从文献统计看世界车用燃料电池研发的生态与演变: 主要国家研发布局对比与启示

张剑波^①, 葛昊^①, 王诚^{②*}

① 清华大学汽车工程系, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084;

② 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

* 联系人, E-mail: wangcheng@tsinghua.edu.cn

2014-01-24 收稿, 2014-02-27 接受, 2014-07-18 网络版发表

中国科学院“百人计划”(2006-067)和国家自然科学基金(40872168)资助

摘要 经过近 10 年的快速发展, 车用燃料电池的性能、寿命和成本在国际上已经取得了突破性进展, 新一轮的燃料电池汽车产业化浪潮正在逼近. 为鸟瞰全球车用燃料电池研发布局, 梳理技术发展脉络, 掌握科技创新的新动向, 本文通过对车用燃料电池文献的检索与统计, 详细分析了世界车用燃料电池论文与专利的数量与质量、研发重点领域与分工、研究机构的性质与数量、参与的广泛度与集中度等研发生态与演变. 在此基础上, 对比分析了我国燃料电池汽车与国际先进水平的差距和存在的问题, 从研发布局的角度探寻了优化我国燃料电池汽车产业化研发的方向.

关键词

燃料电池汽车
质子交换膜燃料电池
文献检索与统计
研发生态
研发布局

燃料电池汽车因其具有高效率 and 零排放等优势而被认为是未来汽车工业可持续发展重要方向, 是解决全球能源短缺和环境污染的理想方案^[1]. 21 世纪初, 随着世界各国政府和企业纷纷投入巨资开发车用燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)关键技术, 燃料电池汽车逐渐在世界范围内呈现研发浪潮^[2], 主要汽车制造厂商非常自信地期待在第一个 10 年实现产业化. 然而, 2008 年突如其来的席卷世界的金融危机迫使各国政府和企业不得不在纯电动汽车和燃料电池汽车这 2 种既有竞争性又有互补性的技术路线之间做出取舍. 由于当时的燃料电池汽车技术成熟度尚低、加氢站基础设施建设难度很大, 而锂离子电池技术得到了长足进步, 人们认为纯电动汽车更加临近商业化, 纯电动汽车的研发与商业化一跃成为世界关注的热点甚至焦点, 持续近 10 年之久的燃料电池汽车产业化浪潮冲高回落.

2009 年, 在燃料电池汽车产业化降温之际, 日

本丰田汽车及德国戴姆勒等全球 8 家大型汽车公司于 2009 年 9 月 9 日发表联合声明, 称将于 2015 年正式开始普及燃料电池汽车(<http://www.china-hydrogen.org/fuelcell/mix/2010-01-06/574.html>). 应该说, 此时的声明表达的更多的是一种意愿, 人们有理由怀疑, 接近 2015 年时, 燃料电池汽车产业化的日期会不会再往后移. 随着 2015 年的临近, 种种迹象表明, 燃料电池汽车产业化的声浪又日渐高涨. 2013 年初, 世界七大汽车公司开始采取商业行动, 相继形成 3 个燃料电池汽车研发的跨国联盟(丰田-BMW、日产-戴姆勒-福特、本田-通用), 并均提出 2015~2017 年燃料电池汽车产业化的目标(<http://www.chinaairn.com/news/20130704/155531648.html>); 在东京车展和德国车展上, 新型专用设计的燃料电池汽车纷纷亮相; 2014 年 1 月日本丰田公司正式向外界透露将在 2015 年量产燃料电池车型, 新车的命名和生产规模将在 2014 年底对外公布(<http://news.cnfol.com/chanyejingji/20140107/>

引用格式: 张剑波 葛昊 王诚. 从文献统计看世界车用燃料电池研发的生态与演变: 主要国家研发布局对比与启示. 科学通报, 2014, 59: 2743–2759
Zhang J B, Ge H, Wang C. The evolution of worldwide research and development on fuel cell for vehicle application based on statistical analysis of literature: A comparative study of major countries (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 2743–2759, doi: 10.1360/N972014-00059

16675729.shtml);与此同时,日美欧政府均出新版的车用燃料电池中长期技术蓝图,如美国 DOE “Technical Plan-Fuel Cells”将车用燃料电池性能、价格和寿命的 2020 年的商业化指标分别设定为 2.5 kW/L(2.0 kW/kg)、15 美元/kW(年产 50 万台)和 5000 h(http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/fuel_cells.pdf).而且,日美欧政府对燃料电池车产业化支持的重点也开始移向加氢站的建设(http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_station),新一轮燃料电池汽车产业化的浪潮大有山雨欲来风满楼之势.

经过多年持续不断的研发,目前车用燃料电池已在国际上取得重大进展^[3~8],近千辆燃料电池汽车在世界各地示范运行,本田、丰田、现代、通用等车企陆续推出用于普通用户租赁的燃料电池汽车.大规模的示范运行表明,燃料电池汽车的使用方式与传统燃油车相近,性能已接近传统燃油车的水平,并且无一例重大安全事故发生^[9].目前车用燃料电池的性能、寿命和成本的先进水平为:(1) PEMFC 模块的功率密度大幅提升,日本丰田 Sedan 燃料电池汽车用 PEMFC 模块的功率密度达到 3 kW/L (<http://www.hybridcars.com/honda-will-reveal-pre-production-fuel-cell-sedan-this-year-in-tokyo/>),英国 Intelligent Energy 的新一代 EC200-192 模块的功率密度达到 5 kW/L (http://www.h2fc-fair.com/hm12/images/exhibitors/intelligent_energy-tech-forum.pdf);(2) 丰田燃料电池汽车零下 37℃启动,续航里程超过 500 km^[10];(3) PEMFC 系统的实际车载寿命提高,美国 UTC 公司开发的燃料电池发动机在实际道路运行中并在没有更换任何部件条件下突破 10000 h 寿命指标 (<http://www.utcpower.com/pressroom/pressreleases/utcpowerfuel-cell-system-sets-world-record-achieving-10000-hr-durability>);(4) PEMFC 的成本大大降低,美国在 2011 年达到 22 美元/kW(年产 50 万台),美国 3M 公司通过有序化晶须催化剂技术将铂载量水平降低到 0.15 g/kW (http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/fuel_cells.pdf),丰田也宣布在 2015 实现燃料电池车零售价格为 5 万美元/辆的目标 (<http://auto.huanqiu.com/globalnews/2013-05/3893639.html>).上述情况表明国际上燃料电池汽车已经基本完成了技术验证阶段的任务,进入到了商业化的前夕.

