



# 基于 CiteSpace 的汽车动力电池发展趋势分析

赵 健, 王跃虎, 周 玉, 邓涵予, 陈梦瑜, 吴威龙

(贵州大学, a. 资源与环境工程学院; b. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室;  
c. 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵阳 550025)

**摘 要:** 电动汽车是汽车行业主要的发展和变革方向, 其兴起对减少化石燃料消耗和降低二氧化碳排放具有重要意义。快速充电能减少电动汽车电池的充电时间, 缓解车辆行驶里程短的焦虑。目前, 汽车行业广泛接受的快速充电的目标为 15 min 内完成 80% 的电荷容量。基于 Web of Science Core Collection 数据库对 2008 年 1 月 1 日—2021 年 6 月 27 日期间的汽车动力电池相关文献进行了检索, 剔除不相关的文献, 共得到 1738 篇学术论文。借助 CiteSpace 5.8.R1 进行文献计量学可视化分析, 绘制知识图谱, 以揭示 2008 年以来汽车动力电池的研究现状和发展趋势。从提升汽车动力电池能量密度、安全性和寿命的角度, 综述了近年来锂离子电池、钠离子电池、其他电池和超级电容器的研究进展。综合来看, 锂硫电池、钠离子电池、固态电解质电池等具有理论能量密度高、寿命长、环保和低成本等优势, 是今后新型电池研究的主要方向。

**关键词:** 电动汽车; 快速充电; 动力电池; CiteSpace; 发展趋势

**中图分类号:** TM 912

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2022) 05-0329-11

## CiteSpace-based analysis of the development trend of automobile power battery

ZHAO Jian, WANG Yuehu, ZHOU Yu, DENG Hanyu, CHEN Mengyu, WU Weilong

(a. College of Resources and Environmental Engineering; b. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education; c. Guizhou Karst Environmental Ecosystems Observation and Research Station, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Electric vehicles represent the main direction of development and reform in the automobile industry and its emerging has great significance for reducing the consumption of fossil fuel and the emission of CO<sub>2</sub>. Fast charging can reduce charging time of electric vehicle batteries, alleviate people's anxiety of short driving range. Currently, the widely accepted goal of fast charging in the automotive industry is to charge a fully discharged battery to 80% of its charge capacity within 15 min. Through the retrieval of the literature related to electric vehicle batteries from January 1, 2008 to June 27, 2021 on the Web of Science Core Collection database, and the elimination of irrelevant documents, a total of 1738 academic papers were obtained. A bibliometric visual analysis was conducted using CiteSpace 5.8. R1, and a knowledge map was drawn to reveal the current status and development trend of the research on electric vehicle batteries since 2008. From the perspective of enhancing the energy density, safety and lifespan of automobile power batteries, the paper summarized the research progress of lithium-ion batteries, sodium-

收稿日期: 2021-07-06 网络出版日期: 2021-10-11

基金项目: 贵州大学引进人才基金项目((2018)25); 贵州省人才计划基金项目(RCJD201821)

作者简介: 赵 健(1994—), 男, 贵州织金人, 硕士研究生, 主要从事新能源材料、环境保护方面的研究。

通信作者: 王跃虎, E-mail: wangyuehu814081@163.com

ion batteries, other batteries and supercapacitors in recent years. On the whole, lithium-sulfur batteries, sodium-ion batteries and solid-state batteries with the advantages of high theoretical energy density, long lifetime, environmental protection, and low cost will be the main directions for future research on new batteries.

**Key words:** electric vehicle; fast charging; power battery; CiteSpace; development trend

## 0 引言

二氧化碳排放引起的温室效应已经引起了世界各国的广泛关注。有关研究表明,全球汽车尾气排放的二氧化碳占其总排放量的 17% 左右<sup>[1]</sup>。如果电动汽车取代燃油汽车,将有利于减少碳足迹,实现碳达峰、碳中和的目标。许多国家已提出禁止销售燃油车的计划,如挪威规定 2025 年开始禁止销售燃油汽车,德国和印度将于 2030 年禁止,英国和法国将于 2040 年禁止。汽车厂商路虎宣布 2020 年以后的所有汽车产品都将是电动或混合动力汽车<sup>[2]</sup>。由此可见,电动汽车以及汽车动力电池已经成为当前和未来的研究热点。

快速充电有助于减少电池的充电时间,缓解电动汽车里程短的焦虑<sup>[3]</sup>。到目前为止,关于汽车动力电池快速充电还没有统一的定义,美国先进电池联盟提出的快速充电目标是 15 min 内充电到 80% 的电荷容量。目前国内汽车厂商普遍能达到的快充能力是 30 min 内从 30% 充至 80% 的电荷容量,如比亚迪 2021 年推出的秦 PLUS EV。Xie 等<sup>[4]</sup>发现,提高锂离子电池的充电速率可以减少充电时间,但是同时会导致电池寿命降低,并产生电镀锂、电池老化和发热等副作用。因此,新型改性电极材料、电池热管理以及充电优化等成为快速充电研究方向的热点。

目前常用的锂离子电池电极材料有三元锂电池和磷酸铁锂电池。三元锂电池能量密度高,该电池使用高镍三元材料,能量最高可达 300 Wh/kg,但是高镍和低钴容易使电池过热,使电池燃烧的风险大大增加。基于安全和更长的使用寿命考虑,目前应用较多的是磷酸铁锂电池,如比亚迪 2020 年推出的“刀片”电池和国产特斯拉 Model 3 采用的就是磷酸铁锂电池。为了提升锂离子电池的性能和安全性,研究者们重点研究各种新型电极材料,并着力研究电池热管理、电解质、催化剂等方面的内容。除了锂离子电池外,低成本、高电导率的钠离子电池也成为了新型电池研究的热门内容<sup>[5]</sup>。此外,锂硫电池<sup>[6]</sup>、固态电解质电池<sup>[7]</sup>由于理论能量密度高,是传

