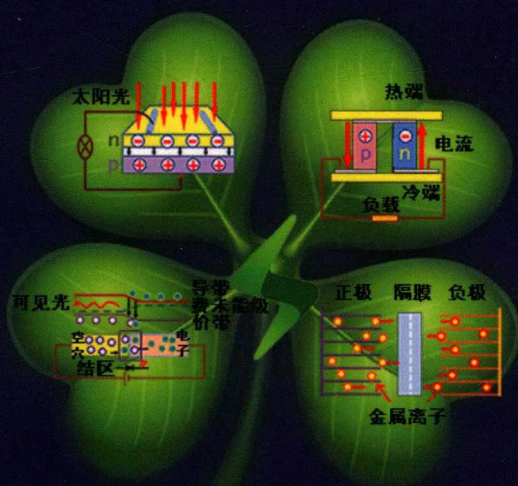


能量转换材料与amp;技术

王 强 李国建 苑 轶 等 编著



科学出版社

能量转换材料与技术

王 强 李国建 苑 轶 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

要解决传统能源面临的短缺问题,一是寻找储量丰富、可再生的清洁能源,二是提高传统能源的能量转换效率。能量转换材料的研发与应用技术的发展是提高能量转换效率的关键。本书共8章,包括绪论、光电光热能量转换材料与技术、热电能量转换材料与技术、压电能量转换材料与技术、电致发光能量转换材料与技术、化学能-电能能量转换材料与技术、磁能-机械能能量转换材料与技术、其他能量转换材料与技术。

本书可以作为能源科学技术、材料科学、物理学、化学工程等相关领域的科研人员和工程技术人员的参考书,以及高等学校和院所能源科学技术等相关专业本科生及研究生的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

能量转换材料与技术 / 王强等编著. —北京: 科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-057823-5

I. ①能… II. ①王… III. ①能量转换-功能材料-研究 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 129256 号

责任编辑: 张淑晓 付林林 / 责任校对: 杜子昂 樊雅琼

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 东方人华

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第一版 开本: 720×1000 1/16

2018年10月第一次印刷 印张: 28 1/4

字数: 570 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

能源是国民经济发展的重要物质基础，近年来，煤矿、石油、天然气等矿物资源被大量开采和过度使用，造成传统能源逐渐消耗殆尽，全球普遍出现了严重的能源短缺及环境污染问题，威胁着人类的生存与可持续发展。要解决传统能源面临的问题，一方面是找到储量丰富、可再生的清洁新能源，另一方面是提高传统能源的能量转换效率。因此，1981年联合国提出了以新技术和新材料为基础，开发可再生能源取代化石能源的计划，以应对当前的能源危机。开发清洁安全的新能源并实现能量间的高效转化成为推动新能源产业前进的技术关键。

近些年，太阳能、水能、风能、核能等新能源技术的发展较快、日益成熟，水电、风电、核电、光伏产业的发展可作为应对能源危机的重要手段。但目前新能源技术的利用率较低、成本较高，这使其在未来相当长时间内占能源消费总量的比例仍会远小于传统化石能源。目前，发达国家的能源利用率（约40%）比中国等发展中国家高约10%，但是仍然存在普遍较低的问题。如何提高能源的利用率，实现能量间的高效转化，对新能源产业的发展具有重要的战略意义，潜力巨大。

能量转换材料的研究与应用技术的发展是实现能量高效转化的关键环节。实际上，不同的物理性质可以并存于同一材料中，并且不同性质间可以相互转化。利用材料的这一特性制作不同器件，对能量进行有效转化，有利于提高能源的利用率。目前，研究较为广泛的能量转换材料包括光电光热能量转换材料，应用于太阳能电池、太阳能集热器、太阳能热发电等；热电能量转换材料，应用于热电发电机、温差制冷机等；压电能量转换材料，应用于机电换能及压电谐振方面，如变压器、频率器件等；电致发光能量转换材料，是仪器仪表照明、平面显示器件制造的重要原料；化学能-电能能量转换材料，用作电极；还有应用于磁能-机械能能量转换的磁致伸缩材料等。能量转换材料的种类繁多，在军事、民生的多个产业中有重要应用，产生了巨大的利益与效益，为人类生活带来众多便利，提高了人们的生活质量。

