

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2023.12.019

氢燃料电池重型商用车全生命周期评价研究及不确定性分析*

张 硕¹, 蔡 旭¹, 张春梅¹, 兰利波¹, 张淑祺², 陈轶嵩¹

(1. 长安大学汽车学院, 西安 710064; 2. 长安大学长安都柏林国际交通学院, 西安 710064)

[摘要] 氢燃料电池重型商用车(FCHCV)是应对能源安全和温室效应等问题的理想解决方案之一,但目前在关键参数情景模拟下的FCHCV全生命周期能耗和排放尚不清晰。以国内某款FCHCV为评价对象,基于全生命周期评价方法,重点分析煤气化、甲烷重整、混合电力电解水和光伏电解水制氢4种氢能路径下FCHCV全生命周期能耗和排放结果,并对燃料电池电堆衰退、百公里氢耗量和车辆寿命里程进行不确定性分析。研究发现,基于光伏电解水制氢的FCHCV全生命周期能耗和碳排放最低。提高燃油经济性和车辆寿命里程,延缓燃料电池电堆衰退,可有效改善FCHCV全生命周期环境影响。

关键词: 氢燃料电池; 重型商用车; 全生命周期评价; 燃料电池衰退; 不确定性分析

Life Cycle Assessment Research and Uncertainty Analysis of Hydrogen Fuel Cell Heavy-Duty Commercial Vehicles

Zhang Shuo¹, Cai Xu¹, Zhang Chunmei¹, Lan Libo¹, Zhang Xuqi² & Chen Yisong¹

1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064;

2. Chang'an Dublin International College of Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064

[Abstract] The hydrogen fuel cell heavy-duty commercial vehicle (FCHCV) is one of the ideal solutions to address energy security and greenhouse gas emissions. However, the full life cycle energy consumption and emissions of FCHCVs under key parameter scenario simulations are still unclear. This study evaluates a domestic FCHCV based on the life cycle assessment method, with a focus on analyzing the life cycle energy consumption and emissions results of FCHCV under four hydrogen production paths, which are coal gasification, methane reforming, mixed power electrolysis, and photovoltaic electrolysis. Uncertainty analyses are conducted on the fuel cell stack degradation, hydrogen consumption per hundred kilometers, and vehicle lifespan. The results show that the FCHCV using photovoltaic electrolysis has the lowest life cycle energy consumption and carbon emissions. Improving fuel economy and vehicle lifespan, and delaying fuel cell stack degradation can effectively improve the environmental impact of FCHCV during the life cycle.

Keywords: hydrogen fuel cell; heavy-duty commercial vehicles; life cycle assessment; fuel cell degradation; uncertainty analysis

* 国家重点研发计划项目(2021YFE0192900)、陕西省重点研发计划项目(2021LLRH-04-04-02)、陕西省重点产业创新链项目(2020ZDL-GY16-08)、陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(2021KJXX-15)、一汽-大众中华环境保护基金会汽车环保创新引领计划项目(220222220522)和长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102223207)资助。

原稿收到日期为 2023 年 05 月 05 日,修改稿收到日期为 2023 年 06 月 15 日。

通信作者:陈轶嵩,教授,博士,E-mail:chenyisong_1988@163.com。

前言

国家统计局最新数据表明,2022年中国石油消耗对外依存度达到70.9%,能源安全问题成为当今亟需解决的重要问题。发展氢燃料电池汽车是助力我国实现双碳目标的重要路径之一,同时,结合燃料电池技术特点以及我国本土特点,诸多学者认为重型商用车是目前氢燃料电池汽车主流的应用场景^[1-4]。氢燃料电池重型商用车(fuel cell heavy-duty commercial vehicles, FCHCV)在运行使用阶段是氢气和氧气的电化学反应,产物只有对环境友好的水^[5],但是考虑FCHCV的材料获取、制造过程、氢能的来源以及报废回收,FCHCV是否环境友好是值得研究的重要课题。

关于氢燃料电池汽车(fuel cell vehicles, FCV)全生命周期评价方面,Kannangara等^[6]和Bauer等^[7]为传统燃油汽车(internal combustion engine vehicles, ICEV)、纯电动汽车(battery electrical vehicles, BEV)和FCV轻型汽车开发了全生命周期评价框架。Evangelisti等^[8]和Simons等^[9]对比了FCV与ICEV和BEV的全生命周期环境影响,并重点对燃料电池功率密度、储氢罐类型和双极板类型等进行了敏感性分析。Ahmadi等^[10-12]和Raeesi等^[13]评估了燃料电池衰退对FCV燃油消耗量的影响,并研究了燃料电池衰退、车辆工况以及制动能量回收对FCV全生命周期碳排放的影响。Chen等^[14-15]量化预测对比我国2020、2030和2035年FCV的全生命周期能耗、碳排放和酸化潜值。Liu等^[16]评估了氢能碳排放因子和FCV渗透率的变化对我国道路车辆全生命周期碳排放的影响。

国内外学者关于商用车的全生命周期评价研究,Yeow等^[17]研究发现基于甲烷重整制氢的氢燃料电池中型城市配送商用车(总质量3.5~7 t)在满足续航里程的条件下降低23%~30%的碳排放;Booto等^[18]在考虑到使用的能源类型、能源来源和生产途径时,研究发现FCHCV可减少48%的碳排放(即约430 g·km⁻¹);Lee等^[19]根据商用车重量等级和类型的不同,研究发现基于气态氢的FCHCV从油井到车轮(well-to-wheel, WTW)的排放中CO₂、VOC、CO、NO_x、PM10和PM2.5分别减少20%~45%、37%~65%、49%~77%、62%~83%、19%~43%和27%~44%。Alonso-Villar等^[20]利用GREET计算了包含FCHCV在内的

10种重型商用车动力系统的全生命周期排放和总拥有成本,综合来看,氢气和压缩天然气应用于重型商用车具有一定的优势。Gustafsson等^[21]量化评估了BEV、FCV和ICEV重型商用车能源载体WTW的碳排放,分析了生产中使用电力的碳强度影响,结果表明,从WTW的角度来看,高电力依赖的能源载体并不一定比柴油更好。涂小岳等^[22-23]基于全生命周期评价理论建立了液化天然气(liquefied natural gas, LNG)商用车与柴油重型商用车(diesel heavy-duty commercial vehicles, DHCV)的全生命周期能耗和环境排放差异评价模型。彭飞等^[24]对某款商用车铝合金轮辋和钢制轮辋的全生命周期环境影响进行了评价和对比分析。Zhang等^[25]比较了2020年和2040年情景下的BEV、FCHCV和DHCV的全生命周期排放,研究发现,绿色电力和绿色氢是影响不同重型商用车电气化方案下CO₂、NO_x和PM2.5全生命周期排放的最重要因素。

综上可知,国内外对重型商用车全生命周期评价有一定的研究成果。但是,当前的研究主要聚焦在DHCV和LNG重型商用车,对FCHCV的研究相对较少,同时国外的数据清单不符合我国的产业发展实际。针对我国本土化的FCHCV的全生命周期评价研究较少,FCHCV的全生命周期材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放的结果尚不清晰。因此,本文构建FCHCV全生命周期“材料-能源-排放”评价模型,量化计算FCHCV的全生命周期能耗和排放,并选取燃料电池衰退、百公里氢耗量和车辆寿命里程作为关键参数,研究关键参数的不确定性对于FCHCV全生命周期的环境影响。

1 评价对象和方法

1.1 评价对象

本文选取国内某款氢燃料电池重型商用车为研究对象,车辆的基本参数见表1。由于氢燃料电池重型商用车与其他动力类型的重型商用车的差异主要在于整车质量,因此车辆的悬挂车厢本文暂未考虑,只考虑了整车部分在原材料获取阶段和制造装配阶段中的环境影响。

1.2 系统边界和功能单位

FCHCV的全生命周期包括原材料获取阶段、制造装配阶段、运行使用阶段和报废回收阶段,系统边界如图1所示。系统边界输入为硬煤、原油和天然

表1 车辆的基本参数

参数	数值
车身长度×宽度×高度/m	7.06×2.55×3.98
整车质量/t	9
牵引总质量/t	40
最高车速/(km·h ⁻¹)	110
燃料电池额定功率/kW	162
锂电池容量/(kW·h)	117.1
电动机峰值功率/kW	360
燃料电池寿命/h	30 000
百公里氢能消耗量/(kg·(100 km) ⁻¹)	14.91
低温启动温度/℃	-30

注: 14.91 kg·(100 km)⁻¹是49 t重型牵引车在C-WTVC驾驶循环下测算的百公里氢耗量^[4]。

气等化石能源,表征为化石能源消耗量(abiotic depletion potential (fossil), ADP(f),单位MJ),以及钢、铝和铜等材料资源,表征为材料资源消耗量(abiotic depletion potential (elements), ADP(e),以Sb-Eq计,单位kg),其输出为表征碳排放的全球变