统锂离子电池的两倍以上,对于缓解电动汽车里程的焦虑具有重要意义,也是研究者们密切关注的內容。

本文采用文献统计学方法,借助 CiteSpace.5. 8. R1 对 2008 年以来汽车动力电池相关文献进行了统计分析,梳理了汽车动力电池的研究现状和发展趋势,以期给未来该方向的研究者提供一定的参考数据。

## 1 数据来源和方法

以 Web of Science (WoS) 文献检索平台的“Web of Science Core Collection”为样本数据库,按照“主题”进行精确检索,检索策略设定为 TS = (“fast charg \*” or “rapid charg \*”) and “batter \*”,文献类型选择“article”,检索时间跨度为 2008 年 1 月 1 日—2021 年 6 月 27 日,共得到 2245 篇文献(检索日期为 2021 年 6 月 27 日)。为了保证文献的准确性,剔除不相关的文献,得到学术论文 1738 篇。

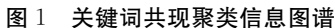
## 2 结果与分析

### 2.1 动力电池关键词分析

#### 2.1.1 关键词共现分析

借助 CiteSpace 关键词分析工具所呈现出来的关键词聚类 and 相互影响情况(节点大小、颜色变化、连线粗细)等,可以探究动力电池领域的研究热点和变化情况。动力电池研究的关键词共现聚类信息图谱如图 1 所示,从图中可以看出:关键词共产生了 537 个节点,4263 条连线,网络密度为 0. 0296;聚类模块值(Q 值)为 0. 3762,聚类平均轮廓值(S 值)为 0. 7085。在 CiteSpace 中,一般认为  $Q > 0. 3$  表示聚类结构显著, $S > 0. 5$  聚类就是合理的,这表示动力电池各研究领域主题词界限清晰,关键词共现明显。动力电池研究领域的关键词被划分为 7 个主题,各个主题用不同颜色的聚块表示并和它们的标签颜色一一对应。

动力电池研究领域关键词的出现次数由高到低依次为 Lithium ion battery(394 次),Performance



关键词	出现次数/次	关键词	出现次数/次
Lithium ion battery	394	Electrochemical performance	130
Performance	344	Cathode material	130
Electrode	261	Nanosheet	127
Battery	243	Carbon	127
Anode	188	High capacity	127
Storage	181	Nanoparticle	125
Composite	176	Fast charging	124
Energy storage	166	Cathode	118
Graphene	160	Electric vehicle	114
Anode material	152	Intercalation	113
Lithium	131	Capacity	109

关键词	突现强度	开始年份	结束年份	2008—2021(时间跨度)
Rechargeable battery	4.76	2008	2018	
Lithium ion battery	5.83	2010	2015	
Carbon	4.02	2011	2013	
Nanostructure	8.00	2012	2015	
Fast charge	4.24	2016	2017	
Growth	3.87	2017	2018	
Phosphorene	4.31	2018	2019	
Na	3.80	2018	2019	
Lithium plating	3.85	2019	2021	
Solid electrolyte Interphase	3.40	2019	2021	

使用关键词突现分析的功能可以分析主要的关键词随着研究年份的变化情况。2008—2021 关键词突现统计情况如表 2 所示。

间发表的论文主要是研究锂离子电池电镀锂对快速充电的不利影响及对策。2018—2019 的关键词是磷和钠离子电池。这段时间的研究方向更多的是侧重于更低成本和高能量密度的磷、钠离子电池等新型电池和材料的研究。2019—2021 年的关键词是锂沉积和固态电解质,固态电池/电解质具有完全的不可燃性和更高的安全性能。Zhu 等<sup>[9]</sup>研究了不同电压窗下  $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$  硫化固体电解质的氧化还原行为及其对界面输运和电池循环寿命的影响,通过改变工作电压窗口来调节电解液的氧化还原行为,在 10 min(6 C)内实现了快速充放电过程,为未来高能/功率密度固态锂电池的合理设计提供了新的见解。可见,随着时间的推移,学者们的研究视角从最开始的锂离子电池,慢慢转移到更加廉价、高效率和

安全的钠离子电池、固态电解质电池等方向上。

### 2.2 主要被引文献和研究现状分析

从 CiteSpace.5. 8.R1 中导入 1738 篇参考文献,共得到 40687 篇被引参考文献,主要被引论文统计情况如表 3 所示。从表 3 可以看出:Web of science 引用量最高的 5 篇文献发表于 2011—2015 年,是电池快充研究的初期,主要代表了动力电池的基础性知识和发展的趋势。共被引量最高的 5 篇文献主要发表于 2014—2019 年,是动力电池研究领域的高速

发展期,主要代表了当时的研究热点和未来趋势。主要被引论文共现时间线图如图 2 所示。从图 2 可以看出:高被引论文早期(2010 年左右)的研究热点集中在电极材料石墨烯和涂层上,后期(2015—2021 年)主要集中在电镀锂、快速充电和锂离子电池方向的研究。结合相关研究方向重点文献的研读,可以将汽车动力电池的研究领域归纳为 4 个方面:a)锂离子电池;b)钠离子电池;c)其他电池;d)超级电容器。

表 3 主要被引论文统计

共被引量/篇	Web of Science 被引量/篇	第一作者	年份	标题	来源期刊	DOI
52	109	Ahmed S	2017	Enabling fast charging e A battery technology gap assessment	<i>Journal of Power Sources</i>	10. 1016/j.jpowsour. 2017. 06. 055
48	211	Wang C L	2015	Extended $\pi$ -Conjugated System for FastCharge and-Discharge Sodium-Ion Batteries	<i>Journal of the American Chemical Society</i>	10. 1021/jacs. 5b00336
45	3202	Yabuuchi N	2014	Research Development on Sodium-Ion Batteries	<i>Chemical Reviews</i>	10. 1021/ cr500192f
43	2759	Nitta N	2015	Li-ion battery materials: present and future	<i>Materials Today</i>	10. 1016/j.mattod. 2014. 10. 040
37	223	Liu Y Y	2019	Challenges and opportunities towards fast-charging battery materials	<i>Nature Energy</i>	10. 1038/s41560- 019-0405-3
36	7467	Dunn B	2011	Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices	<i>Science</i>	10. 1126/science. 1212741
36	1570	Hwang J Y	2017	Sodium-ion batteries: present and future	<i>Chemical Society Reviews</i>	10. 1039/ c6cs00776 g
35	233	Gallagher K G	2016	Optimizing Areal Capacities through Understanding the Limitations of Lithium-Ion Electrodes	<i>Journal of the Electrochemical Society</i>	10. 1149/ 2. 0321602jes
34	3016	Simon P	2014	Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin?	<i>Science</i>	10. 1126/science. 1249625
33	168	Waldmann T	2018	Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells-A review	<i>Journal of Power Sources</i>	10. 1016/j.jpowsour. 2018. 02. 063

