



"十二五"国家重点图书出版规划项目
新能源汽车研究与开发丛书

新能源车辆 储能与控制技术

NEW ENERGY VEHICLE ENERGY STORAGE AND CONTROL TECHNOLOGIES

李永 宋健 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源汽车研究与开发丛书

新能源汽车储能与控制技术

New Energy Vehicle Energy Storage and Control Technologies

李 永 宋 健 著
Li Yong Song Jian



机械工业出版社

本书论述了新能源车辆储能与控制技术,是新能源车辆领域的一部学术专著。全书共八章,分上、下两篇。上篇(前四章)介绍了新能源车辆储能、电池理论、微纳米损伤测试技术和新能源车辆能量实验测试系统等,重点介绍的储能技术包括锂电池技术、非均质技术、石墨烯技术、燃料电池技术等。下篇(后四章)介绍了新能源车辆控制技术,包括电子控制系统技术、变速系统控制技术与整车仿真技术等。本书以控制与储能技术为核心,重点围绕新能源车辆的新能源进展与主动安全技术问题,阐述了新能源车辆的关键技术。本书具有完整的理论体系,为新能源车辆的发展提供了技术支持。

本书可以作为高等学校车辆、机械、机电、控制、力学及宇航等专业的本科生和研究生的教材或教学参考书,也可作为相关工程技术与研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源车辆储能与控制技术/李永,宋健著. —北京:机械工业出版社, 2014. 1

“十二五”国家重点图书出版规划项目

(新能源汽车研究与开发丛书)

ISBN 978-7-111-44732-0

I. ①新… II. ①李…②宋… III. ①新能源—汽车—储能②新能源—汽车—控制系统 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 267759 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:何士娟 责任编辑:何士娟

版式设计:常天培 责任校对:樊钟英

封面设计:路恩中 责任印制:杨曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·13.75 印张·265 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-44732-0

定价:49.90 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

目 录

前言

上篇 新能源车辆储能技术

第 1 章 绪论	1
1.1 新能源车辆发展概述	1
1.2 新能源车辆锂电池储能技术	6
1.2.1 锂离子电池浓度梯度储能体系与微结构	8
1.2.2 锂离子电池微结构储能模型与功能设计	10
1.2.3 石墨烯锂离子电池纳米尺度储能模型与功能设计	14
1.2.4 锂离子电池组均衡储能技术	15
1.2.5 锂电池储能技术展望	17
参考文献	18
第 2 章 新能源车辆非均质电池储能技术	21
2.1 非均质电池储能模型	22
2.2 非均质电池储能微观损伤机理	23
2.3 微结构弱间断界面冲击损伤分析与计算模拟尺度	25
2.4 耦合冲击加载及动态变形场高速测量的实验测试方法与系统	26
2.5 非均质电池储能技术展望	28
参考文献	29
第 3 章 新能源车辆石墨烯储能技术	32
3.1 非均衡状态下石墨烯储能材料的微结构储能机理	33
3.2 大电流/大热量非均衡状态下石墨烯储能的损伤机理	35
3.3 大电流/大热量非均衡状态下石墨烯微尺度性能储能与表征技术	38
3.4 石墨烯储能技术展望	43
参考文献	45



第4章 新能源车辆燃料电池储能技术	48
4.1 PEMFC 工作原理与基本结构	49
4.2 石墨化有序介孔碳基纳米结构	51
4.3 铂系金属催化结构的纳米结构形态与纳米尺度效应	52
4.4 纳米尺度性能实验装置	55
4.5 燃料电池储能技术展望	58
参考文献	58

下篇 新能源车辆控制技术

第5章 新能源车辆传动控制技术	62
5.1 新能源车辆变速器概论	62
5.2 新能源车辆变速器总体技术进展	68
5.3 新能源车辆变速器的执行器控制技术	69
5.4 新能源车辆变速器系统的建模与分析	71
5.5 离合器动力学模型	74
5.6 离合器转矩特性分析	78
5.7 新能源车辆同步器的动力学模型	84
5.8 新能源车辆的轮胎动力学模型	85
5.9 新能源车辆整车传动系统的动力学控制策略	87
参考文献	89
第6章 新能源车辆路面识别及换档控制技术	92
6.1 AMT 路面动力学特性	93
6.2 AMT 路面识别特性	95
6.3 单片机运算实现技术	96
6.4 AMT 综合控制技术	100
6.5 执行机构与微控制单元	102
6.6 AMT 系统控制程序与整车匹配	106
参考文献	113
第7章 新能源车辆主动安全控制技术	116
7.1 ESP 系统概论	118
7.2 ESP 组成与基本功能	120
7.3 ESP 系统控制策略的基本原理	123



