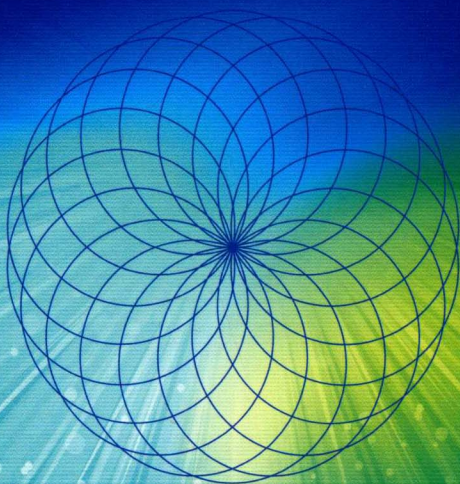


氢能利用关键技术系列

制氢工艺与技术

毛宗强 毛志明 余皓 等编著



ZHIQING GONGYI YU JISHU



化学工业出版社

氢能利用关键技术系列

制氢工艺与技术

毛宗强 毛志明 余皓 等编著

ZHIQING GONGYI YU JISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

《制氢工艺与技术》介绍了氢气的工业生产过程与原理。为了满足当前对无碳氢气，即氢气生产过程“零 CO₂ 排放”的要求，本书介绍了可再生能源制氢，突出了风力制氢和生物质能制氢；还介绍了核能制氢、氨气制氢、硼氢化钠催化水解制氢、硫化氢分解制氢、金属粉末制氢等目前尚未工业化生产但完全的“零 CO₂ 排放”的制氢技术。对于通常排放 CO₂ 的烃类制氢工艺，本书介绍了其制得氢和炭黑的独特工艺，从而使其成为另一种“零 CO₂ 排放”的制氢方法。

本书适合从事或准备进入氢能领域的企业家、投资家、政策决策者阅读，可供从事能源研究的工程技术人员、高等学校相关专业的教师和学生参考，也适合从事能源领域的科技人员和管理人员及一般读者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

制氢工艺与技术/毛宗强等编著. —北京: 化学工业出版社, 2018. 4
(氢能利用关键技术系列)
ISBN 978-7-122-31707-0

I. ①制… II. ①毛… III. ①制氢 IV. ①TE624. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 047432 号

责任编辑: 袁海燕
责任校对: 吴 静

文字编辑: 向 东
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 河北鹏润印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 21 $\frac{3}{4}$ 字数 574 千字 2018 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

氢是人类永恒的能源、人类未来的能源

为什么说氢是人类永恒的能源、人类未来的能源？ 是因为：

(1) 氢及其同位素的资源丰富。每个水分子含有两个氢原子一个氧原子。相比氧化铁是“铁矿”，那么，水就是无穷的“氢矿”。而氢在使用后又复生成水。可见氢的量是无穷无尽的。我们知道地球的70%以上的表面都覆盖着水，人们不必像争夺分布极度不平衡的石油和煤那样去争夺水，由此我们也称氢为“和平能源”。大力发展“和平能源”是我国崛起的必然之路。

(2) 氢很“容易”得到。只要有水和其他任何能源，甚至金属、化合物都能获得氢气。氢气是能源载体，所有的一次能源和能源载体都可以用来直接或间接生产氢气。所谓直接生产氢气，指与水反应制得氢气或直接裂解生成氢气，如天然气直接裂解生成氢气和碳。所谓间接生成氢气，是指先发电，再利用电解水制得氢气，或先制成含氢载体，如氨气、甲醇、乙醇等，再裂解它们制得氢气。氢气的制取方法很多，包括：热化学制氢、电化学制氢、微生物学制氢，等等。“易得”是氢的重要特点，如何制得氢气是本书的主要内容。

(3) 氢能是无碳能源，是最环保的能源。无论用什么方式使用氢气，其最终的产物都是水，是清洁的、无污染的水。氢在其生命周期中，不给环境留下一丁点 CO_2 ，氢是典型的无碳能源。

(4) 氢气具有可储存性。它既可以以气态、液态的形式储存和输配，也可以以不饱和的氢的液体、固体及金属氧化物的形式进行储存和运输。

(5) 氢是宇宙中最丰富的元素。构成宇宙的物质元素中，大约占据宇宙质量的75%。地球之母——太阳，就是依靠氢的同位素氘和氚的聚合反应生成巨量的热和光，温暖着地球，照耀着地球。使用氢作为能源，就是回归宇宙法则，“替天行道”。

