

氢与甲烷作为代油燃料之比较

周 理

(天津大学化工学院 天津 300072)

〔摘要〕 概要介绍了使用氢燃料的必然性、存在的技术瓶颈及现有解决方案存在的问题,比较了将甲烷和氢作为替代燃料的技术状况,指出氢燃料的技术问题难以在短期内解决,而甲烷燃料却有可能在短期内大规模地替代石油制品;以甲烷动力为基础的甲烷经济作为到达氢经济的渡船,从解决实际问题的迫切性和技术可行性考虑,均是合理的决策。因此,氢能仍应作为基础研究课题,而在甲烷燃料方面却应有较大的技术开发投入,使其在 5~10 年内起到缓解石油需求压力的作用。

〔关键词〕 氢气 甲烷 代油燃料

〔中图分类号〕 X51 0613.2 0621.24

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)02-0039-05

COMPARISON BETWEEN HYDROGEN AND METHANE AS ALTERNATIVE FUELS

ZHOU Li

(School of Chemical Engineering & Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A review was given on hydrogen fuel, its inevitability, technical bottlenecks, and the state of solutions available. It was indicated that all the bottlenecks of hydrogen fuel could not be overcome in a short time. On the other hand, technologies involved in methane fuel are relatively easier to solve and, hence, methane can be applied as an alternative fuel quite soon. Therefore, methane economy is a suitable ferry to reach the hydrogen economy from the point of view of technical feasibility. Hydrogen energy is still at the stage of fundamental research; however, more money should be invested in methane energy to develop the advanced and sophisticated technologies in order to release the pressure on petroleum supply in 5~10 years.

Key Words: hydrogen, methane, alternative fuel

CLC Numbers: X51 0613.2 0621.24

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)02-0039-05

1 引言

1999 年 1 月 18~19 日, 环境与发展国际合作委员会中方能源战略与技术工作组在清华大学召开中外专家研讨会,“氢经济”是会议讨论的内容之一。如果说 5 年前“氢经济”还只是少数专家的话题,那么今日已成为我国能源领域一个热门话题。什么是“氢经济”? 简言之,就是以氢气动力为基础的经济体系。从工程经济学的 Leontiev 表^[1]可知,国民经济各部门都是直接或间接地通过供需关系联系在一起。氢燃料的生产,特别是与热电生产的耦合以及输送、消费,特别是在交通领域中的广泛使用所牵动的多个经济部门,将形成国民经济中的一个子系统(Economy infrastructure),这就是氢经济的内涵。与此对照,便不难理解“甲烷经济”的所指了。也许“甲烷经济”的提法尚未见诸媒体,但按照氢经济的思路提出“甲烷经济”概念也是顺理成章的。“甲烷经济”与“氢经济”并提的目的,是希望引起关于如何尽快缓解我国面临的快速增长的石油需求压力的讨论。氢经济已经作为重要的解决方案提出来了,并且一些外国政府或大公司也把它连同一些资助作为“礼物”送到我们面前。笔者认为如何摆正氢能在我国能源发展计划中的位置,如何解决石油

替代燃料问题,是能源科学研究的核心课题。

2 从社会发展史看使用氢燃料的必然性

燃料提供动力,因此燃料的使用与人类社会发展进程密切相关。从二者之间的关联可以断定,氢燃料成为人类社会的主体燃料是历史发展的必然。在直到工业革命之前的漫长岁月中,人类使用的是生物质燃料,即蒿草和木材;人均能耗水平很低,生产力水平很低,生活质量也不高。煤的广泛使用使蒸汽机进入人们的生产和生活,激发了工业革命,把人类带入近代文明。当燃料从煤演变到石油时,人类社会随之进入以汽车的普及为重要特征的现代文明。随后,天然气广泛地成为发达国家人民的日常燃料,进一步改善了生存环境。如果注意到从煤(其成分以 C 为主)经石油(基本组成是 $-\text{CH}_2-$)到天然气(主要成分是 CH_4)正是燃料中氢含量增加的方向,便可明了一个事实,即燃料进化的下一个环节必然是纯氢。如果看看人类社会正面临的大气层中温室气体急剧增多和现用能源资源日益枯竭这两大难题,即可对此论断产生认同。