暖潜值(global warming potential, GWP,以CO₂-Eq计,单位kg),以及反映污染物的酸化潜值(acidification potential, AP,以SO₂-Eq计,单位kg)、水体富营养化潜值(eutrophication potential, EP,以Phosphate-Eq计,单位kg)、光化学烟雾潜值(photochemical ozone creation potential, POCP,以Ethene-Eq计,单位kg)和人体健康损害潜值(human toxicity potential, HTP,以DCB-Eq计,单位kg)。原材料获取阶段主要是搜集FCHCV燃料电池堆栈、锂电池、电堆辅电系统(balance of plant, BOP)、电机和电控、储氢罐、车身和底盘等7大部件的钢、铁、铝等金属材料以及四氟乙烯、碳纤维和塑料等非金属材料清单,制造装配阶段主要考虑7大部件加工制造过程的工艺对应的电能和热能的消耗以及整车集成过程的流水工艺对应的能耗和排放,运行使用阶段主要考虑FCHCV的氢能的消耗量以及氢能上游来源对应的能耗和排放,报废回收阶段主要考虑金属的回收和废渣的焚烧和填埋。

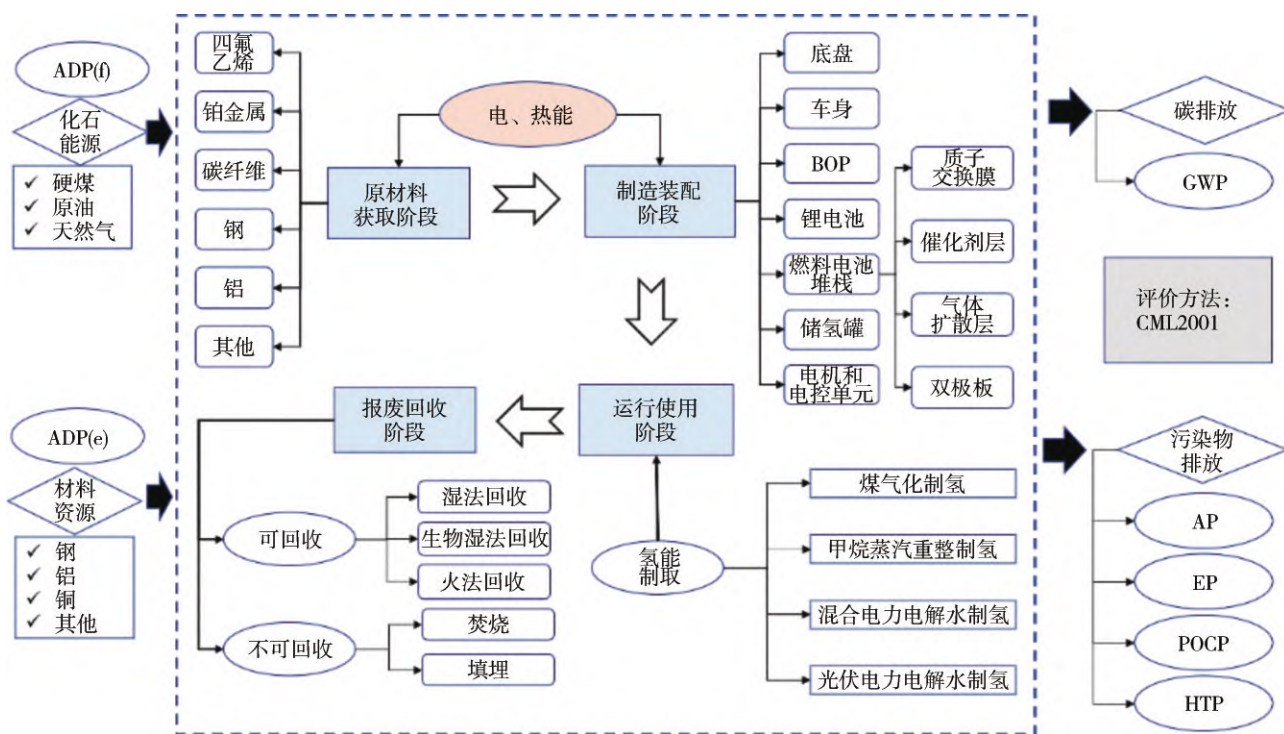


图1 系统边界图

功能单位是指经过量化的产品功能或绩效特征^[26]。《节能与新能源汽车技术路线图2.0》规划氢燃料电池商用车到2025年的整车寿命为40万km,本文假设FCHCV在中国工况运行40万km。

2 FCHCV全生命周期评价模型

FCHCV的全生命周期评价模型是在本课题组

前期研究的基础上构建的^[15-16,26-29],包括材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放评价模型。

FCHCV的全生命周期评价模型见式(1)。

$$\begin{cases} F_{LCA} = F_{mat} + F_{man} + F_{use} + F_{rec} \\ E_{LCA} = E_{mat} + E_{man} + E_{use} + E_{rec} \\ G_{LCA} = G_{mat} + G_{man} + G_{use} + G_{rec} \\ P_{LCA} = P_{mat} + P_{man} + P_{use} + P_{rec} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{LCA} 、 E_{LCA} 、 G_{LCA} 和 P_{LCA} 分别为FCHCV全生命周期的材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放的总量; F_{mat} 、 E_{mat} 、 G_{mat} 和 P_{mat} 分别为原材料获取阶段的材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放量; F_{man} 、 E_{man} 、 G_{man} 和 P_{man} 分别为制造装配阶段的材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放量; F_{use} 、 E_{use} 、 G_{use} 和 P_{use} 分别为运行使用阶段的材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放量; F_{rec} 、 E_{rec} 、 G_{rec} 和 P_{rec} 分别为报废回收阶段的材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放量。

原材料获取阶段全生命周期矩阵见式(2)。

$$\begin{cases} F_{mat} = \sum_k [(m_{ij})_{k \times n} \cdot (f_{0ij})_{n \times t}] \\ E_{mat} = \sum_k [(m_{ij})_{k \times n} \cdot (e_{0ij})_{n \times u}] \\ G_{mat} = \sum_k [(m_{ij})_{k \times n} \cdot (g_{0ij})_{n \times 1}] \\ P_{mat} = \sum_k [(m_{ij})_{k \times n} \cdot (p_{0ij})_{n \times s}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_{ij} 表示汽车第*i*个组成部件所包含的第*j*种车用材料的质量(kg);*k*表示汽车组成部分数量;*n*表示车用材料的种类数; f_{0ij} 表示生产单位第*i*种车用材料所需的第*j*种材料资源量(kg·kg⁻¹);*t*表示材料资源的种类数; e_{0ij} 表示生产单位第*i*种车用材料所需要的第*j*种初级能源量(MJ·kg⁻¹);*u*表示初级能源的种类数; g_{0ij} 表示生产单位第*i*种车用材料碳排放当量(kg·kg⁻¹); p_{0ij} 表示生产单位第*i*种车用材料所排放的第*j*种污染物排放当量(kg·kg⁻¹);*s*表示污染物排放种类数。

制造装配阶段全生命周期矩阵见式(3)。

$$\begin{cases} F_{man} = \sum_k [(e_{2ij})_{k \times r} \cdot (f_{1ij})_{r \times t}] \\ E_{man} = \sum_k [(e_{2ij})_{k \times r} \cdot (e_{1ij})_{r \times u}] \\ G_{man} = \sum_k [(e_{2ij})_{k \times r} \cdot (g_{1ij})_{r \times 1}] \\ P_{man} = \sum_k [(e_{2ij})_{k \times r} \cdot (p_{1ij})_{r \times s}] \end{cases} \quad (3)$$

式中: e_{2ij} 表示汽车第*i*个组成部件制造过程所需的第*j*种二次能源量(MJ·kg⁻¹);*r*表示二次能源的种类数;

f_{1ij} 表示生产单位第*i*种二次能源量所需要的第*j*种材料资源量(kg·MJ⁻¹); e_{1ij} 表示生产单位第*i*种二次能源所需要的第*j*种初级能源量(MJ·MJ⁻¹); g_{1ij} 表示生产单位第*i*种二次能源的碳排放当量(kg·MJ⁻¹); p_{1ij} 表示生产单位第*i*种二次能源所排放的第*j*种污染物排放当量(kg·MJ⁻¹)。

运行使用阶段全生命周期矩阵见式(4)。

$$\begin{cases} F_{use} = \frac{Q_1 \times L}{100\eta} \cdot (f_{1ij})_{1 \times t} \\ E_{use} = \frac{Q_1 \times L}{100\eta} \cdot (e_{1ij})_{1 \times u} \\ G_{use} = \frac{Q_1 \times L}{100\eta} \cdot (g_{1ij})_{1 \times s} \\ P_{use} = \frac{Q_1 \times L}{100\eta} \cdot (p_{1ij})_{1 \times s} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q_1 表示汽车百公里氢耗量[kg·(100 km)⁻¹];*L*表示全生命周期的行驶里程(km); η 表示汽车的氢气加注效率; f_{1ij} 表示生产单位氢能所需要的第*j*种材料资源量(kg·MJ⁻¹); e_{1ij} 表示生产单位氢能所需要的第*j*种初级能源量(MJ·MJ⁻¹); g_{1ij} 表示生产单位氢能的碳排放当量(kg·MJ⁻¹); p_{1ij} 表示生产单位氢能所排放的第*j*种污染物排放当量(kg·MJ⁻¹)。

