

Battery Thermal Management

# 电池热管理

饶中浩 张国庆◎编著



科学出版社

# 电池热管理

Battery Thermal Management

饶中浩 张国庆 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书结合作者的部分研究成果,根据相关领域的国内外研究进展,围绕电池的热安全,分别介绍了电池的产热原理、基于不同传热介质的电池热管理方式,详细总结了各种电池热管理方式的基本概念、工作原理,以及电池热管理系统热质传递规律、热管理材料热性能等方面实验研究和数值模拟的重要结论。

本书可作为能源与动力、电动汽车、电池等相关专业本科生和研究生的教材或参考书,也适合新能源汽车、动力电池、热管理等领域相关的研究人员和工程技术人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电池热管理/Battery Thermal Management/饶中浩,张国庆编著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-044863-7

I. ①电… II. ①饶… ②张… III. ①电池-研究 IV. ①TM911

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第126879号

责任编辑:范运年 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张倩 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年7月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年7月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:220 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序 一

电动汽车、新能源和能源互联网是战略性新兴产业,三大产业的基础都是可充电电池,因此,动力电池和储能电池将成为另一个大产业。电池的种类很多,但从能量密度、循环寿命、成本、环境和能源效率等综合因素考虑,锂离子电池是最佳选择。电池的电化学性能、安全性和可靠性等性能等都显著受到温度的影响,而锂离子电池尤其如此。因此,研究电芯、模块和电池系统的产热和吸热行为,以及不同温度环境下的电池性能,从而设计合理的电池热管理系统,对于电动汽车等战略性新兴产业的发展具有重要意义。

电池热管理相关研究工作可追溯到 30 年前,最近几年因为电动汽车和新能源的快速发展又受到广泛关注。电池热管理技术有风冷、液体冷却、热电冷却、热管冷却以及相变材料等多种方式,各有特点,急需对这些研究工作进行系统分析和总结。

该书的编著者及其团队多年来致力于电动汽车电池研究及工程化工作,是国内最早开展电池热管理的研究团队之一,其研究工作得到了国内外同行的广泛关注。希望通过这本书的出版,能在一定程度上满足动力电池和储能电池技术发展的需求,对从事电池成组技术开发的研究人员和工程技术人员提供借鉴和参考。

陈立泉

中国科学院物理研究所研究员

(中国工程院院士)

2015 年 6 月 26 日,于北京

## 序 二

电动汽车之所以成为国家战略性新兴产业,这是因为“发展新能源汽车是我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路”(习近平语);是减少对石油进口的依赖,提高国家战略安全的需要;也是改善环境,提高人们健康水平的保障。我是一名电力工作者,对电网巨大的峰谷差所造成的危害深有体会:它严重影响电网与电厂的安全和经济性。它也象上下班高峰期堵车一样,成为世界性难题。电动汽车可以帮助电网调峰,这对我国和全世界都具有战略性意义。

但是,电动汽车推广应用较为困难,动力电池就是关键制约因素之一。动力电池不但影响电动汽车的使用性能和经济性能,而且目前所使用的锂离子电池还存在燃烧和爆炸的隐患,因此,电池的安全问题已成为当前急需解决的焦点和热点。该书从深层次剖析电池温度对电池的影响,同时提出电池温度控制的解决办法,这对推动电动汽车与电池的发展具有深远的影响。

从上个世纪 90 年代开始,广东工业大学的张国庆教授长期坚持电动汽车及电池与电池组的研究、试验和生产,具有十分丰富的经验和扎实的理论基础。近年来,他又同中国矿业大学教授饶中浩合作,取得多项研究成果和专利。该书就是他们的经验总结和研究成果的结晶,具有一定的科学价值。

相信该书的出版,可供电池和电动汽车及储能的研究与生产和使用的人员学习和借鉴,同时也可以作为电化学和电动汽车及能源与电力等专业的参考书籍。

中国工程院院士 罗绍基

二零一五年六月于广州

# 前 言

电池热管理(battery thermal management)相关研究工作的出现,至今已有30余年的历史,尤其是在近十几年,随着电动汽车的快速发展,动力电池热安全问题也日益突出,电池热管理逐渐成为制约电池发展的关键技术之一,在基础理论和实际应用等方面都取得了较大进步,受到国内外许多学者的关注。

