

序

能源紧缺和环境污染是人类面临的两大重要难题。传统能源结构的碳基特征导致温室气体排放激增，迫使人们重新思考和探索可再生能源的发展。当前，我们迎来了一个关键的转折点，转向绿色能源利用和环境保护。绿色能源将在能源储存、电动汽车、智能电网以及可穿戴设备等领域发挥重要作用，其广泛应用将推动能源转型的实现。在我国，绿色能源领域尚没有一套能够系统、科学地展现材料科学技术方面前沿进展的教材。本书全面阐述绿色能源材料理论基础、实际应用和技术前沿，力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性，帮助读者深入了解绿色能源和环境保护的重要意义。

本书概述了锂离子电池、太阳能电池、燃料电池、金属-空气电池等绿色能源技术的基本原理、关键技术和推广应用。通过对绿色能源材料的分析，可以更好地理解其特点、优势和限制条件，特别是绿色二次电池材料在电池能量密度、循环寿命与稳定性、成本以及回收利用等方面存在诸多技术瓶颈，亟待科学家、工程师和青年学者共同努力，通过技术创新推动绿色电池材料的发展。

本书强调了绿色能源材料与环境之间的密切联系，深入阐述了绿色能源材料对于减少温室气体排放、改善空气质量、保护生态环境的重要性。通过详细的案例分析和综合评估，展示了绿色能源材料如何在电池领域发挥作用，包括工业生产、交通运输、建筑领域等。同时，本书还讨论了绿色能源材料与城市化进程、农村电气化、可持续发展等的关系，提供了对未来绿色能源材料和环境保护技术的思考路径。本书还介绍了国内外最新的绿色能源材料技术和工程案例，为读者提供了从理论到实践的桥梁。无论是学生、科研工作者、企业技术人员还是管理者都可以从中获得一些启示。

我衷心希望本书的出版能够引起更多人对绿色能源和环境问题的关注，为构建清洁、健康和可持续的未来贡献一份力量，推动我国绿色能源领域的科技进步和创新。



中国工程院院士

2025 年 10 月

前 言

本书涵盖了绿色能源材料的基本概念、技术原理、现代检测表征技术，以及当今国内外绿色能源材料的最新发展趋势和前沿技术。在阐述基本理论知识的同时，突出绿色能源材料的实际应用，理论结合实践，充分体现本领域的前沿领先技术。通过学习本书，学生可以掌握绿色能源材料的基础知识和主要利用技术，了解绿色能源材料课题中的具体应用实施途径，具备新能源材料与器件专业相关专业知识与基本技能，为学习后续课程及从事专业工作奠定理论基础。

本书具有以下三个特点：

- (1) 注重基础知识，内容系统全面，理论与案例分析相结合，深入浅出。
- (2) 紧跟国际学科前沿，将基础知识与发展动态相结合，突出教材的前瞻性和时效性。
- (3) 内嵌思考讨论、文献导读、知识拓展等，激发学生学习兴趣，拓展知识面。

本书由李丽教授、吴锋院士担任主编。其中，第1~3、8章由李丽、吴锋执笔，第4、5章由罗冲执笔，第6、7章由刘琦执笔，第9章由骆相宜执笔。全书由李丽、徐李倩昀统稿。

感谢课题组徐李倩昀、范二莎、张喜雪、黄清荣、刘子欣、吕晓伟、燕乔一等博士研究生的辛勤付出。感谢国家自然科学基金项目(52534010、52374410)、北京市自然科学基金重点项目(Z220021)、北京理工大学“十四五”规划教材项目对本书的支持。本书分别入选了教育部高等学校材料类专业教学指导委员会规划教材2023年度建设项目、科学出版社“十四五”普通高等教育研究生规划教材。最后，感谢科学出版社编辑对本书提出的宝贵意见及对编辑出版的大力支持。

由于我们知识水平和经验有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

李 丽

2025年10月于北京理工大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 能源的基本概念	1
1.1.1 能源的定义和分类	1
1.1.2 能源的来源和用途	3
1.1.3 能源的主要评价标准	5
1.2 能源的发展趋势	6
1.2.1 薪柴时代	6
1.2.2 煤炭时代	6
1.2.3 石油时代	7
1.3 能源需求与结构	7
1.3.1 世界能源消费概况	7
1.3.2 能源需求与经济发展	9
1.3.3 能源结构优化与环境改善	10
1.4 绿色能源与绿色能源材料	11
1.4.1 绿色能源及其材料简介	11
1.4.2 中国绿色能源产业与材料需求	12
思考题	15
参考文献	15
第 2 章 锂离子电池及关键材料	17
2.1 概述	17
2.1.1 锂离子电池的构成和原理	17
2.1.2 锂离子电池的特点	19
2.2 锂离子电池正极材料	19
2.2.1 钴酸锂	20
2.2.2 镍钴锰三元材料	23
2.2.3 磷酸铁锂	28
2.2.4 锰酸锂	31
2.3 锂离子电池负极材料	34
2.3.1 石墨	35
2.3.2 硅基材料	37
2.3.3 锡基材料	39