报废回收阶段全生命周期矩阵见式(5)。

$$\begin{cases} F_{rec} = \sum_k [(m_{ij} \cdot \xi_j)_{k \times 5} \cdot [(e_{3ij})_{5 \times r} \cdot (f_{1ij})_{r \times t} - (f_{0ij})_{5 \times t}]] \\ E_{rec} = \sum_k [(m_{ij} \cdot \xi_j)_{k \times 5} \cdot [(e_{3ij})_{5 \times r} \cdot (e_{1ij})_{r \times u} - (e_{0ij})_{5 \times u}]] \\ G_{rec} = \sum_k [(m_{ij} \cdot \xi_j)_{k \times 5} \cdot [(e_{3ij})_{5 \times r} \cdot (g_{1ij})_{r \times 1} - (e_{0ij})_{5 \times 1}]] \\ P_{rec} = \sum_k [(m_{ij} \cdot \xi_j)_{k \times 5} \cdot [(e_{3ij})_{5 \times r} \cdot (p_{1ij})_{r \times s} - (e_{0ij})_{5 \times s}]] \end{cases} \quad (5)$$

式中:报废回收阶段仅考虑了钢、铸铁、铝、铜金属和橡胶的回收,回收率分别为 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ξ_4 和 ξ_5 ; e_{3ij} 表示回收单位金属*i*过程中所需的第*j*种二次能源量(MJ·kg⁻¹)。

3 数据清单

3.1 原材料获取阶段

原材料获取阶段是指将材料资源加工转化为车用原材料的过程,车用原材料可以加工为汽车零部件。本文将FCHCV划分为燃料电池堆栈、储氢罐、锂电池、电机与电控、BOP、车身和底盘7部分。根据实地调研,具体清单见表2,FCHCV原材料获取阶段的GaBi模型如图2所示。

表2 FCHCV数据清单^[8-9,15,27-29]

锂电池		车身		底盘		质子交换膜		储氢罐		BOP	
材料	数量	材料	数量	材料	数量	材料	数量	材料	数量	材料	数量
磷酸铁锂	128.70 kg	钢	1 861.08 kg	钢	3 555.36 kg	异丙醇	2.27 kg	碳纤维	410.40 kg	钢	167.67 kg
聚氯乙烯	40.95 kg	铝	21.67 kg	铸铁	272.16 kg	水	2.27 kg	环氧树脂	164.16 kg	锻造铝	9.72 kg
铝基体	239.85 kg	镁	2.71 kg	铝	43.20 kg	电能	3.48 MJ	泡沫	27.36 kg	乙烯	19.44 kg
石墨	58.50 kg	玻璃纤维	178.79 kg	铜	99.36 kg	热能	2.15 MJ	玻璃纤维	27.36 kg	橡胶	7.29 kg
聚丙烯	35.10 kg	塑料	471.37 kg	塑料	142.56 kg	硫酸	1.30 kg	铝基体	6.84 kg	其他	2.43 kg
聚乙烯	70.20 kg	铜	51.47 kg	橡胶	181.44 kg	四氟乙烯	1.73 kg	高强度 聚乙烯	47.88 kg	高密度 聚乙烯	36.45 kg
其他	11.70 kg	其他	121.91 kg	其他	25.92 kg	聚乙烯	4.15 kg				

催化层		电机和电控		气体扩散层		双极板		端板		冷却垫片		
材料	数量	材料	数量	材料	数量	材料	数量	材料	数量	材料	数量	
Pt/C ¹	0.23 kg	铜	14.40 kg	石墨	16.82 kg	石墨	163.67 kg	铝	24.68 kg	橡胶	42.59 kg	
碳黑	0.35 kg	钢	71.10 kg	碳纤维 ³	302.70 kg	电能	5 143.82 MJ					
电能	3437.08 MJ	钎铁硼 ²	0.90 kg	电能	1204.06 MJ	醋酸 乙烯酯	70.14 kg					
水	0.23 kg	铝合金	3.60 kg	聚四氟 乙烯 ⁴	33.63 kg			钢	24.68 kg	电能	5.54 MJ	
甲醇	0.23 kg											
Nafion DE-521	2.80 kg											

注:1. 生产1 g Pt/C需要消耗0.6 MJ的电能和0.09 MJ的热能^[8];2. 生产1 kg钎铁硼需要消耗0.697 kg的铁和3.37 kg的硬煤;3. 生产0.9 kg碳纤维需要消耗0.9 kg的聚丙烯腈、88.7 MJ热能和235.87 MJ的电能^[8];4. 聚四氟乙烯的清单在GaBi数据库中无,用高强度聚乙烯代替。

原材料获取阶段
Process phase: raw materials acquisition
The names of the basic processors are shown.

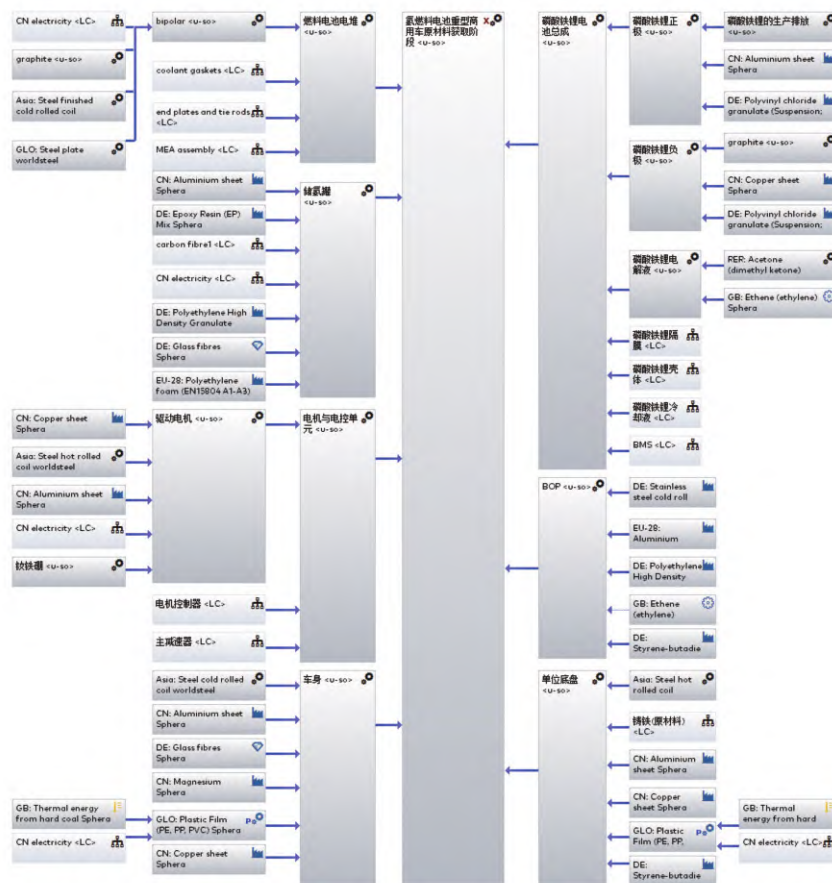


图2 FCHCV原材料获取阶段的GaBi模型

3.2 制造装配阶段

制造装配阶段是将车用材料变成各种汽车零部件的过程。该阶段的能源消耗和环境影响主要来源于汽车7大零部件制造和装配工艺所消耗的电能和热能,以及部分材料消耗。整车主要部件的制造过程的主要能耗情况见表3,FCHCV制造装配阶段的

GaBi模型如图3所示。

表3 整车主要部件制造过程的主要能耗^[29] MJ·kg⁻¹

能耗类型	锂电池	电机和电控	燃料电池	储氢罐	BOP	车身	底盘
电能	27.00	5.28	23.60	14.15	5.70	3.43	1.39
热能	8.80	1.90		5.32			0.42



图3 FCHCV制造装配阶段的GaBi模型

FCHCV整车装配阶段能耗数据主要来自装配厂的电能和热能的消耗,主要涉及涂装、供暖、照明和焊接等工艺或设备。根据文献,设定各阶段的能源需求,量化整理得到车辆整车装配阶段的电能消耗和热能消耗分别为6.86和2.03 MJ·kg⁻¹[29]。

3.3 运行使用阶段

FCHCV运行使用阶段主要考虑氢气的消耗所

带来的环境影响。不同的氢能路径会产生不同的环境影响和能源消耗,通过文献调研,搜集整理了不同氢能路径下的综合能耗、碳排放和污染物排放量,其中考虑了氢气的运输、加注和耗散等因素对于氢燃料电池重型商用车全生命周期各指标的影响,不同氢能路径的生命周期能耗、碳排放和污染物排放量见表4。

表4 4种氢能路径下1 kg氢气的生命周期能耗、碳排放和污染物排放量^[14,26-27]

路径	ADP(f)/MJ	GWP/kg	AP/kg	EP/kg	POCP/kg	HTP/kg
煤气化+高压气氢	3.31E+02	2.75E+01	1.66E-02	8.26E-04	4.78E-03	8.30E-03
甲烷重整+高压气氢	3.98E+02	2.03E+01	2.46E-02	1.55E-03	4.98E-03	1.20E-02
混合电力电解水+高压气氢	4.09E+02	3.47E+01	7.66E-02	9.75E-03	8.28E-03	3.30E-02
光伏电解水+高压气氢	1.52E+02	3.21E+00	1.26E-02	9.26E-04	4.13E-03	1.00E-04

