

新能源汽车 安全与可靠性测试

● 主编 李昊

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以新能源汽车的测试和试验技术为主线,从新能源汽车动力系统、整车的测试和试验两个方面展开,融入国家和企业标准解读,结合汽车可靠性工程相关知识,讲述新能源汽车的可靠性测试标准和设计思想。本书以新能源汽车的安全和可靠性测试试验为基础,全面阐述新能源汽车性能相关测试、耐久性测试、安全防护测试、电驱系统标准与试验。

本书既可作为高等院校车辆工程相关专业的教材,也可作为新能源汽车开发人员的技术参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车安全与可靠性测试 / 李昊主编. --北京:
北京理工大学出版社, 2023. 1

ISBN 978-7-5763-2078-7

I. ①新… II. ①李… III. ①新能源-汽车-安全技术-测试 ②新能源-汽车-可靠性-测试 IV.

①U469. 7

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 010885 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 涿州市新华印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 12.5

字 数 / 278 千字

版 次 / 2023 年 1 月第 1 版 2023 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 68.00 元

责任编辑 / 江 立

文案编辑 / 李 硕

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

随着全球新一轮的科技革命和产业变革，电动化、网联化、智能化、共享化成为汽车产业的发展潮流和趋势。发展新能源汽车是应对气候变化、推动绿色发展的战略举措，对建设清洁美丽中国、构建人类命运共同体具有重要意义。新能源汽车融合新能源、新材料和互联网、大数据、人工智能等多种变革性技术，正逐步演变成机械、能源、交通、通信等多学科交叉融合的综合载体。

随着新能源汽车的快速发展，汽车试验技术也正在从传统燃油汽车转向以电驱动为主的新能源汽车领域。由于新能源汽车引入了电池、电机等动力元件，因此本书以新能源电驱动车的可靠性测试和试验为主线，从新能源汽车动力系统、整车的测试和试验两个方面展开，融入国家和企业标准解读，结合汽车可靠性工程相关知识，讲述新能源汽车的可靠性测试标准和设计思想。

全书分为两大部分。第一部分为1~4章，讲述新能源汽车的动力系统测试和试验，包括新能源汽车的动力电池系统、驱动电机系统、传动系统和燃料电池系统的测试技术和试验方法以及国际和国内相关标准。第二部分为5~8章，讲述新能源汽车的整车测试和试验，包括新能源汽车的整车基本试验、安全性试验、可靠性试验和汽车环保性试验。

全书以新能源汽车测试和试验为基础，全面阐述新能源汽车动力系统，整车测试和试验的原理、方法、技术指标，仪器设备及发展趋势等。在动力系统部分，包括：动力电池安全性、可靠性，壳体防护等；驱动电机参数测试、安全和环境适应性测试、可靠性、电磁兼容性等；新能源传动系统动力性能、燃油消耗和SOC试验、可靠性试验、振动噪声试验等；燃料电池常规试验、环境温度适应性试验、安全性试验等。在整车部分，包括：动力性、经济性、制动性、操纵稳定性、通过性、电磁兼容性等基本性能试验；电池安全性检测、整车碰撞安全等安全性能试验；动力系统、传动系统及整车的可靠性试验；排气污染物测量及汽车噪声测量等环境保护试验。

本书由燕山大学李昊教授担任主编，李学良副教授担任副主编。李昊构思了全书的结构框架，统筹全书编写工作，并编写了第1章和第2章；李学良编写了第5章、第6章和第7章；许宏鹏编写了第4章；闫梅编写了第3章和第8章。参加本书编写工作的研究生有金嘉玺、王衍荣、李国通、湛永全、刘浩然、徐宏扬。特别感谢保定长城汽车股份有限公司赵冬冬、吴涛两位资深工程师和燕山大学电气工程学院沈虹教授为本书提出的宝贵建议。

由于时间仓促，书中难免存在不妥之处，请读者原谅，并提出宝贵意见。

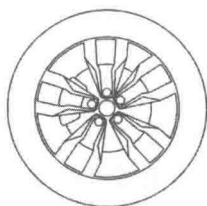
编 者

目 录

| | |
|---------------------|-------|
| 第 1 章 动力电池系统 | (1) |
| 1.1 动力电池的分类及原理 | (1) |
| 1.2 动力电池的主要性能指标 | (8) |
| 1.3 动力电池系统主要试验 | (10) |
| 1.4 动力电池系统试验平台 | (20) |
| 1.5 动力电池及其测试技术的发展趋势 | (23) |
| 第 2 章 驱动电机系统 | (26) |
| 2.1 驱动电机的分类及原理 | (26) |
| 2.2 驱动电机的主要性能指标 | (32) |
| 2.3 驱动电机系统主要试验 | (33) |
| 2.4 驱动电机系统试验平台 | (39) |
| 2.5 驱动电机及其测试技术的发展趋势 | (40) |
| 第 3 章 传动系统 | (42) |
| 3.1 传动系统的基本组成 | (42) |
| 3.2 传动系统主要试验 | (46) |
| 3.3 传动系统试验平台 | (60) |
| 3.4 传动系统及其测试技术的发展趋势 | (65) |
| 第 4 章 燃料电池系统 | (68) |
| 4.1 燃料电池系统的基本原理 | (68) |
| 4.2 燃料电池系统的主要性能指标 | (75) |
| 4.3 燃料电池系统主要试验 | (78) |
| 4.4 燃料电池系统试验平台 | (86) |
| 4.5 燃料电池及其测试技术的发展趋势 | (93) |
| 第 5 章 新能源汽车基本性能 | (97) |
| 5.1 动力性 | (97) |
| 5.2 经济性 | (101) |
| 5.3 制动性 | (115) |
| 5.4 操控稳定性 | (123) |
| 5.5 通过性 | (129) |
| 5.6 电磁兼容性 | (132) |
| 第 6 章 安全性能 | (135) |