2.3.4	钛酸锂	40
2.3.5	锂金属	41
2.4	锂离子电池电解质材料	44
2.4.1	液态电解质	44
2.4.2	固态电解质	45
	思考题	51
	参考文献	51
第3章	太阳能电池及关键材料	55
3.1	概述	55
3.1.1	开发太阳能电池的重要意义	55
3.1.2	太阳能电池发展简史	56
3.1.3	太阳能电池工作原理	57
3.1.4	太阳能电池电学特性及主要参数	59
3.1.5	影响太阳能电池性能的主要因素	60
3.2	硅太阳能电池	62
3.2.1	硅半导体材料的特点	62
3.2.2	硅太阳能电池技术路线	62
3.2.3	硅太阳能电池行业发展	64
3.2.4	硅太阳能电池的发展前景和挑战	65
3.3	Ⅲ-V族化合物太阳能电池	66
3.3.1	Ⅲ-V族化合物材料的特点	66
3.3.2	Ⅲ-V族化合物材料的制备方法	66
3.3.3	高效率Ⅲ-V族化合物太阳能电池	67
3.3.4	Ⅲ-V族化合物太阳能电池的发展前景和挑战	69
3.4	CIGS 太阳能电池	70
3.4.1	CIGS 材料的特点	70
3.4.2	CIGS 材料的制备方法	70
3.4.3	高效率 CIGS 太阳能电池	71
3.4.4	CIGS 太阳能电池的发展前景和挑战	72
3.5	CdTe 太阳能电池	73
3.5.1	CdTe 材料的特点	73
3.5.2	CdTe 材料的制备方法	73
3.5.3	高效率 CdTe 太阳能电池	74
3.5.4	CdTe 太阳能电池的发展前景和挑战	75
3.6	钙钛矿太阳能电池	76
3.6.1	钙钛矿材料的特点	76
3.6.2	钙钛矿薄膜的制备工艺	77
3.6.3	高效率钙钛矿太阳能电池	77
3.6.4	钙钛矿材料的发展前景和挑战	82

思考题	84
参考文献	85
第 4 章 燃料电池及关键材料	90
4.1 概述	90
4.1.1 燃料电池的发展历史	90
4.1.2 燃料电池的类型和特点	93
4.1.3 燃料电池的关键材料	95
4.1.4 燃料电池的应用领域	97
4.2 燃料电池的工作原理	99
4.2.1 燃料电池的基本反应	99
4.2.2 燃料电池的热力学基础	99
4.2.3 燃料电池的动力学基础	100
4.3 质子交换膜燃料电池	102
4.3.1 PEMFC 的结构和工作原理	102
4.3.2 质子交换膜	103
4.3.3 电极	105
4.3.4 双极板	107
4.3.5 研究展望	108
4.4 熔融碳酸盐燃料电池	109
4.4.1 工作原理	109
4.4.2 关键材料	110
4.4.3 研究展望	112
4.5 固体氧化物燃料电池	113
4.5.1 SOFC 的结构和工作原理	113
4.5.2 SOFC 的电解质材料	114
4.5.3 SOFC 的阳极材料	117
4.5.4 SOFC 的阴极材料	117
4.5.5 研究展望	118
4.6 微生物燃料电池	119
4.6.1 工作原理	119
4.6.2 分类	122
4.6.3 电极材料	123
4.6.4 研究展望	126
思考题	129
参考文献	129
第 5 章 金属-空气电池及关键材料	132
5.1 概述	132
5.1.1 金属-空气电池的简介	132
5.1.2 金属-空气电池的发展历程	132



5.1.3	金属-空气电池的应用领域	133
5.1.4	金属-空气电池的应用前景及挑战	134
5.2	锂-空气电池	135
5.2.1	锂-空气电池电化学原理及挑战	136
5.2.2	锂-空气电池正极材料	139
5.2.3	锂-空气电池负极材料	142
5.2.4	锂-空气电池电解液	143
5.3	钠-空气电池	147
5.3.1	钠-空气电池电化学原理及挑战	147
5.3.2	钠-空气电池正极材料	149
5.3.3	钠-空气电池负极材料	149
5.3.4	钠-空气电池电解液	150
5.4	锌-空气电池	151
5.4.1	锌-空气电池电化学原理与挑战	151
5.4.2	锌-空气电池正极材料	152
5.4.3	锌-空气电池负极材料	155
5.4.4	锌-空气电池电解液	158
5.4.5	锌-空气电池隔膜	160
5.5	铝-空气电池	160
5.5.1	铝-空气电池电化学原理及挑战	160
5.5.2	铝-空气电池催化剂材料	161
5.5.3	铝-空气电池负极材料	161
5.5.4	铝-空气电池电解液	162
5.6	镁-空气电池	162
5.6.1	镁-空气电池电化学原理及挑战	162
5.6.2	镁-空气电池正极材料	163
5.6.3	镁-空气电池负极材料	163
5.6.4	镁-空气电池电解液	163
	思考题	166
	参考文献	167
第 6 章	新体系电池及关键材料	171
6.1	概述	171
6.1.1	新体系电池及关键材料发展现状	172
6.1.2	新体系电池及关键材料面临的挑战	173
6.2	钠离子电池	175
6.2.1	钠离子电池正极材料	176
6.2.2	钠离子电池负极材料	181
6.2.3	钠离子电池电解质和界面	185
6.2.4	固态钠离子电池	188

6.3	钾离子电池	190
6.3.1	钾离子电池正极材料	190
6.3.2	钾离子电池负极材料	195
6.3.3	钾离子电池电解质	196
6.4	锌离子电池	197
6.4.1	锌离子电池正极材料	197
6.4.2	锌离子电池负极材料	200
6.4.3	锌离子电池电解质	201
	思考题	204
	参考文献	204
第7章	液流电池	209
7.1	概述	209
7.1.1	液流电池的发展历史	209
7.1.2	液流电池应用前景	213
7.2	全钒液流电池	214
7.2.1	全钒液流电池工作原理	214
7.2.2	全钒液流电池电极材料	215
7.2.3	全钒液流电池隔膜材料	218
7.3	非水系液流电池	220
7.3.1	Li/TEMPO 液流电池	221
7.3.2	Li/二茂铁液流电池	222
7.3.3	Li/Br ₂ 液流电池	222
7.3.4	FL/DBMMB 液流电池	223
7.3.5	新型非水系液流电池膜	224
7.4	新体系水系液流电池	226
7.4.1	甲基紫精/TEMPO 体系液流电池	226
7.4.2	醌/溴体系液流电池	227
7.4.3	醌/铁体系液流电池	228
7.4.4	锌/碘体系液流电池	228
7.4.5	其他水系液流电池	229
	思考题	233
	参考文献	233
第8章	混合离子电容器及关键材料	238
8.1	概述	238
8.1.1	混合离子电容器的应用背景	238
8.1.2	混合离子电容器的发展基础	240
8.1.3	混合离子电容器的内在原理	242
8.2	锂离子电容器	242
8.2.1	锂离子电容器的工作原理	242



