



新·知·识·图·书·馆

◆内容全面◆题材新颖◆创意无限◆

能源新希望—— 氢能

XXXXXXXXXXXXXXXXXINZHISHI TUSHUGUAN

《新知识图书馆》丛书是一套自然科学类丛书，囊括人类科技多个领域等一系列新知识、新技术的应用情况，为青少年朋友了解推动当今人类社会发展的动力提供了方便，同时也为新知识和新技术的传播作出了贡献。

王建国◎编著



安徽师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

能源新希望——氢能 / 王建国编著. — 芜湖: 安徽师范大学出版社, 2012. 1

(新知识图书馆)

ISBN 978-7-81141-724-1

I. ①能… II. ①王… III. ①氢能-能源利用-青年读物②氢能-能源利用-少年读物 IV. ①TK91-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 005853 号

能源新希望——氢能

王建国 编著

出 版 人: 张传开

责任编辑: 吴毛顺

版式设计: 北京盛文林文化中心

出版发行: 安徽师范大学出版社

芜湖市九华南路 189 号安徽师范大学花津校区 邮政编码: 241002

发 行 部: (0553) 3883578 5910327 5910310 (传真) E-mail: asdcbsfxb@126.com

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京燕旭开拓印务有限公司

版 次: 2012 年 4 月第 1 版

印 次: 2012 年 4 月第 1 次印刷

规 格: 700 × 1000 1/16

印 张: 10

字 数: 120 千

书 号: ISBN 978-7-81141-724-1

定 价: 16.90 元

凡安徽师范大学出版社版图书有缺漏页、残破等质量问题, 本社负责调换

前 言

PREFACE

能源是人类社会前进和发展的动力。在当前世界上，能源体系仍以煤、石油、天然气等化石燃料为主，这些能源成为人类发展的根本保证。

随着人口的增长和人类物质文明的提高，人类对能源的需求也日益加大。然而，人类不得不面对一个残酷的事实：随着人类的不断开采，属于不可再生资源的化石能源日益减少，枯竭是不可避免的，大部分化石能源将在本世纪末开采殆尽。同时，化学能源的大规模使用带来了环境的恶化，给世界的生态平衡和人类健康带来威胁。因此，及早摆脱对化学能源的依赖，寻找新能源成了全人类当前重大任务之一。

在人们的迫切要求下，多种新能源被人类开发利用，核能、太阳能、风能、海洋能等，尤其是氢能的异军突起，更是引起了人们的广泛关注。

氢能是氢的化学能，氢在地球上主要以化合态的形式出现，是宇宙中分布最广泛的物质，它构成了宇宙质量的75%。氢具有高挥发性、高能量，同时氢在工业生产中也有广泛应用。氢能是一种二次能源，因为它通过一定的方法利用其他能源制取的，而不像煤、石油和天然气等可以直接从地下开采。

另外，氢本身无毒，与其他燃料相比，氢燃烧时更清洁，除生成水和



少量氯化氢外，不会产生一氧化碳、二氧化碳、铅化物和粉尘颗粒等对环境有害的污染物质。

许多科学家认为，氢能在 21 世纪有可能在世界能源舞台上成为一种举足轻重的二次能源。

早在 1970 年，美国通用汽车公司的技术研究中心就提出了“氢经济”的概念。1976 年美国斯坦福研究院就开展了氢经济的可行性研究。20 世纪 90 年代中期以来多种因素的汇合增加了氢能经济的吸引力。

氢能作为一种清洁、高效、安全、可持续的新能源，被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源，是人类的战略能源发展方向。世界各国如冰岛、中国、德国、日本和美国等国家在氢能交通工具的商业化的方面已经出现了激烈的竞争。我们有理由相信，在将来，氢能，就像阳光一样将照亮世间每一个角落，影响我们的生活。

Contents

目 录

走进氢世界	1
认识氢	1
氢的存在方式	7
氢有哪些性质	14
谁发现了氢	24
传统制氢技术	27
制氢新方法	34
存储氢气的方式	41
如何纯化氢气	47
如何安全储运氢气	50
理想的新能源	55
开启能源新时代	55
人类永恒的能源	58
巨大的能量：氢与核聚变	61



