



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

零排放动力循环

Zero Emissions Power Cycles

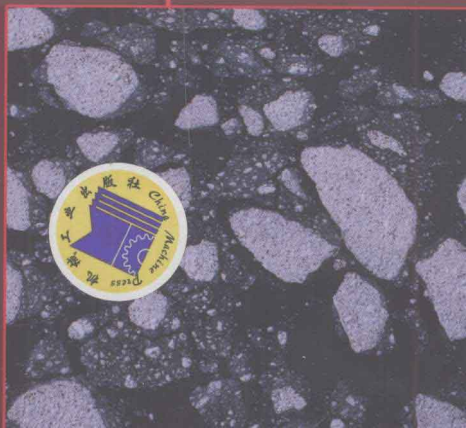
(乌克兰) E.Yantovsky

(波兰) J.Górski 著

(乌克兰) M.Shokotov

段立强 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

零排放动力循环

(乌克兰) E. Yantovsky

(波兰) J. Górski 著

(乌克兰) M. Shokotov

段立强 等译

机械工业出版社

本书介绍了不同类型的 CO₂ 零排放动力循环, 包括带有外部供氧的 CO₂ 零排放联合循环、带有富氧燃烧的零排放活塞发动机循环、利用光合作用的太阳能转化和零排放的富氧燃烧循环等; 并分析和对比了各循环的特点和性能。还介绍了组成这些循环的关键集成技术, 如氧离子传输膜以及用于分析循环所用的各种辅助计算工具等。

本书可以作为高等工科院校与能源动力系统相关专业的在校本科生, 从事 CO₂ 减排研究的硕士生、博士生及相关工程技术人员参考用书。

Zero Emissions Power Cycles/by E. Yantovsky, J. Górski, M. Shokotov/ISBN: 978-1420087918

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书版权登记号: 图字 01-2010-0220 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

零排放动力循环/ (乌克兰) 杨托科夫斯基 (Yantovsky, E.) 等著; 段立强等译. —北京: 机械工业出版社, 2011. 7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Zero Emissions Power Cycles

ISBN 978-7-111-35336-2

I. ①零… II. ①杨…②段… III. ①零排放 - 动力工程 - 循环 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 138819 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: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁 版式设计: 霍永明

责任校对: 李秋荣 封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 16.75 印张 · 330 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-35336-2

定价: 78.00 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

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010)68326294

销 售 二 部: (010)88379649 教材网: <http://www.cmpedu.com>

译者序

进入 21 世纪, 人类遭遇到两大全球性的瓶颈问题: 一个是化石能源短缺问题; 另一个是环境恶化问题, 尤其是利用化石燃料排放的大量 CO_2 导致的温室效应问题越来越严重, 给全球生态环境、气候变化带来严重的危害。因此, 如何从各种燃烧化石燃料的动力系统中捕获和封存 CO_2 (CO_2 Capture and Storage, CCS) 甚至有效利用它, 即 CO_2 捕获利用和封存 (CO_2 Capture, Utilization, and Storage, CCUS), 无疑成为目前全球关注和研究的热点问题。鉴于此, 机械工业出版社及时引进了本书的英文原版, 可谓是契合了时代的需求。

本书共分 11 章, 第 1 章介绍了全球气候变化的原因及有争议的一些论点; 第 2 章介绍了捕获 CO_2 的各种方法及学者们提出的各种典型 CO_2 零排放动力系统; 第 3 章介绍了 CO_2 热物性以及带有外部供氧的 CO_2 零排放准联合循环系统; 第 4 章介绍氧离子传输膜特性以及化学链燃烧特点; 第 5 章介绍了不同类型用于不同功能集成氧离子传输膜采用富氧燃烧的 CO_2 零排放动力循环 (ZEITMOP); 第 6 章针对 ZEITMOP 循环以及关键单元氧离子传输膜进行了详细模拟分析; 第 7 章介绍了带有富氧燃烧的零排放活塞发动机以及采用不同燃料时的经济性能; 第 8 章介绍了利用光合作用的太阳能转化系统和零排放富氧燃烧, 尤其藻类养殖利用等; 第 9 章介绍一些用于计算的常用工具以及涉及的相关概念等; 第 10 章介绍了作者给都柏林理工大学给学生和教师作的两次讲座内容; 第 11 章作为全书的结束语。