7.4	ESP 液压执行单元关键零部件功能与结构设计	125
7.5	ESP 的液压零部件设计	129
7.6	无背压条件下主动增压理论	131
7.7	吸入阀的结构与功能设计	133
7.8	ESP 泵与阀的系统理论	135
7.9	基于 AMESim 的 ESP 液压仿真模型	138
7.9.1	管路与主动主缸模块的数学物理模型	141
7.9.2	单向阀的数学物理模型	143
7.10	ESP 液压仿真模型	144
	参考文献	148

第 8 章 新能源车辆制动系统的控制技术 151

8.1	DEHB 的原理及其执行机构	152
8.2	执行机构性能测试	154
8.3	高速开关阀在 Simulink 中的仿真模型	158
8.4	ESP 液压执行单元试制和实验验证	162
8.5	ESP 实车匹配实验	169
8.6	ABS 和 ESP 对比实验	173
	参考文献	175

附录 179

附录 A	主要符号与缩写对照表	179
附录 B	新能源车辆控制技术基本概念与定义	181
附录 C	新能源车辆控制装置原理图	189
附录 D	新能源车辆制动性能实验内容及图解	206

上篇
新能源汽车储能技术

第 1 章 绪 论

1.1 新能源车辆发展概述

随着石油紧缺与环境问题日益严峻，新能源越来越受到重视。动力电池技术的突破及清洁能源技术的推广应用，让新能源车辆焕发生机，汽车工业进入动力革新时代。在新能源车辆领域，如果能够把握时机，将在国际上获得重要地位，我国启动新能源车辆战略以来，建立了“三纵三横”的研发布局，即以燃料电池、混合动力、纯电动车辆为“三纵”，以能源总成控制、驱动电机、动力电池为“三横”，如图 1-1 所示。

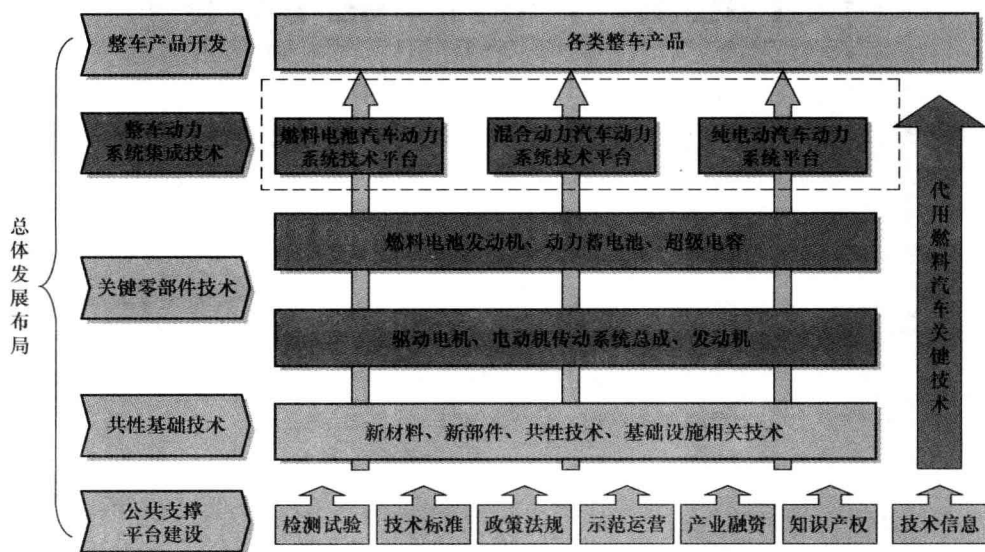


图 1-1 新能源车辆总体布局

在“三纵三横”布局下，目前的新能源车辆均已通过国家认证，各项指标满足国家标准和行业标准。我国自主研发的新能源车辆主要技术指标已达到国际标准，如清华大学、同济大学与北京理工大学等已分别开发出新能源车辆，整车操控性能、行驶性能、安全性能、燃料利用率等零部件系统均达到产业化标准，如图 1-2 所示。在关键技术领域，对新能源车辆性能有决定性的锂离子电池、燃