我国2009年出台的《新能源产业振兴和发展规划》指出了中国新能源发展的战略，预计到2020年，中国在新能源领域的总投资将超过3万亿元。尽管投资总额大，但我国在新能源领域缺少具有自主知识产权的核心技术，产业体系的持续发展堪忧。因此，为增强自主创新能力，我国陆续在高校开设新能源相关专业，

提供职业教育机会，加大人才的培养力度。能量转换材料与技术是新能源产业自主创新的重要方向，广泛开展该领域人才的培养迫在眉睫。然而，由于该学科在国内发展时间较短，目前尚无本科生、研究生适用的有关能量转换材料与技术的完整、系统性书籍，因此我们编写本书用于教学和科研。本书可供材料类、能源类相关学科或工程技术人员学习和参考。

本书共 8 章。第 1 章介绍了能源、能量、能量转换原理及能量转换材料与技术的种类。第 2 章介绍了光电、光热能量转换材料与应用技术。第 3 章介绍了热电能量转换材料基本理论、材料制备及其应用技术。第 4 章介绍了压电原理，压电材料的分类、制备及其应用技术。第 5 章介绍了电致发光的原理，电致发光材料的分类、制备及其应用技术。第 6 章介绍了化学能-电能能量转化材料的转换原理、制备方法及其应用技术。第 7 章介绍了磁能-机械能能量转换材料的制备方法及其应用技术。第 8 章介绍了其他能量转换材料与技术，如光能-化学能能量转换材料与技术、磁能-热能能量转换材料与技术及相变能-热能能量转换材料与技术。

本书由东北大学王强教授、李国建副教授主笔，负责全书的统稿和整体修改工作。具体撰写分工为：第 1 章，王强；第 2 章，李国建；第 3 章，苑轶；第 4 章，王凯；第 5 章，董书琳；第 6 章，袁双；第 7 章，刘铁；第 8 章，王强。东北大学材料科学与工程学院高杨、肖玉宝、刘诗莹、孙金妹、李显亮、苗玲等及冶金学院贾宝海、段晓、陈曦等研究生在本书数据搜集、资料整理等方面做了大量工作，借此机会一并表示感谢。此外，本书参考了相关领域的诸多研究成果，由于篇幅有限，未能一一列举所有引用工作的文献，在此对相关作者表示感谢。

由于编者水平有限，且本书涉及内容广泛，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正！

王 强 李国建

2018 年 3 月于沈阳

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 能源	1
1.1.1 能源的定义	1
1.1.2 能源的分类	1
1.1.3 能源的评价方法	2
1.1.4 能源的发展现状	2
1.2 能量	5
1.2.1 能量的定义	5
1.2.2 能量的存在形式	6
1.2.3 能量与能源的关系	8
1.2.4 能量的性质	8
1.3 能量转换原理	9
1.3.1 基本原理	10
1.3.2 能量转换与材料	12
1.4 能量转换材料与技术	12
1.4.1 功能材料	12
1.4.2 能量转换材料	13
1.4.3 能量转换材料与技术的分类	13
参考文献	21
第 2 章 光电光热能量转换材料与技术	22
2.1 引言	22
2.2 光电能量转换材料与技术	26
2.2.1 光电能量转换原理及特征参数	26
2.2.2 光电材料分类及制备	32
2.2.3 光电能量转换技术与应用	60
2.3 光热能量转换材料与技术	64
2.3.1 光热能量转换原理及特征参数	64
2.3.2 光热材料分类及制备	68

2.3.3 光热能量转换技术与应用	75
参考文献	88
第3章 热电能量转换材料与技术	90
3.1 引言	90
3.2 热电能量转换原理及特征参数	92
3.2.1 热电能量转换基本原理	92
3.2.2 特征参数	95
3.2.3 热电转换器件	102
3.3 热电材料分类及制备	106
3.3.1 低温热电材料	107
3.3.2 中温热电材料	112
3.3.3 高温热电材料	121
3.3.4 热电材料的制备	127
3.3.5 提高材料热电性能的措施	130
3.4 热电能量转换技术与应用	132
3.4.1 热电制冷技术	133
3.4.2 热电发电技术	139
3.4.3 热电测温技术	151
参考文献	153
第4章 压电能量转换材料与技术	155
4.1 引言	155
4.2 压电原理及特征参数	158
4.2.1 压电原理	158
4.2.2 特征参数	163
4.3 压电材料分类及制备	171
4.3.1 压电晶体	172
4.3.2 压电陶瓷	175
4.3.3 压电聚合物	183
4.3.4 压电复合材料	186
4.3.5 压电半导体	188
4.4 压电陶瓷粉体的制备方法	191
4.4.1 固相法	192
4.4.2 液相法	194
4.5 压电能量转换技术与应用	198
4.5.1 压电陶瓷频率控制器件	199

