

2011-05-28

Electric Vehicles and Power Batteries

Xin-Ping AI

Han-Xi YANG

Recommended Citation

Xin-Ping AI, Han-Xi YANG. Electric Vehicles and Power Batteries[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2011 , 17(2): Article 12.

DOI: 10.61558/2993-074X.2827

Available at: <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol17/iss2/12>

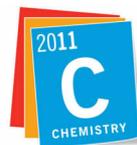
This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electrochemistry. It has been accepted for inclusion in Journal of Electrochemistry by an authorized editor of Journal of Electrochemistry.

电动汽车与动力电池

艾新平*, 杨汉西

(武汉大学 湖北省化学电源材料与技术重点实验室,

化学与分子科学学院, 湖北 武汉 430072)



国际化学年

International Year of
CHEMISTRY 2011

编者按: 在各国政府、企业界和研究机构的共同努力下,电动汽车的发展已进入了由科研转入产业化和商业化的关键时期.我国政府在“十二五”规划中已经把新能源汽车作为重点发展的七大战略性新兴产业之一.此期间,将实施以纯电驱动为重点的新能源汽车举措.加快推动纯电动汽车和插电式混合动力汽车的产业化,同时继续推广混合动力汽车,并且在条件具备的省市,率先进行燃料电池汽车的示范运行.在中国科技部、国际能源署和上海市政府支持下,“中国(上海)电动汽车国际示范城市”已于4月22日在上海正式揭牌.作为我国首个电动汽车国际示范城市,上海将与各国示范城市密切互动,在多个领域开展电动汽车应用示范项目.这标志着我国电动汽车发展进入了一个新阶段.我们也注意到,推进电动汽车的研究开发和应用也是2011国际化学年所提倡的清洁能源的一个重要方面.为了帮助读者了解电动汽车和动力电池研究开发的历史和现状,以及国际和国内的发展战略,本刊特约武汉大学艾新平教授和杨汉西教授撰写了“电动汽车和动力电池”专文,以飨读者.

摘要: 回顾电动汽车一百多年的发展历史,讨论了化学电源技术对电动汽车发展的影响.在简要介绍电动汽车种类和电动汽车对动力电池的技术要求之后,集中讨论了动力锂离子电池应用的主要问题,包括电池安全性、环境适应性和成本.最后,简单分析了未来动力电池技术的发展之路.

关键词: 电动汽车; 动力电池; 锂离子电池

随着汽车工业的迅猛发展,石油资源耗竭日益加快,汽车尾气排放导致的空气污染和温室效应日益严重.面对当前能源和环境问题备受关注的国际大环境下,汽车技术不得不朝着燃料多元化、动力电气化的方向变革.以车载电源为全部或部分动力驱动行驶的电动汽车,因具有高效节能、低排放或零排放的显著优势,成为目前国际节能环保汽车发展的主攻方向.从世界各国的战略目标看,发展电动汽车已被普遍确立为保障能源安全和转型低碳经济的重要途径.美国在奥巴马总统上任后,立即部署实施总额为48亿美元(其中24亿美元为政府拨款)的电池与电动车研发与产业化计划,提出到2015年普及100万辆插电式电动汽车.日本将发展电动汽车作为“低碳革命”的

核心内容,并计划到2020年普及以电动汽车为主体的“下一代汽车”达到1350万辆.德国政府于2009年8月发布了以纯电动车和插电式电动车为重点的《国家电动汽车发展计划》.

我国政府也将发展电动车上升为国家战略予以高度支持.科技部从“十五”开始在863计划中设立“电动汽车”重大科技专项.2009年以来,有关部门又密集出台了一系列鼓励电动汽车及相关行业发展的政策措施.2009年3月出台的《汽车产业调整和振兴规划》中,提出“三年内形成50万辆纯电动、充电式混合动力和普通型混合动力等的新能源汽车,以及新能源汽车销量占乘用车销售总量的5%左右”的目标.随后,科技部、财政部、发改委和工信部共同启动“十城千辆”工程,计划用3

收稿日期:2011-04-18 * 通讯作者,(86-27)68754526, E-mail: xpai@whu.edu.cn

国家973计划(No. 2009CB220103)、863计划(No. 2007AA03Z224),以及中央高校基本科研业务费专项资金(203275672)资助

年左右时间,每年发展 10 个城市,每个城市推出 1000 辆新能源汽车示范运行.在最近出台的“十二五”规划中,“十城千辆”进一步扩充为“二十城千辆”.2010 年 6 月,财政部、科技部、工信部和发改委又联合出台《关于开展私人购买新能源汽车补贴试点的通知》,对上海、长春、深圳、杭州、合肥 5 城市私人购买电动车给予一次性补贴.

在各国政府的引导和大力支持下,全球范围内又一次掀起了电动汽车的开发热潮.然而,作为电动汽车的“引擎”部件,动力电池的现有技术经济指标能否满足电动汽车的技术发展和商业化应用要求?动力电池目前面临哪些问题和挑战?从普及纯电动驱动电动汽车的远期目标出发,动力电池可能发展的技术路线如何?本文将在介绍化学电源技术对电动汽车发展的影响,以及电动汽车种类和它的动力构成之后,针对以上问题展开讨论.

1 化学电源技术对电动汽车发展进程的影响

虽然电动汽车在业内已成为一个时尚话题,但它绝非汽车领域的一个新概念.事实上,在汽车工业发展史上,电动汽车先于燃油车出现,距今已有一百多年的历史.发展电动汽车取代燃油车,在某种意义上说更像是一次“复兴”或“价值回归”.“电动汽车”,顾名思义,是采用化学电源为驱动电能的汽车.无疑,车载化学电源(俗称动力电池)是电动汽车的最核心部件.但电动汽车发展与动力电池技术之间存在怎样的依存关系?或者说化学电源技术是如何影响和左右电动汽车发展进程的呢?对此不妨简要回顾一下电动汽车的发展历程.

