

用于新能源汽车的锂离子动力电池研究进展^{*}

杨红斌^{**}

(长安大学科技处, 西安 710064)

摘 要:随着国内外新能源汽车产业的快速发展,作为核心部件的锂离子电池行业正在成为新的风口。本文列举了在锂电行业具有技术竞争优势的美国、日本、韩国、中国等国在锂离子动力电池方面的战略规划,分析了各国在技术路线上的差异。随后对锂电行业的发展趋势进行预测。研究发现,锂离子电池重点关注能量密度、成本、寿命;高镍多元材料将成为未来车用动力电池的主流正极材料体系;新体系固态锂离子电池将成为锂电行业新的研究方向。最后,从电池关键技术、市场发展、后续回收利用等三方面对我国锂电行业日后发展提出了几点建议。

关键词:锂离子电池;新能源汽车;国际竞争;发展趋势;建议

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2019.10.018

Competition Situation, Technology Trends and Enlightenment of Lithium-Ion Power Batteries in the Development of New Energy Vehicles^{*}

YANG Hongbin^{**}

(Department of Science and Technology, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The rapid development of new energy automobile industry home and abroad has created a huge market demand for lithium ion batteries, and the lithium ion battery industry is becoming a new outlet. This paper lists the strategic planning of lithium-ion power batteries in the development of new energy vehicles in the United States, Japan, South Korea, China and other countries with technological competitive advantages in the lithium battery industry, and analyzes the differences in the technical routes of countries. Subsequently, the development trend of the lithium battery industry is predicted. It is found that energy density, cost and life will become the focus of lithium-ion battery; positive electrode materials will continue to transition to multi-materials, especially high-nickel multi-materials will become the future vehicle power battery. The mainstream cathode material system; the new system solid-state lithium-ion battery has become a new research direction in the lithium battery industry. Finally, from the three key aspects of battery technology, market development, and subsequent recycling, we put forward some suggestions for the future development of China's lithium battery industry.

Keywords: Lithium-ion Batteries; New Energy Vehicles; International Competition; Development Trends; Suggestions

随着环境污染加剧和石化资源的过度开采, 地球正面临着严重的生态环境危机, 零排放、无污

^{*} 国家自然科学基金(41472220), 陕西省科技计划(2013TG-07)

^{**} E-mail: yhb1997@chd.edu.cn; Tel: 029-61105265

染、可持续发展的环境友好型新能源已经成为人们的普遍诉求。21 世纪伊始,各国在新能源技术领域的开发上便达成共识,新能源汽车应运而生,成为各国维持可持续发展的一个重要举措。2018 年全球新能源汽车销量高达 197.5 万辆,同比增长 68.2%,新能源汽车渗透率达 2.1%,2019 年 1~8 月全球新能源汽车累计销量 142.5 万辆,超过 2017 全年销售辆,渗透率达 2.4,再创历史新高,汽车电动化趋势明朗。

习近平总书记在给 2019 世界新能源汽车大会的贺信中指出:“当前随着新一轮科技革命和产业变革孕育兴起,新能源汽车产业正进入加速发展的新阶段,不仅为各国经济增长注入强劲新动能,也有助于减少温室气体排放,应对气候变化挑战,改善全球生态环境”^[1]。动力电池作为新能源汽车的核心部件,是其最为重要的组成部分,负责提供驱动力,其性能是否优良决定了新能源汽车在安全性、实用性和市场性的发展前景。动力电池中,蓄电池是纯电动汽车驱动系统中唯一的动力源,主要包括铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池和锂离子电池等。锂离子电池相比于其他类型蓄电池具有能量密度高、循环寿命长、自放率低、使用温度范围宽、无记忆性效应、成本较低、绿色环保等优势,是新能源汽车最主要的动力来源,也是目前为止应用于各类电动汽车中综合性能最好的动力电池之一。因此,锂离子电池自 1991 年投入市场以来一直备受瞩目^[3],迅速成为了各国抢占新能源汽车战略高地、实现弯道超越的重点。作为动力电池技术研究和产业发展的热点,在未来相当长的时间内,锂离子电池仍将是动力电池的主要技术途径之一。

在全球锂离子动力电池技术研发和产业化进程中,中、美、日、韩四足鼎立:美国在锂电基础原

料产业领域有着历史优势;日本在锂离子动力电池开发领域技术优势明显;韩国市场份额位居全球第一;中国的电池企业数量庞大、产能巨大,市场份额仅次于韩国^[4]。近年来,世界对于新能源领域技术的迫切需求为锂离子动力电池的技术研发提供了良好的市场前景,面对全球锂离子动力电池技术革新、产业转型,世界各国高度重视动力电池的发展,并基于国际国内形势变化、自身技术储备,依托新能源汽车的发展,纷纷针对锂离子动力电池研发采取了一系列措施。