4.5.2 压电换能器及传感器	199
4.5.3 压电式纳米发电机	205
参考文献	208
第5章 电致发光能量转换材料与技术	210
5.1 引言	210
5.2 电致发光原理与特征参数	213
5.2.1 电致发光原理	213
5.2.2 特征参数	216
5.3 电致发光材料及制备	222
5.3.1 高场电致发光材料分类及制备	222
5.3.2 低场电致发光材料分类及制备	227
5.4 电致发光能量转换技术与应用	246
5.4.1 LED 器件的制备	246
5.4.2 在照明领域的应用	258
5.4.3 在显示与背光领域的应用	264
参考文献	266
第6章 化学能-电能能量转换材料与技术	269
6.1 引言	269
6.2 化学能-电能能量转换原理及特征参数	271
6.2.1 化学能-电能相互转换装置及原理	271
6.2.2 化学能-电能单向转换装置及原理	275
6.2.3 特征参数	280
6.3 化学能-电能能量转换材料及制备	284
6.3.1 正极材料	284
6.3.2 负极材料	300
6.3.3 超级电容器电极材料	311
6.3.4 燃料电池催化材料	315
6.3.5 其他关键材料	319
6.4 化学能-电能能量转换技术与应用	323
6.4.1 锂离子电池	323
6.4.2 铅酸电池	326
6.4.3 燃料电池	328
6.4.4 电化学电容器	332
6.4.5 其他电化学能量转换技术	334
参考文献	335

第 7 章 磁能-机械能能量转换材料与技术	339
7.1 引言.....	339
7.2 磁致伸缩原理及特征参数.....	341
7.2.1 磁致伸缩原理.....	341
7.2.2 磁致伸缩材料的其他效应.....	343
7.2.3 特征参数.....	343
7.3 磁致伸缩材料及制备.....	351
7.3.1 稀土金属及其合金.....	351
7.3.2 稀土-过渡金属间化合物.....	355
7.3.3 过渡金属及合金.....	369
7.3.4 铁氧体材料.....	380
7.3.5 磁致伸缩复合材料.....	382
7.3.6 磁致伸缩非晶合金.....	385
7.3.7 磁致伸缩薄膜材料.....	388
7.4 磁能-机械能能量转换技术与应用.....	390
7.4.1 在精密致动器中的应用.....	391
7.4.2 在换能器中的应用.....	393
7.4.3 在动力输出领域的应用.....	396
7.4.4 在其他领域中的应用.....	397
参考文献.....	400
第 8 章 其他能量转换材料与技术	402
8.1 光能-化学能能量转换材料与技术.....	402
8.1.1 概念及发展历程.....	402
8.1.2 光能-化学能转换原理及特征参数.....	403
8.1.3 光能-化学能能量转换材料.....	405
8.1.4 光能-化学能能量转换材料的制备.....	411
8.1.5 光能-化学能能量转换技术与应用.....	412
8.2 磁能-热能能量转换材料与技术.....	415
8.2.1 概念及发展历程.....	415
8.2.2 磁能-热能能量转换原理及特征参数.....	416
8.2.3 磁能-热能能量转换材料.....	417
8.2.4 磁能-热能能量转换材料的制备.....	421
8.2.5 磁能-热能能量转换技术与应用.....	422
8.3 相变能-热能能量转换材料与技术.....	425
8.3.1 概念及发展历程.....	425

8.3.2 相变储能原理及特征参数	426
8.3.3 相变储能材料	428
8.3.4 相变储能材料的制备	436
8.3.5 相变储能材料技术与应用	437
参考文献	441

第1章 绪 论

1.1 能 源

1.1.1 能源的定义

能源是指能够直接或经过转换而获取某种能量的自然资源，包括煤、石油、天然气、太阳能、风能、水能、地热能、核能等。为了便于运输和使用，上述自然资源经过加工可以得到一些更符合使用要求的能量，如煤气、电力、焦炭、蒸汽、沼气、氢能等。另外，能源既可以是能够提供某种形式能量的物质，如煤、石油、天然气等；也可以是在运动中能够提供能量的物质，如风能、水能等。由此可见，能源物质中储存着各种形式的能量，并通过能量转换提供给人类使用。

