

Q I N G Y U Q I N G N E N G



氢与氢能

李星国 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

氢能源被视为重要的清洁可再生能源,受到世界各国的高度重视,相关研究成为了能源科学领域的一个热点。本书分19章,围绕着氢能的基础知识、科学与技术、最新研究成果和动态、基本信息等内容进行了介绍。

第1~2章介绍为什么现在氢和氢能源受到了关注,氢气是什么,具有哪些基本性质;第3~11章介绍氢气在使用中涉及的一些关键环节,如氢气的制备、分离、输运、储氢(分子储氢和原子或离子态储氢);第12~16章介绍氢气的使用领域以及如何使用氢,包括目前最关心的镍氢电池、氢内燃机及汽车、燃料电池以及氢动力汽车、加氢站;第17~18章介绍氢气与材料的关系以及氢气的安全问题;第19章收集了一些相关数据。

本书作为一本有价值的氢与氢能参考书籍,可使读者能够较全面和深入地认识氢气和氢能。本书读者对象为化工、电子、冶金、能源、宇航、交通等领域与氢能源使用和研究相关的学生、研究者、工程技术人员、科研管理人员。

图书在版编目(CIP)数据

氢与氢能/李星国等编著. —北京:机械工业出版社,2012.6
ISBN 978-7-111-38715-2

I. ①氢… II. ①李… III. ①氢—基本知识②氢能—基本知识
IV. ①O613.2②TK91

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第122355号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:朱林 责任编辑:朱林

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:赵颖喆 责任印制:杨曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2012年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·39.75印张·987千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-38715-2

定价:99.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

氢是世界上最简单的原子，从氢这个最简单的元素可以洞察浩瀚的宇宙，围绕氢的话题有无数，它们可以让人惊奇或心旷神怡，可以让人兴奋不已，也可以让人联想翩翩或突发奇想。氢在人类科学史的伟大诗篇中扮演了主角，是宇宙中最重要的成分。

在早期的科学理论和试验研究中，氢始终是关注的重点，如大爆炸、化学元素光谱、波尔模型、量子力学、质子磁矩、核聚变、核磁共振、氢脉泽、玻色理论、DNA 和 RNA 的解析等的认识都和氢紧密相连。这段时期人类是对氢好奇，也积极通过氢来认识自然，而今天人类对氢重新展现的热情更多的则是被动的，是被能源资源枯竭和环境恶化所逼迫的。当今化石燃料已日趋枯竭，这直接威胁到工业文明所取得的所有成就，人类期待一种新的清洁、可再生能源的诞生，它能令人类辛辛苦苦创建的文明得以延续。这时人类又想到了氢，期待当一滴石油也没有、当化石燃料枯竭的时候，氢能源能够拯救人类。

21 世纪初美国经济强盛，布什总统把氢能源视为是同时解决能源资源危机和环境危机的最佳途径，大幅度增加了对氢能源研究开发的投入，此举是要使氢能源成为美国经济的又一个助推器，并以此领导下一次工业革命，力争确保美国在能源领域的主导权。然而研究进展并没有期待的那么顺利，奥巴马就职后就削减了氢能源开发投入，一方面是出于技术上的考虑，一方面也是经济状况所迫。其实氢能源既不像布什时代所期待的那样很快就能来临，也不像奥巴马所想象的那样绝望，现在人类的智慧是可以利用它，让它服务于人类的。如果我们要想对我们后代保证氢经济是有望实现的现实，并给后代留下一份有价值的遗产的话，那么我们就有必要今天做出正确的选择。

虽然氢经济时代没有想象的那样迅速到来，但是氢气和氢能源已经是一个很大的产业，涉及到了化工、电子、冶金、能源、宇航、交通等很多领域，而且其规模在不断发展，会带来更大的经济效益和社会效益。

氢与氢能相关的研究竞争十分激烈。目前国内已经有了一些关于氢和氢能方面的书籍，但往往仅涉及某一特定的领域，需要增补最新内容。我们希望编著一本关于氢与氢能的综合性参考书，涵盖氢能利用过程中涉及的诸多科学技术问题，包括氢气的制备、存储、运输、安全以及氢能的利用方式等；并对相关的科学背景，包括氢的物理化学性质、氢与物质的相互作用等做了深入的讨论。在编著过程中，我们努力做到：内容新，去除比较陈旧的内容，补充最新的研究成果以及研究动态，反映最新的氢能源相关知识和信息；内容丰富，从氢的能源特征和研究背景、氢气的基本特性、制氢、氢气分离、储氢、运输、使用、安全等方面进行介绍，基本上包括了氢能源相关的所有领域，通过本书能够整体理解氢气和氢能源；利用图表等形式整理大量的数据，便于阅读人员理解和参考；便于阅读理解，写作简练易懂。如果本书能够达到此目的，为广大的读者提供有益的信息的话，我们将感到十分欣慰。

本书分 19 章，第 1、17、18 章和 19 章由李星国（北京大学）撰写，第 2 章和第 13 章由郑捷（北京大学）撰写，第 3 章由刘洋（北京联合大学）撰写，第 4 章由罗伟民（中科院广州能源所）撰写，第 5 章由谢镭（北京大学）撰写，第 6 章和第 10 章由杨璿智（北京大学）撰写，第 7.1 和 7.2 节由宋萍（北京大学）撰写，第 7.3, 7.4, 7.5 节由李瑶琦（北京科技大学）撰写，第 8.1~8.5 节由邵怀宇（日本九州大学）撰写，第 8.6~8.8 节由张旋洲（北京大学）撰写，第 8 章 9、10 节由曲江兰（北京大学）撰写，第 9.1~9.5 节由李海文（日本九州大学）、严义刚（瑞士联邦材料科学与技术研究所）撰写，第 9.6 节由李瑶琦（北京大学）撰写，第 11 章由张国庆（北京大学）撰写，第 12 章由杨容（北京大学）撰写，第 14 章由余学斌（复旦大学）撰写，第 15 章由刘彤（北京航空航天大学）撰写，第 16 章由杨君友（华中科技大学）撰写。