8.2.2	锂离子电容器的构建	243
8.2.3	锂离子电容器正极材料	245
8.2.4	锂离子电容器负极材料	247
8.2.5	锂离子电容器电解液	250
8.2.6	锂离子电容器的发展与挑战	251
8.3	非锂离子混合电容器	252
8.3.1	非锂离子混合电容器的发展	253
8.3.2	先进混合离子电容器关键材料	254
8.3.3	非锂离子混合电容器的电解质	260
8.4	混合离子电容器的发展前景与挑战	261
	思考题	264
	参考文献	264
第9章	新能源材料测试表征技术	269
9.1	微观形貌表征	269
9.1.1	扫描电子显微镜	269
9.1.2	透射电子显微镜	270
9.1.3	扫描探针显微镜	271
9.1.4	原子探针层析技术	273
9.2	物相结构分析	274
9.2.1	衍射技术	274
9.2.2	分子振动光谱	277
9.2.3	紫外-可见光谱	279
9.2.4	X射线吸收精细结构	280
9.2.5	磁共振技术	280
9.3	成分分析	282
9.3.1	光谱法	282
9.3.2	质谱法	284
9.3.3	能谱法	286
9.3.4	色谱法	289
9.3.5	化学分析法	290
9.4	物理性能分析	291
9.4.1	孔隙/粒度测量	291
9.4.2	密度测量	293
9.4.3	万能材料试验机	294
9.4.4	硬度试验	295
9.4.5	热性能分析	296
9.5	电化学性能测试	299
9.5.1	稳态测试法	299
9.5.2	暂态测试法	300



9.5.3 伏安分析法	301
9.5.4 交流阻抗法	301
9.6 二次电池安全要求	302
9.6.1 寿命试验	302
9.6.2 气候环境试验	303
9.6.3 机械条件试验	305
9.6.4 电安全试验	306
思考题	309
参考文献	309



能源变革与人类文明息息相关。火的使用推动了原始文明的出现，煤炭的大规模利用带领人类进入“蒸汽时代”，石油和电力的广泛应用开启了“电气时代”……然而，近年来伴随着化石能源的日益枯竭，环境污染问题也日趋严重，人类开始逐步探索高效化、清洁化、低碳化的新能源以取代传统能源，新一轮的“能源革命”正在拉开帷幕。

本章将以能源的基本概念和发展历史为始，主要介绍当今世界能源的消费概况及其对经济发展和环境改善的影响、绿色能源及关键材料、绿色能源材料产业的发展概况等内容，带领读者了解能源变革对社会生产和人类生存环境的重要影响。

1.1 能源的基本概念

1.1.1 能源的定义和分类

能源，又称能量资源，是人类活动的物质基础，是自然界中能为人类提供某种形式能量（如光能、热能、机械能、电能、化学能等）的物质或物质运动。需要强调的是，能源不仅蕴藏在煤炭、石油等物质中，也可能蕴含于物质的运动过程中。自然界中的水和空气，它们本身作为自然资源并不能为人类提供能量，但是当水从高处向低处流动形成水流时，当空气从高压向低压运动形成气流时，它们蕴含的水能和风能就可以通过转化为人类提供能量，这就是物质运动带来的能源。

能源的形式多种多样，因此衍生出许多不同的能源分类方法。世界能源理事会（World Energy Council, WEC）推荐将能源分为 11 类，分别为：固体燃料、液体燃料、气体燃料、水能、电能、太阳能、生物质能、风能、核能、海洋能和地热能。同时，能源的用途多种多样，不同的使用目的决定不同的分类方法。能源的分类见图 1.1。

1. 按来源分类

（1）来自地球外部天体的能量（太阳能）：这里的太阳能除了直接来自太阳的能量（如太阳光的热辐射能），还有间接来自太阳的能量。

（2）地球本身蕴藏的能量：通常指与地球内部的热能有关的能源和与原子核反应有关的能源，如原子核能、地热能等。

（3）地球和其他天体互相作用产生的能量：主要是月球和太阳对地球的引力产生的能量，如潮汐能。

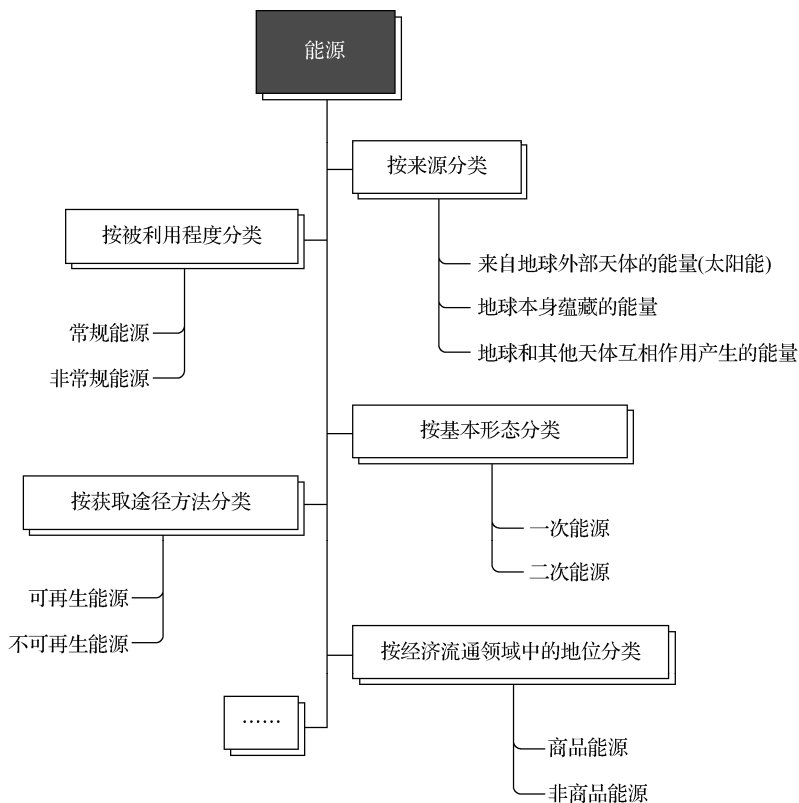


图 1.1 能源的分类

2. 按被利用程度分类

(1) 常规能源 (conventional energy): 已经能大规模生产和广泛利用的一次能源, 又称传统能源。例如, 煤炭、石油、天然气、水能等, 是促进社会进步和文明的主要能源。

