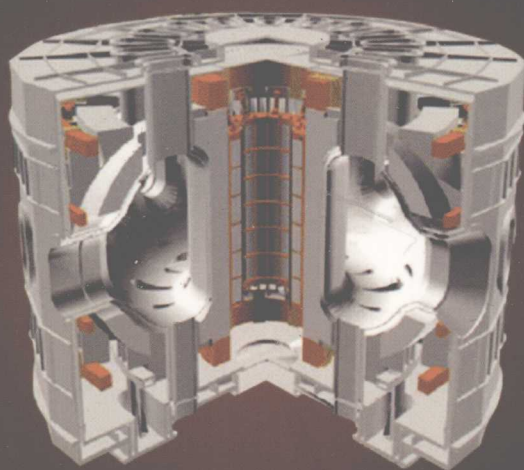


聚变能及其应用

邱励俭 编著



科学出版社
www.sciencep.com

聚变能及其应用

邱励俭 编著

科学出版社

北京

(编辑) 赵仁俊 (校对) 赵仁俊

2004年1月第1版

内 容 简 介

核聚变是集等离子体物理与核聚变工程于一体的巨大的科学技术知识体系。经过五十余年人类共同的努力,现在到了展望其应用的时代。为了实现为人类提供取之不尽、用之不竭的清洁能源的伟大目标,人类还要付出巨大的努力。作者在为等离子体所年轻工作人员和博士生授课教材的基础上,撰写了此书,全书共分17章,总结了与核聚变有关的等离子体原理及核聚变工程技术,并对聚变能未来的发展进行了展望。

本书可供从事核聚变及高温等离子体专业的科研人员及研究生参考,也可供对人类能源发展前景感兴趣的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

聚变能及其应用/邱励俭编著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-014941-1

I. 聚… II. 邱… III. 聚变反应-核能-综合利用 IV. TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 011901 号

责任编辑:胡 凯/责任校对:李奕莹

责任印制:赵德静/封面设计:王 浩

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第 一 版 开本:A4(890×1240)

2008年1月第一次印刷 印张:31 3/4

印数:1—2 500 字数:1 054 000

定价:96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

序

受控核聚变是集等离子体物理与核聚变工程为一体的巨大的科学技术知识体系。经过五十余年人类共同的努力,可以说,现在到了展望其应用的时代。为了实现为人类提供取之不尽、用之不竭的清洁能源的伟大目标,人类还要付出巨大的努力。邱励俭在自己近半个世纪的科研生涯中深知,只有既通晓等离子体物理原理又熟悉核聚变工程技术,才能把这一事业进行到底。这不仅仅是他的体会,我们对此也认同。

氘氚聚变反应释放出大量聚变能,一升海水中的氘通过聚变反应可释放出相当于燃烧 300L 汽油的能量。轻核反应的原理已在揭示太阳能量产生的奥秘中得到验证,它的反应产物是无放射性的,因此,以开发聚变能为目的受控热核聚变将为人类提供最理想的清洁能源。考虑到聚变固有的安全性,潜在环境的优越性,可用燃料的区域广泛性,可以说,聚变是可以解决人类最终理想能源的方案之一。

核聚变所依托的主要学科是等离子体物理学,并与其他多种学科相互交叉。等离子体物理学近几十年在国际上取得迅速发展,但还是一门不成熟的学科,这在很大程度上是因为它的发展是来自核聚变研究的推动。不论是磁约束途径还是惯性约束,燃烧介质的基本形态都是等离子体。等离子体具有多体系统的特点,其运行形式很复杂,在描述方法、基本规律上向已有的知识体系提出了挑战,构成了一门活跃的前沿学科。等离子体物理学也推动了应用等离子体科学技术的发展。等离子体科学技术已经在航天、微电子、材料、加工、印刷出版、电子对抗、动能武器、科学仪器,乃至冶炼、通讯、推进技术、废物处理和环境、化工、医疗卫生等各个经济领域中建立起数千亿美元的产业。

从托卡马克途径看,其科学可行性在非氘等离子体上已得到解决,但必须通过氘氚等离子体的自持“燃烧”实验,才能说完全验证“科学可行性”,要进行这样的实验,就必须解决稳态运行的一系列物理及工程问题。所以,建造一个能“自持燃烧”的实验装置是完全必要的。1976 年由美苏倡议,在 IAEA 的框架下,由美国、欧洲、日本及前苏联共同建造 ITER(international tokamak experimental reactor),这是一个巨大的科学计划,先后进行了 10 余年。

1988~1990 年 概念设计阶段 CDA(conceptual design activity);

1992~1998 年 工程设计阶段 EDA(engineering design activity);

1999~迄今,进入修改设计、协商合作、选址、准备建造阶段。

ITER 的目标是验证稳态的氘氚等离子体“自持燃烧”的科学可行性、聚变反应堆的工程可行性,只有在此基础上发展实验堆和商用堆原型,最后才能说“商业化”,若以一代装置需十余年计算,这三代装置,需时就要 40~50 年,所以说聚变商用化(托卡马克途径)大约在 2050 年后才可能实现。因此,聚变能的应用是“任重而道远”。有人说裂变能的利用,从开始实现“链式反应”(1943 年)到形成一代“能源”(1970 年),不过 20 余年。只因“三里岛”和“切尔诺贝利”两次核事故,才使裂变能源的发展放缓下来。当然,这只是暂时的,现在裂变能在国际上又迎来了它的“第二个春天”。而对聚变能的发展来说:已研究了 50 年,预期还要 50 年才能广泛应用,是何原因?现在能回答的是:①对等离子体物理了解还是初步的,有待进一步深入;②支持磁约束的各种技术(超导、低温、超高真空、微波、材料等)非常复杂,因为氘氚反应要产生 14MeV 的强中子辐照,而且还要把上亿度高温等离子体维持相当长的时间,这对人类现有技术积累,尤其是材料,提出了挑战;③全世界对发展聚变还没有形成一致的时间表,很难集中人力、物力和财力。