图 1-2 新能源车辆及零部件系统

料电池、电机等取得重要进展。动力电池在性能、工艺、安全和电池管理方面也取得进步，目前正在形成配套产能。但是，现有电池仍存在一些问题，如电池容量有限，在保持适当的行驶速度及具有良好的电池调节系统前提下，新能源车辆一次充电后的续驶里程甚至达不到 100km。锂离子电池比能量仅为 $100\text{W} \cdot \text{h/kg}$ 左右，质量和尺寸过大严重影响电池综合性能，锂离子电池成本一般占整车成本的 30% ~ 50%，电池循环寿命短。目前，驱动电机及其控制系统已开发出额定功率为 60kW、100kW 功率等级的客车用驱动电机系统，可以满足整车行驶性能要求。在北京奥运会期间，投入了自主研发的混合动力车、纯电动车及燃料电池车，运行 370 万 km，运送乘客 440 多万人次。在上海世博会上，各类型新能源车进行了示范运行，累计行驶里程超过 700 万 km，载客 1.25 亿人次。

从全球主要汽车生产厂家的发展计划来看，新能源车辆产业化时代正在到来。混合动力车已进入产业化阶段，全球销量已超过 100 万辆。未来 10 年，将是新能源车辆产业格局的关键时期，新能源车辆将成为拉动经济发展新的增长点。美国、日本、德国等发达国家对新能源车辆技术高度重视，从汽车技术变革和产业升级的战略出发，都颁布、制定了优惠的政策措施，以提升本国汽车工业在国际上的竞争力。美国已形成“总体战略和一揽子政策”的新能源车辆体系，在电池性能和寿命测试方面处于国际领先水平。日本在新能源车辆的研制和推广方面，投入了巨大的人力、物力，日本汽车企业（包括丰田、本田和日产汽车公司）共同发起成立了联盟组织，由该联盟组织协调新能源车辆充电接口的技术标准以及通信标准的制定。欧盟将发展新能源车辆作为绿色发展战略的重要组



成部分, 预计 2020 年欧洲将有 500 万辆新能源车辆上路, 德国提出 10 年普及 100 万辆新能源车辆。但是, 作为新能源车辆的技术核心——储能与控制系统 (图 1-3) 却还处于零部件攻坚的研发阶段, 相关技术尚未完全成熟。例如, 目前的动力电池在成本、续驶里程、比能量以及使用寿命等方面尚未取得关键性突破, 成组使用后的一致性和安全性等问题尚未得到有效解决, 动力电池仍是制约新能源车辆产业化发展的技术瓶颈。

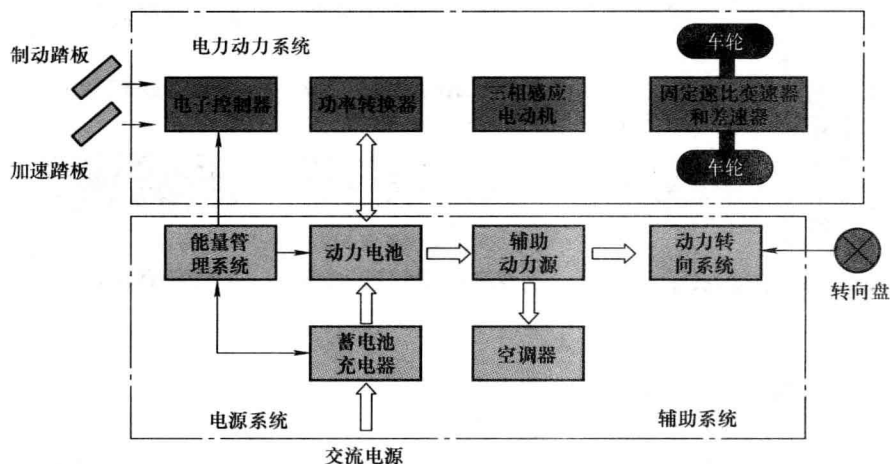


图 1-3 新能源车辆储能与控制系统

决定新能源车产业成熟度的关键因素是新能源动力电池技术, 除传统的钢铁、有色金属以外, 生产新能源车所消耗的重要资源是, 生产电池的原材料锂和生产电机的原材料稀土。我国是世界锂资源、稀土资源都较为丰富的国家之一, 能够为新能源车发展提供可靠保障。北京奥运会、上海世博会、世界大学生运动会等国际活动已成为我国混合动力、纯电动和燃料电池等车辆良好的技术展示平台和市场导入机遇。目前可行的新能源车充电服务模式主要包括整车充电和电池更换两种模式。整车充电模式是在车辆停靠期间为新能源车进行直接充电, 完成能量补给。根据充电时间的不同, 整车充电又可分为常规充电和快速充电两种方式。常规充电方式下充电电流通常较低, 约为 16A、32A。根据电池容量的大小, 充电时间一般为 5~8h, 较长的甚至达 10h。常规充电方式一般适用于电池容量较小的纯电动车。非车载充电机通过交直流转换装置为车辆提供直流电源。常规充电方式对汽车来讲, 由于只需要充电接口和车载充电机等主要设备, 便于对汽车进行设计, 且对电池封装较为方便, 同时, 由于充电电流和充电功率都比较低, 对电池寿命影响较小。它的缺点是由于充电时间过长, 需要较长时间占用车位进行充电, 对新能源车辆的停靠时间和停靠地点有严格要求。因



