

燃料电池汽车生命周期分析综述

杨佳珞, 舒俊豪, 徐鑫, 武小花*

(西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

摘要: 生命周期分析是评估燃料电池汽车从生产到报废整个过程中能耗、排放以及对环境造成影响的重要手段。目前从制氢路径入手, 分析不同制氢路径能耗、排放以及对环境造成的影响的研究居多。本文在概述生命周期分析方法及实施步骤等基础上, 对国内外燃料电池汽车生命周期分析的研究进行综述, 指出目前国内燃料电池汽车生命周期分析研究中存在的问题与不足, 并对燃料电池汽车生命周期分析未来的发展方向进行展望, 为后续燃料电池汽车相关政策或战略的制定提供参考。

关键词: 燃料电池汽车; 生命周期分析; 节能减排

中图分类号: TK91 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2022)06-0105-08

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4205

A Review of Life Cycle Assessment on Fuel Cell Vehicles

YANG Jialuo, SHU Junhao, XU Xin, WU Xiaohua*

(Vehicle Measurement Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039 China)

Abstract: Life cycle assessment is an important means to evaluate the energy consumption, emissions and environmental impact of fuel cell vehicles from production to scrap. This paper summarized the research of life cycle assessment of fuel cell vehicles at home and abroad. The problems and deficiencies in the research of fuel cell life cycle analysis in China are pointed out, and the future development direction of fuel cell vehicle life cycle is prospected. The purpose of this paper is to provide reference for the formulation of related policies or strategies for fuel cell vehicles.

Keywords: fuel cell vehicle; life cycle assessment; energy saving and emission reduction

燃料电池汽车具有高效、清洁、零污染等优点^[1]。目前, 现代、丰田和本田等车企都已有燃料电池汽车投入市场, 它们的性能以及续航里程已经可以与目前的传统燃油汽车别无二致。近年来, 我国燃料电池汽车技术研发取得重大进展。在国家政策的大力支持下, 我国燃料电池汽车产业链初具

雏形^[2]。当前我国燃料电池汽车正处在示范应用推广初级阶段, 其高效清洁的优势只是针对行驶阶段。如果从汽车生命周期角度出发, 燃料电池汽车是否能起到节能减排作用, 与混合动力汽车、纯电动汽车相比是否具有更好的环境效益, 这些问题存在着较大的争议。因此, 对燃料电池汽车进行生命

收稿日期: 2020-08-16

基金项目: 四川省科技计划项目(2020YFQ0037, 2019ZDZX0002, 2021YFG0071)。

*通信作者: 武小花(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为新能源汽车控制技术、电池容量衰减、随机在线优化控制等。

ORCID: 0000-0001-7692-7863 E-mail: xiaohuawu13@163.com

引用格式: 杨佳珞, 舒俊豪, 徐鑫, 等. 燃料电池汽车生命周期分析综述[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 105-112.

YANG Jialuo, SHU Junhao, XU Xin, et al. A Review of Life Cycle Assessment on Fuel Cell Vehicles[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2022, 41(6): 105-112.

周期分析是必不可少的。

本文简介了生命周期分析方法,对燃料电池汽车生命周期分析的国内外应用现状进行了综述,指出目前我国燃料电池汽车生命周期分析中存在的问题,并展望了FCV-LCA(fuel cell vehicles-life cycle assessment,燃料电池汽车生命周期评价)未来的发展方向。

1 生命周期分析方法及实施步骤

1.1 生命周期分析方法概述

生命周期分析理论可以评估产品在整个生命周期所有投入产出以及对环境造成的影响^[1],涉及的领域包括能源、环境、经济评价以及社会政策等各方面^[4-5]。生命周期分析将产品整个生命周期分为不同的阶段,并依次分析,对于解决“氢燃料电池汽车是否真的节能减排”这一问题,是一种行之有效的方法。生命周期分析有助于企业实施清洁生产,帮助政府部门优化能源、运输和废物管理方案,引导、指导“绿色营销”和“绿色消费”^[6]。

