

电堆：师夷长技，方可制夷

——氢能燃料电池产业前沿系列五

行业深度

◆目前全球范围内燃料电池车的生产规模普遍不高，规模效应降本是当前主导方式，后期则体现在技术与工艺上。根据美国能源部数据，电堆生产规模为1000套/年时，燃料电池乘用车总成本约为6.50万美元，燃料电池系统成本为215美元/kW，电堆成本为153美元/kW；当年产量增至1万套时，系统成本降至93美元/kW，电堆成本降至53美元/kW，燃料电池系统成本、电堆成本分别降低57%和65%。当生产规模由1万套/年增长至50万套/年时，质子交换膜和气体扩散层成本仍旧会随着规模扩大而降低，但此时电堆成本主要由电极催化剂和双极板的材料用量及价格决定，这与技术及工艺水平密切相关。

◆铂边际净需求不会限制燃料电池车导入期发展，当燃料电池车数量达百万量级时，铂需求将快速增长。（1）铂电极催化剂需求需综合考虑：1）燃料电池用铂对柴油商用车尾气催化剂具有替代效应；2）电极催化剂铂负载量将随技术的进步而减少。根据我国规划，2020/2025/2030年燃料电池车数量将达到5千/5万/100万辆，我们进而基于商用、乘用车占比4:1、铂负载量0.4、0.2、0.125g/kW，柴油商用车被替代且以尾气催化剂5克/辆铂用量假设进行测算，铂净需求增量（以5年为时间跨度）为0.212吨/0.960吨/10.50吨。（2）双极板材料需求（石墨或金属）：假设单车所需双极板石墨/金属的量约为60kg，2020年电堆比功率为2kW/kg、2025年后达到2.5kW/kg，测算出至2020/2025/2030年，石墨/金属的需求量为0.029万吨/0.232万吨/4.64万吨，对相关材料供需边际影响有限。

◆国内燃料电池相关产业薄弱，电堆关键材料及核心技术与国外差距较大，政策可推动关键零部件的国产化进程。锂电池电动车的补贴已经退坡，燃料电池车补贴却依然坚挺，除性能差异及功能互补外，政策的另一方面考量在于能源安全和对先进制造的推动。我们认为，燃料电池产业链在政策及资本的双重刺激下，将会迎来发展机遇；但也需要清楚意识到，电堆的关键材料供给及技术水平，如电极催化剂、双极板，质子交换膜及气体扩散层等，国内企业相较世界领先企业依然较为落后，在此浪潮中，关键零部件的国产化进程将是重要的看点，也有助于产业链降本；同时需要警惕不重视研发、注意力仅局限于组装的企业和产业环节将持续掣肘于国际先进技术，从而无法显著提升利润水平。

◆投资观点：作为燃料电池车的核心部分，燃料电池电堆制造企业及各组件提供商将最先受益；规模效应对于燃料电池成本降低效果显著，能够率先实现大规模生产的各组件供应商及电堆制造商将在该行业中取得先机；

（1）关注电堆各组件供应商——东岳集团、贵研铂业、上海弘枫、上海弘竣、上海冶臻新能源（上汽集团、富瑞特装）、武汉喜马拉雅、上海河森等；

（2）关注燃料电池电堆制造商——潍柴巴拉德（潍柴动力）、神力科技、新源动力等。

◆风险分析：燃料电池电堆核心技术和关键材料自主化发展进程不及预期，部分组件或技术发展受限；产业化及规模化能力不足，生产成本偏高；氢能燃料电池车发展速度不及预期。

分析师

殷中枢（执业证书编号：S0930518040004）

010-58452071

yinzs@ebsecn.com

马瑞山（执业证书编号：S0930518080001）

021-52523850

mars@ebsecn.com

王威（执业证书编号：S0930517030001）

021-52523818

wangwei2016@ebsecn.com

联系人

杨耀先

021-52523656

yangyx@ebsecn.com

郝骞

021-52523827

haoqian@ebsecn.com

行业与上证指数对比图



资料来源：Wind

相关研报

加氢站：千车易得，一“站”难寻——氢能与燃料电池产业前沿系列四

..... 2019-08-07

小小气瓶，大大学问——氢能与燃料电池产业前沿系列三

..... 2019-07-09

弃风弃光，化电为氢——氢能与燃料电池产业前沿系列二

..... 2019-06-06

氢能时代，点煤成金——氢能与燃料电池产业前沿系列一

..... 2019-06-05

投资聚焦

研究背景

我们前期已经完成四篇氢能与燃料电池产业前沿报告的撰写，详细对煤制氢、弃风弃光制氢、车载储氢瓶、加氢站产业进行了详细讨论，本篇报告则是主要针对燃料电池车的动力核心——电堆进行分析，详细探讨了其发展情况、技术水平、降本路线、国内外产业化等问题。

我们的创新点

- (1) 对燃料电池电堆成本构成进行了拆分，分析了规模效应对电堆整体及各组件成本的影响；
- (2) 重点分析和比较了电极催化剂、双极板的发展及降本路线情况；
- (3) 比较了国内外燃料电池电堆及关键组件性能及发展情况，对国内燃料电池电堆及关键组件的未来发展目标进行了分析。

投资观点

我国大力推动燃料电池车产业发展，电堆作为燃料电池车的动力核心是未来的重中之重，但目前燃料电池电堆制造成本依旧较高；因此，电极催化剂、双极板、质子交换膜及气体扩散层的规模化生产以及国产化是燃料电池车当前降本的重要路径。

我们认为，在政策的推动下，燃料电池车产业链将快速发展，电堆制造企业及各组件提供商将最先受益；规模效应对于燃料电池成本降低效果显著，能够率先实现大规模生产的各组件供应商及电堆制造商将在该行业中取得先机。

(1) 关注电堆各组件供应商——双极板：石墨双极板研发制造企业上海弘枫、上海弘竣、金属双极板研发制造企业上海冶臻新能源（上汽集团、富瑞特装）；催化剂：贵金属材料全产业链覆盖并且和上汽集团合作进行催化剂开发研究的贵研铂业、和清华大学合作进行催化剂开发研究的武汉喜马拉雅；质子交换膜：和福特、奔驰等国际汽车厂商进行合作的国内质子交换膜研发制造企业东岳集团；气体扩散层：碳纸和碳布研发制造企业上海河森等；

(2) 关注燃料电池电堆制造商——全球领先燃料电池制造商巴拉德和重卡产业链龙头潍柴动力联合设立的潍柴巴拉德（潍柴动力）、国内燃料电池技术研发和产业化先行企业神力科技、国内领先的燃料电池电堆和系统企业新源动力等。

目 录

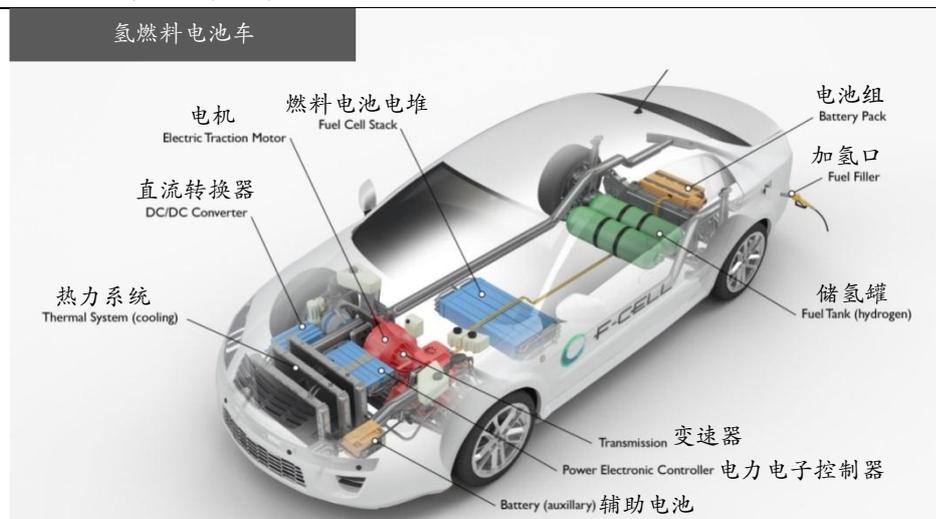
1、 产业发展初期，电堆攻坚时不我待.....	4
1.1、 电堆——燃料电池车的动力核心.....	4
1.2、 降本迫在眉睫，规模效应首当其冲.....	6
1.3、 各国“逐鹿”，计划快速迈过产业初期.....	8
2、 规模效应和技术突破是电堆降本的两条路径.....	12
2.1、 实现规模生产后，催化剂成本由铂材料主导.....	12
2.2、 规模效应对双极板降本体现在制造及涂层成本.....	16
2.3、 质子交换膜规模化效应显著，需强化产业配套.....	20
2.4、 大规模生产是降低气体扩散层成本的有效方法.....	21
3、 政策加速燃料电池产业国产化进程.....	23
3.1、 国内催化剂技术与国外存差距，正在不断缩小.....	23
3.2、 石墨双极板已实现国产化，金属双极板国内供应较少.....	24
3.3、 国内质子交换膜技术已趋于成熟.....	27
3.4、 国内气体扩散层尚未形成产业化.....	29
3.5、 新源动力和神力科技电堆制造在国内具优势.....	29
4、 投资建议.....	32
5、 风险分析.....	34

1、产业发展初期，电堆攻坚时不我待

1.1、电堆——燃料电池车的动力核心

燃料电池车是一种使用氢燃料电池发电的新型电动车，它比传统内燃机汽车效率更高，且只排放水蒸气与热量，同时又比锂电动车具有更高的能量密度，是一种新型环保交通工具。燃料电池系统是燃料电池车的核心部分，为其提供了动力来源。在系统中，燃料（氢气、氧气）储存的化学能，通过燃料电池转化为电能。燃料电池系统可分为四部分：电化学反应系统、热管理系统、水管理系统和电力系统。

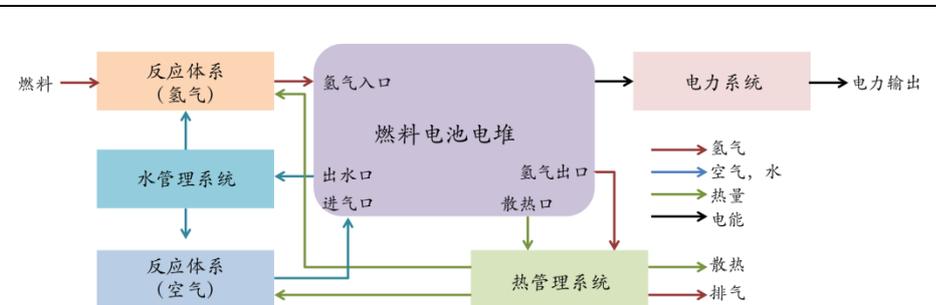
图 1：燃料电池车整车示意图



资料来源：Alternative Fuels Data Center

电堆，即燃料电池电化学反应系统。在电化学反应系统中，反应物氢气和空气以一定的化学计量比进入燃料电池电堆中，反应生成电能和水。电堆决定了整个燃料电池的功率密度与净功率，是整个燃料电池动力系统的核心部分。

图 2：燃料电池电化学反应系统工作基本原理



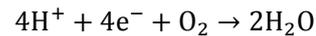
资料来源：W.R.W. Daudet al. 《PEM fuel cell system control: A review》

目前，燃料电池车中应用最广泛的是质子交换膜燃料电池，其电堆是由**膜电极组件（MEA）**、**双极板（BP）**、**密封垫片**和**端板**组成。

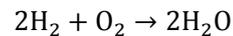
(1) **膜电极组件**包括**质子交换膜（PEM）**、**催化剂层（CL）**和**气体扩散层（GDL）**，当有氢气与空气通入时，在其中发生电化学氧化还原反应产生电能。膜电极组件中的电极由气体扩散层与催化剂层组成。在催化剂存在条件下，发生在阳极的氢气氧化反应为：



发生在阴极的氧气还原反应为：



燃料电池的整体反应为：



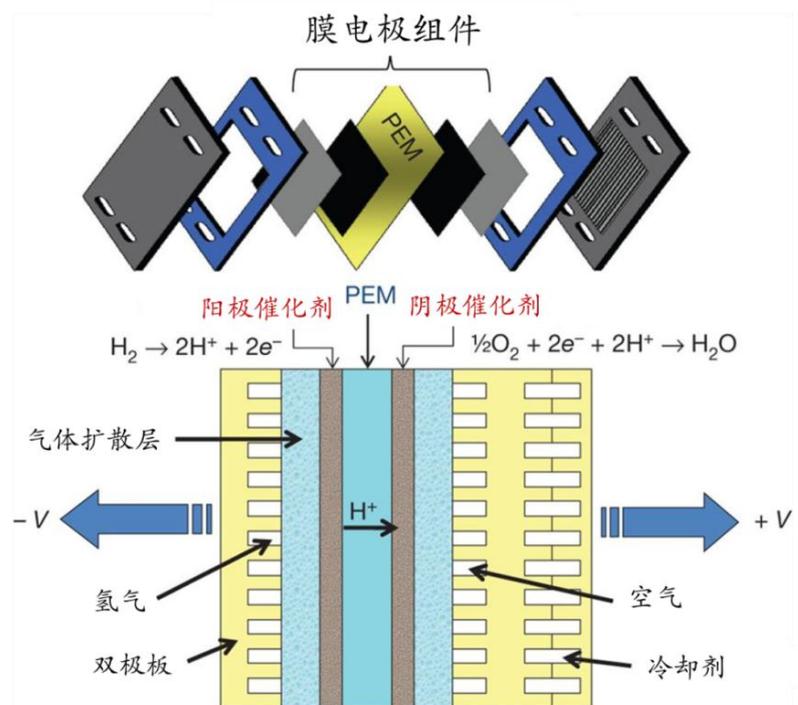
质子交换膜将质子从阳极传递到阴极，与外电路中从阴极通过负载流向阳极的电子构成闭合回路，并在阴极与氧气反应生成水；