中国政府已正式参加 ITER 建设的国际合作谈判,相信在不远的将来,中华民族将为“最终地”解决人类赖以生存的能源问题做出自己应有的贡献。

赵仁俊

2004 年 5 月 24 日

前 言

《聚变能及其应用》一书是在给等离子体所的年轻科研人员和博士生授课教材的基础上撰写而成的。可供广大对人类能源发展前景感兴趣者参考。

本书分为五个部分：

第一部分，阐述了只有大力发展核聚变能才是解决我国能源问题的唯一出路这一观点。总结了 50 年来核聚变研究发展的历程，取得的进展及尚待解决的问题，包括物理上和工程上的，也提出了解决的途径，从而达到最后实现最终目标的进程。

第二部分，阐述了等离子体物理的基础：从核聚变的基本定义出发，论述了单个带电粒子的运动及其宏观行为的描述和等离子体中波的产生及传播过程，最后是等离子体的输运过程，共有五章。应该说，国内外有不少这方面的书，作者力求简洁易懂，不陷于繁琐的推导，即使是非物理专业的理工科高校毕业生也能接受。

第三部分，阐述了聚变堆设计(包括聚变-裂变混合堆)涉及的四大问题：

1. 计算堆芯等离子体，包括堆参数选择、平衡计算、自举电流份额计算、优化等离子体位形，并寻求先进运行模式、检验等离子体宏观稳定性、提出各种防止不稳定性的措施、进行动态的放电模拟、计算等离子体的各种损失并提出约束定标等。

2. 控制聚变堆的能量流与粒子流，目前采用的主要方式是偏滤器。对它的工作原理、等离子体与表面的相互作用、偏滤器设计及其工作过程的模拟做了阐述。

3. 维持高温聚变等离子体的连续运行是加热及驱动的主要任务，因此，对等离子体电流本身的加热与感应、中性注入、离子回旋共振、电子回旋共振、低杂波等方式的加热和驱动的物理过程及工程技术问题做了阐述，最后提到 α 粒子自持加热。

4. 所产生 14MeV 聚变中子巨大能量的充分利用，以及将其对设备及周围环境的损害作用降低到允许接受的程度，这是包层功能体现，正是利用将不同核材料布置在不同的能量范围及不同的空间，才生产氚、核燃料，产生能量，处理及嬗变高放核废料得以实现。这正是聚变堆与聚变-裂变混合堆的微小差别，但对等离子体的要求差别却很大。这部分内容详细阐述了我国在这个领域的贡献。

第四部分，详细阐述了实现聚变堆的实验装置：

1. 磁体技术与电源；
2. 真空室结构、抽气、充气及弹丸注入系统；
3. 材料的辐照损伤及聚变堆材料；
4. 经济分析；
5. 环境安全。

第五部分，附件：

1. 对实现核聚变的前景做了分析比较与评估，尤其是对托卡马克的发展优先做了分析，这表明聚变能源的实现虽然还有较长的路，但都是物理可行、工程有望、经济有潜力的；

2. 收集了重要的公式、数据及单位换算；

3. 参考文献。

以上主要来源于我们自己三十余年的实践和国际同行五十余年的实践经验，聚变堆设计主要参考我们从事 863 高技术计划能源领域聚变-裂变混合堆专题(1987~2000)及 ITER(international thermonuclear experiment reactor) (1987~2002)的工作。

本书是为从事核聚变及高温等离子体专业科研人员及博士研究生而写的专著，只讲授核聚变的基本原理及最近技术发展，使学习者能以广阔的眼界，熟悉核聚变发展的进程，掌握基本的研究技能，尤其是计算机计算及模拟仿真的技巧，使读者能较快地从事研究工作，为实现彻底解决人类最终能源这一长期目标，而尽自己最大的努力。

据我所知,国内外出版的同类图书大都是等离子体物理方面的书籍,聚变堆设计方面的书曾在 20 多年前出版过[[美]卡马什. 聚变反应堆物理(原理与技术). 北京:原子能出版社,1982]。另外,石秉仁在 1999 年出版的《磁约束聚变原理与实践》一书亦是本书的主要参考,但偏重于物理。

本书的特点:

1. 内容新颖。主要反映这 20 年聚变-裂变混合堆的进展及 ITER 设计的进展,这些进展是在国内外工作实践的基础上实现的。

2. 比较全面,既有物理,也有工程。物理上尽量避免深奥及繁琐的数学推导,强调给出清晰的物理图像,目的是让工科毕业的大学生也能接受。

3. 强调计算机程序的运用。现在计算机技术飞速发展,聚变界积累了许多有效的程序,不仅包括复杂的等离子体物理的计算(平衡位形、稳定性校核、放电过程的模拟等),还有工程设计中必需的应力、变形、热工、水力、核素嬗变等方面的计算程序,甚至结构与仿真、环境评估和经济分析都可以在计算机上完成。可以说,在不久的将来完全可以达到“数字托卡马克”境界。

4. 站在实现聚变能应用的“高起点”开始工作。这就要了解核聚变研究 50 年发展的历程,了解过去,是为了总结教训、发现问题,从而解决问题,这样才能展望未来。所以在前言中阐述了 50 年发展的历程,最后展望中讨论了限制核聚变装置发展的问题,并提出了解决的设想,这就是“创新”过程。

