



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13-5” GUIHUA JIAOCAI

# 电化学储能器件 及关键材料

连芳 主编



冶金工业出版社  
www.cnmip.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

# 电化学储能器件 及关键材料

连芳 主编



北京

冶金工业出版社

2019

## 内 容 提 要

本书介绍了能源存储与转换技术的主要类别、基础理论和基本概念,系统阐述了电化学储能器件的种类、构造、工作原理、技术优势以及存在的问题,结合该领域的新发展以及实践教学积累,重点介绍了电池体系关键材料的结构、组分、性能、优化和发展。全书共分为9章,力求为广大读者构建全面系统的电化学储能器件及材料的应用基础知识体系。各章内容独立性强,在讲授和学习时可根据需要进行选择。每章设置思考题与习题,便于读者巩固和拓展学习内容。

本书适合作为材料、能源、化工和环境等学科本科生的必修课或选修课教材,也可作为研究生的学习参考书,还适合作为从事电池材料、储能及动力电池等相关领域工程技术人员的培训教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

电化学储能器件及关键材料/连芳主编. —北京:冶金工业出版社, 2019. 7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-8141-4

I. ①电… II. ①连… III. ①电化学—储能—功能材料—高等学校—教材 IV. ①TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第107740号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 夏小雪 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹蕊

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8141-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安县京平诚乾印刷有限公司印刷  
2019年7月第1版,2019年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.5印张; 301千字; 190页

39.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjcs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

可再生能源资源丰富、无污染、具有多途径利用和可持续性等优势，近年来其需求增长已成为能源总增量的重要组成。但是，可再生能源的利用往往受到时间、空间和气候变化等因素的制约，存在间歇性、不稳定性和分布不均匀性，电化学储能器件的迅速发展将改变可再生清洁能源产生、获取、利用的方式。本书介绍了电化学能量存储和转换过程涉及的热力学、动力学以及晶体结构的基础理论知识。紧密结合能源存储与转换技术及其材料的最新发展，详细介绍了包括铅酸电池、铅碳电池、镍氢电池、锂硫电池、锂氧气/空气电池、钠电池、液流电池、燃料电池、锂离子电池等电化学储能器件的构造、工作原理、技术优势和存在的问题。同时，本书系统介绍了锂离子电池体系正极材料、负极材料、隔膜、电解质等关键材料的结构、组分、性能、优化和发展。本书力求为学生和技术人员提供电化学存储技术、器件和关键材料的应用基础知识，适合初涉该领域的学生和技术人员建立知识体系框架和系统学习。

本书能够出版得益于北京科技大学新能源材料研究室的各位前辈、老师和同事们在教学和科研一线的长期工作积累。科研实践的推进和创新为我们实施研究型教学奠定了坚实的基础。感谢科技部、教育部、国家自然科学基金委、北京市科委对相关科研工作的资助，感谢电池领域的前辈、校友和朋友们在教学和科研中所给予的提携、关怀、指点 and 帮助。感谢北京科技大学对本教材出版的大力支持和资金资助。在教材编写过程中，连理舒怡、马磊磊、程矫扬等同学承担了大量的工作，收集和整理文献、规范图表和修改文字等，在此一并表示感谢。

尽管我们力求给读者呈现电化学能源存储和转换技术的基本概貌以及新体系和新材料的发展趋势，但由于学识有限、内容设置限制，以及近年来相关理论研究和新材料体系的迅速发展，书中难免有疏漏与不妥之处，还希望本书出版后得到相关专家与读者的批评指正。

编 者

2019年3月

# 目 录

<b>1 新能源时代</b> .....	1
1.1 能源发展的驱动力 .....	1
1.2 能源存储的种类与作用 .....	3
1.2.1 能源存储的种类 .....	4
1.2.2 能源存储在可再生能源利用中的作用 .....	5
1.3 机械储能 .....	6
1.4 热电能量存储 .....	10
1.5 超导磁储能 .....	11
思考题与习题 .....	11
参考文献 .....	11
<b>2 电化学储能基础</b> .....	12
2.1 嵌脱反应 .....	12
2.1.1 嵌脱反应的结构基础 .....	12
2.1.2 嵌脱反应热力学 .....	13
2.1.3 嵌脱反应动力学 .....	15
2.1.4 多电子嵌脱反应 .....	19
2.2 合金化反应 .....	21
2.3 转换反应 .....	22
2.4 其他反应机理 .....	22
2.5 二次电池体系 .....	24
2.5.1 发展 .....	24
2.5.2 电池的分类和基本组成 .....	25
2.5.3 电池热力学基础 .....	26
2.5.4 容量 .....	27
2.5.5 电压 .....	28
2.5.6 能量与功率 .....	28
2.5.7 效率与寿命 .....	29
思考题与习题 .....	30
参考文献 .....	31

