

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

陈轶嵩 丁振森 刘佳慧 马金秋

长安大学汽车学院,西安,710064

摘要:运用 GaBi 软件建模,以我国燃料电池技术 2020 年发展目标为基础,结合美国能源部 2020 年燃料电池汽车技术计划,对 2020 年我国燃料电池汽车的全生命周期节能减排绩效进行定量评价计算和预测分析。结果表明:2020 年我国每台燃料电池汽车全生命周期平均矿产资源消耗量 $E_{ADP(e)}$ 、化石能源消耗量 $F_{ADP(f)}$ 和温室气体排放量 Q_{GWP} 分别为 0.609 kg(锑当量)、 3.99×10^5 MJ 以及 2.99×10^4 kg(CO₂ 当量)。从其全生命周期来看, $E_{ADP(e)}$ 、 $F_{ADP(f)}$ 与原材料获取阶段贵金属铂的生产、制氢技术以及燃料电池的效率有关, Q_{GWP} 则主要来源于制氢过程中消耗的化石燃料和电能。降低燃料电池汽车对资源环境影响的有效措施有:加快研发关键材料及金属铂的高效回收策略,从而不断降低贵金属的消耗量;改进制氢技术,由化石能源主导变为可再生清洁能源主导;逐步优化电力结构,有效降低氢气压缩过程中的煤电消耗量等。

关键词:质子交换膜燃料电池汽车;生命周期评价;能源部 2020 年目标;资源能源消耗;环境影响

中图分类号:U469;X323

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.21.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Life Cycle Assessment and Prediction of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Vehicles for 2020

CHEN Yisong DING Zhensen LIU Jiahui MA Jinqu

School of Automotive, Chang'an University, Xi'an, 710064

Abstract: By modeling with GaBi software, the quantitative evaluation and predictive analysis were made for full life cycle energy saving and emission reduction of China's fuel cell vehicles in 2020 based on the development goal of China's fuel cell technology in 2020 and the U.S. DOE 2020 fuel cell vehicle technology plan. The results show that the average mineral resource depletion $E_{ADP(e)}$, fossil energy consumption $F_{ADP(f)}$ and environmental impact Q_{GWP} for fuel cell vehicles of China in full life cycle are as 0.609 kg(Sb-Eq.), 3.99×10^5 MJ and 2.99×10^4 kg(CO₂-Eq.) respectively. The production of precious metals platinum, hydrogen production technology and fuel cell efficiency in raw material acquisition phase plays a key role in fuel cell vehicle life cycle $E_{ADP(e)}$ and $F_{ADP(f)}$, while Q_{GWP} mostly comes from the consumption of fossil fuel and electric energy in the processes of hydrogen production. The effective measures to reduce the impact of fuel cell vehicles on resources and environment are as below: accelerating the development of key materials and the efficient recycling strategies of platinum are used to reduce the consumption of precious metals gradually, improving hydrogen production technology which may change from fossil energy to renewable clean energy, gradually optimizing the power structure to effectively reduce the consumption of coal electricity in the hydrogen compression processes.

Key words: proton exchange membrane fuel cell vehicle; life cycle assessment; Department of Energy(DOE) 2020 target; resource and energy consumption; environmental impact

收稿日期:2017-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目((71173072);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017JQ7003);教育部人文社会科学青年基金资助项目(16YJCZH008);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(310822171001,310822170661);“弘毅长大”研究生科研创新实践项目(2018099)

0 引言

中国汽车产业高速发展对我国资源、能源以及环境造成了越来越大的影响。据统计,我国气候恶化以及雾霾等环境现象的产生,31%是由汽车产业造成的。此外,2017 年我国原油对外依存度已经

达到 67.4%，至 2020 年可能高达 70%。面对资源和环境的双重压力，国家已密集出台多项政策支持新能源汽车发展，鼓励消费者进行绿色消费^[1]。

燃料电池汽车因其行驶里程及燃料加注时间都与燃油车类似，被认为是燃油车的最直接替代品，其中质子交换膜燃料电池因其相对低的运行温度、快速启动特性和高的效率被认为最合适在汽车上使用。但目前人们对其给资源、能源、环境带来的影响尚缺乏全面科学的认知，国外虽有研究但并不适合中国国情，唯有针对我国本土数据并对其进行生命周期评价(LCA)才可得到全面系统的认知。

国外已有学者对燃料电池汽车的资源能源消耗情况展开了一定的研究，如 EVANGELISTI 等^[2]提出了一种注重生产过程的燃料电池汽车(FCV)综合评价方法，对燃料电池汽车、纯电动汽车(BEV)和传统燃油车(ICEV)的生产、使用和报废过程进行了对比分析，并对燃料电池堆和燃料电池系统关键部件进行了敏感性分析，结果表明：降低燃料电池汽车制造阶段对环境的影响仍然是一个挑战。BAUER 等^[3]基于新的整车仿真框架提出了一种综合的 LCA 方法，并对燃料电池汽车与纯电动汽车，传统燃油车与混合动力汽车，柴油汽车与天然气汽车的生命周期环境影响进行了两两的对比分析，结果表明：氢气来源对燃料电池汽车节能减排意义重大。AHMADI 等^[4]对加拿大四个省由常规汽油车转变为燃料电池车的环境影响和经济成本进行了分析，分析过程中考虑了三种制氢方法并且与传统燃油车进行了对比，结果表明：燃料电池汽车相比传统燃油车，其生命周期温室效应气体(GHG)排放减少，燃料成本减少。