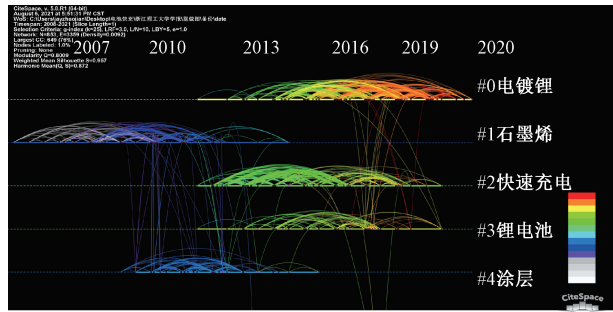


图 2 主要被引论文共现时间线图

#### 2.2.1 锂离子电池

##### 2.2.1.1 电极材料

Nitta 等<sup>[10]</sup>综述了锂离子电池电极的关键技术发展和科学挑战。锂基电池具有较高的质量(体积)

容量和功率密度,已发展成为当时的高能密度、高循环寿命、高效率的电池,但锂离子电池成本高,使用的过渡金属短缺,迁移率低。为此,人们研究了各种各样的新电极材料、插层阴极、转化技术等提高锂离子电池在成本、效率和寿命等方面的优势。

纳米材料常被用于制备电极材料。Li 等<sup>[11]</sup>以二硫化钼纳米片为装饰材料,采用葡萄糖辅助水热法制备了  $\text{TIO}_2$  纳米线复合材料( $\text{TIO}_2 @ \text{MOS}_2$ ),具有 862 mAh/g 的高初始放电容量,库伦效率达到 99% 以上,是一种高性能的锂电池阳极材料。Kwon 等<sup>[12]</sup>采用硅纳米颗粒,以低成本玉米淀粉为生物质前驱体,在  $\text{C}_3\text{H}_6$  气氛下进行热处理,采用可

拓展的微乳液法合成了硅-碳复合材料。这种复合材料在循环 500 个周期后,保持了超过 80% 的容量,并具有 12 min 内完成快速充放电的能力。

采用生物质及绿色材料制备电极材料能达到节能环保、高效和资源再循环等目的。Miroshnikov 等<sup>[13]</sup>从天然纹身染料指甲花中提出了一种四聚体,可作为可循环和环保的锂电池正极材料,在 300 个充放电循环后,能稳定保持 100 mAh/g 以上的电池容量。Wang 等<sup>[14]</sup>通过二氧化碳钠还原直接合成了具有丰富表面孔隙的三位石墨烯结构作为锂电池的有效阳极,在高达 50 °C 的放电倍率下循环 10000 次后,放电容量达到 280 mAh/g,容量保持率为 91.9%,这为从温室气体中开发高效电极打开了一扇新的大门。

泡沫铜的导电性和延展性好,制备成本较低,是一种理想的电极基体材料。Lin 等<sup>[15]</sup>提出了一种在泡沫铜上生长沸石骨架多面体并与铜纳米线交织的合成策略,该电极在 0.1 A/g 电流下循环 500 次后,保留了 2305 mAh/g 的高容量。结果表明,赝电容效应是锂电池高存储容量的主要原因,即使是在 10 A/g 的电流下,也能达到 719 mAh/g 的容量。Kim 等<sup>[16]</sup>研究了氧化铈在锂离子电池中的循环稳定过程,在不添加任何添加剂的常规碳酸盐电解液中,该电池在 5 °C 和 10 °C 的放电倍率下表现出优异的性能和循环稳定性,从而促使氧化铈等新型材料正在成为研究的新热点。

开发更加安全和稳定的电动汽车动力电池是人们主要关注的焦点。因此,人们在传统锂离子电池的基础上不断做出研究和改进。2020 年 3 月,比亚迪发布了刀片电池<sup>[17]</sup>。该电池采用磷酸铁锂工艺,磷酸铁锂材料具有高度稳定性,温度高达 500~800 °C 时才会发生分解,放热慢,并且不产生氧气。相对于三元锂电池而言,磷酸铁锂材料虽然能量密度相对较低,但是具有寿命长、安全性好等优点。

#### 2.2.1.2 电镀锂

锂金属在阳极上沉积将导致电池老化,不仅影响锂离子电池的使用寿命,还降低了其快速充电的能力和安全性<sup>[18]</sup>。Liu 等<sup>[19]</sup>综述了阳极电镀锂的机理、诊断技术、激励机制和抑制方法,其中固体核磁共振和中子衍射等物理表征方法在理解镀锂机理方面具有广阔的应用前景。在室温高速率充电过程中,锂离子固相扩散不良是阳极镀锂的主要原因,目前,为了抑制阳极镀锂,常用的方法有优化电解液成

分和改性石墨表面结构等。Tallman 等<sup>[20]</sup>采用直流磁控溅射纳米级 Cu 和 Ni 对石墨电极进行界面修饰,增加锂沉积的过电位,抑制高速率电荷条件下的电镀锂。结果表明,与未经处理的电极相比,表面处理有效的减少了接近 50% 镀锂金属的数量。

通过建立数值模型和数值分析有利于解决锂离子电池的电镀锂问题。Tan 等<sup>[21]</sup>提出了一个在电极-电解液界面多次充放电循环中枝晶生长的数值模型,模型能够预测枝晶生长的形态,并模拟了快速充电对枝晶生长速率和形态的影响。计算结果表明通过增加电池放电速率可以抑制枝晶的生长。通过均匀的电镀或浓密的枝晶来控制枝晶生长,将有望生产出更坚固和耐久的电池。

