

电动汽车和相关电源材料的现状与前景

杨遇春

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

[摘要] 论述了电动汽车(EV)、电动汽车用镍氢电池、锂离子电池、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)及相关材料的研发现状、产业化前景,指出以电动汽车代替燃油内燃机汽车,以氢能代替碳基燃料,是当前运输业的主要发展方向。

[关键词] 电动汽车; 镍氢电池; 锂离子电池; 质子交换膜燃料电池; 固体氧化物燃料电池

[中图分类号] U469.72 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)12-0001-11

1 电动汽车的兴起和发展现状

电动汽车(EV)是一种以电力代替燃油,以电动机代替内燃机的公路车辆,包括纯电池(驱动)电动车(BEV)、混合型电动车(HEV)与燃料电池电动车(FCEV)三大类,涉及动力推进、能源与汽车结构等核心工艺,涵盖车体、传动、控制、电动机、电池、充电器等多个系统,是21世纪极具市场潜力的“绿色”产业。

电动汽车是电动车的一个主要类型。电动车的范围还有:电动叉车、电动摩托、电动自行车、电动轮椅和电动搬运车等多个品种,本文论及的仅为公汽、轿车、小型货车等电动汽车。

电动车的发明最早可追溯到1834年。19世纪末叶,美、英、法的一些公司开始生产电动车。由于受电池性能的限制,特别是内燃机汽车的迅猛发展,到20世纪30年代电动车已几乎绝迹。直到70年代初,由于能源危机,美国又重新开始了电动汽车的研发工作。此后由于环保问题的日趋严重,环保问题作为推动电动汽车研发的主要因素,以满足美国加州要求汽车零排放法规为主要目标,极大地强化了研发电动汽车的力度和速度。

据推算,今后50年全球人口将从60亿增至100亿,汽车保有量将从7亿辆增至25亿辆,汽车的排放将严重影响全球气候,而石油短缺及美伊战争爆发所预示的潜在能源危机亦将阻碍全球运输业的持续发展。因此电动汽车的研发与产业化已迫在眉睫。

目前西方发达国家经过近十几年的努力,在纯电动汽车与混合型电动汽车(同时使用内燃机)方面已实现和正在实现产业化,但影响电动汽车发展的瓶颈仍然是电池,因此面临如何越过这个能源障碍、逐步扩大市场的问题。作为纯电动车,全球原有的叉车产业在2000年前已形成130亿美元的市场,但作为现代公路交通工具的电动汽车,限于能源和成本问题,目前还仅适于低速、短程交通运输。而混合型电动汽车虽然在结构上稍嫌复杂,但基本上克服了行驶里程短和工作性能上的问题,目前正围绕降低成本的问题大力开展研发活动。

在全球环保法规日趋严格的大环境下,美国加州环境资源局(CARB)抛出的零排放机动车(ZEV)概念及相关环保法规,触发了全球电动汽车走向产业化的热潮。1997年日本丰田公司首先在全球实现了HEV的批量生产。这种叫做Prius

- [9] Aurbach D, Lu Z, Schechter A, et al. Prototype systems for rechargeable magnesium batteries [J]. *Nature*, 2000, 407(6805): 724~726
- [10] Arora Pankaj, Srinivasan Venkat. Report on the electrolytic industries for the year 2001[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2002, 149(11): K1~K29
- [11] Wilkinson Jennie. Minor metals recharge? [J]. *Metal Bulletin Monthly*, 2002(4): 46~49
- [12] Terada N, Yanagi T, Arai S, et al. Development of lithium batteries for energy storage and EV applications [J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 100(1): 80~92
- [13] 陈立泉. 电动车锂离子电池的材料问题[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(11): 32~36
- [14] Nishi Yoshio. Lithium ion secondary batteries: past 10 years and the future[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 100(1): 101~106
- [15] Thackeray M M, Thomas J O, Whittingham M S. Science and applications of mixed conductors for lithium batteries[J]. *MRS Bulletin*, 2000, 25(3): 39~46
- [16] Vincent C A. Lithium batteries: a 50 - year perspective, 1959 ~ 2009 [J]. *Solid State Ionics*, 2000, 134(1~2): 159~167
- [17] 杨遇春, 罗锐平. 锂的新兴应用领域——锂离子二次电池材料[J]. *广东有色金属学报*, 2000, 10(1): 47~54
- [18] Thackeray M M, Vaughey J T, Fransson L M L. Recent developments in anode materials for lithium batteries[J]. *JOM*, 2002, (3): 20~23
- [19] 杨遇春. 燃料电池及其相关材料新进展(二)[J]. *稀有金属*, 1999, 23(4): 316~320
- [20] 郑耀宗, 万瑞英. 质子交换膜燃料电池技术的进展分析[J]. *能源(季刊)*, 1998, 28(2): 119~131
- [21] Li Z P, Morigazaki B H, Liu B H et al. Preparation of sodium borohydride by the reaction of MgH_2 with dehydrated borax through ball milling at room temperature[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003, 349: 232~236
- [22] Kojima Y, Suzuki K-I, Fukumoto K, et al. Hydrogen generation using sodium borohydride solution and metal catalyst coated on metal oxide [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, 27: 1027~1034
- [23] anon Daimler. Chrysler adopts hydrogen fuel system from millennium cell [J]. *Advanced Materials & Processes*, 2002, (2):72
- [24] O'Driscoll M. Driving a new market for minerals? [J]. *Industrial Minerals*, 2002, (421): 34~39
- [25] Singhal S C. Science and technology of solid oxide fuel cells [J]. *MRS Bulletin*, 2000, 25(3): 16~21
- [26] Akikusa J, Adachi K, Hoshino K, et al. Development of a low temperature operation solid oxide fuel cell [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148(11): A1275~A1278
- [27] Singhal S C. Advances in solid oxide fuel cell technology[J]. *Solid State Ionics*, 2000, 135(1-4): 305~313
- [28] anon. SOFC redux[J]. *Techno Japan*, 2001, 34(9): 8~23

Status and Future of the Electric Vehicles and Their Relevant Power Source Materials

Yang Yuchun

(General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China)

[Abstract] The status, R&D tendency and commercialization prospect of electric vehicles (EVs), their power sources (nickel-metal hydride batteries, lithium ion secondary batteries, proton exchange membrane fuel cell, solid oxide fuel cell) and relevant battery (cell) materials are elucidated. Electric vehicle as a viable alternative to petrol-engine cars and hydrogen energy as an alternative energy source to carbon-based fuels is an important development direction for transportation.

