

21世纪可持续能源丛书

氢能

——21世纪的绿色能源

毛宗强 编著



 化学工业出版社

21世纪可持续能源丛书

氢能 ——21世纪的绿色能源

毛宗强 编著



化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

氢能：21 世纪的绿色能源/毛宗强编著. —北京：化学工业出版社，2005. 1
(21 世纪可持续能源丛书)
ISBN 7-5025-6039-4

I. 氢… II. 毛… III. 氢能-基本知识 IV. TK91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 083774 号

21 世纪可持续能源丛书

氢能——21 世纪的绿色能源

毛宗强 编著

责任编辑：陈志良

责任校对：陈 静

封面设计：于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话：(010)64982530

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 27 $\frac{1}{4}$ 字数 482 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6039-4/TK·9

定 价：58.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

序

能源是人类社会存在与发展的物质基础。过去 200 多年，建立在煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的能源体系极大地推动了人类社会的发展。然而，人们在物质生活和精神生活不断提高的同时，也越来越感悟到大规模使用化石燃料所带来的严重后果：资源日益枯竭，环境不断恶化，还诱发了不少国与国之间、地区之间的政治经济纠纷，甚至冲突和战争。因此，人类必须寻求一种新的、清洁、安全、可靠的可持续能源系统。

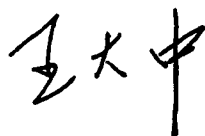
我国经济正在快速持续发展，但又面临着有限的化石燃料资源和更高的环境保护要求的严峻挑战。坚持节能优先，提高能源效率；优化能源结构，以煤为主多元化发展；加强环境保护，开展煤清洁化利用；采取综合措施，保障能源安全；依靠科技进步，开发利用新能源和可再生能源等，是我国长期的能源发展战略，也是我国建立可持续能源系统最主要的政策措施。

面临这样一个能源发展的形势，化学工业出版社组织了一批知名学者和专家，撰写了这套《21 世纪可持续能源丛书》是非常及时和必要的。

这套丛书共有 11 册，以每一个能源品种为一册，内容十分广泛、丰富和充实，包括资源评价，新的工艺技术特性介绍，开发应用中的经济性和环境影响，还涉及到推广应用和产业化发展中的政策和机制等。可以说，在我国能源领域中，这套丛书在深度和广度上都达到了较高的学术水平和实用价值，不仅为能源工作者提供了丰富的能源科学技术方面的专业知识、信息和综合分析的政策工具，而且也能使广大读者更好地了解当今世界正在走向一个可持续发展的、与环境友好的能源新时代，因此值得一读。

我们期待本丛书的出版发行，在探索和建立我国可持续能源体系的进程中作出应有的贡献。

中国科学院院士



2004 年 7 月 8 日

前 言

能源是人类发展的根本保证。自英国工业革命以来，社会的所有进步，可以说都是建筑在大量使用化石燃料煤、石油、天然气的基础上。当人类陶醉于日益丰富的物质文明时，却发现化石能源不多了，而且化石能源带来的环境污染已经不能令人容忍。

但是由于人口的增长和人类物质、文化生活水平的普遍提高，人类对能源的需求还在急速地增加。据统计，在 20 世纪初，全世界对能源的需求量约每 50 年增长 1 倍，而在 20 世纪中叶，每 30 年增长 1 倍；到 20 世纪 80 年代，则每 15~20 年增长 1 倍。其中电能由于使用方便，需求量增长更快，约 10~15 年增长 1 倍。

煤炭、石油和天然气等化石燃料是不可再生能源，而其储量是有限的，所以，应了中国的一句古话“坐吃山空”。化石燃料资源日益枯竭，加之分布不均，受到地区的限制；由此引发战争也是不可避免的。

大量使用化石能源对大气和环境造成了严重污染，对生态系统和人类本身带来了损害。世界气候异常，酷热、严寒、洪水、海啸肆虐地球，人们已经不能安宁地享受生活。

现在，全世界都很重视研究开发新的能源，可再生能源是研究热点。可再生能源包括太阳能、风能、潮汐能、波浪能、地热能和水力能等，他们都需要具有“可储存”特性的氢作为能源载体。即使到了受控热核聚变完全成功，为人类彻底解决了能源问题，仍然需要氢的同位素作为原料，需要氢能作为能源载体。氢，是最轻的也是自然界最丰富的元素，大约占宇宙所有物质的 80%。

它存在于所有类型的化石燃料，它存在于最大的能量之源——太阳中。太阳由几乎 100% 的氢构成，它的能量来自氢原子的核聚变。

氢的资源丰富。在地球上的氢主要以其化合物，如水和碳氢化合物：石油、天然气等的形式存在。而水是地球的主要资源，地球表面的 70% 以上被水覆盖；即使在大陆，也有丰富的地表和地下水。水就是地球上无处不在的“氢矿”。

