

燃料电池汽车氢源基础设施的生命周期评价

冯文,王淑娟,倪维斗,陈昌和(清华大学热能工程系,北京 100084)

摘要:为了推动生命周期评价的应用和发展并为我国制定燃料电池汽车氢源基础设施的近期规划提供参考,根据现有的生产、储存和输运氢的技术,针对燃料电池汽车氢源基础设施,设计了 10 种可行方案,运用生命周期评价方法对这些方案的环境影响进行了全面评价,得到了每种方案的分类环境效应标准化指标,并对若干参数进行了敏感性分析。结果表明,环境性最好的燃料电池汽车氢源基础设施方案是:天然气集中制氢厂制氢,然后用管道将氢气输运到加注站,加注给以氢气为燃料的燃料电池汽车。

关键词:燃料电池汽车;氢源;基础设施;生命周期评价

中图分类号:X820.3 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)03-08-0008

Life Cycle Assessment of the Infrastructure for Hydrogen Sources of Fuel Cell Vehicles

Feng Wen, Wang Shujuan, Ni Weidou, Chen Changhe(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to promote the application of life cycle assessment and provide references for China to make the project of infrastructure for hydrogen sources of fuel cell vehicles in the near future, 10 feasible plans of infrastructure for hydrogen sources of fuel cell vehicles were designed according to the current technologies of producing, storing and transporting hydrogen. Then life cycle assessment was used as a tool to evaluate the environmental performances of the 10 plans. The standard indexes of classified environmental impacts of every plan were gotten and sensitivity analysis for several parameters were carried out. The results showed that the best plan was that hydrogen will be produced by natural gas steam reforming in central factory, then transported to refueling stations through pipelines, and filled to fuel cell vehicles using hydrogen gas at last.

Keywords: fuel cell vehicles; hydrogen sources; infrastructure; life cycle assessment

在环保和节能的双重压力下,发展清洁、节能的新型汽车不可避免地提上了汽车工业的议事日程。燃料电池汽车较好地满足了这一要求,从而成为全球汽车工业发展的一个新方向。燃料电池汽车的燃料是氢气,要实现其规模应用,必须首先建立氢气的生产、输运和供给系统,即氢源基础设施。设计并选择合适的氢源基础设施方案是发展燃料电池汽车的先决条件。

国际上,美国普林斯顿大学能源与环境研究中心(CEES)的 John M. Ogden^[1]以南加州为具体案例,从经济性的角度对燃料电池汽车氢源基础设施方案进行了评价。本文以北京为具体案例,首次从环境性的角度评价燃料电池汽车氢源基础设施方案。

根据现有的生产、输运和储存氢气的技术

路线^[2~8],本文设计了 10 种氢源基础设施方案,并在此基础上,运用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)这一重要的环境管理与分析工具,评价了各种方案的环境影响,选出了环境性最好的方案,并根据敏感性分析的结果,提出了一些改进方向。

1 LCA 的基本概念及方法

1.1 LCA 的基本概念

LCA 是一种评价产品、工艺过程或活动的整个生命周期环境影响的分析工具。

国际标准化组织(ISO)对 LCA 的定义^[9]:

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2001 AA501986)

作者简介:冯文(1978~),男,硕士研究生,主要研究方向为能源领域的产品生命周期评价。

收稿日期:2002-08-22;修订日期:2002-11-19

汇总和评估一个产品(或服务)体系生命期间的所有投入及产出对环境造成的和潜在的影响的方法.

1.2 LCA的方法和技术框架

根据国际环境毒理学和化学学会(SETAC)的权威专著^[10],LCA由4个相互关联的阶段组成.初始化:目标定义和范围界定(Goal and Scope Definition);清单分析(Inventory);影响评价(Impact Assessment)和改善评价(Improvement Assessment).

2 案例选择和方案设计

氢源基础设施方案环境性的评价结果与其实施时间和地点密切相关,应针对具体案例进行评价.参考我国的燃料电池汽车商业化计

划^[11],选择北京为具体案例,以为2008年建成的燃料电池公共汽车(Fuel Cell Bus,FCB)车队提供氢源为目标,设计出可行的氢源基础设施方案,并对其环境性进行评价.

