

中国能源安全和环境污染的解决方案

# 大变甲

## 甲醇能源时代

沈建跃◎著



$\text{CH}_3\text{OH}$

挖掘你所不知道的甲醇经济  
探索中国清洁能源的发展之路  
石油时代终将结束，什么才是现实、可行的跨油气替代能源？

新华出版社

# 大变革

## 甲醇能源时代

沈建跃◎著

新华出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

大变革:甲醇能源时代/沈建跃著.---北京:新华出版社,2017.12  
ISBN 978-7-5166-3748-7

I. ①大… II. ①沈… III. ①甲醇-空气燃料电池-研究 IV. ①TM911.44

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第306650号

## 大变革:甲醇能源时代

作 者:沈建跃

---

责任编辑:蒋小云

封面设计:三鼎甲

---

出版发行:新华出版社

地 址:北京石景山区京原路8号

邮 编:100040

网 址:<http://www.xinhuaapub.com>

<http://press.xinhuanet.com>

经 销:新华书店

购书热线:010-63077122

中国新闻书店购书热线:010-63072012

---

照 排:中版图

印 刷:北京紫瑞利印刷有限公司

成品尺寸:170mm×240mm

印 张:15.25

字 数:240千字

版 次:2018年2月第一版

印 次:2018年2月第一次印刷

书 号:978-7-5166-3748-7

定 价:58.00元

---

版权专有,侵权必究。如有质量问题,请与出版社联系调换:010-57458149

## 序一

内燃机带领人类进入石油时代。二百多年过去了，世界石油资源已进入“半衰期”，亿万年的积累储藏将在未来的几十年内消耗殆尽，石油时代即将终结。跨越油气时代，是人类必然的选择。

随着我国经济的快速发展，石油进口依存度连续 17 年蹿升，2017 年一季度逼近 70%，有机构预测还会继续上升至 80%。打破石油魔咒，摆脱对石油的依赖，确保能源安全和国家安全，是各国首脑的头等大事。中国政府郑重推出能源革命，发展立足于本土资源的石油替代能源。我们将迎来大变革：甲醇能源时代即将到来。

甲醇能源，既可用于动力，又可用于电力，还可用于化工，是石油的不二替代品。我国拥有丰富的甲醇资源，包括煤炭、煤层气、页岩气和生物质资源等，可支撑中国经济可持续发展；随着技术的进步，通过回收二氧化碳制备甲醇，人类将源源不断获取清洁可再生能源。甲醇能源，是人类能源环保双向选择的双赢战略，对我国快速降低石油进口依存度，提高能源安全、经济安全、国家安全以及实现低碳环保极具现实意义。

沈建跃先生长期从事甲醇能源向电力、动力转化的研究，他领导的团队研发的甲醇重整燃料电池发电系统已达世界先进水平，实现了国家发改委、国家能源局关于《能源技术革命创新行动计划（2016~2030 年）》中的技术标准和要  
求，为我国实施甲醇能源战略奠定了技术基础。

沈先生在百忙中编写的此书，是国内首部系统介绍甲醇重整燃料电池的专著，为科技界、能源界和交通运输领域深度了解甲醇能源技术应用及产业发展，提供了系统的资讯；同时为国家制定甲醇能源战略和产业政策提供了依据。

在此，对沈建跃博士及其团队为国家做出的贡献表示衷心感谢！

中国投资协会能源研究中心

2017 年 8 月

## 序二

能源安全和环境污染是我国现在面临的两大现实难题。我国能源安全的挑战，主要集中在石油供应领域，海关总署最新数据显示，2017年一季度，我国原油进口量突破一亿吨大关，达1.05亿吨，石油进口对外依存度达69%，远超国际公认警戒线。有机构预测，到2030年，我国对外依存度将高达80%，什么、是能源安全底线？连年攀升的石油对外依存度还能保证国家安全吗？

空气污染已是我国百姓生存环境最大的威胁，据中国环境状况公布数据，2016年，全国338座城市平均超标天数（即空气质量指数大于100的天数）占比21.2%，有32个城市重度及以上污染天数超过30天，主要分布在新疆、河北、山西、山东、河南、北京、陕西等地。同时，338个城市发生重度污染2464天次、严重污染784天次，以PM<sub>2.5</sub>为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的80.3%，以PM<sub>10</sub>为首要污染物的占20.4%，以O<sub>3</sub>为首要污染物的占0.9%，严重影响居民的健康。