| | | |
|-------------|-----------------------|-------|
| 6.1 | 电池安全性试验 | (135) |
| 6.2 | 整车碰撞安全性试验 | (144) |
| 第7章 | 可靠性试验 | (155) |
| 7.1 | 动力系统可靠性试验 | (156) |
| 7.2 | 传动系统可靠性试验 | (161) |
| 7.3 | 整车可靠性试验 | (164) |
| 第8章 | 汽车环境保护试验 | (171) |
| 8.1 | 排气污染物测量 | (171) |
| 8.2 | 汽车噪声测量 | (178) |
| 附录 | | (184) |
| 附录 A | 动力蓄电池相关标准 | (184) |
| 附录 B | 新能源汽车驱动电机相关标准 | (184) |
| 附录 C | 新能源汽车传动系统相关标准 | (184) |
| 附录 D | 燃料电池汽车相关标准 | (185) |
| 附录 E | 新能源汽车通过性试验相关标准 | (185) |
| 附录 F | 新能源汽车安全试验相关标准 | (187) |
| 附录 G | 新能源汽车可靠性试验相关标准 | (189) |
| 附录 H | 汽车环境保护试验相关标准 | (190) |
| 参考文献 | | (191) |



第1章

动力电池系统

学习目标

1. 了解动力电池的历史和发展趋势，掌握各类动力电池的结构、工作原理和运行特性。
2. 熟悉车用动力电池的测试标准和试验方法。

思考

1. 哪些电池能作为汽车的动力蓄电池来使用？
2. 电驱动汽车对蓄电池的要求如何？
3. 国家标准和国际标准对车用动力蓄电池做了哪些要求？

1.1 动力电池的分类及原理

1.1.1 动力电池概述

1. 动力电池的定义

纯电动汽车不再需要燃油，它没有内燃机和燃油箱，简单来说就是用电机取代了内燃机，动力电池取代了燃油。电动汽车的主要动力源为电能，通过电机等动力装置将电能转化为机械能，从而驱动车轮行驶，而电能来自纯电动汽车的动力电池系统。作为电动汽车的能量来源，动力电池技术一直是影响电动汽车的实用化进程的关键因素之一。

动力电池是为电动汽车提供能量的电能储存元件，一般将车载的高压驱动电池称为动力蓄电池或动力电池，相当于传统内燃机汽车“燃油箱”的作用。GB/T 19596—2017《电动汽车术语》中动力电池的定义：为电动汽车动力系统提供能量的蓄电池。电动汽车用动力电池与普通电池不同，它是以较长时间的中等电流持续放电为主，间或以大电流放

电（启动、加速时）并以深循环使用为主。

2. 动力电池的特征

电动汽车要求动力电池具有高能量密度、高功率密度、较长的循环寿命、较好的充放电性能、良好的电池一致性，同时具有价格优势和使用维护方便等特征。电动汽车用动力电池与普通电池相比，有以下区别。

1) 性质不同

相对于为便携式电子设备提供能量的小型电池而言，动力电池是指为交通运输工具提供驱动能量的电池，包括传统的铅酸蓄电池、镍氢电池和新兴的锂离子动力电池。手机、笔记本电脑等消费电子产品使用的锂电池一般统称为锂电池，以区别于电动汽车用的动力电池。

2) 放电功率不同

一颗 4 200 mA · h 的动力电池可以在短短几分钟内将电量放光，但是普通电池完全做不到，因此普通电池的放电能力完全无法与动力电池相比。动力电池与普通电池最大的差别，在于其放电功率大、比能量高。由于动力电池主要用途为车用能源供给，因此相较于普通电池要有更高的放电功率。

3) 放电时间不同

与传统内燃机汽车上的启动蓄电池相比，动力电池能以小电流放电几个小时，放电深度很深。启动蓄电池放电时间很短，但是瞬间大电流放电能力强，利于大电流启动。

3. 动力电池的作用

动力电池系统作为电动汽车的能量源，它除了为整车提供持续稳定的能量，还承担以下任务：

- (1) 计算整车的剩余电量和充电提醒；
- (2) 对电池进行温度、电压、湿度的检测；
- (3) 漏电检测和异常情况报警；
- (4) 充放电控制和预充电控制；
- (5) 电池一致性的检测；
- (6) 系统自检。

1.1.2 动力电池的分类

电动汽车可采用的动力电池种类很多，主要有铅酸蓄电池、镍系列电池和锂系列电池，其他还包括氯化镍高能电池、锌-空气电池、质子交换膜燃料电池、直接甲醇燃料电池、石墨烯电池等。常见动力电池的性能比较如表 1-1 所示。

表 1-1 常见动力电池的性能比较

| 电池类别 | 电压/V | 质量比能量/ (W · h · kg ⁻¹) | 体积比能量/ (W · h · L ⁻¹) | 记忆效应 | 循环寿命 (80% DOD)/次 | 价格/[美元 · (kW · h) ⁻¹] |
|--------|------|---------------------------------------|--------------------------------------|------|---------------------|--------------------------------------|
| VRLA | 2.0 | 35 | 80 | 无 | 400 | 93 ~ 100 |
| Cd-Ni | 1.2 | 45 | 160 | 有 | 500 ~ 1 000 | 1 000 |
| MH-Ni | 1.2 | 70 | 240 | 有 | 500 ~ 800 | 1 250 |
| Li-ion | 3.6 | 125 | 300 | 无 | 600 ~ 1 000 | 2 000 |