相比之下,虽然我国燃料电池汽车实现了从无

到有的重大突破,并且进行了 2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会的批量示范,但随着试验考核的不断深入,我国燃料电池汽车技术与西方车企的差距也日渐清晰:(1) 燃料电池模块功率密度小于 1.3 kW/L;(2) 燃料电池汽车刚刚实现零下 10℃自启动技术^[11];(3) 由于对动态工况、频繁启停、怠速、零度以下储存和启停以及空气质量等寿命影响因素的研究不足,目前电堆的寿命一般不到 3000 h^[11];(4) 成本仍然居高不下,目前还没有这方面的公开指标.国内膜电极的制备铂载量为 0.6~0.8 mg/cm²,即 1 g/kW,每辆燃料电池汽车需要铂的量为 50 g/轿车和 100 g/大巴车^[11].另外加氢站的数目与西方主要国家有数量级的差距.面对呼之欲出的新一轮燃料电池汽车产业化浪潮,中国究竟前景如何,政府主管部门担忧,业内有识之士焦虑.

造成这种被动局面的原因很多,起步早晚、底子单薄、投入多寡和研发布局等都是重要的影响因素.本文试图通过对论文、专利等文献的检索与统计,分析世界车用燃料电池技术研发的生态(指世界上从事 PEMFC 研发的主要国家、主要机构及相互合作关系)与演变,从论文与专利的数量与质量、研发的重点领域与分工、研究机构的数量、性质、参与度与集中度等研发布局的角度将我国与其他发达国家进行对比,寻找我国燃料电池汽车产业化进展不力的线索,为改进研发布局、促进我国燃料电池汽车的发展提一些建议.

1 文献检索方法

通过对车用燃料电池论文和专利这两种主要文献的检索与统计分析,可以鸟瞰全球燃料电池研发成果,梳理技术发展脉络,掌握科技创新的新动向.

1.1 论文检索

论文检索的平台为 Web of Science 数据库(包括世界范围内 8000 多种最有影响力、高质量的期刊)(<http://thomsonreuters.com/web-of-science/>);检索的时间范围为 1900~2013 年;以主题词为检索条件,表达式为 Topic=(“PEMFC” or “proton exchange membrane fuel cell” or “polymer electrolyte membrane fuel cell” or “PEFC” or “polymer electrolyte fuel cell” or “solid polymer fuel cell” or “SPFC”).共检索到有关“质子交换膜燃料电池”的记录 8775 条.

对检索出的 PEMFC 论文分别从国际总体情况, 各国参与研究的广泛度与集中度, 中国、美国和日本各自国际合作情况, 论文高产机构与作者, 研究领域分类, 主要车企及燃企发表论文情况, 论文质量以及论文发表期刊 7 个方面进行了统计与分析。

1.2 专利检索

专利检索平台为 Derwent Innovations Index 数据库(该数据库提供来源于全球 40 多个专利机构的专利信息, 可以综合检索世界各国的专利文献)(http://wokinfo.com/training_support/training/derwent-innovations-index/)索的时间范围为数据库有所收录的所有年份(1963~2013 年); 以主题词为检索条件, 表达式为 Topic=(“PEMFC” or “proton exchange membrane fuel cell” or “polymer electrolyte membrane fuel cell” or “PEFC” or “polymer electrolyte fuel cell” or “solid

polymer fuel cell” or “SPFC”)。共检索到有关“质子交换膜燃料电池”的记录 9128 条。

对检索出的 PEMFC 专利分别按照国际专利总体情况, 中国专利分布, 主要车企、燃企专利分布与演化, 以及原材料、部件、电堆专利分布等方面进行了统计与分析。

另外, 考虑到论文与专利成果检索存在漏检情况, 为更全面地或更有针对性地提取燃料电池成果信息, 除以上文献检索方法之外, 对某些专题还采用了其他的检索条件, 具体情况请见文中说明。

2 论文统计结果

2.1 国际 PEMFC 论文总体情况

图 1 显示了 PEMFC 论文的数量、分布及演化情况。其中, 论文发表数量随年份分布如图 1(a)所示,

图 1 国际 PEMFC 论文总体情况统计

(a) 不同年份 PEMFC 论文发表数量分布; (b) 不同国家 PEMFC 论文发表数量分布; (c) 不同国家论文发表数量随年份变化

文章发表数量在 1998 年之前很少, 每年不足 50 篇, 自 1998 年之后文章发表数量稳步上升, 直到 2010 年升至最高点(1118 篇), 随后逐年减少; PEMFC 发表论文数量在不同国家中分布如图 1(b)所示, 美国遥遥领先, 中国、日本和韩国东亚三国整体数量(3788 篇)与美国、德国、法国、加拿大和意大利的论文总量(3741 篇)相当, 而中国的论文总量(1729 篇)与美国(1793 篇)持平; 7 个代表性国家的 PEMFC 发表论文数量变化如图 1(c)所示, 从发表第一篇文章的时间看, 美国、加拿大和日本起步最早分别为 1975, 1988 和 1992 年. 韩国、中国起步稍晚分别为 1996 和 1997 年. 美国、日本和加拿大的文献快速增长年份分别在 2001, 2002 和 2003 年, 其余各国均在 2004 年左右, 其中中国增速最快, 每年发表论文总量和日本交替名列第二, 到 2011 年彻底超过日本并超过美国. 美国在 2010 年论文数量达到顶峰后快速下降, 这可能与奥巴马政府削减燃料电池汽车研发经费有关.

2.2 各国参与 PEMFC 研究的广泛度与集中度

为了分析美国、中国和日本参与研究的广泛程度, 统计了各国参与 PEMFC 研究的机构总数: 美国参与 PEMFC 研究的机构(发表文章一篇及以上, 包括合作发表)总数为 678 家, 中国为 374 家, 日本为 423 家. 中国参与研究的机构数目在 3 国之中处于最低.

美国、中国和日本 3 国各自排名前 20 机构发表文章数量在本国的所占百分比如图 2(a)所示, 其中, 中国发表论文数量排名第一的机构遥遥领先于其他

机构, 中国、美国和日本 3 国燃料电池研究的集中程度依次降低. 图 2(b)统计了燃料电池研究较为领先的国家各个机构发表文章数量的标准差与平均值之比, 即变异系数, 作为衡量各个国家研究集中度的指标. 变异系数越高, 研究的集中程度越高. 从图 2(b)中可以看出中国燃料电池研究的集中程度最高, 美国和日本的研究集中程度相对于中国较低.

2.3 中国、美国和日本各自国际合作发表文章情况

中国发表的 PEMFC 文章中, 23.0%是与其他国家合作发表; 美国的比例为 23.5%, 基本与中国持平; 日本的比例为 12.9%, 说明日本的 PEMFC 国际合作研究开展情况不如中国和美国广泛. 统计了中国、美国和日本 3 国各自与世界其他国家合作发表文章的比例, 如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 中国的主要合作伙伴为美国、加拿大、日本、新加坡和德国; 美国的主要合作伙伴为韩国、中国、加拿大、日本和土耳其; 日本的重要合作伙伴有中国、美国、韩国、埃及和泰国.

