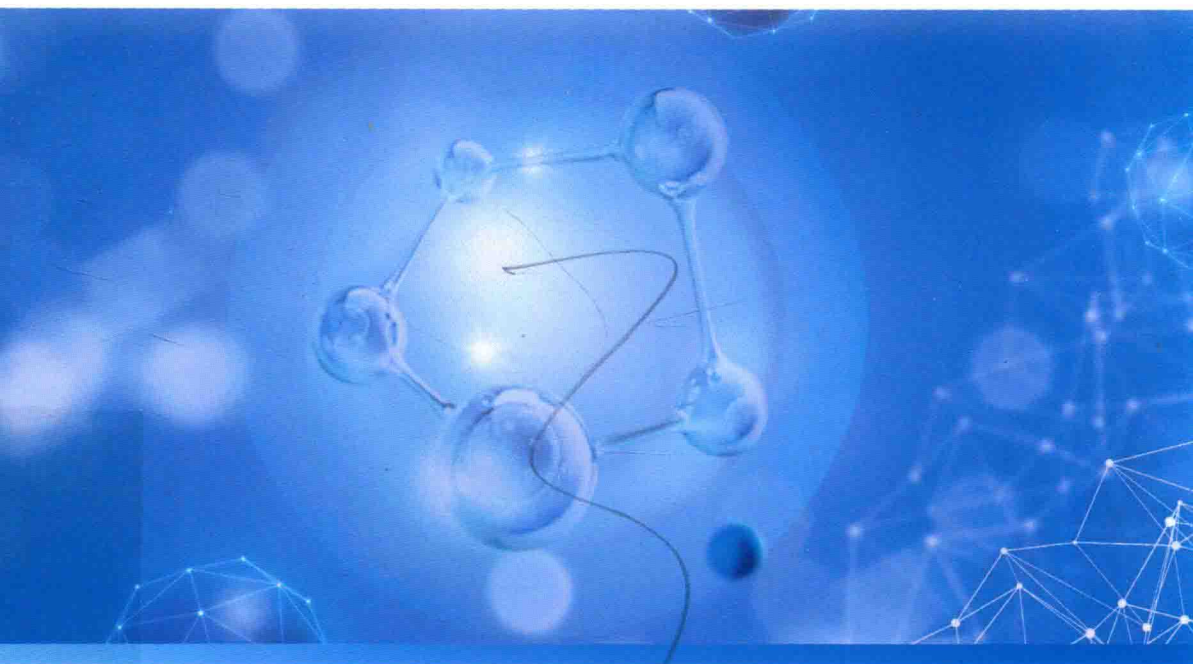


CoMoO₄ 基核壳纳米复合材料的 构筑及其电容性能研究

王 晶 ◎ 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

CoMoO₄基核壳纳米复合材料的 构筑及其电容性能研究

王 晶 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

CoMoO₄基核壳纳米复合材料的构筑及其电容性能研究 / 王晶著. —北京: 科学技术文献出版社, 2019. 10

ISBN 978-7-5189-6176-4

I. ①C… II. ①王… III. ①纳米材料—电容器—性能—研究 IV. ①TM53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 251196 号

CoMoO₄基核壳纳米复合材料的构筑及其电容性能研究

策划编辑: 周国臻 责任编辑: 李 鑫 责任校对: 张永霞 责任出版: 张志平

出 版 者 科学技术文献出版社
地 址 北京市复兴路15号 邮编 100038
编 务 部 (010) 58882938, 58882087 (传真)
发 行 部 (010) 58882868, 58882870 (传真)
邮 购 部 (010) 58882873
官 方 网 址 www.stdp.com.cn
发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 制 者 北京虎彩文化传播有限公司
版 次 2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷
开 本 710×1000 1/16
字 数 202千
印 张 11.25
书 号 ISBN 978-7-5189-6176-4
定 价 48.00元