编写本书需要感谢北京大学化学学院新能源与纳米材料实验室的辛恭标、李伟、付赫、贺蓓、危苏昊、楼宇、何鹏、苗晓斐、宋尔东、梅洁、李关乔、李涤尘和范欣欣等同学的帮助。同时感谢机械工业出版社牛新国、朱林编辑的帮助，感谢家人的支持。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，希望读者予以批评指正。

作者
2011.8

目 录

前言	
第1章 氢能源与氢经济	1
1.1 世界经济和能源	1
1.2 各国能源消耗和我国能源消耗的特点	5
1.3 世界能源资源和开发状况	12
1.4 CO ₂ 排放和环境问题	19
1.5 氢能的特点和利用形式	23
1.6 氢气的供给	26
1.7 氢能的利用形式	29
1.8 可再生能源与氢能源	34
1.9 氢能源研究的发展与各国氢能源 研究动态	41
参考文献	46
第2章 氢的基本性质	48
2.1 氢的基本性质概述	48
2.1.1 氢原子的性质	48
2.1.2 氢气的分子结构和物理性质	51
2.2 氢的反应	58
2.2.1 氢的核聚变反应	58
2.2.2 氢气的制备	68
2.2.3 氢的化学性质	70
2.3 氢化物	76
2.3.1 概述	76
2.3.2 含氢化合物的命名	77
2.3.3 碱金属和碱土金属氢化物	77
2.3.4 其他主族元素氢化物	78
2.3.5 铝氢化物和硼氢化物	85
2.3.6 二元合金氢化物	87
2.3.7 氢化物研究的常用方法	90
2.4 氢和物质的相互作用	92
2.4.1 氢对材料力学性能的破坏	92
2.4.2 氢对材料能带结构的影响	94
参考文献	96
第3章 氢气制备	98
3.1 化石燃料制氢	98
3.1.1 原理	98
3.1.2 现状	99
3.2 电解水制氢	102
3.2.1 原理	102
3.2.2 现状	102
3.3 生物质制氢	105
3.3.1 光合生物制氢	105
3.3.2 生物发酵制氢	108
3.4 光催化制氢	112
3.4.1 原理	112
3.4.2 光催化制氢反应器	113
3.4.3 制氢光催化剂的分类以及性能	114
参考文献	122
第4章 氢分离和提纯	125
4.1 氢分离提纯方法	125
4.2 变压吸附	126
4.3 膜分离	126
4.3.1 高分子膜分离	128
4.3.2 二氧化硅膜	129
4.3.3 沸石膜	129
4.3.4 金属透氢膜	130
4.4 本菲尔法	138
4.5 深冷分离	139
4.5.1 冷凝法	139
4.5.2 膨胀机法	140
4.6 重氢的分离	140
4.6.1 氢同位素的特性	140
4.6.2 重氢的核聚变反应	141
4.6.3 重氢提纯回收	142
4.6.4 氢同位素的分离浓缩	145
参考文献	150
第5章 高压储氢	153
5.1 高压氢气的压缩	153
5.1.1 氢气的压缩因子	153
5.1.2 高压氢气的压缩方式	154
5.2 氢气的加注	155
5.3 高压储氢容器	156

5.3.1 高压储氢容器的发展	156	7.1.3 额外吸附量与总吸附量	191
5.3.2 轻质高压储氢容器的设计	158	7.2 碳材料的发展及储氢性能	191
5.4 高压储氢的风险评估和检测试验	161	7.2.1 活性炭	192
5.4.1 高压储氢的使用风险	161	7.2.2 碳纤维	192
5.4.2 高压储氢容器的风险评估	161	7.2.3 碳纳米管	193
5.4.3 高压储氢使用的标准	163	7.2.4 石墨烯及石墨烯型材料	194
5.4.4 高压储氢的安全性能检测试验	163	7.2.5 碳材料的开发与研究前景	195
5.5 高压储氢的风险控制	163	7.3 金属有机骨架材料的储氢性能	195
5.5.1 氢气加注过程中的风险控制	163	7.3.1 结构的设计合成及储氢性质 研究现状	195
5.5.2 高压储氢容器的风险控制	163	7.3.2 与氢气作用机理	198
5.5.3 运输与车用储氢设备的风险 控制	164	7.3.3 储氢性能的影响因素和发展 方向	201
5.6 高压储氢的应用	164	7.4 微孔高分子的储氢性能	203
5.6.1 运输用大型高压氢气容器	164	7.4.1 PIM 类型的微孔高分子	203
5.6.2 蓄气站大型高压氢气容器	165	7.4.2 超高交联型微孔高分子	204
5.6.3 燃料电池车用高压储氢	165	7.5 3 种物理吸附材料的比较	207
参考文献	166	参考文献	207
第 6 章 液态储氢及应用	167	第 8 章 储氢合金和金属氢化物	209
6.1 液态储氢简介	167	8.1 储氢合金的工作原理和设计	209
6.1.1 液态储氢适用条件	167	8.1.1 储氢合金简介	209
6.1.2 正-仲氢转化	167	8.1.2 储氢合金的历史发展及现状	209
6.2 液态氢的生产	168	8.1.3 储氢合金的工作原理	211
6.3 液态氢的存储	171	8.1.4 储氢合金的设计与评价	216
6.3.1 液氢存储的热学分析	171	8.2 稀土储氢材料	218
6.3.2 液氢设备的绝热材料	171	8.2.1 LaNi ₅ 基 AB ₅ 型储氢材料	218
6.3.3 液氢储罐	172	8.2.2 混合稀土储氢材料	223
6.4 液氢的运输	175	8.2.3 非 AB ₅ 型 Re-Mg-过渡金属储氢 材料	226
6.4.1 常温容器加注液氢的冷却特性	175	8.3 Mg 和 MgH ₂ 基储氢材料	230
6.4.2 液氢的输送方式	177	8.3.1 镁单质储氢材料	230
6.4.3 液氢储藏型加氢站	178	8.3.2 Mg-Ni 体系储氢材料	236
6.5 液氢的应用	180	8.3.3 Mg-Co 体系储氢材料	241
6.5.1 液氢在航空航天领域的应用	180	8.3.4 Mg-Fe-H 体系以及其他镁基 储氢材料	242
6.5.2 液氢在汽车领域的应用	181	8.4 Ca 和 CaH ₂ 基储氢材料	244
6.5.3 液氢的其他应用	186	8.4.1 CaH ₂	244
6.6 液氢的安全性	186	8.4.2 Ca-Ni-M 体系	244
6.7 展望	187	8.4.3 其他 Ca 基合金储氢材料	247
参考文献	188	8.5 Ti 基合金储氢材料	247
第 7 章 物理吸附储氢材料	189	8.5.1 Ti-Fe 基合金体系	249
7.1 气体吸附原理及物理储氢的特点	189		
7.1.1 吸附等温线的类型	189		
7.1.2 吸附等温方程	190		