氢的来源多样性。可以通过各种一次能源（可以是化石燃料，如天然气、煤、煤层气）；也可以是可再生能源，如太阳能、风能、生物质能、海洋能、地热）或者二次能源（如电力）来开采“氢矿”。地球各处都有可再生能源，而不像化石燃料有很强的地域不均匀性。

氢能是最环保的能源。利用低温燃料电池，由电化学反应将氢转化为电能和水。不排放 CO_2 和 NO_x ，没有任何污染。使用氢燃料内燃机，也是显著减少污染的有效方法。

氢气具有可储存性。就像天然气一样，氢可以很容易地大规模储存。这是氢能和电、热最大的不同。这样，在电力过剩的地方和时间，可以用氢的形式将电或热储存起来。这也使氢在可再生能源的应用中起到其他能源载体所起不到的作用。

氢具有可再生性。氢由化学反应发出电能（或热）并生成水，而水又可由电解转化氢和氧；如此循环，永无止尽。

氢是“和平”能源，因为它既可再生又来源广泛，每个国家都有丰富的“氢矿”。化石能源分布极不均匀，常常引起激烈抗争。例如，中东是世界石油最大产地，也是各国列强必争之地。从历史上看，为了中东石油已发生多次战争。事实上，当前中东严峻的形势也是石油所致。

由于氢具有以上特点，可以同时满足资源、环境和可持续发展的要求，是其他能源所不能比拟的。因此可以说，氢能是人类未来的能源。

30 年前，一批科学家、学者呼吁人们重视氢能，成立了国际氢能学会。2003 年，应美国能源部的倡议，在华盛顿成立了“氢能经济国际合作伙伴”的官方组织，致力推动氢能全球产业化，我国是首批 16 个成员国之一。氢能已经提到政治家的议事日程，氢能离我们不远了。

2004 年 5 月的最后一周，堪称中国国际氢能周。5 月 23 日中美氢能发展高级研讨会，5 月 24 日中德可再生交通能源合作指导委员会第一次会议，5 月 26~27 日氢能经济国际合作伙伴计划（IPHE）指导委员会第二次会议，5 月 25~28 日，第二届国际氢能论坛在北京人民大会堂和凯宾斯基饭店召开。这一系列高层次、集中的活动不仅预示着中国对氢能发展已开始表现出了前所未

有的重视，也可以看出世界对中国未来氢能发展的关注。

虽然人们认识氢已经有 200 多年了，并且氢在化学工业已经大显身手，目前，我国年产氢达到 800 万吨，名列世界前茅。但是作为能源，氢还是“新手”。有必要大力宣传，引导、推荐、介绍氢能。

我在英国进修四年之后，于 1993 年回国开始着手燃料电池的研究，进而又涉及氢能其他方面，始终处在氢能科研的第一线。国内有关氢能的书不多，本人一直希望能有朝一日，编写较为全面的氢能小册子，向我国各界读者介绍这一正在迅速发展的新能源领域的基本知识、基本情况和最新进展，为读者提供一个初步的、定性的但较为准确的概貌。

2003 年夏，本人有幸在清华大学开了一门研究生课程，叫做“氢能工程”，30 多名来自各系的研究生，挤在能科楼狭小的教室里，充满生气与活力。讲课过程中，和同学们相互讨论，我虽是授课者，却从同学们那里受益匪浅。恰逢化工出版社希望出版能源丛书，遂以讲稿为蓝本、增补内容而成；故本书的部分内容，也有听课同学的贡献，我要借此机会，表示谢意。

氢能涉及的面很广；有些领域，如生物制氢、热核反应等离我的专业甚远，为了保持氢能的全貌，也勉为其难地收集资料，加以介绍。这里，我要感谢中国电子工程设计院陈霖新高工，中国科学院化学所沈建权研究员，北京有色金属研究总院蒋利军研究员，清华大学核能与新能源技术研究院李赏博士等专家在百忙之中为本书校对相关章节，提出许多宝贵意见，提高了本书的准确性。

我还要借此机会感谢我的同事和研究生们，他们帮助录入了大量的文稿；研究生刘志祥、潘文钰、张扬键、黄建兵、段世杰等协助准备不少插图，博士后彭冉冉、尚玉明都提供了有用的素材。还有许多同事的鼓励和帮助，在此一并致谢。

最后，我要感谢我的夫人，清华大学方军副教授，她阅读全部初稿并提出许多有益的建议；她的全力支持，使我得以克服许多意外的困难，完成本书。

氢能是一个内容十分广博而又不断更新的科学技术领域，在编写过程中，本人尽量收集国内外最新资料，力求论述准确、理论结合实际。由于时间紧迫、加之本人水平有限，书中错误难免，恳请读者批评指正。