3.4 报废回收阶段

FCHCV的报废回收阶段主要考虑车辆报废之后拆解、粉碎等工艺对环境的负效益以及关键金属材料回收后循环利用对环境的正效益。当前主流的报废回收工艺包含火法、湿法、生物湿法和直接回收

等回收方式^[30-32]。由于FCHCV处于示范运营阶段,国内尚未出现大规模报废的FCHCV。因此,本文FCHCV的材料回收重点借鉴传统燃油汽车的报废流程^[33],材料回收的能耗和回收效率见表5,FCHCV报废回收阶段的GaBi模型如图4所示。

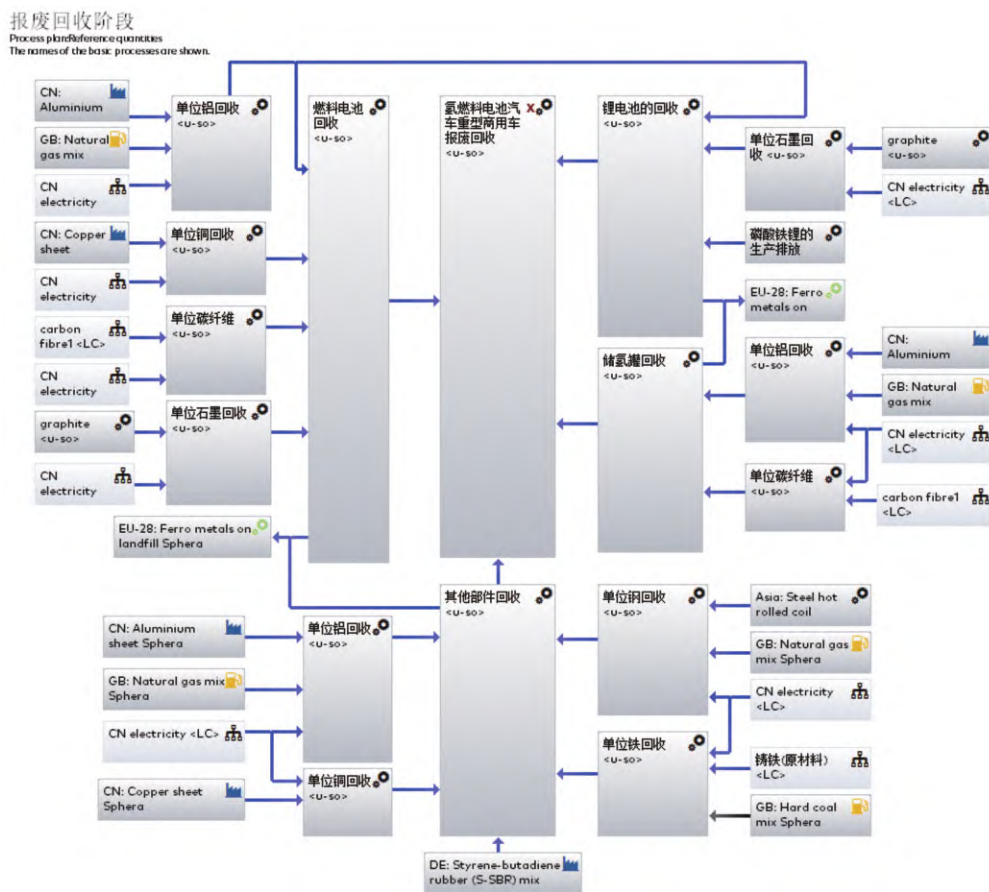


图4 FCHCV报废回收阶段的GaBi模型

表5 材料回收的能耗和回收效率

材料	预处理能耗/(kW·h)	回收效率	废渣处理
钢	4.23	75%	25%
铝	0.80	46%	54%
铁	2.24	80%	20%
铜	9.54	90%	10%
橡胶		37%	63%

4 结果与讨论

4.1 特征化结果

4.1.1 材料资源消耗评价结果

根据FCHCV全生命周期清单数据,并基于本文构建的FCHCV材料资源消耗评价模型,在GaBi中搭建数学评价模型并进行运算,得到FCHCV的全生命周期材料资源消耗量ADP(e)结果,见表6。由于运行使用阶段的材料资源消耗较少,本文未考虑此阶段的材料资源消耗量。同时,由于回收体系不全面,本文在报废回收阶段仅考虑了部分金属及非金

属材料的回收和处理。

表6 FCHCV的全生命周期材料资源消耗量ADP(e)结果

部件	原材料获取阶段	制造装配阶段	报废回收阶段	全生命周期
燃料电池堆栈	4.42E-03	1.10E-04		
锂电池	2.39E-01	2.03E-04		
储氢罐	7.84E-03	1.24E-04		
电机和电控	4.77E-02	6.12E-06		
BOP	2.32E-02	1.77E-05		
车身	1.98E-01	1.18E-04		
底盘	3.25E-01	8.43E-05		
整车装配		7.93E-04		
总计	8.45E-01	1.46E-03	-5.61E-01	2.86E-01

由表6可知,FCHCV全生命周期材料资源消耗量ADP(e)为0.286 kg,原材料获取阶段占比最大,同时报废回收阶段对材料资源的节约效益明显。由于原材料阶段占比最大,因此重点分析FCHCV各部

件的材料资源消耗,如图5所示。

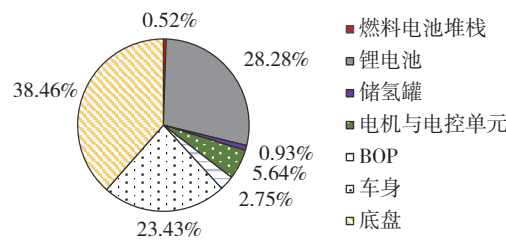


图5 FCHCV原材料获取阶段各部件ADP(e)占比

由图5可知,在原材料获取阶段各部件ADP(e)占比中,占比最大的是底盘(38.46%),其次是锂电池(28.28%),再者是车身(23.43%),其他部件的占比相对较小。因此注重底盘、锂电池和车身的轻量化有助于降低FCHCV的材料资源消耗量。

4.1.2 化石能源消耗评价结果

根据FCHCV全生命周期清单数据,并基于本文构建的FCHCV化石能源消耗评价模型,在GaBi中搭建数学评价模型并进行运算,得到基于4种氢能路径的FCHCV的全生命周期化石能源消耗ADP(f)结果,见表7,对比结果如图6所示。

表7 基于4种氢能路径的FCHCV全生命周期化石能源消耗量ADP(f)结果 MJ

不同阶段	煤气化	甲烷重整	混合电力 电解水	光伏 电解水
原材料获取阶段	7.13E+05	7.13E+05	7.13E+05	7.13E+05
制造装配阶段	2.77E+05	2.77E+05	2.77E+05	2.77E+05
运行使用阶段	1.97E+07	2.37E+07	2.44E+07	9.07E+06
报废回收阶段	-2.06E+05	-2.06E+05	-2.06E+05	-2.06E+05
全生命周期	2.05E+07	2.45E+07	2.52E+07	9.85E+06

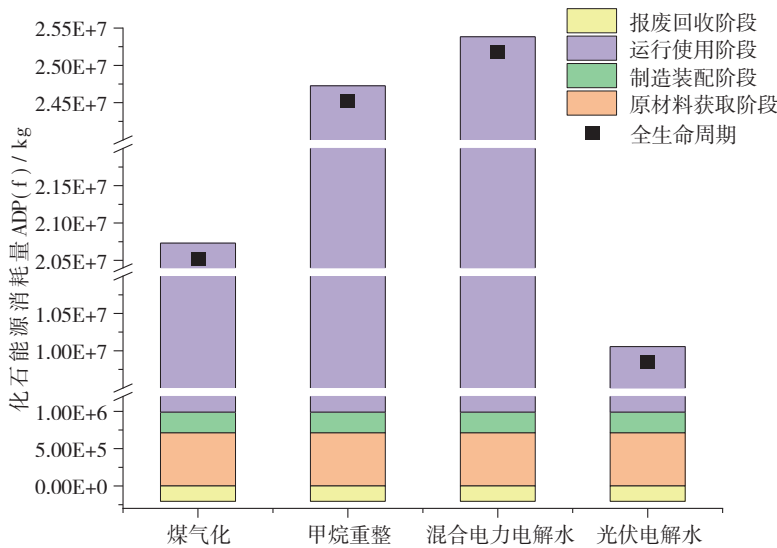


图6 基于4种不同氢能路径的FCHCV全生命周期化石能源消耗量ADP(f)结果

由表7和图6可知,基于混合电力电解水制氢的FCHCV全生命周期化石能源消耗量ADP(f)最高(2.52E+07 MJ),基于光伏电解水的ADP(f)最低(9.85E+06 MJ)。从不同阶段的差异来看,运行使用阶段的占比最大,主要原因是上游氢能产生的高能耗,同时汽车全生命周期的氢耗量大也是重要原因。因此降低FCHCV的百公里氢耗量以及利用可再生能源电解水制氢有助于降低FCHCV的全生命周期化石能源消耗量。