2.4 PEMFC 论文高产机构与作者

研究机构发表 PEMFC 论文的数量排序如表 1 所示, 中国、美国和韩国的 PEMFC 研究集中在少数几个单位, 发表文章数量在国际上排名靠前. 瑞士国家不大, 但有一个研究机构的论文发表数量在国际上排名靠前. 日本论文发表总数在世界上排第 3 位, 有 2 个机构发表文章数目进入世界前 10, 分别排名第 6

图 2 各国参与 PEMFC 研究的广泛度与集中度统计

(a) 论文数量排名前 20 机构(美国、中国和日本)各自发表文章数量占本国的百分比; (b) 各国研究机构 PEMFC 文章数量变异系数

图3 中国、美国和日本各自与世界其他国家合作发文比例

(a) 中国与其他国家合作发文比例; (b) 美国与其他国家合作发文比例; (c) 日本与其他国家合作发文比例。
括号中的数字表示“其他”包含的国家数

与第10位。论文高产作者统计分析如表2示,处于前4位的高产作者都是中国人或华人,以大连化学物理研究所的衣宝廉院士(98篇)遥遥领先,韩国的Kim排在第6位,瑞士Paul Scherrer Institute的两位研究人员分别排在第5和第8位。

表1 论文高产研究机构

排名	缩写	全称	数量
1	CAS	Chinese Academy of Sciences, China	242
2	PSU	Penn State University, USA	147
3	YZU	Yuan Ze University, Taiwan, China	135
4	SNU	Seoul National University, Korea	134
5	PSI	Paul Scherrer Institute, Switzerland	125
6	TIT	Tokyo Institute of Technology, Japan	121
7	KIST	Korea Institute of Science Technology, Korea	114
8	USC	University of South Carolina, USA	107
9	SJTU	Shanghai Jiao Tong University, China	95
10	KU	Kyushu University, Japan	85

表2 论文高产作者

排名	作者	数目	机构
1	Yi B L	98	Chinese Academy of Sciences
2	Wang C Y	87	Penn State University
3	Zhang H M	69	Chinese Academy of Sciences
4	Wang Y	69	University of California, Irvine
5	Wokaun A	67	Paul Scherrer Institute
6	Kim H J	67	Korea Institute of Science Technology
7	Watanabe M	66	Yamanashi University
8	Scherer G G	65	Paul Scherrer Institute
9	Hissel D	65	University Franche-comte
10	Lim T H	55	Korea Institute of Science Technology

2.5 PEMFC 论文研究领域分类

为提取 PEMFC 的材料、部件、电堆及工况相关论文信息,在1.1节所述的检索条件基础上附加条件:标题分别为 catalyst; “membrane” not “membrane electrode assembly” not “catalyst” not “membrane fuel cell” not “membrane fuel cells” not “MEA” not “membrane electrode assemblies”; “GDL” or “gas diffusion layer”; bipolar; “MEA” or “membrane electrode assembly”; stack,进行细分检索,得到 PEMFC 的材料、部件和电堆相关研究的论文分布,如图4(a)所示。PEMFC 材料研究的论文数量远远多于电堆,尤其是以催化剂的研究论文数量优势十分明显。

同样在1.1节所述的检索条件基础上附加条件:标题分别为 cold start; (“startup” or “shutdown”) not “cold start”; impurity; water and (“management” or “removal” or “generation” or “transport” or “distribution” or “adsorption”); starvation; cycling 进行细分检索,得到 PEMFC 的不同工况和运行条件研究方面的论文分布,如图4(b)所示。总体上 PEMFC 运行工况方面的论文数量从远少于材料、部件和电堆方面的论文数,但值得一提的是,关于水管理研究的论文占据压倒性多数,充分表明水管理在 PEMFC 中的重要性。

中国、美国、日本在 PEMFC 材料、部件和电堆研究方面的发表论文分布如图4(c)所示,其中日本在催化剂方面的论文数最多(230篇),多于中国(167篇)、美国(192篇)的论文数。在关键材料催化剂研究方面,日本、美国、中国的论文发表数量均处于高位,远高于气体扩散层、膜、双极板、膜电极和电堆方面的论文发表数量,这是由于在早期的车用燃料电池应用

图 4 PEMFC 论文按研究领域分类统计

(a) 材料、部件与电堆论文数量分布; (b) 工况论文数量分布; (c) 中国、美国、日本在材料、部件和电堆研究方向发表论文比较; (d) 中国、美国、日本在不同工况和条件研究发表论文比较

实践中证实催化剂铂的流失与载体碳的氧化腐蚀是决定 PEMFC 寿命的主要问题, 铂金的储量有限且严重集中于个别国家因而是 PEMFC 普及的障碍, 因此各国均在大力发展既有高活性与又具有良好稳定性的低铂电催化剂与非铂电催化剂。而日本和美国在催化剂研究方面发表的论文数量多于中国, 这反映出日本和美国试图通过大力研究新材料进一步巩固其在 PEMFC 方面的核心竞争力。日本 PEMFC 研究重点更加明显地倾斜在新型催化剂上(2013 年催化剂论文约占其论文总数的 56.4%), 而在 PEMFC 部件制备工艺、电堆研发方面的论文较少。这可能是因为日本企业在燃料电池研究方面参与度较高, 如丰田、本田和日产等汽车公司主要内制燃料电池电堆并积极致力于燃料电池汽车的商业化, 而这些企业并不热心发表商业秘密性质较浓的电堆、双极板、膜电极等研发结果。

中国、美国、日本在 PEMFC 不同工况和条件研究方面发表的论文数量分布如图 4(d)所示, 中国的总论文数为 70 篇, 远远少于美国和日本的论文数(分别为 177 和 95 篇), 而杂质方面研究仅 1 篇文章。这一现象可能有两个原因: 其一是中国的 PEMFC 研究机构更多地关注材料和部件, 缺乏对运行工况、条件的关注, 或者缺少对这些实验结果的接触; 其二是中国车企严重缺席(这一点可以在后面的统计中得到印证)。

2.6 主要车企及燃企发表 PEMFC 论文情况

为了解主要车企和燃料电池企业(燃企)论文发表数量分布, 除 Web of Knowledge 平台下的所有数据库之外还附加了 SAE 数据库并采用主题词进行检索: Topic=("fuel cell" not ("Alkaline Fuel Cell" or

