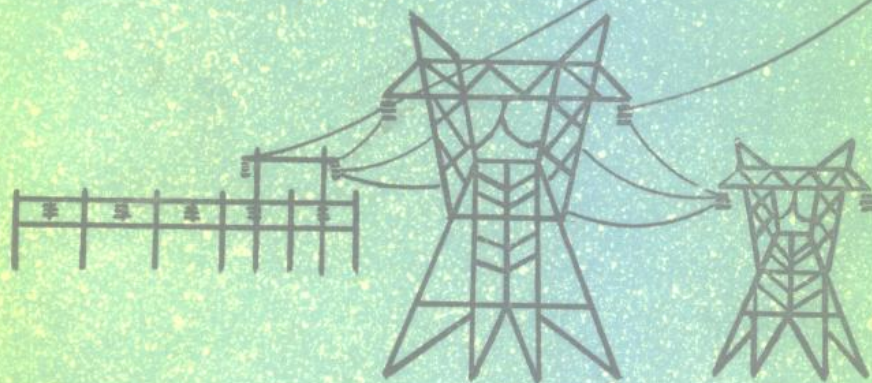


氢能

陈丹之



西安交通大学出版社

10040

氢 能

陈 丹 之



西安交通大学出版社

内 容 简 介

氢能是一二十年来迅速发展的一种新能源；氢能学科是崭新的一门能源科学。氢是一种独特的元素。氢及其同位素既是一种高能核燃料，又是一种高效、高热值的化学燃料。

本书是国内第一本系统而全面地论述氢能的专著。全书共分八章：第一章为绪论；第二章为氢的基本性质与利用依据；第三章为氢能利用；第四章论述氢的生产工艺；第五及第六章是储氢和输氢原理与技术；第七章阐述氢的安全问题；第八章讨论氢能系统及其发展方向。书末还备有附录并在各章中提供大量参考文献以供查考。

本书内容丰富，理论结合实际，反映最新世界氢能利用与研究的成就，其中包括作者本人在国内、外发表的研究成果，是一本研究新能源的重要书籍。它可供广大从事氢能及其他能源开发与利用的科技工作者使用。也可供广大的动力工程、航天航空、交通运输、化学、化工、物理、核工、制冷、冶金以及从事安全管理等技术工作人员和高等院校有关专业的师生参考。



责任编辑 潘瑞麟

*

西安交通大学出版社出版

(邮政编码：710049)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张13.25 插页4 字数：349 千字

1990年11月第1版 1990年11月第1次印刷

印数：1—1500

ISBN 7-5605-0356-X/TK·36

定价：3.30元

序 言

随着人类社会的发展和人民生活水平的提高，世界上普遍出现了能源和环保等重大问题。矿石燃料不仅储量有限，而且由于石油、煤炭等矿石燃料中含有碳、硫，尘埃及放射性物质，它们跟空气燃烧后的生成产物中含有大量的 CO_x 、 SO_x 、 NO_x 及一定剂量的放射性物质与致癌物质，造成对人类生活环境的严重污染，既直接威胁人类的健康，又破坏自然界的生态平衡，并造成反常的气候变化。再加上酸雨的频繁发生和水源的不断污染，造成动植物的死亡。为了综合解决人类所面临的原料、食物、健康和环保等方面的挑战性问题，研究新的，既能代替矿石燃料又能使人类今后得以长期依靠的清洁能源，已成为世界和我国新科技领域中的首要问题。

氢是一种清洁的新能源。氢和氧燃烧时生成清洁的和无污染的水。氢中不含碳、硫及其他有害杂质，故在空气中燃烧时不会产生 CO_x 、 SO_x 和致癌物质。这就大大地减轻了对环境的污染，改善了人类健康、保护了自然界的生态平衡。氢除了具有矿石燃料的各种优点外，还有它独特的优点，即：它可储、可输性好；它不仅是高能燃料，又可作为中间载能体使用；它转换灵活、使用方便、清洁卫生；在自然界中形成水-氢-水自然循环，而且由于海水占地球表面71%，故氢及其同位素的资源不愁匮乏。所以，氢能是一种可以再生的永久性的清洁能源，符合人类长远发展的需要。因此，从70年代起，世界各国对氢能的开发研究十分重视。在发达的资本主义国家的高技术发展，它占有重要的地位。

近十余年来，国外在氢技术、氢能系统和氢能经济的开发研究与推广应用等方面均有较快的进展。美、西德、苏、日等国对氢能都有研究规划；中东地区的产油国家也都积极参与氢能的开发研究工作。继技术先进国家50年代初氢弹试验成功之后，氢在航天、航空领域中的应用也日益扩大。液氢(LH_2)、液氧(LO_x)火箭发动机应用技术日趋成熟。燃氢的超音速民用运输机也开始进入应用行列。1988年，苏联成功地试飞了燃氢的涡轮喷气飞机TY-155，同年6月第一架以氢作为燃料的私人飞机也在美国佛罗里达州试飞成功。在地面运输中，出现了由西德航天中心(DFVLR)和BMW*公司研制的液氢汽车及奔驰公司制造的氢气汽车。以氢为燃料的内燃机车与超导磁浮高速列车也正在加拿大和日本等国进行研制。氢的储存和输配技术有了可观的进展，发展出液氢以及金属氢化物储氢的新技术。氢浆的生产与输运技术也在不断发展。此外，还在研究固氢的生产与储存技术。氢能与核能以及氢能与太阳能的复合的能源系统正在开发之中。太阳能制氢技术已达到了工业试用阶段。氢不仅在国防和运输上用作为高能燃料，且正逐渐向民用和通用能源方向过渡。继美国之后，瑞典也建立了所谓“氢能家庭”的示范应用。用清洁的新能源——氢能，逐渐更替矿石燃料的理想，正在逐步变为现实。