燃料电池汽车氢源基础设施按氢气的流动顺序在空间上可以分为4个独立的子系统,从上游到下游依次是:制氢子系统、输运子系统、加注站子系统和终端利用子系统.各子系统可以采用不同的技术路线来实现,将各子系统的不同技术路线组合起来,即得到氢源基础设施的不同方案.根据现有的生产、输运和储存氢气的技术路线,并考虑到各子系统可供选择的设备^[12]和设备间的配套与衔接,本文共设计出10种氢源基础设施方案,见表1.

表1 10种氢源基础设施方案

Table 1 The 10 kinds of plans of infrastructure for hydrogen sources of fuel cell vehicles

方案	制氢子系统	输运子系统	加注站子系统	终端利用子系统
1	集中制氢厂:天然气蒸汽重整	汽车运输:氢气钢瓶	氢气钢瓶储存	FCB车队:气氢
2	集中制氢厂:天然气蒸汽重整	管道运输:氢气	氢气储罐储存	FCB车队:气氢
3	集中制氢厂:天然气蒸汽重整	汽车运输:液氢储槽	液氢储槽储存	FCB车队:液氢
4	集中制氢厂:天然气蒸汽重整	汽车运输:氢化物	氢化物储存	FCB车队:氢化物
5	集中制氢厂:煤气化	汽车运输:氢气钢瓶	氢气钢瓶储存	FCB车队:气氢
6	集中制氢厂:煤气化	管道运输:氢气	氢气储罐储存	FCB车队:气氢
7	集中制氢厂:煤气化	汽车运输:液氢储槽	液氢储槽储存	FCB车队:液氢
8	集中制氢厂:煤气化	汽车运输:氢化物	氢化物储存	FCB车队:氢化物
9	加注站现场制氢:水电解	无	氢气储罐储存	FCB车队:气氢
10	车载制氢:甲醇制造厂	汽车运输:甲醇	甲醇储槽储存	FCB车队:甲醇

3 初始化

3.1 目标定义

以氢源基础设施向FCB提供1kg H₂为功能单位,比较各种方案20年(FCB的使用寿命^[13])内从含氢原材料开采到氢输送至燃料电池的全生命周期过程对环境的影响.

3.2 范围界定

明确评价目标后,必须对燃料电池汽车氢源基础设施系统及其边界进行界定,然后才能进行数据搜集和清单分析.

根据制氢子系统中氢气制备场所的不同,10种氢源基础设施方案可以分为3类:集中制氢厂制氢(方案1~8)、加氢站现场制氢(方案

9)和车载制氢(方案10).3类方案的系统及其边界如图1~3所示.

关于系统及其边界的说明、简化和假设如下:

(1)在空间上,系统包括从含氢原材料的开采到氢输送至燃料电池的所有环节;在时间上,系统包括每一空间环节从设备制造、场地建设到设备、场地的回收、废弃的所有过程;在对象上,系统包括以上所有空间环节和时间过程内的物质(原材料进入系统,污染物离开系统)和能量(天然气、煤、柴油、电进入系统,氢作为产品离开系统)流动.

(2)系统中,原材料包括天然气、煤、柴油、

水、硫酸、钢、铁、铝、镁、镍、水泥、橡胶和塑料, 能量包括一次能源(天然气、煤、柴油)和二次能源(电、氢), 污染物包括废气(SO_2 、 CO_2 、 NO_x 、 CO 、 CH_4 、烟尘)、废水和废渣。

(3) 系统的总物耗包括全生命周期内各环节的物耗(原材料), 系统的总能耗包括物耗对应的能耗(生产原材料消耗的能量)和过程(生产、回收等)对应的能耗, 系统的总污染物排放包括物耗对应的污染物排放(生产原材料产生的污染物排放)、能耗对应的污染物排放(生产二次能源(电)产生的污染物排放)和过程(生产、回收等)对应的污染物排放。

