

基于 CiteSpace 关于国内外锂离子电池的研究综述



张岩^{1,*}, 齐贵涛²

¹青岛科技大学化工学院, 山东青岛 266045

²青岛大学机电工程学院, 山东青岛 266071

摘要: 作为当前最主流的可充电电池之一, 锂离子电池在能源储备、移动设备等领域具有广泛的应用前景。本文基于 CiteSpace 软件, 系统性地分析了国内外锂离子电池领域的研究现状和发展方向。通过对大量文献进行筛选、对文献的发文年份、发文量、发文国家以及机构进行分析, 再加上对关键词进行聚类分析等方式, 总结了锂离子电池的技术原理及特点、应用领域、研究热点、面临的挑战, 并提出了未来的发展方向。研究表明, 锂离子电池的研究在电池材料、热管理、循环性能、安全性等方面取得了重要进展, 其中涉及到的领域包括锂正极材料、锂负极材料、电池健康状态, 锂离子电池的循环性能等。虽然目前有关电池安全等一些领域取得了重要的突破, 但是, 一些突出问题依然存在。为了有效地避免这些问题, 本文针对当前面临的问题和困难, 提出了改进和突破的建议, 以推动锂离子电池技术的进一步发展, 推动中国“双碳”目标尽早实现。

关键词: CiteSpace; 国内外; 锂离子电池; 研究现状; 发展方向

DOI: [10.57237/j.jest.2023.05.001](https://doi.org/10.57237/j.jest.2023.05.001)

A CiteSpace-based Review of Domestic and International Research on Lithium-ion Batteries

Yan Zhang^{1,*}, Guitao Qi²

¹Chemical Engineering Institute, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China

²College of Electromechanical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China

Abstract: As one of the most mainstream rechargeable batteries, lithium-ion batteries have a wide range of applications in the fields of energy storage and mobile devices. Based on CiteSpace software, this paper systematically analyzes the research status and development direction of the field of lithium-ion batteries at home and abroad. By screening a large number of literatures, analyzing the year of issuance, the volume of issuance, the country of issuance, and the institution of issuance of the literatures, together with the cluster analysis of keywords, we summarize the technological principles and characteristics of lithium-ion batteries, the application fields, the research hotspots, and the challenges, and put forward the direction of future development. The results show that the research on lithium-ion batteries has made important progress in the areas of battery materials, thermal management, cycling performance, and safety, which involve areas such as lithium cathode materials, lithium anode

*通信作者: 张岩, 3509758771@qq.com

materials, battery health state, and cycling performance of lithium-ion batteries. Although important breakthroughs have been made in some areas related to battery safety, some unexpected problems still exist. In order to effectively avoid these problems, this paper puts forward the improvement and breakthrough suggestions for the current problems and difficulties, so as to promote the further development of lithium-ion battery technology, and to promote the early realization of China's "dual-carbon" goal.

Keywords: CiteSpace; Domestic and International; Lithium-ion Battery; Research Status; Development Direction

1 引言

自从 2020 年 9 月提出“双碳”目标后, 中国提倡绿色、环保、低碳的生活方式, 来加快降低碳排放的步伐。通过大力推进能源结构调整, 发展可再生能源来促进中国能源转型。锂离子电池作为一种重要的可充电电池, 已经广泛应用于移动通信、电动汽车、储能和医用等领域。新时期, 随着中国新能源汽车产业的快速发展, 锂离子电池将会成为未来电动车等设备的核心电池技术。随着社会经济的快速发展和环境保护意识的增强, 人们对于锂离子电池的研究和发展也越来越关注。

2018 年, 2 月 15 日, 财政部、工业和信息化部、科技部、发改委发布了《关于调整和完善财政补贴政策促进新能源推广应用的通知》。为新能源汽车提供补贴, 鼓励开发高耐久性和高能量密度的车辆。在新的补贴政策的推动下, 锂离子电池的使用频率迅速增加, 并且也推动了锂离子电池的结构性改革, 锂离子电池得到不断优化, 促使其向着更高容量、更安全方向发展。本文以 2018 年为研究起点, 运用 CiteSpace 软件对文件进行分析, 全面了解国内外锂离子电池领域的研究现状, 并提出未来的发展方向。锂离子电池的应用对中国双碳目标具有积极意义, 为提高能源利用效率, 降低碳排放, 实现双碳目标做出巨大贡献。

2 锂离子电池的储能技术原理及特点

2.1 锂离子电池储能技术原理

锂离子电池由正负极、电解液和隔膜组成。正极一般是由锂化合物(如锂钴氧化物钴酸锂(LiCoO_2))、

锰酸锂(LiMn_2O_4)、磷酸铁锂(LiFePO_4)等)制成, 负极则是由碳材料(如石墨)制成, 电解液一般是由锂盐和有机酸组成。隔膜主要用于隔离正负极, 防止直接接触而引发短路。常见的隔膜材料包括聚丙烯膜、聚乙烯膜等。电池充电时, 正极上的锂化合物会释放出锂离子, 这些离子会穿过电解液和隔膜, 最终到达负极。在负极上, 锂离子会被嵌入到碳层中, 从而实现电池的储存和供电功能。电池放电时, 负极上的锂离子会从碳层中脱离, 并返回正极。在正极上, 锂离子会与正极上的锂化合物结合, 从而释放出更多的电能。这个过程可以通过电解液中的锂离子在正负极之间来回运动来实现。锂离子电池可以多次充放电, 锂离子在正负极之间来回移动, 实现了对电能的重复利用。总之, 锂离子电池工作原理就是基于锂离子的释放和嵌入, 以及正负极之间的电解液流动。

