

HYDROGEN

Facing the energy challenges of the 21st century

图说氢能

面向 21 世纪的能源挑战

[加拿大] 塔潘·波斯 (Tapan Bose) [法] 皮埃尔·马尔布鲁诺 (Pierre Malbrunot)

[加拿大] 皮埃尔·贝纳德 (Pierre Bénard) [法] 约翰·维奥拉 (John Viola)

著

肖金生 蔡永华 叶锋 童亮 潘菊英 译

隋邦傑 校订 毛宗强 作序

一本书读懂氢能

从制取、储存、运输到安全使用

从氢气内燃机到燃料电池

从陆地、海上、水下到太空应用

普及知识，传播技术，内容翔实，图文并茂



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

 AFH₂

 Hydrogen Association
Association française de l'hydrogène

 John Libbey
EUROTEXT

Hydrogen

Facing the energy challenges of the 21st century

图说氢能

面向 21 世纪的能源挑战

[加拿大] 塔潘·博斯 (Tapan Bose)

[法] 皮埃尔·马尔布鲁诺 (Pierre Malbrunot)

[加拿大] 皮埃尔·贝纳德 (Pierre Bénard)

著

[法] 约翰·维奥拉 (John Viola)

肖金生 蔡永华 叶锋 童亮 潘菊英 译

隋邦傑 校订

毛宗强 作序



加拿大氢能协会



法国氢能协会

本书针对人类所面临的能源危机与环境问题,探讨基于氢能的解决方案,介绍氢能与燃料电池在陆地、海上、水下以及航空与航天领域的各种应用,论述作为能源(特别是可再生能源)载体的氢气的制取、储存、运输以及安全使用,展望氢能的未来发展前景。本书内容结构体系完备合理,版面设计图文并茂,具有概要浏览和细节研读双重可读性。书后还附有相关名词术语和技术经济数据。

本书适合作为从事相关领域的技术与管理工作者的参考资料,也可作为兴趣爱好者的科普读物。

Hydrogen: Facing the energy challenges of the 21st century / by Tapan Bose, Pierre Malbrunot, Pierre Bénard, John Viola / ISBN: 978-2-74-200639-7
Copyright © 2007 John Libbey Eurotext Ltd. All right reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from John Libbey Eurotext Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 John Libbey Eurotext Ltd. 授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2014-3681 号。

图书在版编目(CIP)数据

图说氢能: 面向21世纪的能源挑战/(加)塔潘·博斯(Tapan Bose)等著;肖金生等译—北京:机械工业出版社,2017.12

书名原文: Hydrogen: Facing the energy challenges of the 21st century
ISBN 978-7-111-59107-8

I. ①图… II. ①塔…②肖… III. ①氢能 IV. ①TK911

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第023810号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:李万宇

责任校对:陈越 封面设计:马精明

责任印制:张博

北京彩和坊印刷有限公司印刷

2018年5月第1版第1次印刷

210mm×297mm·6印张·2插页·185千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59107-8

定价: 48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com



致谢

我们要感谢赞助者，即加拿大自然资源部、加拿大氢能协会、多伦多大学和三河城魁北克大学，在完成本书的过程中所给予的帮助。同时，也要感谢法国国家教育、高等教育与研究部部长对本书的关注。

我们很感激 Thierry Alleau、Stephen Boucher、Richard Chahine、Raymond Courteau、Claude Derive、Kamiel Gabriel、Ted Hollinger、Ron Venter 以及 Lucie Bellemare 给予的帮助与鼓励。

Tapan Bose
Pierre Malbrunot
Pierre Bénard
John Viola

说明

本书的法文版于 2006 年 12 月由 John Libbey Eurotext Limited 出版（ISBN：978-2-7420-0637-0），其作者顺序为 Pierre Malbrunot、Tapan Bose、Pierre Bénard 和 John Viola。

中文版序一

当今人们普遍认识到含碳化石燃料所排放的温室效应气体和污染物对我们的生存环境和全球气候造成的不利影响。2015 年召开的第 21 届联合国气候变化大会表明了国际社会采取《巴黎协定》的措施来加强全球应对气候变化的意愿。为了应对 21 世纪的能源和气候的挑战，氢能是最合适的解决方案。

