



无碳能源：太阳氢

WUTAN NENGYUAN TAIYANGQING

毛宗强 编著

化学工业出版社






TK91
M373-2

无碳能源：太阳氢

WUTAN NENGYUAN TAIYANGQING

毛宗强 编著 



化学工业出版社

·北京·

TK91

图书在版编目 (CIP) 数据

无碳能源：太阳氢/毛宗强编著. —北京：化学工业出版社，2009.12

ISBN 978-7-122-06946-7

I. 无… II. 毛… III. 氢能 IV. TK91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 195636 号

责任编辑：赵玉清

文字编辑：颜克俭

责任校对：战河红

装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装：北京白帆印务有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 185 千字 2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888(传真：010-64519686) 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：26.00 元

版权所有 违者必究

序

当今，无论如何强调发展新能源和可再生能源的意义都不过分。我们的世界正面临着由于以化石燃料为基础而支撑的能源系统带来的一系列威胁：资源枯竭、环境污染、生态恶化、气候变化、贫富不均，直至由于能源问题而引发的国与国之间、地区之间的冲突、纠纷不断，直至战争。新能源和可再生能源具有资源可持续、清洁、分布均衡等特点，必将成为未来可持续能源系统的支柱。

我国的经济社会正在快速发展。在能源方面，我们既需要充足的能源供应以保障全面建设小康社会目标的实现，同时我们也面临着国内资源和环境的威胁，国际社会温室气体减排的压力。因此，国家把发展新能源和可再生能源作为长期能源战略的重要组成部分，而且制订了以《可再生能源法》为基础的一系列政策措施。几年来，新能源可再生能源在我国得到了快速发展，其广阔的前景正日益显现出来。

清华大学长期致力于能源科学研究和人才培养，形成了新型核能、太阳能、风能、生物质能以及新能源战略和政策等领域的新能源科研和教学体系，取得了一批有影响的科技成果。以这些科研和教学经验为基础，并吸收了国内外同行的大量研究成果，在化学工业出版社的支持下，几位教师编写了这套新能源丛书。

丛书按能源种类分册，内容涉及发展新能源的战略和政策，各类新能源资源核技术的特点、技术和产业发展现状、未来的发展趋势展望等。丛书内容丰富、通俗易懂，从中可以较清晰地了解发展新能源的意义，各种新能源技术的基本原理和发展路线、发展前景等，对于广泛和

系统了解和认识新能源，这是一套很好的读物。

当然，新能源的发展是一个很复杂的系统工程，是一个很长的产业链、政策链和基础设施链，牵涉到技术、体制、政策、社会和个体的行为。所以，要起到有份额的作用，还有很长的路要走，尤其和我国国情有十分紧密的联系。在此期间，各种技术的发展还有可能不一致，会有很大的差异性。我们目前的认识，在技术发展有新突破、政策上有新措施的条件下将会有很大的变化。今天我们认为有前途的方向可能将来会“边缘化”，一些新的方向可能“异军突起”。总之，我们作为科技工作者应该结合国情不断变化地在技术创新方面下功夫，走出我国自己的新能源和可再生能源发展的道路来。相信这套丛书的发行，会在提高社会各界对新能源的了解，普及新能源知识，促进我国新能源快速发展方面做出应有的贡献。

虽然丛书中有有关可再生能源的描述，社会上的专家不见得完全意见一致，有些同志会有不同的看法，这是很正常的。一个新生事物的发展总不可避免的有各种看法，在争议中成长。但是，了解它是第一位的，只有不断深入的了解，不断实践才会逐渐接近真理，这套丛书的作用就在于此。

清华大学教授
工程研究院

倪维斗

2009.12.4

前 言

在宇宙形成第4秒钟，就生成了氢。无穷无尽氢的同位素在太阳系内部的热核反应已经进行了50亿年，在那里，每秒钟6万吨氢同位素聚变为氦，以极高的热度，照亮了14960万公里之外的地球——人类衍生繁殖的摇篮。

宇宙中90%的原子是氢，9%的原子是氦。也许是上帝和人类开的玩笑，氢、氧和碳原子组合构成地球上所有生命：动物、植物及其他生物。地球有纯氧、纯碳，却没有纯氢。几经探索，最终在18世纪，人类还是认识了氢，逐渐揭开氢的神秘面纱，原来，氢就藏在占地球表面71%的水中！水中蕴藏的无穷的氢的能量令人震撼。