<b>3 电池储能技术</b> .....	33
3.1 电池储能技术应用前景 .....	33
3.2 铅酸电池 .....	34
3.2.1 基本构成和工作原理 .....	34
3.2.2 铅酸电池的失效机理 .....	35
3.2.3 铅碳电池 .....	37
3.3 镍氢电池 .....	40
3.3.1 工作原理 .....	40
3.3.2 负极材料——储氢合金 .....	42
3.3.3 正极材料——氢氧化镍 .....	46
3.4 锂硫电池 .....	48
3.4.1 工作原理及其存在的问题 .....	48
3.4.2 正极材料 .....	51
3.4.3 锂硫电池电解质 .....	55
3.5 锂空气/氧气电池 .....	58
3.5.1 锂空气/氧气电池的发展和种类 .....	58
3.5.2 非水电解液锂空气电池 .....	60
3.5.3 非水电解液锂空气电池的电解质 .....	62
3.6 钠电池 .....	64
3.6.1 高温钠电池 .....	64
3.6.2 室温钠硫电池 .....	65
3.7 液流电池 .....	66
3.7.1 全钒液流电池 .....	67
3.7.2 全钒液流电池的关键材料 .....	68
思考题与习题 .....	69
参考文献 .....	69
<b>4 燃料电池</b> .....	71
4.1 燃料电池体系 .....	71
4.1.1 燃料电池的构造与种类 .....	71
4.1.2 燃料电池工作原理 .....	72
4.2 熔融碳酸盐型燃料电池 .....	73
4.2.1 电化学反应过程及特点 .....	73
4.2.2 熔融碳酸盐燃料电池的关键材料 .....	74
4.3 质子交换膜型燃料电池 .....	76
4.3.1 工作原理与特点 .....	76
4.3.2 电催化剂 .....	76
4.3.3 质子交换膜 .....	77

4.4 固体氧化物燃料电池 .....	78
4.4.1 组成及工作原理 .....	78
4.4.2 SOFC 固体电解质 .....	79
4.4.3 阳极材料 .....	80
4.4.4 阴极材料 .....	82
思考题与习题 .....	82
参考文献 .....	83
5 锂离子电池 .....	84
5.1 锂离子电池的构造 .....	85
5.2 嵌脱反应的材料基础 .....	87
5.3 扣式锂离子电池的组装 .....	89
5.4 软包锂离子电池与铝塑膜 .....	92
思考题与习题 .....	93
参考文献 .....	94
6 锂离子电池的正极材料 .....	95
6.1 $\text{LiMO}_2$ 经典体系 .....	95
6.1.1 $\text{LiCoO}_2$ .....	95
6.1.2 高电压 $\text{LiCoO}_2$ .....	97
6.1.3 $\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$ 三元体系 .....	98
6.1.4 高镍三元正极材料的性能优化 .....	102
6.1.5 $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$ 高容量体系 .....	103
6.2 $\text{Li}_{1-x}(\text{NiMnCo})_{1-x}\text{O}_2$ 富锂高容量体系 .....	105
6.2.1 高容量获取机理 .....	105
6.2.2 随循环电压下降问题 .....	106
6.2.3 表面/界面的特殊性 .....	108
6.3 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ .....	111
6.3.1 John-Teller 效应 .....	111
6.3.2 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ 的电化学性能 .....	118
6.3.3 高电压 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_2$ 体系 .....	119
6.4 $\text{LiFePO}_4$ .....	121
6.4.1 $\text{LiMPO}_4$ 橄榄石结构 .....	121
6.4.2 $\text{LiMPO}_4\text{F}$ .....	123
6.5 $\text{V}_x\text{O}_{2x+1}$ 钒氧化物 .....	126
思考题与习题 .....	130
参考文献 .....	130
7 锂离子电池的负极材料 .....	132
7.1 碳基负极材料 .....	132

7.1.1	石墨类碳材料	132
7.1.2	无定形碳材料	134
7.1.3	碳纳米管	135
7.1.4	石墨烯	136
7.1.5	碳材料的优化	136
7.2	钛的氧化物	138
7.2.1	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 负极材料	138
7.2.2	二氧化钛负极材料	139
7.3	锡基负极材料	141
7.4	硅基负极材料	141
7.4.1	纳米硅与 $\text{SiO}_x$	141
7.4.2	硅薄膜	142
7.5	转换反应型负极材料 $\text{M}_3\text{O}_4$	143
	思考题与习题	144
	参考文献	144
8	锂离子电池隔膜	146
8.1	聚烯烃隔膜	146
8.2	锂离子电池隔膜的主要性能指标	148
8.2.1	厚度、孔径和孔隙率	148
8.2.2	润湿性和吸液率	149
8.2.3	机械强度	149
8.2.4	热性能	149
8.2.5	化学稳定性	150
8.3	锂离子电池隔膜的预处理方法	150
	思考题与习题	152
	参考文献	152
9	电解质体系	153
9.1	电解质种类	153
9.2	液态电解质	153
9.2.1	电解质盐	153
9.2.2	电解液体系的有机溶剂	159
9.2.3	电解液安全问题	166
9.3	凝胶聚合物电解质	167
9.3.1	凝胶聚合物电解质种类	167
9.3.2	凝胶聚合物电解质制备方法	168
9.3.3	凝胶聚合物电解质改性	169
9.4	固态聚合物电解质	170



