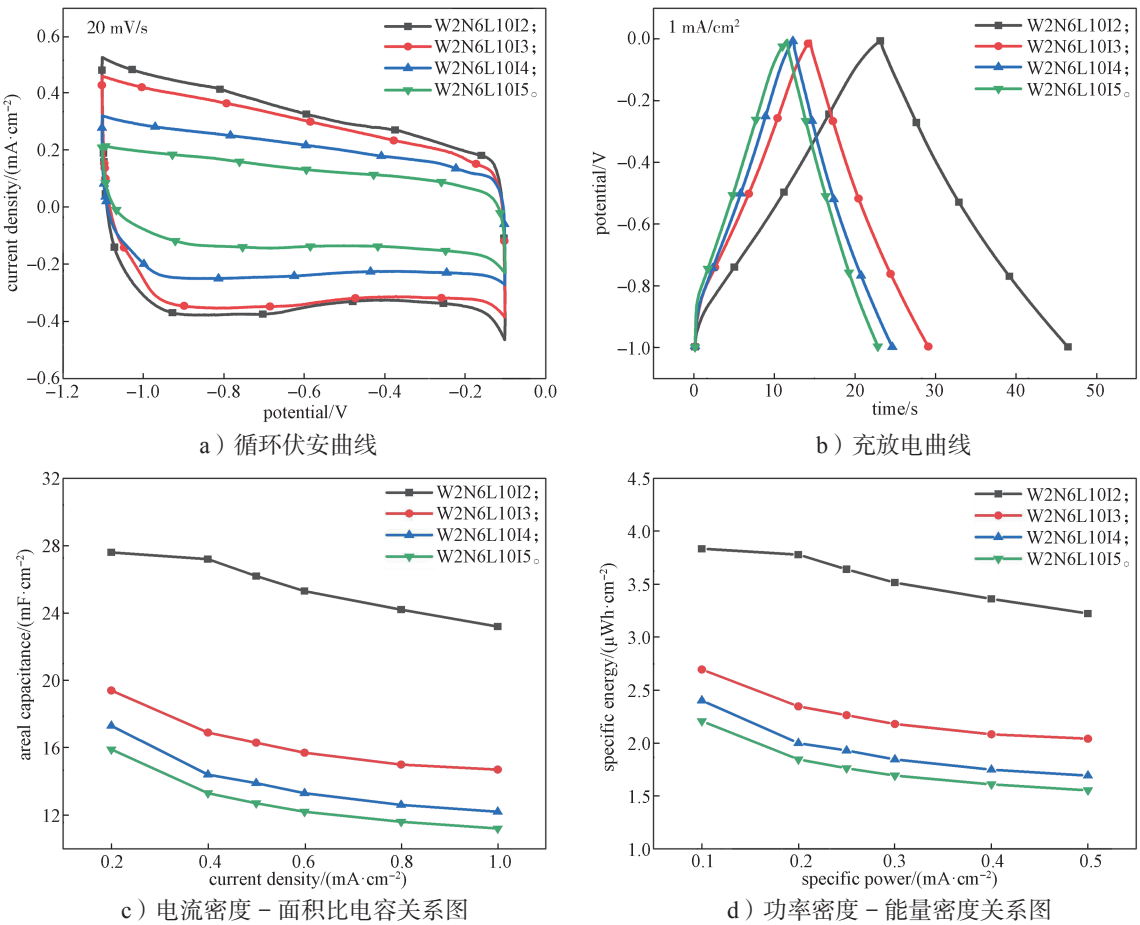
式中：I 为放电电流；S 为活性电极占地面积；Δt 为放电时间；ΔV 为电压窗口。