4.1.3 碳排放评价结果

根据FCHCV全生命周期清单数据,并基于本文构建的FCHCV碳排放评价模型,在GaBi中搭建数

学评价模型并进行运算,得到基于不同氢能路径的FCHCV的全生命周期碳排放GWP结果,见表8,对比结果如图7所示。

由表8和图7可知,基于混合电力电解水的FCHCV全生命周期碳排放最高为2.14E+06 kg,基于光伏电解水的碳排放最低为2.63E+05 kg,基于煤气化和甲烷重整处于中间。以混合电力电解水为基准,基于煤气化、甲烷重整和光伏电解水的FCHCV全生命周期碳排放分别降低20.1%、40.2%和87.7%。

4.1.4 污染物排放评价结果

根据FCHCV全生命周期清单数据,并基于本文

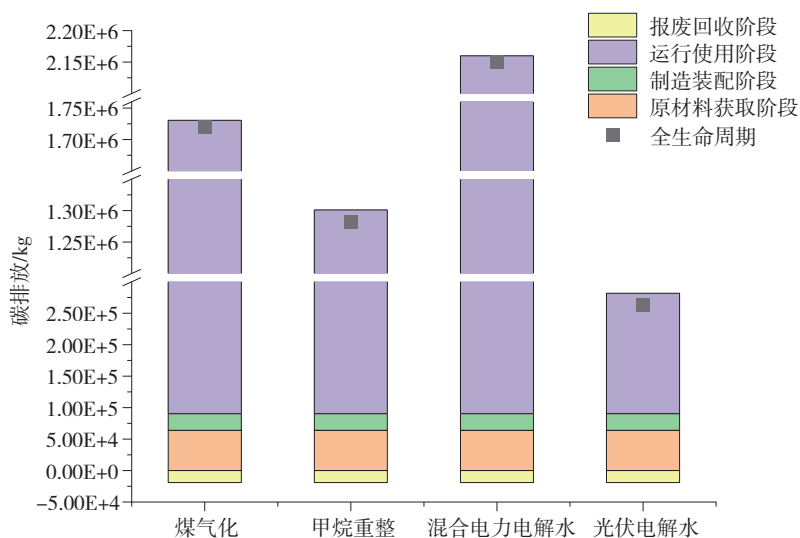


图7 基于4种不同氢能路径的FCHCV全生命周期碳排放结果

表8 基于4种氢能路径的FCHCV全生命周期
碳排放 GWP 结果 kg

不同阶段	煤气化	甲烷重整	混合电力 电解水	光伏 电解水
原材料获取阶段	6.40E+04	6.40E+04	6.40E+04	6.40E+04
制造装配阶段	2.64E+04	2.64E+04	2.64E+04	2.64E+04
运行使用阶段	1.64E+06	1.21E+06	2.07E+06	1.91E+05
报废回收阶段	-1.91E+04	-1.91E+04	-1.91E+04	-1.91E+04
全生命周期	1.71E+06	1.28E+06	2.14E+06	2.63E+05

构建的FCHCV污染物排放评价模型,在GaBi中搭建数学评价模型并进行运算,得到基于不同氢能路径的FCHCV的全生命周期污染物排放结果,见表9,对比结果如图8所示。

由表9和图8可知,基于煤气化、甲烷重整、混合电力电解水和光伏电解水4种氢能路径的FCHCV的全生命周期酸化潜值AP分别为 $1.16\text{E}+03$ 、 $1.63\text{E}+03$ 、 $4.73\text{E}+03$ 和 $9.17\text{E}+02$ kg,其全生命周期水体富营养化潜值EP分别为 $6.84\text{E}+01$ 、 $1.12\text{E}+02$ 、 $6.01\text{E}+02$ 和 $7.43\text{E}+01$ kg,其全生命周期光化学烟雾潜值POCP分别为 $2.97\text{E}+02$ 、 $3.09\text{E}+02$ 、 $5.06\text{E}+02$ 和 $2.59\text{E}+02$ kg,其全生命周期人体健康损害潜值HTP分别为 $2.21\text{E}+04$ 、 $2.23\text{E}+04$ 、 $2.36\text{E}+04$ 和 $2.16\text{E}+04$ kg。从各个阶段来看,运行使用阶段在酸化潜值AP、水体富营养化潜EP和光化学烟雾潜值POCP的全生命周期中占比较大,原材料获取阶段在人体健康损害潜值HTP占比较大。从运行使用阶段不同路径分析可知,基于混合电力电解水的汽车全生命周期AP、EP、POCP和HTP在4种路径中最

大,基于光伏电解水的汽车全生命周期AP、POCP和HTP在4种路径中最低,基于煤气化的汽车全生命周期EP在4种路径最低。

4.1.5 与现有研究对比

由于评价体系及评价方法的不同,本文重点将4种制氢路径下氢燃料电池重型商用车的全球变暖潜值与现有研究结果进行对比,具体结果见表10。

由表10可知,由于各个研究考虑的边界与范围、地域制氢碳排放因子和研究对象存在一定的差异,本研究结果在4种制氢路径下的全球变暖潜值结果与现有研究存在一定的不同,但总体上得到的结果在同一数量级,说明本研究结果具有一定的可信度。

4.2 关键参数不确定性分析

4.2.1 燃料电池衰退不确定性分析

燃料电池电堆衰退会影响燃料电池的寿命,同时会增加氢燃料电池汽车运行过程的氢能消耗量。本文在文献[13]的研究基础上,进一步研究氢燃料电池衰退对氢燃料电池重型商用车全生命周期的能耗、碳排放和污染物排放的影响。假设不同制氢路径下的氢气纯度是一致的,构建3种场景,分别为基础场景(不考虑燃料电池衰退)、情景1(考虑燃料电池在新欧洲驾驶循环工况下的衰退)和情景2(考虑燃料电池在新FTP-75驾驶循环工况下的衰退),见表11。3种情景下的氢燃料电池重型商用车全生命周期化石能源消耗结果和碳排放结果分别如图9和图10所示。

由图9可知,基于煤气化氢能路径下,燃料电池

表9 基于不同氢能路径的FCHCV的全生命周期污染物排放结果

kg

污染物排放指标	阶段	煤气化	甲烷重整	混合电力电解水	光伏电解水
AP	I	1.72E+02	1.72E+02	1.72E+02	1.72E+02
	II	5.65E+01	5.65E+01	5.65E+01	5.65E+01
	III	9.90E+02	1.47E+03	4.57E+03	7.51E+02
	IV	-6.21E+01	-6.21E+01	-6.21E+01	-6.21E+01
	总计	1.16E+03	1.63E+03	4.73E+03	9.17E+02
EP	I	1.64E+01	1.64E+01	1.64E+01	1.64E+01
	II	7.53E+00	7.53E+00	7.53E+00	7.53E+00
	III	4.93E+01	9.24E+01	5.81E+02	5.52E+01
	IV	-4.83E+00	-4.83E+00	-4.83E+00	-4.83E+00
	总计	6.84E+01	1.12E+02	6.01E+02	7.43E+01
POCP	I	1.52E+01	1.52E+01	1.52E+01	1.52E+01
	II	3.80E+00	3.80E+00	3.80E+00	3.80E+00
	III	2.85E+02	2.97E+02	4.94E+02	2.46E+02
	IV	-6.61E+00	-6.61E+00	-6.61E+00	-6.61E+00
	总计	2.97E+02	3.09E+02	5.06E+02	2.59E+02
HTP	I	2.45E+04	2.45E+04	2.45E+04	2.45E+04
	II	1.10E+03	1.10E+03	1.10E+03	1.10E+03
	III	4.95E+02	7.16E+02	1.97E+03	5.96E+00
	IV	-3.99E+03	-3.99E+03	-3.99E+03	-3.99E+03
	总计	2.21E+04	2.23E+04	2.36E+04	2.16E+04