[Key words] electric vehicle (EV); nickel-metal hydride (Ni-MH); lithium ion battery (LIB); proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); solid oxide fuel cell (SOFC)

的 HEV 为超低排放车, 最高时速 144 km, 燃效 20 km/kg, 包括 8 年行驶 10 万英里的电池组 (240 个 6.5Ah 的 Ni-MH 电池, 共重 44 kg, 提供 20 kW 动力)、混合系统及附件在内, 每辆售价 19 995 美元。这个价位比表 1 所列纯电动汽车低很多。随后日本的本田, 美国的戴姆勒-克莱斯勒、通用汽车和福特汽车公司相继开发了混合型电动汽车并实现了不同程度的产业化。但是, 电池的比能量或能密度远低于汽油, 因此大大加快了 FCEV

的开发。

应该说在电动汽车的开发方面, 美国在 1996 至 2000 年期间不如日本成功, 生产成本高、行驶里程短, 不能满足用户要求 (表 1)。因此美国政府调整了研发方向, 加大了扶持 HEV 与 FCEV 商品化的力度。2001 年布什政府宣布, 为销售这两种车型设置了 40 亿美元的附税信贷, 同时美国公司和能源部仅 2001 年在 FCEV 方面就分别投入了 6 亿美元和 1 亿美元的巨资。

表 1 纯电动汽车的若干重要数据^[1]

Table 1 Key data of battery electric vehicles

电动汽车	电池	行驶距离/ km	质量/kg		电池质量/ kg	价格/美元	
			限重	乘客		销售价	出租价
GM EV-1	铅酸	88~152	1 348	2	553	33 959	424
	Ni-MH	120~208	1 205	2	410	43 995	499
GM S-10	铅酸	64~88	1 977	2/ (364 kg)	612	32 995	不详
	Ni-MH	104~128	1 909	2/ (432 kg)	不详	42 995	不详
Ford Ranger EV	铅酸	80	2 243	2/ (395 kg)	不详	32 795	349
	Ni-MH	104~136	1 907	2/ (568 kg)	不详	42 795	450
丰田 RAV4	Ni-MH	202	1 564	5/ (376 kg)	450	45 000	不详
本田 EV plus	Ni-MH	200~220	1 615	4	450	44 999	454
日产 Altra	锂离子	192	1 704	4/ (372 kg)	350	50 999	599
Chrysler EPIC	Ni-MH	128~144		5/ (363 kg)	不详	不详	450

我国电动汽车的研发自 1997 年全面启动, 大体上与美、日、欧等国处于同一起跑线。发展电动车首先给我国民族汽车产业在整车研发中赶超世界先进水平带来了难得的机遇; 其次, 2008 年奥运会开列的 20 亿元电动汽车订单, 也推动了我国电动车的研发驶入快车道; 三是缓解我国对石油的需求。因此这项具有重大战略意义的项目已列入国家“十五”重大科技攻关计划, 在今后 5 年内将获得国家和地方、企业共 40 亿元人民币的资金支持。

总的来看, 电动汽车工艺正日趋成熟, 一些先进的工艺已用于延长行驶里程和降低成本。通用公司的 EV-1 和日产 Altra EV 已成为 BEV 先进工艺水平的代表; 丰田公司的 Toyota Prius 和本田公司的 Honda Insight 则是 HEV 产业化的典型代表; 燃料电池电动汽车尚处于开发阶段, 如福特公司的 Ford 2000P 和戴姆勒-克莱斯勒公司的 NECAR5 是这类车型的典型代表。鉴于美国加州对电动汽车需求的推波助澜, 2000 年全球电动汽车销售量已

达 155.7 万辆, 预计 2010 年将成长为销量 1 246.5 万辆、销售额 266.5 亿美元的产业^[1~4]。

2 电动汽车用电池及电池材料

EV 是脱胎于现代汽车工业的一个新车种, 它与汽车的区别在于以电力代替汽油, 其关键技术是电动马达和电池, 后者是决定 EV 行驶里程与成本的决定因素。为解决行驶里程并加快电动汽车商品化进程, 必须逾越电池性能这个瓶颈, 因此尤须在近期内开发高比能、高比功率、快速充电以及深度放电、循环和使用寿命长、安全、不污染环境、可再生及价格合理的电池及电池材料。目前可供选择的电池除花样翻新的阀控铅酸电池 (VRLA) 外, 主要有镍基电池和锂基电池两大类 (表 2)。

镍基电池中, Ni-Cd 电池工艺成熟、放电流大, 但作为 EV 电源其工作性能与环境方面的劣势, 使其处于 Ni-MH 储氢电池的下风。Ni-MH 电池及 Ni-Zn、Ni-空 (气), Na/NiCl₂ 等电池

都有达到美国先进电池联合体 (USABC) 制定的中期目标的能力。Ni-Zn 的主要缺点是循环寿命短 (表 2)。Na/NiCl₂ 是电动汽车在中期易于接受的高温电池, 目前尚不适用于应用, 其性能还有进一步改善的空间。Ni-MH 电池是镍基电池中性能最好的, 作为小型电池已占有广阔的 3C 产品市场; 作为动力电池它在安全性能方面, 为锂离子电池所不及。更何况储氢电极 (MH) 所用的稀土和钛资源丰富, 原料供给充足和有成本相对低廉的优势。

表 2 电动汽车电池的主要参数^[1]

Table 2 Key parameters of EV batteries

电池类型	比能量 ^a /Wh·kg ⁻¹	能密度 ^a /Wh·L ⁻¹	比功率 ^b /W·kg ⁻¹	循环寿命 ^b /循环数	预计成本 ^d /美元·(kW·h) ⁻¹
VRLA ^c	30~45	60~90	200~300	400~600	150
Ni-Cd	40~60	80~110	150~350	600~1 200	300
Ni-Zn	60~65	120~130	150~300	300	100~300
Ni-MH	60~70	130~170	150~300	600~1 200	200~350
Zn/空(气)	230	269	105	不详 ^e	90~120
Al/空(气)	190~250	190~200	7~16	不详 ^e	不详
Na/S	100	150	200	800	250~450
Na/NiCl ₂	86	149	150	1 000	230~350
Li-聚合物	155	220	315	600	不详
Li 离子	90~130	140~200	250~450	800~1 200	>200
USABC 要求	200	300	400	1 000	<100

a—在 C/3 率即 3 小时率下取得; b—放电深度为 80% 条件下;
c—机械再充; d—仅供参考; e—阀控铅酸电池; USABC—美国先进电池联合体。

锂基电池由于性能明显优于 Ni-MH 电池, 在小型电池的应用中锂离子电池在便携式电器应用中已呈逐步取代 Ni-MH 电池之势, 但作为动力电池, 在电动汽车的应用中还有安全问题的隐患。

以色列开发的一种可再充镁电池也值得注意。这是一种以金属镁为阳极, 有机卤铝酸镁为电解液, 含镁、铝与硫的新材料为阴极的电池, 充放电循环可达数千次、工作温度宽、搁置寿命长, 估计价格比任何市售的可再充电池都便宜, 是否适用于电动汽车, 尚需假以时日, 视今后开发情况而定。