相对国外而言，国内研究主要集中在氢源基础设施评价领域。邱彤等^[5]将 LCA 方法用于经济、能源、环境领域，编制了用于氢源系统方案综合评价的专用软件，研究表明：以天然气为初级能源、配以甲醇车载重整制氢方案的综合评价值较高。王菊等^[6]采用全生命周期 GREET (green-house gas, regulated emissions, and energy use in transportation)能量分析方法对北京燃料电池公共汽车示范项目进行了全生命周期综合评价，结果表明：天然气集中制氢方案最优。

综上所述，我国新能源汽车领域的 LCA 起步较晚，近年来虽然有针对氢源基础设施的 LCA，但质子交换膜燃料电池汽车(proton exchange membrane fuel cell vehicles, PEMFCV，简称“燃料电池汽车”)属于新能源汽车领域的前

瞻性产品，目前全面系统地对其进行 LCA 的文献尚未发现。同时，燃料电池汽车尚未大规模进入市场，在大规模产业化之前很有必要进行量化的全生命周期预测研究，为提高预测的准确性，把握燃料电池汽车技术未来的国内外发展趋势，本文以我国燃料电池技术 2020 年发展目标为基础^[7]，结合美国能源部(DOE)对 2020 年燃料电池汽车的要求，根据 2020 年美国、日本、德国等汽车产业发达国家燃料电池汽车的技术特点，构建了从原材料生产到维修阶段的 LCA 模型，评价结果可为燃料电池汽车产业政策制定及企业技术战略规划提供量化参考依据。

1 评价方法

1.1 系统边界与功能单位

LCA 是指对一个产品的整个生命周期中所有输入、输出及其潜在环境影响进行汇编和评价的过程^[8]。目前，LCA 方法是量化某产品系统生命周期各阶段中能源与材料消耗、环境排放及相关影响的有效工具，借助 LCA 能够全面认识某产品的各方面影响，并寻求降低上述负面影响的方法和措施。

汽车 LCA 分析需要按照国际标准 ISO14040 进行，首先需要明确研究目的、系统边界和功能单位。本文的研究目的在于探寻 2020 年我国质子交换膜燃料电池汽车生命周期各阶段对资源、能源消耗和环境排放的影响，为企业、研究机构或者政府部门决策作参考，因此，研究涵盖了燃料电池汽车的整个生命周期阶段，包括原材料获取，零部件的制造、组装、使用和维修五个阶段。到 2020 年由于燃料电池汽车尚未进入大规模生产阶段，尚未有大量车辆进入报废回收期，因此，本文暂不考虑报废回收过程，在以后的研究中以本文构建的模型和预留接口为基础，扩展系统边界再加入报废回收过程。本文构建的质子交换膜燃料电池汽车 LCA 系统边界见图 1。

功能单位是指经过量化的产品功能或绩效特征^[8]，选择与其他类似研究相同的功能单位可确保不同 LCA 研究结果之间具有相对可比性，因此，本文假设以 2020 年技术下的质子交换膜轻型燃料电池汽车在中国道路行驶 150 000 km 为功能单位^[2]。