在能源短缺和环境污染等问题的压力下,节能与环保已成为全社会的共识。电动汽车由于在节能和减排方面优势明显,已受到国内外的重视。发展电动汽车,关键是动力电池,而大部分电池的电化学性能和循环寿命受温度的影响显著,温度过高或过低均不利于电池性能的发挥。温度过高,电池容易出现过热、燃烧、爆炸等安全问题;温度过低,电池无法放电或放电深度较浅。因此,合理的电池热管理系统,对于延长动力电池循环寿命,进而推动电动汽车的发展,具有重要意义。

与电子芯片等的散热不同,电池热管理的主要目的既包括通过散热(或冷却)降低电池的温度,同时还须减小电池组/包/模块内部不同单体电池之间的温差,在低温环境下,还包括对电池进行加热或保温。因此,对电池热管理的研究,涉及电池的产热与热量分布规律、电池的结构设计与组装、电池组/包/模块热量的传递与分布等多个方面。经过多年的发展,电池热管理已经成为涵盖传热学、电化学、材料学等多个学科背景的重要领域,在促进上述学科的应用和发展方面发挥着重要作用。

随着电池热管理相关理论和技术的不断发展,对电池进行热管理,既可以从电池自身材料入手,提高电池材料的耐高/低温性能,强化电池内部的传热,也可以从电池外部出发,通过空气强制对流、液体介质流动、相变材料包裹等方式将电池的温度控制在适宜的范围内。热管、热电制冷、冷板等技术的发展也为电池热管理提供了新的思路。

近年来频发的电动汽车着火、燃烧、爆炸等事故,使国内外越来越多的学者和企业技术人员对电池热管理产生兴趣,在与电动汽车领域、电池领域以及传热界的学者和企业技术人员的交流中,我们深切感受到迫切需要一本专门介绍电池热管理相关理论和技术的著作。本书正是基于这一背景而编著。书中包含了编者近十年来所取得的研究成果,同时,根据国内外已有文献,尽可能地对电池热管理的基本方法和原理以及所涉及的材料设计、传热模型等知识进行了全面介绍。

本书共分9章。第1章为绪论。第2章介绍电池的产热原理以及电池热量产生和传递的数学模型。第3~5章详细介绍风冷、液冷、相变材料冷却的电池散热

方法的基本原理和常见结构等。第6章详细阐述电池热管理用相变材料的制备、强化传热方法以及材料多尺度热质传递研究的方法。第7章重点介绍基于几种常见热管的电池热管理系统。第8章介绍采用微通道换热器的空调、热电制冷、沸腾冷却等其他制冷原理的电池散热方式。第9章介绍低温环境下电池加热或保温的几种方法。

在本书完稿之际,作者衷心感谢导师——广东工业大学张国庆教授和华南理工大学汪双凤教授。研究生刘臣臻、赵佳腾、霍宇涛、王庆超、陈斌在文献整理、插图制作、文字校对等方面提供了很多帮助,在此一并表示感谢。作者的研究工作还得到了国家自然科学基金(项目编号:51406223)和江苏省自然科学基金(项目编号:BK20140190)的支持,并得益于中国矿业大学良好的工作环境。此外,衷心感谢本书参考文献中所列的全体作者。