氢，可以利用来源于可再生能源的电来电解水获取，而不产生二氧化碳；可以先储存起来，之后再通过燃料电池转化为电力以驱动汽车或用作固定动力。氢，也可以与天然气混合使其具有更高的能量密度和较少的二氧化碳排放比例。近年来，可再生能源的增值利用在美洲、欧洲及远东的主要国家得到了非常显著的发展。

氢能是本书的主题，本书具有双重可读性。翻开书本，其右边用于阅览，其左边用于研读。这种版式设计有助于读者由浅入深，各有所取。

本书是我与 Tapan Bose 教授合作并得到 Pierre Bénard 教授和 John Viola 协助的成果。我们同 Tapan Bose 教授共事多年，保持着长久和深厚的友谊。不幸的是，本书的法文版和英文版问世不久，他就永远地离开了我们。谨以此书的中文版表达对他的怀念。

感谢肖金生教授组织翻译此书并付诸出版。非常荣幸，这个在加拿大和法国之间的合作成果能被翻译成中文并奉献给中国读者，这将继续展示氢能前景和促使其引起更广泛兴趣。

Pierre Malbrunot

中文版序二

本书作者之一 Tapan Bose 博士，是加拿大三河城魁北克大学（UQTR）教授，他在 20 世纪 90 年代初创建了氢能研究所（HRI），深入开展了氢能的研究与开发。2006 年我有幸获得国际氢能协会（IAHE）的 Jules Verne 大奖，这是 IAHE 从 1974 年成立以来第一位中国人获奖。当时 Tapan Bose 在现场对我表示热情友好的祝贺，他还偕同夫人与我和国际氢能协会主席 Nejat Veziroglu 一起合影留念，该照片我一直珍藏着。后闻 Tapan Bose 博士早逝噩耗，令人唏嘘。2014 年 10 月 2 日，我有幸访问了 Tapan Bose 博士创建的氢能研究所。该研究所在其后继者努力之下，取得了很多氢能研究成果，使我受益匪浅。

Tapan Bose 教授作为加拿大氢能协会主席与法国氢能协会主席 Pierre Malbrunot 教授共同撰写了这本氢能著作。武汉理工大学汽车工程学院肖金生教授从 2008 年初开始多次访问 UQTR 氢能研究所并与其在氢能汽车研发方面建立了长久的合作关系。他们虽然未能谋面，但是 Tapan Bose 先生献身氢能事业的精神和他所创立的氢能研究所的研究氛围一直激励着肖金生教授翻译 Tapan Bose 教授的遗作，传播氢能社会的理念，令我钦佩。肖金生教授请我为本书中译本作序，虽然我从未给他人著作作序，但此次我却欣然同意。

氢位于元素周期表之首，原子序数为 1，是宇宙中普遍存在的元素。自然界中氢在常温常压下以气态氢分子的形式存在，在超低温或超高压下可成为液态或固态。氢能是指以氢及其同位素为主体的反应中或氢的状态变化过程中所释放的能量，主要包括氢化学能和氢核能两大部分。狭义的氢能只包括氢化学能。

氢是一种理想的洁净能源载体，被誉为 21 世纪的绿色能源，是人类未来的能源，它具有如下特点。①氢能可以方便高效地与电能互相转换，互为补充。②制氢所用的物质来源广泛，其中水在自然界大量存在，通过风能、光能等可再生能源制氢，使得氢能成为“和平能源”，各国不必为地球上分布不均的石油等化石能源而爆发战争；氢能又是“自由能源”，任何个人、团体只要有水都可以制得氢气，不受国际垄断资本的制约。③氢无论以燃烧还是电化学转换方式利用后的最终产物只为纯水或水蒸气，非常洁净环保。④氢可以采用气态、液态或固态（氢的固态化合物）等多种方式来储存。⑤氢可以采用输气管线直接输送，也可以充装进高压氢气罐、液氢罐等通过火车、船舶来长途运输。⑥氢可以灵活高效地转化为其他形式的能量，如燃烧、电化学转换和氢化等。⑦氢的环境相容性非常好，无论是制氢、储氢、输运以及利用的各个环节中对环境几乎都可以实现零排放；质子交换膜燃料电池作动力的汽车不排放任何有害气体，只有氢在高温下空气中燃烧时才会产生非常少量的氮氧化物。