“AFC” or “Phosphorous Acid Fuel” or “PAFC” or “Molten Carbonate Fuel Cell” or “MCFC” or “Solid Oxide FuelCell” or “SOFC” or “direct methanol fuel cell” or “DMFC” or “Microbial Fuel Cell” or “MFC”)). 主要车企论文发表数量分布如图 5(a)所示, 日本丰田、韩国现代起亚名列前二位处于第一方阵, 日本日产、美国通用、美国福特分别名列 4, 5 和 6 位处于第二方阵, 日本本田、德国戴姆勒、中国上汽和大众处于第三方阵. 日、韩、美、欧车企论文发表数量的多少, 在一定程度上对应着这几个国家在 PEMFC 技术上的实力. 主要燃企论文发表数量分布如图 5(b)所示, 加拿大的巴拉德公司遥遥领先, 中国的新源动力名列第三. 车企和燃企文章发表数量逐年分布如图 5(c)所示, 车企和燃企文章发表数量快速增长也是从 2004 年开始, 与当时燃料电池汽车产业化的热潮相一致. 新源动力的文章发表数量从 2007 年开始快速增长, 比西方

相关企业晚了 3 年. 巴拉德和新源动力从 2008 年开始发表论文数量陡降, 车企则仍在上升, 到 2011 年、甚至 2012 年才开始陡降. 值得关注的是, 丰田和日产的论文发表数量在 2013 年又有所回升.

主要车企及燃企与外单位合作发文占其全部论文比例的统计如图 6(a)和(b)所示. 在燃料电池汽车技术开发过程中, 企业大都会与高校或科研机构合作开展研究, 但其中日产、巴拉德、丰田、通用与高校或科研机构联合发文比例相对较低. 企业大都选择本国的高校或研究院所合作, 此外, 韩国和日本的企业也与美国高校合作较多. 新源动力主要与中国科学院大连化学物理研究所和大连理工大学合作, 有一篇论文与日产合作. 上海汽车集团股份有限公司(上汽)主要与上海交通大学和同济大学合作发表论文(图 5 和 6 的统计用到了 Web of Science 的统计功能, 在 Web of Science 数据库中进行).

图 5 主要车企和燃企 PEMFC 研究发表文章统计

(a) 主要车企论文发表数量分布; (b) 主要燃企论文发表数量分布; (c) 主要车企和燃企论文发表数量时间统计

图 6 主要车企和燃企合作发文比例

(a) 主要车企合作发文比例; (b) 主要燃企合作发文比例

2.7 论文质量

论文平均被引次数是一个国家或研究机构的全部被引用次数除以其发表文章总数, 是平均研究水平的一种度量. 不同国家发表文章平均被引频次统计如图 7(a)所示, 美国发表文章的平均被引频次最高, 加拿大、意大利、德国的平均被引次数高于世界平均值, 其余国家低于世界平均值. 与论文总数高居世界第二相对照, 中国的论文平均被引次数排在第九, 位于日本、法国、印度、韩国之后. 各个研究机构论文的平均被引频次如图 7(b)所示. 在各个研究机构的论文被引次数中, 美国的两大机构 PSU 和 USC 进入前三, 处于第一方阵; 中国的 CAS 位于第三名和瑞士 PSI 处于第二方阵; 韩国、日本以及中国台湾的 4 个机构处于第三方阵; 中国的 SJTU 与日本的 KU 处于

第四方阵, 较为落后. 不论从论文总数、还是从平均被引次数, 美国都高居第一, 而且美国从事 PEMFC 研究的时间远远早于其他国家, 研究机构也最多, 充分反映出美国在 PEMFC 研究方面遥遥领先于世界的坚实地位.

PEMFC 研究中前 10 名高引用率论文统计信息如表 3 所示. 对燃料电池内部过程进行模型描述的高引用论文共有 4 篇, 分别排在第 1, 3, 9, 10 位, 其中有 3 篇发表在 1991 和 1992 年, 1 篇在 2003 年, 充分反映出膜电极结构、物质传输、电化学反应等过程研究对 PEMFC 研究的重要. 关于催化剂的有 4 篇, 分别排在第 2, 4, 6, 8 位, 其中有 3 篇发表在 2006 年以后, 其中的 2 篇发表在 *Science*、1 篇发表在 *Nature* 杂志上, 反映出催化剂研究的基础性、持续性, 及其在几种关键材料中的突出地位. 关于膜和电极层的

图 7 发表文章平均被引次数统计

(a) 不同国家发表文章平均被引频次; (b) 不同机构发表文章平均被引频次

表 3 PEMFC 研究的高引用率论文统计信息

引用率 排名	文章	年份	通讯作者及所在机构	杂志	被引 频次
1	Polymer electrolyte fuel-cell model	1991	Springer T E; Univ Calif Los Alamos Sci Lab	<i>Journal of the Electrochemical Society</i>	1524
2	Improved oxygen reduction activity on Pt ₃ Ni(111) via increased surface site availability	2007	Stamenkovic V R; Argonne Natl Lab	<i>Science</i>	895
3	A mathematical-model of the solid-polymer- electrolyte fuel-cell	1992	Bernardi D M; GM Corp, Res & Environm Staff, Dept Phys Chem, Warren	<i>Journal of the Electrochemical Society</i>	833
4	Pd-Pt bimetallic nanodendrites with high activity for oxygen reduction	2009	Xia Y N; Washington Univ	<i>Science</i>	758
5	Development of ionomer membranes for fuel cells	2001	Kerres J A; Univ Stuttgart (Germany)	<i>Journal of Membrane Science</i>	714
6	A class of non-precious metal composite catalysts for fuel cells	2006	Zelenay P; Los Alamos Natl Lab	<i>Nature</i>	605
7	Thin-film catalyst layers for polymer electrolyte fuel-cell electrodes	1992	Wilson M S; Univ Calif Los Alamos Sci Lab	<i>Journal of Applied Electrochemistry</i>	576
8	Role of structural and electronic-properties of Pt and Pt alloys on electrocatalysis of oxygen reduction— An in-situ XANES and EXAFS investigation	1995	Mukerjee S; Texas A&M Univ	<i>Journal of the Electrochemical Society</i>	557
9	Mathematical-model of a gas-diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte	1991	Bernardi D M; GM Corp, Res & Environm Staff, Dept Phys Chem,Warren	<i>AIChE Journal</i>	504
10	Effective diffusivity and water-saturation distribution in single- and two-layer PEMFC diffusion medium	2003	Kaviany M; Univ Michigan	<i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i>	473

表 4 美中日 PEMFC 论文发表期刊比较

美国		中国		日本	
期刊	数目	期刊	数目	期刊	数目
<i>Journal of Power Sources</i>	408	<i>Journal of Power Sources</i>	252	<i>Journal of Power Sources</i>	189
<i>Journal of the Electrochemical Society</i>	232	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	179	<i>Electrochimica Acta</i>	85
<i>Ecs Transactions</i>	111	<i>Electrochimica Acta</i>	53	<i>Ecs Transactions</i>	77
<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	103	<i>Advanced Materials Research</i>	44	<i>Electrochemistry</i>	65
<i>Electrochimica Acta</i>	88	<i>Journal of Membrane Science</i>	30	<i>Journal of the Electrochemical Society</i>	65
<i>Journal of Fuel Cell Science and Technology</i>	64	<i>Chemical Journal of Chinese Universities</i>	20	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	36