氢弹：氢能威力的见证	64
国外对氢能的研究	80
中国对氢能的研究	83
氢能的未来	85
氢能的应用	88
氢与燃料电池	88
燃料电池的发展	95
作为燃料的氢能	99
引人关注的微型燃料电池	107
氢能汽车	110
氢能汽车的发展	114
用途广泛的氢能	129
后 记	133

走进氢世界

在自然界中，氢是最轻且最丰富的元素，大约占宇宙所有物质的75%，被称为“百素之首”。而且，氢是一种能源载体，是人类可以通过某种途径获得并且能够以工业规模加以利用的能量。地球上的氢主要存在于水中，因此从这种意义上来说，我们地球上的氢资源是取之不尽，用之不竭的。

对于氢，一些人似乎还有些陌生，其实它并不是什么新事物，在很早以前人们就发现了氢，并将其渗透到人们的生产生活中。在本章，我们将揭开笼罩在氢头上的面纱，让大家对其有个完整的认识。

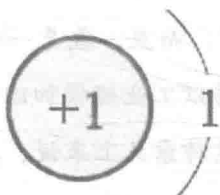
认识氢

要想真正地了解氢，我们首先要熟悉有关氢的一些基本常识。



氢的简介

氢是一种化学元素，化学符号为 H，原子序数是 1，在元素周期表中位于第一位。它的原子是所有原子中最小的。氢通常的单质形态是氢气。它是无色无味无臭、极易燃烧的由双原子分子组成的气体，而且是最轻的气体。同时，它也是宇宙中含量最高的物质。氢原子存在于水、所有有机化合物和活生物中，导热能力特别强，跟氧化合成水。在 0°C 和一个大气压下，每升氢气只有 0.09 克——仅相当于同体积空气质量的 $1/14.5$ （实际比空气轻 14.38 倍）。



氢原子结构示意图

氢元素在太阳中的含量：75%；在地壳中含量：1.5%。

在常温下，氢气比较不活泼，但可用催化剂活化。单个存在的氢原子则有极强的还原性。在高温下，氢则非常活泼。除稀有气体元素外，几乎所有的元素都能与氢生成化合物。

氢的同位素

什么是氢的同位素呢？我们不妨先来看一下同位素的定义。那些质子数相同而中子数不同的原子核所构成的不同原子总称即为同位素。

自然界中许多元素都有同位素。同位素有的是天然存在的，有的是人工制造的，有的有放射性，有的没有放射性。同一元素的同位素虽然质量



数不同，但它们的化学性质基本相同，物理性质有差异，主要表现在质量上。氢在自然界中的同位素有氕、氘和氚3种。其中氕相对丰度（指某一同位素在其所属的天然元素中占的原子数百分比）为99.985%；氘（重氢）相对丰度为0.016%，这两种氢是自然界中非常稳定的同位素。从核反应中还找到质量数为3的同位素氚（超重氢），它在自然界中含量极少。

英国物理学家索第（F. Soddy, 1877—1956年）与卢瑟福（E. Rutherford, 1871—1937年）于1913年首先提出同位素问题。索第认为，同位素的原子量和放射性是不同的，但其他的物理和化学性质相同。此后的几年内，人们虽然相继发现了200多种同位素，但是氢的同位素却一直没有被发现。1919年，德国物理学家斯特恩（O. Stern, 1888—1956年）认为，氢的原子量为1.0079，估计它应具有一种同位素。即一种是原子量为1的氢，即 1H ，一种是原子量为2的氢同位素。根据1与1.0079之间的差值来估计它们的相对丰度值，氢的同位素应占1%左右。但他和同事试图从实验上加以证实却未获成功。

1927年，阿斯顿以氧的原子量等于16.0000为标准（就像过去以水的密度为标准一样），用质谱仪对氢元素进行了质谱分析，测得的氢与氧的比值是1.0077:16.0000，这个比值与化学方法测得的比值非常一致，以至于阿期顿认为，氢元素是没有同位素的，它是一个“纯粹的”元素。

氢的同位素氘（D）被哈罗德·尤里发现。1931年年底，美国哥伦比亚大学的尤里教授和他的助手们，把5~6升液态氢在53约定毫米汞柱（7千帕）、14K（三相点）下缓慢蒸发，最后只剩下2毫升液氢，然后作光谱分析。结果在氢原子光谱的谱线中，得到一些新谱线，它们的位置正