8.5.2 Ti-Co 基合金体系	250	9.5.1 合成方法	309
8.5.3 Ti-Mn 基合金体系	250	9.5.2 晶体结构	310
8.5.4 Ti-Cr 基合金体系	251	9.5.3 吸放氢性能	313
8.5.5 Ti-Ni 基合金体系	252	9.5.4 吸放氢性能改善	318
8.6 V 基体心立方固溶体合金储氢材料	252	9.6 氨硼烷 (NH_3BH_3) 及其衍生物	323
8.6.1 V-Ti-Fe 合金体系	254	9.6.1 氨硼烷化合物储氢材料的特点 以及合成方法	323
8.6.2 V-Ti-Ni 合金体系	255	9.6.2 氨硼烷化合物储氢体系和放氢性 能改善	324
8.6.3 V-Ti-Cr 合金体系	255	9.6.3 氨硼烷化合物及其衍生物储氢 材料的研究与发展	333
8.7 Zr 基合金储氢材料	256	参考文献	335
8.7.1 Zr-V 基合金体系	257	第 10 章 其他储氢材料	341
8.7.2 Zr-Cr 基合金体系	257	10.1 水合物储氢技术	341
8.7.3 Zr-Mn 基合金体系	257	10.1.1 气体水合物的晶体结构	341
8.8 Pd 基固溶体储氢材料	258	10.1.2 气体水合物储氢	343
8.9 纳米材料尺寸效应与形貌对储氢 材料性能的影响	259	10.1.3 水合物储气量的一般计算 方法	345
8.9.1 纳米结构储氢材料研究背景	259	10.2 有机液体氢化物储氢技术	346
8.9.2 纳米结构储氢材料制备方法	260	10.2.1 有机液体氢化物储氢技术 原理和特点	346
8.9.3 纳米结构储氢材料的性能	262	10.2.2 有机液体氢化物储氢技术的 关键问题	347
8.9.4 特殊纳米形貌对储氢性能的 影响	264	10.3 空心玻璃微球高压储氢技术	348
8.10 纳米薄膜材料的储氢性能研究	268	10.3.1 玻璃微球储氢原理	348
8.10.1 纳米薄膜材料的储氢研究	268	10.3.2 玻璃微球的储氢效率和存在 的主要问题	349
8.10.2 薄膜的氢致光变特性	269	10.4 铝水反应制氢储氢技术	349
参考文献	275	10.4.1 铝水反应制氢储氢机理	349
第 9 章 无机非金属储氢材料	284	10.4.2 铝水反应实用化反应器及其 应用展望	350
9.1 氢与氢化物	284	参考文献	351
9.2 无机非金属氢化物	285	第 11 章 储氢材料的计算模拟	353
9.2.1 基本特征	285	11.1 储氢材料计算模拟背景	353
9.2.2 电子结构和成键特性	286	11.2 储氢材料计算模拟的理论基础	354
9.2.3 吸放氢反应机理 (与金属氢化 物相比较)	287	11.2.1 基于密度泛函理论的第一性 原理	354
9.3 配位铝氢 (Al-H) 化物	289	11.2.2 固体结构计算方法和模型	355
9.3.1 合成方法	289	11.2.3 分子动力学方法	356
9.3.2 晶体结构	289	11.2.4 Monte Carlo 方法	358
9.3.3 吸放氢性能	293	11.3 储氢材料计算软件简介	360
9.3.4 掺杂的配位铝氢化物	296		
9.4 金属氮氢 (N-H) 化物	299		
9.4.1 合成方法	299		
9.4.2 晶体结构	300		
9.4.3 吸放氢性能	302		
9.5 金属硼氢 (B-H) 化物	309		

11.3.1	VASP	360	13.5	磷酸燃料电池	426
11.3.2	Materials Studio	361	13.5.1	概述	426
11.3.3	Gaussian	361	13.5.2	电池结构	427
11.3.4	其他常见软件简介	362	13.5.3	运行条件对性能的影响	429
11.4	储氢材料计算研究进展	362	13.5.4	PAFC 的冷却系统	430
11.4.1	金属型氢化物和多元络 合氢化物	363	13.5.5	磷酸燃料电池的应用	430
11.4.2	化学氢化物储氢材料	366	13.6	熔融碳酸盐燃料电池	432
11.4.3	吸附储氢材料	367	13.6.1	概述	432
11.4.4	其他固体储氢材料	368	13.6.2	电池结构	432
参考文献	.....	370	13.6.3	MCFC 的应用	434
第 12 章 镍氢电池	.....	373	13.7	固体氧化物燃料电池	436
12.1	概述	373	13.7.1	概述	436
12.1.1	电化学理论基础	373	13.7.2	电解质	436
12.1.2	化学电源的发展历史	376	13.7.3	电极	441
12.1.3	镍氢电池的工作原理和特点	377	13.7.4	密封材料	444
12.2	镍氢电池的组成	378	13.7.5	SOFC 的结构	445
12.2.1	正极材料	378	13.7.6	SOFC 的应用	447
12.2.2	负极材料	383	13.8	其他燃料电池	448
12.2.3	辅助材料	392	13.8.1	直接醇类燃料电池	448
12.3	镍氢电池的开发与应用	394	13.8.2	硼氢化钠燃料电池	449
12.3.1	镍氢电池的开发现状	394	13.8.3	微生物燃料电池	449
12.3.2	镍氢电池的应用	395	13.9	燃料电池系统	450
参考文献	.....	396	13.10	燃料电池的成本和开发	452
第 13 章 燃料电池	.....	398	13.10.1	成本分析	452
13.1	燃料电池概述	398	13.10.2	燃料电池的开发	453
13.2	碱性燃料电池	403	13.11	燃料电池的应用	455
13.2.1	概述	403	参考文献	.....	456
13.2.2	电池构造	404	第 14 章 金属氢化物储氢装置与 技术	.....	460
13.2.3	操作条件对电池性能的影响	408	14.1	金属氢化物储氢容器	460
13.2.4	研究现状、问题及前景	408	14.1.1	金属氢化物储氢容器储氢 原理	460
13.3	高聚物电解质膜燃料电池	410	14.1.2	储氢容器的分类及优缺点	461
13.3.1	概述	410	14.1.3	金属氢化物储氢容器的 应用范围	464
13.3.2	电池结构	411	14.1.4	储氢材料的填充	466
13.3.3	水管理	418	14.1.5	储氢容器的密封	470
13.3.4	PEMFC 的应用	418	14.2	高压及金属氢化物复合储氢容器	470
13.4	直接甲醇燃料电池	419	参考文献	.....	474
13.4.1	概述	419	第 15 章 氢能源汽车	.....	476
13.4.2	甲醇的催化电氧化	420	15.1	氢内燃机汽车	476
13.4.3	甲醇渗漏	422			
13.4.4	DMFC 应用	425			