首先看温室气体问题的严重性。大气中的 CO_2 浓度升高将导致地球温度升高,而现今每年 CO_2 排放量高达约 $3 \times$

收稿日期: 2004-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(29936100, 20336020), 国家科技部基金项目(G2000026404)

作者简介: 周理,男,1941~;天津市南开区天津大学化工学院,教授,主要从事吸附科学与清洁能源技术研究; E-mail:

zhoulijun@eyou.com

10^{12} kg^[2];地球上98%的CO₂溶解在海水里,海水温度每升高1度,CO₂的溶解度便下降3%,海水因此向大气释放更多的CO₂,从而造成温室效应的恶性循环。

再看能源资源面临枯竭问题的紧迫性。图1^[3]清楚地显示了近200年来人类的能源消耗增长及其组成的变化情况。尽管不同的文献来源报道的数据有所出入,但人们对能源,特别是石油的自然资源面临枯竭的恐慌感是不言而喻的。伊拉克战争和近来世界石油价格的居高不下都是证明。

氢燃料有两大优点:一是最清洁,燃烧产物是水,避免了温室气体的产生;二是可再生,将燃烧产物分解又得到氢,故用之不竭。氢燃料的两大优点恰恰蕴藏着解决人类面临的两大难题的巨大可能性。

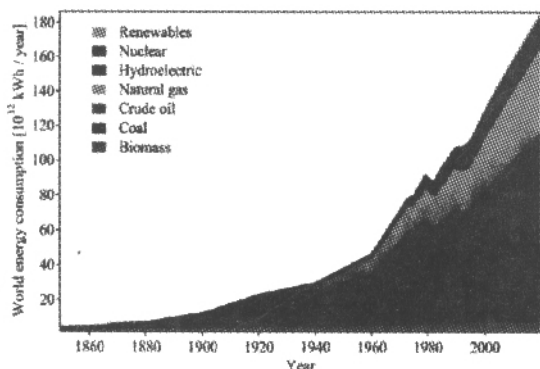


图1 世界能量消耗的增长情况

3 使用氢燃料须突破的第一个技术瓶颈:氢的再生

首先必须明确一个概念,即只有由水得到的氢才是再生氢,因为水是氢燃烧的产物,这样才能形成闭路循环。氢有很多来源,但从当前的情况来看,都存在着一些问题,第一个技术瓶颈是再生氢的生产技术。

(1)从化石燃料制氢。这一直是化肥工业的基础,但用化石燃料制氢必然同时产生CO₂,尽管该CO₂不是在动力(用氢)装置上排放的,但增加了大气中的CO₂含量这个结果是相同的。因此,以非再生氢为燃料,既不能解决温室气体问题,也不能避免对能源资源的消耗。

(2)由水制氢。最熟知的技术便是水的电解,但电解水制氢的能耗与氢的热值相比,不能证明该项技术的合理性。虽然可将电解水制氢作为电网调峰的一项措施,但如果电网总体负荷过大,调峰的余地则十分有限;利用太阳能、风能等自然能作为电解水的能源,在利用规模与能量成本方面仍需做出巨大的改进。

(3)由光催化或细菌作用从生物质(包括废弃物)制氢。前者的反应速率非常低,后者不但有产率问题,往往更需要消耗大量蔗糖,且两者皆有成本太高的问题。其它通过高温水介质反应从生物质制氢,尚仅仅处于初始研究阶段。这些方法能否最终成为大规模地生产廉价再生氢的工业技术,还要等待一段时间才能得出结论。