人类的能源史伴随着人类发展史。人类开始只是随手捡起树枝、落叶即可点燃火堆，驱兽、取暖、炊事。随着时间的推移，人类发现了煤，只要挖出来就可使用，运输也方便。再后来，要打井，开采石油、天然气。核能的利用则更为复杂。就这样能源由简单到复杂，伴随着世界工业、经济的增长。今天，人类社会已经发展到更高阶段，当温饱问题基本解决后，才发现环境何其重要！世间气候变化，究其原因是碳能源出了问题。数百年来，人类使用含碳能源，结果使得大气中CO₂含量由工业革命时期的200ppm（1ppm=10⁻⁶，即百万分之一体积或质量比）飙升到今天的400ppm。全球气温已经普遍升高0.8℃，全球冰川融化、气候反常已是不争的事实。科学家指出，如果地球气温升高2℃，则人类将永久失去居住之地！为了生存，人类对能源提出更高的要求：不但提供能量，而且不可破坏环境。

为此，有人提出低碳能源，有人提出收集和储存CO₂（称为CCS）。其实都是权宜之计，最好的方案应该是使用无碳能源，氢能就是最好的无碳能源。学者为了便于研究，将能源分为一次能源、二次能源、可再生能源等。按照现阶段的定义，氢是二次能源，又叫能源载体。我想若我们考虑到太阳上的情形，考虑到太阳的能源来自氢的同位素的热核反应，那里的氢并不是哪个“一次能源”制造的。因此，将氢归于二次能源值得商榷。无论如何，氢是当之无愧的能源，而且是无碳能源。

应化学工业出版社及清华大学核能与新能源技术研究院要求，编者再编著一本关于氢能的书。2005年1月出版的《氢能——21世纪的绿色能源》已经比较全面地介绍了氢能的方方面面。本书则不打算再完全重复2005年版，而希望成为其姐妹篇，与2005年版互为补充。因此对有的部分，如氢的制备则简略说明，而侧重介绍这几年氢能的进展，包括研发和市场化，希望让读者了解氢能并不是镜中花或水中月而遥不可及，氢能已经开始进入市场。而且，一旦启动，则发展迅速，横扫市场，势不可挡。

本书编写过程中，美国总统奥巴马又给人类能源发展史增添笑料。在氢能汽车大规模示范相当成功之际，此公在学生物的能源部长建议下，提议将美国氢能研发经费砍掉2/3，引起世界大哗。在美国有识之士的强烈反对下，最终国会否决了奥巴马的提议，仍保持相关氢能研发经费。这倒使我想起汽油车刚刚代替马车时，美国也通过为马车夫叫屈，不准开发汽车，妄图扼杀汽车于摇篮，结果是人所尽知的。

且不说欧美的氢能，就看我国东邻日本，今年5月开始家用氢燃料电池电站的商业化，宣布2015年开始氢燃料电池汽车商业化。南邻印度，则提出2010年发展1000辆氢气-天然气混合燃料的汽车，2020年将拥有100万辆这样的车。氢能正在大步走向市场。中国怎么办？中国如何行动？如读者从本书获得启发，则作者心满意足。

氢能是无碳能源，在世界呼唤低碳能源的今天，格外受到世人青睐。氢能在迅速市场化，尽管本人努力收集国内外最新资料，力求准确、清晰地描述氢能，毕竟氢能涉及的领域太宽泛了，加之本人水平有限，书中难免不当之处，恳请读者批评指正。

编者

2009年9月2日于清华大学荷清苑

作者简历

毛宗强，男，1947年9月10日出生，江苏淮阴人。现为清华大学核能与新能源技术研究院责任教授，博士生导师。清华大学学士（1970）、清华大学硕士（1980），英国 Bradford 大学博士（1993）。

自1970年起一直在清华大学核研院从事与化学工程有关的科研工作，1993年起研究氢能与燃料电池；1998起研究工作扩展到纳米碳储氢、新型制氢方法和氢能经济与安全、氢能标准、氢能战略等。2000~2005年期间担任中国第一个国家973氢能项目的首席科学家。已在国内外著名刊物及会议发表160余篇文章，申请多项专利。曾获国际氢能学会（IAHE）颁发的2006年度Jules Verne奖，中国石油和化学工业协会2006年科技进步二等奖。

现为中国可再生能源学会副理事长（2008—2013），中国可再生能源学会氢能专业委员会主任（2008—2013），《太阳能学报》、《电源技术》、《太阳能》副主编，全国氢能标准化技术委员会副主任委员（2008—2013），全国燃料电池标准化技术委员会副主任委员（2008—2013），科技部“第三届973计划领域专家咨询组”能源专家（2007—2012），中华全国工商业联合会新能源商会主任科学家（2009—2012）；联合国工业发展组织国际氢能技术研究中心（UNIDO-ICHET）特邀技术顾问（全球共6名），国际氢能学会（IAHE）理事会成员。