我国对氢能的研究起步不算太晚。从70年代起，我们成功地试验了氢弹。氢在航天事业的发展中也得到了应用。在“长征3型”火箭的第三级中采用了以 LH_2 - LO_x 作为燃料的先进推进技术。在70~80年代期间，太阳能光解制氢技术以及储氢材料与氢-氧电池技术都有过开发和研究。近年来，汽车和内燃机中开始试用注氢技术。但是，从能源的开发与利用

* 专用外文缩写名词，见附录

角度来看，由于我国长期以煤炭作为主要能源，所以对新能源，特别是对氢能的开发和利用不够重视。从国力上，我们在氢能研究方面的规模尚很小，科研力量也不够强大。

为了普及氢能科技知识，推广氢能利用与发展成果，作者在多年从事新能源研究工作的基础上，广泛采集氢能研究的最新资料，从内容上加以系统整理和分析，写出《氢能》一书，以飨读者。

全书共分八章。其中前三章讨论氢能的来源、特点、氢及其同位素的基本性质及其用作能源的内在依据和氢能的利用与发展方向。用近代科学的观点，将氢能与核能统一起来，把氢能看作为一种崭新的一次新能源。高度评价氢及其同位素作为高能燃料的作用，把氢能看作是今后人类使用的理想能源。

第四到第六章讨论氢的生产、储存、输配原理和技术。其中把重点放在第四章氢的制取方法上。

第七章专门阐述氢能利用中的安全问题。氢的安全生产与使用不仅牵涉工作人员的安全，也直接会影响氢能的利用与推广。由于世人一般对使用氢能怀有恐怖情绪和传统的偏见，因此介绍氢的安全使用技术，解除人们对安全的顾虑也就成为推广、使用氢能的前提。在本章中，作者从氢的基本性质与固有特点出发，分析用氢的潜在危险因素。在熟悉氢的本身特性之后，就可以得出氢的安全使用规律。大量的氢能利用实践证明：氢有着长期使用的安全记录，它并不比使用其他化学燃料或核燃料危险。

本书的最后一章，第八章论述氢能系统及其发展方向。提出了氢能系统的概念和能源系统的评价标准；强调了氢能系统的重要性及其跟其他能源系统的长远结合方向。

作者衷心希望，通过本书的出版，能使广大读者对氢能的认识有所提高，为壮大我国的氢能科研队伍，促进氢能事业的发展作些微薄的贡献。

本书承西北工业大学七系王宏基教授审阅。王教授在百忙工作中抽出时间为本书审阅手稿，提出了许多宝贵的意见并对手稿作了不少有益的指正，作者谨在此深表感谢。

西安交通大学出版社为本书提供出版机会也一并在致此致谢。

陈 丹 之

1989年8月于西安交通大学能源与动力工程系

目 录

序言

第一章 绪论

- 1.1 氢能的涵义.....(1)
- 1.2 氢能利用的历史背景^[1].....(2)
- 1.3 氢能的利用与发展简史.....(6)
- 参考文献.....(9)

第二章 氢的基本性质及其利用依据

- 2.1 氢的基本性质.....(12)
- 2.2 氢的状态方程及其热力性质.....(19)
- 2.3 氢作为能源使用的内在依据.....(24)
- 参考文献.....(25)

第三章 氢能利用

- 3.1 氢核聚变能的利用.....(26)
- 3.2 宇航推进.....(30)
- 3.3 车船动力.....(38)
- 3.4 氢能发电.....(55)
- 3.5 氢氧电池.....(63)
- 3.6 家庭用氢的前景.....(72)
- 参考文献.....(73)

第四章 氢的制取

- 4.1 制氢的物质来源.....(77)
- 4.2 制氢的能源.....(77)
- 4.3 制氢工艺.....(82)
 - 4.3.1 电解制氢.....(82)
 - 4.3.2 热解制氢.....(96)
 - 4.3.3 几种新的制氢工艺.....(111)
 - 4.3.4 矿石燃料制氢.....(116)
- 4.4 制氢的经济性分析.....(122)
- 4.5 氘和氚的制取.....(133)
- 参考文献.....(135)

第五章 氢的储存

- 5.1 气氢高压储存.....(142)
- 5.2 深冷液化储存.....(143)

5.3 金属氢化物储存	(147)
5.4 非金属中的氢化储存	(155)
参考文献	(156)
第六章 氢的输配	
6.1 概述	(158)
6.2 氢气输送	(158)
6.3 液氢输送	(161)
6.4 输氢管道的材料	(165)
6.5 输氢成本分析	(166)
参考文献	(168)
第七章 氢的安全性分析	
7.1 危险的来源	(170)
7.2 总的综合评价	(174)
7.3 保安措施	(177)
7.4 小结	(181)
参考文献	(182)
第八章 氢能系统	
8.1 氢能系统的概念	(183)
8.2 氢能系统的评价标准与实例分析	(184)
8.3 氢能系统跟其他长远能源系统的结合	(190)
参考文献	(199)
附录	
附录 A 氢的状态方程式系数表	(200)
附表 A1 仲氢的维利型状态方程系数	(200)
附表 A2 饱和氢气状态方程的系数值	(201)
附录 B 氢及其主要燃烧产物的热力性质	(202)
附表 B1 氢与氧化剂及其主要产物的标准生成热*	(202)
附表 B2 氢气及气体氧化剂及其主要反应产物的定压比热	
附表 B3 氢气与气体氧化剂及其主要反应产物的化学平衡常数	
附表 B4 氢气与气体氧化剂及其主要反应产物的焓差	
附表 B5 氢气与气体氧化剂及其主要反应产物的熵	
附表 B6 高压下气体热力性质的修正	
附录 C 重要单位和术语缩写说明	(203)
C1 重要参数单位符号表	(203)
C2 术语缩写与外文名缩写说明	(205)

