

燃料电池的应用和发展现状

杨润红，陈允轩，陈庚，陈梅倩，李国岫

(北京交通大学，北京100044)

摘要：能源和环境是全人类面临的重要课题，考虑可持续发展的要求，燃料电池技术正引起能源工作者的极大关注。主要在介绍燃料电池的工作原理、发展简史、分类及特性的基础上，详细分析和论述了燃料电池的应用和研发现状，并对其发展前景作了展望。

1839年，英国的William

Grove首次发现了水解过程逆反应的发电现象^[1]，燃料电池的概念从此开始。100多年后，英国人Francis T.Bacon使燃料电池走出实验室，应用于人们的生产活动^[2]

。20世纪60年代，燃料电池成功应用于航天

飞行器并逐步发展到地面应用^[3]

。今天，随着社会经济的飞速发展，随之而来的不仅是人类文明的进步，更有能源危机，生态恶化。寻求高效、清洁的替代能源成为摆在全人类面前的重要课题。继火力发电、原子能发电之后，燃料电池发电技术以其效率高、排放少、质量轻、无污染，燃料多样化等优点，正进一步引起世界各国的关注。

1 燃料电池的工作原理

人们常用的普通电池有碱性干电池、铅酸蓄电池、镍氢电池和锂离子电池等。燃料电池和普通电池相比，既有相似，又有很大的差异。它们有着相似的发电原理，在结构上都具有电解质，电极和正负极连接端子。二者的不同之处在于，燃料电池不是一个储存电能的装置，实际上是一种发电装置，它所需的化学燃料也不储存于电池内部，而是从外部供应。在燃料电池中，反应物燃料及氧化剂可以源源不断地供给电极，只要使电极在电解质中处于分隔状态，那么反应产物可同时连续不断地从电池排出，同时相应连续不断地输出电能和热能，这便利了燃料的补充，从而电池可以长时间甚至不间断地工作。人们之所以称它为燃料电池，只是由于在结构形式上与电池有某种类似：外特性像电池，随负荷的增加，它的输出电压下降^[4]。

燃料电池实际上是一个化学反应器^[5]

，它把燃料同氧化剂反应的化学能直接转化为电能。它没有传统发电装置上的原动机驱动发电装置，也没有直接的燃烧过程。燃料和氧化剂从外部不断输入，它就能不断地输出电能。它的反应物通常是氢和氧等燃料，它的副产品一般是无害的水和二氧化碳。燃料电池的工作不只靠电池本身，还需要燃料和氧化剂供应及反应产物排放等子系统与电池堆一起构成完整的燃料电池系统。燃料电池可以使用多种燃料，包括氢气、碳、一氧化碳以及比较轻的碳氢化合物，氧化剂通常使用纯氧或空气。它的基本原理相当于电解反应的逆向反应，即水的合成反应。燃料及氧化剂在电池的阴极和阳极上借助催化剂的作用，电离成离子，由于离子能够通过两电极中间的电解质在电极间迁移，在阴电极、阳电极间形成电压。当电极同外部负载构成回路时，就可向外供电(发电)。图1是燃料电池的工作原理图^[6]。