廉价对于再生氢是至关重要的。化石燃料皆是自然资源,没有制造成本。与此不同,氢是人造燃料,制造成本必须很低才有市场应用前景。

4 使用氢燃料须突破的第二个技术瓶颈:氢的储存

维持一辆小汽车的正常行驶里程至少需要在车上装载

4 kg 氢气。常温常压下4 kg 氢气的体积是49 m³,由此可知储氢的难度有多大。储氢问题的核心是减小氢气体积。美国能源部曾提出储存氢的重量密度应大于6.5%,即100 kg重的燃料箱中氢气重量应不小于6.5 kg;体积密度应不低于60 kg/m³,这就是所谓的DOE标准——作为衡量一种储氢方法实际可行性的技术指标。另一个重要的技术指标是吸放氢的可逆性,从实际应用角度看,这是非常重要的;像碳氢化合物的脱氢与加氢便被第二个标准排除在储氢方法之外,因为只有把碳氢化合物加热到800℃以上氢才能释放出来。

目前受到关注的储氢方法基本有5种:氢气高压压缩、氢气液化、金属氢化物、化学氢化物与氢气物理吸附。笔者近日对这几种方法的现状、存在问题与未来应用的可能性作了评介^[4]。简言之,除液氢外现有方法都不能同时达到DOE的两项标准,即使对于近来调低了的DOE标准^[5]也是如此。

高压压缩氢气的能量密度低,压缩设备与高压气瓶的成本都很高。目前世界上能够达到的氢气瓶压力不到32 MPa。工业界制定了重110 kg、耐受70 MPa压力、重量密度达到6 wt%、体积密度达到30 kg/m³的努力目标。尽管尚未达到DOE标准,但氢气的使用成本恐已难为市场接受。笔者与德国工业界人士座谈时了解到,按照林德公司的数据,20 MPa压力下氢气成本已经达到28欧元/kg。

与此相比,一直被认为成本太高而不被看好的液氢成本仅仅是8欧元/kg(林德公司资料),与目前欧洲市场的汽油价格相同。由于当前最先进技术液化氢气的能耗大约是氢气热值的一半,所以林德公司的数据尚需通过工业界的普遍认同。即使液氢的价格可与汽油相比,使用液氢还有一个重要问题,即液氢气化导致的氢气向大气的泄漏。最完善设计的液氢绝热容器也不能避免液氢的气化损失,这是因为正氢向仲氢的转化是个缓慢的自发过程,其释放的转化热大于氢的气化热。如果向大气释放氢气成为公众关注的事情,氢气液化储存方法仍需做出艰巨的技术努力,虽然这不是不可克服的技术障碍。

金属氢化物储氢,是指某些金属或金属合金能够吸收氢,形成仍具有金属性质和外观的金属间隙化合物,而且氢的吸收与解析是可逆的。但常温与不太高压下可逆地吸放氢的合金都是由过渡金属构成的,因此氢的重量密度很低,LaNi₅便是典型的例子,其中氢的体积密度可达115 kg/m³(液氢密度只有70.8 kg/m³),但其中氢的重量密度只有1.4%。为提高金属氢化物中氢的重量密度,镁基合金已成为近年来的研究热点。镁基合金的问题是吸放氢的温度高、动力学性能差,经过努力虽有改进,特别是金属镁的纳米颗粒化收到显著效果,但距应用标准仍有很大距离。一个严重的问题在镁基合金研究中尚未得到应有的重视,这就是能量收支问题。化学常识告诉我们,一个化合物愈稳定,释放的生成热愈大,分解时吸收的热也愈多。MgH₂很稳定。为使其释放1 kg氢所需提供的热量比1 kg氢燃烧释放的热量还高25%^[3]。

轻金属氢化物研究的难度使人们的注意力转向化学氢化物。化学氢化物是由元素周期表中第I、II、III族的轻元素,例如Li, Mg, B, Al吸氢后形成的共价键或离子键型化合物,其中氢的体积密度和重量密度的理论值都非常高。目

前受到较多关注的化合物是 NaAlH_4 和硼氢化物, 例如 LiBH_4 。与金属间隙化合物可逆地吸放氢不同, 化学氢化物的吸放氢过程不是可逆的。氢的释放是氢化物分级分解反应的结果, 每级分解反应的条件各不相同, 因此实际放氢量远低于理论值。对化学氢化物作为氢载体的研究工作还很不充分。初步的机理研究表明, 放氢过程中金属元素的长程迁移是速率控制步骤, 催化剂如何能够加快这一环节尚未明了。氢的释放往往导致氢化物外观形态的改变和元素在材料中的分布, 因此其使用寿命需通过多次循环实验才能确定。