饶中浩

2015年2月于中国矿业大学

E-mail: raozhonghao@cumt.edu.cn

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 交通能耗概况 .....	1
1.2 汽车节能与新能源汽车 .....	2
1.3 动力电池 .....	3
1.4 电池热安全 .....	5
1.5 电池热管理研究进展 .....	9
1.5.1 电池热管理性能要求与分类 .....	9
1.5.2 基于耐高温电池材料的热控 .....	11
1.5.3 以空气为介质的电池热管理系统 .....	12
1.5.4 以液体为介质的电池热管理系统 .....	13
1.5.5 基于相变传热介质的电池热管理系统 .....	13
<b>第 2 章 电池的产热原理及模型</b> .....	15
2.1 电池的产热 .....	15
2.1.1 Li-ion 电池产热行为 .....	15
2.1.2 SEI 的分解 .....	16
2.1.3 电解液分解 .....	16
2.1.4 正极分解 .....	17
2.1.5 负极与电解液的反应 .....	17
2.1.6 负极与黏合剂的反应 .....	17
2.2 电池产热量与速率计算 .....	18
2.3 电池热量的扩散 .....	19
2.4 电池热数学模型 .....	20
<b>第 3 章 风冷式电池散热</b> .....	27
3.1 概述 .....	27
3.2 被动式与主动式 .....	28
3.3 串行通风与并行通风 .....	28
3.3.1 串行通风方式 .....	29
3.3.2 并行通风方法 .....	31
3.4 交替式通风 .....	36



3.5	电池排列方式 .....	37
3.6	单体电池结构的影响 .....	38
<b>第4章</b>	<b>液冷式电池散热 .....</b>	<b>40</b>
4.1	概述 .....	40
4.2	被动式和主动式 .....	41
4.3	直接接触式与间接接触式 .....	42
4.4	液冷式电池散热效果 .....	42
4.5	夹套结构液冷系统 .....	43
4.5.1	系统工作原理 .....	43
4.5.2	单体电池结构 .....	44
4.5.3	电池模块结构 .....	45
4.6	板式液冷系统 .....	46
4.6.1	单进单出式流道 .....	46
4.6.2	多进多出式流道 .....	47
4.6.3	蛇形通道冷板 .....	51
4.6.4	超薄内斜翅片微通道液冷板 .....	54
4.7	其他液冷系统 .....	56
<b>第5章</b>	<b>基于相变材料的电池热管理 .....</b>	<b>58</b>
5.1	概述 .....	58
5.2	基本原理 .....	59
5.3	PCM 性能要求 .....	60
5.4	动力电池的基本类型 .....	60
5.5	基于 PCM 散热的圆柱形动力电池系统 .....	61
5.5.1	电池的热物性测试 .....	61
5.5.2	单体电池热管理系统模型 .....	62
5.5.3	PCM 导热系数与电池温度变化的关系 .....	64
5.6	PCM 导热系数对方形动力电池的散热影响 .....	67
5.6.1	基于 PCM 散热的方形 Li-ion 电池系统 .....	67
5.6.2	PCM 导热系数对传热的影响 .....	68
5.7	几种典型的 PCM 电池热管理系统 .....	71
5.7.1	PCM/泡沫铝电池热管理系统 .....	71
5.7.2	PCM/泡沫铜电池热管理系统 .....	73
5.7.3	PCM/膨胀石墨电池热管理系统 .....	74
5.7.4	PCM/振荡热管电池热管理系统 .....	76
5.8	影响系统性能的主要参数 .....	76

<b>第 6 章 相变材料的制备与性能</b> .....	78
6.1 概述 .....	78
6.1.1 相变材料热力特性 .....	78
6.1.2 相变材料分类 .....	79
6.2 电池热管理用 PCM .....	82
6.3 PCM 强化传热 .....	82
6.3.1 金属材料对相变材料的强化传热 .....	82
6.3.2 多孔介质对 PCM 的强化传热 .....	83
6.3.3 其他材料对 PCM 的强化传热 .....	86
6.4 PCM 胶囊 .....	87
6.4.1 PCM 微/纳胶囊的制备方法 .....	87
6.4.2 PCM 微胶囊的强化传热 .....	94
6.5 PCM 的分子动力学模拟 .....	97
6.5.1 分子动力学模拟的方法与理论 .....	97
6.5.2 单质烷烃的比热与导热系数 .....	98
6.5.3 高导热纳米金属粒子在烷烃中的扩散特性 .....	102
6.5.4 烷烃基相变胶囊传热介质的自扩散特性 .....	106
<b>第 7 章 基于热管的电池散热</b> .....	111
7.1 概述 .....	111
7.2 热管冷却基本原理 .....	111
7.3 热管内流动工质选择 .....	112
7.4 热管性能要求 .....	114
7.5 热管的相容性及寿命 .....	116
7.6 热管的工作条件 .....	116
7.7 几种典型热管的电池散热管理系统 .....	118
7.7.1 重力型热管 .....	118
7.7.2 烧结热管 .....	120
7.7.3 环路热管 .....	125
7.7.4 脉动热管 .....	127
7.8 相变材料与热管耦合散热 .....	135
<b>第 8 章 其他电池散热方式</b> .....	138
8.1 概述 .....	138
8.2 微通道换热器空调冷却 .....	138
8.3 热电制冷 .....	141
8.4 沸腾冷却 .....	144