本书得以完成,首先必须感谢中国科学院等离子体研究所领导在物质与精神上的支持,给予我足够的条件;其次是我所在的反应堆研究室,除了物质支持之外,处在青年人活跃而又上进的氛围中,使我在“古稀”之年,能写完这本书。

还要感谢两院院士赵仁恺先生为本书写序。

1961 年,具有远见卓识的郭永怀先生带我由“裂变”走向“聚变”,这开始了我的“巨变”,直到今天,谆谆之言,如历在耳。

感谢中国原子能科学研究院郁金楠研究员提供了《材料辐照效应》手稿供作者参考。

我的妻子慕惠玲多年来创造了温馨的家庭氛围,这是完成此书的重要保证。

特别感谢等离子体所情报资料室,尤其是张英主任对出版这本书的大力支持与帮助。

邱励俭

目 录

序

前言

第 1 章 人类的能源需求及对未来能源的展望	1
1.1 我国能源需求的展望	1
1.2 能源的科学预测	4
1.3 环境污染	7
1.4 世界能源需求	8
1.5 裂变核能	9
1.6 聚变核能	12
1.7 核聚变能研究的历史和现状	12
1.8 对未来能源的展望	17
1.9 聚变裂变混合堆	18
参考文献	21
第 2 章 核物理及等离子体物理中的元过程	22
2.1 高温等离子体的物理过程	22
2.2 微观过程与宏观过程	27
2.3 弹性碰撞	28
2.4 非弹性碰撞	33
2.5 核反应的截面、自由程、反应时间	34
2.6 热核等离子体的能量平衡	35
2.7 等离子体内热能的平衡方程	36
2.8 工作过程中的电能平衡	36
2.9 托卡马克的工作原理	37
2.10 等离子体的加热	41
第 3 章 带电粒子在磁场中的运动	43
3.1 一般概念	43
3.2 均匀、恒定磁场中的单粒子轨道	43
3.3 漂移近似	45
3.4 慢变磁场中的守恒量(寢渐不变量)	50
3.5 粒子在环形磁场中的运动	54
第 4 章 磁流体力学	58
4.1 磁流体力学方程	58
4.2 感应方程 磁扩散和冻结	61
4.3 箍缩效应	63
4.4 磁流体力学波	64
4.5 磁流体力学激波	68
第 5 章 等离子体中的波	75
5.1 色散关系(一般形式)	75
5.2 均匀各向同性等离子体中的振荡与波	79
5.3 磁场中“冷”等离子体的介电张量、色散关系	84
5.4 截止与共振 色散曲线	86

5.5	“冷”等离子体中平行于磁场方向传播的波	90
5.6	“冷”等离子体中垂直于磁场方向传播的波	94
第6章	等离子体中的输运过程	99
6.1	输运过程的宏观处理	99
6.2	等离子体的输运系数的动力学处理	102
6.3	均匀恒稳磁场中弱电离等离子体的输运系数	108
6.4	等离子体输运过程的磁流体力学处理	112
6.5	新经典输运理论及反常扩散	116
第7章	聚变堆设计	120
7.1	聚变堆设计的意义	120
7.2	聚变堆设计的历史演变	122
7.3	聚变堆设计的方法与步骤	126
7.4	ITER 介绍	133
7.5	ITER 设计资料框图	144
7.6	EAST	147
	参考文献	149
第8章	堆芯等离子体	151
8.1	等离子体参数选择与系统分析	151
8.2	平衡(equilibria)	154
8.3	自举电流	159
8.4	先进的等离子体位形	162
8.5	磁流体力学稳定性(MHD stability)	165
8.6	堆芯等离子体的约束定标	186
8.7	等离子体放电的模拟	193
	参考文献	202
第9章	聚变堆中能量和粒子的控制	204
9.1	聚变堆中能量和粒子的控制	204
9.2	控制能量与粒子的方法	205
9.3	等离子体与材料表面的相互作用(PSI)	208
9.4	与辐射有关的边缘物理现象	213
9.5	偏滤器设计	216
9.6	偏滤器模拟	220
	参考文献	229
第10章	包层	230
10.1	包层的作用	230
10.2	中子输运方程及理论基础	231
10.3	嬗变原理、效率、损耗计算及燃料循环	233
10.4	能量放大器	242
10.5	多功能包层	245
10.6	放射性完全洁净动力系统 RCNPS	248
10.7	ITER 示例	252
10.8	聚变堆可能应用的包层示例	262
	参考文献	267
第11章	加热与驱动	269
11.1	欧姆加热与电流感应	270
11.2	自举电流(bootstrap current)的实验与非感应驱动	271

11.3 中性束注入(NBI)	274
11.4 离子回旋共振加热(ICRF)和驱动	279
11.5 电子回旋共振(ECRF)	284
11.6 低杂波	290
11.7 α 粒子加热	295
参考文献	300
第 12 章 磁体与电源	301
12.1 磁体	301
12.2 磁体结构与制造工艺	305
12.3 电源系统	316
12.4 控制系统	320
12.5 低温系统	321
参考文献	329
第 13 章 真空室 抽充气 弹丸注入 水冷及氦系统	330
13.1 真空室的功能及设计	330
13.2 抽气系统	342
13.3 加料系统	343
13.4 水冷系统	343
13.5 氦系统	349
参考文献	352
第 14 章 聚变堆中材料的辐照损伤及材料	353
14.1 前言	353
14.2 辐照缺陷产生的过程	354
14.3 辐照缺陷的退火、聚集和辐照肿胀	359
14.4 辐照硬化、脆性和断裂	363
14.5 辐照生长、蠕变和疲劳	368
14.6 辐照及辐照模拟技术	371
14.7 聚变堆材料	374
参考文献	382
第 15 章 经济评估	384
15.1 经济评估的意义、对象与任务	384
15.2 聚变能经济学研究进展	386
15.3 单位电价 COE 公式的进化过程	399
15.4 各种系统的成本计算模型	399
15.5 从物理、工程到电价及投资的统一计算体系	403
参考文献	410
第 16 章 环境与安全	412
16.1 前言	412
16.2 安全分析的原则与方法	413
16.3 正常运行情况下的安全与防护	417
16.4 事故态分析	423
16.5 聚变-裂变混合堆中放射性的计算	429
参考文献	435
第 17 章 展望	436
17.1 托卡马克要实现为聚变商用堆,还需在科学与技术(R&D)作很大的努力	436
17.2 D+T 聚变堆的第一壁工程限制	436