自约·亨利发明直流电机之后不久,19 世纪 30 年代世界上就开始陆续出现采用一次电池作为动力源的雏形电动汽车.1859 年,法国科学家普朗特发明了铅酸蓄电池,为后来电动汽车的兴起奠定了基础.1881 年,法国工程师古斯塔夫·土维(Gustave Trouve)装配了世界上第一辆以铅酸电池为动力的三轮车,该车先于德国人本茨(Karl Benz)于 1885 年发明的 4 冲程汽油机三轮车和戴姆勒(Gottlieb Daimler)于 1886 年发明的 4 冲程汽油机 4 轮汽车^[1].之后,这种用铅酸电池驱动的电动汽车逐渐开始流行并成为权贵们的代步工具.

19 世纪 90 年代,汽车工业开始快速发展.但当时的内燃机技术还相当落后,燃油车存在噪声大、启动难、水消耗量大、行驶里程短、最高时速低、故障多、维修困难等问题,而蒸汽机则存在启动前加热时间长、行驶过程中消耗大量水等问题.电动车因具有启动快、维修方便等优点,在与上述两者的市场竞争中脱颖而出,从最初的三分天下,很快成为市场主导.1890 年,全世界 4200 辆汽车中,38% 为电动汽车,40% 为蒸汽汽车,22% 为内燃机汽车.1899 年在美国市场销售的汽车中,电动汽车为 1575 辆,而汽油机汽车只有 936 辆^[1].就在这一年,由比利时工程师卡米乐·热纳茨(Camille Jenatzy)设计的名为“不满足”(La Jamais Contente)的子弹头电动车赛车(图 1),因成为第一辆时速超过 100 km 的汽车而名噪一时^[2],更是将电动汽车的发展推向了高潮.同年,在美国市场,电动汽车开始大规模进入出租车营运行业.据记载,到 1912 年,美国至少已有 3.4 万辆电动汽车在运行.



图 1 比利时人设计的“不满足”(La Jamais Contente)子弹头电动车赛车^[3]

Fig. 1 “La Jamais Contente”, a Belgian car equipped with lead acid batteries, reached a speed of 100 km/h^[3]

随着电动汽车市场规模的扩大,铅酸蓄电池的技术水平和配套基础设施也获得了较快发展.铅酸蓄电池的储电能力从 1890 年的每 kg 电池不到 10 W·h(瓦时),上升到 1901 年的 18 W·h,1911 年更是达到了每 kg 接近 25 W·h^[1].相应的,电动车的一次充电续驶里程从 1900 年的 30 km 提高到 1914 年的 80 ~ 130 km,配套基础设施也日趋完善.据记载,波士顿在 1903 年已拥有 32 个充电站,而纽约在 1905 年的充电站个数已经达

到41个^[1]。

虽然电池技术在此期间获得了较大幅度的提升,但与内燃机技术的发展速度相比,仍然偏慢。电动车爬坡能力差、续驶里程短、最高时速低以及车身笨重等痼疾,由于电池技术水平的限制并没有从根本上予以解决,并且一直困扰、延续到现在,成为妨碍电动汽车发展的一个永久性问题。与此相反,内燃机技术在此期间获得了飞速发展。1908年美国福特汽车公司T型车问世,并开创了以流水线生产方式大规模批量制造汽油机汽车的先河^[2],对电动汽车发展造成了严重打击。更为致命的是,随着1912年燃油车电打火启动的出现,电动车在技术上彻底失去了与燃油车竞争的资本^[1]。电打火启动一方面解决了依靠手摇曲柄启动燃油车这一最笨拙的操作,另一方面,也改变了当时电池技术研究方向。由于每辆电打火启动的燃油车均需要配置电池用于启动,电池需求量因而猛增,且型号相对单一。此时,电池制造商即将主要精力转向大规模生产这种性能要求不高的启动电源,从而大大影响了当时电池技术的发展,严重削弱了电动汽车的技术竞争力。到19世纪20年代,燃油车已经明显地占据了市场主宰地位,而电动车几乎接近被淘汰。如,1924年,美国总共仅生产了381辆电动车,而生产的燃油汽车总量达到了3 185 490辆^[1]。

然而,经历了20世纪70年代的两次石油危机之后,能源安全迫使发达国家开始审视替代能源的重要性,电动汽车研发又重新得到关注,并逐渐成为一项全球性的战略课题,多个国家在此期间提出了电动车开发计划。1976年,美国参议院授权能源部出台了关于电动车的联邦计划,预算总投资达到1.6亿美元,主要用于开发Ni-Fe和Ni-Zn电池,以及电动车和混合动力车。预期目标:在1978年6月到1979年12月间,推广2500辆电动车和混合动力车,之后又设想提高电动汽车产量到每年5000~50 000辆。然而,这样一个雄心勃勃的计划,因电池技术开发的滞后没有能够实现,于1982~1983年被里根政府以预算原因停止。

日本在1971~1976年,先后投入1900万美元支持其《国家电动车开发计划》。在此期间,开发出了两代电动车,推出了大约300辆不同类型的电动车。1976年,日本电动汽车协会确定了在1986年之前,电动车数量达到20万辆的目标。这个目标也

因电池技术问题而没有能够实现。

类似的研究计划在法国、德国等国家也相继出台,但从70年代到80年代,竟没有一个国家的电动汽车计划得到实现。当时的计划都是基于这样一个设想,即电池技术能够在短期内获得大幅度的提升,但结果都不能达到原先预期的企望。

20世纪90年代第三次石油危机爆发,能源安全以及汽车尾气的污染问题再次引起人们对电动汽车的高度关注。多国政府推出产业鼓励政策与措施,许多世界级汽车企业也纷纷加入到电动汽车的研制和开发行列。美国加利福尼亚州甚至通过立法来强制推动电动汽车的发展。州立法规定^[2]:在加州汽车销售市场,从1998年起,“零排放”汽车必须占到汽车年销售总数的2%;2001年占5%;2003年占10%。1991年,美国三大汽车公司通用、福特和克莱斯勒共同成立了“先进电池联合会”(USABC),旨在研发新一代电动汽车所需的高性能电池,并拟定电池的中期、远期发展目标分别达到80 W·h/kg和200 W·h/kg。1993年克林顿政府推出“新一代汽车合作计划”,集中力量研制电池驱动的纯电动汽车。世界各大汽车公司也纷纷推出各种电动汽车样车。1995年,法国标致汽车公司曾向市场投放了1000辆Peugeot 106电动车^[2]。1996年,通用汽车公司也向市场推出了EV-I电动汽车。但是由于当时的蓄电池技术尚未取得关键性突破,电动汽车续驶里程短、充电时间长及使用成本高等问题依然难以解决,商业化进展缓慢,电动汽车的生产和销售先后被停止。考虑到电动汽车发展的实际情况,1996年加州政府取消了原制定的1998年达2%、2001年达5%“零排放”的规定。