(2) 非常规能源 (unconventional energy): 非常规能源是指传统能源以外的各种能源形式, 包括刚开始开发利用或正在积极研究、有待推广的能源, 如太阳能、地热能、风能、海洋能、生物质能和聚变能等。

3. 按基本形态分类

(1) 一次能源 (primary energy): 一次能源是指自然界中以原有形式存在的、未经加工转化的能量资源, 又称天然能源, 如煤炭、石油、天然气、水能等。

(2) 二次能源 (secondary energy): 二次能源是一次能源经过加工、转化形成的另一种形态的能源。主要有电力、焦炭、煤气、沼气、蒸汽、热水, 以及汽油、煤油、柴油、重油等石油制品。

4. 按获取途径方法分类

(1) 可再生能源 (renewable energy): 可再生能源是指在自然界中不会随自身的变化或人类的利用而日益减少并有规律地得到补充的能源, 如太阳能、风能、水能、生物质能等。

(2) 不可再生能源 (non-renewable energy): 不可再生能源是指经过亿万年形成、使用后逐渐减少、短期内无法恢复的能源, 如石油、煤炭、天然气、核燃料等。

5. 按经济流通领域中的地位分类

(1) 商品能源 (commercial energy): 商品能源是指进入市场、在国内或国际市场上进行买卖的能源, 如煤炭、石油及其制品、天然气、电力、焦炭等。

(2) 非商品能源 (non-commercial energy): 非商品能源是指薪柴、秸秆等农业废料和人畜粪便等就地利用的能源。非商品能源在发展中国家农村地区的能源供应中占有较大比重。这种能源不是一种商品交易的对象, 所以在能源平衡中很难计算。

1.1.2 能源的来源和用途

1. 能源的来源

从来源看, 地球能源分为来自地球外部天体的能量 (太阳能)、地球本身蕴藏的能量、地球和其他天体互相作用而产生的能量。

1) 太阳能

太阳是地球主要的能量来源, 太阳能及其产物包括: 太阳能 (solar energy), 植物燃料, 化石燃料, 风、水流、海流等的能量, 海洋热能。太阳能通过太阳辐射到达地球, 其在可见光 (波长 $0.4 \sim 0.76 \mu\text{m}$)、红外线 (波长大于 $0.76 \mu\text{m}$) 和紫外线 (波长小于 $0.4 \mu\text{m}$) 分别占 50%、43% 和 7%, 即太阳辐射集中于短波波段, 所以又称为短波辐射。与之相对的是地面吸收能量反射给大气的地面长波辐射, 大气吸收地面长波辐射向宇宙散发的大气长波辐射, 还有大气向地面散发的大气逆辐射 (图 1.2)。

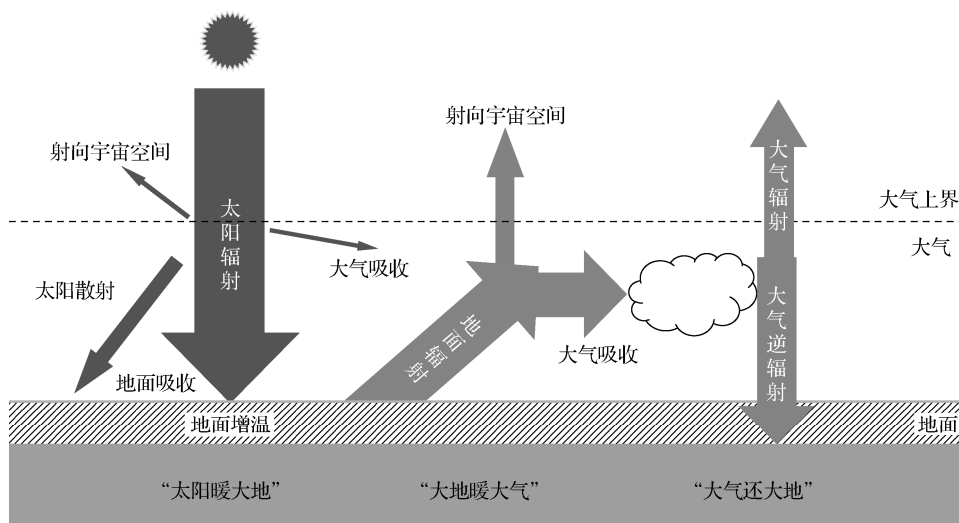


图 1.2 大气层的能量传递过程

2) 核能

核能 (nuclear energy, 或称原子能) 是通过核反应从原子核释放的能量, 满足爱因斯坦的质能方程 $E = mc^2$, 其中 E 为能量, m 为质量, c 为光速。核能可通过三种核反应释放:



①核裂变，较重的原子核分裂释放核能；②核聚变，较轻的原子核聚合在一起释放核能；③核衰变，原子核自发衰变过程中释放能量。

地球的地热能有一部分来自放射性物质的衰变，也就是核能。核能是人类最具希望的未来能源之一。人们开发核能的途径有两条：一是重元素的裂变，如铀的裂变；二是轻元素的聚变，如氘、氚、锂等。重元素的裂变技术已经得到实际应用，而轻元素聚变技术也正在积极研究中。2021年，中国科学院等离子体物理研究所“人造太阳”之称的全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST），实现了1056 s的长脉冲高参数等离子体运行，这是目前世界上托卡马克装置高等离子体运行的最长时间。也许再过50年，可控核聚变技术将不再遥远。