(2) **双极板**通过气体通道或流场使氢气与空气分别在膜电极组件的两极均匀分布，并在相邻的阴极和阳极之间传递电子；

(3) **密封垫片**主要用于防止电堆发生气体泄漏，从而发生危险；

(4) **端板**是燃料电池电堆最外面固定整个电堆的两块板，并通过负载将电流从阳极传导到阴极并产生电功率。

图 3：燃料电池电堆工作原理



资料来源：Peiyun Yiet al. «Carbon-based coatings for metallic bipolar plates used in proton exchange membrane fuel cells»

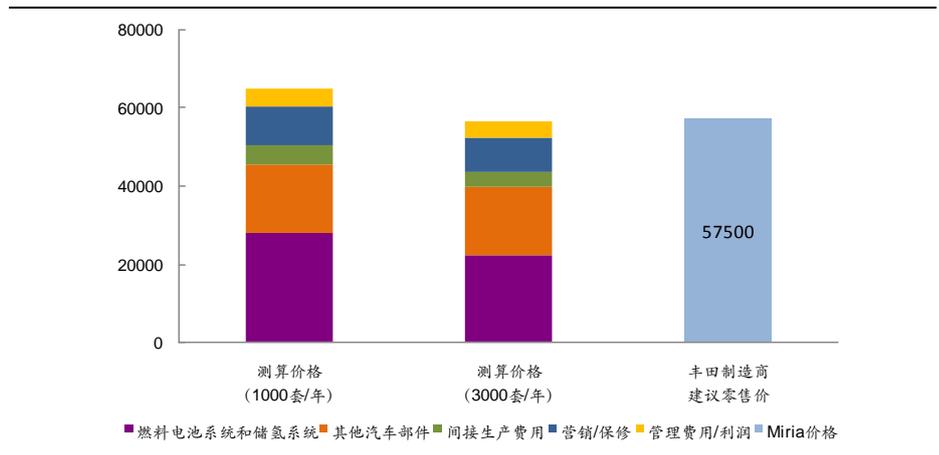
1.2、降本迫在眉睫，规模效应首当其冲

2017年丰田 Miria 的销售价格为 57500 美元，美国能源部基于丰田 Miria 公开资料，对燃料电池车整车价格进行了拆分测算：

当生产规模达到 3000 套/年时

- (1) 燃料电池系统和储氢系统成本为 22372 美元，其中燃料电池系统成本为 16204 美元（占整车成本为 28.6%），储氢系统成本为 6168 美元（占整车成本约 10.9%）；
- (2) 燃料电池系统和储氢系统的间接生产费用 3803 美元，占总成本的 6.7%；
- (3) 汽车其他部件成本（包括电力牵引电机、逆变器、齿轮箱、滑翔机、再生制动系统和加热、通风和冷却系统等）为 17600 美元，占总成本的 31.2%；
- (4) 市场营销和保修费用为 8755 美元，占比 15.5%；
- (5) 企业管理费用和利润为 3940 美元，占比 7.0%。

图 4：燃料电池车整车成本构成



资料来源：美国能源部，光大证券研究所整理；单位：美元

电堆是根据所需要的电池功率组装一定数量的由膜电极与双极板组件构成的单元。电堆成本很大程度决定了燃料电池系统的成本，进而影响整车成本，降低燃料电池电堆成本对于燃料电池车的推广与应用至关重要，而规模效应、催化剂铂负载量、双极板材料等均是影响成本的重要因素。

表 1：不同生产规模下燃料电池系统与电堆成本

生产规模套/年	1k	10k	30k	80k	100k	500k
燃料电池系统成本 (美元/kW)	215	93	71	61	59	53
电堆成本 (美元/kW)	153	53	39	32	31	27
电堆成本占燃料电池系统成本比例	71%	57%	55%	52%	53%	51%

资料来源：美国能源部，光大证券研究所整理

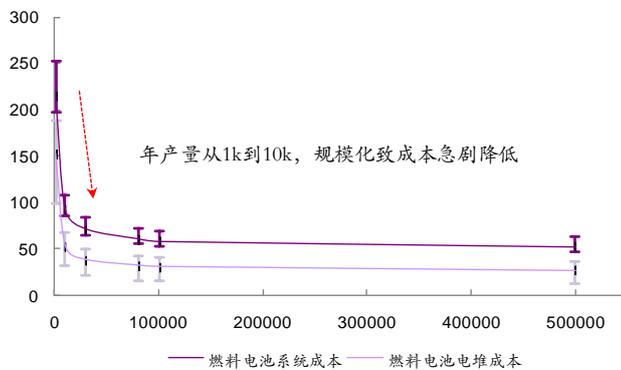
上述影响因素中，在发展初期规模效应最为显著，当年产量由1千套增加到1万套时，电堆成本可降低65%。美国能源部估算了不同生产规模对单个燃料电池系统成本及电堆成本的影响：

(1) 年产量为1000套时，燃料电池系统成本为215美元/kW，电堆成本为153美元/kW；当年产量达到1万套时，系统成本降至93美元/kW，电堆成本降至53美元/kW，燃料电池系统成本降低57%，电堆成本降低65%；

(2) 产量由1万套/年增长至10万套/年时，燃料电池系统成本与电堆成本分别可降至59美元/kW和31美元/kW，分别降低37%和42%；

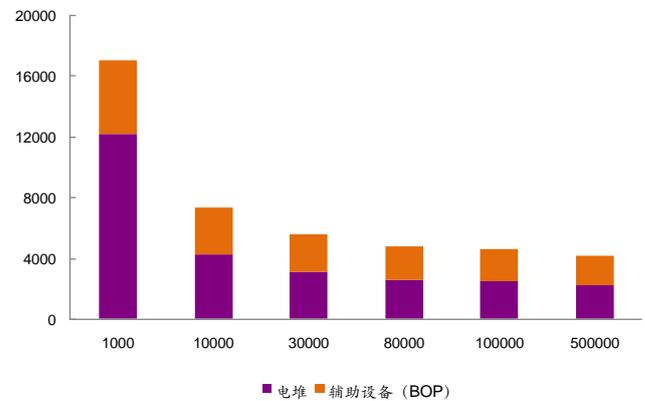
(3) 产量由10万套/年增长至50万套/年时，燃料电池系统成本和电堆成本分别可降至53美元/kW和27美元/kW，分别降低10%和13%。

图5：规模效应对燃料电池系统及电堆成本的影响



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/kW，横轴为生产规模，单位：套/年；图中误差线为模型计算出的最可能值与最高值和最低值之间的差

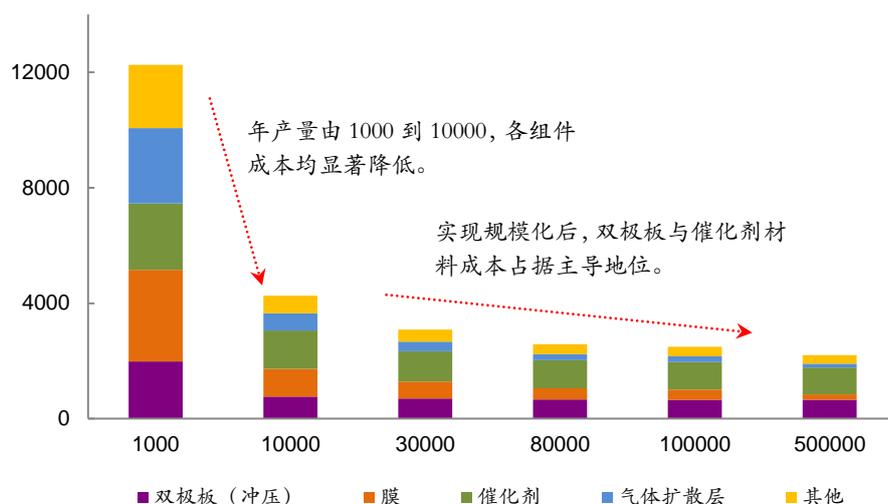
图6：规模效应对电堆和辅助设备系统成本的影响



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/套，横轴为生产规模，单位：套/年

目前全球范围内燃料电池车的生产规模普遍不高，规模效应降本是当前主导方式，当生产规模从百套/年到千套/年数量级变化时，各组件的制造成本均有显著降低；当生产规模增长至1万套每年时，双极板、催化剂、质子交换膜和气体扩散层成本仍具有规模化降本空间，其他组件已开始不是特别明显；当生产规模由1万套/年增长至50万套/年时，质子交换膜和气体扩散层成本仍旧会随着规模扩大而降低，但此时电堆成本主要由电极催化剂和双极板的材料用量及价格决定，这与技术及工艺水平密切相关。

图 7：不同生产规模下电堆各组件成本占比



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/套；横轴为生产规模，单位：套/年

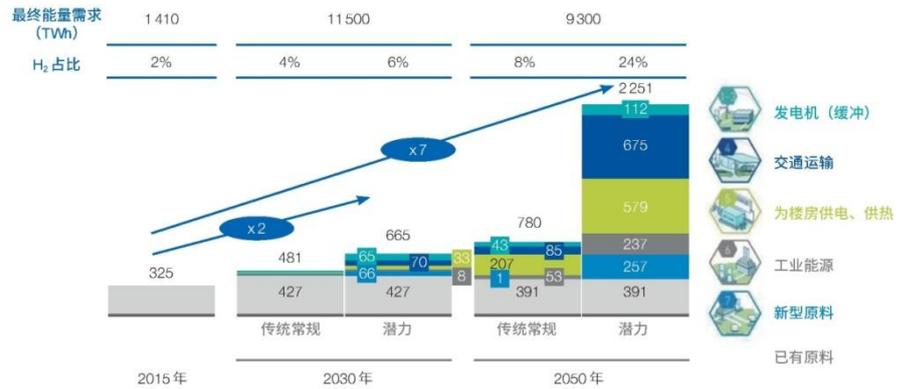
1.3、各国“逐鹿”，计划快速迈过产业初期

根据中国氢能联盟发布的《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》，世界主要国家对于燃料电池电堆关键部件的技术研究已逐步取得一定进展，目前国际先进水平电堆功率已达到 3.1 kW/L，乘用车系统使用寿命可达 5000 h，商用车使用寿命可达 20000 h。截至 2018 年底，全球氢燃料电池的装机量超过 2090.5MW，乘用车销售累计约 9900 辆，初步实现商业化应用。

(1) 美国燃料电池乘用车保有量为 5899 辆，燃料电池动力叉车运营量超过 23000 台。美国是最早将氢能及燃料电池作为能源战略的国家，目前已将氢能和燃料电池作为美国优先能源战略，积极开展氢能及燃料电池的前沿技术研究，近十年对氢能及燃料电池给予的支持超过 16 亿美元。美国在氢能及燃料电池领域拥有的专利数位居世界第二位，液氢产能和燃料电池乘用车保有量居全球第一。截至 2018 年底，全国燃料电池乘用车数量达到 5899 辆，全国燃料电池动力叉车运营量超过 23000 台，多个州均在使用或计划使用燃料电池客车，全年固定式燃料电池安装超过 100MW，累计固定式燃料电池安装超过 500MW。

(2) 欧盟部署燃料电池乘用车约 1080 辆。欧洲将氢能作为能源安全和能源转型的重要保障，2014-2020 年期间，欧盟燃料电池与氢能联合行动计划项目对氢能及燃料电池的研发推广提供的资金支持预计将达到 6.65 亿欧元。截至 2018 年底，欧盟部署燃料电池乘用车约 1080 辆。德国是欧洲发展氢能最具代表性的国家，于 2006 年启动了氢能和燃料电池技术国家创新计划 (NIP)，从 2007 至 2016 年第一阶段共投资 14 亿欧元，2017-2019 年第二阶段工作计划投资 2.5 亿欧元，目前德国在全球氢能及燃料电池领域占据领先地位，可再生能源制氢规模全球第一，燃料电池的供应和制造规模位居全球第三。