2003年起至今，在清华大学开设研究生学分课“氢能工程”。2005年以来，编著的中文著作有：《氢能——21世纪的绿色能源》，化学工业出版社，北京，2005年；《燃料电池》，化学工业出版社，北京，2005年；《氢能——21世纪的绿色能源》（繁体字改写本），新文京开发出版股份有限公司，台湾，2008年。

目 录

1 氢能：人类未来的清洁能源 / 1

1.1 谁是下一个能源主角	2
---------------	---

1.2 成也是煤，败也是煤	3
---------------	---

1.2.1 工业革命的动力	3
---------------	---

1.2.2 地球污染的根源	3
---------------	---

1.2.3 世界的难题，氢能的机遇	5
-------------------	---

1.2.4 耀眼的太阳氢	6
--------------	---

1.2.5 任重道远的氢能	6
---------------	---

2 氢从哪里来 / 8

2.1 水就是取之不尽的“氢矿”	8
------------------	---

2.2 今天的工业化制氢方法	8
----------------	---

2.2.1 以煤为原料制氢	8
---------------	---

2.2.2 天然气制氢	9
-------------	---

2.2.3 重油部分氧化制造氢气过程	10
--------------------	----

2.2.4 水电解制造氢气	10
---------------	----

2.3 未来的太阳能、风能制氢	11
-----------------	----

2.3.1 太阳能电解水制氢	11
----------------	----

2.3.2 太阳能热解水制氢	12
----------------	----

2.3.3 太阳能热化学制氢	12
----------------	----

2.3.4 太阳能光解水制氢	13
----------------	----

2.3.5 光合作用制氢	13
--------------	----

2.3.6 生物制氢	13
------------	----

2.3.7 风力制氢	14
------------	----

2.4 大有前途的新方法	14
--------------	----

2.4.1	水煤气-铁法制造氢气	15
2.4.2	甲烷(催化)裂解制造氢气	15
2.4.3	等离子体制造氢气过程	15
2.4.4	生物质制氢	15
2.5	副产氢气是宝	15
2.6	天生我才必有用——每种制氢方法都有自己的用武之地	17

3 如何储存氢气 / 18

3.1	对储氢系统的要求	18
3.2	气氢储存	19
3.3	液氢储存	20
3.4	固体氢储存	22
3.5	几种有希望近期工业化的储氢新方法	22
3.6	攀登无止境	24

4 将氢气输送给用户 / 25

4.1	气氢输送	25
4.2	液氢的输送	27
4.3	固氢输送	28
4.4	有希望的氢气输送的其他途径: 有机物储氢	29
4.5	如何提高输氢效率	29

5 利用氢能的高效设备(I)——低温燃料电池 / 31

5.1	什么是燃料电池	31
5.2	燃料电池原理	31
5.3	几种常见的低温燃料电池	32
5.3.1	质子交换膜燃料电池	32

5.3.2	磷酸燃料电池	33
5.3.3	碱性燃料电池	34
5.4	低温燃料电池发电	35
5.5	燃料电池电站简史	36
5.6	燃料电池电站现状	37
5.7	质子交换膜燃料电池的改进	39

6 利用氢能的高效设备(II)——高温燃料电池 / 41

6.1	高温燃料电池原理	41
6.2	高温燃料电池结构	41
6.3	高温燃料电池历史及应用现状	43
6.4	固体氧化物燃料电池的发展趋势	46
6.4.1	固体氧化物燃料电池运行温度不断降低	46
6.4.2	采用方便的碳氢燃料	47
6.4.3	新结构平板固体氧化物燃料电池	47
6.4.4	微管式固体氧化物燃料电池	48
6.4.5	单室结构固体氧化物燃料电池	49
6.4.6	新材料开发	49
6.5	前景及挑战	50

7 不用汽油的汽车：氢燃料电池汽车 / 52

7.1	氢燃料电池车如何工作，为什么要开发氢燃料电池车	52
7.2	燃料电池公共汽车	54
7.3	燃料电池轿车	55
7.4	我国的氢燃料电池车	56
7.5	呼之欲出的新一代氢燃料电池车	64
7.6	氢燃料电池车与纯电池汽车对比	66
7.7	制定符合中国国情的氢燃料电池车发展战略	68

8

氢内燃机汽车 / 70

8.1 氢内燃机	70
8.2 氢内燃机汽车发展历程	70
8.3 内燃机的燃料发展	73
8.4 氢内燃机汽车已经超过汽油车的性能	74
8.5 氢内燃机历史	75
8.6 氢内燃机汽车 SWOT 分析	80
8.6.1 优势 (S) 分析	80
8.6.2 劣势 (W) 分析	81
8.6.3 机遇 (O) 分析	82
8.6.4 挑战 (T) 分析	82

