

电动汽车动力电池产业的发展

肖成伟¹, 汪继强²

1. 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384

2. 中国化学与物理电源行业协会, 天津 300384

摘要 动力电池作为电动汽车的核心关键零部件,其技术水平及产业发展对电动汽车的规模化应用意义重大。在研发方面,美国、日本、德国、韩国及中国分别制定了动力电池的国家发展规划,提出了动力电池技术的研发方向和相关指标;在产业方面,锂离子动力电池作为主流技术产品主要应用于纯电驱动汽车(包括纯电动汽车及插电式混合动力汽车)领域,中、日、韩3国电池企业是锂离子动力电池的主要供应商和竞争者,产品涉及不同的材料体系、不同的容量及不同的工艺路线,能量密度范围为89~245(W·h)/kg,并形成一定的产业规模;在产业未来发展趋势方面,提出了锂离子动力电池预期实现产业化的材料体系及电池单体的相关技术指标,指出了动力电池产业面临的问题,表明在装备、材料、系统集成以及评价方面需要进一步加强。

关键词 电动汽车;锂离子动力电池;产业发展

严峻的能源及环境挑战使交通能源动力转型成为全球共识,汽车技术迎来了动力系统电动化的时代,发展电动汽车已成为世界范围内汽车产业发展的共识和主攻方向。

动力电池作为电动汽车的能量储存装置,其性能的优劣直接影响电动汽车的应用,如安全性、能量密度、功率密度、寿命以及成本等。目前铅酸电池、镍氢电池、超级电容器及锂离子电池在电动汽车领域均有应用,而锂离子电池作为铅酸电池、镍氢电池、超级电容器的技术及产业升级换代产品,具有质量及体积功率密度高、能量密度高、自放电率低、无记忆效应以及环境友好等优点,因此成为目前研究及产业化的焦点和热点,其应用领域涵盖了混合动力、插电式混合动力以及纯电动汽车,发展前景广阔,市场需求巨大^[1]。

本文主要综述国内外的动力电池国家发展规划以及锂离子动力电池产业发展现状和趋势。

1 国家层面动力电池发展规划

世界主要发达国家均制定了国家层面的动力电池研究发展规划,大力支持动力电池技术和产业的发展。

1.1 美国动力电池国家规划

“电动汽车无处不在大挑战”(EV everywhere grand challenge)是美国能源部(Department of Energy)清洁能源大挑战计划的系列计划之一,旨在通过研究及产业等的多方协作实现技术的快速开发,在未来10年内实现纯电驱动汽车商业化(指纯电动汽车和插电式混合动力汽车),使纯电驱动汽车能够与常规燃油车展开竞争,并从经济性角度为普通消

费者所接受。为此,能源部所属的能源效率及可再生能源办公室(EERE, the Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)发布了“电动汽车无处不在大挑战蓝图”(EV everywhere grand challenge blueprint),聚焦于动力电池、电驱动系统、车辆轻量化、高效能量控制、充电设施五大领域进行技术开发,以实现纯电驱动汽车的性能提升和成本降低^[2]。“电动汽车无处不在大挑战”设置的动力电池系统技术指标如图1所示。该蓝图技术目标的实现,可使280英里续航里程的纯电动汽车在购车5年后,其购买及运行的总成本与类似大小尺寸的燃油车相比较^[3]。“电动汽车无处不在大挑战蓝图”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,2022年实现电池系统质量能量密度250(W·h)/kg,体积能量密度400(W·h)/L,功率密度2000W/kg,成本125美元/kW·h的目标。其中,短期目标(2012—2017)采用高容量正极材料、高电压电解液和高容量锡基或硅基合金负极材料,可使电池系统的质量能量密度由100(W·h)/kg提高到250(W·h)/kg,但在性能和寿命方面需要开展深入的研究工作;长期目标(2017—2027)则主要支持后锂离子电池技术的开发,如锂硫、锂空气、镁离子及锌空气电池等,在寿命、能量效率、功率密度以及其他重要性能参数等方面开展深入的研究工作,以实现其商业化应用。

为实现上述目标,美国能源部所属的能源效率及可再生能源办公室、能源先进研究项目办公室和科学办公室分工合作,共同推动车用动力电池的技术进步。能源效率及可再生能源办公室的车辆技术项目重点支持先进技术研发,通过推

收稿日期: 2016-02-03; 修回日期: 2016-02-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA11A234)

作者简介: 肖成伟,研究员级高级工程师,研究方向为动力电池、关键原材料及评价技术,电子邮箱: xiaochengwei@126.com

引用格式: 肖成伟,汪继强. 电动汽车动力电池产业的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 74-83; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.06.008

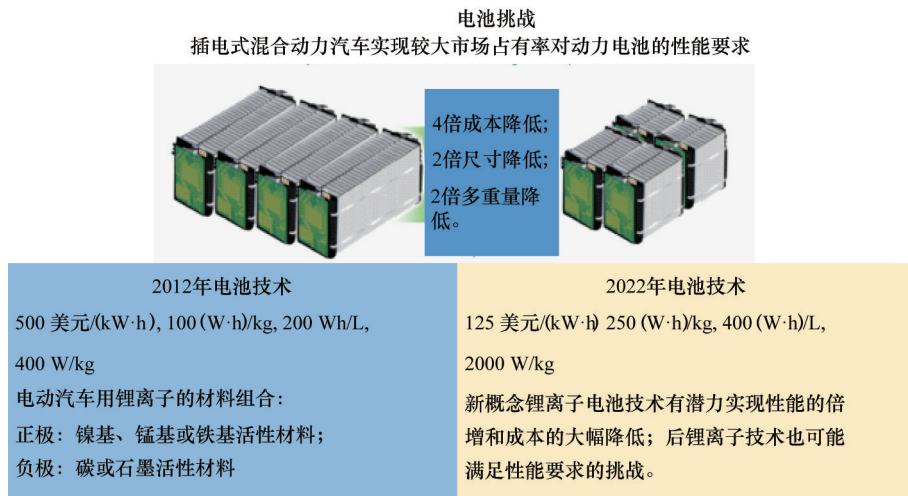


图1 “电动汽车无处不在大挑战”设置的动力电池系统技术指标

动力电池及其他电化学能源储存装置的技术开发,提高混合动力汽车及电动汽车的市场占有率。能源先进研究项目办公室支持了交通领域电能量存储电池技术项目(BEEST, Batteries for Electrical Energy Storage in Transportation)和车用下一代能量存储系统项目(RANGE, Robust Affordable Next Generation Energy Storage Systems),开发超越传统锂离子电池的高能量密度及低成本动力电池技术,主要包括先进电池体系、电池构造及制造工艺等,设置的电池系统层面指标为:质量能量密度达到200 (W·h)/kg,体积能量密度达到300 (W·h)/L,循环寿命达到1000次,成本不高于250美元/(kW·h)^[4]。科学办公室则通过基础能源科学项目(BES, Basic Energy Sciences Program)的能源储存研究联合中心