图2给出了前面提到的电动汽车开发的几次热潮中,研究机构关于电动汽车市场份额的前景预测^[2]。实际的情况是,乐观的预测都因为电池技术无法突破而成为泡影。表1给出了20世纪90年代之前主要动力电池的技术发展梗概^[1]。如表,从1901年到1995年的90余年间,动力电池的能量密度仅有不到3倍的提高。其主导产品依然是100多年前出现的铅酸电池体系,此外没有一种具有实用价值的动力电池的能量密度能够满足USABC中期发展的需要。

电动汽车几起几落的发展历程说明,化学电源技术一直是制约电动汽车发展的关键,直接左

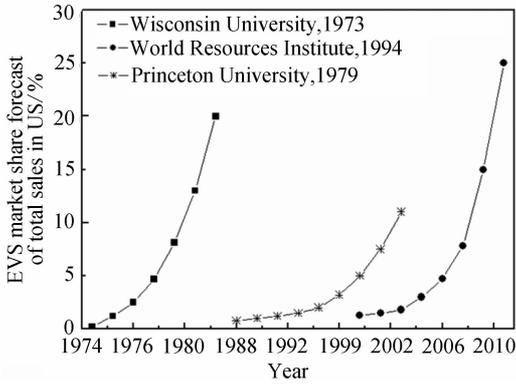


图 2 不同时期研究机构对电动汽车发展前景的预测^[2]

Fig. 2 Examples of three studies on the forecast of EVs (1973, 1979, 1994)^[2]

表 1 20 世纪 90 年代中期之前主要动力电池技术发展梗概^[1]

Tab. 1 Development of the EV battery technologies until mid-1990s

Type	Year	Specific energy density/ W · h · kg ⁻¹
Lead acid	1901	18
Lead acid	1943	24
Lead acid	1950	27
Lead acid	1978	33
Ni-Cd	1984	35 (test)
Lead acid	1990	40
Ni-Cd	1993	55
Ni-Cd	1995	65 (planned)
USABC	Mid-term goal	80
USABC	Long-term goal	200
Zinc air	1993	120 ~ 300 (test)
Gasoline		13 000

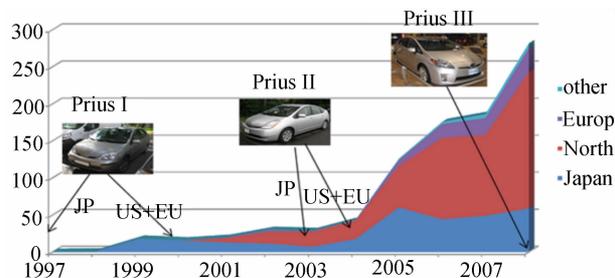
右着电动汽车的开发应用前景. 缺乏先进化学电源技术的强有力支撑, 电动汽车的开发和应用只会是“水中月、镜中花”。

从 20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 在移动电话、手提电脑、摄像机等便携式电子产品的需求推动下, 化学电源技术得到了飞速发展. 以镍氢电池和锂离子电池为代表的先进二次电池先后问世,

为此后电动汽车的开发奠定了基础.

1997 年, 使用高功率镍氢电池的丰田普锐斯 (Prius) 混合动力汽车在日本成功上市, 并于 2000 年起在北美、欧洲及世界各地公开发售. 之后, 丰田公司于 2003 年和 2008 年先后推出 Prius II 和 Prius III 换代产品. 图 3 给出普锐斯三代产品在全球的销售情况^[2]. 由于节油效果明显, 从上市至今, 普锐斯混合动力车的全球累计销量已超过 200 万辆, 2009 年更是以 21 万辆的销量居日本国内汽车销量排行榜榜首, 极大地鼓舞了电动汽车的发展. 同年, 本田 Insight 混合动力汽车也以 9.3 万辆的销量居日本汽车销售排行榜第 5 位. 由于兼顾了纯电动汽车和传统汽车的优越性, 混合动力汽车目前已被公认为是一种从传统汽车向新能源汽车过渡的有效途径.

在锂离子电池方面, 随着近年来以磷酸铁锂为代表的高热稳定性、长寿命电极材料的开发应用, 以及电池生产装备和工艺控制水平的提高, 锂离子电池在安全性、可靠性、功率密度、循环寿命及成本控制等方面取得了显著进展, 使之成为当前国内外电动汽车领域动力电池研究开发的最热点. 即如, 以用磷酸铁锂、锰酸锂为正极的锂离子电池, 其比能量目前已经达到了 110 ~ 120 W · h · kg⁻¹ (传统铅酸电池的 3 ~ 4 倍), 有力地推动了电动汽车的发展. 近年来, 各大汽车公司陆续推出各种使用锂离子动力电池的电动汽车. 如美国 Tesla 的纯电动跑车, 三菱的 iMiEV 及富士重工的 Stella PHEV 等. 2008 年底, 德国宝马在洛杉矶国际车展上首次公开了小型纯电动车“Mini E”. 该车使用能量为 35 kW · h 的锂离子电池组, 最大续航里程达 250 km. 2010 年秋天, 日产汽车推出了用锂离子动力电池的 Leaf 纯电动汽车 (图 4), 并宣布到 2012 年制造 20 万台的量产计划. 首款量产的增程型雪佛兰沃蓝达 (Volt) 插电式混合动力车于 2010 年 8 月在上海世博会期间正式公布上市, 纯电驱动续航里程可达 60 km. 沃蓝达计划 2012 年产量将达 4.5 万辆. 福特公司也于今年 1 月份正式推出了 2012 电动版福克斯, 并将于今年年底在美国部分州和特区率先上市. 我国的 863 新能源汽车重大专项的实施, 将锂离子动力电池推向了行业前沿, 电动汽车的研发也取得了突破性进展. 例如, 比亚迪公司研制的混合动力车 F3DM 于 2008 年 12 月份上市, 并在深圳面向个人销售. 随后, 于 2009 年, 比