9.4.1 液态电解质存在的主要问题 .....	170
9.4.2 固态聚合物电解质种类 .....	171
9.4.3 聚合物-锂盐络合体系 .....	172
9.4.4 聚氧乙烯 PEO 基电解质 .....	173
9.4.5 离子橡胶 .....	177
9.4.6 单离子导体体系 .....	178
9.5 无机固态电解质 .....	180
9.5.1 固体中原子/离子扩散过程的基本原理 .....	180
9.5.2 无机晶态固体电解质材料的结构 .....	185
9.5.3 掺杂对离子电导率的影响 .....	188
思考题与习题 .....	189
参考文献 .....	189

# 1

# 新能源时代

自原始人类首次使用火种开始，能源便成为人类生存的必需资源。木材容易获取，满足了人类初期的取暖、烹饪等基本生存需求。随着煤炭开采技术的进步，能量密度较高的煤炭逐渐得到了广泛应用，并于 18 世纪 80 年代在一次能源消费比例中超过了木柴，人类利用能源的方式完成了由木柴向煤炭的第一次重大转换。1886 年内燃机的发明使油气作为高效能源需求量大幅提升，1965 年油气在一次能源结构中的占比超过了 50%，取代煤炭成为世界第一大能源，完成了煤炭向油气的第二次重大转换。随着经济社会对能源需求量的持续增长以及人类对绿色生态环境需求的提升，可再生能源作为新能源在一次能源结构中的比例逐渐增大，传统化石能源向新能源的第三次重大转换将成为必然。本章主要介绍能源发展的现状和趋势，能源存储的种类以及相关技术在能源可持续发展的重要作用。最后，详细介绍了机械储能、热电能量存储和超导磁储能及其工作机理。

## 1.1 能源发展的驱动力

能源是现代社会维持正常运行和持续发展不可或缺的根本要素，支撑着国民经济的正常运转。然而，能源作为经济发展动力因素的同时也是一种制约因素，随着经济的快速发展，我们面临着不断增长的能源需求与传统能源资源稀缺以及环境污染之间的矛盾。

(1) 人类对能源需求的不断增长。能源需求的影响因素很多，如能源价格、经济发展水平、能源结构、技术水平、产业结构、人口、城市化水平、能源效率、能源管理水平、能源政策等。确定各个因素与能源需求之间的内在关系，及其对能源需求的影响程度的综合分析意义重大。

自从人类社会出现，人口的增长和能源的使用发展相辅相成。从 1804 年 10 亿世界人口增加到 1927 年的 20 亿，历时 123 年；再从 20 亿人口到 1960 年的 30 亿人口时，历时已大大缩短至 33 年。此后每 10 亿人口增加，历时逐渐缩短。联合国发布的《世界人口展望（2015 年修订版）》报告预计，世界人口将在 2030 年之前达到 73 亿，2050 年达到 97 亿，2100 年达到 112 亿。世界人口基数庞大，人作为能源的需求者其数量激增。

世界人口的分布极不均衡、发展中国家人口比例超高，造成对能源需求量远远高于按照人口总数计算的平均值。2002 年全球一次能源消费量为 94.05 亿吨石油当量，国际能源署（IEA）预测在近 30 年间一次能源需求量增幅为 1.7%/年。《BP 世界能源统计年鉴》显示，2014 年全球化石能源消费总量为 111.6 亿吨油当量。与 2004 年相比，全球化石能源消费量增长了 23.8%。其中，北美和欧洲能源消费量分别增长 -2.7% 和 -9.7%，呈现负增长态势。2004~2014 年，亚太地区化石能源消费总量由 29.7 亿吨油当量增加到 48.2 亿吨油当量，增长 62.3%。其中，煤炭、石油和天然气消费量分别增长 81.9%、29.5% 和 79.3%。2017 年一次能源消费量达到 135 亿吨油当量，平均增长 2.2%，是 2013 年以来的

最快增速，过去十年的平均增速为 1.7%。其中，全球石油消费量平均增长了 1.8%，天然气增长了 3%，煤炭增长了 1%。同时，可再生能源发电量增长了 17%，即  $69 \times 10^6 \text{t}$  油当量，高于过去十年的平均增速。石油、煤炭和天然气等一次能源在能源结构中的地位不言而喻（如图 1-1 所示）。