1.2 评价对象与数据来源

由于本文是针对 2020 年技术背景下的燃料电池汽车进行预测评价，目前尚未有实际的量产车型，因此，本文在深度研究 2020 年燃料电池汽

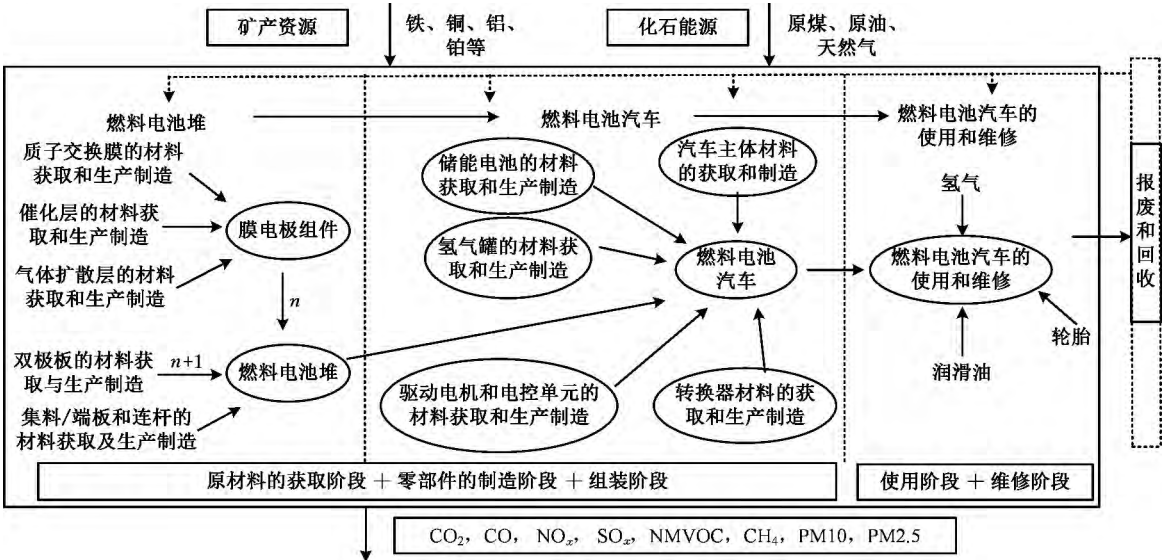


图 1 质子交换膜燃料电池汽车 LCA 的系统边界

Fig.1 The system boundary of the life cycle assessment of proton exchange membrane fuel cell vehicles

车的目标与趋势的基础上,除动力系统外,其他各项数据类比目前比较先进的插电式混合动力车型普锐斯进行二次处理。所选车型的百公里氢气消耗量参考北京半城市循环工况数据^[9]。美国 PEMFCV DOE2020 年目标见表 1^[10],中国燃料电池系统 2020 年目标见表 2^[7],评价对象的具体参数见表 3^[11-14]。表 1 中,比值 μ 表示输出电能与输入氢燃料的比值。

表 1 美国 PEMFCV DOE2020 年目标

Tab.1 The U.S. PEMFCV DOE 2020 target

	燃料电池堆	燃料电池系统
功率(kW)	45	40
堆栈功率/系统功率(kW)	1.25	
额定功率 25% 时的比值 μ (%)	65	60
额定功率时的比值 μ (%)	55	49
体积比功率(kW/L)	1.6	0.7
质量比功率(kW/kg)	1.95	0.65
比质量(kg/kW)	0.51	1.55
运行压力(kPa)	350	
每个单体的活动面积(m ²)	0.023	
单体面积(m ²)	0.032	
每个单体活动面积的能量密度(W/cm ²)	0.8	
每个单体的功率(W)	187	
单体数量需求	241	
总活动面积(m ²)	5.4	
额定电压(V)	0.69	148.00
当前密度(A/cm ²)	1.2	
总铂载量(mg/cm ²)	0.125	
铂含量(g/kW)	0.15	0.17

本文中燃料电池汽车各阶段所需的实景数据主要来源于国内外的参考文献^[2,9,15],一小部分来源于企业调研,而背景数据主要是指上游过程数据,主要来源于 GaBi7(GaBi ts)数据库 2017 年的数据。

• 2548 •

表 2 中国燃料电池系统 2020 年目标

Tab.2 China fuel cell system 2020 target

参数	乘用车	商用车
最高效率(%)	60	60
冷启动温度(℃)	-30	-30
成本(元)	1 000	1 000
额定功率(kW)	70	70
寿命(h)	5 000	5 000
体积比功率(kW/L)	3.0	2.0
质量比功率(kW/kg)	2.0	

表 3 燃料电池汽车 2020 年主要参数预测值

Tab.3 The main parameters of fuel cell vehicles in 2020

燃料电池堆栈功率(kW)	45
燃料电池系统功率(kW)	40
汽车总质量(kg)	1 485
汽车总行驶里程(km)	150 000
百公里加速时间(s)	12
一次加满氢气的行驶里程(km)	500
百公里氢气消耗(g)	10.1
电机功率(kW)	75
电池储能(kW·h)	13

1.3 影响评价指标和计算方法

影响评价是指在选定的影响指标和评价模型的基础上,将清单分析结果转化为潜在环境影响的过程,旨在帮助人们理解产品系统对某些重要的环境(包括资源、能源)特性所造成的影响大小^[8]。

本文针对新能源汽车尤其是燃料电池汽车的特点,选取矿产资源消耗量($E_{ADP(e)}$)、化石能源消耗量($F_{ADP(f)}$)、全球变暖潜值(Q_{GWP})、酸化潜值(Q_{AP})、水体富营养化潜值(Q_{EP})、光化学烟雾潜值(Q_{POCP})和臭氧层损耗潜值(Q_{ODP})七项影响指标,用于衡量燃料电池汽车的资源、能源消耗及对环境的影响,单位分别为 kg(Sb-Eq.,即锑当量)、

MJ、kg (CO₂-Eq., 即二氧化碳当量)、kg (SO₂-Eq., 即二氧化硫当量)、kg (Phosphate-Eq., 即磷酸当量)、kg (Ethene-Eq., 即乙烯当量)、kg (R11-Eq., 即三氯氟甲烷当量), 特征化因子来源于荷兰莱顿大学开发的 CML 模型^[8]。

2 模型构建

本文运用德国斯图加特大学开发的 GaBi ts 软件系统平台构建模型, 模型构建所必须的实景数据和背景数据主要来自于文献和 GaBi 数据库。本文研究对象质子交换膜轻型燃料电池汽车在 Argonne 国家实验室 (Argonne national laboratory, ANL)^[16] 分类方法的基础上进行了改进, 将整个燃料电池汽车分为六个部分, 分别为: 汽车主体、高压储氢罐、电机及控制系统、转换器、燃料电池堆和储能电池。