17.3	托卡马克各种“先进运行模式”	440
17.4	各种“先进燃料”比较	440
17.5	各种磁约束概念比较	442
17.6	聚变堆作为中子源的前景	445
17.7	低环径比托卡马克	449
	参考文献	467
附录		468
附录 1	国际单位制(SI)和基本常数	468
附录 2	公式与数据	470
附录 3	元素与一些分子的截面和核参数	492
附录 4	附邱励俭个人论文、报告、著作目录	494

第 1 章 人类的能源需求及对未来能源的展望

1.1 我国能源需求的展望

能源是发展国民经济的动力,是提高人民生活的物质基础。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,对能源的需求将越来越大,能源结构将越来越合理。现时中国能源消费的特点是:人均消费水平低,产值能耗高,且以煤为主,见图 1.1^[1]。

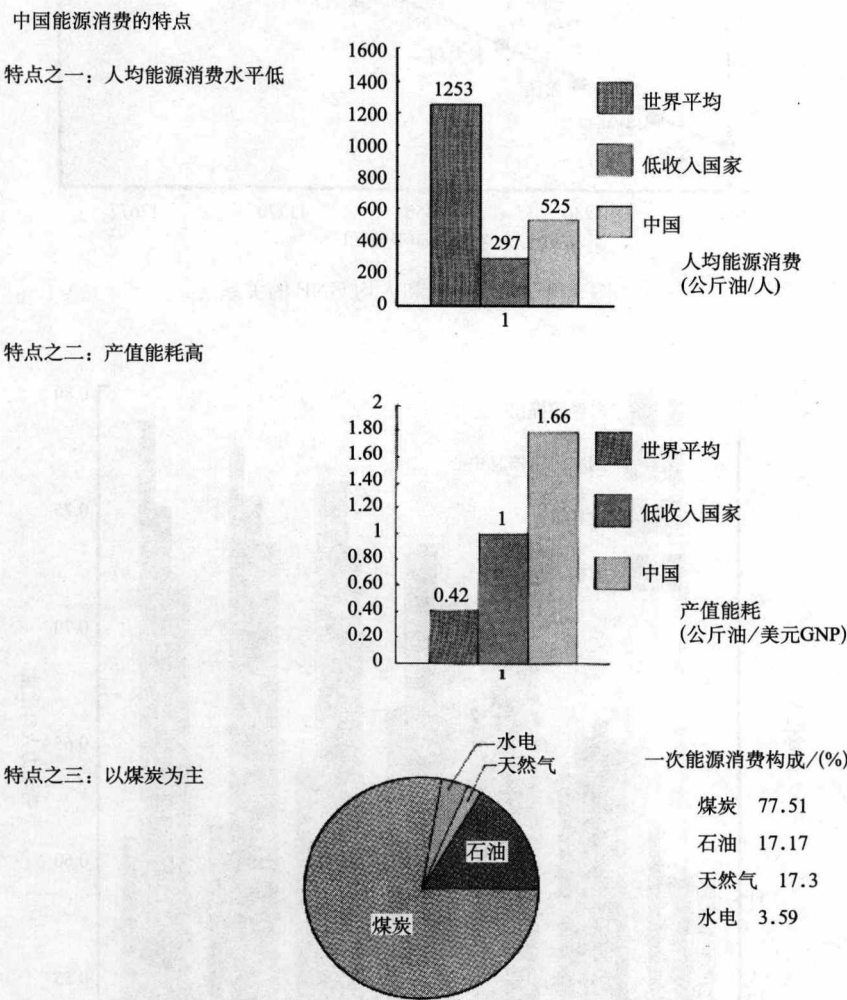


图 1.1 中国能源消费的特点

中国在 1987 年石油的人均为 525 公斤,大大低于世界人均水平 1253 公斤。人均能耗和人均 GNP 是密切相关的,可见图 1.2。

从图 1.2 可以看出即使中国在 2050 年人均 GNP 为 4000 美元时,其人均能耗也比发达国家低,比美国更低很多。

按照中央提出的实现社会主义现代化经济建设分三步走的战略目标,到 2050 年,按人均国民生产总值达 4000 美元计,届时我国人口估计将达 15 亿,见图 1.3。这是根据各种预测资料而得到的^[1]。这时,预测的能源需求总量将为 40~45 亿吨标煤,石油总需求量为 4~5 亿吨,电力的装机容量将达 12 亿千瓦以上(12~15 亿千瓦)。这意味着 21 世纪中国在能源方面遇到的问题是以下几个方面。