15.1.1 氢内燃机概述	476	17.2.2 氢气吸收非晶态化的金属间 化合物成分和晶体结构特点	532
15.1.2 氢内燃机工作原理	476	17.2.3 氢气吸收非晶态化的机理	534
15.1.3 氢气燃烧的特性	478	17.2.4 氢致非晶态化合物热 稳定性	535
15.1.4 氢内燃机汽车的结构系统	479	17.3 HD 和 HDDR 现象以及微观组 织调控	536
15.1.5 氢内燃机的热效率和输出 功率	482	17.3.1 稀土永磁材料的 HD 现象	536
15.1.6 氢内燃机的技术难点和解决 办法	483	17.3.2 稀土永磁材料的 HDDR 现象	537
15.1.7 氢混合燃料内燃机	484	17.3.3 氢气处理引起的钛基材料的 晶粒微细化以及性质的提高	540
15.1.8 氢内燃机汽车的发展状况	485	17.3.4 Nb_3M ($M = Al, Si, Ge, In$) 粉体的制备	542
15.2 燃料电池汽车	490	17.3.5 镍氢电池合金粉体的制备	543
15.2.1 燃料电池汽车概述	490	17.3.6 氢气吸收与多孔金属的形成	543
15.2.2 燃料电池汽车特点	490	17.4 氢等离子体法制备纳米材料	545
15.2.3 燃料电池汽车工作原理	491	17.4.1 简介	545
15.2.4 燃料电池汽车结构系统	492	17.4.2 设备及其工艺	546
15.2.5 燃料电池汽车的发展状况	494	17.4.3 纳米颗粒形成机理和长大 过程	546
参考文献	502	17.4.4 影响纳米颗粒制备的因素	547
第 16 章 加氢站	503	17.4.5 氢等离子体制备的纳米颗粒 大小和形貌	548
16.1 加氢站的基本组成系统	503	17.4.6 金属合金以及无机非金属纳米 颗粒的制备	548
16.1.1 压缩系统	504	17.4.7 氢等离子体制备不同形态的 纳米结构物质	550
16.1.2 储藏系统	505	17.5 磁学性质	551
16.1.3 加注系统	506	17.5.1 吸氢所引起的磁矩大小变化	551
16.2 各种类型加氢站简介	507	17.5.2 交换相互作用	554
16.2.1 燃料重整型加氢站	508	17.5.3 磁各向异性	554
16.2.2 水电解型加氢站	512	17.5.4 储氢合金氢化物的磁学性质	555
16.2.3 液氢储藏型加氢站	514	17.6 超导 MgB_2 的制备	558
16.2.4 压缩氢储藏型加氢站	515	17.6.1 MgB_2 超导化合物	558
16.2.5 移动加氢站	515	17.6.2 传统的 MgB_2 超导薄膜制备	559
16.3 加氢站与加氢站网络建设	517	17.6.3 $Mg(BH_4)_2$ 分解制备 MgB_2 超导薄膜	560
参考文献	518	参考文献	561
第 17 章 氢气与材料制备和改性	519	第 18 章 氢气的安全性	564
17.1 氢脆	519	18.1 氢气安全的基础知识	567
17.1.1 氢在钢铁中的固溶和性能	519	18.2 氢气的燃烧和爆炸性能	568
17.1.2 氢脆模型	523		
17.1.3 不同材料的氢脆	524		
17.1.4 氢脆机理以及氢致滞后 断裂	528		
17.1.5 氢脆的防止	530		
17.2 金属间化合物氢致非晶化	531		
17.2.1 金属间化合物的氢气吸收和 非晶态化	531		

18.3 高压氢气和液态氢气的危险性	574	第 19 章 基本数据	587
18.3.1 高压氢气的危险性	574	19.1 氢元素、能源与环境	587
18.3.2 液态氢气的危险性	575	19.2 氢气燃料的基本特性	588
18.4 氢脆引起的设备安全问题	577	19.3 氢气的物理和化学性质	589
18.5 储氢合金的安全问题	578	19.4 氢气扩散	593
18.6 氢燃料电池汽车的安全问题	580	19.5 氢化物分类	596
18.6.1 高压保护系统	580	19.6 储氢材料性质比较	597
18.6.2 氢气泄漏检测	580	19.7 相图和 PCT 曲线	599
18.6.3 氢燃料电池汽车的相对 安全性	581	19.8 氢化物晶体结构	612
18.7 氢气泄漏检测方法和氢气检测器	581	19.9 储氢材料热力学	615
18.8 一般安全的对策	583	19.10 蓄热合金	618
参考文献	585	19.11 氢能源汽车	619
		参考文献	624

