



中国车用氢能潜力分析

邓学, 王贺武, 黄海燕

清华大学机械工程学院; 汽车安全与节能国家重点实验室; 中国车用能源研究中心, 北京 100084

摘要 分析了中国氢气应用和生产的现状, 利用实际工业生产数据, 根据工业氢气制取、转化的应用原理, 得出了中国氢气消费总量与相关化工产品产量的数量关系, 确定了目前中国工业氢气的生产能力和副产氢资源。采用情景分析方法, 预测了 2050 年前燃料电池汽车发展对应的氢能需求及面临的供应选择。分析结果表明, 根据目前中国的规模化工企业的生产现状, 每吨合成氨耗氢量 178.18~182.44kg, 每吨甲醇耗氢量 126.45~142.26kg, 根据 2007 年中国合成氨和甲醇的产量, 对应氢气消费量分别达 920 万吨和 130 万吨。根据中国炼油加氢工艺耗氢量和近年加氢裂化和加氢处理加工量, 耗氢量达 180 万吨。合计中国工业氢气消费量超过 1200 万吨, 年均增长速度 9%。此外, 中国是世界重要的烧碱、钢铁和焦炭生产大国, 根据每生产 1 吨烧碱副产 270m³ 氢气, 氯碱工业每年副产氢气约 41.57 万吨, 同时 1m³ 的焦炉煤气可制取约 0.44m³ 的氢气, 中国焦炉煤气蕴含 563.86 万吨的副产氢资源。合计超过 600 万吨的副产氢资源可供应 686 万辆燃料电池大客车或 2703 万辆乘用车的运行, 是未来重要的车用氢能来源。通过设定缓慢、中等、快速发展情景假设, 中国副产氢资源可满足燃料电池汽车在缓慢情景下到 2050 年对氢能的需求, 在中等和快速发展情景下分别支持到 2046 年和 2040 年对氢能的需求。

关键词 氢能; 副产氢气; 供应潜力; 车用能源; 燃料电池汽车

中图分类号 TK91

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)09-0096-06

China's Hydrogen Supply Potential for Automotive Transportation

DENG Xue, WANG Hewu, HUANG Haiyan

State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy; China Automotive Energy Research Centre; School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract This paper analyzes the present state of industrial hydrogen production and application in China. Based on the industrial data and the basic theory of hydrogen production and conversion, a detailed evaluation of production capacity and by-product hydrogen resource is made, taken into account of the production of related chemicals including ammonia, methanol and petroleum products. Besides, the future hydrogen demands for the fuel cell vehicles by the year 2050 are analyzed with the scenario method, compared with the present hydrogen production capacity in China. Analysis results show that the present hydrogen consumption in China has reached to 12 million ton in 2007, with average annual growth rate of about 9%, most of which is used in three chemical industries, including ammonia, methanol and oil refinery. In the ammonia synthesis plants, to produce one ton of ammonia would consume, on average, 178.18~182.44kg hydrogen, and in the methanol plants the mean hydrogen consumption is 126.45~142.26kg. So the corresponding hydrogen consumption is 9.2 million ton and 1.3 million ton in ammonia and methanol synthesis processing, respectively. Besides, the 1.8 million ton hydrogen consumption could be deduced from Chinese hydro-cracking/hydro-treating ability for oil-refinery and the industrial data of hydrogen-consumption in each corresponding processing. Moreover there is also 6 million ton by-product hydrogen gas, which could be obtained during the carbonization process or the sodium hydroxide producing. While the by-product hydrogen is utilized in vehicles by means of fuel cell or internal combustion engine technologies, it could replace about 16 million ton of gasoline, or feed at least 6.86 million FCB (Fuel Cell Buses) or 27.03 million FCPV (Fuel Cell Passenger Vehicles) in the future. Finally, three scenarios of high-, mid- and slow-growth are defined to analyze the hydrogen supply and demand for vehicle. Under the slow-growth scenario, the by-product hydrogen gas

收稿日期: 2009-12-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA11A157)

作者简介: 邓学, 硕士研究生, 研究方向为氢能路径, 电子信箱: dengx02@163.com; 王贺武(通信作者), 副教授, 研究方向为汽车技术及战略, 电子信箱: wanghw@tsinghua.edu.cn