我国是锂电产出大国,市场份额位居世界第一,有巨大的锂电发展前景。近年来我国动力电池产业快速发展,动力电池技术水平有了显著提升,但企业总体研发水平仍相对薄弱,特别是在电池能量密度、新型电池体系研发和原材料方面与国际先进水平仍存在一定差距。此外,我国锂电行业在快速发展的状态下也呈现出了产能结构性过剩的问题,且在成本控制上与国际先进水平还存在不少差距。

对我国而言,做好锂离子电池产业,有助于实现汽车领域的“弯道超车”,助力推动我国整个产业经济结构升级,实现中国经济的腾飞。本文将结合近年来全球主要国家动力电池战略规划及我国锂电行业发展现状,对车用锂离子动力电池研发的国际竞争和发展趋势进行分析,并从电池关键技术、市场发展、后续回收利用等方面指出对我国锂电行业未来发展的启示或建议。

1 主要国家战略规划及技术路线差异

1.1 主要国家战略规划

1.1.1 美国

2018 年,美国的电动汽车销量持续向好,但其动力电池技术参数的研究现状与理论结果还有

一段距离。2019 年,美国国务院的新战略“能源资源治理倡议”(Energy Resources Governance Initiative, ERGI)承认对可再生能源、电动汽车和电池储能技术的需求不断增长将创造对能源矿产前所未有的需要。美国能源署下属能源效率及可再生办公室发布的“电动汽车无处不在挑战蓝图”提出,将重点支持应用于插电式混合动力汽车的锂离子电池技术研发^[5],将如何提升电池能量密度、减少充电时间等参数作为下一阶段的关注点。美国能源署关于 2022 年电池及电源电子目标见表 1。此外,《美国燃料电池和氢能技术发展报告》^[6]等美国相关政府报告通过对行业未来形势的分析为各种研发组织和公司提供了技术支持;政府通过对消费者的补贴和税收减免间接地进锂电工业的发展;美国各州还根据各自的政策,积极为消费者提供相应的激励措施和政策,如加州要求在销售汽车时电动汽车需占一定比例,并对消费者给予一定的购车补贴^[7],弗吉尼亚州与企业合作,推出四个锂离子电池储能试点项目等。

与此同时,ERGI 表示,在锂电池回收领域美国将通过建立专业研发中心、开展平台竞赛等多种措施,不断研发新的先进技术,以推动全美锂电企业减少对外源材料的依赖,进一步扩大经济效益。

1.1.2 日本

2018 年 1~9 月的全球动力锂电池出货数据显示:日本松下的动力锂电池出货量为全球第一。日本拥有目前全球最大的锂电池企业,一直牢牢占据着锂电高端市场的主导地位,其锂电技术也是整个行业的风向标。近年来,日本在新能源汽车领域逐渐形成了以动力电池技术研发为核心的发展趋势,在锂电产业链中具有较高的研发与生产技术水平,其主要的锂电池企业也都具有丰富的技术经验和完备的生产体系。2006 年日本发布的《新一代车载电池发展报告》提出,要大力开展创新性锂离子电池的技术研发工作^[8]。2013 年颁布了的“二次电池技术路线图 2013”,大体规划了日本未来近 20 年的锂离子电池发展趋势(表 2)^[9]。此外,2019 年日本下一代新型动力电池研发计划要求在 2020 年研发出单体能量密度达 500 Wh/kg 的高能量密度锂电池。

1.1.3 韩国

韩国政府重视动力电池在电动汽车和储能方面的发展,并将锂离子电池作为战略支柱行业进行支持。目前韩国形成了以三星 SDI 和 LG 化学为代表的动力电池代表性企业,并在 2014 年跃居二次电池领域市场份额第一。在能量密度上,韩国锂电行业计划在2020—2022年单体能量密度

表 1 美国能源署关于 2022 年电池及电源电子目标

Tab. 1 US Energy Agency’s Battery and Power Electronics Targets for 2022

类型		单位	PHEV40 ¹⁾	AEV100 ²⁾	AEV300 ³⁾
电池系统	电池成本	MYM/KWh	190	300	100
	电池包比能	Wh/kg	150	180	225
	电池包能量密度	Wh/L	250	300	425
电驱系统	电池成本	MYM/KWh	5	14	4
	电池比功率	kW/kg	1.9	1.3	1.3
	电源电子比功率	kW/kg	16	12	16.7
	系统峰值效率	%	97	91	98