(6) 氢是安全的能源。每种能源载体都有其物理/化学/技术性的特有的安全问题。氢在空气中的扩散能力很强，因此氢泄漏或燃烧时就很快地垂直上升到空气中并扩散。因为氢本身没有毒性及放射性，所以不可能有长期的未知范围的后续伤害。氢不会产生温室效应。现在已经有整套的氢安全传感及执行装置，可及时测定氢气的泄漏并采取措施，将事故消灭在萌芽状态，保证氢气使用安全。

通常，氢能产业链由制氢、储运和应用组成，制氢是完整的氢能产业链的第一环，非常重要，没有氢气，就无从谈起氢能产业。近年来，准备投入氢领域的投资人、企业家越来越多。他们的第一个问题往往就是氢气从哪里来？为了比较系统地回答这一问题，我们曾在2015年在化学工业出版社的支持下，出版了《氢气生产热化学利用》，介绍了工业化制氢方法及其氢能在内燃机、燃气轮机、锅炉、切割、焊接及环境保护等领域的应用，得到读者好评。为了适应最近投资人和企业家对氢气生产的深入了解，我们决定编写本书，不仅仅介绍工业化生产氢气，也介绍有潜力的无碳氢气（又称绿色氢气）生产，例如更接近产业化的风力制氢、生物质制氢。希望一方面满足新进入氢能领域的人士需要，另一方面切实推

动无碳制氢发展。

起初，化学工业出版社就本书内容及作者已有部分安排，后由我继续执行。因为在已有的框架下完善，所以，有的章节似乎可以安排得更好些。

参与本书各章节撰写的作者都是制氢方面的教授、专家和亲历者，从专业出发承担相关章节编写，每章节的功劳和责任都分别属于作者自己。编者在此对各位作者表示诚挚的谢意。本书各章节的具体作者情况如下：

绪论（清华大学 毛宗强）

第1章 煤制氢（毛宗强）

第2章 天然气制氢（清华大学 蹇伟中）

第3章 石油制氢（北京华氢科技有限公司 毛志明）

第4章 可再生能源制氢（清华大学 李十中、碗海鹰 完成该章第4.2.3节；毛志明完成该章其余部分）

第5章 太阳能光解水制氢（上海电力学院 姚伟峰）

第6章 生物质发酵制氢（中国农业大学 刘志丹、司哺春、李嘉铭，中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院 张家仁）

第7章 生物质热化学制氢（华南理工大学 余皓）

第8章 核能制氢（清华大学 张平）

第9章 等离子体制氢（毛宗强）

第10章 汽油、柴油制氢（陆军防化学院 孙杰）

第11章 醇类重整制氢（余皓）

第12章 甘油重整制氢（余皓）

第13章 甲酸分解制氢（余皓）

第14章 氨气制氢（毛志明）

第15章 烃类分解生成氢气和炭黑的制氢方法（毛志明）

第16章 NaBH_4 制氢（毛志明）

第17章 硫化氢分解制氢（毛志明）

第18章 金属粉末制氢（毛志明）

第19章 液氢（毛宗强）

第20章 副产氢气的回收与净化（毛志明）

最后，编者借此机会感谢化学工业出版社的大力支持，特别是编辑的辛勤劳动，使得本书得以高质量完成。本书是从事氢能的教授、专家的集体编著的结晶，希望本书能对我国发展氢能有所贡献。在编写过程中，编者力求论述准确、理论结合实际。由于水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

