

新能源汽车燃料电池研究进展

刘忠肃,陈雨庭,刘晓红,孙威,刘春雨,陈红,陈倩倩,任国红*

山东交通学院汽车工程学院,山东 济南 250357

摘要:总结目前常用燃料电池(fuel cell,FC)的工作原理及特点,根据工作温度、电解质和燃料种类对FC进行分类,重点介绍碱性燃料电池、磷酸燃料电池、固体氧化物燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、质子交换膜燃料电池和直接甲醇燃料电池的工作原理、性能及应用。针对FC商业化需解决的问题提出建议,为FC在交通运输等行业的应用提供参考依据。

关键词:新能源汽车;FC;工作原理;性能及应用

中图分类号:U463.63;U469.7

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)03-0015-07

引用格式:刘忠肃,陈雨庭,刘晓红,等.新能源汽车燃料电池研究进展[J].山东交通学院学报,2023,31(3):15-21.

LIU Zhongsu, CHEN Yuting, LIU Xiaohong, et al. Research progress of fuel cells for new energy vehicles [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(3): 15-21.

0 引言

能源问题和环境问题是目前各国面临的两大重要问题。随汽车燃油经济性要求和环保理念的不断提高,新能源汽车排放污染物少、噪音小,受到越来越多的关注。汽车行业现处于以传统化石燃料为基础的动力系统向混合动力和纯电动动力系统过渡的时期,未来将朝着清洁和高效的方向发展^[1]。

新能源汽车包括混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车(fuel cell vehicle,FCV)等^[2]。混合动力汽车是由2个或2个以上单独运行且可同时工作的动力系统组成,是对传统燃油车的改进,作为燃油汽车到电动汽车的过渡车型,能在一定程度上减少车辆尾气排放,在技术上也较成熟,但仍未解决依赖化石燃料和排放污染物的问题。纯电动汽车以动力电池为动力源,由驱动电机和传动系统将电能转化为动能并驱动车辆,是低排放、多元化节能环保汽车,呈加速发展趋势,对推动高新技术、新兴产业和经济发展具有重要影响,但纯电动汽车充电时间较长,电池维修和回收等问题暂未得到妥善解决,无法成为零污染排放汽车的永久替代者^[3]。近年来,FCV作为一种可实现零污染排放的汽车备受关注,FCV以车载燃料电池(fuel cell,FC)为主要动力源,动力电池、超级电容器等为辅助动力源。FCV具有清洁无污染、运行平稳、操作简单、行驶安全性高、噪声低、续航里程高等优点^[4]。FCV通常由氢气等绿色清洁能源在催化剂的作用下与氧气发生化学反应产生电能,作为动力系统的主要能源供应,再由驱动电机和传动系统推动汽车工作^[5]。与传统内燃机的能源效率相比,FCV的能源效率高达40%~60%,能量转换效率较高,是新能源汽车最有发展前景的方向之一。目前,FC及FCV技术处于快速发展时期。

收稿日期:2022-12-20

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021QB181);山东交通学院博士启动基金项目(BS2020004,BS201902002,BS201902004);2022年国家级大学生创新创业训练计划项目(202211510001);山东交通学院科研基金项目(Z202003,Z202005);2022年山东省青年导师访学研修项目

第一作者简介:刘忠肃(1990—),男,济南人,理学博士,主要研究方向为新能源汽车,E-mail:liuzhongsu@sdjtu.edu.cn。

* **通信作者简介:**任国红(1990—),女,山东聊城人,硕士生导师,理学博士,主要研究方向为新能源汽车动力电池关键材料,E-mail:200018@sdjtu.edu.cn。

本文基于 FC 的基本原理,介绍碱性燃料电池(alkaline fuel cell,AFC)、质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell,PEMFC)、直接甲醇燃料电池(direct methanol fuel cell,DMFC)、磷酸燃料电池(phosphoric acid fuel cell,PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell,MCFC)和固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell,SOFC)6种不同 FC 的工作温度、燃料种类、电解质、阳极和阴极的反应等,分析 FC 存在的问题并给出具体建议。