1)插电式混合动力电池,容量为 40 Ah;2)应用于纯电动汽车的车用锂离子电池,容量为 100 Ah;3) 应用于纯电动汽车的车用锂离子电池,容量为 300 Ah。

表 2 日本车用锂离子动力电池主要技术指标
Tab.2 Main Technical Indicators of Japanese Lithium-ion Battery for Vehicles

	项目	单位	2020 年	2030 年
功率型 电池	能量密度	Wh/kg	200	—
	功率密度	W/kg	2500	—
	成本	JPY/kWh	20000	—
	寿命	年	10 ~ 15	—
	循环周期	周期	4000 ~ 6000	—
能量型 电池	能量密度	Wh/kg	250	500
	功率密度	W/kg	~ 1500	~ 1500
	成本	JPY/kWh	20000	10000
	寿命	年	10 ~ 15	10 ~ 15
	循环周期	周期	1000 ~ 1500	1000 ~ 1500

能达到 300 Wh/kg,满足整车 500 km 的续航里程需求;在 2023—2024 年能量密度达到 330 Wh/kg,满足整车 600 km 的续航里程需求。未来韩国锂电行业将以绿色环保为理念,对锂电池关键技术和关键原材料等进行攻关,开展锂离子电池在电动汽车领域的应用拓展、评价及性能测试系统等领域的相关项目研究,打造完善的动力电池产业链^[10]。

1.1.4 中国

中国电动汽车行业的迅猛发展离不开国家对于新能源技术产业的大力支持,我国出台了多个关于锂离子电池产业规划、发展路线图的政策文件,对于我国电动汽车领域进行顶层设计。例如国家科技部在第十二个五年计划中发布了电动汽车重大项目,对动力电池产业的任务和重点提出了明确要求。《中国制造 2025》《汽车产业中长期发展规划》等一系列政策,也对我国汽车锂离子动力电池的发展提出了新要求。

《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》明确指出,锂离子电池应在安全性、能量密度、使用寿命等方面突破创新,要在关键电池材料、关键生产设备等领域搭建技术创新平台,寻求技术突破^[11]。国家设立新能源汽车重点研发专项,强

化了对新能源汽车整车能耗、续驶里程、电池性能、安全等方面的规范,提出了产品性能大幅提升、产品安全性满足大规模使用需求、产品规模合理有序发展等要求。

《节能与新能源汽车技术路线图》对动力电池在质量密度、成本等方面提出了明确的发展目标和重点。这些相关规划以及发展路线图的发布,为锂电行业提供了进一步的发展方向。同时,国家倾向于扶持高比能量动力电池,强调要大力推进新型电池结构体系的研究,抢占技术突破高台,实现电池材料技术突破性发展^[12]。这就要求加快推进动力电池生产技术创新,提升动力电池工程化和产业化水平。

1.2 各国锂离子电池技术路线差异

在技术路线选择上,中日美韩四国有着方向上的差异。根据正极材料的不同,锂离子动力电池主要有钴酸锂、改性锰酸锂、三元材料和磷酸铁锂等技术路线。在负极材料的选择上,石墨类材料因其性价比优势成为各国的首选材料,钛酸锂由于具有最优的倍率性能和循环性能,适合大电流快速充电,应用也较为广泛,在部分领域已经实现成熟的商业应用。除这些优点外,同为层状结构的三元正极材料由于其低成本,低毒性和更稳定的结构被广泛应用于动力电池领域。

具体而言,日本企业从钴酸锂材料,到锰酸锂材料,再到改性锰酸锂和三元材料的路线选择,演变较为多样。目前,日本的锂电研究重点在于高功率输出和高能量密度两方面,并且会通过进一步优化镍钴含量比例,开发继续引领高能量密度优势的新型材料,发展新的结构电池单体以提高其安全性和容量。开发出的正极材料有镍钴锰酸锂、镍钴铝酸锂等,并已经在规模化应用。同时,日本还重视创新性电池体系的开发,

且在全固态锂离子电池、锂硫电池、金属负极电池等方面均已取得较大突破。

韩国企业以锰酸锂材料路线为基础,近年来全面转向镍钴锰三元材料的研发。在三元材料的开发方面,韩国企业选择了将镍钴锰酸锂(NCM)与镍钴铝酸锂(NCA)齐头并进的发展方式,主要从高功率、高容量、低成本、高安全性四个方面开展锂电池技术研究,主要的发展方向是增加能量密度(增加镍含量)、降低成本(减少钴含量)和提高充电性能(引入人造石墨负极)。