<b>第 9 章 低温环境电池的加热</b> .....	148
9.1 概述 .....	148
9.2 常规空气加热 .....	148
9.3 相变材料加热 .....	151
9.4 电加热 .....	152
9.5 帕尔帖效应 .....	155
9.6 其他加热方式 .....	157
<b>参考文献</b> .....	159

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 交通能耗概况

随着社会的不断进步和经济的快速发展,全球性能源短缺以及环境污染等问题日益严重。能源与环境问题已经成为危及国家安全的战略问题,直接影响着人类的健康与生存。节约与开发清洁能源、提高能源利用效率、保护和改善环境、促进经济和社会全面协调可持续发展,已成为国际社会的共同责任。

受金融危机的影响,2008 年和 2009 年全球的石油消费量略有下降,但在 2010 年旋即出现回升,2013 年达到 41.85 亿吨。中国是石油消费增长最快的国家,2013 年石油消费量首次突破 5 亿吨,达到 5.074 亿吨,其中进口原油约 2.83 亿吨,对外依存度达 55.77%。预计到 2020 年,中国石油对外依存度将达到 56%~60%。表 1-1 给出了 2003~2013 年石油消费量。

表 1-1 2003~2013 年石油消费量<sup>[1]</sup>

年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
全球/百万吨	3725	3869	3919	3959	4018	4000	3925	4040	4085	4139	4185
中国/百万吨	271.7	318.9	327.8	354.5	370.6	377.6	391	440.4	464.1	490.1	507.4
比例/%	7.3	8.2	8.4	9	9.2	9.4	10	10.9	11.4	11.8	12.1

交通行业作为资源占用型和能源消耗型行业,其年石油消费量约占全球石油消费量的 50%,私人交通工具 95%都依赖于石油。在中国,交通能耗占社会总能耗的比例已从 1980 年的 5%上升到近两年的 20%,且年石油消费量占全国石油总消费量的 50%,而人均石油可采储量只有世界平均水平的 11%。至 2010 年年底,全国石油累计探明地质储量为 312.8 亿吨,仅可采 15 年。同时,中国已成为仅次于美国的第二大石油消费国。随着中国石油对外依存度的不断提高,石油安全将成为制约经济和社会发展的的重要因素。另外,伴随着交通行业能源消耗而产生的温室气体以及排放的污染物,如二氧化碳、粉尘、硫化物、氮氧化物以及多环芳烃等,是引起环境污染和诱发人体多种疾病的根源<sup>[2,3]</sup>。以美国为例,每年温室气体排放源于交通行业的占 28%,其中二氧化碳排放源于交通行业的占 34%,主要的城市气体污染物来自交通行业的占 36%~78%,交通耗油占全国石油消费量的 68%,如不加以控制,这些数字还会继续增大<sup>[4,5]</sup>。

如今,电动汽车、混合动力汽车以及燃料电池汽车在私家车中难以普及的重要因素是其高昂的能源价格。Offer 等<sup>[6]</sup>对汽油、氢气、电三种能源 2030 年的价格进行了预测,预测结果见表 1-2,虽然这种预测可能不十分准确,但是随着科学技术的发展,制氢技术和发电技术成本下降,汽油、氢气、电的价格差别会越来越小。这会促使私家车用户将更多的目光投入新能源汽车行业中。