#### 2.2.1.3 电池热管理

研究热量的产生原理和产生位置对设计有效的电池热管理系统具有重要意义。Ahmed 等<sup>[22]</sup>研究了温度对于电动汽车快速充电的影响:高温会更快地降低电池性能,而低温会降低它们的功率和电池容量。Yang 等<sup>[23]</sup>提出了一种可控电池结构实现了不受环境温度限制、无电镀锂的快速充电。来自充电电源的电流都被引导到电池内部的铝箔上,而不进入阳极材料(不镀锂),根据电池温度实现快速加热模式和充电模式的无缝切换,即使在一 50 °C 的极端天气下,其仍然可以在 15 min 内充电到 80% 的电荷容量。Xu 等<sup>[24]</sup>提出了一种近零能量的智能电池热管理策略,用于被动制冷和供暖。该策略基于从空气中获取吸附能量,自适应的电池热管理装置可以将电池温度控制在 45 °C 以下。Behi 等<sup>[25]</sup>提出了一种热管冷却的夹层结构,采用该结构强制对流的电池温度为 37.8 °C,比自然冷却的温度降低了 33.4%。

近年来,全国各地不断发生电动汽车发生自燃事故的报道。除了电池本身的安全性,模组组装,电池管理系统等的研究都具有重要意义。如 2020 年,通用汽车推出了全新 Ultium 智能纯电平台,采用分布式拓扑结构可以减少线束,减重的同时增加了体积能量密度,从而有效提升了电动车的续航里程。

#### 2.2.1.4 电解质

电解质的传输速率是影响电动汽车动力电池快速充电的重要影响因素之一。Colclasure 等<sup>[26]</sup>对不同负载下的电池的高速率充电数据进行了电化学模型的验证,该模型表明高能量密度电池的主要局限性是电解质传输不良导致阳极内盐的耗尽和石墨/分离器界面的镀锂,从而可以用于了解未来哪些电



极和电解质特性可以帮助实现快速充电。Parikh等<sup>[27]</sup>研究了隔膜对锂离子电池能量密度的影响。结果表明: Celgard 2500 型隔膜具有较好的电解质润湿性,在 2 C 和 3 C 充电时,电池容量分别提升了 57% 和 47%,这说明隔膜在锂离子电池的快速充电中也发挥了重要作用。

Zhang 等<sup>[28]</sup>提出了二苯砜和双(4-氟苯基)砜作为双功能电解质添加剂,在 5 C 的电流下循环 500 次后,每循环仅有 0.05% 的容量损失,添加添加剂的锂离子电池具有更长的循环寿命、更高的容量保持能力和更好的快速充电性能。Park 等<sup>[29]</sup>报告了一种新一代合成添加剂的方法,该方法采用氟化和硅基化电解质添加剂形成高度稳定的电极-电解质界面结构。合成所得碳酸乙烯型添加剂的界面结构使得锂离子电池的容量保留率更高,在 1 C 的电流下循环 400 次后容量保持率为 81.5%,并且具有快速充电的能力。结果表明: 电解液添加剂生成的界面结构是提高锂离子电池性能的关键因素。

## 2.2.2 钠离子电池

钠是地球上含量第四丰富的元素,储量广泛,仅在美国就有 230 亿 t 的纯碱,相对锂离子电池来说具有成本上的优势<sup>[30]</sup>。钠离子在固相中的扩散速率快,因此具有高速率的性能。钠离子电池的缺点和局限在于相对于锂离子来说钠离子半径较大,使得钠离子在插入和提取过程中容易发生结构变化导致容量发生损失,所产生的能量密度较低。此外,金属钠具有高反应性,通常需要配制基本溶液才能在阳极上形成金属钠沉积。当前,研究者们通过研究电极材料、电解质、添加剂等内容,有力促进了钠离子电池的发展和进步。

氧化还原有机聚合物具有生态友好、可持续性和结构灵活等优点,可作为钠离子电池下一代的“绿色电池”。Gu 等<sup>[31]</sup>首次将环化聚丙烯腈引入导电聚合物骨架中作为一种新型的有机阳极进行研究,结果表明其具有优越的钠存储性能和高可逆容量,具有超长的寿命,在 3500 个充放电循环后,仍能保持 99.4% 的荷电容量。Xu 等<sup>[32]</sup>设计并合成了两种氮杂环共轭聚合物作为钠离子电池的阳极,结果表明支链聚合物的离子传导速率远高于线性共轭聚合物阳极,甚至优于大多数有机聚合物钠离子阳极。

钠离子电池的主要局限在于其能量密度低,采用纳米复合材料有利于提高钠离子电池的能量密度、寿命和电导率等。Hu 等<sup>[33]</sup>利用铜的高电导率

以及磷对钠的高存储能力将非均相磷和铜结合在一起,构建了独特的三维中空结构,制备所得空心磷化铜纳米立方体具有优异电化学性能,并通过赝电容行为实现快速充放电。Shi 等<sup>[34]</sup>采用原位聚合的方法构建了一种共轭聚芘四酮碳纳米管复合材料作为钠电池的正极材料,该复合材料具有 360.2 mAh/g 的高放电容量和超长的寿命,循环 1300 次后容量保持率为 95.1%。近年来,共轭聚合物在钠离子电池中的应用已成为一个重要的发展方向。

2018 年中科院物理研究所推出了中国首辆钠离子电池低速电动车。2019 年,中科院物理研究所又在江苏常州启动了世界上第一个钠离子电池储能电站。2021 年 7 月,新能源行业的龙头企业宁德时代举办了钠离子电池线上发布会,公布了宁德时代第一代钠离子电池及锂钠混搭电池包。钠离子电池的高丰度、低成本使其成为未来最有发展潜力的电池之一。