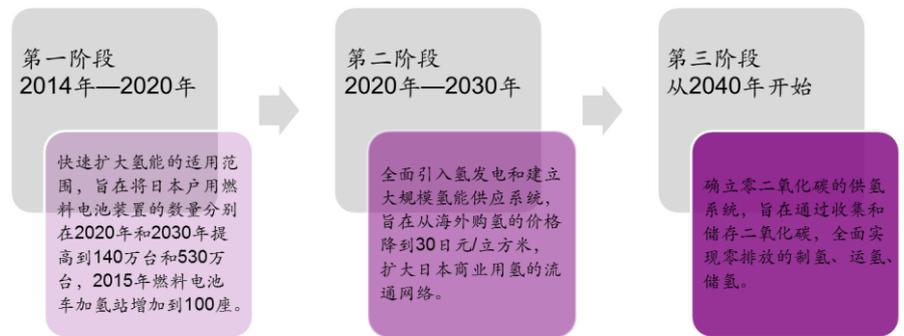
图 8：欧洲未来氢能市场需求



资料来源：邵志刚等《氢能与燃料电池发展现状及展望》，欧洲燃料电池和氢能联合组织

(3) 日本燃料电池乘用车保有量已达到 2839 辆。日本作为高度重视氢能产业发展的国家，提出了“成为全球第一个实现氢能社会的国家”的目标，规划了日本实现氢能社会战略的技术路线。日本是全球拥有氢能和燃料电池专利数最多的国家，目前已经实现燃料电池车和家用热电联供系统的大规模商业化推广。日本丰田推出的 Mirai 燃料电池车是目前全球销量最大的燃料电池乘用车，占全球燃料电池乘用车总销量的 70% 以上。截至 2018 年底，日本燃料电池乘用车保有量已达到 2839 辆，根据日本政府规划，预计 2025 年保有量达到 20 万辆，2030 年 80 万辆，2040 年实现燃料电池车的普及。

图 9：日本氢和燃料电池战略路线



资料来源：日本经济产业省、中国储能网

(4) 韩国燃料电池乘用车保有量约 300 辆。韩国政府自 2008 年以来持续加大对氢能技术研发和产业化推广的扶持力度，先后共投入 3500 亿韩元推进氢能及燃料电池技术研发，预计将在未来 5 年投入 2.6 万亿韩元，于 2030 年进入氢能社会。2018 年，韩国现代汽车正式发布第二代燃料电池车 Nexu，电堆最大输出功率达到 95 kW，续航里程可达 800 公里。截至 2018 年底，韩国燃料电池乘用车保有约 300 辆，计划保有量 2025 年 15 万辆，2030 年 63 万辆，到 2040 年分阶段生产 620 万辆。

(5) 中国燃料电池车年产量预计在 5 年内达到万辆规模。由于商用车油耗

与尾气排放问题较乘用车更为严重，同时商用车的运行线路相对固定，对加氢站依赖性较乘用车低，因此未来燃料电池车在商用车领域的发展前景更为广阔。现代汽车集团商用事业本部理事安广铉提及燃料电池商用车的开发方向时指出：“新能源商用车根据用途和运行特性，中小型适合采用纯电动，中型以上适合采用氢燃料电池动力。”国家信息中心副主任徐长明在 2018 年举办的“第六届中韩汽车产业发展研讨会”上指出，“中国商用车领域需要燃料电池车，主要原因有三点：第一，商用车数量虽然不是很多，但油耗高、排放高，替换效果显著；第二，燃料电池车相比锂电池汽车在大载重、长续航、高强度的交通运输体系中具有先天优势，适合在商用车领域应用；第三，我国燃料电池商用车已经具备一定基础，目前在示范运营阶段，具备初步实现商业化的条件”（资料来源：网易汽车）。目前我国宇通、福田等公司已开发了多款燃料电池客车，东风特汽、中国重汽等也开发了燃料电池物流车、牵引车等专用车。

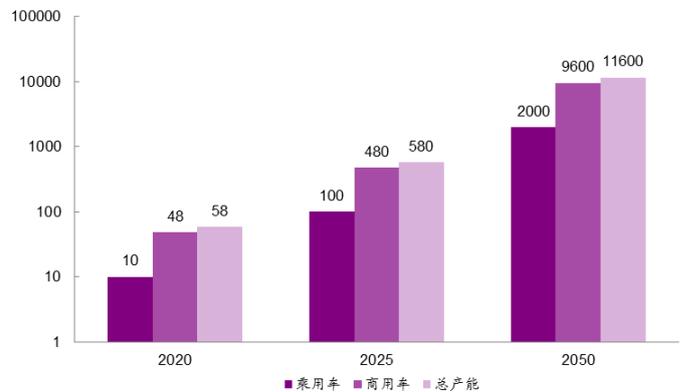
根据 2016 年 10 月发布的《节能与新能源汽车技术路线图》，我国燃料电池车发展目标为 2020 年达到 5000 辆，2025 年达到 5 万辆，2030 年燃料电池车辆保有量达到 100 万辆。由于燃料电池车未来发展的主要目标为商用车，结合目前发展情况，可估计未来燃料电池车商用车与乘用车比例约为 4:1；根据目前国内外商用车与乘用车电堆功率，我们预计未来乘用车电堆功率约为 100kW，商用车功率约为 120kW。

图 10：中国燃料电池车发展规划



资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图》

图 11：中国燃料电池车未来产能预测



资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图》，光大证券研究所预测，单位：万 kW

我国燃料电池研发与产业化推动主要集中在质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池领域，自“十五”新能源汽车重大科技专项启动以来，在国家一系列重大项目的支持下，我国燃料电池技术取得了一定进展。就质子交换膜燃料电池而言，膜电极、双极板和质子交换膜等已具有国产化能力，但生产规模较小；电堆产业发展较好，但辅助系统关键零部件产业发展较为落后；系统及整车产业发展较好，配套厂家较多且生产规模较大，但大多采用国外进口零部件，对外依赖度高。

表 2：国内外燃料电池车技术发展现状

领域	技术指标	国内先进水平	国际一流水平
燃料电池电堆	额定功率等级	36kW (在用)	60-80kW
	体积功率密度	1.8kW/L (在用)	3.1kW/L
		3.1kW/L (实验室)	
	耐久性	5000h	>5000h
	低温性能	-20℃	-30℃
应用情况	百台级别 (在用)	数千台级别	
核心零部件	膜电极	电流密度 1.5A/cm ²	电流密度 2.5A/cm ²
	空压机	30kW 级实车验证	100kW 级实车验证
	储氢系统	35MPa 储氢系统——Ⅲ型瓶组	70MPa 储氢系统——Ⅳ型瓶组
	双极板	金属双极板——试制阶段；石墨双极板小规模使用缺少耐久性和工程化验证	技术双极板技术成熟，完成实车验证；石墨双极板完成实车验证
	氢循环装置	氢气循环泵——技术空白；30kW 级喷射器——可量产	100kW 级燃料电池系统用氢气循环泵技术成熟
关键原材料	催化剂	铂载量约 0.4g/kW	铂载量达 0.2g/kW
		小规模生产	产品化生产阶段
	质子交换膜	性能与国际相当，中试阶段	产品化生产阶段
	碳纸/碳布	中试阶段	产品化生产阶段
	密封剂	国内尚无公开资料和产品	产品化批量生产阶段

资料来源：中国氢能联盟

表 3：国内外燃料电池乘用车、商用车性能

乘用车厂商	丰田	本田	现代	商用车厂商	美国 Van Hool	美国 New Flyer	德国戴姆勒奔驰	日本丰田和日野	佛山飞驰
型号	Mirai	Clarity	ix35	燃料电池功率 kW	120	150	2*160	2*114	88
充能时间 min	3	3	3	燃料电池厂家	US FuelCell	Ballard HD6	AFCC	Toyota	上海重塑
电堆/电池容量 kW	114	103	95	电机功率 kW	2*85	2*85	2*80	2*110	90
电堆/电池功率密度 kW/L	3.1	3.1	1.65	氢气气瓶	350bar, 8 个	350bar, 8 个	350bar, 7 个	700bar, 8 个	350bar, 8 个
电堆/电池体积/重量	37L, 56kg	33L	60L	氢气量	40 kg	56kg	35kg	480L, 18kg	25kg
续航里程 km	502	589	415	耐久性 h	18000	8000	12000	未公开	10000
百公里加速 s	9.6	8.8	12.5						
电机参数	113kW	120kW	100kW	续驶里程	300 英里	300 英里	250km	未公开	400km
	335Nm	300Nm	300Nm						

资料来源：陈广等《国内外燃料电池车的发展前景及市场状况》

2、规模效应和技术突破是电堆降本的两条路径

2.1、实现规模生产后，催化剂成本由铂材料主导

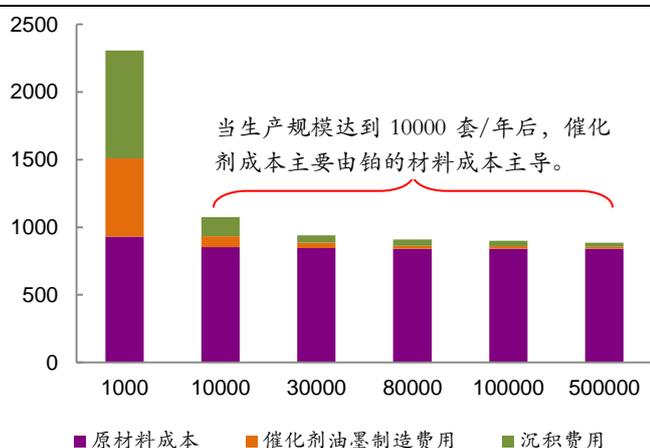
催化剂层是整个膜电极组件中最复杂的部分之一，它包括了燃料电池发生电化学反应、进行质子和电荷转移所必需的组分，并为反应物气体传输和液态水放电提供空间。

在质子交换膜燃料电池中，一般使用贵金属铂（Pt）或其合金作催化剂、以及碳作为载体，目前已经提出的催化剂种类包括：

- (1) PtCo/C ((Brookhaven 国家实验室/ChemCat, 丰田/田中)；
- (2) PtNi (3M, 庄信万丰/通用汽车)；
- (3) PtMnCo (3M-NSTF)；
- (4) Pt/C (通常为阳极催化剂)。

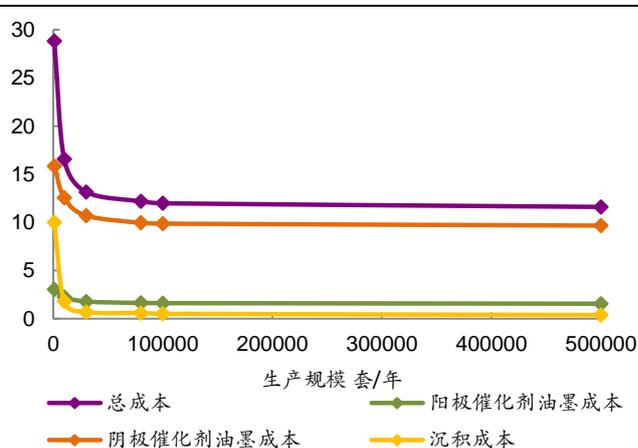
大规模生产情况下，催化剂成本由铂的材料成本主导，因此如何降低贵金属用量、提高催化剂效率一直是燃料电池研究的重点。燃料电池电极催化剂成本主要可分为：**铂原料成本、催化剂油墨的制造成本和将催化剂沉积到膜上的制造成本**。当生产规模达到 10000 套/年后，催化剂成本主要由铂的材料成本主导，因此，降低电极催化剂中铂负载，或使用非贵金属替代对于燃料电池车降本至关重要。

图 12：催化剂成本构成



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/套；Pt 的平均成本 1500 美元/盎司；横轴为生产规模，单位：套/年

图 13：规模效应对催化剂成本影响



资料来源：美国能源部；单位：美元/kW

根据我们的测算，铂边际净需求不会限制燃料电池车导入期发展，当燃料电池车数量达百万量级时，铂需求将快速增长。我们认为燃料电池车发展带来的铂需求应从两方面考量，一方面，燃料电池车具有对当前乘用车，油气式商用车具有替代作用：根据我国目前技术，单辆燃料电池乘用车耗铂量约为 40g，商用车耗铂量约为 48g，而目前单辆柴油商用车尾气净化装置所需铂

量约为 5 g，虽然燃料电池车对铂的需求量要远远高于柴油车，但随着技术不断进步，预期 2020 年我国催化剂负载将达到国际水平后，乘用车和商用车单车耗铂量可分别降至 20g 和 24g。另一方面，我国催化剂的铂负载量有望进一步下降：根据中国氢能联盟发布数据，我国目前燃料电池车催化剂负载量为 0.4g/kW，目前国际燃料电池车催化剂负载量为 0.2 g/kW，而随着技术进步，电极催化剂铂用量还将持续下降，目前铂负载量最低的为本田 Clarity 燃料电池车，仅为 0.125g/kW，单车铂耗量可低至 10g 左右，基本可达到产业化水平；至 2030 年，我国燃料电池车铂负载量也有望降至 0.125g/kW。

针对上述分析，我们对铂净需求量进行了测算，考虑了 1) 燃料电池用铂对柴油商用车尾气催化剂具有替代效应；2) 电极催化剂铂负载量将随技术的进步而减少。根据我国规划，2020、2025、2030 年燃料电池车数量将达到 5 千/5 万/100 万辆，我们进而基于商用、乘用车占比 4:1、铂负载量 0.4/0.2、0.125 g/kW，柴油商用车被替代且以尾气催化剂 5 克/辆铂用量假设进行测算，铂的净需求增量（以 5 年为时间跨度）分别为 0.212 吨/0.960 吨/10.50 吨。而根据 2018 年《全球铂钯年鉴》，2017 年全球铂钯总产量为 611 万盎司（约 190 吨）。