表 1-2 2010 年和 2030 年三种能源价格对比<sup>[6]</sup>

价格 \ 年份 能源类别	2010 年	2030 年最低	2030 年最高	2030 年平均值
汽油/(G·J <sup>-1</sup> )	\$ 12.7	\$ 19	\$ 38	\$ 28.5
氢气/(G·J <sup>-1</sup> )	\$ 42	\$ 14	\$ 56	\$ 35
电/(G·J <sup>-1</sup> )	\$ 36	\$ 27	\$ 45	\$ 36

在能源危机和环境问题的双重压力下,近年来,世界各国都在积极制定能源发展战略、寻求平衡能源供给的有效途径、节能以及开发新能源与可再生能源<sup>[7,8]</sup>。考虑到汽车市场的快速增长对石油消费的预期需求,从 2001 年起,中国就开始着手制定汽车燃油消费标准,并于 2004 年发布第一个《乘用车燃料消耗量限值》国家标准。截至当前,中国已实施多项能源政策进行节能减排<sup>[9,10]</sup>。美国政府也制定了许多交通政策,如限制车辆行驶里程、减轻车辆阻耗、改进车辆引擎技术、开发低碳和非燃油高效动力系统等<sup>[11]</sup>。欧盟各国十分重视节能减排,制定了一系列环保政策,计划到 2030 年将城市交通中燃油汽车的数量削减一半左右,到 2050 年在城市交通中全面停用燃油汽车<sup>[12]</sup>。日本于 2009 年开始实施“绿色税制”,在汽油税、汽车消费税、传统燃油汽车重量等方面进行了较大幅度的调整,其适用对象包括纯电动汽车、混合动力车、清洁柴油车、天然气车以及获得认定的低排放且燃油消耗量低的车辆<sup>[13]</sup>。尽管如此,交通行业节能潜力依然巨大,任重道远。

## 1.2 汽车节能与新能源汽车

2000 年以来,世界汽车工业发展迅猛,至 2010 年,全球汽车保有量已逾 10 亿辆,预计到 2030 年,全球汽车保有量将增至 16 亿辆。2011 年中国汽车保有量已经突破 1 亿辆,是 2000 年的 6.58 倍(表 1-3)。到 2020 年,中国汽车的保有量或将突破 2 亿辆。快速发展的汽车工业已成为交通行业石油消耗的主要领域,2008 年中国车用燃油(汽油和柴油)的消耗量占石油总消耗的比例已从 2000 年的 17.8% 增长到 33% 左右<sup>[14]</sup>。其中,中国汽车的汽油消费量约占汽油生产量的 86%,柴油的消费量约占柴油生产量的 24%,汽车节能迫在眉睫。

表 1-3 2000~2011 年汽车保有量

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
数量/万辆	1 608	1 802	2 053	2 430	2 742	3 160	4 985	5 697	6 467	7 619	9 086	10 578

汽车节能,关键是动力系统,既包括传统内燃机技术的改进,又涉及新能源汽车的发展。而新能源汽车无疑将成为未来汽车发展的必然趋势。其中,纯电动汽车(electric vehicle, EV)和混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)由于在能量效率和降低排放方面具有比传统车辆更好的优势,因而得到世界范围内的普遍重视,且纯电动汽车和燃料电池电动汽车(fuel cell electric vehicle, FCEV)被认为是仅有的能替代内燃机的零排放车辆(zero emissions vehicle, ZEV)<sup>[15]</sup>。电动汽车用电生产所排放的一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物和碳氢化合物分别是汽油驱动汽车排放量的 2%、76%、56%和 9%<sup>[16]</sup>。如果采用可再生能源为电动汽车电池供电,仅是私人用车领域,其温室气体排放量就可减少 60%<sup>[17]</sup>。例如,使用 HEV,二氧化碳的排放量可以减少 20%~40%<sup>[18]</sup>。