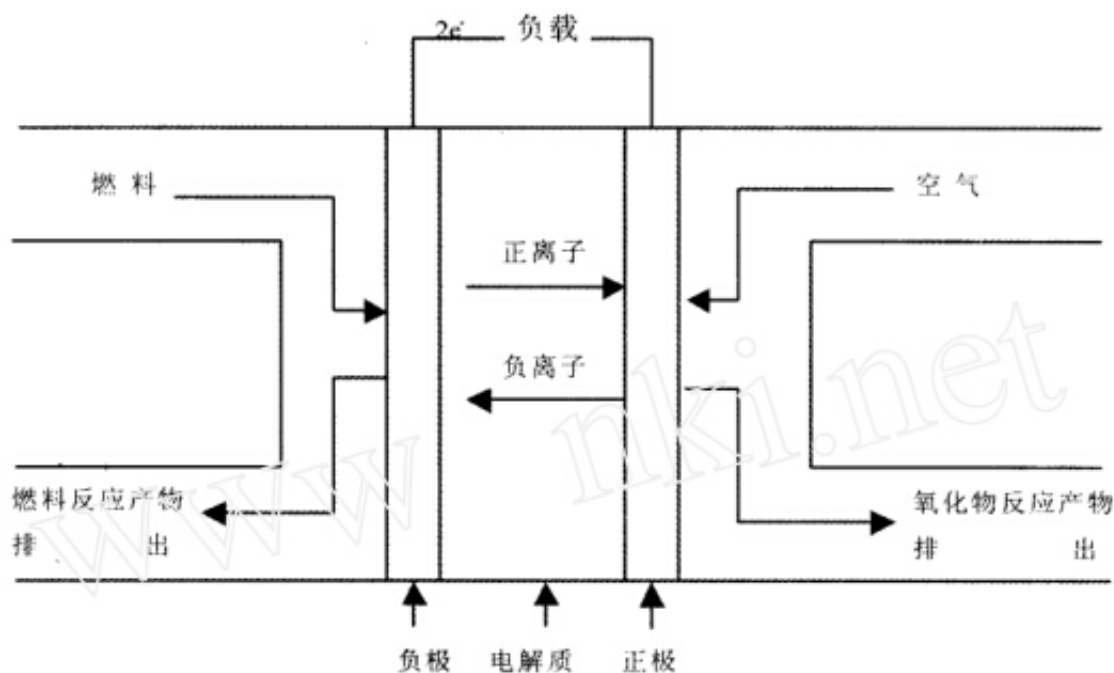


图1 燃料电池工作原理图

2 燃料电池的发展简史、分类及各自特性

1839年, William Grove提出了氢和氧反应可以发电的原理, 并发明了第一个燃料电池。他把封有铂电极的玻璃管浸入稀硫酸中, 电解产生氢和氧, 连接外部装置, 氢和氧就发生电池反应, 产生电流。

1896年, W.W.Jacques提出了用煤作为燃料电池的燃料, 但由于无法解决环境污染的问题, 没有取得满意的效果。

1897年, W.Nernst用氧化钇和氧化锆的混合物作为电解质, 制作成了固体氧化物燃料电池。

1900年, E.Baur研究小组发明了熔融碳酸盐型燃料电池(MCFC)。此后, I.Taitelbaum等人就此进行了一些拓展性的研究。

1902年, J.H.Reid等人先后开始研究碱质型燃料电池(AFC)。

1906年, F.Haber等人用一个两面覆盖铂或金的玻璃圆片作为电解质, 与供气的管子相连, 做出了固体聚合物燃料电池(SPEC)的雏形。

1952年, 英国学者F.T.Bacon在借鉴前人研究经验的基础上研制出具有实用性的培根电池并获得专利。它的研制思路是避免采用贵金属并设法获得尽可能高的输出功率。采用双层孔径烧结镍做电极, 氢氧化钾水溶液做电解质, 以纯氢和纯氧为燃料及氧化剂。副产物是纯水。培根电池是燃料电池由实验走向实用具有里程碑性质的燃料电池^[7]。

20世纪60年代以来, 燃料电池进入了广泛的实用性开发阶段。按所使用的电解质的不同, 燃料电池通常可以分为以下几种[8]:

2.1 碱性燃料电池(alkaline fuel cell简称AFC)

这种电池是以氢氧化钾或氢氧化钠等碱性溶液为电解质, 电解液渗透于多孔而惰性的基质隔膜材料中, 导电离子为 OH^- , 使用的电催化剂主要是贵金属(如铂、钯、金、银等)和过渡金属(如镍、钴、锰等)或者由它们组成的合金。电池的工作温度一般在60 ~ 90 范围。它设计简单, 但不耐 CO_2 , 所以原则上它必须采用纯氢和纯氧做为燃料。

2.2 磷酸盐燃料电池(phosphoric acid fuel cell简称PAFC)

这种电池一般以Pt/C为电极基材，电解质为吸附于SiC上的85%的磷酸溶液，工作温度范围在150 ~ 200 °C，其主要优点是产生热量高，产生CO的量少。缺点是电导率较低且有漏液问题。

2.3质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell简称PEMFC)

这种电池以磺酸型质子交换膜为固体电解质，无电解质腐蚀问题，能量转换效率高，无污染，室温下快速启动。

2.4熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell简称MCFC)

该型电池采用多孔Ni/Al/Cr作阳极，NiO为阴极， $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$ 为电解质，并加入 LiAlO_2 做稳定剂。MCFC型燃料电池由于反应温度高，正常工作温度在650 °C左右，电解质成熔融态，电荷移动很快，在阴阳电极处电化学反应快，因此可不用昂贵的贵金属作催化剂；对燃料适应广，可直接使用天然气或煤气作为燃料使用，降低了投资；可同汽轮发电机组组成联合循环，进一步提高发电效率。其优点是高效，耐CO。主要缺点是启动时间长。