造成空气污染的主要原因是交通工具排放的污染源。2016年，全国机动车排放污染物初步核算为4472.5万吨。其中，一氧化碳(CO)3419.3万吨，碳氢化合物(HC)422万吨，氮氧化物(NO<sub>x</sub>)577.8万吨，颗粒物(PM)53.4万吨。汽车是污染物排放总量的主要贡献者，其排放的CO和HC超过80%，NO<sub>x</sub>和PM超过90%。我国已连续8年成为世界机动车产销第一大国，机动车尾气污染是造成细颗粒物、光化学烟雾污染的重要原因。同时在煤烟型污染尚未根本解决的背景下，我国多个地区已形成了特征、过程、成因和影响均非常复杂的区域复合型污染，使我国大气污染治理进入瓶颈期。要同时解决能源安全和环境污染的难题，就要对中国能源结构进行分析，找出一种资源丰富，可再生的清洁能源。

沈建跃博士在本书《大变革：甲醇能源时代》中对中国推广甲醇能源作了说明和分析，本书从中国甲醇资源开始，对生产技术，配送体系，应用市场做了清晰的说明，特别对新能源汽车方面的应用，甲醇氢燃料电池汽车的特点，优势分析的非常透彻，给中国新能源汽车的发展指明了一条新路径。国际上，

发展可再生能源已经是新一轮国际竞争的战略制高点。大力发展可再生能源也是中国实现经济可持续发展的必经之路。本书对我国如何从石化能源切换到可再生能源提出了许多现实、可行的战略性建议！

沈建跃博士是我大学的同学，多年来，他一直致力于新能源汽车的甲醇氢燃料电池方面的研究开发，有许多独特见解和亲身实践，相信他的著述一定能对我国的能源和环境问题的解决，提供有益的帮助！相信读者一定能够从中有所收益！

中国工程院院士、原华东理工大学校长、现华东师范大学校长

钱旭红

2017年8月8日

### 序三

When our joint book, "Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy," Wiley-VCH 2006, was published in English with my Nobel Laureate colleague, Professor George A. Olah and Dr. Alain Goeppert, its immediate and first translation took place into Chinese with the aid of one of my past doctoral student, Professor Jinbo Hu at the Shanghai Institute of Organic Chemistry. The book became very popular in China and many concepts proposed in the book were commercially adopted. The second edition published in 2009 was also quickly translated into Chinese. Today more than 60 million tons of methanol is produced in China through coal gasification. Ten percent of transportation fuels are methanol based (blending with gasoline in various ratios along with methanol derived dimethyl ether) in many parts of China. About 17 million tons of olefins like ethylene and propylene are produced in China through MTO (methanol to olefin) process.

Now, Dr. John Shen of Palcan Energy Corporation has written a valuable book in Chinese titled, "Energy Revolution: Methanol Time." The book is composed of nine chapters. The 1<sup>st</sup> chapter includes many aspects of Chinese methanol experiment including its economic, political, policy, technological and social impact. The 2<sup>nd</sup> chapter dwells on myriad ways of hydrogen production from various sources including methane and methanol reforming. Chapter 3 and 4 covers various issues related to direct and indirect methanol fuel cell (MFC) technology. Chapter 5 and 6 analyse the potential application MFC to the transportation field, particularly in automobiles with electrical propulsion, and explores the prospect of MFC industry in China. Chapter 7 focuses on the advantages and challenges of a hydrogen fuel cell based methanol reforming. Chapter 8 analyses the developments of internal combustion engines based on methanol as a drop in fuel. The final chapter 9 addresses the broader aspects of China's environment and energy security issues and how methanol strategy could

help alleviate some of the challenges. The book is valuable in promoting methanol as a home grown versatile fuel to the Chinese energy basket.

G. K. Surya Prakash, Ph. D.

Professor and George A. and Judith A. Olah.