本书理论联系实际、内容丰富、图文并茂、叙述详细, 介绍了不同类型的 CO_2 零排放动力循环类型、特点以及组成这些循环所需要的主要集成技术, 包括集成生物质能及太阳能利用的新方法和途径。为人类应对全球温室效应, 大幅减排 CO_2 提供可行的途径。本书可以作为高等工科院校与能源动力系统有关专业的在校本科生, 从事 CO_2 减排研究的硕士生、博士生及相关工程技术人员的参考用书。

本书由华北电力大学段立强副教授负责全书的译校、审校、定稿及排版。

本书共 11 章, 各章初译的执笔人为: 第 3、4 章由黄科薪译; 第 5、6 章由杨阳译; 第 7 章由张素华译; 第 8、9、10 章由李冉、潘翔及陈新明译; 第 1、2、11 章由段立强译。以上译者除段立强为华北电力大学的教师外, 其余人员均为华北电力大学的研究生。

需要说明的是, 本书译者是在忠实于原书的基础上翻译的, 书中观点并不代表译者本人及其所在单位的观点。我们相信, 本书的翻译出版将对基于化石燃料系统减排 CO_2 具有重要的指导和参考作用。

由于译者水平及时间有限，译文中的错误和不妥之处在所难免，敬请各位专家、读者给予批评指正。

译者

2011 年 7 月

前 言

本书的主要思想开始于早期与 David A. Frank-Kamenetsky、John O' M. Bockris 和 Gustav Lorentzen 教授们的讨论。

目前本书编辑了从 1991 年作者单独发表或与同事（包括 J. A. McGovern、J. W. Górski、M. K. Shokotov 和 N. N. Akinfiev 教授们）共同发表的文章。我衷心感谢他们允许我整合并采用他们的研究成果。这些文章都列在了参考文献中。

在 21 世纪初，采用在材料、燃烧技术、冷却技术领域的发展以及创新性的循环手段来实现基于化石燃料的无污染发电是可能的。美国和欧洲已经提出了一些替代的方法来实现基于化石燃料的无污染发电，并且这些方法也在一直在不断更新和改进中。为了对教学界、工业界以及管理人员有潜在的好处，本书也描述和评估了目前存在的各种方法。本书并不详细介绍所谓的可再生技术，如光伏发电（太阳能电池）、风力机、潮汐能利用系统或地热系统，因为这些系统并不采用燃烧化石燃料方式发电。本书的焦点集中在燃用化石燃料且无污染的发电系统。目前已经涌现出各种各样的替代技术，我们在这里力图介绍这些技术以及它们的优缺点。本书中的主题以及所描述的相关技术在不断地发展，但是这些系统的基本的概念以及运行特性并不会在未来几年发生重大变化。我们坚信选择在这个时机记录和描述一些新出现的技术是合适的。为了减少排放，八国集团领导人峰会设立了在 2050 年前减排 50% 的目标，涉及数万亿美元资金，会带来建造数百座零排放电厂的重大商机。