燃料电池汽车生命周期分析可以对燃料电池汽车生命周期内的成本、能源消耗和环境污染情况进行综合评价,近年来已经有越来越多的学者在这个问题上进行了相关研究^[7]。

对汽车进行生命周期分析时,一般将汽车的整个生命周期分为车辆材料生命周期以及燃料生命周期,如图1所示。车辆材料生命周期针对除燃料外的部分,包括原材料开采、原料生产、零部件的生产、汽车装配、报废回收等过程。燃料生命周期针对燃料,包括原料开采、原料储存、原料运输、加工、产品储存、产品运输、使用的整个过程。燃料

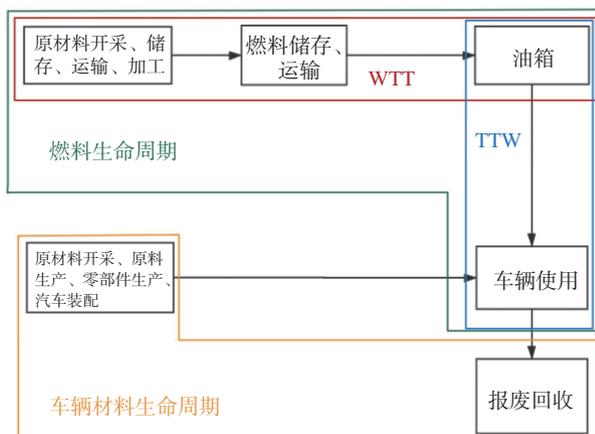


图1 汽车生命周期

生命周期可划分为两阶段,WTT(well to tank,油井到油箱)与TTW(tank to wheel,油箱到车轮)。WTT阶段指从原料开采到燃油加注的整个过程。TTW阶段指汽车的使用阶段。在目前的研究中,大部分研究是针对燃料生命周期来进行的。

1.2 相关标准

1993年6月国际标准化组织拟定包含LCA(life cycle assessment,生命周期分析)的ISO14000环境管理系列标准^[8]。经过30来年的发展,生命周期分析在国内外建立了相关标准。相继推出有ISO14040:2006《环境管理-生命周期评价-原则与框架》^[9]、ISO14044:2006《环境管理-生命周期评价-要求与指南》^[10]。参考国外,我国推出了GB/T 24040—2008《环境管理-生命周期评价-原则与框架》^[11]、GB/T 24044—2008《环境管理-生命周期评价-要求与指南》^[12]。《中国制造2025》^[13]和《工业绿色发展规划(2016—2020年)》^[14]也提出“强化产品全生命周期绿色管理”。

1.3 生命周期分析实施步骤

总体上来讲,LCA可以分为4个主要步骤:目标和范围的确定、清单分析、影响评价、结果解释^[15],如图2所示。

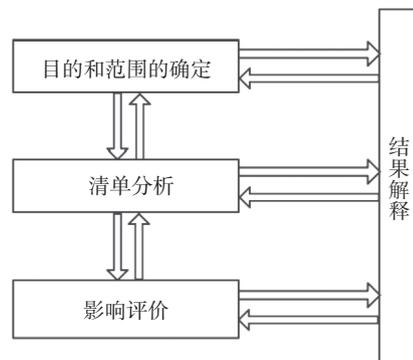


图2 生命周期分析实施步骤

1.3.1 目的与范围的确定

作为生命周期分析的第一步,这一步应该清晰的表明进行生命周期分析的目的和原因。范围界定包括确定研究对象的系统边界、功能单位、数据要求、数据分配方式等^[16]。这一步是生命周期分析中关键的一步,目的与范围的确定会影响整个生命周期分析的结果与最终结论。在燃料电池汽车的生命周期分析中,这一步往往是选取研究对象和确定进行生命周期分析的范围。