目前, 上述电池虽然在提高电容量方面取得明显进展, 但毕竟电容量有限, 限制了行驶里程, 且容量提升, 需要较长的充电时间, 且电池本身使车体过重, 因此开发另一类化学电源——燃料电池势不可免。汽油的理论比能量和能密度分别为 12 400 Wh/kg 和 9 100 Wh/L, 远高于电池 (表 2) 的相

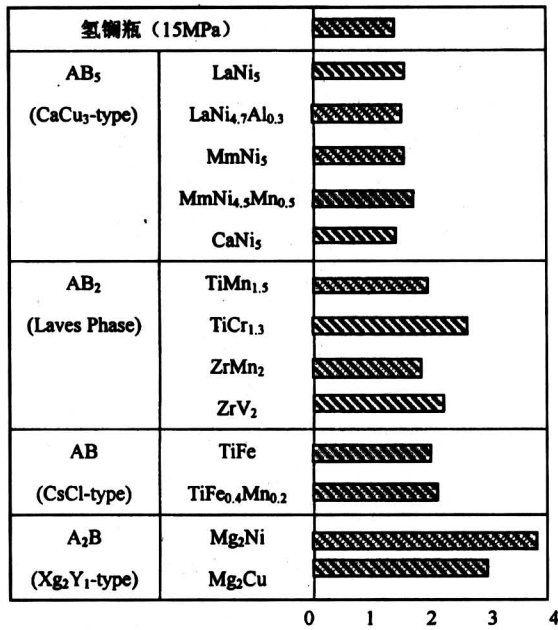
应数值, 1 kg 氢燃烧放出的热量为 39 kW·h, 是液态碳氢化物如甲烷、汽油等燃料的 3 倍以上, 因此从燃料电池外部不断提供氢和氧, 用 H₂ 作燃料电池动力车的燃料, 由于能量转换效率高达 50%~60%, 在续航力或行驶里程 (能密度) 和加速性 (功率密度) 等性能上可做到二者兼得^[1,5]。

3 镍氢 (Ni-MH) 动力电池及材料

根据使用规格, 通常把电池分作小型便携式电池 (1~5 Ah) 和大型动力电池 (50~250 Ah) 两种, 前者用于手机和笔记本电脑, 后者主要用于电动汽车。发展电动汽车的瓶颈在于电池, 而提高电池性能在于发展电极材料, 对 Ni-MH 电池而言, 则在于开发商品化的储氢电极合金。

储氢合金及金属氢化物的研究发轫于 20 世纪 70 年代, 要求金属具有大于气、液甚至固态氢的储氢能力, 同时具有极好的氢化、脱氢可逆性。当时发现 TiNi, TiFe, LaNi 等 AB 型和 AB₅ 型材料, 由于循环寿命短、容量低, 并不适合工业应用。80 年代开始涉足 AB₂ 型合金的研究, 先后在研发稀土基 AB₅ 型 Ln-Ni-Co-Mn-Al 合金 (Ln=镧系金属) 和 Ti/Zr 基 AB₂ 型 Ti/Zr-V-Ni-M 合金 (M=金属) 方面取得重大进展, 为可再充镍氢电池的商品化打开了天窗, 从而导致日本三洋、松下等公司率先实现以 MmNi_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3} 为负极的 Ni-MH 电池的批量生产, 及美国 Ovonic 公司以 Ti/Zr-V-Ni-M (M=Co, Al, Cr) 为负极的 Ni-MH 的另起炉灶。AB₂ 型合金较 AB₅ 型合金的容量高 (图 1, 表 3)、寿命长、造价相对较低, 其所含的拉弗斯 (Laves) 相均显示颇高的容量, 如 ZrV₂H_{5.3}, ZrMn₂H_{3.6}, ZrCr₂H_{3.4} 等。但它们的氢化物在室温过于稳定, 且由于表面存在氧化层, 故活化性能差, 必须经特殊的表面处理如氟化才能保持活化特性。平台压力高及明显的滞后效应, 影响了它的应用。AB₅ 型合金的储氢容量尽管较低, 但氢化/脱氢是在室温常压附近状态下进行的, 所需之储氢容器或电池外壳简便易解决。因此稀土系 AB₅ 型储氢电池的生产在市场上较 Ti/Zr 或 Ti/Mn 系 AB₂ 型储氢电池占优势。

稀土储氢合金的工作性能近年来已有很大提高, 1990 年 AA 型电池的储氢容量为 1 000 mAh, 到 2000 年已提升到 1 600 mAh, AAA 型的容量 1994 年为 500 mAh, 2000 年已提升到 750 mAh。

图1 储氢合金的类型及储氢容量^[6]Fig.1 Major type and H₂ capacity of hydrogen storage alloy表3 AB₅型与AB₂型合金电化性能的比较^[7]Table 3 Comparison of electrochemical performance of AB₂Ti/Zr-based and AB₅ rare earth-based alloys

性能	Ti/Zr 基合金	稀土基合金
容量/mAh·g ⁻¹	230~430	230~310
电极制备	干压	干压或电极糊涂抹
预活化	通常需要	不需要
高倍率放电能力	好/极好	极好
循环寿命	好/极好	极好

Sc型Ni-MH电池的高倍率放电能力已提升到20C,当全充时功率高达500W/kg以上,已达到或超过Ni-Cd电池大电流放电的水平。1999年USABC宣称与SAFT联合生产的Ni-MH电池组件已达到USABC规定的动力电池目标。组件规格为390mm×120mm×195mm,3小时率(C/3)的容量为106Ah,组件重19.8kg,比能量70Wh/kg,能密度152Wh/L,循环寿命1000~1400次。由30个组件构成电池组,重670kg,规格925mm×2005mm×229mm功率达40kW·h(360V),已用于微型货车。此前,日本先期开发了组成与小型电池略有不同的MmNi_{3.5}Co_{0.7}Al_{0.8}为负极合金制成了60Ah和30Ah两种动力电池,

由丰田率先将Ni-MH电池用于电动汽车(表4)。随后美国通用汽车的EV1、福特的Escape、丰田的HV-M4(第二代)等电动汽车及福特的LSR动力系统广泛使用Ni-MH电池,促使Ni-MH电池的规格与性能进一步提升。

表4 丰田和本田混合型电动汽车使用电池的类型及规范^[6]

Table 4 Type of batteries used by Toyota and Honda HEVs and their specifications

厂家	车型	电池	电池供应商	下线时间	最大功率/kW	电压/V	电池容量/kWh
丰田	Prius	Ni-MH	松下电动车能源公司(PEVE)	1997	25	288	1.75
本田	Insight	Ni-MH	PEVE	1999	10	144	0.8
丰田	Estima	Ni-MH	PEVE	2001	20	216	1.4
本田	Civic	Ni-MH	PEVE	2001/02	12	144	0.8