(4) 计算生产二次能源(电)产生的污染物排放时, 假设电能均来自燃煤火电, 平均能量转换效率为 30 %^[14]。

(5) 回收环节仅考虑钢、铁、铝、橡胶和塑料的回收, 且计算其净环境影响(将回收一定量材料的污染物排放与生产等量材料的污染物排放相减)。

(6) 系统中, 所有环节均未包括环境治理设备, 产生的污染物直接排放环境。



图 1 方案 1~8 的系统边界

Fig.1 System boundaries for plans(from 1st to 8 th)

4 清单分析

4.1 数据搜集原则

清单分析是生命周期评价的核心环节, 在这一环节需要搜集每种氢源基础设施方案全生命周期过程中相关设备、基建和工艺的物耗、能耗、污染物排放系数, 生产各种原材料的能耗、

污染物排放系数, 生产二次能源(电)的污染物排放系数等众多数据, 如何获得准确可靠而又符合我国国情的上述数据, 并建立各种方案的污染物排放清单, 是生命周期评价的重点和难点, 本文在搜集数据时遵循如下原则:

(1) 密切结合方案实施的时间(2008 年)和地点(北京), 考虑技术的时空性。

(2) 以国内各工业行业的数据为主, 国外的数据为辅。

(3) 在数据的简化、取舍上兼顾数据获得的难易程度和数据对结果影响的大小程度。



图 2 方案 9 的系统边界

Fig.2 System boundaries for plans 9th



图 3 方案 10 的系统边界

Fig.3 System boundaries for plans 10th

4.2 清单建立过程

设计方案时, 上游子系统的规模都由对应的下游子系统决定, 所以, 建立数据清单应按照从下游子系统到上游子系统的顺序, 即: 终端利用子系统→加注站子系统→输运子系统→制氢子系统, 最后将 4 个子系统的数据清单汇总, 即得到每种方案的数据总清单。

下面按 4 个子系统的顺序对建立数据清单的主要过程作必要说明。

(1) 终端利用子系统 2000 ~ 2030 年间,中国的城市公共汽车的年平均增长速度预计为 5 %^[15],北京市 1999 年的公共汽车总量为 8850 辆^[16],那么 2008 年北京市的公共汽车总量是 13730 辆,共计增加新车 4880 辆.假设在这些新车中有 10 % 是 FCB^[1],那么 2008 年北京的 FCB 车队的 FCB 数量是 488 辆,以 500 辆计。

氢气输运和储存方式不同,FCB 车型也不同,其燃料有氢气、液氢和氢化物 3 种.另外,对于方案 10,FCB 的燃料是甲醇,需附加车载甲醇重整器.本文在 FCB 选型时以氢气作燃料的车型^[13]为准,其它几种燃料方式对应的车型在其基础上进行改动即可。

(2) 加注站子系统 在终端利用子系统中,一辆 FCB 一天消耗氢气 120 Nm^3 ^[13];而一辆 FCB 的储氢量是 496 Nm^3 ^[13],所以,每辆 FCB 大约每 4 天加一次氢,又 FCB 车队的数量是 500 辆,可知每天平均有 125 辆 FCB 需要加氢(方案 10 将氢气流折算为甲醇量)。

北京市区共有个 8 个区,市中心(3 环以内)有 4 个区.根据北京市 LPG 和 CNG 加气站的情况(1999 年数据^[16]:LPG 站 3 个,CNG 站 1 个,对应 LPG 车 1600 辆,CNG 车 300 辆),假设 2008 年北京共建成加注站 4 个(三环和四环上各 2 个),则每个加注站平均每天有 31.25 辆 FCB 加氢,而每辆 FCB 的加氢量是 $120 \times 4 = 480 \text{ Nm}^3$,则每个加注站平均每天耗氢 15000 Nm^3 .考虑到汽车加氢情况存在的不确定性,假设加注站氢气的周转周期是 4 天,则加注站储氢设备的容量是 60000 Nm^3 (储氢容器氢气泄漏量归入上游环节,方案 10 将氢气流折算为甲醇量)。