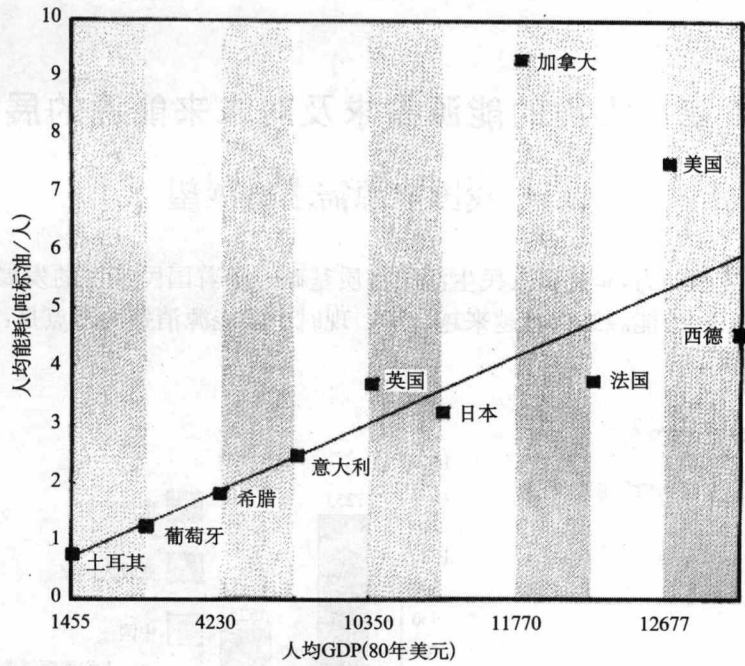


图 1.2 人均能耗和人均 GNP 的关系

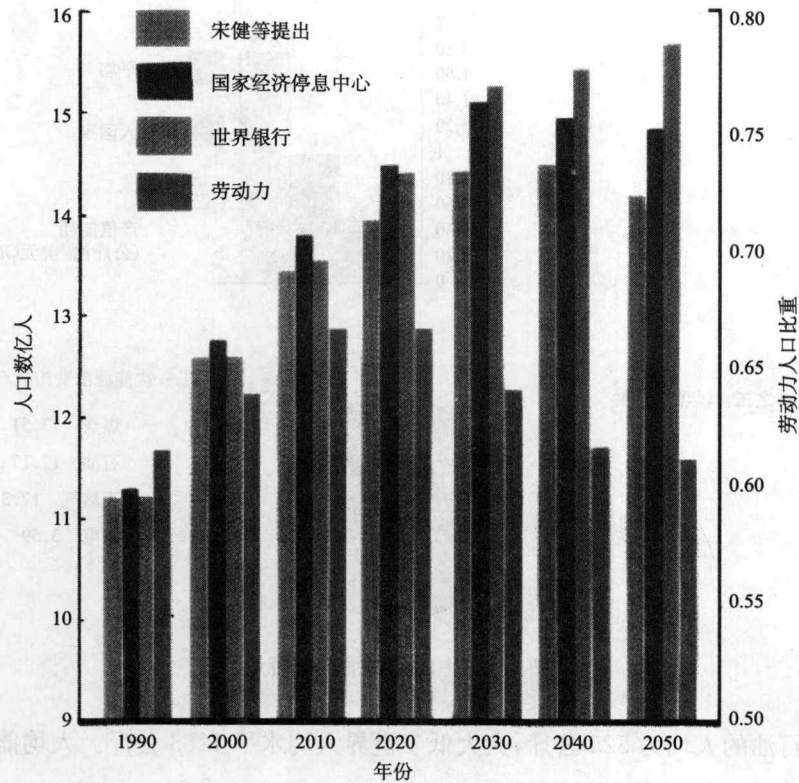


图 1.3 人口预测:2050 年中国人口将达到 15 亿左右

1.1.1 缺口大

据初步预测,21 世纪中我国能源供应前景是:石油、天然气提供的一次能源仅相当 4 亿吨标煤;水电装机容量约 2.5 亿千瓦,能开发利用的,相当 3 亿吨标煤。因此,我国的一次能源仍将主要靠煤。我国煤炭储

量虽然丰富,但其分布极不平衡,75%左右分布在西北和华北地区,而东部和南部地区经济发达地区严重缺煤,考虑到开采能力及运输能力的限制,到 2050 年我国原煤的供应量只能达到 34 亿吨,折合 25 亿吨标煤,约占一次能源总需量的 60%。再加上石油、天然气、水力等主要常规能源大致只能提供能源总需求量的 80%,因此一次能源的供应尚有 20%的缺口。这是我国 21 世纪中能源发展面临的一个主要矛盾,见图 1.4 能源需求总量分析^[1]。

项目	单位	1985(实际)	2000(规划)	2020(预测)	2050(预测)
人口	亿人	10.45	12.5	13.8	15.0
人均GNP	万美元(1980)	465	1000	1900-2500	4000-6000
国民生产总值	万亿美元(1980)	0.48	1.25	2.62-3.45	6.0-9.0
能源总需求	亿吨标煤	7.73	14.0	24-30	38-54
人均能源消费量	吨标煤	0.74	1.12	1.74-2.17	2.53-3.63
产值能耗	KgCe/美元	1.59	1.12	0.92	0.65
平均节能率	(%/年)	4.0 (1980-1987)	3.3 (1985-2000)	1.0 (2000-2020)	1.0 (2020-2050)
能源弹性系数		0.53 (1980-1987)	0.61 (1985-2000)	0.72 (2000-2020)	0.61 (2020-2050)

图 1.4 能源需求总量分析

1.1.2 液体燃料严重不足

21 世纪中能源需求量面临的第二个矛盾是石油供应严重不足。随着国民经济的发展,人民生活水平的提高,特别是交通运输业的发展,对液态燃料的需求量也将大量增加。到 2050 年,即使在不考虑我国大规模发展私人汽车的前提下,预测的液态燃料需求量将为 4 亿~5 亿吨,而我国的石油后备储量不足,估计到 2050 年只能年产 1 亿多吨,缺少 3 亿~4 亿吨。因此,到 21 世纪中期。从我国以煤为主的国情出发,需解决煤的气化、液化问题,以补充对液态燃料的需求。

