

燃料电池的新进展
The New Progress in the Fuel Cell

高培德
(中国科学院上海冶金研究所 上海 200050)

早在 1839 年，英国人 W·Grove 就提出了氢和氧反应可以发电的原理，这就是最早的氢-氧燃料电池(FC)。但直到 20 世纪 60 年代初，由于航天和军事的需要，才开发了液氢和液氧的小型燃料电池，应用于空间飞行和潜水艇。近二三十年来，由于一次能源的匮乏和环境保护的突出，开始转向开发利用新的清洁再生能源。燃料电池由于具有能量转换效率高、对环境污染小等优点而受到世界各国的普遍重视。美国矿物能源部长助理克·西格尔说：“燃料电池技术在 21 世纪上半叶在技术上的冲击影响，会类似于 20 世纪上半叶内燃机所起的作用。”福特汽车公司主管 PINGV 经理鲍伯·默尔称：燃料电池必定给汽车动力带来一场革命，燃料电池是唯一同时兼备无污染、高效率、适用广、无噪声和具有连续工作和积木化的动力装置。预期燃料电池会在军用和民用的电力、汽车、通信等许多领域发挥重要作用。美国 Arthur D. Little 公司最新估计，2000 年

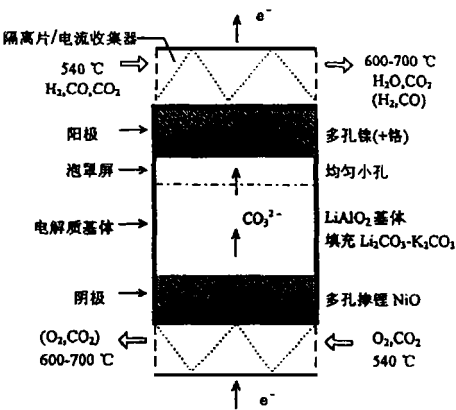


图 1 熔融碳酸盐燃料电池单电池结构示意图

燃料电池在能源系统市场将提供 1 500 ~ 2 000MW 动力，价值超过 30 亿美元，车辆市场将超过 20 亿美元；2007 年燃料电池在运输方面的商业价值将达到 90 亿美元。

表 2 主要研究内容一览表

序号	课题名称	主要研究内容	研究目标
1	利用城市垃圾充填采空区的关键技术研究	充填方法、充填技术、充填工艺、充填设备	解决充填的具体操作办法
2	固体垃圾掩埋中的安全控制及潜在资源回收与废弃地复垦方法、技术研究	充填场地动、静稳定性评价与治理；二恶英等有害物质的污染监测与防治；沼气等潜在资源的回收	解决安全监测手段与分析治理方法，实现潜在资源的有效回收与废弃地的复垦
3	利用城市垃圾充填矿山采空区的经济技术可行性研究与工程示范	技术、经济的分析、评价与对比；小范围的工程示范操作	论证实施两结合综合环境治理及实现绿色希望工程产业化的可行性
4	实施两结合工程的资金筹措与政策法规保障体系研究	资金的筹措方法及效益分析；政策法规体系建议方案及效果预测	完善资金支撑与政策法规保障体系

为使前期的研究工作，有助于技术创新和产业化进程，可按图 1 所示的技术路线实施，这样将更有利于这项绿色希望工程产业化的实现。

我国现有矿山上万座，每年产出各类矿石 50 亿吨以上，而且大都靠近大、中城市，并有铁路专线连通。如果将我国每年采出 50 亿吨矿石后所形成

的采空区中的 5%，用城市垃圾作充填料进行回填处理，每年也可消纳 1 亿吨以上的城市垃圾。促进城市垃圾消纳处理与矿山采空区隐患治理这项两结合、两受益的综合环境治理工程的实施，有助于社会经济的可持续协调发展，是一项具有重大现实意义的绿色工程。这项绿色工程既涉及到具体的充填技术、污染控制和潜在资源的回收问题，也涉及到行政、法律及管理上的一系列问题，是一项复杂的系统工程，困难一定很大，只有加大统筹力度，进行科学管理，协调一致，才有可能落到实处。

主要参考文献

[1] 施阳．北京市垃圾问题的现状及对策．环境科学研究，1998(3)
[2] 张增强等．“垃圾城市”与城市垃圾．科学时报，1999-6-3.
[3] 臧文超．我国城市生活垃圾现状与管理问题．环境保护，1998(8)
(删去 4 篇内部文献)