版权所有 违法必究

购买本社图书, 凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

作者简介



王晶，博士，哈尔滨商业大学轻工学院教师，从事纳米功能材料在环境能源领域的研究，对材料的可控生长、生长机制、光学、电学及力学等相关理论和性能分析、测试等方面具有良好的研究基础和丰富的实践经验，并取得了一定的创新性成果。发表SCI检索论文40余篇，第一作者11篇，以第二、三作者发表论文20余篇，成果他引400余次，授权专利4项。*Ionic*、*Electrochimica Acta*、*RSC Advances* 等期刊审稿人。参与国家自然科学基金1项，企业合作项目1项，省自然科学基金3项。

内容简介

本书主要研究了以二元金属氧化物钼酸钴为基体的核壳结构复合材料作为超级电容器电极材料的电化学性能。与单一的金属氧化物相比，钼酸钴具有高的氧化还原活性、较好的导电性、优异的倍率性能和循环稳定性等优点。但是，在已有的研究报告中钼酸钴的比电容却差强人意。为解决这个问题，本书中详细介绍了纳米钼酸钴材料与其他氧化物杂化构筑核壳结构的复合材料，通过两者协同效应来实现电极材料的电化学性能的显著提升。本书中对这些材料的电化学性能展开研究，组装成器件来研究其实际应用的能力。

前言

近些年来,由于环境污染、能源短缺,给人们的生活带来了诸多不便。因此,人们需要开发和使用清洁可持续的新能源来摆脱目前的困境。于是风能、水能、太阳能和潮汐能等清洁能源得到广泛的关注。这些能源是间断的、不连续的,需要具有高效储能性能、稳定性好的储能器件来实现对能量的存储。超级电容器由于自身具有高功率密度、快速充放电、较长的使用寿命、方便携带易维修、环保等优势,而成为新型的储能设备备受研究者的青睐。

本书主要探讨了以二元金属氧化物钼酸钴为基体的核壳结构复合材料类超级电容器电极材料的电化学性能。与单一的金属氧化物相比,钼酸钴具有高的氧化还原活性、较好的导电性、优异的倍率性能和循环稳定性等优点。但是,在已有的研究报道中钼酸钴的比电容却差强人意。为解决这个问题,本书重点研究了纳米钼酸钴材料与其他氧化物杂化构筑核壳结构的复合材料,通过两者协同效应来实现电极材料的电化学性能的显著提升。本书对这些材料的电化学性能展开研究,通过组装成器件来研究其实际应用的能力。

本书采用两步水热法成功地制备出直接生长在泡沫镍导电基底上的花状 $\text{CoMoO}_4 @ \text{MnO}_2$ 核壳结构复合材料。第一步是将 CoMoO_4 生长在泡沫镍基底上,第二步使 MnO_2 在第一步处理后的 CoMoO_4 表面原位生长,进而得到核壳结构的 $\text{CoMoO}_4 @ \text{MnO}_2$ 复合材料。由于复合材料特殊的纳米结构使得电极材料的比表面积增大、表面活性位点增多,从而使电解液与电极材料进行充分接触;同时,纳米级材料缩短了离子和电子的扩散路径,加快离子和电子传导。电化学性能测试表明,在电流密度为 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$, 其比电容为 $1800 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, 经 10 000 次循环后比电容的保持率为 98.6%, 并且在高的电流密度 ($5 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$) 进行 30 000 次循环后比电容仍有很高的保持率 (96.3%)。本文以 $\text{CoMoO}_4 @ \text{MnO}_2$ 与活性炭 (AC) 来组装非对称电容器。在 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KOH 电解液中,器件的电位窗口可达到 1.6 V, 表现出很好的储能能力 [在

功率密度为 $800 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 此器件表现出最大的能量密度为 $54 (\text{W} \cdot \text{h}) \cdot \text{kg}^{-1}$ 和高的循环稳定性 (经 10 000 次循环, 保持率为 84%)。