2.2 锂离子电池的工作特点

锂离子电池的优点非常明显, 如高能量密度, 长循环寿命, 无记忆效应, 无污染, 轻量化等。随着环保意识的增强和政府政策的推动, 电动汽车市场需求量不断增长, 锂离子电池的高能量密度和长续航里程使得锂离子电池在电动汽车等领域脱颖而出。但是, 任何事物都有两面性。锂离子电池也存在一些缺点, 比如安全性风险, 能量密度限制, 成本高等。尽管锂离子电池具有较高的能量密度, 但进一步提升能量密度仍是较大的挑战, 这就限制了其在某些领域的应用。这些问题还需要技术改进来解决。

就表 1 可以看出, 锂离子电池相比于其他电池来说, 总体上具有极大优势的。

表 1 电池对比表格

电池指标	指标含义	铅酸蓄电池	镍镉电池	镍氢电池	锂离子电池
比能量	指单位重量对应的能量。同等电池质量下，比能量越高，电池容量越大	低（35-45wh/kg）	较低（55wh/kg）	较低（65wh/kg）	高（155wh/kg）
比功率	指单位重量对应的功率。同等电池质量下，比功率越高，电池功率越大	较低（150-400w/kg）	较低（>190w/kg）	高（800w/kg）	适中（315w/kg）
充放电次数	指电池能够实现的充放电次数，充放电次数越高，电池循环寿命越长	循环寿命短（300-500次）	循环寿命长（>2000次）	循环寿命较短（>500次）	循环寿命长（>1000次）
记忆效应	指电池重复的部分充电与放电不完全导致电池的容量减小，导致使用时间缩短的情况	无记忆效应	有记忆效应	有微弱的记忆效应	无记忆效应
环保性	电池自身的环保程度	生产与使用过程容易导致铅、镉等重金属污染问题，环保性差	生产与使用过程容易导致镉等重金属污染问题，环保性差	不存在重金属污染问题，环保性好	不存在重金属污染问题，环保性好

注：改表格来自锂电池行业现状、竞争格局、发展历程及未来趋势分析

3 可视化分析

本文利用 CiteSpace v 6.2R4 软件对锂离子电池进行分析，将其研究热点与发展趋势可视化。此次分析文献检索的时间跨度为 2018-2023 年，中文文献基于 CNKI 数据库，以“锂离子电池”为主要主题，“期刊”为文献类型，得到 3245 条文献。国外研究采用 Web of Science 核心合集数据库文献，以“TI=lithium ion battery”或“TI=Li-ion Battery”检索主题，来源期刊为 SSCI，语种国外“English”文献类型为“Article”，经去重、筛选，得到 115 条记录。

3.1 文献引用分析

进行文献引用分析是综述研究中一个重要的步骤，其主要目的是评估和分析相关研究领域内已有文献的质量、影响力和研究趋势。通过文献引用分析，可以了解该领域的现状、确定研究问题和目标、评估文献的可靠性和信度、确定合适的研究方法、揭示学术网络和学科发展动态等。总之，进行文献引用分析可以帮助研究者全面了解研究领域的现状和发展趋势，评估文献的质量和可信度，并为自己的研究问题、目标和方法选择提供参考和指导。通过分析文献引用数据，我们可以了解各个领域的研究进展，从而更好地把握当前的研究进展。因此，进行文献引用分析是非常必要的。

表 2 有关锂离子电池研究中英文文献被引频次统计表

序号	作者	论文名称	出版年	被引频次
1	安富强等	纯电动车用锂离子电池发展现状与研究进展	2019	151
2	杨杰等	锂离子电池模型研究综述	2019	137
3	李泓等	锂离子电池过往与未来	2020	112
4	李超然等	基于卷积神经网络的锂离子电池 SOH 估算	2020	84
5	韩啸等	锂离子电池的工作原理与关键材料	2021	77
6	谷苗等	基于综合型卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态估算	2019	76
7	李超然等	基于深度学习的锂离子电池 SOC 和 SOH 联合估算	2020	74
8	刘昱君	多种灭火剂扑救大容量锂离子电池火灾的实验研究	2018	73
9	任东生	锂离子电池全生命周期安全性演变研究进展	2018	56
10	李伟	基于扩展卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态估计	2019	54
11	Ciez, RE, et al	Examining different recycling processes for lithium-ion batteries	2019	339
12	Ren, DS	Investigating the relationship between internal short circuit and thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition	2021	180
13	Fernandes, Y	Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery	2018	137
14	Ziegler, MS	Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline	2021	125
15	Zhu, XH	LiMnO ₂ cathode stabilized by interfacial orbital ordering for sustainable lithium-ion batteries	2021	111

序号	作者	论文名称	出版年	被引频次
16	Song, JL	Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China	2019	105
17	Li, WF	Flammability characteristics of the battery vent gas: A case of NCA and LFP lithium-ion batteries during external heating abuse	2019	65
18	Zhang, GW	A Sustainable Process for the Recovery of Anode and Cathode Materials Derived from Spent Lithium-Ion Batteries	2019	64
19	Few, S	Prospective improvements in cost and cycle life of off-grid lithium-ion battery packs: An analysis informed by expert elicitations	2018	56
20	Dunn, J	Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles	2021	54