今天氢燃料电池轿车已经市场化，进入寻常百姓家，家用氢燃料电池热电联供设备

已经开始在日本、欧美普及，氢燃料电池潜艇已经在海中游弋，氢燃料电池客车和特种车，氢燃料电池增程式电动车也已开上街头。

我国氢能发展迅速，这里仅举一例来说明。这就是联合国开发计划署（UNDP）、全球环境基金（GEF）和中国科技部（MOST）在中国推行的发展中国家燃料电池公共汽车示范项目。2005 年第一期项目仅有北京一个城市参与，2010 年第二期项目也只有北京和上海两个城市。2016 年开始实行的第三期项目已涵盖北京、上海、郑州、佛山和盐城五个示范城市，项目计划将在这些城市大规模示范运营 109 辆氢能燃料电池大巴车。联合国开发计划署（UNDP）还命名江苏省如皋市为国际“氢经济示范城市”。由此可以看到我国氢能发展缩影。

本书法文版和英文版先后于 2006 年和 2007 年出版，至今已有 10 年，但是本书超前的理念、系统的构思、简明的叙述、生动的插图，直至今今天仍然毫不逊色。值此氢能在我国再次起飞之际，希望本书中译本《图说氢能：面向 21 世纪的能源挑战》对启迪国人思维、普及氢能知识起到促进作用。

毛宗强

清华大学核能与新能源研究院教授

全国氢能标准化技术委员会主任

国际氢能协会副主席

英文版序

我们很荣幸能赞助由加拿大氢能协会和法国氢能协会合作撰写的这本关于氢能技术的书籍。

加拿大一直致力于创造清洁环境和减少温室气体排放。随着温室气体排放受到日益关注，本书的面世非常及时而且意义重大。本书通过丰富的图解详尽地讨论了氢能作为一种可能替代化石燃料的能量载体而使用的方方面面。本书有英语和法语两种加拿大官方语言版本。

加拿大自然资源部从 20 世纪 80 年代起就开始支持加拿大的氢能技术相关研究，使得加拿大的氢能技术处于全球领先地位。

加拿大氢能协会是加拿大氢能研究圈的代言人，也是政府和工业界信赖的顾问。

多伦多大学氢能与电化学研究中心（CHES）和三河城魁北克大学氢能研究所（HRI）通过长期的氢能技术研究，在此方面都取得了突出的成果。

我们希望读者喜欢这本书，并从中学到更多关于氢能技术方面的知识。

Nick Beck 加拿大自然资源部

Alexander Stuart 加拿大氢能协会

Ronald Venter 多伦多大学氢能与电化学研究中心

René-Paul Fournier 三河城魁北克大学

法文版序

显而易见的是，我们进入了一个石油储量不断减少，而油价不断升高的时代。

毫无疑问的是，越来越多的化石能源的使用正在改变我们的气候。

当务之急的是，开发化石能源的替代物。

这就是为什么法国政府会每年投入十多亿欧元的研发经费用于寻找能够替代石油的能源解决方案，例如：

- 生物能源、生物燃料、用于燃料合成的生物反应器；
- 核能，包括制氢技术；
- 热核聚变、太阳等恒星中产生能量的方法，由法国在 Cadarache 实施的国际热核聚变能源研究计划（ITER）；
- 氢能和燃料电池。

氢能和燃料电池技术近来取得了速度惊人的进展，前景看好。未来的年轻人将会用氢气盒给手机充电；人们将会使用由家中太阳能制取的氢气提供给汽车作为燃料，排放物只有水。这不再只是科学幻想，这些现在已经在实验室里实现了。