论文各有有 1 篇, 排在第 5 和第 7 位。

从表 4 中可以看出, 美国的 Los Alamos 实验室表现非常突出, 有 3 篇文章分别排在第 1, 6 和 7 位。美国通用汽车公司的论文数目虽然不多, 但是有两篇高引用率的论文入选。排名第 4 的高引用文章的通讯作者是一位华人。

2.8 PEMFC 论文发表期刊

美中日 PEMFC 论文发表期刊比较如表 4 所示, 表中列出了美国、中国、日本 3 个国家各自发表论文

最多的 6 种期刊, 这些期刊其实也就是 PEMFC 的主要刊源。从表中可看出, 这 3 个国家在 *Journal of Power Sources* 上发表文章最多, 且数量远远多于其他期刊。日本在本国杂志(*Electrochemistry*)上发表有 65 篇, 占论文总数的 5.8%。而中国在整个论文发表数量(1189)中, 只有 20 篇论文发表在本国杂志(*Chemical Journal of Chinese Universities*)上, 占论文总数的 1.7%。

表 5 对表 3 和 4 中提到的期刊信息进行了统计和汇总, 并按影响因子进行了排序, 这些杂志应该是发

表 5 期刊杂志信息汇总

期刊	影响因子	所属国家
<i>Nature</i>	38.597	英国
<i>Science</i>	31.027	美国
<i>Journal of Power Sources</i>	4.675	荷兰
<i>Journal of Membrane Science</i>	4.093	荷兰
<i>Electrochimica Acta</i>	3.777	英国
<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	3.548	英国
<i>Journal of the Electrochemical Society</i>	2.588	美国
<i>AIChE Journal</i>	2.493	美国
<i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i>	2.315	英国
<i>Journal of Fuel Cell Science and Technology</i>	0.988	美国
<i>Electrochemistry</i>	0.934	日本
<i>Chemical Journal of Chinese Universities</i>	0.856	中国
<i>Ecs Transactions</i>	无信息	美国
<i>Advanced Materials Research</i>	无信息	瑞士

表高质量 PEMFC 的主要期刊。可以看到,除美国之外,英国和荷兰的科技期刊出版业非常发达,有很多高水平的杂志。

3 专利统计结果

3.1 新能源专利总体情况

为了了解新能源技术的整体态势,首先统计了新能源专利数量的年份分布和国家分布情况。新能源专利数量变化趋势如图 8(a)所示,燃料电池(以 fuel cell 为主题词)的专利数量从整体上趋于高位,在 2000~2009 年期间,其专利总数远远排在太阳能(以

solar energy 为主题词)、风能(以 wind energy 为主题词)、生物能(以 biofuel or bioenergy 为主题词)、地热能(以 geothermal 为主题词)、页岩气(以 shale gas 为主题词)等新能源专利总数之前,其中,在 2008 年的专利数量超过 9000 件。从 2009 年开始,燃料电池的专利数量呈减少之势,而太阳能、风能、生物能和地热能清洁能源都呈增长之势(可能与各国应对金融危机所采取的支持清洁能源的政策有关),其中,太阳能与风能增速最为显著。在 2012 年之后,绝大部分新能源专利数量均呈下降趋势,这可能与欧债危机引发的世界经济低迷长期化有关。然而页岩气专利数量从 2011 年开始逐渐增多(2011 年为 13 件,2012 年为 40 件,2013 年为 49 件),这可能与国际上兴起的页岩气开发热潮有关,页岩气正在成为搅动世界能源市场的一种新生力量。

新能源专利的地域分布如图 8(b)所示,美国与日本以 44%和 33%遥遥领先,处于第一方阵。韩国和德国以 7%和 6%,处于第二方阵。法国、中国、加拿大和英国以 1%~2%处于第三方阵。其中中国的专利主要分布在台湾。

3.2 国际 PEMFC 专利总体情况与中国 PEMFC 专利分布

PEMFC 作为五大类型燃料电池之一,从 1963~2013 年的专利统计总数为 9128 件。其专利数量逐年变化如图 9(a)所示,基本变化趋势与图 1 中燃料电池总体变化趋势相符,PEMFC 专利也在 2008 年到达峰

图 8 新能源专利数量统计

(a) 新能源专利数量变化趋势; (b) 新能源专利国家分布

图9 国际 PEMFC 专利总体情况与中国 PEMFC 专利分布
(a) 国际 PEMFC 专利数量变化趋势; (b) PEMFC 专利数目 TOP10; (c) 中国 PEMFC 专利分布

值,随后逐年递减. PEMFC 专利统计排序如图 9(b)所示,排在前 10 位的依次是丰田、本田、日产、松下、三菱、通用、三星、Asahi、日立和三洋,这 10 家企业的专利数量之和为 4356 件,几乎占全部 PEMFC 专利数量的一半,与论文分布统计相比,PEMFC 专利集中较高,主要集中于车企,而且集中于日本. 在以上 TOP10 企业中,美国与韩国均有 1 家企业,而日本有 8 家企业,处于绝对优势,特别是丰田一枝独秀. 从国内 PEMFC 专利统计情况看,专利总数为 392 件,分布于 200 家单位,其中超过 5 件专利的单位排列如图 9(c)所示. 专利件数超过 5 件的单位有 13 家,共有 189 件专利,占国内专利总数的近一半. 中国 PEMFC 专利主要集中于新源动力和大连化物所,大学的参与度很高,相比较而言企业的参与度较小,这种状况与国外专利主要由企业发明形成鲜明对比.