由表中数据可以看出,从中文文献中引用量最高的是安富强等人在2019年发布于《工程科学学报》的文章《纯电动车用锂离子电池发展现状与研究进展》。该文章被下载8027次,被引用151次,足以看出该文章在锂离子电池领域的影响力。文章主要基于锂离子电池产学研结合的角度,从电池正负极材料,电池设计和生产工艺来分析动力电池行业最新动态和科学研究的前沿成果,并结合市场需求与政策导向来阐述动力电池的发展方向和技术路线的实现途径[1]。被引用前十主要集中于锂离子电池健康状态(SOH)的估算、锂离子电池安全问题、锂离子电池荷电状态估计、锂离子电池的模型、工作原理及关键材料的研究。其中哈尔滨工业大学的杨杰简述了锂离子电池等效电路模型和电化学模型的研究进展[2],并根据《中国制造2025》所提出的要求,结合最新的建模理论,建立具有高精度、高适用性的锂离子电池仿真模型的研究方向进行了展望,并写出自己的见解。

引用最多的英文文献是2019年发布的Examining different recycling processes for lithium-ion batteries,该文章自发布以来被引用339次。这篇文章强调寻找和拓展锂离子电池的回收工艺,使用归因生命周期分析和基于过程的成本模型,来研究与生产和回收三种常见阴极化学物质(镍钴锰氧化物(NMC-622)、镍钴铝氧化物和磷酸铁锂)相关的温室气体排放、能源投入和成本[3],并对三种电池回收过程进行比较。

对文献进一步检索发现,在检索的所有中文文章中被引次数最多的前十个中国作者是张青松(2018,18)(2018代表首次发文章的年份,但不代表是该作者写的第一篇,因为本次统计时间区域的首年;18代表在本次统计年段内该作者发布的有关锂离子电池的文章数目。)、贺元骅(2018,18)、陈现涛(2019,18)、王莉(2018,15)、Tsinghua University 何向明(2018,14)、杨凯(2018,12)、程泽(2021,12)、韩冰雪(2018,12)、史永胜(2018,11)、郑岳久(2018,11)。

进一步发现国外被引作者最多的前十是WANG QS(2019,17,0.13)(2019代表首次发文章的年份,但

不代表是该作者写的第一篇,因为本次统计时间区域的首年;17代表在本次统计年段内该作者发布的有关锂离子电池的文章数目;0.13代表被引作者的中心度。)、FENG XN(2019,16,0.27)、HU XS(2019,15,0.2)、LI W(2019,14,0.07) LI J(2019,13,0.05)、SAHRAEI E(2019,11,0.06)、LIU BH(2021,11,0.03)、GAINES L(2021,11,0.,11)、RICHA K(2019,11,0.04)、REN DS(2021,9,0.05)。

通过文献检索后,运用CNKI的可视化分析功能分析可知中文文献发文前五个期刊是电工技术学报(38)、机械工程学报(29)、化工进展(22)、Science China. Materials(20)、科学通报(16)。由以上发布期刊可以看出锂离子电池与电工、机械、化工方面密切相关。

对外文文献用Citespace进行可视化分析得到前五个被引期刊分别是JPOWER SOURCES(74)、APPL ENERG(66)、RENEW SUST ENERG REW(52)、J CLEAN PROD(47)、J ENERGY STORAGE(47)。由以上被引期刊频次可以看出JPOWER SOURCES在锂离子电池研究领域具有重要的地位。

3.2 国内外发文量分析

由CNKI数据库可知,2018-2023年间,关于锂离子电池的研究的中文发文量总体呈上升趋势。由图可知,中国文献发文量在2021年达到历史峰点,以“锂离子电池”为主题搜索文献期刊达到3245篇,其中北大核心1799篇, EI 475篇, SCI 159篇。根据WOS核心数据库,外文关于锂离子电池的研究SSCI期刊来源文献在2018-2023年间总体上保持上升趋势,在2021年达到顶峰。且发文主要集中在中国(45; 0.28)(其中,45代表2018—2023年发文量;0.13代表节点中心度,下同)、美国(17; 0.28)、德国(14; 0.05)、英国(11; 0.23)、意大利(6; 0.19)埃及(5; 0.36)等国家,中国发文量领先其他国家,位列第一,中心度位列第二。往往中心度大的节点是数据网络的关键