(JCESR, Joint Center for Energy Storage Research),采用新一代纳米科学工具,从原子及分子水平上发现、设计下一代能源储存技术,在5年内将能量密度提高5倍,成本降低到目前的1/5^[5]。对于交通领域用动力电池,设置的技术目标为:能量密度达到400 (W·h)/kg,功率密度达到800 W/kg,循环寿命达到1000次(80% DOD, C/5),日历寿命达到15年,成本达到100美元/(kW·h)^[6]。

1.2 日本动力电池国家规划

日本经济产业省(METI, Ministry of Economy, Trade and Industry)的报告中提出了车用动力电池的功率密度、能量密度及成本的目标值^[7],如图2所示。

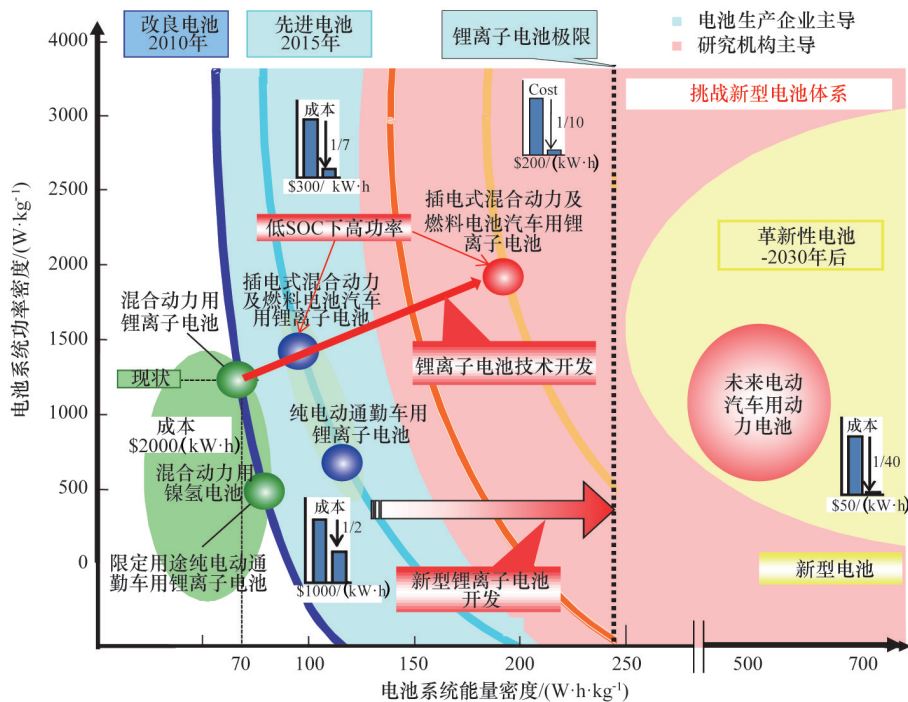


图2 日本经济产业省设置的动力电池系统相关参数目标值

日本经济产业省下属的新能源与工业技术开发组织(NEDO, New Energy and Industrial Technology Development Organization)牵头制定了较为详细的动力电池研发路线图和行动计划,重点对锂离子电池单体、模块、标准及评价技术进行研发项目的设置,开展技术攻关。

NEDO 于 2013 年发布了二次电池技术路线图 2013 (Battery RM 2013),提出了电动汽车用及固定式用二次电池的技术指标(表 1),其中对于车用动力电池的功率密度、能量密度及寿命等设置了明确的目标^[8]。

表 1 日本车用动力电池的主要技术指标

| 电池类别 | 要求 | 2012 年底 | 2020 年前 | 2030 年前 | 2030 年后 |
|-------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 功率型电池 | 功率密度/(W·kg ⁻¹) | 1400~2000 | 2500 | — | — |
| | 能量密度/(W·h·kg ⁻¹) | 30~50 | 200 | — | — |
| | 使用寿命/年 | 5~10 | 10~15 | — | — |
| | 循环寿命/次 | 2000~4000 | 4000~6000 | — | — |
| | 价格/(美元/(W·h)) | 1~1.5 | 0.2 | — | — |
| 能量型电池 | 功率密度/(W·kg ⁻¹) | 330~600 | ~1500 | ~1500 | ~1500 |
| | 能量密度/(W·h·kg ⁻¹) | 60~100 | 250 | 500 | 700 |
| | 使用寿命/年 | 5~10 | 10~15 | 10~15 | 10~15 |
| | 循环寿命/次 | 500~1000 | 1000~1500 | 1000~1500 | 1000~1500 |
| | 价格/(美元/(W·h)) | 0.7~1 | 0.2 | 0.1 | 0.05 |

注:相关指标为电池系统层面,美元与日元汇率按 1:100 计。

1.3 德国动力电池国家规划

德国政府为推动电动汽车的发展,制定了国家电驱动平台计划(NPE),通过电池灯塔研发项目推动在动力电池领域建立单体电池及电池系统的生产能力,在材料开发及电池技术、创新性电池设计技术、安全性评估及测试流程、电池寿命的建模与分析、大规模生产的工艺技术等五方面开展研发工作^[9],提出了动力电池系统主要性能参数(2014—2020):2014 年重量能量密度为 105 (W·h)/kg,成本为 400 美元/(kW·h),2017 年为 110 (W·h)/kg 和 300 美元/(kW·h),2020 年为 130 (W·h)/kg 和 280 美元/(kW·h)^[10]。德国电驱动平台设置的动力电池系统技术指标如图 3 所示。