采用水热法直接在泡沫镍基底上来构建 Co₃O₄@CoMoO₄ 核壳结构材料。首先, 将 Co₃O₄ 纳米锥作为核直接生长在泡沫镍基底上; 然后, 采用水热法将 CoMoO₄ 纳米片生长在 Co₃O₄ 纳米锥表面上, 进而形成 Co₃O₄@CoMoO₄ 核壳结构。该核壳结构使得电极材料的比表面积和导电性得到提升。电化学性能测试结果表明, 在电流密度为 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, Co₃O₄@CoMoO₄ 核壳结构复合材料比电容为 $1902 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, 经 5000 次循环测试后比电容的保持率为 99%。实验对全固态的非对称 (Co₃O₄@CoMoO₄//CNTs) 器件和对称器件 (Co₃O₄@CoMoO₄//Co₃O₄@CoMoO₄) 进行了研究。测试结果表明, 非对称电容器具有更加优异的性能, 其电压达 1.6 V, 高能量密度为 $50.1 (\text{W} \cdot \text{h}) \cdot \text{kg}^{-1}$, 且有较好的循环稳定性。

采用水热法制备柔性的 CoMoO₄@NiMoO₄·xH₂O 核壳结构复合材料及柔性的 Fe₂O₃ 纳米棒电极材料, 这两种材料都是以碳布为导电基底。电化学性能测试表明, CoMoO₄@NiMoO₄·xH₂O 具有优异的电化学性能, 在电流密度为 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 比电容为 $1582 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$; 当电流密度为 $15 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 比电容为 $1050 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ 。经 3000 次循环后比电容保持率为 97.1%。对该电极进行不同程度的弯曲再恢复到原来的状态时, 比电容几乎没有改变 (电流密度为 $3 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$)。Fe₂O₃ 作为电容器负极材料, 与碳材料相比具有更高的比电容和更宽的电位窗口。因此, 以 CoMoO₄@NiMoO₄·xH₂O 为正极和 Fe₂O₃ 为负极来设计固态柔性非对称电容器并研究其电化学性能。电化学测试结果表明, CoMoO₄@NiMoO₄·xH₂O//Fe₂O₃ 非对称器件的电压可达 1.6 V, 在功率密度为 $900 (\text{W} \cdot \text{h}) \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 器件的能量密度可达到 $47.1 (\text{W} \cdot \text{h}) \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当电流密度为 $3 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 经 5000 次循环后, 比电容的保持率可高达 89.3%。

本书通过对纳米复合材料微观结构进行独特设计, 不仅提高了电极材料的比表面积, 而且缩短了电解液离子和电子的传输路径, 减小电极材料内阻与界面电阻。另外, 纳米级结构材料利于加快电解液中离子和电子与电极材料电化学反应; 讨论了固态非对称和对称电容器电化学性能。笔者相信这些研究结果可帮助相关领域研究者对钼酸盐体系材料性能有一个整体的认识, 对核壳结构对性能的调控影响因素、协同机制等研究具有一定指导意义。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 超级电容器的储能原理和结构	4
1.3.1 双电层电容储能原理	5
1.3.2 赝电容储能原理	5
1.3.3 超级电容器器件结构	5
1.3.4 超级电容器分类	7
1.4 超级电容器电极材料和材料的制备方法	8
1.4.1 超级电容器电极材料	8
1.4.2 材料的制备方法	16
1.5 本书研究的主要内容	18
第2章 实验材料与分析方法	20
2.1 实验药品及仪器	20
2.1.1 实验药品	20
2.1.2 实验仪器	22
2.2 表征测试设备	22
2.2.1 扫描电子显微镜	22
2.2.2 X射线衍射	23
2.2.3 透射电子显微镜	23
2.2.4 比表面积及孔径分析仪	24
2.3 电容性能的测试方法	24
2.3.1 循环伏安法	25

