

CNIC-00910

SMI-0009

CN9502914

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE  
AND TECHNOLOGY REPORT

氢同位素及其金属化合物在未来能源中的应用

APPLICATION OF HYDROGEN ISOTOPES AND METAL  
HYDRIDES IN FUTURE ENERGY SOURCE

*(In Chinese)*



中国核情报中心  
原子能出版社

China Nuclear Information Centre  
Atomic Energy Press



**蒋国强：四川材料与工艺研究所副研究员，  
1962年毕业于北京大学技术物理系。**

**Jiang Guoqiang; Associate professor of Institute  
of Sichuan Material and Technology. Graduated  
from Department of Technical Physics, Peking  
University in 1962.**

**CNIC-00910**

**SMI-0009**

# 氢同位素及其金属化合物 在未来能源中的应用

**蒋国强**

(四川材料与工艺研究所, 成都)

## 摘 要

评述了氢同位素与金属氢化物在未来能源中的应用。从分析中国能源的现状入手,说明开发氢能与聚变能的重要意义。建议重点开展氢能应用与贮氢材料的研究,重视聚变堆氦工艺技术的跟踪。

# **APPLICATION OF HYDROGEN ISOTOPES AND METAL HYDRIDES IN FUTURE ENERGY SOURCE**

*(In Chinese)*

**Jiang Guoqiang**

**(SICHUAN INSTITUTE OF MATERIALS  
AND TECHNOLOGY, CHENGDU)**

## **ABSTRACT**

The probable application of hydrogen isotopes and metal hydrides to future energy source is reviewed. By start from existing state of Chinese energy source, the importance for developing hydrogen energy and fusion energy is explained. It is suggested that the application investigation of hydrogen energy and hydrogen storage materials should be spurred and encouraged; keeping track of the development on tritium technology for fusion reactor is stressed.

# 引言

氢能,这种储量丰富,含能密度高的洁净能源,作为太阳能开发、利用的一个重要环节而倍受人们关注。金属氢化物对氢能贮存、运输与能量转换起着很大作用。

聚变能一直是科学家梦寐以求的理想能源。新近磁约束托卡马克氦-氦聚变实验获得成功<sup>[1]</sup>,惯性约束聚变也走向点火<sup>[2]</sup>,聚变能实用这一天的到来为期不会太远了。

未来的能源时代,很可能是太阳能同聚变能相结合的时代。如此,氢同位素及其金属化合物就可能占有重要位置。

## 1 中国的能源现状和对策

新中国成立以来,能源工业获得了巨大发展。特别是进入 80 年代之后,为实现本世纪末社会生产总值翻两番的目标,要求国民经济年增长不低于 6%,能源总产量平均年增长 3%。近 5 年中国一次能源的生产和消耗情况列于表 1。

表 1 1989~1993 年中国能源的生产和消耗

年度	原煤 Gt	原油 Gt	发电量, TWh			一次能源总量 (Gt 标准煤)	能耗总量 (Gt 标准煤)
			总量	火电	水电		
1989	1.054	0.138	584.7	466.2	118.5	1.016	0.969
1990	1.079	0.137	612.3	495.0	117.3	1.040	0.979
1991	1.087	0.139	677.5	552.6	124.9	1.060	1.009
1992	1.116	0.142	754.1	622.7	131.4	1.090	1.050
1993	1.138	0.141	820.0	681.7	138.3	1.132	1.090

中国能源工业虽有很大发展,但同中国经济的高速增长相比还不匹配,根据专家测算<sup>[3]</sup>,“八·五”计划期间我国能源缺口达 0.2 Gt 标准煤,到本世纪末能源缺口将扩大到 0.4 Gt 标准煤。若考虑到中国近 12 亿人口,年人均能耗不到世界平均值一半。

中国的能源资源是丰富的,探明的煤炭地质储量约 700 Gt,居世界第三位;水能资源蕴藏储量 5.76 亿千瓦为世界之冠<sup>[4]</sup>。石油地质储量也在 60 Gt 以上。但是按人口计算,中国能源资源并不丰富。