电池的性能特别是比能量(Wh/kg)和比功率(W/kg)对电动车至关重要。纯电动车要求容量100Ah、比能量90Wh/kg、比功率450W/kg的电池组件,混合型电动车要求容量35Ah、比能量80Wh/kg、比功率700W/kg的电池组件。为降低成本,提高工作性能,AB₅型电池厂家一方面减少钴的用量(占成本的40%),添加各种组分元素如Mg, Ti, Zr, Zn等研发新的合金组成,另一方面改变材料的微观结构也是一个方向,特别是使储氢合金纳米化,增大表面积,增加高活性中心。目前AB₅型镍氢动力电池的比能量尚徘徊在60~70Wh/kg之间,估计达到80Wh/kg甚至更高不成问题。美国Ovonic公司是采用AB₂型合金的厂家,已研发出能密度达70~90Wh/kg的矩形镍氢电池,这表明镍氢动力电池中近期将在纯电动汽车及混合电动汽车的生产中从容应对锂离子电池的挑战,弥合在小型电池市场所处的劣势地位。

90年代后期丰田Prius与本田Insight的出现开创了电动汽车(特别是中、短程)的新纪元。预计2008年将形成不少于60万辆电动汽车的市场,丰田2005年混合型电动汽车的销量将达到7万辆。这同时也给动力电池开辟了巨大的市场。2002年HEV电池的市场估计为7000万美元,2005年预计为2.5亿美元,2009年将高达5亿美元。2008年Ni-MH电池组的产量将达到4万件,若按每kW·h Ni-MH 750美元计,其销售总额约4亿美

元 (Ti/Zr 基电池可能占 1.5 亿美元)。如果这 60 万辆汽车都使用稀土基 Ni-MH 电池, 每辆 HEV 的电池质量按 450 kg 计, 电池总质量达 27×10^4 t, 显然对制造储氢负极合金的原料提出了巨大的要求。我国和全球稀土与钛的供应充足, 但作为电池生产大国, 镍、钴特别是钴的供应捉襟见肘, 制约了 Ni-MH 电池的生产。1999 年日本仅生产 Ni-MH 电池就消耗了 2.2×10^4 t 镍 (我国 2001 年镍的产量仅为 5.07×10^4 t)。全球钴的需求量约 3.6×10^4 t, 其中 15%~18% 即 6 500 t 用于电池制造, 日本占 5 670 t。因此和日本在世界电池市场上竞争, 必须在原料上做好充分准备^[7-11]。

4 锂离子、锂聚合物动力电池及材料

与 Ni-MH 电池相比, 锂离子二次电池具有工作电压 (一般为 3.6 V)、能密度和比功率高 (表 2) 以及放电平稳、工作温度宽、电池质量轻等诸多优点, 在小型电池领域如 3C 等便携式高端产品的应用市场中, 已逐步取代镍氢、镍镉电池而居首位 (表 5)。但是, 作为电动汽车动力电池, 除镍镉电池镉的毒性强、污染环境并存在记忆效应不能与之竞争外, 锂离子电池由于安全和加工制造困难以及成本上的原因, 在中、近期尚不及 Ni-MH 电池在电动汽车上应用得广泛, 包括锂聚合物电池在内, 仅适于做混合型电动汽车的动力源。锂基电池目前正朝大容量及高能密度发展, 日本已能生产放电容量 2 kW·h 适合电动汽车的大型电池, 并研发 45 kW·h 级的产品 (表 6), 但是安全问题是待解决的隐患。和备有保护电路的小型锂离子电池不同, 大中型电池因使用完全锂化的石墨负极及含可燃有机溶剂的电解质, 一旦充电达到峰值, 或因使用不当出现过度充电, 使 Li^+ 脱嵌以金属锂的形式沉积在碳素表面, 同时脱锂的 $\text{Li}_{1-x}\text{-CoO}_2$ 正极有可能释放出氧, 从而导致热散失、排气、着火甚至爆炸。锂活性强遇火、氮、酸或氧化剂均有可能爆炸和着火, 因此大中型锂离子电池最大的挑战是研发新电极材料和阻燃的电解质溶剂。

正极材料在小型电池方面实现产业化的有 LiCoO_2 , LiNiO_2 和 LiMn_2O_4 。 LiMn_2O_4 的放电容量与循环寿命不及 LiCoO_2 , 但锰价仅及钴的 1/20, 使电池成本明显下降。日本以 LiMn_2O_4 为正极、石墨为负极已制成比能量 140 Wh/kg、能密度 346 Wh/L、比功率 465 W/kg 的单电池及尺寸 280 mm

$\times 420$ mm $\times 140$ mm, 重约 29 kg 的 3 kW·h 级电池组件并获实用。2000 年日产在其 Tino MPV 型 HEV 上使用了重约 20 kg 由 48 个电池构成的锂锰氧电池组。三菱公司用锂锰氧电池在 FTO-EV 原型车上创造了 24 h 行驶 2 000 km 的世界记录, 展示了质量轻、行驶里程长、比能量高等特点。

表 5 历年来全球各类二次电池产值的变迁^[4]

Table 5 Turnover of various rechargeable batteries globally in recent years $\times 10^4$ USD

电池类型	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
锂离子	37 500	132 500	175 500	215 700	251 700	280 600	209 900
锂聚合物					2 100	13 300	17 200
镍氢	99 200	87 000	90 700	95 500	117 000	112 500	86 700
镍镉	206 600	188 100	175 000	171 300	158 800	146 400	127 400

表 6 EV 用大型电池组件的研发现状^[11]

Table 6 R&D Status of large size battery modules for EV application

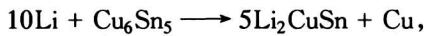
性能指标	目标	$\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ (圆柱形)	LiMn_2O_4 (矩形)
放电容量/kW·h	3	3.55	3.17
比能量/Wh·kg ⁻¹	150	146	130
能密度/Wh·L ⁻¹	300	271	235
比功率/W·kg ⁻¹	400	783	416
能效率/%	85	96	96.6
循环寿命/次数	1 000	~620	~460

在上述三种已产业化的正极材料中, LiCoO_2 放电曲线平稳, 第一循环充放电效率、放电容量与高温稳定性好, 为首选材料, 但钴资源稀缺、成本高。 LiNiO_2 的性能居其次。 LiMn_2O_4 放电曲线平稳, 第一循环充放电效率低, 放电容量低于 LiCoO_2 , 工作电压略高于 LiCoO_2 , 高温稳定性最好, 锰资源丰富, 成本低, 但循环寿命低。通过加铬及控制放电深度 (DOD), 能有效地改善循环寿命及抑制容量损失 (高温时)。