2018年4月

于清华大学能科楼A座314室

0 绪论	1
0.1 氢气是“全能”的高级能源并可能成为下一个“主体能源”	1
0.2 氢在减排温室气体中的重要地位	2
0.3 多种多样、丰富多彩的制氢方法	3
0.3.1 根据制氢原料分类	3
0.3.2 根据制氢原理分类	4
0.4 我国是世界产氢第一大国，化石燃料是目前制氢主力	5
0.4.1 全国煤炭、天然气制氢潜在产能	5
0.4.2 2016年全国氯碱、甲醇、合成氨的副产氢气产能	5
0.5 氢能是二次能源吗？	6
第1章 煤制氢	9
1.1 传统煤制氢技术	10
1.2 煤气化制氢工艺	10
1.2.1 煤的气化	10
1.2.2 一氧化碳变换	11
1.2.3 酸性气体脱除技术	11
1.2.4 H ₂ 提纯技术	12
1.2.5 “三废”处理	12
1.3 煤制氢国内外发展现状	12
1.3.1 国外煤制氢发展状况	12
1.3.2 国内煤制氢发展状况	13
1.4 煤气化技术	13
1.4.1 固定床气化技术	13
1.4.2 流化床气化技术	14
1.4.3 气流床气化技术	14
1.5 煤制氢技术经济性	16
1.5.1 煤制氢与天然气制氢的经济技术指标对比	16
1.5.2 煤制氢技术经济影响因素分析	18
1.6 煤制氢前景	19
1.7 褐煤制氢	20
1.7.1 背景介绍	20
1.7.2 工艺介绍	21
1.7.3 成本计算及 CO ₂ 排放量	23

- 1.7.4 总结与展望 /24
- 1.8 煤炭地下气化制氢 /25
 - 1.8.1 煤炭地下气化研究综述 /25
 - 1.8.2 国外煤炭地下气化 /25
 - 1.8.3 我国的地下煤气化试验 /26
 - 1.8.4 地下煤气化制氢前景 /27
- 1.9 煤制氢零排放技术 /28
- 1.10 电解煤水制氢 /29
 - 1.10.1 电解煤水制氢的研究现状和前景 /29
 - 1.10.2 电解煤水制氢的反应机理 /30
 - 1.10.3 电解煤水制氢技术的特点 /33
- 1.11 超临界煤水制氢 /35
 - 1.11.1 概论 /35
 - 1.11.2 我国研究情况 /35
 - 1.11.3 国外研究情况 /37
 - 1.11.4 展望 /37
- 1.12 煤/石油焦制氢 /38
- 参考文献 /38

第2章 天然气制氢 /42

- 2.1 天然气在含氧(元素)环境下的制氢技术 /42
 - 2.1.1 基本原理 /42
 - 2.1.2 技术进展 /43
 - 2.1.3 关键设备 /47
 - 2.1.4 优点与问题 /49
- 2.2 天然气无氧芳构化制氢工艺 /49
 - 2.2.1 基本原理 /49
 - 2.2.2 制氢工艺 /50
 - 2.2.3 设备 /53
 - 2.2.4 优点与问题 /53
- 2.3 天然气直接裂解制氢与碳材料工艺 /53
 - 2.3.1 基本原理 /53
 - 2.3.2 制氢气工艺 /54
 - 2.3.3 反应设备 /57
 - 2.3.4 优点与问题 /59
- 参考文献 /59

第3章 石油制氢 /63

- 3.1 石油制氢原料 /63
- 3.2 制氢工艺简介 /64
 - 3.2.1 石脑油制氢 /64
 - 3.2.2 重油制氢 /64

- 3.2.3 石油焦制氢 /65
- 3.2.4 炼厂干气制氢 /65
- 3.3 石油原料制氢经济 /66
- 参考文献 /67

第4章 可再生能源制氢 /68

- 4.1 太阳能制氢 /68
 - 4.1.1 太阳光直接分解水制氢 /68
 - 4.1.2 太阳光热化学分解水制氢 /73
 - 4.1.3 太阳能发电、电解水制氢 (PTG) /73
- 4.2 生物质能制氢 /74
 - 4.2.1 生物质生物发酵制氢 /75
 - 4.2.2 生物质化工热裂解制氢 /76
 - 4.2.3 生物质制乙醇、乙醇制氢 /79
- 4.3 风能制氢 /84
 - 4.3.1 风电制氢 /84
 - 4.3.2 风-氢能源系统 (WHHES) 介绍 /85
 - 4.3.3 应用范例 /86
 - 4.3.4 吉林省长岭县龙凤湖 20 万千瓦风电制氢及 HCNG 示范项目介绍 /87
- 4.4 海洋能制氢 /89
 - 4.4.1 潮汐能 /89
 - 4.4.2 波浪能 /89
 - 4.4.3 温度差能 /89
 - 4.4.4 海流能 /90
 - 4.4.5 海洋盐度差能 /90
 - 4.4.6 海草燃料 /91
 - 4.4.7 海洋能制氢前景 /91
- 4.5 水力能制氢 /91
 - 4.5.1 水力能资源 /91
 - 4.5.2 水力能发电制氢 /91
 - 4.5.3 水力能制氢优势 /92
- 4.6 地热能制氢 /92
- 参考文献 /92