合成过程中惰性气体的积累导致反应变缓甚至反应终止,需要从系统中连续排放含有惰性气体和氢气等成份的弛放气,因而将增加相应的氢气消耗量。

以目前国内规模最大的煤制甲醇项目——山东兖矿国宏化工有限责任公司的煤制甲醇合成工艺为例,年产 50 万吨甲醇的装置,弛放气流量 3780Nm³/h,每年系统累计运行 8000h^[8],年弛放气为 3024 万 Nm³,该弛放气的成分见表 3^[9]。

表 3 弛放气主要成分

Table 3 Compositions of periodic off-gases

成分	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	CH ₄	CH ₃ OH	Ar
含量/%	26.7	19.5	1.8	34.8	8.9	0.1	8.2

根据装置的物料平衡,每吨甲醇耗氢量将包括发生反应的氢气和弛放气中的氢气两部分: $m_{H_2}=\frac{m_H}{m_{CH_3OH}}\times1000+\frac{3024}{50}\times26.72\times\rho_{NH_3}=126.45(\text{kg})$ 。由此可推算出大规模合成工艺的吨甲醇耗氢量为 125~126.45kg。

以目前中国大量存在的年产 3 万吨甲醇的装置为例,弛放气流量 1000~1500Nm³/h,每年系统累计运行 8000h,年合成甲醇弛放气 800 万 Nm³。弛放气设计组分为:H₂ 72%,N₂ 8.43%,CO 5%,CO₂ 7.14%,CH₄ 6.6%,Ar 0.1%,以及一些微量有机成分^[9]。根据装置的物料平衡,吨甲醇耗氢量将包括发生反应的氢气、弛放气中的氢气 2 部分: $m_{H_2}=\frac{m_H}{m_{CH_3OH}}\times1000+\frac{800}{3}\times72\times\rho_{NH_3}=142.26(\text{kg})$ 。由此可推算,小规模合成工艺的吨甲醇耗氢量为 125~142.26kg。考虑到中国甲醇生产规模的复杂性,中国的实际吨甲醇耗氢量为 126.45~142.26kg。

根据《万德资讯》发布的中国 2000—2007 年甲醇产量数据,可估算相应耗氢量(图 2)。由图 2 可知,在中国 2007 年甲醇为 1036.77 万吨的产量下,对应氢气消费量达 131.10 万~147.50 万吨。

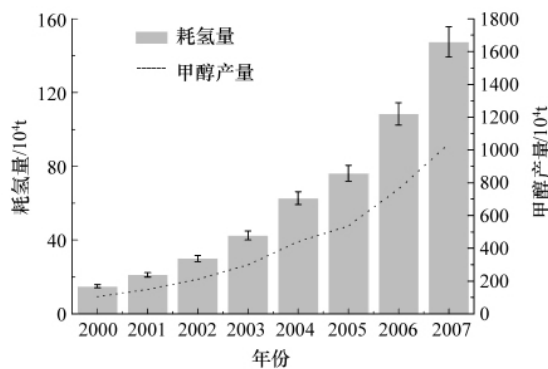


图 2 中国近年甲醇产量及耗氢量

Fig. 2 Chinese methanol production and corresponding hydrogen consumption

1.3 炼油过程中的氢气使用

中国是炼油大国,原油一次加工能力居世界第三位。2007 年四大类成品油(汽、煤、柴、燃)产量已达 21812 万吨。由于中国原油产量不足,供需矛盾越来越突出,将会更多地进口国外原油,特别是高含硫原油^[10]。随着高硫油加工量的增加及国家对石油产品质量的提高,炼油过程需大量的氢气实现油品质量的不断提高。

炼油工艺中消耗氢气的主要是加氢裂化和加氢处理。加氢裂化工艺每加工 1 吨原料油的氢耗为 1.888%,加氢处理工艺每加工 1 吨原料油的氢耗为 0.974%^[11]。近年中国加氢裂化和加氢处理加工能力见表 4^[12-14]。

表 4 中国近年炼油加氢能力情况(单位:10⁴t/a)

Table 4 Chinese hydrocracking/hydrotreating ability for oil-refinery (unit: 10⁴t/a)

	加氢裂化	加氢处理 *	加氢合计
1998 年	1084	3209	4293
1999 年	1292	4030	5322
2000 年	1147	4780	5927
2001 年	1337	5388	6725
2002 年	1502	7100	8602
2006 年	2596	9750	12346

注:* 为含加氢精制。

Notes: * Hydro-treating including purified process.