Nobel Laureate Chair in Hydrocarbon Chemistry

Director

Loker Hydrocarbon Research Institute

University of Southern California

Los Angeles, California

USA





目  
录

<b>第一章 甲醇产业概况</b> .....	01
<b>第一节 甲醇产业介绍</b> .....	01
一、甲醇简介 .....	01
二、甲醇的应用 .....	02
三、甲醇的合成 .....	07
<b>第二节 中国甲醇产业概况</b> .....	10
一、甲醇产业概况 .....	10
二、甲醇成本分析 .....	12
三、甲醇产业发展环境分析 .....	14
<b>第三节 甲醇经济简介</b> .....	17
<b>第二章 甲醇重整制氢技术介绍</b> .....	20
<b>第一节 甲醇制氢技术概述</b> .....	20
<b>第二节 甲醇重整制氢技术详解</b> .....	22
一、甲醇水蒸汽重整制氢反应原理及工艺 .....	22
二、反应器设计计算 .....	26
三、反应器控制方案设计 .....	29
四、PSA 氢气提纯装置 .....	30
五、去除 CO 的 Pd 膜技术 .....	34
<b>第三节 制氢技术归纳对比分析</b> .....	38
一、天然气制氢 .....	38
二、甲醇制氢 .....	40
三、水解制氢 .....	41

第四节 甲醇重整制氢技术优劣势分析 .....	43
一、比较技术类型 .....	43
二、制氢经济分析 .....	43
三、制氢效果分析 .....	44
四、技术适用情景 .....	44
第五节 甲醇重整制氢技术发展趋势 .....	46
一、中低温太阳热驱动的化学反应制氢系统的提出 .....	46
二、适用于燃料电池的重整微通道反应器的开发研究 .....	47
<b>第三章 甲醇重整燃料电池研发和产业化 .....</b>	<b>48</b>
第一节 甲醇重整燃料电池产品研发现状 .....	48
一、国外研发成果 .....	48
二、国内研发成果 .....	52
第二节 甲醇重整燃料电池产品研发主要问题 .....	55
一、催化剂 .....	56
二、甲醇重整器 .....	62
三、质子交换膜 .....	68
<b>第四章 甲醇重整燃料电池上游原料市场分析 .....</b>	<b>75</b>
第一节 甲醇市场分析 .....	75
一、甲醇产业规模 .....	75
二、甲醇市场价格 .....	77
三、甲醇产业集中度 .....	78
第二节 甲醇重整燃料电池催化剂市场分析 .....	79
<b>第五章 甲醇重整燃料电池下游应用市场分析 .....</b>	<b>84</b>
第一节 汽车市场分析 .....	84
一、汽车市场规模分析 .....	84
二、新能源汽车发展分析 .....	90
三、甲醇重整燃料电池应用分析 .....	104

第二节 分布式电网 .....	107
一、新能源电力建设概况 .....	107
二、典型分布式电源 .....	108
第三节 备用电源市场分析 .....	124
一、商业备用电源 .....	124
二、民用备用电源 .....	125
三、应急备用电源 .....	125
<b>第六章 甲醇重整燃料电池行业发展前景 .....</b>	<b>127</b>
第一节 甲醇重整燃料电池发展趋势 .....	127
一、技术研发趋势 .....	127
二、产业化进程趋势 .....	129
第二节 甲醇重整燃料电池市场规模预测 .....	134
一、全球燃料电池应用市场规模预测 .....	134
二、全球燃料在汽车领域的应用情况 .....	135
三、中国甲醇重整燃料电池应用前景 .....	139
<b>第七章 我国发展甲醇重整制氢燃料电池的战略意义 .....</b>	<b>141</b>
第一节 甲醇重整氢燃料电池是解决环境大气污染的重要方向 .....	141
第二节 发展甲醇重整氢燃料电池对国家安全建设具有战略意义 .....	146
第三节 发展甲醇重整氢燃料电池是缓解我国能源短缺的重要途径 .....	148
第四节 发展甲醇重整氢燃料电池可以带动相关产业的发展 .....	150
第五节 氢作为燃料的局限性 .....	153
<b>第八章 甲醇内燃机汽车发展的前景分析 .....</b>	<b>173</b>
第一节 甲醇内燃机的国内外技术发展状况 .....	173
一、国际发展趋势 .....	182
二、国内发展趋势 .....	183
第二节 甲醇内燃机的市场前景 .....	186
第三节 甲醇内燃机使用的国内外政策 .....	189