第5章 太阳能光解水制氢 /96

- 5.1 光催化研究开端 /96
- 5.2 光催化分解水的基本原理 /97
 - 5.2.1 光催化分解水过程 /97
 - 5.2.2 光催化分解水反应热力学 /97
 - 5.2.3 光催化分解水反应动力学 /98
- 5.3 研究进展 /99
 - 5.3.1 分解水制氢光催化剂 /99

5.3.2 提高光催化剂分解水制氢效率的方法 / 101

5.3.3 光催化分解水制氢反应器 / 103

5.4 结论与展望 / 109

参考文献 / 109

第 6 章 生物质发酵制氢 / 113

6.1 基本原理 / 113

6.2 研究进展 / 114

6.2.1 接种物的选择以及处理方式 / 114

6.2.2 反应 pH 值 / 116

6.2.3 温度 / 116

6.2.4 原料 / 116

6.2.5 反应器 / 117

6.3 案例介绍 / 117

6.4 优点与问题 / 119

参考文献 / 119

第 7 章 生物质热化学制氢 / 122

7.1 生物质简介 / 122

7.2 生物质热解制氢 / 123

7.2.1 生物质热解反应 / 123

7.2.2 生物质热解制氢的影响因素 / 125

7.2.3 生物质热解制氢反应器及技术 / 130

7.3 生物质气化制氢 / 133

7.3.1 生物质气化原理 / 134

7.3.2 气化介质 / 134

7.3.3 气化炉及工艺 / 135

7.3.4 生物质气化过程强化 / 137

7.3.5 生物质超临界水气化制氢 / 138

7.4 生物油制氢技术 / 139

7.4.1 生物油简介 / 139

7.4.2 生物油蒸汽重整制氢 / 139

7.4.3 生物油自热重整制氢 / 140

7.4.4 生物油重整制氢反应器技术 / 141

7.5 生物质热化学制氢技术评述 / 143

7.5.1 生物质热化学制氢的技术经济性 / 143

7.5.2 生物质热化学制氢的 CO₂ 排放 / 144

参考文献 / 145

第 8 章 核能制氢 / 149

8.1 核能制氢技术 / 149

- 8.1.1 核能制氢主要工艺 / 150
- 8.1.2 核能制氢用反应堆 / 153
- 8.2 核能制氢国内外研究进展 / 154
 - 8.2.1 日本 / 155
 - 8.2.2 美国 / 155
 - 8.2.3 法国 / 155
 - 8.2.4 韩国 / 156
 - 8.2.5 加拿大 / 156
 - 8.2.6 中国 / 157
- 8.3 核能制氢的经济性与安全性 / 160
 - 8.3.1 经济性 / 160
 - 8.3.2 安全性 / 161
- 8.4 核能制氢的综合应用前景 / 162
 - 8.4.1 核能制氢——氢冶金 / 162
 - 8.4.2 其他 / 164
- 参考文献 / 165

第 9 章 等离子体制氢 / 167

- 9.1 等离子体简介 / 167
- 9.2 等离子体的制备 / 168
- 9.3 等离子体制氢研究现状 / 169
- 9.4 等离子体制氢的优缺点 / 173
- 参考文献 / 174

第 10 章 汽油、柴油制氢 / 175

- 10.1 基本原理 / 175
- 10.2 研究进展 / 176
 - 10.2.1 汽油、柴油制氢工艺 / 176
 - 10.2.2 设备 / 179
- 10.3 优点与问题 / 181
- 参考文献 / 181

第 11 章 醇类重整制氢 / 184

- 11.1 甲醇制氢 / 184
 - 11.1.1 甲醇水蒸气重整制氢 / 184
 - 11.1.2 甲醇水相重整制氢 / 189
- 11.2 生物燃料乙醇制氢 / 189
 - 11.2.1 乙醇直接裂解制氢 / 191
 - 11.2.2 乙醇水蒸气重整制氢 / 191
 - 11.2.3 乙醇二氧化碳重整制氢 / 193
 - 11.2.4 乙醇制氢催化剂 / 194