第一章 绪 论

1.1 氢能的涵义

所谓氢能，是指以氢及其同位素为主导的反应中或者氢在状态变化过程中所释放的能量。氢能可以是由氢的热核反应释放，也可以由氢跟氧化剂发生化学反应所放出。前一种反应释放的能量通常称为热核能或聚变能，后一种反应放出的能量称为燃料反应的化学能。氢是一种活泼的元素。它不仅可与氧及卤族元素等化合放出化学能，而且还可与金属等化合而释放出化学能。

不同种类的氢反应，其放出的能量是大有差别的，因而其利用程度和利用方式也可各不相同。

根据爱因斯坦的质量和能量的相互转换关系，

$$E = \Delta mc^2 \quad (1.1)$$

式中 Δm 为反应前、后物质的质量的变化； c 为光速； E 为反应前、后由于物质质量变化所转化的能量。氢变为氦的转换反应是



所放出的热核能为

$$E = (4 \times M_H - M_{He}) \times c^2 = (4 \times 1.673 \times 10^{-24} - 6.644 \times 10^{-24}) \times (3 \times 10^{10})^2 \\ \times 10^{-7} = 4.32 \times 10^{-12} \text{J}$$

这里 $M_H = 1.673 \times 10^{-24} \text{g}$ 为氢的原子质量； $M_{He} = 6.644 \times 10^{-24} \text{g}$ 为氦的原子质量。式(1-2)表示：在氢的聚合反应中，四个氢原子质量的消耗可以生成新的元素氦，并换来 $4.32 \times 10^{-12} \text{J}$ 的能量。因此，消耗 1 kg 氢原子质量可以换得的氢能量为

$$E = 4.32 \times 10^{-12} / 6.692 \times 10^{-24} \times 10^{-3} = 6.455 \times 10^{14} \text{J}$$

这就是说，在氢氦热核反应中，每消耗 1 kg 的氢可换得的氢能约相当于 25000t 的好煤* 在燃烧反应中所放出的能量。由此可见氢能的巨大潜力。

现在的问题是：宇宙或地球上氢的来源或储量究竟有多少？如何实现氢的这种热核反应？如何人工控制和有效利用这种氢能？

事实上，氢是银河系统中最丰富的元素。太阳容积的 80% 是由氢构成的。在地球上，氢跟氧化合以水的形式大量存在于江、河、湖、海、洋之中。千百万年来，太阳中就一直在进行着氢变为氦的热核反应。太阳所放出的光和热之所以经久不衰，就是这种高温热核反应的结果。其中，大部分放出的能量散射到广阔无垠的宇宙空间中。只有很小的一部分能量射到地球上，为地球所吸收、利用，成为地球上万物生长和转化的能源。在这里，“万物”两字中不仅包含有生命的动植物、而且也包含各种无生命的矿石燃料和核燃料等等。今天正在利用

* 我国高质量煤的热值平均约为 25120kJ/kg

的太阳能、地热能、水能、风能、海洋能、生物能等等，追根溯源，无一不和这种氢核反应有关。如何利用这种巨大的能量为人类造福，是摆在我们前面的一项光荣而艰巨的任务。

跟氢的热核反应不同，氢能也可在较低温度下通过氢和氧化剂的化学反应来放出。常见的氢氧反应为



其中(g)代表气态。在常温(298K)和常压(0.1013MPa)下，氢氧反应放出的燃烧热 $4H_0 = 1.21 \times 10^5 \text{kJ/kgH}_2$ 。在这种化学反应中、反应前、后物质的总质量并无变化。只是由于反应中原始物质和生成物质的化学性质发生了变化，出现了反应前、后生成热上的差别，而放出了反应热。这种化学反应放出的能量比氢核反应放出的能量几乎小一百万倍，但跟普通烃类液体燃料在同样氧化剂中燃烧时所产生的燃烧热相比，则几乎要高 2.8 倍。然而，这种已有几百年应用历史的氢氧化学反应，在当今使用的各种热力发动机中，仍未得到广泛的采用。它应是今后需要推广使用的一种新能源。

在今天，人们不仅可以利用氢核反应和氢的燃烧反应所放出的能量，而且还可利用氢的转化反应、重合反应以及由于氢的物态变化所放出的能量，譬如象氢和各种金属元素或合金化合时所放出的能量以及氢在膨胀机中膨胀时所放出的能量等等。氢在这些理、化过程中释放的能量，跟氢核、氢氧反应中放出的能量相比，数量上更小，但有时仍可为人类服务，如用于取暖、空调等等。

1.2 氢能利用的历史背景^[1]

近一二十年来，美国、加拿大、西德、日本等国家普遍重视对氢能的开发和利用。从世界范围来看，虽然各国的发展情况极不平衡，但其主流是在不断发展的。这可以从下列一些共同的历史背景中找到根据。

1.2.1 能源背景

当前世界上的主要能源是矿石燃料，即：石油、煤和天然气等。矿石燃料是地球上经过千百万年演变所积累的化石燃料。它是属于一种非再生的能源，其储量有限。然而，随着世界人口的增长（世界上每隔三四十年人口几乎要增加一倍）以及人民生活水平的逐年提高，能源的消耗速率也迅速提高。世界的能耗量几乎每隔 12 年就要翻上一番。由于社会对能源需求的增长率远远超过了矿石燃料的生成率和供应速率，这就必然造成世界能源的短缺与供应的紧张。