3.3 主要车企、燃企 PEMFC 专利分布与演化

车企 PEMFC 专利数量统计如图 10(a)所示,日本四大汽车厂商有 2781 件专利(其中丰田、本田、日产、三菱分别有 1313, 590, 469 和 409 件),占据专利总数的 30%以上,通用以 310 件的专利数量排在第 5 位,后面依次是韩国现代和 KIA、戴姆勒、福特、大众. 车企专利数量的多少,直接反映了其在燃料电池汽车研发方面的投入与技术实力. 日本车企在 PEMFC 专利数量上的压倒性优势是显而易见的. 中国上汽在燃料电池汽车方面的专利近 40 件,而在 PEMFC 方面仅有 8 件相关专利,这表明其重心不在 PEMFC 的开发,而在燃料电池汽车的动力平台和整车布置. 世界 PEMFC 相关企业专利统计如图 10(b)所示,燃料电池电堆公司的专利排序为加拿大巴拉德、中国新源动力、美国 UTC 等;膜电极公司的专利排序依次为美国

图 10 主要车企和燃企专利统计

(a) 主要车企 PEMFC 专利分布; (b) 主要燃企 PEMFC 专利分布; (c) 主要车企和燃企 PEMFC 专利逐年变化; (d) 主要车企和燃企 fuel cell 专利逐年变化

Gore 和 3M; 原材料公司的专利排序为日本 Toray、英国 Johnson Matthey、日本 Tanaka、美国 Du Pont、德国 BASF 和 SGL。以上专利结果分析表明, 美国具有 PEMFC 原材料、部件和电堆的相关生产企业; 日本没有专门致力于 PEMFC 电堆生产的企业, 这是由于日本三大车企均选择内制燃料电池电堆, 因此在 PEMFC 部件和电堆方面没有专门的生产企业; 中国最大的燃料电池公司新源动力主要研制电堆, 除此之外还有上海神力科技公司和武汉理工新能源公司, 但后两家公司的专利在“Derwent Innovations Index”数据库中收录极少, 而且中国在原材料和部件方面还没有知名的生产企业, 表明我国燃料电池产业链还远不完备。

从专利件数占优势的车企和燃企中, 选取丰田、

本田、日产、三菱、通用、现代-起亚、戴姆勒、福特、巴拉德、UTC 和新源动力 11 家典型企业分析其 PEMFC 与 fuel cell(检索条件: 标题中含“fuel cell”)专利数量的时间演变(1990~2013 年), 统计如图 10(c)和 (d)所示, 两图的变化趋势基本相同。

三菱、本田、丰田从 2001 年开始进入专利申请爆发期, 其中丰田的专利数量从 2004 年以后逐年变化均处于最高位, 在 2005~2008 年分别达到两个高峰, 2010~2011 年的专利数量急剧下降, 2011 年以后下降速度趋缓; 日产于 2003 年奋起直追, 上升幅度远远高于前者; 通用到了 2005 年才开始以较缓的速度上升; 新源动力在 2008 年有一个猛升, 并达到最高点(与 2008 年北京奥运会燃料电池汽车的示范有关)。燃企方面, 巴拉德公司于 20 世纪 80 年代就开始 PEMFC

的研发,所以于 90 年代末期处于专利申请爆发期,2004 年以后专利数量逐步下降.从企业专利演变图可看出,日本四大汽车厂商表现非常活跃.值得一提的是,虽然戴姆勒的专利数量总体上偏少,但却在 2013 年达到最高点,这与其他公司形成了鲜明的对比.

这些企业的早期专利情况如表 6 所示.从早期专利情况分析,车企中的三菱、丰田和本田是燃料电池专利的领跑者,燃企中的巴拉德和 UTC 是燃料电池专利的领跑者.

3.4 PEMFC 原材料、部件和电堆专利分布

从 PEMFC 产业链的原材料、关键部件和电堆的角度分析全球燃料电池产业的状态,对 PEMFC 催化剂、质子交换膜、气体扩散层、膜电极、双极板和电堆的专利数量作分析比较,检索条件与结果如表 7 所示.从中可以看出,与论文统计结果相同,催化剂的研发也是最为活跃的,这充分表明催化剂是各国在 PEMFC 技术方面的竞争重点.除气体扩散层专利数量较少之外,与电堆技术的专利数量相比,PEMFC 关键材料和部件(膜电极与双极板)的专利数

量处于高位.

4 综合分析

4.1 论文综合分析

自从 1975 年发表第一篇 PEMFC 论文以来,经过近 40 年的发展,PEMFC 的研究取得了长足的进步,论文总数已达到近 9000 篇.美国起步最早(1975 年),论文数目最多(1793 篇),平均被引次数最高(31.8),在 PEMFC 研究领域赫然处于世界领先地位.相比而言,中国的文章发表虽然起步较晚(1997),但是增长势头,2012 年中国发表的论文数目已经处于世界第一的位置,总量已处于世界第二,其中以中国科学院大连化学物理研究所为代表的研究团队为中国 PEMFC 的研究做出了突出的贡献.然而,通过对论文质量的分析,我们可以看到,中国发表的论文平均被引次数较低(12.4),总体质量较差,说明中国的研究水平还有很大的提升空间.相对于美日等国,中国参与 PEMFC 研究的机构数较少,发表文章的集中程度较高(中国科学院一家机构发表的文章占据压倒份额).中国本土的高水平学术期刊不多,大量的文章发表在外国期刊上,这与中国学术论文数量较多的情况极不相称.另外,相对于国外车企,中国车企有关 PEMFC 的论文数目极少,在 PEMFC 的研究中严重缺席.

4.2 专利综合分析

PEMFC 自从 20 世纪 50 年代美国通用电气公司发明以来,经过近 60 多年突飞猛进的发展,在国际间已经形成完整的产业链,可以分为上游原材料制造业,中游燃料电池部件制备与电堆组装业,下游的燃料电池系统集成和终端产品业.从 3.2 节专利统计

表 6 11 家企业 fuel cell 专利早期情况

单位	2001 年(含)前 专利数量(件)	第一件专利 公开年份	第一件专利
三菱	298	1974	JP74025136-B
丰田	136	1984	JP59000861-A
巴拉德	125	1992	CA2018639-A
本田	99	1993	JP5190184-A
日产	45	1976	GB1447835-A
UTC	23	1996	US5503944-A
戴姆勒	21	1993	DE69302902-T2
新源动力	5	2000	CN1242611-A
福特	5	1976	US3951689-A
现代-起亚	2	2000	KR99080476-A

表 7 PEMFC 关键材料、部件和电堆的专利检索条件与结果

检索对象	检索条件(主题词 PEMFC+)	检索结果(条)
催化剂	“catalyst” not “membrane electrode assembly” not “catalyst layer”	1181
膜电极	“MEA” or “membrane electrode assembly”	987
双极板	“plate” or “flow field”	877
质子交换膜	“membrane” not “membrane electrode assembly” not “catalyst” not “membrane fuel cell”	746
电堆	“stack”	728
气体扩散层	标“GDL” or “gas diffusion layer”	264

分析看,目前在 PEMFC 产业链中处于技术优势甚至垄断地位的企业分别如表 8 所示.

从 PEMFC 的全球产业链看,它的上游原材料和 中游部件已经实现以盈利为目的的商业化,而且均由国外相关企业处于技术垄断地位,并且持续保持着该领域的核心竞争优势,例如美国 Gore 公司开发的 CCM 在 2010 年之前处于世界领先水平,并批量生产畅销全球;这之后美国 3M 公司开发的新一代铂膜晶须有序化膜电极制备技术,使燃料电池膜电极的总铂载量降低至 0.15 mg/cm^2 ,并显示出优异的性能和耐久性,代表了目前全球膜电极的最先进水平,然而该产品却限制性出口.到目前为止,世界上几家处于垄断地位的燃料电池原材料制造商赚取了燃料电池产业中的最大利润,这与着眼于燃料电池应用下游产业的公司只能靠融资来艰难维持发展形成了鲜明的对比,这也表明燃料电池关键材料与部件的重要性,它是否能够国产化将决定一个国家燃料电池技术的先进程度以及有无商业化前景.