续表

| 电池类别 | 电压/V | 质量比能量/ ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$) | 体积比能量/ ($W \cdot h \cdot L^{-1}$) | 记忆效应 | 循环寿命 (80% DOD)/次 | 价格/[美元· ($kW \cdot h$) $^{-1}$] |
|------------|------|---|--|------|---------------------|---------------------------------------|
| 聚合物 Li-ion | 3.6 | 200 | 300 | 无 | 600 ~ 1 000 | 2 500 |
| Zn-Ni | 1.65 | 75 | 180 | 无 | 300 ~ 500 | 200 |
| 锌-空气 | 1.4 | 135 | 1 000 | 无 | 可再生 | 100 |

1. 铅酸蓄电池

自1859年法国科学家普兰特发明了铅酸蓄电池以来,铅酸蓄电池历经了许多重大的改进。由于制造工艺及相关配套技术成熟,且具有价格便宜、规格齐全、原料易得、使用可靠、温度特性好、可大电流放电等优点,因此铅酸蓄电池在许多领域得到了广泛应用。在此主要对新能源汽车所用的铅酸蓄电池予以介绍。

铅酸蓄电池是指正极活性物质使用二氧化铅,负极活性物质使用海绵状铅,并以硫酸溶液为电解液的蓄电池。铅酸蓄电池主要用在低速电动汽车上。

1) 铅酸蓄电池的基本分类

铅酸蓄电池分为免维护铅酸蓄电池和阀控密封式铅酸蓄电池。

(1) 免维护铅酸蓄电池。这类电池由于自身结构上的优势,电解液的消耗量非常小,在使用寿命内基本不需要补充蒸馏水,具有耐振、耐高温、体积小、自放电小的特点,使用寿命一般为普通铅酸蓄电池的2倍。市场上的免维护铅酸蓄电池也有两种:一种是在购买时一次性加电解液,以后使用中不需要添加补充液;另一种是本身出厂时就已经加好电解液并封死,用户根本就不能加补充液。

(2) 阀控密封式铅酸蓄电池。这类电池在使用期间不用加酸、加水维护,电池为密封结构,不会漏酸,也不会排酸雾。电池盖子上设有溢气阀(也叫安全阀),其作用是当电池内部气体量超过一定值,即当电池内部气压升高到一定值时,溢气阀自动打开排出气体,然后自动关闭,防止空气进入电池内部。

阀控密封式铅酸蓄电池分为玻璃纤维(Absorbent Glass Mat, AGM)电池和胶体(Gelled, GEL)电池两种。AGM电池采用吸附式玻璃纤维棉作隔膜,电解液吸附在极板和隔膜中,电池内无流动的电解液,电池可以立放工作,也可以卧放工作;GEL电池以二氧化硅(SiO_2)作凝固剂,电解液吸附在极板和胶体内,一般立放工作。若无特殊说明,阀控密封式铅酸蓄电池皆指AGM电池。

电动汽车使用的动力电池一般是阀控密封式铅酸蓄电池。

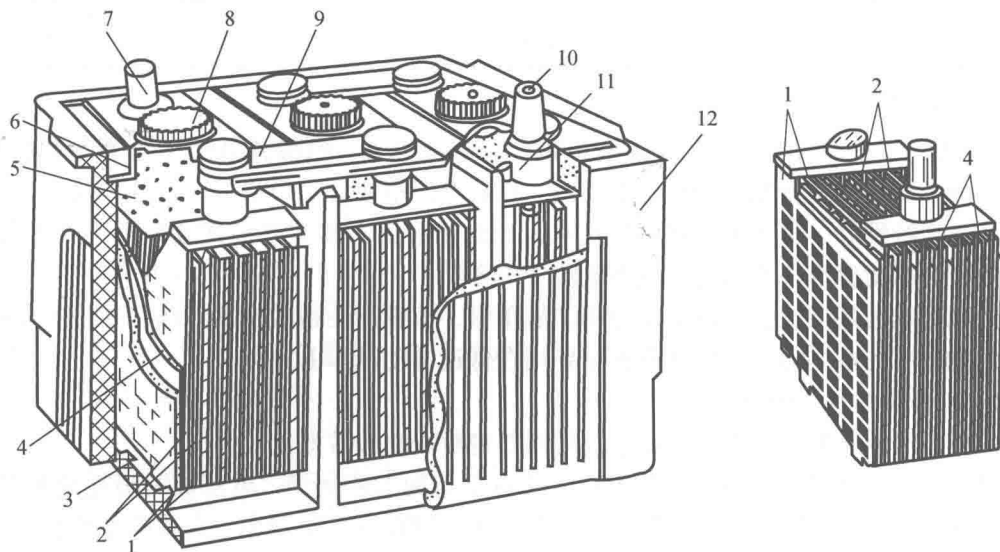
2) 铅酸蓄电池的型号含义

铅酸蓄电池通常按用途、结构和维护方式来分类,我国铅酸蓄电池产品型号的中间部分就表示其类型。通常,铅酸蓄电池型号用三段式来表示:第一段用数字表示串联的单体电池数,第二段用两组字母分别表示其用途和特征,第三段用数字表示额定容量。例如,型号6DAW150表示为由6个单体电池串联组合(通常单体电池电压为2V)成为额定电压为12V,用于电动汽车的干荷电式、免维护及额定容量为150A·h的蓄电池。其中,特征就是按其结构和维护方式来划分的。