美国锂电技术主要以磷酸铁锂电池为主,近年来锂电研发逐步向全固态电池、锂硫电池、锂空气电池新体系等进发,拟寻找新型电极材料和化学反应体系以谋求电池性能的提升和成本的降低。如使用新的高容量硅碳负极材料代替原有的石墨负极以提高能量密度,采用耐高压、环保的电解质解决电池安全性方面问题,研发新的化学反应体系来降低电池成本等。

我国企业目前主要存在磷酸铁锂电池和三元电池两种技术路线。国内中小型企业主要应用磷酸铁锂电池,技术较为成熟,其电池能量密度从2007年的90Wh/kg提高到2019年180Wh/kg^[13]。然而,磷酸铁锂电池能量密度提升空间有限,随着对动力电池能量密度要求的大幅提升,国内大型动力电池厂商如比亚迪、宁德时代等已经确定在电动乘用车产品上主要使用以镍钴锰三元、镍钴铝或其混合材料为代表的技术路线。

2 动力锂离子电池发展趋势

1) 能量密度、成本、寿命将成为锂离子电池的重点关注方向

从整个电池的发展体系上看,动力电池的能量密度较低、快充能力受限、成本较高,在电动车

的续航里程、充电体验以及购置成本等方面较燃油车仍有劣势,因此高能量密度和低成本是汽车动力电池一直努力的方向。中、日、韩、美等国的战略规划表明,未来电池行业将以能量密度、成本、循环寿命等作为动力电池的重点评价指标。目前各国对这些电池指标的要求和应用大致相近,但由于各国环保诉求、技术储备等差异,各国对于锂电未来发展方向的认识各有侧重:日本在电池能量密度方面寻求突破、建构“超级电池”梦想;韩国着力于通过电池体系材料的改进、实现电池各方面指标的整体优化;美国更关注单体电池成本;中国则将重点放在了能量密度和成本协调发展上。2020年将是锂离子动力电池技术大幅提升的阶段,锂离子电池比能量逐步提升、成本逐渐降低将成为锂电行业的发展趋势。与此同时,锂离子动力电池的行业竞争必将不断加剧。

2) 优良的正负极材料的保证了动力锂离子电池的优良性能

正极材料作为锂离子电池四大关键部分之一,是决定电池电压、能量密度以及安全性等的重要因素。目前,随着以钴酸锂(LCO)、镍钴铝酸锂(NCA)、镍钴锰酸锂(NCM)、磷酸铁锂(LFP)、钛酸锂(LTO)等正极材料相关技术突破,锂离子电池的各方面性能均有提升,且电池成本也在不断下降^[14]。未来,汽车动力电池的正极材料将不断向多元材料过渡,富镍材料将成为其中主流^[15]。高镍多元材料改变了混合材料中的镍钴比,增大了镍的用量,不仅大大降低了材料成本,而且显著提升了锂电池能量密度。随着其安全性能方面实现技术突破,高镍多元材料将会迎来在锂电正极领域大范围的推广和应用。锂电池负极材料是动力电池安全性的命脉,在锂离子电池负极材料中,当前主流使用的负极材料是碳

材料,天然石墨和人造石墨占据着 90% 以上的负极材料市场份额。其中人造石墨在倍率性能、循环寿命以及体积膨胀、防止电极反弹方面都好于天然石墨^[16]。因此,人造石墨市场渗透率将继续上升,并成为负极材料市场的主要增长点。同时,硅碳复合材料也将迎来发展的新浪潮。

3)新体系固态锂离子电池成为锂电行业新的研究方向

固态电池在安全性、高比能等方面具有更大的发展前景^[17],目前国内外相继开发出了高能量密度的固态锂离子电池、固态金属锂电池和锂硫电池^[18]。相较于传统的锂离子电池而言,固态电池在能量密度、安全性、原材料的选择上都更具优势:从能量密度方面看,固态电解质可以直接使用金属锂来做负极,减轻负极材料的用量,从而显著提高整个电池的能量密度;在安全性上,固态锂电池避免了有机溶剂作为电解质引发电解液燃烧问题,使得电池安全性更高;在原材料的选择上,由于固态锂离子电池负极是锂金属,故其正极材料可以选择不含锂的材料,选择范围宽,同时全固态锂电池有体积小和柔性化的特点,不但可应用于新能源汽车,也可以适应未来高精尖电子设备市场的需求。随着新能源汽车行业在安全性和性能方面要求的不断提高,新型固态锂离子电池将成为锂电行业新的研究方向。