由表 4 可知,在中国 2006 年原油加氢裂化加工量为 2596 万吨和加氢处理加工量为 9750 万吨的情况下,对应氢气消费量为: $2596\times1.888\%+9750\times0.974\%=143.96(\text{万吨})$ 。根据近年原油加工总量的增长速度,2008 年已接近 180 万吨。

1.4 商业氢气的使用

目前,在电子半导体产业、冶金工业、食品工业、浮法玻璃、精细有机合成、航空航天及车辆示范运行等方面还消耗了一部分商业氢气。商业氢气在中国总氢气的消费量占比小,对中国氢气总消费量的影响不大,但增长趋势明显。氢气直接作为交通燃料的数量还很少,目前仅燃料电池汽车的示范运行在使用,且只消耗少量的氢气。例如 2008 年 7 月—2009 年 8 月期间,氢能燃料电池城市客车在北京公交系统商业化示范运行,3 辆车共计 5.38 万 km 的载客运营里程,消耗的氢气量共 5.33t。

可见,中国工业氢气主要用作化工合成的原料,集中在大型合成氨、炼油和甲醇的生产企业,超过氢气总消费量的 95%。合成氨生产近年保持年均 8.8% 的增长率,耗氢量占比 75% 左右;中国石油消费上升较快,年均增长 7.17%,随着石油需求增长、高硫原油进口量增加和成品油质量要求提升,石油炼厂的耗氢量将持续增长;中国各地甲醇生产量增长迅速,年均增长 38.7%,氢气消费量相应增长,占比扩大。中国氢气消费量已从 2001 年约 700 万吨增长到 2007 年的 1200 万吨,年均增长率超过 9%(图 3)。

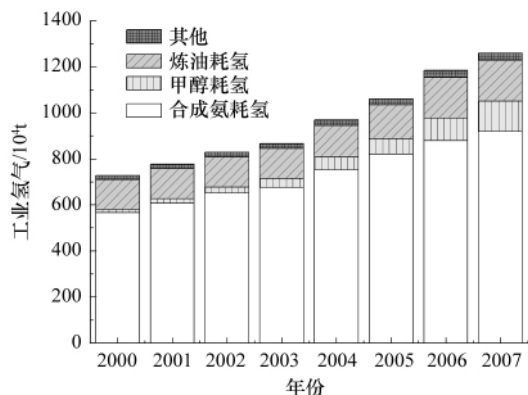


图3 近年中国工业氢气消费情况

Fig. 3 Chinese industrial hydrogen consumption

2 副产氢现状及潜力

2.1 氯碱工业副产氢

中国的氯碱厂、焦化厂和钢铁厂的尾气中富含氢,可通过变压吸附技术制取高纯度氢气进行循环利用。这部分氢气通常被称为工业副产氢。工业常见的烧碱工艺是电解食盐水,生产过程中同时生成氢气。国内对烧碱生产过程的副产氢通常回收制取盐酸等化工产品进行出售以降低生产成本。通常每生产1吨烧碱,副产 270m^3 氢气^[15],图4为根据中国2000—2007年烧碱产量估算的相应副产氢量。由图4可知,在中国2007年烧碱产量达1759.29万吨,副产氢气约41.57万吨。

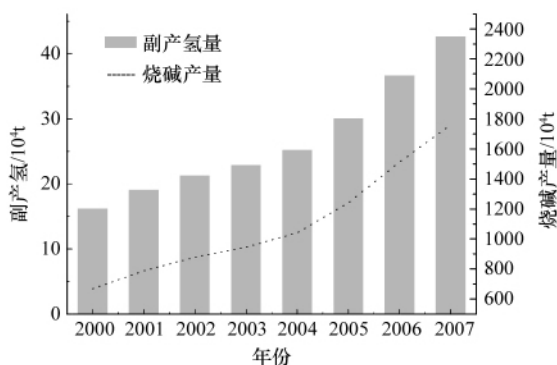


图4 中国近年烧碱产量和副产氢量

Fig. 4 Chinese caustic soda production and corresponding by-product hydrogen production