这将会给我们的社会、我们的习惯、我们的工作，最终给我们的行为带来巨大的变化，我们应该做好准备。

我非常高兴为法国氢能协会和加拿大氢能协会合作撰写的这本书作序。这部重要的著作对氢经济的科学和技术进行了清楚的阐述。本书适合所有希望学习、了解氢能和期望氢能时代到来的人们阅读，老少皆宜。

Gilles de Robien

法国国家教育、高等教育与研究部部长

目 录

致谢	III
说明	III
中文版序一	IV
中文版序二	V
英文版序	VII
法文版序	VIII
兔子、乌龟和氢能	1
能源危机	2
能量，作用中的力……能量无处不在！	2-3
从油井到车轮……能量之旅	4-5
能源……人类文明的表征	6-7
过度使用能源……使环境陷入危机！	8-9
有何解决方案？……能源的合理使用	10-11
另一个解决方案……无碳能源	12-13
最有希望的解决方案……氢能！	14-15
基于氢能的解决方案	16
从气球到火箭……氢气的悠久历史	16-17
传统内燃机……直接燃烧氢气	18-19
氢能转化为电能……燃料电池效率更高！	20-21
不同类型的燃料电池……面向多种不同场合的应用	22-23
氢能的应用	24
陆地……氢能车辆	24-25
海上和水下……氢能船舶	26-27
空中……氢能飞机	28-29
太空……氢燃料火箭	30-31
来源于氢气的电力……比蓄电池更长的续航时间	32-33

氢气是理想的能源载体吗? 34-35

作为能源载体的氢气 36

制氢……伴随温室气体的排放 36-37

不产生二氧化碳的制氢方法……电解水、核能、生物技术或光合作用 38-39

氢能……可再生能源的好伙伴 40-41

压缩、吸附和吸收……氢的储存 42-43

液化……储存更多的氢 44-45

氢的运输……用储罐或管网输送 46-47

氢的配送……加氢站 48-49

氢的安全使用……氢的危险性何在? 50-51

氢能的未来 52

氢经济……商业化途径 52-55

有所作为……迎接氢经济的到来 56-57

正在行动……氢能的示范和发展 58-59

总结 60-61

附录 1 何为能量? 62-63

力相关的能量……机械能 64-65

热相关的能量……热能 66-67

其它形式的能量……电能、辐射能、化学能、核能 68-69

能量可以转换……但总是守恒的! 70-71

热能转换……卡诺原理 72-73

附录 2 加气站中氢的价格将是多少? 74-80

专业术语 81-82

缩写和简称 83

单位及其符号 84

图片来源 85

更多关于氢的信息 86

兔子、乌龟和氢能

兔子和乌龟^①在讨论“大自然”，说到大自然已经受到人类活动的严峻威胁。有人告诉它们说，可以使用氢能来拯救能源匮乏的地球。

于是它们俩开始寻找信息以便了解更多的情况，最后它们发现了这本书。本书根据它们的步伐快慢和阅读节奏，解答了它们的疑问。

书中右边的页面插图丰富，介绍简洁，适合于那些喜欢插图、跳过细节的快速阅读者。

左边的页面内容详细，针对那些有耐心、系统学习的读者。

兔子跑前跑后，高兴地在页面间蹦来蹦去，乌龟则耐心地、按部就班一章一章地阅读全文。

这个寓言故事的结局呢？

结果是兔子和乌龟都以自己的方式学到了自己想要的东西。

本书的最后还提供了有关能源的基本知识。

本书所用的主要科技术语和单位都在第一次出现时进行了介绍，并在书末给出了这些术语的定义，还列出了缩略语、单位和符号。书中各种物理常数和物性参数的数值并非绝对标准，只是数量级的概数，仅仅用于支撑书中的观点。