## 2.2.3 其他电池

### 2.2.3.1 镍离子、锌离子电池

Xu 等<sup>[35]</sup>用多价镍离子发明了一种可充电电池并命名为镍离子电池。镍离子电池一般采用二氧化锰阴极、含镍离子的电解质和镍阳极,具有较高的能量密度(340 Wh/kg,接近锂离子电池)和快速的充放电能力。Yang 等<sup>[36]</sup>报道一种晶格水富集的无机开放式框架结构阴极材料磷钒酸盐,其中的晶格水起着“电荷屏蔽”作用,使  $\text{Zn}^{2+}$  迁移能垒很低,实现了材料的超快充电,可达 90 Wh/kg 的能量,已远远超过商业的铅酸电池、镍镉电池和镍氢电池。

### 2.2.3.2 锂硫电池

锂硫电池具有较高的理论能量密度(400 Wh/kg 以上),是一种很有前景的电动汽车储能装置和大型储能装置。然而,由于存在含硫量低、循环稳定性差等问题,制约了其实际应用。Zhou 等<sup>[37]</sup>利用三维氮/硫共掺杂石墨烯海绵电极获得高能量密度和长循环寿命的锂/聚硫电池。该电池在 0.2 C 放电速率下具有 1200 mAh/g 的容量。Yan 等<sup>[38]</sup>为了解决锂硫电池容量严重下降的问题,提出了一种三维类铁混凝土胺化碳纳米管网络,该网络具有聚苯胺涂层,可以抑制多硫化物溶解,从而有效提高了锂硫电池的容量保持性能。韩国 LG 化学公司采用搭载锂硫电池的无人机进行了长效性能实验,滞空时间可达 13 h,其中在 12~22 km 的平流层飞行 7 h<sup>[39]</sup>。锂硫电池的循环寿命较差、体积能量密度低是实现其未来发展的主要挑战。

### 2.2.3.3 钾、镁、铝离子电池

钾离子电池储量丰富,成本较低,并具有快速的离子传导性能和与锂离子电池相当的电极电位。与钠相比,钾金属的价格虽然相对较高,但是钾盐即碳酸钾的价格与碳酸钠相似,同时比碳酸锂要便宜得多。钾离子电池存在能量密度有限、循环性能低等缺点。Tang 等<sup>[40]</sup>报道的聚五烯四酮硫化物作为钾离子电池的阴极具有高可逆容量、快速充放电能力和长循环寿命。在 5 A/g 电流下循环 3000 次后容量仍高于 190 mAh/g。有机电极材料有更大的面间距,使得钾离子可以具有更好的存储性能。Li 等<sup>[41]</sup>使用第一性原理计算,预测具有多孔结构的有机芳烃类材料将成为比石墨更好的钾离子负极材料,理论容量达到 700 mAh/g。

低成本、高容量、安全性好的镁电池是锂离子电池理想的代替品,但是由于其缺乏高功率和稳定的阴极而限制了发展。Sun 等<sup>[42]</sup>研究了一种环境友好、低成本、可持续的共价有机框架镁存储阴极,具有高功率密度和超长的循环寿命的特性。3000 次循环后每个循环的容量衰减率仅为 0.0196%。铝是地壳中含量第三丰富的元素,且具有极高的理论容量(8 056 mAh/cm<sup>3</sup>)。当前,铝电池的主要挑战在于铝离子的三价性提供了巨大的阻力,阻碍了其在材料框架上的扩散,并且由于铝金属表面形成大的带隙钝化层,难以找到适合的电解质和阴极材料。Yoo 等<sup>[43]</sup>研究了一种三角形大环化合物作为铝离子的阴极材料,这种化合物由三个具有氧化还原活性的菲醌有机单元组成,以三角结构共价连接,具有极高的反应速率和循环性能,即使在电流密度增加 100 倍,即 10 A/g 的情况下,仍能保留 64% 的容量。

### 2.2.3.4 固态、量子电池

固态电池的能量密度高,是锂离子电池的两倍以上,具有更长的使用寿命和更高的安全性,作为电动汽车动力电池具有很好的前景。目前的研究方向主要是固体电解质以及电极材料。Sastre 等<sup>[44]</sup>研究开发了一种锂石榴石/钴酸锂的全薄膜模型结构,为研究界面降解过程和测试层间涂层的解决方法提供了一个通用的平台,证明了固体电解质和阴极材料之间的快速传输离子成为可能,这项工作构成了更高功率密度薄膜固态电池发展的里程碑。

Yamauchi 等<sup>[45]</sup>采用钠  $\beta'$  氧化铝固体电解质制备了一种新型结构的固态电池,通过降低前驱体玻璃粉的直径,使得结晶温度降低,促进晶体与氧化铝

集合,因此在电极中形成了良好的离子传导路径,并添加了包括玻璃和乙炔黑等作为导电添加剂,使电池内阻降低到 120  $\Omega$ ,获得了一种既能在室温(30  $^{\circ}\text{C}$ )下工作,也能在 -20  $^{\circ}\text{C}$  下工作的固态电池。该技术是氧化物基固态电池的创新突破。Bay 等<sup>[46]</sup>将钠  $\beta'$  氧化铝陶瓷作为固态电池快速充电的电解质,通过在氩气氛围对精细抛光的钠  $\beta'$  氧化铝表面进行热处理,实现低界面电阻以实现快速充电的目的。这项作为研究枝晶的形成提供了新的思路,并为固态电池快速充电铺平了道路。

目前,中国、美国、日本、德国等世界主要经济体均制定了各自的固态电池发展规划。总体计划是:2020—2025 年致力于提升电池能量密度并逐步向固态电池转变,2030 年前后研发出商业化运用的全固态电池<sup>[47]</sup>。2021 年 8 月赣锋锂业公布了其生产的第二代固态锂电池,能量密度超过 350 Wh/kg,循环寿命近 400 次<sup>[48]</sup>。