3　结果与分析

3.1　叉指间距改变

样品 W2N6L10I2、W2N6L10I3、W2N6L10I4 和 W2N6L10I5 具有相同的叉指宽度、叉指数目和叉指长度，即活性电极有效面积不变，随着叉指间距增大，有效电极面积占比由 41.7% 下降至 23.8%。不同叉指间距样品的电化学性能如图 3 所示。由图 3a 可知，该系列样品的循环伏安曲线接近矩形，说明活性电极主要以双电层方式储能。循环伏安曲线所围面积可反映器件比电容的大小，可见，印制式器件的面积比电容随着叉指间距的增大（由 2 mm 增加至 5 mm）而逐渐减小，该现象与器件的有效电极面积占比减小、离子在相邻电极间扩散的距离增加和电解液电阻增加有关[23, 24]。W2N6L10I2、W2N6L10I3、W2N6L10I4 和 W2N6L10I5 的充放电曲线（见图 3b）呈对称三角形，由放电曲线计算的面积比电容分别为 23.2, 14.7, 12.2, 11.2 mF/cm^2，比电容变化规律与图 3a 所示一致。不同电流密度下的面积比电容结果如图 3c 所示，W2N6L10I2、W2N6L10I3、W2N6L10I4 和 W2N6L10I5 在 0.2 mA/cm^2 条件下面积比电容分别为 27.6, 19.4, 17.3, 15.9 mF/cm^2，W2N6L10I2 较 W2N6L10I3、W2N6L10I4 和 W2N6L10I5 的面积比电容分别提升约 42%、60% 和 74%。随电流密度增大，各器件面积比电容呈下降趋势，该现象与活性电极内部孔隙不能被充分利用有关。由功率密度 - 能量密度关系图（见图 3d）可知，叉指间距最小的 W2N6L10I2 呈现最高能量密度，当功率密度为 0.1

mW/cm^2 和 0.5 mW/cm^2 时，能量密度分别为 3.83 μWh/cm^2 和 3.22 μWh/cm^2。



a）循环伏安曲线　b）充放电曲线

c）电流密度－面积比电容关系图　d）功率密度－能量密度关系图

图 3　不同叉指间距样品的电化学性能

Fig. 3　Electrochemical performances of samples with different interdigital interspace

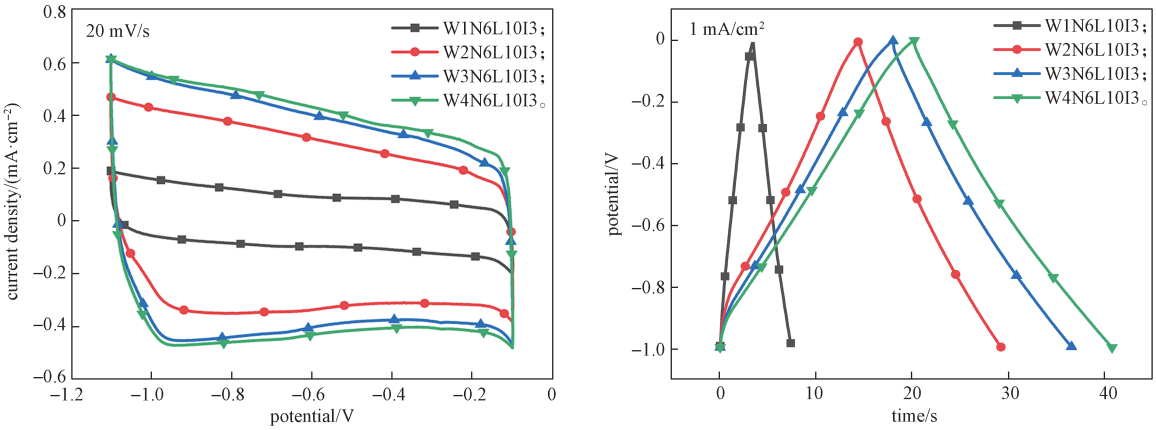
3.2　叉指宽度改变

样品 W1N6L10I3、W2N6L10I3、W3N6L10I3 和 W4N6L10I3 具有相同的叉指数目、叉指长度和叉指间距，随着叉指宽度依次增加，有效电极面积占比由 20.8% 增加至 47.6%。不同叉指宽度样品的电化学性能如图 4 所示。由循环伏安曲线（见图 4a）和充放电曲线（见图 4b）可知，当叉指宽度由 1 mm 增加至 4 mm，印制式超级电容器的面积比电容逐渐增大，该现象与印制器件的有效电极面积占比增大、参与储能过程的活性电极载量增加相关，与 Li H. P. 等 [7] 的研究结果一致，其认为叉指器件的“指宽 / 间距”增加可导致等效串联电阻下降，利于提升比电容。由图 4b 的放电曲线，可算出 W1N6L10I3、W2N6L10I3、W3N6L10I3 和 W4N6L10I3 的面积比电容分别为 3.9, 14.7, 18.4, 20.5 mF/cm^2。由电流密度－比电容关系曲线（见图 4c）可知，W1N6L10I3、W2N6L10I3、W3N6L10I3 和 W4N6L10I3 在 0.2 mA/cm^2 条件下面积比电容分别为 5.9, 19.4, 25.4, 26.1 mF/cm^2，W4N6L10I3 较 W1N6L10I3、W2N6L10I3 和 W3N6L10I3 的面积比电容分别提升约 342%、35% 和 3%。不同电流密度下，W4N6L10I3 始终保持相对最高的面积比电容。由功率密度－能量密度关系图（见图 4d）可知，W4N6L10I3 在功率密度为 0.1 mW/cm^2 和 0.5 mW/cm^2 时，能量密度分别为 3.63 μWh/cm^2 和 2.85 μWh/cm^2。