3) 铅酸蓄电池的结构组成

汽车所用的普通铅酸蓄电池如前面蓄电池构造所述,正负极板浸入稀硫酸电解液中成

为单体电池。每个单体电池的标称电压为 2 V，为增加铅酸蓄电池的容量，一般由多块极板组成极群，即多块正极板和多块负极板分别用连接条（汇流排）焊接在一起，共同组成电池。新能源汽车的辅助电源及传统内燃机汽车启动用的 12 V 铅酸蓄电池就是由 6 个独立的铅酸单体蓄电池组成的，而新能源汽车的动力电池组则为多个电池以多种方式组合成的大容量电池。铅酸蓄电池的构造如图 1-1 所示。



1—正极板；2—负极板；3—肋条；4—隔板；5—护板；6—封料；7—负极柱；
8—加液口盖；9—电极连接条；10—正极柱；11—极柱衬套；12—蓄电池容器。

图 1-1 铅酸蓄电池的构造

2. 锂离子电池

锂离子电池是 1990 年由日本索尼公司首先推向市场的高能蓄电池。与其他蓄电池相比，锂离子电池具有电压高、质量能量密度高、充放电寿命长、无记忆效应、无污染、快速充电、自放电率低、工作温度范围宽和安全可靠等优点。相比于镍氢电池，电动汽车采用锂离子电池，可使电池组的质量下降 40% ~ 50%，体积减小 20% ~ 30%，能源效率也有一定程度的提高。所以，锂离子电池逐渐成为电动汽车动力电池的首选。

1) 锂离子电池的分类

(1) 按电解质材料分类：根据所用电解质材料的不同，锂离子电池可以分为聚合物锂离子电池和液态锂离子电池。

(2) 按正极材料分类：根据正极材料的不同，锂离子电池可以分为锰酸锂离子电池、磷酸铁锂离子电池、镍钴锂离子电池及三元（镍钴锰）材料锂离子电池。目前应用广泛的是锰酸锂离子电池、磷酸铁锂离子电池和三元材料锂离子电池。

(3) 按外形分类：根据外形形状的不同，锂离子电池可以分为方形锂离子电池和圆柱形锂离子电池。

2) 普通锂离子电池的特点

单体电池工作电压高达 3.7 V，是镍-镉电池、镍-氢电池的 3 倍，铅酸蓄电池的 2 倍；质量轻；质量比能量大，高达 150 W · h/kg，是镍-氢电池的 2 倍、铅酸电池的 4 倍，因此质量是相同能量的铅酸蓄电池的 1/4 ~ 1/3；体积比能量大，高达 400 W · h/L，是铅酸



蓄电池的1/3~1/2;提供了合理的结构、更美观的外形设计条件和设计空间;循环寿命长,以容量保持60%计,电池组100%充放电循环次数可以达到600次以上,使用年限可达3~5年,为铅酸蓄电池的2~3倍;自放电率低,每月不到5%;允许工作温度范围宽,可在-20~55℃条件下工作;无记忆效应,所以每次充电前无须像镍-镉电池、镍-氢电池一样充分放电,可以随时随地进行充电;电池充放电深度对电池的寿命影响不大,可以全充全放;无污染,锂离子电池中不存在有毒物质,因此被称为“绿色电池”,而铅酸蓄电池和镍-镉电池由于存在有害物质铅和镉,故环境污染问题严重。

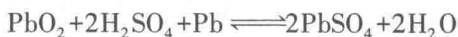
3) 锂离子电池的基本结构

液态锂离子电池和聚合物锂离子电池的主要区别在于电解质不同,液态锂离子电池使用的是液体电解质,而聚合物锂离子电池则以聚合物电解质来代替。不论是液态锂离子电池还是聚合物锂离子电池,它们所用的正、负极材料都是相同的,工作原理也基本一致。液态锂离子电池的负极材料采用碳材料,主要有石墨、微珠碳、石油焦、碳纤维和裂解碳等;正极材料主要有 LiCoO_2 、 LiNiCoMnO_2 、 LiMnO 等,其中 LiCoO_2 应用较为广泛,可逆性、放电容量、充放电率、电压稳定性等性能均较好;电解质为液态,其溶剂为无水有机物;隔膜采用聚烯类多孔膜,如PE、PP或复合膜;外壳采用钢或铝材料,盖体组件具有防焊、断电的功能。聚合物锂离子电池又称为高分子锂电池,属第二代锂离子电池。聚合物锂离子电池由多层薄膜组成,第一层为金属箔集电极,第二层为负极,第三层为固体电解质,第四层为正极,第五层为绝缘层。负极采用高分子导电材料、聚乙炔、人造石墨、聚苯胺或聚对苯酚等制成,正极采用 LiCoO_2 、 LiNiCoMnO 、 LiMnO 和 LiFePO 等制成;电解质为胶体电解质,如有机碳酸酯混合物等。

1.1.3 动力电池系统原理

1. 铅酸蓄电池工作原理

铅酸蓄电池放电和充电的反应过程,是铅酸蓄电池活性物质进行可逆化学变化的过程。它们可以用以下化学反应方程式表示:



铅酸蓄电池在放电时,化学反应由左向右进行,其相反的过程为充电过程的化学反应。放电时,负极板中的每个铅分子从硫酸电解液中吸收1个硫酸根离子组成硫酸铅,自己却放出2个电子送到正极板;正极板的二氧化铅在吸收电子的同时,自硫酸电解液中吸收1个硫酸根离子化合成硫酸铅,并放出2个氧离子;电解液中硫酸的1个分子被铅吸收1个硫酸根离子后余下2个氢离子,当二氧化铅放出2个氧离子时,就和这4个氢离子自动结合成2个水分子。所以,放电时电解液中水的成分增加而硫酸的成分减少。