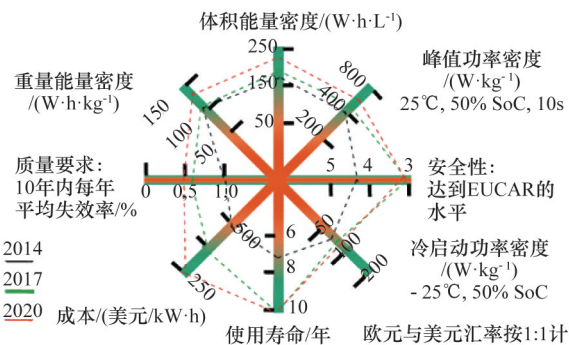


图 3 德国电驱动平台设置的动力电池系统技术指标

2014 年度的电驱动平台进展报告认为,在电动汽车市场加速阶段,核心部件仍然是动力电池系统,低成本高能量密

度将有助于推动电动汽车市场快速发展。锂离子电池系统的持续改进和后锂离子电池技术的开发是提升能量密度的关键,从而提高电动汽车的续航里程。基于技术的进步,2025 年电池系统体积能量密度将实现倍增,达到 280~300 (W·h)/L 的水平;同时随着大规模生产和电池化学体系的改进,电池系统的成本将降至 200 美元/(kW·h) 以下。未来有可能在不增加电池系统成本的情况下续航里程实现倍增达到 400 km,或者在目前续航里程 200 km 的情况下成本降低一半以上。

1.4 韩国动力电池国家规划

韩国知识经济部(MKE, Ministry of Knowledge and Economy)大力支持电动汽车用锂离子电池的研发工作,着重对锂离子动力蓄电池单体、模块、系统及关键原材料等进行攻关研究。支持的世界首要材料项目(WPM, world premier material),涉及纯电动汽车和储能两大应用领域,纯电动汽车侧重于能量密度,储能侧重于成本,从高功率、高容量、低成本、高安全性四方面开展相关技术研究。引导绿色社会的二次电池技术研发项目,下设锂离子电池关键材料、应用技术研究(针对储能及纯电动汽车领域)、评价与测试基础设施、下一代电池研究-2020 电池计划 4 个子项目,涵盖基础研究、关键原材料、测试评价及标准、动力电池应用,以期在韩国打造完善的动力电池产业链。

1.5 中国动力电池国家规划

科技部发布的第十二个五年计划电动汽车重大项目(2011—2015),对混合动力用高功率动力电池、纯电驱动用

高能量型锂离子动力电池以及下一代纯电驱动用新型锂离子动力电池和新体系电池进行了技术研发支持。中国科技部关于电动汽车重大项目的动力电池研发布局如图4所示。

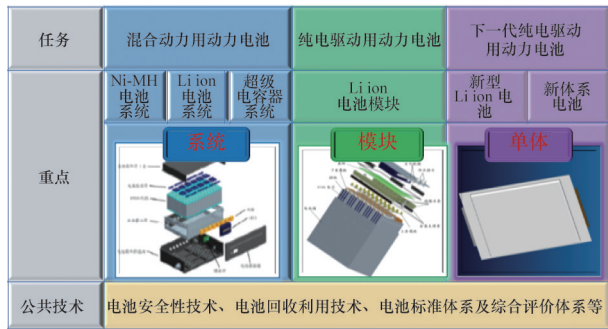


图4 中国科技部电动汽车重大项目动力电池研发布局

国务院发布的节能与新能源汽车国家规划(2012—2020),对动力电池路线图进行了大致规划,重点支持动力电池的产业化和电池模块的标准化。节能与新能源汽车国家规划设置的动力电池模块相关参数指标如图5所示。在国家第十三个五年计划中设立了新能源汽车重点研发专项(2016—2020),在动力电池方面从动力电池新材料新体系、高比能锂离子电池、高功率长寿命电池、动力电池系统、高比能二次电池、测试评估等六方面进行支持,提升锂离子电池的技术水平,能量密度达到300(W·h)/kg,实现批量应用;开展新型锂离子电池的技术开发,能量密度达到400(W·h)/kg;开展新体系电池的技术开发,能量密度达到500(W·h)/kg。

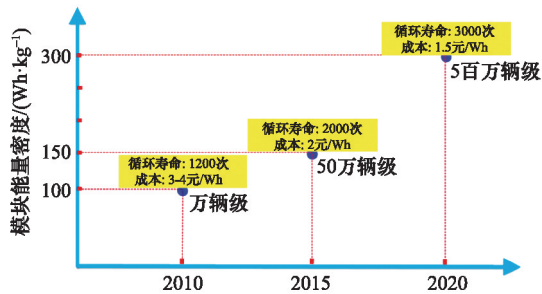


图5 中国节能与新能源汽车规划设置的动力电池模块相关参数指标

综上所述,以中、美、日、韩、德等为代表的各国形成产学研的开发体制,积极开展锂离子电池的技术攻关研究,主要表现为三个层次:锂离子电池的实用化技术(近期产业化技术研究);锂离子电池的高性能化技术(近中期性能提升研究);创新性电池大幅度的高性能化技术(中长期探索理论性研究)

2 动力电池产业发展概况

目前电动汽车用动力电池以锂离子电池产品为主流方

向,原因之一是因为锂离子电池是目前实用化动力电池中能量密度最高的电化学体系,具有较长的循环寿命及使用寿命,安全性不断改善;原因之二则是因为锂离子电池已处于大规模自动化生产阶段,成本不断下降。目前世界范围内形成了动力电池研发和产业化的三个集中区域,分别位于德国、美国和中日韩所在的东亚地区。较长时间以来,中、日、韩三国在消费类电子用小型锂离子电池领域处于技术、市场的绝对主导地位,锂离子动力电池的生产目前也主要集中在这三个国家。从技术与产业的角度综合来看,日本在技术方面依旧领先,韩国在市场份额方面超越日本,占据最大份额,而中国的电池企业数量最多,产能最大。

目前锂离子动力电池主要用于纯电动汽车及插电式混合动力汽车,但纯电驱动续航里程相对燃油车较短(纯电续航里程大多在200 km以内),动力电池成本依然较高,安全性有待进一步改善提高。因此,世界主要汽车生产国都在持续支持动力电池开展技术创新研究和扩大产业规模,特别是进一步提高动力电池的安全性、能量密度(从目前的110~200(W·h)/kg大致范围提升至300~350(W·h)/kg),进一步降低成本等。

着眼于对电动汽车产业未来发展的良好预期,世界各国动力电池企业均投资扩产,2011—2014年全球锂离子电池产业投资总额为100~120亿美元,2015年产能超过500亿W·h,特斯拉、比亚迪、时代新能源3家公司在2014—2017年的投资近70亿美元^[1]。同时,随着动力电池产能规模的扩大,动力电池价格将呈现快速下降的趋势,单体电池的价格将趋向于0.8美元/(W·h),电池系统的价格将趋向于1.2美元/(W·h)。全球动力电池系统价格的变化趋势如图6所示。