好与预期的质量为 2 的氢谱线一致，从而发现了重氢。尤里将这个新发现的同位素命名为 Deuterium，简写为 D，它在希腊文中的意思是“第二”，中文译作“氘”。但是，尤里等人未发现他们曾预言的原子量为 3 的氢的同位素。尤里因发现氘在 1934 年荣获了诺贝尔化学奖。

1934 年，澳大利亚物理学家奥利芬特（Oliphant, Marcus Laurence El-win 1901. 10. 8—2000. 7. 14）用氘轰击氦，生成一种具有放射性的新同位素氚，质量为 3，命名为 tritium，中文译为氚，符号 T，是具有放射性的另一重要的氢同位素。T (^3H) 显示弱放射性，其半衰期为 12.26 年。科学家发现的 ^4H 的半衰期只有 4×10^{11} 秒。日本理化研究所 2001 年宣布说，该所科学家谷畑勇夫和俄罗斯科学家在设立于莫斯科郊外的原子核研究机构，使用大型加速器，以碳原子为目标进行轰击，制造出了由 2 个质子和 4 个中子构成的氦 6，然后使用液态氢与之撞击，去掉氦 6 原子核中的 1 个质子，结果获得了由 1 个质子和 4 个中子构成的 ^5H 。不过， ^5H 极其不稳定，在极短时间就衰变为氚和 2 个中子。

因此， ^4H 和 ^5H 并没有被公认，人们通常还是认为氢只有 3 个同位素。

由于氢几乎全部是由 ^1H 组成的，所以，氢的最轻的同位素 ^1H 的性质就决定了氢的性质。

^1H 和 D 的分离可用电解法，电解水时， ^1H 的迁移速度比 D 的迁移速度快 6 倍，这样，在剩余物中的 D 的浓度提高。重复电解，则得到 D_2O ，即重水。重水和普通水有很大的不同。

氢同位素主要有以下 3 种用途：①作为热核反应的原料。这是氢同位素最重要的用途。氢的同位素氘和氚是轻热核聚变的材料，在一定的条件下，氘和氚发生核聚合反应即核聚变，生成氦和中子，并发出大量的热。

②利用氢同位素测定地质的历史。随着稳定同位素研究的进展，利用氧、



氢同位素测定古温度已成为沉积环境地球化学研究的前沿课题。从 20 世纪 60 年代开始, 美国及西欧国家的冰川学家就在南极大陆和格陵兰岛的内陆冰盖上钻取冰芯, 通过分析不同年龄冰芯里的氢同位素、氧同位素、痕量气体、二氧化碳、大气尘以及宇宙尘等, 来确定当时 (百年尺度) 全球平均气温、大气成分、大气同位素组成、降水量等诸项气候环境要素。

③用同位素作为示踪剂。氕和氘可以作为“示踪剂”研究化学过程和生物化学过程的微观机理。因为氕原子和氘原子都保留普通氢的全部化学性质, 而氕、氘与氢的质量不同; 氚与氢的放射性不同。这样就可以深入研究示踪的分子的来龙去脉。例如利用氢同位素记录污水的历史, 可以控制污水排放。利用最新的“氢稳定同位素质谱技术”, 开发出对环境有机污染物的“分子水平氢稳定同位素指纹分析法”, 可以追踪污染源。

氢的分布

在地球上和地球大气中只存在极稀少的游离状态的氢。在地壳里, 如果按重量计算, 氢只占总重量的 1%, 而如果按原子百分数计算, 则占 17%。氢在自然界中分布很广, 水便是氢的“仓库”——水中含 11% 的氢; 泥土中约有 1.5% 的氢; 石油、天然气、动植物体也含氢。在空气中, 氢气倒不多, 约占总体积的一千万分之五。在整个宇宙中, 按原子百分数来说, 氢却是最多的元素。据研究, 在太阳的大气中, 按原子百分数计算, 氢占 81.75%。在宇宙空间中, 氢原子的数目比其他所有元素原子的总和约大 100 倍。

根据地球物理学家的意见, 地球分为地表、地幔和地核。氢在地壳中大约为第 10 丰富的元素。地球中的氢主要是以化合物形式存在, 其中水



最重要。氢占水质量的 $1/9$ 。海洋的总体积约为 13.7 亿立方千米，若把其中的氢提炼出来，约有 $1.4 \times 10^{17} \text{ t}$ ，所产生的热量是地球上矿物燃料的 9000 倍。氢也是生命元素。