9

氢能加注站 / 84

9.1 国外加氢站的情况	85
9.1.1 天然气重整制氢加氢站	85
9.1.2 水电解制氢加氢站	85
9.2 加氢站结构以及主要设备	88
9.2.1 系统流程示意图	88
9.2.2 系统及主要设备	88
9.3 我国的加氢站	90
9.3.1 北京飞驰竞力加氢站	90
9.3.2 北京清能华通-BP 加氢站	91
9.3.3 上海同济-Shell 加氢站	92
9.3.4 移动加氢站	93
9.3.5 住宅加氢站	94

10

家用燃料电池与家用氢能源 / 97

10.1 分布式燃料电池电站为家庭同时供应冷量、热水和电	97
------------------------------	----

10.2	社区用分布式热电联供燃料电池电站	98
10.2.1	磷酸燃料电池电站	98
10.2.2	熔融碳酸盐燃料电池	100
10.2.3	固体氧化物燃料电池	101
10.3	家用热电联供燃料电池电站	102
10.3.1	北美家用燃料电池电站	102
10.3.2	日本家庭燃料电池电站	104
10.3.3	发展中的我国分布式燃料电池电站	105
10.4	家用氢能源	105

11 微型燃料电池 / 107

11.1	微型燃料电池电源	107
11.2	微型燃料电池的燃料	108
11.3	微型燃料电池研究现状	109
11.3.1	笔记本电脑电源	113
11.3.2	掌上电脑电源	114
11.3.3	手机电源	115
11.4	微型燃料电池前景	116

12 神奇的氢添加剂——混氢燃料 / 119

12.1	纯氢燃料	119
12.2	汽油（柴油）混氢	120
12.3	天然气混氢	125
12.4	氢氧混合气	130
12.5	氢氧混合气与燃油	131
12.6	氢氧混合气与煤	132

13 市场上的氢能源 / 134

13.1	已经在市场上的氢能源：氢氧切割机	134
------	------------------	-----

13.1.1	氢氧切割机简介	134
13.1.2	氢氧切割机的构造与原理	136
13.1.3	氢氧切割机的分类	136
13.1.4	氢氧切割机的优点	137
13.1.5	氢氧切割机的应用	138

13.2 站在市场门口的氢能源 141

13.2.1	氢燃料电池叉车	141
13.2.2	氢燃料电池观光车	143
13.2.3	氢燃料电池备用电源	144
13.2.4	氢燃料电池摩托车与自行车	145
13.2.5	氢天然气混合燃料	146

14 氢能标准 / 147

14.1 氢能技术标准化的重要性 147

14.2 我国氢能标准的基本状况 148

14.2.1	我国的标准管理体制	148
14.2.2	标准级别与性质	149

14.3 氢能的国际标准化组织 151

14.4 国外的氢能标准化 154

14.4.1	美国	154
14.4.2	欧盟	155
14.4.3	英国	156
14.4.4	德国	156
14.4.5	法国	157
14.4.6	日本	158

15 安全的氢能 / 159

15.1 氢气是安全的燃料 159

15.2 氢的有利安全特性 159

15.3 氢的不利安全特性 160

15.3.1	泄露性	160
15.3.2	扩散性	161


15.3.3	易燃性	161
15.3.4	爆炸性	162
15.4	氢气对环境的安全性	162
15.4.1	对材料的影响：氢脆	162
15.4.2	对大气环境的影响	163
15.5	氢气安全性综合评价	164
15.6	严格的科学试验，保障氢气安全	165
15.7	遵守安全使用规则，氢气很安全	167
15.8	历史上最著名的“氢气冤案”	168
15.9	学习更多的氢气安全知识	169

致谢 / 171

1

氢能：人类未来的清洁能源

2006年11月13日国际氢能界的主要科学家向八国集团领导人：加拿大总理斯蒂芬·哈珀、法国总统雅克·希拉克、德国总理默克尔、意大利总理罗马诺·普罗迪、日本首相安倍晋三、俄罗斯总统弗拉基米尔·普京、英国首相托尼·布莱尔和美国总统乔治·布什以及联合国相关部门负责人提交了氢能的《百年备忘录》。图 1-1 是国际氢能学会副



international association for hydrogen energy
POST OFFICE BOX 248266 • CORAL GABLES • FLORIDA 33124 • USA