节点，并且中心度越大，代表该节点越重要。由此可以看出，虽然中国在锂离子电池研究方面发文量位居世界前列，但是影响力低于发文量少的埃及。

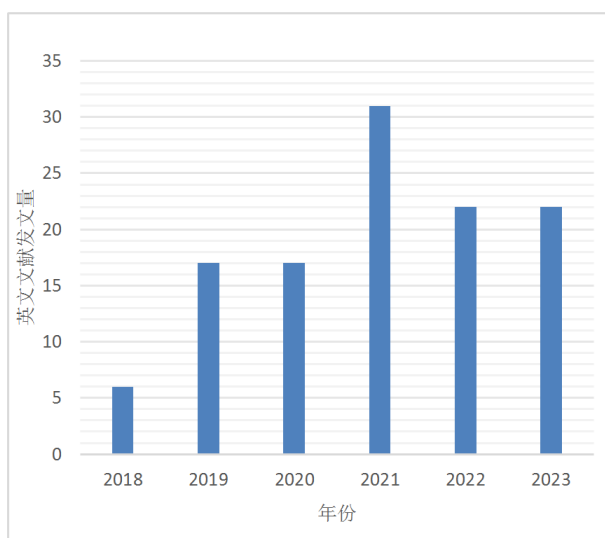


图 1 国外文献发文量

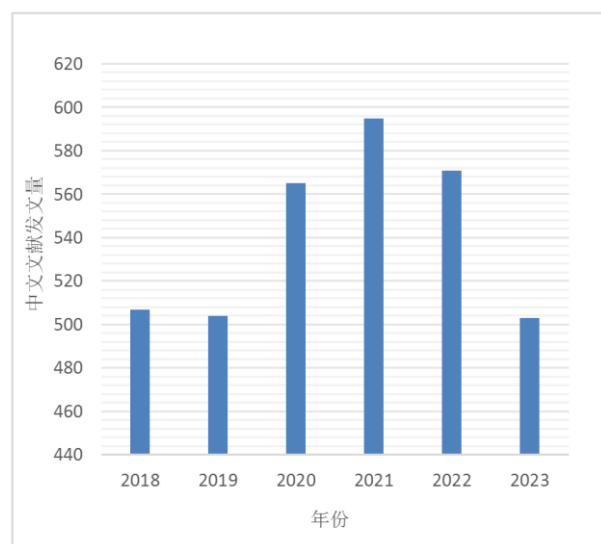


图 2 中国文献发文量

3.3 研究机构分析

通过 citespace 软件分析锂离子电池国内外研究机构发现，发表中文文章的主要研究机构有中国科学院大学、上海理工大学机械工程学院、哈尔滨工业大学化工与化学学院、中国科学院广州能源研究所、清华大学核能与新能源技术研究所、上海空间电源研究所、天津力神电池股份有限公司。Beijing Institute of Technology、Chinese Academy of Sciences、Egyptian Knowledge Bank

是英文文献的代表机构。由下图可以看出。中国科学院大学、清华大学核能与新能源技术研究院与其他机构具有密切的联系。而英文文献的机构分析中可以看出，锂离子电池研究机构 Chinese Academy of Science 与其他研究机构具有密切的合作关系。

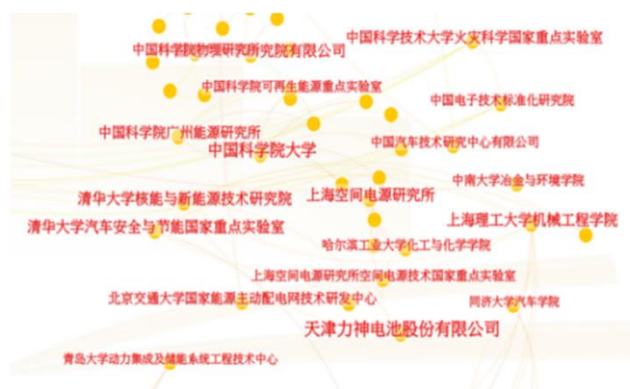


图 3 中国文献研究机构分析



图 4 国外文献研究机构分析

4 研究热点分析

4.1 关键词分析

关键词能够简明扼要地概括文章的主题和内容，帮助读者快速理解文章的核心观点，体现该领域的研究热点。对关键词进行分析，有利于更好地了解该领域的研究前沿，更好地把握该领域的研究方向。通过 citespace 分析，得到频次前 15 的关键词。其中，锂离子电池的正负极材料、热控制、状态以及安全是目前国内外共同研究热点。这有助于促进锂离子电池的创新性发展，提高锂离子电池的荷电状态以及健康状态，保障锂离子电池的使用安全性。

表 3 国内外高频关键词

序号	中文关键词	频次	英文关键词	频次
1	负极材料	255	lithium-ion battery	28
2	热失控	173	Electric vehicles	18

序号	中文关键词	频次	英文关键词	频次
3	正极材料	157	lithium-ion batteries	18
4	荷电状态	103	State	14
5	电动汽车	85	Performance	14
6	隔膜	83	Behavior	12
7	电解液	80	Cells	10
8	石墨烯	73	energy storage	9
9	健康状态	58	Cell	8
10	负极	55	thermal runaway	8
11	锂电池	54	Challenges	7
12	改性	54	Technology	7
13	安全性	52	circular economy	7
14	复合材料	42	renewable energy	6
15	电极材料	37	Safety	6