基于物理吸附的储氢方法最大的优点是可逆性好, 吸附剂使用寿命长。但物理吸附随温度变化的规律性, 决定了较高温度下不可能有很大的吸附量。因此, 这种方法亦称为低温吸附法。以液氮为冷却剂的超级活性炭吸附储氢达到 10.8% 的重量储氢密度和 41 kg/m^3 的体积储氢量^[6], 其技术指标仅次于液氢, 但成本比液氢低得多, 目前处于中试研究阶段。关于物理吸附储氢的一个插曲是碳纳米管储氢。1997 年一个美国学者在 *Nature* 发表文章说碳纳米管有超常的储氢能力(该文后被其他学者证明完全错误), 但该文的储氢温度仍很低。随着后来关于碳纳米管常温超常储氢能力的报道, 使得碳纳米管储氢成为全世界的热点研究课题。笔者的实验室最近检索化学文摘, 收集到 2003 年底前发表的纳米碳材料吸氢数据文献约 40 篇, 其值示于图 2^[7]。

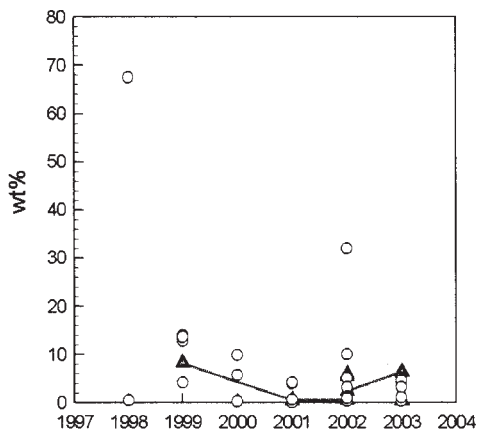


图2 碳纳米材料吸氢量的实验数据

其中三角形的点是低温(80 K 左右)数据, 圆圈点为常温数据。低温数据本应比常温数据高 10 倍左右, 但却完全被常温数据所掩埋, 表明文献报道的数据具有很大的不确定性。对于很高的常温吸氢量常常以“氢在纳米管中发生液化”来解释。只要看看图 3 所示氢的相图^[8]便知, 液体氢只存在于 21.2~33 K 的狭窄温度范围内。氢在纳米管上究竟发生了什么, 只有在不同温度下测定的吸附等温线能够告诉我们, 但这样的实验数据却几乎没有报道。为了理解纳米管吸氢机理, 笔者所在实验室经过 2 年的实验准备与测量, 得到图 4 所示氢在多壁纳米碳管上的 8 条吸附等温线, 由此计算出吸附热为 1.8 kJ/mol , 仅为氢在活性炭上吸附热^[9]的 1/4。可见纳米管表面对氢分子的作用力小于氢在活性炭中受到的作用力。图 4 中 77 K 的 3 条等温线分属于经历不同处理的纳米管样品^[10], 不但显示出低温吸附量高的规律性, 而且表现出典型的超临界吸附的特征, 即等温线有极值点, 极值点后氢气压力愈高, 测得的吸附量愈低。图中的点是实验数