地球的对流层大气中（离地面 12 ~ 15 千米）：在地球的平流层 0 ~ 50 千米，几乎没有氢；在地球大气内层 80 ~ 500 千米，氢占 50%，在地球大气外层，500 千米以上，氢占 70%。

太阳光球中氢的丰度为 2.5×10^{10} （以硅的丰度为 10^6 计），是硅的 25000 倍（Kuroda, 1983 年），是太阳光球中最丰富的元素。据计算，氢占太阳及其行星原子总量的 92%，占原子质量的 74%（卡梅伦，1968 年）。甲烷存在于巨大行星的大气圈中，其数量大大超过了氢。此外，在木星和土星的大气圈中还发现少量氢。巨大的行星是由冰层围绕着的核心组成，有些是由高度压缩的氢组成。两个最轻的元素——氢及氦是宇宙中最丰富的元素。

人体组成的元素有 81 种，其中 O、C、H、N、Ca、P、K、S、Na、Cl、Mg 共 11 种，占人体质量的 99.95% 以上，其余组成人体的元素还有 70 种，为微量元素。氧、碳、氢、氮、钙、磷分别占人体质量的 61%、23%、10%、2.6%、1.4% 和 1.1%。可见，氢在人体内是占第 3 位的元素，排在氧、磷之后，也是组成一切有机物的主要成分之一。



知识点

地壳中各元素的含量

在地壳中最多的化学元素是氧，它占总重量的 48.6%；其次是硅，占 26.3%；以下是铝、铁、钙、钠、钾、镁，丰度最低的是砷和钪。其百分

比分别为：氧 48.06%、硅 26.30%、铝 7.73%、铁 4.75%、钙 3.45%、钠 2.74%、钾 2.47%、镁 2.00%、氢 0.76%、其他 0.76%。

铝占地壳总量的 7.73%，比铁的含量多一倍，大约占地壳中金属元素总量的三分之一。

氢的存在方式

氢气可以以 3 种状态存在，即气态、液态和固态。下面就其特性分别加以叙述。

气体氢

通常情况下，氢气以气态的形式存在。其性质（物理属性、化学属性）、制备和储运将在后面的章节予以详细论述。

液体氢

在一定条件下，气态氢可以转化成液态氢。

我们先来看一下液氢的生产。氢作为燃料或作为能量载体时，液氢是其较好的使用和储存方式之一。因此液氢的生产是氢能开发应用的重要环节之一。氢气的转化温度很低，最高为 20.4 K，所以只有将氢气冷却到该温度以下，再节流膨胀才能产生液氢。

常温时，正常氢或标准氢（ $n-H_2$ ）含 75% 正氢和 25% 仲氢（正氢和仲氢是氢的两种同素异构体。一般认为分子是由两个原子的自旋方向的不同组合而成的。当两个原子核都顺时针旋转时，它们的自旋方向平行，就



是正氢。当两个原子核自旋方向反平行时，则是仲氢)。低于常温时，正—仲态的平衡组成将随着温度而变化。在氢的液化过程中，生产出的液氢为正常氢，液态正常氢会自发地发生正—仲态转化，最终达到相应温度下的平衡氢。由于氢的正—仲转化会放热，这样，液氢就会发生气化；在开始的 24 小时内，液氢大约要蒸发损失 18%，100 小时后损失将超过 40%。为了获得标准沸点下的平衡氢，也就是仲氢浓度为 99.8% 的液氢，在氢的液化过程中，必须进行正—仲催化转化。

液氢的生产通常有 3 种方法，分别是节流氢液化循环、带膨胀机的氢液化循环和氦制冷氢液化循环。节流循环是 1859 年由德国的林德和英国的汉普逊分别独立提出的，所以也叫林德或汉普逊循环。1902 年法国的克劳特首先实现了带有活塞式膨胀机的空气液化循环，所以带膨胀机的液化循环也叫克劳特液化循环。氦制冷氢液化循环用氦作为制冷工质，由氦制冷循环提供氢冷凝液化所需的冷量。