在研的新型正极材料有 LiFePO_4 , FeSO_4 、钒化物、钼化物等。 LiFePO_4 在安全特性及放电曲线平稳方面优于其他材料, 适用于纯电动和混合型电动汽车, 尽管平均放电电压 (3V) 不及 LiCoO_2 , LiNiO_2 和 LiMn_2O_4 , 单位质量放电容量 (160Ah/kg) 低于 LiNiO_2 , 因不使用 Co 及 Ni 而令人瞩目。

负极材料主要使用硬碳, 也使用石墨/硬碳混合碳, 弥散银的石墨块 (寿命达 4 000 次循环),

多层石墨以及在硬碳中掺入 P_2O_5 (最佳掺入量 5%), 在空气中实施氧化处理提高电化学性能。研发的负极材料还有多砷半导体 (PAS)、锡或硅的氧化物、金属氮化物等高嵌锂材料。日本有公司还从事过用非晶态锡的复合氧化物 (ATCO) 作锂离子电池负极的产业化尝试。 $Sn_{1.0}B_{0.6}P_{0.4}Al_{0.4}O_{3.6}$ 的充电容量达 1 000 mAh/g 和 2 300 mAh/cm³。铜锡基合金如 Cu_6Sn_5 的开发也引起了特别关注。锂与 Cu_6Sn_5 发生局部规整反应:



锂的嵌入发生在高于锂标准还原电位数百微伏的情况下, 但不存在 Li_xSn 二元合金的体积膨胀问题。 Cu_6Sn_5 在该反应产生 1 360 mAh/cm³ 的电化容量, 明显高于石墨的理论电化容量 818 mAh/cm³。

在非水溶液电解质及溶剂方面, 包括大型电池在内一般多使用六氟磷酸锂 ($LiPF_6$) 作该电解质的溶质, 乙烯碳酸酯 (EC)、二乙基碳酸酯 (DEC)、乙基甲基碳酸酯 (EMC) 等形成的碳酸酯混合物作溶剂。我国 1999 年已在西安由中福 (Zhongfu) 企业集团建立起年产 30t 的 $LiPF_6$ 生产线。除 $LiPF_6$ 外, 采用高介电常数非水溶剂丙烯碳酸酯、乙烯碳酸酯、二甲亚砜的还有 $LiBF_4$ 、 $LiClO_4$ 和 $LiAsF_6$ 。Denso 公司还使用了环醚为溶剂的双乙基磺酸酰亚胺锂—— $LiN(C_2F_5SO_2)_2$ 即 $LiBETI$, 以提高电池的循环次数。

但采用阻燃溶剂防止着火仍不尽人意。这个问题的解决将明显改善安全隐患, 有利于推广它们用在电动汽车上的应用。我国发现由尿素与三氟甲基磺酸酰亚胺锂 ($LiTFSI$) 形成的电解质具有阻燃作用, 对锂离子动力电池的开发与产业化意义重大。

创全天行驶 2 000 km 世界记录的 FTO-EV 使用的锂锰氧电池组容量为 27 kW·h, 质量为 359.6 kg, 而使用 Ni-MH 电池组和铅酸电池组, 两者的容量分别只有 26 和 17 kW·h, 质量则分别高达 447.6 kg 和 489.4 kg。从长远看, 未来应是锂基电池的天下。当前它和镍氢电池应是长距离与中短距离相互补充, 在 HEV 方面发挥作用。

USABC 曾经公布了一个中远期 EV 电池工作性能的奋斗目标 (表 7), 对照表 2 不难看出, 锂基电池的主要性能已达到设定的中期目标, 解决好安全和成本问题, 将有很好的应用前景^[1~3, 11~18]。

表 7 USABC 设定的汽车动力电池性能目标^[1]

Table 7 USABC performance goals for EV batteries

主要目标	中期	远期
比能量(C/3 放电率)/Wh·kg ⁻¹	80(希望 100)	200
能密度(C/3 放电率)/Wh·L ⁻¹	135	300
比功率(放电深度 80%/30 s)/W·kg ⁻¹	150(希望 200)	400
功率密度/W·L ⁻¹	250	600
寿命/a	5	10
循环寿命(80% 放电深度)/次数	600	1 000
最终价格/USD(kW·h)	< 150	< 100
工作温度/°C	-30~65	-40~85
再充时间/h	< 6	3~6
快速再充时间(达 40%~80% 充电态)/h	0.25	
自放电/%	< 15(48 h)	< 15(month)

5 电动汽车用燃料电池及材料

燃料电池电动汽车 FCEV 在新世纪的头 10 年将加快产业化的步伐, 其最大的优势在于可跑出与内燃机汽车相同的里程 (能密度约为普通可再充电电池的 10 倍), 并具有与之相同的工作性能。燃料电池主要由阳极 (燃料极)、阴极 (空气极或氧电极) 与电解质组成, 只要不断提供氢、氧燃料, 即可持续供电, 不存在大容量电池需要长时间充电的不便。燃料电池的缺点是成本高, 氢的储存与转移尚无满意的途径, 因此 FCEV 仍处于研发阶段。巴拉德公司曾表示, FC 发动机只有在产量达到 $(25 \sim 30) \times 10^4$ 台的时候, 才能与内燃机竞争。但福特董事会主席小福特在 2001 年就已经认为: “燃料电池车最终将结束内燃机延续 100 年的王朝。”

鉴于对未来能源与环保问题的考虑, 全球汽车制造商 (表 8) 投入了数十亿美元用于 FCEV 的研发, 其中福特的 P2000 和戴姆勒-克莱斯勒的 Ncar 5 代表了当今 FCEV 的最高研发水平。前者为质子交换膜燃料电池电动车 (PEMFC EV), 后者为直接甲醇型燃料电池电动车 (DMFC EV)。两者的最高时速分别为 128 km 和 150 km, 都使用质子交换膜。通用汽车的 Precept 五座轿车型 FCEV 概念车的燃料经济性相当于每加仑汽油行驶 100 英里, 从静态到 60 英里加速仅需 9 s 并且行程达 500 英里 (800 km)。

表 8 各汽车厂家制造的燃料电池概念车^[10]

Table 8 Concept FCEV introduced by major automakers

制造厂	车型	规格/类型	燃料	燃料源	燃料电池型号 及厂家	行驶里程 /miles	最高时速 /mile·h ⁻¹	辅助能源
戴姆勒-克莱斯勒	Necar 5	四座, 紧凑型	甲醇	车上重整器	75 kW Ballard	300	80	无
日产	Xterra FCV	五座 SUV*	甲醇	车上重整器	75 kW Ballard	不详	75	锂离子电池
福特	Focus FCV	五座紧凑型	氢	压缩煤气	75 kW Ballard	100	80	无
大众	Bora HyMotion	五座轿车	氢	液氢	75 kW Ballard	250	90	无
本田	FCX-V3	四座轿车	氢	压缩煤气	75 kW Ballard	250	90	超级电容器
现代	Sante Fe FCEV	五座 SUV*	氢	压缩煤气	77 kW IFC	100	77	无
通用汽车	Hydro Gen I	紧凑型运货车	氢	液氢	75 kW GM	250	90	无