第九章 中国能源的安全出路·····	191
第一节 中国能源安全现状·····	191
一、能源结构·····	192
二、国际形势·····	193
三、供需矛盾·····	195
四、储备体制·····	196
五、能源利用·····	197
第二节 能源安全的应对措施·····	199
一、节能减排·····	199
二、国际能源合作·····	201
三、能源储备·····	202
四、科技兴能·····	204
五、推广新能源·····	205
第三节 新能源与甲醇战略·····	208
一、新能源的特点·····	208
二、甲醇能源重要性·····	210
三、甲醇能源战略·····	211
参考文献·····	213

# 第一章 甲醇产业概况

## 第一节 甲醇产业介绍

### 一、甲醇简介

甲醇是结构最为简单的饱和一元醇，化学式为  $\text{CH}_3\text{OH}$ ，又称“木醇”或“木精”，是无色有酒精气味易挥发的液体。甲醇的部分性质如表 1-1 所示。

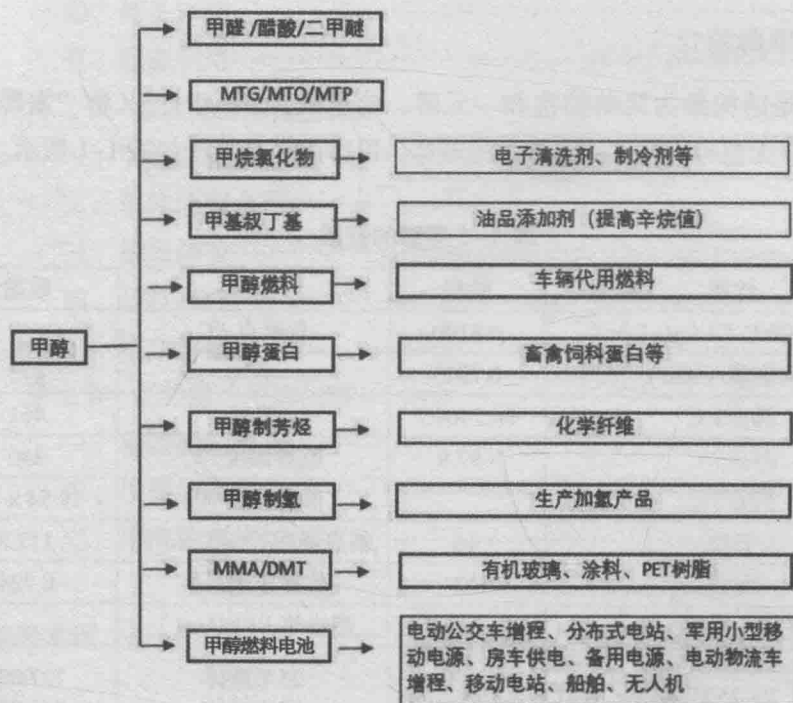
表 1-1 甲醇的性质

性质	数据	性质	数据
密度 (0℃) / (g/mL)	0.8100	自燃点 /℃	
相对密度 (d <sub>20</sub> )	0.7913	空气	473
沸点 /℃	64.5~64.7	氧气	461
熔点 /℃	-97.8	临界温度 /℃	240
闪点 /℃		临界压力 /Pa	$79.54 \times 10^5$
开口	16	临界体积 / (mL/mol)	117.8
闭口	12	临界压缩系数	0.224
蒸气压 (20℃) /Pa	$1.2879 \times 10^4$	燃烧热 / (kJ/mol)	
液体热容 (20~25℃) / [J/(g·℃)]	2.51 ~ 2.53	25℃液体	727.038
		25℃气体	742.738
粘度 (20℃) /Pa.s	$5.945 \times 10^{-4}$	生成热 / (kJ/mol)	
热导率 / [J/(cm.s.K)]	$2.09 \times 10^{-3}$	25℃液体	238.798
表面张力 (20℃) / (N/cm)	$22.55 \times 10^{-5}$	25℃气体	201.385
折射率 (20℃)	1.3287	膨胀系数 (20℃)	0.00119
蒸发潜热 (64.7℃) / (kJ/mol)	35.295	腐蚀性	常温无腐蚀性，铅、铝例外
熔融热 / (kJ/mol)	3.169	空气中爆炸性 /% (体积)	6.0 ~ 36.5