问题的严重性还在于:能源结构不合理;能源资源分布不均衡。在中国商品能源的生产和消费中,煤炭占 73%以上,石油~20%,天然气 2%,水电 4.5%<sup>[5]</sup>,电能能源终端消费中只占 25%。这种以煤为主体的能源结构在交通运输与环境污染方面已带来许多问题,这些问题因资源分布极不均衡而更加严重化。煤炭储量的 2/3 集中在西北,水力资源主要集中在西南,经济发达的东部地区所占能源资源不到 1/3。加上近年来大强度开发,估计到 21 世纪初叶,京广铁路以东的油田和煤矿将面临枯竭<sup>[6]</sup>。那时长距离煤炭东调不仅增加交通运输的压力,也提高了能耗成本。

新近据国际能源专家预测<sup>[6]</sup>,全世界蕴藏的石油大约到 2060 年就会耗尽,天然气 2080 年耗尽,煤炭也只能维持 200 多年。无疑,中国这一天会更快到来。看来能源结构从化石燃料向多样化发展已是必然趋势。

为了摆脱能源困境,逐步减少对化石能源的依赖,中国在积极开发水能,生物质能的同时,注意了核裂变能的发展。核裂变能在未来一个时段可能起着主导作用,快中子增殖

堆可把铀、钍使用寿命延长几十年，但地球上的铀、钍资源也会很快耗尽，核废物处理也是一个需要认真对付的问题。

能源问题的最终解决依赖太阳能和聚变能的开发、利用，这是人类彻底摆脱能源危机困扰，拯救地球使之免受环境污染，实现良性生态循环的必然之路。中国未来能源发展的方向也必在此。

## 2 氢能的开发利用

氢能越来越引起人们的关注。氢的资源取之不尽，用之不竭。研究氢及其作为未来燃料的可能用途，是现代科学研究中最诱人的领域之一。早在一百多年前，J. Verne 就认识到地球上的矿物燃料是有限的，并且预言有朝一日从水制得的氢是满足人类未来燃料需求的一种选择<sup>[7]</sup>。氢是一种不包含碳原子的新能源。而且氢能的开发、利用过程也是实现氢的自身循环过程。氢来之于水，又回归于水，除了能量转换，可说无有害物质产生。所以氢是一种十分理想的清洁燃料。

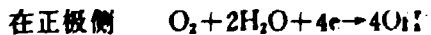
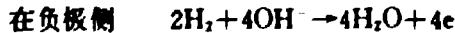
氢能还具有下述特征：可贮存性；可运输性。氢能密度是汽油 2.68 倍，用于贮电时，技术经济性能目前已有可能超过其它各类贮电技术，将氢用于催化燃料，其热效率比化石燃料高 30%~60%。尽管液氢贮存能耗大，蒸发损失严重，却提供高的贮氢密度。同金属氢化物的贮氢密度高于液态氢或固态氢。氢的运输可利用管道进行，输氢成本低，损失也少。

氢能的种种优越性充分体现了它在开发太阳能和节能中的特殊功效。科学家把氢能称为“能源货币”。有些国家已把氢能开发利用列为一项国策<sup>[8]</sup>。

下面列举氢能开发利用的几个方面：

### 2.1 燃料电池的应用前景

燃料电池是以氢或富氢的燃气（如甲烷）为燃料，在催化剂作用下，氢-氧经历电解的逆过程结合成水而实现化学能向电能的转换。氢-氧燃料电池体系可表示为  $H_2/KOH_m/O_2$ ，其电池反应是：



根据电解质的不同，燃料电池可分为碱型（ALFC），磷酸型（PAFC），熔融碳酸盐型（MCFC），固体氧化物型（SOFC）以及质子交换膜型（PEMFC）五类。表 2 列出各类电池的主要特性与有待研究的问题。