3 启示与建议

1)掌握技术优势,推进新型锂离子动力电池反应体系的研究

世界环境问题的日益严峻向新能源汽车技术提出了更高的要求,研发一种高能量密度、高安全环保性的新体系锂离子电池迫在眉睫。锂离子电池向着高能量、高功率、长寿命、低成本的

方向发展,将有力推动电池结构的技术更新。未来五年是电池产业发展的关键时期^[19],应将重点放在对锂离子电池正负极材料、电解液、隔膜在内的新材料开发与应用上,同时应大力支持锂离子电池新体系的研究,从提高单体电池性能出发,抢占技术发展制高点,推动我国锂离子动力电池技术革新。

2)保持产出优势,培育一批具有自主创新和持续发展的动力电池龙头企业

中国是世界锂离子电池产出大国,市场份额位居全球第二^[20]。然而,近十年来,我国锂电行业迅速发展引起的生产规模快速扩张直接导致了我国电池行业产能过剩和产品同质化。反观韩国企业,具有保护锂离子动力电池专利技术的管理体系,使得韩国的锂电行业集中度高,培养了如三星 SDI、LG 化学和 SK 等具有全球竞争力的电池企业。同时,这些企业之间良性的市场竞争推动了韩国锂电产业的迅速发展。因此,将动力电池产业集中到龙头企业已成必然趋势。未来,我国应该实行锂电行业优胜劣汰制,淘汰一批低端企业,通过培育具有自主创新和持续发展能力的电池企业“领头羊”、统一电池标准,推动锂电池行业标准形成,从而促进我国锂电行业更高水平的发展。

3)推动锂电回收再利用,保障锂离子电池产业可持续发展

一般情况下,应用于电动汽车上的动力锂离子电池在使用一段时间后便不能满足汽车的动力需求,需定期更换。而更换下来的锂离子电池仍有 70% ~80% 的容量可使用^[21],若直接将其进行资源化回收则会造成极大浪费。与此同时,钴、镍、锂等动力电池原材料都是我国稀缺的战略资源。^[22]。因此,加强动力电池回收市场的发

展不仅有利于动力电池的回收利用,也有利于改善电池原材料稀缺的窘境,具有较高的经济价值和环境友好性。

在我国全面推行生态文明建设的大背景下,废旧动力电池回收和循环利用必然成为新能源汽车产业链的关键环节之一。然而,我国过去的动力电池缺乏统一标准,电池一致性差^[23],因此,在动力电池回收领域我国依旧处于萌芽期,尚未形成完整的产业链。为保证新能源汽车产业和生态环境保护的可持续开发,我国应从战略高度考虑和规划布局,并建立专门的再利用机构进行处置。妥善解决动力电池回收问题,同时加强技术和标准方面研究,制定相关标准,推动梯次利用,加快构建动力电池回收利用体系。

参考文献

- [1] 白星星. 国家主席习近平致贺信 2019 世界新能源汽车大会在海南博鳌举办[J]. 中国会展(中国会议),2019(14):19-19.
- BAI Xingxing. President Xi Jinping Congratulatory Letter 2019 World New Energy Vehicle Conference Held in Boao, Hainan[J]. China Exhibition(China Conference),2019(14):19-19.
- [2] LUKIC S M, CAO J, BANSAL R C, et al. Energy Storage Systems for Automotive Applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008, 55(6):2258-2267.
- [3] 赵越. 世界能源的发展趋势及对中国的启示[J]. 中国煤炭,2013,39(06):116-118.
- ZHAO Yue. The Development Trend of World Energy and its Enlightenment to China. China Coal [J]. 2013,39(06):116-118.
- [4] JAMES M. Energy Storage: Current Status and Future Trends [EB/OL]. (2013-09-26). <https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/events/20130926-eco-industries/20130926-eco-industries-miller.pdf>.
- [5] The USA Department of Energy. EV Everywhere Grand Challenge Blueprint [EB/OL]. (2014-02-08). http://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/everywhere_blueprint.pdf.
- [6] BAKKER S,LENTE H V, MEEUS M T H. Credible Expectations-the US Department of Energy's Hydrogen Program Role as Enactor and Selector of Hydrogen Technologies [J]. Technological Forecasting&Social Change,2012,79(6):1059-1071.
- [7] 高慧,杨艳,赵旭,等. 国内外氢能产业发展现状与思考[J]. 国际石油经济,2019,27(04):9-17.
- GAO Hui, YANG Yan, ZHAO Xu, et al. Development Status and Thinking of Hydrogen Energy Industry at Home and Abroad [J]. International Petroleum Economy,2019,27(04):9-17.
- [8] TAKESHI S. R&D High-performance Batteries for Next-generation vehicles in NEDO [EB/OL]. (2011-09-22). <http://www.itschina.org/UserFiles/2011-9/22/2011922155650100.pdf>.
- [9] New Energy and Industrial Technology Development Organization. NEDO Secondary Battery Development Roadmap 2013 (Battery RM2013) [EB/OL]. (2013-08-14). <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>.
- [10] 兰凤崇,李诗成,陈吉清,等. 基于专利分析的锂离子动力电池产业发展趋势[J]. 科技管理研究,2019,39(12):144-150.
- LAN Fengchong, LI Shicheng, CHEN Jiqing, et al. Development Trend of Lithium Ion Power Battery Industry based on Patent Analysis. Science and Technology Management Research,2019, 39(12):144-150.