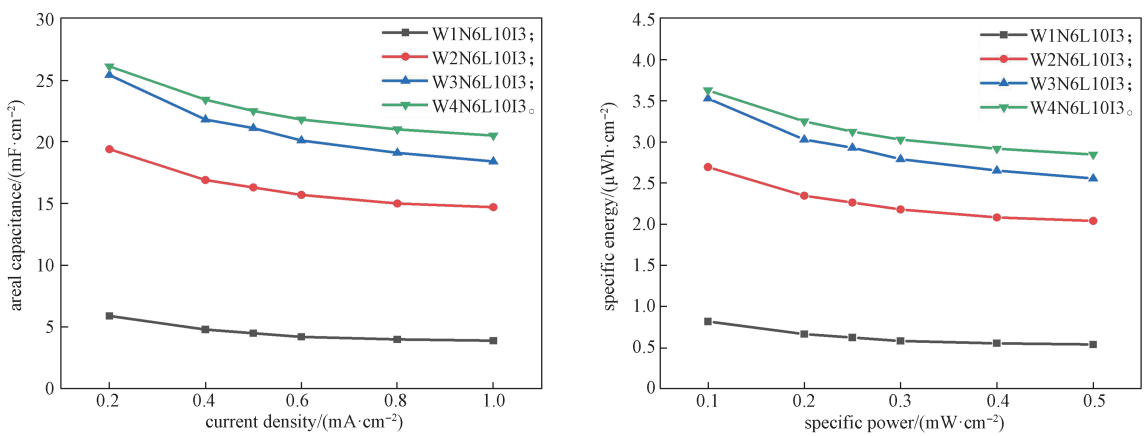
通过分析叉指间距和叉指宽度对印制式平面型超级电容器件电化学性能的影响可知，进行电极构型设计时，应在印刷精度允许的前提下，充分利用器件占地面积，如通过减小叉指间距和增加叉指宽度均可增加有效电极面积占比，利于提升器件的储能特性。

3.3　叉指长度改变

样品 W2N6L6I3、W2N6L10I3、W2N6L18I3 和 W2N6L22I3 具有相同的叉指宽度、叉指数目和叉指间距，随叉指长度依次增大，有效电极面积占比由 30% 增加至 36.7%，变化幅度较小。各样品的循环伏



a）循环伏安曲线　　b）充放电曲线



c）电流密度－面积比电容关系图　　d）功率密度－能量密度关系图

图 4　不同叉指宽度样品的电化学性能

Fig. 4　Electrochemical performances of samples with different interdigital width

安曲线（见图 5a）和充放电曲线（见图 5b）呈现一致的面积比电容变化规律，即随着叉指长度由 6 mm 增加至 22 mm，器件的面积比电容稍有增加[21]。由图 5b 的放电曲线计算出 W2N6L6I3、W2N6L10I3、W2N6L18I3 和 W2N6L22I3 的面积比电容分别为 12.2, 14.7, 17.5, 18.2 mF/cm^2。由电流密度－比电容关系曲线（见图 5c）可知，W2N6L6I3、W2N6L10I3、W2N6L18I3 和 W2N6L22I3 在 0.2 mA/cm^2 条件下面积比电容分别为 16.6, 19.4, 21.8, 23.4 mF/cm^2，W2N6L22I3 较 W2N6L6I3、W2N6L10I3 和 W2N6L18I3 的面积比电容分别提升约 41%、21% 和 7%。随着电流密度增大，离子扩散、吸附于电极内表面的时间不足，比电容下降，但 W2N6L22I3 始终保持相对最高的面积比电容。由功率密度－能量密度关系图（见图 5d）可知，W2N6L22I3 当功率密度为 0.1 mW/cm^2 和 0.5 mW/cm^2 时，能量密度分别为 3.25 μWh/cm^2 和 2.53 μWh/cm^2。