1.3.2 清单分析

清单分析阶段分析供应链每个节点消耗或生产的能源和材料的数量^[17]。具体做法为对所研究系统的数据进行收集处理,客观量化输入与输出。在燃料电池汽车的生命周期分析中,这一步为建立生命周期分析模型,包括燃料生产模型、车辆生产模型、车辆模型等,之后对生命周期中的每一单元进行数据收集,最后计算和汇总收集的数据,得到研究车辆的生命周期清单结果。

1.3.3 影响评价

影响评价需要评价所研究系统或产品清单分析结果对环境的影响,为了便于直观地认识此影响,一般将清单分析的数据转化为影响类别,并对数据进行归一化、特征化和量化处理。有学者使用 CML2001 的评价方法来评价燃料电池汽车生命周期分析的结果。该评价方法将汽车生命周期对环境造成的影响分为矿产资源消耗、化石能源消耗、光化学烟雾潜值、全球变暖潜值、酸化潜值、水体富营养化潜值和臭氧层损耗潜值 7 项指标^[18]。

1.3.4 结果解释

这一步需要对前两步的结果做出解释,检查生命周期分析的完整性,并给出结论、局限和建议等。在燃料电池汽车的生命周期研究中,有部分学者针对影响生命周期结果的关键变量进行敏感性分析,此外,这一步可得出所研究的车辆的生命周期结果与其他同级别不同燃料车辆的对比结论,便于找出问题的关键点,提出意见或建议。

2 FCV-LCA 在国外和国内研究现状

2.1 国外研究现状

国外对汽车生命周期分析的研究起步较早。上世纪 90 年代初,许多国家开始从事有关生命周期分析的方法研究,已取得一定的进展^[19]。国外众多研究机构相继研发了相应软件,建立了庞大的数据库与模型。目前,较为主流的用于生命周期分析的软件有由美国的 GREET^[20]、德国的 Gabi^[21]、荷兰的 Simapro^[22] 等。此外,国外学者也运用生命周期方法对燃料电池汽车做了大量研究。

2.1.1 对制氢路径的研究

近年来,国内外燃料电池汽车生命周期分析中有大部分是针对氢的生产途径来进行研究的,如

表 1 所示。

Bartolozzi 等^[23]的研究结果表明,在基于可再生能源的使用中,使用氢和电力,大多数影响类别上优于意大利电网;氢气因为其存在储存和运输阶段,加上其生产效率低,在环境保护能力上总体不如使用可再生能源生产的电能。加拿大学者 Ahmadi 等^[24]通过研究发现,使用氢燃料电池汽车可以大量减少温室气体和空气污染物排放,同时大大降低生命周期燃料成本。Liu 等^[25]的研究表明,氢的压缩和液化用电对 WTW 结果影响较大,不应忽略。日本学者 Wang 等^[26]经过研究得出了氢的供给途径对生命周期结果影响较大的结论。西班牙学者 Valente 等^[27]研究发现,天然气重整制氢过程的碳排放、能耗、酸性物质排放占生命周期的 30% 以上,高于生物质气化制氢与风电制氢,但 Khzouz 等^[28]经过成本计算后得出,从成本角度考虑,集中式天然气重整制氢是最经济可行的选择。阿根廷的 Iannuzzi 等^[29]针对当地客车的分析表明,沼气重整制氢技术的能耗比固体生物质气化制氢更低。He 等^[30]研究了 2017 年和未来 2030 年中国轻型燃料电池车辆,结果表明,电网结构中煤电比例小于 20% 时,电网电解水制氢的燃料电池车辆的温室气体、NO_x、PM_{2.5}、SO₂ 排放量可低于传统内燃机汽车。

2.1.2 对不同车辆技术的研究

Baptista 等^[31]重点研究了使用新能源对英国伦敦出租车的影响,结果表明,燃料电池汽车能有效降低能耗与排放。Lee 等^[32]分析了几种中重型货车使用氢燃料电池和柴油的生命周期评价结果,并考虑了未来技术进步后的影响,结果同样表明,使用燃料电池在能耗与排放上具有优势。Candelaresi 等^[33]比较了 3 种不同燃料乘用车的环境生命周期性能,研究指出,使用氢与天然气或氢与汽油混合驱动的车辆在短期内是一个较好的方案。

