



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

锂离子电池 制造工艺原理与应用

杨绍斌 梁正 编著

Fundamentals and Applications of the Manufacturing
Process of
Lithium Ion Batteries



化学工业出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

锂离子电池 制造工艺原理与应用

Fundamentals and Applications of the Manufacturing
Process of
Lithium Ion Batteries

杨绍斌 梁正 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在简述锂离子电池基本原理和基本概念的基础上,首先讨论了多孔电极动力学原理,为锂离子电池电化学性能设计提供理论依据。然后以锂离子电池关键制造工艺为主线,首次系统构筑了制浆、涂布、辊压、分切、装配、焊接和化成等制造工序的工艺原理及应用框架体系,重点讨论了这些制造工序的基本工艺原理、制造设备、工艺调控方法和缺陷预防等内容,为锂离子电池制造及工艺研究提供理论指导。最后介绍了与锂离子电池类似的锂硫电池和类锂离子电池的研究进展。本书内容全面系统、重点突出,集成反映了国内外的锂离子电池工艺研究及应用领域的最新科技成果与相关技术,体现了锂二次电池的发展和研究趋势。

本书既可供锂离子电池及其相关领域的工程技术人员作为参考书和生产工艺手册使用,也可供科研机构研究人员、高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

锂离子电池制造工艺原理与应用/杨绍斌,梁正编
著. —北京:化学工业出版社,2019.9

ISBN 978-7-122-34609-4

I. ①锂… II. ①杨… ②梁… III. ①锂离子电池-
生产工艺 IV. ①TM912.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 111297 号

责任编辑:刘 军
责任校对:王素芹

文字编辑:杨欣欣
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:中煤(北京)印务有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张 32½ 彩插 4 字数 627 千字
2020 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888

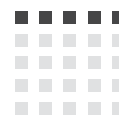
售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:168.00 元

版权所有 违者必究



20 世纪 80 年代首次提出锂离子电池的概念，其后索尼公司于 1991 年成功推出了第一个商用锂离子电池产品，标志着锂离子电池大规模产业化的开始。锂离子电池在手机、笔记本电脑、数码相机等便携式电器中得到广泛应用，一跃成为发展速度最快和销量最大的二次电池体系。

尤其是在全球可持续发展越来越受到人们重视的今天，新能源汽车产业快速发展，锂离子电池的发展也随之加速。美国前能源部长 Steven Chu 曾指出：“温室效应存在一个非线性的气候引爆点，留给人们的治理时间远没有预期的长。”目前，发达国家已经或正在制定燃油车禁售时间表，开发新能源汽车是实现可持续发展的必然要求。锂离子电池由于能量密度高、循环寿命长等优点，成为当今市场上电动汽车应用最广泛的电池体系。随着电动汽车的迅速扩张，锂离子电池在国民经济中的比重和社会发展中的战略地位会越来越重要。

本书在介绍锂离子电池基本原理和基本概念的基础上，首先讨论了多孔电极动力学原理。然后以锂离子电池关键制造工艺为主线，首次系统构筑了制浆、涂布、辊压、分切、装配、焊接和化成等制造工序的工艺原理及应用框架体系，重点讨论了这些制造工序的基本工艺原理、制造设备、工艺调控方法和缺陷预防等内容。最后介绍了与锂离子电池类似的锂硫电池和类锂离子电池的研究进展。

锂离子电池性能和质量提高一直依赖于材料、工艺和装备的理论研究和科技进步，目前关于锂离子电池原材料的专著已经出版多部，但至今还未见到全面系统讨论锂离子电池制造工艺方面的著作出版。本书集成反映了国内外的锂离子电池工艺研究及应用领域的最新科技成果与相关技术，给出了工艺研究方面的大量基础科学数据，同时包含了作者多年研究成果和实践经验。本书的出版期望有助于推动锂离子电池新工艺、新设备的研发，对提高我国锂离子电池产业的整体技术水平和国际竞争力有所裨益。