图3 Prius 混合动力车三代产品销售情况^[2]Fig. 3 The sales of three generation Prius^[2]

Specifications
The highest speed: 145 km/h
Driving range: 160 km
Electromotor power: 80 kW
Max torque: 280 Nm
Battery energy: 24 kWh

Specifications: The highest speed: 154 km/h; Driving range: 160 km; Electromotor power: 80 kW; Max torque: 280 Nm; Battery energy: 24 kW · h

图4 日产纯电动轿车 Leaf 及其主要性能指标

Fig. 4 Nissan EV “Leaf” and its main specifications

比亚迪又推出了搭载其自主研发的磷酸铁锂锂离子电池的 E6 纯电动轿车。还有长安汽车推出的长安奔奔 MINI 电动汽车，奇瑞推出的 S18 纯电动车等。

由此可见，近年来化学电源技术的快速发展将电动汽车的开发和应用又一次推向了高潮。各种国家级电动汽车战略目标和国内外汽车企业关于电动汽车的量产计划纷纷出台。但应当看到，现今的化学电源技术水平尚不足以支持纯电驱动电动车的商业化普及推广，仍然面临许多问题，有待于理论和技术的重大突破。这些都需要电化学家和化学电源工程技术人员的加倍努力！否则，电动汽车的发展有可能重蹈覆辙，再次成为泡影。

2 电动汽车种类及动力构成

电动汽车发展的终极目标是实现纯电驱动的普及，但受到目前二次电池技术水平的限制，电动汽车完全取代传统燃油汽车进入普及应用尚需假

以时日。业界认为，只有当纯电驱动的电动汽车的续航里程达到与燃油车接近的水平时，电动汽车才有可能进入普及期。而与此相应的动力电池的比能量则要求达到 $500 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。然而，即使是目前最为先进的磷酸铁锂和锰酸锂锂离子电池，其比能量也仅 $110 \sim 120 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，与纯电驱动的技术要求相去甚远。面临着节能与新能源汽车发展的紧迫性，业界提出了由混合动力到插电式到纯电驱动的汽车动力电气化技术发展路线，电动汽车因此而出现了多种过渡车型。

图5示意各种电动汽车及其动力系统组成。按照电驱动系统和内燃机引擎耦合方式的不同，可分为并联结构和串联结构两大类。当动力系统采用电池/电机和内燃机引擎的并联结构时，根据电池和引擎在驱动能量方面贡献的比例大小，混合电动车可分为弱混电动车、中度混合电动车、强混电动车和插电式混合动力车。插电式混合动力车中，电池的容量较大，且电池储存的能量主要来自体外电网的充电。当电池的荷电态较高时，汽车的驱动以纯电动模式，或以电池为主、引擎为辅的混合方式；但如电池的荷电态下降到一定程度时，汽车则以混合动力方式运行。在其它类型混合动力车中，电池能量来自车身引擎的充电和制动时回收的能量，电池荷电态一般稳定在 $70\% \sim 30\%$ 的范围。除弱混电动车外，并联式混合动力车在启动、加速或爬坡时，动力电池可以提供额外的功率辅助，使引擎处于相对稳定的高效率工况状态，提高了燃料利用率；而在下坡、减速制动和怠速时可以将动能转化为电能储存在电池中，回收能量，提高了能量利用率。由此可见，混合动力车具有节能、环保的显著优点。对纯电动车则使用完全的电池/电机驱动机制，其原理为：电池为储能单元，电机为驱动系统，全部由电池向电动机提供电能驱动汽车。当汽车在制动或减速时，则电机可起发电机作用而回收能量。因此，纯电动车被认为是最清洁、环保的汽车。

当动力系统采用电池/电机和内燃机引擎的串联结构时，内燃机引擎通过发电机向电池充电，电池再通过电机驱动汽车。在此结构中，引擎发动机+发电机只能看作是一种电能供应系统，发动机并不直接参与汽车的驱动。根据内燃机引擎功率的配置大小和汽车驱动模式的不同，串联式结构可分别构成增程式EV和全混HEV两种。其中，增

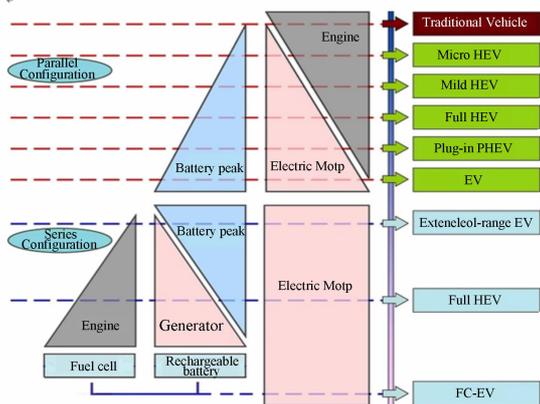


图 5 电动汽车种类及其相应的动力系统组成

Fig. 5 Classification and power systems of different types of EV and HEV

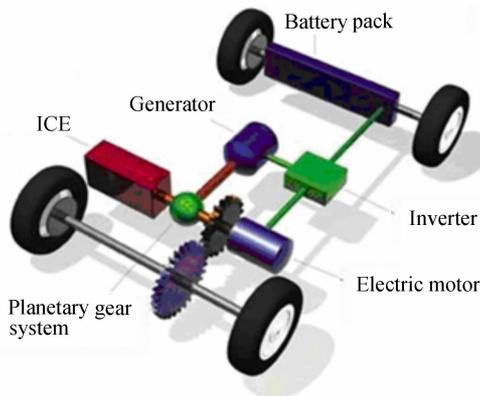


图 6 混联式混合电动车的动力系统结构示意图

Fig. 6 Structural illustration of the power system for HEVs with parallel and series combination

程式 EV, 车载电池的能量主要来自体外固定充电, 其工作模式为开始时以纯电动方式行驶, 完全利用电池的能量进行驱动. 当电池能量接近用完时 (一般控制在电池容量耗尽到 80% 左右), 燃油发电机开始发动, 并对电池进行充电, 以补充电池电能, 延长车的续驶里程. 全混 HEV 具有节油、环保特点的主要原因是内燃机引擎可以处于相对稳定的高效工作状态.