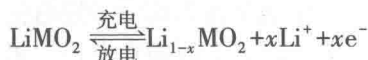
充电时,负极板的硫酸铅自电源中取得2个电子后就放出1个硫酸根离子于电解液中,而自己变为铅;正极板处硫酸铅中的铅离子在电流的作用下失去2个电子变成4价铅离子,它和电解液中的氢氧根结合生成氢氧化铅,由于不稳定,又分解为氧化铅和水;负极板放出的1个硫酸根离子与正极板放出的1个硫酸根离子和电解液中剩下的4个氢离子化合成2个硫酸分子。所以,充电时电解液中的水分逐渐减少而硫酸的成分逐渐增加。

由于铅酸蓄电池在放电时其 H_2SO_4 的浓度会逐渐减小,因此,可以用比重计来测定硫酸的密度,再由铅酸蓄电池电解液密度确定其放电程度。单体铅酸蓄电池的电压为2V,在使用或存放一段时间后,当电压降低到1.8V以下或电解液的密度下降到 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 时,铅酸蓄电池就必须充电,如果电压继续下降,则铅酸蓄电池将可能损坏。

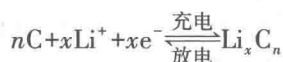
2. 锂离子电池工作原理

以两种不同的、能够可逆地插入及脱出锂离子的嵌锂化合物，分别作为电池正、负极的二次电池即为锂离子电池。锂离子电池是由锂原电池改进而来的。锂原电池的正极材料是二氧化锰 (MnO_2) 或亚硫酸氯 ($SOCl_2$)，负极是锂，电池组装完成后无须充电即有电压，这种电池虽也可充电，但循环性能不好，在充放电循环过程中容易形成锂枝晶，造成电池内部短路，所以这种电池是不允许充电使用的。日本索尼公司在 1991 年研发成功了以碳材料为负极的锂离子电池，它可进行可逆反应，不过该反应不再是一般电池中的氧化还原反应，而是锂离子在充放电过程中可逆地在化合物晶格中嵌入和脱出的反应。当对电池进行充电时，电池的正极上有锂离子生成，生成的锂离子经过电解液运动到达负极。而作为负极的碳呈层状结构，它有很多微孔，到达负极的锂离子就嵌入到碳层的微孔中，嵌入的锂离子越多，充电容量越高。同样，当对电池进行放电时，嵌在负极碳层中的锂离子脱出，又运动回到正极，回正极的锂离子越多，放电容量越高。在充放电过程中，锂离子如同一把摇椅在正、负两个电极之间往返嵌入和脱出，因此锂离子电池也被形象地称为“摇椅式电池”。锂离子电池的电极反应式如下。

正极：



负极：



电池：



式中，M 为 Co、Ni、W、Mn 等金属元素。

锂离子电池的工作原理（即其充放电原理）如图 1-2 所示。

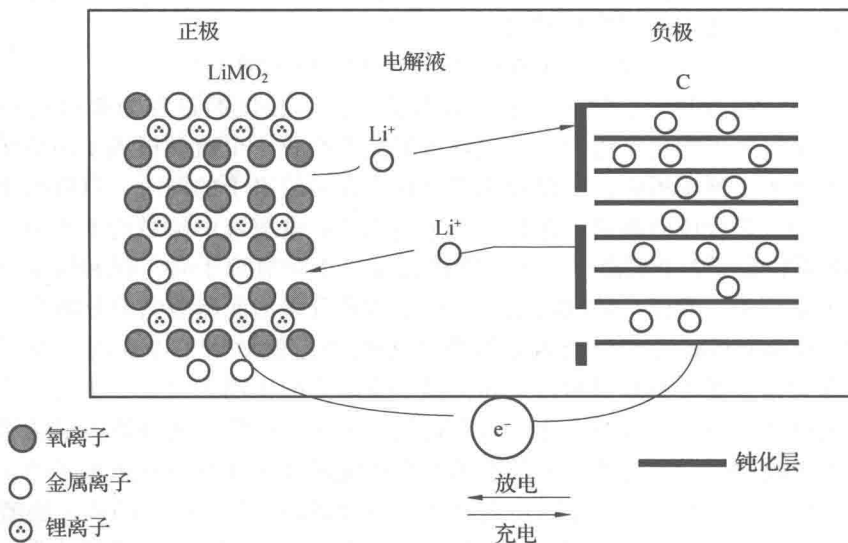


图 1-2 锂离子电池的工作原理

由于锂离子电池的充放电过程只涉及锂离子而不涉及金属锂，因此从根本上解决了由于锂枝晶的产生而带来的安全性的问题。

1) 钴酸锂离子电池的工作原理

钴酸锂离子电池的工作原理如图 1-3 所示。试验证明, 钴酸锂 (LiCoO_2) 离子电池在正常充电结束后 (即充电至截止电压为 4.2 V 左右), LiCoO_2 正极材料中的 Li^+ 还有剩余。此时若发生过充电等异常情况, LiCoO_2 正极材料中的 Li^+ 将会继续脱嵌, 游向负极, 而此时负极材料中能容纳 Li^+ 的位置已被填满, 故 Li^+ 只能以金属的形式在其表面析出, 聚结成锂枝晶, 埋下了使电池内部短路的安全隐患。

钴酸锂离子电池的充电反应式为:

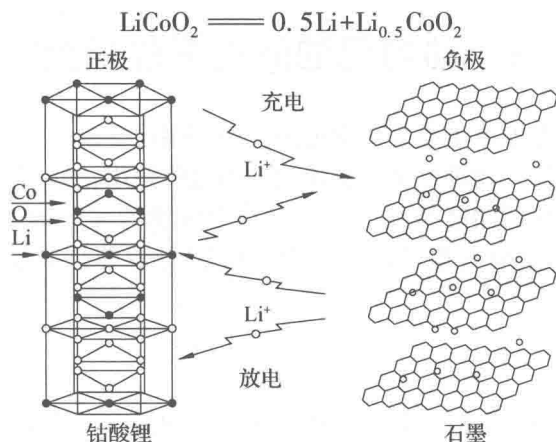


图 1-3 钴酸锂离子电池的工作原理

2) 锰酸锂离子电池的工作原理

合成性能好、结构稳定的正极材料锰酸锂是锂离子电池电极材料的关键, 锰酸锂是较有前景的锂离子电池正极材料之一, 但其较差的循环性能及电化学稳定性却大大限制了其产业化, 掺杂是提高其性能的一种有效方法。掺杂有强 $\text{M}-\text{O}$ 键、较强八面体稳定性及离子半径与锰离子相近的金属离子, 能显著改善其循环性能。

锰酸锂离子电池的工作原理如图 1-4 所示。充电时, 锂离子从正极材料的晶格中脱出, 通过电解液和隔膜嵌入到负极中; 放电时, 锂离子从负极脱出, 通过电解液和隔膜嵌入到正极材料晶格中。

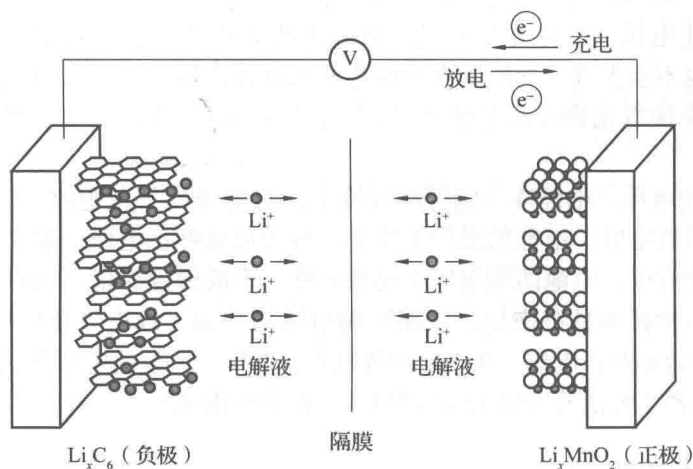
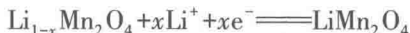


图 1-4 锰酸锂离子电池的工作原理

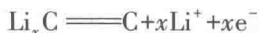


钴酸锂离子电池的电极反应式如下。

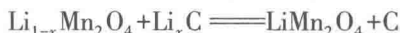
正极：



负极：



电池：



1.2 动力电池的主要性能指标

新能源汽车上的动力电池主要是化学电池，即利用化学反应发电的电池，可以分为原电池、蓄电池和燃料电池；物理电池一般作为辅助电源使用，如超级电容器。

动力电池是电动汽车的储能装置，要评定动力电池的实际效应，主要是看其性能指标。动力电池性能指标主要有电性能、安全性能和寿命等，根据动力电池种类不同而不同。

1.2.1 电性能

电性能主要有端电压、标称（额定）电压、开路电压、工作电压、充电终止电压和放电终止电压等。

(1) 端电压。电池的端电压是指电池正极与负极之间的电位差。

(2) 标称电压。标称电压也称额定电压，是指电池在标准规定条件下工作时应达到的电压。标称电压由极板材料的电极电位和内部电解液的浓度决定。铅酸蓄电池的标称电压是 2 V，金属氢化物镍蓄电池的标称电压为 1.2 V，磷酸铁锂离子电池的标称电压为 3.2 V，锰酸锂离子电池的标称电压为 3.7 V。

(3) 开路电压。电池在开路条件下的端电压称为开路电压，即电池在没有负载情况下的端电压。

(4) 工作电压。工作电压也称负载电压，是指电池接通负载后处于放电状态下的端电压。电池放电初始的工作电压称为初始电压。

(5) 充电终止电压。电池充足电时，极板上的活性物质已达到饱和状态，再继续充电，电池的电压也不会上升，此时的电压称为充电终止电压。铅酸蓄电池的充电终止电压为 2.7~2.8 V，金属氢化物镍蓄电池的充电终止电压为 1.5 V，锂离子电池的充电终止电压为 4.25 V。

(6) 放电终止电压。电池在一定标准所规定的放电条件下放电时，电压将逐渐降低，当电池不宜再继续放电时，电池的最低工作电压称为放电终止电压。如果电压低于放电终止电压后电池继续放电，电池两端电压会迅速下降，形成深度放电。这样，极板上形成的生成物在正常充电时就不易再恢复，从而影响电池的寿命。放电终止电压和放电率有关，放电电流直接影响放电终止电压。在规定的放电终止电压下，放电电流越大，电池的容量越小。金属氢化物镍蓄电池的放电终止电压为 1 V，锂离子电池的放电终止电压为 3 V。

1.2.2 安全性能

锂离子电池的单体电池是由正极、负极、隔膜和电解液等组件组成的一个比较复杂的

电化学体系，其安全性取决于整个组件的“底板效应”。只有做到单体安全才能保证串并联后电池整体的性能安全地提升。

1. 输出效率

动力电池作为能量存储器，充电时把电能转化为化学能储存起来，放电时把化学能转化为电能释放出来。在这个可逆的电化学转换过程中，有一定的能量损耗，通常用电池的容量效率和能量效率来表示。

