



页岩气

Shale Gas

肖钢 陈晓智 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



页岩气

Shale Gas

肖 钢 陈晓智 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大能源. 页岩气/肖钢,陈晓智编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.9
ISBN 978-7-307-16746-9

I. 大… II. ①肖… ②陈… III. ①能源—普及读物 ②油页岩—油田开发—普及读物 IV. ①TK01-49 ②P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 210122 号

责任编辑:余 梦

责任校对:邓 瑶

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:270千字

版次:2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16746-9 定价:860.00元(全九册)

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

“能源”，并不总是人们茶余饭后津津乐道的话题。说起“能源”，不少人会想到石油和国内三大石油公司的强大，还会联想到环境污染和全球气候变暖，但很少有人会想到“能源”本身，以及自己与“能源”的关系。然而，穷人类历史之长，尽人类足迹之远，仰人类文明之高，“能源”可谓与我们的生活息息相关，休戚与共，我们时时、处处都在利用它、依赖它。也正因为如此，“能源”反而更易被人们忽略，就像直到窒息时才想起原来我们是多么地依赖空气一样。日常生活中，我们不可避免使用能源，但很难挑选使用何种能源，无法影响或决定能源的来源、生产方式和价格，更无法通晓纷繁芜杂的能源技术及其发展方向。

时至今日，改变正在发生。随着资源、环境和气候问题的凸显，全球正在一步步迈入新一轮的能源变革，陈旧的能源开采、转化、利用方式正被逐渐淘汰，而新能源事业正悄然兴起，新资源、新技术、新理念层出不穷，一个崭新的时代即将到来，届时人与能源的关系都将发生改变。对于老百姓，不再是被动地接受能源，而是积极地创造，主动地分享，智能地消费。在中国，大多数人可能还无法想象很多丹麦人已经可以轻松地通过电脑软件，随时选择并任意切换不同来源、不同价格的电力供应；更无法想象不少西班牙人每天都会关注全国各地的天气预报，来估算自己在不同地方买下部分股权的太阳能电池能发多少电，并给自己带来多少利润；而美国人已经考虑在自己的车库里安装电网连接设备，用低谷电价给自己的电动汽车充电，并在用电高峰时送电上网，赚取差价……

能源问题，是全球性问题，中国亦不可避免。从某种意义上来说，经济高速增长的中国存在着更为突出的能源问题，而中国人并非后知后觉，也不会熟视无睹。几百年的落后使国人自省，30多年的改革让国人自信，对变革的必要性我们有着清醒的认知，但使我们困惑和迷茫的是怎样付诸实践，向哪些国家学习，优先发展何种能源，以怎样的力度发展，达到怎样的效果，以及能否在改革中保持和谐稳定。

曾经听过一则寓言：一只青蛙遇到了一条蜈蚣，青蛙自忖自己有四条腿，

跳跃自如，而蜈蚣却有无数条腿，竟也行走流畅。青蛙觉得很奇怪，便问蜈蚣道：“你有这么多条腿，那你行走时都是先迈哪条腿呢？”蜈蚣听了青蛙的问话，不由地思考了起来。不料，蜈蚣一思考，竟从此不会走路了。原来蜈蚣从不曾执着于这个问题，只是目视前方，一心向前，自然而然就朝前走了。自从考虑先迈哪条腿后，它忘记了向前看，只盯着自己的脚，结果无数条腿互相磕绊，从此再也迈不开步子了。我想，蜈蚣不久就会明白：孰先孰后并不重要，重要的是认准方向，明确目标，一心向前。中国的能源改革同样如此，我们百般纠结于眼前的主次和先后之时，是否已经找到并确定了改革的正确方向和终极目标呢？

本套书介绍的是高效的能源转化技术、方兴未艾的非常规能源勘探开发技术、梯级利用的节能技术和绿色低碳的可再生能源技术，共包括《中国式低碳》《生物能源》《固体氧化物燃料电池》《二氧化碳》《分布式能源》《天然气水合物》《页岩气》《海洋能》《煤层气》9分册。编者旨在通过本套书来唤起更多人对我国能源问题的思考，提升同仁们对未来能源事业的参与度和积极性。