2.3.2	计时电位法	26
2.3.3	交流阻抗法	26
2.3.4	接触角测试	27
第3章 CoMoO₄@ MnO₂ 核壳纳米复合材料的构筑及电容性能研究		28
3.1	引言	28
3.2	电极材料的制备和器件组装	29
3.2.1	CoMoO ₄ 花状结构材料的制备	29
3.2.2	MnO ₂ 纳米片材料的制备	29
3.2.3	CoMoO ₄ @ MnO ₂ 核壳结构纳米材料的制备	30
3.2.4	AC 电极的制备	30
3.2.5	器件组装	31
3.3	制备材料的生长机制及形貌表征	32
3.3.1	CoMoO ₄ @ MnO ₂ 材料的生长机理	32
3.3.2	CoMoO ₄ 花状结构材料的形貌表征	34
3.3.3	MnO ₂ 纳米片状结构材料的形貌表征	36
3.3.4	CoMoO ₄ @ MnO ₂ 花状结构材料的形貌表征	37
3.3.5	制备材料的结构表征	40
3.3.6	制备材料的比表面积表征	41
3.4	三电极条件下的电化学性能测试	42
3.4.1	CoMoO ₄ 电极材料电化学性能	42
3.4.2	MnO ₂ 纳米片状电极材料电化学性能	44
3.4.3	CoMoO ₄ @ MnO ₂ 电极材料电化学性能	45
3.5	两电极条件下的电化学性能	51
3.5.1	CoMoO ₄ //AC 非对称型器件性能	52
3.5.2	MnO ₂ //AC 非对称型器件性能	54
3.5.3	AC//AC 对称型器件性能	55
3.5.4	CoMoO ₄ @ MnO ₂ //AC 非对称型器件性能	56
3.6	本章小结	60

第4章 $\text{Co}_3\text{O}_4@ \text{CoMoO}_4$ 核壳纳米复合材料的构筑及电容性能研究	62
4.1 引言	62
4.2 电极材料的制备和器件组装	63
4.2.1 Co_3O_4 纳米锥结构材料的制备	63
4.2.2 CoMoO_4 纳米片结构材料的制备	63
4.2.3 $\text{Co}_3\text{O}_4@ \text{CoMoO}_4$ 核壳复合结构材料的制备	64
4.2.4 碳纳米管电极的制备	64
4.2.5 器件组装	65
4.3 制备材料的生长过程及形貌表征	66
4.3.1 $\text{Co}_3\text{O}_4@ \text{CoMoO}_4$ 材料的生长过程	66
4.3.2 Co_3O_4 纳米锥的形貌表征	67
4.3.3 CoMoO_4 纳米片的形貌表征	68
4.3.4 $\text{Co}_3\text{O}_4@ \text{CoMoO}_4$ 核壳结构的形貌表征	69
4.3.5 制备材料的结构表征	73
4.3.6 制备材料的比表面积表征	73
4.4 三电极条件下的电化学性能	75
4.4.1 Co_3O_4 纳米锥电极材料的电化学性能	75
4.4.2 CoMoO_4 纳米片电极材料的电化学性能	76
4.4.3 $\text{Co}_3\text{O}_4@ \text{CoMoO}_4$ 电极材料的电化学性能	77
4.5 两电极条件下的电化学性能测试	83
4.5.1 对称型器件电化学性能测试	85
4.5.2 非对称型器件电化学性能测试	87
4.5.3 对称和非对称型器件性能对比和讨论	90
4.6 本章小结	90
第5章 柔性 $\text{CoMoO}_4@ \text{NiMoO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 核壳纳米复合材料的构筑及其电容性能研究	92
5.1 引言	92
5.2 电极材料的制备和器件组装	93
5.2.1 CoMoO_4 纳米线结构材料的制备	93

5.2.2	NiMoO ₄ · xH ₂ O 纳米片结构材料的制备	94
5.2.3	CoMoO ₄ @ NiMoO ₄ · xH ₂ O 核壳结构材料的制备	94
5.2.4	Fe ₂ O ₃ 纳米棒的制备	94
5.2.5	器件组装	95
5.3	制备材料的生长过程及表征	96
5.3.1	制备材料的生长过程	96
5.3.2	CoMoO ₄ 纳米线的形貌表征	97
5.3.3	NiMoO ₄ · xH ₂ O 纳米片的形貌表征	98
5.3.4	CoMoO ₄ @ NiMoO ₄ · xH ₂ O 核壳结构的形貌表征	100
5.3.5	制备材料的结构表征	103
5.3.6	制备材料的比表面积表征	104
5.4	三电极条件下的电化学性能	105
5.4.1	CoMoO ₄ 电极材料的电化学性能	106
5.4.2	NiMoO ₄ · xH ₂ O 电极材料的电化学性能	107
5.4.3	CoMoO ₄ @ NiMoO ₄ · xH ₂ O 电极材料的电化学性能	108
5.4.4	Fe ₂ O ₃ 电极材料的电化学性能	115
5.5	两电极条件下的电化学性能和柔韧性研究	118
5.5.1	非对称型器件电化学性能	118
5.5.2	非对称型器件稳定性研究	121
5.6	本章小结	123