1.1.2 能源的分类

可被人类利用的能源多种多样，通常有以下六种分类方法：按能量来源分类、按被利用的程度分类、按获得的方法分类、按能否再生分类、按能源本身的性质分类和按对环境的污染情况分类^[1,2]。

(1) 按能量来源可分为三类：一是来自地球本身蕴藏的能源，如核能、地热能等；二是来自地球外天体的能源，如宇宙射线、太阳能及由太阳辐射引起的水能、风能、波浪能、海洋温差能、生物质能、光合作用、化石燃料等；三是来自地球和其他星体的相互作用，如潮汐能。

(2) 按被利用的程度可以分为常规能源（或传统能源）和新能源（或非常规能源、替代能源）。其中，常规能源开发时间长、技术成熟、能大量生产并广泛使用，如煤炭、石油、天然气、薪柴燃料、水能等。而新能源开发利用较少或正在研究开发之中，如太阳能、地热能、潮汐能、生物质能等。

(3) 按获得的方法可以分为一次能源和二次能源。一次能源是可供直接利用的能源，是自然界中以天然形式存在并没有经过加工或转换的能量资源。一次能源包括可再生的水力资源和不可再生的煤炭、石油、天然气资源。其中，水、石油和天然气三种能源是一次能源的核心，也是全球能源的基础。除此以外，太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能及核能等可再生能源也在一次

能源的范围内。二次能源是指由一次能源直接或间接加工转换而成的能源，使用方便、易利用，是高品质的能源，如电力、煤气、汽油、柴油、焦炭、洁净煤、激光和沼气等。

(4) 按能否再生可以分为可再生能源和不可再生能源。可再生能源不会随其本身的转化或人类的利用而减少，如水能、风能、潮汐能、太阳能等。而不可再生能源会随人类的利用而减少，如石油、煤、天然气、核燃料等。

(5) 按能源本身的性质可以分为含能体能源（载体能源）和过程性能源。含能体能源本身是可提供能量的物质，可以直接存储，如石油、煤、天然气、地热、氢等；而过程性能源是由可提供能量的物质运动而产生的能源，无法直接存储，如风能、水能、海流、潮汐、波浪、火山爆发、雷电、电磁能和一般热能等。

(6) 按对环境的污染情况可以分为对环境无污染或污染很小的清洁能源（如太阳能、水能、海洋能、生物质能、核能等）和对环境污染较大的非清洁能源（如煤、石油、天然气等化石燃料）。

1.1.3 能源的评价方法

能源多种多样，各有优缺点，为了正确选择和使用能源，必须对各种能源进行正确的评价。一般可以从以下几个方面对能源进行评价：①储量；②能量密度，是指在一定的质量、空间或面积内，从某种能源中所能得到的能量；③储能的可能性与供能的连续性，也就是能源是否可以存储，是否可以立即使用，是否可以连续不断使用；④能源的地理分布；⑤开发费用和利用能源的设备费用；⑥运输费用与损耗；⑦能源的可再生性；⑧能源的品位；⑨对环境的影响。

1.1.4 能源的发展现状

能源与环境问题是人类在 21 世纪面临的巨大挑战，能源发展的第一个问题是能源结构问题。图 1.1 是 2015 年世界主要发达国家与中国的一次能源消费结构对比图，在发达国家中，美国能源消费的构成为：煤炭 17.4%、原油 37.3%、天然气 31.3%、水力发电 2.5%、核能 8.3%、可再生能源 3.2%。而中国能源消费的构成为：煤炭 63.7%、原油 18.6%、天然气 5.9%、水力发电 8.5%、核能 1.3%、可再生能源 2.0%。其中，中国煤炭消费量的比例明显偏高，天然气与核能比例明显偏低，与世界平均水平相差甚远。这种以煤炭为主的能源结构并不合理，不仅受制于煤炭资源和开采安全问题，而且不利于环境保护。据预测，中国的能源结构将在接下来的二十年内发生重大变化。其中，对煤炭的需求份额将在 2035 年降至 45% 以下，取而代之的可再生能源和核能等份额将在 2035 年升至 25%^[3]。