表 4：我国未来燃料电池车发展对铂的需求增量情况测算

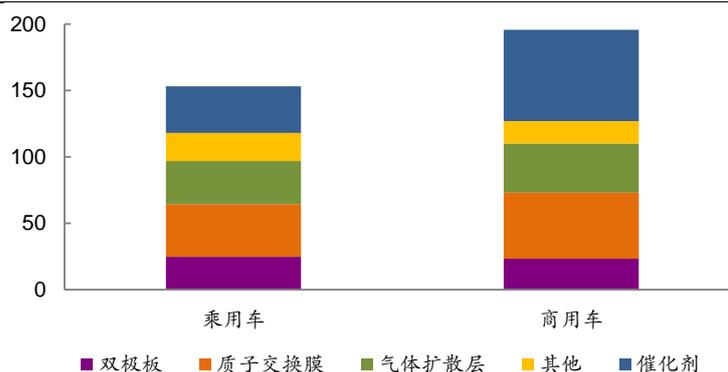
项目	2020	2025	2030
Pt 负载量 (g/kW)	0.40	0.20	0.125
单车铂用量 (g)			
乘用车	40	20	12.5
商用车	48	24	15
预计保有量 (辆)			
乘用车	1000	10000	200000
商用车	4000	40000	800000
单辆柴油商用车尾气催化剂铂用量 (g/辆, 替代)	5	5	5
燃料电池用铂需求总量 (吨)	0.232	1.16	14.5
铂净需求增量 (吨, 以 5 年为时间跨度)	0.212	0.96	10.5

资料来源：中国氢能联盟，光大证券研究所测算

注：测算过程考虑燃料电池商用车对柴油商用车 1:1 的替代作用

燃料电池商用车耐久性与铂负载量之间的平衡对其未来发展至关重要。影响电堆寿命的因素很多，其中电堆性能的下降是由铂催化剂中毒、表面积减少或利用率降低等因素引起的，而高催化剂负载量会提高电堆的使用寿命。由于商用车通常要求更高的耐久性，而提高电堆的铂负载量可以延长商用车的使用寿命，但会提高商用车成本并导致铂需求量的大大增加。因此，如何平衡铂用量与耐久性，是未来商用车后期发展的重要问题。

图 14：乘用车与商用车电堆成本构成比较



资料来源：美国能源部；单位：美元/kW

在膜电极组件中，电化学反应发生在需要三相边界的催化剂层。燃料电池性能主要取决于催化剂沉积方法和催化剂油墨的性能，对于大规模生产，**催化剂层的成本约占电堆总成本的 30% 以上**；因此，**催化剂沉积技术和催化剂油墨的配方决定了燃料电池的性能和成本**，在不牺牲电极性能的情况下尽可能降低铂催化剂负载量对于降低燃料电池电堆成本至关重要。

表 5：催化剂沉积技术比较

时间	沉积方法	方法简介	铂负载	功率	设备
80 年代	<p>喷涂法</p>	20 世纪 80 年代，通过喷涂或刷涂的方法将催化剂沉积在聚四氟乙烯上，该方法可将燃料电池的 Pt 负载由之前的 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 降至 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 。在膜电极组件制造过程中使用喷涂法沉积时，制备的催化剂油墨沉积在膜的两侧（阳极和阴极），然后在 70°C 下干燥，然后再与防潮碳纸组装。干燥所需的时间取决于喷在膜上的油墨，温度取决于催化剂油墨中溶剂的沸点。	$0.3\text{ mgPt}/\text{cm}^2$ (阳极) $0.4\text{ mgPt}/\text{cm}^2$ (阴极)	$430\text{ mW} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	喷枪
90 年代	<p>丝网印刷</p>	丝网印刷方法主要包括在膜表面上设置需要催化剂沉积的印刷矩阵。该方法首先要制备催化剂油墨，然后将催化剂油墨放入小型塑料容器中用高速搅拌机搅拌；最后，用丝网打印机将催化剂涂在薄膜上。丝网印刷方法简单有效。	$0.4\text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$ (阴极) $0.6\text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$ (阳极)	$800\text{ mW} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	打印刷
	<p>转印法</p>	转印法是将催化剂被涂覆在薄膜基底上；将催化剂转移到质子交换膜上；烘烤后去除薄膜基底。	$0.34 - 0.42\text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1\text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	转印基底
21 世纪早期	<p>溅射沉积法</p>	常用的真空沉积方法包括化学气相沉积、物理或热气相沉积和溅射沉积。溅射通常用于形成催化剂层，所形成的催化剂层比气相沉积更为密集。溅射沉积可以将催化剂负载量降低到超低水平，从而降低成本。	$0.01 - 0.16\text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$	$85\text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	磁控溅射系统
	<p>刮涂法</p>	在刮涂法中，用毛细管在膜上沉积一定量的催化剂浆液，然后使用涂布器将催化剂浆液均匀涂布在膜上。这种方法更精确、更快，但是催化剂浆液中使用溶剂和悬浮剂可能影响质子在膜中的传输，或导致膜对水的传输效率降低。	$0.125\text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$	$5\text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	毛细管涂沫器

目前	<p>电喷雾沉积</p>	<p>电喷雾法是基于液体或悬浮液在电场作用下的雾化，可用于制备高催化剂分散度的催化剂层。电喷雾沉积过程如下：使用注射泵控制悬浮液从毛细管进入针头的速度，然后在针和基板之间施加电位差使悬浮液形成带电的液滴喷雾，在电场作用下，带电液滴到达基板在此过程中溶剂会蒸发。在溶剂蒸发过程中，液滴在库仑力的作用下分散成更小的颗粒。</p>	$0.052 \text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$ $0.022 \text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$	$42 \text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	针头注射泵
	<p>双离子束辅助沉积</p>	<p>双离子束辅助沉积是物理气相沉积和离子束轰击的结合。电子束蒸发器可产生沉积在基底上的涂层原子蒸汽，离子以几百到几千电子伏（500-2000 eV）的能量加速进入物理气相沉积膜。</p>	$0.04 - 0.12 \text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$	$3.862 \text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	电子束蒸发器
	<p>喷墨打印</p>	<p>喷墨打印机使用静电场来引导催化剂油墨的移动，在大型喷墨打印机中，它们可以使用能够容纳多种溶液的多个墨盒，用于多种应用或膜电极组件成分的变化。该方法中最重要的参数是油墨粘度和表面张力，以及粒径。每一滴催化剂的能量必须足以克服油墨的粘性流动和表面张力，但粘度必须足够低，以使油墨贮存器能够迅速地将其重新装满。</p>	$0.020 \text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$	$16 \text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	喷墨打印机
	<p>超声波喷涂</p>	<p>该技术过程包括混合催化剂油墨，并使用工作频率为 120 kHz 的喷雾仪器将其超声喷涂到气体扩散层上。使用超声波注射器（60 kHz）在针内雾化之前将催化剂墨水放入其中，并按照设定的流速喷射。为了达到所需的铂催化剂负载量，此步骤将重复多次。最后一步是在 50°C 下干燥。</p>	$0.232 \text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$ (阴极) $0.155 \text{ mgPt} \cdot \text{cm}^{-2}$ (阳极)	$1.69 \text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$ $2.32 \text{ W} \cdot \text{mgPt}^{-1}$	玻璃喷雾器

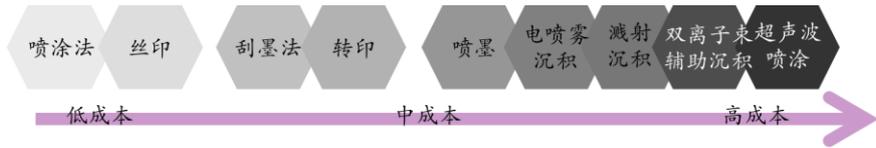
资料来源：De las Heras A et al. «From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core»

表 6：催化剂沉积技术比较

沉积方法	优点	缺点	成本
喷涂	适用于小型膜电极组件 操作简单 高效	不适用于超低催化剂负载 催化剂油墨越多，干燥时间越长 不易控制均匀性 精度不高	低
丝网印刷	适用于小型膜电极组件 操作简单 高效	不易控制均匀性 所需时间长 不适合超低催化剂负载	适中
转印	可批量生产、界面阻力低、高效	热处理会导致结构变化	适中
溅射沉积	超低催化剂负荷、成本低	需要严格的真空条件 不易批量生产	高
刮涂	高精度、可再生、高效、厚度可控	不适合批量生产	高
电喷雾沉积	超低铂负载、催化剂分散性高、适合大规模生产、无真空要求、易于扩展到任何尺寸、实验装置简单	需要提高再生性和性能	高
双离子束辅助沉积	金属利用效率高、催化剂负载量非常低、可低温操作	不适合批量生产	很高
喷墨印刷	精度高、快速、可大规模生产	-	很高
超声波喷涂	超低铂负载、精确、可控	不适用于高粘度催化剂油墨	很高

资料来源：De las Heras A et al. «From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core»

图 15：催化剂沉积技术成本比较



资料来源：De las Heras A et al.《From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core》

2.2、规模效应对双极板降成本体现在制造及涂层成本

双极板在燃料电池电堆的质量、体积和成本中占据着主导地位，因此，不断提高双极板制造技术对于减小燃料电池电堆质量与体积、降低燃料电池电堆成本具有重要意义。双极板在燃料电池结构中主要有以下几个基本功能：

(1) 分离单个单元；(2) 输送反应气体；(3) 构成电流通路；(4) 去除反应生成物水；(5) 散热；(6) 固定燃料电池内部结构。

基于上述功能，双极板应具有下列特性：

(1) 高导电性 ($>100 \text{ S/cm}$)；(2) 低渗透性 ($<2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)；(3) 高耐腐蚀性 ($<16 \mu\text{A/cm}^2$)；(4) 弯曲强度 ($>59 \text{ MPa}$)；(5) 拉伸强度 ($>41 \text{ MPa}$)；(6) 冲击强度 ($>40.5 \mu\text{J/m}$)；(7) 抗压强度 ($>4200 \text{ kPa}$)；(8) 高导热性 ($>10 \text{ W/(m} \cdot \text{k)}$)；(9) 化学、电化学和热稳定性；(10) 低热膨胀系数；(11) 材料和加工成本较低等。

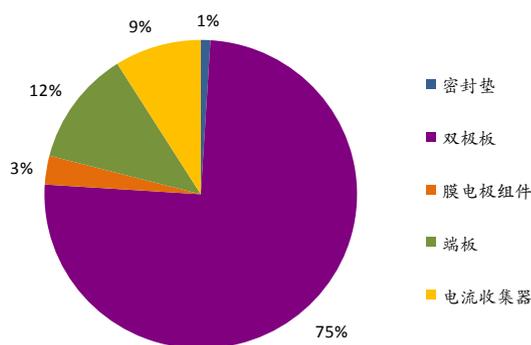
目前，根据材料可以将双极板分为五类：

(1) 无孔石墨双极板；(2) 涂层金属双极板；(3) 聚合物-碳复合双极板；(4) 碳-碳双极板；(5) 多孔/泡沫金属双极板。

根据《节能与新能源汽车技术路线图》，到 2020 年，我国燃料电池电堆比功率可达 2 kW/kg ，单车功率 100 kW 的燃料电池车单车所需双极板石墨/金属质量为 50 kg ，商用车单车所需双极板石墨/金属的量约为 60 kg ，2025 年以后，燃料电池电堆比功率达到 2.5 kW/kg ，则乘用车与商用车单车所需石墨/金属双极板质量分别可降至 40 kg 和 48 kg 。根据我国未来燃料电池车发展情况预测，2020 年燃料电池车双极板对石墨/金属的需求量为 0.029 万吨，2025 年需求量将为 0.232 万吨，至 2030 年则将增长至 4.64 万吨。根据中国炭素行业协会不完全统计，我国 2018 年石墨电极产量 65 万吨。

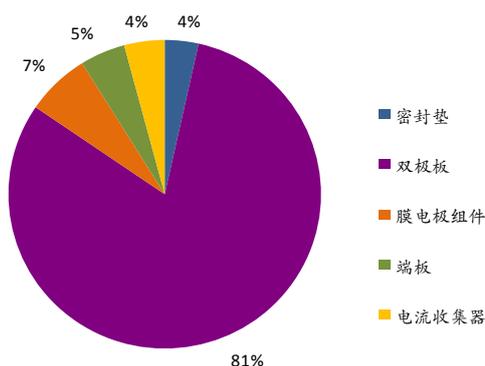
Ti、Al、Ni、不锈钢是世界各国最常研究的金属双极板材料，根据中国有色金属工业协会数据，2018 年我国铝产量为 3580 万吨，镍产量为 18 万吨，中国特钢企业协会不锈钢分会公布的数据显示，2018 年我国不锈钢粗钢产量 2671 万吨，根据攀枝花钒钛产业协会的统计，2018 年中国共生产钛精矿大约 420 万吨。因此，燃料电池车双极板材料带来的石墨与相应金属的边际增量较小，不会导致大的价格波动。

图 16: 电堆体积构成占比



资料来源: A. De las Heras et al. «From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core»

图 17: 电堆质量构成占比



资料来源: A. De las Heras et al. «From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core»

目前奔驰、本田等燃料电池乘用车均使用金属双极板，且冲压成型是目前最常见的金属双极板制造方法，美国能源部基于冲压法制造金属双极板对双极板成本进行了分析。规模化效应对双极板材料成本无显著影响，生产规模由 1000 套/年提高至 10000 套/年时，制造成本和涂层成本会显著降低。