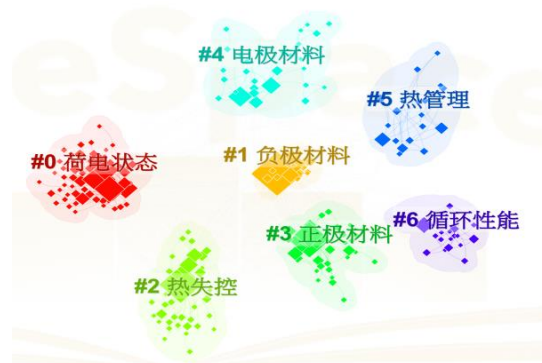


图 5 中文文献关键词聚类

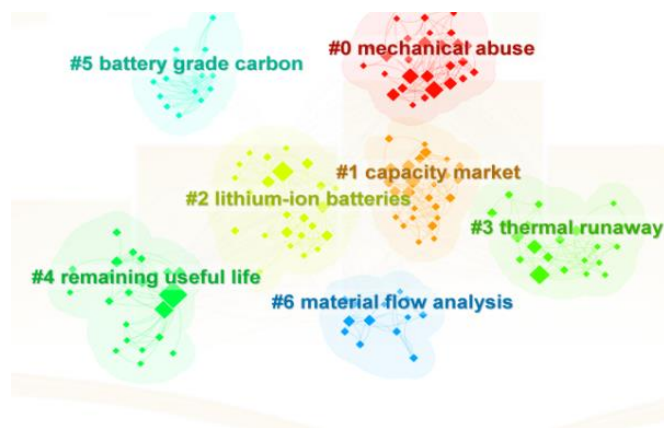


图 6 英文文献关键词聚类

4.2 关键词聚类分析

在分析文献的过程中，对关键词进行聚类分析十分重要。关键词聚类可以将文献中的关键词按照相似性分为不同的组别或主题，从而帮助我们提取出文献中的主题信息。通过关键词聚类分析可以观察到不同关键词之间的关系，了解它们在论文中的相互作用。聚类结果会形成一个关键词网络，其中具有密切联系的关键词会体现在一个主题中。这可以帮助我们把握当前领域的研究动态，了解现在研究热点，为进一步的研究提供指导。这有助于我们深入理解研究领域的相关概念和思想，更好地管理和归纳研究成果。基于 citespace 对文献的可视化分析得到中英文文献聚类各 7 个，其中中文聚类图谱

$Q=0.4795$, $S=0.7366$ （在聚类中， Q 值又叫模块值，区间为 $[0,1)$ ， $Q>0.3$ ，就意味着划分出来的结构是显著的； S 值是平均轮廓值， $S>0.5$ 聚类一般认为是合理的， $S=0.7$ ，聚类是高效率令人信服的， S 为无穷大，则聚类个数通常为 1），英文聚类图谱 $Q=0.6266$, $S=0.844$ ，由此说明此次聚类具有意义（见图 5、图 6）。

在 Citespace 对文献可视化分析的基础上，提取锂离子电池的研究热点，中文文献分别为从荷电状态、负极材料、热失控、正极材料、电极材料、热管理、循环性能等方面进行分析和总结；英文文献分别从锂离子电池、热失控、剩余使用寿命、电池级碳、物质流分析等发方面进行梳理和总结（具体见表 4）。

表 4 关键词聚类信息表

中文聚类	中文热点	英文聚类	英文热点
#0 荷电状态	健康状态; 电动汽车; 参数辨识; 温度	#0 mechanical abuse	internal short circuit; thermal response; cyclic aging; electrochemical impedance spectroscopy
#1 负极材料	石墨烯; 负极; 复合材料; 石墨	#1 capacity market	degradation cost; lithium ion batteries; abuse; multifactor learning curve

中文聚类	中文热点	英文聚类	英文热点
#2 热失控	安全; 储能; 负极材料; 回收	#2 lithium-ion batteries	life cycle assessment; circular business models; dynamic material flow analysis
#3 正极材料	改性; 隔膜; 静电纺丝; 磷酸铁锂	#3 thermal runaway	flammability; thermal hazard; state of health (soh); phase equilibria
#4 电极材料	安全性; 新能源; 巴斯夫; 高比能	#4 remaining useful life	state of health; lithium-ion battery; gaussian process regression; state of charge
#5 热管理	液冷; 仿真; 热管; 数值模拟	#5 battery grade carbon	surface coating; disordered carbon microstructure; pouch cells; waste tires
#6 循环性能	表面包覆; 元素掺杂; 综述; 失效机理	#6 material flow analysis	precipitation; impact; graphite and cathode materials; lib

注: #0 代表聚类 ID

时间线图, 可以清晰的看出每一个聚类之间的关系以及聚类中文献的历史跨度。分析锂离子电池的时间线图可以清晰的看出每一个聚类的在不同时间出现的关键词, 了解自己目前的研究在过去的历史尺度的发展情况。根据关键词的时间线图可以明确的看出某一时段的研究热点以及根据该研究热点分析未来的发展趋势。