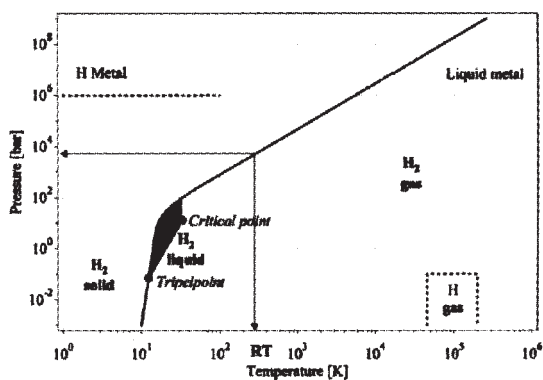


图3 氢的相图

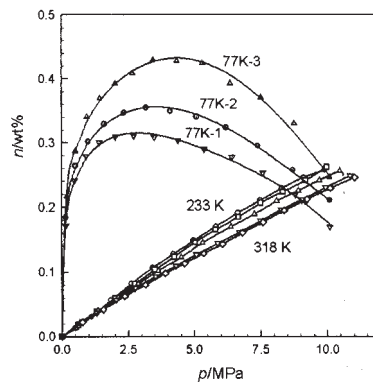


图4 氢在纳米碳管上的系列吸附等温线

据, 曲线是笔者为超临界吸附平衡建立的理论模型^[11-13], 二者完全一致, 说明纳米碳管并不能改变氢气与其表面之间作用力的性质, 因此不能改变氢在碳纳米管表面的吸附亦属于超临界温度气体的吸附这一事实^[14]。其它几何特征的碳纳米材料也是如此。推而广之, 其它材质的纳米材料也应如此。超临界温度气体的物理吸附只能是单分子层吸附^[15], 因此其储氢能力受制于比表面积和储氢温度。

鉴于储氢问题知名度的日渐扩大, 材料科学取得的新进展也往往与储氢相关联。最近关于金属有机架构材料 MOF (metal-organic framework) 储氢^[16-17]大有继碳纳米管储氢之后掀起新的一波研究热潮之势。这种新材料的比表面积比超级活性炭更高, 并且常温下的吸氢量也比活性炭高。从该材料的组成看, 与碳材料相比, 其表面应有较强的吸附势场, 故常温下应有较多的吸氢量。但其给出的低温(78 K)吸氢量(4 % 左右)又大大高于常温吸氢量, 表明吸氢机理仍是物理吸附。其低温吸氢量显著低于超级活性炭, 而且常温和 78 K 的吸附等温线形状与临界温度以上气体的吸附规律不符, 表明其测量数据的可靠性尚存疑问。在最近与德国合作伙伴的交流中, 看到他们对 MOF 吸氢的测量结果。德国人测得的低温吸附等温线完全符合超临界温度吸附规律, 但比超级活性炭上的吸附量略低。虽然常温下的吸附量比活性炭高, 但其差别不超过 1%。如何从分子/原子间作用力的性质出发探索可行的储氢材料, 仍是一项艰巨的基础研究课题。

从化学吸附原理寻找储氢材料^[18], 近来亦颇受重视。化学吸附的特征有二: 一是低于一定温度则吸附不会发生; 二是材料表面只能吸附一层分子, 这一点与超临界温度的物

理吸附相同。前者使吸附温度一般远高于环境温度,不利于实际应用,后者使材料的比表面积成为吸附量的制约因素。由此可见,无论是物理吸附还是化学吸附,作为储氢材料必须具有很高的比表面积。如果材料具有规则结构且很高的比表面积,则气体进出的扩散阻力将成为一个实际应用中必须考虑的问题。

简言之,储氢问题不简单。应从基础理论入手探索可行途径。无论是再生氢的制备还是氢的储存,都缺少实际可用的工业技术,而且不能说上述问题能够在短期内得到解决。

5 甲烷燃料及甲烷经济框架

与氢经济相比,以甲烷的生产、净化、储存与输运为基础,特别是与环境治理相耦合的“甲烷经济”却呼之欲出。甲烷也是可再生的清洁能源,虽然其燃烧产物仍包含二氧化碳,但因只含 1 个碳原子,甲烷燃料的清洁程度比液化石油气和天然气(甲烷是主要成分)都高。甲烷燃烧产物 CO_2 和 H_2O 恰恰是光合作用合成生物质的原料,其能量效率(如玉米)高达 10%。生物质通过发酵等反应又转变为甲烷,完成图 5 所示的闭合循环。其实,利用秸秆、动物排泄物等农村垃圾制造沼气,在我国南方很多地区已是日常生活的燃料来源,沼气中甲烷含量约占 40%~50%。至此可知,甲烷是可再生的清洁能源,并且再生技术比较成熟。