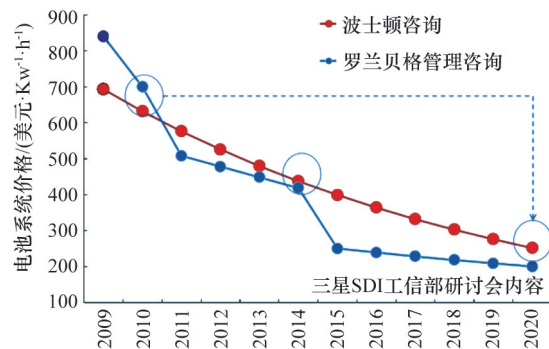


图6 全球动力电池系统价格的变化趋势

2.1 国际动力电池发展概况

日本车辆能源供应公司(AESC)主要为日产公司的聆风电动汽车配套动力电池,量产的能量型单体电池的容量为33.1 A·h,单体电池的能量密度达到157(W·h)/kg,电池系统的能量密度达到82(W·h)/kg,已累计配套超过18.5万辆聆风电动汽车。韩国LG化学量产的15 A·h能量功率兼顾型单体电池(实际容量达到15.9 A·h)能量密度达到155(W·h)/

kg, 26、29 A·h 能量功率兼顾型单体电池能量密度分别达到 170 和 161 (W·h)/kg(2015 年量产), 为通用沃兰达增程式混合动力汽车配套; 量产的 41 A·h 能量型单体电池能量密度达到 158 (W·h)/kg, 36、37 A·h 能量型单体电池能量密度达到 157 (W·h)/kg。日本三洋电机为丰田普锐斯插电式混合动力汽车量产配套的 21.5 A·h 单体电池, 能量密度为 110 (W·h)/kg。日本松下公司为美国特斯拉汽车公司量产配套的 3.1 A·h 1865 圆柱型锂离子电池, 单体电池的能量密度达到 233 (W·h)/kg, 电池系统的能量密度达到 127 (W·h)/kg, 目前松下公司将电池的容量提高到 3.4 A·h。韩国三星 SDI 为菲亚特等公司的纯电动汽车量产配套锂离子动力电池, 单体电池的容量为 64 A·h, 单体电池的能量密度为 132 (W·h)/kg, 2016 年推出 94 A·h 动力电池产品, 能量密度达到 170 (W·h)/kg; 为电动汽车配套的 3.1 A·h 1865 圆柱型电池, 能量密度达到了 245 (W·h)/kg, 同时在 2015 年推出针对电动汽车的 3.3 A·h 1865 圆柱型电池; 针对插电式混合动力汽车, 推出了 28 A·h 锂离子动力电池, 2016 年将推出更高容量的第二代

动力电池产品。东芝公司推出的 20 A·h 钛酸锂电池, 具有 8C 快速充电的能力, 6 min 可充电至 80% 容量, 能量密度达到 89 (W·h)/kg, 充电功率密度达到 2400 W/kg, 放电功率密度达到 2200 W/kg, 循环寿命超过 6000 次。日本锂能源公司量产的 50 A·h 锂离子动力电池, 单体电池的能量密度达到 109 (W·h)/kg。韩国 SKI 公司量产的 27.3、30.4 A·h 锂离子动力电池, 单体电池的能量密度达到 185 (W·h)/kg。

从目前各公司量产的锂离子动力电池产品看, 现有的锂离子动力电池可以分为两大类, 一类是采用小型标准圆柱型电池(以 1865 电池为代表, 其他类型如 2070、2665、3265、3270 等) 组装动力电池系统, 一般需要多串并联达到总电压与总容量需求, 单体电池的数量达到数千只, 连接复杂; 另一类则采用大容量动力电池, 最大容量可达数十 A·h 甚至更高, 采用铝塑膜封装或者是金属壳体焊接封装, 由于单体电池的容量大, 组合成模块和系统的单体电池数量大大减少, 连接相对简单。国际主流电池公司量产的动力电池产品相关信息如表 2 所示。

表 2 国际主流电池公司量产的动力电池产品相关信息

| 公司名称 | 电池容量/(A·h) | 材料体系 | | 应用领域 | 产能规模 |
|----------------|--------------|-----------------|------------|---------------------|---------------------------------------|
| | | 正极 | 负极 | | |
| 车辆能源供应公司(AESC) | 33.1 | 尖晶石锰酸锂为主, | 石墨 | EV(日产聆风) | 2.1 GW·h, 可配套 8.7 万辆纯电动汽车和 2 万辆混合动力汽车 |
| | 4.2 | 混合镍钴铝 | 硬碳 | HEV(日产 FUGA/CIMA) | |
| 东芝 | 20 | 镍钴锰 | 钛酸锂 | EV(三菱 i-MiEV); PHEV | 50 万只/月 |
| 松下(三洋电机) | 3.1 | 镍钴铝 | 石墨 | EV(Tesla 为主) | — |
| | 21.5 | 镍钴铝 | 石墨 | PHEV(丰田普锐斯插电式混合动力) | — |
| LG 化学 | 15.9, 25, 29 | 尖晶石锰酸锂为主, 混合镍钴锰 | 石墨为主, 混合硬碳 | PHEV(通用沃兰达) | 3.1 GW·h |
| | 36, 37, 41 | 镍钴锰为主, 混合尖晶石锰酸锂 | 石墨 | EV(雷诺 ZOE) | |
| | 3.1 | 镍钴锰 | 石墨 | EV | |
| 三星 SDI | 28 | 尖晶石锰酸锂为主, 混合镍钴锰 | 石墨 | PHEV(宝马 i3) | 1.12 GW·h(2013) |
| | 64 | 镍钴锰为主, 混合尖晶石锰酸锂 | | EV(菲亚特 500) | |
| | 3.1 | 镍钴锰 | 石墨为主, 少量硅 | EV | |
| PEVE | 5 | 镍钴铝 | 石墨 | HEV(丰田普锐斯混合动力) | — |
| 日本锂动力公司(LEJ) | 50 | 尖晶石锰酸锂为主, 混合镍钴锰 | 石墨 | EV(三菱 i-MiEV) | 2.4 GW·h, 可配套 15 万辆(2013) |

总体而言, 从应用于纯电驱车辆领域看, 国外动力电池公司量产配套的大容量动力电池产品(容量大于 10 A·h) 的能量密度大多为 110~180 (W·h)/kg, 部分产品可达 200 (W·h)/kg 左右; 小容量动力电池产品则以 1865 圆柱型电池为典型产品(容量为 3.1、3.4 A·h 等), 能量密度可达 230~250