以燃料电池为主、二次电池为辅给出驱动能量的车, 称为燃料电池车. 鉴于燃料电池车的特殊性, 本文暂不涉及与其有关问题的讨论.

事实上, 混合动力车除以上所述的“并联”式和“串联”式外, 还有一种最复杂的方式—混联式^[4]. 图 6 示意混联式混合电动车的动力系统结构. 丰田 Prius 采用的就是这种混合驱动方式. 混联式混合动力电动汽车主要由发动机、发电机、电动机、行星齿轮机构和蓄电池组等部件组成, 发动机、发电机和电动机通过一个行星齿轮装置连接起来. 动力从发动机输出到与其相连的行星架, 行星架将一部分转矩传送到发电机, 另一部分传送到电动机并输出到驱动轴. 此时车辆动力系统结构并不属于串联式或者并联式, 而是介于串联和并联之间, 充分利用两种驱动方式的优点.

3 电动汽车对动力电池的技术要求

尽管对不同类型的电动车辆来说, 其动力系统对电池的具体参数要求存在较大差异, 如纯电动汽车更强调电池的比能量, 混合电动汽车则侧重于电池比功率, 但总体来说也存在诸多共性点. 为满足电动汽车的动力性能、使用安全性及经济

指标要求, 先进的动力电源系统原则上均需具备以下特征:

1) 能量密度高. 指电池的质量比能量 ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$) 和体积比能量 ($W \cdot h \cdot L^{-1}$), 亦即单位质量或单位体积的电池所能供给的能量. 比能量越高, 同一质量或同一体积电池所储存和释放的电能就越多. 显然, 使用比能量高的电池体系有助于降低动力电池的质量和体积, 提高电动汽车的有效载荷量, 乃至它的一次充电续驶里程. 因此, 能量密度是评价动力电池应用性能的一个最重要指标.

2) 比功率大. 指单位质量或单位体积电池所能输出的功率, 分别称为质量比功率 ($W \cdot kg^{-1}$) 和体积比功率 ($W \cdot L^{-1}$). 比功率越高, 则单位时间电池的输能量越大, 电动汽车的加速性能和爬坡性能就愈优越. 就混合动力车而言, 如电池系统的比功率大, 其制动能量回收的效率一般就越高, 节油效果也越理想.

3) 循环或使用寿命长. 其含意即指一定的充放电制度或工况条件下, 电池容量降到某一额定值前所经历的充放电次数. 循环寿命越长, 则电池在正常使用周期内支撑电动汽车行驶的里程数就越多, 有助于降低车辆使用期内的运行成本.

4) 均匀一致性好、可靠性高. 对于电动汽车而言, 电池组的工作电压大多均应达到数百伏, 这就要求至少有几十到上百只电池的串联. 为达到设计容量要求, 有时甚至需要更多的单体并联. 由于电池组的使用性能会受到性能最差的某些单节电池的制约, 因此设计上要求各电池单体在容量、内

阻、功率特性和循环特性等方面具有高度的均匀一致性,而运行过程中高的可靠性,则有利于减小汽车的维修次数和维修成本。

5) 高低温性能好、环境适应性强。电动汽车作为一种交通工具,要求电池不仅能在北方冬天极冷的气温下,而且能在南方夏天炎热环境中长期稳定地工作。在最恶劣的气候条件下,电池的工作温度可能要从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,甚至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,要求电池应当具有良好的高低温特性。

6) 安全性好。能够有效避免因泄漏、短路、撞击、颠簸等引起的起火或爆炸等危险事故发生,确保汽车在正常行驶或非正常行驶过程中的安全。

7) 自放电率低。自放电是电池在开路状态下自动放电致使电池容量降低的现象。其自放电程度,由自放电率表示,即单位时间内容量降低的百分数。

8) 价格低廉。包括材料来源丰富,电池制造成本低,以使降低整车价格,提高电动汽车的市场竞争力。

9) 绿色、环保。要求电池制作的材料与环境友好、无二次污染,并可再生利用。

对于目前任何一种动力电池来说,如要完全满足上述要求,显然存在一定的困难。在实际选择电池时,往往根据汽车本身动力系统的要求,侧重于电池的某一部分指标,而其他指标仅作参考。

图7比较了现今各种动力电池的技术性能。其中,锂离子电池兼具高比能和高比功率的特点,是目前最理想的动力电池体系,镍氢电池次之。而超级电容器虽然比能量低,但其超高的功率特性可

以为电动车提供有效的功率补偿。

根据目前动力电池的技术水平和特性,对各种电动车的适用性电源分析如下:A. 纯电动汽车(EV),由于纯电动车的一次充电续航里程完全由动力电池一次充电储存的电能数量来决定,因此,一般要求比能量高的能量型动力电池与之配套。在目前的二次电池体系中,锂离子电池具有最高的能量密度,因而成为纯电动车的首选配套电池;B. 混合动力电动汽车(HEV),包括微混(弱混)、中混、全混几种类型:i) 微混。电池的作用仅限于车的起停及有限的制动能量回收功能,无纯电动行驶模式要求。典型的电池配置为:电压 12 V ,能量需求 $0.6\sim 1.2\text{ kW}\cdot\text{h}$,功率需求 $0.5\sim 2\text{ kW}$ 。由于配套电池的电压低,能量需求和功率需求均较小,一般采用铅酸电池或铅酸电池+超级电容器即可满足要求。ii) 中混。电池的作用主要体现在起停、制动能量回收和加速助力,无纯电动行驶模式要求。典型的电池配置为:电压 $36\sim 120\text{ V}$,能量需求 $1\text{ kW}\cdot\text{h}$,功率需求 $5\sim 10\text{ kW}$ 。由于对电池的功率要求较高,适用的电池体系主要为功率型镍氢电池和锂离子电池。iii) 全混电动车。除要求电池具有中混车需要满足的功能外,还要求电池可以驱动整车进行较短的纯电动行驶,电池的电压一般要达到 $200\sim 400\text{ V}$,在保持能量需求为 $1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的同时,要求电池的输出功率能够达到 $30\sim 50\text{ kW}$ 。因对电池的功率要求极高,可选择的电池体系主要为超高功率的镍氢电池和锂离子电池;C. 对插电式混合动力汽车(PHEV)和增程式EV来说,对电池的典型技术要求为:电压 $200\sim 400\text{ V}$,能量需求 $5\sim 10\text{ kW}\cdot\text{h}$,功率需求 $30\sim 70\text{ kW}$ 。由于要求使用能量、功率兼顾型动力电池,从目前情况看,锂离子电池无疑是其最佳选择。