此,在常规充电方式下,新能源车辆使用的便利性受到一定程度的限制。快速充电又称应急充电,是以较大电流在新能源车辆临时停靠时,为其提供短时充电服务,一般充电电流为 $150 \sim 400\text{A}$,采用直流充电。快速充电利用非车载充电机实现大电流充电,充电功率可以做得较大,可在 $20 \sim 30\text{min}$ 内为电池充电 $50\% \sim 80\%$ 。快速充电的优势在于充电时间短,可满足新能源车辆紧急充电的需求。但是,充电电流越大,充电时间越短,对电池寿命的影响越大。快速充电对充电的可靠性和安全性也有较高要求,在当前技术水平下,快速充电只可作为新能源车辆充电的应急补充,不适合大规模应用。

新能源车辆与传统汽车的根本差别在于动力系统,动力电池是新能源车辆的关键和战略制高点。新能源车辆理想的动力电池要求有安全性好、绿色环保、具有高能量密度和高功率密度、循环寿命长、成本低的特点。而动力电池的技术现状与其相比显然存在很大差距,成为制约新能源车辆产业化最大的瓶颈。电池的寿命包括循环寿命和搁置寿命两个方面:

① 循环寿命的降低源于电池成组中一致性问题。循环寿命低将增加电池更换需求,这会增加电动车使用成本。

② 搁置寿命是指电池在静态放置状态下寿命衰减。在新能源车辆应用中,电池大部分时间处于搁置状态,车辆在夏天的高温暴晒状态下,电池的衰减非常明显。动力锂电池目前主要有磷酸铁锂电池、锰酸锂电池、三元材料三种。大力推进新能源车辆的发展,不能丢弃传统技术。

应在充分尊重成熟理论的基础上,进而推动新能源技术的发展。新能源车辆在传统汽车产业链基础上进行延伸的零部件包括储能电池、驱动控制和能源管理系统等主要功能部件。

(1) 储能电池 储能电池是新能源车辆的核心零部件,是新能源车辆的动力源。目前主要的产品是锂离子电池等。由于是车载电池,对电池的安全性、电磁兼容性、容量以及使用寿命都有较高的要求。锂离子电池具有电压高、体积小、无记忆效应、无污染、自放电小、循环寿命长等优点。正极材料是锂离子电池中关键的原材料之一,直接决定了电池的安全性能和电池能否大型化,同时也是锂离子电池成本占比很高的材料,约占锂离子电池电芯材料成本的三分之一。

(2) 驱动控制系统 新能源车辆的驱动控制系统包括行驶驱动控制和再生制动控制两个功能,混合新能源车辆的驱动控制系统还承担着车辆电力驱动和内燃机驱动的协调、控制功能。新能源车辆的驱动控制系统需要高度智能化和数字化,结构简单、响应迅速、抗干扰能力强,参数变化具有鲁棒性,因此采用变结构控制、模糊控制、神经网络与遗传算法等非线性智能控制技术。

(3) 能量管理系统 能量管理系统是一种相当重要的技术措施,可称为新



能源车辆电池的“保护神”，它可对电池性能进行保护、防止个别电池早期损坏，有利于新能源车车辆的正常运行等。电池能量管理系统参与电池模块的监控工作，使新能源车车辆的运行、充电等功能与电池的电流、电压、内阻与容量等紧密相连和协调工作。

