

燃料电池重型货车整车开发主要矛盾辨析与应对研究

白雪松^{1,2}, 宋琳¹

(1. 上汽集团商用车技术中心, 上海 200438; 2. 上汽红岩汽车有限公司, 重庆 401122)

摘要: 在我国,中重型货车是温室气体及污染物排放的主要贡献者,加快以柴油为主的中重型货车向电动化转型十分迫切,纯电动与燃料电池是当下最受重视的两条技术路线。纯电动路线在十多年的中短途运输和公共领域中的发展被证明是成功的;燃料电池路线在能量补给、能量密度等方面的优势比纯电动路线更适宜于长途重型货车的应用,目前正处于迅猛发展阶段。然而,以柴油牵引汽车为例,车辆可通过采用大油箱轻松达到3 000 km的续驶里程,而当前的燃料电池牵引汽车的续驶里程正努力向500 km迈进,远不能与柴油汽车相比较。鉴于此,基于客户需求视角考虑,当下燃料电池重型货车整车开发的主要矛盾,是过低的车载储氢量带来的续驶里程过低问题,这主要是由氢过低的体积存储密度决定的。提高燃料电池堆和燃料电池系统的能量转化效率虽然有助于提升续驶里程,但其前提是关键材料的技术突破。在当前整车开发中,最大限度地提升车载储氢量,降低辅助系统能耗,提高机械传动与电力电子系统效率,降低车辆行驶消耗更具有现实意义和可操作性。重点介绍在提升车载储氢量和降低车辆空气阻力系数方面的措施,以及对提升续驶里程的影响。按照《节能与新能源汽车技术路线图2.0》的愿景,能够实现燃料电池重型货车到2030年达到800 km的续驶里程的目标。

关键词: 燃料电池重型货车; 主要矛盾; 续驶里程; 体积储氢密度; 车载储氢量; 空气阻力系数

中图分类号: U462.1 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.04.04

Development of Fuel Cell Heavy-Duty Trucks: Major Obstacle and Corresponding Measures

BAI Xuesong^{1, 2}, SONG Lin¹

(1. SAIC Motor Commercial Vehicle Technical Center, Shanghai 200438, China;
2. SAIC Hongyan Automotive Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: Medium-duty trucks (MDTs) and Heavy-duty trucks (HDTs) are the major contributors of greenhouse gas (GHG) and pollutant emissions in China, and it is urgent to speed up the conversion of diesel trucks into electric vehicles. Fuel cell (FC) and lithium battery electric vehicles are the two most important technical routes at present. Lithium battery electric vehicles have been successfully adopted in short and medium distance transport and in public transport after more than ten years of development. The advantages of fuel cells in terms of energy supply and energy density are more suitable for the application in long-distance HDTs than those of lithium batteries, and the former is under rapid development. However, a diesel tractor can easily reach the driving range of 3 000 km by using a large fuel tank, while the driving range of a typical fuel cell tractor is at most 500 km, far less than that of the diesel one. Therefore the low driving range due to the low hydrogen storage capacity of the HDT, caused by the low volume density of

收稿日期:2021-08-28 改稿日期:2021-10-31

参考文献引用格式:

白雪松,宋琳.燃料电池重型货车整车开发主要矛盾辨析与应对研究[J].汽车工程学报,2022,12(4):375-387.

BAI Xuesong, SONG Lin. Development of Fuel Cell Heavy-Duty Trucks: Major Obstacle and Corresponding Measures[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4): 375-387. (in Chinese)



hydrogen, hinders the development of fuel cell HDTs. Though improving the energy conversion efficiency of the fuel cell stack and the fuel cell system may be of limited assistance, the related materials innovation can play a critical role in increasing the driving range. At present, the most practical and effective solutions includes maximizing the hydrogen storage capacity, reducing the energy consumption of the auxiliary system, improving the efficiency of the mechanical transmission and the power electronic system, and reducing vehicle energy consumption during driving. Finally this paper focuses on the measures to increase the onboard hydrogen storage and to reduce the coefficient of air resistance, as well as their impact on improving the driving range. According to the Technology Roadmap 2.0 for energy-saving and new energy vehicles, the FC-HDT can achieve a driving range of 800 km by 2030.

Keywords: fuel cell heavy-duty truck; principal contradiction; driving range; volumetric hydrogen storage density; vehicle hydrogen storage capacity; coefficient of air resistance

当前,“低碳”和“环保”作为引领未来车辆技术发展的两个重要关键词,已在全球形成普遍共识。根据2019年中国向国际社会公布的2014年国家温室气体清单,交通运输温室气体排放8.2亿t CO₂当量,占全国温室气体排放总量的6.7%,其中道路运输在整个运输领域占比高达84.1%,而中重型商用汽车又在道路运输中占比达46.9%;在污染物排放方面,全国机动车4项污染物排放总量为1 603.8万t,其中重型货车在各类型汽车中的NO_x排放量占比高达74%,颗粒物(PM)排放量为52.4%^[1]。虽然中重型货车在全国机动车总数中的比重极少,但却是温室气体及污染物排放的主要贡献者,且在履行《巴黎协定》承诺,展现大国担当,建设生态文明社会的国际国内大背景下,势必成为今后减排降污的关键对象。加快以柴油燃料为主的中重型货车向电动化转型是解决上述问题的主要途径,纯电动与燃料电池是实现电动化转型的两个最重要的技术路线^[2-5]。首先介绍了纯电动路线在长途重型货车上的应用痛点,强调长途重型货车更适宜采用燃料电池的技术路线,并进一步分析燃料电池重型货车在整车开发中遇到的主要问题,即过低的车载储氢量导致的低续航里程,并提出相应的解决方案。

1 未来重型货车极有前途的氢燃料解决方案

得益于国家政策的推动,近十年来商用汽车在电动化进程中取得了迅猛的发展。我国商用汽车最

先在公共领域启动电动化,采用了纯电动的技术路线。目前,新增的城市公交客车,纯电动化率占比已高达90%以上,货车领域电动化主要集中在环卫车和城市轻型物流配送车上,近期还出现了一些如港口牵引、城建渣土、厂区运输等特定场景的换电式纯电动货车。总体来讲,当前商用汽车电动化发展以纯电动为主,且货车领域电动化滞后于客车领域,尤其是长途(500 km以上)重型货车,几乎鲜有电动化车辆的踪迹。

1.1 长途重型货车宜采用氢燃料电池方案

回顾过往,长途重型货车在电动化进程中长期停滞不前,在充分考虑了续驶里程,充、换电的方便性和电池附加质量后,大多数企业似乎已放弃了纯电动的技术路线。目前,行业内更倾向于在长途重型货车上采用燃料电池(本文特指氢燃料质子交换膜燃料电池)的技术方案,并且近三年在氢能上下游供应链、关键零部件与技术开发方面都有了很大的突破,投资及产业化步入了快速发展期^[6]。