从氢液化单位能耗来看，以液氮预冷带膨胀机的液化循环最低，节流循环最高，氦制冷氢液化循环居中。如以液氮预冷带膨胀机的循环作为比较基准，那么节流循环单位能耗要高 50%，氦制冷氢液化循环高 25%。所以，带膨胀机的循环效率最高，但流程简单，没有在低温下运转的部件，运行可靠，所以在小型氢液化装置中应用较多。氦制冷氢液化循环消除了处理高压氢的危险，运转安全可靠。但氦制冷系统设备复杂，因此在氢液化过程中应用得不多。

接下来我们来谈一下凝胶液氢（胶氢）。液氢虽然是一种液体，但是它具有与一般液体不同的许多特点。例如，液氢分子之间的缔合力很弱；液态范围很窄（ $-253^{\circ}\text{C} \sim -259^{\circ}\text{C}$ ）；液氢的密度和黏度都很低；液氢极性非常小，离子化程度很低或者不存在离子化等。一般来说，液氢的物理



性质介于惰性气体和其他低温液体之间。除了氦以外其他任何物质都不能溶于液氢。

液氢的主要用处是做燃料，液氢作为火箭燃料有下列缺点：

(1) 密度低。符合固体推进剂密度为 $1.6 \sim 1.9$ 克 / 立方厘米，可储存液体推进剂的密度为 $1.1 \sim 1.3$ 克 / 立方厘米，而液氢的密度只有 0.07 克 / 立方厘米；

(2) 温度分层；

(3) 蒸发速率高，造成相应的损失和危险；

(4) 液氢在储箱中晃动引起飞行状态不稳定。

为了克服液氢的不足，科学家们提出，将液氢进一步冷冻，生成液氢和固氢混合物，即泥氢 (slush hydrogen)，以提高密度。或在液氢中加入胶凝剂，成为凝胶液氢 (gelling liquid hydrogen)，即胶氢。胶氢像液氢一样呈流动状态，但又有较高的密度。

与液氢相比，胶氢的优点表现在：

(1) 安全性增加。液氢凝胶化后黏度增加 $1.5 \sim 3.7$ 倍，降低了泄漏带来的危险性。

(2) 蒸发损失减少。液氢凝胶化以后，蒸发速率仅为液氢的 25%。

(3) 密度增大。液氢中添加 35% 甲烷，密度可提高 50% 左右；液氢中添加 70% (摩尔比) 铝粉，密度可提高 300% 左右。

(4) 液面晃动减少。液氢凝胶化以后，液面晃动减少了 20% ~ 30%，这有助于长期储存，并能简化储罐结构。

(5) 比冲提高 (比冲是内燃机的术语，也叫比推力，是发动机推力与每秒消耗推进剂质量的比值。比冲的单位是牛·秒 / 千克)，提高发射能力。



固体氢

固体氢具有许多特殊的性能，所以固体氢是科学家多年追求的目标。

如何制备固体氢呢？将液氢进一步冷却，达到 -259.2°C 时，就可以得到白色固体氢。

固体氢的用途主要表现在：

一是可以做冷却器。固体氢在特殊制冷方面可以发挥作用。有这样一个实例，它就是由于氢冷却器的失效而导致天文探测器失效的。

1999 年 3 月 4 日，美国航空航天局发射了一颗名叫“宽场红外线探测器 (WIRE)”的人造卫星。按计划这个重 255 千克的探测器将用 30 厘米口径的红外线望远镜研究星系的形成和演变过程。该望远镜是一台非常灵敏的仪器，需要一个使用固态氢的低温冷却系统。固态氢升华才能使它保持 -267°C （近似绝对零度）的低温。原先设计只要该望远镜对准太空深处，装有固态氢的低温冷却系统就能够持续工作 4 个月。但是当控制人员向它发出一个指令导致卫星发生误动作时，固态氢提前升华，而且升华速度非常快，形成了一股气流，使卫星以 60 转/分的速率开始自旋，最后失灵。

二是高能燃料。物理学家指出，金属氢还可能是一种高温高能燃料。现在科学家正在研究一种“固态氢”的宇宙飞船。固态氢既作为飞船的结构材料，又作为飞船的动力燃料。在飞行期间，飞船上所有的非重要零件都可以转作能源而“消耗掉”。这样飞船在宇宙中的飞行时间就能更长。

三是高能炸药。氢是一种极其易燃的气体，被压成固态时，它的爆炸威力相当于最厉害的炸药的 50 倍。目前还没有人在实验室里制成过这种