2.2 焦炉气副产氢

中国自1996年以来,就保持着世界第一产钢大国的地位。作为钢铁工业所必须的原材料,焦炭产量随着钢铁工业的发展大幅增加,2007年中国焦炭产量达3.35亿t/a,居世界第一。焦炉煤气是煤炭工业和钢铁工业炼焦过程产生的重要副产气,通常生产1吨焦炭可副产 425.6Nm^3 焦炉气^[16]。通过变压吸附技术可以提取高纯度氢气,通常 1m^3 的焦炉煤气可制取约 0.44m^3 的氢气^[17]。根据中国石油和化学工业协会“中国经济数据库”发布的中国2000—2007年焦炭产量,估算相

应副产氢量见图5。由图5可知,在中国2007年焦炭产量达3.35亿吨,炼焦副产氢气理论上有563.86万吨。

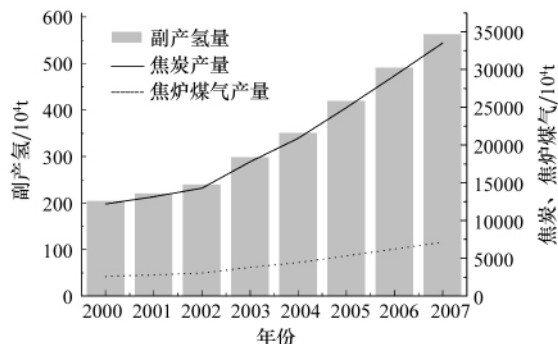


图5 中国近年焦炭、焦炉煤气产量和副产氢

Fig. 5 Chinese coke production and corresponding by-product hydrogen production

可见,中国副产氢资源主要集中在氯碱化工和炼焦过程产生的副产氢气。图6为中国近年副产氢总量,目前达605.43万吨,亟待进行合理的开发利用。

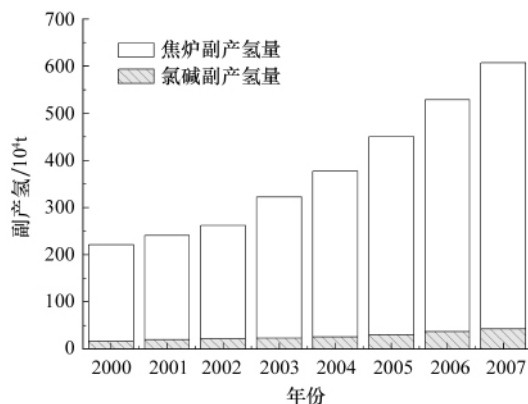


图6 中国近年副产氢总量

Fig. 6 Chinese total by-product hydrogen production

目前大部分的工业副产氢和富氢工业尾气经纯化处理后均能满足各行各业的需要。氢气的纯化方法包括化学吸收法、催化反应法、膜分离法和选择吸附法。变压吸附法可将不同来源的含氢气体中的多种杂质取出,提纯后氢纯度可达99.999%,足够满足燃料电池对氢气的纯度需要^[18]。例如,上海宝山钢铁宝氢公司通过提纯尾气为上海周边企业提供纯氢,规模可达2万吨^[19],服务于各类化工产品企业、电子产品企业以及燃料电池汽车示范运行项目。

3 车用氢能潜力分析

3.1 氢能燃料电池汽车技术

氢燃料被认为是未来最理想的车用能源之一^[17],氢燃料电池系统是最具潜力的车用发动机^[20]。燃料电池以高效率、零排放和无污染等优点被认为是替代石油燃料发动机的理想解决方案之一^[21]。燃料电池城市大客车目前处于示范运行发