2.1 原材料获取阶段

原材料获取过程是指将矿产资源通过加工转变为车用的原材料, 这些车用原材料能够用来制造汽车的零部件。如上所述, 本文将整个燃料电池汽车分为六个部分, 每个部分的材料组成数据来源于文献^[2, 9, 15], 氢气罐采用目前最先进的非金属内胆纤维全缠绕型 (IV 型) 70 MPa 气瓶^[17]。其电池的材料组成数据见表 4, 其主要部件 (不包括电池) 的材料组成数据见表 5。

表 4 燃料电池汽车电池的材料组成
Tab.4 Material composition of battery
for fuel cell vehicles

燃料电池堆	质量分数 (%)
石墨	47.3
钢	26.7
聚四氟乙烯	22.6
电子元件	2.8
铂	0.3
其他	0.3
储能电池	质量分数 (%)
锰酸锂	27.8
石墨	12.2
黏合剂	2.1
铜	14.8
锻铝	22.9
电解液: LiPF ₆	1.7
电解液: 碳酸乙烯酯	4.9
电解液: 碳酸二甲酯	4.9
塑料: 聚丙烯	2.2
塑料: 聚乙烯	0.4
塑料: PET	1.7
钢	1.9
热绝缘	0.3
冷却液: 乙二醇	1.3
电子元件	0.9

表 5 燃料电池汽车主要部件 (不包括电池) 的材料组成
Tab.5 The composition of the main components for fuel cell vehicles (excluding the battery)

汽车主体	质量分数 (%)	高压储氢罐	质量分数 (%)	电机及控制系统	质量分数 (%)	转换器	质量分数 (%)
钢	66.3	铝	20.7	钢	78.0	铜	25.9
铸铁	5.3	碳纤维	37.7	铝	10.0	绝缘材料	2.6
锻铝	1.8	钢	41.5	铜	6.0	二氧化硅	6.5
铸铝	4.7	其他	0.1	油漆	1.0	铁氧体	64.9
铜	4.3			塑料	0.3	其他	0.1
玻璃	3.0			磁铁	1.7		
平均	10.6			其他	3		
塑料							
橡胶	1.7						
其他	2.2						

获取燃料电池汽车的前述六大部分的材料组成清单 (BOM 表) 后, 便可在 GaBi ts 软件中对其原材料获取阶段进行建模。

2.2 零部件制造阶段

零部件制造阶段是指将获得的原材料根据功能需要转变成车用零部件, 为汽车装配做准备的过程。本文是对燃料电池汽车 2020 年的生命周期影响进行预测, 在没有量产车型的情况下, 除整个动力系统外, 其他部分数据根据燃料电池汽车与插电式混合动力汽车的结构差异, 类比于目前比较先进的插电式混合动力汽车丰田普锐斯 NWH35 的制造过程进行数据二次处理后得到。零部件制造阶段所需要的能源的上游数据来源于 GaBi ts 数据库的 2017 年数据, 而燃料电池汽车区别于插电式混合动力汽车普锐斯特有结构的实景数据来源于文献^[2, 3, 9], 类比于普锐斯结构的零部件制造阶段的实景数据来源于文献^[18]。由于小部分结构的零部件制造阶段的数据难以获得, 因此, 假设本文所研究的是 2020 年燃料电池汽车生命周期影响的最小值。本文所得结果结合 2020 年各种技术的发展和数据的更新来推算。

获取零部件制造阶段各部分的能耗值后, 在 GaBi ts 软件中建模。

2.3 整车装配阶段

针对整车装配阶段的数据, 本文参考加州大学伯克利分校对汽车装配工业的研究, 汽车装配厂的主要能源消耗源自: 涂装、空气调节系统 & 照明、供暖、物料搬运、焊接以及车间压缩空气等工艺或设备^[18]。装配厂除加热工序用煤提供能量外, 其他工序全部为电能。各阶段的能源需求见表 6。

2.4 使用阶段

燃料电池汽车装配完成后即可投入使用, 本文假设汽车行驶采用北京半城市循环工况, 2020

表 6 整车装配阶段的电能、热能消耗^[17-18]

Tab.6 Electric energy and heat energy consumption of vehicle assembly

	涂装	空气调节 系统 & 照明	供暖	物料 搬运	焊接	车间 压缩空气
电能(MJ/kg)	2.72	2.18		0.45	0.61	0.90
热能(MJ/kg)			2.03			

年燃料电池汽车每行驶 100 km 的氢气平均消耗量为 0.85 kg^[2],其计算公式如下:

$$E_{FCV} = L \frac{\int_0^L (f_{urban} + f_{highway}) dL}{2}$$

式中, E_{FCV} 为燃料电池汽车使用阶段总的氢气消耗量; f_{urban} 为城市路况汽车百公里氢气消耗量; $f_{highway}$ 为高速路况汽车百公里氢气消耗量; L 为燃料电池汽车生命周期总行驶里程。