1 FC 基本原理

1839年,英国科学家 Grove 根据电解知识设计“气体电池”装置,能使氢气和氧气反应并产生电(即电解水的逆反应);1889年,Mond 和 Langer 研制了首个氢燃料电池装置,正式命名为 FC;20世纪60年代,FC 第一次真正应用是为美国宇航局的航空航天器提供电力^[6]。FC 本质是将燃料的化学能直接转化为电能^[7]的电化学转换装置。

FC 发生的是氧化还原反应,不涉及机械能和热能的转化,能量转换效率高。FC 主要包括阳极、阴极和电解液,阳极和阴极被电解液隔开,基本结构及工作原理示意图如图 1 所示。实际反应过程中,燃料如 H_2 输送到阳极,发生电化学反应,氢分子被氧化产生 H^+ 和电子, H^+ 在酸性电解质中迁移,而电子通过外部电路到达阴极,在阴极 H^+ 和电子与外部提供的 O_2 反应生成 H_2O ,电子通过外电路产生电能^[7]。

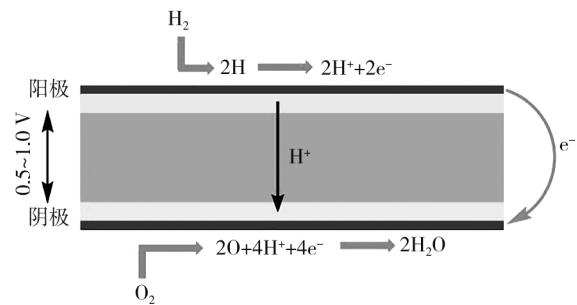


图 1 FC 的基本结构及工作原理示意图

2 FC 种类

根据使用电解质和燃料的不同,FC 分为 AFC、PAFC、SOFC、MCFC、PEMFC 和 DMFC 等^[8];根据电池的工作温度分为低温 FC(PEMFC、AFC、DMFC)、中温 FC(PAFC)和高温 FC(MCFC、SOFC)^[4],不同种类 FC 的特点及应用如表 1 所示^[2]。

表 1 FC 的特点及应用

FC 种类	工作温度/℃	常用燃料	单电池理论(工作)电动势/V	电解质(液)及电荷载体	输出功率/kW	应用
AFC	<100	氢气	1.23	氢氧化钾(钠)/OH ⁻	5~150	便携式电子产品,交通运输行业(汽车、公交车、客车、货车等),航空航天项目(空间站、无人机等),军事应用、小型发电站等
PEMFC	60~120	氢气	1.23	质子交换膜(全氟磺酸型质子交换膜)/H ⁺	5~250	
DMFC	60~120	甲醇	1.21	质子交换膜(全氟磺酸型质子交换膜)/H ⁺	5~300	交通运输行业,分散式、固定电力系统等
PAFC	150~200	氢气	1.23	磷酸/H ⁺	50~11 000	
MCFC	600~800	氢气、碳氢化合物等	1.10	熔融碳酸盐混合物/CO ₃ ²⁻	100~2 000	交通运输行业和固定、分散系统的热电联产等
SOFC	800~1 000	氢气、天然气、丙烷等	1.17	固体氧化物电解质/O ²⁻	100~250	

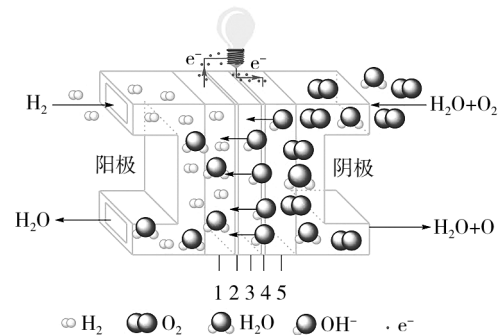
注:可根据 Nernst 方程及相关热力学数据计算 FC 不同工作条件的单电池理论电动势。

表1中的FC均可应用于交通运输行业,其中AFC、PEMFC和DMFC可直接作为FCV的动力源,PAFC、MCFC和SOFC则通过发电用于其他交通运输相关行业。

2.1 AFC

AFC是研究最早、技术最成熟的FC,曾被广泛使用。由于体积小、质量轻,最初在空间站任务中提供电力,也可用于汽车动力源,但功率密度较低,在小型固定发电站应用较多^[9]。