展阶段,可望率先实现商业化。全球燃料电池客车(Fuel Cell Bus)示范项目包括已完成的22个、运行中的28个和正在计划中的29个,共274辆燃料电池客车^[2]。其中2009年8月公布的SunLine Transit Agency燃料电池客车示范项目第5期报告,100km耗氢量8.63kg^[23]。国内,2007年12月正式启动的“新能源汽车奥运示范运行”项目,清华大学开发的3辆燃料电池公共汽车在示范期间100km氢耗10.8kg;同济大学开发了10辆燃料电池轿车,其中“超越”3号100km耗氢1.12kg(相当于汽油4.23L)^[24]。

3.2 中国节能与新能源汽车发展

近年来,中国加大对汽车产业,特别是新能源汽车的扶持和投入。2009年1月23日中国财政部、科技部发布《关于开展节能与新能源汽车示范推广试点工作的通知》,实施“十城千辆”推广计划。公共服务用乘用车和轻型商用车燃料电池车补助25万元/辆;10m以上燃料电池城市公交客车补助60万元/辆。2009年3月20日国务院出台《汽车产业调整和振兴规划(2009—2011)》,启动国家节能和新能源汽车示范工程,由中央财政安排资金给予补贴,支持大中城市示范推广混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车等节能和新能源汽车。2009年11月25日国务院常务会议决定,到2020年单位国内生产总值CO₂排放比2005年下降40%~45%。减排压力下,减排效果明显^[25]的氢能燃料电池汽车技术将获得发展契机,充分发挥中国车用氢能的潜力。

3.3 情景分析

目前600万t/a的副产氢资源,相当于1812万吨汽柴油,约占目前中国车用汽柴油消耗量的20%。应用于燃料电池乘用车(以1辆燃料电池乘用车年行驶里程20000km消耗224kg氢气计算^[24]),可供应2703万辆燃料电池乘用车运行,达到中国目前汽车保有量的49.88%,是2050年总保有量预测值的6%。

如果未来燃料电池客车率先得到商业应用,假设燃料电池客车的燃油经济性将改善到6.32kg/100km,以1辆燃料电池客车年行驶里程14400km消耗882.32kg氢气计算^[26],可供应686.18万辆燃料电池大客车的运行。2007年中国营运客车仅164.73万辆^[27],足够支撑未来数十年的公交发展。这对促进中国城市化进程,改善城市空气质量,意义深远。

中国2050年的汽车保有量将超过4亿辆^[28],燃料电池汽车的占比在缓慢、中性、快速情景下分别达到3%、8%和12%左右,燃料电池汽车的保有量将达到1300万辆、3200万辆和4800万辆规模(图7)。

假设燃料电池乘用车的燃油经济性为1.12kg/100km^[24],1辆燃料电池乘用车年行驶里程20000km消耗224kg氢气计算。对应的氢气消耗总量在298万吨、735万吨、1078万吨左右。图8为相应燃料电池客车保有量的氢气消耗量。由图8可知,以目前静态的副产氢和工业氢气生产规模来说,副产氢资源足以支持缓慢发展情景下的氢能汽车发展到2050年,在中性和快速发展情景下分别在2047年和2040年将影