本文的氢气生产过程来自于 GaBi ts 数据库,数据库中氢气的生产采用的是多种技术混合的方式,包括甲醇水蒸气重整、水电解和蒸汽裂解乙烯等。

2.5 维修阶段

在汽车整个使用寿命期内,零部件需要更换,本文仅考虑所更换的零部件的制造过程对环境的影响,且由于空气滤清器、刹车片等质量较小,对环境影响较小,本文假设不予更换,使结果更接近于 2020 年燃料电池汽车生命周期影响的最小值。

根据文献[15],汽车每行驶 62 500 km 需要更换一次轮胎,故燃料电池汽车在整个使用寿命期内需要更换两次轮胎。假设燃料电池在使用 150 000 km 后退化不超过 15%^[19],则无需更换。其他零部件的更换,包括少量的润滑液体的更换对环境影响很小,本文都假设不予考虑。

3 影响评价与结果解释

3.1 生命周期能耗、排放及其特征化结果

对于能耗,本文主要考虑不可再生能源(原

表 8 2020 年燃料电池汽车全生命周期环境影响特征化结果

Tab.8 The characterization results of the environment impact of the life cycle for fuel cell vehicles in 2020

	$E_{ADP(e)}$ (kg(Sb-Eq.))	$F_{ADP(f)}$ (MJ)	Q_{GWP} (kg(CO ₂ -Eq.))	Q_{AP} (kg(SO ₂ -Eq.))	Q_{EP} (kg(Phosphate-Eq.))	Q_{POCP} (kg(Ethene-Eq.))	Q_{ODP} (kg(R11-Eq.))
I	0.608	8.15×10^4	9.69×10^3	45.40	1.930	4.160	2.39×10^{-8}
II	2.69×10^{-4}	1.96×10^4	1.83×10^3	8.73	0.608	0.734	3.60×10^{-10}
III	1.74×10^{-4}	2.88×10^4	2.89×10^3	12.10	0.868	1.680	5.78×10^{-10}
IV	1.09×10^{-3}	2.40×10^5	1.37×10^4	7.04	0.713	1.470	7.75×10^{-10}
V		2.90×10^4	1.62×10^3	2.98		0.121	
VI	0.609	3.99×10^5	2.99×10^4	76.30	4.120	8.170	2.56×10^{-8}

注: I-原材料获取阶段; II-零部件制造阶段; III-装配阶段; IV-使用阶段; V-维修阶段; VI-全生命周期。

由图 2 可知,原材料获取阶段是矿产资源消耗最多的阶段。主要是因为在这一阶段各种车用

煤、原油、天然气)的消耗,而排放则考虑主要排放物,能耗和排放表见表 7。由表 7 可知,2020 年燃料电池汽车天然气的消耗最多,主要是由于制氢过程消耗了大量天然气,而排放的 CO₂ 远远高于其他排放物,导致 Q_{GWP} 在各个阶段占比均较高,这主要是由于制氢过程采用混合技术,消耗了大量电能,而我国又是以煤电为主,因此,产生了大量 CO₂,其次,原材料获取阶段由于铂等贵金属的开采消耗了大量化石能源,也产生了大量 CO₂。

表 7 生命周期各阶段能耗和排放表

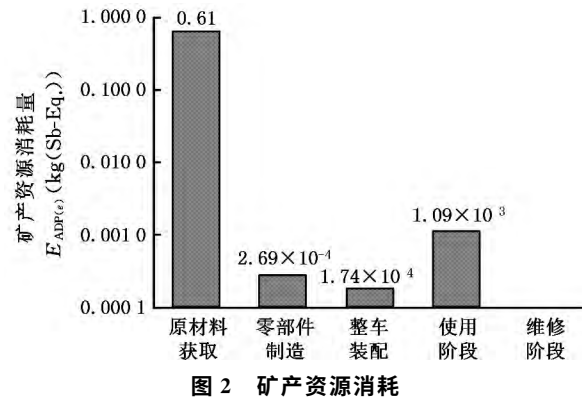
Tab.7 Energy consumption and emission of various stages of the life cycle

	原材料 获取	零部件 制造	整车装配 阶段	使用 阶段	维修 阶段	合计
原油 (MJ)	309	8.670	13.200	17.300	589	937.170
原煤 (MJ)	2 380	670	1 030	20.600	146	4 246.60
天然气 (MJ)	185	39	24.700	5 400	0.076 8	5 648.78
CO ₂ (kg)	8 910	1 720	2 670	1.250×10^4	1 620	27 420
CO (kg)	31.600	2.150	3.320	4.940	0	42.010
NO _x (kg)	13.700	4.310	6.070	5.230	0	29.310
SO _x (kg)	31.800	5.440	7.500	3.620	2.480	50.840
NM VOC (kg)	4.270	0	2.000	0	0	6.270
CH ₄ (kg)	26.600	4.200	7.440	44.200	0.272	82.712
PM10 (kg)	1.87×10^{-3}	5.32×10^{-5}	9.16×10^{-5}	9.54×10^{-5}	0	0.002 11
PM2.5 (kg)	1.120	0.256	0.466	0.038	0	1.880

