

氨载氢技术经济性分析

安恩科, 张 伟

(同济大学 热能与环境工程研究所, 上海 201804)

摘要: 液氨作为一种含氢质量分数为 17.6% 的富氢物质, 是氢能的理想载体. 从目前氢气存储和运输的瓶颈问题出发, 设计了以液氨为储氢和输氢载体的供氢方案, 并以单位质量的氢气供应成本做为评价指标, 对该路线与天然气、电解水和甲醇裂解制氢供氢路线进行了经济性的比较分析. 结果表明, 在中等制氢规模和近距离运输的模式下, 氨载氢供氢方案一次投资单位供氢成本仅为 $51.2 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显低于其他制氢路线, 具有较强的经济性和技术可行性.

关键词: 氨载氢; 方案设计; 供氢成本; 经济性分析
中图分类号: TK 91 **文献标识码:** A

Tech-economic Analysis of Ammonia as Hydrogen Carrier for Transportation and Production

AN Enke, ZHANG Wei
(Institute of Thermal Energy and Environment Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ammonia is a sort of hydrogen-rich material with hydrogen content of 17.6%. Considering the bottleneck problems of hydrogen storage and transportation to date, this paper designs a hydrogen supply pathway with ammonia carrier as the agent of hydrogen storage and transport. Using supply cost of 1 kg hydrogen as economic indicator, through economic analysis and comparison with nature gas reforming, water electrolysis and methanol decomposition pathways, we come the conclusion that on medium hydrogen production scale and in short distance transportation circumstance, the supply cost of ammonia as hydrogen carrier pathway is $51.2 \text{ yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$, obviously lower than the other threes, showing good performance on economic aspect.

Key words: ammonia carrier; pathway design; hydrogen supply cost; economic analysis

氢能源以其可再生性和良好的环境效应成为未来最具发展潜力的能源载体. 高效、安全经济的氢气储存和输运是目前制约氢能技术发展的瓶颈问题之一. 目前高压储氢是世界上最常用的氢气储存方式, 但由于氢气的密度很小, 所需储氢压力很高, 安全性差, 储氢效率很低, 而且需要消耗额外的能量, 同时对储氢材料材质也有十分苛刻的技术要求, 如在 $3.5 \times 10^7 \text{ Pa}$, 298 K 的条件下, 每压缩 1 kg 的氢需要消耗 $2.2 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电量, 而质量储氢效率仅为 3% 左右, 储氢成本大约为每公斤 40~500 美元^[1]; Odgen 等通过案例研究认为, 管道高压输氢成本为 $12 \sim 40 \text{ 美元} \cdot \text{GJ}^{-1}$, 液氢槽车运输成本也为 $12 \sim 40 \text{ 美元} \cdot \text{GJ}^{-1}$ ^[2]. 显然, 氢气的运输经济性和安全问题影响到供气站的建设, 成为发展和推广燃料电池汽车的瓶颈. 氨作为一种含氢质量分数达到 17.6% 的富氢物质, 在常温加压 (0.86 MPa) 或常压低温 (240 K) 下很容易转化为液态, 其对应的能量密度分别为 $134.0 \text{ kJ} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $143.5 \text{ kJ} \cdot \text{L}^{-1}$ (同等条件下氢气的能量密度为 $84.0 \text{ kJ} \cdot \text{L}^{-1}$), 便于储存 (低压储罐或者钢瓶) 和运输, 因此是氢气的理想载体.

由于氨裂解制氢工艺技术成熟, 制取的氢气纯度达到 99.99%, 可满足质子交换膜燃料电池汽车 (PEMFC) 系统的要求, 因而集成氨载氢与氨分解制氢技术是一条潜在的供氢途径, 可以为将来加氢站和燃料电池分散电站提供氢源.

根据上述分析, 本文设计了一条以液氨为储能载体的输运方案, 分析比较了该输送方案与天然气重整制氢、水电解制氢、甲醇重整制氢 3 种输送路线的经济性, 探讨了该方式的技术可行性, 期望为能源政策制定者在氢源供应体系选择上提供一种理想的解决途径.