FC均是基于阳极燃料和阴极空气或氧化剂的电化学反应产生电的系统。AFC的电解质通常为水或稳定的氢氧化钾溶液,其工作原理如图2所示^[9]。反应过程中向阳极提供H₂,与电解质中的OH⁻发生反应,经过阳极气体扩散层到达催化层,产生H₂O和电子;向阴极提供O₂和H₂O,二者反应产生OH⁻,OH⁻通过电解质扩散,参与阳极发生的氢氧化反应,最终产物为H₂O。



1、5—阳极、阴极气体扩散层;2、4—阳极、阴极催化层;
3—液体/聚合物电解质层。

图2 AFC的工作原理示意图

AFC的化学反应式为: $2\text{H}_2+4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^-$, $\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$, $2\text{H}_2+\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 。

2.2 PEMFC

PEMFC的发展历程相对较短,但发展速度较快,是目前FCV最常用的能源系统,具有结构简单、工作温度低(60~120℃)、功率密度高等优点^[10]。与AFC不同,PEMFC使用可导电的聚合物膜为电解质,要求聚合物膜质子导电性高、抗聚集、化学和机械稳定性良好。杜邦公司生产Nafion膜(全氟磺酰氟乙基-丙基-乙烯基醚)是目前最常用的聚合物膜,全氟磺酸含有碳碳主链(CF₂-CF₂)和磺酸官能团(-SO₃H)侧链,能够有效地转移质子,同时阻止电子运输^[4]。

PEMFC的核心是由提供H₂的阳极和O₂的阴极组成的膜电极,聚合物膜电解质将2个电极分开并提供离子传导。PEMFC的主要组成部分包括阳极、阴极、聚合物膜和催化剂^[11]。PEMFC阳极和阴极发生电化学反应,阳极燃料纯H₂被催化剂激活形成电子和质子,质子可穿过质子交换膜,电子通过外部电路流向阴极;在阴极处,O₂²⁻和质子相互作用形成H₂O^[12]。H₂和O₂的反应动力学缓慢,需使用催化剂提高反应速率,在酸性介质中,贵金属铂是最有效的催化剂^[13]。近年来,人们研究铂合金和一些非铂催化剂,试图找到取代昂贵铂的新型催化剂^[14],但这些替代品在FC实际运行环境中不稳定,较难实现商业化。目前常见的商业催化剂是碳负载铂催化剂(粒径为2~6nm铂颗粒负载在15~50nm的碳颗粒上)。

2.3 DMFC

DMFC的结构和工作原理与PEMFC相似,但DMFC使用的燃料为甲醇(CH₃OH)。与H₂相比,CH₃OH在室温下以液体形式存在,便于携带、储存,且来源丰富、价格便宜,对运输行业具有较大的吸引力。

DMFC的阴极和阳极均在膜电极组件上发生反应,产生电能^[15]。CH₃OH在阳极发生氧化反应,产生CO₂、质子和电子,通常反应分脱氢过程、含碳化合物剥落和氧化过程2阶段进行。阳极产生的质子通过质子交换膜扩散至阴极,与通过回路到达阴极的电子结合,在阴极催化剂作用下将O₂还原成H₂O,DMFC的化学反应式为: $\text{CH}_3\text{OH}+\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2+6\text{H}^++6\text{e}^-$, $3\text{O}_2+12\text{H}^++12\text{e}^- \rightarrow 6\text{H}_2\text{O}$, $2\text{CH}_3\text{OH}+3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2+4\text{H}_2\text{O}$ 。

DMFC可在室温(约40℃)或较高温度(>100℃)下工作,高温可加速电极的反应,功率较高。DMFC在室温和高温下均比PEMFC的功率密度低,限制了其在汽车上的实际应用。目前成功设计了甲醇重整制氢装置,利用CH₃OH制备H₂,再将H₂输送到FC中发生氧化还原反应产生电能,根据CH₃OH在重整装置中的进料方式可分为自动热重整和蒸汽重整2种方式,甲醇重整制氢FC已有相关商业化应用,如在家庭热电联产系统分布式发电和FCV等方面^[16-17]。在家庭应用方面,发达国家的研究技术相对比较成