### 2.2.4 超级电容器

超级电容器与汽车动力电池不同,具有充电更快、寿命超长、受温度变化影响小以及无毒性等特点。Simon 等<sup>[49]</sup>综述了超级电容器在快速充放电中的应用,具有超快的充放电能力,但是其本质上的低能量密度严重限制了其进一步广泛应用,开发具有汽车动力电池能量密度和超级电容器功率密度以及循环寿命的材料是一个有前景的发展方向。由于碳基材料环保、无毒且成本低,是理想的候选电极材料<sup>[50]</sup>。Lee 等<sup>[51]</sup>将超交联聚合物碳化得到高导电性的多孔材料用作超级电容器的电极,在快速充放电时具有出色的电容保持能力并可支持多达 15000 次的充放电循环。Zhang 等<sup>[52]</sup>报道了一种直接将生物质转换为氮掺杂空心碳纳米球的绿色路线,该路线仅使用葡萄糖和葡萄糖胺作为前驱体,采用气溶胶工艺,具有快速充放电性能。Fu 等<sup>[53]</sup>通过将锐钛矿型  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒限制在碳纳米孔中,实现超快电荷存储并能在 -40  $^{\circ}\text{C}$  到 0  $^{\circ}\text{C}$  的寒冷条件下工作。

2021 年 7 月,烯晶碳能电子科技无锡有限公司成功研发了第二代混合超级电容器。兼具了传统锂离子电池的高能量密度和超级电容器高功率密度的双重特点。能量密度达到 80~160 Wh/kg、功率密度达到 6~12 kW/kg,充放电倍率 30~150 C,并成功中标了德国某电力巨头 50 MW 调频项目,超级电容器未来的发展趋势是提高其能量密度。

## 2.3 主要研究力量分析

### 2.3.1 发文国家数据分析

表4是通过导入CiteSpace.5.8.R1中的1738篇动力电池研究领域的论文而得到的国家发文情况统计表。在CiteSpace中,中介中心性超过0.1的节点称为关键节点。由表4可得:中心度最高的国家是中国和美国,说明中国和美国是动力电池研究领域的中心和枢纽。图3是国家发文数量和相互联系的信息图谱,其中最大圈代表中国,颜色的冷暖色调代表研究时间的远近,连接线条的粗细表示他们之间的联系强弱。从图3中可以发现发文国家之间虽然有联系,但是联系并不是很紧密,各国之间还需要加强合作。

表4 国家发文情况统计表

序号	国家	发文量/篇	连线数量(国家合作发文量)	中心度	首次发表论文年份
1	中国	853	39	0.48	2008
2	美国	407	33	0.40	2008
3	韩国	193	24	0.28	2009
4	德国	107	24	0.16	2011
5	日本	69	15	0.05	2008
6	加拿大	68	19	0.16	2011
7	英国	61	23	0.10	2008
8	澳大利亚	57	17	0.04	2011
9	印度	52	10	0.04	2009
10	新加坡	46	15	0.05	2012
11	法国	32	21	0.13	2010
12	伊朗	12	7	0.16	2017

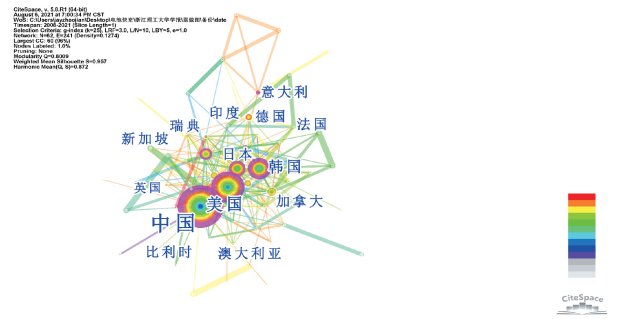


图3 国家发文量和联系图谱

### 2.3.2 研究机构数据分析

通过CiteSpace.5.8.R1对于动力电池研究领域发文机构的分析可得表5,从中可得论文发表最多的机构为中国科学院、清华大学。中国科学院和清华大学的中心度分别为0.24和0.14,说明这两个机构和外界的联系交流相对较为紧密,是这个领域研究的研究中心,图4是各个发文机构之间的共现时间线图,图中连接线条的粗细代表他们之间的联系强弱,时间线图上从左到右(发文年代由远及近)

依次代表了各个机构的最早发文时间,可见清华大学在2008年就发表了动力电池相关研究论文。由图4可以发现,研究机构之间的联系并不是很紧密,未来还需要加强合作。

表5 研究机构发文情况统计

排序	机构	发文量/篇	连线数量/条	中心度	首次发表论文时间/年
1	中国科学院	97	60	0.24	2011
2	清华大学	50	41	0.14	2008
3	美国阿贡国家实验室	37	28	0.06	2014
4	华中科技大学	34	15	0.02	2013
5	南洋理工大学	29	24	0.05	2012
6	北京理工大学	26	15	0.02	2016
7	中国科学技术大学	24	21	0.03	2014
8	中国科学院大学	24	8	0.00	2015
9	南开大学	23	18	0.02	2012
10	吉林大学	23	18	0.02	2016
11	浙江大学	22	18	0.03	2015
12	哈尔滨工业大学	22	11	0.02	2014
13	德克萨斯大学奥斯汀分校	21	15	0.01	2009
14	汉阳大学	21	8	0.01	2013

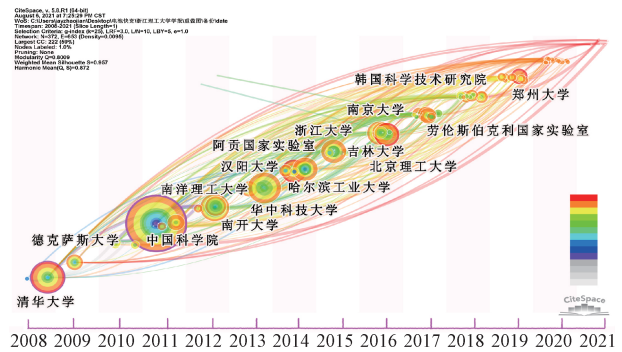


图4 发文机构共现时间线图

### 2.3.3 研究作者数据分析

通过CiteSpace.5.8.R1对动力电池研究领域的发文作者进行数据统计分析后可得图5,由图5可以看出:由于作者的数量众多,CiteSpace.5.8.R1计算呈现出的信息图谱相当分散,图中节点的大小代表了作者发文数量的多少,颜色的冷暖色调代表了研究时间的远近,颜色越冷代表研究时间越早,连接线条的粗细代表了作者之间的联系强弱。从图中可以发现:发文数最多的前三位作者为华中科技大学光学与电子信息学院的王成亮教授以及他的博士生陈远和吴艳超。作者之间的联系都很分散,而且集中于特定的年份,说明作者之间的合作和研究持续时间都较短。