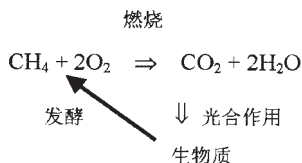


图 5 甲烷能源的再生循环

甲烷燃料的生产亦可与其它产业耦合,形成规模化的产业部门,其中最重要的是甲烷生产与城市垃圾处理的耦合。随着我国城市人口的急剧增长、乡村城市化,垃圾处理亦成为国家面临的大问题。掩埋处理法不但占用大量土地,更易造成地下水污染。合理的处理方法应是按人口比例建设相应规模的垃圾焚烧炉,集中处理。焚烧垃圾的主要问题是经费负担重,这个问题的出路在于设法提高焚烧产物的附加值。目前有的地区(如天津)已将垃圾焚烧与发电耦合起来,这固然是个出路,但因沼气中二氧化碳等不可燃气体含量较高,直接燃烧的能量效率不高。若将超级活性炭的活化炉与垃圾焚烧炉耦合,既降低了活性炭的成本,又为垃圾焚烧炉增加了一个高附加值产品。

比表面积超过 $2\,000\text{m}^2/\text{g}$ 的超级活性炭在氢气、天然气的储存,氢气与甲烷的分离、净化,以及作为催化剂载体和水处理剂等方面有很大的市场容量,但由于原化学活化工艺为环境保护法所不容,使其成为国际市场的缺货。笔者的实验室开发成功清洁高效的物理活化方法,利用垃圾焚烧炉的尾气及其温度条件即可制备超级活性炭。

从沼气或垃圾焚烧炉气体中浓缩甲烷,使其成为清洁的汽车燃料,亦是甲烷经济体系中的重要环节。煤层气的开发亦有相似的问题。煤层气也是甲烷的重要来源。我国各地煤层气资源的地质条件不同,甲烷含量及产气量稳定性不同,使得甲烷的分离与储存技术成为煤层气开发的必要条件之一。垃圾焚烧炉气体、沼气和煤层气中均可能含有少量

硫化氢气体及其它有毒气体,有毒气体的清除亦是甲烷燃料生产的必要环节。分离净化处理的主体操作是甲烷与二氧化碳的分离,甲烷与氮气的分离,以及甲烷与硫化氢的分离。从化工实用技术角度看,均有一定难度。实用的技术必须具有经济成本的合理性,一些分离方法技术上可行但经济上不可用。例如,甲烷与氮气的分离,采用低温精馏很容易将甲烷与氮气分离,但实际上不可行,因此直到 2000 年专家们仍将此分离问题看作一项挑战^[19]。

近年来我国倡导的自主、创新科学研究在甲烷的分离、净化与储存方面取得了突破性进展,为大力发展甲烷燃料提供了技术可能性。近已证明,采用新型吸附剂的变压吸附技术可将甲烷与氮气等杂质分离,并已实现脱硫化氢吸附剂的常温再生^[20]。这些技术的研究成功为从沼气和垃圾焚烧炉气体提取甲烷燃料以及煤层气的开发提供了有力的技术支持。甲烷与氮气的分离技术亦有可能在煤矿生产中得到应用。煤矿瓦斯就是甲烷。甲烷含量超标常常导致灾难性后果,就是排到大气中也是温室气体。若将煤矿排出气体中的甲烷提出并储存起来,则可作为矿区的清洁燃料。当然,该项技术的采用对煤成本的影响必须进行经济评价。