1.2 新能源车辆锂电池储能技术

2030 年，我国石油总需求将达 5 亿 t，进口 3.5 亿 t，巨大的市场需求与严峻的能源环境之间的矛盾异常尖锐，实现能源转型势在必行。清洁能源车辆可从根本上解决尾气问题，若清洁能源车辆占有量的 30%，我国将节省石油总需求 22%，清洁能源车辆是影响国计民生的战略产品。清洁能源车辆的“心脏”为动力电池（成本占到总成本 50% 左右），其能量越高，则车辆续驶里程越远，其功率越高，则车辆加速、爬坡性能越好，其循环性越好，则车辆寿命越长。对于动力电池，材料体系与微结构性能关联是决定动力电池综合性能的主要因素之一。为保证能量转换效率，车辆动力电池需进行频繁充放电循环，电压与电流变化大。清洁能源车辆动力系统对电池的总体要求为高比功率、高效充放电能力、高稳定性（在高效充放电工况下材料体系与微结构性能的相对稳定性）等。锂电池包括锂离子电池、锂空气电池等，具有稳定、功率大及寿命长等优点，其储能体系及反应原理如图 1-4 所示，用做清洁能源车辆动力电池发展潜力巨大。锂离子电池在针刺、挤压、过充、放电中具备高功率和稳定性，可循环 1500 次，容量保持率达 93%，使用年限达 5~7 年，自放电率每月不到 5%，被称为环境

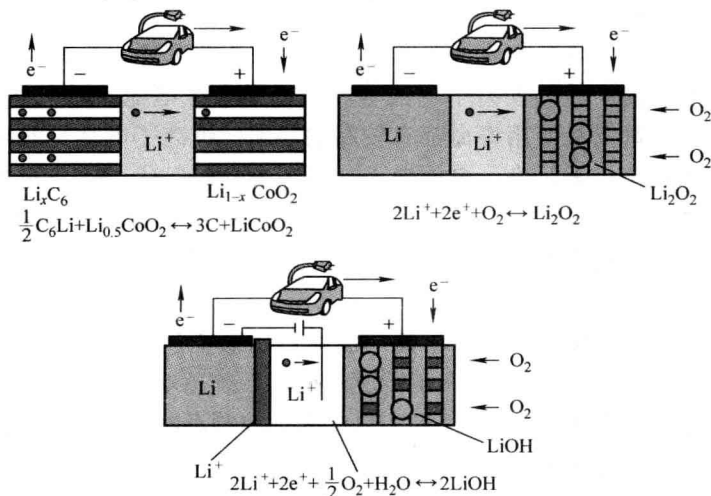


图 1-4 车用锂动力电池储能体系及反应原理



友好的“绿色电池”。锂离子电池结构由正、负极及隔膜等组成，其正极材料的材料体系与微结构性能（材料微纳观尺度表现特征与性能等）对电池的性能影响最大。锂空气电池用碳代替质量大且价格贵的金属，降低了车重和成本，且能源密度是锂离子电池的10倍，电池组性能则提高5倍，由于空气随处可得，不存在燃料储存空间问题，因此更薄更轻。锂空气电池应用前景虽然很美好，但其充放电及稳定性问题还未很好解决。锂动力电池材料体系与微结构性能决定清洁能源车辆的安全性、可靠性等。锂电池材料研究备受人们关注，材料体系的底层创新依赖于微结构性能，石墨烯、浓度梯度等微结构将引领未来动力电池技术。微结构性能决定电池综合性能，推动了动力电池技术变革。在清洁能源发展及变革过程中，电池材料体系与微结构性能密切相关。本章讨论清洁能源车辆锂动力电池材料体系与微结构性能关联的研究工作，为清洁能源车辆电池技术发展提供科学依据。

层状嵌入化合物同碱金属发生可逆反应，锂离子电池在充放电过程中，锂离子处于从正极→负极→正极的运动状态，类似摇椅，椅两端为电池的两极，因此该结构体系称为“摇椅式电池”，其功能原理及微结构模型如图1-5所示。当对电池进行充电时，正极的含锂化合物有锂离子脱出，锂离子经过电解液运动到负极。基于嵌入化合物的锂动力电池过度放电导致负极碳片层结构塌陷，会造成充电过程中锂离子无法插入；过度充电会使过多的锂离子嵌入负极碳结构，造成部分锂离子无法释放出来。电池内阻值大将导致电池放电电压降低，放电时间缩短，内阻受结构体系、微结构性能因素影响。负极的碳材料呈层状微孔结构，到达负极的锂离子嵌入的到碳层微孔中，嵌入的锂离子越多，充电容量越高。当对电池进行放电时，嵌在负极碳层中的锂离子脱出，又运动回正极，回正极的锂