毛宗强

2004 年 6 月

于清华大学荷清苑



图1 天然气水蒸气重整制氢工厂（英国）



图2 位于慕尼黑机场加氢站的天然气部分氧化重整制氢装置



图3 德国 Choren 公司年产 200t 生物柴油的中试工厂

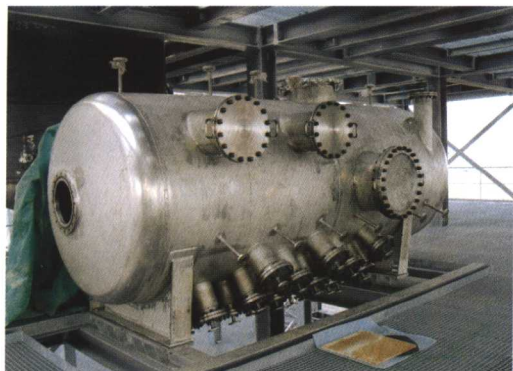


图4 生产生物柴油的关键设备——反应釜



图5 车用35MPa储氢罐



图6 地面加氢站用(固定式)35MPa储氢罐



图7 地面加氢站用(移动式)35MPa储氢罐

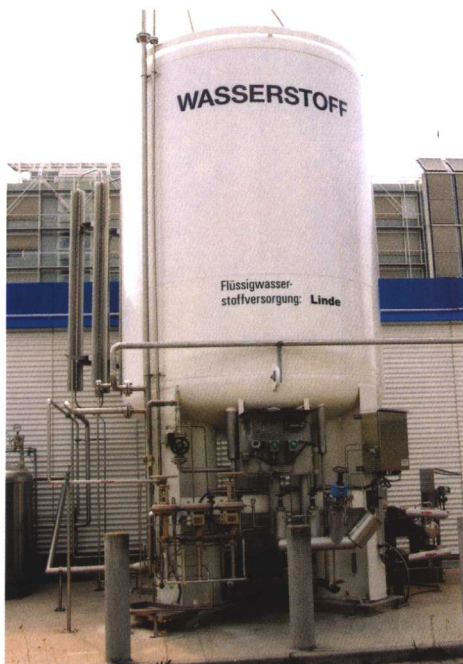


图8 大型地面液氢储罐



图9 日本的加氢站

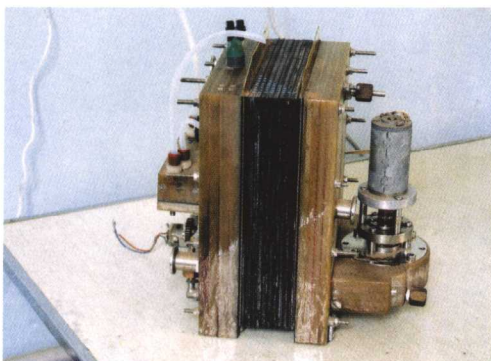


图10 清华大学核能与新能源技术研究院早期开发的一体化燃料电池堆

图11 载姆勒-克莱斯勒公司生产的燃料电池公共汽车





图12 我国自行研制的燃料电池大客车（863计划项目）

图13 我国自行研制的燃料电池小轿车（863计划项目）



图14 我国第一辆5kW燃料电池车

图15 在德国汉诺威工业博览会上3MTU公司展示的250kW的MCFC电站



目 录

第 1 章 导论	1
1.1 化石能源短缺与汽车	1
1.2 环境要求	2
1.3 可持续发展的压力	4
1.3.1 能源安全	4
1.3.2 经济发展的需要	5
1.3.3 新的经济增长点	5
1.4 氢能是能源历史的必然	9
1.5 氢能发展史	10
1.6 永恒的能源：氢能	13
1.6.1 氢和电力、蒸汽的比较	13
1.6.2 核聚变	14
1.6.3 为什么氢是永恒的能源	17
第 2 章 氢的发现	19
2.1 氢的发现过程	19
2.1.1 氢从何而来	19
2.1.2 氢发现简史	19
2.2 氢的分布	20

2.2.1	地球上的氢	20
2.2.2	空间中的氢	20
2.2.3	人体中的氢	21
2.3	氢的性质	21
2.3.1	氢的原子结构和分子结构	21
2.3.2	氢的物理性质	21
2.3.3	氢的化学性质	24
2.3.4	氢键	26
2.3.5	正氢和仲氢	26
2.4	氢的形态	28
2.4.1	气体氢	28
2.4.2	液体氢	28
2.4.3	固体氢	30
2.5	氢的实验室制备	31
2.5.1	制备方法	31
2.5.2	实验装置	31
2.6	氢的能源特性	32
2.7	氢的同位素	33
2.7.1	氢同位素的发现	33
2.7.2	氢同位素的性质	34
2.7.3	氢同位素的用途	35
2.8	“分数氢”	36
2.8.1	分数氢的提出	36
2.8.2	分数氢理论对重大理论提出挑战	37
2.8.3	来自科学界的两种对立观点	38
2.8.4	分数氢理论展望	40