燃料电池把贮藏的化学能直接转换为电能，没有中间热能损失，不像热机那样受卡诺循环的限制，其能量转换效率比热机高得多。燃料电池发电是一种静型直接发电，无机械传动部件，无噪音，少维护。工作方式灵活，可采用独立的单元发电，也可以由上百个单元组成燃料电池组发电，还可以根据需要在各个用户区分散配置。基于此燃料电池发电受到美国、日本电力部门的高度重视，它被认为是继水力、火力、原子能发电站之后第四发电站。

表 2 主要燃料电池的类型和特征

名称		碱性	磷酸型	熔融碳酸盐型	固体氧化物型	质子交换膜型
简称		ALFC	PAFC	MCFC	SOFC	PEMFC
电解质	类别代表	液体 KOH	液体 H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	液体 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	固体 (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> .m(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>1-x.m</sub>	固体 Nafion 117
	导电离子	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub> <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>
工作温度/℃		常温~100	600~700	600~700	800~1000	常温~100
燃料		纯氢	富含氢气体 (CO<0.1%)	H <sub>2</sub> , CO 或 液质氢气	H <sub>2</sub> , CO 或 低级碳氢化合物气体, 液质氢气	富含氢气体
发电效率 %		40	40	>45	>50	>70
研究课题		提高抗微量 CO <sub>2</sub> 的能力	长寿命低成本 减少 Pt 用量	提高结构材料 耐腐蚀性, 分离与 回收 CO <sub>2</sub> 气体	开发温度高的耐热材料	长寿命低成本 减少 Pt 用量

美国是最早系统地开发应用燃料电池的国家<sup>[10]</sup>。1967年制定了“靶子计划”，旨在利用燃气发展小容量的电池单体。目前 11 MW 电站已投入运行。

日本在燃料电池的研究与开发方面大有后来居上之势。现在已生产了 50, 100, 200 与 500 kW 的发电装置, 1 MW 与 5 MW 的 PAFC 电站也已投入试验运行<sup>[10]</sup>。

燃料电池的应用范围很广, 首先是在太空领域应用<sup>[11]</sup>。随着卫星应用范围的扩大, 对卫星能源贮存的要求更加苛求: 高的峰功率输出; 极长的循环寿命 (对于低轨道运行的卫星, 十年循环次数超过 50000)。只有能量密度大, 能量转换效率高的碱性燃料电池和质子交换膜燃料电池才能满足这样的要求。未来宇宙飞船的能源贮存无疑首推燃料电池了。

燃料电池用于节能和供电有着重要意义。在美国 11 MW 磷酸型电池发电站, 1991 年投入试运行, 预计今后美国燃料电池发电量将不断增加<sup>[12]</sup>。在日本, 到 2000 年日本将有 2200 MW 的燃料电池发电厂供电, 到 2010 年燃料电池供电将达到 10800 MW。

燃料电池应用的最大潜力在交通运输领域。目前全世界范围内有大约 5 亿辆小汽车, 加上卡车、机动车, 拖拉机总数有 6.75 亿辆, 而且每年还在以 5.2% 的速率增长<sup>[8]</sup>。车辆排放的 CO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 是造成温室效应与环境污染的主要原因。1987 年美国能源部 (DOE) 启动发展 PAFC 动力机车计划, 1990 年启动发展 PEFC 动力汽车计划<sup>[14]</sup>, 以加速研究燃料电池在交通运输领域的应用。主要问题是车辆行驶费用太高 (\$ 960~1200/kW), 大批量生产有可能把费用降低到 \$ 50~100/kW。

## 2.2 镍-金属氢化物电池可望取代镉-镍电池

镍-金属氢化物 (Ni-MH) 电池是一种以氧化镍 [Ni(OH)<sub>2</sub>/NiOOH] 为正极, 以贮氢合金为负极, 用 KOH 作电解液的, 可高速充电, 放电的二次电池<sup>[15]</sup>。与传统的镉-镍电池相比, Ni-MH 电池具有一些突出优点<sup>[16]</sup>: 贮电容量大, 电能密度高, 体积小, 重量轻, 对过度充/放电不敏感, 无镉污染环境。