1973 年由于中东石油生产国对一些发达国家采取石油禁运，使这些被禁运的国家出现了所谓“能源危机”，同时也对一些石油和煤炭资源缺乏、能源依赖外部进口的国家造成很大的冲击。近来石油市场价格虽有降低，各国也陆续发现和开发了一些海上油田和煤炭资源，但通过这次世界性的能源危机与石油冲击，使人们深感矿石燃料资源的不足。根据文献^{[2][8]}的初步估计（参阅图 1.1），到了 21 世纪 50 年代以后，矿石燃料的资源将面临日益紧张和枯竭的局面。即使近一二百年中还可能发现新的油田和煤田，但如按目前这样的能耗增长率开采下去，到下世纪中期以后，能源问题会变得十分严重。此后，矿石燃料在残存的矿藏中不是属于品质很差的，就是难以开采的或者需要付出很高代价才能取得的燃料。因此，开发和

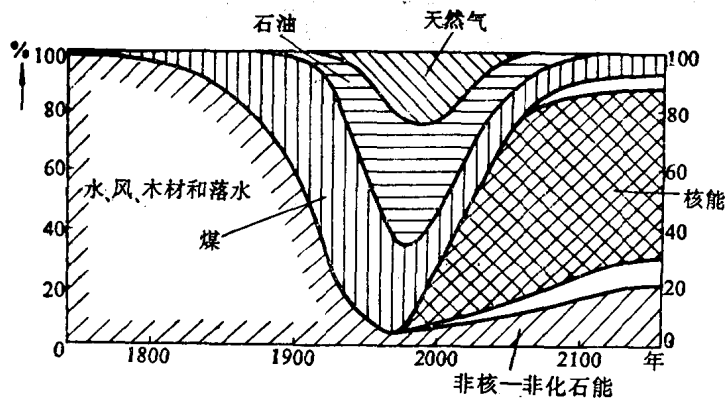


图 1.1 各种能源在不同世纪中的更替情况[8]

研究新能源已是当今世界上刻不容缓的一件大事。

另一个迫切需要解决的问题是：当石油资源枯竭之时，世界上千百万台汽车、拖拉机、飞机、轮船等将用什么作为燃料？运输问题如何解决？有人会说，石油用完之后还可以用煤或从煤中制取煤油、制造人造燃料。不错，这是一种解决办法。但是从历史发展的长河来看，这仍是一种不能持久的缓冲措施。

大力发展水能利用、开发核能、太阳能、风能、地热能、海洋能和生物质能等等，这些都是应当采取的种种长远措施。但是，这些新、旧能源都没有具备矿石燃料那样的重大优点，如：能量比较集中，可储、可输以及使用可以分散、方便等等。象水能、太阳能、地热能、海洋能等不是受地理条件的限制，就是受气候条件的限制。核能的能量密度虽然很高，但也存在放射性问题，对环境污染及生命安全有影响，不宜分散使用。总之，这些能源也不能满足运输部门的需要。

因此，作为一种理想的能源或燃料，特别是作为运输上应用的能源，最好应当是既具备矿石燃料的优点，又能符合长远能源发展的要求。在这方面，氢能就是一种理想的能源。因而对它的开发和利用也就应运而起了。

1.2.2 环保背景

矿石燃料除了本身的资源有限，约可供世上几百年使用外，还存在另一个严重的缺点，即它对环境的污染特别严重。矿石燃料，特别是煤，从其开采起，中间经历加工、运输、置放、使用、直到排烟与变成垃圾，每经一个阶段都要对环境产生不同程度的污染。所谓环境污染，不仅包含对大气的污染、而且也包括对水、对土地等的有害影响。

以大气污染为例进行说明。矿石燃料的主要成分是C、H。根据燃料本身品质的好坏，其间还包含有S、机械杂质，灰分及微量的放射性物质。矿石燃料在空气中燃烧时，除产生CO₂和H₂O之外，还产生有害的CO_x、SO_x、NO_x、HC、尘粒、灰渣和放射性。

表 1.1 为一个 1000MW 燃烧矿石燃料的发电厂的每年对大气的污染情况。根据这一表据，就不难估计矿石燃料对大气污染的严重程度。假如按当今世界一年的能耗率为 $\sim 10^{18}$ W 来计算，则当分别使用煤、石油和天然气来供应能量时，其全年排放到大气中有害的污物量分别为： 669.9×10^8 t； 616.4×10^8 t 和 42.3×10^8 t。核放射性的剂量对烧煤和油的情况分别为： 280 Ci 和 5 Ci，天然气的排烟中则不带放射性。这样，世界上每年将有几百亿吨的污染

表 1.1 一个功率为 1000MW，烧矿石燃料的发电厂每年对大气的排污量估计^[4]
(取负荷率为 0.75)

燃料种类	矿石燃料		
	煤	石油	天然气
燃料消耗量， 排入大气中的污物量，10 ³ t	2.3 × 10 ⁶ t	1.67 × 10 ⁶ t	192.92 × 10 ⁶ m ³
尘粒	4.17	0.83	0.31
SO ₂	118.77	52.37	0.02
NO ₂	18.75	21.88	21.56
HC	0.31	0.42	0.03
CO	1.04	0.63	0.51
CO ₂	6556.00	6088.00	401.00
醛	0.004	0.21	—
核的放射性(10 ⁻⁴ Ci)			
Ra—226	172	1.5	—
Ra—228	108	3.5	—

物由煤和石油来毒害大气。其中 SO₂、NO₂ 的毒害无论从数量或质量上都很严重。从人类和生物的健康来说，CO、SO₂、NO₂、HC、尘粒，特别是镭放射，都是非常有害的。如果考虑到有些石油使用过程中的含铅量，则毒害的情况就更为严重了。