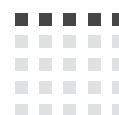
本书由我和梁正进行统稿，沈丁参与了部分撰写工作和实验工作。我于

1997 年在大连理工大学攻读博士学位期间就开始了锂离子电池负极材料的研究工作，随后在广东风华高新科技股份有限公司做博士后期间，进行了锂离子电池工艺和负极材料的产品研发工作。2004 年出站以后就一直想撰写一部关于锂离子电池生产工艺方面的书，在这期间，专攻锂离子电池新型电极材料研发的斯坦福大学的梁正博士，与我志同道合，愿将国际最前沿的锂离子电池科研进展和研发思路供我参考，与我分享。我们决定共同撰写本书。由于锂离子电池的生产工艺包括多个工序，跨越多个学科，相关理论研究和基础科学数据分散，撰写难度较大，经过十多年的积累和编写，今天终于成稿并与读者见面。

本书得到了国家科学技术学术著作出版基金的资助，特别感谢中国科学院成会明院士、中国工程院温蕴博院士和衣宝廉院士对本书申报的推荐！特别感谢化学工业出版社的编辑给予的帮助和支持！感谢所有对本书撰写做出贡献的人们！

限于作者的知识和能力，疏漏与不足之处在所难免，敬请同行和读者不吝赐教。

杨绍斌
2019 年 8 月



1

001

- 1.1 锂离子电池电化学原理 / 002
 - 1.1.1 化学原理 / 002
 - 1.1.2 电池结构及分类 / 003
- 1.2 锂离子电池原材料及制造 / 005
- 1.3 锂离子电池性能 / 006
 - 1.3.1 电化学性能 / 006
 - 1.3.2 安全性能 / 011
- 1.4 锂离子电池发展历程、特点及应用 / 012
 - 1.4.1 锂离子电池发展历程 / 012
 - 1.4.2 锂离子电池特点及应用 / 013
- 参考文献 / 014

2

016

- 2.1 锂离子电池正极材料 / 017
 - 2.1.1 正极材料简介 / 017
 - 2.1.2 钴酸锂 / 018
 - 2.1.3 三元材料 / 020
 - 2.1.4 富锂锰基材料 / 022
 - 2.1.5 尖晶石型锰酸锂 / 025
 - 2.1.6 磷酸铁锂 / 027
- 2.2 锂离子电池负极材料 / 030
 - 2.2.1 负极材料简介 / 030

- 2.2.2 石墨材料 / 031
- 2.2.3 无定形炭 / 034
- 2.2.4 钛氧化物材料 / 036
- 2.2.5 SiO_x/C 复合材料 / 037
- 2.2.6 Sn 基复合材料 / 039
- 2.3 电解质 / 040
 - 2.3.1 电解质简介 / 040
 - 2.3.2 液态电解质 / 041
 - 2.3.3 半固态电解质——凝胶聚合物电解质 / 044
 - 2.3.4 固态电解质 / 046
- 2.4 隔膜 / 048
 - 2.4.1 隔膜种类和要求 / 048
 - 2.4.2 湿法聚烯烃多孔膜 / 050
 - 2.4.3 干法聚烯烃多孔膜 / 050
 - 2.4.4 无机/有机复合膜 / 051
- 2.5 其他材料 / 052
 - 2.5.1 导电剂 / 052
 - 2.5.2 黏结剂 / 053
 - 2.5.3 壳体、集流体和极耳 / 054
- 参考文献 / 055

3

056

- 3.1 多孔电极简介 / 057
 - 3.1.1 多孔电极结构 / 057
 - 3.1.2 多孔电极分类 / 058
- 3.2 锂离子电池多孔电极动力学 / 058
 - 3.2.1 多孔电极过程 / 058
 - 3.2.2 多孔电极动力学 / 061
 - 3.2.3 多孔电极极化 / 067
 - 3.2.4 多孔电极锂离子扩散测量与模拟 / 073
- 3.3 锂离子电池多孔电极电化学性能 / 080
 - 3.3.1 多孔电极孔隙结构 / 080

- 3.3.2 多孔电极电化学性能 / 088
 - 3.3.3 多孔电极结构稳定性 / 091
 - 3.3.4 锂离子电池多孔电极结构设计 / 097
- 参考文献 / 100