本文对燃料电池汽车 2020 年的生命周期评价预测运用 GaBi ts 软件计算建模,并引用国际上普遍采用的 CML2001 的影响评价方法,对矿产资源消耗量($E_{ADP(e)}$)、化石能源消耗量($F_{ADP(f)}$)、全球变暖潜值(Q_{GWP})、酸化潜值(Q_{AP})、水体富营养化潜值(Q_{EP})、光化学烟雾潜值(Q_{POCP})和臭氧层损耗潜值(Q_{ODP})七项影响指标进行分析,特征化结果见表 8。

3.2 矿产资源消耗

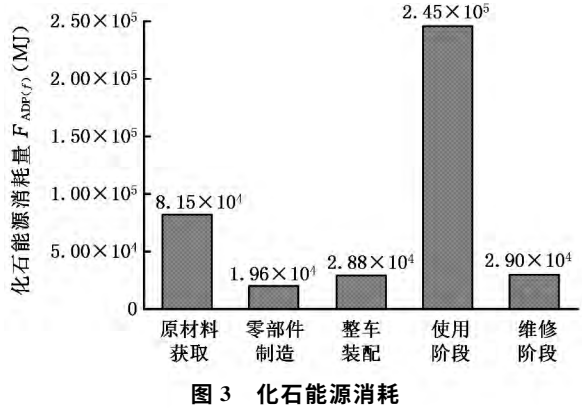
利用 GaBi 软件对所建 2020 年燃料电池汽车的生命周期模型进行平衡表计算,根据计算结果可得各阶段的矿产资源消耗见图 2。



铁、铝、铜等金属矿产资源,燃料电池的生产过程中需要用到铂等贵金属矿产资源,锂电池原材料获取消耗了大量的锂矿、岩石等矿产资源等。其中铁矿石消耗最多,占 76.6%,铝矿石、铜矿石次之,分别占 11.5%、4.3%,其他占比较小的便是铂、锂等矿产资源。铂矿资源占比虽不到 1%,但由于其稀缺性,影响巨大。

3.3 化石能源消耗

在 GaBi 软件中对所建模型的化石能源消耗进行平衡表计算,计算结果如图 3 所示。



由图 3 可知,燃料电池汽车的化石能源(原煤、原油、天然气)消耗主要发生在使用阶段,这是因为汽车在整个使用阶段(150 000 km)消耗了大量氢气,而氢气的制造本文假设选取当前广泛应用的混合制氢技术,消耗了大量的电力和天然气,而我国的电力结构又以火电为主,原油、原煤、天然气的消耗占比分别为:0.2%、0.4%、99.3%。由此可知,首先应该寻求高效节能的制氢技术,减少制氢过程中的化石能源消耗,特别是天然气消耗;其次,提高燃料电池内部的氢气与氧气的化学反应效率,并配合运用轻量化技术,比如,寻求更优材料减小氢气罐和燃料电池等质量比较大的部件的质量,减少氢气的消耗。除此之外,改善我国电力结构,降低煤电比例,多使用清洁能源发电仍然

不可忽视。

3.4 环境排放影响

为更好地解释各种环境影响类型的相对重要性,运用 CML2001 方法对前述五种环境影响类型做归一化和量化处理。归一化基准值来源于 GaBi 数据库,权重来源于文献[20]。归一化基准值和权重系数见表 9。五种环境影响类型的归一化和量化结果见表 10。

表 9 归一化基准值与权重系数
Tab.9 Normalized datum value and weight coefficient

环境影响类型	归一化基准值	权重(量纲一)
全球变暖潜值 Q_{GWP} (kg(CO ₂ -Eq.))	4.18×10^{13}	0.274 692 29
酸化潜值 Q_{AP} (kg(SO ₂ -Eq.))	2.39×10^{11}	0.180 726 51
水体富营养化潜值 Q_{EP} (kg(Phosphate-Eq.))	1.58×10^{11}	0.088 862 20
光化学烟雾潜值 Q_{POCP} (kg(Ethene-Eq.))	3.68×10^{10}	0.181 026 72
臭氧层损耗潜值 Q_{ODP} (kg(R11-Eq.))	2.27×10^8	0.274 692 29

表 10 五种环境影响类型的归一化和量化结果
Tab.10 The normalization and quantitative results of five types of environmental impacts

	原材料获取	零部件制造	整车装配	使用阶段	维修阶段	总计
Q_{GWP}	6.39×10^{-11}	1.21×10^{-11}	1.90×10^{-11}	9.07×10^{-11}	1.07×10^{-11}	1.964×10^{-10}
Q_{AP}	3.43×10^{-11}	6.60×10^{-12}	9.15×10^{-12}	5.32×10^{-12}	2.25×10^{-12}	5.762×10^{-11}
Q_{EP}	1.09×10^{-12}	3.42×10^{-13}	4.87×10^{-13}	4.01×10^{-13}	0	2.320×10^{-12}
Q_{POCP}	2.05×10^{-11}	3.61×10^{-12}	8.26×10^{-12}	7.23×10^{-12}	5.95×10^{-13}	4.019×10^{-11}
Q_{ODP}	2.89×10^{-17}	4.37×10^{-19}	6.99×10^{-19}	9.38×10^{-19}	0	3.097×10^{-17}
综合值	1.198×10^{-10}	2.265×10^{-11}	3.690×10^{-11}	1.037×10^{-10}	1.355×10^{-11}	2.965×10^{-10}