对比图 3、图 4 和图 5 可知，与叉指间距和叉指宽度相比，叉指长度改变对器件面积比电容和能量密度的影响相对较小。这是因为叉指长度的改变对有效电极面积占比的影响较小，实验中叉指间距、叉指宽度和叉指长度改变引起有效电极面积占比的变化量分别为 17.9%、26.8% 和 6.7%。结合表 1、图 4 和图 5 可知，当活性电极有效面积及占比增加时，器件的比电容和能量密度也相应提升。

3.4　叉指数目改变

平面型超级电容器的占地空间有限，扩大活性电极有效面积占比将有利于提升能量密度，因此研究叉指数目的影响时，采用较小叉指间距（1 mm），以及叉指宽度和叉指数目同时变化的策略[22]。W16.3N2L10I1、W4.8N6L10I1、W1.9N12L10I1 和 W1.2N16L10I1 具有统一的电极占地面积（3.6 cm^2），随着叉指数目的增加，有效电极面积占比由 90.6% 下降至 51.6%。各样品的循环伏安曲线（见图

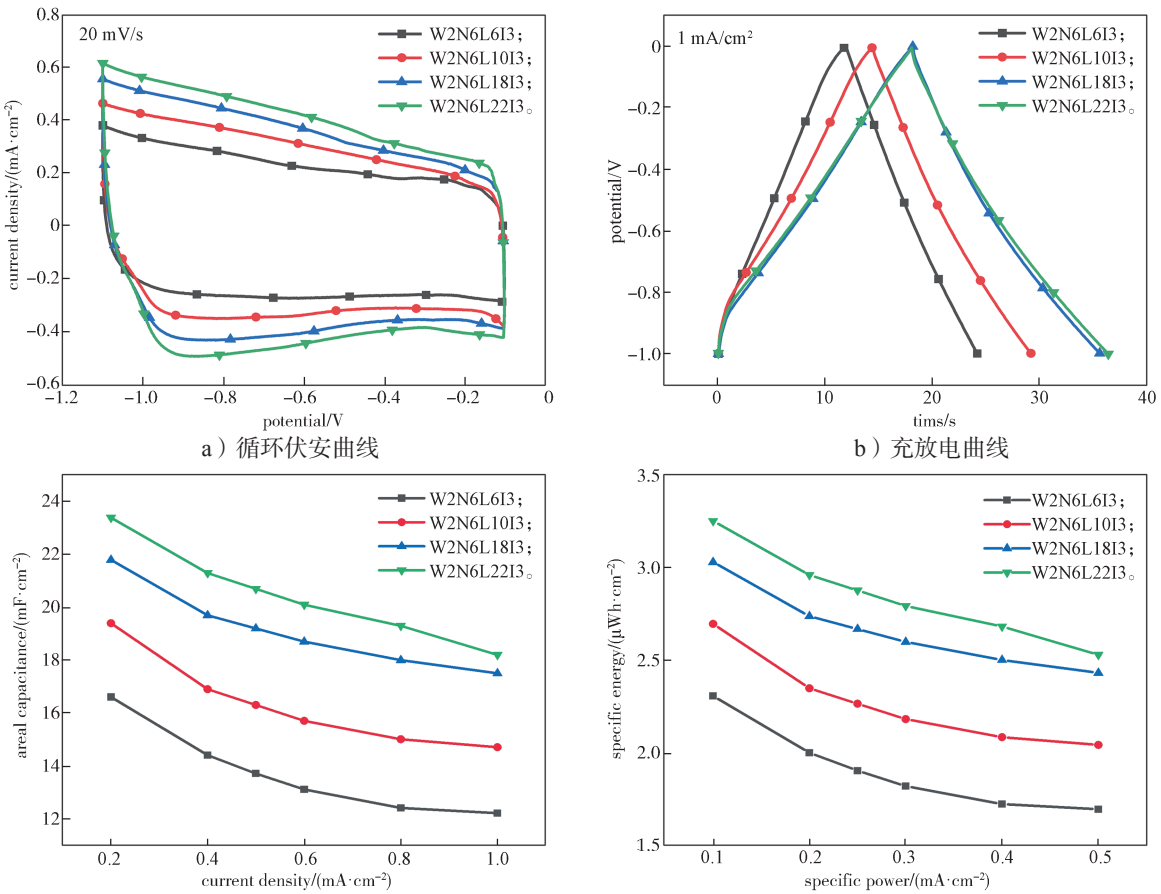


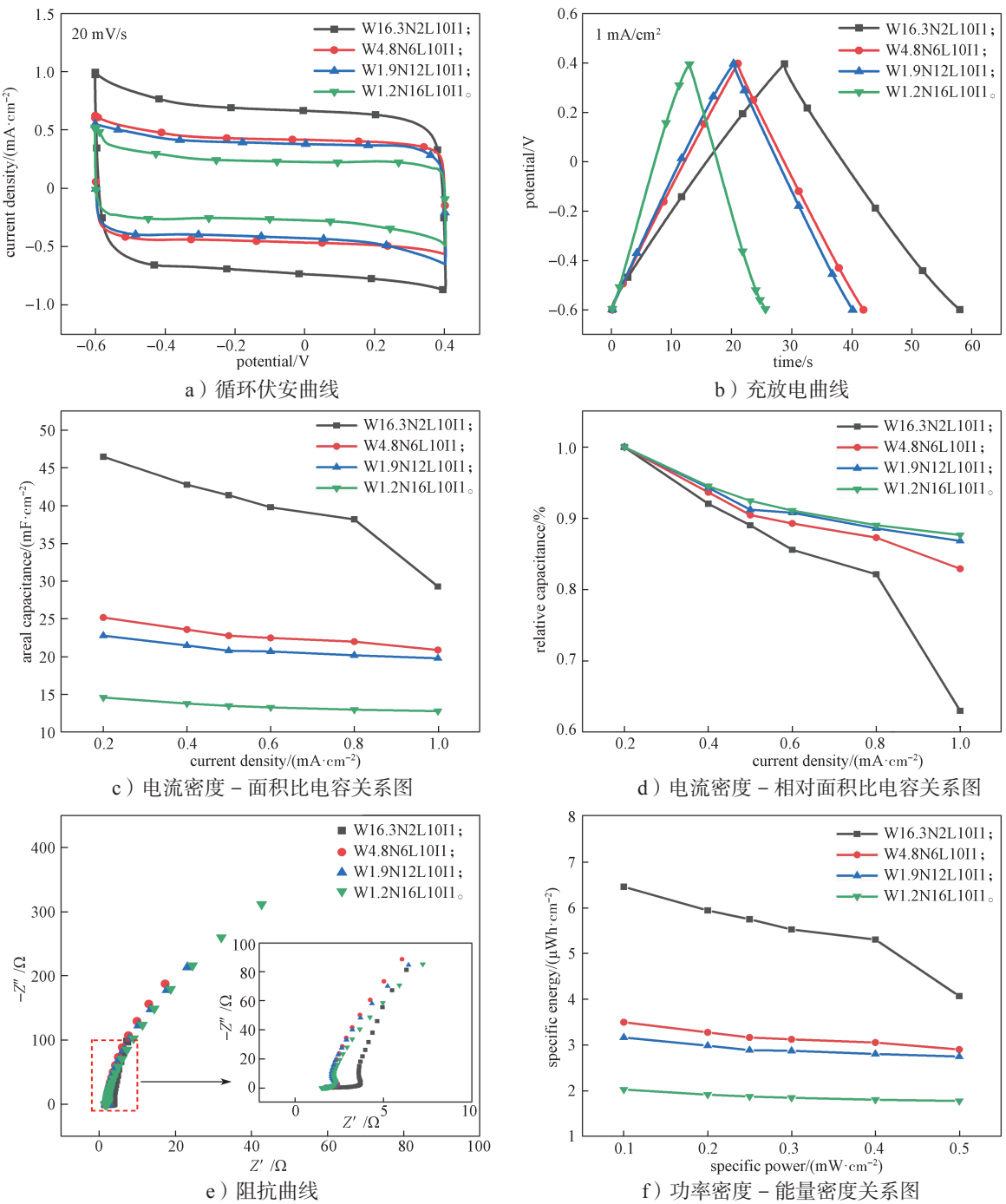
图 5　不同叉指长度样品的电化学性能

Fig. 5　Electrochemical performances of samples with different interdigital length