第 1 章 氢能源与氢经济

1.1 世界经济和能源

人类的历史是和能源资源的消耗密切联系在一起发展起来的，人类的生活水平和质量与能源消耗密切相关。通过考察个人的能源消耗就可以对全球能源消耗做一个展望，见表 1-1。

表 1-1 历史上的人类能源消耗^[1]

时 期	每人每天的消耗/kcal [⊖]					特 点
	食 物	家庭和商业	工业和农业	运 输	总 计	
原始	2				2	只有食物
狩猎	3	2			5	木材取火烹煮食物
原始农业	4	4	4		12	动物耕作
先进农业	6	12	7	1	26	利用煤炭
工业	7	32	24	14	77	蒸汽机
技术	10	66	91	63	230	内燃机、电力

古代人类使用木材为原料，受到森林生长的制约，世界人口长期停留在 2 ~ 5 亿之间，公元 1600 年达到了 5 亿。18 世纪中叶进入产业革命，改为以煤炭为主能源资源，生产力水平迅速提高，人们生活和医疗卫生水平也有显著改善，到 1800 年经过 200 年人口增长 1 倍，达到 10 亿。19 世纪开始使用石油，1900 年人口达到 15 亿，20 世纪石油取代煤炭成为了主要燃料，出现了人口爆炸的局面，世界人口增长达到了历史高峰，1999 年人口达到了 60 亿，在 100 年来人口增加了约 4 倍，人口增长与能源消耗显示了密切的相关性。据联合国人口基金会公布的报告显示，2011 年世界人口已达到 70 亿。

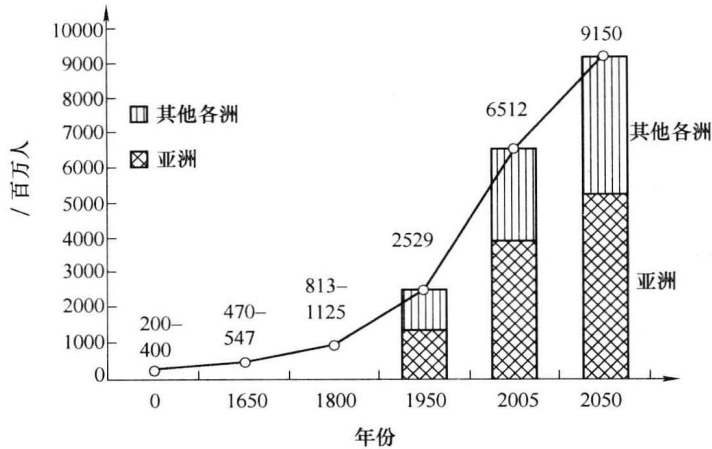
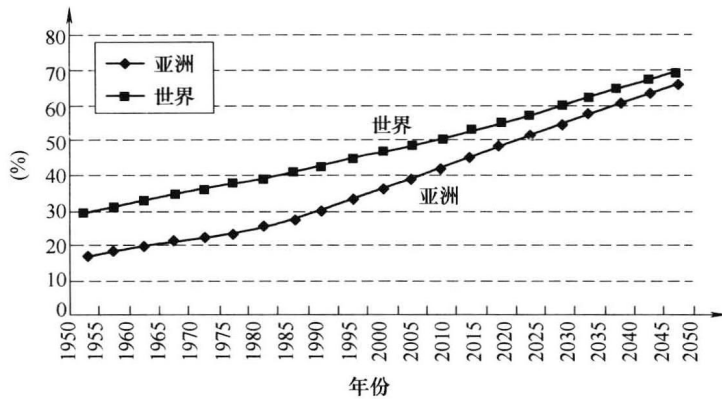
1. 人口增长

图 1-1 是世界人口年增长和今后的预测，亚洲的人口增加将尤为迅速。人口发展的另一个特点是，各国城市化趋势越来越强，如图 1-2 所示。发达国家人均收入达到 2 万美元以上，发展中国家收入提高迅速，亚洲几个国家和地区家庭收入在 5000 ~ 35000 美元的人口在增长。富裕阶层，尤其是中产阶级人口增长迅速，人均消费也在不断增加。

2. 世界经济增长

第二次世界大战后世界经济开始慢慢恢复，20 世纪 70 年代以后发展迅速，自 20 世纪 90 年代以来，世界科学技术突飞猛进，在经济全球化和信息技术革命的推动下，以电子信息、生物技术和新材料为支柱的高新技术取得了一系列重大突破，改变了世界的面貌，推动

⊖ 1cal = 4.184J。

图 1-1 世界人口变迁和预测^[2]图 1-2 世界和亚洲城市化率的变化^[3]

了经济全球化的进程。

20 世纪 90 年代以来，世界经济增长从 1991 年的 1.5% 提高到 2007 年的 5.2%，年均增速达到 3.5%。其间，虽然受 1997-1998 年亚洲金融危机和 2000-2001 年美国“新经济”泡沫破灭影响而出现下滑，但在 1~2 年后又恢复到年均增速之上，总体保持平稳增长趋势。2008 年 9 月的金融危机发生后，世界各国经济形势快速恶化，新兴国的经济也受到了很大影响，但是和发达国家相比还是有很大的发展。中国、印度、巴西和俄罗斯的年增长率都超过了 5%，与此相比发达国家都是负增长。根据以往规律，世界经济仍将逐步回升到过去多年的年均增长水平。

图 1-3 是世界主要经济国家的 GDP 年增长变化。美国、加拿大、德国、英国、法国、意大利和日本 7 国，总人口占世界人口的 11%，但是 GDP 占世界总量的 65%。而世界其余地区，人口占世界的 89%，GDP 却仅占世界的 35%。全非洲 50 多个国家，GDP 占世界总量的比例为 1%，只相当于美国通用电气公司一家的资产。尽管各国有自己的经济困难，但是总体是在增长，中国 GDP 从 2000 年起增长尤为迅速，2007 年超过德国，2010 年超过日本。