注:I为原材料获取阶段,II为制造装配阶段,III为运行使用阶段,IV为报废回收阶段。

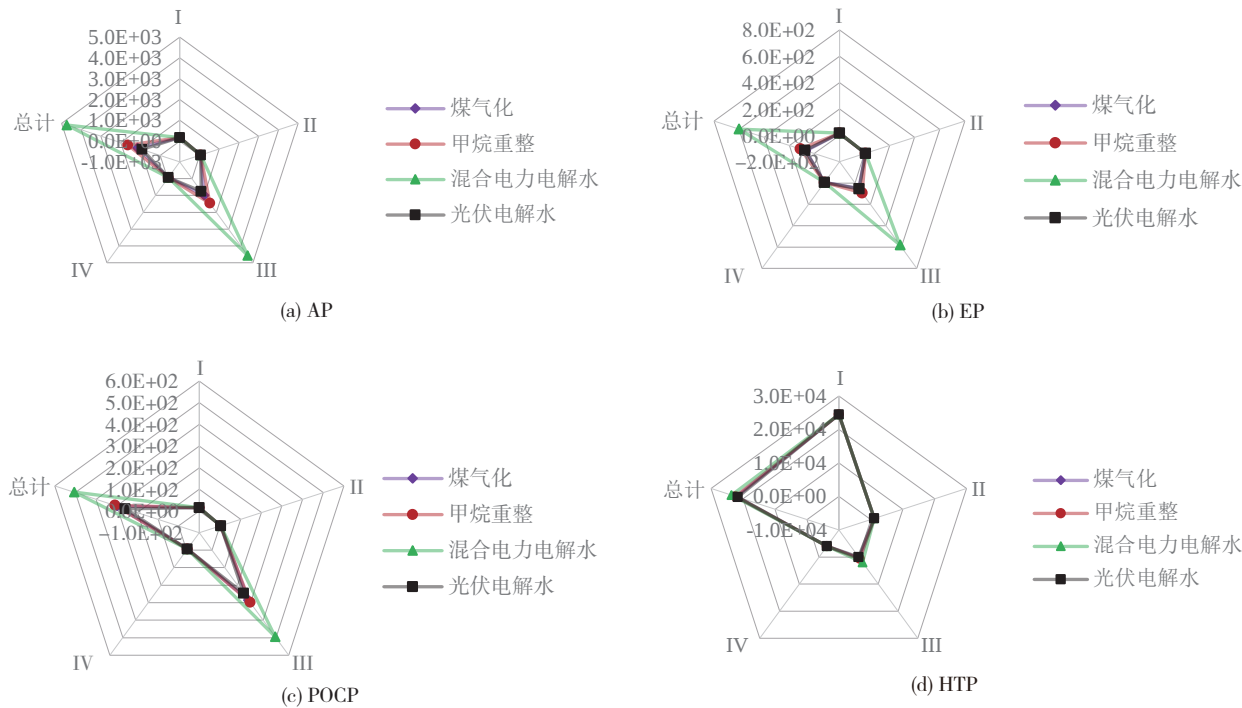


图8 基于不同氢能路径的FCHCV的全生命周期污染物排放结果

衰退情景1和情景2相比于基础情景的全生命周期化石能源消耗量增加了2.74E+06和2.83E+06 MJ;

基于甲烷重整氢能路径下,燃料电池衰退情景1和情景2相比于基础情景的全生命周期化石能源消耗

表 10 不同研究结果的全球变暖潜值对比

制氢路径	质量/t	功能单位	碳排放/kg	文献
甲烷重整	9.0	40 万 km	1.28E+06	本研究
	7.5	40 万 km	1.49E+06	[17]
	7.9	40 万 km	2.92E+06	[19]
光伏电解水	9.0	40 万 km	2.63E+05	本研究
	7.5	40 万 km	6.73E+05	[17]
混合电力电解水	9.0	40 万 km	2.14E+06	本研究
混合电力电解水+ 甲烷重整	12.0	40 万 km	1.88E+06	[18]
煤气化	9.0	40 万 km	1.71E+06	本研究
	7.0	80 万 km	1.30E+06	[25]

量增加了 3.30E+06 和 3.40E+06 MJ; 基于混合电力电解水氢能路径下, 燃料电池衰退情景 1 和情景 2 相

表 11 3 种燃料电池衰退机理情景^[13]

情景	氢能消耗 增加率/%	百公里氢耗量/ [kg·(100km) ⁻¹]	工况
基础情景	0	14.91	
情景 1 (考虑燃料电池衰退)	13.9	16.98	新欧洲 驾驶循环
情景 2 (考虑燃料电池衰退)	14.32	17.05	FTP-75 驾驶循环

比于基础情景的全生命周期化石能源消耗量增加了 3.39E+06 和 3.49E+06 MJ; 基于光伏电解水氢能路径下, 燃料电池衰退情景 1 和情景 2 相比于基础情景的全生命周期化石能源消耗量增加了 1.26E+06 和 1.30E+06 MJ。

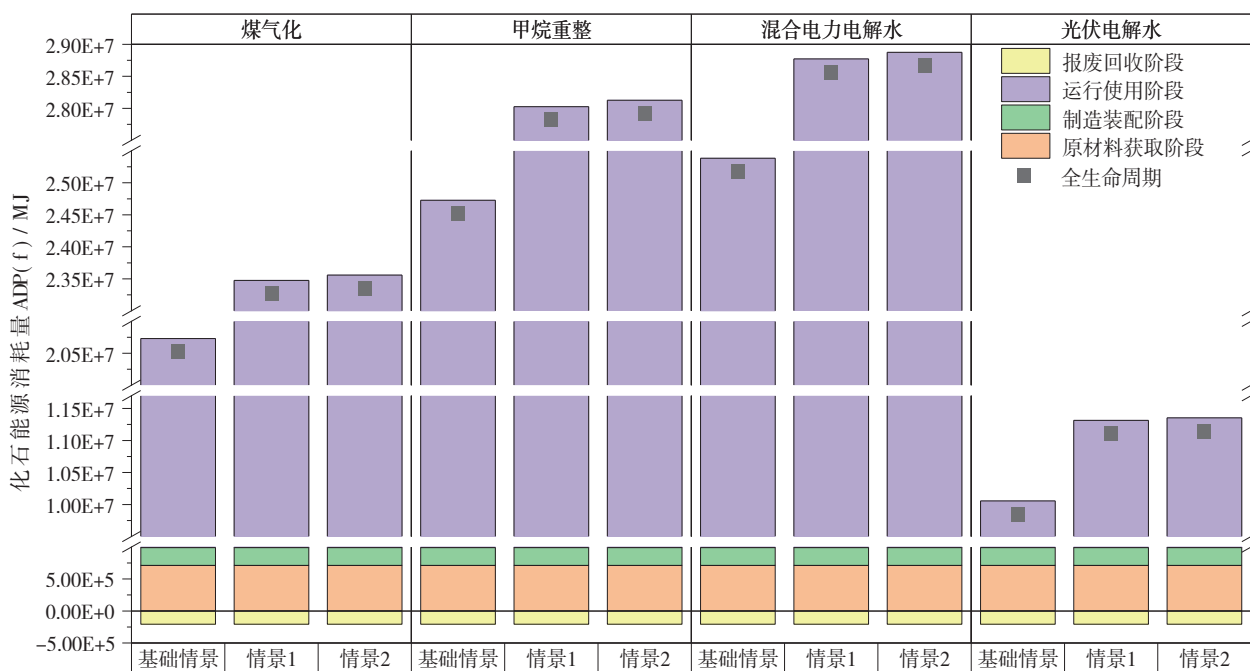


图9 3种情景下的汽车全生命周期化石能源消耗量评价结果

由图 10 可知, 基于煤气化氢能路径下, 燃料电池衰退情景 1 和情景 2 相比于基础情景的全生命周期碳排放增加了 2.28E+05 和 2.35E+05 kg; 基于甲烷重整氢能路径下, 燃料电池衰退情景 1 和情景 2 相比于基础情景的全生命周期碳排放增加了 1.68E+05 和 1.73E+05 kg; 基于混合电力电解水氢能路径下, 燃料电池衰退情景 1 和情景 2 相比于基础情景的全生命周期碳排放增加了 2.88E+05 和 2.96E+05 kg; 基于光伏电解水氢能路径下, 燃料电池衰退情景 1 和情景 2 相比于基础情景的全生命周期碳排放增加了 2.66E+04 和 2.74E+04 kg。

4.2.2 氢耗量不确定性分析

由前文可知, FCHCV 在运行使用阶段中对于其全生命周期化石能源消耗量 ADP(f)、碳排放量及污染物排放量影响较大, 因此重点讨论 FCHCV 的百公里氢耗量的变化对 FCHCV 全生命周期化石能源消耗量 ADP(f)、碳排放及污染物排放的影响。假设基于煤气化、甲烷重整、混合电力电解水和光伏电解水 4 种氢能路径的百公里氢耗量分别降低 20%、10% 以及增加 10% 和 20% 时, 不同氢耗量对 FCHCV 全生命周期 ADP(f) 和碳排放量的不确定性分析结果分别如图 11 和图 12 所示。