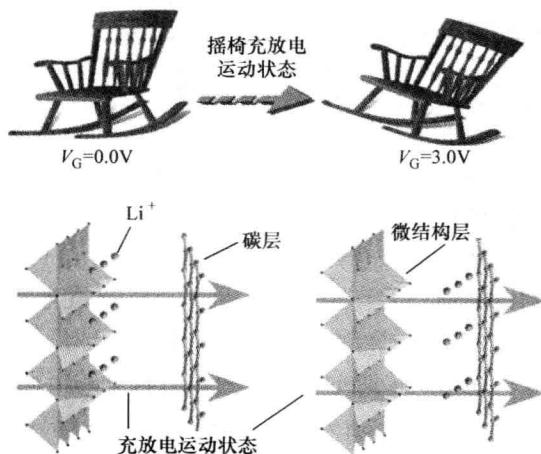


图1-5 新能源车锂离子摇椅电池功能原理及微结构模型



离子越多,放电容量越高。锂动力电池正负极材料容量/氧化还原电位分布如图1-6所示。负极结构满足大量 Li^+ 能够快速嵌入和脱出,主体结构变化很小,得到高容量密度。 Li^+ 嵌入与脱出过程中,电极电位变化小,保持了电压平稳。对于结构稳定且电子导电率低的 LiFePO_4 ,锂离子扩散系数小,导致循环及高倍充放电性能不好,利用碳包覆可增强该材料的导电性能,结合金属阳离子如 Co^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 等掺杂,该材料就具有了良好的表面结构,电解质稳定、致密。 Li^+ 在电极材料中具有较大扩散系数,变化小,便于快速充放电,材料导电性得到明显提高。以下重点探讨车用锂动力电池材料体系及微结构性能,评述电池材料体系与微结构性能及其内在关联机制。

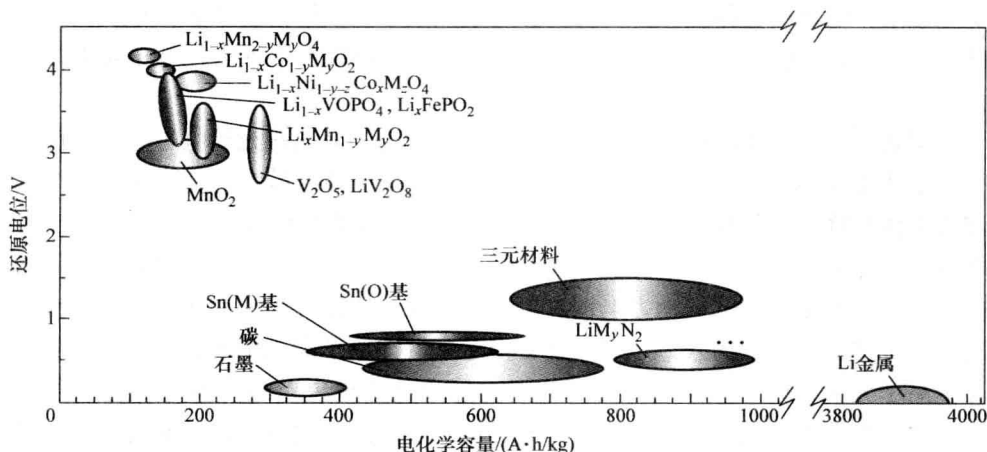


图1-6 锂动力电池正负极材料容量/氧化还原电位分布示意

1.2.1 锂离子电池浓度梯度储能体系与微结构

浓度梯度材料体系目前在锂动力电池应用潜力很大,梯度材料的设计思想,例如,有 Ni/Co 二元材料非均匀分布,从内部到表面, Ni 含量逐渐降低, Co 含量逐渐升高,兼具两种材料优势,性能更佳。在微尺度层面,设计材料微结构,从而改变浓度梯度结构的尺度特性,加强微结构纳米尺度的导电功能性,通过掺杂技术增强梯度微结构的电池综合性能。浓度梯度材料由于具有独特结构特性,整合了内外两种材料的性质,并互相弥补不足,形成新的纳米微结构性能,是近几年的一个重要研究方向,并且经久不衰。Sun等设计球形纳米尺度梯度结构用于 Li^+ 的嵌入与脱嵌,如图1-7所示,使材料具有较好的倍率性和较高的振实密度。其内部为 $\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1})\text{O}_2$,具有高容量特点,表面平均组分为 $\text{Li}(\text{Ni}_{0.46}\text{Co}_{0.23}\text{Mn}_{0.31})\text{O}_2$ 的梯度材料体系,高电压下两者结合既提高了电池材料的容量、结构稳定性和循环稳定性,又满足了高安全性要求。Armand等通过原