(责任编辑 肖庆山)

表 1 燃料电池的分类

类型	磷酸盐型燃料电池 (PAFC)	熔融碳酸盐型燃料电池 (MCFC)	固体氧化物型燃料电池 (SOFC)	聚合物离子膜燃料电池 (PEMFC)
燃料	煤气、天然气、甲醇等	煤气、天然气、甲醇等	煤气、天然气、甲醇等	纯 H ₂
电解质	磷酸水溶液	KLiCO ₃ 熔盐	ZrO ₂ - Y ₂ O ₃ (8 YSZ)	离子 (Na ⁺ 离子)
阳极	多孔质石墨 (Pt 催化剂)	多孔质镍 (不要 Pt 催化剂)	Ni - ZrO ₂ 金属陶瓷 (不要 Pt 催化剂)	多孔质石墨或 Ni (Pt 催化剂)
阴极	含 Pt 催化剂 + 多孔 质石墨 + Teflon	多孔 NiO (掺锂)	La x Sr 1 - x Mn (Co) O ₃	多孔质石墨或 Ni (Pt 催化剂)
工作温度	200	650	800 ~ 1 000	100

燃料电池的工作原理和分类、特点和优势

燃料电池发生电化学反应的实质是氢气的燃烧反应。它与一般电池不同之处在于燃料电池的正、负极本身不包含活性物质，只是起催化转换作用。所需燃料 (氢或通过甲烷、天然气、煤气、甲醇、乙醇、汽油等石化燃料或生物能源重整制取) 和氧 (或空气) 不断由外界输入，因此燃料电池是名副其实的把化学能转化为电能的装置。以熔融碳酸盐型燃料电池为例，图 1 为燃料电池的结构示意图。

在燃料电池电极上反应如下：

阳极反应： $H_2 + CO_3^{2-} = H_2O + CO_2 + 2e^-$

阴极反应： $1/2 O_2 + CO_2 + 2e^- = CO_3^{2-}$

总反应： $1/2 O_2 + H_2 = H_2O$

燃料电池有多种分类。按燃料类型可分为直接型、间接型和再生型。按电解质种类又可分为磷酸盐型燃料电池 (PAFC) ——第一代 FC；熔融碳酸盐型燃料电池 (MCFC) ——第二代 FC；固体氧化物型燃料电池 (SOFC) ——第三代 FC。表 1 列出了几种主要类型燃料电池的燃料、电解质、电极和工作温度等基本特点。

近 20 多年来，燃料电池经历了碱式、磷酸、熔融碳酸盐和固体电解质等几种类型的发展阶段。美日等国已相继建立了一些碳酸燃料电池电厂、熔融碳酸盐燃料电池电厂、质子交换膜燃料电池电厂作为示范 (表 2)。

表 2 一些国家的燃料电池电厂

磷酸盐燃料电池电厂	ONSI 公司建设的 200 KW PAFC 电厂
质子交换膜燃料电池电厂	Ballard Generation System 建设的 250 KW PEM 燃料电池电厂 Avista 实验室建造的 7.5W 民用 PEM 燃料电池电厂，它具有 60W 热交换调制 Northwest Power System 建设的 5 KW 民用 PEM 燃料电池电厂 Plug Power 建造的 7 KW 民用 PEM 燃料电池电厂
熔融碳酸盐燃料电池电厂	M - C Power Corporation 建造的熔融碳酸盐燃料电池电厂 Energy Research Corporation 建造的 250 KW 熔融碳酸盐燃料电池电厂 Energy Research Corporation 在加州 Santa Clara 建造的 2MW 熔融碳酸盐燃料电池示范电厂
固体氧化物燃料电池电厂	Siemens Westinghouse 建设的管状固体氧化物燃料电池电厂

燃料电池电厂所以具有如此大的吸引力，是因为它与传统的火力发电、水力发电或核能发电相比，具有无可比拟的特点和优势。

1. 能量转换效率高 燃料电池能量转换效率比热机和发电机能量转换效率高得多。目前汽轮机或柴油机的效率最大值为 40 ~ 50 %，当用热机带动发电机时，其效率仅为 35 ~ 40 %，而燃料电池可达 60 ~ 70 %，其理论能量转换效率可达 90 %。其他物理电池，如温差电池效率为 10 %，太阳能电池效率为 20 %，均无法与燃料电池相比。