2.5固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell简称SOFC)

固体氧化物燃料电池，又称高温燃料电池，电解质采用 $\text{ZrO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3$ ，阳极为 $\text{Ni}+\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ ，阴极为 La/SrMnO_3 。电解质允许氧离子自由通过，而不允许氢离子和电子通过。其电子导电性很差，低温时比电阻很大，因此，工作温度要维持在800 ~ 1000 °C才能有较高的发电效率。从而要求采用高温密封材料。其优点是高效，耐CO，可以不用贵金属催化剂。缺点是启动时间长，工作温度高，带来材料耐高温，耐腐蚀问题。

还有一种分类方法是按电池工作温度对电池进行分类^[9]

，可分为：低温燃料电池(工作温度一般低于100 °C)，它包括碱性燃料电池和质子交换膜燃料电池；中温燃料电池(工作温度一般在100 ~ 300 °C)，它包括培根型碱性燃料电池和磷酸型燃料电池；高温燃料电池(工作温度在600 ~ 1000 °C)，它包括熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池。表1是各种类型燃料电池的结构特性^[10-13]。

表1 各种类型燃料电池结构特性

类 型	AFC	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
适用燃料	纯 H_2	H_2 和 CO	H_2	H_2 和 CO	H_2 和 CO
氧化剂	纯 O_2	空气	空气	空气	空气
阳极材料	Pt/ Ni	Pt/ C	Pt/ C	Ni/ Al/ Cr	Ni/ ZrO_2
阴极材料	Pt/ Ag	Pt/ C	Pt/ C	Li/ NiO	Sr/ LaMnO_3
结构型式	单极或双极	双极	单极或双极	单极或双极	双极
外壳材料	聚合物	石墨	石墨	聚合物	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
电解质	$\text{NaOH}(\text{KOH})$ 溶液	H_3PO_4	质子可渗透膜	$\text{Li}_2/\text{Na}_2\text{CO}_3$	YSZ
催化剂	铂系金属	铂系金属	铂系金属	无	无
正极反应	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
负极反应	$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$1/2\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
导电离子	OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
工作温度/ °C	60~90	150~200	85~100	约 650	800~1 000
腐蚀性	强	强	无	强	弱
发电效率/ %	60~65	约 40	45~50	45~60	约 50
应用领域	航天、特殊地面	局部独立供电、供热	航天、潜艇、电动汽车、移动电源	大规模发电	洁净电站大规模发电

3应用及国内外研发现状^[14-20]

3.1AFC

在已开发的燃料电池中碱性燃料电池是最早获得实际应用的。美国的阿波罗登月飞船和航天飞机等轨道飞行器都采用这类燃料电池作为搭载电源，实际飞行结果表明电池系统具有很高的可靠性。20世纪80年代中期以后，随着一些新材料的应用及工艺的不断改进，碱性氢氧燃料电池的性能得到完善，比如工作温度、工作压力、电流密度提高，比质量(单位功率的质量)显著减小等。

碱性氢氧燃料电池除成功应用于空间技术外，也进行了其他用途的开发。美国UTC公司曾试制过60kW、80kW的深水探查船用电源及30kW深海潜水救助艇用的电源，德国西门子公司曾试制过100kW的潜水艇动力电源，但都在样机试用以后终止开发，未投入正式使用。比利时Elenco公司及美国UCC公司也都进行过将碱性氢空气燃料电池用于电动车动力电源的开发，日本的富士电机公司曾在月光计划资助下开发过kW级的应急用碱性燃料电池。目前，此类燃料电池技术的发展已非常成熟并已经在航天飞行及潜艇中成功应用。国内已研制出200W氨-空气的碱性燃料电池系统，制成了1kW，10kW，20kW的碱性燃料电池。

碱性燃料电池在地面应用的

最大缺点是对燃料纯度要求太高而且不能使用含C、CO₂

及CO的燃料气，使用空气也必须脱除空气中的CO₂，从而限制了这类电池在地面上的应用。

3.2PAFC

该型电池技术成熟，目前这类电池在城市发电，供气及其他工业项目上广为试用。如在宾馆、医院、办公楼、工厂等地方用PAFC来进行辅助供电、供热。还有一种采用生物气体的PAFC体系已被开发出来，而在废弃物质的处理方面，含有甲烷的沼气或其他有机气体已经被利用。大规模利用生物沼气的PAFC可望在将来应用于垃圾回收领域，解决一大社会难题。