- 11.3 醇类重整制氢反应器及技术 / 198
 - 11.3.1 固定床反应器 / 199
 - 11.3.2 微通道反应器 / 200
 - 11.3.3 微结构反应器 / 203
 - 11.3.4 膜反应器 / 205
- 11.4 电催化强化乙醇制氢 / 208
- 11.5 等离子体强化乙醇制氢 / 208
- 11.6 甲醇、乙醇制氢技术的特点和问题 / 209
 - 11.6.1 甲醇、乙醇制氢的技术经济性 / 209
 - 11.6.2 甲醇、乙醇制氢的 CO₂ 排放 / 209
 - 11.6.3 制氢与燃料电池耦合系统 / 209
- 参考文献 / 212

第 12 章 甘油重整制氢 / 217

- 12.1 背景及甘油的来源 / 217
- 12.2 甘油的物化性质 / 218
- 12.3 甘油水蒸气重整制氢 / 219
 - 12.3.1 热力学分析 / 220
 - 12.3.2 反应机理 / 221
 - 12.3.3 催化剂 / 223
- 12.4 甘油水相重整制氢 / 229
- 12.5 甘油干重整制氢 / 231
- 12.6 甘油光催化重整制氢 / 231
- 12.7 甘油高温热解法重整制氢 / 232
- 12.8 甘油超临界重整制氢 / 232
- 12.9 甘油吸附增强重整制氢 / 232
- 12.10 甘油制氢技术的 CO₂ 排放 / 237
- 12.11 甘油制氢技术的经济性 / 237
- 参考文献 / 239

第 13 章 甲酸分解制氢 / 243

- 13.1 基本原理 / 243
- 13.2 甲酸的来源 / 243
- 13.3 甲酸分解催化剂 / 245
 - 13.3.1 均相催化剂 / 245
 - 13.3.2 非均相催化剂 / 252
- 13.4 甲酸分解制氢技术及设备 / 258
- 13.5 甲酸分解制氢技术的优点和问题 / 259
- 参考文献 / 260

第 14 章 氨气制氢 / 264

- 14.1 氨制氢原理 / 264

- 14.1.1 氨分解制氢的热力学 / 264
- 14.1.2 氨分解制氢的动力学 / 265
- 14.1.3 热催化法分解氨气制氢 / 267
- 14.1.4 等离子体催化氨制氢新工艺 / 268
- 14.2 氨制氢的设备 / 268
- 14.3 其他氨分解制氢方法 / 268
- 14.4 和甲醇制氢比较 / 269
- 参考文献 / 270

第 15 章 烃类分解生成氢气和炭黑的制氢方法 / 272

- 15.1 烃的定义及制氢方法 / 272
- 15.2 烃类分解制取氢气和炭黑方法 / 272
 - 15.2.1 热裂解法 / 272
 - 15.2.2 等离子体法 / 273
- 15.3 天然气催化热裂解制造氢气和炭黑 (TCD) / 273
 - 15.3.1 传统的天然气热裂解 / 273
 - 15.3.2 天然气热裂解制氢气和炭黑的新方法 / 273
 - 15.3.3 天然气催化热裂解制造氢气和炭黑(TCD) / 274
- 15.4 热分解制氢气和炭黑与传统方法的比较 / 274
 - 15.4.1 分解甲烷的能耗 / 274
 - 15.4.2 氢气产品的能耗与原料消耗 / 275
 - 15.4.3 排放 CO₂ 比较 / 275
 - 15.4.4 能量利用比较 / 275
- 参考文献 / 275

第 16 章 NaBH₄ 制氢 / 276

- 16.1 基本原理 / 276
- 16.2 研究进展 / 277
 - 16.2.1 NaBH₄ 制氢工艺 / 277
 - 16.2.2 设备 / 279
- 16.3 优点与问题 / 281
- 参考文献 / 281

第 17 章 硫化氢分解制氢 / 282

- 17.1 硫化氢分解反应基础知识 / 282
 - 17.1.1 反应原理 / 282
 - 17.1.2 热力学分析 / 282
 - 17.1.3 动力学研究 / 283
 - 17.1.4 动力学反应机理 / 283
- 17.2 硫化氢分解方法 / 284