氢的输运方式不同,氢在加注站的储存方式也不同(方案 10 为甲醇)。

(3) 输运子系统 根据加注站子系统的容量和储氢容器氢气泄漏量,可以确定输运子系统的运量(方案 10 为甲醇).假设集中制氢厂建设在北京近郊,距 4 个加氢站的距离都是

50 km;又因为加注站建设在三环和四环上,所以,输运方案不涉及铁路、水路和空中运输,只涉及公路运输或管道运输(方案 9 现场制氢,制氢设备在加注站,无输运子系统)。

(4) 制氢子系统 根据输运子系统的运量和储氢容器氢气泄漏量,可以确定制氢子系统的生产规模(方案 10 为甲醇).每种方案的制氢(甲醇)流程均采用国内或国际的成熟工艺。

4.3 清单汇总

将每种方案各个子系统的物耗和能耗清单汇总,得到物耗和能耗总清单,见表 2、表 3.根据每个子系统物耗、能耗、回收过程、生产过程的数据和相应的污染物排放系数^[17],求得其物耗、能耗、回收过程、生产过程对应的污染物排放,汇总,得到每个子系统的污染物排放清单;再将每种方案各个子系统的污染物排放清单汇总,得到污染物排放总清单,见表 4。

5 影响评价

根据氢源基础设施各方案的污染物排放总清单(表 4),运用荷兰莱顿大学环境科学中心(CML)的干预-效应方法^[18]对每种方案的环境影响进行评价。

5.1 方法简介

干预-效应方法将各种污染物对环境的影响划分为 18 种分类环境效应,并确立了其中 10 种分类环境效应(温室效应、人类毒性、光化学氧化、酸化、富营养化、臭氧层破坏、淡水生态毒性、海洋生态毒性、陆地生态毒性和非生物性资源消耗)的计算方法,目的是得到评价对象的量化的环境影响总指标.其步骤分为 3 步:

(1) 分类 建立分类环境效应与各种污染物的对应关系.各分类环境效应对应的污染物有若干种,选择其中一种污染物作为参照物,然后根据与参照物相比其它污染物对该分类环境效应的相对贡献值,给出其它污染物的分类系数(参照物的分类系数为 1)。

(2) 标准化 将各种污染物排放量换算为定量的分类环境效应标准化指标。

将各分类环境效应对应的污染物排放量乘以其分类系数再相加,得到各分类环境效应总

表 2 10 种方案的物耗总清单/ $10^3\text{t}\cdot 20\text{a}^{-1}$

Table 2 Material consumption inventory of the 10 plans/ $10^3\text{t}\cdot 20\text{a}^{-1}$

方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
天然气	137.73	137.73	141.05	136.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	210.43
蒸汽	379.83	379.83	388.97	377.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
煤	0.00	0.00	0.00	0.00	373.33	373.33	382.31	371.10	0.00	0.00
柴油	4.78	0.00	0.72	1.67	4.78	0.00	0.72	1.67	0.00	0.48
水	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1945.4	0.00
硫酸	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.41	0.00
钢	10.10	13.49	8.51	8.28	10.00	13.41	8.40	8.19	12.67	8.49
铁	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
铝	0.41	0.41	0.41	0.81	0.41	0.41	0.41	0.81	0.41	0.41
镁	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00
镍	0.00	0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00
水泥	0.43	0.43	0.44	0.43	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
橡胶	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
塑料	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78

表 3 10 种方案的能耗总清单(H_2)/ $\text{MJ}\cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Energy consumption inventory of the 10 plans(H_2)/ $\text{MJ}\cdot \text{kg}^{-1}$

方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
制氢气系统	173.55	165.58	212.49	164.02	282.65	278.43	324.79	273.03	674.62	264.29
输运子系统	5.08	2.25	0.76	1.78	5.08	2.25	0.76	1.78	0.00	0.51
加注站子系统	0.60	2.92	0.47	51.22	0.60	2.92	0.47	51.22	2.92	0.01
终端利用子系统	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93
总能耗	185.17	176.68	219.66	222.95	294.26	289.53	331.96	331.96	683.47	270.74