收稿日期: 2009-06-15
作者简介: 安恩科(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为电站锅炉燃烧理论与新能源技术. E-mail: axa@tongji.edu.cn

1 氨载氢供应方案设计

液氨做为重要的农业基础产品和化工原料,已有近百年的历史,生产技术成熟.氨的存储运输既可通过传统的公路低压槽车、水路罐船驳船等输送方式实现中小规模短距离运输,也可以经由铁路罐车甚至现有的管网输送,可见氨的供应网络齐全,基础设施建设也非常完备,因此氨载氢技术在理论上具有可行性.设计的以液氨为储能载体,在加氢站制氢供氢的方案见图 1.



图 1 氨载氢供氢方案
Fig.1 Ammonia as a hydrogen carrier supply chain

与上述氨载氢供氢方案相比较,天然气重整制氢供氢、水电解制氢和甲醇重整制氢供氢路线见图 2.此 3 条路线均采用气态氢气高压拖车运输.拖车运输系统由拖车车头、整车托盘和十几根长管形管状储存容器组成,由于 4 条路线用户终端相同,均为燃料电池汽车或公交车提供加注服务,因此本文在供氢路线经济性分析部分不考虑氢气加注阶段设备投资引起的供氢成本变化.

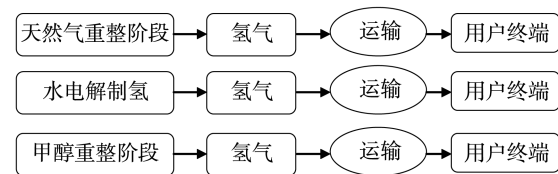


图 2 传统供氢路线
Fig.2 Conventional hydrogen supply chain

需要说明的是,虽然氨载氢输送模式的运输阶段成本显著低于其他 3 条路线,但该供氢路线需要额外的站内氨裂解制氢设备的投资成本,因而需要从总成本投资和单位供氢成本角度定量分析各路线的经济性.

2 供应路线经济性分析

2.1 基本假设条件

由于加氢站的规模需要由氢气需求量确定,因此假设上述 4 种路径的加氢站供氢规模取 100~500 kg·d⁻¹.

液氨采用低压槽车运输的方式为加氢站提供氢

源(站内),站外制取的氢气采用高压管束拖车运输的方式,运输阶段主要假设条件见表 1^[3].

表 1 运输阶段主要假设条件
Tab.1 Main assumptions of transportation stage

运输方式	平均运距/km	运输车容量/kg	利用率/%	燃料经济性/(L·(100 km) ⁻¹)
氢气运输	50	320	80	34
液氨运输	67	800	90	20

依据加氢站供氢规模,站内站外制氢、储氢主要设备的成本见表 2^[4-6].假设各设备的折旧年限均为 10 年,残值取 5%,设备的折旧费用包含在年运行成本中.

表 2 主要设备价格
Tab.2 Main devices cost

设备名称	性能参数	价格/万元
氨裂解装置	300 m ³ ·h ⁻¹	3
变压吸附(PSA)装置	8.86 kg·h ⁻¹	49
天然气重整装置	8.86 kg·h ⁻¹	215
水电解装置	2.66 kg·h ⁻¹	105
甲醇重整装置	4.12 kg·h ⁻¹	60
储氢高压罐	193 kg	126
膜片式压缩机	17 kg·h ⁻¹	140

天然气重整效率、甲醇重整效率、水电解效率和氨分解效率分别取 70%,75%,70% 和 90%^[7].原料、燃料价格和电力价格见表 3.

表 3 原料燃料价格
Tab.3 Cost of feedstock and fuel

原料	价格
液氨	2 400 元·t ⁻¹
天然气	2.3 元·m ⁻³
甲醇	2500 元·t ⁻¹
电力	0.68 元·(kW·h) ⁻¹
燃料油	5.0 元·L ⁻¹

高压气态氢运输和氨载体运输阶段主要设备成本和操作压力见表 4^[3].另外,假定加氢站雇员人数为 10,年薪均为 6 万元.

表 4 运输阶段设备成本和操作压力比较
Tab.4 Comparison of devices cost and operating pressure in transport stage

供氢路线	运输设备成本/万元			操作压力/MPa
	运输车	卸载设备	拖车车头	
传统路线	120.0	48.0	7.2	35.0
氨载氢路线	3.5	48.0	7.2	0.8

2.2 经济性分析

为了比较的直观性,本文选用单位质量氢气的供应成本做为经济性评价的指标.由于用户终端相同,因此不考虑加注阶段设备投资折算到氢气供应上的成本.运输模式采用“点对点”情景方式,即液氨(氢气)的生产地和加氢站分属两地,加氢站的供氢规模为 $500\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$.不考虑土地租金费用、土建保险等费用,供氢方案一次性投资总成本 C_T 由固定资产成本 C_d 、运行成本 C_o 、原料成本 C_f 和运输成本 C_t 组成,即

$$C_T = C_d + C_t + C_o + C_f \tag{1}$$

则单位供氢成本为

$$C_h = C_T/S_h \tag{2}$$

式中: S_h 为年氢气供应量.