(1) 容量效率。容量效率是指电池放电时输出的容量与充电时输入的容量之比，即

$$\eta_c = \frac{C_o}{C_i} \times 100\%$$

式中， η_c 为电池的容量效率； C_o 为电池放电时输出的容量， $A \cdot h$ ； C_i 为电池充电时输入的容量， $A \cdot h$ 。

影响电池容量效率的主要因素是副反应。当电池充电时，有一部分电量消耗在水的分解上。此外，自放电及电极活性物质的脱落、结块、孔率收缩等也降低容量效率。

(2) 能量效率。能量效率也称电能效率，是指电池放电时输出的能量与充电时输入的能量之比，即

$$\eta_E = \frac{E_o}{E_i} \times 100\%$$

式中， η_E 为电池的能量效率； E_o 为电池放电时输出的能量， $W \cdot h$ ； E_i 为电池充电时输入的能量， $W \cdot h$ 。

2. 自放电率

自放电率是指电池在存放期间容量的下降率，即电池无负荷时自身放电使容量损失的速度，它表示电池搁置后容量变化的特性。自放电率用单位时间容量降低的百分数表示，其表达式为

$$\eta_{\Delta C} = \frac{C_a - C_b}{C_a T_i} \times 100\%$$

式中， $\eta_{\Delta C}$ 为电池自放电率； C_a 为电池存储前的容量， $A \cdot h$ ； C_b 为电池存储后的容量， $A \cdot h$ ； T_i 为电池存储的时间，常以天、月为单位。

3. 放电倍率

电池放电电流的大小常用“放电倍率”表示，是指电池在规定的时间内放出其额定容量时所需要的电流强度。由此可见，放电电流越大，即放电倍率越高，则放电时间越短。

放电倍率等于放电电流与额定容量之比。根据放电倍率的大小可分为低倍率（ $<0.5C$ ）、中倍率（ $0.5C \sim 3.5C$ ）、高倍率（ $3.5C \sim 7.0C$ ）、超高倍率（ $>7.0C$ ）。

例如，某电池的额定容量为 $20 A \cdot h$ ，若用 $4 A$ 电流放电，则放完 $20 A \cdot h$ 的额定容量需用 $5 h$ ，也就是说以 $1/5$ 倍率放电，用符号 $C/5$ 或 $0.2C$ 表示，为低倍率。

1.2.3 寿命

寿命是指电池在规定条件下的有效使用期限。电池发生内部短路或损坏而不能使用，以及容量达不到规范要求时，电池的寿命终止。

电池的寿命包括使用期限和使用周期。使用期限是指电池可供使用的时间，包括电池



的存放时间。使用周期是指电池可供重复充放电的次数，也称循环寿命。

目前，电动汽车发展的瓶颈之一就是电池价格高。

除上述主要性能指标外，还要求电池无毒性、对周围环境不会造成污染或腐蚀、有良好的充电性能、充电操作方便、充电时间短、耐振动、无记忆效应、对环境温度变化不敏感、制造成本低、易于调整和维护等。

1.3 动力电池系统主要试验

1.3.1 单体电池测试

1. 电池容量测试

电池容量的测试方法主要包括静态容量检测和动态容量检测。

(1) 静态容量检测的主要目的是确定电动汽车在实际应用时，动力电池组具有充足的电量，能够在各种预定放电倍率和温度下正常工作。主要的测试方法为恒温条件下恒流放电测试，放电终止以动力电池组电压降低到设定值或动力电池组内的单体电池一致性达到设定的数值为标准。

(2) 动态容量检测时，电动汽车在行驶过程中，动力电池的使用温度、放电倍率都是动态变化的。该测试主要检测动力电池组在动态放电条件下的能力，主要表现为不同温度和不同放电倍率下的能量和容量。主要测试方法为采用设定的变电流工况或实际采集的汽车应用电流变化曲线，进行动力电池组的放电性能测试，测试终止条件根据测试工况及动力电池的特性有所调整，基本也是遵循电压降低到一定的数值为标准。该方法可以更加直接和准确地反映电动汽车的实际应用需求。

电池容量测试的内容包括电池内阻、荷电保持能力及电池寿命。

1) 电池内阻

电池内阻的测量方法目前主要有两种：直流放电法和交流阻抗法。直流放电法以理想直流电路为基础，对电池进行瞬间大电流放电，然后测量电池两端的瞬间压降，再通过欧姆定律计算出电池内阻，该方法简单、易于实现，在实践中得到了一定的应用。但该方法必须在静态或者脱机的情况下进行，无法实现在线测量，且动力电池组放出的瞬间电流较大，对动力电池组和负载均会造成较大冲击，影响使用。此外，测量结果稳定性不佳，一般适用于对测量精度和安全性要求不高的场合。电化学阻抗谱法俗称“交流阻抗法”，以小幅值的正弦波电流或电压信号作为激励源，输入电池，通过测定其相应信号来推算电池内阻。交流阻抗法既不是稳态法，也不是暂态法，而是在一个稳态下施加一个小的扰动，是一种准稳态方法。该方法的优点是在线测量可避免小扰动对系统产生的影响，扰动与系统的响应之间保持近似线性关系。

2) 荷电保持能力

采用直封工艺制备 15 只 D 型 MH-Ni 电池，额定容量为 $7 \text{ A} \cdot \text{h}$ ，多次活化使电池容量达到稳定状态，作为电池的初始容量，然后采用高温搁置和常温搁置两种方法进行测试。

(1) 高温搁置。电池常规充电后， $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 搁置 4 天，然后以 0.2C 倍率放电至 1 V 。

(2) 常温搁置。电池常规充电后，常温搁置 28 天，然后以 0.2C 倍率放电至 1 V 。

3) 电池寿命

按我国工业和信息化部规定的电池寿命测试方法,循环寿命不应小于500次,具体步骤如下。

(1) 电池在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下,以 $C/3$ 倍率放电至截止电压,静置 1 h,以 $C/3$ 倍率充电至截止电压,转恒压充电到电流降至 $C/3$,静置 1 h。