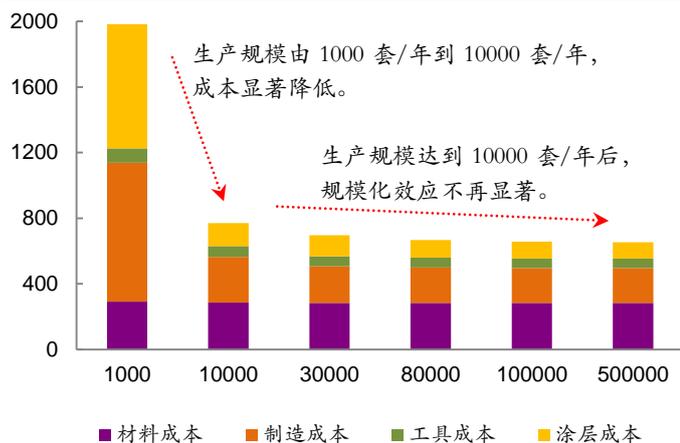
表 7: 金属双极板成本构成

生产规模套/年	1000	10000	30000	80000	100000	500000
材料成本	3.64	3.58	3.55	3.55	3.55	3.55
制造成本	10.60	3.49	2.79	2.70	2.65	2.65
工具成本	1.10	0.83	0.78	0.75	0.73	0.73
涂层成本	9.46	1.75	1.60	1.35	1.29	1.24
总和	24.80	9.64	8.71	8.35	8.21	8.16

资料来源: 美国能源部; 单位: 美元/kW

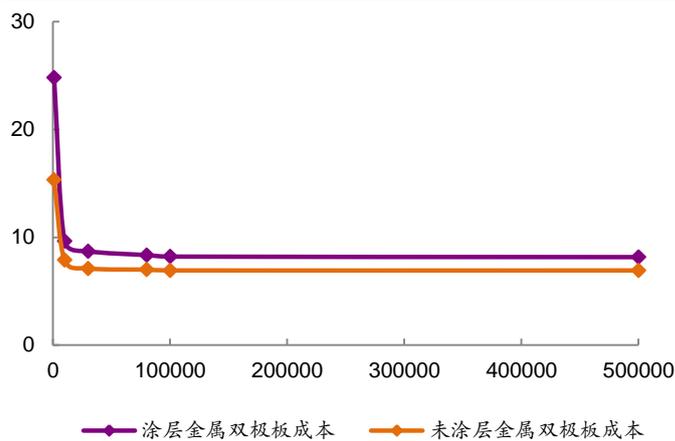
在低产量情况下，涂层成本对金属双极板成本影响巨大。与石墨双极板相比，金属双极板的一个重要挑战是易被腐蚀，在金属双极板表面涂覆耐腐蚀材料进行保护是一种必要手段。美国能源部对双极板涂层成本的核算是基于美国 TreadStone 公司的涂层技术，涂层成本主要与年生产率相关，在年产量只有 1000 套的低产量情况下，涂层成本急剧上升，由此会对金属双极板成本造成重大影响。

图 18: 金属双极板成本构成



资料来源: 美国能源部, 纵轴单位: 美元; 横轴为生产规模, 单位: 套/年

图 19: 规模效应对金属双极板成本的影响



资料来源: 美国能源部, 纵轴单位: 美元; 横轴为生产规模, 单位: 套/年

目前使用最广泛的是**石墨双极板**与**涂层金属双极板**。

传统的**石墨双极板**具有导电性高、化学稳定性和热稳定性好以及耐腐蚀等优点, 而燃料电池的操作环境 pH 一般为 2~3, 具有较强的腐蚀性, 因此双极板材料的耐腐蚀性至关重要。但由于石墨材料有着易碎、机械阻力小等特点, 其加工成本较高, 且石墨双极板体积较大, 因此更适合空间较大的商用车。

涂层金属双极板目前应用也十分广泛, 金属涂层双极板具有金属材料的高导电率、高导热性、高强度和低生产成本等优点。金属双极板具有体积更小的优点, 更适合空间有限的乘用车的未来发展, 但由于燃料电池的高腐蚀性运行环境, 对金属材料表面的涂层具有较高要求。

不同材料的双极板适用的制造技术也不同, 对于无孔石墨双极板, 最早使用的是模压成型技术, 近年来, 诸如数控铣削等加工技术使得制造用于低功率和超低功率燃料电池的微型双极板成为可能。对于涂层金属双极板, 除了传统的冲压技术, 冶金工业中使用的注射成型、熔模铸造和紫外光刻等技术也被引入, 数控铣削技术也被广泛应用于涂层金属双极板流场通道的设计。

表 8：双极板制造技术发展历程

时期	制造过程	方法简介	制造步骤	双极板尺寸	流道尺寸	操作温度
70 年代	<p>冲压法</p>	冲压成型是制造金属双极板最常用的生产工艺之一，将材料填充到两个模具（凸模和凹模）中并向其施加压力即可使材料塑性变形为所需要的形状，	3	70×70mm 100× 100mm	1.5mm（宽） 0.5mm（深）	150℃
	<p>模压法</p>	模压成型是一种适合大规模生产的冲压工艺，它与冲压成型的主要区别在于只需要用热流体加压的凹模。	2	70×70mm 40×40mm	0.75mm （宽，深）	80℃
80-90 年代	<p>注模法</p>	注模法包括三个基本步骤：（1）将熔融金属注入注射套管的浇注孔；（2）以一定的速度将柱塞移向模具，同时真空泵开始工作；（3）将柱塞缓慢移到套管末端，以约 50 Mpa 的压力喷出。该工艺适用于制造任何形状的双极板。	3	25×25cm 25×25cm	1.2mm（宽） 1.5mm（深）	250℃
	<p>熔模法</p>	熔模铸造工艺首先制造一个形状与工件相同的模具（通常是陶瓷基的），之后将模具加热并将熔融金属充入其中，当铸件充分冷却后将模具从工件上剥落，即可得到金属铸件。该工艺能够生产出形状复杂的零件，但每制造一个双极板都需要一个新的模具。	4	-	1.5mm（宽） 0.75mm（深）	250℃
目前	<p>微细电火花加工法</p>	在微细电火花加工中，流场通道是由导电材料上的电蚀形成的。通过施加电脉冲将电极制成所需的形状。在此过程中，由于刀具和工件不相互接触，因此机械力和振动产生的不利影响最小。	1	4×4cm 6mm（厚度）	300μm（宽） 300μm（深） 200mm（长）	室温
	<p>紫外光刻法</p>	紫外光刻技术是一种基于纳米级金属沉积工艺的技术，在金属基底上按照所需流场通道形状沉积有光刻胶，在紫外线照射 50 s 后，未暴露区域被蚀刻掉从而形成所需的流场图案。	8	4×4cm 2.6mm（厚度）	100μm（宽） 200μm（深）	120℃

资料来源：De las Heras A et al. «From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core»

表 9：双极板制造技术比较

制造工艺	优点	缺点	成本
冲压	通用流程、快速、成本低、可大规模生产	步骤较长、高温（150℃）、高压操作物理过程复杂、精度通常较低、易出现成形缺陷	低
模压	表面拓扑结构良好、厚度分布均匀、可大规模生产	高温（80℃）、高压操作、尺寸公差小	低
注射成型	成本低、可大规模生产	步骤较长、高温（250℃）、高压操作、生产率低、导电性不足	适中
熔模铸造	常压操作、适用于形状复杂的双极板	需要四步、高温（250℃）操作、不适用于小尺寸	高
微细电火花加工	只需一步、常温常压、精度高（可达亚微米级别）、微尺度流道、高效	不适合批量生产	高
紫外光刻	常压、适用于具有微观特征的双极板	生产过程中存在精度缺失的风险	高

资料来源：De las Heras A et al. «From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core»

图 20：双极板制造技术成本比较



资料来源：De las Heras A et al.《From the cell to the stack. A chronological walk through the techniques to manufacture the PEFCs core》

2.3、质子交换膜规模化效应显著，需强化产业配套

在质子交换膜燃料电池中，催化氧化的质子被膜内的阴极吸引，同时，阳极产生的电子通过外部电路向阴极移动，质子与电子和阴极表面的还原氧结合产生水，电子通过外部电路传导所产生的能量。在典型的质子交换膜燃料电池中，**膜和电极的效率是一个关键因素**，而高质子导电性是质子交换膜材料的重要特性。质子交换膜通常由分离良好的疏水和亲水结构组成，疏水结构避免了过多的吸水，使膜的溶胀比较低，维持膜的机械稳定性；亲水的硫酸基团则提供了足够的导电通道，可以将质子从阳极带到阴极，同时气体燃料混合。

根据美国能源部 2020 年目标，性能良好的质子交换膜应满足以下条件：(1) 在 120℃ 下质子传导率为 0.1S/cm；(2) 最大氢氧交叉渗透电流为 2 mA/cm²；(3) 最小电阻为 1000Ω/cm²；(4) 机械强度达到 2000 次循环；(5) 化学稳定超过 500 小时。

早期的质子交换膜燃料电池由于使用磺化聚苯乙烯-二乙烯基苯共聚物膜，而具有成本高、寿命短的缺点。在 20 世纪 70 年代，全氟磺酸基膜 (Nafion) 代替了磺化聚苯乙烯-二乙烯基苯共聚物膜成为质子交换膜燃料电池的标准膜。

全氟磺酸基膜是目前质子交换膜燃料电池中应用最广泛的电解质膜，因为其在水合状态下具有较高的质子传导率、热稳定性、机械强度、化学稳定性和耐久性。全氟磺酸膜包括作为全氟乙烯基醚全氟磺酸封端基团的主链序列和侧链的结晶四氟乙烯单体，高疏水性的全氟主链与高亲水性的磺酸官能团相结合。在水存在下，疏水区和亲水区被完全分离，形成双连续的微观结构，提高了质子导电性和物理化学性质。由于氟原子对磺化基团和 C-C 键有保护作用，全氟磺酸膜的氧化稳定性高，适合大多数燃料电池应用。在室温水溶液条件下，常规全氟磺酸膜的质子传导率为 0.07~0.08 S/cm。

全氟磺酸膜需要在低于 100℃ 的条件下工作，当温度高于 100℃ 时，膜会迅速脱水，膜结构中的离子畴会坍塌，从而导致电导率显著降低。目前大部分燃料电池的工作温度低于 100℃，但这并不是最佳工作条件，因此，能适应高温的质子交换膜有待进一步开发。

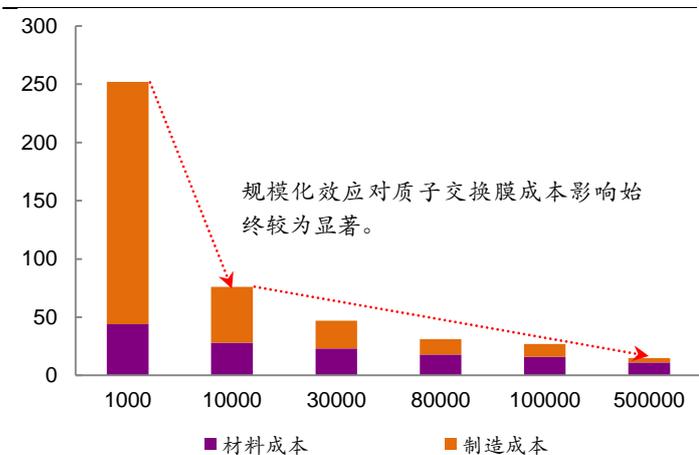
表 10：质子交换膜种类与特性

种类	组成	特性	商业应用
全氟磺酸膜	碳氟主链和带有磺酸基团的醚支链	机械强度高，化学稳定性好和在湿度大的条件下导电率高；低温时电流密度大，质子传导电阻小。温度升高会引起质子传导性变差，高温时膜易发生化学降解；单体合成困难，成本高；价格昂贵；用于甲醇燃料电池时易发生甲醇渗透等	美国杜邦公司的 Nafion 系列膜；美国陶氏化学公司的 XUS-B204 膜；日本旭化成的 Aciplex 膜；日本旭硝子的 Flemion 膜；日本氟工程公司的 C 膜；加拿大巴拉德公司的 BAM 型膜
非全氟化质子交换膜	用取代的氟化物代替氟树脂，或者是用氟化物与无机或其他非氟化物共混	具有非常低的磺酸基含量、高的工作效率；使单电池的寿命提高到 15000h；成本较 Nafion 膜和 Dow 膜低得多，更易被人们接受	加拿大巴拉德公司 BAM3G 膜
无氟化质子交换膜	碳氢聚合物膜	成本低而且环境污染相对较小，是质子交换膜发展的一大趋势；但化学稳定性有待提高	处于研究阶段，尚无商业化应用
复合膜	复合的方法来改性全氟型磺酸膜	耐溶剂，耐高温；有效降低膜材料甲醇渗透	尚无商业化应用