Ni-MH 电池还处在开发研究之中, 但已在宇宙飞船, 计算机, 电话以及录像机中应用。作为电力汽车之电源, 大容量、长寿命 Ni-MH 电池也在开发。可以期待, 不久的将来, Ni-MH 电池将取代镉-镍电池。

## 2.3 氢用作汽车燃料

这里所指的并不是燃料电池汽车, 而是内燃发动机汽车。氢的一种潜力应用也许是作为合成燃料直接取代石油, 或者被混入汽油中形成富氢的混合燃气燃料, 这种混合燃料扩大了普通汽油可燃性下限, 从而实现高的热效率, 减少 NO<sub>x</sub> 排放量<sup>[17]</sup>。

早在 30 年代,已证明了氢完全可以用作燃料<sup>[20]</sup>。70 年代化石能源紧缺与环境保护促进了氢汽车的开发,专家们预测到 2000 年后,烧氢的汽车将走向市场。

#### 2.4 金属氢化物在能源开发中的应用

1969 年发现的 AB<sub>2</sub> 型间金属化合物具有在较低温度下吸氢,较高温度下放氢的特性而引起人们极大关注<sup>[21]</sup>。经过了二十余年的研究,发展了诸多应用,现这类材料已被列为高性能材料之一。

金属氢化物首先是一种贮氢材料。氢能的开发利用的一项关键技术就是氢的贮存。氢的贮存技术包括气态贮存(需要大的体积,高的压力),液态贮存(要求-253℃的低温),形成液态氢化物(如氢、甲醇),金属氢化物等。表 3 列出不同贮存介质贮氢特性。

表 3 不同贮存介质氢的含量和能量密度<sup>[22]</sup>

介 质	氢含量 (wt%)	体积密度 (10 <sup>3</sup> H/L)	能量密度 MJ/kg	能量密度 MJ/L
气态 H <sub>2</sub> (15.0 MPa)	100.00	0.5	141.90	1.02
液态 H <sub>2</sub> (20 K)	100.00	4.2	141.90	9.92
甲醇 (20 C)	11.76	5.9	16.70	13.21
氢 (-79 C)	17.75	8.7	25.20	20.58
MgH <sub>2</sub>	7.65	6.7	9.92	14.32
VH <sub>2</sub>	2.10	11.4		
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	3.60	5.9	4.48	11.49
TiFeH <sub>1.11</sub>	1.95	5.5	2.27	13.56
LaNi <sub>5</sub> H <sub>6.7</sub>	1.5	7.6		
ZrMn <sub>2</sub> H <sub>3.1</sub>	1.75	6.0		

可见用金属氢化物贮氢,其贮氢密度可比液态氢还高。但从作为能源体系的要求说,目前已知的贮氢体系,例如 TiFeH<sub>1.11</sub>、LaNi<sub>5</sub>H<sub>6.7</sub>,氢含量为别为 1.9 wt% 与 1.4 wt% 仍然太低,同汽油比较,相当于多负担大约燃料三倍的重量。在金属氢化物中 MgH<sub>2</sub> 体系有 7.6 wt% 最高的贮氢容量,遗憾的是金属镁同氢直接反应是非常困难的。据新近报告<sup>[21]</sup>,在金属镁中加入稀土形成无定型复合物,镁的氢化率可以大大增强。La<sub>2</sub>Mg<sub>17</sub>-X wt% LaNi<sub>5</sub> (X = 0.5-10) 在 400±10℃ 氢含量可达到 5.2 wt%, Mg-40 wt% FeTi 在室温下氢含量 3.5 wt%,几乎是单纯 FeTi 贮氢量 1.9 wt% 之二倍<sup>[22]</sup>。更高贮氢容量的材料仍在研究发展中。

金属氢化物在环境净化的能源技术中有重要应用<sup>[23]</sup>。采用金属氢化物作热转换的工作介质是能量转换领域一项很有前途的技术。在热转换器,热泵以及制冷机中,金属氢化物可用来把低质量的热能(废热)转换为高品质的热能或洁净的制冷。特别是对于 200℃ 以上温度的热能改质,利用通常的水-氢体系或水-溴化锂体系是不可能的,但用金属氢化物可以实现。今日采用混合稀土作工作介质的,二级小规模太阳能贮热器 (14 kWh) 已在德国 KE 发展<sup>[24]</sup>。采用镁氢化物作工作介质可以设计工业应用的高温热能贮存系统。