- 17.2.1 热分解法 /284
- 17.2.2 电化学法 /285
- 17.2.3 电场法 /286
- 17.2.4 微波法 /286
- 17.2.5 光化学催化法 /286
- 17.2.6 等离子体法 /286
- 17.3 主要研究方向 /288
- 参考文献 /289

第 18 章 金属粉末制氢 /290

- 18.1 什么金属能制氢 /290
- 18.2 铝制氢 /291
 - 18.2.1 Al-H₂O 体系 /291
 - 18.2.2 铝制氢设备 /295
- 18.3 镁制氢 /295
- 18.4 锌制氢 /296
- 18.5 铁制氢 /297
- 18.6 结语和展望 /297
- 参考文献 /297

第 19 章 液氢 /299

- 19.1 液氢背景及性质 /299
 - 19.1.1 液氢性质 /299
 - 19.1.2 液氢外延产品 /299
- 19.2 液氢用途 /302
- 19.3 液氢的生产 /302
 - 19.3.1 正氢与仲氢 /302
 - 19.3.2 液氢生产工艺 /303
 - 19.3.3 液氢生产典型流程 /305
 - 19.3.4 全球液氢生产 /307
 - 19.3.5 液氢生产成本 /308
- 19.4 液氢的储存与运输 /309
 - 19.4.1 液氢储存 /309
 - 19.4.2 液氢运输 /310
- 19.5 液氢加注系统 /312
 - 19.5.1 液氢加注系统 /312
 - 19.5.2 防止两相流的措施 /312
- 19.6 液氢的安全 /313
- 19.7 中国液氢 /314
- 19.8 小结 /315
- 参考文献 /315

第 20 章 副产氢气的回收与净化 / 317

20.1 变压吸附法 / 318

20.1.1 背景 / 318

20.1.2 氢气分离的各种方法比较 / 318

20.1.3 变压吸附制氢工艺 / 319

20.1.4 变压吸附在氢气分离中的应用与发展 / 323

20.2 膜分离法 / 325

20.2.1 有机膜分离 / 325

20.2.2 无机膜分离 / 330

20.2.3 液态金属分离 / 331

20.3 深冷分离法 / 332

20.3.1 低温吸附法 / 332

20.3.2 工业化低温分离 / 333

参考文献 / 333

化石燃料是当今世界能源市场的支柱和世界经济发展的动力，然而化石燃料的广泛使用，对全球环境造成了很大威胁。在满足能源需求、支持经济持续发展和保护全球环境的多重难题下，发展无碳的氢能是人类摆脱困境的重要途径。

世界能源结构在历史上发生过两次能源革命：煤炭替代薪柴，石油和天然气替代煤炭。生产力发展的需求是这两次能源革命的主要动因。现在，世界能源结构正在发生第三次革命：从以化石燃料为主的能源系统转向可再生能源、氢能等多元化结构。环境要求是本次能源革命的主要动因。

氢能是理想的清洁高效的二次能源。随着制氢、氢能储运及燃料电池技术的发展，氢能已经跨过概念、示范进入产业化阶段。据统计，近三年“零排放”的氢燃料电池汽车已经商业化销售 6475 辆。虽然和全球汽车数目相比，氢燃料电池汽车数量还是很少，但这是氢能的萌芽，揭示氢能替代化石燃料成为现实。有苗不愁长，氢能萌芽一定会成为参天大树。

氢不但是一种优质交通燃料，还是石油、化工、化肥和冶金工业中的重要原料和物料。用氢燃料电池可直接发电，采用燃料电池和氢气-蒸汽联合循环发电，其能量转换效率将远高于现有的火电厂。

可以预见：21 世纪将是氢能世纪，人类将告别化石能源而进入氢能社会。

0.1 氢气是“全能”的高级能源并可能成为下一个“主体能源”

2015 年国际能源署（IEA）对能源给出新的定义。如图 0-1 所示。

IEA 根据能源的应用形式将能源分为热、电和交通工具燃料三类。其中对于目前的能源，石油是能够同时用作这三类的能源。煤炭和核能只能用于热和电。可再生能源中，太阳能光伏只能用作热和电能；风能和水能只产生电能；生物质能产生热和电（还可以制得交通工具用燃料——毛宗强）。当然这一分类还值得商榷。利用同样的标准，IEA 认为未来的能源中，氢气将和石油一样是能够同时用作热、电和交通工具用燃料的能源。这说明了氢能是可以广泛用于所有类别的“高级”能源。