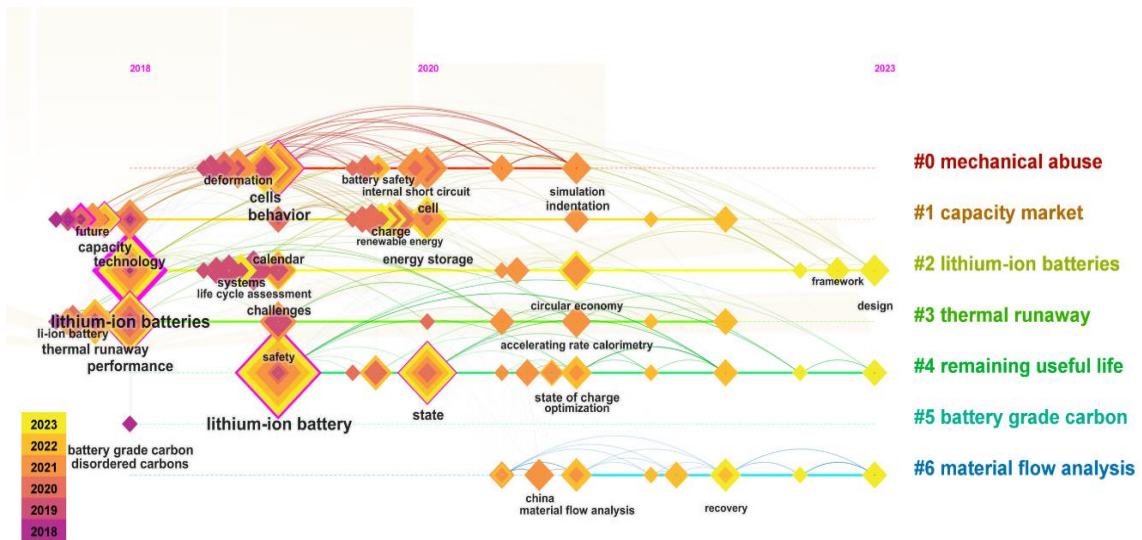


图 7 外文关键词聚类时间线图

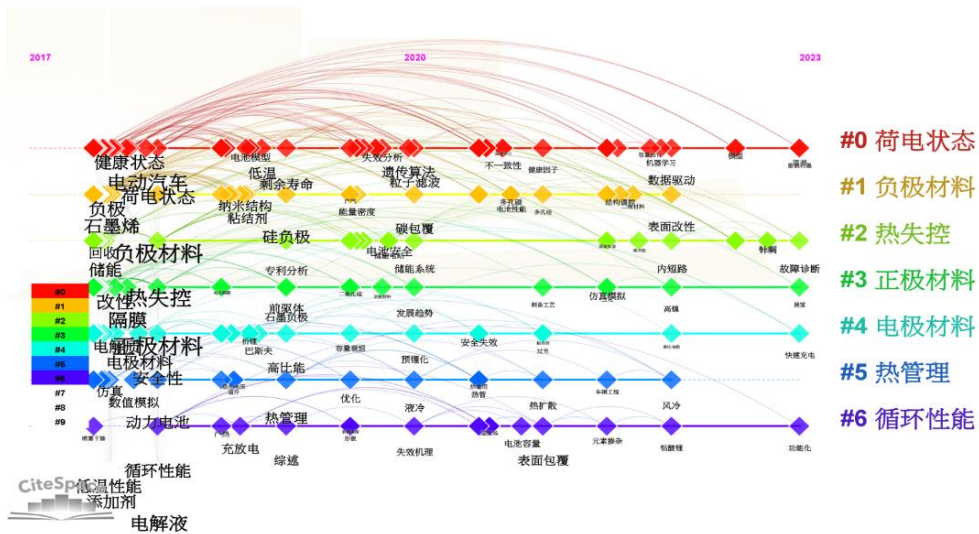


图 8 中文关键词聚类时间线图

5 锂离子电池研究现状

5.1 锂离子电池健康状态的研究

锂离子电池在工作过程中将发生容量衰退甚至恶化现象, 实现电池健康状态的有效估计是电池管理系统的关键挑战[4], 也对锂离子电池的使用和维护具有重要意义。电池健康状态是指电池在正常运行时的状态, 包括电池的容量、电压、温度等参数。通过有效估计电池健康状态, 可以延长电池的使用寿命, 提高电池的性能, 同时避免因电池故障导致的设备损坏或安全隐患。目前, 对电池健康状态的估计方法主要分为三类: 特征参数法, 基于模型的方法和数据驱动法[5]。

通过这三种估算方法, 可以有效地描述出电池老化的过程, 并且能够将电池老化与电池健康状态联系起来, 对电池健康进行有效估计。通过研究电池的健康状态, 可以深入了解电池的性能和寿命, 从而促进电池技术的进步。

5.2 锂离子电池热管理技术的研究

锂离子电池热管理非常重要, 高效的电池热管理技术对于锂离子电池的安全运行、长循环使用寿命以及整体成本的降低至关重要, 且对推动锂离子电池的大规模应用具有重要意义。目前, 锂离子电池几种主流的电池热管理技术有空气冷却、液体冷却、新型的相变材料冷却和热电冷却技术[6]。

近来, Amallesh T 等人发现两种新型微通道冷板(MCP)最适合用于高功率锂离子电池模块在高倍率放电时的热管理[7]。锂离子电池热管理技术是一个正在快速发展的领域, 需要材料科学家、工程师和研究人员共同合作, 不断探索新的技术和方法, 以提高锂离子电池的安全性和可靠性, 来满足不同用户的需求。

5.3 锂离子电池正极材料的研究现状

随着锂离子电池技术的快速发展, 锂离子电池产业迎来爆发式增长, 锂电正极材料是影响电池性能的关键因素之一[8]。目前常见的正极材料包括锰酸锂、钴酸锂、磷酸铁锂、钛酸锂、无序岩盐(DRX)材料[9]等。通过CiteSpace分析, 我们可以看到国内外对于锂正极材料的研究主要集中在锂离子电池正极材料安全性等方面。现在, 为了减少化石能源的应用, 促进新能源产业的发展, 正在进一步完善锂离子电池正极材料测试标准体系, 来保