和纯电动路线相比,燃料电池路线在长途重型货车上的应用具有如下优势:一是能量补给优势,相比较锂电池充电,氢气加注更快;二是续驶里程优势,同等系统质量下,燃料电池系统比纯电动系统能量密度更高,续驶里程更长,对于长途运输场景,这两点尤为重要。此外,氢作为理想能源,可通过适当的生产途径最大限度地减轻对环境的影响,实现车辆上的绝对零排放,而锂电池从最初的矿物开采到报废处理,都会给环境带来较大负担。

某42 t长途牵引汽车采用纯电动路线，电池容量为400 kWh（在目前的水平以上），电池系统质量超3 t，满载每百公里耗电量为160 kWh，考虑电池系统要保留必要的剩余电量（SOC为20%），车辆在运行200 km后（约2.5 h）需立刻充电。目前，面向大中型商用汽车的高功率充电桩，常用功率为150 kW，也有更大功率的充电桩（如180 kW、240 kW、360 kW等）。使用大功率充电需考虑对电池寿命的影响，即使忽略此点，充电也需要1 h以上，不适合长途重载运输工作场景的需求，与高效、快速的客户需求产生了突出的矛盾。当下国家电力投资集团公司推出的换电模式方案，采用宁德时代锂电池，适合重型货车运输的电池容量有282 kWh、350 kWh等，虽然约5 min便可完成自动换电，但是同等电量下，换电系统质量更大，且一辆车需数个电池系统配套，目前仅在固定路线场景的中短途货车上使用，应用于长途货车并非明智的选择。

虽然氢气具有负的焦耳—汤姆森效应，导致充气时瓶内温度升高，同时增大加注质量流率也会导致瓶内升温速率指数增长，进而影响加注能耗与瓶内加满度，甚至影响瓶内材料属性，但是燃料电池汽车（Fuel Cell Vehicle, FCV）仍具有纯电动汽车无法比拟的能量加注优势，从而适用于长途重型货车。有加注试验显示^[7]，对某35 MPa的物流车辆加注，3个车载氢瓶总容积为420 L，耗时470 s加注氢气8.21 kg，加满度SOC为88%；对某70 MPa乘用车进行加注，耗时276 s，且经过3次检漏后加注氢气5.08 kg。长途重型货车对车载储氢量要求远大于上述两类参照车辆，加注流量也会更大，仍以42 t长途牵引汽车为例，为满足500 km的续航里程，大约需要50 kg的储氢量（工程可实现），在团体标准《燃料电池汽车高压氢气加注技术规范》意见稿中，对于储氢量大于10 kg的车辆，要求加注流程不得超过120 g/s，依照当下水平可实现20 min内充满，且续航里程远超纯电动方案，基本满足客户对高效、快速的需求。

即便如此，一些学者对燃料电池在重型货车上

的应用前景仍持谨慎态度，其观点主要是从燃料电池的可靠性、价格、使用经济性以及是否真正实现节能减排的角度考虑。第一，燃料电池的可靠性（寿命）以及价格等是影响市场化应用的重要因素。随着近几年国家对燃料电池及其上下游产业链的政策扶持，行业对其研发与产业化的投入，燃料电池在可靠性与价格方面均有长足进步，有理由相信这两方面不会成为未来大规模应用的障碍；第二，应该认清燃料电池为道路运输提供了一个不同于传统柴油燃料的解决方案，以解决严重的温室气体和污染物排放问题，这是其意义所在，而不是从整个生命周期的经济性及能量消耗的角度出发，得出燃料电池汽车优于传统柴油汽车的结论，恰恰相反，燃料电池汽车相比于柴油汽车在整个生命周期的经济性及能量消耗上将在很长时间内处于劣势；第三，氢燃料电池虽是绝对的零排放，但氢却是一种工业产品，在生产过程中会带来一定的碳排放及环境污染，从碳排放角度考虑，氢的生产及运输途径至关重要，它决定了车辆的整个“井到轮”（Well-to-Wheel, WTW）过程是否真正实现了节能减排，而不是自欺欺人，这为燃料电池真正实现节能减排提出了一些限定条件，为行业发展指明了正确方向。

关于第三点，众多学者做了分析与评估。LIU Feiqi等^[4]通过中国案例评估了未来燃料电池道路运输车辆的部署对温室气体（Greenhouse Gas, GHG）排放的影响，指出如果FCV在中国的销量在2050年达到800万辆，与无FCV的情况相比，整个道路车辆的GHG排放量将减少约13.9%，重型货车在其中的贡献率约为1/5，同时强调制氢途径在未来将至关重要，如果使用低效的氢气路径，FCV可能无法真正实现减排目标，只有清洁能源才能减少GHG的排放量。WANG Qun等^[5]通过对WTW的分析，估算了2017–2030年中国12条氢路径下FCV的WTW化石燃料消耗，与传统内燃机相比，11条路径均能减少化石燃料消耗（减少约11%~92%），而通过国家电网的现场水电解制氢，化石燃料消耗反而增加了10%，这是因为目前电网2/3

以上电力仍由火电产生。在不久的将来,考虑到氢仍将主要由化石燃料生产,充分利用工业副氢将有助于中国的低碳发展,而从长远来看,氢气通过可再生能源供应才是确保脱碳、清洁以及可持续的正确方向。ÇABUKOGLU等^[8]通过对瑞士全国的道路运输重型货车进行分析研究,考虑到每辆车的日常运行模式来评估FCV应用的可行性,指出氢燃料电池技术是一种非常有吸引力的重型汽车减排方案,但需要大量的投资来确保氢气的绿氢属性,同时在白天要有足够的机会获得氢补给。

胡浩然等^[9]指出,氢气在制备、存储和运输方面面临的挑战远大于燃料电池系统的技术和成本,不能满足商用汽车的要求,而固态氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)由于具有超过60%的最高能源转换效率和使用燃料的多元性,所以是车用动力的最佳选择,值得持续关注。

1.2 纯电动与燃料电池路线互为补充关系

在货车电动化的路线选择上,纯电动与燃料电池不应是零和关系,而是不同应用场景与不同减碳途径互为补充的关系。

第一,实践证明了纯电动路线在中短途运输领域,尤其在公共领域的应用是成功的。例如,在城市环卫车辆上的广泛应用,规模化的应用带来了技术的进步与价格的进一步降低,纯电动路线会在一段时间内比燃料电池路线更具价格优势。随着燃料电池技术的逐步成熟与成本的下降,预测FCV会渐进式进入纯电动汽车的应用领域。由于燃料电池路线更适合应用于长途重型货车,从而形成与纯电动路线互补的覆盖更多应用场景的格局。