图 1.2 中形象地表达了用矿石燃料作为能源时，其排放物对人体的危害情况^[5]。

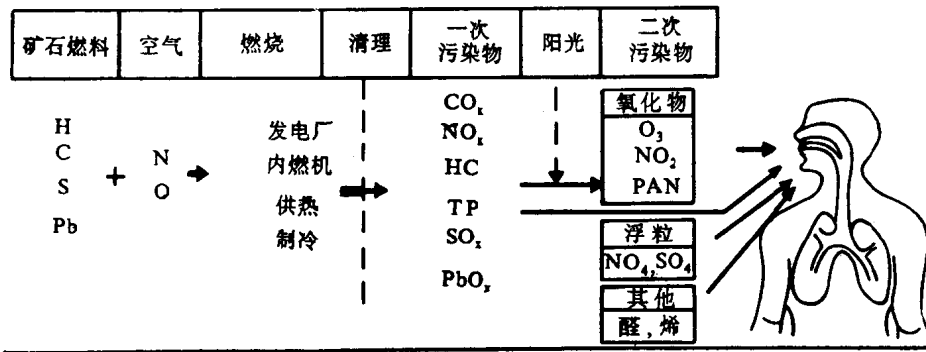


图 1.2 矿石燃料的产物排气污染对人体的危害^[5]

由于燃烧矿石燃料而放出的大量有害排气产物对空气的污染，使得世界上大城市的居民染上了种种呼吸道疾病，以至患上癌症，严重危害生命健康。假如今天把矿石燃料对水源、土地的污染损失以及在职人员和广大人民由于污染引起的疾病、死亡损失也折合成费用计算进去，则损失费用就十分可观了。

燃烧矿石燃料排出到大气中的烟气成分，如： CO_x 、 NO_x 和 SO_x ，经过日积月累已对地球的气候和局部地区的生态环境造成灾难性的影响。大气中 CO_2 和 NO_x 的大量增加，使地面附近大气层中出现了温室效应，造成气候反常，旱涝成灾。 SO_x 和 NO_x 在大气中含量的增多，在一定的条件下会和水汽相遇而生成酸。目前世界上不少地区，如：美国、加拿大、瑞典、日本以至我国的东北和上海等地区都出现了酸雨。在遭受酸雨或河水污染严重的地区，农作物死亡，树木枯萎，池塘、河流中的鱼虾大量死亡，使地球上的生态平衡受到极大的破坏。这使人们认识到必须把能源的选择和使用跟环保问题紧密结合起来，而用氢作能源在环保方面就显示出它所特有的优点。

氢是一种清洁的燃料。它本身无毒、无臭；跟氧燃烧时产生纯净的水。水不但不污染环境，而且在太空等缺水的环境下还可供人饮用。氢在空气中燃烧时，其产物中虽也会生成 NO_x ，但是 CO_x 、 SO_x 及尘粒、放射性等不良影响都完全排除。因此，它在使用中对大气的污染很小。从环保角度来看，它无疑是一种理想的燃料。

1.2.3 生产力背景

生产力背景不仅包括社会上对氢及氢能的需求，而且还包括当时科学水平下实现有规模地制氢、储氢、输氢、用氢以及氢的综合利用的可能性。社会上新科学技术的发展是彼此互为促进、相辅相成的。过去，当社会生产力还不够发达时，氢能的开发和利用长期受到抑制。但是，在今天，社会对氢的需求量已大幅度增加。譬如，以美国为例，在整个 70 年代中，每年平均的氢消耗量约占当年总能耗量的 1%。假如以 70 年代初期的耗氢量为基础，则到 1985 年耗氢量增加 2~4 倍，而到 2000 年估计要增加 5~20 倍。其他象加拿大、西欧地区有些国家估计也会有成倍的增长。当然，这样的制氢量并非完全用于能源，而其中大部分目前还是在工业领域中使用。

70 年代以后，氢能的开发与利用进入了新的阶段，这是因为科学与技术的进步为它的发展创造了条件。原子能技术迅速发展并日趋成熟。热核技术在某些先进国家中已见诸应用。可控热核反应已进入中间试验阶段。氢弹试验成功。核能和太阳能新技术的发展以及水能、海洋能等再生能源的开发和使用都要求象氢这样的物质作为中间载能体来调节能量和转换能量。氢的大规模液化技术的成功和储氢金属化合物的出现也给氢能的应用提供了推广的条件。人们今天对氢的性质、变化规律以及对氢能重要性认识也日益深刻。这样，氢能发展的生产力背景也就具备了。

1.2.4 国防背景

二次大战后，世上的军备扩充有增无减。出乎威慑或防御力量的需要，世界上的强国纷纷研究威力巨大的热核武器。氢及其同位素首先被列入试验研究之中。70 年代之前多数列强都完成了不同能级的氢弹试验。

从一个国家的能源政策和备战要求出发，国不分大小都希望本国能在能源使用及能源储备上独立自主、不受外界约束。对一些燃料资源缺乏，国土狭小的国家，这方面的要求更为迫切。

氢的资源丰富，在世界上的分布也比较均匀。氢可以用各种一次能源、特别是核能和太阳能来生产。它储存、输送、使用方便。所以，氢能既可对一个国家中的各种能源起协调、补充作用，也可以迎合一国的能源独立自主的需要。

1.3 氢能的利用与发展简史

根据各历史阶段利用氢能的不同特点,可以把整个氢能发展历史分为三个时期,即:1)启蒙探索时期;2)开发试用时期;3)宣传规划时期。

1) 启蒙探索时期

这段时间的经历很长。大致可以追溯到18世纪初叶到20世纪的20年代(1700~1930)。该时期的特点是:绝大多数人对氢的认识很模糊。虽然个别先知对氢能的前途作了深刻的乐观的预言,但仍为社会上广大人们所不理解。氢能只在少数领域中摸索着使用。