2.1.3 对经济性的研究

Rocco 等^[34]利用生命周期分析模型分析了 2050 年德国燃料电池汽车预期渗透率下的经济和环境影响,结果表明,氢气的生产和分配以及国家电力组合对结果影响较大。Ally 等^[35]建立了生命周期成本模型,以澳大利亚西部为例,对柴油价格、电价、氢价对成本的影响做了敏感性分析,研究指出,与传统柴油汽车相比,氢燃料电池汽车的

经济性还有待提高。Wei等^[36]也建立了计算燃料电池汽车燃料经济性的模型,将计算结果作为GREET的输入,研究不同驱动方式的影响,结果表明,快速换挡驱动模式下的经济性最好。

2.1.4 对燃料电池系统部件的研究

Usai等^[37]对燃料电池系统进行了研究,结果

表明,储氢罐、阴极催化和辅助元件是质子交换膜燃料电池制造过程中产生排放的关键部件。Evangelisti等^[38]研究也同样表明,燃料电池堆和储氢罐的生产过程将对环境产生较大的影响。Sean等^[39]研究指出,使用动态排放系数来决定何时运行电解槽是减少二氧化碳当量排放的有效方法。

表1 针对制氢路径进行研究的文献

| 文献 | 制氢路径 | 车辆技术 | 评估对象 |
|------|---------------------------------------|-------------------------|---|
| [23] | 电解水(电网、风电、生物质气化发电)、生物质气化 | FCV、ICEV(汽油、氢)、BEV | WTW化石能耗、CML2000方法 |
| [24] | 电解水(电网)、天然气重整、电化学水裂解 | FCV | CTG温室气体排放、SO _x 、NO _x 、VOC _s 、CO、PM、燃料成本 |
| [25] | 天然气重整、电解水(电网、太阳能发电) | FCV、ICEV | WTW化石能耗、温室气体排放、CO、NO _x |
| [26] | 天然气重整、电解水(水电)、煤气化、焦炉煤气、氯碱工业副产物 | FCV、ICEV、BEV | WTW化石能耗、温室气体排放、VOC _s 、CO、NO _x 、SO _x 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ |
| [27] | 天然气重整、电解水(风电)、生物质气化 | FCV | CTG能耗、温室气体排放、SO ₂ |
| [28] | 天然气重整、电解水(电网) | FCV | WTW成本 |
| [29] | 天然气重整、电解水(电网)、生物质气化、沼气重整 | ICEV、FCV | WTW能耗、温室气体排放、水消耗、占用土地 |
| [30] | 天然气重整、电解水(电网、可再生能源)、煤气化、焦炉煤气、生物质气化 | FCV | WTW温室气体排放、VOC _s 、CO、NO _x 、SO _x 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ 、成本 |
| [40] | 天然气重整、电解水(电网、太阳能)、煤气化、玉米乙醇重整 | FCV | WTW化石能耗、温室气体排放 |
| [41] | 天然气重整、电解水(电网)、焦炉煤气、热化学水裂解制氢 | FCV、ICEV(汽油、柴油)、BEV | CTG能耗、温室气体排放 |
| [42] | 天然气重整、电解水(电网、风电、水电、太阳能、核能)、甲醇催化裂解、氨裂解 | FCV | CTG能耗、温室气体排放、VOC _s 、CO、NO _x 、SO _x 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ |
| [43] | 天然气重整、电解水(电网)、焦炉煤气 | FCV | WTW化石能耗、温室气体排放、VOC _s 、CO、NO _x 、SO _x 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ |
| [44] | 天然气重整、电解水(电网、水电)、煤气化、焦炉煤气、氯碱工业副产物 | FCV、ICEV(汽油、柴油、天然气)、BEV | WTW能耗、温室气体排放 |
| [45] | 电解水(电网、风电、太阳能) | FCV、ICEV | WTW化石能耗、温室气体排放、VOC _s 、CO、NO _x 、SO _x 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ |
| [46] | 天然气重整、电解水(电网、可再生电力)、煤气化、焦炉煤气、生物质气化 | FCV、ICEV、HEV、BEV | WTW化石能耗、CO ₂ 排放 |
| [47] | 天然气重整、电解水(电网)、煤气化 | FCV | WTW化石能耗、温室气体排放、VOC _s 、CO、NO _x 、SO _x 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ |

注:表中,如无特别说明,ICEV(Internal Combustion Engine Vehicle)代表汽油内燃机汽车;BEV(Battery Electric Vehicle)代表纯电动汽车;CTG(Cradle To Grave)代表全生命周期。

2.2 国内研究现状

2.2.1 对制氢路径的研究

与国外相比,国内对汽车生命周期的研究起步较晚,此方面的研究也较少,目前的研究方法基本上是参考国外相对应的方法,在数据库的建立相对较差,很多研究都是基于国外的数据背景来进行的。与国外研究相比,国内从制氢路径入手的研究数量更加庞大。

Hwang^[40]的研究结果表明,使用可再生能源制

氢虽然可以大幅度减少能耗和环境影响,但成本过高,用现有电网结构的电制氢,能耗和排放都高于传统汽油车。Yang等^[41]也发现,国家电网制氢的燃料电池汽车无明显正效益。陈轶嵩等^[42]研究表明,要让电解水法成为大面积制氢的可行方案,不仅要提高能源利用率,还要在关键技术上取得进步。朱昊等^[43]的研究指出,工厂焦炉煤气制氢在所研究的制氢方法中的总能耗和温室气体排放量较低,氢气运输距离对生命周期评价结果的影响很

大。Ren 等^[44]的研究结果也显示,氢的输送和储存阶段的一次能源消耗和温室气体排放不容忽视。孔德洋等^[45]通过研究发现,基于风能的电解水制氢能耗和排放较低且经济效益好。林婷等^[46]建立了适用于我国本土的燃料电池汽车燃料生命周期数据库,研究结果显示,使用清洁能源制氢,最多可减少燃料生命周期化石能耗和二氧化碳排放90%以上。Xu 等^[47]以中国的工业和运输数据为基础来分析,结果表明,目前天然气重整制氢后再使用管道运输高压氢气的方案总体环境效益最好。

2.2.2 对不同车辆技术的研究

郭焱等^[48]和黄伟等^[49]通过研究发现,燃料电池汽车在空气污染物的排放上具有明显优势。在程昊等^[50]与高玉冰等^[51]的研究中,燃料电池汽车的WTW能耗低于以柴油、天然气和汽油为燃料的内燃机汽车。Wang 等^[52]从能源消耗、碳排放、PM2.5、效率和材料的使用等方面对传统柴油汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车进行了分析。方海峰等^[53]选取了七款不同类别能源中型货车为研究对象,基于Gabi平台建立计算模型,并将最终的输出环境影响进行了比较分析。杨沛豪^[54]使用GREET软件对美国当前市场上的9款不同品牌不同大小的家用轿车进行了生命周期碳排放比较。Wu 等^[55]对比了氢燃料电池汽车和甲醇重整嵌入式燃料电池汽车的环境影响和经济性。丁振森等^[56]通过MATLAB建模并计算分析了燃料电池汽车和插电式混合动力汽车生命周期的能耗和排放差异。

2.2.3 其他方向的研究

除上述研究外,有很多学者在其他方向上也进行了研究。朱昊等^[57]在另外一篇文献中对燃料电池公交车生命周期的能耗和排放进行了计算和分析,使用遗传算法求解燃料电池公交车最优电源配置方案。Li 等^[58]建立了生命周期成本(life cycle cost,LCC)模型来评价交通政策、环境政策等因素对汽车生命周期成本的影响,并对中国12个城市的内燃机汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车的生命周期成本进行了研究,结果表明,纯电动汽车和燃料电池汽车在一线城市具有较强的成本竞争力,在新一线、二线及以下城市,传统汽车在LCC中仍有优势。袁飞等^[59]从生命周期的角度对燃料电池和