2. 污染小、噪声低 燃料电池作为大、中型发电装置使用时其突出的优点是减少污染排放 (表 3)。对于氢燃料电池而言，发电后的产物只有水，可实现零污染。另外，由于燃料电池无热机活塞引擎等机械传动部分，故操作环境无噪声污染。

表 3 燃料电池与火力发电的大气污染比较

单位： $kg \cdot 10^{-6} (KWh)^{-1}$

污染成分	天然气火力发电	重油火力发电	煤火力发电	燃料电池
SO ₂	2.5 ~ 230	4 550	8 200	0 ~ 0.12
NO _x	1 800	3 200	3 200	63 ~ 107
烃类	20 ~ 1 270	135 ~ 5 000	30 ~ 10 ⁴	14 ~ 102
尘末	0 ~ 90	45 ~ 320	365 ~ 680	0 ~ 0.14

3. 高度可靠性 燃料电池发电装置由单个电池堆叠至所需规模的电池组构成。由于这种电池组是模块结构，因而维修十分方便。另外，当燃料电池的负载有变动时，它会很快响应，故无论处于额定功率以上过载运行或低于额定功率运行，它都能承受且效率变化不大。这种优良性能使燃料电池在用电高峰时可作为调节的储能电池使用。

4. 比能量或比功率高

5. 适用能力强 燃料电池可以使用多种多样的初级燃料，如天然气、煤气、甲醇、乙醇、汽油；也可使用发电厂不宜使用的低质燃料，如褐煤、废木、废纸，甚至城市垃圾，但需经专门装置对它们重整制取。

虽然燃料电池有上述种种优点，然而由于技术问题，至今一切已有的燃料电池均还没有达到大规模民用商业化程度。为此，美、日等国相继拨出巨资来发展燃料电池。

燃料电池开发现状与发展趋势

在燃料电池研究开发方面,美国、日本和德国处于世界领先地位。美国早在1967年就制定了TARGET和FCG1燃料电池研究发展计划。近年美国能源部对燃料电池研究资助每年均在2000万美元以上。日本在1981年制定了“月光计划”,进行燃料电池研究。1989年欧洲燃料电池集团成立。

在所有燃料电池中,磷酸盐型燃料电池(PAFC)由于磷酸易得,反应温和,成为发展最快、研究最成熟的一种燃料电池。1977年美国通用公司首先建成兆瓦级PAFC发电站。1991年日本电力公司在东京湾兴建的1MW PAFC发电站也已投入运行。目前美国已有少量销售,其商品化阶段已经开始。

熔融碳酸盐型燃料电池(MCFC)正处于10-20KW向兆瓦级发展阶段。1994年12月美国已建成迄今功率最大的250KW MCFC电站。日本1989年已完成25KW的MCFC试验,按其“新阳光计划”,1MW的MCFC中间试验电厂现正在实施中。

聚合物电解质燃料电池(PEMFC)不仅是人造卫星上可靠、低成本的动力源,还可作为陆地上市区交通车辆和水下潜艇的动力源。1996年美国能源合作公司推出实验型的由三块薄膜组成的以1.5KW PEMFC为动力的“绿色轿车”。德国奔驰公司在前两年开发出NECAR 存储式燃料电池驱动电车(燃料电池产生的电能为250KW,一次行程为250公里),并在慕尼黑、斯图加特市作为试行公共电车之后,在1998年8月又作为世界首创,开发出NECAR

燃料电池驱动电车。它用质子交换膜(PEM)燃料电池为动力,以甲醇为原料,通过车辆后部的反应器产生氢气,再以氢和空气中氧反应产生电能来驱动,当踩下脚踏板后,在不到2秒的时间内动力系统的能量将达到90%,其最大行程为400公里,预期2004年投放市场。最近,Daimler Chrysler设计的燃料电池和电池混合引擎轿车NECAR 4由于具有零污染、宽阔的操作范围和良好的驾驶特性等最佳设计而获得北美“1999国际引擎年奖”。新近美国Ballard Power System开发的第二代燃料电池公共客车已在芝加哥运行。美国至今已开发的具有代表性的运输用的燃料电池公共客车、轿车已达30多种。