第二,纯电动与燃料电池汽车均能起到电力消纳的作用,纯电动汽车的电力主要来源于国家电网,在电力负荷低谷时(如夜间)进行充电能达到很好的收益。燃料电池的氢气燃料来源于多种途径,更重要的是氢气作为一种能量载体,对解决电力消纳,尤其是走出可再生能源的消纳困境意义深远,可削弱可再生能源的随机性与间歇性的影响,减少“弃电”情况的发生,对推动以可再生能源为

主体的绿色、低碳能源体系建设这一国家战略意义重大^[10-11]。

第三,燃料电池系统比庞大的纯电动电池系统环境更友好。从材料应用上看,燃料电池和氢瓶本身的危废量较为有限,而质量巨大的锂电池系统含有众多的污染物^[12],且当前普遍存在正规回收率低、回收处置不当、污染控制不力等问题,这极有可能使锂电池在生产和再生过程中产生的污染物进入自然环境。随着纯电动普及化率的提高,锂电池环境安全问题将逐渐凸显,这可能是未来燃料电池在全领域挑战纯电动的突破口。

2 燃料电池重型货车的发展现状与主要矛盾

2.1 氢燃料电池重型货车发展现状

当前,世界主要汽车大国都把燃料电池重型货车作为重要战略发展方向之一,然而发展的道路并不顺畅甚至充斥着一些夸大宣传。2016年末,美国尼古拉公司展出了一款名为Nikola One的燃料电池原型车,这款8级、总质量36 t的车辆宣称一次加氢可达到近2 000 km的续驶里程,甚至每百公里氢耗低于5 kg,所以单车储氢量需达到100 kg以上,并计划2020年投入量产。“光鲜”的数字一时牵动众人的神经,大家对Nikola One如何实现如此低的整车能耗与大质量的储氢技术满怀期待,若真能实现,无疑是行业的巨大进步,然而时至今日,尼古拉也未实现当初所谓的技术承诺,反倒是负面信息不断被披露。

欧洲老牌商用车企业如奔驰、沃尔沃等,也在积极探索燃料电池重型货车在不同场景中的应用,中国货车企业也在近两年开启了FCV开发的热潮,几乎都做出了样车和试运营车辆,这些企业比尼古拉公司似乎走得更稳些。表1列举了国内外一些燃料电池货车的开发情况。

国内长途重型货车市场主要以半挂牵引车、重载载货汽车和中置轴车为主,截止到345批公告(2021年7月),查询显示,驱动形式为4×2与6×4的燃料电池半挂牵引车公告数量为25个,未查询到燃料电

表1 国内外燃料电池重型货车开发情况^[13-14]

车辆名称	车辆描述	能量存储
奔驰 GenH2 概念车	6×4高速牵引,总质量40 t,燃料电池功率150 kW×2,预计2023年进行试验,2025年实现量产,续航里程预计可达1 000 km	液氢存储;单瓶40 kg×2=80 kg;锂电池70 kWh
ScaniaFC货车	6×2(后提升桥)厢式车,总质量为26 t,加拿大氢能公司提供燃料电池功率为90 kW,提供给挪威批发商ASKO进行食品杂货配送业务,2020年已投入使用,续航里程为400~500 km	III型气瓶35 MPa;储氢质量33 kg;锂电池56 Wh
长城V9 6×4(大运底盘)	列车总质量为49 t,未势能源提供燃料电池系统功率为111 kW	斯林达III型瓶70 MPa;氢瓶水容积198 L×10;储氢质量近80 kg;锂电池96 kWh
红岩 4×2港口牵引	列车总质量为42 t,上海捷氢提供燃料电池系统功率为92 kW,应用于港口特点路线的集装箱转运,场景里程<200 km	斯林达III型瓶35 MPa;氢瓶水容积162 L×8;储氢质量>30 kg;锂电池100 kWh
海格6×4牵引	列车总质量为49 t,上海杰宁提供燃料电池系统功率为135 kW	中集III型瓶35 MPa;氢瓶水容积210 L×8;储氢质量>40 kg;锂电池101 kWh
海格4×2牵引	列车总质量为42 t,上海杰宁提供燃料电池系统功率为120 kW,2020年底交付于宝武钢铁,负责厂内物流转运工作,单趟续航里程短	III型气瓶35 MPa;锂电池60 kWh

池重型载货汽车与中置轴车的车辆公告。表2列出了部分牵引汽车公告型号,以及环保信息公开数据所公布的锂电池容量及续航里程数据,据了解,该续航里程多采用40 km/h等速法进行申报,车辆在实际道

路上运行时,实际续航里程将远低于该里程数。目前国内的普遍水平,是单次加氢的续航里程只适合城市配送(200 km以下)及中短途运输(200~500 km),不能满足更长路程(500 km以上)的运输需求。

表2 国内燃料电池牵引车公告及参数

厂家	车辆型号	锂电池容量/续航里程(环保信息公开)
解放	CA4250P66T1FCEV	124.88 kWh/400 km
东风	EQ4180GTZFCEV	60.02 kWh/320 km
	EQ4250GFCEV	100.9 kWh/300 km
福田	BJ4189FCEVPH	105.28 kWh/565 km(氢工作)/75 km(氢不工作)
	BJ4259FCEVPH	52.98 kWh/650 km(氢工作)/20 km(氢不工作)
红岩	CQ4180FCEVSS441A	100.27 kWh/460 km(氢工作)
	CQ4250FCEVSS404	100.27 kWh/420 km(氢工作)
重汽	ZZ4256V384HZ1FCEV	123.15 kWh/420 km
大运	CGC4250FCEV1Z4	95.55 kWh/430 km(氢工作)/60 km(氢不工作)
	CGC4251FCEV1Z2	95.55 kWh/410 km(氢工作)/60 km(氢不工作)
	CGC4250FCEV1Z1	248.21 kWh/400 km(纯电160 km;氢燃料240 km)

2.2 主要矛盾——低储氢量带来的低续航里程

从整车开发角度看,当下最突出的问题是低储氢量所带来的低续航里程,不解决这一主要矛盾,便不能实现燃料电池在长途重型货车上的成功应用。车辆低储氢量的根本原因是氢气过低的体积储氢密度。

在众多燃料中,同质量下氢气所含能量(120 MJ/kg)是最高的,为柴油所含能量(约为43 MJ/kg)的3倍,这是氢气的优势。然而,从体积能量密度比较,情况则正好相反,柴油为36 MJ/L,而液态氢约为8 MJ/L,气态氢更低,分别为4.8 MJ/L(70 MPa)和2.8 MJ/L(35 MPa),这意味着为了和