4.3 中日对比分析

以经产省为代表的日本政府部门高度重视并持续开展氢能及燃料电池汽车开发,在过去 30 年时间内先后投入上千亿日元用于氢能和燃料电池汽车的基础科学研究、技术攻关和示范推广.日本燃料电池商业化组织 FCCJ(Fuel Cell Commercialization Conference of Japan)于 2010 年 7 月发布了《燃料电池汽车和加氢站 2015 年商业化路线图》,明确指出 2011~

2015 年开展燃料电池汽车技术验证和市场示范,随后进入商业化示范推广前期.2011 年 1 月,丰田、本田和日产三大汽车厂商等 13 家企业共同签订协议,呼吁在东京、大阪、名古屋和福岡四大都市圈的市区和高速公路上建立 100 座加氢站;2013 年初,日本三大车企相继分别与美欧车企形成三个跨国联盟,企图通过共享先期研发经验、共同分担研发成本、共用核心部件和系统等方式,大幅降低燃料电池汽车研发与生产成本,共同培育燃料电池汽车市场.可以说日本已经基本完成燃料电池汽车的技术验证阶段与社会验证阶段的主要任务,率先进入商业化阶段的前夕.

我国在科技部“十五”“863”计划电动汽车关键技术重大科技专项和“十一五”节能与新能源汽车重大项目支持下,燃料电池汽车技术研发取得重要进展,基本培育起了 PEMFC 关键原材料、部件和电堆的研发单位,研制的燃料电池汽车成功服务于 2008 北京奥运会和 2010 年上海世博会.但是,由于我国传统汽车工业基础薄弱等多方面条件限制,燃料电池高性能原材料和部件主要依赖进口,电堆制造水平不高,加氢站等基础设施建设滞后,我国燃料电池汽车仍然处于技术验证阶段.

中日 PEMFC 研发布局对比如表 9 所示.中国 PEMFC 研究起步虽比日本晚了 5 年,但增速很快,且国际合作比日本更加活跃,论文总数已经超过日本;然而,反映产业化潜力的专利数量远远少于日本.中国从事燃料电池研究的机构少于日本,而集中度

表 8 在 PEMFC 产业链中优势企业分布

燃料电池产业	美国优势企业	日本优势企业	欧洲优势企业	加拿大优势企业
燃料电池原材料类	质子交换膜代表性企业 Du Pont	催化剂代表性企业 Tanaka	催化剂代表性企业 Johnson Matthey; 高温质子膜代表性企业 BASF	无明显优势企业
燃料电池部件类	膜电极代表性企业: Gore, 3M	气体扩散层代表性企业 Toray	气体扩散层代表性企业 SGL	气体扩散层代表性企业巴拉德
燃料电池电堆类	代表性企业 UTC	代表企业: 丰田、日产、本田	代表性企业 Intelligent Energy	代表性企业巴拉德和 Hydrogenics
燃料电池系统集成和终端产品类	燃料电池动力系统代表性企业 UTC, 燃料电池汽车代表性企业 GM、福特, 全球燃料电池叉车市场的领导者 Plug Power, 备用电源领导者 Relion	燃料电池汽车代表性企业: 丰田、本田、日产, 家用电源代表性企业: 东芝、松下	燃料电池汽车代表性企业戴姆勒	无明显优势企业

表 9 中日 PEMFC 研发状况对比

	中国	日本	对比
首篇论文年份	1997	1992	比日本晚
论文总数	1188	1139	交替上下, 2012 年中国彻底胜出(论文数量不代表产业化水平)
国际合作比例	23.0%	12.9%	中国的国际合作比例远高于日本
平均被引次数	12.4, 低于世界平均	15.3, 略低于世界平均	世界平均值为 17.6 (论文质量也不代表产业化水平)
专利数量	392 件, 院校占据相当份额	4000 多件, 日本企业世界范围内占据压倒优势, 主要发明来自企业	专利是产业化水平的代表性指标, 企业应该承担主导作用
研究重点领域	集中在部件 运行工况研究较少(作为主要使用单位的车企缺席)	催化剂研究占压倒多数 运行工况研究多于中国	日本的研究集中在科学问题遗留较多的关键材料和部件, 主要由院校承担, 工程性强的部件论文不多, 估计其研究主要由企业承担
主要研发力量	发表文章研究机构数量: 374; 变异系数: 3.41. 主体研发力量是院校, 且非常集中	发表文章研究机构数量: 423; 变异系数: 2.41. 院校进行基础研究, 企业集中在技术研发	中国从事燃料电池研究的机构少于日本, 而集中度大于日本
产业链	有部件和电堆的生产能力, 上汽正在开发燃料电池汽车. 然而, 高性能原材料仍然依赖进口. 仅有数座加氢站, 主要靠国家示范项目, 能源行业介入不深	在原材料方面具有催化剂代表性企业 Tanaka 和碳纸代表性企业 Toray, 三大车企均内制电堆甚至核心部件, 并形成领先世界的技术优势. 加氢站数量几十座, 能源企业积极参与	日本的 PEMFC 产业链已基本形成, 而中国仍然处于技术开发和示范阶段, 产业链正在培育

大于日本. 高等院校是中国 PEMFC 的研发的主要力量, 知识和技术主要掌握在不以产业化为首要目标的院校手里. 个别院校孤军深入, 既缺少其他院校的呼应, 更缺少产业界的支撑, 与千军万马争抢锂电形成鲜明对照. 中国车企发表论文、申请专利的数量远远少于日本车企; 中国车企没有一家内制电堆, 日本主要车企不仅内制电堆, 甚至内制氢气瓶、催化剂等核心部件与关键材料.

轿车用燃料电池电堆作为多种技术的综合, 技术壁垒高、开发周期长、所需费用高昂, 在燃料电池汽车长期不能实现商业化的情形下, 只有少数以日本为代表的车企坚持内制电堆. 日产汽车公司燃料电池研究所所长饭山先曾根据日产研发燃料电池汽车的切身体会, 对中国车企发出忠告: 车企不自己开发电堆, 就不可能掌握核心技术. 当然, 车企并不一定需要掌握电堆核心技术. 与日本车企不同, 欧洲车企通过参股燃料电池企业, 试图掌控电堆核心技术. 中国车企是否、以及何时内制电堆, 要根据自身的具体情况进行判断.