如图 1-4 所示。

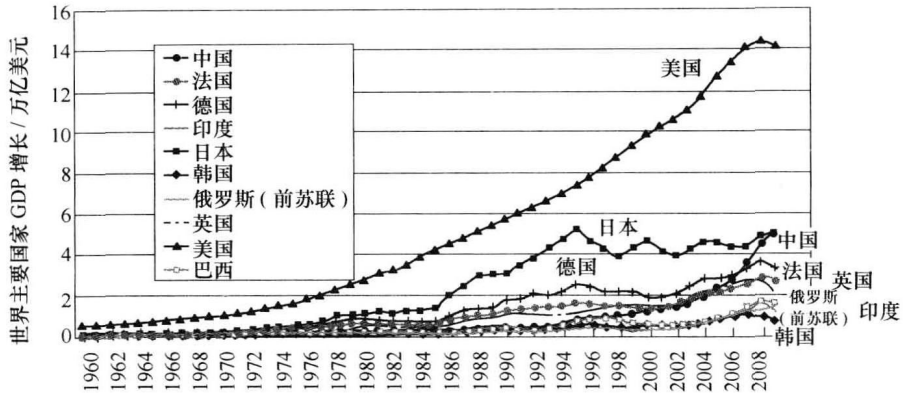


图 1-3 世界主要经济国家的 GDP 年增长变化^[4,5]

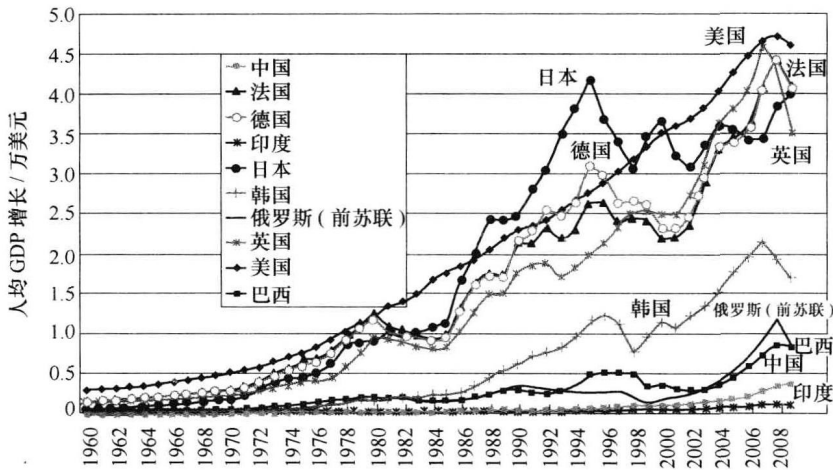


图 1-4 一些国家的人均 GDP^[4,5]

经济全球化是全球以市场经济模式全球化，使资源在使用效率最高的企业使用，促进竞争和带动经济发展，在世界上形成产业结构新的国际分工，这种结果使得世界经济在相当长的一段时间得到了持续的发展。中国在世界市场整合中是最成功的，改革开放以来，30 年间使人均 GDP 提高了 10 倍，贫困人口减少 5 亿以上。

3. 世界钢铁、汽车、水泥的生产

世界经济发展以及各国的情况可以从钢铁、汽车、水泥等几种大宗产品的生产上更深入地了解。

(1) 钢铁生产

图 1-5 是 2003 年和 2009 年世界主要国家和地区的钢铁生产的对比。世界 2003 年钢的总产量是 96716.4 万 t，2009 年钢的总产量是 1219.7 百万 t，其中中国的钢产量为 567.8 百万 t，占全世界的 46.6%。

根据 World Steel Association 的排名，世界十大钢厂企业以及 2008 年的产量汇总到了表 1-2。从中可以看出十大钢厂中有 4 个是中国钢厂。

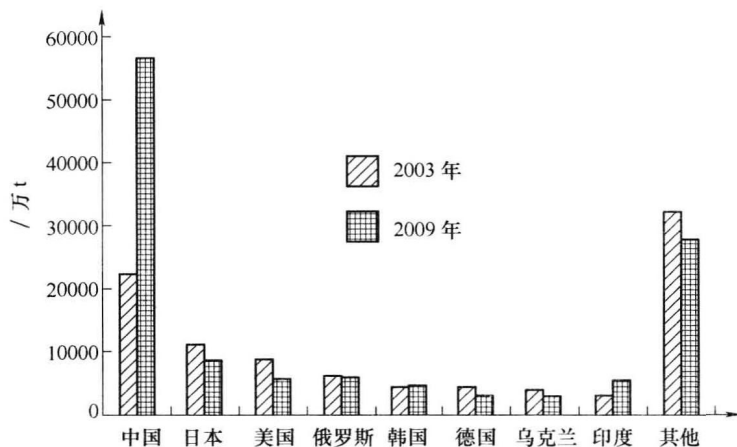


图 1-5 2003 年和 2009 年世界主要国家和地区的钢铁生产的对比^[6,7]

表 1-2 世界十大钢厂的情况

排 名	公 司 名 称	年钢产量/百万 t
第 1 名	阿塞洛-米塔尔跨国公司 ArcelorMittal	103.3
第 2 名	日本新日铁 Nippon Steel	37.5
第 3 名	中国宝钢集团 Baosteel Group	35.4
第 4 名	韩国浦项 posco	34.7
第 5 名	中国河北钢厂 Hebei Steel Group	33.3
第 6 名	日本钢铁工程控股公司 JFE	33.0
第 7 名	中国武钢集团 Wuhan Steel Group	27.7
第 8 名	印度塔塔钢铁公司 Tata Steel	24.4
第 9 名	中国江苏沙钢集团 Jiangsu Shanggong Group	23.3
第 10 名	美国钢铁公司 U. S. Steel	23.2

钢铁行业制造过程中材料加热等的热源主要是重油，虽然原油价格波动大，通过进行燃料转换和实施节省能源技术的开发，受到原油价格波动的影响不大。不过煤炭、铁矿石等原材料受到原材料的影响很大。发达国家由于钢铁行业向车用高强钢板等高附加值的制品转移，可以将原料费的增加转移到成品中去，所以行业利润一直持续维持下来。