3) 引力势能

以潮汐能为代表的引力势能（gravitational potential energy），也是地球上能量来源的途径之一。潮汐是指海水在天体（主要是月球和太阳）引潮力的作用下所产生的周期性运动。在涨潮的过程中，汹涌而来的海水具有很大的动能，随着海水水位的升高，海水的巨大动能转化为势能；在落潮的过程中，海水奔腾而去，水位逐渐降低，势能又转化为动能。与风能与太阳能这些受环境影响较大的不稳定能源相比，潮汐能的时间可预知、能量规模庞大且稳定，是不可多得的高质量能源。

2. 能源的用途

相比于能源的来源，能源的用途更为复杂多样。从人类学会使用火开始，经过石器时代、铁器时代，直到近代工业革命，各种技术发明使人类文明达到了前所未有的高度。能源相当于城市的血液，它驱动着城市的运转。现代化程度越高的城市对能源的依赖越强，因为能源维系着照明、交通、餐饮、供暖、降温、自动化管理系统等。当代能源主要依靠燃烧石油、煤炭、天然气等化石燃料而获取，下面将着重介绍这三种化石燃料的用途。

1) 石油

石油的主要用途为：①燃油，72%的石油用于制成各种燃油，如汽车使用的柴油、汽油，飞机、轮船等交通工具使用的燃油；②塑料，大部分塑料都是石油产品；③沥青，沥青也称柏油，是石油加工过程中的一种产品；④衣服，从衣服标签上看到的涤纶、腈纶、锦纶等面料，都是以石油为原料生产的合成纤维；⑤合成橡胶，具有高弹性、耐高温、耐低温等性能，石油就是制作合成橡胶的主要原料；⑥制药，制药与石油密不可分，从药品包装使用的塑料到药品本身都依赖石油；⑦清洁用品，生活中常用的清洁用品很多都是石油制品，如洗涤剂、洗发水、沐浴乳、肥皂等都含有石油的衍生物；⑧食品，石油不仅用来制造化肥、杀虫剂等，很多食物的保鲜、染色以及调味都有石油产品的参与；⑨润滑油，润滑油、润滑脂（黄油）中的成分大部分是石油炼制的基础油，许多润滑油中90%的成分是石油；⑩化妆品，石油也是制作化妆品的原料，含量较高的可达80%，石油精炼或合成的油、石蜡、香精、染料等都可以用来制作化妆品。

2) 煤炭

煤炭的主要用途为：①火力发电，我国的火力发电主要靠燃煤；②生活用煤，日常生活中使用的天然气和煤气都需要用到煤；③工业用煤，除作燃料外，还可以利用冶金提取出其余的化学物质；④建筑材料用煤，生产水泥、玻璃等加工合成材料时也需要用煤。

3) 天然气

天然气的主要用途为：①天然气发电，是具有缓解能源紧缺、降低燃煤发电比例、减少环境污染的有效途径；②天然气化工工业，天然气是制造氮肥的最佳原料，具有投资少、成本低、污染少等特点；③城市燃气事业，特别是居民生活用燃料，天然气作为民用燃料的经济效益大于工业燃料；④压缩天然气汽车，以天然气代替汽车用油，具有价格低、污染少、安全性高等优点。

1.1.3 能源的主要评价标准

能源的种类很多，各有优劣。通过对能源进行评价，可以了解能源利用的难易程度以及对环境的影响程度。

1. 能源的品质评价

(1) 储量：评价能源品质的一个重要指标是能源的储量，同时应对能源的可再生性和地理分布做出评价。例如，煤、石油、天然气等都是不可再生能源，其储量有限。而可再生能源，如太阳能、风能、水能等可以循环使用。

(2) 储能的可能性与供能的连续性：储能的可能性是指能源是否可以储存，在需要时是否能及时供应。供能的连续性是指能否按需连续不断地提供能量。化石燃料易于储存，且便于连续供应。而太阳能、风能等可再生能源不易储存，能量供应也可能存在波动性和间歇性。

(3) 能流密度：能流密度是指在单位空间或单位面积内，能够从某种能源获得的能量或者功率，主要用于评价一次能源。太阳能和风能的能流密度很小，每平方米约 100 W。而各种常规能源的能流密度较大，如每千克标准煤的发热量约 29288 kJ，每千克石油的发热量为 41840 kJ。核能的能流密度最大，每千克铀-235 裂变时可释放出 686.176 亿 kJ 的热量。若能流密度太小，经济性就会过差，不利于开发利用。

(4) 能源品位：能源品位是指对一种能源的分级，反映能源利用的方便程度。能源品位的高低是相对的。二次能源比一次能源品位高。水能直接转变为机械能和电能，其品位比由化学能转变为热能、再由热能转变为机械能的化石燃料高。

(5) 环境影响：随着环保呼声的提高和可持续发展概念的提出，人类对环境的重视进一步加强，对排污指标的限制也会增加。化石燃料燃烧过程中会排放 CO₂ 等温室气体，甚至还有一些有毒或腐蚀性物质，对环境的影响较大。核燃料有放射性污染及废料处理的问题。即使是水力发电，也会对生态平衡、土地盐碱化、灌溉与航运造成不利影响。而可再生能源大多对环境的影响较小。