第三代固体燃料电池SOFC正在积极研制开发中,1991年6月美国能源部和威斯汀豪斯公司投资1.4亿美元加速固体燃料电池的商业化。目前美西屋公司处于SOFC领先地位,它们所制造的一个由576个管式SOFC组成的25KW发电系统已创下13000多小时运行的世界记录。其下一步计划是建立100KW的SOFC热电联产系统交付荷兰/丹麦电力公司使用。目前美国已有5KW的SOFC产品出售。一些公司还

打算把SOFC和储氢合金结合起来,用于开发汽车用燃料电池。

近年因环境保护要求而新兴起来的生物电池,可用生物原料(包括林场杂木、稻草、麦杆、玉米杆、青草、草垃圾、含能源的植物、动物粪便等)生产电能。即将生物原料通过反应器转换成燃烧气体(主要是 H_2 、CO、 CH_4),经加工处理后作为燃料电池的原料用于建立分散电站,供家庭或城市用电;也可转换成 H_2 ,用于电动汽车。据《Modder Power System》报道,一个以垃圾场生产的燃料气体为燃料的燃料电池厂正在美国康涅狄格州格罗顿镇运行,它生产国际燃料电池公司的200KW磷酸燃料电池。该电池厂装有燃气洁净系统,使垃圾场的燃气在进入燃料电池堆之前已被去除掉其中的氯化物、硫化物和其它污染物。目前德国巴伐利亚州的Bad Bruckenan正在建造一个生物能源—氢气工程。

燃料电池中另一亮点是细菌电池。其基本原理是通过细菌发酵,把酸或糖类转化为氢气,再将氢导入磷酸燃料电池后发电。美国1984年设计出一种供遨游太空用的细菌电池,原料是宇航员的尿液和活细菌。日本也研制过用特制糖浆作原料的细菌电池。

燃料电池今后的发展方向除了电动车辆(包括工交车辆、拖拉机、叉式装卸机、高尔夫车和军事车辆等)和热电站外,另一方向是使燃料电池小型化。用燃料电池替代普通电池,在膝上电脑、便携式电子器件等方面的应用,见表4。据《科学美国人》报道,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室罗伯特·G·霍克最近研制成功微型燃料电池,其电池尺寸和价格可与传统的镍镉电池相比,重量仅为镍镉电池的一半,但供电能力为镍镉电池的50倍。预期这种微型燃料电池用于移动电话,可连续待机40天,而仅消耗不到2盎司的甲醇。霍克目前正把微电子技术引入微型燃料电池制作中,准备制作25 μ m厚的微型电池。另外,还有把燃料电池用于电子广告牌和电动自行车的报道。

表4 燃料电池替代普通小电池在膝上电脑、便携式电子器件等方面的应用

便携式燃料电池	Warsitz制作的便携式燃料电池电源
替代电池用的燃料电池	Ballard的燃料电池膝上电脑
	An H Power燃料电池电源公司提供的美国新泽西州高速公路广告牌
	An H Power燃料电池电源公司提供的职业电视摄像机
	Fraunise ISE发展的蜂窝电话用微型燃料电池
教学用燃料电池	美国木醇研究所提供的教学用木醇燃料电池
	Ecosoul提供的再生燃料电池教学用具 H-Tec提供的教学用太阳能-氢燃料电池

(下转第64页)

众理解科学有关。有舆论认为,对科学家的研究资助来自纳税人,因此科学家有义务、有责任让公众了解他们用这些钱做了什么。其次,在很多国家,政府为平衡预算而削减科研经费的事屡有发生,这也促使科学团体号召科学家们为其研究工作更多地呼吁呐喊。美国国家科学基金会前任主任尼尔·莱恩就在多种场合敦促研究人员成为大力宣传其研究工作的“市民科学家”。再者,科技的加速发展以及科技知识的日益深化,使得以往那种单纯依靠科普组织及专业科普工作者搞科普的方式越来越困难,科普越来越需要第一线研究人员的直接参与。