表 4 10 种方案的污染物排放总清单(H_2)/ $\text{kg}\cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Pollution emission inventory of the 10 plans(H_2)/ $\text{kg}\cdot \text{kg}^{-1}$

方案		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
废气	SO_2	0.062	0.053	0.160	0.182	0.130	0.132	0.232	0.252	0.616	0.083
	CO_2	16.659	15.761	26.573	28.222	37.664	37.807	48.243	49.257	59.532	21.244
	NO_x	0.059	0.048	0.103	0.114	0.084	0.079	0.130	0.140	0.316	0.074
	CO	0.022	0.020	0.019	0.023	0.016	0.014	0.013	0.017	0.020	0.021
	CH_4	0.072	0.072	0.074	0.072	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110
	粉尘	0.224	0.188	0.623	0.706	0.453	0.461	0.865	0.941	2.475	0.275
废水		1011	822	2950	3350	2124	2144	4122	4488	11882	1277
废渣		4783	3884	13994	15880	10071	10163	19562	21285	56340	6011

指标;然后把各分类环境效应总指标乘以其标准化系数(某一地域内参照物年排放量的倒数),得到各分类环境效应标准化指标.

(3)赋权汇总 依照各分类环境效应的轻重程度,定义其相对权重.根据权重将各分类环境效应标准化指标汇总,得到评价对象的环境影响总指标.

5.2 计算过程

(1)分类 本文考察的污染物共 3 类 8 种,即废气(SO_2 、 CO_2 、 NO_x 、CO、 CH_4 、粉尘)、废水和废渣.对于废水,由于数据有限,未得到其具体成分的清单;对于废渣,干预-效应方法还没有做出明确的规定,所以,目前只能将废气排放量换算为分类环境效应标准化指标.废水、废渣

排放量列在废气排放量换算的分类环境效应标准化指标之外,作为单独的指标考察各氢源基础设施方案的环境性。

废气中 6 种污染物引起的可计算的分类环境效应共有 5 种:温室效应、人类毒性、光化学氧化、酸化和富营养化,其参照物^[18]和对应污染物的分类系数^[18]见表 5。其它分类环境效应的计算有待于考察污染物的细化和干预效应方法的完善。

表 5 分类环境效应的参照物、标准化系数和分类系数

Table 5 Reference pollutants, normalization coefficients and classification coefficients of classified environmental impacts

分类环境效应	参照物	标准化系数 (1 E-14 年/ kg)	对应 污染物	分类系数
温室效应	CO ₂	2. 25	CO ₂	1. 000
			CH ₄	21. 000
人类毒性	1,4- DB	2. 01	SO ₂	1. 200
			NO _x	0. 780
			CO	0. 012
			粉尘	0. 820
光化学氧化	C ₂ H ₂	2200. 00	SO ₂	0. 048
			NO _x	0. 028
			CO	0. 027
			CH ₄	0. 006
酸化	SO ₂	334. 00	SO ₂	1. 200
			NO _x	0. 500
富营养化	PO ₄ ³⁻	774. 00	NO _x	0. 130

(2) 标准化 将各分类环境效应对应的污染物排放量(表 4)乘以其分类系数(表 5)再相加,得到各分类环境效应总指标(略);然后把各分类环境效应总指标乘以其标准化系数(由全世界 1995 年各参照物排放量^[18]算得,表 5),得到各分类环境效应标准化指标,见图 4。