氨裂解制氢工艺具有安全性好、附加值低和分解产物不含 CO_x 杂质等优点,理论情况下,单位体积氨分解可制得 1.5 倍体积的氢气,高于电解水、甲醇重整等制氢体系.根据氨裂解装置实际运行数据^[4],单位质量的液氨大约可生产 1.8 m^3 的氢气,液氨裂解制氢的电力消耗为 $0.85\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$,液氨消耗为 $0.55\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,运输成本约 $0.5\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$.氨载氢供氢方案及在同等的供氢规模下,天然气重整制氢供氢、水电解制氢供氢和甲醇分解制氢供氢路线的一次性固定资产投资、运行、原料、运输成本以及单位质量氢气供应成本计算结果见表 5.

表 5 供氢方案成本分析
Tab.5 Supply cost of ammonia as hydrogen carrier mode

供氢路线	固定资产投资	原料成本	运行成本	运输成本	总成本	供氢成本/(元·kg ⁻¹)
氨载氢路线	367	270	240	56	933	51.20
天然气重整路线	705	337	272	111	1 425	78.10
水电解路线	595	0	958	0	1 553	85.10
甲醇裂解路线	550	743	257	111	1 661	91.03

3 结果讨论

3.1 运输成本分析

从表 5 中可以看出,当加氢站的日供氢规模为 500 kg 时,采用液氨做为富氢载体的运输模式的年运输成本为 56 万元,仅为高压气态氢运输成本的 1/2 左右,因此在中等制氢规模和近距离运输条件下,氨载氢供氢路线不仅在经济上可行,而且在安全性方面也避免了高压管束车在运输途中的氢气泄露和氢脆等问题.

3.2 总成本和供氢成本分析

从表 5 可以看出,氨载氢供应路线无论在固定资产投资和运行成本上,均要优于其他 3 条路线.同时从单位质量氢气供应成本上来看,氨载氢体系的单位供氢成本为 51.2 元,分别仅为天然气重整路线、电解水路线和甲醇重整路线的 65.1%,60.1%和 56.1%.所以液氨做为理想的储氢物质,不仅可以解决氢气运输、存储的瓶颈问题,而且在中等供氢规模的条件下,氨载氢系统的经济性要优于本文设计的其他路线.

3.3 技术可行性分析

我国天然气资源主要分布在中西部盆地,相对

于煤炭资源而言,天然气资源储量有限,可采年限约为 70 年.目前以天然气为原料的大规模制氢技术比较成熟,适合天然气储量比较丰富地区的生产利用,如四川、重庆等地,而天然气中小规模制氢供氢技术因一次设备投资较大,生产过程中 CO_2 排放较高,制约了该技术在东部沿海地区的使用.

水是可再生的制氢资源,电解水制氢的理论电耗约为 $2.94\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$,但实际生产过程,单位体积氢气的电耗约为 $4.5\sim 6.0\text{ kW}\cdot\text{h}$,电费占到制氢运行成本的 80%以上,电量消耗较大.美国 GM 公司曾依据现有技术对制氢技术进行了经济评估,认为电解水单位质量制氢成本约为每公斤 12.12 美元,显然电解水制氢工艺在经济性方面不具备竞争性.我国的电力生产主要是以煤为原料的火力发电,煤电转换效率约为 30%~35%,因此从社会系统的能源利用角度来看,从煤→蒸汽→汽轮机发电(交流电)→输变电整流(直流电)→水电解→氢气→加压储存的电解水制氢过程,能源利用效率很低.