第3章 用水制氢 41

3.1	水电解制氢	41
3.1.1	电解水制氢的基本原理	41
3.1.2	水电解的能量与物料平衡	47
3.1.3	水电解制氢装置	48
3.1.4	重水电解	57
3.1.5	煤水电解制氢	58

3.1.6	压力电解	58
3.2	热化学制氢	60
3.2.1	为什么要研究热化学制氢	60
3.2.2	热化学制氢的历史	61
3.2.3	热化学制氢现状	61
3.2.4	热化学循环体系的选择	64
3.2.5	热化学制氢的国内现状	65
3.2.6	热化学制氢的展望	65
3.3	高温热解水制氢	68
3.3.1	高温热解水制氢原理	68
3.3.2	高温热解水制氢的难点	68
3.3.3	高温热解水制氢前景	69
第4章	化石能源制氢	70
4.1	煤制氢	72
4.1.1	传统煤制氢技术	73
4.1.2	我国煤炭气化制氢现状	74
4.1.3	煤制氢零排放技术	78
4.1.4	煤炭气化制氢用途的发展	80
4.2	气体原料制氢	81
4.2.1	天然气水蒸气重整制氢	81
4.2.2	天然气部分氧化重整制氢	85
4.2.3	天然气催化热裂解制造氢气	86
4.2.4	天然气制氢气新方法	86
4.3	液体化石能源制氢	86
4.3.1	甲醇裂解-变压吸附制氢技术	87
4.3.2	甲醇重整	88
4.3.3	以轻质油为原料制氢	88
4.3.4	以重油为原料部分氧化法制取氢气	89
第5章	生物质制氢	90
5.1	微生物转化技术	91
5.1.1	生物制氢发展历程	91
5.1.2	生物制氢方法比较	92

5.1.3	生物制氢技术现状	93
5.1.4	生物制氢前景	97
5.2	热化工转化技术	97
5.2.1	热化工转化技术发展史	97
5.2.2	固体燃料的气化	97
5.2.3	生物质热解	103
5.2.4	热化工转化优缺点	104
5.3	国际生物质利用简况	106
5.4	我国生物质利用设想	108
5.4.1	农村的生物质利用	108
5.4.2	国民经济中的大生物质能	109

第6章 其他制氢方法 111

6.1	烃类分解生成氢气和炭黑的制氢方法	111
6.2	氨裂解制氢	112
6.3	新型氧化物材料制氢	112
6.4	NaBH ₄ 的催化水解制氢	113
6.4.1	基本原理及装置介绍	113
6.4.2	存在的问题	115
6.5	硫化氢分解制氢	115
6.5.1	硫化氢分解反应基础知识	116
6.5.2	硫化氢分解方法	117
6.5.3	主要研究方向	120
6.6	太阳能直接光电制氢	121
6.7	辐射性催化剂制氢	122
6.8	各种化工过程副产氢气的回收	122
6.9	电子共振裂解水	122
6.10	陶瓷和水反应制取氢气	122

第7章 氢的纯化 124

7.1	氢气中的杂质	124
7.2	为什么要纯化氢	125
7.2.1	能源工业要求	125
7.2.2	现代工业的要求	126

7.2.3	在电子工业中的应用	127
7.3	氢的实验室纯化方法	127
7.3.1	纯化方法概述	127
7.3.2	实验室催化纯化	127
7.3.3	实验室聚合物膜扩散法	127
7.3.4	实验室金属氢化物法	131
7.4	氢的工业纯化方法	132
7.4.1	低温吸附法	132
7.4.2	工业化低温分离	133
7.4.3	工业化变压吸附	133
7.4.4	工业化无机膜分离	136
第8章	太阳能-氢能系统	139
8.1	什么是太阳能	139
8.2	如何从太阳能得到氢	140
8.2.1	太阳能电解水制氢	140
8.2.2	太阳能热化学制氢	141
8.2.3	太阳能光化学制氢	141
8.2.4	太阳能直接光催化制氢	141
8.2.5	太阳能热解水制氢	144
8.2.6	光合作用制氢	144
8.3	太阳能-氢能系统	145
8.3.1	太阳能-氢能系统	145
8.3.2	尝试太阳能-氢能系统	145
8.4	太阳-氢能系统的科学性、经济性	146
8.4.1	太阳-氢能系统的科学性	146
8.4.2	太阳-氢能系统的经济性	147
第9章	氢的储存	148
9.1	氢能工业对储氢的要求	148
9.2	目前储氢技术	148
9.2.1	加压气态储存	148
9.2.2	液化储存	149
9.2.3	金属氢化物储氢	150