* SUV—运动型多功能车

燃料电池有 6 种类型 (表 9), 其中使用质子交换膜运输 H⁺ 的质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 以功率密度高、工作温度低 (<80℃)、预计成本低及启动速度快而成为 FCEV 的理想电源。PEMFC 的氢气来源于高压氢气、液氢、LaNi₅ 型

氢化物及甲醇重整 (水与甲醇混合物重整的温度为 280℃, 汽油重整获取氢的温度为 800~1 000℃)。除戴姆勒-克莱斯勒与日产使用甲醇作氢源的技术及“现代”采用 IFC 技术外, 所有公司都采用加拿大巴拉德燃料电池公司提供的 PEMFC 技术。

表 9 燃料电池的典型特征

Table 9 Typical performances of FCs^[1]

	PAFC	AFC	MCFC	SOFC	PEMFC	DMFC
工作温度/℃	150~210	60~100	600~200	900~1 000	50~100	50~100
功率密度/W·cm ⁻²	0.2~0.25	0.2~0.3	0.1~0.2	0.24~0.3	0.35~0.6	0.04~0.23
预计寿命/h	40 000	10 000	40 000	40 000	40 000	10 000
预计成本/USD·W ⁻¹	1 000	200	1 000	1 500	200	200

PAFC—磷酸型燃料电池, AFC—碱性燃料电池, MCFC—熔融碳酸盐燃料电池, SOFC—固体氧化物燃料电池, DMFC—直接甲醇燃料电池

固体氢化物燃料电池 SOFC 的工作温度高达 800~1 000℃, 结构也较 PEMFC 复杂, 但它不使用铂族催化剂和外部重整装置, 尤其是其空气极、燃料极、固体电解质、互连材料等都使用稀土复合氧化物, 扬我国稀土资源之长, 避我国铂族资源之短, 因此除用作固定式发电装置外, 也是我国研发电动汽车的首选电源之一。与直接用甲醇燃料的电池电动汽车 DMFC EV 比, DMFC 采用车上重整, 仅用于转换的燃料就占总燃料的 25%。从节省能耗看, 发展 SOFC EV 也是一个重要的方面。因此, 研发低温 PEMFC 和高温 SOFC 作为电动汽车的驱动电源及其材料, 应是今后较长时间内解决汽车清洁能源的重大主攻方向^[1~3, 10]。

5.1 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 材料

PEMFC 主要由电极、薄膜电解质与导流板构成。其核心组件由氟碳聚合物 (如杜邦生产的过氟化磺酸聚合物 Nafion) 质子交换膜, 两侧分别作阴、阳极的铂催化层及外侧作结构支撑及气体扩散

层用的多孔性材料组成。这几层材料用热压法压成膜电组合体 (MEA), MEA 厚度小于 1 mm 是将燃料氢与氧结合转化成电能的关键。

通常将 2~5 nm 的铂粒负载到碳粒表面并以带疏水涂层的多孔碳布为背衬, 形成典型的气体扩散电极。铂是在阳极催化 H₂ 为 H⁺ 及在阴极使 O₂ 与透过交换膜的 H⁺ 反应生成水及电流最有效的催化剂。为降低成本, 一般将铂弥散在各种载体内, 如在铂/碳类纳米级 PAN (聚丙烯腈)/Pt 中形成复合催化电极。也有使用 Pt-Cr-Cu 代替 Pt 的。巴拉德公司开发了一种将 Pt/C 与电解质调成油墨通过丝网印刷印制电极的方法, 可将 Pt 含量控制在 0.1~1.0 mg Pt/cm² 之间, 已实现批量生产。美国德州 A&M 大学更将阴极铂含量控制在 0.05 mg Pt/cm² 以下, 从成本上已接近商业化的标准。对电动汽车而言, 整个膜电组合体的催化剂含量必须降到 0.35 mg Pt/cm² 以下, 才能应对成本的挑战。有人认为催化电极层的厚度可降至 5 μm, 故

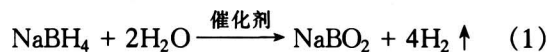
铂的用量还有下降的空间。

在质子交换膜方面,巴拉德公司最近开发出一种适合汽车用的部分氟化膜,成本低,批量生产后可降价至 50 USD/m²。

导流板是接通电路、提供反应气体与去除生成水分的重要组件,位于结构支撑层之外,由纯石墨制成。把许多 MEA 和导流板堆摞在一起,增高了电压,扩大 MEA 和导流板的面积,就增大了电流。通常每个 PEM 电池约含数百平方英尺的膜电极组合与导流板。在进行石墨表面加工时,要形成流通气体的管道,加工过的碳板估计占电池组成本的 60%。主要的发展方向是采用质量轻、尺寸小的轻质复合碳板与金属类薄板。

燃料氢的供应或氢源技术也涉及许多材料问题。除使用 LaNi₅ 型合金作氢源外,气态的氢必须用钯与钯合金净化;使用甲醇等作氢源时必须解决催化重整后气流内 1% 左右 CO 和 CO₂ 的清除问题。为防止催化中毒,一般使用 1:1 的 Pt/Ru (高表面积石墨作载体) 催化剂。为从甲烷中获取氢, Niagra Mohawk Power 公司还发明了一项用 Ni/SiO₂ 催化裂化甲烷再用 1~2 μm 厚的 Pd-Nb 膜分离制氢的新技术。还有使用铑基催化剂从甲烷转化中制氢的。此外, Proton Energy Systems 还开发了一种不经机械压缩用电力和水直接产生压力大于 2 000 psi (14 MPa) 的高压氢气的技术,明显加快了 FCEV 用氢气站基础设施创建的步伐。我国大连化物所开发的具有自主知识产权的 75 kW 和 150 kW 发动机及氢源技术,已处于产业化的前期,用有限的投入产生这样的成就,确实可贵^[1~3,10,19,20]。

在氢源技术最令人振奋的报道莫过于美国千年电池公司 (Millennium Cell Inc.) 开发的由硼氢化钠生产氢的系统,该系统系根据下式:



生产氢的。硼氢化钠的主要优势在于它的储氢密度或储氢容量高达 $w(\text{H}_2) = 10.6\%$, 远高于稀土储氢合金 (~1.4%)、Ti-Mn 合金 (~2%)、Mg₂Ni 合金 (3.8%) 和 MgH₂ (7.6%) 的储氢容量,达到或超过了 FCEV 每行驶 500 km 消耗约 3.1 kgH₂, 从而使给定体积和质量的燃料箱内的燃料必须含 $w(\text{H}_2) = 6.5\%$ 或 62 kg/m³ 的要求 (参见图 1), 并且制氢时不需要压缩和液化;其次,硼氢化钠溶解在水内和常温、常压下装在轻质的塑料