由此可见,锂离子的高比能量和高比功率特征,使之无论是对于需要高比功率电池的混合动力车,还是要求能量功率兼顾型电池的插电式混合动力车,以及要求高比能量电池的纯电动车,均是到目前为止最为理想的选择。动力锂离子电池因此而成为现今新能源汽车计划实施中的关键技术和核心产业。

4 动力锂离子电池目前面临的主要应用问题

尽管锂离子电池在小型电池的产业化方面具

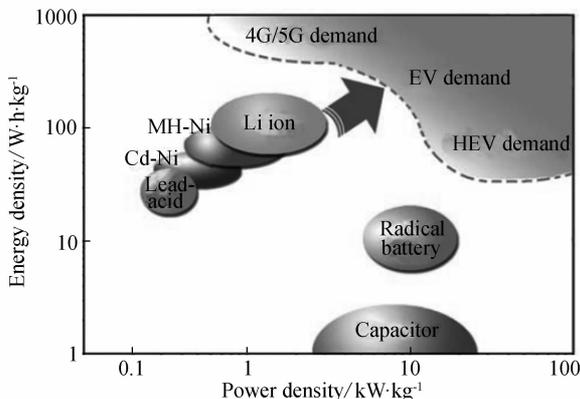


图7 现今动力电池的技术性能对比^[5]

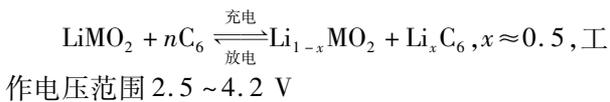
Fig. 7 Comparison of power density and energy density on the different secondary batteries

有良好的技术基础,在装车运行方面也已取得一定的进展.但总体来看,动力锂离子电池的应用应该说仍处于装车示范运行与考核评估的阶段,商业化应用仍面临着诸多问题,主要体现在电池安全性、环境适应性和成本等方面.

1) 电池安全性

如果说电池的比能量、比功率、循环寿命、环境适应性、可靠性等技术指标是影响电动车运行状况的因素,那么,动力电池的安全性能则是决定其能否装车运行的先决条件.在具体讨论安全性问题之前,不妨回顾一下有关锂离子电池的发展历程.

锂离子电池诞生于 1991 年,由 Sony 公司首先报道.它采用富锂的过渡金属氧化物(如钴酸锂 LiCoO_2) 为正极,嵌锂碳材料为负极,含有锂盐的有机电解质溶液为电解液.通过锂离子在两极间的嵌入-脱出循环以贮存和释放电能.其电池反应可表述为:



由于碳酸酯类有机溶剂在电势低的负极和电势高的正极表面均存在一定的热力学不稳定性,因此,在电池的初始充电过程中,将分别发生不可逆的还原和氧化,并在电极表面形成钝化膜(SEI膜).由于 SEI 膜具有离子导电性,可将电解液与电极表面隔离,阻止电解液氧化和还原的继续发生.而锂离子则可以通过 SEI 膜正常的嵌入和脱出,保证了后续循环中电池反应的正常进行.

由于锂离子电池表现出的高比能特征,使之迅速成为移动电话、笔记本电脑、摄像机等便携式电子产品的首选,年需求量迅速增加.目前全球的年需求量已接近 40 亿只^[6].但初期锂离子电池采用的正极主要是钴酸锂,热稳定性较差,不时发生的笔记本电脑电池和手机电池的爆炸、起火事件,使得人们进一步开发大容量动力锂离子电池存在戒心.随着锰酸锂,特别是磷酸铁锂高热稳定性正极的问世,以及锂离子电池技术的日益成熟,电池的安全性得到了大幅度改善,锂离子电池很快发展成为动力电池领域开发的重点.出自于安全性方面的考虑,目前动力锂离子电池采用的正极材料主要是磷酸铁锂和锰酸锂,而非小型锂离子电池所采用的钴酸锂以及镍钴锰三元氧化物等钴基

正极.事实上,基于前者的电池比能量仅 $100 \sim 110 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$,而后者已达到 $150 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上.

尽管人们在发展动力锂离子电池的过程中,为了电池安全,已在材料方面作出了取舍,甚至以不惜大幅度牺牲电池能量密度为代价.然而,以磷酸铁锂或锰酸锂为正极的锂离子电池就绝对安全了吗?事实上,除正极分解放热外,在锂离子电池内部仍存在其它的安全隐患因素.如电池在过充状态下,有机电解质溶剂的剧烈分解放热;碳负极表面钝化膜(即 SEI 膜)因受热分解,而造成裸露在电解液中的高活性嵌锂碳电极与有机溶剂之间的剧烈放热反应;负极的低电势导致在低温或高倍率充电条件下,高活性锂易在其表面沉积并引起电池短路,从而引发电池热失控等.近年来国内外不时发生的电动车烧毁事件一再提醒人们,采用磷酸铁锂和锰酸锂为正极的锂离子电池同样存在安全性问题.

为改善动力锂离子电池的安全性,人们正在积极探索一些技术措施.如在正极集流体铝箔和活性层之间涂敷一层具有正温度敏感特征的 PTC 涂(薄)层(图 8).当电池发热温度升高到控制值时,该 PTC 涂层的电阻急剧增大几个数量级,切断集流体与活性层之间的电流,抑制电极反应的进行,阻止电池温度的进一步上升,从而避免电池进入到危险的热失控状态^[7].此外,在负极表面涂敷一层由惰性纳米粉体(如氧化铝)组成的多孔热阻(薄)层(图 8),亦可有效防止各种原因引起的电池内部短路,减小电池发生安全性事故的几率.