(3) 赋权汇总 赋权是一个正在发展的研

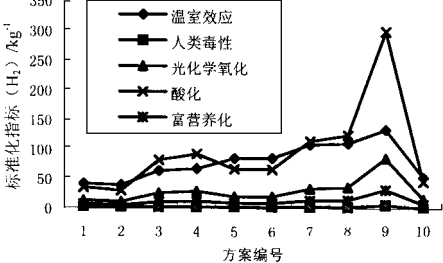


图 4 10 种方案的分类环境效应标准化指标

Fig. 4 Standard indexes of classified environmental impacts of the 10 plans

究领域,没有相应的国际标准和通用方法。本文仅列出各氢源基础设施方案分类环境效应标准化指标的一维矩阵,对这一多指标评价体系的赋权工作可以留给环境决策者、管理者在面对某一具体问题时权变地完成。

5.3 评价结果

(1) 方案 2 的各分类环境效应标准化指标和废水、废渣排放量均最小,是环境性最好的氢源基础设施方案。

(2) 方案 9 的各环境效应标准化指标和废水、废渣排放量均最大,是环境性最差的氢源基础设施方案。传统上认为水电解制氢具有最好的环境性,而本文得出与其完全相反的结论,是因为二者评价角度不同。传统观点仅考察水电解过程,而本文考察了包括电能生产在内的全生命周期过程。虽然水电解过程的污染物排放量几乎为零,但是从一次能源(如煤等)生产电解水所需电能的过程效率低下,对应的污染物排放量很大,所以,从全生命周期的角度考虑,水电解的环境性并不好,它只是将污染从水电解过程转嫁到了电能的生产过程。

(3) 从制氢子系统的角度来评价氢的 4 种制取方法,其环境性从好到差依次是:天然气蒸汽重整、甲醇车载重整、煤气化、水电解。

(4) 从输运子系统和加注站子系统的角度来评价氢的 4 种储运方法,其环境性从好到差依次是:管道输运(氢气)、钢瓶输运(氢气)、液氢储槽输运(液氢)、氢化物输运(氢化物)。液氢储槽输运和氢化物输运的环境性较差,是因为与之相关的氢气液化和气化过程、氢化物放氢和活化过程对应着大量的能量消耗,而生产这些能量将带来大量的污染物排放。

6 改善评价

6.1 控制分析

(1) 各种污染物的排放主要来自于输运子系统和制氢子系统,所以,要减少各种污染物的排放,输运子系统和制氢子系统是需要改进的核心环节。

(2) 温室效应的主要贡献来自 CO₂,人类毒性、光化学氧化和酸化的主要贡献来自 SO₂,富

营养化的主要贡献来自 NO_x , 所以, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 是需要首先治理的气态污染物。

(3) 对大部分技术路线来说, 最严重的环境影响是酸化, 其次是温室效应。结合上面的结论, SO_2 的治理是当务之急, 其次是 CO_2 。因为 SO_2 主要来自发电过程, 而我国生产的电能中火电占大部分, 所以对火电厂进行脱硫是非常必要的。

6.2 敏感性分析

为鉴别对研究结果影响较大的参数(情景), 明确方案的改进方向, 需要对每种氢源基础设施方案进行敏感性分析, 即考察一个参数独立于其它参数而变化时, 每种方案评价结果的相应变化, 以评估该参数在系统中的重要

本文选取如下 3 个参数的变化作敏感性分析: 制氢子系统直接能量效率提高 20%; 天然气蒸汽重整考虑可避免过程; 可再生能源发电电解水。

(1) 制氢子系统直接能量效率提高 20% 制氢子系统的直接能量效率等于制氢子系统所产生的氢气的能量与生产氢气所用到的一次能源能量的比值, 它反映了制氢子系统生产水平的高低。与基准方案相比, 制氢子系统的直接能量效率提高 20% (代表制氢子系统生产水平进步), 相当于制氢所用一次能源(水电解制氢中是二次能源电能)的数量变为基准方案的 5/6。

该参数对所有方案都有影响, 结果见表 6。

表 6 制氢子系统直接能量效率提高 20% 对分类环境效应的影响/ %

Table 6 Effects on classified environmental impacts by 20 % increase of the direct energy efficiency of hydrogen producing subsystem/ %