十方来，十方去，共成十方事；万人施，万人用，同结万人缘。我诚望书中的一些知识能对有缘的读者提供小小的启发，并在此恭候各位的批评指正。

丛书主编 肖钢



肖钢博士简介

肖钢，英国皇家化学会院士（FRSC），中国国家“千人计划”特聘专家，美国Case Western Reserve University客座教授，现为能源央企首席科学家。著有《页岩气及其勘探开发》《天然气水合物综论》《新能源经济引领新经济时代》《低碳经济与氢能开发》《大规模化学储能技术》《分布式能源综论》《还碳于地球——碳捕获与封存》《燃料电池技术》《黑色的金子——煤炭开发、利用与前景》等书。作为主要发明人，享有国际及中国授权和受理的专利180余项。



当前，人类活动同自然界之间的相互影响进一步加深。面对全球温室气体排放及其引发的气候变化，有效促进资源可持续利用、环境可持续发展，努力实现人与自然的和谐，已经成为一个世界性的重大课题。这就需要我们开辟更多的途径，找到更好的办法，而优化能源结构、提高能源转化和使用效率尤其重要。

纵观当今世界，“绿色”不再是业余消遣，不再是流行口号，而是逐渐真正成为发展、建造、设计、制造、工作及生活的方式。当把环境保护等所有的成本都纳入进来时，包括非常规油气在内的新能源变成了最时尚、最有效率、成本最低的做事方式，这是世界正在经历的最伟大的转变。绿色从只是流行变得更加可用，从一种选择变成了一种必需，从一种时尚变成了必胜的战略选择，从一个无法解决的问题变成了一个巨大的机遇。

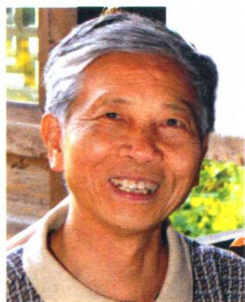
我们有理由深信：发展清洁的新能源和高效能源技术将会变成决定未来50年国家经济地位、环境健康、能源安全及国家安全的战略选择。这场清洁技术革命关系到国家强大与否。今天，我们为了走上绿色道路所做的每一件事都会使我们国家更强大、更健康、更安全、更具创新力、更有竞争力、更能受到尊重。我们在解决自身问题的同时也在帮助全世界解决问题。

从本质上来说，科技决定未来能源。在替代能源发展过程中，到底哪一种能源应该占主导地位，各种新能源应该如何布局，应该由技术论证、环境评测和市场验证来决定。对于这点，科技界提出了林林总总的方案，有些具备了产业化的条件，有些正在开发，有些处于研究阶段，还有些则属于大胆的设计。这些人类的大课题涵盖了很多的学科领域、很广的技术专业、很深的知识层面及很大的行业范围，因此很少有人以通俗易懂的方式将这些技术情况系统地展现给读者。

恰逢此时，我很高兴看到肖钢博士及其合作者正在编写一套“新能源丛书”，该丛书系统地介绍了高效能源转化技术、非常规天然气技术及可再生能源技术等诸多方面的最新进展，这对科研人员掌握国际上新能源发展现状大有裨益，也为希望了解新能源技术概况的人士提供了有用的信息。

肖钢博士是国家引进的海外高级人才，在能源领域成果丰硕。他已经出版了数本学术专著，希望他主持编著的这套《大能源》也会受到读者喜爱。

中国工程院院士 曾恒一



曾恒一院士简介

曾恒一，海洋石油工程专家，中国工程院院士。主持设计、建造了我国第一代海上石油钻探船、海上石油平台导管架下水大型驳船、海上浮式生产储油轮等。主持国家“863”工程的“海洋边际油气田资源开发技术”项目研究并组织编制了海上油气田总体开发方案。主持完成的科研成果“渤海五号、七号自升式钻井船”获国家科技进步二等奖。



能源一直是全球关注的重点问题。当前，世界各国对煤、石油、天然气资源的需求不断攀升，能源压力日益增大。随着低碳经济的发展，尽快发展和开发低碳高效的清洁能源成为人类应当承担的重要责任。但从目前的能源消费结构看，化石能源大约占世界能源消费量的88%，其中，石油占35%，煤占29%，天然气占24%，世界经济和工业体系对化石能源仍具有很强的依赖性。据中国工程院预测，到2020年我国原油供给的对外依存度将增至55%以上，天然气进口量将达到800亿立方米左右。随着常规油气资源的日渐枯竭，在油气消费需求与日俱增的情况下，为保持人类社会的可持续发展，积极寻找和开发新型的替代能源势在必行。