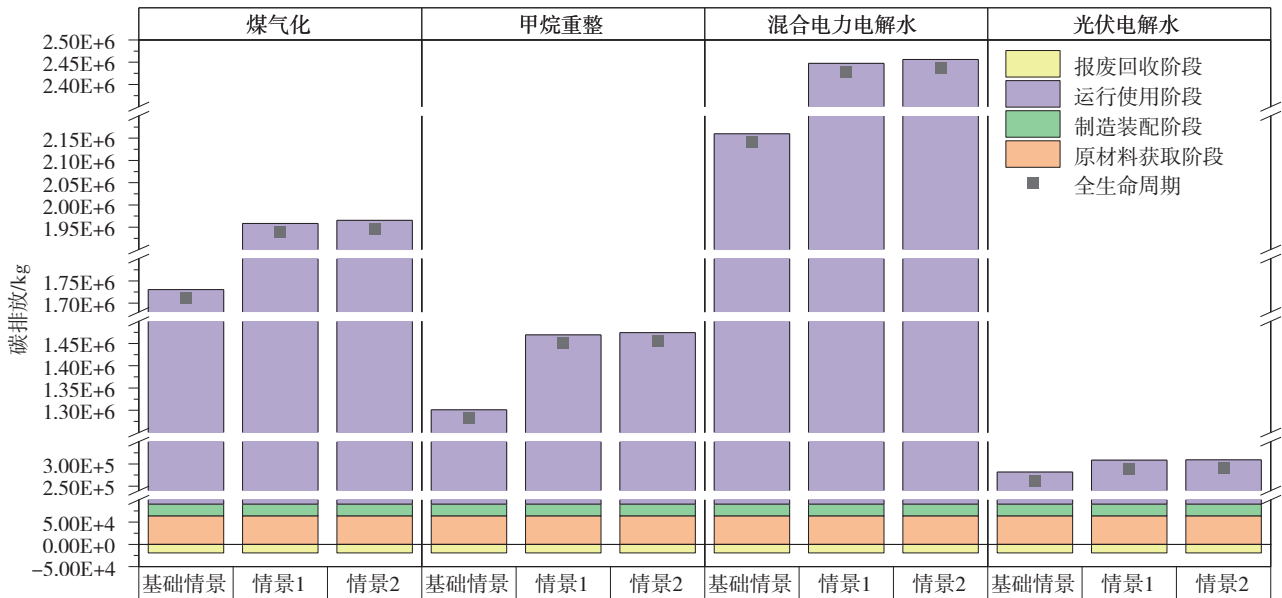


图10 3种情景下的汽车全生命周期碳排放评价结果

由图11可知,随着FCHCV百公里氢能消耗量每增加10%,基于煤气化、甲烷重整、混合电力电解水和光伏电解水的FCHCV全生命周期ADP(f)分别增加 $1.97\text{E}+06$ 、 $2.37\text{E}+06$ 、 $2.44\text{E}+06$ 和 $9.06\text{E}+05$ MJ,对应的FCHCV全生命周期ADP(f)分别增加9.75%、9.77%、9.62%和9.64%。

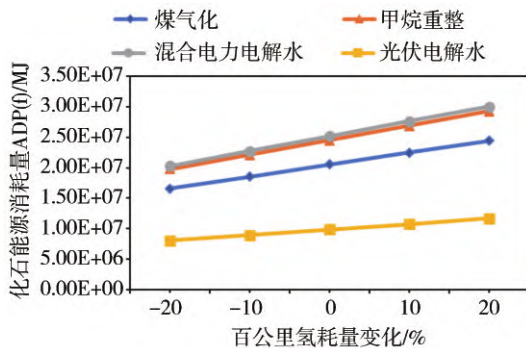


图11 百公里氢耗量对FCHCV全生命周期化石能源消耗量ADP(f)的不确定性分析

由图12可知,随着FCHCV百公里氢能消耗量在变化时(-20%~20%),基于煤气化、甲烷重整、混合电力电解水和光伏电解水的FCHCV全生命周期碳排放量的范围分别为 $1.38\text{E}+06$ ~ $2.04\text{E}+06$ 、 $1.04\text{E}+06$ ~ $1.52\text{E}+06$ 、 $1.73\text{E}+06$ ~ $2.55\text{E}+06$ 和 $2.25\text{E}+06$ ~ $3.01\text{E}+05$ kg。

根据上文分析可知,基于光伏电解水的FCHCV的全生命周期污染物排放最低,因此本文以基于光

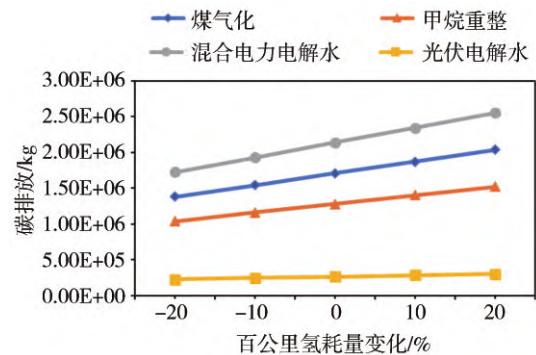


图12 百公里氢耗量对FCHCV全生命周期碳排放的不确定性分析

伏电解水的FCHCV为例,讨论百公里氢耗量变化(降低10%和20%)对FCHCV全生命周期AP、EP、POCP和HTP的影响。百公里氢耗量变化对FCHCV全生命周期AP、EP、POCP和HTP的不确定性分析结果如图13所示。

由图13可知,随着FCHCV的百公里氢耗量的变化降低20%,相较于基础情景,AP、EP、POCP分别降低了16.39%、14.83%和19.13%,而对于HTP影响不大。

4.2.3 车辆寿命里程不确定性分析

本文假设的车辆寿命为40万km,该数据会随着燃料电池材料寿命提高和控制策略的优化得到提升,因此具有一定的不确定性。在4种氢能路径下,在寿命里程20万、30万、40万、50万、60万和100万km情景下,随着车辆寿命里程不断提升,FCHCV的全

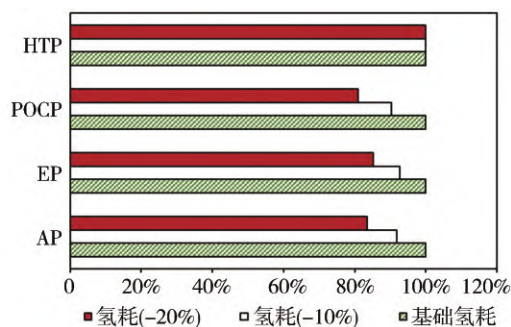


图13 百公里氢耗量变化对FCHCV全生命周期AP、EP、POCP和HTP的不确定性分析

生命周期化石能源消耗量ADP(f)和碳排放是不断增加的,但环境效益却是不断改善的。所以本文采用单位里程下FCHCV的全生命周期化石能源消耗量ADP(f)和碳排放对FCHCV不同车辆寿命里程进行不确定性分析,分别如图14和图15所示。

由图14可知,随着车辆寿命的提高,汽车全生命周期化石能源消耗量(以 $\text{MJ} \cdot \text{km}^{-1}$ 计)会降低。车辆寿命从20万km提高到100万km时,基于混合电力电解水、煤气化、甲烷重整和光伏电解水的全生命周期化石能源消耗量ADP(f)分别降低5.89%、4.96%、4.83%和11.79%。

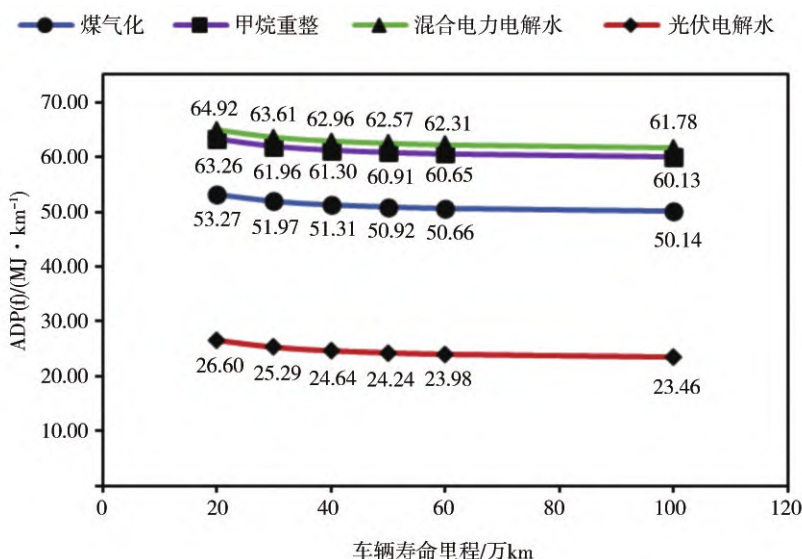


图14 不同车辆寿命里程对FCHCV全生命周期化石能源消耗量ADP(f)的不确定性分析

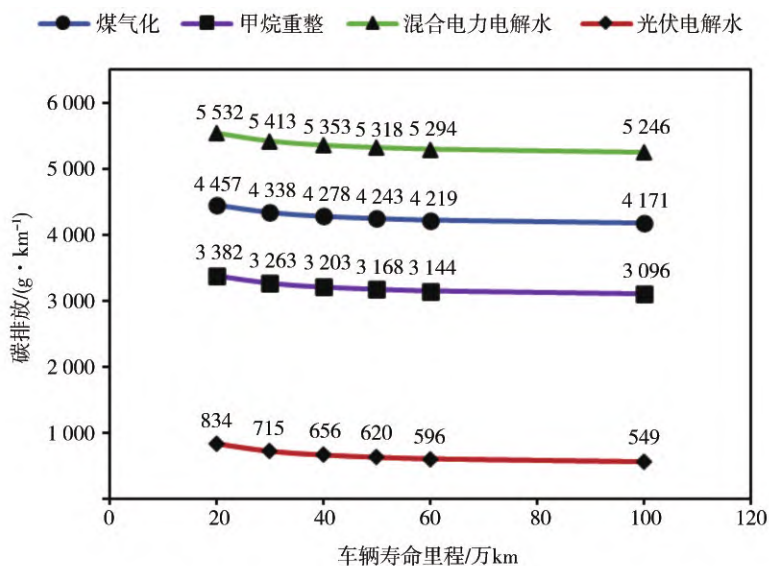


图15 不同车辆寿命里程对FCHCV全生命周期碳排放的不确定性分析

由图 15 可知,随着车辆寿命的提高,汽车全生命周期碳排放(以 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 计)会降低。车辆寿命从 20 万 km 提高到 100 万 km 时,基于混合电力电解水、煤气化、甲烷重整和光伏电解水的全生命周期碳排放分别降低 5.17%、6.42%、8.46% 和 34.17%。车辆寿命的提高对基于光伏电解水的氢燃料电池重型商用车全生命周期化石能源消耗量 ADP(f)和碳排放降低效果最为显著。