方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温室效应变化	- 12.27	- 12.91	- 8.12	- 7.46	- 12.44	- 12.40	- 9.95	- 9.46	- 15.65	- 4.01
人类毒性变化	- 2.40	- 2.87	- 0.95	- 0.82	- 2.65	- 2.64	- 1.48	- 1.32	- 15.52	- 2.86
光化学氧化变化	- 4.81	- 5.62	- 2.41	- 2.08	- 3.65	- 3.72	- 2.24	- 2.00	- 15.20	- 5.60
酸化变化	- 3.57	- 4.25	- 1.56	- 1.34	- 3.87	- 3.90	- 2.30	- 2.05	- 15.34	- 4.07
富营养化变化	- 4.42	- 5.44	- 2.58	- 2.27	- 3.15	- 3.38	- 2.09	- 1.88	- 14.98	- 5.02

从表 6 可看出, 直接能量效率的提高使得所有的分类环境效应标准化指标下降, 各方案对环境的危害程度都降低。对天然气重整方案和煤气化方案来说, 温室效应标准化指标下降的最多; 对于水电解方案, 所有的分类环境效应标准化指标都大幅下降。

(2) 天然气蒸汽重整考虑可避免过程 在天然气蒸汽重整制氢的生产过程中, 输出系统蒸汽的能量高于输入系统蒸汽的能量, 而基准方案中没有考虑对输出蒸汽的能量加以利用。所以, 把这部分能量加以利用, 是对天然气蒸汽重整方法进行改进的重要方向, 这就是“可避免过程”^[19] (如果对输出蒸汽的能量加以利用, 相当于在工业上避免使用了相应的蒸汽锅炉)。用高温高压饱和蒸汽与常温常压饱和水的焓差近似输入系统和输出系统蒸汽的能量, 就得到可避免过程可以节约的能量值。

该情景只对方案 1 ~ 4 有影响, 结果见表 7。

表 7 天然气蒸汽重整的可避免过程对分类环境效应的影响/ %

Table 7 Effects on classified environmental impacts by adopting the avoided operations in natural gas steam reforming/ %

方案	1	2	3	4
温室效应变化	- 15.24	- 16.04	- 10.09	- 9.26
人类毒性变化	- 45.78	- 54.58	- 18.17	- 15.60
光化学氧化变化	- 31.19	- 36.47	- 15.62	- 13.48
酸化变化	- 39.40	- 46.98	- 17.19	- 14.76
富营养化变化	- 24.02	- 29.54	- 14.01	- 12.33

从表 7 可看出, 天然气蒸汽重整考虑可避免过程, 分类环境效应标准化指标均大幅下降。

(3) 可再生能源发电电解水 由于基准方案中假设水电解制氢的电能来自于燃煤火电, 水电解制氢方案的环境性很差, 可以推测, 如果电能来自于可再生能源, 如水电、风电等, 上述情况应该有较大变化。基于此, 作敏感性分析, 假设水电解制氢的电能来自于可再生能源, 其它因素不变, 可再生能源发电的能量转换效率

视为 100 %.

该情景只对方案 9 有影响,结果见表 8.

表 8 利用可再生能源发电电解水对分类环境效应的影响/ %

Table 8 Effects on classified environmental impacts by electrolyzing water with the electricity from renewable energy/ %

方案	温室效应变化	人类毒性变化	光化学氧化变化	酸化变化	富营养化变化
9	- 65.72	- 65.17	- 63.83	- 64.45	- 62.93

从表 8 可看出,如果能够实现利用可再生能源电力电解水,分类环境效应标准化指标均下降了 60 %左右.这说明,在可再生能源丰富的地区,从环境保护的角度来衡量,水电解制氢的方案也具有相当的竞争力.

7 小结

(1) 环境性最好的氢源基础设施方案为方案 2(天然气集中制氢厂制氢,用管道运输氢气到加氢站,储于高压钢瓶,然后加注到以氢气为燃料的 FCB),其分类环境效应标准化指标(单位:1 E-14 年/kg H₂)的一维矩阵是温室效应,人类毒性,光化学氧化,酸化,富营养化(38.865, 0.512, 10.621, 29.106, 4.795).