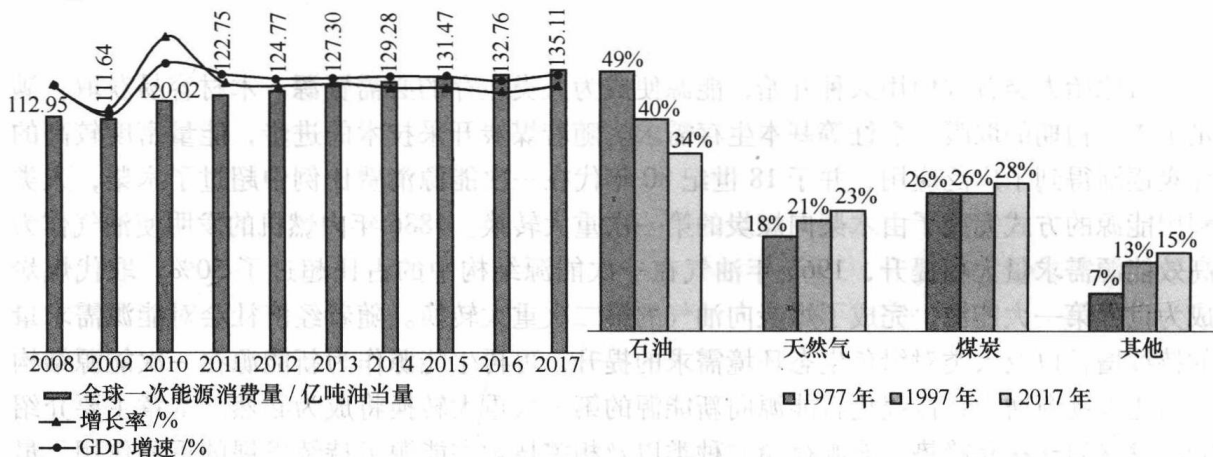


图 1-1 全球一次能源消费量以及能源消费结构

(2) 化石燃料应用带来严重问题。目前，人类面临着世界人口基数增长、对能源依赖程度进一步加深、现存资源过度消耗且不可再生等问题。而且，人类对化石燃料燃烧所造成的环境污染的认识逐渐深入、更加科学。下面就以目前在国内能源结构中占比最高的煤炭为例，深入分析化石燃料在开采、加工和使用的全过程对环境的影响。

在化石燃料开采过程中，对环境影响最典型的是煤炭开采，其中包括对土地的损害、对村庄的损害以及对地表水和地下水资源的影响。据不完全统计，迄今为止平均每开发万吨煤炭，塌陷农田 0.2 公顷（1 公顷=1 万平方米），平均每年塌陷土地 2 万公顷。煤炭开采造成水资源的污染对生态环境的影响也量大面广，平均每开采 1t 煤炭需要排放 2t 污水。煤炭在加工过程中会对环境产生很大的影响。煤炭在洗选过程中要排出大量的黑色煤水。洗煤水主要含有大量悬浮的粉煤、煤泥等。焦煤的浮选洗煤水中含有油、酚、杂醇等有害物，洗煤水直接外排，不仅浪费一部分资源（流失大量煤泥），而且还染黑水域，影响自然景观，同时也淤塞河道，妨害水生物生长，影响工农业生产及人民生活。煤炭的加工尤其煤的气化和液化过程会排出大量的污染物对环境产生影响。目前，煤炭基本上作为燃料用于供暖和发电等，煤炭燃烧引起的主要污染物有二氧化硫、二氧化碳、氮氧化物（主要为二氧化氮和二氧化氮）、一氧化碳、颗粒灰尘、烃类、痕量金属，以及因不完全燃烧而产生的有机化合物及炉渣、粉煤灰等固体废物。大气中  $\text{CO}_2$  的过量排放加剧温室效应，引起的全球变暖成为当代气候变化最核心的问题，带来热带气旋、旱涝、龙卷风、冰雹、霜冻、夏季暖夜等极端天气事件频发。据估计，1991~2000 年的十年中，全球每年受到气象水文灾害影响的平均人数为 2.11 亿人，是因战争冲突受到影响的人数的 7 倍。而全球气候变化及相关的极端气候事件所造成的经济损失在过去 40 年里平均上升了 10 倍。除了温室气体排放，化石燃料燃烧产生的颗粒污染物的影响也逐渐被人类所认知。其中，细颗粒物指环境空气中空气动力学当量直径小于等于  $2.5 \mu\text{m}$  的颗粒物。化学成分主要包括有机

碳(OC)、元素碳(EC)、硝酸盐、硫酸盐、铵盐、钠盐( $\text{Na}^+$ )等。与较粗的大气颗粒物相比,PM2.5粒径小,活性强,易附带有毒、有害物质(例如,重金属、微生物等),且在大气中的停留时间长、输送距离远,对空气质量、能见度以及人体健康等有重要的影响。

(3) 能源发展的三大趋势。2016年可再生能源是所有能源中增长最快的部分,增幅达到12%。虽然可再生能源在一次能源总量中仅占4%的份额,但其增长在2016年占能源需求总增量的近三分之一。从世界能源发展总趋势来看,能源资源类型由高碳向低碳发展,生产方式由简单生产向技术生产发展,以及利用方式由直接一次向多次转化发展。