柴油含有同等的能量，氢气（35 MPa）所占体积将是柴油的 12.8 倍。几种燃料的质量能量密度与体积能量密度之比，如图 1 所示。

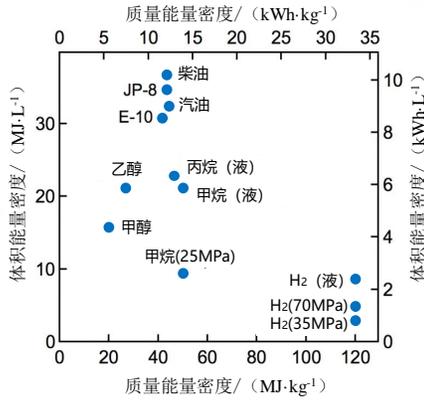


图 1 基于低热值的几种燃料能量密度比较 [15]

为满足高压需求，氢瓶需要有厚厚的外壳，呈内胆加纤维缠绕层结构，分别是铝内胆纤维缠绕瓶（III型氢瓶）和塑料内胆纤维缠绕瓶（IV型氢瓶）；此外，柴油存储于方形油箱内，在车辆上布置方便且空间利用率极高，高压氢瓶为细长形胶囊状，胶囊形状空间利用率较低。相对于整个储氢系统体积，这两个因素更加剧了空间储氢密度的大幅降低。

胶囊形氢瓶结构如图 2 所示。图中， R_0 为氢瓶

空腔半径，mm； R_1 为氢瓶外半径，mm； L 为氢瓶长度，mm； L_1 为氢瓶圆柱部分长度，mm。

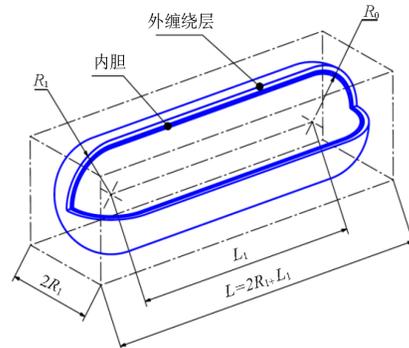


图 2 胶囊形氢瓶简图

氢瓶所占长方体空间体积为：

$$V_{\text{cuboid}} = 4R_1^2 L \quad (1)$$

式中：

$$L = L_1 + 2R_1 \quad (2)$$

胶囊形状空间体积计算公式为：

$$V_{\text{capsule}} = \pi R^2 \left(\frac{4}{3} R + L_1 \right) \quad (3)$$

把 R_0 和 R_1 代入式 (3)，可分别得到氢瓶的空腔部分容积（水容积）和氢瓶所占空间体积。根据斯林达某 3 款典型氢瓶参数，按上述方法计算可得出体积储氢密度，见表 3，表中氢瓶存储水容积、储氢量通过测试已知。

表 3 货车用典型氢气瓶体积储氢密度对比

氢瓶类型	III型瓶 35 MPa	III型瓶 70 MPa	IV型瓶 70 MPa
气瓶外径/mm	410	444	440
气瓶长度/mm	2 200	2205	2 150
气瓶体积/L	272	318	304
空腔水容积/L	210	198	215
气瓶重量/kg	110	190	143
储氢量/kg	5	7.9	8.6
质量储氢密度/(wt%)	4.3	4.0	5.7
体积密度(水容积)/(g·L ⁻¹)	23.8	39.9	40.0
体积密度(胶囊)/(g·L ⁻¹)	18.4	24.8	28.2
体积密度(长方体)/(g·L ⁻¹)	13.5	18.2	20.6

目前普遍使用的 35 MPa 氢瓶，对比所占长方体空间，储氢密度约为 13.5 g/L，体积能量密度约为 1.62 MJ/L。考虑油箱包装空间的柴油体积能量

密度约为 $36 \times 90\% = 32.4$ MJ/L，所以在相同储能下，氢气存储空间需求约是柴油的 20 倍，对于各类长途重型货车，在不影响货物空间及载货量的情况

下，这几乎是无法实现的。基于以上分析，目前燃料电池重型货车车载能量远低于柴油汽车，续驶里程也远低于柴油车。

如图3所示，通过简单地增加氢瓶数量来提高续驶里程，不但影响了挂车的前回转半径，同时大大增加了车辆整备质量，降低了运输效率，不能体现先进的技术发展方向。



图3 某国产牵引汽车氢瓶布置

3 提升整车续驶里程应对研究

当前，亟待通过各种方法来提升燃料电池重型货车的续驶里程，以满足长途运输场景的需求，只有这样才能进一步推动试运营工作的展开，为实现更长期的碳减排目标走出关键的一步。提升对策应基于两个前提：首先，可以在一定时期内能实现，要具有可操作性与现实意义；其次，要有一定的前瞻性，能代表先进的技术发展方向。

图4分析总结了影响整车续驶里程的主要因素，为提升续驶里程需从以下三方面出发制定相应对策：一是车载储氢量尽可能地大；二是降低车上能量损耗，以便能有更多的剩余能量来驱动车辆，获得更大的续驶里程，其中包括提升电堆及燃料电池系统的效率，提升各类机械系统、电力电子系统效率，减少各种辅助系统（如空压泵电机、转向泵电机）的负载功率损耗等；三是降低车辆的行驶阻力（主要降低车辆的空气阻力）。

以上分析忽略了锂电池容量、车辆轻量化，以及先进的能量管理策略对车辆续驶里程的影响。匹配更大容量的锂电池固然能增加续驶里程，但也占用了更大的车辆布置空间，从而增加车辆的整备质量，这与“大功率燃料电池+小容量锂电池”能量跟随型混合功率模式的发展趋势相悖。轻量化技术

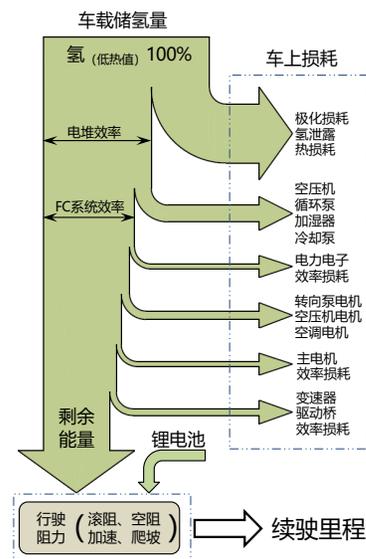


图4 车辆续驶里程影响因素分析

能带来运输效率的提升，在相同的载货量下，整车总质量更低，行驶里程更远，本文不做过多叙述。有研究表明^[16]，通过考虑现实场景来验证能量管理策略并获得稳健的设计，同时实现氢经济性与系统寿命的多目标优化，对于某明确的目标车辆，利用现有驾驶信息最大化氢经济性，有助于降低车辆能耗、增加续驶里程。先进的能量管理策略是提升续驶里程的有效手段，稳健的策略会涉及到具体的车辆和道路信息，本文也不展开论述。