早在16到18世纪之际,氢就为一些炼丹术士所接触。当金属置于酸中溶解时会产生出这种特殊的气体,但当时对这种物质的本质没有认识,也不能把它单独分离。

1766年卡文迪许(Cavendish)首先把氢分离出来并称它为“可燃空气”,但对氢和空气的性质仍未认识。

1783年法国拉瓦锡(Lavoisier)通过氢和空气的燃烧试验,正式为“氢”命名,并称它是一种“制水剂”。之后,在差不多一整个世纪中,对氢和氢能的认识无甚进展,只是从19世纪中叶起,氢作为城市煤气的一种成分用以改善煤气燃烧与使用性能。

1869年俄国门捷列夫对化学元素作出科学的整理,创作出周期表。它为其后寻找氢与其他元素之间的作用规律打下了基础。

1870年法国伟大的预言家朱利·凡尔纳(Jules Verne)提出了氢能利用的新概念。他在著作中写道^[6]:

“水无疑可用电分解为它的组成元素,然后产生强大的可控的动力。……我相信,水总有一天会用作燃料,其组成元素——氢,既可单独、又可和氧联合使用,作为用之不尽的热源和光源。这种能源的强度是煤所不及的。……当煤用尽时,我们将用水来生热、供暖。水是未来的煤。”

凡尔纳的预言是相当深刻的。用现代语言来说,它包括着三个重要的观点:(1)水总有一天成为未来燃料的主要来源,其成分氢和氧都可用作燃料;(2)电解水可以制氢;(3)氢能是巨大的,为煤所不及。这段预言大部分已为现实所证明。

1898年杜瓦(Dewar)首先使氢液化并发明了杜瓦瓶,为氢的储存开拓了新途径。

在凡尔纳预言之后半世纪,英国剑桥大学生物化学教授哈顿(Haldane J. B.)在1923年发表的著作中预言^[7]:当煤和油田在本世纪末采尽时,英国可用金属制成的风车排阵来带动电机发电。其多余电力,可用于电解水制氢和氧气,然后把这些气体液化储存在真空夹套的容器中埋入地下。

哈顿预言的新观点是:他已预感到矿石燃料终究要枯竭,并提出未来将出现蓄能和能量转换的问题。他还预见到氢可作为中间载体使用。他在著作中还建议氢可作为转化的通用燃料使用,并预示它能在燃料电池中应用。

20年代后期,德国齐柏林公司制成了使用氢气的“LZ-127 齐柏林号”飞艇。1928年它首次载客作横渡大西洋飞行。飞艇连续成功地航行590次,其中横渡大西洋144次,来回于德国和南美洲之间,直到1937年才退役。这只利用氢气浮力的飞艇,其飞行总里程达到164906km,载运乘客总数13110人,货运总量达到106955kg。在这里,氢虽然只作为产生

浮力的工质使用，但这也是氢在空中运输中的首次应用。

2) 开发试用时期

从本世纪的30年代起到60年代止，可称为氢能的开发试用时期(1931~1970)。这一时期的特点是：氢能在各方面都有开发试用，但它们基本上是试验性的。除了火箭发动机中有持续的应用和发展之外，氢能在其他方面并没有定型的或有计划的推广。

1930年前后，正是活塞式内燃机作为原动机使用的黄金时期，氢在此时也在内燃机上进行了试用。两次世界大战中，德国都因汽油短缺而开展过烧氢内燃机的研究^[8]。当时，某些石油短缺的国家也曾激发过用氢研究的热情。二次大战结束后，加拿大的金(King, R.O)和兰特(Rand, M.)等也开展过对活塞内燃机中燃氢技术的研究^{[9]、[10]}，热效率达47%。

在本世纪的30年代到50年代之间，出于飞行和航空动力的需要，氢在各种飞行器上的试用逐渐增多。

1936年德国兴登堡飞船设计成功，并投入到德国和美国之间的商业航线上使用。此飞船同样利用氢气浮力作为航行动力。不幸的是，使用不久，当它在1937年5月6日到达美国着陆于新泽西州机场时，突然起火燃烧。全船97人中有35个丧生，成为一件轰动一时的新闻。兴登堡飞船失事的原因没能真正查清。由于当时报章、电台大肆宣传，给人造成一种用氢不安全的错觉，所以它是氢能利用史上的一次大挫折，给后来氢能的推广、使用带来障碍。

氢作为飞机发动机燃料使用的优越性早在1938年已为西柯尔斯基(Sikorski, I.I.)所预见^[11]。他认为假如能掌握液氢的廉价生产和安全使用，则用液氢为燃料时，几乎所有航空发动机的工况都可改善，并可加长飞机的航程。

50年代初，在喷气发动机上进行烧氢试验获得成功。到50年代中期，美国NASA发表了用液氢作为超、亚音速飞机燃料的可行性报告^{[12]、[13]}。先后在B57双引擎轰炸机中进行发动机改装和烧氢试验，情况良好，运行安全。发动机改装用氢的试验获得成功。

以液氢和液氧作为火箭发动机燃料来产生巨大推力的想法早在第二次世界大战后期就已形成。但是用这种发动机来推进宇宙飞船升入太空直到1963年11月才在美国发射成功。液氢/液氧发动机的应用为航天事业的发展作出了重大的贡献。其主要成果之一是：为1968年底阿波罗飞船的人类首次登月飞行开创了业绩，并为今后航天飞机的研制开辟了广阔的前景。在60年代中，美国还进行了一系列用氢作为推进剂的核火箭试验^[14]。