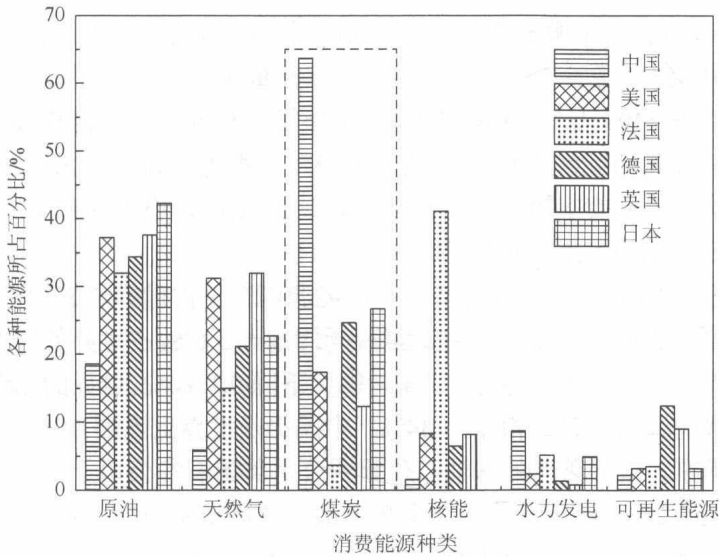


图 1.1 2015 年世界主要发达国家与中国的一次能源消费结构对比图

能源发展的第二个问题是能源效率问题，它是指终端用户使用能源得到的有效能源量与消耗的能源量之比。提高能源效率是缓解能源危机的途径之一。从能源效率上来看，中国能源从开采、加工与转换，到储运及终端利用的能源系统总效率很低，不到 10%，只有欧洲地区的一半。通常能源效率是指后三个环节的效率，中国的能源效率约为 30%，比世界先进水平低约 10%。

能源发展的第三个问题是能源环境的污染问题，其中大气污染和水体污染会直接危害生态环境和人体健康。从环境容量看，二氧化硫为 1620 万 t，氮氧化物为 1880 万 t，到 2020 年，如不采取措施，两者的排放量将分别达到 4000 万 t 和 3500 万 t。中国二氧化碳的排放量已居世界第 1 位，减排二氧化碳的任务十分艰巨。为了应对全球的能源危机及环境危机，目前，我国国家发展和改革委员会、国家能源局在 2016 年 12 月发布的《能源发展“十三五”规划》中提出，“十三五”时期是中国能源低碳转型的关键期。能源结构调整将进入油气替代煤炭、非化石能源替代化石能源的双重更替期，推动能源转型大势所趋、刻不容缓。

能源发展的另一个问题是能源安全问题，它是指能源可靠的供应保障。中国能源自给率为 94%，比经济合作与发展组织 (OECD) 国家平均水平高 20%。中国能源消费对外依存度仅 6%，中国人均一次能源消费量为 1.08 吨油当量，为世界平均水平的 66%，是美国人均水平的 13.4%，日本人均水平的 26.7%。中国原油进口占世界贸易量的 6.31%，而美国占 26.9%，日本占 11.3%。从 2009 年开始，中国已成为世界第一大能源生产国，在进口部分品种能源的同时，还向世界出口能源。2016 年中国原煤产量 34.1 亿 t，比上年下降 9.0%，而煤炭进口快速增长，

全年进口 2.6 亿 t，同比增长 25.2%。原油产量 19 969 万 t，比上年下降 6.9%，进口原油 38 101 万 t，增长 13.6%。全年天然气产量 1369 亿 m³，比上年增长 1.7%，而天然气进口量 5403 万 t，增长 22.0%。全年发电量 61 425 亿 kW·h，电力生产结构优化明显，非化石能源发电比例进一步提升，水电、风电、太阳能发电装机容量占世界第一^[4]。目前中国已经形成了以煤炭为主体、电力为中心，石油、天然气和可再生能源全面发展的能源供应格局。