为促进 EV 和 HEV 等电动汽车的发展,许多国家都积极采取各种措施。中国早在 2001 年就将新能源汽车研究项目列入国家“十五”期间的“863”重大科技课题,提出“以整车开发为主导,关键零部件和相关材料紧密结合,基础设施协调发展,政策法规、技术标准与评估技术同步展开”的基本方针,标志着电动车领域研究开发及产业化计划的全面启动,并于“十一五”提出“节能和新能源汽车的战略”,高度关注新能源汽车的研发和产业化。美国从 2009 年起投入 25 亿美元支持电动汽车相关产业发展,计划在 2015 年前部署 100 万辆电动汽车上路<sup>[19]</sup>。德国投入近 5 亿欧元用于电动汽车发展,预计 2020 年电动汽车产量将达到 100 万辆,2030 年超过 500 万辆。英国投入 2.5 亿英镑用于支持电动汽车产业建设,到 2016 年电动车或占英国汽车市场的 20%。到 2020 年,世界电动汽车总量将达到 1100 万辆。世界电源研究所(electric power research institute, EPRI)估计平均 200 万辆电动车每天可节约 60 000 桶汽油,每年可减少市区废气排放量 160 000 吨。以 2020 年中国汽车保有量 2 亿辆计算,若使用电动汽车,可以节约石油 4613 万吨,替代石油 4443 万吨,两者相当于将汽车用油需求削减 32.4%。

由于最具前景的氢燃料电池汽车技术问题短时间内难以突破,加上美国政府自 2012 年起计划终止无公害柴油基金项目(clean-diesel grant program),并将停拨氢燃料电池汽车的研发经费,预计在 2040 年之前,汽车节能将主要依靠发展非氢燃料 EV 和 HEV 等来实现。

### 1.3 动力电池

动力电池,作为制约电动汽车发展的关键技术,一直是众多生产、研发单位争

相投入的热点<sup>[20-22]</sup>,发展历程已逾百年,其中用于电动汽车的二次电池主要类型如表 1-4 所示。

表 1-4 用于电动汽车的二次电池主要类型<sup>[16,23-25]</sup>

电池类型	英文简写
阀控铅酸电池	VRLA, valve-regulated lead-acid
镍铁电池	Ni-Fe, nickle-iron
镍锌电池	Ni-Zn, nickel-zinc
镍镉电池	Ni-Cd, nickel-cadmium
镍氢电池	Ni-MH, nickel-metal Hydride
锌氯电池	Zn/Cl <sub>2</sub> , zinc/chlorine
锌溴电池	Zn/Br <sub>2</sub> , zinc/bromine
铁空气电池	Fe/Air, iron/air
铝空气电池	Al/Air, aluminum/air
锌空气电池	Zn/Air, zinc/air
钠硫电池	Na/S, sodium/sulfur
钠镍氯化物电池	Na/NiCl <sub>2</sub> , sodium/nickelchloride
锂铝硫化铁电池	Li-Al/FeS, lithium-aluminum/iron monosulfide
锂聚合物电池	Li-Po, lithium-polymer
锂离子电池	Li-ion, lithium-ion

铅酸电池是最早用于电动汽车的可充电电池,为适应正在浮现的世界汽车工业,随着 ALABC(advanced lead-acid battery consortium)项目的广泛实施,20 世纪 90 年代, VRLA 得到快速发展<sup>[26,27]</sup>。2000 年,英国 FVP(foresight vehicle programme)提出了针对 HEV 的铅酸电池优化与发展方案<sup>[20]</sup>。一般来说,提升铅酸电池比能量和循环寿命的方式主要是电极活性材料改性和电池板栅设计<sup>[28-30]</sup>。

Ni-MH 电池,由于具有比铅酸电池更高的能量、功率密度,寿命长且无污染,无记忆效应等优势,20 世纪末,包括 Daimler Chrysler、Ford、General Motors、Honda 和 Toyota 等在内的多家著名汽车公司都开始着手研发基于 Ni-MH 电池的 EV 和 HEV<sup>[23]</sup>。其中, Toyota 生产出世界上第一辆商用 HEV, General Motors 生产的 EV1 所使用的 Ni-MH 电池一次充电行驶里程达 225 km。

自 1991 年日本率先开发成功 Li-ion 电池以来,由于其具有质量轻、体积小、比能量高等优点,为世界各国所重视并大力开发和研制,迅速向产业化发展<sup>[25,31]</sup>。Li-ion 电池能量密度是铅酸电池的 4~5 倍、Ni-MH 电池的 2 倍,且电压是 Ni-MH 电池的 3 倍、铅酸电池的近 2 倍<sup>[32]</sup>。Li-ion 电池提供动力源的电动汽车,已经在中国、美国、法国、意大利、日本等许多国家出现。随着电池技术的不断完善, Li-ion