非常规天然气作为新型的替代能源已经为全球的能源需求带来了便利，尤其是煤层气、页岩气等非常规天然气在美国、加拿大、澳大利亚等国家和地区的快速发展，使人们对其充满了期望。页岩气是一种以吸附状态或游离状态储存于富有机质页岩地层中的天然气聚集物，在全球各个国家或地区广泛发育，资源潜力巨大。北美是全球唯一实现页岩气商业化生产的地区，页岩气年产量逐年递增。仅就美国来讲，其2011年的页岩气产量就超过1800亿立方米，并将全球的页岩气革命推向了更高的台阶。据统计，我国的页岩气资源量居全球首位，页岩气资源潜力巨大。从2004年开始，我国的政府部门、科研机构、石油公司等已纷纷开始了对页岩气的理论研究与开发试验。虽然我国在页岩气相关地质理论、勘探开发技术等方面取得了一些进展，目前也已经钻探了几十口页岩气井，获得了一些重大发现，但相对于美国的页岩气发展现状，我国页岩气资源“还睡得很香”，页岩气的勘探开发还处于初级阶段。本书是页岩气研究的综述性著作，内容囊括了世界页岩气的发展历程与现状、页岩气的相关地质理论及其地质特征、页岩气的勘探开发技术、全球页岩气资源的分布状况、页岩气资源的综合利用以及我国页岩气发展策略等内容，可为国内相关领域的研究人员及工程技术人员提供参考。

全书共分七章，主要包括清洁能源类型、页岩气发展历程与现状、页岩气地质特征、页岩气勘探开发技术、页岩气资源与分布、页岩气资源综合利用、页岩气的未来之路等内容。清洁能源类型部分介绍了我国的常规清洁能源类型（如太阳能、风能、海洋能、地热能、氢能等）和新型清洁能源类型（如煤层气、页岩气等）的资源条件与利用情况，使读者对清洁能源形成初步认识。页岩气发展历程与现状部分介绍了世界天然气工业的发展现状、全球页岩气的发展历程与现状，以及我国页岩气的发展历程与现状。页岩气地质特征部分总结了页岩气的基本地质特征、页岩气的形成条件以及富集规律等

内容。页岩气勘探开发技术部分归纳了国内外页岩气领域的勘探开发技术，包括页岩气地震勘探技术、测井技术、实验分析技术、资源评价技术、钻井技术、压裂技术、水力压裂裂缝监测技术、微地震监测技术等内容。页岩气资源与分布部分阐述了世界页岩气的资源潜力，包括美国、加拿大以及其他主要国家页岩气的资源分布状况，并对我国页岩气资源的分布情况做了介绍。页岩气资源综合利用部分阐述了页岩气在能源战略储备、推动低碳经济发展中的作用，天然气的储运方式，以及页岩气资源的综合利用方式。页岩气的未来之路部分总结了美国页岩气商业化生产的成功经验，提出了我国页岩气发展面临的主要挑战，并探讨了我国页岩气快速发展的策略。

本书引用了大量国内外页岩气领域的研究成果和文献，由于资料众多，难以一一列举，在此一并致谢！

本书是编者在页岩气方面学习与研究过程中的综述性成果，由于编者水平有限，书中难免有错误和不足之处，敬请读者批评指正。

编者
2015年6月



陈晓智简介

陈晓智，毕业于中国地质大学（北京），目前供职于大型国有能源企业，主要从事非常规油气勘探地质及综合评价等方面的科研工作。参与完成海外页岩油气区块综合评价、动态跟踪评价、重大专项与综合科研以及国内页岩气综合评价项目10余项，已发表学术论文多篇。

常用名词缩略语对照表

ARI	高级资源国际公司
CSUG	加拿大非常规天然气协会
DOE	美国能源部
EIA	美国能源信息署
ERDA	美国能源研究开发署
FERC	联邦能源监管委员会
GASH	欧洲页岩气研究开拓计划
GFZ	德国波茨坦地学研究中心
GRI	美国天然气研究所
IEA	国际能源署
NEB	加拿大国家能源局
NGRI	印度国家地球物理研究所
OPEC	石油输出国组织