本书第 3 章和第 6 章由 Jan Górski 编写，第 7 章和第 9.3 节由 Mykola Shokotov 编写。

我衷心感谢清洁能源系统公司的主要研究人员 R. Anderson 博士和 S. Doyle 博士在编辑本书前两章给予的大力帮助以及图书出版商给予的精神上的支持。

E. Yantovsky

德国亚琛

作者简介

E. Yantovsky 博士于 1929 年出生在乌克兰的哈尔科夫。他的主要研究领域为磁流体发电机和泵、热泵、带有膜分离氧用于富氧燃烧的零排放电厂、能量和烟流以及烟经济学。Yantovsky 教授毕业于哈尔科夫航空学院，之后到 Taganrog 工作，致力于制造水上飞机。在 1953 年，他又回到哈尔科夫并且在一个大型电子厂工作，他负责检测电机中空气和热流。他作为大型同步电动机的设计者工作的时间并不长。1959~1971 年，他成为哈尔科夫磁流体动力学实验室的主任，在那里制造并检测了磁流体液态金属发电机，该发电机意图为到火星的宇宙飞船提供动力。Yantovsky 教授作为资深研究员于 1971 年加入了 Krjijanovski 能源学会，并且在 1974 年开始为工业动力学学会工作。1986~1995 年，Yantovsky 教授是俄罗斯科学院能源研究所的主要研究人员。他也去欧洲和美国进行了多次访问讲学。作为作者，Yantovsky 教授出版了 6 本书，并用英语发表了近 40 篇论文（包括 1991 年的“无废气排放的燃用化石燃料电厂热力学分析”以及 2000 年的“可再生甲烷的定义”）。他目前住在德国的亚琛。



（来源于 21 世纪创始人，Intern, Biogr. 中心，Cambridge, 661 页）

Jan Górski 博士于 1945 年出生于波兰的 Letownia。他是应用热科学以及能量转换系统的专家。他对热力学和流量过程模拟中的浓密气体现象问题尤其感兴趣。在 30 多年的职业生涯中，他作为一名燃气轮机设计工程师工作在航空工业。从 1974 年开始，他成为 Rzeszow 技术大学机械与航空系以及城市环境工程系的一名教师和副教授。他是 EUROMECH 的一名会员，也是波兰科学院两个委员会的成员。Gorski 博士在 1982 年作为一名访问教授工作于墨西哥国立自治大学，并在欧盟许多国家做过讲学交流。



Mykola Shokotov 于 1926 年出生于乌克兰的 Lugansk。在 1943~1945 年期间，

他参加了第二次世界大战，包括柏林风暴战役。在1950~1955年期间，他进入了哈尔科夫理工学院，接下来的3年他在活塞发动机厂作为涡轮机和增压器的设计师。他在哈尔科夫理工学院内燃机系工作了40年，历任讲师、副教授和教授。在教学的同时，他也参与了用于运输和工业柴油机的科学研究。他多年担任一家大型哈尔科夫制造厂的顾问，该厂主要生产用于运输工具的柴油机。Shokotov教授已经在技术杂志上发表约200篇论文并且出版了6本书。从1998年起，他居住在德国。



缩 略 语 表

AZEP	Advanced Zero Emission Power	先进的零排放发电
BFW	Boiler Feed Water	锅炉给水
C	Compressor	压缩机
CAR	Ceramic Autothermal Recovery	陶瓷自热回收
CC	Combustion Chamber	燃烧室
CES	Clean Energy Systems, Inc.	洁净能源系统公司
CHP	Combined Heat and Power	热电联产
COOPERATE	CO ₂ Prevented Emission Recuperative Advanced Turbine Energy	控制 CO ₂ 排放的回热型先进透平能源
CW	Cooling Water	冷却水
DOE	Department of Energy	美国能源部
EG	Electric Generator	发电机
EM	Electric Motor	电动机
EOR	Enhanced Oil Recovery	驱油回收
ECMB	Enhanced Coal Bed Methane Recovery	增强煤层甲烷气回收
ESA	European Space Agency	欧洲航天局
FT	Fuel Tank	燃料箱
GHG	Green House Gas	温室气体
HE	Heat Exchanger	热交换器
HP	High Pressure	高压
HPT	High Pressure Turbine	高压透平
HTT	High Temperature Turbine	高温透平
HRSG	Heat Recovery Steam Generator	余热汽轮发电机
HX	Heat eXchanger	热交换器
IEA	International Energy Agency	国际能源署
INJ	Fuel Injector	燃料注入器
IP	Intermediate Pressure	中压
IPT	Intermediate Pressure Turbine	中压透平
IGCC-MATiant	Integrated Gasification Coal Cycle MATiant	整体煤气化联合循环 MATiant