金属氢化物吸/放氢的温度-压力关系可被用来制造压缩机与传动机械。同传统的机械器件相比,由于没有驱动部件,故运转平稳,无噪音,易维修<sup>[25]</sup>。

近年来发现某些金属-氢体系在电解,放电或温度骤变过程中产生超热<sup>[26]</sup>。若被证实,这对新能源开发将有重要意义。

### 3 聚变能应用是划时代的能源革命

同核裂变能相比,聚变能是比较清洁的能源。人类欲最终摆脱能源危机的困扰,必赖



于轻核的聚合反应。在重要的轻核反应道中，氘-氘聚合反应要求相对低的温度而有极大的反应截面，因而第一代聚变反应堆以氘、氚作为核燃料。氘在自然界储量丰富，海水中氘与普通氢的比例是 1:6500，氚的天然含量极少，但可利用锂同中子核反应在聚变堆内实现自支持。一座 1 GW 的聚变反应堆，年耗氘量约 200~300 kg，消耗的氚量还要多。可以预料在不久的将来，氘、氚将在世界能源结构中起着举足轻重的作用。

实现核聚变有两种方法：一种是用磁场约束燃料等离子体以达到高温核聚变的磁约束方法，如托卡马克装置；另一种是用激光或相对论电子束 (REB) 照射燃料靶丸，使之发生爆聚达到点火，这就是惯性约束聚变 (ICF) 方法。

### 3.1 磁约束聚变重要进展

自从 50 年代初苏联科学家提出用环形磁场真空室约束等离子体以来，托卡马克经过 40 余年的潜心研究取得了世界公认。几十个托卡马克原理试验装置已经建立。1991 年 11 月，在世界上最大的托卡马克，欧共体的 JET 上进行了首轮氘-氘聚变实验。为了减少装置的放射性，两次脉冲实验氘的浓度皆限制在 10%。结果是令人鼓舞的，获得了 1.7 MW 级的输出功率，中子发射率  $6 \times 10^{17}/s$ ，中心离子温度 18.8 keV。聚变放大因子  $D_{0T} = 0.15^{[27]}$ 。事过两年，1993 年 12 月 9 日，在美国普林斯顿大学的托卡马克聚变试验堆 (TFTR) 上进行了 50:50 的氘-氘聚变实验，产生 6.2 MW 峰功率输出持续 4 s<sup>[28]</sup>。输入的加热功率为 28 MW，因而计算的聚变放大因子为 0.22。

JET 和 TFTR 投氘实验的成功，证实了受控核聚变作为地球上先进能源的科学可行性，树立了人类聚变研究史上的一块新的里程碑，大大地加快了聚变能商用化的进程。

### 3.2 惯性约束聚变可用作氢聚变能源

高增益惯性约束聚变 (ICF) 靶是由烧蚀体玻璃球壳与等浓度的氘-氚燃料组成，ICF 驱动束，例如高功率激光束从四面八方照射靶球，将靶加热，于是从玻璃烧蚀体表面均匀、对称地喷出等离子体，由于等离子体的反作用压缩靶心，从而能产生相当于固态氘-氚密度  $10^3 \sim 10^4$  倍的超高密度的氘-氚等离子体。这种氘-氚等离子体因惯性而被约束着，在不到  $10^{-8}$  s 的时间内完成聚合反应，得到 100 倍以上的能量增益。

ICF 研究开始于 1963 年，由于可能的军事应用，例如提供激光核爆武器，提供核武器效应模拟，这类研究一直是保密的，直至 1993 年美国能源部宣布对 ICF 解密。今后 ICF 作为重要能源发展将会越来越引起人们关注。