内燃机进行了对比研究,预测在汽车行业燃料电池将会代替内燃机。

3 存在的问题与建议

目前国内外对燃料电池汽车生命周期的分析大多集中在对其生命周期能耗、二氧化碳和有害物质排放上,对其成本的分析相对较少。另外,当前许多学者使用生命周期分析方法研究了不同制氢方案对燃料电池汽车的成本和环境影响,而燃料电池系统、动力电池系统等能量源系统核心部件生命周期成本、能耗、环境影响的研究被忽视。再者,当考虑燃料电池、动力电池以及氢能生命周期的成本、能耗、环境效益后,燃料电池汽车的能量源系统该如何配置,能量管理策略该如何制定,均有待回答。

生命周期分析方法的优点相当明显,但其在国内的使用上还存在着一些需要解决的问题。在国内的燃料电池汽车生命周期研究中,很多研究的数据背景都是基于国外数据库的,由于国与国之间的差异,很有可能对研究结果产生影响,因此,需要针对我国的能源与环境情况,建立适合中国的数据库,才能使研究结果更为准确。

4 结论与展望

在新能源汽车的发展中,对燃料电池汽车进行生命周期分析是必要的,定量分析燃料电池汽车各个阶段的能耗与排放等指标可为与燃料电池汽车相关的政策或战略的制定提供参考。本文综述了燃料电池汽车的国内外生命周期评价现状,并针对我国燃料电池汽车生命周期分析中存在的问题与挑战提出建议:1)国内外对燃料电池汽车生命周期成本的分析相对较少,应该加强该方面的研究;2)重视能量源系统核心部件生命周期成本、能耗、环境影响的研究;3)今后需要重点加强关于燃料电池汽车的能量源系统该如何配置,能量管理策略如何制定方面的研究。最后展望了将来燃料电池汽车生命周期评价的发展方向,指出需要针对我国的能源与环境情况,建立适合中国的数据库,才能使研究结果更为准确。

目前我们正处在以清洁低碳为导向的新一轮

能源变革中。中国是世界上能源利用效率提升最快的国家,要在2060年前实现碳中和^[60],必须构建高效清洁的能源体系。发展车用新能源,寻找现有传统燃料的替代品,对于迈向环境友好型发展意义非凡。此外,针对复杂的面向生命周期的燃料电池汽车能量管理问题,如何基于现有研究水平提高和完善能量管理算法的优化性能和理论体系,是当前能量管理控制发展亟需解决的重要挑战。