由表 10 可知,燃料电池汽车的五个阶段五种环境影响类型影响值由大到小的顺序依次为:全球变暖潜值(占比 66.2%)、酸化潜值(占比 19.4%)、光化学烟雾潜值(占比 13.5%)、水体富营养化潜值(占比 0.7%)、臭氧层损耗潜值(占比 0.2%);2020 年燃料电池汽车的环境影响主要集中在原材料获取阶段,其次是使用阶段。其中使用阶段的潜值 Q_{GWP} 最高,主要是因为制氢技术不成熟,导致产生了大量的 CO₂,原材料获取阶段酸化潜值最高,主要是因为稀有金属铂和钢、铝等的原材料获取过程消耗了大量的化石能源以及电能,由此产生了大量的酸化气体 SO₂ 和氮氧化物 NO_x。

4 结论

(1)2020 年质子交换膜燃料电池汽车的原材料获取阶段消耗的资源最多,主要是因为铂等贵金属矿产资源的消耗,因此,加快研发燃料电池汽车关键材料特别是铂的高效回收策略将会是行之

有效的方法。

(2)2020 年质子交换膜燃料电池汽车在使用阶段的化石能源消耗最多,而其中天然气消耗的占比最大。这与工业制氢主要使用天然气及我国电网的“不清洁”密不可分,改进制氢技术,使制氢技术由化石能源主导变为可再生清洁能源主导是降低燃料电池汽车对资源环境影响的重要途径。

(3)2020 年燃料电池汽车的 Q_{GWP} 排放占比各阶段均较高,使用阶段最高。其中主要是 CO_2 的排放,铂的生产过程产生了大量的 CO_2 ,降低催化剂中铂的含量(铂载量)是提高其绿色度的关键,此外,氢气压缩消耗了大量的电能,降低煤电比例也是降低其对资源环境影响的重要举措。

参考文献:

- [1] 郭焱,刘红超,郭彬.产品生命周期评价关键问题研究评述[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5): 1141-1148.
GUO Yan, LIU Hongchao, GUO Bin. Review on Key Issues of Product Life Cycle Assessment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(5): 1141-1148.
- [2] 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.
- [3] BAUER C, HOFER J, ALTHAUS H J, 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(3):871-883.
- [4] 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): 12905-12917.
- [5] 邱彤,谢华伟. FCV 氢源系统生命周期评价及其软件实现[J]. 计算机与应用化学, 2014, 21(1):16-18.
QIU Tong, XIE Huawei. Life Cycle Evaluation of FCV Hydrogen Source System and Its Software Implementation[J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 21(1):16-18.
- [6] 王菊,尤可为,于丹. 燃料电池公共汽车在北京和上海载客示范评价[J]. 汽车技术, 2013(10):19-22.
WANG Ju, YOU Kewei, YU Dan. Fuel Cell Bus Demonstration in Beijing and Shanghai[J]. Automobile Technology, 2013(10):19-22.
- [7] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会.
• 2552 •

《中国制造 2025》重点领域技术路线图推进项目 [M]. 北京:机械工业出版社, 2017:161-178.

- Strategic Advisory Committee on Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles. “China made 2025” Key Areas of Technology Roadmap to Promote Projects [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2017: 161-178.
- [8] Universiteit Leiden. CML-IA Characterisation Factors [EB/OL]. (2016-09-05). [2017-06-19]. <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/databases/cmlia/cmlia.zip>.
 - [9] LOMBARDI L, TRIBIOLI L, COZZOLINO R, et al. Comparative Environmental Assessment of Conventional, Electric, Hybrid, and Fuel Cell Powertrains Based on LCA [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2017(1):1-18.
 - [10] SIMONS A, BAUER C. A Life-cycle Perspective on Automotive Fuel Cells [J]. Applied Energy, 2015, 157(10):884-896.
 - [11] DUCLOS L, LUPSEA M, MANDIL G, et al. Environmental Assessment of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Platinum Catalyst Recycling [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 142: 2618-2628.
 - [12] MIOTTI M, HOFER J, BAUER C. Integrated Environmental and Economic Assessment of Current and Future Fuel Cell Vehicles[J]. International Journal of Cycle Assessment, 2017, 22 :94-110.
 - [13] LEE Y D, A K Y, MOROSUK T, et al. Environmental Impact Assessment of a Solid-oxide Fuel-cell-based Combined-heat-and-power-generation System[J]. Energy, 2015, 79: 455-466.
 - [14] PAPASAVVA S, KIA S, CLAYA J, et al. Life Cycle Environmental Assessment of Paint Processes[J]. Journal of Coatings Technology, 2002, 74 (925):65-76.
 - [15] 李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 长春:吉林大学, 2014.
LI Shuhua. Life Cycle Analysis and Environmental Benefit Evaluation of Electric Vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
 - [16] BURNHAM A, WANG M, WU Y. Development and Application of GREET 2.7—The Transportation Vehicle-cycle Model [R]. Chicago: Argonne National Laboratory, 2006.
 - [17] 侯明,衣宝廉. 燃料电池的关键技术[J]. 科技导报, 2016, 34(6):52-61.
HOU Ming, YI Baolian. Key Technology of Fuel Cell [J]. Science & Technology Review, 2016, 34 (6):52-61.