- [11] 陈吉清, 翁楚滨, 兰凤崇, 等. 政策影响下的动力电池产业发展现状与趋势[J]. 科技管理研究, 2019, 39(09): 148-157.
- CHEN Jiqing, WENG Chubin, LAN Fengchong, et al. Status Quo and Trend of Power Battery Industry under the Influence of Policies [J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(09): 148-157.
- [12] 权利. 基于节能与新能源汽车技术路线图规划探究[J]. 内燃机与配件, 2019(23): 55-56.
- QUAN Li. Based on Energy-saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap Planning Exploration [J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2019(23): 55-56.
- [13] 李敦迈, 宋鹏发, 曲世谣. 电动汽车电池的应用前景与发展展望[J]. 南方农机, 2019, 50(07): 247-248.
- LI Dunmai, SONG Pengfa, QU Shiyao. Application Prospects and Development Prospects of Electric Vehicle Batteries [J]. Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(07): 247-248.
- [14] ARMAND M, TARASCON J M. Building Better Batteries[J]. Nature, 2008, 451(179): 652-657.
- [15] SMITH M. Batteries Versus Biomass as a Transport Solution[J]. Nature, 2009, 457(7231): 785-785.
- [16] NOH H J, YOUN S, YOON C S, et al. Comparison of the Structural and Electrochemical Properties of Layered $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$ ($x = 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ and 0.85) Cathode Material for Lithium-ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2013, 233(1): 121-130.
- [17] NITTA N, WU F, LEE J T, et al. Li-ion Battery Materials: Present and Future [J]. Materials Today, 2015, 18(5): 252-264.
- [18] 陈牧, 颜悦, 刘伟明, 等. 全固态薄膜锂电池研究进展和产业化展望[J]. 航空材料学报, 2014, 34(06): 1-20.
- CHEN Mu, YAN Yue, LIU Weiming, et al. Research Progress and Industrialization Prospects of All Solid-state Thin Film Lithium Batteries [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(06): 1-20.
- [19] SUN Chunwen, LIU Jin, GONG Yudong, et al. Recent Advances in All-solid-state Rechargeable Lithium Batteries [J]. Nano Energy, 2017(33): 363-386.
- [20] 刘彦龙. 中国锂离子电池产业发展现状及市场发展趋势[J]. 电源技术, 2019, 43(02): 181-187.
- LIU Yanlong. Development Status and Market Development Trend of China's Lithium Ion Battery Industry [J]. Power Supply Technology, 2019, 43(02): 181-187.
- [21] RONG Yaoguang, HU Yue, MEI Anyi, et al. Challenges for Commercializing Perovskite Solar Cells [J]. Science, 2018, 361(6408): 1214.
- [22] ZENG Xianlai, LI Jinhui, SINGH Narendra S. Recycling of Spent Lithiumion Battery: A Critical Review [J]. Critical Reviews in Environment Science and Technology, 2014, 44(10): 1129-1165.
- [23] 贾晓峰, 冯乾隆, 陶志军, 等. 动力电池梯次利用场景与回收技术经济性研究[J]. 汽车工程师, 2018(6): 14-19.
- JIA Xiaofeng, FENG Yilong, TAO Zhijun, et al. Research on the Economics of Power Battery Ladder Utilization and Recycling Technology [J]. Automotive Engineer, 2018(6): 14-19.