第6章	壳聚糖水凝胶辅助煅烧法制备电化学性能优异的 CoMoO ₄ -NiMoO ₄ 杂化纳米片	124
6.1	引言	124
6.2	电极材料的制备和组装	125
6.2.1	壳聚糖水凝胶珠的制备	125
6.2.2	壳聚糖辅助合成的 CoMoO ₄ 纳米片和 CoMoO ₄ 的制备	126
6.2.3	壳聚糖辅助 NiMoO ₄ 纳米片和 NiMoO ₄ 的制备	126

6.2.4 壳聚糖水凝胶改性 $\text{CoMoO}_4\text{-NiMoO}_4$ 和 $\text{CoMoO}_4\text{-NiMoO}_4$ 的 制备	126
6.2.5 $\text{CoMoO}_4\text{-NiMoO}_4$ 电极和交流电极的制备	127
6.2.6 全固态非对称型器件组装	127
6.2.7 电化学测量	127
6.2.8 材料特征	128
6.3 结果与讨论	128
6.4 结论	138
第7章 结 论	140
附 录	142
参考文献	147

第1章

绪论

1.1 研究目的和意义

目前人们日常生活中使用的能源主要来自于化石燃料的燃烧,然而,化石燃料是不可再生资源并且其在地球中储量也很有限。这些化石燃料在给人类带来所需能量的同时,也会排放一些有毒有害物质,从而对人类的生存环境造成污染。为解决目前存在的能源问题,一些新型清洁能源,如风能、水能、核能、太阳能等备受人们关注。但这些清洁能源是间断的、不连续的,需要具有高效储能性能、稳定性好的储能器件来实现能量的储存。因此,科研工作者们研究了多种类型的储能器件,如常见的太阳能电池、已经上市的锂离子电池和人们正在不断开发研究的超级电容器等。这些储能器件要想在大型电动车辆、公交车、后备储蓄电源上应用,需要能够提供高的功率密度和能量密度的存储器件。虽然小型、质轻便于携带的高能量密度的锂离子电池已被广泛用在便携式电子器件,如笔记本电脑、手机、摄像机电池等。日常生活中人们所用的动力蓄电池存在着循环寿命短、功率密度小等问题。电容器能够解决上述出现的问题而成为研究热点。

电化学电容器 (Electrochemical Capacitor, EC), 也称超级电容器 (Supercapacitor), 它具有的能量密度要高于传统的普通电容器, 但低于现在已经市场化的锂离子电池。因此, 提高其能量密度是目前研究需要解决的问题。超级电容器的比容量可以达到几百法拉甚至上千法拉、具有较宽的使用温度范围、充放电速度快、循环使用寿命长等优越的电化学性能。根据它具有高功率密度特性可以将其用来对一些高功率辅助仪器提供能量, 还可以供给较大的电流; 循环使用寿命高达上万次, 目前有报道其稳定性能达到 100

万次；具有较长的使用寿命，可以长时间放置，并且性能依然优异；还可以在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内进行调控使用。超级电容器因其具有符合时代需求的多方面优点，也顺应了时代的需求，由于其在未来实际应用方面具有潜在的价值，其市场需求也正在不断扩张。