(W·h)/kg 左右。快充型锂离子动力电池则以钛酸锂电池为代表产品(容量为 20 A·h), 能量密度达到了 89 (W·h)/kg。

2.2 中国动力电池发展概况

通过国家“863 计划”及新能源汽车产业技术创新工程等的大力支持, 动力电池的技术水平、产业化水平有了大幅

提升。

2.2.1 中国动力电池技术研发进展

在混合动力汽车用高功率动力电池领域,正极采用尖晶石锰酸锂、镍钴锰三元材料混合材料,负极采用人造石墨材料,研发的6 A·h锂离子动力电池,能量密度达到了81 (W·h)/kg,可实现30C充放电,50%SOC条件下输入输出功率密度大于4000 W/kg,5000次以上的循环寿命(70%剩余容量),-20℃低温条件下充放电性能优越,充放容量大于83%。

在纯电驱动汽车用动力电池领域(含能量型及能量功率兼顾型两类),主要技术进展是:正极采用高电压富锂层状锰酸锂和镍钴锰三元材料混合材料,负极采用人造石墨材料,研发的25 A·h能量型电池,能量密度达到159.6 (W·h)/kg,功率密度达到1101 W/kg,常温循环800周时容量保持率为91%;研发的25 A·h能量功率兼顾型电池,能量密度达到153.3 (W·h)/kg,功率密度达到1498 W/kg,常温循环770周时容量保持率为93%。正极采用磷酸铁锂材料,负极采用天然石墨、硬碳混合材料,研发的50 A·h能量型电池,能量密度

达到136.6 (W·h)/kg,功率密度达到1101 W/kg,常温循环800周时容量保持率为91%;研发的20 A·h能量功率兼顾型电池,能量密度达到106.5 (W·h)/kg,功率密度达到了1119 W/kg。正极采用尖晶石锰酸锂、镍钴锰三元材料混合材料,负极采用人造石墨材料,研发的25 A·h软包装能量型电池,能量密度达到162 (W·h)/kg;研发的35 A·h能量功率兼顾型电池,能量密度达到135 (W·h)/kg。正极采用镍钴锰三元材料,负极采用天然石墨/人造石墨/中间相碳微球等材料,开发的10、15、20、28、30、45 A·h的动力电池,能量密度达到180 (W·h)/kg;开发的2.6 A·h1865圆柱型电池,能量密度达到200 (W·h)/kg。

2.2.2 中国动力电池技术路线发展变化趋势

通过3个五年计划的大力支持,动力电池的材料体系选择呈现多元化,在提升安全性的前提下,寻求动力电池能量密度的大幅提升是必然趋势。中国动力电池技术路线多元化的变化趋势如图7所示。

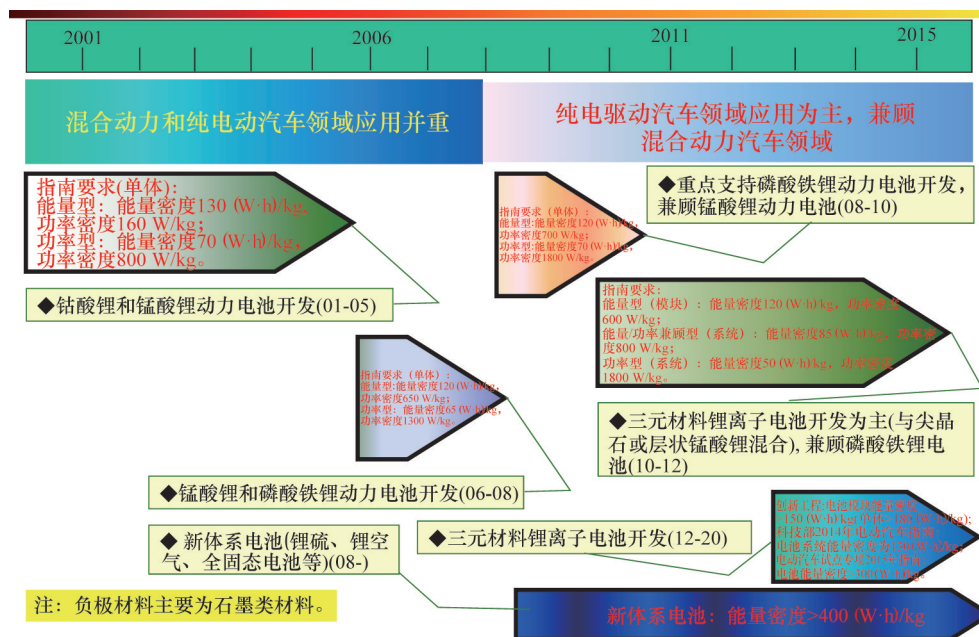


图7 中国动力电池技术路线多元化的变化趋势

2.2.3 中国动力电池产业化现状

目前已形成了包括关键原材料(正极、负极、隔膜、电解液等)、动力电池、系统集成、示范应用、回收利用、生产装备、基础研发等在内的完善的锂离子动力电池产业链体系,掌握了动力电池的配方设计、结构设计和制造工艺技术,生产线逐步从半自动中试向全自动大规模制造技术过渡。规模化生产的10、20、86、120、200 A·h铝合金方形壳体能量型磷酸铁锂动力电池能量密度为120~140 (W·h)/kg,规模化生产的5 A·h 3265圆柱型磷酸铁锂动力电池,能量密度达到130 (W·h)/kg;规模化生产的35 A·h能量功率兼顾型锰酸锂动力电池(混合镍钴锰三元材料)的能量密度达到135 (W·h)/kg;

规模化生产的6.5 A·h功率型锰酸锂动力电池(混合镍钴锰三元材料)的能量密度达到81 (W·h)/kg;规模化生产的2.6 A·h能量型三元材料1865圆柱型动力电池的能量密度达到200 (W·h)/kg左右,规模化生产的6、20、28、30、45 A·h等不同容量的能量型三元材料动力电池,能量密度达到180 (W·h)/kg左右。

在系统集成技术及能力方面取得较大进展和突破,采用磷酸铁锂材料的动力电池系统的能量密度达到90 (W·h)/kg,采用三元材料(1865圆柱型动力电池)的动力电池系统的能量密度达到110 (W·h)/kg,循环寿命超过了5年/10万km的质保要求。

目前,中国形成了珠江三角洲、长江三角洲、中原地区和京津区域为主的四大动力电池产业化聚集区域。据统计,近100家动力电池企业开展动力电池的研发及产业化工作,有近1000亿产业资金投入,形成近400亿W·h年产能,技术研发、产业化进展显著,有力地支撑了电动汽车产业的快速发展。2015年随着国内新能源汽车市场的快速发展,动力电池呈现出供不应求的局面,以比亚迪、时代新能源、力神、比克、沃特玛、国轩和盟固利等为代表的国内电池企业均在进行大规模的投资扩产。中国主流动力电池公司产能统计如表3所示。