目 录

常用名词缩略语对照表	I
1 清洁能源类型	1
1.1 常规清洁能源	3
1.2 新型清洁能源	10
2 页岩气发展历程与现状	29
2.1 世界天然气工业的发展现状	31
2.2 全球页岩气发展历程与现状	37
2.3 中国页岩气发展历程与现状	52
3 页岩气地质特征	61
3.1 页岩气及其成因	63
3.2 页岩气形成条件	75
3.3 页岩气富集规律	79
4 页岩气勘探开发技术	89
4.1 页岩气地质勘探技术	91
4.2 页岩气开发技术	117
5 页岩气资源与分布	137
5.1 世界页岩气资源与分布	139
5.2 美国页岩气资源与分布	141
5.3 加拿大页岩气资源与分布	146
5.4 其他主要国家或地区页岩气资源与分布	153
5.5 中国页岩气资源与分布	159

6 页岩气资源综合利用	177
6.1 能源战略储备	179
6.2 推动低碳经济发展	181
6.3 天然气储运方式	183
6.4 资源综合利用	186
6.5 页岩气分布式应用	192
7 页岩气的未来之路	197
7.1 美国页岩气成功经验	199
7.2 中国页岩气面临的挑战	207
7.3 中国页岩气快速发展的必经之路	209

◎ 1 清洁能源类型

能源是人类社会赖以生存和发展的重要基础性资源之一，一个国家能源的拥有量决定着它的经济发展。清洁能源是指在生产和使用过程中不产生有害物质排放的能源。清洁能源包含两方面的内容，一是指可再生的能源，称为第Ⅰ类清洁能源；二是指不可再生的低污染能源，称为第Ⅱ类清洁能源。



能源是人类社会赖以生存和发展的重要基础性资源之一,一个国家能源的拥有量决定着它的经济发展。一直以来,能源以及与其相关的问题始终是世界各国关注的热点。在当前资源日益短缺的时代背景下,发展低碳经济,改变能源利用方式,大力发展和开发低碳、高效的清洁能源已经成为服务当代、造福后代的重要举措。

清洁能源是指在生产和使用过程中不排放有害物质的能源。一般来讲,清洁能源包含两方面的内容:一是指可再生的能源,如水能、太阳能、风能、地热能、海洋能等,这些能源在消耗后可以得到补充和恢复,不会产生或者很少产生污染物,被称为第Ⅰ类清洁能源;二是指不可再生的低污染能源,如核能、天然气、生物质能和利用洁净能源技术处理过的化石燃料,如洁净煤、洁净油等,这种能源被称为第Ⅱ类清洁能源。

目前,虽然人们对第Ⅰ类能源的利用程度逐渐增加,但其仍不能最大限度地满足人们的日常需要。现在社会的发展仍是以煤、石油、天然气等化石能源的利用为主,因此,快速发展及利用天然气这种清洁能源是最为现实有效的途径。根据目前人们对能源的了解程度与利用情况,下文将清洁能源划分为常规清洁能源(包括太阳能、风能、海洋能、地热能、氢能等)和新型清洁能源(包括煤层气、页岩气等天然气资源)两大类。