ITM	Ion Transport membrane 离子传输膜
ITMR	Ion Transport membrane Reactor 离子传输膜反应器
L	Luft (air) 空气
LHV	Lower Heating Value 低位热值
LP	Low Pressure 低压
LPT	Low Pressure Turbine 低压透平
MATANT	Cycle designed by MATHieu and IANTovski 由 MATHieu 和 IAN-Tovski 提出的循环
MCM	Mixed Conducting Membrane 混合导电膜
MHX	Multi-Heat-eXchanger 多级换热器
MPT	Mean Pressure Turbine 中压透平
NG	Natural Gas 天然气
OITM	Oxygen Ion Transport Membrane 氧离子传输膜
P	Pump 泵
PE	Piston Engine 活塞发动机
R	Radiator 辐射器
RH	Reheater 再热器
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell 固体氧化物燃料电池
TC	Air Turbocompressor 空气透平压缩机
TIT	Turbine Inlet Temperature 透平入口温度
WS	Water Separator 水分离器
ZECA	Zero Emission Coal Alliance 零排放煤联盟
ZEMPES	Zero Emissions Membrane Piston Engine System 零排放膜式活塞发动机系统
ZENG	Zero Emission Norwegian Gas 零排放挪威气循环
ZEITMOP	Zero Emissions Ion Transport Membrane Oxygen Power 零排放离子传输膜富氧燃烧发电
ZEPP	Zero Emission Power Plant 零排放电厂

目 录

译者序	
前言	
作者简介	
缩略语表	

第 1 章 充满争议的未来	1
1.1 介绍和预测	1
1.2 气候变化的原因	4
1.3 有争议的观点	5
1.4 在零排放电厂 (ZEPP) 中不可避免的 CO_2 捕获	7
1.5 碳氢燃料的起源	9
1.6 由 CO_2 和正硅酸铁形成甲烷的反应热力学	13
1.7 紧迫的任务——捕获	14
参考文献	15
第 2 章 零 CO_2 排放循环回顾	17
2.1 碳捕获方法	17
2.2 早期的尝试	19
2.3 工业界首次关注	21
2.4 后续的进展	24
2.5 集成氧离子传输膜的 ZEPP 循环	31
2.6 零排放机动车循环——主要的部分 (见第 7 章)	39
2.7 走向零排放工业	40
2.8 一篇重要的论文	42
2.9 一些额外的评论	43
参考文献	66
第 3 章 带有外部供氧的 CO_2 零排放准联合循环	71
3.1 CO_2 ——热力学特性, 纯 CO_2 及混合物	71
3.2 气体混合物	76
3.3 实际气体条件下压缩机和透平效率	78
3.4 纯 CO_2 作为工质的零排放动力循环的详细模拟	80

参考文献	87
第 4 章 氧离子传输膜	90
4.1 能斯特效应	90
4.2 用于 ZEPP 的氧离子传输膜反应器	93
4.3 化学链燃烧	97
参考文献	99
第 5 章 ZEITMOP 循环及其变形	101
5.1 带有独立 ITMR 且燃烧煤粉的 ZEITMOP 循环	101
5.2 将 ITMR 与燃烧室集成到一起的燃气的 ZEITMOP 循环	102
5.3 一座带有供热和制冷功能的零排放锅炉房	104
5.4 一个采用透平的交通运输动力单元	106
5.5 一个零排放航空发动机	107
5.6 一个无烟膜式加热器	109
5.7 一个零排放朗肯循环	109
5.8 整合 ITM 燃烧室的锅炉	109
参考文献	111
第 6 章 ZEITMOP 循环的详细模拟	113
6.1 CO_2 作为工质的透平机械	113
6.2 ZEITMOP 循环分析	117
6.3 将燃烧室和 ITM 反应器集成到一起的 ZEITMOP 循环	122
6.4 氧传输膜装置的模拟	124
6.5 结果和讨论	126
参考文献	129
第 7 章 带有富氧燃烧的零排放活塞发动机	131
7.1 罪魁祸首	131
7.2 零排放膜活塞发动机概述	133
7.3 带有高氧气浓度的 ZEMPES	134
7.4 增加热化学回热器 (TCR)	136
7.5 用于活塞发动机的膜反应器	138
7.6 零排放涡轮柴油机	140
7.7 用于涡轮柴油机的膜反应器	142
7.8 应用实例	144
7.9 用于涡轮柴油机的高温热交换器	145
7.10 采用不同燃料 ZEMPES 的经济性	146