熟,我国目前还处于理论设计阶段,还需进一步深入研究^[18]。虽然目前氢燃料电池车主要以高压储氢罐储存的 H_2 为动力源,但对甲醇重整制氢为载体动力源的 FCV 也进行了相关研究。德国能源 Innogy 公司成功研制全球首辆甲醇燃料电池汽车;美国戴姆勒-克莱斯勒公司开发的甲醇重整燃料电池汽车是 FC 技术的里程碑,目前已完成行车试验^[19]。日本的汽车公司也进行甲醇燃料电池汽车的研发;巴拉德动力系统公司研制了 75 kW 的甲醇重整燃料电池组“马克 900”^[19]。在国内,相关企业和科研机构也进行甲醇重整燃料电池的研究,2018 年,广东合即得能源科技有限公司成功研制了甲醇和水重整制氢的 FC,经过改进甲醇重整制氢能量转化效率高达 42%,已用于巡逻车和观光车等;2020 年,广东能创科技有限公司将自主研发的甲醇重整制氢系统用于重卡商用车;2018 年,中德合作研制了首款甲醇重整燃料电池跑车^[17]。东风汽车集团有限公司推出了全球首批甲醇重整制氢燃料电池轻型商用卡车且投入运行^[20]。与其他国家相比,我国在甲醇重整燃料电池汽车方面的研究还需加大投入力度。

2.4 PAFC

PAFC 以液态磷酸为电解质,纯 H_2 为燃料,采用催化剂加速反应。磷酸电解质在聚四氟乙烯粘结碳化硅的多孔基质中, H_2 和 O_2 分别在阳极和阴极碳负载铂催化剂作用下反应生成 H_2O 。200~215 $^{\circ}C$ 时 PAFC 中的磷酸电解质才能稳定,质子传导性较高。与 PEMFC 相比,铂催化剂对 CO 中毒的敏感性随工作温度升高而降低,降低了对气体处理的要求,延长了使用寿命^[21]。

PAFC 是可用于热电联产的(如空气和水的加热)FC,也是发展最好、技术最成熟的商业化 FC 之一。由于工作温度较高,适用于固定的热电联产应用,如大型发电厂。与大多数新技术一样,其成本和系统寿命仍存在问题^[22],研发更合适的催化剂和电解质可进一步提高 PAFC 的功率密度。此外,结合使用场景和系统设计,回收 PAFC 产生的热量能提高系统的整体性能。

2.5 MCFC

MCFC 以熔融碳酸盐为电解质产生电能,主要以悬浮在多孔陶瓷基体或瓷片中熔融锂和碳酸钾(钠)的混合物作为电解液,电解液中的 CO_3^{2-} 可作为电子载体,为有效管理电解液,需精细控制陶瓷基体的孔径和分布。MCFC 的反应温度一般为 600~650 $^{\circ}C$ 。

MCFC 阳极燃料为 H_2 或其类型的碳氢化合物(天然气、生物燃料、其他合成气体等转化的富氢燃料),阴极氧化剂为 O_2 或空气。在阳极,氢燃料和碳酸盐离子反应产生 CO_2 和 H_2O ,同时将电子输送到外电路;在阴极, O_2 和 CO_2 与外电路输送的电子生成 CO_3^{2-} 。MCFC 工作原理示意图如图 3 所示^[23]。在阴极的电极反应中消耗了 CO_2 ,为维持电解液平衡,在阳极形成的部分 CO_2 需回收到阴极。阳极可进行重整反应,将加入的碳氢化合物转化为富氢燃料气体(如 H_2 、CO 和 CO_2)。MCFC 可采用碳氧化物本身作为燃料,捕获 CO_2 能力处于 FC 前列。MCFC 的化学反应式为: $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$, $O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$, 阳极重整反应式为: $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$, $CO_2 + 2H_2O \rightarrow CH_4 + 2O_2$, $CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$ 。

与其他高温 FC 相比,因利用系统的废热,MCFC 的效率可高达 85%。由于原材料便宜、制造技术简单,MCFC 成本较低。MCFC 可在较低的温度(约 650 $^{\circ}C$)下进行重整反应,且无需外加重整器将其他类型的燃料转化为 H_2 。与 PEMFC 相比,MCFC 不受 CO 或 CO_2 中毒的影响,系统复杂性降低,效率更高,大大降低运营成本。由于操作温度较高,MCFC 通常用于固定的热电联产,其电力输出功率为 100 kW ~ 2 MW。MCFC 存在的主要问题是电解液的蒸发损失、陶瓷基体结构的粗化和电池部件的腐蚀导致电池性能下降等^[24]。