6a）和充放电曲线（见图 6b）均表明随着叉指数目增加，器件的面积比电容显著减小，符合 Li H. P.[7] 和 Li J. T.[25] 的研究结论。由图 6b 的放电曲线计算出 W16.3N2L10I1、W4.8N6L10I1、W1.9N12L10I1 和 W1.2N16L10I1 的面积比电容分别为 29.3, 20.9, 19.8, 12.8 mF/cm^2。由电流密度－比电容关系曲线（见图 6c）可知，W16.3N2L10I1、W4.8N6L10I1、W1.9N12L10I1 和 W1.2N16L10I1 在 0.2 mA/cm^2 条件下面积比电容分别为 46.5, 25.2, 22.8, 14.6 mF/cm^2，W16.3N2L10I1 较 W4.8N6L10I1、W1.9N12L10I1 和 W1.2N16L10I1 面积比电容分别提升约 85%、104% 和 218%，W16.3N2L10I1 始终保持相对最高的面积比电容。J. J. Yoo 等 [22] 用激光直写法制备了平面（叉指）型电容器，在叉指宽度减小时得到了更高比电容，这与所用的活性电极材料——热还原氧化石墨烯的特性有关，其具有 2D 结构及活跃的酸性官能团，产生了显著的边缘效应。本研究采用的电极材料为活性炭，虽然叉指宽度的减小有利于削弱电解液离子迁移的限制，但会引起叉指电极电阻的增大（愈渗作用主导的电学行为）和有效电极面积减小，综合作用结果为面积比电容减小。由电流密度－相对面积比电容关系图（见图 6d）可知，随叉指数目增加，印制式器件的倍率性能提升，说明叉指数目的增加和叉指宽度的减小，利于缩短电极内部离子扩散路径和减小离子扩散相关电阻，从而提升了器件的倍率特性 [26]。Zhu S. F. 等 [8] 亦认为单位面积电极载量增加，如指数减小、宽度增加，可引起器件的时间常数增大，从而影响功率表现。该系列样品的电化学阻抗（EIS）分析结果如图 6e 所示，高频区无明显半圆，说明电极的电荷转移电阻可忽略 [24]。各样品的等效串联电阻（1.3~1.6 Ω）受叉指数目影响较小 [22]，EIS 曲线的 Warburg 阻抗和低频区响应特性受叉指数目影响较大。W16.3N2L10I1 具有较为扩展的 Warburg 阻抗区域，说明其电极－电解液界面的离子传输较慢，电极孔结构内离子溶液电阻较大 [26]。该现象与多孔电极具有分散电阻和分散电容特性有关，且受活性材料

微观结构特性、孔隙分布、电极厚度和粗糙度等影响。随着叉指数目的增加，W1.2N16L10I1 呈现出较小的 Warburg 阻抗，这与电解液离子在界面的快速传输有关，与图 6d 中呈现出的最佳倍率性能相对应。W16.3N2L10I1 的 EIS 曲线在低频区的响应接近 90° 垂线，近似于理想电容器的纯电容行为，该结果与其受愈渗作用影响而具有良好的电子传导特性相关[7]。

由功率密度－能量密度关系图（见图 6f）可知，有效电极面积占比最高的 W16.3N2L10I1 呈现较高能量密度，当功率密度为 0.1 mW/cm^2 和 0.5 mW/cm^2 时，能量密度分别为 6.46 μWh/cm^2 和 4.07 μWh/cm^2。若能进一步改善其离子扩散特性，将有利于同时实现器件的高比能量和高功率特性。



a）循环伏安曲线　b）充放电曲线

c）电流密度－面积比电容关系图　d）电流密度－相对面积比电容关系图

e）阻抗曲线　f）功率密度－能量密度关系图

图 6　不同叉指数目样品的电化学性能

Fig. 6　Electrochemical performances of samples with different interdigital number

4 结论

本研究对印制式碳基平面型超级电容器的构型进行了探究，结果表明，几何构型参数（叉指间距、叉指宽度、叉指长度和叉指数目）显著影响了丝网法印制的平面（叉指）型电容器的性能。