氨做为重要的工业、农业基础性原料,其产业链的发展已近 100 余年,基础设施建设齐全,液氨的运输方式也呈现多元化和网络化.氨裂解制氢技术已经实现商业化,主要应用于浮法玻璃生产行业和金属粉末加工行业.目前氨裂解制氢的最大生产能力

为 $320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 氨分解率可达 99.9%, 分解后的混合气可通过钯膜分离法或变压吸附(PSA)法纯化, 制取高纯度氢气. 另外, 从原材料供应条件来看, 我国是合成氨生产和消费的大国, “富煤、贫油、少气”的能源结构特征, 保证了煤→氨→氢路线的可持续性. 因此, 本文设计的氨载氢供氢方案利用了液氨来源丰富、运输简单低廉和裂解制氢技术成熟的优点, 解决了高压气态氢运输基础设施投资过大、危险系数较高的难题. 从技术层面角度分析, 集成氨载氢与氨分解制氢技术将是一条理想的供氢途径.

4 结论

氢气的高效存储和安全运输技术是发展氢燃料电池汽车的关键因素之一. 氨做为含氢质量分数为 17.6% 的富氢物质代替高压气态氢的运输和存储, 不仅解决了高压气态氢运输的难题, 而且能方便地通过裂解制氢装置制取氢气. 本文从固定资产投资、运行成本、原料成本和运输成本角度, 对比分析了氨载氢供氢路线和天然气重整、电解水和甲醇重整制氢供氢路线的单位质量氢气的供应成本, 认为以液氨为载体的供氢方案经济性优于其他 3 种路线, 技术上也简单、可靠、易行, 因此, 以液氨为载体的氢气

运输技术是中短期内解决氢气运输和加氢站氢源问题的理想选择.

参考文献:

- [1] 倪萌, Leung M K H. 氢存储技术[J]. 可再生能源, 2005, 1: 35.
NI Meng, Leung M K H. Hydrogen storage technology [J]. Renewable Energy, 2005, 1: 35.
- [2] Ogden J M. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles; a southern California case study [J]. Hydrogen Energy, 1999, 24: 709.
- [3] 刘绍军, 马建新, 周伟, 等. 小型加氢站网络的成本分析[J]. 天然气化工, 2006, 31: 44.
LIU Shaojun, MA Jianxin, ZHOU Wei, et al. Cost analysis for a mini-network of hydrogen refueling stations [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2006, 31: 44.
- [4] 奚永龙. 新型氨分解制氢装置[J]. 上海化工, 1992, 9: 9.
XI Yonglong. New installation for hydrogen production via ammonia decomposition [J]. Shanghai Chemical, 1992, 9: 9.
- [5] Meysam Qadrdan, Jalal Shayegan. Economic assessment of hydrogen fueling station, a case study for Iran [J]. Renewable Energy, 2008, 33: 2525.
- [6] 薛福连. 甲醇制氢技术的经济性[J]. 甲醛与甲醇, 2003, 4: 21.
XUE Fulian. Cost research of hydrogen production from methanol [J]. Formaldehyde and Methanol, 2003, 4: 21.
- [7] Zamfirescu C, Dincer I. Using ammonia as a sustainable fuel [J]. Power Sources, 2008, 185: 459.
- [4] Radovan DOLE ČK, Jaroslav NOVÁK, Ondřej ČERNÝ. Traction permanent magnet synchronous motor torque control with flux weakening [J]. Radioengineering, 2009, 18(4): 601.
- [5] 刘春光, 臧克茂, 马晓军. 电传动装甲车辆用永磁同步电动机的弱磁控制算法[J]. 微特电机, 2007(4): 27.
LIU Chunguang, ZANG Kemao, MA Xiaojun. Research on flux-weakening control of PMSM for electric drive armored vehicle [J]. Small & Special Electrical Machines, 2007(4): 27.
- [6] 勒立强, 王庆年, 张缓缓. 电动轮驱动汽车差速性能试验研究[J]. 中国机械工程, 2007(21): 2632.
JIN Liqiang, WANG Qingnian, ZHANG Huanhuan. Experimental study on the differential capability of motorized wheels driving vehicles [J]. China Mechanical Engineering, 2007(21): 2632.
- [7] Junya Yamakawa, Keiji Watanabe. A method of optimal wheel torque determination for independent wheel drive vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 2006(43): 269.
- [8] 徐希民, 黄宗益. 铲土运输机械机械[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
XU Ximin, HUANG Zongyi. Design of scraper conveyor machine [M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [9] 同济大学, 西安冶金建筑学院, 哈尔滨建筑工程学院. 工程机械底盘构造与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980.
Tonji University, Xi'an Institute of Metallurgy and Architecture, Harbin Institute of Architectural and Engineering. Construction and design of the chassis of construction machinery [M]. Beijing: China Architecture and Building Industry Press, 1980.

(上接第 1370 页)