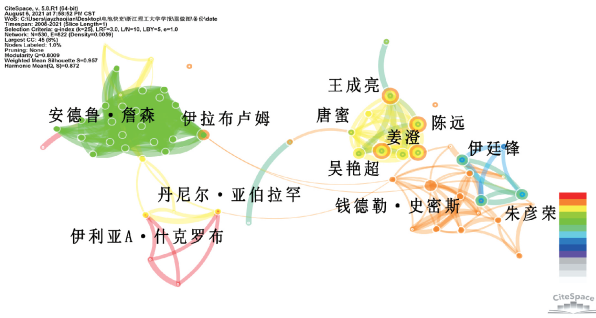


图5 发文作者共现信息图

### 3 结论和展望

目前广泛使用于纯电动汽车以及混合动力汽车的电池主要是锂离子电池,应用较多的类型为三元锂离子电池以及磷酸铁锂电池,但是三元锂电池存在安全隐患,磷酸铁锂电池相对能量密度较低。新一代的研究对象包括锂硫电池、固态电池和钠离子电池。锂硫电池的理论能量密度高达 2600 Wh/kg,但是活性材料利用率低、硫负荷低、循环稳定性差限制了它的实际应用。固态电池促进了能量密度的飞跃,并且具有不可燃的特性,因而更加安全,但存在界面阻抗过大、离子传递效率低等问题需要解决。钠离子电池由于其低成本和高离子电导率成为最有发展潜力的电池之一,但是需要对其机理进行更深入的研究以提高其循环稳定性和寿命。对汽车动力电池研究领域的展望如下:

a) 固态电解质电池由于其安全性是未来发展的趋势,针对其界面阻抗大、离子电导率低等缺点,可以从固态电解质的结构、材料、添加剂等方面进行改进和研究。

b) 进一步研究纳米复合材料、泡沫铜等新型材料应用于动力电池的电极以提高其能量密度、安全性和循环稳定性,探索绿色、环保的生物质材料作为合成新型材料中的碳源和添加剂等,减少对环境的污染和提高资源的循环利用率。

c) 应继续深入研究电池的电镀锂原理,改进电池热管理系统、充电策略和充电方式等,加强对于电池结构、封装系统等的设计。

### 参考文献:

- [1] 徐耀宗. 关于汽车行业如何落实国家二氧化碳减排战略的思考[J]. 汽车工业研究, 2010(9):12-14.
- [2] Eftekhari A. Lithium batteries for electric vehicles: from economy to research strategy[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(6): 5602-5613.

- [3] Shao C C, Qian T, Wang Y N, et al. Coordinated planning of extreme fast charging stations and power distribution networks considering on-site storage[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(1): 493-504.
- [4] Xie W L, Liu X H, He R, et al. Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101837.
- [5] 郭晋芝, 万放, 吴兴隆, 等. 钠离子电池工作原理及关键电极材料研究进展[J]. 分子科学学报, 2016, 32(4): 265-279.
- [6] 刘帅, 姚路, 章琴, 等. 高性能锂硫电池研究进展[J]. 物理化学学报, 2017, 33(12): 2339-2358.
- [7] 李杨, 丁飞, 桑林, 等. 固态电池研究进展[J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1085-1089.
- [8] Jiang H, Hu Y, Guo S, et al. Rational design of MnO/carbon nanopeapods with internal void space for high-rate and long-life li-ion batteries[J]. ACS Nano, 2014, 8(6): 6038-6046.
- [9] Zhu G L, Zhao C Z, Yuan H, et al. Interfacial redox behaviors of sulfide electrolytes in fast-charging all-solid-state lithium metal batteries[J]. Energy Storage Materials, 2020, 31: 267-273.
- [10] Nitta N, Wu F X, Lee J T, et al. Li-ion battery materials: present and future[J]. Materials Today, 2015, 18(5): 252-264.
- [11] Li X D, Li W, Li M C, et al. Glucose-assisted synthesis of the hierarchical TiO<sub>2</sub> nanowire @ MoS<sub>2</sub> nanosheet nanocomposite and its synergistic lithium storage performance [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(6): 2762-2769.
- [12] Kwon H J, Hwang J Y, Shin H J, et al. Nano/microstructured silicon-carbon hybrid composite particles fabricated with corn starch biowaste as anode materials for Li-ion batteries[J]. Nano Letters, 2020, 20(1): 625-635.
- [13] Miroshnikov M, Kato K, Babu G, et al. Made from henna! A fast-charging, high-capacity, and recyclable tetrakislawsonone cathode material for lithium ion batteries [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(16): 13836-13844.
- [14] Wang L, Deng J, Deng J T, et al. Ultra-fast and ultra-long-life Li ion batteries with 3D surface-porous graphene anodes synthesized from CO<sub>2</sub>[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(26): 13385-13392.
- [15] Lin X M, Lin J, Zeng C H, et al. Copper nanowires and copper foam multifunctional bridges in zeolitic