(下转第 2564 页)

- ing, 2011, 133(2): 379-399.
- [7] BENO T, HULLING U. Measurement of Cutting Edge Temperature in Drilling [J]. Procedia CIRP, 2012, 3(1): 531-536.
- [8] NASKAR A, CHATTOPADHYAY A K. Investigation on Flank Wear Mechanism of CVD and PVD Hard Coatings in High Speed Dry Turning of Low and High Carbon Steel[J]. Wear, 2018, 396/397: 98-106.
- [9] ZHENG L J, WANG C Y, FU L Y, et al. Wear Mechanisms of Micro-drills During Dry High Speed Drilling of PCB[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(10): 1989-1997.
- [10] MUSFIRAH A H, GHANI J A, CHEHARON C H. Tool Wear and Surface Integrity of Inconel 718 in Dry and Cryogenic Coolant at High Cutting Speed [J]. Wear, 2017, 376/377: 125-133.
- [11] 李安海, 赵军, 罗汉兵, 等. 高速干铣削钛合金时涂层硬质合金刀具磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 40-46.
- LI Anhai, ZHAO Jun, LUO Hanbing, et al. Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools in High-speed Dry Milling of Titanium Alloy [J]. Tribology, 2012, 32(1): 40-46.
- [12] 张应, 曹华军, 朱利斌, 等. 齿轮高速干切滚刀寿命预估模型与优化方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(21): 2614-2620.
- ZHANG Ying, CAO Huajun, ZHU Libin, et al. High-speed Dry Gear Hob Life Prediction Model and Optimization Method [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(21): 2614-2620.
- [13] 陈永鹏, 曹华军, 杨潇. 高速干切滚齿工艺滚刀切削刃载荷分布特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 181-187.
- CHEN Yongpeng, CAO Huajun, YANG Xiao. Research on Load Distribution Characteristic on the Cutting Edge in High Speed Gear Hobbing Process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 181-187.
- [14] YANG X, CAO H J, CHEN Y P, et al. An Analytical Model of Chip Heat-carrying Capacity for High-speed Dry Hobbing Based on 3D Chip Geometry[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2017, 18(2): 245-256.
- [15] SCHEY J A. Introduction to Manufacturing Processes [M]. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2000: 552-553.
- [16] 张洪潮, 孔露露, 李涛, 等. 切削比能模型的建立及参数影响分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(8): 1098-1104.
- ZHANG Hongchao, KONG Lulu, LI Tao, et al. SCE Modeling and Influencing Trend Analysis of Cutting Parameters [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(8): 1098-1104.
- [17] YAN S J, ZHU D H, ZHUANG K J, et al. Modeling and Analysis of Coated Tool Temperature Variation in Dry Milling of Inconel 718 Turbine Blade Considering Flank Wear Effect [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2985-3001.
- [18] KARPUSCHEWSKI B, KNOCH H J, HIPKE M, et al. High Performance Gear Hobbing with Powder-metallurgical High-speed-steel [J]. Procedia CIRP, 2012, 1(1): 196-201.
- [19] 全燕鸣, 何振威. 车削碳钢中切削热的分配[J]. 中国机械工程, 2006, 17(20): 2155-2158.
- QUAN Yanming, HE Zhenwei. Cutting Heat Distribution in Turning of Carbon Steel [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(20): 2155-2158.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 杨 潇, 男, 1987 年生, 讲师、博士。研究方向为高效环保加工工艺及理论。E-mail: yangxiao@cqu.edu.cn。

(上接第 2552 页)

[18] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 234-235.

DENG Nansheng, WANG Xiaobing. Life Cycle Assessment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 234-235.

[19] AHMADI P, KJEANG E. Realistic Simulation of Fuel Economy and Life Cycle Metrics for Hydrogen Fuel Cell Vehicles[J]. International Journal of Energy Research, 2016, 41(5): 714-727.

[20] 国家标准化管理委员会. GB/T 24044-2008 环境管理 生命周期评价 要求与指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

Standardization Administration of PRC. GB/T 24044-2008 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 陈轶嵩, 男, 1988 年生, 讲师、博士。研究方向为新能源汽车全生命周期评价、汽车产业规划与技术战略。出版专著 1 部, 发表论文 20 余篇。E-mail: chenysisong_1988@163.com。

丁振森(通信作者), 男, 1993 年生, 硕士研究生。研究方向为新能源汽车生命周期评价。发表论文 6 篇。E-mail: 571130429@qq.com。