(2) 电池在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下以 $0.5C$ 倍率放电,直到放电容量达到额定容量的 80%。

(3) 电池按步骤 (1) ~ (2) 连续重复 24 次。

(4) 按步骤 (1) 充满电后,以 $C/3$ 倍率放电至截止电压,计算放电容量。如果蓄电池容量小于额定容量的 80%,则终止测试。

(5) 步骤 (1) ~ (4) 在规定条件下重复的次数为循环寿命数。

2. 电池安全性能测试

电池的安全性能测试是指电池在使用与搁置期间对人和装备可能造成伤害的评估。尤其是电池在滥用时,由于特定的能量输入,电池内部组成物质发生物理或化学反应而产生大量的热量,如热量不能及时散逸,可能导致电池热失控,使电池发生损坏,如猛烈的泄气、破裂、并伴随起火,造成安全事故。通用的动力电池安全测试项目及方法如表 1-2 所示。

表 1-2 通用的动力电池安全测试项目及方法

| 测试项目 | 测试方法 |
|-------|---------------------|
| 电性能测试 | 过充电、过放电、外部短路、强制放电 |
| 机械测试 | 自由落体、冲击、针刺、振动、挤压等 |
| 热测试 | 焚烧、热成像、热冲击、油浴、微波加热等 |
| 环境测试 | 高空模拟、浸泡、耐菌性等 |

3. 电池振动测试

一般测试方法为将单个电池充满电后,紧固至振动台上,按下述条件进行试验。

(1) 振动方向:上下振动;

(2) 振动频率: $10 \sim 55 \text{ Hz}$;

(3) 最大加速度: 30 m/s^2 ;

(4) 振动时间: 2 h;

(5) 放电:以 $1C$ 倍率恒流放电至规定下限电压。

测试后放电容量损失率应小于 5%,不允许出现电压异常、电池外壳变形、漏液等现象。要求以 $1C$ 倍率恒流放电至规定下限电压,限时 90 min。

1.3.2 动力电池组测试

1. 安全性测试

安全性测试的目的在于验证动力电池系统在滥用情况下的安全性,最重要的目的在于验证动力电池系统保护自身的能力以及在发生危险的情况下对乘员的保护能力。安全性测试主要包括跌落、挤压、水浸、火烧、热蔓延等测试。

1) 跌落

(1) 1 m 跌落。测试对象以实际维修或者安装过程中最可能跌落的方向,若无法确



定最可能跌落的方向，则沿 z 轴方向，从 1 m 的高度处自由跌落到水泥地面上，观察 2 h。

(2) 10 m 高空跌落。测试对象以最可能跌落的方向，若无法确定最可能跌落的方向，则沿 z 轴方向，从 10 m 的高度处自由跌落到水泥地面上，观察 2 h。

2) 挤压

(1) 挤压板形式：半径 75 mm 的半圆柱体，半圆柱体的长度大于测试对象的高度，但不超过 1 m。

(2) 挤压方向： x 和 y 方向（汽车行驶方向为 x 轴，另一垂直于行驶方向的水平方向为 y 轴）。

(3) 挤压程度：挤压力达到 100 kN 或挤压变形量达到挤压方向的整体尺寸的 30% 时停止挤压。

(4) 保持 10 min。

(5) 观察 1 h。

3) 水浸

室温下，测试对象以实车装配状态与整车线束相连，然后以实车装配方向置于 3.5% 氯化钠溶液（质量百分比，模拟常温下的海水成分）中观察 2 h（水深要足以淹没测试对象）。对于满足 IPX7 的样品，要求振动测试完成后进行海水浸泡测试。

4) 火烧

(1) 短时间耐火烧测试。

测试中，盛放汽油的平盘尺寸超过测试对象水平尺寸 20 cm，不超过 50 cm。平盘高度不高于汽油表面 8 cm。汽油液面与测试对象的距离设定为 50 cm，或者为汽车空载状态下测试对象底面的离地高度，或者由双方（测试元件提供方与产品购买方，下同）商定。平盘底层注入水。

在离被测设备至少 3 m 远的地方点燃汽油，经过 60 s 的预热后，将油盘置于被测设备下方。如果油盘尺寸太大，无法移动，可以采用移动被测样品和支架的方式。

测试对象直接暴露在火焰下 70 s。

将盖板盖在油盘上，测试对象在该状态下测试 60 s。或经双方协商同意，继续直接暴露在火焰中 60 s。

将油盘移走，观察 2 h。

(2) 长时间耐火烧测试。

测试时，盛放汽油的平盘尺寸超过测试对象水平尺寸 20 cm，不超过 50 cm。平盘高度不高于汽油表面 8 cm。汽油液面与测试对象的距离设定为 50 cm，或者为汽车空载状态下测试对象底面的离地高度，或者由双方商定。平盘底层注入水。

在离被测设备至少 3 m 远的地方点燃汽油，经过 60 s 的预热后，将油盘置于被测设备下方。如果油盘尺寸太大，无法移动，可以采用移动被测样品和支架的方式。

测试对象直接暴露在火焰下 20 min。

5) 热蔓延

热蔓延测试主要验证动力电池系统发生热失控时，能否确保车内乘客的人身安全。

测试对象为整车或完整的车载可充电储能系统或包括蓄电池及电气连接的车载可充电储能系统子系统。如果选择储能系统子系统作为测试对象，则需证明子系统的试验结果能够合理地反映完整的车载可充电储能系统在同等条件下的安全性能。如果储能系统的电子