如图4所示，电堆效率及燃料电池系统效率过低是带来能量过多浪费的关键，当前电堆的效率大约为50%~65%，燃料电池系统的效率更低，普遍为40%~55%。然而，要提升电堆及电池系统的整体效率水平，需依靠关键材料的技术突破，依靠电池系统本身的技术进步，整车企业作为应用单位，似乎无能为力。可以做到的是让燃料电池尽可能工作在高效率区域，来提升氢经济性与整车的续驶里程。

下文将重点在提高车载储氢量与降低车辆行驶能耗（主要指降低空气阻力）两个方面进行探讨，分析对整车续驶里程的影响，从整车角度出发，具有可操作性与现实意义。

3.1 提高车载储氢量

提升车载储氢量是最直接的增加续驶里程的方

法,然而由于储氢体积密度的影响,储氢量并不容易增加。开发推进车载储氢技术的发展,为车辆提供足够的氢气能源,使燃料电池汽车能够满足客户对续驶里程、货物空间、加注时间和车辆性能的期望,是当前一项紧迫且重要的工作,为此,美国能源部氢能和燃料电池技术办公室(HFTO)为行业指出了两条战略路径^[15],近期侧重于高压存储,使其能够达到70 MPa的压力,远期则向深冷高压储氢和基于材料的储氢技术方向发展。

当前,国内普遍采用35 MPa III型氢瓶,70 MPa III型氢瓶也已经开发出来,由于受到加氢站加注压力等诸多因素的限制,所以应用得还较少。而70 MPa IV型氢瓶,由于采用塑料内胆,使氢瓶重量有了显著降低,必将替代III型氢瓶。目前,开发70 MPa IV型瓶遇到的最大瓶颈是在储氢瓶口与出口阀的结构部位,如何通过设计来确保阀门在高压下不会像炮弹出膛一样被冲出,对可靠性与安全性的要求更加突出。至2021年上半年,据报道,仅有斯林达70 MPa IV型氢瓶通过了国家安全认证。

根据表3计算结果,采用70 MPa III型氢瓶替代目前普遍使用的35 MPa III型氢瓶,相对包装空间的(长方体)体积储氢密度将由13.5 g/L增加到18.2 g/L,储氢量是原来的1.35倍,低于氢气在两种气压下同体积的质量差距(约 $39.9/23.8=1.67$ 倍),这是由于III型瓶在提升到70 MPa后,氢瓶厚度大幅增加所致,造成腔内水容积对比氢瓶体积(胶囊型体积)密度变小。如果采用70 MPa IV型氢瓶,相对包装空间(长方体)体积储氢密度可达20.6 g/L,相同布置空间下,是35 MPa III型氢瓶储氢量的1.53倍。如表1所示,长城(未势能源)6×4牵引重型货车,采用斯林达70 MPa III型氢瓶,并将其双排布置在驾驶室后侧,每排上下5个,总的水容积为198 L×10,按70 MPa的密度40 g/L计算,储氢量近80 kg,该车验证了同类牵引汽车的空间储氢能力,待70 MPa IV型氢瓶的技术成熟后,车载储氢能力可接近90 kg。现阶段国内商用车用氢瓶的规格参数见表4,其中包含70 MPa III型瓶和IV型瓶。

表4 国内氢瓶规格参数

厂家	氢瓶型号	类型	水容积/L	质量/kg	气压/MPa	储氢质量/kg
国富氢能	CHG3-379-210-35 S/A	III	210	110	35	4.98
	CHG3-379-165-35 S/A	III	165	88	35	3.91
	CHG3-353-145-70 S/B	III	145	145	70	5.76
北京天海	CHG3-373-165-35 T/A	III	165	90	35	3.90
	CHG3-352-134-70 S/B	III	134	125	70	5.30
斯林达	CHG4-410-140-70S/B1	IV	143	98	70	5.70
	CHG4-440-210-70S/B1	IV	215	143	70	8.60
	CHG3-379-210-35 S/A	III	210	110	35	5.00
	CHG3-372-198-70S/B	III	198	190	70	7.90

液氢就其本身密度而言,拥有比气态氢更大的体积储氢密度,约为70 g/L,这里不含储氢装备的体积。根据对奔驰GenH2燃料电池概念车的介绍,将两个液氢存储装置布置在牵引车车架两侧,不占用驾驶室后侧空间,便可达到80 kg的车载储氢量。从2021年中国电动汽车百人会年会高层论坛获悉,国内福田搭载亿华通电池的某8×4载货车样车,采

用液氢系统,可达到1 000 km的连续行驶。然而,这种探索性方案似乎比高压储氢方案离客户的距离更远,要实现车载液氢商业化应用首先要跨过两大障碍:一是氢气液化消耗的能量约占氢气初始能量的25%~40%,因此在不保证氢气以及提供液化氢气能量是绿色的前提下,任何车辆的提前布局都是无意义的;二是液氢存储的安全性以及道路运输危

险化学品的属性。

相比气态及液态储氢，固态储氢具有体积储氢密度大的优势，对于储氢布置空间紧张的重型货车，提供了一种增大车载储氢量及续航里程的可能，而不足之处是目前普遍质量储氢密度过低，导致整车整备质量的增加，降低运输效率，同时需要适当的能量才能让氢气释放。表5介绍了不同储氢形式的质量与体积储氢密度的对比。

表5 不同储氢形式及参数对比^[17-18]

储氢形式	气压/MPa	质量储氢密度/(wt%)	体积储氢密度/(g·L ⁻¹)	温度/°C
高压储氢	35 (III型瓶)	4.30	24 ^a	20
	70 (IV型瓶)	5.70	40 ^a	20
液氢	0.4	5.11	70 ^a	-253
固态储氢	(MgH ₂) 0.1	7.60	110	200~400
	(Mg ₂ NiH ₄) 0.1	3.60	94	250
	(TiFeH _{1.95}) 1.5	1.86	83.7	20~100

注：“a”为氢自身的密度，未考虑体积庞大的储氢装置空间。由于固态存储装置的复杂程度远远小于高压气态或液态，所以在体积储氢密度上，固态储氢会比表5表现得更具优势。

日本丰田公司等企业很早之前就提出高压复合储氢罐的概念，即在高压罐内存储一定量的氢化合物（一体式），从而实现气-固混合储氢。周超等^[17]介绍了NaAlH₄和AlH₃是未来极具发展潜力的高压储氢材料，可有效提升高压储氢体系的质量储氢密度和体积储氢密度；徐双庆等^[19]通过建立模型进行数值分析，得出某国产70L 35MPa氢瓶，通过填充40%的MH固态氢化物，能获得与70 MPa氢瓶相当的体积储氢密度（40 g/L），目前未发现对IV型氢瓶的气-固混合储氢模式的研究。