## 二、甲醇的应用

甲醇不仅是一种重要的化工产品，更是一种用途广泛的基础有机化工原料，近年来，它的能源属性愈发明显，已经逐步发展成为替代化石燃料作为能源储存、燃料和合成烃及产品的重要原料。

图 1-1 甲醇衍生的化学产品及其应用



### 1. 甲醇的化学应用

甲醇是一种重要的化工原料，在有机合成工业中，是仅次于烯烃和芳烃的重要基础有机化工原料，用途极为广泛，目前甲醇的深加工产品已达 120 多种。以甲醇为起点，进一步开发多种下游产品，它可以通过氧化脱氢、氧化羰基化、还原羰基化和其它化学反应过程来生产甲醛、醋酸、甲醇蛋白、甲基叔丁基醚 (MTBE)、甲烷氯化物、甲基丙烯酸甲酯、合成橡胶等<sup>[1-6]</sup>，在化工、医药、轻工、纺织等行业具有广泛的用途，如图 1-1 所示。

## 2. 甲醇作为运输燃料

甲醇具有非常好的燃烧特性,使它成为内燃机——汽油及柴油发动机的理想燃料。甲醇本身是一种清洁燃料,辛烷值为100,而且燃烧时不产生烟雾、炭黑和颗粒物,在较低的室温下,产生的碳氧化物排放较低,使得甲醇作为柴油机替代燃料很具吸引力。相对于许多其它的替代燃料,公共汽车已经成为以甲醇为动力的柴油机的主要测试工具。用甲醇取代柴油作为燃料还可以使尾气排放的微粒及NO<sub>x</sub>的数量显著减小<sup>[7-11]</sup>。由于甲醇不含硫,因此SO<sub>x</sub>排放而导致的酸雨几乎不会再发生。目前,以甲醇为燃料的柴油机动力的汽车在美国已获广泛使用。

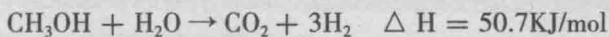
相对于传统的柴油动力的汽车,甲醇动力汽车具有更高的维护成本,这是由于发动机燃料系统有一些技术上的难题需克服,发动机需测试。这些技术上的难题不是不可避免的,可以通过进一步研究来解决。近年来,甲醇燃料因其安全、廉价、燃烧充分、利用率高、环保等众多优点,已经成为替代汽油的车用燃料发展方向之一。我国政府已充分认识到发展车用替代燃料的重要性,并开展了这方面的工作。

## 3. 甲醇重整制氢用于燃料电池

甲醇中的碳氧单键很难被破坏,这极大地方便了它以80%~90%效率转化为氢的反应,甲醇可以在燃料电池中产生电,方法是通过将甲醇催化重整为H<sub>2</sub>来实现的。

氢燃料电池是甲醇重整制氢反应的一个重要应用领域,相对于纯氢气系统,甲醇重整制氢系统更致密(相同体积下比液态氢的储氢量更多)并且容易保存。利用甲醇重整制得氢气<sup>[12-16]</sup>,利于减少化工生产中的能耗和降低成本,替代“电解水制氢”的工艺,而且甲醇不含硫这种可以使燃料电池中毒的物质。这是四种甲醇制氢方法中最为成熟的一种制氢方法。

甲醇水蒸汽重整制氢的反应式:



甲醇水蒸汽重整是国外20世纪80年代兴起的一种制氢技术,加拿大、英国、澳大利亚等国家在这方面进行了大量研究。1997年,戴姆勒公司生产了第一台甲醇作为燃料的FCV, Nekar3,它装备有可以提供50kW的燃料电池并且可以连续行驶400km。目前,该制氢技术在工艺上较为成熟,已经成功用于为新