电池在 EV 和 HEV 中的应用将更具潜力。

由于近年来对环保的要求越来越高,含重金属的 Ni-Cd 电池、铅酸电池的使用逐渐受到限制,Ni-MH 电池使用大量的有色金属以及生产工艺受限,再发展空间很小。与 Ni-MH 电池相比,EV 和 HEV 采用 Li-ion 电池可使得电池组的质量减轻 40%~50%,体积减小 20%~30%,而当前影响 Li-ion 电池在电动汽车中普及的主要问题是成本。虽然目前 Li-ion 电池成本高于其他电池,但是,预计在不久的将来,Li-ion 电池的成本有望下降到 Ni-MH 电池的 2/3。

美国于 2008 年组建国家 Li-ion 电池制造联盟,随后 5 年投入 10~20 亿美元以形成大规模制造 Li-ion 电池的能力。日本最大工业电子集团日立公司计划到 2015 年将 Li-ion 电池产能扩大 70 倍。德国从 2012 年起启动了一项 3.6 亿欧元的车用锂电池开发计划,几乎所有德国汽车和能源巨头均携资加入。在中国,深圳比克电池有限公司在天津投资 10 亿元专业生产磷酸亚铁锂动力电池;2013 年 12 月,天津力神电池股份有限公司投资 40 亿元在新能源汽车电池项目,从事包括汽车动力电池在内的 Li-ion 电池和新能源材料、超级电容器等的研发生产和销售,规划 5 亿 A·h 动力电池电芯装配产能;2014 年,总投资 25 亿元的锂电池项目落户灵宝,项目建成后具有年产 7 亿 A·h 电池、7000 吨磷酸铁锂正极材料、3000 吨石墨负极材料的生产能力;2013 年 10 月 31 日财政部公示 Li-ion 电池隔膜补贴项目,加大扶持力度。预计至 2018 年,全球 Li-ion 电池的总需求量将超过 38 500 万 kW·h,与 2013 年相比,增加 6 倍以上,被誉为绿色电源的 Li-ion 电池市场前景十分乐观。

## 1.4 电池热安全

由于电池充放电过程中的电化学反应都是在特定的温度范围内才能够发生,这意味着电池运行的环境温度范围是特定的,表 1-5 给出了几种典型的动力电池的特性以及运行许可的温度范围。

表 1-5 动力电池性能参数

电池类型	铅酸电池	Ni-MH 电池	Li-ion 电池
能量密度/(W·h·kg <sup>-1</sup> )	30~50	60~120	110~200
快速充电时间/h	8~16	2~4	2~4
电压/V	2	1.25	3.6
自放电率(室温)/%	5	30	3
运行温度范围/°C	-20~+60	-20~+60	0~45

过热、燃烧、爆炸等安全问题一直是动力电池研究的重点。热量的产生与迅速



积聚必然引起电池内部温度升高,尤其在高温环境下使用或者在大电流充放电时,可能会引发电池内部发生剧烈的化学反应,产生大量的热,如果热量来不及散出而在电池内部迅速积聚,电池可能会出现漏液、放气、冒烟等现象,严重时电池发生剧烈燃烧甚至爆炸(图 1-1)。无论传统的铅酸电池,还是性能先进的 Ni-MH、Li-ion 动力电池,温度对电池整体性能都有非常显著的影响。一般来说,温度主要影响动力电池的如下性能<sup>[33]</sup>:

- (1) 电化学系统运行;
- (2) 充放电效率;
- (3) 电池的可充性;
- (4) 电池的功率和容量;
- (5) 电池的可靠性和安全性;
- (6) 电池的寿命和循环次数。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-1 电动汽车热安全事故<sup>[34]</sup>

温度升高,电池内阻减小,电池效率提高。但温度的升高,又会加快电池内部有害化学反应速率,进而破坏电池。一般来说,温度上升  $10^{\circ}\text{C}$ , 化学反应速率增大