1.1.3 环境污染严重

我国以煤炭为主的一次能源结构,造成能源利用率低,对生态环境造成严重的污染。从 1988 年全球环境监测的 40 个城市的结果看,我国已经成为大气污染最严重的国家之一。设想到 21 世纪中叶,我国煤炭消耗再增加 4~5 倍,对生态环境的污染,将更加成为一个严重问题。

1.1.4 核能是解决能源问题的出路

为了填补我国 21 世纪中能源的 20%的缺口,对核能发展规模要求将是十分巨大的。到 2050 年,设想以我国核电占总电力生产的 10%,20%,30%,作为核电发展的低、中、高三个目标,则其发展规模如表 1.1^[1]。

表 1.1 2050 年中国核能发展的三种可能方案

	核电站总电力比例	核电发展规模	占一次能源比例	备 注
低方案	10%	1.2 亿千瓦	6%	接近目前法国核电两倍
中方案	20%	2.4 亿千瓦	12%	相当目前美国、法、苏三国核电之和
高方案	30%	3.6 亿千瓦	18%	超过目前全世界核电总和

从以上预测可以看出,一方面由于我国是一个人口大国,对未来能源需求量十分巨大,即使裂变核电发展达到高目标,其在一次能源中的比例也只有 18%左右,仅能起到重要补充的作用;另一方面,从绝对数量看,我国未来核电发展规模将是空前巨大的,其高目标将超过目前全世界核电总和(全世界目前运行 482 座核电站,净电功率为 3.1 亿千瓦)。由此可见,我国这样一个人口大国,解决能源问题是如何艰巨。纵观国际上核电发展的经验及趋势,考虑到我国国情,使核能成为 21 世纪我国能源的重要补充,然后进一步过渡到主要能源,这才是唯一的出路。所以,如何发展核能将是一个非常审慎的战略问题。

1.2 能源的科学预测

1.2.1 化石能源

化石能源一直是人类主要的一次能源(现在的火力发电厂及工业都要用到煤,交通运输主要用到石油)。化石燃料存量有限,随着社会的发展,能源消耗将急速上升。预期 200 多年以后,整个人类将面临一次能源枯竭的严重问题。此外,使用化石燃料还将对环境造成严重污染,而且化石矿物燃料是宝贵的化工原料,仅用作燃料,将它消耗殆尽,还造成严重污染,这是自然资源极不合理的使用和浪费。人类在其发展过程中尤其是工业革命后,逐渐地过度依赖地球上千万年慢慢累积的石油、煤、天然气等矿物燃料。除了燃烧产生的二氧化碳带来的温室效应、酸雨等问题外,在短短的二三百年内把地球上宝贵的矿物燃料挥霍净尽,对我们的子孙孙确实是很不负责任的事。化石能源的利用,当前主要是集中在发展高效、低耗、低污、安全的动力设备,这方面是工业部门研究的重点。

1. 石油和天然气

据石油部门 1993 年完成的全国油、气资源预测评价^[1,3,4],石油总资源量为 940 亿吨,天然气总资源量为 38 万亿立方米。1995 年末,累计探明储量,石油 174.0 亿吨,天然气 2.25 万亿立方米;已动用可采储量 133 亿吨,天然气 1.35 万亿立方米;剩余可采储量,石油 15.6 亿吨,天然气 7479 亿立方米。

石油资源最多的是渤海湾、松辽和塔里木盆地,资源量分别为 188.4、128.9 和 107.1 亿吨。1995 年石油资源的探明程度为 18.5%,探明储量 80%在东部地区。石油最终可采储量约 130 亿吨。

在 940 亿吨石油总资源量中,常规资源占 56.5%,非常规资源占 43.5%,其中低渗透油和重质油分别占 22.4%和 21.1%。此外,还有大量的沥青、油砂和油页岩,其中油页岩资源量达 4000 亿吨,探明储量 332 亿吨,相当于 12.5 亿吨原油。

天然气资源最多的是塔里木盆地、陕甘宁和四川盆地,资源量分别为 8.39、7.36 和 4.18 万亿立方米。1995 年天然气探明程度仅为 5.9%。最终可采储量约(7~10)万亿立方米。

除常规天然气外,还有煤层气、致密岩层天然气、水含气等非常规天然气。全国煤层气总资源量估计达(17~35)万亿立方米,其中鄂尔多斯盆地占 40%,山西沁水盆地占近 1/4。目前,正在进行大规模商业性开发的前期工作。

2. 煤炭

据 1997 年完成的全国第三次煤炭资源预测与评价,中国 2000m 深度内的煤炭资源总量为 5.57 万亿吨,1000m 深度内为 2.86 万亿吨。1996 年末,全国煤炭保有储量为 10024.9 亿吨,其中尚未利用的精查储量为 7469 亿吨,相当于世界能源委员会定义的探明可采储量为 1145 亿吨。煤炭保有储量在各区的分布如表 1.2 所示。

表 1.2 中国煤炭资源的预测与评价

地区	合计	生产在建矿井保有		停采停建闭坑保有		尚未利用保有		
		精查	非精查	精查	非精查	精查	非精查	普查
全国	10024.9	1373.4	1138.1	32.2	12.2	893.1	1438.4	5137.5
华北	5000.2	633.9	446.7	12.9	4.3	502.1	948.3	2452.1
东北	306.6	126.7	19.2	3.9	0.4	26.9	12.4	117.2
华东	537.7	218.6	36.7	1.8	0.8	75.7	46.1	157.9
中南	291.5	93.8	15.7	3.7	2.7	51.3	48.4	75.9
西南	863.3	122.9	52.1	4.8	2.8	103.3	180.3	397.0
西北	3025.6	177.5	567.7	5.1	1.2	133.8	202.9	1937.4