这样，从飞艇、飞机、火箭发动机到宇宙飞船，氢与氢能已相当广泛地在航天航空领域中得到了应用。

这段试用期中的另一件大事就是氢弹试验成功。

1952年美国在太平洋岛屿上首先进行了大约1000万吨级的氢弹试验。此后，1961年苏联也爆炸了一颗5800万吨级的氢弹。60年代，我国在西部上空也成功地试验了氢弹。对氢弹的掌握，这是氢能利用发展史中一个巨大的里程碑。

随着燃氢发动机的发展，氢能直接转变为电能的思想也在60年代渐趋成熟。1961年英国培根(Bacon, F.T)提出了燃料电池的新概念^{[15]、[16]}。之后，美国NASA用氢氧电池产生电能，供阿波罗飞船登月航行所需。

60年代后期，应用氢能的思想开始触及到家庭日用的领域中。1968年美国芝加哥的煤气技术研究所(IGT)提出了未来家庭用氢的新设想，并向大众展览了许多催化式烧氢用具，

扩大了民众对氢能应用的眼界。

随着氢能各个领域中的广泛试用,制氢、储氢、输氢的技术在这一阶段也有发展。1952年氢的大规模液化和储存获得成功。用金属氢化物储氢的系统在60年代后期也试验成功^{[17]、[18]}。加上电解制氢与输氢技术的发展,氢能的应用与发展已初具规模。

3) 宣传规划时期

从本世纪70年代开始到现在,氢能的开发与利用进入了一个宣传、规划的新时期。鉴于氢能具有巨大的潜力、强盛的生命力和突出的优点,因此许多科学家提出:氢是未来地球上的一种通用燃料或是伴随人类发展的长远理想能源^{[19][20][21][22]}。氢能已由个人的开发研究逐渐变为世界性的共同开发的项目。一些政府组织和科学团体也拨出经费支持对氢能的研究和切实探讨未来大规模制氢、储氢、输氢、用氢以及氢能综合经济利用的可能性并摸索发展中的关键技术问题。

这一时期的重大活动有:

1974年3月首次在美国迈阿密召开了“氢能经济利用会议”,有30多个国家700余人参加。会后不久成立了“国际氢能学会”(IAHE),它负责推动世界氢能事业的发展与交流及展览氢能利用成果,负责创办“国际氢能杂志”。此后于1976、1978、1980、1982、1984、1986和1988年先后在美国迈阿密、瑞士苏黎世,日本东京、美国洛杉矶、加拿大多伦多、奥地利维也纳及苏联莫斯科召开了七次世界氢能会议。这种大型世界性氢能会议以后每隔二年举行一次。第八次国际氢能会议在美国夏威夷举行。会上除了要讨论制氢、储氢、输氢和用氢及如何规划氢能发展之外,还把全球的温室效应、美国的航天飞机规划与国际的航天飞机规划以及冷核聚变等新技术、新概念列入专题讨论。同时还举办氢能成就展览会。所以,每次世界氢能会议都对氢能事业的发展起了很大的促进作用。

在美国,继六次登月飞行之后,开展了耗资巨大的空间探索规划与航天飞机的发展规划。美国的空间规划也大大促进了氢能、特别是液氢的生产、储运与利用技术的发展。远从70年代初期,美国洛克希德公司就提出应用液氢于运输用飞机的设想,使液氢成为航天与航空运输中的一种新型燃料。

1975年以后,美国政府还开始制订氢能的研究规划。氢能的研究与使用从原先的以航天航空领域中NASA为主导,改为它与美国其他能源研究机构联合进行。1976年美国能源总署(ERDA)成立了氢能协调中心并由政府资助对氢能的研究。资助于氢能研究的经费在1977年为1200万美元^[23]。到1978年度美国能源部(DOE)把研究经费提高到4200万美元^[24]。其资助的研究范围包括:制氢、储氢、输氢、用氢以及对材料、环境和安全的研究。其研究的势头直至1980年才受到制约。

欧洲对氢能的研究也在70年代展开。1976年在比利时召开了欧洲氢能会议^[25],汇集了70年代前期欧洲对氢能利用与生产的研究情况。在西欧幅员有限、缺乏矿石燃料和水力资源的情况下,德、法、意等国十分重视核能与氢能等新能源的开发与研究。以西德尤利希核能研究中心(JFA)和意大利依斯柏拉欧共同体联合研究中心为首的科研机关,积极开展核能制氢和氢核能联合系统的研究。把热化学制氢列入重要的研究规划。同时还开展高温蒸汽的电解以及改善碱性电解制氢的工艺研制。西德的航天航空中心(DFVLR)和一些著名的内燃机、汽车制造厂联合研制成氢能汽车。从1975到1978的四年中,欧洲共同体成员国投入于氢能研究的基金达1600万美元^{[26][27]}。

1979年9月在德国的斯图加特召开了“航空上应用氢能的专题讨论会”^{[28][29]}，重点讨论烧液氢的高、超音速客机在全球上应用的可能性。

在加拿大，从80年代起，该国的国会和政府重视对氢能的开发和研究^[30]。尽量少用碳氢燃料，利用该国便宜而丰富的水力资源来电解制氢。把开发和利用氢能列为其发展新能源的一种国策。加国政府在1981~1985年五年规划中拨出4亿多加元经费供研究和发发展氢能系统使用，以使该国的氢能技术能居世界前列。

在日本的“阳光计划”中制订有该国的氢能发展规划^{[31][32]}。开展热化学、电解以及太阳能制氢的研究。各科研机关还开展H-系列的烧氢火箭发动机及烧氢内燃机和汽车的研究。