随着新材料技术的发展，如果能发现一些更高质量储氢密度，吸/放氢焓变量更小，易活化且寿命足够的固态氢化物，车载储氢有可能会向固态储氢模式或车载固-气混合储氢模式演进。

按照不同储氢状态对典型牵引车的储氢系统进行空间布置，以此探讨车载储氢能力。选取驾驶室后侧车架上端为布置空间，要求储氢系统x向不超过1.2 m，宽度为2.5 m，考虑布置高度不能超出车

辆总高度4 m的限值及驾驶室的最高点，选取布置空间z向高度为2.6 m，整个布置空间长方体体积为7.8 m³，可布置10个高压氢瓶，或2个圆柱状液氢罐，该评估简化了液氢罐复杂的附件结构，假定其他附件安装于罐体轴向而不影响液氢罐在车上的双层布置。不同储氢状态车载储氢能力评估如图6所示，评估显示：液氢储存比气态高压储存在储氢能力及系统质量上均有很大的优势，能给车辆带来更大的续航里程；如果采用固态金属氢化物储氢，并达到和液氢相同的储氢量，需求空间会大幅减小，考虑固态储氢材料氢的质量密度一般在1%~4.5%左右，仅材料本身质量就可能在3.1~14 t，系统质量则>4 t，车辆可能无法承受。固态氢化物车载储氢技术目前仍处于探索阶段，还有许多亟待解决的问题，不仅要找到适合车载的固态储氢材料，同时还与罐体的结构有关，如需要解决罐体的体积膨胀、传热、气体流动等问题，有必要加一个大容积的“蓄气池”，这将消减其空间上的布置优势。从实现商业应用的难度考虑，车载气态储氢易于液态储氢，车载固态储氢商品化道路更远。

3.2 降低整车空气阻力能耗

车辆在行驶过程中，各种运动阻力所消耗的功率共同作用来影响整车的能量消耗率，分别是滚动阻力功率 P_f ，空气阻力功率 P_w ，坡度阻力功率 P_i 及加速阻力功率 P_j ，总的阻力功率（kW）为：

$$P_f + P_w + P_i + P_j = \frac{Gfu_a}{3600} + \frac{C_D Au_a^3}{76140} + \frac{Giu_a}{3600} + \frac{\delta mu_a}{3600} \frac{du}{dt} \quad (4)$$

式中： G 为车辆总重量，N； f 为滚动阻力系数； u_a 为车速，km/h； C_D 为空气阻力系数； A 为车辆迎风面积，m²； i 为道路坡度，%； δ 为汽车旋转质量换算系数； m 为车辆总质量，kg。

车辆行进时，时刻影响功率消耗且总能耗巨大的为滚动阻力与空气阻力两部分。滚动阻力主要的外部影响是滚动阻力系数，滚动阻力系数与轮胎及行驶路面情况相关，可改善的空间有限；而空气阻力大小主要受车辆的空气阻力系数与迎风面积以及

表 6 不同储氢状态车载储氢能力评估对比

储氢状态	III型 35 MPa	III型 70 MPa	IV型 70 MPa	液态 (0.4)	金属氢化物
布置形式		 10 只氢瓶 (气态)		 双液氢瓶	 固态储氢容器
布置空间/m ³		1.2×2.5×2.6=7.8		7.8	<3
系统质量/t	1.4	2.2	1.7	1.5	4
储氢能力/kg	50	70~80	80~90	140	140
商品化难度	易	●			
	中		●		
	难			●	
	很难				●

车速的影响, 由于我国货车驾驶室基本都采用平头式, 且在过去很长时间对列车的气动造型不够重视, 造成如今空气阻力系数偏大的现实, 存在巨大的优化空间。降低空气阻力主要从两个方面展开: 一是为车辆加装减阻附件, 二是新开发更具流线型、空气阻力系数更优的驾驶室。

杨帆等^[20]通过对牵引车与挂车车身连接处以及货箱尾部两处增加减阻附件, 减弱货箱前部气流分离和尾部涡量, 实现货车空气阻力系数降低 16.2%; 王庆洋等^[21]对某款平头重型牵引车进行了详细的研究对比, 在牵引车区域、牵引车与挂车间距区域和挂车尾部区域等 3 个气动敏感区域, 分别加装不同类型的减阻附件(图 5), 得到最佳减阻附件组合, 且减阻率达到 27.4%; 晏强^[22]等对 4 种不同类型的驾驶室模型进行外流场分析, 得出具有更大倾角的前围, 且 A 柱采用流线型设计, 整车空气阻力系数比常规平头车降低 15.2%, 达到 0.415; 国内如重汽黄河 X7 车型采用 A 柱后倾, 且前悬加长的流线型设计, 通过匹配低空气阻力挂车, 使整车空气阻力系数低至 0.4 以下; 欧洲新一代达夫牵引车也采用大倾角流线型造型, 尽可能降低空气阻力, 其造型已经不同于常规的平头驾驶室; 奔驰 GenH2 概念车也采用了更具流线型的车身造型, 以及电子后视镜来降低空气阻力(图 6), 根据已有研究^[21]可知, 传统后视镜影响空气阻力占比约 4.15%, 不可忽视。

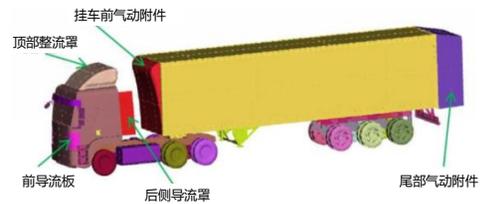
图 5 多种气动附件的组合模型^[21]

图 6 奔驰与达夫概念货车造型

当前国内主流牵引车, 前导流板、顶部导流罩、后侧导流罩等都已成为标配, 整车空气阻力系数大约在 0.6 左右的水平, 而挂车前气动附件、挂车尾部气动附件、挂车底部导流装置等少有应用, 同时牵引车与挂车匹配性较差, 中间间隙较大影响了中间涡流的产生, 这几点为进一步降低整车空气阻力系数提供了很大的空间。

一直以来, 中国和欧洲对不同类型货车的总长度均有法规上的限值, 因此, 为实现货物装载及运输效益的最大化, 都不约而同地选用了平头驾驶室造型, 然而与前部大弧度、大倾角的造型风格相比, 方方正正的平头驾驶室在气动造型上具有天然的劣势。为了更大限度地降低燃油消耗, 提升整车