① 它们也许就是拉封丹寓言和伊索寓言里的那对伙伴。

能源危机

能量，作用中的力……

在我们的日常生活中，我们所做的任何事情不外乎：

运动，使静止的物体动起来

从汽车到飞机、轮船、火箭——克服地面和空气的摩擦力。

克服冷和热

给我们的房子、学校和办公室供暖；我们要进食，因为我们身体的热量来源于我们所吃的食物。夏天需要空调制冷来克服热。

照明

由蜡烛、电灯或太阳提供。

生产粮食

播种、种植、收割作物。

制造和加工

熔化和制造金属，生产和成型塑料，加工、修整木头，研磨谷物，烘焙面包。

建造

挖掘地面，制作、浇灌水泥，起吊、装配各种建筑材料。

通信

通过电话、收音机、电视、因特网或通过声音说话交流。

还有很多很多！

所有这些活动都离不开能量，能量是一个难以定义的抽象概念，通常指的是做功的能力。能量这个词来自希腊文 (energia)，意思是“作用中的力”。



一个典型的家庭会使用多少个如下动力源呢？

- (a) 内燃机，如用于汽车、除草机、两轮或多轮车；
- (b) 电动机，如用于汽车、电器、玩具、多媒体设备、园艺设备、厨具；
- (c) 电池，如用于玩具、手机、数码相机、闪光灯、遥控器、手表、电脑等。

答案：

- (a) 从 1 到 6；
- (b) 从 25 到 70 或更多；
- (c) 从 15 到 50 或更多！

译注：作用中的力，可以理解为，力作用在物体上使其移动一段距离，这样就会做功，从而引起其能量的变化，反之，能量也可用来做功，就像作用中的力。

……能量无处不在！

能源危机



从油井到车轮……

一次能源

能量每次转换形式都会有所损失，直到转化为没有实用价值的低温热能，最终耗散到周围环境中。为了做功，能量必须从一次能源中连续不断地获得。

有史以来，我们借助自身体力和家畜做功，这些所需的一次能源依靠食物提供。后来人们开始利用流水和风力，以提高做功的能力，并从生存所需的琐事中得到了一定程度的解脱。木材也是一种一次能源，它的燃烧所产生的热量可用于取暖和烹饪。工业时代初期，大量的煤被用于解决我们对能源的渴求。接着，人们开始利用像石油这样效率更高的燃料，以及其它像水力这样的一次能源。当今，我们使用的四种一次能源包括：化石燃料、可再生能源、地热能和核能。

化石燃料，包括煤、石油和天然气，它们占到了世界能源消耗的大约 90%。顾名思义，它们的储量并不是无穷无尽的，储量可用年限从煤炭的几百年到石油和天然气的几十年不等。这些燃料必须通过提炼后才能使用。



直接或间接地来源于太阳。水坝、风力涡轮机和太阳能板给我们提供电能。农作物可被转化为燃料，太阳辐射可用于对冷水加热。由于其本身的性质，可再生能源，相对于人类历史的长河而言，可以说是取之不尽的，但目前这种能源还面临着两个问题：①它们是间歇性的，因而需要储存起来以便供需管理；②它们是相当分散的，所以需要大量投资。

与可再生能源有点类似，在岩浆接近地表之处，通过捕集一些由地核释放的热量来获得。

通过反应堆中的铀原子裂变释放出来且产生大量的热量，进一步生成蒸汽并用来驱动涡轮机，这就像传统火电厂发电一样。

储存、运输和配送

为了满足能源的供应和需求，必须把能源储存起来。化石燃料，如煤炭、石油和天然气，能够以非常密集的形式储存大量的能量。

一次能源很少在生产现场使用，这些能源常常通过海运、陆运或火车进行大规模地、长距离地运输，若是液态或气态形式也可通过管道来输送。

相当大的一部分一次能源用于其本身的运输和配送。一般而言，运输和配送一次能源所需能量占所运送能量相当大的比例，因此其成本较高。

作为能量载体的电能

自然界中电能以闪电的形式出现，但在这种形式下它不能用于完成任何实际工作。为了使其为我们所用，电能必须在发电厂中从一次能源通过机械能转化，以可预测的速度产生。因此，电能是一种一次能源或能量载体，虽然它在我们日常生活中无处不在，看上去像一次能源。目前，电能主要由大规模火力发电厂使用煤炭或核裂变物质作为燃料进行生产，也可通过水电站生产，也有少数发电厂借助风能、太阳能（光伏）、地热能或潮汐能来生产。尽管电能在一些特定应用中可在蓄电池中少量储存，但不能大量有效地储存，所以电能一旦产生，必须尽快被传递和配送，并立即使用。故**电能是一种能量载体，而不是能量的来源。**