图 1.2 是 2016 年世界主要经济体一次能源消费量占世界总量的比例。2016 年中国一次能源消费量为 30.53 亿吨油当量，同比增长 5.6%，占世界的比例为 23.00%。而美国的消费总量为 22.73 亿吨油当量，同比下降 0.1%，占世界的比例为 17.12%。中美两国一次能源消费总量相差约 34%，中国仍是世界上连续 15 年一次能源消费增量最多的国家。世界著名的石油石化集团公司英国石油公司于 2014 年发布预测报告^[5]，认为到 2035 年中国将成为世界上最大的能源进口国，依存度将从 15% 上升至 20%。主要因为中国的能源生产将上升 61%，而消费将增加 71%，对所有化石燃料的需求将扩大，石油、天然气和煤炭将占需求增长的 70%。此外，预测中国到 2025 年将超过俄罗斯成为世界第二大天然气消费国，到 2027 年将超过美国成为世界上最大的石油消费国。由此可见，大量的能源需求和资源储备急速下降成为中国能源行业最大的威胁和挑战。

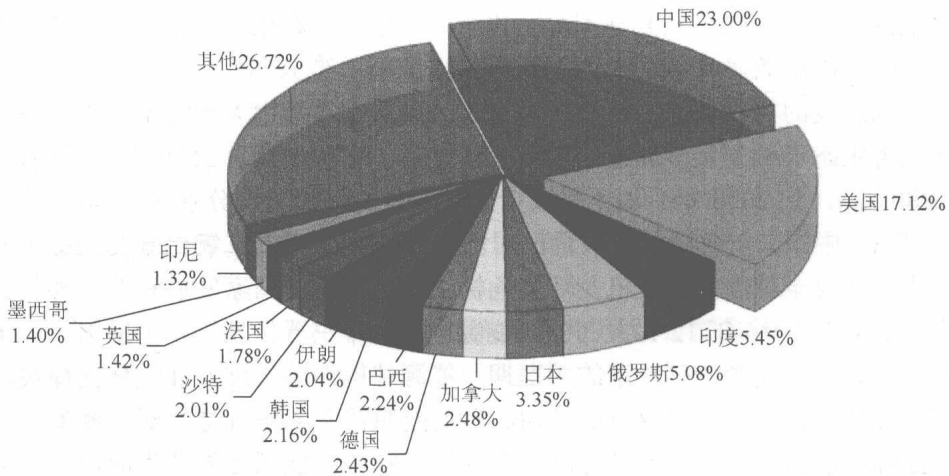


图 1.2 2016 年世界主要经济体一次能源消费量占世界总量的比例

随着 20 世纪 70 年代石油危机的爆发，美国等西方发达国家开始尝试改变他们的能源消费方式，并寻求新的能源代替对原油的依赖，触发了新能源材料的研究。而日益加重的能源、环境压力，低的能量转换效率也推动了能量转换材料与技术的不断发展。目前，能量转化及存储材料的研究与开发已经成为科

学界的热门领域，各国政府也不断加大对该领域研究的投入。如何利用清洁能源（太阳能、风能、海洋能及水能等）产生能量，并能实现各种能量（热能、光能、电能及磁能等）之间的转化是当前科学家亟须解决的问题。而能量转换材料的开发为解决以上问题提供了有效途径，如已经获得广泛应用的太阳能电池，利用洁净的太阳光能，通过半导体材料中的光电效应产生电势，从而将光能转换为电能，使用过程中既不需要消耗燃料也不释放任何有害气体，是一种绿色无污染的可再生能源。除此之外，热电材料、压电材料、电致发光材料、化学能-电能转换材料、磁能-机械能转换材料等能量转换材料与技术的开发及应用也将对解决能源与环境危机起到关键作用，并对提高人类生活质量，促进科技文明进步具有重要意义。

1.2 能 量

1.2.1 能量的定义

宇宙间一切运动着的物体，都有能量的存在和转化。人类一切活动都与能量及其使用紧密相关。所谓能量，也就是产生某种效果或变化的能力。反过来说，产生某种效果或变化时，必然伴随能量的消耗和转换。因此，物质与能量是构成客观世界的基础。

常用的能量单位有：焦耳（J）、千瓦时（kW·h）、卡（cal）、大卡（kcal）等。功率的单位为瓦（W）。1焦耳相当于1牛顿的力将物体移动1米的距离所需要的能量；1卡是指1毫升的水由15摄氏度升高至16摄氏度（升高1摄氏度）时所需要的热量。在工程应用上，还会见到其他一些单位，如标准煤当量、标准油当量、百万吨煤当量、百万吨油当量等。表1.1为常用的能源单位换算表。