前面系统地说明了氢气的储存技术难度之大,但甲烷的储存却没有那么困难,并且近年来取得了突破性进展。甲烷压缩到 20 MPa (200 大气压)即可满足公交车的燃料需求,例如北京等地运行的 CNG 汽车;但同样体积 20 MPa 的氢气却没有实用性。研究氢气的储存是解决可能性问题,研究甲烷的储存是技术完善问题,即进一步降低储气压力并提高储气密度从而降低储气成本。为此,从上世纪 80 年代起,开始研究利用超级活性炭对甲烷的吸附以降低储气压力的所谓 ANG 技术。但时至今日,ANG 技术仍未市场化,美国已经不再支持 ANG 研究,这是因为 ANG 技术有 4 个致命的弱点。(1)能量密度低。虽然 ANG 将储气压力降到 3~5 MPa,但只能将气体体积减小 150 倍,而 20 MPa 的 CNG 却能减小 200 倍。(2)吸附热效应不能有效排除。甲烷在活性炭上的吸附热为 16 kJ/mol,快充气时活性炭床温度会上升 60~80℃,储气量下降约 20%;快放时炭床温度下降,降低放气速率。(3)杂质影响。如果气体中不止是甲烷(例如天然气),其它比甲烷分子量更大的气体更易被吸附,且更难被脱附,它们不断在活性炭床中积累,使得储气容量随充放循环次数增多而递减。若将其它组份预先清除,则需增大设备体积与成本。(4)为加大有限容积内的储气量,必须提高超级活性炭的堆积密度,为此须将其压制成型,这是效率很低的操作,增加了工业化难度。笔者所在实验室发明了湿活性炭储天然气方法,可将上述缺点较好地克服,单位重量炭的储气容量可提高 63%^[21]。这一方法已引起国际上的重视^[22],经过进一步的充实研究,该技术在不太长的时间内市场化是很有可能的。

6 结语

在 1992~1995 年间,笔者在加拿大的一个氢研究所做储氢、储甲烷及储气活性炭的一线研究工作,回国后在国家多途径基础研究经费支持下建成高压吸附实验室,指导学生以寻找石油替代燃料为目标,围绕超临界温度吸附理论、超级活性炭等新型吸附材料、清洁燃料的分离与储存问题,探索新思路的可行性。几年来,有 40 多篇研究论文被 SCI

收录 9 项发明专利获授权,并于今年当选国际吸附学会理事。上述见解是笔者十几年来对氢燃料与甲烷燃料研究工作的切身体会,还有从大量国际交流中得到的信息。最近美国的布什总统确实又批了 100 亿美元支持氢能研究,笔者也知道世界上燃料电池技术最好的加拿大巴拉德公司一直靠各类无偿赞助在运营。氢能确实不能不研究,但我国财力尚有限,应当给予氢能研究以恰当的定位,应该将其作为中长期的技术储备,还是作为缓解紧迫的石油需求压力的措施?若是前者,则应定位在基础创新研究,探索克服再生氢与储氢瓶颈的新途径;若为后者,笔者认为其可行性不如开发甲烷燃料更大。作为未来经济子系统,氢经济与甲烷经济孰近孰远,还须各界专家和有关决策人员认真考虑。

参考文献(References)