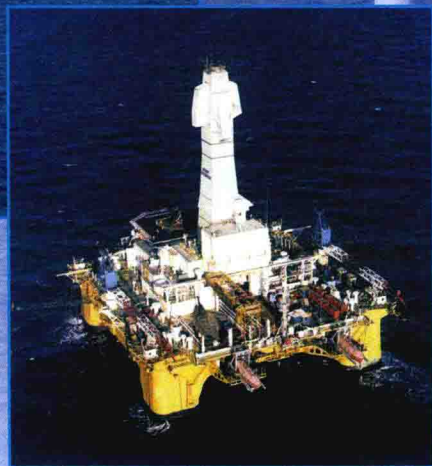




……能量之旅



能源危机



石油、天然气和煤炭等燃料都是化石一次能源，它们可直接从油田或煤矿中获取。核燃料是非化石一次能源，可从铀矿中获取。

河流、潮汐、风力可产生机械能，太阳辐射可产生热能或电能，它们都可以被利用和转换。这些能源都是可再生的，并且在人类历史的进程中不会枯竭。

电能只能从一次能源中产生，尽管电能易于输送，但不能大量储存。电能只是一种能量载体，而不是能量的来源。

能源.....

现在谁能够接受没有电或汽车的生活呢？我们愿意回到那个居所没有供暖和夜晚街道没有路灯的时代吗？

文明需要能源，进步需要不断提升能源消费水平。文明始于史前人类发现并使用火种。火种起初用于自卫、取暖和照明；后来用于生产陶瓷和金属物品。人类学会了使用牲畜和奴隶干活，后来学会了从风力和水力中获取能量。随着工业革命的到来，人类的能源消费水平显著上升。在依赖木材数千年之后，人类开始使用煤炭，然后是石油，最后是电能。其结果是：经济高速发展，生活水平显著改善，交易水平不断提高，工业基础设施建设更加高效，把人类从繁重的工作任务中解放出来，生活更加舒适，健康状况普遍提升。

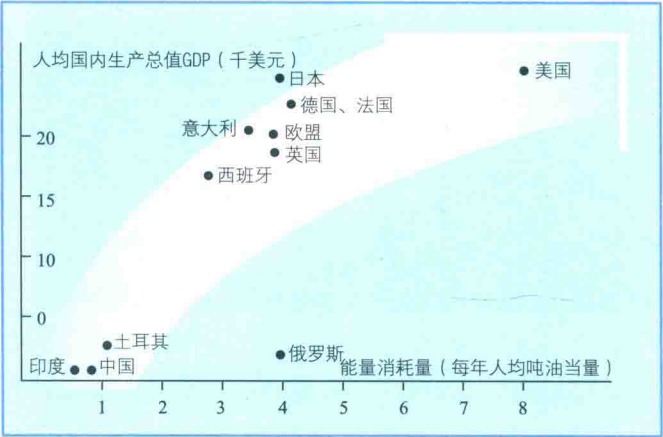
经济圈	1999年能量消耗 (每年人均吨油当量 (tep))
全球平均	1.7
北美	6.5
美国	8.1
拉丁美洲	1.1
西欧	3.4
德国	4.2
法国	4.2
意大利	2.9
非洲	0.6
中东	2.3
远东	0.9
中国	0.9
日本	4.1

来源：法国财政和工业部，巴黎，2004。

能源是繁荣的引擎

生活水平和能源消费水平密切相关。相对于欧洲和非洲每年人均 3.4 吨油当量和 0.6 吨油当量 (tep)，北美洲每年人均消耗 6.5tep。

虽然在生活水平相当的国家之间可能存在能源消费的差异（例如加拿大和美国因气候原因存在差异），但是据估计，要达到西方国家的经济发展水平，每人每年需要 2tep 以上的能源消费。



来源：法国财政和工业部，巴黎，2004。