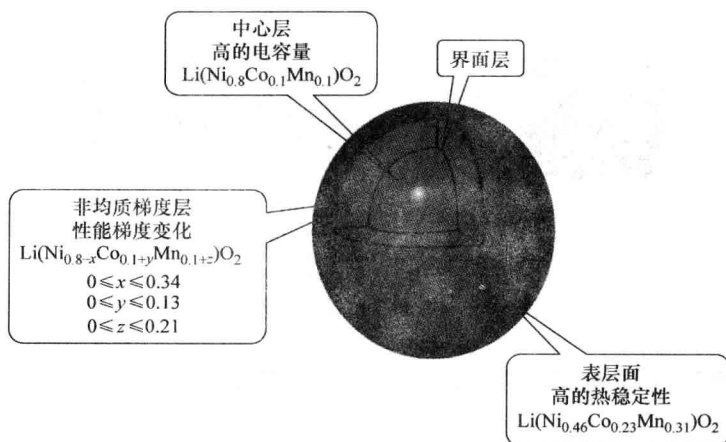


图 1-7 球形梯度微结构

位聚合法合成得到了梯度结构的碳包覆三维基片纳米复合物,如图 1-8 所示,它利用电纺丝技术合成碳包覆形成三维基片形纳米线微结构。该材料体系具有高比容量、良好充放电倍率、循环稳定性和较高的振实密度,成为研究纳米尺度电池材料的新方向。

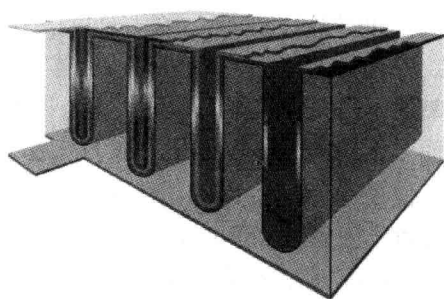


图 1-8 三维基片形梯度微结构

锂离子电池梯度结构具有可薄膜化、任意面积化与任意形状化等优点,可以用复合薄膜制造电池,提高电池容量。薄膜曲面结构锂离子电池(图 1-9),适合于大功率充放电,呈三维薄膜梯度结构,具有高吸液率、高保液率、高电导率性能,韧性好。该结构体系适合大电流放电,而且产生的热量很少,具有优良的表面性能,且在高温下具有自闭合功能。当薄膜材料发生聚合反应时微孔急速闭合,高温下蠕变小,仍能继续保持结构的完整性,因此薄膜尺度稳定性好。锂离子电池的宏观优点如图 1-10 所示。

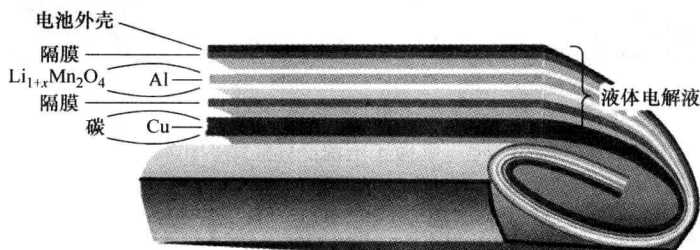


图 1-9 薄膜曲面结构锂离子电池



图 1-10 锂离子电池的宏观优点

1.2.2 锂离子电池微结构储能模型与功能设计

磷酸铁锂 (LiFePO_4) 比传统正极材料更具安全性, 耐高温且耐过充电, 因此已成为当前主流的大电流放电的锂离子电池的正极材料。 LiFePO_4 具有正交橄榄石结构, 如图 1-11c 所示。在 LiFePO_4 中, 氧原子以微扭曲结构六方紧密堆积方式排列。 Fe 与 Li 分别位于氧原子八面体中心位置, 形成了 FeO_6 和 LiO_6 八面体。 P 占据了氧原子四面体位置, 形成了 PO_4 四面体。相邻的 FeO_6 八面体共用一个氧原子, 从而互相连接形成 FeO_6 层。在 FeO_6 层之间, 相邻的 LiO_6 八面体通过两个氧原子连接, 使得 Li^+ 形成二维扩散运动, 从结构上看, PO_4 四面体位于 FeO_6 层之间, 在一定程度上阻碍了 Li^+ 扩散运动。相邻的 FeO_6 八面体通过共顶点连接, 与层状结构 (图 1-11a) 和尖晶石结构 (图 1-11b) 中存在共棱的 MO_6 八面体连续结构不同, 基于共顶点八面体的多壁石墨纳米管的多孔 LiFePO_4 材料, 放电状态下用金属离子如 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 等掺杂, 电导率超过了 LiCoO_2 、 LiMn_2O_4 的电导率。掺杂后的 LiFePO_4 能够保持可观的放电容量, 并且极化很小, 防止产生异常晶粒, 增强了颗粒内部及颗粒间的电子电导。