5 结论

以国内某款重型商用车为研究对象,分析 4 种氢能路径下 FCHCV 的全生命周期评价结果,并选取燃料电池电堆衰退等关键参数进行不确定性分析,得出以下结论。

(1) FCHCV 全生命周期材料资源消耗量为 0.286 kg,原材料获取阶段占比最大,报废回收对材料资源消耗降低效益明显;4 种氢能路径下 FCHCV 全生命周期化石能源消耗量、碳排放量、酸化潜值和水体富营养化潜值中,运行使用阶段占比最大,基于光伏电解水的 FCHCV 全生命周期评价结果对环境最友好。

(2) 在燃料电池衰退情景模拟增加 13.9% 和 14.32% 的氢能消耗量时,基于光伏电解水的 FCHCV 全生命周期能耗分别增加了 $1.26\text{E}+06$ MJ 和 $1.30\text{E}+06$ MJ;基于光伏电解水的 FCHCV 全生命周期碳排放分别增加了 $2.66\text{E}+04$ kg 和 $2.74\text{E}+04$ kg。研究设计高效安全的燃料电池系统控制策略,以延缓燃料电池电堆衰退,有助于减少 FCHCV 全生命周期能耗和碳排放。

(3) 从不确定性分析可知,随着汽车百公里氢耗量变化($-20\%\sim 20\%$),基于光伏电解水的 FCHCV 全生命周期碳排放量的范围为 $2.25\text{E}+05\sim 3.01\text{E}+05$ kg。随着车辆寿命从 20 万 km 提高到 100 万 km 时,基于光伏电解水的 FCHCV 全生命周期碳排放(以 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 计)降低 34.17%。因此,车辆燃油经济性和寿命里程的提高对 FCHCV 的全生命周期碳排放的降低效果显著。

参考文献

[1] 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 Z W, SHI T Z, HAO H, et al. Research on main problems associated with development of fuel cell vehicle in China[J]. Au-

tomobile Technology, 2018(1):1-9.
[2] 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 X G, YU Z P. Development status and prospects of fuel cell commercial vehicle industry[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5):152-158.
[3] 邵志刚,衣宝廉.氢能与燃料电池发展现状及展望[J].中国科学院院刊,2019,34(4):469-477.
SHAO Z G, YI B L. Developing trend and present status of hydrogen energy and fuel cell development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4):469-477.
[4] 李航,胡尊严,胡家毅,等.新型分布式驱动液氢燃料电池重型商用车设计、分析与验证[J].汽车工程,2022,44(8):1183-1198.
LI H, HU Z Y, HU J Y, et al. Design, analysis and validation of novel distributed drive liquid hydrogen fuel cell heavy commercial vehicles[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(8):1183-1198.
[5] 侯明,邵志刚,俞红梅,等.2019 年氢燃料电池研发热点回眸[J].科技导报,2020,38(1):137-150.
HOU M, SHAO Z G, YU H M, et al. Review of hot topics on hydrogen fuel cell in 2019[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(1):137-150.
[6] KANNANGARA M, BENSEBAA F, VASUDEV M. An adaptable life cycle greenhouse gas emissions assessment framework for electric, hybrid, fuel cell and conventional vehicles: effect of electricity mix, mileage, battery capacity and battery chemistry in the context of Canada[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 317:128394.
[7] BAUER C, HOFER J, ALTHAUS H, et al. The environmental performance of current and future passenger vehicles: life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework[J]. Applied Energy, 2015, 157:871-883.
[8] EVANGELISTI S, TAGLIAFERRI C, BRETT D, 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.
[9] SIMONS A, BAUER C. A life-cycle perspective on automotive fuel cells[J]. Applied Energy, 2015, 157:884-896.
[10] AHMADI P, KHOSHNEVISAN A. Dynamic simulation and life-cycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(62):26758-26769.
[11] AHMADI P, TORABI S, AFSANEH H, et al. The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(5):3595-3608.
[12] AHMADI P, KJEANG E. Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles[J]. International Journal of Energy Research, 2017, 41(5):714-727.
[13] RAEESI M, CHANGIZIAN S, AHMADI P, et al. Performance analysis of a degraded PEM fuel cell stack for hydrogen passenger

- vehicles based on machine learning algorithms in real driving conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 248: 114793.
- [14] CHEN Y, LAN L, HAO Z, et al. Cradle-grave energy consumption, greenhouse gas and acidification emissions in current and future fuel cell vehicles: study based on five hydrogen production methods in China[J]. *Energy Reports*, 2022, 8:7931-7944.
- [15] 付佩, 兰利波, 陈颖, 等. 面向2035的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(4):2365-2374.
- FU P, LAN L B, CHEN Y, et al. Life cycle prediction assessment of energy saving and new energy vehicles for 2035[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4):2365-2374.
- [16] LIU F, ZHAO F, LIU Z, et al. The impact of fuel cell vehicle deployment on road transport greenhouse gas emissions: the China case [J]. *The International of Hydrogen Energy*, 2018, 43: 22604-22621.
- [17] YEOW L, YAN Y, CHEAH L. Life cycle greenhouse gas emissions of alternative fuels and powertrains for medium-duty trucks: a Singapore case study[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 105:103258.
- [18] BOOTO G, AAMODT K, HANCKE R. Comparative life cycle assessment of heavy-duty drivetrains: a Norwegian study case [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 95:102836.
- [19] LEE D, 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, 393:217-229.
- [20] ALONSO-VILLAR A, DAVÍÐSDÓTTIR B, STEFÁNSSON H, et al. Technical, economic, and environmental feasibility of alternative fuel heavy-duty vehicles in Iceland[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 369:133249.
- [21] GUSTAFSSON M, SVENSSON N, EKLUND M, et al. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of heavy-duty transports: influence of electricity carbon intensity [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 93:102757.
- [22] 涂小岳, 杨沿平, 徐建全, 等. LNG重型商用车和柴油重型商用车全生命周期环境排放差异评价[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(11):1525-1530.
- TU X Y, YANG Y P, XU J Q, et al. Evaluation of difference between LNG and diesel heavy-duty commercial vehicle's life cycle environmental emission [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(11):1525-1530.
- [23] 涂小岳, 徐建全, 陈轶嵩, 等. 液化天然气商用车与柴油商用车生命周期能耗差异评价[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(23): 3211-3215.
- TU X Y, XU J Q, CHEN Y S, et al. An evaluation of differences between LNG and diesel commercial vehicle's life cycle energy consumption[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(23): 3211-3215.
- [24] 彭飞, 杨沿平, 殷仁述, 等. 商用车铝合金与钢制轮辋生命周期环境影响评价对比分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 4136-4142.
- PENG F, YANG Y P, YIN R S, et al. Comparative analysis on life cycle environmental impacts assessment between aluminum alloy and steel rim of vehicle[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12):4136-4142.
- [25] ZHANG X, LIN Z, CRAWFORD C, et al. Techno-economic comparison of electrification for heavy-duty trucks in China by 2040[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 102:103152.
- [26] 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.
- CHEN Y S, DING Z S, WANG W J, et al. Life-cycle assessment and scenario simulation of four hydrogen production schemes for hydrogen fuel cell vehicles [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(5):172-180.
- [27] 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 等. 氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比[J]. *环境科学*, 2022, 43(8):4402-4412.
- CHEN Y S, LAN L B, HAO Z, et al. Life cycle assessment and key parameter comparison of hydrogen fuel cell vehicles power systems[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8):4402-4412.
- [28] 陈轶嵩, 丁振森, 刘佳慧, 等. 面向2020年的质子交换膜燃料电池汽车生命周期评价及预测[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(21):2546-2552.
- CHEN Y S, DING Z S, LIU J H, et al. Life cycle assessment and prediction of proton exchange membrane fuel cell vehicles for 2020[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(21):2546-2552.
- [29] 陈轶嵩, 兰利波, 杜轶群, 等. 基于全生命周期评价理论的EREV/BEV/ICEV环境效益及减碳经济性评估[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(2):516-527.
- CHEN Y S, LAN L B, DU Y Q, et al. Environmental benefit and carbon reduction economic evaluation of extended range/battery electric/internal combustion engine vehicles based on life cycle assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(2): 516-527.
- [30] HARPER G, SOMMERVILLE R, KENDRICK E, et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles [J]. *Nature*, 2019, 575(7781):75-86.
- [31] FAN E, LI L, WANG Z, et al. Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospect [J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(14):7020-7063.
- [32] JIANG H, WANG Q, CHEN S, et al. Recycling-oriented cathode materials design for lithium-ion batteries elegant structures versus complicated compositions [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 41:380-394.
- [33] LI W, BAI H, YIN J, et al. Life cycle assessment of end-of-life vehicle recycling processes in China—take Corolla taxis for example[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 117:176-187.