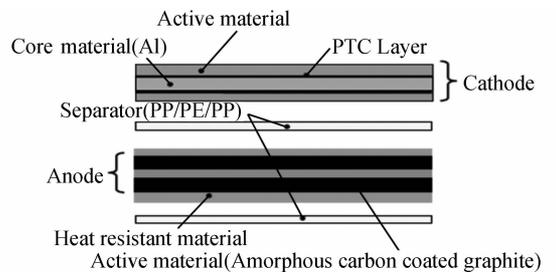


图 8 提高锂离子电池安全性的技术措施

Fig. 8 Technical process in enhancing the safety of Li-ion batteries

除以上工艺技术外,人们还在积极寻找其它电池安全性的改善途径.如发展电压敏感隔膜和

氧化还原电对添加剂^[8,9],建立电池的可逆过充保护机制,防止过充对电池的电性能和安全性带来影响;开发阻燃或不燃性电解液,避免电池的燃烧;研究高稳定性 SEI 膜成膜添加剂,提高 SEI 膜的耐温性等。

2) 环境适应性

对于用于移动电话、笔记本电脑和数码相机等小型便携式电子产品的锂离子电池来说,其充电过程大多在温度适中的室内完成,使用过程中也很少长时间置于极冷、极热等极端气温环境中,对环境适应要求不高。但电动汽车作为一种交通工具的动力电池的充电和使用均在室外进行,这就要求电池必须同时具有良好的高温和低温特性。因此,环境适应性是目前动力电池实际应用面临的又一问题。

锂离子电池的高温性能主要与正极材料、表面 SEI 膜和电解质锂盐的热稳定性有关。磷酸铁锂正极因其热稳定性良好,高温应用不存在问题,因而目前的研究工作大多集中在改善 LiMn_2O_4 正极的高温循环稳定性。其主要技术思路是,通过优化其合成条件,利用表面修饰和掺杂,以求抑制高温下锰的溶解流失。再者,目前普遍使用的电解质锂盐如 LiPF_6 因在高温下容易发生热分解,生成 PF_5 和 LiF ,使得电池的高温循环性能受到较大程度影响。相关研究表明,硼系锂盐显示出一定的热稳定性优势。主要包括:双草酸硼酸锂(LiBOB),双氟代(草酸)硼酸锂(LiODFB)、全氟代硼酸锂($\text{Li}_2\text{B}_{12}\text{F}_{12}$)等。其中, LiBOB 不仅分解温度高($320\text{ }^\circ\text{C}$)、热稳定性好,而且 BOB^- 阴离子能够促进石墨负极表面 SEI 膜的形成。在结构上可以看作是 LiBOB 和 LiBF_4 的结合体—— LiODFB ,兼具 LiBOB 良好的高温性能和 LiBF_4 良好的低温性能。这些工作为发展高热稳定性电解质盐奠定了基础。

锂离子电池的低温性能主要受制于电解液体系的低温电导率。通过优化电解液的溶剂组成,如采用线型碳酸酯和环状碳酸酯的四元混合溶剂($\text{EC} + \text{DMC} + \text{EMC} + \text{DEC}$),在一定程度上可以提高电解液的低温电导率,改善电池的低温性能。此外,在电解液中加入低凝固点的溶剂,即如于常规 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ LiPF}_6/\text{EC} + \text{DMC}$ 电解液中添加乙酸乙酯(EA)、丁酸甲酯(MB)、乙酸甲酯(MA)或丙酸酯类溶剂也是一种有效的途径。还有一些成膜添加剂也被广泛用于提高电解液的低温性能,如碳

酸亚乙烯酯(VC)、丁磺酸内酯(BS)等。由于添加剂参与 SEI 膜的形成,并且能有效降低 SEI 膜的阻抗,从而降低了电极界面电阻,有利于电池低温放电性能的提高。

3) 电池成本

动力锂离子电池所面临的挑战不仅仅在技术层面上,现阶段高昂的价格也是制约其推广应用的一个重要因素。据调查,目前国内厂家大容量锂离子电池的报价普遍在每 $\text{W}\cdot\text{h}$ 3~4 元之间,而一辆与普通经济性轿车相当的纯电动车需要配置约 $20\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电池包。依此计算,仅动力锂离子电池的成本就高达 6~8 万元。而且,大约每 5 年就需要更换一次电池组,大大地增加了整车购置和维护成本,从而严重阻碍了电动汽车的市场推广。

造成大容量锂离子电池价格高昂的最主要原因是生产规模小,产业化技术不成熟。尽管大容量动力电池在技术性能和生产装备的要求上,其标准远高于小型电池,但因同属锂离子电池体系,除正极材料不同外,其它电池材料以及电池的制造工艺都大致相同,相对于小型锂离子电池使用的钴酸锂正极,大容量锂离子电池所用的磷酸铁锂正极和锰酸锂正极在成本方面具有一定优势。因此,二者在某种程度上仍具有一定可比性。由于产业化规模较大,目前小型锂离子电池的成本价每 $\text{W}\cdot\text{h}$ 在 1.5 元左右。对比之下,大容量锂离子电池的价格明显“虚高”。因此,随着动力锂离子电池生产规模的扩大,达到每 $\text{W}\cdot\text{h}$ 2 元是近期可以期盼的指标,与国外的预期基本一致(图 9)。当然,达到此指标的前提是电池单体的均匀一致性好,组合成电池包时成组率高。这就需要有先进的自动化生产线和成熟的产业化技术作保障。

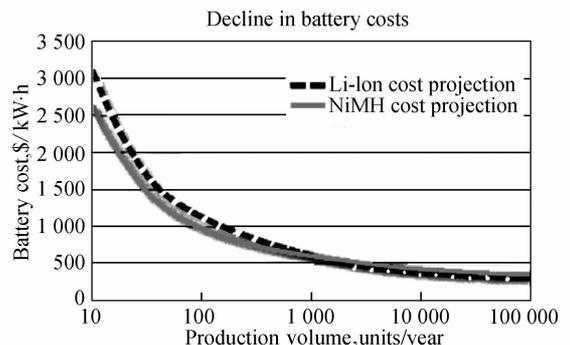


图9 动力电池的成本走势预测^[10]

Fig. 9 A prediction of the costs of power batteries versus production volume^[10]

动力电池仅是电动汽车产业链中的一环,由于市场规模和电池材料成本的限制,短期内大幅降低成本的可能性不大.因此,探索动力电池的商业化运营模式以及梯级利用应提上日程.如“电池租赁”,即电动汽车销售时仅装配较小容量的电池组,或完全的“裸车”,用户可根据自己实际用车的需要向电池经销商租赁电池,以降低购置成本.而梯级利用则是为已不能再满足电动汽车使用需要的电池,移用到性能要求不高的下一级,以期最大限度地利用电池,降低电池在生命周期内的成本.