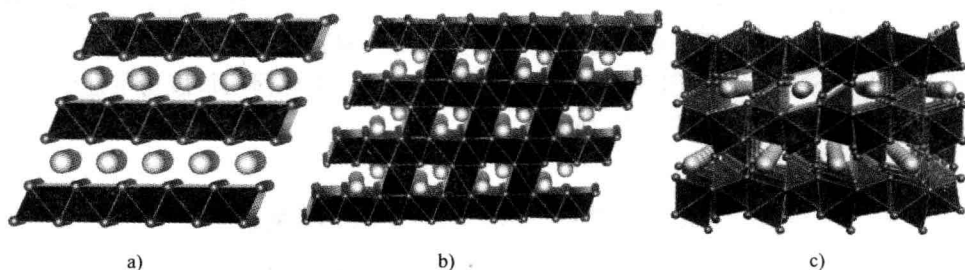


图 1-11 锂离子电池晶体微结构比较

a) LiCoO_2 层状结构 b) LiMn_2O_4 尖晶石结构 c) LiFePO_4 橄榄石结构

对于磷酸铁锂 (LiFePO_4 , LFP) 微结构, 当 Li^+ 嵌入与脱嵌动态运动时, 电极电位变化小, 保持了电压平稳。锂离子扩散系数大, 循环及高倍充放电性



能良好, 结合 Mg^{2+} 金属阳离子掺杂等四种微结构设计模型, 如图 1-12a 所示; 同时, 利用碳包覆增强 LFP 材料的导电性能, 并设计纳米颗粒空心球微结构如图 1-12b 所示。LFP 具有更大的比表面积, 电解质稳定、致密, Li^+ 在 LFP 材料中具有更大的扩散系数, 便于快速放电与深度放电, 材料导电性得到明显提高。

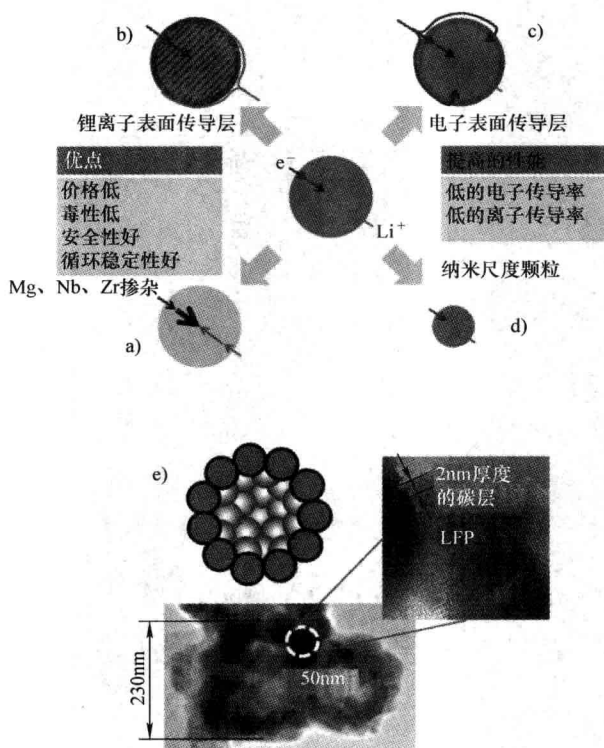


图 1-12 LFP 锂离子微结构模型与功能设计

a) ~ d) 为提高锂离子与电子传导率的四种微结构 e) 碳包覆 LFP 纳米颗粒空心球的微结构

进一步分析 LiCoO_2 层状结构, LiCoO_2 在纳米尺度上混合在电解质中, 在电解液中形成微层结构, LiCoO_2 内形成了晶界。如图 1-13 所示, 纳米尺度下, 许多显微术很难观测清楚石墨烯边界情况。这种纳米结构尺寸很小, 对比其他显微术, 用高角度暗场散射扫描透射电镜观测技术, 能够看清锂离子沿晶界平面 (100) 传输模型与锂离子沿晶界 (100) 和 (110) 的扩散路径, 该技术无干扰叠加, 这点至关重要, 观测效果很理想。该技术独到之处在于对晶界效应的清晰观测。微结构纳米尺度性能优异, 能储存 $1.1 \text{ 万 mA} \cdot \text{h/g}$ 能量, 储能巨大。对于分层纳米结构的锂离子电池, 若在纯氧环境下则能达更高水平储能容量。但在空气中时, 储能容量因空气中的水对于锂金属影响而有所下降。若设计硅簇薄