表 1.1 常用的能源单位换算表

单位	TJ (太焦)	Gcal (吉卡)	Mtoe (百万吨油当量)	MBtu (百万英热单位)	GW·h (吉瓦时)
1TJ	1	238.8	2.388×10^{-5}	947.8	0.2778
1Gcal	4.1868×10^{-3}	1	10^{-7}	3.968	1.163×10^{-3}
1Mtoe	4.1868×10^4	10^7	1	3.968×10^7	11 630
1MBtu	1.0551×10^{-3}	0.252	2.52×10^{-8}	1	2.931×10^{-4}
1GW·h	3.6	860	8.6×10^{-5}	3412	1

1.2.2 能量的存在形式

人类使用的能量存在各种不同的形式，目前人类所认识的能量形式主要有六类：机械能、热能、电能、辐射能、化学能和核能。

1) 机械能

机械能是与物体宏观机械运动或空间状态相关的能量，前者称为动能，后者称为势能。其中，动能为系统或物体由于机械运动而具有的做功能力。如果质量为 m 的物体的运动速度为 v ，则该物体的动能 E_k 可以用式 (1.1) 计算：

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

式中， E_k ——动能，J；

m ——质量，kg；

v ——速度，m/s。

势能是储存于一个系统内的能量，也可以释放或者转化为其他形式的能量。势能是状态量，又称为位能。势能不是属于单独物体所具有的，而是相互作用的物体所共有的。势能按性质不同可分为：重力势能 E_p ，是受重力作用的物体因其位置高度不同而具有的做功能力；弹性势能 E_r ，是物体由于弹性变形而具有的做功能力；表面势能 E_s ，是不同类物质或同类物质不同相的分界面上，由于表面张力的存在而具有的做功能力。其中，重力势能 E_p 可以用式 (1.2) 计算：

$$E_p = mgH \quad (1.2)$$

式中， E_p ——重力势能，J；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

H ——物体距离参考平面的高度，m。

弹性势能 E_r 的计算公式为

$$E_r = \frac{1}{2}kx^2 \quad (1.3)$$

式中， k ——弹性系数，N/m；

x ——变形量，m。

表面势能 E_s 的计算公式为

$$E_s = \sigma A \quad (1.4)$$

式中， σ ——表面张力系数，N/m；

A ——相界面面积， m^2 。

2) 热能

热能是能量的一种基本形式，所有其他形式的能量都可以完全转换为热能，而且绝大多数的一次能源都是首先经过热能形式被利用，因此，热能在能量利用中具有重要意义。构成物质的微观分子运动的动能表现为热能。它的宏观表现是温度的高低，反映了分子运动的剧烈程度。地球上最大的热能资源为地热能。通常热能 E_q 可表述成如下的形式：

$$E_q = \int TdS \quad (1.5)$$

式中， T ——热力学温度，K；

S ——熵， $J/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

3) 电能

电能是和电子流动与积累有关的一种能量，通常由电池中的化学能转换而来，或是通过发电机由机械能转换得到；反之，电能也可以通过电动机转换为机械能，从而显示出电做功的本领。在自然界中，还有雷电等电能。电能 E_e 的计算公式为

$$E_e = UI \quad (1.6)$$

式中， U ——电位差，V；

I ——电流，A。

4) 辐射能

辐射能是物体以电磁波形式发射的能量，如太阳能。太阳是最大的辐射源。物体会由于各种原因发出辐射能，从能量利用的角度而言，因热的原因所发出的辐射能（又称热辐射能）是最有意义的。例如，地球表面所接受的太阳能就是最重要的辐射能。物体的辐射能 E_r 可由式（1.7）计算：

$$E_r = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1.7)$$

式中， ε ——物体的发射率；

c_0 ——黑体的辐射系数， $5.669\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ 。

5) 化学能

化学能是物质结构能的一种，即原子核外进行化学变化时放出的能量。它是一种很隐蔽的能量，不能直接用来做功，只有在发生化学变化时才释放出来，变成热能或者其他形式的能量。化学能的来源是在化学反应中由于原子最外层电子运动状态的改变和原子能级发生变化的结果。典型的化学能释放：煤燃烧、薪柴燃烧、蜡烛燃烧等。利用最普遍的化学能是燃烧碳和氢，而碳和氢正是煤、石油、天然气、薪柴等燃料中最主要的可燃元素。

化学能的度量主要分为高位和低位发热量，其中，高位发热量是指单位质量