7.11 带有变压吸附分离氧气反应器的活塞式发动机	150
7.11.1 提出的流程图	150
7.11.2 从空气中分离氧	153
7.11.3 计算结果	154
7.12 增强石油回收 (EOR) 的三联供系统	156
参考文献	161
第8章 利用光合作用的太阳能转化和零排放的富氧燃烧	164
8.1 生物质燃烧——这是一种可持续的能源吗?	164
8.2 藻类养殖和利用的短暂历史	166
8.3 什么是石莼?	167
8.4 海藻用作一种可再生燃料	171
8.5 以色列和意大利的大海藻养殖	174
8.6 能量流密度	174
8.7 动力系统展望	175
8.8 汽化	179
8.9 海水淡化	179
8.10 与1991年的首个SOFT版本的对比	180
参考文献	181
第9章 相关的计算工具	183
9.1 什么是烟?	183
9.1.1 自然的问题	184
9.1.2 山地自行车	185
9.1.3 瀑布	186
9.1.4 卡诺类比	187
9.1.5 热摩擦	188
9.1.6 一个警告	189
9.1.7 橡胶气球	190
9.1.8 烟是什么?	191
9.1.9 参考状态	193
9.1.10 烟的单位	194
9.1.11 烟效率	195
9.1.12 烟损失在哪儿?	195
9.1.13 烟的流向	196
9.1.14 来自海洋的烟	197
9.1.15 热量的归宿	199
9.1.16 神奇的数字	201

9.2 烟经济学	202
9.2.1 烟与货币	203
9.2.2 烟经济学的主要指标	204
9.2.3 投入烟模型	205
9.2.4 直流导电体	206
9.2.5 穿过壁面的传热	206
9.2.6 热绝缘的优化	208
9.3 活塞发动机的热化学回热器的烟转换	209
9.3.1 烟计算的例子	209
9.3.2 TCR 中的过程	211
9.3.3 烟平衡	212
9.3.4 计算结果	215
9.4 流通学作为一个中间文件	216
9.4.1 散废形式方程	216
9.4.2 作为负熵的信息	218
9.4.3 热电势	220
9.4.4 广义摩擦理论	221
9.4.5 一些方程式	221
9.4.6 冲量守恒	222
9.4.7 能量守恒	223
9.4.8 烟流矢量	224
9.4.9 传导、对流和辐射波传递	224
9.4.10 信息电效应期望	226
9.5 动力循环的帕累托最优解	227
9.5.1 坐标框架	227
9.5.2 投资和流动消耗	229
9.5.3 烟最小化	230
9.5.4 成本和污染优化	230
9.5.5 帕累托优化过程	231
9.5.6 实例说明	232
参考文献	234
 第 10 章 给都柏林理工大学学生和教师的两次讲座	237
10.1 禁止? 放纵? (关于人类呼吸权和全球变暖问题)	237
10.2 一个机械工程师的命运 (E. Yantovsky 教授于 2003 年 10 月 30 日 在都柏林理工大学的讲座)	241
 第 11 章 结束语	249

第1章 充满争议的未来

1.1 介绍和预测

能源政策充满争议。一些人相信化石能源很快会枯竭，并且断言我们需要利用核能和可再生能源（太阳能、风能、地热能以及潮汐能），尤其是考虑到已经检测到的全球变暖形势。全球性的变暖是由地球空气的温室效应导致的。有人认为全球变暖主要是由于从电厂和汽车燃烧产物的排放导致的。也有人包括本书作者认为化石燃料（天然气和煤）是丰富的，至少可以满足本世纪的用能需求，而核能是危险的，并且德国政府永久关闭所有核反应堆的决定为世界上其他国家树立了一个先例。由于它们的高成本，可再生能源并不能主导本世纪的能源供应。