近十几年来，ICF 在驱动束的发展上，驱动束与等离子体相互作用上，以及用直接驱动靶和间接驱动靶演示 ICF 点火要求与增益要求上都取得了重要进展。特别是高功率激光器发展迅速，用于直接驱动的 24 束 Omega Nd: 玻璃激光器能产生 2~3 kJ 的 351 nm 激光脉冲，压缩氘-氚燃料，使其密度达到  $20 \sim 40 \text{ g/cm}^3$ <sup>[29]</sup>，这距劳森判决条件相离不远了。对于间接驱动，劳伦斯·利弗莫尔国家实验室研制的十光束 Nova Nd: 玻璃激光器装置已能产生 125 kJ 1.05  $\mu\text{m}$  的蓝光脉冲，三倍频 351 nm 激光的辐射能量达到 40 kJ<sup>[30]</sup>。新近美国能源部批准国家点火装置 (NIF) 进行概念设计，NIF 是 Nova 的升级。它包括 192~288 束独立激光，总能量达 2 MJ。其功率为 400~700 TW，依激光脉冲宽度之不同<sup>[31]</sup>。可以预料 NIF 建成，ICF 的点火与燃烧指日可待了。

惯性约束聚变作为能源的科学可行性问题已经解决。这种方法因为不用约束磁场，故没有同步辐射损失，其结构也比磁约束聚变堆简单。无疑它将在未来能源体系中占一席之地。

地。

### 3.3 国际合作加快聚变能开发利用进程

聚变能开发利用是一项巨大的系统工程，任何一个国家单独进行，无论在技术上或是财力上都会遇到极大的困难。80年代美国、苏联、欧共体、加拿大与日本决定合作共建国际热核实验反应堆 ITER，从而大大加快磁约束聚变商用发电的进程。可能的国际合作时间表如下：1992~1995年 ITER 工程设计，在欧共体 JET 上，美国 TFTR 上，日本 JT-60

上进行高功率氦-氦聚变实验；  
1997~2006年 建成 ITER；  
2007~2020年 设计核电站聚变示范堆；  
2020~2025年 建造核电站聚变示范堆；  
2030年 开始大规模核聚变发电。

由此可见，聚变能的开发利用，将是 21 世纪的一个热点。

### 3.4 要重视聚变堆氦、氦工艺技术的跟踪

聚变堆提出了氦、氦工艺技术前所未有的新问题，这些问题是：

(1) 从氦增殖包套在线回收氦：若氦增殖材料选择液锂，需要发展熔融锂盐浸取、金属吸附技术。若选择锂基氧化物陶瓷，需要发展高压氦气流中氦的回收技术。

(2) 等离子体排“灰”及其处理：注入环室的氦、氦燃料，燃耗约 3%~4%，由于氦-4 与杂质 (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, 水, 甲烷, 氩等) 的积聚会使等离子体降温，因此必须及时将这种含有杂质的氦、氦燃料 (称为“灰”) 排出。为了使氦、氦气体能够再用，需要发展燃料循环的净化技术；高效率，低贮量的氢同位素分离技术；大容量，安全的贮氦技术。

(3) 安全防护与应急处理：聚变堆运行要求日处理氦、氦量在百摩尔以上，大量的、强放射性氦的操作，安全防护是第一重要问题。需要发展氦的密封、监测，无油泵输，小室除氦，实验室除氦以及氦废物处理技术。

上述问题的研究与解决不仅对聚变氦氦系统设计，聚变堆实际氦处理是重要的，而且对人员安全，环境保护，聚变能开发能否尽快通过安全论证有深远意义。

## 4 结束语

中国的化石能源大约还可使用 200 年，但油、气资源将在今后 50 年内基本耗尽。在 21 世纪 40 年代之前，煤炭在中国能源经济中的作用可能越来越大，然后让位于核能。煤炭与核能共撑局面的时段不会太长，它只不过是在化石燃料时代结束和新能源时代到来之间搭起一座桥梁。

新能源时代很可能是聚变能与太阳能相结合的时代，在这一能源时代，氢同位素及其金属化合物将发挥重要作用。利用太阳能电解海水制取氢气、氦气，用管道与金属氢化物远距离输氢取代煤进行发电，取代天然气供暖，取代石油用于交通运输。制取的氦用作聚变反应堆燃料获得聚变能。人类再不为能源资源危机，大气温室效应与环境污染犯难了。