来源：国家计委交能司. 中国能源白皮书. 北京：中国物价出版社,1997^[3]

中国煤炭资源中高硫、高灰煤较多。原煤灰分通常在 20%，洗选后可降至 10%。灰分小于 110% 的煤炭只占全国保有储量的 20%。在保有储量中，高硫煤占 1/3，主要集中在西南和中南地区。

中国的煤炭资源分布在除上海市以外的所有省市自治区，但 93% 分布在秦岭—大别山以北，92% 分布在大兴安岭—雪峰山以西。煤炭资源主要集中在新疆、内蒙、山西、陕西和贵州等省（区），这里共占全国总资源量的 82.67%，其余地区仅占 17.33%，沿海发达地区更少。这正好与中国的经济地理及出口海港呈反方向分布，不利于煤炭运销，造成了中国“北煤南运”、“西煤东调”的煤炭运销格局。可以认为，在大兴安岭—雪峰山一线以东，煤炭资源的潜力已基本挖尽，今后的储量和产量都难以增加，煤炭生产中心必然要逐步西移。东部各省区内部煤炭供应缺口越来越大，省区之间煤炭调拨量逐年增长，特别是从“三西（晋、陕、蒙）”基地调出的煤炭会越来越多。

中国的煤炭资源中适合露天开采的储量很少，只有 641 亿吨，仅占保有储量的 6%，主要分布在内蒙、山西、云南、新疆、黑龙江和辽宁等 6 省区。

煤炭保有储量中一半以上为暴露或半掩盖煤田，煤层埋藏深度小于 300m 的储量约占 30%，埋深在 300~600m 的约占 40%，埋深在 600~1000m 的约占 20%。西部煤层埋藏较浅；东部较深，表土层很厚，地压较大，有些矿区还存在流沙层，建井和开采比较困难。

就开采地质条件而言，条件较好的主要集中在“三西”规划区和宁夏、甘肃、新疆、贵州等省区，山东、河南、河北、安徽和徐州的多数煤田开采条件也较好。全国受含水层威胁的和在“三下”（建筑物下、水体下、铁路下）埋藏的煤田数量可观，其开采技术非常复杂。全国一部分煤田，尤其是长江以南的煤田，煤层稳定性差且较破碎，地质构造复杂，煤层倾角较大，顶板不易管理，瓦斯涌出量高，不适合综合机械化开采。

由于存在上述开采条件，所以中国煤炭以井工开采为主，矿井最大开采深度 1160m。1992 年国有重点煤矿平均开采深度约为 370m（美国仅为 70m，德国为 935m）。厚度小于 1.3m 的薄煤层和大于 3.5m 的厚煤层的产量比重分别为 8.3% 和 43.3%；倾角大于 12° 的煤层的产量比重为 43.7%，其中大于 45° 的急倾斜煤层占 3.7%。1996 年，国有重点煤矿露天开采原煤产量占 6.2%。

中国煤炭的自然发火倾向较大，在陕北、新疆、辽宁阜新和宁夏汝其沟等地都发生过自燃，新疆一些矿区经常在燃烧。

总之，中国的煤炭资源主要分布在经济不发达地区，自然地理和气候条件恶劣，交通也不太方便，有的地区还存在缺水问题。东部煤田地质条件较差，但地理条件好。西部煤田地质条件好，但自然环境和地理条件不利，相当一部分煤田处在沙漠地带，生态环境异常脆弱，环保问题尤为突出。只有中部地区，特别是山西，资源丰富，煤田地质条件较好，其煤炭产量和调出量居中国榜首，但缺水问题有待解决，交通条件仍有待进一步改善。

3. 水能资源

中国有居世界第一的水能资源蕴藏量。全国的水能资源理论蕴藏量为 6.76 亿千瓦，年发电量为 1.92 万亿千瓦·时。其中，可开发的装机容量为 3.78 亿千瓦，年发电量为 1.92 万亿千瓦·时，占全球可开发水

能资源总量的 16.7%。可开发的装机容量中,小水电资源(总装机容量 2.5 万千瓦及以下的电站)为 7600 万千瓦。

中国的水能资源虽然丰富,但分布极不均匀,而且远离东部的负荷区,输送距离长,再加上地质构造复杂,开发难度大,所以中国的水能资源开发程度低。1990 年,中国水能资源开发利用程度只有 5.6%,比发达国家低得多,如美国、加拿大和法国的利用程度分别为 61.2%,49.4%和 96.7%。也比有丰富水能资源的发展中国家低,如 1990 年巴西和印度的水能资源利用程度分别为 17.9%和 12.8%。

由于中国西部地区河流落差大,南部地区径流丰富,中国水能资源主要分布在西南地区。在可开发水能资源中,西南地区占全国水能资源总量的 67.9%,其次是中南地区,占 15.4%,西北地区占 9.9%,而经济相对发达的华东地区占 3.6%,东北地区占 2.0%,华北地区占 1.2%。

1.2.2 再生能源

包括风能、太阳能、潮汐能、生物能,这也是近期发展的另外一个主要方面。但它们受地域限制(风能、潮汐能)或受储能环节限制(太阳能储能环节投资高),生物能主要在农村。应尽量发挥它们的最大作用,以减轻对主要能源的压力。

1. 风能

中国地处亚洲大陆东南部,季风盛行,有较丰富的风能资源。中国可开发的风能资源估计为 250GW,主要分布在两大风带。沿海风带有效风能密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上,有效风力出现百分率达 80%~90%;北部风带(新疆、甘肃至内蒙古一线)风能密度在 $200\sim 300\text{W}/\text{m}^2$,有效风力出现在 70%左右。