美国是最早发展PAFC电站技术的国家，而日本是PAFC电站技术发展最快的国家，PAFC在日本已进入产业化阶段。日本是开发燃料电池积极而热情的国家，近年来成果尤为显著，特别是在PAFC商业化方面已与美国并驾齐驱。目前，日本的制造商在电力公司，煤气公司的通力合作之下，已经可以生产50kW，100kW，200kW，1000kW，5000kW，11MW等各种规格的PAFC电站。英国、德国、荷兰、比利时、意大利、丹麦、瑞典、芬兰等9个国家22家公司于1989年9月11日成立的欧洲燃料电源集团(EFCG)也与美国和日本的公司在这一领域展开竞争。事实上，到目前为止，美日两国的公司已经销售了数以百计的磷酸型燃料电池，正在试验的则为数更多，可以说，PAFC的基础研究工作已经结束。商品化阶段已经开始，正在向工业化迈进。

3.3PEMFC

质子交换膜燃料电池以氟磺酸型或非氟磺酸型质子交换膜为固体电解质，能量转换效率高，无污染，可在室温下快速启动，特别适合用做动力电源。美国通用电器公司在20世纪60年代就将PEMFC电池用于双子星座航天飞机。

它又是电动车的最佳驱动电源，受到美国、德国、加拿大和日本等发达国家政府及国际汽车业巨头如德国奔驰公司和美国通用汽车公司等企业的支持，发展势头非常强劲。1993年，加拿大Ballard公司研制出世界上第一辆燃料电池公共汽车。1999年，美国福特汽车公司和日本丰田汽车公司分别研制出质子交换膜燃料电池电动汽车。汽车工业的介入是推动PEMFC快速发展的最主要的动力。

总部位于加拿大温哥华的Ballard Power System公司被公认为是世界开发、生产和营销零排放质子交换膜(PEM)燃料电池的领先者。国内从事PEMFC研究的单位主要有中科院大连物理化学研究所，北京世纪富源公司，北京绿能公司，上海神力公司等。目前，我国已具备研制50kW以上，可用于电动汽车的燃料电池动力模块的能力。

PEMFC的研究涉及到电化学、机械设计、物理学、计算机模拟等各个方面。目前制约PEMFC发展的问题有很多，主要是解决催化剂的中毒问题和提高其活性，保证电解质膜的成型能力及机械强度以及密封的问题。目前国内有很多单位都在对催化剂做大量的研究工作并取得了显著成果。如华南理工大学的廖世军采用Si-Mo酸共沉积制备催化剂，所得催化剂比E-TEK公司的催化活性要高，用他们自己制备的催化剂组装的DMFC的电压为0.38V，电流大约在几十个mA。北京有色金属研究总院的张向军等采用浸渍还原法，进行浸渍—还原—干燥的步骤，改变了C的表面官能团从而得到了高担载量高分散性的PVC催化剂，有效减少了催化剂用量，优化了催化剂层的结构，降低了催化剂的制备成本。北京交通大学的朱红等采用原位还原法制得了PVC催化剂。

3.4 MCFC

美国是从事熔融碳酸盐燃料电池最早和技术高度发展的国家之一,美国对熔融碳酸盐电池的开发重点在大容量的MW级机组的开发,从事熔融碳酸盐燃料电池研究和开发的主要单位为煤气技术研究所(IGT),该所已于1987年组建了M—C动力公司和能量研究所(ERC),这两个单位现在均具有熔融碳酸盐燃料电池电站的生产能力。日本从1981年开始研究发展熔融碳酸盐燃料电池技术,在完成1kW, 10kW, 30kW和100kW熔融碳酸盐燃料电池系统的试验后,于1988年由23家公司成立了熔融碳酸盐燃料电池研究协会,目的是发展1000kW的熔融碳酸盐燃料电池分散电站。1993年,大连化物所所长基金资助10万元开展了MCFC研究,1994年中科院将MCFC列为院重点项目,投资50万元加以支持,目前大连化物所已完成LiAlO₂隔膜材料的制备,小电池设计及评价装置的建立。单电池性能已达到日本20世纪80年代中期水平、正准备开展百W级MCFC装置的研制。

研究表明,成本和寿命是影响MCFC的主要障碍,阴极溶解、阳极蠕变、高温腐蚀和电解质损失是主要影响因素。因此,研制新的电极材料,改进密封技术将是今后一段时期的研究关键。