(2) 汽车生产

世界汽车制造商协会 (OICA) 公布了 2008 年世界 52 个国家年汽车产量统计数据。受金融危机影响，全年全球共生产汽车 7053 万辆，比 2007 年减少 3.7%，近年来首次出现负增长。汽车产量超过 100 万辆的 17 个国家中，除金砖中国、印度、巴西、俄罗斯国家及墨西哥、泰国、土耳其、伊朗等国为正增长外，其余传统汽车生产大国均为负增长。通过世界各国 2008 年与 2007 年产量排序的变动，可以从总体上了解世界汽车工业格局的变化情况。表 1-3 是 2009 年上半年世界前 10 大汽车集团的销售排序，及 2008 年同期的排名变化。中国的汽车市场发展很快，而且今后还会持续下去。根据日本自动车产业专门调查会调查报告 2010 年中国汽车产量为 2200 万辆，预计 2015 年达到 3000 万辆，中国企业和外资都积极加

大投资，加入竞争^[8]。

表 1-3 世界十大汽车生产公司的生产情况^[9]

排名 (2008 年排名)	车 厂 名	销售量/百万辆	变化 (%)
1 (1)	丰田	3.564	-26
2 (2)	通用	3.553	-22
3 (3)	大众	3.265	-5
4 (5)	现代	2.153	-2
5 (4)	福特	2.145	-33
6 (8)	标致雪铁龙	1.587	-14
7 (6)	本田	1.586	-22
8 (7)	日产	1.546	-23
9 (10)	铃木	1.150	-10
10 (9)	雷诺	1.107	-16.5

(3) 水泥生产

据中国建筑材料联合会信息部初步统计，2009 年全国水泥产量生产能力：水泥熟料产量 10.79 亿 t，比上年增长 10.42%；其中新型干法熟料产量 7.79 亿 t，比上年增长 26.05%；其他熟料产量 2.99 亿 t，比上年下降 16.52%。水泥熟料产量新型干法比例 72.25%，比上年上升 8.96 个百分点。全国水泥产量 16.48 亿 t，比上年增长 16.07%。水泥熟料和水泥产量比例 65.45%，比上年下降 3.35 个百分点。图 1-6 所示为 2010 年世界水泥生产大国的生产量，我国的水泥产量已占世界总产量的一半以上。

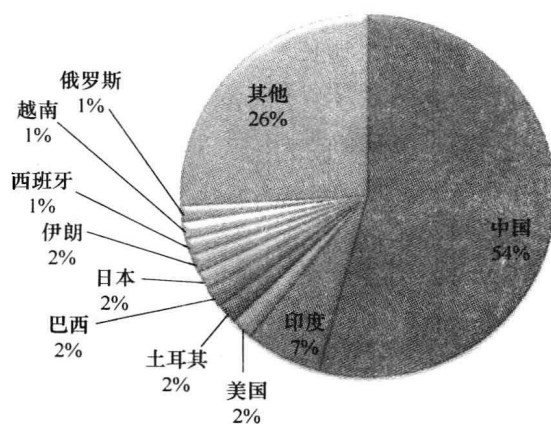


图 1-6 2010 年世界水泥生产大国的生产量^[10]

1.2 各国能源消耗和我国能源消耗的特点

人类和能源的关系是能源消耗规模取决于人类的生活以及经济活动水平，如图 1-7 所示，同时生活和活动也是由能源的供给方法来决定和制约的一种相互关系。正如 W. W. Rosoutou 在“经济发展阶段学说”中指出的一样，经济发展到了某种程度后，能源的消耗将随着经济发展而增加。

从工业革命至今，人类社会的能源消耗几乎完全建立在化石燃料的基础之上。200 年以来，全球能源消耗中煤炭 + 石油的比例很大，占 75% ~ 80%，20 世纪 80 年代末，天然气的比例有一定上升，水电 + 核电的比例上升较快。从 20 世纪 80 年代末至今的 30 多年能源结构比较稳定。一般为：煤炭占 26% ~ 26.5%，石油占 36.5%，天然气占 23.5%，水电占 6.0%，核电占 6.0%。化石燃料仍占主要地位。

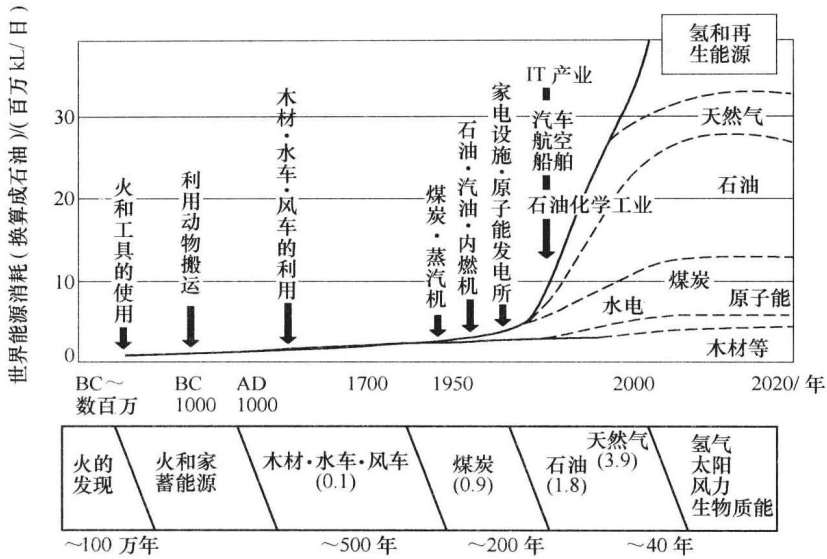


图 1-7 能源消耗增长历史以及燃料和资源利用的变迁 (括号内的数据是 H/C 原子比)^[11]