国际能源署（IEA）预测的2030年世界能源结构分布如图1-1所示，该图说明了在能源供应上预测的能源结构变化趋势。

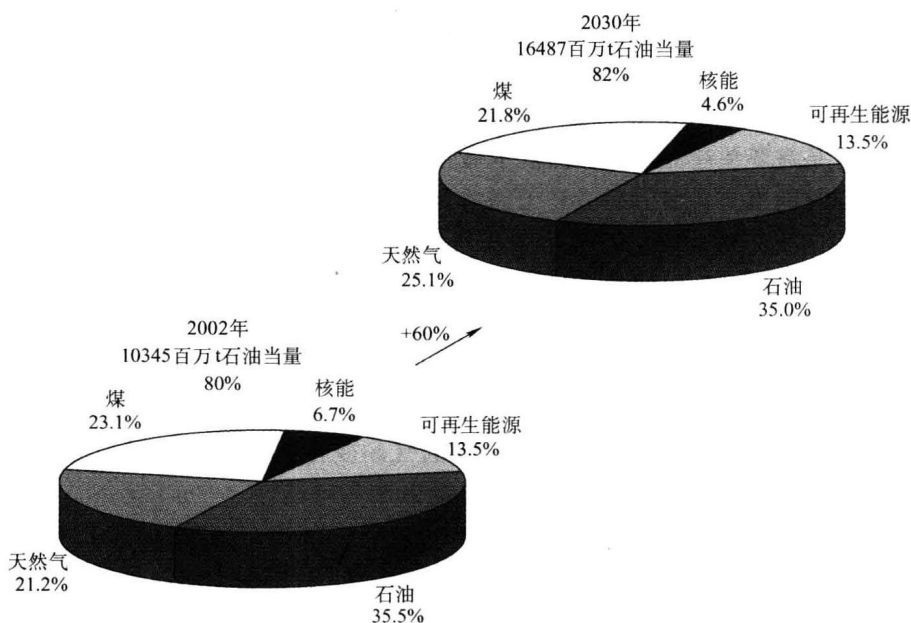


图 1-1 国际能源署在 2004 年公布的关于 2030 年世界能源结构分布预测
(数据来源于世界能源展望, 2004)

IEA 的预测期望核能份额大幅下降, 可再生能源所占比例保持不变, 而化石燃料的比例会增加 2%, 从 2002 年的 80% 增加到 2030 年的 82%。

预测的碳氢燃料在能源结构中的比例会增加, 这样的结论对于两种不可调和的争论非常重要: “枯竭论”者和“非枯竭论”者。前者确信世界的石油资源很快会被用尽, 并且天然气也会在一些年后用完, 若真如此, 会导致严重的经济问题, 甚至可能恶化到为争夺石油资源发生战争。这种观点的关键点在于是否有一个石油生产量的峰值点存在, 之后生产量会逐渐下降。石油产量随时间的变化曲线可以用钟罩形曲线来描述。

更专业的“枯竭论”者群体积极地在大众媒体和大量的互联网站(如 www.energy-bulletin.net 和 www.lifeafter-theoilcrash.net) 宣传他们的观点。他们的反对者“非枯竭论者”则认为由于不断减少的资源, 石油产量的峰值已经被预测过许多次, 并且所有的预测都是错误的。石油资源原则上是有限的, 但储量相当巨大。天然气(主要成分是甲烷)在化学结构上远比石油简单, 根据天然气形成的非生物成因理论, 它可能在地球的深处自然产生。在严寒星球发现的大量液体甲烷为“非枯竭论”提供了有力的佐证。最激进的“非枯竭论”者甚至将“枯竭论者”视为“职业悲观主义者”。

世界上最大的石油公司 Exxon Mobil 公司, 在他们的网站(www.exxonmobil.com)上断言: 仍然可以得到丰富的石油资源, 工业、政府部门以及消费者尽可分享, 还不存在石油产量峰值。

考虑到 IEA (在能源领域最权威的国际组织) 的预测, 作者认为碳氢燃料(包括煤)在 21 世纪将是最主要的燃料。这意味着继续利用煤的主要障碍是空气污染, 这才是需要关注的真实原因。本书介绍了制止污染的各种可选择途径。

全球变暖的事实目前似乎已经无需质疑, 它确实存在, 不仅可精确地测量到, 而且有一些证据, 如极地冰的融化以及其他的气候事件, 都显示全球气温正在上升。关于这个问题已经很清楚, 目前的争论在于针对这个问题做出的合适的回应以及解决措施。这个争论就产生了如下两个问题: ①由谁来负责? ②该怎么办?