3.5 SOFC

美国对SOFC的研究处于世界领先地位,2001年8月更又投资5亿美元进行SOFC的研制开发。目前美国国内进行该项目的单位主要有西屋动力公司,霍尼韦尔公司,Delphi自动系统公司等几家。作为日本“月光计划”的一部分,日本国内的三菱重工业公司在这一方面发展迅速,计划2010年将SOFC推入实用化水平。国内SOFC的主要研制单位有大连化物所,中科院上海硅酸盐研究所,吉林大学,中国科技大学,中科院北京化冶所等单位。目前我国已具备了研制数kW级SOFC发电系统的能力。

SOFC在高温下工作也给其带来一系列材料、密封和结构上的问题,如电极的烧结,电解质与电极之间的界面化学扩散以及热膨胀系数不同的材料之间的匹配和双极板材料的稳定性等,这些也在一定程度上制约着SOFC的发展,成为其技术突破的关键方面。

总的来说,美国、日本、加拿大以及一些欧洲国家介入燃料电池的研发较多,特别是美国和日本是研究投入较多的国家,开发应用也处于世界前列。对燃料电池的研究,我国也投入了相当大的人力物力。在燃料电池的基本理论研究方面,我们与世界先进国家的差距不太大,但在结构优化、材料应用,关键部件的设计与生产方面有一定差距。

1997年,国家科委批准将“燃料电池技术”列为国家“九五”计划中重大科技攻关项目之一。1999年国家电力总公司成立了燃料电池课题组,并于1999年3月召开了中国燃料电池电站技术路线研讨会。在国家自然科学基金会、“863”计划和国家科委等的支持下,国内参与燃料电池研究的单位主要集中在中科院系统和大学。中科院上海硅酸盐研究所、上海冶金研究所、长春应用化学研究所和大连化学物理研究所,清华大学、上海交通大学、北京科技大学和华南理工大学等从事了MCFC、SOFC和PEMFC燃料电池的基础性研究。中科院大连化学物理研究所对质子交换膜燃料电池进行了详尽的研究,并开发出多种功率等级的PEMFC。近年来,随着研究机构和经费投入的不断增加,我国对燃料电池催化剂的研究取得了可喜的成果,从事质子交换膜燃料电池原材料及半成品制造的公司开始出现,相信我国的燃料电池研究将出现一个崭新的局面。

4 燃料电池的应用前景展望

随着人类能源和生存环境的问题日益严峻,积极发展高效无污染的能源成为日益迫切的课题,燃料电池作为21世纪的绿色能源,它的高效无污染的突出优点是其它发电方式所无法比拟的^[21-23]:

- 1)污染小:火电站排出烟气、汽车排出尾气中的SO₂和NO_x等污染物污染了环境,更直接危害人的身体健康。以氢氧燃料电池为例,它的反应产物是水,与传统的火力发电相比较,它减少了粉煤灰造成的大气污染;同时,由于它自身不需要用水冷却,可以减少传统发电带来的废热污染;
- 2)噪音低:燃料电池发电时噪声很小,实验表明,距离40kW磷酸燃料电池电站4.6m的噪声水平是60dB,而4.5MW和11MW的大功率磷酸燃料电池电站的噪声水平已经达到不高于55dB的水平;
- 3)系统负荷变动的适应能力强:火力发电的调峰问题一直是个难题,发电出力的变动率最大为5%,且调节范围窄。而燃料电池发电出力变动率可达每分钟66%,对负荷的应答速度快,启停时间很短。另外,燃料电池即使负荷频繁变化,电池的能量转化效率也并无大的变化,运行得相当平稳。

4)燃料来源广：燃料电池可以使用多种多样的初级燃料，包括火力发电厂不宜使用的低质燃料。作为燃料电池燃料来源的不仅可以是可燃气体，还可以是燃料油和煤。煤炭是我国的主要能源，煤炭的利用存在着污染大、效率低、资源不能充分合理利用的紧迫问题。通过煤制气的方式为燃料电池提供原料气而得到电能，是解决上述问题的有效手段。

5)易于建设：燃料电池具有组装式结构，不需要很多辅机和设施。由于电池的输出功率由单电池性能、电池面积和单电池数目决定，因而燃料电池电站的设计和制造也是相当方便的。