桶中既可储存又便于运输,无毒,不会燃烧和爆炸;第三,硼氢化钠的原料为硼砂,按全球年产 5 000 × 10⁴ 辆汽车计,这些车全部为 PEMFC EV 且每辆车消费 400 kg 硼砂计,则每年有大约 2 000 × 10⁴ t 硼砂用于生产硼氢化钠,全球硼砂储量约 6 × 10⁸ t 以上,而这 2 000 × 10⁴ t 硼砂可循环使用,不存在资源短缺的问题;第四,该制氢技术能量密集 (在适当条件下,每克 NaBH₄ 产生 0.213 g 的 H₂), 产生的氢为纯氢,可闭路反复使用,其反应物为用 $w(\text{NaOH}) = 1.3\%$ 溶液,作稳定剂的 $w(\text{NaBH}_4) = 20\% \sim 35\%$ 水溶液,产物为供燃料电池使用的纯氢及副产品含 NaOH 的偏硼酸钠水溶液,后者为浆状液,能用闭路系统借逆反应再生出富氢的硼氢化钠。

硼氢化钠过去主要用作造纸工业的漂白剂,做燃料,成本则是主要问题。2001 年千年公司在用硼砂做原料生产硼氢化钠方面与 Air Products & Chemicals 公司和 US Borax 公司合作在技术和制造能力上都取得了进展,价格上可与汽油竞争。

据披露,用 MgH₂ 与脱水硼砂 (Na₂B₄O₇) 在室温下通过球磨进行机械-化学反应,并不断补充钠盐 (最好是 Na₂CO₃) 可获得产率高达 78% 的硼氢化钠 (见式 2)。整个实验流程见图 2。

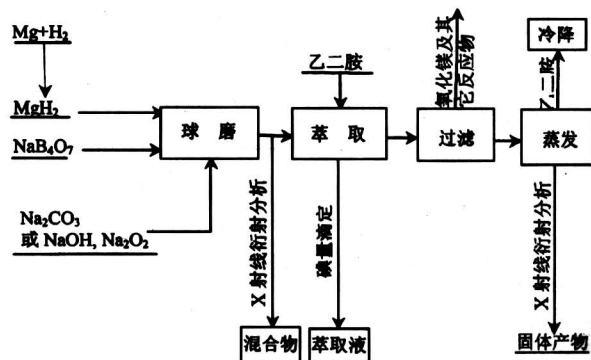
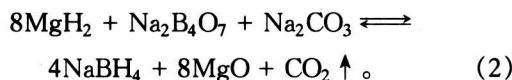


图 2 实验流程^[21]

Fig. 2 Scheme of experimental procedures

NaBH₄ 与水反应生产氢的过程必须使用催化剂, Yoshitsugu Kojima 等人涂铂的 LiCoO₂ 作催化剂比 Pt-TiO₂, Pt-CoO 的效果好。它们假定标准的 PEMFC 的工作电压 0.7 V, 据此推算在 20~23℃ 每使用 1 g Pt-LiCoO₂ 催化剂 (Pt 的含量为

15 mg)，通过生成氢可产生 0.1~0.34 kW 的电力。因此一个电动汽车用的 77.5 kW 的 PEMFC，催化剂用量应为 230~780 g。可见研制新型的少铂催化剂对降低电动汽车成本非常重要^[19~24]。

5.2 固体氧化物燃料电池 (SOFC) 材料

PEMFC 的膜电极组合体中的阴、阳极以及 NaBH₄ 制氢过程都使用铂，给稀缺的铂族资源造成压力。而 SOFC 使用温度虽高，但能量转换效率高 (可达 60%~70%)，不使用铂族金属催化剂，氢燃料的选择范围宽，碳氢化物转化时产生的 CO 亦可作燃料，不存在 PEMFC 非用纯氢不可，否则 CO 和 CO₂ 会造成催化剂中毒及影响电极寿命的问题。SOFC 的 NO_x 和 SO_x 排放水平非常低。此外由于约 1 000℃ 的工作温度，对天然气等燃料可在电池堆内重整，不需要昂贵的外部重整系统。因此，多以固定的形式用于大医院、超市及偏远的居民区，同时所用材料为固态，不存在腐蚀问题，且可制成薄板，减小了体积，已在船舶、潜艇、电动汽车上试用。

SOFC 主要使用固态电解质、阳极、阴极及互连材料，固态电解质是 SOFC 的核心材料。SOFC 基于氧离子导电电解质将氧离子 (O²⁻) 从空气极一侧传导到燃料极 (阳极) 一侧发生反应：



产生电压的，为此曾广泛使用萤石型氧化物材料如氧化钇作稳定剂的氧化锆 (YSZ)、掺稀土氧化铈、掺稀土氧化铈等，其中以 YSZ 的应用最成功。通常在 ZrO₂ 中掺 8%~10% 的 Y₂O₃ 作稳定剂。Y₂O₃ 使 ZrO₂ 的高温立方相保持稳定，同时还产生氧空位，导致 YSZ 高的氧离子传导率。YSZ 除必须有高的离子传导率 (约 1×10⁻¹ S/cm) 之外，必须没有孔隙使气体渗透到电解质的另一侧，必须做得很薄 (如 40 μm)，很均匀，以尽量降低电解质层的电阻或叫做减少欧姆损失。YSZ (含 9%~10% Y₂O₃) 的热胀系数约为 10×10⁻⁶/℃，其他阳极、阴极、互连材料的选择，均需与之匹配。

目前对固态电解质的研究主要向低使用温度发展。如离子传导率极佳、工作温度可降低至 600℃ 的 LaGaO₃ 系固态电解质 La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O₃ (图 3)，La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.115}Co_{0.085}O₃ (LSGMC) 以及非萤石型的 La₁₀Si₆O₂₇，La₂Mg₂O₃ 等。采取 LSGMC 的 SOFC 在 800℃ 产生 1.5 W/cm² 的电能，在 600℃ 产生 0.5 W/cm² 的电能。