根据风能资源,可能发展 100 千瓦以上大型风力机的地区,只占全国总面积的 1%左右;可能发展 10 千瓦级风力发电机的地区占全国总面积的 10%;可能发展 1 千瓦级小型风力机的地区则占全国总面积的 40%以上。

2. 太阳能

中国有丰富的太阳能资源,2/3 以上的地区的年日照在 2000h 以上,各地的太阳能年辐射总量约为 $335\sim 837\text{kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$,其平均值是 $590\text{kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$,全年陆地接受的太阳辐射能约为 $5 \times 10^{22}\text{J}$ 。从分布来看,西部和北部的西藏、青海、新疆、宁夏、甘肃等地的太阳能辐射总量很大,四川、贵州最少。

3. 潮汐能

中国内地的海岸线总长 1.8 万千米,根据 1982 年潮汐能资源普查统计,可开发的潮汐资源装机容量为 2098 万千瓦,年发电量为 580 亿千瓦·时。

1.2.3 地热能

据不完全统计,至今已经发现的地热露头点,包括温泉、热水井及矿坑热水等约 3000 余处。其中,高温水热系统数量不多,约 175 处,主要分布在西藏、云南和台湾。全部地热井、泉全年的天然放热量为 $1.04 \times 10^{20}\text{J}$,折合 35.6 亿吨标煤。

地质部门对 30 个省、市、区地热资源勘探计算的结果是:已查明的地热资源折合 31.6 亿吨标煤,推测的地热资源折合 117 亿吨标煤,远景地热资源折合 4480 亿吨标煤。

地热能的利用目前主要有两大方面:一是利用地热气、水来发电。地热温度在 150°C 以上,用来发电才能有经济性。低于这个温度的地热,用于农业和住宅采暖以及温泉淋浴等。

1.2.4 生物能

中国的生物质能资源主要包括三个部分。第一部分是,农作物秸秆中作为燃料使用的部分。按 1992 年农产品产量计算的秸秆数量为 5.50 亿吨,其中有 50%作为燃料使用,即 2.25 亿吨,按含热量折合 1.30 亿吨标煤。第二部分是,各类树木合理采伐可作为薪材使用的部分。按林地面积及林种折算,一年的薪材使用

量为 1.4 亿吨,折合标煤 8000 万吨左右。但 1992 年薪材的实际使用量为 1.93 亿吨,折合成 1.1 亿吨标煤,超过合理采伐量 5300 万吨,这是造成森林破坏和水土流失的重要原因之一。第三部分是,人畜粪便及有机物废水,按人口及牲畜量推算,一年有人畜粪便干物质近 3 亿吨,其发热量相当于 1.3 亿吨标煤。目前农牧区直接燃烧干物质(700~800)万吨,还有少量来制取沼气,一年约计 12 亿立方米。这些只相当于资源量的 3%,其余 97%均作为肥料,施入农田,或作为废物排入江河。

综上所述,中国拥有丰富的常规能源和新能源,但能源分布不平衡。

从常规能源的总储量来看,中国无疑是世界上拥有丰富能源资源的国家之一。中国的常规能源资源占世界总量的 1/10 以上。中国有居世界第一位的水能资源蕴藏量,居世界第三位的煤炭探明储量,居世界第十位的石油探明储量和世界第十八位的天然气探明储量。按煤炭、石油、天然气和可开发水能资源的总量折合成标煤是 1551 亿吨标煤,而全世界是 1.45 万亿吨标煤,占 10.7%。但由于中国人口众多,能源资源的人均占有量只有 135 吨标煤,而世界人均是 264 吨标煤,中国是世界人均的 51%,由此而产生的一次能源构成的假想方案(见图 1.5)。

	单位	2000	2020	2050		
一次能源总消费	亿吨标煤	14.4	25	40		
石油	亿 吨	2.0	2.5	1.2		
	亿吨标煤	2.86	3.58	1.71		
天然气	亿立方米	300	1000	1600		
	亿吨标煤	0.4	1.33	2.13		
水电	亿 千 瓦	0.83	1.74	2.43		
	亿 度	2905	6094	9720		
	亿吨标煤	1.0	2.1	3.1		
新能源	亿吨标煤	0	0.1	1.0		
核能	亿 千 瓦	0.06	0.4	1.2	2.4	3.6
	亿 度	390	2600	7800	15600	23400
	亿吨标煤	0.14	0.91	2.5	5.0	7.5
煤炭	亿 吨	14.0	23.8	41.38	37.88	34.38
	亿吨标煤	10.0	17.0	29.56	27.06	24.45

图 1.5 一次能源构成的假想方案

中国还有其他的不利因素:

- (1) 以煤为主的能源资源结构,油气比重只占 4%,而世界是 25.3%。
- (2) 能源资源分布不理想。煤炭、石油资源集中在北方;水力资源偏于西南;而经济相对发达的东南沿海地区能源资源很少。其结果是一方面带来了严重的环境污染,另一方面加大了交通运输压力。

1.3 环 境 污 染

中国的空气污染以煤烟型为主,主要污染物是二氧化硫和烟尘。1997 年,二氧化硫排放总量为 2346 万吨,95%是由于能源消费引起的;烟尘排放总量为 1873 万吨,其中,70%以上是由于能源消费引起的;工业粉尘排放量为 1505 万吨。

因主要由二氧化硫排放引起的酸雨污染进一步加重,1997 年,全国降水年均 pH 值范围在 3.74~7.79 之间。降水年平均 pH 值低于 5.6 的城市有 44 个,占统计城市数的 47.8%,其中 75%的南方城市(长江以