2.6 SOFC

SOFC 是早期研究的 FC 种类之一,其电解质为氧化物离子导电固体,如掺杂有氧化钇的氧化锆(氧

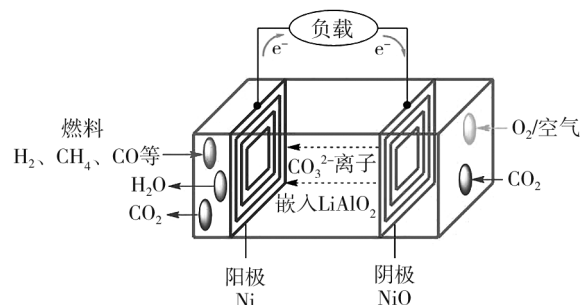


图3 MCFC的工作原理示意图

化钇的摩尔分数为3%~10%)。通常阳极是镍/氧化锆陶瓷,阴极是电解质材料和掺杂锰酸镧组分的陶瓷复合材料^[25]。基本工作原理与其他高温FC类似,燃料在阳极发生氧化反应,氧化剂在阴极发生还原反应,电子沿外部电路从阳极流向阴极。SOFC的主要优势是燃料的多样,除了常见燃料H₂和天然气外,丙烷、丁烷、氨、汽油、柴油、氨、溶解尿素、甲烷/蒸汽和乙醇/水混合物等均可作为SOFC的燃料^[26]。

低温下电解质的离子导电性差,SOFC是在高温(800~1 000℃)下工作。SOFC主要由陶瓷、陶瓷金属复合材料和高温金属合金构成,最常见结构的是平面和管状2种^[27]。平面SOFC通过具有导电性的掺杂铬酸镧、金属/陶瓷或耐高温氧化合金串联在一起,具有燃料流场和向反应场所供应氧化剂的气体流场,该重复单元堆叠以增加系统电压和功率输出。平面SOFC在热循环过程中需避免空气和燃料混合,注意电池部件腐蚀引起的电池退化问题,这种结构存在材料成本较高,工厂平衡要求复杂等不足。随着SOFC体积功率密度的增大,管状设计比平面设计应用更广泛,也更有效^[28]。

FC通过电化学反应为外界提供电能,在电力行业应用广泛。以上6种FC的特点不同,应用场景不同^[29]:1)便携式电子设备的电源,FC的小型化是未来发展方向之一,微型FC可替代锂离子电池成为家用或军用电子设备(如手机、笔记本电脑、照相机、无线电话、小型无人机等)的外接(或备用)电源;2)交通运输领域,以上6种FC均可直接或间接应用于交通运输领域,其中PEMFC和DMFC可直接作为FCV的动力源,是应用最多的FC,FC的关键材料和技术取得了较大突破,目前PEMFC已应用在家用轿车、物流车、重型卡车、客车等乘用车和商用车,随着FC技术的更新进步,将进一步推动其在航空航天(空间站、飞行器等)、海洋(船舶、水下航行器等)等方面的应用;3)FC发电站,发电站是FC另一个重要应用领域,FC既可以作为中小型民用发电站,也能作为大型发电站,PAFC是中小型发电站的首选,可建成一些分布式发电设备,解决小范围的电力问题,具有较好的灵活性,目前已在部分国家投入使用,MCFC和SOFC具有清洁高效、工作温度高和燃料种类多等特点,可作为大型发电设备,同时还能与现有的水蒸气等发电设备联用,提高燃料的利用率。

3 FC存在的问题及建议

以FC为动力源的车辆效率高、污染少、噪音低、余热再利用、燃料补充迅速、易制备和长期稳定性好,目前部分FCV已投放市场。但FC存在的一些问题影响了FCV商业化进程:1)FC常用催化剂中铂的负载量大、成本高,铂基催化剂是目前FC的最佳催化剂,但铂价格较昂贵,为获得理想的功率密度,铂催化剂的负载量较大,导致FC催化剂的价格较高,同时铂基催化剂在催化过程中易被含碳中间体毒化,降低反应活性和稳定性,需找到合适的解决方案减少铂负载,提高铂利用率,或使用廉价的非贵金属催化剂降低生产成本,提高FC的性能;2)质子交换膜是PEMFC和DMFC重要组成部分,目前最广泛使用的是Nafion膜,但其价格昂贵且使用寿命有限,存在燃料交叉穿过的问题,需研发改性Nafion膜,降低其合成和制备成本,提高工作温度,提高质子导电性,减少燃料交叉等问题^[30];3)对反应温度较高的FC则需研究新型材料(阳极、阴极和电解质),改进材料的微观结构和化学成分,降低其反应温度和产品价格,提高FC燃料效率和耐用性。