能源类型由高碳向低碳发展,即由化石能源走向非化石能源。煤炭单位热值的碳含量为26.37t/TJ,原油为20.1t/TJ,天然气为15.3t/TJ;而水电、风电、核能、太阳能等几乎不含碳。煤炭向油气、油气向新能源发展的过程中,各类型能源所产生的污染量和碳排放量将逐渐降低,可以适应和满足生态环境绿色发展的需求。

资源生产方式由简单生产向技术生产发展。原始人类从自然界中直接获取木材为能源,从煤炭开采到油田开发越来越体现工程技术的重要性,核能、风能、太阳能等新能源资源的开发均为技术密集型产业。以油气开采为例,早期石油开采以直井为主,水平井技术和水力压裂技术的应用使大量低产井获得了有效开发,近年来水平井分段压裂技术的应用更是人类利用能源的方式在继木柴向煤炭、煤炭向油气开发,推动了一场能源领域的“页岩油气革命”。

能源利用方式由直接一次转换向多次转化发展。第一次工业革命以前,作为能源的木柴和煤炭以直接热利用为主;随着1776年蒸汽机和1875年内燃机的发明,能源利用向动力方向拓展;1831年法拉第发现电磁感应,1864年麦克斯韦建立电磁理论,1888年赫兹发现电磁波,推动了能源利用方式又向电力方向发展,开启了能源利用的电气化时代。电力成为增长最快的终端能源形式,工业的发展与生活的便利已经离不开持续供给的电力。

## 1.2 能源存储的种类与作用

清洁能源能够提高能源效率,减少温室气体排放,促进经济的可持续发展,储能技术是实现能源可持续发展的关键。智能电网、大规模储能、电动汽车、能源互联网等领域的快速发展是信息时代和能源结构变革有机结合的结果,正在潜移默化地改变可再生清洁能源产生、获取、利用的方式,其中储能技术是这些领域的重要组成部分和关键支撑技术。而大容量储能技术的应用将促进电网结构的优化,解决新能源发电的随机性、波动性问题,实现新能源的友好接入和协调控制。储能技术可广泛应用于电能质量与能源管理系统、交通运输等方面。先进的储能技术涉及电能、化学能、热能、机械能、太阳能、风能、水能等不同形式能量之间的相互转换和储存。不同形式的储能技术的能量转换途径不同,转换效率、技术成熟度、存储规模都不尽相同。

### 1.2.1 能源存储的种类

能源存储，主要是指将能源转变成可存储的形态（如化学能、势能、动能、电磁能等），使转化后能量具有空间上可转移或时间上可转移或质量可控制的特点，并且在需要的时候以原始的形态或者可以使用的形态释放出来的过程。能源可以凭借多种形式和能级存在，包括热能、化学能、机械能、动能、静压气体、电能等，因此储能不只是储电。相应的储能技术也就多种多样，包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、电池储能、液流电池储能、超导磁储能、超级电容储能、储氢技术及储热技术等。按类别分别是物理储能（包括抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能、电介质储能、超导电磁储能等）、化学储能（包括铅酸电池、氧化还原液流电池、钠硫电池、钠离子电池、锂离子电池、固态锂离子电池、电化学超级电容器等）、储热储冷、储氢四大类。储能技术成为能源应用突破“时间”和“空间”限制的关键技术。如图 1-2 所示，储能系统的规模不同，技术的成熟程度也不同，这就决定了应用时的用户类型和所存储的能量等级将会有所差异，应用领域也不同（见表 1-1）。

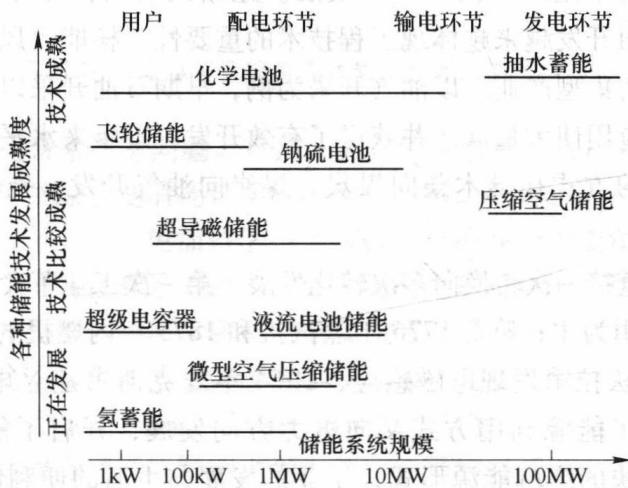


图 1-2 以供电为目的的储能系统性能比较

表 1-1 储能技术的应用领域比较

设备类型	用户类型	功率	能量等级
便携式设备	电子设备	1~100W	1W·h
	电动工具		
运输工具	汽车	24~100kW	100kW·h
	火车、轻轨列车	100~500kW	500kW·h
静止设备	家庭	1kW	5kW·h
	小型工业和商业设施	10~100kW	25kW·h
	配电网	1MW	1MW·h
	输电网	10MW	10MW·h
	发电站	10~100MW	10~100MW·h