2017 年 1 月达沃斯论坛期间，法液空、阿尔斯通、宝马、戴姆勒、恩吉、本田、现代汽车、川崎重工、荷兰皇家壳牌、林德、道达尔和丰田 13 个国际顶级汽车和能源公司 CEO 宣布成立“氢能委员会”推动氢燃料电池。“氢能委员会”每年提供 14 亿欧元发展氢燃料电池车。“氢能委员会”主席轮流，首任主席为法液空和丰田 CEO。一年后，委员会又增加 5 个新的成员：英美资源集团、奥迪公司、岩谷、塑料制品公司、国家石油公司，以及 10 个

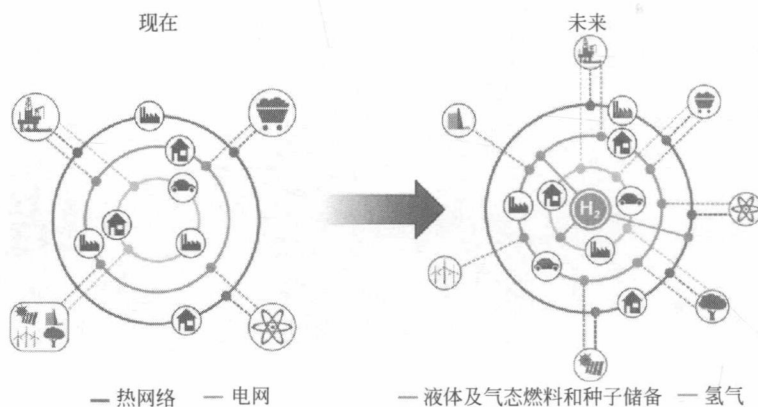


图 0-1 2015 年国际能源署 (IEA) 对能源给出新的分类

支持成员：三井、Plug Power、Faber Industries、Faurecia、第一元素燃料（真正的零）、戈尔、丰田通商、Hydrogenics，巴拉德、三菱。

2017 年 11 月氢能委员会发布氢能愿景报告：氢能无边 (hydrogen scaling up)。报告中预测：到 2050 年，大约 4 亿辆氢的动力汽车，1500 万~2000 万辆卡车，以及大约 500 万辆公共汽车，它们在各自的运输部门平均有 20%~25% 的份额；氢能也能占 1/4 客船和 1/5 的机车，基于氢的合成燃料在飞机和货运船中也将占一定比例；在建筑用热量的需求约占 10%；氢被用作 30% 的甲醇和 10% 的钢铁生产可再生原料。到 2050 年氢将占世界终端能源消耗的 18%。

“主体能源”指在能源份额中占 10% 以上的能源。我国目前的主体能源为煤炭和石油。同时，正在努力希望于 2020 年将天然气打造成为我国第三大主体能源。目前我国氢气产量已经达到 2200 万吨，占世界氢气产量的 34%。氢气目前主要用于工业原料，如合成氨；间接能源，如石油加氢，煤制油，煤制天然气，煤制甲醇；少量用于直接能源。

考虑到能源的发展速度，笔者估计 2040 年氢将占世界终端能源消耗的 10%，即届时氢能将成为“主体能源”。

0.2 氢在减排温室气体中的重要地位

要实现我国政府提出的到 2020 年单位 GDP 的 CO₂ 排放减少为 2005 年水平的 40%~45% 的目标，氢能有着不可或缺的作用。减少 CO₂ 排放的主要途径包括：节约能源、提高能源转换及利用效率；调整能源结构，低碳能源；CCS/CCU。氢能在这三个方面都发挥着不可替代的作用。

(1) 节能与提高能效离不开氢能

氢能的主要利用方式是燃料电池，通过电化学反应直接将化学能转化为电能，能量转化过程中不受“卡诺循环”限制，能量转换效率很高。一般汽油车从油井到最终车轮的总能源效率仅为 13%，而氢燃料电池汽车从油井到车轮的总能源效率可达 30%，是汽油车的两倍多。另外，氢燃料电池的发电效率也高于常规发电技术。在较低的发电功率 (0.01~1MW) 情况下，普通往复引擎的发电效率约为 30%，燃料电池的效率可达 40%；发电功率在 1~100MW 的范围内，蒸汽轮机的发电效率也在 30% 左右，而燃料电池的效率则达到 50%~60%；在较高的发电功率 (100~1000MW) 范围，IGCC 的发电效率最高可达到 60%，但如果用燃料电池结合蒸汽轮机还将获得更高的发电效率。相对传统能源，氢能的利用大大提