4 结束语

随着我国将氢能纳入国家能源战略,围绕氢能源布局了一批新兴产业和发展方向。以氢气为燃料的燃料电池发展对于我国能源结构转变、行业绿色低碳发展具有重要作用。目前新能源汽车处于快速发展时期,大力发展清洁环保的燃料电池汽车对实现“碳达峰与碳中和”的双碳目标具有重要意义。另外,燃料电池发展还面临许多问题,将燃料电池技术与氢气的生产、储存和输送等方面贯通,需在材料工程、纳米技术、测量技术、分子过程模拟、辅助元件开发等方面取得根本性突破,以降低燃料电池成本,提高燃料电池汽车性能。

参考文献:

- [1] 张微. 新能源汽车燃料电池技术产业发展现状分析[J]. 金属功能材料, 2021,28(3):23-28.
ZHANG Wei. Analyse of new energy vehicle fuel cell technology developing status[J]. Metallic Functional Materials, 2021, 28(3):23-28.
- [2] BAI Y L, ZHU Q, ZHANG J M, et al. Research on key technologies of new energy fuel cell electric vehicle[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2021,804:042030.
- [3] CANO Z P, BANHAM D, YE S, et al. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets[J]. Nature Energy, 2018,3:279-289.
- [4] LUO Y, WU Y H, LI B, et al. Development and application of fuel cells in the automobile industry[J]. Journal of Energy Storage, 2021,42:103124.
- [5] 刘宗巍,史天泽,郝瀚,等. 中国燃料电池汽车发展问题研究[J]. 汽车技术, 2018(1):1-9.
LIU Zongwei, SHI Tianze, HAO Han, et al. Research on main problems associated with development of fuel cell vehicle in China[J]. Automobile Technology, 2018(1):1-9.
- [6] SHARAF O Z, ORHAN M F. An overview of fuel cell technology: fundamentals and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,32:810-853.
- [7] BRUIJN F. The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications[J]. Green Chemistry, 2005,7:132-150.
- [8] DU Z Y, ZHAN H X. Analysis of related technologies used in fuel cell vehicles[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2021,2125:012011.
- [9] FERRIDAY T B, MIDDLETON P H. Alkaline fuel cell technology:a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(35):18489-18510.
- [10] QIN C W, WANG J, YANG D J, et al. Proton exchange membrane fuel cell reversal:a review[J]. Catalysts, 2016, 6(12):197.
- [11] GARRAÍN D, LECHON Y, DE C, et al. Polymer electrolyte membrane fuel cells(PEMFC) in automotive applications: environmental relevance of the manufacturing stage[J]. Smart Grid Renewable Energy, 2011,2:68-74.
- [12] MEKHILEF S. Comparative study of different fuel cell technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012,16(1):981-989.
- [13] REN X F, LÜ Q Y, LIU L F, et al. Current progress of Pt and Pt-based electrocatalysts used for fuel cells[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2020,4(1):15-30.
- [14] CHANDRAN P, GHOSH A, RAMAPRABHU S. High-performance platinum-free oxygen reduction reaction and hydrogen oxidation reaction catalyst in polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Scientific Reports, 2018,8:1-11.
- [15] GONG L Y, YANG Z Y, LI K, et al. Recent development of methanol electrooxidation catalysts for direct methanol fuel cell[J]. Journal of Energy Chemistry, 2018, 27(6):1618-1628.
- [16] IULIANELLI A, RIBEIRINHA P, MENDES A, et al. Methanol steam reforming for hydrogen generation via conventional and membrane reactors;a review[J]. Renewable Sustainable Energy Review, 2014,29:355-368.
- [17] 李林,刘彤宇,李爽,等. 甲醇重整制氢燃料电池发电研究进展[J]. 发电技术, 2022,43(1):44-53.
LI Lin, LIU Tongyu, LI Shuang, et al. Research progress of hydrogen production by methanol reforming for fuel cell power generation [J]. Power Generation Technology, 2022,43(1):44-53.
- [18] SUN Z, SUN Z Q. Hydrogen generation from methanol reforming for fuel cell applications;a review[J]. Journal of Central South University:Science & Technology of Mining and Metallurgy, 2020,27(4):1074-1103.
- [19] 钱伯章. 甲醇燃料电池汽车在美完成行车试验[J]. 能源技术, 2003(1):16.
- [20] 熊子昂,彭洪亮,向华,等. 水氢燃料电池控制策略[J]. 桂林电子科技大学学报, 2018,38(2):144-149.
XIONG Zi'ang, PENG Hongliang, XIANG Hua, et al. The control strategy of aqueous hydrogen fuel cell[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2018,38(2):144-149.
- [21] GIDDEYS, BADWAL S P S, KULKARNI A, et al. A comprehensive review of direct carbon fuel cell technology[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012,38(3):360-399.
- [22] SAMMES N, BOVE R, STAHL K. Phosphoric acid fuel cells:fundamentals and applications[J]. Current Opinion in Solid