表3 中国主流动力电池公司产能统计

| 编号 | 公司名称 | 2014年产能 | | 2015年可达 |
|----|---------|-------------|-------------|-------------|
| | | 容量/ 亿A·h | 能量/ 亿W·h | 产能/ 亿W·h |
| 1 | 比亚迪 | 12.5 | 40 | 100 |
| 2 | 天津力神 | 3 | 10 | 16.8 |
| 3 | 山东威能 | 3 | 10 | 16 |
| 4 | 中航锂电 | 2.5 | 8 | 15 |
| 5 | 合肥国轩 | 2.5 | 8 | 15 |
| 6 | 浙江万向 | 2 | 7 | 7 |
| 7 | 哈尔滨光宇 | 2 | 7 | 8.5 |
| 8 | 宁德时代新能源 | 4.28 | 13.7 | 17.3 |
| 9 | 中信国安盟固利 | 1 | 3.6 | 3.6 |
| 10 | 天津捷威 | 0.6 | 1 | 2 |
| 11 | 深圳沃特玛 | 8 | 25 | 50 |

2.3 中国动力电池产业未来发展趋势(至2020年)

商业化动力电池采用的正极材料主要有镍钴锰、镍钴铝三元材料^[12,13]、磷酸铁锂材料、富锂层状锰酸锂材料^[14-16]、尖晶石锰酸锂材料^[17,18]、高电压镍锰酸锂材料^[19-21]。正极材料综合性能对比如表4所示。商业化动力电池采用的负极材料主要有石墨^[22,23]、天然石墨、中间相碳微球、硬碳、软碳、硅碳^[24,25]及钛酸锂^[26]等。负极材料综合性能对比如表5所示。

从目前国内外量产的动力电池产品所选择的材料体系看,具有以下特点:

正极材料方面,主要以锰酸锂尖晶石型材料,以镍钴锰、镍钴铝为代表的层状材料,以及以磷酸铁锂为代表的橄榄石型结构材料为主。国外电池企业主要以锰酸锂、镍钴锰、镍钴铝或其混合材料为主。中国目前以磷酸铁锂材料为主,但该材料能量密度进一步提升的空间有限,随着对动力电池能量密度要求的大幅提升,向镍钴锰、镍钴铝或其混合材料的转换趋势明显。

负极材料方面,石墨类材料仍然是主流的选择(包括人造石墨、天然石墨及中间相碳微球)。随着对动力电池能量密度要求的大幅提升,合金类材料,尤其是硅碳复合材料成为当前及今后一段时间产业化及应用的重点方向。对于快充型动力电池,钛酸锂负极材料仍是首选材料,石墨与软碳的混合材料亦可满足要求。

隔膜材料方面,聚烯烃材料是主流的选择,包括聚丙烯及聚乙烯两大类,主要有单层膜和复合膜。为提高动力电池的安全性,对隔膜材料表面进行了表面改性处理,例如涂覆无机陶瓷涂层(如三氧化二铝或二氧化硅等),或有机涂层(如PVDF等);同时针对动力电池能量密度的进一步提升,

表4 正极材料综合性能对比

| 产品类别 | 技术指标容量/ (mA·h·g ⁻¹) | 发展方向 | 优点 | 缺点 |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 镍钴锰三元材料 | 180 | 提高低温性能,提高倍率性能,提高体积比能量,改善安全性 | 循环性能好,容量高,安全性优于钴酸锂,成本较低 | 压实密度低,倍率性能和低温性能比钴酸锂差,安全性能仍有待改善 |
| 镍钴铝三元材料 | 190 | 改善安全性,降低残碱含量,提高低温性能,提供体积比能量,提高倍率性能 | 容量高 | 安全性能差,加工性能差,表面pH高,成本高 |
| 尖晶石锰酸锂 | 110 | 改善高温循环性 | 技术及配套工艺成熟,倍率性能好,成本低,安全性能较好 | 比能量低,高温循环性能差 |
| 磷酸铁锂 | 160 | 改善倍率性能、低温性能和加工性能,降低成本 | 安全性能优异,循环性能优异 | 体积比能量低,加工性能差,低温性能不好 |
| 富锂层状锰酸锂 | 250 | 改善倍率性能、循环性能及电压衰减问题 | 电压高,容量高 | 与电解液的匹配,循环性能和倍率性能亟待改善 |
| 高电压镍锰酸锂 | 135 | 改善循环性能,降低成本 | 电压高,制造成本高 | 循环稳定性较差,现有电解液匹配性差 |

表5 负极材料综合性能对比

| 产品类别 | 技术指标容量 (mA·h·g ⁻¹) | 发展方向 | 优点 | 缺点 |
|--------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 天然石墨 | 360 | 低成本化,改善循环 | 技术及配套工艺成熟,成本低 | 比能量已到极限,循环性能及倍率性能较差,安全性能差 |
| 人造石墨 | 350 | 提高容量、低成本化、降低内阻 | 技术及配套工艺成熟,循环性能好 | 比能量低,倍率性能较差,安全性能差 |
| 中间相碳微球 | 340 | 提高容量、低成本化 | 技术及配套工艺成熟,倍率性能好,循环性能好 | 比能量低,安全性能较差,成本高 |
| 硬碳 | 430 | 提高首次效率,降低成本 | 可逆容量高,容量提升空间大,倍率性能好,安全性能好 | 技术及配套工艺不成熟,首次效率低,成本高,加工性能差 |
| 软碳 | 400(左右) | 提高首次效率,提高压实密度 | 具有快速充放电、良好的低温性能和循环性能,成本优势 | 体积比能量偏低,首次效率较低 |
| 硅碳 | 800(以上) | 提高首次效率,提高循环稳定性 | 原料丰富,容量高 | 首次放电效率低,导电性能较差,循环性能较差 |
| 钛酸锂 | 160 | 解决钛酸锂与正极、解液的匹配问题,提高电池能量密度 | 倍率性能优异,高低温性能优异,循环性能优异,安全性能优异 | 技术及配套工艺不成熟,成本高,能量密度低 |

隔膜材料的薄型化是发展趋势,聚乙烯材料将得到广泛应用。此外,一些新型隔膜材料,如聚酰亚胺、无纺布也得到了应用和考核验证。从提高能量密度和安全性角度看,在薄型化的聚乙烯材料基础上进行表面改性,涂覆有机或无机涂层(如三氧化二铝或二氧化硅无机涂层等,PVDF有机涂层等),是当前及今后一段时间的主流技术选择。