### 1.2.2 能源存储在可再生能源利用中的作用

与传统能源相比,太阳能、风能、生物能和潮汐能等可再生能源具有资源丰富、无污染、多途径利用和可持续性等特点。这些可再生能源的利用往往受到时间、空间和气候变化等因素的限制,如太阳能不能连续使用,只能在白天利用,并且太阳能分布并不均匀;风能的利用主要取决于风速的大小和稳定性,在我国风力发电的地区与高用电的地区往往距离较远。正是由于可再生能源的间歇性、不稳定性和分布不均匀性,大力发展储能技术成为解决可再生能源的“先天不足”的一个重要途径。

传统电力系统要求电能的生产、输送、分配和使用同步进行、实时平衡,这种特性决定了电力系统在规划、建设、调度运行以及控制方式上,对安全稳定、经济灵活都有较高要求。近年来,随着经济发展与特高压建设,国内中东部地区逐步形成受端电网,表现为大容量、大机组、远距离输送、负荷密集等特征,电网运行管理与实时平衡的难度在增加。从用电结构看,第三产业、居民用电比重有较大提升,最高用电负荷逐年攀升,电网峰谷差不断拉大,电网运行面临新的挑战。储能技术在未来发电系统、输配电系统、辅助服务和电力用户端等方面都起着举足轻重的作用。

(1) 储能技术可以通过功率变换装置及时将系统的瞬时功率维持在平衡状态,抑制新能源电力系统中传输功率的波动性,提高供电可靠性;

(2) 储能技术可以改善供电质量,满足不同用户的多种需求,从而减少因电网可靠性或者电能质量带来的损失;

(3) 储能技术通过适时吸收或释放功率,低储高发,有效减少系统输电网络损耗,实现削峰填谷,获取综合经济效益;

(4) 储能技术在应急系统中可以为系统提供快速重启和快速恢复的能力,降低突发事件对电力供应的影响。

电网大容量储能技术打破了发电、用电实时平衡的限制,其大规模应用可有效降低昼夜峰谷差,提升电网稳定性、灵活性和电能质量水平,促进新能源大规模接入电网,同时能有效延缓与降低电网投资成本。由此可见,大容量储能技术在电力系统中的应用已成为未来智能电网发展的一个必然趋势。

发展可再生能源是实现能源结构转型的必由之路,以分布式发电为代表的可再生能源利用方式已逐渐成为推动实现能源绿色发展的主要动力。作为集中式发电的重要补充,分布式发电(Distributed Generation, DG)主要利用太阳能、生物质能、风能、小型水能等各类分散存在的可再生能源和柴油、天然气等可以方便获取的化石类能源进行发电供能。与集中式发电的大容量不同,分布式发电的容量通常在几十千瓦到十几兆瓦之间。2016年以来,我国政府陆续颁发了《电力发展“十三五”规划》《可再生能源发展“十三五”规划》,制定了电力和能源发展的路线图,为分布式发电的发展指明了方向,也从政策层面积极地促进了分布式发电的推广和应用。此外,得益于科学技术的进步,可再生能源单位发电价格正逐年降低。以光伏电池组件为例,2007年我国光伏电池组件的价格约为36元每瓦。2014年年底,每瓦价格已经降低到3.8元以下。光伏组件价格在7年内降低了约90%。受此影响,近年来分布式发电得到了更加广泛的应用。此外,分布式发电系统相较

于集中式发电系统还具有建设周期短、投资成本低等优点。

受可再生能源随机性大、可控性差的影响,使用可再生能源的分布式发电系统在运行过程中表现出了随机性、间歇性、不确定性以及不可调度的特点。随着分布式发电系统在输配电网中的渗透率不断提高,在其并网工作时给传统配电网带来巨大的挑战,甚至影响系统的正常运行。此外,分布式发电系统在电力系统出现故障时通常需要切断二者之间的连接,这必然会加剧电力系统的功率不平衡,并危害系统的安全、稳定运行。如果分布式发电系统工作在离网模式下,其电力用户的电能质量又将得不到保障。若完全由分布式发电系统供电,将难以实现能源的高效利用和优化调度。这些问题都会影响分布式发电技术的推广应用。为解决上述问题,通过将分布式发电系统、储能系统(Energy Storage System, ESS)、能量转换设备、监控以及保护系统进行有机组合,构建小型发配电系统,进而形成了微电网(Micro-grid, MG)的概念。该解决方案可以通过对微电网中“发-输-配-储-用”各子系统的控制、管理,在信息科学和控制科学中各类理论、方法的基础上,制定高效、合理的能量管理及调度策略,实现对分布式能源的充分利用、提高能源使用效率。在运行过程中,通过对微电网各子系统中电力电子设备的控制,不但可以实现不同子系统间的协同增效,同时还能保证系统电压、频率稳定,实现微电网安全、稳定、可靠和高效运行。微电网具有以下几个特点:

(1) 通过合理规划分布式发电系统、储能系统和电网的功率分配情况,微电网可提高系统整体的能量利用效率;

(2) 通过可再生能源与储能技术的组合利用,微电网可以降低间歇性、不确定性的可再生能源发电对配电网电能质量的影响;

(3) 基于分布式发电系统和储能系统的独立性,微电网可在外电网故障时为重要负载供电,提高供电可靠性;

(4) 微电网有助于提升可再生能源在电力系统中的渗透率,减少碳排放和环境污染;

(5) 微电网可以实现对大电网无法顾及的偏远地区的电能供给。

作为微电网中的重要组成部分,储能系统是微电网实现可再生能源优化利用的基本保障。储能系统凭借其快速存储、利用电能的特性,能够有效地调节微电网中的功率分布,实现微电网需求侧管理;它还可以在电网出现故障时作为后备电源为用户供能,增强系统供电可靠性,改善电能质量;得益于储能系统对可再生能源的不确定性具有较强的处理能力,通过储能系统与可再生能源发电系统的互补利用、协同增效,可以消除可再生能源随机性、间歇性和不确定性对微电网系统的不利影响,提高可再生能源利用效率。

### 1.3 机械储能

机械储能技术分为:弹性储能、液压储能、抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能等。

(1) 弹性储能。机械弹性储能以平面蜗卷弹簧为关键零部件,利用蜗卷弹簧受载时产生弹性变形,将机械能转化为弹性势能,卸载后将弹性势能转化为机械能的原理进行储能和释能,该储能方式具有储能大容量、高效率、低成本和无污染等优点。图 1-3 所示为机械弹性储能原理的示意图。该技术是利用弹簧(压簧组合体,卷簧和压簧组合体是关键核心部件)可反复曲伸的弹性物质原理,实现对电能的结构性物理储存和释放弹性能量发

电。机械弹性储能系统以蜗卷弹簧储能箱为中心分为发电侧与储能侧，两侧都通过变频器连接外部电网；在储能侧，变频器连接电动机，通过联轴器连接扭力传感器与蜗簧箱，完成蜗簧储能；在发电侧，蜗簧通过联轴器带动扭力传感器与发电机，再接上变频器，完成发电并网。

(2) 液压储能。液压储能系统中的重要部件是液压储能器，即蓄能器（如图 1-4 所示），是将压力流体的液压能转换为势能储存起来，当系统需要时再由势能转化为液压能而做功的容器，在保证系统正常运行、改善动态品质、保持工作稳定性、延长系统工作寿命和降低噪声等方面起着重要作用。因此，液压储能也被称为蓄能器储能。蓄能器发挥存储能量和回收能量的功能，在实际使用中可作为辅助动力源，减小装机容量，补偿泄漏，补偿热膨胀；作为紧急动力源，构成恒压油源等。液压储能技术的基本原理是，当系统压力高于蓄能器内液体或氮气的压力时，系统中的液体进入蓄能器中，直到蓄能器内外压力相等；反之，当蓄能器内液体或氮气的压力高于系统压力时，蓄能器内的液体流到系统中去，直到蓄能器内外压力平衡。