从现在起我们应该在氢能开发，聚变堆技术跟踪方面做一些切实工作，迎接新能源时代的到来。

## 参 考 文 献

- [1] JET. *App. phys Lett.* 1992. 60 (19) : 11
- [2] John D. Lindl, *Physics Today*. September. 1992. 32~40
- [3] 张文清. *中国能源*, 1990 (4) : 14~16
- [4] 赵福宇. *能源季刊*, 1992 (1) : 34~36
- [5] 朱成章. *中国能源*, 1991 (7) : 7~11
- [6] Eventov Y. *Energy Sources* 1988 (9) : 43
- [7] Thomas N C. *Sci Prog (enl)* 1988. 72 : 37~52
- [8] Pandit Patil. *Journal of Power Sources*. 1994 (49) : 169~184
- [9] 魏德佑. *新能源*, 1994. 16 (3) : 1~3
- [10] Kunio Shibata. *Journal of Power Sources*. 1994 (49) : 77~102
- [11] Oliver J Murphy. et al. *Journal of Power Sources*. 1994 (47) : 353~368
- [12] 钟俊屏. *材料导报*, 1994 (1) : 22~25
- [13] Ryoji Anahara. *Journal of Power Sources*. 1994 (49) : XI~XIV
- [14] Michael Krumpel. *Journal of Power Sources*. 1994 (49) : 37~51
- [15] Frank E Lynch. *Journal of the Less-Common Metal*. 1991 (172~174) : 943~958
- [16] Anahn Anani. et al. *Journal of Power Sources*. 1994 (47) : 261~275
- [17] Jamal Y. et al. *Int J. Hydrogen Energy*. 1994. 19 (7) : 557~572
- [18] Interview, "A hydrogen pioneer: R. A. Erren" (1979) *Hydrogen Progress* 4. 7
- [19] Van Vucht J H N. *Philips Res Rep.* 1970 (25) : 133
- [20] Bakrich J C. et al. *Int J. Hydrogen Energy*. 1994. 19 (7) : 605~609
- [21] Datta K. et al. *Int J. Hydrogen Energy*. 1994. 19 (3) : 253~257
- [22] Khrusanova M. *Int J. Hydrogen Energy*. 1990. 15 : 799
- [23] Groß M. et al. *Int J. Hydrogen Energy*. Vol 19. 1994. 19 (6) : 507~515
- [24] Werner R. et al. *J. Less-Common Metal*. 1991 (172~174) : 1122~1129
- [25] Frank E. Lynch. *J. Less-Common Metal*. 1991 (172~174) : 943~958
- [26] Kunimatsu K. *Proceedings of ICCF3*. 1993. 31
- [27] JET Groups *Plasma physics and Controlled Fusion*. 1992. 34 (13) : 1749
- [28] Bertram Schwarzschild *Physics Today* January. 1994. 17~18
- [29] McCrotry R L. et al. *Nature*. 1988 (335) : 225
- [30] Contact: E. storm (510) 423-4265 *Laser Research E&TK* January-February. 1993. 32~33
- [31] Campbell E M. *J. Fusion Energy*. 1991 (10) : 277

**(京)新登字 077 号**

**图书在版编目 (CIP) 数据**

**氢同位素及其金属化合物在未来能源中的应用 = AP-  
PLICATION OF HYDROGEN ISOTOPES AND METAL  
HYDRIDES IN FUTURE ENERGY SOURCE/蒋国强著.**

—北京:原子能出版社,1994.12

ISBN 7-5022-1306-6

I. 氢… II. 蒋… III. ①氢同位素-应用-能源开发②氢  
同位素-元素有机化合物-应用-能源开发 IV. TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 13360 号



原子能出版社出版发行

责任编辑:武洁

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 13 千字

1994 年 12 月北京第一版·1994 年 12 月北京第一次印刷

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1306-6



9 787502 213060 >