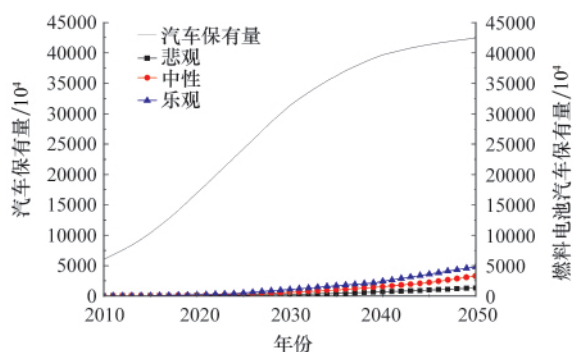


图7 中国燃料电池汽车保有量情景分析

Fig. 7 Scenario analysis for Chinese fuel cell vehicle population up to 2050

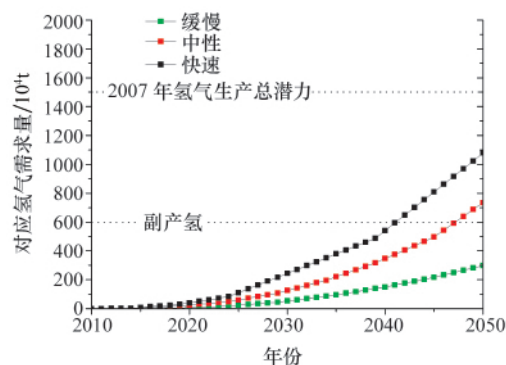


图8 车用氢能情景分析

Fig. 8 Scenario analysis for Chinese automotive hydrogen demand up to 2050

响到工业氢气的供应。随着中国煤炭资源的开发力度,动态发展到2050年的实际氢气生产能力,足够满足车用氢能的需求。

4 结论

1) 目前中国工业氢气使用非常广泛,总量达1200万吨;与此同时,还有超过600万吨的副产氢气。

2) 考虑目前的燃料电池汽车技术水平,600万吨副产氢气可供应686万辆燃料电池大客车或2703万辆乘用车的运行。

3) 在缓慢发展情景下,燃料电池乘用车占比为3%,工业副产氢足够解决车用氢能供应问题;在中性发展情景下,燃料电池乘用车占比为8%,仅利用工业副产氢将在2046年出现车用氢能供应问题;在快速发展情景下,燃料电池乘用车占比为12%,仅利用工业副产氢将在2040年出现车用氢能供应问题。但在氢能技术动态发展的前提下,供应问题基本不会发生。

工业副产氢的综合利用,既可节约能源和减少排放,还可以支持具有战略意义的氢能汽车探索研究。基于中国车用氢能的潜力,重视和研究氢能汽车的研发、支持氢能汽车的早期开发和示范运行具有重大的战略意义。



参考文献 (References)

- [1] International Energy Agency. Prospects for hydrogen and fuel cells[R/OL]. Paris: OECD/IEA, 2005. www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/hydrogen2005.pdf.
- [2] California Fuel Cell Partnership. Hydrogen fuel cell vehicle and station deployment plan: A strategy for meeting the challenge ahead [R/OL]. 2009. <http://www.cafcp.org/sites/files/Action%20Plan%20FINAL.pdf>.
- [3] White C M, Steeper R R, Lutz A E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(10): 1292-1305.
- [4] International Energy Agency, Standing Group on Long-term Co-operation. Moving to a hydrogen economy: Dreams and realities[R/OL]. [2003-01-30]. <https://www.oilmarketreport.org/papers/2003/opmoving.pdf>.
- [5] 王超, 王贺武, 欧阳明高. 氢能对我国未来交通能源需求和温室气体排放的影响[J]. 化工学报, 2004, 55(增刊): 307-311.
Wang Chao, Wang Hewu, Ouyang Minggao. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 55(Suppl.): 307-311.
- [6] 陈登云, 赵金牛. 合成氨厂两气回收技术的应用 [J]. 贵州化工, 2002, 27(6): 33-36.
Chen Dengyun, Zhao Jinniu. *Guizhou Chemical Industry*, 2002, 27(6): 33-36.
- [7] 汤林, 陈宝生. 合成氨弛放气?排放气的氢气回收技术[J]. 化学工业与工程技术, 2002, 23(4): 16-18.
Tang Lin, Chen Baosheng. *Journal of Chemical Industry & Engineering*, 2002, 23(4): 16-18.
- [8] 成宏伟. 煤制甲醇合成弛放气在热电厂中的综合利用[J]. 节能与环保, 2008(12): 41-43.
Chen Hongwei. *Energy Conservation and Environmental Protection*, 2008 (12): 41-43.
- [9] 刘开宇. 氨厂回收甲醇弛放气分析[J]. 云南化工, 2000(27): 37-39.
Liu Kaiyu. *Yunnan Chemical Technology*, 2000(27): 37-39.
- [10] 白雪松. 国内外氢气的生产和消费 [J]. 化工技术经济, 2003, 21(12): 18-35.
Bai Xuesong. *Chemical Techno-Economics*, 2003, 21(12): 18-35.
- [11] 侯震, 齐艳华. 加氢装置氢耗量模型的研究 [J]. 计算机与应用化学, 2004, 21(1): 31-34.
Hou Zhen, Qi Yanhua. *Computers and Applied Chemistry*, 2004, 21(1): 31-34.
- [12] 张德义. 进一步加快我国加氢工艺技术的发展 [J]. 炼油技术与工程, 2008, 38(5): 1-8.
Zhang Deyi. *Petroleum Refinery Engineering*, 2008, 38(5): 1-8.
- [13] 张德义. 继续加紧搞好我国炼油工业结构调整 [J]. 当代石油化工, 2004, 12(3): 1-8.
Zhang Deyi. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2004, 12(3): 1-8.
- [14] 张德义. 大力发展加氢工艺和加氢技术[J]. 炼油设计, 2000, 30(4):1-6.
Zhang Deyi. *Petroleum Refinery Engineering*, 2000, 30(4): 1-6.
- [15] 陈霖新. 对我国氢气规模生产的分析研究[C]//工业气体专业委员会. 中国动力工程学会成立四十周年文集. 2002.
Chen Linxin. An analysis on the large-scale production of hydrogen in