参 考 文 献

- [1] 武小花, 邹佩佩, 傅家豪, 等. 燃料电池电动汽车动力系统能量管理策略研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 89-96.
- [2] 吴征, 刘金周. 地方氢燃料电池汽车产业发展经验分析[J]. 汽车文摘, 2019(12): 1-4.
- [3] 杨焯. 基于 GREET 的汽车代用燃料生命周期评价[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [4] 侯萍, 王洪涛, 朱永光, 等. 中国资源能源稀缺度因子及其在生命周期评价中的应用[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1572-1579.
- [5] CHEN G Q, CHEN Z M. Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: A 135-sector inventory and input-output embodiment[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 15(11): 3647-3732.
- [6] 徐建全. 生命周期评价(LCA)及其在汽车上的应用[J]. 机电技术, 2011, 34(5): 143-146.
- [7] MIOTTI M, HOFER J, BAUER C. Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22: 94-110.
- [8] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446-455.
- [9] International Standard Organisation(ISO). ISO14040 Environmental management-life cycle assessment: principles and framework[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [10] International Standard Organisation(ISO). ISO14044 Environmental management-life cycle assessment: requirements and guidelines[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [11] 环境管理-生命周期评价-原则与框架:GB/T 24040—2008[S].2008.
- [12] 环境管理-生命周期评价-要求与指南:GB/T 24044-2008[S].2008.
- [13] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL]. [2022-08-12].(2021-05-10). http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发《工业绿色发展规划(2016-2020年)》的通知[EB/OL]. [2022-05-21]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2020/art_4290757b7785460795cc49f4fc3ecba4.html.
- [15] VERMA S, DWIVEDI G, VERMA P. Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review[M]. Materials Today: Proceedings, 2021.
- [16] 陈舒婷, 龚卓炫. 生命周期评价研究方法与发展[J]. 广东化工, 2018, 45(22): 61-62.
- [17] BABU B V. Life cycle inventory analysis (LCIA)[D].Glasgow: Galgotias University, 2006.
- [18] 刘凯辉, 徐建全. 纯电动汽车驱动电机全生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3456-3463.
- [19] 韩立波, 刘莉, 张会娜. 生命周期评价在汽车能源与排放评估中的应用[J]. 交通节能与环保, 2012, 8(4): 26-32.
- [20] GREET. Official website[EB/OL]. [2022-08-12]. <https://greet.es.anl.gov/>.
- [21] GABI.Official website[EB/OL]. [2022-08-14]. <http://www.gabisoftware.com/index/>.
- [22] SIMAPRO.Official website[EB/OL]. [2022-08-14]. <https://simapro.com/>.
- [23] BARTOLOZZI I, RIZZI F, FREY M. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy[J]. Applied Energy, 2013: 101.
- [24] AHMADI P, KJEANG E. Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian provinces[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(38):250-262.
- [25] LIU X Y, REDDI K, ELGOWAINY A, et al. Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(1): 972-983.
- [26] WANG Q, XUE M Q, LIN B L, 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: 123061.1–123061.11.
- [27] VALENTE A, IRIBARREN D, CANDELARESI D, et al. Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(47): 25758–25765.
- [28] KHZOUZ M, GKANAS E I, JIA S, et al. Life cycle costing analysis: Tools and applications for determining hydrogen production cost for fuel cell vehicle technology[J]. *Energies*, 2020, 13(15):3783–3795.
- [29] IANNUZZI L, HILBERT J A, SILVA LORA E E. Life Cycle Assessment (LCA) for use on renewable sourced hydrogen fuel cell buses vs diesel engines buses in the city of Rosario, Argentina[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, , 46 (57) :29694–29705 .
- [30] HE X Y, WANG F, WALLINGTON T J, et al. Well-to-wheels emissions, costs, and feedstock potentials for light-duty hydrogen fuel cell vehicles in China in 2017 and 2030[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021: 137–146.
- [31] BAPTISTA P, RIBAU J, BRAVO J, et al. Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9):4683–4691.
- [32] LEE D Y, ELGOWAINY A, KOTZ A, et al. Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks[J]. *Journal of Power Sources*, 2018: 393.
- [33] CANDELARESI D, VALENTE A, IRIBARREN D, et al. Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (72) : 35961–35973.
- [34] ROCCO, MATTEO V, CASALEGN R, et al. Modelling road transport technologies in future scenarios: Theoretical comparison and application of well-to-wheels and input-output analyses[J]. *Applied Energy*, 2018: 232 (15):583–597.
- [35] ALLY J, PRYOR T. Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuel cell bus systems: An Australian case study[J]. *Energy Policy*, 2016: 285–294.
- [36] WEI Q S, ZHANG X, SOO O B. The effect of driving cycles and H₂ production pathways on the lifecycle analysis of hydrogen fuel cell vehicle: A case study in South Korea[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (10) :7622–7633.
- [37] USAI L, HUNG C R, VÁSQUEZ F, et al. Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280(2):125086.1–125086.12.
- [38] EVANGELISTI S, TAGLIAFERRI C, DAN J L B, et al. Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,142: 4339–4355.
- [39] SEAN B, WALKER, FOWLER M, et al. Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2015,4: 62–73.
- [40] HWANG J J. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013,19: 220–229.
- [41] YANG Z Y, WANG B W, JIAO K. Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China[J]. *Energy*, 2020, 198: 117365.1–117365.9.
- [42] 陈轶嵩, 丁振森, 王文君, 等. 氢燃料电池汽车不同制氢方案的全生命周期评价及情景模拟研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(5): 172 – 180.
- [43] 朱昊, 余卓平. 基于全生命周期评价的燃料电池汽车氢能路径分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(S1): 138 – 143.
- [44] REN L, ZHOU S, OU X M. Life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions of hydrogen supply chains for fuel-cell vehicles in China[J]. *Energy*, 2020: 118482.1–118482.21.
- [45] 孔德洋, 唐闻翀, 柳文灿, 等. 燃料电池汽车能耗、排放与经济性评估[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4): 498 – 503.
- [46] 林婷, 吴焯, 何晓旖, 等. 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO₂ 排放[J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3946 – 3953.
- [47] XU W X, ZHANG H, MA J, et al. Life cycle environment evaluation of hydrogen source system for fuel cell vehicles[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 252(3):32055–32068.
- [48] 郭焱, 孙田. 汽车用代用燃料 CO₂ 和有害排放生命周期分析[J]. *小型内燃机与摩托车*, 2012, 41(2): 27 – 29.
- [49] 黄伟, 张欣. 车用新能源燃料的选择及生命周期评价[J]. *环境工程*, 2015, 33(S1): 992 – 996.