资料来源：刘志祥等《质子交换膜燃料电池材料》

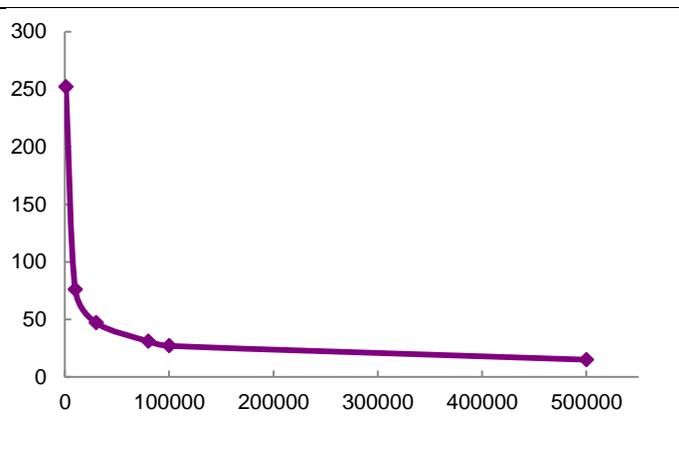
生产规模对质子交换膜的制造成本影响尤为显著。质子交换膜的成本主要由三部分构成：（1）离聚物材料成本；（2）膨化聚四氟乙烯基板材料成本和（3）膜制造成本。材料成本和制造成本均受到生产规模的影响，当生产规模由 1000 套/年增长至 10000 套/年时，质子交换膜的制造成本可降低 77%，总成本可降低 70%。

图 21：质子交换膜成本构成



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/m²；横轴为生产规模，单位：套/年

图 22：规模效应对质子交换膜成本影响



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/kW；横轴为生产规模，单位：套/年

2.4、大规模生产是降低气体扩散层成本的有效方法

在质子交换膜燃料电池中，气体扩散层主要起到以下作用：（1）使反应物从流场通道移动并均匀分布到催化剂层并去除生成物水；（2）为膜电极组件提供结构支撑；（3）导通双极板与催化剂层之间的电流。因此，气体扩散层的下列特性应满足燃料电池运行要求：气体和水蒸气的扩散率和渗透性、孔隙率、导电性和导热性、机械强度和耐久性。

目前最常用的气体交换层材料为碳基材料，包括碳纤维纸（非织造）和碳布（编织）。碳基材料具有多孔结构，导电与导热性好，能满足燃料电池的运行条件与要求。目前碳纸与碳布的生产技术均较为成熟，不同性能与不同操作条件下的碳基材料均可在市场上获得。碳纸是用热固性树脂浸渍碳纤维制成的，碳纤维在超过 2000℃ 的温度下石墨化，以提高导电性和机械性能。而在碳布的制造过程中，由于碳纤维是编织的，所以不需要使用粘合剂，石墨化发生在碳纱的纺纱和编织之后。在燃料电池电堆中，以碳基材料做气体交换层的一个主要优点为其具有可压缩性，可以适应电池运行过程中发生的由于压力和温度变化以及水化引起的尺寸的变化。如前所述，碳布和碳纸具有不同的制造方法，因此具有不同的结构和性能。因此，它们在不同的操作条件和电池设计中表现出不同的性能。由于碳布和碳纸的结构差异，研究者通常认为，碳布在高湿度和/或高电流密度（潮湿条件下）下具有更好的除水性能，而在低电流密度下，碳纸具有更高的性能。

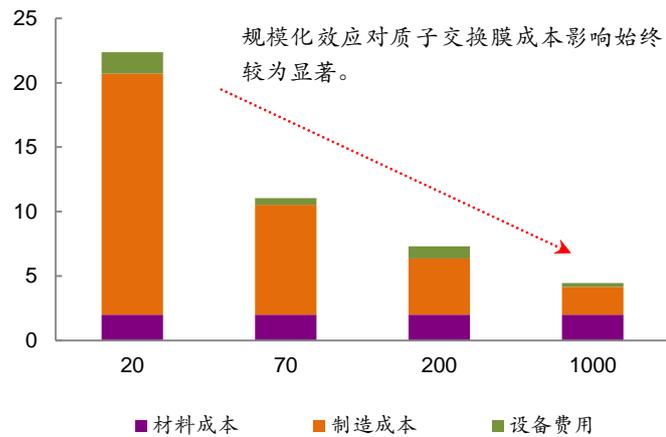
表 11：不同条件下碳纸和碳布的性能比较

条件	性能更好的气体扩散层材料	理由
高电流密度	碳布	高孔隙率 水分去除率更高由于—— 低弯曲度 粗糙表面 双孔径分布
	碳纸	改进反应物分布 低密度较低厚度
低电流密度 ($<800\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) /低湿度	碳纸	减轻膜脱水

资料来源：Omran R et al. «Review of gas diffusion layer for proton exchange membrane-based technologies with a focus on unitised regenerative fuel cells»

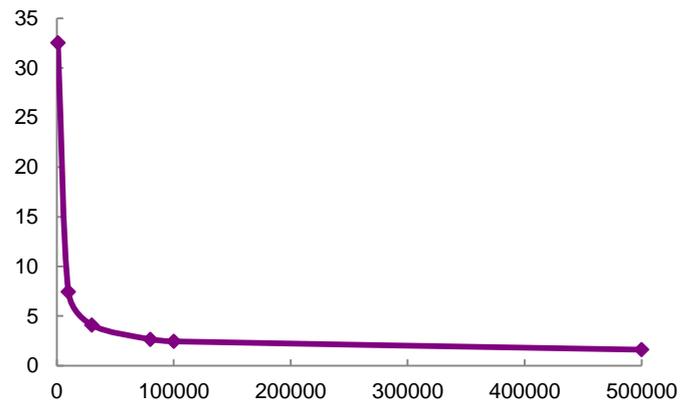
根据美国能源部与巴拉德的联合研究项目，当气体扩散层的年产量为 1000 万 m^2 /年（大约可供应 50 万套燃料电池系统）时，气体扩散层的生产成本为 4.45 美元/ m^2 ，当生产规模为 10 万 m^2 /年时，生产成本则约为 56 美元/ m^2 。

图 23：气体扩散层成本构成



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/m²；横轴为生产规模，单位：万 m²/年

图 24：规模效应对气体扩散层成本影响



资料来源：美国能源部；纵轴单位：美元/kW；横轴为生产规模，单位：套/年

3、政策加速燃料电池产业国产化进程

3.1、国内催化剂技术与国外存差距，正在不断缩小

美国能源部始终致力于降低燃料电池的铂负载量，目前基本已经达到设定的 2025 年的 0.125 mg/cm² 的目标，同时基于目前铂负载量数据，对 2030 年进一步降低铂负载量提出了 0.088 mg/cm² 的目标。

表 12：美国燃料电池催化剂 2015 年情况与 2020 年目标

项目	2015	2020 年目标
铂族金属总含量 g/kW	0.16	0.125
铂族金属总负载 mg · cm ⁻²	0.13	0.125
质量比活性 A/mg	>0.5	0.44
初始催化剂活性损失%	66	<40
0.8A/cm ² 条件下损失 mV	13	<30
电催化剂稳定性%	41	<40
1.5A/cm ² 条件下损失 mV	65	<30
铂族金属催化剂活性 A · cm ⁻²	0.016	>0.044

资料来源：美国能源部

目前燃料电池催化剂国际市场主要被英国的 Johnson Matthey 和日本的田中（本田 Clarity 催化剂的供应商）所垄断。Johnson Matthey 是世界上第一个专门生产燃料电池膜电极组件的工厂，同时是世界上最大的铂族金属回收商，在贵金属管理方面具有较大优势。国内催化剂技术与国外的差距正不断缩小，2015 年清华大学与武汉喜玛拉雅开展校企深度合作，联合开展燃料电池 Pt/C 催化的量产技术攻关，截止 2018 年，催化剂产能达到 1200 克/天的规模，可满足 40 台 36kW 燃料电池电堆使用。

表 13：部分催化剂制造公司简介

公司	公司简介	产品简介	产品参考图
英国 Johnson Matthey	Johnson Matthey 于 1817 年建立于英国伦敦,是一家全球性专用化学品公司,致力于发展催化剂、贵金属和精细化学品核心技术,是先进催化剂生产技术的世界领导者,世界最大的铂系金属提纯及分销商。		
贵研铂业	贵研铂业股份有限公司于 2000 年由中国专业从事贵金属多学科领域综合性研究开发机构昆明贵金属研究所发起设立,是集贵金属系列功能材料研究、开发和生产经营于一体的高新技术企业,于 2003 年在上海证券交易所上市。产品包括贵金属特种功能材料、环保及催化功能材料、信息功能材料、再生资源材料等,主要用于航空、航天、航海、国防军工、电子、能源、化工、石油、汽车、生物医药、环保能源、钢铁等行业。	贵研铂业于 2013 年与上汽集团就燃料电池催化剂签署合作协议,目前产品尚未实现商业化生产。	
武汉喜玛拉雅光电科技股份有限公司	武汉喜玛拉雅光电科技股份有限公司于 2008 年创立,2015 与清华大学签订技术成果转让合同,并成立了清华喜玛拉雅氢燃料电池产业化基地,目前喜玛拉雅已完成燃料电池用催化剂、膜电极、双极板等关键材料的研发和生产能力的建设,截止 2018 年已成功开发了三代燃料电池电堆模块,功率覆盖 1kW~100kW,实现氢燃料电池及其关键材料、核心部件的国产化,降低了对进口的依赖,同时大幅度降低制造成本。喜玛拉雅生产的 Pt 催化剂、膜电极、电堆及车用动力系统,已被国内外多家企业采购应用。	喜玛拉雅联合清华大学,经过多年的研究,成功开发出活性优良、高稳定性、长寿命的燃料电池纳米负载型催化剂;并首创了管道均质连续化管道微波合成生产工艺,掌握了催化剂的量产技术。采用连续合成工艺,实现极高的产品性能一致性,各项指标在±1%以内,且日产能达到 1200g,适合规模化应用	

资料来源: Johnson Matthey、贵研铂业、武汉喜玛拉雅光电科技股份有限公司官网,光大证券研究所整理

3.2、石墨双极板已实现国产化,金属双极板国内供应较少

表 14：美国燃料电池双极板 2015 年情况与 2020 年目标

项目	2015	2020 目标
成本 (美元/kW)	7	3
板重 (kg/kW)	<0.4	0.4
氢气渗透系数 Std $\text{cm}^3/(\text{sec cm}^2\text{Pa})$ @80°C,3atm,100%RH	0	$<1.3 \times 10^{-14}$
腐蚀电流, 阳极 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	无活跃峰值	<1 且无活跃峰值
腐蚀电流, 阴极 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	<0.1	<1
电导率 S/cm	>100	>100
面积电阻率 $\Omega \cdot \text{cm}^2$	0.006	<0.01
抗弯强度 MPa	>34	>25
成型伸长率%	20-40	40

资料来源: 美国能源部

石墨双极板耐久性长,是目前质子交换膜燃料电池中应用最广泛的双极板材料,尤其普遍应用于商用车。目前石墨双极板的国外主流供应商包括美国

POCO、美国 SHF、美国 Graftech、日本 FujikuraRubber LTD、日本 Kyushu Refractories、英国 Bac2 等。石墨双极板目前国内已实现产业化，主要厂商包括上海弘枫、上海弘竣等。

表 15：国内外部分厂家石墨双极板产品性能

项目	美国 POCO	英国 Bac2	上海弘枫
密度 g/cc	1.78	1.81	>1.9
抗弯强度 MPa	89.63	30	>50
抗压强度 MPa	151.69	-	>100
电阻率 $\mu\Omega \cdot m$	14.73	-	<12
肖氏硬度	74	67	60
空气渗透系数	-	-	最小厚度 0.3mm, 1kg 负压不透气

资料来源：POCO、Bac2、上海弘枫公司官网

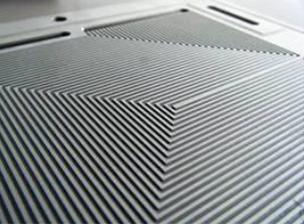
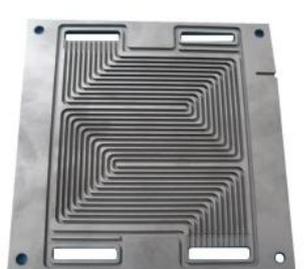
相较于石墨双极板，金属双极板可以降低厚度 (<1mm)，使电堆结构更加紧凑，因此功率密度更高，逐渐成为燃料电池乘用车的双极板的主流材料。目前金属双极板的国外供应商主要包括瑞典的 Cellimpact、德国的 Dana 和 Grabener、美国 Treadstone 等。目前国内金属双极板尚处于研发阶段，供应商数量较少，上海治臻新能源装备有限公司是我国第一家燃料电池金属双极板制造企业，开发了一系列金属双极板的成形、连接及测试工艺，形成了系统的金属双极板制造技术，建成国内首条完整的燃料电池金属双极板生产线。

表 16：上海治臻新能源装备有限公司金属双极板性能

制造技术	MCC	MCD	MCE
接触电阻 $m\Omega \cdot cm^2$	<4	<3	<2
腐蚀电流 $\mu A/cm^2$	<0.5	<0.5	<0.5