Officers

- T. Nejat Veziroglu
President
- Toko Ohita
Vice President
Southeast Asia & Pacific
- David S. Scott
Vice President
Americas
- Carl-Jochen Winter
Vice President
Europe, Middle East & Africa
- Franco Barbir
Internet Editor
- Melvin C. Morgenstein
Legal Counselor
- Ann Gerard
Coordinator
- William J. D. Escher
Secretary
- Board of Directors**
- Hussein I. Abdel-Aal
Saudi Arabia
- Bragi Arnason
Iceland
- Juan C. Bolloch
Argentina
- James E. Funk
U.S.A.
- Shoichi Fukushima
Japan
- Victor A. Goltson
Ukraine
- Zong Qiang Mao
China
- Cesare Marchetti
Austria
- Toko Ohita
Japan
- Vladimir D. Rusanov
Russia
- Jacques Sami-Just
France
- O. N. Shrivastava
India
- Walter Seifritz
Switzerland
- Giuseppe Spazzafumo
Italy
- Alexander K. Stuart
Canada
- Panick Takahashi
U.S.A.
- Carl-Jochen Winter
Germany

The International Association for Hydrogen Energy

proudly supplies the

“Centennial Memorandum on Hydrogen Energy”

which on November 13, 2006 was submitted to the

G8 – Heads-of-State and the Secretary General of the

United Nations as well as the Directors of the UN –

subdivisions.

For inquiries, please, address

Dr Carl-Jochen Winter
Obere St. Leonhardstr. 9
88662 Ueberlingen, Germany
Tel +49 7551 944 5940
Cjwinter.ENERGON@t-online.de
www.itsHYtime.de

图 1-1 国际氢能学会副主席德国人 Winter 博士发给理事会成员的通知

1 氢能：人类未来的清洁能源

主席德国人 Winter 博士发给理事会成员的通知。

在备忘录中，科学家们指出，“21 世纪初叶人类正面临的两大危机：一是因人为因素而导致的气候变化是真实存在的。至 21 世纪末，气温的升高将会呈现一个相当大的幅度，并将会给人类、动物、植物以及人类文化遗产带来灾难性的后果。二是传统化石能源或核能燃料被少数几个国家寡头垄断的情况正不断加剧，这不利于大多数能源利用国家。解决上述问题的方案不少，但是氢能最为优越，它将为人类提供足够的清洁能源。”

为什么世界科学家对氢能如此重视？氢能到底能不能担起如此重任，本书将详细、通俗地向读者介绍这方面的有关知识。

1.1 谁是下一个能源主角

人类的能源发展史是一部生产力发展的历史。从不发达社会使用收集的牲畜粪干、秸秆茅草，到我们今天使用的煤炭、石油、天然气能源，人类社会的发展随着我们使用能源的进步而进步。能源不但为人类提供基本需求，如光和热，而且还让我们能在空中、地面、水上甚至星际长距离旅行。

“钻木取火”是人类利用柴薪的开始。有史以来直到公元 1800 年都是如此利用能源。期间，个别地方发现煤、天然气乃至石油，并没有引起轰动，主要是没有将其工业应用，各种能源都是用于炊事、照明而已，差别不大。直到工业革命的蒸汽机开始使用之时，人们还是用木头烧锅炉。后来，人们发现煤（其实早已发现了煤）可以更方便、更有效地开动蒸汽机，再加上木材也越来越少，煤炭才迅速代替木材，成为世界能源主角。

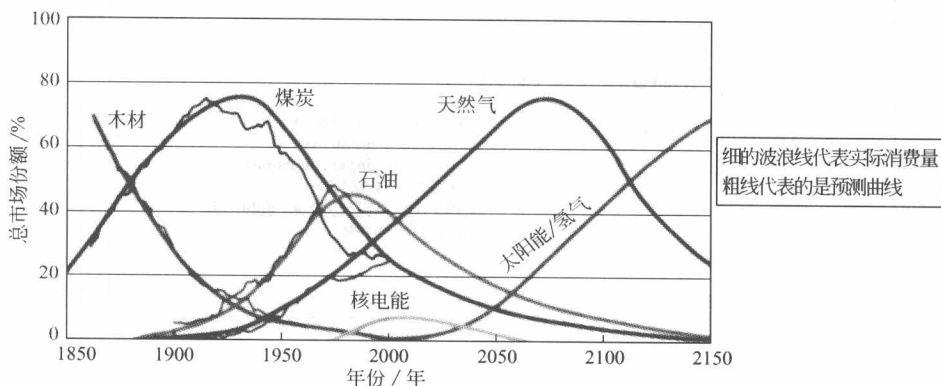


图 1-2 世界一次能源交替历史和预测情形