1. 能源需求增长

图 1-8 为全球各种一次能源消耗比例变化, 随着经济成长世界的能源消耗不断增长,

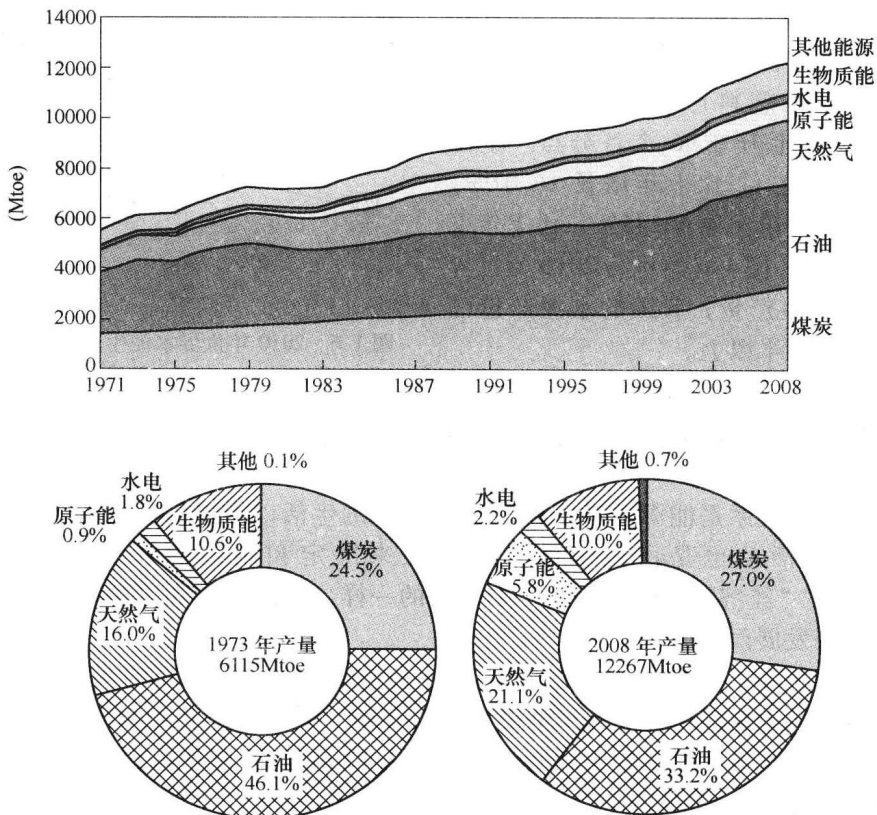


图 1-8 1971~2008 年间全球各种一次能源消耗增长 (折算成 toe)^[13]

1971年为61.55亿toe (tonne of oil equivalent), 以后以2.6%的年平均增长, 2008年达到了122.67亿toe, 将近翻了一番。

世界一次能源消耗的能源资源是以石油为主体, 其中一部分用于发电。1971~2008年石油消耗增长率为2.3%, 和能源整体的增长率大体相当, 到了2008年, 石油消耗占能源整体消耗的比例从1973年的46.1%降到2008年的33.2%。这期间取代石油的能源资源主要是原子能和天然气, 其年增长率分别为11.8%和3.6%, 正因如此, 原子能和天然气能源的消耗(一次能源)占整体的比率分别从0.9%增长到5.8%, 16.0%增长到21.1%。以前和石油一样作为能源主力的煤炭的消耗增长率为1.8%, 在能源消耗资源(一次能源)中所占比例由1971年的24.5%略微增长到2008年的27.0%^[12]。

能源的主要消耗主要是前苏联和OECD发达国家。如作为世界第一大能源消耗国, 美国以世界6%的人口消耗了世界30%的能源, 而亚洲和非洲国家能源消耗所占比例不大。20世纪90年代开始OECD的能源消耗增长趋缓, 发展中国家(非OECD国家)能源消耗增长迅速。OECD国家所消耗的能源由1973年的61%降到了45.7%, 其中的一个原因是因为发达国家的经济增长和人口增长都比发展中国家的要小, 同时产业结构调整以及能源消耗设施的能源使用效率提高。发展中国家和地区能源消耗持续高增长, 尤其是经济发展快的亚太地区, 已经是世界能源消耗增长的主要牵引力, 而以前能源消耗很大的前苏联区域, 由于前苏联的解体、经济和社会的混乱, 能源消耗反而减少, 到了1999年以后能源消耗才转为增加。OECD国家人口为11.74亿, 总GDP为37269亿美元; 非OECD国家人口为53.23亿, 总GDP为10976亿美元。

表1-4是2008年世界主要国家能源消耗结构。发达国家人均能源消耗分为3个范围, 美国、加拿大、挪威、澳大利亚、冰岛、荷兰、芬兰等国大于5toe/人, 新西兰、法国、日本、德国、韩国、奥地利、英国、瑞士等国在3.5~5toe/人之间, 意大利、葡萄牙、西班牙、希腊等国在3.5toe/人以下。20世纪90年代中期, 这些国家人均能源消耗开始出现零增长或下降的趋势。尽管发达国家人均能源消耗呈现“零增长”态势, 但是2007年25个发达国家能源消耗总量占全球的56%, 如图1-9所示, 人均能源消耗水平是发展中国家的5倍以上, 随着人口的不断增多, 发达国家能源消耗总量在今后相当长的时期内仍将占全球较大份额。

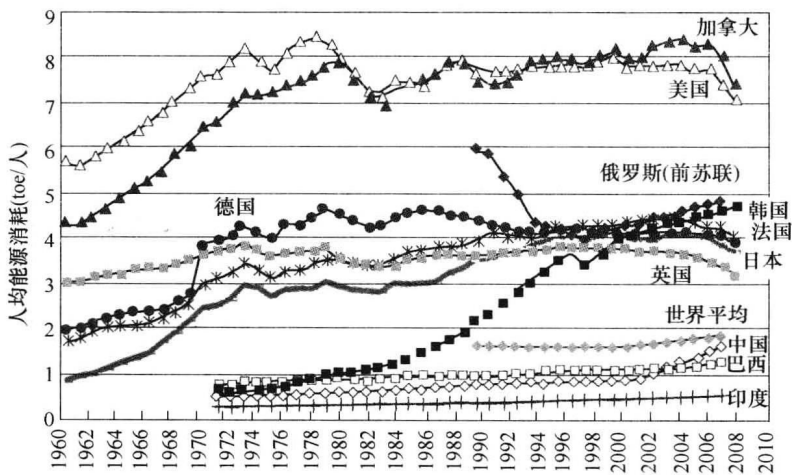


图 1-9 1960~2009 年主要国家人均能源消耗变化^[14]