资料来源：上海治臻新能源装备有限公司官网

表 17: 部分双极板制造公司简介

公司	公司简介	产品简介	产品参考图
美国 POCO	美国 POCO 石墨有限公司是一家具有 50 多年历史的专业石墨制造商, 其石墨产品品质卓越、稳定性好, 是全球石墨电极领先品牌。产品主要应用于以下领域: 半导体和工业应用, EDM 电火花加工, 玻璃应用, 生物医学应用等。	PyroCell POCO 石墨双极板使用的材料主要为一种无孔石墨 PyroCell, POCO 石墨具有强度高, 微观结构均匀的特点, 可以实现双极板复杂流道的加工, 以满足燃料电池对流场效率的要求。	
英国 Bac2	Bac2 创建于 2002 年, 旨在开发基于新型热固性催化剂技术的商用导电聚合物复合材料。2005 年, 迈克·斯坦纳德 (Mike Stannard) 加入 Bac2, 担任首席执行官, 负责拓展 Bac2 在燃料电池市场和电子行业的商业活动。	ElectroPHEN ElectroPHEN 可用于制造质子交换膜燃料电池电堆的双极板和端板, ElectroPHEN 板具有化学惰性, 不会腐蚀, 不会毒害燃料电池电极, 坚固耐用, 能够承受恶劣的环境, 制造工艺具有低能耗、快速、经济且可扩展的特点, 适用于燃料电池板的开发和大批量制造。	
上海弘枫	上海弘枫石墨制品有限公司专注于石墨相关产品的研发、生产, 其产品广泛应用于喷墨打印、太阳能、燃料电池、半导体、智能手机、医疗器械、精密模具等行业, 并拥有多项发明专利和实用新型专利。公司研制的燃料电池石墨双极板、液流电池石墨极板、打印机石墨喷头等产品, 获国家科技部创新基金、重大技改及上海市高新技术成果转化项目, 公司于 2012 年获批上海市高新技术企业。	上海弘枫成功研发超薄石墨双极板, 大大减少了燃料电池堆的体积和重量, 性能优异, 运行稳定, 成本低、效率高、寿命长、耐腐蚀等特点。多年来上海弘枫已生产数十万片石墨极板, 并成功应用于我国自行研发的新一代燃料电池车。目前已成为国内规模最大的燃料电池极板生产商。上海弘枫生产的燃料电池石墨双极板成功运用于 2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会的零排放氢燃料电池轿车和大巴。	
上海弘竣	上海弘竣实业有限公司创建于 2010 年, 是一家集科研、生产、销售、安装、服务为一体的高新技术企业, 公司致力于新能源产品及其主要零部件的研发、生产。主要产品有铸锭石墨热场、PECVD 石墨舟、C/C 框、燃料电池双极板、半导体石墨件、光纤用石墨模具、手机热弯模具、石墨电极加工, 以及销售进口石墨。	上海弘竣实业有限公司采用真空加压的方式以硅酸钠浓溶液浸渍石墨双极板方法, 减少了制造过程中的气孔问题。通过浸渍工艺, 石墨板减少了 70% 以上的孔隙率。	
瑞典 Cellimpact	瑞典 Cellimpact 是氢燃料电池先进双极板的机械制造商, 拥有专利的冲压方法, 高速成形, 可以提供具有复杂和精确流型的双极板的大批量制造。	Cellimpact 的燃料电池双极板为有复杂的氢和氧气体流动通道的薄钢板。钢板上由特殊的涂层以提高双极板的导电性和抗腐蚀性。	
上海治臻新能源装备有限公司	上海治臻新能源装备有限公司成立于 2016 年, 是中国领先的专业燃料电池金属双极板供应商, 公司拥有完全自主知识产权, 专注于低成本高性能的燃料电池金属极板的产业化, 开发了具有自主知识产权的燃料电池金属极板流场设计, 精密成形, 高速焊接和高性能涂层等先进技术。公司拥有多项专利技术, 拥有一流水平的高素质研发团队, 并由完整的燃料电池金属极板的生产线。在国内市场已成为最大的专业燃料电池金属极板供应商。	金属双极板 S05B 技术团队历经十年的科技攻关, 开发出基于不锈钢薄板精密冲压成形工艺、全局激光焊接路径优化的双极板连接工艺、三维误差特征表达的双极板性能测试系统、及不锈钢双极板防腐工艺的世界领先的燃料电池双极板制造创新工艺与方法, 能够降低极板制造成本 75%、减轻极板重量 65%, 其多款双极板产品已在上汽集团、新源动力、南通百应能源等公司应用万余片, 极大提升了燃料电池的产品性能。	

资料来源: POCO、Bac2、上海弘枫、上海弘竣、瑞典 Cellimpact、上海治臻新能源装备有限公司公司官网, 光大证券研究所整理

3.3、国内质子交换膜技术已趋于成熟

表 18：美国质子交换膜 2015 年现状与 2020 年目标

项目	2015	2020 目标
最大氧气交叉渗透电流 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	2.4	2
最大氢气交叉渗透电流 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.1	2
特定条件下质子阻抗 $\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$		
最高运行温度，水蒸汽分压 40-80kPa	0.072 (120°C, 20kPa)	0.02
80°C 水蒸汽分压 25-45kPa	0.027 (25kPa)	0.02
30°C 水蒸汽分压不高于 4kPa	0.027 (4kPa)	0.03
-20°C	0.1	0.2
最高运行温度°C	120	120
最小电阻	>5600	1000
成本 $\text{\$} \cdot \text{m}^{-2}$	17	20
耐久性		
机械耐久循环次数性	23000	20000
化学耐久性 h	742	>500
综合耐久性循环次数	-	20000

资料来源：美国能源部

目前燃料电池领域使用的最主要的质子交换膜为全氟磺酸膜，国际上知名的质子交换膜供应商包括美国杜邦 Nafion 膜、陶氏公司的 Dow 系列质子交换膜、Gore 公司的 Gore-Select 膜、3M 公司全氟磺酸膜、日本旭化成公司 Aciplex 膜和日本旭硝子公司的 Flemion 膜等，其中 Nafion 膜应用最为广泛。

表 19：部分商用质子交换膜性能

膜	膜类型	离子交换容量 mequiv./g	厚度 mm	凝胶水%	30°C 饱和水蒸汽条件下电导率 S/cm
日本东京千代田区朝日化学工业有限公司					
K101	磺化聚芳烯	1.4	0.24	24	0.114
日本旭硝子公司					
CMV	磺化聚芳烯	2.4	0.15	25	0.0051
DMV	磺化聚芳烯	-	0.15	-	0.0071
Flemion	全氟磺酸膜	-	0.15	-	-
美国西布朗爱奥纳克化学公司					
MC 3470	-	1.5	0.6	35	0.0075
MC3142	-	1.1	0.8	-	0.0114
美国马萨诸塞州沃特公司					
61AZL386	-	2.3	0.5	46	0.0081
61AZL389	-	2.6	1.2	48	-
61CZL386	-	2.7	0.6	40	0.0067
美国杜邦公司					
N 117	全氟磺酸膜	0.9	0.2	16	0.0133

N 901	全氟磺酸膜	1.1	0.4	5	0.01053
美国 3M 公司					
R 1010	全氟磺酸膜	1.2	0.1	20	0.0333
	全氟磺酸聚合物	-	0.08-0.5	-	0.1 (120°C, 水蒸气饱和度 50%)

资料来源：Esmaeili N et al. 《Non-Fluorinated Polymer Composite Proton Exchange Membranes for Fuel Cell Applications – A Review》

目前国内质子交换膜主要供应商为东岳集团有限公司，该公司生产的 DF260 型质子交换膜技术上已经成熟，目前膜厚度为 15μm，在开路电压 (OCV) 条件下，耐久性可超过 600 小时，膜寿命可超过 6000 小时，循环次数可达 2 万次以上。东岳 DF260 型质子交换膜已经可实现量产，2017 年产能为 20 万平方米。

表 20：部分质子交换膜制造公司简介

公司	公司简介	产品简介	产品参考图
美国杜邦	美国杜邦公司成立于 1802 年，是一家以科研为基础的全球性企业，广泛在全球 70 个国家经营业务，2015 年，陶氏化学和杜邦美国宣布合并，新公司将成为全球仅次于巴斯夫的第二大化工企业。2018 年 7 月 19 日，《财富》世界 500 强排行榜发布，陶氏杜邦公司位列 147 位。在 2018 世界品牌 500 强排行榜中，杜邦排名第 171 位。	Nafion 薄膜、NafionXL 薄膜 杜邦 Nafion 薄膜能量输出性能和耐久性好，是多种能量存储和汽车应用的理想选择。杜邦科研在燃料电池业不断创新，推出了杜邦 NafionXL 薄膜，这是一种机械强度更高、化学稳定性更好的薄膜，具有更好的拉伸强度，并大大减少了氯化物的排放。	
美国 GORE 公司	GORE 公司创立于 1958 年，生产出应用于医疗植入、纺织品层压面料等领域的众多产品，以及用于多种行业的电缆、过滤、密封、薄膜、透气和纤维技术。戈尔在全球拥有逾 2,000 项专利，涵盖电子、医疗产品和聚合物加工等多个领域。	GORE-SELECT 质子交换膜 自 1994 年，GORE 公司已经生产了数百万件膜电极组件，远超业内其它供应商。其燃料电池部件具有高耐久性和功率密度高的特点。	
美国 3M 公司	3M 公司创建于 1902 年，为全球近 200 多个国家的客户提供产品及服务，其产品包括了从家庭用品到医疗用品，从运输、建筑到商业、教育和电子、通信等各个领域。2018 年 7 月 19 日，《财富》世界 500 强排行榜发布，3M 公司位列 376 位。2019 年 10 月，Interbrand 发布的全球品牌百强榜排名 64。		
东岳集团	东岳集团创建于 1987 年，2007 年在香港主板上市。公司坚持科技创新，在新环保、新材料、新能源等领域掌控了大量自主知识产权，在新环保制冷剂、氟硅新材料、离子膜等方面打破了多项国外技术垄断，实现了国产化替代，是格力、美的、海尔、海信、大金、三菱、长虹等国内外著名企业的优秀供应商。	全氟磺酸质子交换膜 东岳集团的质子交换膜具有优良的耐热性能、力学性能、电化学性能以及化学稳定性，可在强酸、强碱、强氧化剂介质等苛刻条件下使用，不仅被用作质子交换膜燃料电池的关键组件，还广泛应用于钒电池、水电解制氢、电化学合成、气体分离及电化学传感器等领域，在各种有赖于阳离子选择性传导的电化学电池中作为固体电解质隔膜。	

资料来源：杜邦、GORE、3M、东岳集团公司官网，光大证券研究所整理

3.4、国内气体扩散层尚未形成产业化

气体扩散层是目前燃料电池电堆中发展最成熟的部件，目前国际上气体扩散层的主要供应商包括日本东丽、德国西格里（SGL）等，东丽是目前全球最大的碳纤维制造商，制造技术成熟，能很好地满足导电性、疏水性及稳定性等各项基本指标。根据美国能源部规模效应分析，气体扩散层生产成本受生产规模影响较大，扩大生产规模可有效降低气体扩散层成本。但我国目前尚无大规模生产，上海河森公司可生产小规模碳纸与碳布产品。因此，提高国产碳纸与碳布性能，扩大生产规模对于降低燃料电池电堆成本至关重要。

表 21：部分气体扩散层制造公司简介

公司	公司简介	产品简介	产品参考图
日本东丽	东丽（TORAY）成立于 1926 年，是世界著名的以有机合成、高分子化学、生物化学为核心技术的高科技跨国企业，在全球 19 个国家和地区拥有 200 家附属和相关企业，年销售额超过 120 亿美元。	TORAYCA 纺布 该产品以片材形式供应，加工方便，容易浸渍树脂。TORAYCA 面料的用途越来越广泛，包括土木工程产品的增强材料、自行车等运动器材及飞机部件材料	
上海河森	上海河森电气有限公司成立于 2003 年，是一家专业从事燃料电池专用材料开发销售、燃料电池及其专用设备代理销售的股份制高科技民营企业。公司自行成功开发了碳纸、碳布等燃料电池专用高性能气体扩散层产品和铂系列、铂钉系列燃料电池专用高性能催化剂产品并顺利实现批量生产，打破了该类产品长期依赖进口的局面，质量达国际先进水平。目前，公司拥有国家授权发明专利 5 项、实用新型专利 3 项。	到 2012 年底，已形成 1000 平方米燃料电池专用高性能气体扩散层和 5000 克燃料电池专用高性能催化剂的月生产能力，并可根据燃料电池研发生产单位实际需要提供各种原材料、半成品、工装设备的定制服务。	

资料来源：日本东丽、上海河森公司官网，光大证券研究所整理

3.5、新源动力和神力科技电堆制造在国内具优势

目前电堆整体开发企业主要包括两类，一种是汽车制造商自行开发电堆，如丰田、本田、现代等，另一类则为单独供应燃料电池电堆企业，国际上以加拿大的巴拉德和 Hydrogenics 为首。目前国内自主开发并经过实际应用考验的电堆开发企业以新源动力和神力科技为代表。

表 22：部分代表厂家燃料电池车性能

制造商	型号	推出年份	电堆功率 kW	附加电堆功率 kW	总功率 kW	续航 km	速度 km/h	充电时间 min	储氢能力 kg	售价\$	能耗 kg/100km
戴姆勒	Mercedes-Benz - B-Class	2010	100	35	135	402	-	3	-	-	-
	GLC - F-CELL	2018	147	13.5	160.5	478	0-96.56	3	4.4	-	-
现代	Tucson ix35 FCEV	2012	100	24	124	594	0-96.56 (12.5s)	-	5.64	73996.13	0.97
	Hyundai Nexo	2018	120	40	160	756	0-96.56 (12.5s)	5	6.33	78009.68	1.0
本田	Clarity	2016-2017	130	-	-	589	0-96.56 (8.1s)	5	5	52742.96	0.84
丰田	Mirai	2016	114	1.6	115.6	502	0-96.56 (9s)	5	5	87025.88	-