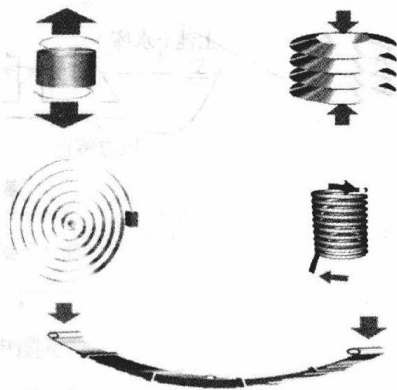


图 1-3 弹性储能示意图

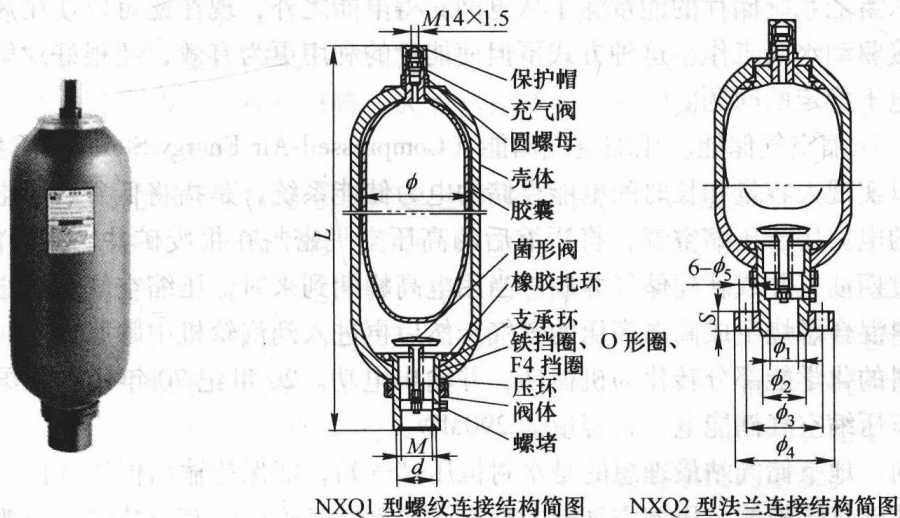


图 1-4 蓄能器的外观图和内部连接结构图

(3) 抽水储能。抽水蓄能是最古老，也是目前装机容量最大的储能技术。基本原理是在用电低谷时将电能以水的势能的形式储存在高处的水库里；用电高峰时，开闸放水，驱动水轮机发电，如图 1-5 所示。第一座抽水蓄能电站于 1882 年在瑞士的苏黎世建成，从 20 世纪 50 年代开始抽水蓄能电站的发展进入起步阶段。抽水蓄能电站既可以使用淡水，也可以使用海水作为存储介质。

抽水蓄能电站高度依赖于当地的地形地貌，它的理想场所是上下水库的落差大、具有较高的发电能力、较大的储能能力、对环境无不利影响，并靠近输电线路。但是这样的理



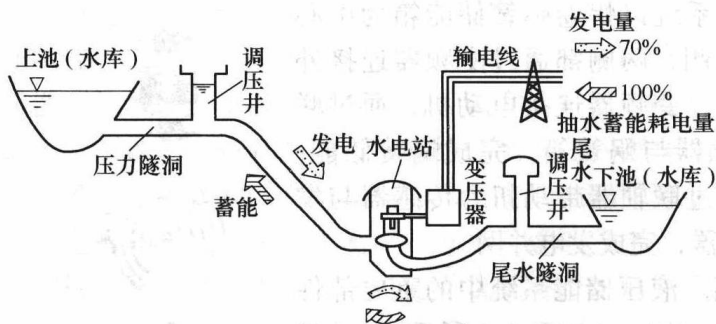


图 1-5 抽水储能系统示意图

想场所很难寻找，目前，地下抽水蓄能（UPHES）的新思路已经浮出水面。地下抽水蓄能电站与传统抽水蓄能电站的唯一区别是水库的位置。传统的抽水蓄能电站对于地质构造与适用区域有较高的要求。地下抽水蓄能电站利用地下水，建筑在平地，上水库在地表，下水库在地下。其中，重力功率模块（GPM）作为新技术受到了广泛关注。具体而言，一个由铁和混凝土制成的大活塞，悬浮在一个充满水的深井中，活塞下降到迫使水通过涡轮，带动发电机发电。与现有抽水蓄能电站相比，GPM 电厂单位存储容量的投资成本小，并且自动化程度高，占地面积小，多轴 GPM 装置也可以在市区修建，从经济性和成本上更具有发展前途。

抽水蓄能系统储存的能量除了从电网获得电能之外，现在还可以使用风力涡轮机或太阳能直接驱动水泵工作。这种方式不但使能量的利用更为有效，还很好地解决了风能和太阳能发电不稳定的问题。

（4）压缩空气储能。压缩空气储能（Compressed-Air Energy Storage, CAES）技术是另一种可以实现大容量和长时间电能存储的电力储能系统，是指将低谷、风电、太阳能等不易储藏的电力用于压缩空气，将压缩后的高压空气密封在报废矿井、沉降的海底储气罐、山洞、过期油气井或新建储气井中。当用电高峰期到来时，压缩空气被压送到燃烧室与喷入的燃料混合燃烧生成高温高压的燃气；然后再进入到汽轮机中膨胀做功，实现了气体或液体燃料的化学能部分转化为机械功，并输出电功。20 世纪 70 年代在德国的亨托夫建设了第一座压缩空气储能电厂，容量为 290MW。

目前，地下储气站最理想的是水封恒压储气站，能保持输出恒压气体，地上储气站采用高压的储气罐模式。压缩空气储能是一种基于燃气轮机的储能技术，一般包括 5 个主要部件：压气机、燃烧室及换热器、透平、储气装置（地下或地上洞穴或压力容器）、电动机/发电机（如图 1-6 所示）。其工作原理与燃气轮机不同的是，压气机和透平不同时工作，电动机与发电机共用一机。在储能时，压缩空气储能中的电动机耗用电能，驱动压气机压缩空气并存于储气装置中；放气发电过程中，高压空气从储气装置释放，进入燃气轮机燃烧室同燃料一起燃烧后，驱动透平带动发电机输出电能。由于压缩空气来自储气装置，透平不必消耗功率带动压气机，几乎全用于发电。

压缩空气储能具有容量大、工作时间长、经济性能好、充放电循环多等优点。1) 规模上仅次于抽水蓄能，适合建造大型电站。压缩空气储能系统可以持续工作数小时乃至数天，工作时间长。2) 建造成本和运行成本比较低，低于钠硫电池或液流电池，也低于抽