1）叉指间距由 5 mm 减小至 2 mm 时，伴随离子在相邻电极间扩散距离的下降，1 mA/cm^2 条件下面积比电容由 11.2 mF/cm^2 增加至 23.2 mF/cm^2。

2）叉指宽度由 1 mm 增加至 4 mm 时，受器件等效串联电阻下降的影响，1 mA/cm^2 条件下面积比电容由 3.9 mF/cm^2 增加至 20.5 mF/cm^2。

3）叉指长度由 6 mm 增加至 22 mm 时，伴随电极有效占地面积少量增加，1 mA/cm^2 条件下面积比电容由 12.2 mF/cm^2 增加至 18.2 mF/cm^2。

4）保持活性电极占地面积（3.6 cm^2）和叉指间距（1 mm）不变，当叉指数目由 2 增加至 16 时，随着电极有效面积占比的减小和电极电阻的增大，1 mA/cm^2 条件下面积比电容虽然由 29.3 mF/cm^2 减小至 12.8 mF/cm^2，但具有更优异的倍率性能。

综上所述，印制式碳基平面（叉指）型超级电容器几何构型参数的改变，将导致器件有效电极面积占比、电解质离子扩散距离和电极电阻等特性的变化，从而影响其电容储能性能。为了使印制式碳基平面（叉指）型超级电容器同时具有较高的能量密度和功率密度，需平衡好叉指间距、叉指宽度、叉指长度和叉指数目 4 个参数之间的关系。高性能的印制式超级电容器可为便携式电子设备和智能包装系统提供安全高效的能源保障。

参考文献：

[1] 石文明，刘意华，吕湘连，等 . 超级电容器材料及应用研究进展 [J]. 微纳电子技术，2022，59(11)：1105−1118.

[2] 李晓燕，张智慧，姚继明 . 基于印刷技术制备柔性微型电容器的研究进展 [J]. 纺织学报，2022，43(12)：197−202，212.

[3] 涂 倩，王婧璐，郑茵茵，等 . 棒状 $V_3O_7{\cdot}H_2O$ 电极材料的制备及印刷超级电容器 [J]. 精细化工，2024，41(5)：1084−1091，1160.

[4] ZHANG X Y，JIANG C Z，LIANG J，et al. Electrode Materials and Device Architecture Strategies for Flexible Supercapacitors in Wearable Energy Storage[J]. Journal of Materials Chemistry A，2021，9(13)：8099−8128.

[5] YUAN Y H，YUAN W，WU Y P，et al. High-Performance All-Printed Flexible Micro-Supercapacitors with Hierarchical Encapsulation[J]. Energy & Environmental Materials，2024，7(4)：e12657.

[6] LI F，LI Y，QU J，et al. Recent Developments of Stamped Planar Micro-Supercapacitors: Materials, Fabrication and Perspectives[J]. Nano Materials Science，2021，3(2)：154−169.

[7] LI H P，LIANG J J. Recent Development of Printed Micro-Supercapacitors: Printable Materials, Printing Technologies, and Perspectives[J]. Advanced Materials，2020，32(3)：1805864.

[8] ZHU S F，XU Z H，TAO H J，et al. Planar Micro-Supercapacitors Toward High Performance Energy Storage Devices: Design, Application and Prospects[J]. Energy Advances，2023，2(6)：765−783.

[9] EL-KADY M F，IHNS M，LI M P，et al. Engineering Three-Dimensional Hybrid Supercapacitors and Microsupercapacitors for High-Performance Integrated Energy Storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2015，112(14)：4233−4238.

[10] 赵 雯 . 基于可印刷制备的高性能平面叉指结构柔性微型超级电容器 [D]. 武汉：华中科技大学，2019.

[11] CHANG Q H，CAO C Y，QIAO H J，et al. Ink Transfer for Printed Flexible Microsupercapacitors[J]. Carbon，2021，178：285−293.

[12] JIA R，SHEN G Z，QU F Y，et al. Flexible On-Chip Micro-Supercapacitors: Efficient Power Units for Wearable Electronics[J]. Energy Storage Materials，2020，27：169−186.

[13] LIANG J，TIAN B，LI S Q，et al. All-Printed MNHCF-MnO_x-Based High-Performance Flexible Supercapacitors[J]. Advanced Energy Materials，2020，10(12)：2000022.