资料来源：Nazila Esmaeili.«Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors»

巴拉德是目前世界上燃料电池电堆技术最为成熟的生产商之一，为多种设备制造提供燃料电池电堆。经过 35 年产品开发，巴拉德形成并完善了燃料电池的核心组件——膜电极组件制造技术。具有批量生产能力，有利于降低燃料电池电堆成本，目前已向客户提供了超过 320MW 的产品。FCVelocity-9SSL 是其在汽车燃料电池技术领域的产品，该产品具有功率密度高、耐久性好、对恶劣环境的耐受性好等优点。FCVelocity-9SSL 燃料电池电堆已应用于巴拉德的 FCVelocity 动力模块中，为公交巴士和轻轨车辆提供动力。

表 23：巴拉德电堆性能

额定功率 kW	3.8	4.8	10.5	14.3	17.2	21
300A 下直流电压 V	12.8	16.0	35.0	48.0	57.4	70.2
质量 kg	7.1	7.2	10.7	13	15	17
长 mm	92	104	174	220	255	302
宽 mm	760	760	760	760	760	760
高 mm	60	60	60	60	60	60
性能	最大电流	300A				
	抗震性能	满足 USABC/SNL CRADA No. SC961447				
燃料	燃料成分	>95%H ₂				
氧化剂	氧化剂组成	压缩环境				
温度	储存温度	-40-60°C				
	启动温度	>2°C				
	流体入口温度	2-68°C				
	外部环境温度	-25-75°C				

资料来源：巴拉德公司官网，光大证券研究所整理

目前新源动力已开发出第二代与第三代燃料电池电堆，第二代燃料电池电堆已通过国内多家大型汽车制造企业多种车型的装车实验验证，第三代燃料电池电堆采用薄金属双极板，单个电堆额定功率已达到 70kW，体积功率由原来的 1.52 kW/L 提高到 1.91kW/L，逐渐向国际水平靠拢，性能更加卓越，适用于商用车与乘用车的应用。神力科技目前推出两种燃料电池电堆，SFC-MD 系列主要应用于客车、乘用车、物流车、商用车等，已实现 9 米级客车的批量应用，SFC-HD 功率覆盖范围更高，主要应用于大型客车、有轨电车、重卡等商用车，已实现 12 米级客车的应用。目前我国国产燃料电池电堆在额定功率、功率密度等方面与国际水平尚有一定差距，未来发展需要进一步提高电堆额定功率，增大功率密度，减小燃料电池电堆的体积与质量。

表 24：新源动力和神力科技主要型号电堆性能

公司 电堆型号	新源动力			神力科技	
	HYSTK-30	HYSTK-40	HYSTK-70	SFC-MD-40	SFC-HD-660
性能参数					
额定功率 kW	25	35	70	47	76
额定电流 A	325	375	296	435	373
峰值功率 kW	28	39	85	49.2	93.8
峰值电流 A	437	437	365	-	-
电压范围 V DC	64~110	87~150	230~370	82~180	164~334
物理参数					
体积功率密度 kW/L	1.41	1.52	1.91	2.2	1.74
质量 kg	30	40	45	75.6	145
质量功率密度 kW/kg	0.83	0.88	1.56	1.43	1.26
其他参数					
抗震性能	SAE J2380-2009	SAE J2380-2009	SAE J2380-2009	-	-
工作介质					
氢气	符合 GB/T 37244-2018			-	-
氧化剂	空气			-	-
冷却剂	商用冷却剂			-	-
工作条件					
氢气工作压力 kPA	133-195	133-195	133-270	-	-
空气操作压力 kPA	114-185	114-185	110~250	-	-
冷却剂压力 kPA	≤170	≤170	≤160	-	-
冷却剂温度℃	-10-80	-10-80	-30~87	-	-
运行环境温度℃	-10~45	-10~45	-30~45	>-30~75	>-30~85
运行环境湿% RH	5~95	5~95	5~95	-	-
储存环境温度℃	-40~60	-40~60	-40~60	>-40	>-40

资料来源：公司官网，光大证券研究所整理

表 25：部分电堆制造公司简介

公司	公司简介	产品简介	产品参考图
加拿大巴拉德	巴拉德动力系统公司成立于 1979 年,公司从 1983 年开始研发燃料电池。目前公司的主要业务是质子交换膜燃料电池产品(包括燃料电池堆、模块和系统)的设计、开发、制造和服务,专注于商用市场(电信备用电源、物料搬运和工程服务)和开发阶段市场(公车、分布式发电和连续电源等)。迄今为止,公司氢燃料电池的出货量接近 150MW。	FCvelocity-9SSL FCvelocity-9SSL 是巴拉德在汽车燃料电池技术领域从事的工作所得的衍生成果,具有卓越的可靠性和强悍的功率密度。FCvelocity-9SSL 燃料电池堆集成到巴拉德 FCvelocity 动力模块为公交汽车和轻轨车辆供电。FCvelocity-9SSL 燃料电池堆还被广泛部署到 Plug Power 的电动叉车专用 GenDrive 燃料电池系统中。 FCgen-LCS FCgen-LCS 是巴拉德在燃料电池堆建模和设计方面 30 年经验的成果,具有耐用的膜电机组、可重复使用的低成本碳板、紧凑型电堆设计、优化的运行条件等特点。	
新源动力	新源动力股份有限公司是中国第一家致力于燃料电池产业化的股份制企业。成立于 2001 年,2018 年通过 IATF16949 汽车行业质量管理体系认证,是国家级高新技术企业、国家级知识产权试点单位,目前已经发展成为集科研开发、工程转化、产品生产、人才培养于一体的专业化燃料电池公司。新源动力拥有自主知识产权的质子交换膜燃料电池技术,部分关键技术达到国际一流水平。截至 2019 年 10 月,公司累计拥有专利 482 项,其中国际专利 2 件,涵盖了质子交换膜燃料电池关键材料、关键部件、电堆、系统各个层面。	HYSTK-30、HYSTK-40 本产品为新源动力股份有限公司研发的二代车用质子交换膜燃料电池电堆,其技术性能更加卓越,并已通过国内多家大型汽车制造企业多种车型的装车实验验证。 产品优势:结构紧凑、高可靠性和耐久性、启动速度快、环境适应性强、易于系统集成 HYSTK-70 本产品为新源动力股份有限公司研发的第三代车用质子交换膜燃料电池电堆,采用薄金属双极板,其技术性能更加卓越,适用于乘用车和商用车的应用。	
神力科技	上海神力科技有限公司成立于 1998 年,是国家科技部重点培育、上海市政府重点支持的新能源高新技术企业。公司以质子交换膜燃料电池研发、系统集成、电堆及系统测试、产业化实践作为发展目标,是国内燃料电池技术研发与产业化的先行者。神力科技已经同上汽集团、上海大众、郑州宇通、北汽福田、中通客车、中国中车、上海申龙、苏州金龙、奇瑞汽车、长城汽车等国内外知名的整车厂合作,成功开发了燃料电池新能源汽车,并在北京、上海、美国加州、英国和韩国等国家和地区成功示范运行。	SFC-MD SFC-MD 系列氢燃料电池模块,其功率范围覆盖 0-50kW,主要应用于客车、乘用车、物流车、商用车等,目前 SFC-MD-40 产品已实现 9 米级客车的批量应用。 SFC-HD SFC-HD 系列大功率氢燃料电池电堆模块,其功率范围覆盖 0-80kW,主要应用于大型客车、有轨电车、重卡等商用车,目前 SFC-HD-60 产品已实现 12 米级客车的应用。	

资料来源:巴拉德、新源动力、神力公司官网,光大证券研究所整理

4、投资建议

目前全球范围内燃料电池车的生产规模普遍不高,规模效应降本是当前主导方式,后期则体现在技术与工艺上。根据美国能源部数据,电堆生产规模为 1000 套/年时,燃料电池乘用车总成本约为 6.50 万美元,燃料电池系统成本为 215 美元/kW,电堆成本为 153 美元/kW,当年产量增至 1 万套时,系统成本降至 93 美元/kW,电堆成本降至 53 美元/kW,燃料电池系统成本、电堆成本分别降低 57%和 65%。当生产规模由 1 万套/年增长至 50 万套/年时,质子交换膜和气体扩散层成本仍旧会随着规模扩大而降低,但此时电堆成本

主要由电极催化剂和双极板的材料用量及价格决定，这与技术及工艺水平密切相关。

铂边际净需求不会限制燃料电池车导入期发展，当燃料电池车数量达百万量级时，铂需求将快速增长。（1）铂电极催化剂需求需综合考虑：1）燃料电池用铂对柴油商用车尾气催化剂具有替代效应；2）电极催化剂铂负载量将随技术的进步而减少。根据我国规划，2020/2025/2030 年燃料电池车数量将达到 5 千/5 万/100 万辆，我们进而基于商用、乘用车占比 4:1、铂负载量 0.4、0.2、0.125g/kW，柴油商用车被替代且以尾气催化剂 5 克/辆铂用量假设进行测算，铂净需求增量（以 5 年为时间跨度）为 0.212 吨/0.960 吨/10.50 吨。（2）双极板材料需求（石墨或金属）：假设单车所需双极板石墨/金属的量约为 60kg，2020 年电堆比功率为 2kW/kg、2025 年后达到 2.5 kW/kg，测算出至 2020/2025/2030 年，石墨/金属的需求量为 0.029 万吨/0.232 万吨/4.64 万吨，对相关材料供需边际影响有限。

作为燃料电池车的核心部分，燃料电池电堆制造企业及各组件提供商将最先受益；规模效应对于燃料电池成本降低效果显著，能够率先实现大规模生产的各组件供应商及电堆制造商将在该行业中取得先机；

（1）关注电堆各组件供应商——双极板：石墨双极板研发制造企业上海弘枫、上海弘竣、金属双极板研发制造企业上海冶臻新能源（上汽集团、富瑞特装）；催化剂：贵金属材料全产业链覆盖并且和上汽集团合作进行催化剂开发研究的贵研铂业、和清华大学合作进行催化剂开发研究的武汉喜马拉雅；质子交换膜：和福特、奔驰等国际汽车厂商进行合作的国内质子交换膜研发制造企业东岳集团；气体扩散层：碳纸和碳布研发制造企业上海河森等；

（2）关注燃料电池电堆制造商——全球领先燃料电池制造商巴拉德和重卡产业链龙头潍柴动力联合设立的潍柴巴拉德（潍柴动力）、国内燃料电池技术研发和产业化先行企业神力科技、国内领先的燃料电池电堆和系统企业新源动力等。

表 26：电堆及关键材料国内企业及相关上市公司

分类	企业名称	持股公司	相关上市公司
双极板	上海弘枫实业有限公司	-	
	上海弘竣实业有限公司	-	
	上海冶臻新能源装备有限公司	上海上汽创业投资中心 张家港同创富瑞新能源产业投资基金企业	上汽集团（600104.SH） 富瑞特装（300228.SZ）
催化剂	贵研铂业（600459.SH）	-	
	武汉喜马拉雅光电科技股份有限公司	-	
质子交换膜	东岳集团（0189.HK）		
气体扩散层	上海河森电气有限公司	-	
电堆制造	潍柴巴拉德氢能科技有限公司	潍柴动力（000338.SZ）	
	上海神力科技有限公司	北京亿华通科技股份有限公司（科创板申请中） 北京水木扬帆创业投资中心 上海复星化工医药创业投资有限公司	东旭光电（000413.SZ） 茂化实华（000637.SZ） 复星医药（600196.SH）
	新源动力股份有限公司	上汽集团（600104.SH） 长城电工（600192.SH） 南都电源（300068.SZ） *ST 大洲（000571.SZ）	

资料来源：天眼查，光大证券研究所整理

5、风险分析

(1) 燃料电池电堆核心技术和关键材料自主化发展进程不及预期，或行业发展过程中受到外国政府或企业反制，致使部分组件或技术发展受限；

(2) 政府支持力度发生变化或相应的实施细则落地进度不及预期，造成产业化及规模化能力不足，生产成本偏高；

(3) 氢能燃料电池汽车的大众接受力不及预期，或加氢站及配套设施的建设推进情况不及预期，致使氢能燃料电池车发展速度不及预期。

行业及公司评级体系

评级	说明
买入	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15% 以上；
增持	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5% 至 15%；
中性	未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差 -5% 至 5%；
减持	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5% 至 15%；
卖出	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15% 以上；
无评级	因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。

基准指数说明：A 股主板基准为沪深 300 指数；中小盘基准为中小板指；创业板基准为创业板指；新三板基准为新三板指数；港股基准指数为恒生指数。

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不曾与、不与、也将不会与本报告中的具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）创建于 1996 年，系由中国光大（集团）总公司投资控股的全国性综合类股份制证券公司，是中国证监会批准的首批三家创新试点公司之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与本报告中观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

光大证券股份有限公司 2019 版权所有。

联系我们

上海	北京	深圳
静安区南京西路 1266 号恒隆广场 1 号写字楼 48 层	西城区月坛北街 2 号月坛大厦东配楼 2 层 复兴门外大街 6 号光大大厦 17 层	福田区深南大道 6011 号 NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