障锂离子电池的安全与可持续发展。

5.4 锂离子电池负极材料的研究

对于锂离子电池而言, 电化学性能主要依赖于它们的电极材料, 电解液和隔膜等。相较于电解液和隔膜而言, 电池材料, 尤其是负极材料的研发是当前电池技术的首要关注点之一。锂离子电池阳极材料作为电池技术迭代的关键材料需要进一步突破[10]。目前, 有文章指出碳-钴氧化物复合材料[11]具有优异的电化学性能, 在锂离子电池中具有较大的适用性。只有深入研究锂离子电池的负极材料, 才能更好的了解其性能、结构, 不仅为锂离子电池的发展提供基础, 还能够推动新型材料和技术的应用。

5.5 锂离子电池循环性能的研究现状

随着现代社会的不断发展, 电动工具和电动汽车等电子产品的市场需求日益增长。锂离子电池作为这些设备的核心组件, 其循环性能的好坏直接关系到这些产品的性能和可靠性, 引起了国内外人们的广泛关注。因此, 研究锂离子电池的循环性能具有重要的理论和实际意义。目前, 锂离子电池在如何提高锂离子电池的充放电效率, 降低电池的成本, 提高电池的安全性能等研究领域已经取得了很大的进展, 但仍有许多问题需要进一步研究和解决。

6 锂离子电池的研究展望

通过citespace分析后, 在关键词聚类的基础上, 通过关键突变来发现研究领域的前沿与未来的研究方向。

2020年9月, 习近平主席在第75届联合国大会的一般性辩论上提出“中国要力争在2030年前实现碳达峰, 在2060年前实现碳中和”的目标[12], 以及2022年发布的《科技支撑碳达峰中和实施方案(2022-2030)》, 这意味着中国能源要面临结构性转化, 从化石能源向绿色低碳能源转型, 开发低碳、零碳工业流程再造技术。而随着经济的发展, 电子产品不断升级, 电动汽车也广泛应用于人们的生活, 而这些电子产品、电动汽车的应用却离不开锂离子电池为其提供强大的动力。由下图可以看出, 中国对锂离子电池研究在多个方面展开, 主要还是针对其电池容量、电池健康、荷电状态、正负极材料

以及电池安全等方面。2018-2020 年，人们比较关注循环寿命、静电纺丝、高电压、掺杂、专利、产业化、综述、粘接剂、比容量、容量、sei 膜、影响因素等。其中，粘接剂可有助于在碳材料上形成 SEI 膜，进而防止溶剂和盐离子与阳极反应，从而提高锂离子电池安全性与循环性能，提高电池寿命。而 2020 以后，为积极应对气候变化，很多国家和地区禁售燃油车的节奏加快，与此同时，各国加大推进新能源汽车，并为购买新能源汽车的用户给予大力度支持。而近年来，锂离子电池爆炸伤人事件也引起广泛关注，大部分因为内部短路，大电流放电产生大量热，温度升高烧坏隔膜，接着造成更大短路现象，使电解液分解成气体，内部压力升高，发生爆炸。这不得不使锂离子电池行业进行结构性改革，生产质量更好、适应性更好的锂离子电池。因此 2021-2023 人们更加关注相变材料、突变失效、环境温度、优化、健康因子、粒子滤波、遗传算法、电池容量，来对锂离子电池进行改良，提高锂离子电池的安全性。

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2017 - 2023
循环寿命	2018	2.76	2018	2020	
静电纺丝	2018	2.44	2018	2019	
高电压	2018	2.39	2018	2020	
掺杂	2018	2.01	2018	2019	
专利	2018	1.86	2018	2019	
产业化	2018	1.86	2018	2019	
综述	2019	3.58	2019	2020	
粘接剂	2019	2.57	2019	2020	
比容量	2019	2.15	2019	2020	
纳米结构	2019	2.11	2019	2021	
容量	2019	1.83	2019	2020	
sei膜	2019	1.79	2019	2020	
影响因素	2019	1.79	2019	2020	
相变材料	2020	2.59	2020	2021	
失效分析	2020	2.27	2020	2021	
环境温度	2020	1.94	2020	2021	
粒子滤波	2020	1.77	2020	2023	
遗传算法	2020	1.62	2020	2023	
优化	2020	1.62	2020	2021	
表面包覆	2021	2.69	2021	2023	
健康因子	2021	2.05	2021	2023	
电池容量	2021	2.02	2021	2023	
不一致性	2021	1.68	2021	2023	
多孔硅	2021	1.68	2021	2023	
制备	2018	1.64	2021	2023	

图 9 中文文献关键词突变

注：关键词突变图谱中 Begin 代表研究时间范畴内关键词突现的起始年份，End 表示关键词突现的结束年份，Strength 表示突现强度（关键词突现的强度代表其受关注的程度）。

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2018 - 2023
lithium ion battery	2018	1.21	2018	2019	
graphite	2019	1.47	2019	2020	
short circuit	2019	1.47	2019	2020	
calendar	2019	1.1	2019	2020	
internal short circuit	2020	1.54	2020	2021	
optimization	2021	1.1	2021	2023	
material flow analysis	2021	1.1	2021	2023	
state of charge	2021	1.1	2021	2023	

图 10 英文文献关键词突变

从图 7 可以看出，2018-2020 年国外锂离子电池的发展重视锂离子的电极材料以及自身性能。其突变型术语主要有 lithium ion battery、graphite、short circuit、calendar，这些关键词的突变强度分别为 1.21、1.47、1.47、1.1。由上图可以看出 graphite、short circuit、calendar 更像是在过渡期，锂离子电池研究前沿的过渡。2021-2023 年，分析上图可以得出这段时间的突变型术语主要有 internal short circuit、optimization、material flow analysis、state of charge，除 internal short circuit 外，其他在此阶段都具有稳定性。形象的看国外锂离子电池的研究热点为 optimization（优化）、material flow analysis（物质流分析）、state of charge（电荷状态）。