对于第一个问题的回答, 至今最权威的是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC), 该委员会由世界气象组织(WMO)与联合国环境规划署(UNEP)联合建立。在其最近的报告中, IPCC 声称全球的气候变化“很可能”是由人类活动造成的, 这里的“很可能”, IPCC 认为有超过 90% 的可能性。

在 IPCC 第四次评估报告一开始, IPCC 主席 Rajendra Pachauri 博士声明如下: 如果人们考虑到人类活动正在影响气候系统的程度, 会出现不同途径的减少温室气体排放方法, 因为人们可以看到不作为的代价。

IPCC 预测的准确性是显而易见的。IPCC 2001 年报告预测在 5 年后温度将增加 $0.15 \sim 0.35^{\circ}\text{C}$ 。实际测得的温度增加值为 0.33°C , 非常接近 IPCC 预测范围的上

限。图 1-2 显示了在 2006 年的 IEA 报告中预测的世界能源需求，同样的预测如图 1-1 所示。

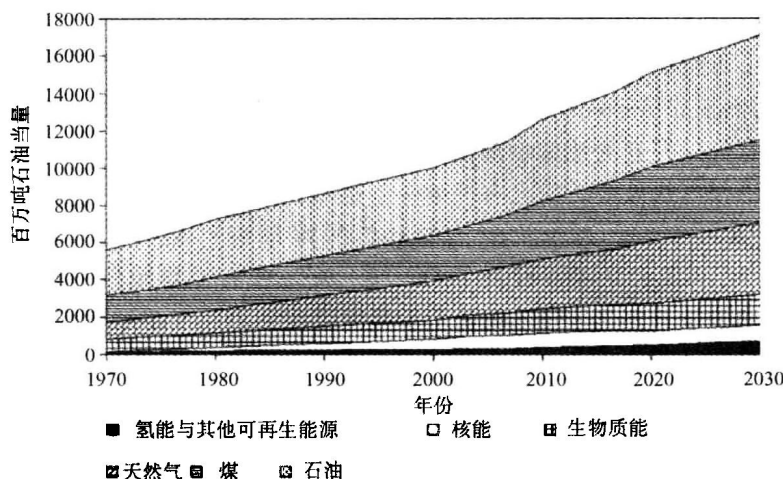


图 1-2 世界一次能源需求预测

[来源于世界能源展望 2006，国际能源署，经济合作与发展组织（OECD）国际能源署（IEA），2006]

作者认为化石燃料是能源的主体这一观点毫无疑问，并且以化石燃料为主的能源结果会维持数十年。这就提出了一个真正的问题：人们期望不断增加天然气和石油能源份额需求。

图 1-3 显示了世界电能生产历史值及到 2030 年的预测值，该图是更有意义的。

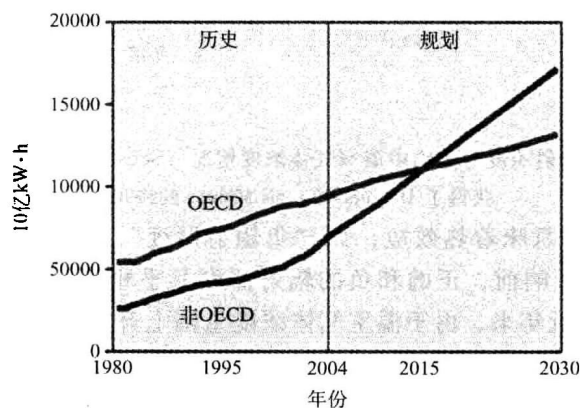


图 1-3 世界各地区电能生产的历史数据与预测数据 [来源：历史数据来自国际能源年鉴 2004，能源信息署（EIA），2006 年 5~7 月，(www.eia.doe.gov/iea)，预测数据来自全球能源市场分析系统，能源信息署（EIA）2007]