效率,欧盟通过(EU)2015/719法规来鼓励引入新的空气动力学驾驶室,可以在不减少货箱长度的前提下,允许驾驶室适当增加一定长度,使前围和前挡风玻璃具有更大的倾角,以此获得更优的气动造型,同时允许整车长度有相应的增加^[23]。欧盟法规(EU)No 1230/2012(欧盟对车辆的质量和尺寸型式批准要求的规定)在2019年12月对涉及到的空气动力学驾驶室补充了型式认证要求^[24],该要求把空气动力学驾驶室分为两类:一是安装了前空气动力学装置的驾驶室,二是更具流线型的加长型驾驶室,并于2020年9月1日起正式实施。欧盟相关法规的动向基本明确了下一代货车的发展方向,既鼓励引入空气动力学驾驶室,如图6所示,达夫新款驾驶室造型,采用前悬加长的流线形设计,验证了欧盟发展新动向。欧洲货车长期以来是我们的风向标,空气动力驾驶室也将是我们的发展方向,基于这一前提,新一代驾驶室采用更具优势的气动造型,还有很大的降低空气阻力的空间。

图7显示了在两种空气阻力系数下,基于等速行驶工况,车辆的空气阻力能耗在总行驶能耗(空气阻力+滚动阻力)中所占的比重,以及对续航里程的影响。该车型为42 t高速长途牵引车,迎风面积 $A=9.86\text{ m}^2$,整车空气阻力系数通过CFD仿真得出 $C_D=0.597$,符合目前的普遍水平,轮胎采用315/80R22.5的同时采用ISO 28580测试法,忽略车速的影响,得到其滚动阻力系数 $f=0.005$,此时假设整车在经过优化后,空气阻力系数达到0.4,不同类型阻力功率对应的计算公式参照式(4),其中两车滚动阻力功率在相同车速下一致。可以看到,车辆行驶速度越大,空气阻力能耗所占比重愈大,空气阻力系数降得越低对整车降耗的作用愈明显。对于高速牵引车,常用车速为70~90 km/h,通过空气阻力系数优化可增加续航里程约18%。

3.3 续航里程的评估

国内牵引车整车总质量普遍在40~49 t,在公路运输车辆中总质量最大,对于其高速公路运输工况的实际油耗,目前有充足的实际测量数据,普遍油耗

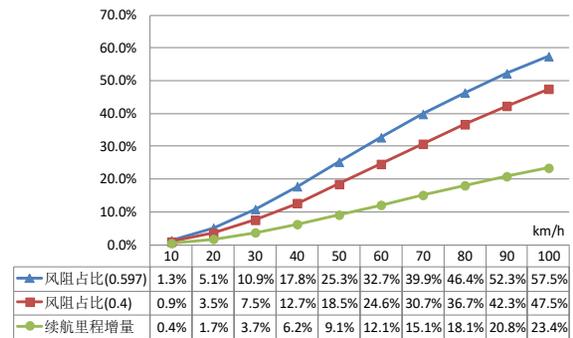


图7 两种空气阻力系数下能耗与续驶情况对比

在30~36 L,由于同类别燃料电池汽车无相应的统计数据支撑,可按式(5)~(6)进行氢耗估算:

$$E_{\text{ICE-V}} = E_{\text{FC-V}} \quad (5)$$

$$E = Qq\eta \quad (6)$$

式中: $E_{\text{ICE-V}}$ 为柴油车某实际工况路段下的行驶能量需求(滚动阻力、空气阻力、加速、爬坡); $E_{\text{FC-V}}$ 为燃料电池汽车同路段下的行驶能量需求,两者理论相同; Q 为燃料消耗量,kg/(100 km),燃油车油耗保守取值36 L/(100 km),约29.88 kg/(100 km); q 为燃料低热值,氢为120 MJ/kg,柴油为43 MJ/kg; η 为轮胎前的所有效率综合值,柴油车取值 $\eta=40\%$,燃料电池车辆效率高于柴油车,保守取值 $\eta=45\%$,根据式(5)~(6)得出同类燃料电池牵引车的氢耗在该路况下约为9.5 kg/(100 km)。

因此,燃料电池长途牵引车,在当前车辆能耗状态下,如果采用70 MPa氢瓶,车载储氢量达到90 kg,车辆续航里程可达900 km以上。随着燃料电池技术的发展及系统效率的继续提升,以及新一代更优气动造型驾驶室的应用,整车续航里程将会进一步提升,可超出1 000 km。根据《节能与新能源汽车技术路线图2.0》,到2030年,新能源汽车的续航里程能够达到800 km。

3.4 加氢站配套是关键

随着技术的进步,燃料电池货车在可预期的将来能达到不错的续航里程,但同时也应深刻认识到,加氢站的快速发展与合理布局才是解决氢能能与燃料电池汽车产业可持续性健康发展的根本举措,是氢能健康发展中不可或缺的关键环节。燃料电池汽车在我国刚刚起步,加氢站布局发展体系也未成形,在技术和经验上与国外尚有不小差距,需要有

针对性地朝着布局规模化,技术和设备自主国产化,以及操作流程安全化的方向发展^[25]。

4 结论

本文指出了燃料电池重型货车整车开发面临的主要矛盾、难点、结论及展望,结论如下:

(1) 当前燃料电池重型货车整车开发的主要矛盾,是低车载储氢量所带来的低续航里程问题,使之无法与柴油车相比拟,不能很好地适用于长途运输场景,根本原因是氢过低的体积存储密度。

(2) 在相同的车载能量下, H₂ (35 MPa) 存储空间需求约是柴油的20倍,对于各类货车,在不影响货物空间及载货量的情况下,这几乎是无法实现的目标。

(3) 当前,努力提升车载储氢量和降低车辆行驶能耗(主要指空气阻力能耗)是提升续航里程的两个最有效且具有操作性的方法;应用70 MPa IV型氢瓶,在同样包装体积下,储氢量是35 MPa III型氢瓶的1.53倍,对于牵引车在驾驶室后布置双排氢瓶,可实现90 kg的车载储氢量。