钼酸钴作为电容器电极材料具有较高的导电性、循环稳定性、氧化还原活性和较好的倍率性能，并且我国钼资源储量较为丰富，为该元素的研究和开发与其他元素进行结合制备复合电极材料提供物质基础。本书设计钼酸钴结构，并通过电化学性能的测试来探索结构和材料的选择与性能相互关系；探讨了单一电极的电化学性能，并对其柔韧性进行探索，也对影响材料的性能的因素进行讨论。先是研究电极材料作为正极材料的单一电极性能，对其结构与性能之间的影响，并给予数据证明。通过实验制备电极材料与负极材料匹配来组装对称型和非对称型器件，测试所制备电极材料的实际应用能力。研究电极材料与负极材料在液态电解质条件下的电化学性能，测试单一材料及复合材料与负极材料匹配的电化学性能，总结出非对称型器件性能较为优异。在后续工作中进一步研究了在固态电解质条件下的对称和非对称型器件的性能，总结出非对称型器件性能较优异，因其能够提高器件的比容量和电压窗口，从而有利于提高器件的能量密度，解决电容器领域待解决的能量密度低的问题。柔性固态微小型便携式器件将是未来电能存储的主要设备，在本书也研究了柔性固态电解质条件下小尺寸器件的电荷存储能力，结果表明其是优异的电能存储器件。

1.2 国内外研究进展

自 1957 年，有关电化学电容器的第一篇专利被报道以来，它的研究便引起了人们的持续关注。最开始，被研究的最多的是小型的也就是尺寸较小的超级电容器，其容量值也较低，只有几法拉；1978 年后，相关公司也随即不断开发和研究电容器。例如，进入 20 世纪 80 年代后出现的 NEC 公司及 ELNA 公司等都在该领域兴起了一股研究热潮。由于人们日常生活对电动汽车需要，小尺寸的电容器已不能满足大型电动汽车等对高能量密度的储能。所以，开发和研究大尺寸的新型电容器成为该领域的新热点。对于其的

探索研究已经不断深入各个国家的科学研究计划中。例如，俄国、日本及一些欧美国家和地区将电容器的研究归入国家级别的科学探究计划。

自从 1991 年开始，美国就与来自世界各国的科学工作者探讨电容器开发研究的未来前景，会议结束后还制订相关计划以备未来进一步开发研究。总结如图 1-1 所示，日本也制定了有关电容器研讨会，并将电容器领域归为国家重要的“新阳光”计划主要研究系列。世界欧盟组织以 Saft 为引领共同制订了关于高能量密度的电容器在大型电动车蓄电池方面的研究计划。我国从 20 世纪 90 年代开始制定的“十五”“十一五”“863”等计划专题，将电动车开发专项、纳米材料主题研究课题及特种功能材料的技术开发研究等列入重要研究对象。

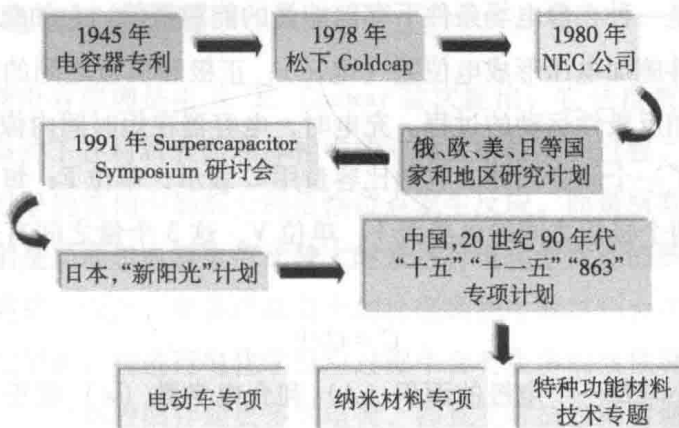


图 1-1 超级电容器国内外研究现状

Fig. 1-1 The supercapacitor research status at home and abroad

目前，国内外生产电容器成品的有关国家主要有德国、韩国、美国、俄罗斯、日本及澳大利亚等。自 20 世纪 90 年代以来，我国的相关企业也出现了生产电容器的一些商家，如 C/C 卷绕炭粉（锦州公司）、东莞的新能源 C/C 卷绕小型、哈尔滨巨容公司的 C/Ni(OH)₂、北京集星公司的 C/C 卷绕炭布及宁波双登公司的 C/Ni(OH)₂ 电容器存储装置等。一些高校和科研院所也对该项研究不断重视，如国内的清华大学、复旦大学及中国人民解放军防化研究院等也在不断投入研究。从整体研究水平来看，我国在该领域的技术研究方面要比其他国家弱一些。因此，着手开展超级电容器及新型材料的