电解液方面,六氟磷酸锂依然是市场主流产品,在未来一段时间内无对其造成严重威胁的替代技术和产品出现。同时,一些新型的锂盐在市场上出现并得到了初步的应用,如双氟磺酰亚胺锂盐(LiFSI)。与传统的六氟磷酸锂电解质盐相比,双氟磺酰亚胺锂盐在溶剂中的溶解度及电导率较高,具有更宽的工作温度范围及更高的安全性,但由于其价格高、高温储存稳定性差、杂质含量控制难等问题,目前主要作为辅料添加剂与六氟磷酸锂配合使用。

动力电池2020年预期实现产业化的材料体系及单体电池技术指标如表6所示。

3 中国动力电池产业化发展面临的问题

总体而言,中国锂离子动力电池技术与国外先进水平差距不大,但电池面向应用的研究与开发工作相对薄弱,电池集成技术水平不高,产业技术创新能力不足,产品标准化工作应进一步加强。

1) 设备及材料与国外的差距。中国锂离子电池的产业链已初具规模,但结构仍不完善,锂离子电池设备与原材料的技术水平总体上仍落后于国外先进水平,部分核心装备及原材料还完全依赖进口。近几年来锂离子电池国产装备在技术和市场方面取得了长足的进步,但与国外先进生产装备

相比,仍存在精度差、自动化程度低,无法满足高一致性、高效率锂离子动力电池大规模生产的需要等诸多问题,生产装备的某些关键零部件依赖进口。由于电动汽车对动力电池质量水平要求高,需求量巨大,成本竞争剧烈,采购、安装新的先进自动化设备是必然的选择,国产化问题不解决,对中国锂离子电池技术与产业发展将产生制约。目前中国锂离子电池关键原材料生产企业众多,产品技术及质量水平良莠不齐,关键正、负极等材料整体水平落后于国外厂商,大多数企业处于模仿跟随的阶段,通过低价方式占据市场;少部分企业有着较强的自主创新能力,在行业内占有一席之地,并成为国内外顶级锂离子电池生产企业的合格供应商。在锂离子电池用高性能隔膜及铝塑包装膜等领域尚未完全实现国产化。关键原材料的缺失将导致中国锂离子电池制造的原材料命脉控制在外国企业手中,制约中国锂离子动力电池的发展。此外,中国锂离子电池产业缺少核心专利,目前锂离子电池产业相关的专利以及核心技术被日本、美国以及韩国掌握。中国锂离子电池产品在出口时会经常面临知识产权的问题,阻碍了中国锂离子电池参与国际竞争。

2) 动力电池系统集成技术与实用化的差距。目前影响电动汽车推广应用的主要因素包括锂离子动力电池的安全性和使用成本,除了将电池本体的安全性、寿命及一致性进一步提升外,通过系统可靠性设计、可靠的电池管理系统设计,同时合理设计电池系统在电动汽车上的安装位置(安全区位置),以确保电池的安全使用,并提供良好的性能,达到延长电池使用寿命的要求。由于中国大型锂离子电池企业大多具备电池技术的优势,缺乏机械、电与热融为一体的锂离子电池系统设计优势,也没有深入的电池管理系统及电子

表6 动力电池预期实现产业化的材料体系及单体电池技术指标(2020年)

| 正极材料 | 负极材料 | 隔膜材料 | 电解质盐 | 单体电池能量密度/ (W·h·kg ⁻¹) | 实现的可能性 |
|-------------------|------------|-------------------|--------------|--------------------------------------|--|
| 磷酸铁锂 | 石墨 | PP为主,部分采用涂层膜 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 110~155 | 已实现商业化,持续应用(EV, PHEV及储能等) |
| 锰酸锂为主,混合镍钴锰或镍钴铝 | 石墨 | PP和PE均有采用,部分采用涂层膜 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 120~160 | 已实现商业化,持续应用(EV, PHEV及储能等) |
| 镍钴锰(333或532型) | 石墨 | PE为主,部分采用涂层膜 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 160~200 | 大容量电池产品实现小批量应用,小容量电池产品(如1865)实现了规模化应用 |
| 镍钴锰(333或532型) | 钛酸锂或石墨混合软碳 | PP和PVDF | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 80~140 | 已实现商业化(主要为快充领域),持续应用(EV, PHEV及储能等) |
| 镍钴锰(622或811型)或镍钴铝 | 石墨 | PE为主,薄型化和表面涂层改性 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 200~250 | 大容量高能量密度电池产品开发过程中,小容量或较低能量密度产品实现了规模化应用(如1865等) |
| 镍钴锰(622或811型)或镍钴铝 | 硅碳 | PE为主,薄型化和表面涂层改性 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 250~300 | 开发过程中,是研发和产业化重点和热点 |
| 高电压镍锰酸锂 | 石墨 | PE为主,薄型化和表面涂层改性 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 200~240 | 开发过程中 |
| 富锂层状锰酸锂 | 石墨 | PE为主,薄型化和表面涂层改性 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 220~280 | 开发过程中 |
| 富锂层状锰酸锂 | 硅碳 | PE为主,薄型化和表面涂层改性 | 六氟磷酸锂,功能性添加剂 | 280~400 | 开发过程中 |

注:PE为聚乙烯;PP为聚丙烯;PVDF为聚偏氟乙烯。

控制技术研发能力,因此总体而言中国在动力电池系统集成技术方面与国外有较明显的差距。

3) 动力电池系统评价力度及深度不够。通过国家财政补贴进行新能源汽车的大规模示范,是促进新能源汽车产业化的重要手段。无论是整车企业还是动力电池企业,在电池系统装车之前,需要对电池系统进行全面、综合性的考核评价,但目前考核力度及完整性还有很大欠缺,示范运营代替了部分动力电池系统的台架试验和整车考核试验,如何在安装之前检查其技术参数、运行条件是否满足设计与应用要求,仍然是一个重要问题。具备综合的评价手段,就可以深入开展动力电池的试验评价,及早发现问题,及时予以改进。同时可以在相同条件下,评价、比较不同动力电池系统的特点。

4) 动力电池市场竞争加剧。随着韩国LG化学及三星SDI公司在国内动力电池合资企业的投产,同时随着国内动力电池企业产能的快速扩大,动力电池产品的价格将呈现快速下降的趋势,动力电池市场的竞争将日趋激烈。

4 结论

动力电池作为电动汽车的核心零部件,近几年在产业化方面发展迅速,有力地支撑了电动汽车产业的发展。为满足汽车产业及普通消费者对长续航里程电动汽车的迫切需求,新型锂离子电池及相关材料技术得到了高度关注,可以预期相关技术将取得长足进步并实现规模应用。动力电池将随着电动汽车的快速发展,迎来爆发增长的黄金期。