型氢能燃料电池客车提供能源，应用前景良好，甲醇作为一种绿色、廉价、可再生的能源可以有效解决我国现在的能源紧缺问题（见图 1-2）。

图 1-2 Necar3



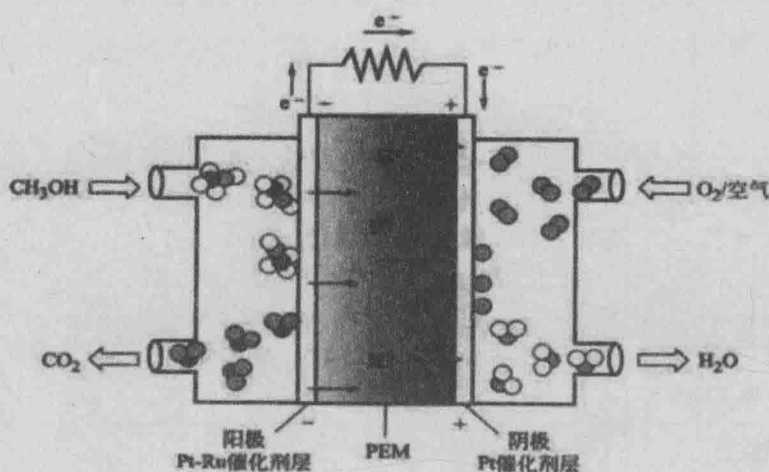
#### 4. 直接甲醇燃料电池（DMFC）

在直接甲醇燃料电池中，甲醇可以直接和空气反应。直接甲醇燃料电池<sup>[17-21]</sup>不依赖氢的生产，比如电解水、天然气或者碳氢化合物的重整过程，因而在很大程度上简化了燃料电池技术，使它在很大范围内都得到应用，如便携式电子设备、小型摩托车、汽车等。1L 的液态甲醇比 1L 的液态氢含有更多的氢（室温下 1L 甲醇 98.8g 氢与 -253℃ 下 1L 液态氢气 70.8g 氢相比），与普通的燃料电池相比，甲醇理论上有相对较高的体积能量密度，这对于小的便携式的仪器至关重要。

随着对 DMFC 各方面的研究所取得的进步，许多公司正在为一些手提设备积极开发低动力的 DMFC，比如手机和笔记本电脑。东芝公司开发了一个有望为笔记本使用的 DMFC 电堆。这个电堆平均输出功率为 12W，使用一个 50ml 的甲醇储藏罐，能持续使用 5 小时。



图 1-3 直接甲醇燃料电池



## 5. 甲醇的应用基础

甲醇是重要的化工原料和重要的能源物质，具有大规模应用的基础和前景：首先，甲醇来源广泛。

持久耐用的能源品种必须有丰富的原料来源，最好是用之不竭，甲醇正是这样的产品。目前，在海外地区，甲醇主要以天然气为原料生产，在我国却适于用资源丰富的煤炭，特别是高硫低质煤或煤层气、焦炉气等生产，仅仅以此便可保证我国的百年能源安全。未来，甲醇还可采用可再生的木材生产，更可以用特定微生物发酵可再生的蔗渣和农作物秸秆生产，仅此就可以近似地保持有关能源的自然循环。多元的原材料来源使得甲醇成为一种理想的二次能源载体。目前，我国由焦炉气等原料制造甲醇的产能出现富余，约超出需求量的3倍左右，开发甲醇替代石油燃料具有充足的产量和产能保障。目前，我国甲醇主要用于化工领域，大量剩余生产能力能保证未来甲醇产品供应充足、价格稳定，一旦市场寻求替代石油的能源资源的时候，甲醇可以担此大任。

第二，甲醇运输方便。

甲醇管道及槽罐车皆只需用现有等级加油站及油罐车即可，安全系数高；而且同等体积下，甲醇的运输效率是氢气运输效率的8倍，是大容量高压钢瓶氢气运输的12倍。在我国，甲醇仓储物流已完成网络式、集约化、规模化布局规划，将在全国范围内建设大库容量仓储基地，并可实现点对点终端配送。