[50] 程昊, 付子航. 中国汽车燃料全生命周期能耗和排放研究[J]. 国际石油经济, 2017, 25(12): 82 – 89.

[51] 高玉冰, 毛显强, 杨舒茜, 等. 基于 LCA 的新能源轿车节能减排效果分析与评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1504 – 1512.

[52] WANG D W, ZAMEL N, JIAO K, et al. Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China[J]. Energy, 2013: 35–41.

[53] 方海峰, 马金秋, 陈轶嵩. 各种替代能源中型货车生命周期环境排放分析[J]. 汽车实用技术, 2019(12): 27 – 30.

[54] 杨沛豪. 基于成本角度的能源供给与产业链发展研究——以氢燃料电池汽车产业链为例[J]. 今日国土, 2021(2): 26 – 30.

[55] WU W, TING P C, KARTHICKEYAN V, et al. Comparative life cycle assessment and economic analysis of methanol/hydrogen production processes for fuel cell vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2021: 126959.1–

126959.15.

[56] 丁振森, 陈轶嵩, 刘佳慧. 燃料电池汽车与插电式混合动力汽车生命周期对比评价研究 [C]//《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(上册). 北京市:《环境工程》编辑部, 2018.

[57] 朱昊, 余卓平. 燃料电池公交车电源配置生命周期评价优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 1416 – 1420.

[58] LI J J, LIANG M, CHENG W J, et al. Life cycle cost of conventional, battery electric, and fuel cell electric vehicles considering traffic and environmental policies in China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(14): 9553 – 9566.

[59] 袁飞, 施扬, 顾凯凯. 燃料电池和内燃机对比研究[J]. 科学技术创新, 2020(17): 1 – 6.

[60] 吴晓青. 大力发展绿色金融和气候金融 力争实现 2060 碳中和国际承诺[J]. 中国科技产业, 2021(3): 34 – 35.

(编校:叶超)

(上接第 47 页)

[19] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 23 – 38.

[20] 李宇, 陈丹, 李敏, 等. 响应面试验优化鲜切胭脂

萝卜复合护色配方[J]. 食品工业, 2017, 38(6): 88 – 91.

[21] PATEL G B, SHAH K R, SHINDHAL T, et al. Process parameter studies by central composite design of response surface methodology for lipase activity of newly obtained actinomycete[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23(5): 101724.

(编校:叶超)