参考文献(References)

- [1] Armand M, Tarascon J M. Building better batteries[J]. Nature, 2008, 451(179): 652-657.
- [2] The USA Department of Energy. EV everywhere grand challenge blueprint [EB/OL]. [2015-10-28]. http://www.energy.gov/sites /prod/ files/2014/02/ f8/everywhere_blueprint.pdf.
- [3] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy Under the USA Department of Energy. About EV everywhere[EB/OL]. [2015-10-28]. <http://www.energy.gov/eere/vehicles/ev- everywhere- grand- challenge- does-10-year-vision-plug-electric-vehicles>.
- [4] The Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E). BEEST

- program overview[EB/OL]. [2015-10-28]. sites/default/files/documents/files/BEEST_programoverview.pdf.
- [5] George Crabtree. The joint center for energy storage research: A new paradigm for battery research and development[C]// Proceedings of Physics of Sustainable Energy III: Using Energy Efficiently and Producing It Renewably, 2014. Berkeley CA, USA: AIP Conference Proceedings, 2014: 1652-1660.
- [6] James Miller. Energy storage: Current status and future trends[EB/OL]. [2015-10-28]. https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/events/20130926-eco-industries/20130926-eco-industries-miller.pdf.
- [7] Takeshi Sato. R&D high-performance batteries for next-generation vehicles in NEDO[EB/OL]. [2015-10-28]. http://www.itschina.org/UserFiles/2011-9/22/2011922155650100.pdf.
- [8] New Energy and Industrial Technology Development Organization. NEDO secondary battery development roadmap 2013 (Battery RM2013) [EB/OL]. [2015-10-28]. http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf.
- [9] Nationale Plattform Elektromobilität. Interim report of the national platform for electric mobility[EB/OL]. [2015-10-28]. http://www.bmw.de/English/Redaktion/Pdf/electro-mobility-report,property=pdf,bereich=bmw2012,sprache=en,rwb=true.pdf.
- [10] Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Technology roadmap energy storage for electric mobility 2030[EB/OL]. [2015-10-28]. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/en/Trm-esem-2030_en_web.pdf.
- [11] Christophe Pillot. Battery market development for consumer electronics, automotive, and industrial: Materials requirements and trends[EB/OL]. [2015-10-28]. http://www.avem.fr/docs/pdf/Avicennediapoxining.pdf.
- [12] 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.
- [13] Fu F, Xu G L, Wang Q, et al. Synthesis of single crystalline hexagonal nanobricks of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ with high percentage of exposed {010} active facets as high rate performance cathode material for lithium-ion battery[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(12), 3860-3864.
- [14] Thackeray M M, Kang S H, Johnson C S, et al. Li_2MnO_3 -stabilized LiMO_2 ($M = \text{Mn, Ni, Co}$) electrodes for lithium-ion batteries [J]. Journal of Materials Chemistry, 2007, 17(30): 3112-3125.
- [15] Armstrong A R, Holzapfel M, Novak P, et al. Demonstrating oxygen loss and associated structural reorganization in the lithium battery cathode $\text{Li}[\text{Ni}_{0.2}\text{Li}_{0.2}\text{Mn}_{0.6}]\text{O}_2$ [J]. Journal of the American Chemical Society, 2006, 128(26): 8694-8698.
- [16] Qiao Q Q, Zhang H Z, Li G R, et al. Surface modification of Li-rich layered $\text{Li}(\text{Li}_{0.17}\text{Ni}_{0.25}\text{Mn}_{0.58})\text{O}_2$ oxide with Li-Mn- PO_4 as cathode for lithium-ion battery[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(17): 5262-5268.
- [17] Thackeray M M, David W I F, Bruce P G, et al. Lithium insertion into manganese spinels[J]. Material Research Bulletin, 1983, 18(4): 461-472.
- [18] Thackeray M M. Structural considerations of layered and spinel lithiated oxides for lithium ion batteries[J]. Journal of Electrochemical Society, 1995, 142(8): 2558-2563.
- [19] Julien C M, Mauger A. Review of 5-V electrodes for Li-ion batteries: Status and trends[J]. Ionics, 2013, 19(7): 951-988.
- [20] Liu D, Zhu W, Trottier J, et al. Spinel materials for high-voltage cathodes in Li-ion batteries[J]. RSC Advances, 2014, 4(1): 154-167.
- [21] Chen Z X, Qiu S, Cao Y L, et al. Surface-oriented and nanoflake-stacked $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ spinel for high-rate and long-cycle-life lithium ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(34): 17768-17772.
- [22] Ein-Eli Y, Koch V R. Chemical oxidation: a route to enhanced capacity in Li-ion graphite anodes[J]. Journal of Electrochemical Society, 1997, 144(9): 2968-2973.
- [23] Goodenough J B, Kim Y. Challenges for rechargeable Li batteries[J]. Chemistry of Materials, 2010, 22(3): 587-603.
- [24] Dey A N. Electrochemical alloying of lithium in organic electrolytes[J]. Journal of Electrochemical Society, 1971, 118(10): 1547-1549.
- [25] 高鹏飞, 杨军. 锂离子电池硅复合负极材料研究进展[J]. 化学进展, 2011, 23(2): 264-274.
- [26] Yang Z G, Choi D, Kerisit S, et al. Nanostructures and lithium electrochemical reactivity of lithium titanites and titanium oxides: A review[J]. Journal of Power Sources, 2009, 192(2): 588-598.

An overview of development status of traction battery industry for electric vehicles

XIAO Chengwei¹, WANG Jiqiang²

1. No. 18th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300384, China
2. China Industrial Association of Chemical and Physical Power Sources, Tianjin 300384, China

Abstract Traction battery, as a key component, plays an important role in the mass application of electric vehicles. In the field of its R&D, US, Japan, Germany, Korea and China have all formulated their national-level plans for traction batteries respectively. In the field of traction battery industrialization, lithium-ion battery is the mainstream product, and China, Japan and Korea are the three major suppliers and competitors. Their products involve different material chemistries, capacities and manufacturing processes, the energy density ranges from 89 to 245 (W·h)/kg, and mass production is realized. The category of material chemistry and related technical parameters have also been proposed for the future traction battery industrialization. Issues faced by manufacturing equipment, material chemistry, system integration and evaluation for the traction battery are pointed out at the end of this overview.

Keywords electric vehicle; lithium-ion traction battery; industrial development

(责任编辑 韩星明)