2. 能源的计量单位

能源的计量单位有以下 3 种表示方法。

(1) 能量单位：用热功单位表示，如焦耳 (J)、卡 (cal)、千瓦·时 (kW·h)^①、英国热能单位 (Btu)。

(2) 当量单位：用能源的当量值表示，常见的有煤当量和油当量。

^① 行业中通常将单位 kW·h、A·h 简写为 kWh、Ah，本书后文均使用简写。



(3) 能源的实物量单位：用能源的实物量表示，如煤用吨(t)、石油用桶(bbl)、天然气用立方米(m^3)。

□ 思考讨论

请列举目前发展迅猛的新能源类型及其特殊用途。

1.2 能源的发展趋势

纵观人类文明进程，对人类利用能源的历史加以考察，可将其划分为三个时代：薪柴时代、煤炭时代、石油时代。在能源的利用历史上，其划时代的革命性转折有三个：第一个转折是煤炭取代了木材成为人类社会中的主要能源；第二个转折是石油取代了煤炭，从而占据人类能源的主导地位；第三个转折是目前正在开发的向多能源结构的过渡。

1.2.1 薪柴时代

时间跨度：几十万年前至 18 世纪 60 年代。

标志事件：人类第一次使用火种。

薪柴作为人类第一代的主体能源，具有容易获得和可再生的优点。在煤炭还没有大量使用之前，薪柴对于古人无疑是优质的能量来源，也引发了人类进化史上几次重大变革。原始人首先用树枝、杂草作为燃料，第一次吃到了烧熟的食物。其次，原始人在掌握了长时间保留火种的方法后，用火把照明、驱赶野兽，摆脱了黑暗对人类的“纠缠”，极大地延长了原始人的寿命。

后来，智慧的古人开始探索薪柴新的利用方式。他们利用火煅烧矿石、冶炼金属、制造工具。无论是居民的灶台、火塘，还是手工业作坊的冶炉、皇帝的宫殿，都需要大量的薪柴为其提供热量或动力。根据《石渠余纪·纪节俭》记载，明末宫中每年需消耗木柴约 $1.3 \times 10^7 \text{ kg}$ ，红筴炭 $6 \times 10^6 \text{ kg}$ 。作为国家重大公务活动，科举考试使用的薪柴也耗费甚巨，每年需要用草约 $2 \times 10^4 \text{ kg}$ ，木柴约 $5 \times 10^4 \text{ kg}$ ，木炭约 $1.8 \times 10^4 \text{ kg}$ ，煤炭约 $5 \times 10^4 \text{ kg}$ ^[2]。当时中国对薪柴燃料重度依赖，薪柴资源的利用也在明清时期达到顶峰。

之后，因为第一次工业革命与煤炭能源的广泛开采，薪柴时代逐渐落幕。随着我国农村地区经济的发展和流通渠道的完善，薪柴占农村能源消费总量的比例逐渐降低，从 1991 年的 29.0% 下降到 2005 年的 21.2%。在北京，2014 年农村住户中薪柴的能源消费占比为 17.9%^[3]。

1.2.2 煤炭时代

时间跨度：18 世纪 60 年代至 19 世纪 60 年代。

标志事件：第一次工业革命。

我国煤炭规模开采有史料记载的是西汉时期，煤在冶铸金属（利用热能）方面得到了广泛的应用。清朝皇宫中御膳房和内膳房是燃料消耗大户，每年约用木柴 $4.2 \times 10^5 \text{ kg}$ ，木炭 $6 \times 10^4 \text{ kg}$ ，煤炭 $6.5 \times 10^4 \text{ kg}$ 。英国利用煤炭的时间可以追溯到 13 世纪，达勒姆、诺森伯兰、诺丁汉、德比、斯塔福德、兰开夏、迪恩森林以及威尔士北部和南部都在进行小规模采煤，但当时煤炭主要是用作家庭燃料而非工业用途。

1550年前后,煤炭在英国能源消费结构中的比重开始超过5%。1619年前后,煤炭在英国能源消费结构中的比重超过居主导地位的薪柴,完成了向煤炭系统的转型。18世纪70年代,英国的瓦特发明了以煤炭作燃料的蒸汽机。蒸汽机的广泛应用使煤炭迅速成为第二代主体能源。转型完成后,随着经济发展及工业革命的推进,煤炭在英国能源消费结构中的比重不断增加,1938年时达到历史峰值(97.7%)。煤炭在世界一次能源消费结构中所占的比重也从1860年的25%上升到1920年的62%。以煤炭作燃料的蒸汽机使纺织、冶金、采矿、机械加工等工业迅速发展。同时,蒸汽机车、轮船的出现使交通运输业得到巨大进步。19世纪以来,电磁感应现象的发现使得人们发明了蒸汽轮机作动力的发电机,煤炭作为一次能源被转换成更加便于输送和利用的二次能源——电能。

1.2.3 石油时代

时间跨度:19世纪60年代至未来几十年。

标志事件:内燃机的发明。

19世纪前,未精制的石油已有各种用途,但从19世纪开始才有精细的石油开采技术和汽油发动机,因此石油时代被公认为始于19世纪。19世纪以来,世界对石油的消耗和对内燃机的使用迅速增加。到了19世纪60年代,石油成为世界主要能源,石油开采技术高速发展,各国也大量开采石油以应对极高的社会需求。

自20世纪60年代以来,随着许多工业化国家的石油产量达到顶峰,不少学者认为全球石油产量将达到顶峰。哈伯特(Hubbert)根据1956年的石油产量数据推导出世界石油产量将在21世纪初达到顶峰。1989年,坎贝尔(Campbell)预测世界石油产量将在2007年达到顶峰,但石油产量在2012年仍然创了新高。

当前社会仍然重度依赖石油、天然气和煤炭等化石燃料。2019年世界能源消耗量大约583.9 EJ(1 EJ=10¹⁸ J),石油仍然在能源结构中占了最大份额(31.2%)。2020年,煤炭为第二大燃料,占一次能源消费总量的27.2%,较2019年的27.1%略有上升。天然气份额上升至24.7%,创历史新高,而可再生能源的比例仅5.7%。

□ 思考讨论

为什么电动车在被发明100多年后才被广泛应用?