5 总结

PEMFC 论文统计分析表明, 美国和日本在车用燃料电池技术研究上起步较早, 尤其是美国在 20 世纪末就领先于其他国家开展 PEMFC 的研究, 论文的数量和质量均处于首位. 日本的论文数量居世界第三, 平均引用次数略低于世界平均水平. 美日以外的其他国家, 论文数量均在 2004 年开始上升, 在发表论文上, 中国与这些国家站在同一起跑线上. 然而, 中国发表论文数量的增速远远高于这些国家, 2012 年中国论文数量位居世界第一, 迄今总量居世界第二, 高产作者中也不乏中国人或华人. 但中国论文的平均引用次数低于世界平均水平, 中国院校的科研创新的总体质量尚需提高.

PEMFC 论文统计结果分析还表明, 各国参与燃料电池研发方面的广泛度与集中度有所不同. 以中日为例, 日本参与燃料电池研究的机构总数为 423 家, 中国为 374 家. 另外, 中国燃料电池研究机构的集中度偏高, 形成了中国科学院一家独大的局面; 相反日本燃料电池研究机构的集中程度较低, 日本几大主

要研究机构发表论文数量较为接近。

PEMFC 专利数量从 2001 年起逐年上升, 企业尤其是日本车企占绝对优势。与在论文发表上表现出的强劲攻势相比, 中国在专利数量上极少而且增长缓慢, 这既是中国燃料电池汽车产业化乏力的一个现象, 同时也从技术创新角度回答了我国 PEMFC 技术落后的原因。在国内的燃料电池汽车开发中, PEMFC 的主要使用者——车企严重缺席, 加氢站等基础设施的主要利害相关者——能源公司袖手旁观, 个别院校承担着 PEMFC 研发的主导作用, 相关的知识、技术主要掌握在以发表论文, 而不是申请专利、实现产业化为首要目的院校手里。国家的科研经费所支持的科研成果, 发表在外文杂志上, 首先供外国人阅览参考, 而没有形成国内知识产权优势、为产业化提供强劲支撑, 从某种意义上讲, 我们的投入是在为他人做嫁衣。应该加快培育中国核心期刊, 改进院校研究的评价体系, 引导院校在国内杂志上发表文章。同时要激励更多的企业参与 PEMFC 的研发, 申请专利, 为产业化提供知识产权的保障。

基于 PEMFC 论文与专利的统计、研发生态与演化的分析、中日技术水准与研发布局的对比, 本文认为中国燃料电池汽车技术的研发需要调整布局, 在

院校和企业间做好基础科学研究、前沿技术开发和新技术应用的分工, 院校应该着重在基础科研上发挥先导作用, 车企与能源企业则应该增大投入, 在产业化中发挥主导作用。院校应以燃料电池催化剂等核心材料、有序化膜电极等关键部件、膜电极中发生的电化学反应与机理等基础性问题为主要研究对象, 以创生新思想、新知识为首要目标。

分别从 2009 和 2011 年起, PEMFC 专利数量与论文数量在持续了近 10 年的上升之后相继下降, 耐人寻味。这是因为随着政府支持的重点转向锂离子电池所引发的研发项目减少、研发人员流失所致? 还是燃料电池汽车技术开发阶段基本结束, 开始进入产业化阶段? 本文认为日本已经率先进入燃料电池汽车产业化阶段的前夕。在此阶段, 形成较多论文与专利成果的技术研发将会让位于难以大量形成论文、专利的降低成本、量产技术开发、基础设施建设以及生产管理。笔者同时认为, 车用燃料电池技术距离商业化(少量专用车在细分市场销售)可能不远, 但距离产业化和普及应用还任重道远。随着人们对电动汽车本质局限性认识的增加, 燃料电池汽车的研发势必还会升温, 专利与论文数量也还会随之回升。

参考文献

- 1 欧阳明高. 汽车新型能源动力系统技术战略与研发进展. 内燃机学报, 2008, 26: 107-114
- 2 马建新, 衣宝廉, 明平文. 氢能及燃料电池技术的发展. 电气技术, 2004, 11: 21-27
- 3 Shigeaki M, Masahiro I, Shigeki H, et al. Vertically aligned carbon nanotube electrodes for high current density operating proton exchange membrane fuel cells. J Power Sources, 2014, 253: 104-113
- 4 Bussian D A, Odea J R, Metiu H. Nanoscale current imaging of the conducting channels in proton exchange membrane fuel cells. Nano Lett, 2007, 7: 227-232
- 5 Wen Z H, Ci S Q, Zhang F, et al. Nitrogen-enriched core-shell structured Fe/Fe₃C-C nanorods as advanced electrocatalysts for oxygen reduction reaction. Adv Mater, 2012, 24: 1399-1404
- 6 Liang H W, Cao X, Zhou F. A free-standing Pt-nanowire membrane as a highly stable electrocatalyst for the oxygen reduction reaction. Adv Mater, 2011, 23: 1467-1471
- 7 Lou J, Wang L Y, Mott D. Core/shell nanoparticles as electrocatalysts for fuel cell reactions. Adv Mater, 2008, 20: 4342-4347
- 8 Pan C F, Wu H, Wang C. Nanowire-based high performance "micro fuel cell": One nanowire, one fuel cell. Adv Mater, 2008, 20: 1644
- 9 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望. 电化学, 2012, 18: 1-13
- 10 Yoshida T, Kojima K, Yokoyama T, et al. Development trends and popularization scenario for fuel cell vehicle. ECS Trans, 2011, 41: 3-12
- 11 衣宝廉. 燃料电池车(发动机)的现状. 第 30 届全国化学与物理电源学术年会, 上海, 2013

The evolution of worldwide research and development on fuel cell for vehicle application based on statistical analysis of literature: A comparative study of major countries

ZHANG JianBo¹, GE Hao¹ & WANG Cheng²

¹ State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Nearly 10 years of intensive research and development worldwide has resulted in great progress in terms of the performance, durability and cost of fuel cells for vehicle applications. As a result, a new wave of vehicle fuel cell industrialization is approaching. This study provides a statistical analysis of the literature on fuel cells for vehicle applications; to create an overall view of the worldwide patterns of research and development (R&D) in this technology, to clarify the pathways of development, and to identify new trends in technological innovation. The analysis includes the quantity and quality of papers and patents, the most focused-on areas and topics of R&D, and the breadth and concentration of participating research institutes. Furthermore, the gap between China and advanced countries was investigated, and the existing problems that China has in R&D and industrialization in this field were documented. Finally, measures for accelerating vehicle fuel cell industrialization in China were proposed from the perspective of the R&D patterns identified.

fuel cell vehicles, proton exchange membrane fuel cell, literature survey and statistics, R&D ecology, R&D layout

doi: 10.1360/N972014-00059