6)能量转化效率高：伴随着工业化的进程，全世界对能源的需求量也日益增加。目前，绝大多数的能量需求要通过消耗大量的化石燃料来满足，在传统的能源利用方式中，储存于燃料中的化学能必须转变成热能后才能被转变成机械能或电能，受卡诺循环及材料性能的限制，在机端所获得效率只有33%~35%。而燃料电池是直接把化学能转变为电能，不经过热机过程，不受卡诺循环的限制，因而转化效率特高。目前，汽轮机或柴油机的效率最大值仅为40%~50%。当用热机带动发电机发电时，其效率仅为35%~40%；而燃料电池理论上能量转化率在90%以上，在实际应用中，其综合利用效率亦可达70%以上。

燃料电池良好的环境特性使其应用前景非常广阔：军事、高可靠性的后备电源、分散式发电装置和未来的汽车动力电源等市场。不同种类的燃料电池有着不同的适用范围和发展前景。例如：PEFC因其启动快，无泄漏的突出优点，可望在家庭供电、供热和电动车电源方面得到广泛的应用；MCFC和SOFC适合中大容量发电装置，并有可能同燃气轮机发电装置或汽轮机发电装置组成高效发电装置。

尽管燃料电池的市场前景十分诱人，但是仍有一些目前尚未解决的不利因素制约着它的产业化和商业化进程。如原材料成本、电极组装工艺、燃料的贮存和运输等。

5结束语

今天，全人类都面临着能源、环保、交通问题的困扰，对燃料电池的开发研究以及商业化是解决世界节能环保的重要手段，因此，世界各国都投入巨大的人力物力到这项工作中来。我们国家也要进一步加大资金投入，支持基础与应用研究，发展我国的燃料电池工业，赶超世界先进水平。相信随着科技的飞速发展和能源工作者的极大关注，随着人们对新材料，新技术，如贮氢，催化，质子交换膜等方面的深入研究，逐步消除制约其产业化和商业化的不利因素，燃料电池技术一定能为人类可持续发展，提高燃料利用效率，改善人类生存环境做出显著的贡献。

参考文献：

- [1]Grove W R.On voltaic series and the combination of gas-es by platinum[J].Phil Mag, 1839(14) : 127-130.
- [2]孟黎青.燃料电池的历史和现状[J].电力学报, 2002, 17(2).
- [3]FEDUSKA W.Laenberg[J].J.Power Sources, 1983, 10(1) : 89.
- [4]吴 忻.燃料电池及其发展概况[J].动力工程, 2001, 21(2) : 1 172-1 175.
- [5]曹云萍.燃料电池发展概况[J].化工时刊, 2002(12).
- [6]陈彬剑, 方肇洪.燃料电池技术的发展现状[J].节能与环保, 2004(8).
- [7]储海虹, 屠一锋, 曹 洋.燃料电池的研究现状[J].电池工业, 2003, 8(5) : 229-237.
- [8]李 杨, 魏敦松, 潘卫国.燃料电池发展现状与应用前景[J].能源技术, 2001, 22(4) : 158-160.
- [9]祁生鲁.应用电化学[M].武汉：华中理工大学出版社, 1994.
- [10]衣宝廉.燃料电池现状与未来[J].能源杂志, 1998, 22(5) : 216-230.
- [11]吴承伟, 张 伟.国外燃料电池研究动向[J].能源工程, 2003(2) : 2-5.

- [12]贺 华，赵景联.燃料电池的开发现状及其发展前景[J].石化技术与应用，2001，19(3)：205-208.
- [13]Appleby A J，Foulkes F R.Fuel Cell Handbook[M].New york：Van Nostrand Reinhold，1989.
- [14]张胜涛，温 彦.燃料电池发展及其应用[J].世界科技研究与发展，2003，25(3)：60-64.
- [15]朱新坚.中国燃料电池技术现状与展望[J].电池，2004，34(3).
- [16]隋 静，黄红良，陈红雨.我国燃料电池的研发现状[J].电源技术，2004，28(2).
- [17]刘建国，孙公权.燃料电池概述[J].物理学与新能源材料专题，2004(2).
- [18]熊一权.燃料电池的开发概况及发展前景[J].节能，2002(11).
- [19]毕道治.中国燃料电池的发展[J].电源技术，2000(2).
- [20]彭茂公.燃料电池研究开发的现状与必要性[J].能源研究与信息，2002，16(3).
- [21]Baentsch F.Liberalization challenges and opportunities for fuel cells[J].Power Sources，2000(86)：84-89.
- [22]衣宝廉.燃料电池的原理、技术状态与展望[J].电池工业，2003，8(1)：16-22.
- [23]邹学权，刘 毅，武建军.新世纪的清洁能源——燃料电池[J].江苏环境科技，2003，16(1)：40-42.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/96903.html>