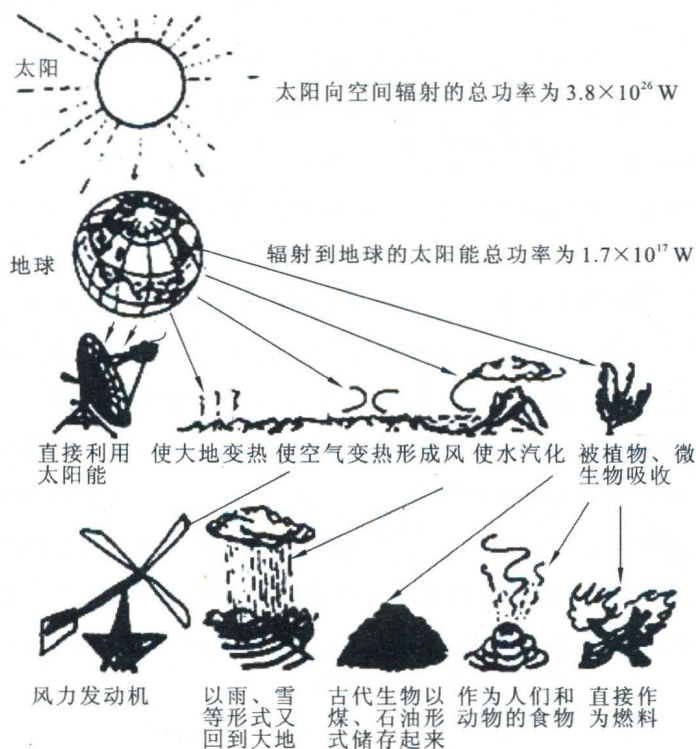
1.1 常规清洁能源

1.1.1 太阳能

太阳能是指将太阳的光能转换为其他形式的热能、电能、化学能,能源转换过程中不产生其他有害的气体或固体废料,是一种环保、安全、无污染的清洁能源。太阳能每天投到地球上的能量惊人。据统计,全世界煤炭、石油、天然气等化石能源的储量总和仅相当于地球 20 天接收到的太阳能。太阳能的利用主要集中在太阳能发电、太阳能电池、太阳能取暖等。其中,太阳能光伏发电技术作为一种不需要燃料,没有污染的获取电能的高新技术正在被大范围使用,它可以直接将太阳能转化为电能(图 1-1)。

为了顺应低碳经济的理念,世界各国均把目光投向具有巨大资源的太阳能。美国在 2010 年之前,为 100 万用户安装太阳能光伏发电电池;德国已安装的光伏屋顶总功率已经超过 4×10^4 kW,并提出了“10 万太阳能屋顶计划”;日本提出了“新阳光计划”。

我国具有丰富的太阳能资源,太阳能较丰富的区域占国土面积的 $2/3$ 以上,年辐射



▲ 图 1-1 太阳能利用示意图

(图片来源:百度百科)

量超过 $6 \times 10^9 \text{ J/m}^2$, 每年地表吸收的太阳能大约相当于 1.7 万亿吨标准煤, 特别是我国西北、西藏和云南等地区, 太阳能资源尤为丰富。据统计, 截至 2010 年, 我国光伏发电累积用量已经达到 600 MW_p , 相当于减排二氧化碳 135 万吨, 预计到 2020 年太阳能光伏发电量将累积到 30 GW_p , 相当于减排 6 750 万吨二氧化碳。作为一种无污染、可再生的清洁能源, 太阳能的利用可以大大减少环境污染, 改善生态环境。

中国的太阳能利用有太阳能集热器、太阳能温室、太阳能干燥、太阳能制冷等; 太阳池、太阳能海水淡化尚处于实验研究阶段。

太阳能是新能源和可再生能源中最引人注目、开发研究最多、应用最为广泛的清洁能源, 是一种取之不尽、用之不竭的能源, 具有安全可靠、清洁卫生、节省开支、自动工作、可长期使用等优点。因此, 太阳能是 21 世纪的重要能源类型, 发展太阳能利用技术是实现可持续发展战略的重要内容之一。

1.1.2 风能

风能是地球表面大量空气流动所产生的动能。由于地面各处受太阳辐射后气温变化不同和空气中水蒸气的含量不同,因而引起各地气压的差异,在水平方向高压空气向低压地区流动,即形成风。风能资源受地形的影响较大,世界风能资源多集中在沿海和开阔大陆的收缩地带。

据估算,全世界风能总量约为 1 300 亿千瓦,风力发电在可再生能源技术的利用方面发展得最快,是最可能成为产业化的技术之一(图 1-2)。近些年,风能的发展有了很大进展,德国风能总量已达到 4×10^6 kW,丹麦风电达到全国电网总容量的 10%,计划在 2030 年达到 40%。我国的风能资源也较为丰富,风能的利用也较为成熟,我国计划在 2020 年实现 4×10^7 kW 的总装机容量。



图 1-2 风力发电示意图
(图片来源:百度百科)

在自然界中,风是一种可再生、无污染而且储量巨大的能源。随着全球气候变暖和能源危机,各国都在加紧对风力的开发和利用,尽量减少二氧化碳等温室气体的排放,有助于低碳经济的发展,保护我们的生存环境。

按照不同的需要,风能可以被转换成其他不同形式的能量,如机械能、电能、热能等。利用风能可以节约化石燃料,同时必须考虑储能或与其他能源相互配合,才能获得稳定的能源,因此也增加了技术上的复杂性。

由于风能的能量密度低(空气密度约为水的 $1/800$),因此,风能利用装置的体积大,