- imidazolate framework-derived anode material for superior lithium storage[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 565: 156-166.
- [16] Kim Y, Jacquet Q, Griffith K J, et al. High rate lithium ion battery with niobium tungsten oxide anode [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2021, 168 (1): 010525.
- [17] 温俊. 刀片电池:新能源汽车的动力升级[J]. *中国工业和信息化*, 2021(1): 16-22.
- [18] Waldmann T, Hogg B I, Wohlfahrt-Mehrens M. Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells-a review[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 384: 107-124.
- [19] Liu Q Q, Du C Y, Shen B, et al. Understanding undesirable anode lithium plating issues in lithium-ion batteries[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(91): 88683-88700.
- [20] Tallman K R, Zhang B, Wang L, et al. Anode overpotential control via interfacial modification; inhibition of lithium plating on graphite anodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(50): 46864-46874.
- [21] Tan J W, Cannon A, Ryan E. Simulating dendrite growth in lithium batteries under cycling conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 463: 228187.
- [22] Ahmed S, Bloom I, Jansen A N, et al. Enabling fast charging - A battery technology gap assessment[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 367: 250-262.
- [23] Yang X G, Zhang G S, Ge S H, et al. Fast charging of lithium-ion batteries at all temperatures [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(28): 7266-7271.
- [24] Xu J X, Chao J W, Li T X, et al. Near-zero-energy smart battery thermal management enabled by sorption energy harvesting from air[J]. *ACS Central Science*, 2020, 6(9): 1542-1554.
- [25] Behi H, Behi M, Karimi D, et al. Heat pipe air-cooled thermal management system for lithium-ion batteries; High power applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 183: 116240.
- [26] Colclasure A M, Dunlop A R, Trask S E, et al. Requirements for enabling extreme fast charging of high energy density Li-ion cells while avoiding lithium plating[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(8): A1412-A1424.
- [27] Parikh D, Christensen T, Hsieh C T, et al. Elucidation of separator effect on energy density of Li-ion batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(14): A3377-A3383.
- [28] Zhang X W, Wu Q P, Guan X, et al. Lithium dendrite-free and fast-charging for high voltage nickel-rich lithium metal batteries enabled by bifunctional sulfone-containing electrolyte additives[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 452: 227833.
- [29] Park S, Jeong S Y, Lee T K, et al. Replacing conventional battery electrolyte additives with dioxolone derivatives for high-energy-density lithium-ion batteries [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 838.
- [30] Hwang J Y, Myung S T, Sun Y K. Sodium-ion batteries: present and future [J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(12): 3529-3614.
- [31] Gu T T, Zhou M, Huang B, et al. Highly conjugated poly (N-heteroacene) nanofibers for reversible Na storage with ultra-high capacity and a long cycle life [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(38): 18592-18598.
- [32] Xu S F, Li H Y, Chen Y, et al. Branched conjugated polymers for fast capacitive storage of sodium ions[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(45): 23851-23856.
- [33] Hu Z, Liu Q N, Lai W H, et al. Manipulating molecular structure and morphology to invoke high-performance sodium storage of copper phosphide[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(19): 1903542.
- [34] Shi R J, Liu L J, Lu Y, et al. In situ polymerized conjugated poly(pyrene-4, 5, 9, 10-tetraone)/carbon nanotubes composites for high-performance cathode of sodium batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(6): 2002917.
- [35] Xu C, Chen Y, Shi S, et al. Secondary batteries with multivalent ions for energy storage[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 14120.
- [36] Yang X, Deng W Z, Chen M, et al. Mass-producible, quasi-zero-strain, lattice-water-rich inorganic open-frameworks for ultrafast-charging and long-cycling zinc-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(45): 2003592.
- [37] Zhou G, Paek E, Hwang G S, et al. Long-life Li/polysulphide batteries with high sulphur loading enabled by lightweight three-dimensional nitrogen/sulphur-codoped graphene sponge [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7760.
- [38] Yan M, Chen H, Yu Y, et al. 3D ferroconcrete-like aminated carbon nanotubes network anchoring sulfur for advanced lithium-sulfur battery [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(25): 1801066.

- [39] 邓南平, 马晓敏, 阮艳莉, 等. 锂硫电池系统研究与展望[J]. 化学进展, 2016, 28(9): 1435-1454.
- [40] Tang M, Wu Y C, Chen Y, et al. Correction: An organic cathode with high capacities for fast-charge potassium-ion batteries [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(5): 2423.
- [41] Li M H, Zhang S Y, Lv H Y, et al. [*n*]phenacenes: Promising organic anodes for potassium-ion batteries [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124 (13): 6964-6970.
- [42] Sun R, Hou S, Luo C, et al. A covalent organic framework for fast-charge and durable rechargeable Mg storage[J]. Nano Letters, 2020, 20(5): 3880-3888.
- [43] Yoo D J, Choi J W. Elucidating the extraordinary rate and cycling performance of phenanthrenequinone in aluminum-complex-ion batteries [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2020, 11(6): 2384-2392.
- [44] Sastre J, Chen X B, Aribia A, et al. Fast charge transfer across the  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  solid electrolyte/ $\text{LiCoO}_2$  cathode interface enabled by an interphase-engineered all-thin-film architecture[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(32): 36196-36207.
- [45] Yamauchi H, Ikejiri J, Tsunoda K, et al. Enhanced rate capabilities in a glass-ceramic-derived sodium all-solid-state battery [J]. Scientific Reports, 2020, 10 (1): 9453.
- [46] Bay M C, Wang M, Grissa R, et al. Sodium plating from  $\text{Na}-\beta''$ -alumina ceramics at room temperature, paving the way for fast-charging all-solid-state batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10 (3): 1902899.
- [47] 刘莹莹, 车超. 国外固态电池产业发展对我国的启示 [J]. 新材料产业, 2019(9): 22-25.
- [48] 毛可馨. 赣锋锂业拟 84 亿投建锂电池项目产业链上下游一片火热[N]. 证券时报, 2021-08-06.
- [49] Simon P, Gogotsi Y, Dunn B. Where do batteries end and supercapacitors begin? [J]. Science, 2014, 343 (6176): 1210-1211.
- [50] Pech D, Brunet M, Durou H, et al. Ultrahigh-power micrometre-sized supercapacitors based on onion-like carbon[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(9): 651-654.
- [51] Lee J S M, Briggs M E, Hu C C, et al. Controlling electric double-layer capacitance and pseudocapacitance in heteroatom-doped carbons derived from hypercrosslinked microporous polymers [J]. Nano Energy, 2018, 46: 277-289.
- [52] Qu H X, Zhang X J, Zhan J J, et al. Biomass-based nitrogen-doped hollow carbon nanospheres derived directly from glucose and glucosamine: Structural evolution and supercapacitor properties [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(6): 7380-7389.
- [53] Fu W B, Zhao E B, Ma R Y, et al. Anatase  $\text{TiO}_2$  confined in carbon nanopores for high-energy Li-ion hybrid supercapacitors operating at high rates and subzero temperatures[J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(2): 1902993.

(责任编辑:刘国金)