- [1] 周理. 工程经济学[M]. 北京: 轻工业出版社, 1989
- [2] Robert T. Watson ed. Climate Change 2001: Synthesis Report, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC[R]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001
- [3] Züttel A. Hydrogen storage methods and materials [J]. *Naturwissenschaften*, 2004(91): 157~172
- [4] Zhou L. Progress and problems in the hydrogen storage methods, Renewable and Sustainable Energy Review, published on internet, 2004
- [5] DOE website: <http://www.eere.energy.gov/RE/hydrogen.html>
- [6] Zhou L, Zhou Y P, Sun Y. Enhanced Storage of Hydrogen at the Temperature of Liquid Nitrogen[J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2004 (29): 319~322
- [7] 周理, 孙艳, 周亚平, 苏伟. 碳纳米管储能的化学原理与储存容量研究[A]. 见: 中国化学会 24 届学术年会二分会报告, 长沙, 2004
- [8] Leung W B, March N H, Motz H. Primitive phase diagram for hydrogen[J]. *Physics Letters A*, 1976(56): 425~426
- [9] 周理, 周亚平. 关于氢在活性炭上吸附特性的实验研究 [J]. *中国科学(B)*, 1996(26): 473~480
- [10] Zhou Y P, Feng K, Sun Y, Zhou L. Adsorption of Hydrogen on Multiwalled Carbon Nanotubes at 77 K [J]. *Chem. Phys. Lett.* 2003(380): 526~529
- [11] Zhou L, Zhou Y P. Linearization of Adsorption Isotherms for High Pressure Applications [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1998 (53): 2 531~2 536
- [12] Zhou L, Zhang J S, Zhou Y P. A Simple Isotherm Equation for Modeling the Adsorption Equilibria on Porous Solids over Wide Range Temperatures[J]. *Langmuir*, 2001(17): 5 503~5 507
- [13] Zhou L, Zhou Y P. A Mathematical Method for the Determination of Absolute Adsorption from Experimental Isotherms of Supercritical Gases[J]. *Chinese J. Chem. Eng.*, 2001(9): 110~115
- [14] 周亚平, 冯奎, 孙艳, 周理. 述评碳纳米管储氢研究[J]. *化学进展*, 2003(15): 345~350
- [15] Zhou L, Zhou Y P, Sun Y. Storage of Hydrogen on Nanostructure Carbons: Experiments and Analyses [A]. In: Materials for Energy Storage[C]. San Francisco, 2003
- [16] Chae H K, Siberio-Pérez D Y, Kim J, Go Y B, Eddaoudi M, Matzger A J, O'Keeffe M, Yaghi O M. A route to high surface area, porosity and inclusion of large molecules in crystals[J]. *Nature*, 2004(427): 523~525
- [17] Rosi N L, Eckert J, Eddaoudi M, Vodak D T, Kim J, O'Keeffe M, Yaghi O M. Hydrogen Storage in Microporous Metal-Organic Frameworks[J]. *Science*, 2003(300): 1 127~1 129
- [18] Chen P, Xiong Z, Luo J, Lin J, Tan K L. Interaction of hydrogen with metal nitrides and imides [J]. *Nature*, 2002(420): 302~304
- [19] Ruthven D M. Past Progress and Future Challenges in Adsorption Research[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2000(39): 2 127
- [20] 周理, 周亚平, 孙艳, 苏伟. 超临界吸附及气体代油燃料技术研究进展[J]. *自然科学进展*, 2004(14): 615~623.
- [21] Zhou L, Sun Y, Zhou Y P. Enhancement of the Methane Storage on Activated Carbon by Pre-adsorbed Water [J]. *AIChE Journal*, 2002(48): 2 412~2 416
- [22] Perrin A, Celzard A, Mareche J F, Furdin G. Methane storage within dry and wet active carbons: a comparative study[J]. *Energy & Fuel*, 2003(17): 1 283~1 291

(责任编辑 邱夜明)

· 科技动态 ·

“2004 年度国防科技工业 10 大新闻”评出

2004 年, 国防科技工业战线以科学发展观统领各项工作, 大力促进军民结合、寓军于民, 加快结构调整步伐, 推进体制机制创新, 实施人才兴业战略, 开展先进军工文化建设, 武器装备研制生产取得重要成果, 军工经济保持快速健康增长, 军工民品发展势头强劲, 国防科技工业改革与发展各项工作有序推进, 取得了重大进展。

2005 年 1 月 17 日, 国防科技工业委员会举办新闻发布会, 向媒体公布了由该委在国防科技工业系统内征集, 并组织新闻界专家评选出的“2004 年度国防科技工业 10 大新闻”: (1) 我国核事业 50 年成就辉煌, “中国核事业 50 年成就展”反响强烈; (2) 我国 2004 年成功发射“八箭十星”, 创 4 项“历史之最”; (3) 我国造船连续 10 年居世界第 3 位, 国际

地位显著提升; (4) 马祖光被授予“国防科技工业战线楷模”荣誉称号, 全国开展学习马祖光活动; (5) 国产“新舟”60 飞机首次走出国门, 中国巴西合资生产的 ERJ145 喷气支线客机交付国内用户; (6) 我国自主设计、建造的大型商用核电站——秦山核电二期工程全面建成投产; (7) 中国北方工业公司中标伊朗德黑兰地铁 4 号线, 成为我国签订的金额最大的国际工程承包合同; (8) 我国首次建造液化天然气船, 超大型原油轮实现建造批量化; (9) 一批导弹武器在珠海航展亮相, 我国高新技术武器研制生产取得重大成果; (10) 中国兵器装备集团长安汽车集团公司汽车产销量跃升国内第 3, 长安福特·蒙迪欧 2.5V6 被评为“中国 2005 年度车型”。

(本刊通讯员 冉露阳)