- State and Materials Science, 2004,8(5):372-378.
- [23] CONTRERAS R R, ALMARZA J, RINCÓN L. Molten carbonate fuel cells: a technological perspective and review [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2021:1-15.
- [24] MEI B, QIN Y H, TAGHAVI M. Thermodynamic performance of a new hybrid system based on concentrating solar system, molten carbonate fuel cell and organic rankine cycle with CO₂ capturing analysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021,146:531-551.
- [25] WEBER A, IVERS-TIFFÉE E. Materials and concepts for solid oxide fuel cells (SOFC) in stationary and mobile applications [J]. Journal of Power Sources, 2004,127(1-2):273-283.
- [26] HAGEN A, SUN X, SUDIREDDY B R, et al. Metal supported SOFC for mobile applications using hydrocarbon fuels [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020,167:104510.
- [27] SINGH M, ZAPPA D, COMINI E. Solid oxide fuel cell: decade of progress, future perspectives and challenges [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021,46(54):27643-27674.
- [28] WEBER A. Fuel flexibility of solid oxide fuel cells [J]. Fuel Cells, 2021,21(5):440-452.
- [29] 弗朗诺·巴尔伯. PEM 燃料电池:理论与实际 [M]. 李东红,连晓峰,译. 北京:机械工业出版社,2016.
- [30] ZAKIL F A, KAMARUDIN S K, BASRI S. Modified Nafion membranes for direct alcohol fuel cells: an overview [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,65:841-852.

Research progress of fuel cells for new energy vehicles

LIU Zhongsu, CHEN Yuting, LIU Xiaohong, SUN Wei, LIU Chunyu,
CHEN Hong, CHEN Qianqian, REN Guohong*

School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: The working principles and characteristics of the commonly used fuel cells at present are summarized in this paper. Fuel cells are classified according to operating temperature, electrolyte and fuel type. The working principle, performance and application of alkaline fuel cell, phosphoric acid fuel cell, solid oxide fuel cell, molten carbonate fuel cell, proton exchange membrane fuel cell and direct methanol fuel cell are introduced emphatically. Some suggestions for the problems in the commercialization of fuel cells are put forward, which provides reference for the application of fuel cells in transportation and other industries.

Keywords: new energy vehicles; fuel cell; working principle; performance and application

(责任编辑:郭守真)

(上接第6页)

machinery chassis, a simulation model for the passability of the tracked agricultural machinery chassis on the super wet clay ground is constructed with the software Recurdyn and considering the mechanical parameters of soil. The variation of hook traction when the tracked agricultural machinery chassis passes through the super wet clay ground at the speed of 5 km/h is analyzed, and the traction force of the hook is taken as the index to evaluate the passability, and the real vehicle verification is carried out. The results show that the average tractive force of the chassis hook of tracked agricultural machinery is 20.000 kN in simulation and 17.923 kN in real vehicle verification. The simulation results, basically consistent with the test results, are accurate and reasonable.

Keywords: tracked agricultural machinery chassis; super wet clay soil ground; passability

(责任编辑:王惠)