在鼓励科学家搞科普方面,国家自然科学基金委具有人、财、物的综合、独特优势。例如,美国科学基金会为鼓励受其各研究局资助的研究人员进行相关的科普活动,设立了“研究经费追加科普拨款”制度。凡是获得该基金会资助的研究课题负责人,如有兴趣开展相关的科普工作,可向 NSF 项目主管递交申请,申请者可获得 3~5 万美元的科普追加拨款。美国科学基金会每年向 30 个项目提供这种科普追加拨款。科普成就突出的科学家,还有望获得美国科学基金会面向全国设立的“公共服务奖”。

单就帮助科学家搞科普而言,英国七大研究理事会做得比美国国家科学基金会更扎实、更富有成效。除向热心搞科普的科学家提供资金支持外,他们还免费为科学家提供科普技能培训,努力帮助科学家与中小学校建立对口联系,派研究人员到中小学校与教师和学生一道开展科技活动等。

在我国,目前很难见到科学家搞科普。国家自然科学基金委应充分利用其人、财、物上的综合优势,发挥其在这方面的作用。美国和英国的做法就值得借鉴。

四、提高科普计划的管理与运作水平

科普计划的资助成效不仅取决于资金投入的多寡,同时更有赖于计划的管理与运作水平。美国科学基金会的非正规科学教育计划实施已有很多年,在管理和运作上积累了很多成功经验。限于篇幅,这里只讲三点。

第一点是费用分担原则。美国科学基金会认为,对科普的资助,基金会应起催化剂的作用,为

(上接第 59 页)

我国早在 50 年代就开展燃料电池方面的研究。中国科学院长春应用化学研究所、大连化学物理所和天津电子部十八所是我国开展燃料电池研究最早的一批单位。70 年代曾兴起第一次研究高潮,研究对象主要为航天用碱性电池。中间停顿约 15 年。90 年代初又掀起了第二次热潮。这阶段研究的品种较多,长春应用化学研究所、清华大学、复

旦大学等单位开展了 PEMFC 的研究,大连化物所、长春应化所、上海交大等开展了 MCFC 的研究,上海硅酸盐所、北京化工冶金所、中科大、清华大学等开展了 SOFC 研究,大连化物所还开展了生物电池的研究。但总体来说,我国燃料电池研究与国外水平和实际应用均有相当大的距离,必须加快追赶的步伐。

第二点是要严把科普项目质量关。计划执行的好坏依赖计划所资助的项目的质量。美国科学基金会对科普项目同样采用同行评议的审批方法。为确保项目的质量,该基金会采用了一套严格的科普项目评审体系,对项目要开展的活动、标识、出版物、展品等逐项进行评估。美国科学基金会还要求项目执行机构成立顾问委员会和技术委员会,鼓励执行机构自己对项目进行评估,特别是总结性评估。这些措施有力地保证了基金会科普项目的高质量和高成功率。

第三点是重视合作。国家层次的科普工作是一项社会系统工程,需要调动科普组织、正规科学教育机构(大中小学)、研究机构、工商企业等各方力量,才能共同把这项事业引向深入。美国科学基金会始终积极倡导在科普工作中建立合作伙伴关系。该基金会举办的全国科技周就是一个突出的例子,众多的伙伴参与了科技周的设计、落实、协调和评价。为办好一年一度的科技周,该基金会建立了“科技周网络”,其成员组织已有 40 个,分布在全国各地,常年活动,一些大公司、协会和学术团体成为科技周的主要赞助商。

我国科普机构长期各自为政,造成科普工作在同一水平上的重复,因此,“合作”这两个字对我国的科普工作具有重要意义,不仅科普机构之间需要加强合作,科普机构和正规教育机构、研究所、工商企业间今后也应加强合作。

在新的世纪,科学社会化、社会科学化的趋势将越发明显。自然科学基金委作为国家层次最高、规模最大的科学资助机构,应顺应这一变化,树立传播科学精神与生产科学知识同样重要的观念,以开阔的视野、创新的精神,更积极地推动我国科普事业的发展。
(责任编辑 王宏章)

旦大学等单位开展了 PEMFC 的研究,大连化物所、长春应化所、上海交大等开展了 MCFC 的研究,上海硅酸盐所、北京化工冶金所、中科大、清华大学等开展了 SOFC 研究,大连化物所还开展了生物电池的研究。但总体来说,我国燃料电池研究与国外水平和实际应用均有相当大的距离,必须加快追赶的步伐。
(责任编辑 王宏章)