5 浅析动力电池的技术发展之路

进一步提高动力电池比能量、比功率、可靠性和安全性,以及进一步降低成本是电动汽车发展的持续要求,也是动力电池技术发展的永恒主题和趋势.在《NEDO 下一代汽车用蓄电池技术开发路线图 2008》中,日本明确提出了未来动力电池的发展目标.到 2015 年,动力电池成本降低至现有水平的 1/7,功率型电池比能量从现有 $70 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高至 $100 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$,功率密度从现有的 $1800 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高至 $2000 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$;能量型电池从现有的 $100 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高至 $150 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$;功率密度从现有的 $400 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高至 $1200 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.到 2020 年,动力电池成本继续降低至现有水平的 1/10.功率型电池比能量、功率密度分别提高至 $200 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2500 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$;能量型电池比能量、功率密度分别提高至 $250 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1500 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.并提出至 2030 年,先进体系动力电池的比能量达到 $500 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的开发目标,纯电动车的续驶里程与燃油车相当.与此同时,动力电池的发展目标也被划分为 3 个发展阶段,分别为:先进锂离子电池(现在—2015 年),革新性锂离子电池(2015—2020 年)和新体系动力电池(2020—).由此可见,在未来相当长的时间内,锂离子电池仍将是动力电池的主流产品.但考虑到锂离子电池的能量密度难以突破 $300 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 这一极限值,需要尽快开展动力电池的新体系研究.

对于动力锂离子电池来说,由于借鉴了小型电池十余年大规模产业化的经验,工艺技术已相对成熟,单纯依靠工艺改进来提高电池比能量的空间非常有限.因此,开发高比能新材料已成为动力锂离子电池比能量大幅度提升的唯一可能途径.从目前研究进展来看,大容量锰基固熔体正极

$x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiMO}_2$ ($M = \text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}$) 和锡基、硅基合金负极被认为是最有潜力的突破方向.前者的比容量达到了 $250 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,几乎接近了嵌入正极所能达到的理论极限;而后的理论比容量分别高达 $994 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $4200 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$,远高于目前碳负极 $372 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 的理论比容量.加紧材料制备和应用性能的研究,解决其循环稳定性问题,有可能发展出比能量接近或达到 $300 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的新型锂离子电池.

在新体系电池研究方面, Li/S 电池是有望突破 $500 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 比能量值的电池体系之一,值得关注.目前 Li/S 电池的主要研究焦点是提高硫电极的电化学活性,抑制硫中间可溶性产物的溶解流失,改善电极的循环稳定性.此外,高价阳离子电池如 Ca 电池、Mg 电池,因反应过程涉及多个电子转移,理论上具有较现有锂离子电池更高的能量密度,也应受到重视.从更长远来看,锂空气电池值得关注.

6 结 语

发展电动汽车是人类一个多世纪以来的追求和梦想.但由于受到化学电源技术水平的制约,电动汽车的发展几起又几落.近年来,随着以镍氢电池和锂离子电池为代表的先进二次电池体系的快速发展,电动汽车的开发、应用又一次迎来了高潮,伴随而来的是混合动力车的大规模应用和各种插电式混合动力车、纯电动车的成功上市.但应当看到,目前被寄予厚望的动力锂离子电池仍然存在许多有待解决的应用问题,特别是安全性、环境适应性和成本.而从电动汽车的中长期发展看,现今化学电源的技术水平尚远不能支持纯电动驱动电动车的商业化普及应用,化学电源的发展任重而道远.

参考文献(References):

- [1] Cowan R, Hultén S. Escaping lock-in: The case of the electric vehicle[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 1996, 53: 61-79.
- [2] Midler C, Beaume R. Project-based learning patterns for dominant design renewal: The case of electric vehicle [J]. *International Journal of Project Management*, 2010, 28: 142-150.
- [3] Armand M, Tarascon J M. Building better batteries[J]. *Nature*, 2008, 451: 652-657.

- [4] Bayindir K Ç, Gözükuçük M A, Teke A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle; Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52:1305-1313.
- [5] Gao X P, Yang H X. Multi-electron reaction materials for high energy density battery [J]. *Energy & Environmental Science*, 2010, 3:165-240.
- [6] Scrosati B, Garche J. Lithium batteries; Status, prospects and future [J]. *J Power Sources*, 2010, 195:2419-2430.
- [7] Feng X M, Ai X P, Yang H X. A positive-temperature-coefficient electrode with thermal cut-off mechanism for use in rechargeable lithium batteries [J]. *Electrochem Commun*, 2004, 6:1021-1024.
- [8] Ai X P (艾新平), Cao Y L (曹余良), Yang H X (杨汉西). Self-activating safety mechanisms for Li-ion batteries [J]. *Electrochemistry (电化学)*, 2010, 16(1):6-10.
- [9] Xia L (夏兰), Li S L (李素丽), Ai X P (艾新平), et al. Safety enhancing methods for Li-ion batteries [J]. *Progress in Chemistry (化学进展)*, 2011, 23(2/3):328-335.
- [10] Amjad S, Neelakrishnan S, Rudramoorthy R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14:1104-1110.

Electric Vehicles and Power Batteries

AI Xin-ping*, YANG Han-xi

(*Key Lab. of Electrochemical Power Source, Hubei Province, College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: In retrospect of the historical development of Electric Vehicles (EV), the impact of battery technologies on the progress of EV was discussed. In consequence, it is concluded that the lack of advanced batteries was the main cause for the fluctuations of EV development in the past century and reduce the progress of the commercialization of electric cars. After a brief introduction to the classification and the requirements of electric vehicles, the main issues including safety, wide temperature operation range and the cost, which now be frequently encountered in scaling-up lithium ion batteries for EV applications were discussed. Finally, the hot areas for future development in EV battery technologies were briefly analyzed.

Key words: electric vehicle; power battery; lithium ion battery