最近，美国和英国还展开了21世纪航天飞机研制的竞争。分别提出了所谓“东方快车”和“霍托尔”航天飞机的设计方案。它们都采用以液氢作为燃料的喷气发动机以使航天飞机达到超高音速的速度($M=5\sim 25$)，可以穿越大气进入空间层，然后又通过大气层在地面上水平降落。由于飞行速度很高，因而大大缩短洲际间的航行时间。这种可以水平起降的航天飞机为氢能在航天和空运事业的发展开辟了新的前景。

我国对氢能的开发和利用起步不算很早，但发展速度相当迅速。我国在60年代中就成功地试验了氢弹。以液氢作为燃料的火箭发动机也迅速投入于卫星发射工作。1984年我国成功地发射了使用液氢液氧的火箭发动机的通讯卫星运载火箭。制氢、储氢和输氢技术也有良好的发展。近年来各高等学校和科研机关开展了金属储氢技术，烧氢汽车以及制氢、用氢技术的研究。1985年在我国北京举行了国际氢能系统讨论会。接着于1986年9月在北京正式成立了我国的氢能学会，以推动我国氢能事业的发展。

其他象：苏联、瑞典、瑞士、奥地利、法国和南美等国家及地区也纷纷开展对氢能的研究。因此，从70年代以后，开发和利用氢能已成为世界各国共同关心的事业了。

这段时期里的重要进展可以归纳为以下几个方面：

(1) 制氢技术有了长足的进步。核能与太阳能制氢技术受到多方的重视。热化学制氢和电解制氢工艺不断发展。氢浆与固氢生产技术也有了进展；

(2) 金属储氢的新技术已得到了开发和应用；

(3) 开始研究大规模输氢、配氢的管网系统方案，以及积累小型加氢站的使用经验。对于输氢的压缩机械、容器、金属管道、附件等材料的氢脆问题也开展了研究；

(4) 氢能的利用成果更加巩固，利用的领域扩大。氢能的应用已从过去以航天航空领域为主的局面积积极扩展到汽车、机车、船舶等领域。燃氢的火力发电厂的方案研究以及氢能直接发电的技术也已经展开。氢作为中间能源的体系更加成熟。此外，还提出了氢能应用于制冷、空调、氢的纯化及家用等种种方案；

(5) 提出了各种氢能综合经济利用的方案。探讨氢能与其他能源共同使用的规律。重视对氢能使用中副产品的利用。力求氢能成为人类长远使用的一种新能源。

参 考 文 献

[1] 陈丹之，氢的利用与发展动向，〈西安交通大学学报〉参考资料第15期，1980年10月。

[2] Hubbert, M. K., "The Energy Resources of The Earth", Scientific Ameri-

oan, p.149 Sept. 1971.

- [3] Energiequellen für morgen; Nichtfossil-Nichtnukleare Primaenergiequellen. "Eine Information des Bundesministers für Forschung und Technologie", 1977.
- [4] Bach. W., Fossil Fuel Resources and Their Impacts on Environment and Climate. <Int. J. Hydrogen Energy>, vol. 6 p. 185, 1981.
- [5] Zweig, R. M., Health Benefit of a Chinese Hydrogen Economy, <Hydrogen Systems>, vol. II, p.479, Proc. of International Symposium, 1985, Beijing, China.
- [6] Verne, J., The Mysterious Island. Paris, 1870
- [7] Haldane. J. B., "Daedalus or Science and Future", 1923
- [8] Oemichen, M., Wasserstoff als Motortrieb-Mittel, Im VDI Kraftforschung, Verlag GMBH, 1942.
- [9] King, R. O. and Rand, M., The Oxidation, Decomposition, Ignition and Detonation of Fuel Vapors and Gases, XXV11. The Hydrogen Engine, <Can. J. Technol.>, vol. 33, p. 345. 1955.
- [10] King, R. O. and Others, The Oxidation, Decomposition, Ignition and Detonation of Fuel Vapors and Gases, V, The Hydrogen Engine and the Nuclear Theory of Ignition, <Can. J. Res. Scien.F.> vol. 26, p.264, 1948.
- [11] Sikorski, I. I., "Science and Future of Aviation", March, 3, 1938.
- [12] Silverstein, A. and Hall, E.W., Liquid Hydrogen as a Jet Fuel for High-Altitude Aircraft, NACA, R. M. E55. C28a 1955.
- [13] "Hydrogen for Turbojet and Ramjet Powered Flight", NACA, RME 57 D23, April 26, 1957.
- [14] Edeakuty, F. J., Liquid Hydrogen as a Coolant / Propellant for Nuclear Rockets. Macmillan, New York, 1964. Chapter5.
- [15] Bacon, F. T., "High Pressure Hydrogen-Oxygen Fuel Cell", <Fuel Cell>, vol. 1, 1960
- [16] Bacon, F. T., "Energy Storage Based on Electrolysers and Hydrogen Oxygen Fuel Cells", Proc. of the U. N Conf. on New Sources of Energy, vol. 1, p. 174, 1961.
- [17] Hoffman, K. C, et al., Metal Hydrides as a Source of Fuel for Vehicular Propulsion", <SAE Paper>, No. 690232, Jan. 1969.
- [18] Hoffman, K. C. et al., Metal Hydride Energy Storage Systems," Paper No. 689131, presented at IECEC, 1968.
- [19] DeBeni, G. and Marchetti. C., "Hydrogen, Key to Energy Market", <Eurospectra>, p. 46. June. 1970.
- [20] Bookris, J. O' M., "Hydrogen Economy", <Science>, No. 176, p 1323. 1972.
- [21] Gregory, D.P., "Hydrogen Economy", <Sci. Am.>, vol. 228 No.1, p.13, 1973.