(4) 目前驾驶室和整车的普遍空气阻力系数偏大,通过增加气动减阻附件,以及开发新一代流线型驾驶室,来降低车辆空气阻力能耗,估计能增加续航里程18%。

(5) 根据《节能与新能源汽车技术路线图2.0》,燃料电池重型货车到2030年达到800 km的续航里程是能够实现的。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2020)[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部,2020. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China Mobile Source Environmental Management Annual Report(2020)[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2020. (in Chinese)
- [2] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0 [M]. 北京:机械工业出版社,2020. China Society of Automotive Engineers. Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles 2.0 [M]. Beijing: China Machine Press, 2020. (in Chinese)
- [3] 谭旭光,余卓平. 燃料电池商用车产业发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 152-158. TAN Xuguang, YU Zhuoping. Development Status and Prospects of Fuel Cell Commercial Vehicle Industry [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 152-158. (in Chinese)
- [4] LIU Feiqi, ZHAO Fuquan, LIU Zongwei, et al. The impact of Fuel Cell Vehicle Deployment on Road Transport Greenhouse Gas Emissions: The China Case [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(50): 22604-22621.
- [5] WANG Qun, XUE Mianqiang, LIN Binle, et al. Well-to-Wheel Analysis of Energy Consumption, Greenhouse Gas and Air Pollutants Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicle in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123061.
- [6] 程一步,王晓明,李杨楠,等. 中国氢能产业2020年发展综述及未来展望 [J]. 当代石油石化, 2021, 29(4): 10-17. CHEN Yibu, WANG Xiaoming, LI Yangnan, et al. China's Hydrogen Energy Industry in 2020 and Future Prospects [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2021, 29(4): 10-17. (in Chinese)
- [7] 赵月晶,何广利,缪平,等. 35 MPa/70 MPa加氢机加注性能综合评价研究 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 702-706. ZHAO Yuejing, HE Guangli, MIAO Ping, et al. Study on Comprehensive Evaluation of 35 MPa/70 MPa Hydrogen Dispenser Refueling Performance [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 702-706. (in Chinese)
- [8] ÇABUKOĞLU E, GEORGES G, KING L, et al. Fuel Cell Electric Vehicles: An Option to Decarbonize Heavy-Duty Transport? Results From a Swiss Case-Study [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 70: 35-48.
- [9] 胡浩然,袁悦博,安莉莎,等. 商用车动力总成最高系统效率的探讨 [J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(4): 428-443. HU Haoran, YUAN Yuebo, AN Lisha, et al. In-Searching for Highest System Efficiency of Commercial Vehicle Powertrains [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2020, 11(4): 428-443. (in Chinese)
- [10] 蔡国伟,孔令国,薛宇,等. 风氢耦合发电技术研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 127-135. CAI Guowei, KONG Lingguo, XUE Yu, et al. Overview of Research on Wind Power Coupled with Hydrogen Production Technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 127-135. (in Chinese)
- [11] 潘光胜,顾伟,张会岩,等. 面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 1-10.

- PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and Hydrogen Energy System Towards Accommodation of High Proportion of Renewable Energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 1-10. (in Chinese)
- [12] 蒋京呈, 菅小东, 林军, 等. 锂动力电池产业有毒有害物质筛查及对策研究 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43(6): 801-806.
- JIANG Jingcheng, JIAN Xiaodong, LIN Jun, et al. Research on Screening and Countermeasures of Toxic and Hazardous Substances Inlithium Power Battery Industry [J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(6): 801-806. (in Chinese)
- [13] Daimler Truck Unveils Fuel Cell Concept Truck [J]. Fuel Cells Bulletin, 2020, 2020(10): 3-4.
- [14] ASKO Puts Four Scania Hydrogen Fuel Cell Electric Trucks into Service in Norway [J]. Fuel Cells Bulletin, 2020, 2020(1): 1.
- [15] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (U. S.). Hydrogen Storage [EB/OL]. [2021-08-01]. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
- [16] FERRARA A, JAKUBEK S, HAMETNER C. Energy Management of Heavy-Duty Fuel Cell Vehicles in Real-World Driving Scenarios: Robust Design of Strategies to Maximize the Hydrogen Economy and System Lifetime [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 232(15): 113795.
- [17] 周超, 王辉, 欧阳柳章, 等. 高压复合储氢罐用储氢材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(1): 117-126.
- ZHOU Chao, WANG Hui, OUYANG Liuzhang, et al. The State of the Art of Hydrogen Storage Materials for High-Pressure Hybrid Hydrogen Vessel [J]. Materials Reports, 2019, 33(1): 117-126. (in Chinese)
- [18] 张志芸, 张国强, 刘艳秋, 等. 车载储氢技术研究现状及发展方向 [J]. 油气储运, 2018, 37(11): 1207-1212.
- ZHANG Zhiyun, ZHANG Guoqiang, LIU Yanqiu, et al. Research Status and Development Direction of on-Board Hydrogen Storage Technologies [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(11): 1207-1212. (in Chinese)
- [19] 徐双庆, 范志超, 刘孝亮. 车载高压-固态复合储氢系统储氢密度的数值分析 [J]. 压力容器, 2020, 37(9): 24-29.
- XU Shuangqing, FAN Zhichao, LIU Xiaoliang. Numerical Analysis of Hydrogen Storage Density for a Vehicle High Pressure-Metal Hydride Hybrid Hydrogen Storage System [J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(9): 24-29. (in Chinese)
- [20] 杨帆, 胡阳洋, 王建华. 重型卡车风阻优化 [J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 54-60.
- YANG Fan, HU Yangyang, WANG Jianhua. Optimization of Wind Resistance for Heavy Truck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 54-60. (in Chinese)
- [21] 王庆洋, 黄文鹏, 赖晨光, 等. 基于气动附件的重型货车空气动力学减阻研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42(6): 746-752.
- WANG Qingyang, HUANG Wenpeng, LAI Chenguang, et al. Study on Aerodynamic Drag Reduction of a Heavy Truck Based on Aerodynamic Accessories [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(6): 746-752. (in Chinese)
- [22] 晏强, 种刚, 张倩, 等. 基于国内某重型卡车整车外流场优化分析 [J]. 汽车实用技术, 2017(20): 126-128.
- YAN Qiang, CHONG Gang, ZHANG Qian, et al. Optimization and Analysis of Outflow Field Based on a Heavy-Duty Truck [J]. Automobile Applied Technology, 2017(20): 126-128. (in Chinese)
- [23] (EU) 2015/719. Certain Road Vehicles Circulating Within the Community the Maximum Authorised Dimensions in National and International Traffic and the Maximum Authorised Weights in International Traffic [S]. Official Journal of the European Union, 2015.
- [24] (EU) No 1230/2012. Type-Approval Requirements for Masses and Dimensions of Motor Vehicles and Their Trailers and Amending Directive [S]. Publications Office of the European Union, 2019.
- [25] 赵俊玮, 陈轶嵩, 方海峰, 等. 我国燃料电池汽车加氢站发展现状分析及对策建议 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(3): 201-208.
- ZHAO Junwei, CHEN Yisong, FANG Haifeng, et al. Status and Countermeasures of Hydrogenation Station Network Layout in China for Fuel Cell Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(3): 201-208. (in Chinese)

作者简介



白雪松 (1983-), 男, 江苏徐州人, 学士, 工程师, 主要研究方向为燃料电池在商用车上的应用、车辆节能技术、未来货车发展趋势等。

Tel: 18918154023

E-mail: bxs_faw@163.com