7 总结

本文主要利用 citespace 软件对国内外 2018-2023 年的 CNKI 和 Web ofscience 数据库的关于锂离子电池的文献进行分析，通过对文献引用、国内外发文量、研究机构、关键词进行可视化分析，得出以下结论：一、自从对燃油汽车进行限制以后，锂离子电池被广泛应用并且成为中外研究热点。从国际上看，有关锂离子电池研究的发文量最多的是中国和美国，但是中国文献的影响力低于发文较少的埃及。二、国内外的研究机构大多以高校和研究所为主，并且有密切的合作关系，这也形象的可以看出高校和研究所在推动科技进步的方面有着十分重要的作用。三、通过对国内外关键词进行分析，目前对锂离子电池的研究主要集中在优化锂离子电池的正负极材料以及电解液的组成，提高锂离子电池的容量，改善其荷电状态，提高锂离子电池的安全性。

通过对国内外锂离子电池领域的研究现状和发展方向进行综合分析，可以看到锂离子电池在电池材料、电池结构设计、电池性能优化等方面取得了重要进展。

锂离子电池在国内外都有广阔的发展前景。但是目前锂离子电池仍面临着一系列问题和挑战, 比如在极端环境条件下适应性不足、安全事故频发等, 就以上问题的出现, 锂离子电池还需要进一步研究与改进。第一、制备新型锂离子电池电极材料, 优化电解质体系, 提高储锂容量、电导率和循环寿命。开发具有合适组成和精巧结构的先进电极材料对于制备具有高能量密度和快速充电能力平台的锂离子电池至关重要 [13]。新型电极材料与优质电解质相结合, 从根部提升锂离子电池的工作能力与循环寿命。第二、设计新型 SEI 膜, 提高锂离子电池的安全性。当锂离子电池的 SEI 膜被破坏, 在充电就会发生碳和锂的化合物无法到正常的地方, 从而就会使电池内部产生巨大的能量, 最后容易产生爆炸的现象。所以, 开发一种不易被破坏的 SEI 膜十分重要。第三、加强锂离子电池废旧金属的回收和再利用技术研究。相较于其他类型的电池, 锂离子电池明显具备突出的优越性, 但随意废弃会产生生态环境污染的问题, 可以通过回收利用予以解决 [14]。了解锂离子电池内废旧金属的各种物理、化学性质, 通过一定的技术将其分离出来应用于其他领域, 既保护环境又实现了金属的综合性高效利用。总之, “双碳”目标下, 目前的大趋势就是锂离子电池应用越来越广泛, 努力提高锂离子电池的储能容量和安全性, 使锂离子电池得到可持续发展。

参考文献

- [1] 安富强, 赵洪量, 程志等. 纯电动车用锂离子电池发展现状与研究进展 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(01): 22-42.
- [2] 杨杰, 王婷, 杜春雨等. 锂离子电池模型研究综述 [J]. 储能科学与技术, 2019, 8(01): 58-64.
- [3] Whitacre F C E R. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries [J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 148-156.
- [4] 朱浩然, 陈自强, 杨德庆. 基于差分热伏安法和高斯过程回归的锂离子电池健康状态估计 [J]. 上海交通大学学报, 2023: 1-16.
- [5] MAB, YANG S C, ZHANG L S, et al. Remaining useful life and state of health prediction for lithium batteries based on differential thermal voltammetry and a deep-learning model [J]. Journal of Power Sources, 2022, 548: 232030.
- [6] 李嘉鑫, 李鹏钊, 王苗等. 锂离子电池热管理技术研究进展 [J]. 过程工程学报, 2023, 23(08): 1102-1117.
- [7] T. A, Lakshmi N N, Ruchitha G R. Numerical and experimental studies on novel minichannel cold plates for lithium-ion battery thermal management [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73(PC).
- [8] 张志勇, 包新军, 谢圣中. 锂离子电池正极材料成分分析与性能测试标准化建设现状及建议 [J/OL]. 化工矿物与加工, 2023: 1-16.
- [9] Ying C, Chun H. Realising higher capacity and stability for disordered rocksalt oxyfluoride cathode materials for Li ion batteries. [J]. RSC advances, 2023, 13(42).
- [10] 高函. PC6 掺杂作为锂离子电池阳极材料性能研究 [D]. 中北大学, 2023.
- [11] Suresh M, Baeksang Y, Dan N, et al. Candle soot-metal-organic framework-based hierarchical electrode as high-performance anode for Li-ion batteries [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2023, 949.
- [12] 何李丽, 张恒. “双碳”目标下我国能源转型路径 [J]. 上海节能, 2023(09): 1285-1294.
- [13] Pengxiang Z, Long J, Peishan L, et al. Tailored engineering of Fe_3O_4 and reduced graphene oxide coupled architecture to realize the full potential as electrode materials for lithium-ion batteries [J]. Journal of Colloid And Interface Science, 2023, 634.
- [14] 楼江鹏. 废旧锂离子电池中有价金属的回收技术进展 [J]. 天津化工, 2023, 37(05): 5-7.