[14] FENG Y，LIU L，LIANG J，et al. $Ni(OH)_2$/$NiMoO_4$ Nanoplates for Large-Scale Fully-Printed Flexible Solid-State Supercapacitors[J]. Journal of Power Sources，2019，433：126676.

[15] SHI X Y，PEI S F，ZHOU F，et al. Ultrahigh-Voltage Integrated Micro-Supercapacitors with Designable Shapes and Superior Flexibility[J]. Energy & Environmental Science，2019，12(5)：1534−1541.

[16] GIANNAKOU P，MASTEGHIN M G，SLADE R C T，et al. Energy Storage on Demand: Ultra-High-Rate and High-Energy-Density Inkjet-Printed NiO Micro-Supercapacitors[J]. Journal of Materials Chemistry A，

2019，7(37)：21496−21506.
[17] GIANNAKOU P，SLADE R C T，SHKUNOV M. Cyclic Voltammetry Studies of Inkjet-Printed NiO Supercapacitors: Effect of Substrates, Printing and Materials[J]. Electrochimica Acta，2020，353：136539.
[18] LI X R，LI H P，FAN X Q，et al. 3D-Printed Stretchable Micro-Supercapacitor with Remarkable Areal Performance[J]. Advanced Energy Materials，2020，10(14)：1903794.
[19] LIANG J，JIANG C Z，WU W. Printed Flexible Supercapacitor: Ink Formulation, Printable Electrode Materials and Applications[J]. Applied Physics Reviews，2021，8(2)：021319.
[20] GELLRICH C，LOCHMANN S，OTTO T，et al. Energetic Carbon Precursors for Micro-Supercapacitor Printing[J]. Materials Advances，2021，2(19)：6380−6387.
[21] PECH D，BRUNET M，DINH T M，et al. Influence of the Configuration in Planar Interdigitated Electrochemical Micro-Capacitors[J]. Journal of Power Sources，2013，230：230−235.
[22] YOO J，BYUN S，LEE C W，et al. Precisely Geometry Controlled Microsupercapacitors for Ultrahigh Areal Capacitance, Volumetric Capacitance, and Energy Density[J]. Chemistry of Materials，2018，30(12)：3979−3990.
[23] LIN Y J，GAO Y，FAN Z Y. Printable Fabrication of Nanocoral-Structured Electrodes for High-Performance Flexible and Planar Supercapacitor with Artistic Design[J]. Advanced Materials，2017，29(43)：1701736.
[24] ABDOLHOSSEINZADEH S，SCHNEIDER R，VERMA A，et al. Turning Trash into Treasure: Additive Free MXene Sediment Inks for Screen-Printed Micro-Supercapacitors[J]. Advanced Materials，2020，32(17)：2000716.
[25] LI J T，SOLLAMI DELEKTA S，ZHANG P P，et al. Scalable Fabrication and Integration of Graphene Microsupercapacitors Through Full Inkjet Printing[J]. ACS Nano，2017，11(8)：8249−8256.
[26] NIU Z Q，ZHANG L，LIU L L，et al. All-Solid-State Flexible Ultrathin Micro-Supercapacitors Based on Graphene[J]. Advanced Materials，2013，25(29)：4035−4042.

（责任编辑：李　涛）

A Study on Configuration of As-Printed Carbon-Based Planar Supercapacitors

FENG Tiancai，LENG Xian，ZHANG Chuanxiang

（School of Packaging Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：In order to systematically study the influence of configuration parameters of planar supercapacitors, planar supercapacitors with different interdigitated parameter characteristics were constructed by screen printing using activated carbon functional ink, with the corresponding electrochemical energy storage performance tested. The results showed, for the as-printed supercapacitor with the interdigital spacing of 1 mm and the interdigital number of 2, the specific energy reached 6.46 μWh/cm^2 at a specific power of 0.1 mW/cm^2. When the interdigital number increased to 16, the specific energy reached 2.03 μWh/cm^2 at the same specific power while with better rate capacity. The geometric configuration parameters changed the effective electrode area, the electrolyte ion diffusion path, and the electrode resistance, thereby affecting the capacitive storage performance of those device, which can provide good reference for the configuration design and optimization of planar interdigital supercapacitors.

Keywords：active carbon；screen printing；supercapacitor；configuration