1.3 能源需求与结构

1.3.1 世界能源消费概况

进入21世纪以来,全球一次能源消费总量保持稳定增长趋势。英国能源研究院(EI)等发布的《世界能源统计年鉴2024》显示,2023年全球一次能源消费总量创历史新高,同比增长2%至620 EJ。全球化石燃料消费量创历史新高,增长1.5%至505 EJ(煤炭增长1.6%,石油增长2%至1亿桶以上,而天然气持平),占整体比例的81.5%,略低于前一年的82%。能源排放量增加了2%,首次超过400亿t二氧化碳。



1. 全球煤炭消费

近年来煤炭发电占比不断降低。2020 年全球煤炭消费需求下降 4.4%，这是第二次世界大战以后几十年来最大的降幅。2021 年，随着经济逐渐复苏，世界煤炭消费需求大幅反弹，同比增长 6%。2022 年，全球煤炭消费量达到 8.4×10^{12} kg，同比增长 4.0%，创历史最高水平。2024 年 7 月 24 日，国际能源署（IEA）发布 2024 年煤炭年中报告显示，2023 年全球煤炭需求增长 2.6%，达到 87 亿 t 的新纪录。然而煤炭作为世界上的主体能源之一，其需求量仍未达到顶峰。近年来，越来越多的国家承诺未来将实现净零碳排放，第 26 届联合国气候变化大会（COP26）期间发布了《全球煤炭向清洁能源转型声明》，将持续减少煤炭发电，加快能源转型，这给全球煤炭产业的发展带来了艰巨挑战。

2. 全球石油消费

根据 2023 年《世界能源统计年鉴》，2022 年的能源市场呈现出几个显著的趋势：一次能源消费量增长放缓，增速仅为 1.1%；可再生能源在一次能源中的比重达到 7.5%，同比增长近 1 个百分点；但化石燃料在一次能源消费中的占比仍稳定在 82% 左右。化石燃料仍然是主要的能源。从区域来看，经济合作与发展组织（简称经合组织）国家的消费量增长了 140 万桶·天⁻¹，非经合组织国家的消费量增长了 150 万桶·天⁻¹。大部分增长源自航空煤油（90 万桶·天⁻¹）和柴油/轻油（70 万桶·天⁻¹）。2022 年全球石油产量增幅为 380 万桶·天⁻¹，其中“OPEC+（石油输出国组织）”占增幅的 60% 以上。在所有国家中，沙特阿拉伯（1182000 桶·天⁻¹）和美国（1091000 桶·天⁻¹）的增幅最大。尼日利亚的产量降幅最大（184000 桶·天⁻¹），利比亚的产量下降了 181000 桶·天⁻¹。

3. 全球天然气消费

根据《中国天然气发展报告（2023）》，世界天然气的市场分布主要呈现以下特点：

（1）上游产量出现增长，勘探活动有所增加。2022 年，世界天然气产量为 4.04×10^{12} m³，同比下降 4.2%；全球天然气的勘探活动有所增长，世界天然气可采储量 193×10^{12} m³，新增储量 1.23×10^{12} m³。

（2）天然气消费区域分化明显，主要经济体消费有升有降。2022 年世界天然气消费量 3.94×10^{12} m³，同比下降 3.1%。北美地区天然气消费量 1.10×10^{12} m³，同比增长 4.7%，其中美国消费量 8.8×10^{11} m³，同比增长 4.7%。然而，亚太地区消费增速放缓，天然气消费量 9.1×10^{11} m³，同比下降 2.3%，其中中国需求增速先抑后扬，全年同比下降 3.0%。

目前在进一步推进碳排放量政策的大环境下，欧盟、美国、日本、英国、加拿大、韩国和南非等纷纷提高温室气体减排承诺行动的目标，使用天然气代替煤炭发电来进一步降低二氧化碳排放，这保持了天然气在应对气候变化下发展的强劲韧性，预计全球天然气消费量将继续保持上升趋势。

4. 全球核能消费

进入 21 世纪以来，核能的消费量与重要程度逐年下降。2023 年，核电在全球能源市场的份额持续回升，但核能仍为消费量最小的一次能源，主要分布在北美、欧洲以及亚太地区。福岛核事故发生后，日本核能消费量迅速下滑，西班牙、德国、比利时和瑞士都先后

宣布要放弃核能或减少对核能的依赖。

法国是目前世界上对核能依赖程度最高的国家。核能消费量为 3.14 EJ, 占全球比例的 14%, 占其一次能源消费总量的 36.09%。总的来看, 当前核能的发展与其作用相比还有很大不足, 潜力亟待挖掘。国际能源署预计, 到 2050 年, 在全球 90% 的可再生能源电力中, 风力和光伏发电的份额占 70%, 其余的 30% 需要由核能提供。因此, 综合考虑清洁低碳、经济性、灵活性和能源安全等要素, 核能将为全球过渡到净零能源系统提供“必不可少的基础”。

5. 全球可再生能源消费

根据国际可再生能源署 (IRENA) 发布的 *Renewable Capacity Statistics 2023*, 截至 2022 年底, 全球可再生能源发电装机总量达到 3382 GW, 其中新增装机 292 GW, 同比增长 9.5%, 可再生能源发电占全球发电总装机的比例呈明显上升趋势。其中, 约 60% 的增长量来自亚洲国家, 达到 175.5 GW, 中国新增可再生能源发电装机量位于首位, 达到 140.5 GW。以上数据表明, 由传统能源结构向可再生能源方向转型升级是大势所趋。

其中, 水力发电应用较为广泛, 2020 年水电消费量占一次能源总消费量的 7%。过去 20 年, 亚太地区是水电消费量增加最明显的地区, 其余地区水电消费量大致保持平稳。2020 年, 全球水电消费量最大的国家是中国, 共消费 11.74 EJ, 占全球水电总消费量的 30.77%, 较 2000 年增长超过 5 倍。

太阳能及风能的消费量也同样可观, 2020 年中国在全球风能与太阳能装机容量的增长中约占一半份额。中国风电装机容量 (72 GW) 的增长尤其引人注目。2015~2020 年, 陆上风能与太阳能成本分别下降约 40% 和 55%, 这使得风能和太阳能的使用率大幅提高。