高能源利用效率，从而减少化石能源的使用，并最终实现 CO_2 的减排。

(2) 调整能源结构，增加可再生能源份额需要氢能协助

在调整能源结构方面，氢能也起着很重要的作用。目前，可再生能源由于时空不稳定使其应用价值大为降低，氢能可以很好地解决这一问题。首先，氢可以将可再生能源的多余电力储存起来；其次，氢可以将风能的低质量电力变成优质电源；再次，氢能可以使风能免除电网份额的限制；此外，氢能还可将可再生能源的电力变为汽车的动力。可以说，氢能是连接可再生能源和用户的最好桥梁，将不稳定的可再生能源转化为稳定的氢能，再将氢能用于汽车或发电，达到调整能源结构的目的，最终实现能源的低碳化，减少 CO_2 排放。

(3) 煤的低碳化利用的第一步就是生成氢气

当前的热点：碳捕集与埋藏 (CCS) 主要有三种技术，即燃烧前捕集、燃烧后捕集和燃烧中捕集，其中燃烧前捕集技术在电力生产等方面应用前景广阔。在这一方法中，化石燃料首先在气化炉中部分氧化产生合成气 (CO 和 H_2)，再经水煤气变换得到 CO_2 和 H_2 ，通过分离，就可以从相对纯粹的排气中捕捉 CO_2 ，得到的 H_2 则可以作为燃料或进一步利用。以华能集团绿色煤电 IGCC+CCS 项目为例，450MW 级近零排放电站每年预计可捕集 160 万吨 CO_2 。鉴于 CCS 技术中 CO_2 的储存较为困难，实际上就是 CCS 的技术可行性都没有解决，谈不上应用。由此提出 CCU 技术，即捕集到 CO_2 后的资源化利用。 CO_2 资源化利用的主要方式包括催化加氢、高分子合成、有机合成、电化学法、人工光合成法和分解法等，其中催化加氢最为简单有效。 CO_2 通过催化加氢，可以得到甲烷、甲醇、乙烯等重要化工产品。目前，CCU 的主要问题在于 H_2 从何而来？从传统的化石燃料来获得 H_2 显然是不划算的，而且对于 CO_2 减排并没有帮助；如果能够通过可再生能源如太阳能来获得 H_2 ，再用以固定 CO_2 ，将有效减少 CO_2 的排放。CCU 的主要问题是商业经济性，在现阶段，其较高的生产成本是主要壁垒。

0.3 多种多样、丰富多彩的制氢方法

现在世界能源的主体是化石能源。近百年来化石能源支撑人类社会高速发展，功莫大焉。但有越来越多的证据表明化石能源的大量使用已经损害了环境，并造成全球气候的变化。而化石能源是一种有限的资源，特别是石油以现有的消费速度很可能在 100 年内就将被消耗完。而且化石能源的分布存在明显的地理分布不均匀性。对能源的争夺越来越激烈，由此也带来了能源安全的问题。在这种情况下，可再生能源越来越受到人们的重视。可再生能源包括太阳能、生物质能、风能、水力能、地热能、海洋能源等。笔者在《无碳能源：太阳氢》(2009 年，化学工业出版社) 中“耀眼的太阳氢”一节中指出氢会进一步提高可再生能源在全球能源市场中的比例。总之，氢能越来越受到人们的重视。

氢能是一种二次能源，在人类生存的地球上，几乎没有现成的氢，因此必须将含氢物质加工后方能得到氢气。最丰富的含氢物质是水 (H_2O)，其次就是各种矿物燃料 (煤、石油、天然气、硫化氢) 及各种生物质等。

0.3.1 根据制氢原料分类

所有的化石能源都既可以直接制氢，也可以间接制氢。目前，全世界氢气的主要来源是用化石能源制氢，其中主要是煤和天然气制氢。

可再生能源中，太阳能是最活跃的制氢介质，有很多种方法制氢，既可以直接制氢，也可以间接制氢。有太阳和水就能制得氢。难怪太阳能-氢系统受到青睐。生物质能也是可以