(2) 各种制氢方案的环境性为天然气蒸汽重整优于煤气化;煤气化优于电解水;甲醇车载重整比天然气蒸汽重整制氢+钢瓶或管道运输差,但比天然气蒸汽重整制氢+液氢或氢化物运输好.

(3) 各种运输方案的环境性为钢瓶和管道运输明显优于液氢和氢化物运输.

(4) 根据敏感性分析的结果,对氢源基础设施方案环境性影响较大的参数(情景)有天然气蒸汽重整的可避免过程,电解水的电能来源.这些参数从环境保护的角度指明了燃料电池汽车氢源基础设施的一些改进方向.

参考文献:

1 Joan M Ogden. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles:a South California case study[J]. Int. Journal of Hydrogen Energy,1999,24: 709 ~ 730 .
2 化工百科全书编辑部.化工百科全书第 13 卷[M].北京:化学工业出版社,1998.53 ~ 114 .
3 毛宗强,陈霖新. PEM 燃料电池用氢气的制取、储运方式初探[J].工厂动力,2000,3:22 ~ 35 .

4 Lee F Brown. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles[J]. Int. Journal of Hydrogen Energy,2001,26:381 ~ 397 .
5 Kirk Othmer. “Hydrogen”, Encyclopedia of Chemical Technology,4th edition, Vol.13: Helium Group to Hypnotics[M]. New York: John Wiley & Sons,1991.566 ~ 569 .
6 Kirk Othmer. “Pipelines”, Encyclopedia of Chemical Technology,4th edition, Vol.13: Helium Group to Hypnotics[M]. New York: John Wiley & Sons,1991.1483 ~ 1484 .
7 Amos W. Cost of storing and transporting hydrogen(NREL/TP-570-25106)[R]. National Renewable Energy Laboratory,1998.12 ~ 14 .
8 Joan M Ogden et al. A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicles design and infrastructure development[J]. Journal of Power sources,1999,79:143 ~ 168 .
9 ISO. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework[S](ISO 14040).1997.1 ~ 3 .
10 Consoli F, Allen D, Boustead I et al. Guidelines for life cycle assessment: A code of practice[M]. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 1993.1 ~ 3 .
11 Zongqiang Mao, Zhengmin Zhang, Linxin Chen, Shuhua Gu. The feasibility of fuel cell bus commercialization in China [A]. Veziroglu, Zongqiang Mao. Hydrogen energy progress XIII: Proceedings of the 13th world hydrogen energy conference[C]. Beijing: CICCST, 2000. 110 ~ 115 .
12 国家机械工业局.中国机电产品目录第 6 册[M].北京:机械工业出版社,2000.309 ~ 522 .
13 Leslie Eudy, Richard Parish. Hydrogen fuel cell bus evaluation (NREL/CP-570-30535) [R]. National Renewable Energy Laboratory,2001.4 ~ 7 .
14 国家统计局工业交通统计司.中国能源统计年鉴 1997 ~ 1999 年卷[M].北京:中国统计出版社,1999.10 ~ 11 .
15 Qiming Zhu, Jinlu Li, Junmei Wei. Production and utilization of hydrogen in China- current and prospectus situations[A]. Veziroglu, Zongqiang Mao. Hydrogen energy progress XIII: Proceedings of the 13th world hydrogen energy conference [C]. Beijing: CICCST, 2000. 105 ~ 110 .
16 北京市统计局.北京统计年鉴 1999 年卷[M].北京:中国统计出版社,1999.300 .
17 国家环境保护局科技标准司.工业污染物产生和排放系数手册[M].北京:中国环境科学出版社,1996.64 ~ 153 .
18 Centre of Environmental Science (CML). Life Cycle Assessment: an operational guide to ISO standards[M]. Netherlands: Leiden University, 2000.20 ~ 45 .
19 Pamela L Spath, Margaret K Mann. Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming (NREL/TP-570-27637) [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2001.5 ~ 6 .