2020 年, 全球可再生能源的消费量为 2000 年的 12 倍。目前可再生能源消费量最大的地区是亚太地区, 占比近 40%, 最大的消费国是中国, 其次为美国。欧洲可再生能源的绝对使用量虽然仅占全球的 28%, 但是在其能源结构中的比重居全球首位。

1.3.2 能源需求与经济发展

能源是人类文明进步的基础和动力。在 19 世纪, 人类所使用的燃料以生物能源为主, 如木柴或秸秆等。这些生物能源在燃烧过程中会损耗大量的能量, 但是由于当时的科技水平落后, 这些能量转换过程也可以接受。进入 20 世纪以后, 能源的需求与经济发展开始同步提升。到达电气时代后, 汽车、电灯和冰箱等新型电气产品的出现使得全球的能源需求量迅速翻倍。与此同时, 经济的增速也一飞冲天。1950 年, 美国的人均 GDP 是 1900 年的 2 倍多, 石油和煤炭等化石燃料开始成为主要的能源来源。到 21 世纪, 能源需求已达到 20 世纪初的数倍, 但是优化能源的使用效率和能源燃烧后产生的环境问题又成为全世界共同关注的焦点。世界的能源需求在逐步上升, 但是经济增长对能源需求的依赖程度在逐步下降。国际能源署、美国能源信息署 (EIA) 和中国石油经济技术研究院的统计资料均表示, 全球能源的需求会放慢脚步。经济增速与能源需求增长脱钩, 主要原因是能源效率提升、电气化进步、居民对电力的使用更加广泛、能源强度下降等; 其次, 对环境保护的意识增强, 各国开始推行节能政策, 并且开始广泛提高可持续再生能源的利用。这些方面的原因也导致能源需求的上升逐渐变缓。

目前全球经济与能源需求重新回暖, 可再生能源的使用占比逐步上升, 全球碳中和目

标日趋明晰。对可再生能源的相关投资和扩大经营也会创造更多就业机会，引导世界走向更清洁的未来。

1.3.3 能源结构优化与环境改善

能源的生产、消费和使用与环境、人的健康息息相关。在全球大规模使用一次能源的背景下，各种环境问题开始逐渐凸显，如气候变化、全球变暖、国际水域与海洋污染、臭氧层破坏、土地荒漠化、大气及酸雨污染、森林破坏与生物多样性减少、有毒化学品污染和有害废物越境转移等。

为防止全球环境持续恶化，近 200 个缔约方在 2015 年 12 月 12 日共同签订《巴黎协定》，以共同遏止全球变暖的趋势，其中提到：“提高适应气候变化不利影响的能力并以不威胁粮食生产的方式增强气候抗御力和温室气体低排放发展。”为了全世界能够达成《巴黎协定》所设定的目标，全球发达国家及发展中国家必须增加可持续再生能源的利用规模，同时减少如化石能源等一次能源的消耗量。

1. 欧盟

尽管近些年来欧盟一直遭受能源危机，但是欧盟在能源转型以及结构优化等方面依旧进行着诸多努力。如图 1.3 所示，在欧盟进行煤炭向天然气转型的过程中，可再生能源的使用占比也在提升。根据《欧洲电力评论》在 2022 年第一季度发出的报告，即使欧洲的去煤进程由于天然气价格的飙升而受阻，但是可再生电力继续扩张。欧洲在 2011~2019 年期间超过 80% 的新增可再生能源取代了煤电；对比 2019 年以来，有超过一半（52%）的新增可再生能源发电替代了天然气发电，另外有 1/3 替代了核能，仅有 1/6 替代了煤电。欧盟可再生能源的占比在 2020 年全年占到 20% 以上^[4]。

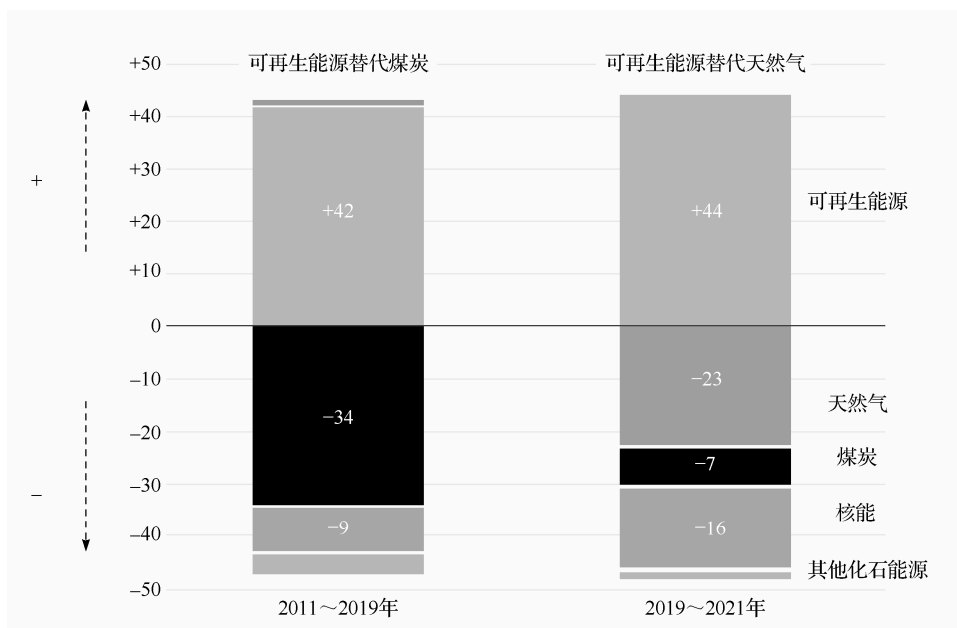


图 1.3 可再生能源代替天然气和煤炭占比^[5]