4

105

- 4.1 概述 / 106
 - 4.2 悬浮液颗粒受力^[1] / 106
 - 4.2.1 颗粒间作用力 / 107
 - 4.2.2 颗粒受到的其他作用力 / 111
 - 4.2.3 颗粒间距和粒度对颗粒受力的影响 / 113
 - 4.3 静态悬浮液稳定性 / 114
 - 4.3.1 沉降方式 / 114
 - 4.3.2 稳定悬浮液的判据 / 115
 - 4.4 锂离子电池浆料制备原理 / 117
 - 4.4.1 粉体润湿 / 117
 - 4.4.2 粉体分散 / 119
 - 4.4.3 脱气、输送和过滤 / 122
 - 4.5 锂离子电池制浆设备 / 124
 - 4.6 锂离子电池制浆工艺 / 128
 - 4.6.1 浆料体系及要求 / 128
 - 4.6.2 制浆工艺步骤 / 130
 - 4.6.3 悬浮液分散性和稳定性调控 / 135
 - 4.6.4 制浆工艺与极片导电体系 / 146
- 参考文献 / 150

5

151

- 5.1 涂布流变学基础 / 152
 - 5.1.1 悬浮液分类 / 152

5.1.2	剪切与黏度	/	154
5.1.3	润湿与流平	/	157
5.2	黏度和表面张力调控	/	159
5.2.1	黏度调控	/	159
5.2.2	表面张力调节	/	165
5.2.3	助剂调节	/	167
5.2.4	温度调节	/	170
5.2.5	制浆工艺调节	/	171
5.3	辊涂原理与工艺	/	174
5.3.1	辊涂简介	/	174
5.3.2	单辊涂布	/	174
5.3.3	双辊涂布	/	179
5.3.4	三辊涂布	/	187
5.4	预定量涂布原理与工艺	/	188
5.4.1	坡流涂布原理与工艺	/	188
5.4.2	条缝和挤压涂布原理与工艺	/	202
5.4.3	涂布弊病及消除	/	212
5.5	涂布方法选择	/	214
5.5.1	涂布方法	/	214
5.5.2	涂布方法选择	/	215
5.6	干燥	/	217
5.6.1	干燥简介	/	217
5.6.2	干燥原理与工艺	/	218
5.6.3	干燥时涂膜的流变性质及缺陷预防	/	225
5.6.4	干燥设备	/	232
	参考文献	/	233

6

6.1	概述	/	237
6.2	粉体基本性质	/	237
6.2.1	粒度与形状	/	238
6.2.2	群聚集性质	/	241

- 6.3 粉体充填模型和充填密度 / 243
 - 6.3.1 理想充填模型 / 243
 - 6.3.2 实际粉体充填密度 / 246
- 6.4 实际粉体压缩性能 / 248
 - 6.4.1 压缩过程 / 248
 - 6.4.2 压缩曲线 / 249
 - 6.4.3 充填和压实的调控 / 252
- 6.5 极片辊压原理与工艺 / 254
 - 6.5.1 辊压力 / 255
 - 6.5.2 厚度控制 / 256
 - 6.5.3 伸长率 / 259
- 6.6 辊压极片与电池性能 / 261
 - 6.6.1 压实密度对电池性能的影响 / 261
 - 6.6.2 电极特性对电池充放电性能的影响 / 266
- 6.7 极片辊压设备 / 269
 - 6.7.1 辊压机 / 269
 - 6.7.2 附加装置 / 270
- 6.8 极片质量与控制 / 272
 - 6.8.1 极片缺陷及控制 / 272
 - 6.8.2 收放卷缺陷 / 274
 - 6.8.3 极片强韧性 / 274
 - 6.8.4 极片黏结性 / 276
- 参考文献 / 277

7

280

- 7.1 极片分切方法 / 281
- 7.2 极片剪切过程 / 282
- 7.3 极片剪切工艺 / 283
 - 7.3.1 剪切材料 / 283
 - 7.3.2 剪切力 / 284
 - 7.3.3 刀盘水平间隙和垂直间隙 / 285
 - 7.3.4 剪切速率 / 288
 - 7.3.5 张力 / 288

- 7.4 极片分切设备 / 289
 - 7.4.1 纵切设备 / 289
 - 7.4.2 横切设备 / 291
- 7.5 激光分切 / 292
 - 7.5.1 激光分切简介 / 292
 - 7.5.2 激光分切工艺 / 295
- 7.6 极片分切缺陷及其影响 / 298
 - 7.6.1 分切缺陷 / 298
 - 7.6.2 分切缺陷的影响 / 300
- 参考文献 / 301