开发研究，提高其能量密度等技术水平对未来能源存储领域的开发具有十分重要的意义。作为一种新型的储能元件，超级电容器在未来电动汽车蓄电池使用、移动通信微小型电池及国防科技等领域将有着潜在的应用前景。

电容器的储能原理分为双电层电容和赝电容两种方式。双电层电容是电极材料与电解液在界面处的离子或偶极子及电子在电极材料两侧的定向排列形成电容。而赝电容是在电极材料与电解液中的离子和电子进行了可逆的吸附脱附氧化还原反应过程而进行的能量存储。

1.3 超级电容器的储能原理和结构

电容器是一种在静电场条件下存储能量的能源器件。它的充电过程是通过给整个器件施加电压形成电位差（电压），正极和负极之间的电荷在电极材料表面向相反极性运动的过程。充电时，电容器在短时间内像一个电源一样连接形成了一个闭合回路。它的比容量用 C 表示，单位 F；每个电极表面电荷量 Q ；两个极板之间的电势差 V ，单位 V，这 3 个量之间有这样的一个关系式：

$$C = Q/V \tag{1-1}$$

电容大小与每一个电极的面积（ A ）和介电常数（ ϵ ）成正比；与两极的相对距离是反比关系。因此有式（1-2）：

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/D \tag{1-2}$$

式中， ϵ_0 为两极介电常数， ϵ_r 为两极的相对介电常数。影响因素包括平板面积、两个电极板之间的距离及中间绝缘板的介电常数。表征电容器的性能参数物理量主要包括能量密度（ E ）和功率密度（ P ）。能量密度 E 与存储电荷 Q 和两个电极的电位差 V 相关。因此也直接与电容密切相关：

$$E = 1/2 \times CV^2 \tag{1-3}$$

当电压最大的时候，获得的能量最大。电压的大小受中间绝缘体击穿强度影响。而功率密度 P 代表单位时间内传输能量，因此功率密度与能量密度之间存在如下关系：

$$P = E/t \tag{1-4}$$

1.3.1 双电层电容储能原理

双电层理论是由德国物理学家亥姆霍兹 (Helmholtz) 提出的, 当将电极材料放入电解液中, 就会在两者之间的界面处形成相反电荷的定向排列, 也就是在两相间会形成电位差而储存电能。双电层电容是由于静电电荷借助于固液界面来构建双电层进而完成能量的储蓄和转化。在电极材料与电解液的界面处只是离子和电荷的静电吸附, 这是非常迅速的过程, 因此, 能够快速完成能量存储和释放, 从而具有很好的功率特性和快速充放电特点。

1.3.2 赝电容储能原理

法拉第赝电容原理是由 B. E. Conway 首次提出: 它是指被研究的电极材料在通电条件下在材料表面和体相中的一种欠电位沉积过程。法拉第反应不只是研究对象的体相中的部分的活性位点发生反应, 而是所有的地方都发生反应。特别是当通过电极电流比较大时来进行电化学性能的研究时, 这种情况将更加明显。因此, 制备出具有大的比表面积电容材料会在其表面有更多的表面活性位点, 在进行电化学反应过程中会有更多的活性材料参与反应的进行, 从而在材料表面存储更多的电荷, 而且实际法拉第所储存的比容量是由法拉第容量和双电层容量共同贡献的。

1.3.3 超级电容器器件结构

超级电容器结构类似于电池结构, 也是由导电集流体、正负极材料、提供离子和电子反应的电解液, 以及防止器件短路的隔膜等构成。超级电容器各个部分如图 1-2 所示。

(1) 导电集流体

实验中常用的导电集流体有泡沫镍、铜网、铝网等。对于导电集流体, 要求导电性要好, 在电化学反应过程中不与电解液及电极材料发生反应。市售的导电集流体, 由于表面可能会被氧化, 会影响电极材料导电性, 并且被