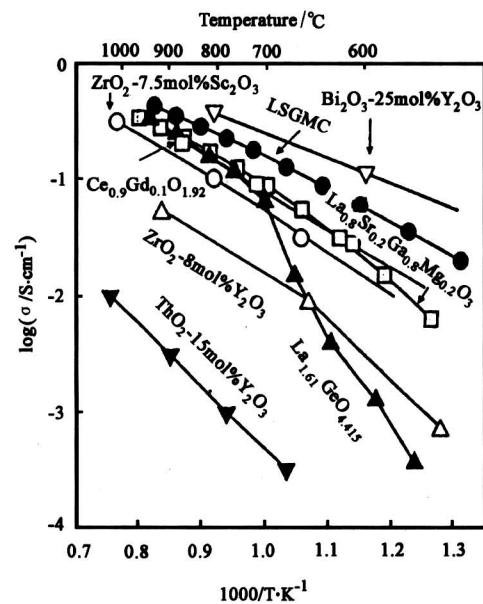


图 3 离子导电氧化物的电导率

Fig.3 Conductivity of ion conducting Oxides

汽车用的 SOFC 必须能经受频繁启动/急停运作引起的重复热冲击，这对于由上述复合氧化物构成的稀土陶瓷而言是难以承受的。普通汽车上用来控制发动机燃烧的 ZrO₂ 基氧传感器工作原理与 SOFC 相同，能抗频繁的热冲击而不破碎，这表明将 SOFC 做小就能抗热冲击。为此 Kendall 制造了一种微管形的 SOFC，这种 SOFC 由许多直径 2.4 mm、厚 200 μm 的 ZrO₂ 管构成，管束的强度极高。用有限元法计算了微管受到的热冲击为 2.5 MPa。因 ZrO₂ 的最高强度为 200 MPa，因此微管型 SOFC 完全能经受发动机不断启动/关停的考验。

阳极材料即燃料极在 H₂ 或 CH₄ 等燃料的环境内必须稳定，必须表现出电子导电性能，导电率约为 100 S/cm (1 000℃)，且必须有足够的孔隙度使燃料氧化产物能离开电解质/燃料电极的界面。一般用镍作燃料极，但镍的热胀系数明显高于 YSZ，故目前多选用体积分数为 30% 的镍粉与 70% YSZ 粉混合后制造 (在 1 000℃ 烧结) 的多孔电极。在低温 SOFC 中，使用 Ni-SDC (掺 CeO₂ 的 Sm₂O₃) 作燃料极。

阴极或空气极是电子导电材料。1 000℃ 导电率约为 100 S/cm，必须能抗氧化，有极好的化学和尺寸稳定性，有足够的孔隙度，且在热胀系数方面能与 FC 的其他零部件匹配。一般选用晶格结构为钙钛矿型的 ABO₃ 氧化物晶体，诸如 La(Sr)MnO₃，La(Ca)MnO₃，La(Mg)MnO₃，La(Sr)CoO₃ 和

La(Ca)CoO₃等。通常都用La(Sr)MnO₃作空气极,它有极强的氧吸附力,电子导电率高且与YSZ的反应能力极低。

管状SOFC整个质量的90%以上由掺铈亚锰酸镧即La(Sr)MnO₃空气电极管构成。目前这种电极材料是用高纯La₂O₃和高纯MnO₂合成,如选用的La₂O₃等纯度较低,估计成本还有很大的下降空间,这对于用量大的空气极而言是绝对必要的。

互连材料又称双极板,起串联电池(连接阳极与另一电池的阴极)即将燃气与空气隔离的作用,因此也叫做隔膜(隔离极)。互连材料需同时经受阴极的氧化环境与阳极的还原环境,且需呈极致密状态以隔离阴、阳极,同时还要求接近100%的电子导电率。目前主要使用掺杂亚铬酸镧做互连材料。在西门子-西屋公司研发的管状SOFC中,采用等离子喷涂法沿空气电极管的全长沉积出约85 μm厚,9 mm宽的亚铬酸镧窄带就是该电池的互连或双极板(表10)。

表10 SOFC元件材料与制造方法^[25]

Table 10 SOFC Component materials and fabrication processes

元件	材料	厚度	制造方法
空气电极管	掺杂 LaMnO ₃	2.2 mm	挤压烧结
固态电解质	ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)	40 μm	电化学气相沉积
互连	掺杂 LaCrO ₃	85 μm	等离子喷涂
燃料电池	Ni-ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)	100 μm	粉浆涂层烧结

从原料及元件材料研发准备看,开发电动汽车用SOFC时机已经成熟。但和PEMFC在EV上的应用比,仍处于起步阶段。SOFC EV走上商品化为时尚远,但若在降低成本、提高电能输出、降低工作温度、简化系统结构及寻找高效率的工艺方面取得突破,如在阳极支撑件、金属互连、新电解质、新电极材料方面有所斩获,将大大拉近与商品化的距离。据称安装在电动汽车上的SOFC,其功率输出应为50 kW,而车上给出的空间只有50 L。这就要求每升的空间必须容纳1 kW的SOFC。对一个10 cm×10 cm×0.5 cm规格20层的电池(体积1 L)而言,要求SOFC产生的电功率为0.5 W/cm²。而目前有的SOFC的电功率已达到0.7~1.5 W/cm²,因此从性能上满足EV的要求已不是困难的问题。最近Delphi公司与BMW合作研发了一种采用重整汽油固体氧化物燃料电池的辅助能源系统(APU),并配之以启动和关停运作的锂聚合物电

池组,已有能力先将SOFC APU推向市场。

对清洁替代能源的迫切需求,加快了对固定式和移动式SOFC的研发步伐,伊拉克战争及战后对控制石油资源的不确定性,更充分暴露美、英对长期解决能源问题的浮躁,因此数十亿美元的投入必将给SOFC的研发带来巨大的冲击。稀土氧化物在固体氧化物燃料电池的部件中无所不在,这给我国高起点地研发相关稀土高技术陶瓷带来了挑战,也带来了潜在的巨大商机。开展国际合作也许是一条不失时机的便捷途径^[25~28]。

6 结语

美、伊战争预示潜在的能源危机已为期不远。在运输行业中以电代油,以电动汽车代替燃油汽车是颇有远见的明智之举。为摆脱温室效应,以全球的最佳替代能源——氢作能源也将为电动汽车开拓一条摆脱以碳为基的化石燃料的新路。本文结合我国资源情况,试谈了电动汽车用储氢电池、锂离子电池、质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池所涉及的材料及相关工艺与开发、发展方向。

参考文献

- [1] Chan C C. The state of the art of electric and hybrid vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(2): 247~275
- [2] Weidner J W. Doyle M. Report on the electrolytic industries for the year 1999 [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(10): 3953~3974
- [3] Report on the electrolytic industries for the year 2000 [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(11): K1~K41
- [4] 张慧君. 电动车用电池市场发展现状与趋势分析 [J]. 工业材料杂志, 2002, (189): 82~91
- [5] Materials for Alternative energy technologies [J]. Material Technology & Advanced Performance Materials, 2003, 18(1): 11~15
- [6] 白玉良. 氢吸存合金技术在能源领域的应用 [J]. 能源(季刊), 2001, 31(1): 109~124
- [7] Hong Kuochih. The development of hydrogen storage electrode alloys for nickel hydride batteries [J]. Journal of Power Sources, 2001, 96(1): 85~89
- [8] Guo Z X. Carrying clean energy to the future-hydrogen absorbing materials [J]. Material Technology & Advanced Performance Material, 2000, 15(4): 269~289