8

303

- 8.1 电极卷绕和叠片 / 304
 - 8.1.1 卷绕和叠片工艺 / 304
 - 8.1.2 卷绕和叠片设备 / 308
- 8.2 锂离子电池组装 / 312
 - 8.2.1 组装工艺 / 312
 - 8.2.2 组装设备 / 315
- 8.3 锂离子电池装配质量检验 / 319
- 参考文献 / 320

9

321

- 9.1 焊接概述 / 322
- 9.2 锂离子电池激光焊接 / 325
 - 9.2.1 激光焊接原理 / 325
 - 9.2.2 激光焊接设备 / 326
 - 9.2.3 脉冲激光缝焊 / 329
 - 9.2.4 脉冲激光点焊 / 333
 - 9.2.5 激光焊接性 / 334
 - 9.2.6 焊接检验及缺陷预防 / 335

- 9.2.7 激光焊接防护 / 337
- 9.3 锂离子电池超声波点焊接 / 337
 - 9.3.1 超声焊接原理及特点 / 337
 - 9.3.2 超声焊接设备 / 339
 - 9.3.3 超声波点焊工艺 / 341
 - 9.3.4 超声焊焊接性 / 348
 - 9.3.5 缺陷及预防 / 353
- 9.4 锂离子电池电阻点焊 / 354
 - 9.4.1 电阻点焊原理及特点 / 354
 - 9.4.2 点焊设备 / 356
 - 9.4.3 电阻点焊工艺 / 357
 - 9.4.4 常用材料焊接性 / 363
 - 9.4.5 缺陷及预防 / 365
- 9.5 锂离子电池塑料热封装 / 368
 - 9.5.1 热封装原理与设备 / 368
 - 9.5.2 热封工艺 / 369
- 参考文献 / 371

10

373

- 10.1 锂离子电池化成原理 / 374
 - 10.1.1 化成反应 / 374
 - 10.1.2 固体产物及 SEI 膜 / 375
 - 10.1.3 气体产物与水分 / 379
 - 10.1.4 极片的膨胀 / 383
- 10.2 锂离子电池化成工艺及设备 / 387
 - 10.2.1 注液工艺及设备 / 387
 - 10.2.2 化成工艺及设备 / 391
 - 10.2.3 老化工艺及设备 / 395
- 10.3 锂离子电池制造水分控制 / 396
 - 10.3.1 水分控制工艺 / 396
 - 10.3.2 水分控制设备 / 398
- 10.4 锂离子电池分容分选 / 399
- 参考文献 / 403

- 11.1 概述 / 408
 - 11.1.1 动力电池简介 / 408
 - 11.1.2 电动汽车动力电池 / 410
- 11.2 单体动力锂离子电池电性能 / 412
 - 11.2.1 原材料与电性能 / 412
 - 11.2.2 电池结构与电性能 / 414
- 11.3 单体动力锂离子电池安全性 / 414
 - 11.3.1 热失控及安全性能 / 414
 - 11.3.2 电池结构与安全性能 / 416
 - 11.3.3 设备工艺与安全性能 / 417
 - 11.3.4 原材料与安全性能 / 419
- 11.4 单体动力锂离子电池一致性 / 420
 - 11.4.1 电池一致性指标 / 421
 - 11.4.2 电池一致性影响因素 / 423
 - 11.4.3 筛选指标与一致性 / 424
 - 11.4.4 一致性与电池组性能 / 425
- 11.5 动力锂离子电池组管理 / 428
 - 11.5.1 电池组管理系统简介 / 428
 - 11.5.2 电池状态评估 / 429
 - 11.5.3 电池充放电及均衡控制 / 433
 - 11.5.4 电池组温度控制 / 436
- 11.6 动力锂离子电池组安全技术 / 439
 - 11.6.1 安全技术 / 439
 - 11.6.2 安全性能检测 / 440
- 参考文献 / 441

- 12.1 锂硫电池 / 444
 - 12.1.1 反应原理及特点 / 444
 - 12.1.2 正极材料 / 446

12.1.3	负极材料	/	461
12.1.4	电解质	/	465
12.2	钠离子电池	/	469
12.2.1	反应原理及特点	/	469
12.2.2	正极材料	/	470
12.2.3	负极材料	/	475
12.3	镁离子电池和铝离子电池	/	488
12.3.1	镁离子电池	/	488
12.3.2	铝离子电池	/	489
	参考文献	/	491