- China [C]//Industry Gas Association. China Power Engineering Association 40th Anniversary, 2002.
- [16] 张学镭, 王松岭, 陈海平, 等. 焦炉煤气利用项目的经济性评价[J]. 现代化工, 2006, 26(1): 47-50.
Zhang Xuelei, Wang Songling, Chen Haiping, et al. *Modern Chemical Industry*, 2006, 26(1): 47-50.
- [17] 上官方钦, 酃秀萍, 张春霞. 钢铁生产主要节能措施及其 CO₂ 减排潜力分析. 冶金能源, 2009, 28(1): 3-8.
Shangguan Fangqin, Li Xiuping, Zhang Chunxia. *Energy for Metallurgical Industry*, 2009, 28(1): 3-8.
- [18] 中国工业气体工业协会. 中国工业气体大全(第3册)[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2008.
China Industrial Gases Industry Association. China industrial gas encyclopaedia [M]. Vol. 3. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2008.
- [19] Baosteel Group Co. Using clean energy to reduce pollution discharge [EB/OL]. 2008. http://www.baosteel.com/group_e03management/ShowArticle.asp?ArticleID=1420.
- [20] 欧阳明高. 我国节能与新能源汽车发展战略与对策 [J]. 汽车工程, 2006, 28(4): 317-321.
Ouyang Minggao. *Automotive Engineering*, 2006, 28(4): 317-321.
- [21] 欧阳明高, 张育华, 辛军, 等. 氢内燃机的改装设计与控制研究[J]. 内燃机工程, 2006, 27(6): 1-5.
Ouyang Minggao, Zhang Yunhua, Xin Jun, et al. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2006, 27(6): 1-5.
- [22] National Renewable Energy Laboratory. Worldwide hydrogen and fuel cell bus projects[R/OL]. 2010. http://www.nrel.gov/hydrogen/proj_fc_bus_eval.html.
- [23] National Renewable Energy Laboratory. SunLine transit agency fuel cell transit bus: Fifth evaluation report [R/OL]. 2009. <http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/44646-1.pdf>.
- [24] 陈家昌, 王菊, 伦景光. 国际燃料电池汽车技术研发动态和发展趋势 [J]. 汽车工程, 2008, 30(5): 380-384.
Chen Jiachang, Wang Ju, Lun Jingguang. *Automotive Engineering*, 2008, 30(5): 380-384.
- [25] China Automotive Technology & Research Center, General Motors. China wells to wheels study on automotive fuel about oil demand and green house gas emissions[R]. Beijing, 2008.
- [26] Fuel Cell School Buses. Report to Congress [R/OL]. DOE, USA. 2008. www.hydrogen.energy.gov/pdfs/epact_743_fuel_cell_school_bus.pdf.
- [27] 中华人民共和国国家统计局 编. 中国统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2008 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [28] Energy Systems Division. Projection of Chinese motor vehicle growth, oil demand, and CO₂ emissions through 2050 [R/OL]. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. 2006. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/398.pdf>.

(责任编辑 陈广仁)