

漫谈 CO₂ 减排与氢能源

毛宗强



一、CO₂ 减排的重要性与迫切性

世界能源供应主要依赖化石能源，而化石能源的长期大量使用在促进了区域经济发展的同时，也严重破坏了环境，造成了严重的生态问题，如酸雨，气候变暖等。科学观测表明，地球大气中 CO₂ 的浓度已从工业革命前的 280 ppmv (百万分体积比) 上升到了目前的 379ppmv；全球平均气温也在近百年来升高了 0.74℃ (图 1)，特别是近 30 年来升温明显。总体上看，全球变暖对地球自然生态系统和人类赖以生存环境造成了日益严重的负面影响。

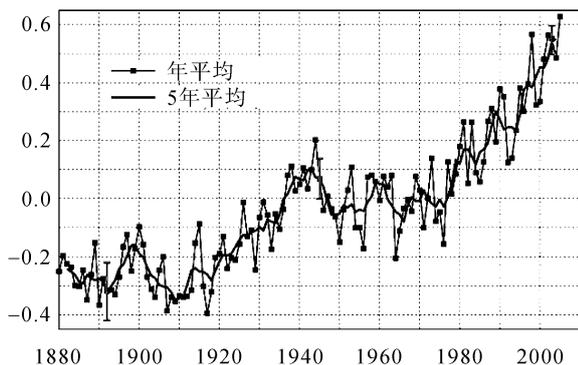


图 1 近百年来全球平均气温变化

根据测算：如果地球平均气温再升高 2℃，则意味着格陵兰岛的冰盖将彻底融化，从而使得全球海洋的水平面上升 7 米，将会淹没许多城市和土地。当气温上升 2℃ 的时候，全球的山脉都会受影响，山系的冰架和冰峰雪原将大幅度减少以至消失，直接影响整个水循环过程，水将变得更少更脏。全球的食物，尤其是热带地区的食物将会大受影响。三分之一的动植物种群因为天气的变化而灭绝。气候变暖对人类健康的直接影响将更加明显，高温使得病毒、细菌、寄生虫、敏感原更加活跃，同时它也会损害人的免疫力和疾病抵抗力，从而大大降低人们的生活质量。对气温上升的速度科学界有不同的估计。比较极端的估计认为，如果我们还想将全球气温上升控制在 2℃ 内，那么让人类控制二氧化碳排放量的时间从现在起还有 10 年而已，的确是时间紧迫了。

二、氢的特点

氢是周期表中 1 号元素，相对原子质量为

1.008，是已知元素中最轻的一个。氢在自然界有 2 个稳定的同位素氕(¹H)和氘(²D)，它们的丰度分别为 99.9844% 和 0.0156%。氚(³T)是放射性同位素，它的半衰期为 12.26 年。

地球表面并没有纯氢存在。氢在地壳中大约为第十位丰富的元素。地球中的氢主要是以化合物形式存在，其中水是最重要的化合物。氢占水重量的 1/9。海洋的总体积约为 13.7 亿立方千米，若把其中的氢都提取出来，大约有 1.4×10^{17} 吨，所产生的热量是地球上矿物燃料的 9000 倍。

按质量计，氢占地壳 1%；若按原子百分比计，则占 17%。矿物中氢通常以 OH⁻、H₂O 以及在某些情况下以 H⁺ 形式存在 (如在某些盐类矿物中)。另外，在某些矿物中发现有 HO 存在，如在绿柱石、锂电气石、斜硅镁石和顽火辉石的构造间隙和通道中有氢氧集合体 HO。

在地球稀薄的大气层中开始有游离气态分子氢，但在地球表面数量很少。地球大气圈底层含氢量为 $(1 \sim 1500) \times 10^{-6}$ ，其浓度随着大气圈高度的上升而增加。氢的含量在地球的平流层，大约 0~50 千米范围，几乎为零；在地球大气内层 80~500 千米，氢占 50%，在地球大气外层，500 千米以上，氢占 70%。

太阳光球中氢的丰度为 2.5×10^{10} (以 Si 的丰度为 10^6 计)，是硅的 25000 倍，是太阳光球中最丰富的元素。据计算，氢占太阳及其行星原子总量的 92%，占原子质量的 74%。

大约 250 年前人们就发现了氢；约 150 年前，氢就获得工业应用。在使用天然气之前，人们就用所谓的城市煤气来取暖、做饭或道路照明；那种煤气含氢量达 60%。我国在推广天然气之前，广泛使用的由煤制取的城市煤气中，氢含量高达 50% 以上。人类在 20 世纪就利用液氢发射火箭、航天飞机去探索宇宙的秘密，氢早就是我们应用的能源。

由于氢需要用各种能源：煤炭、石油、天然气、

核能、太阳能、风能等可再生能源来制取，因此，氢被称为二次能源。二次能源的种类很多，如甲醇、汽油、电等都是二次能源。可以说，氢是除电以外的最重要的二次能源。

与化石能源相比，氢能源具有很多优点，可归纳如下。

氢是宇宙中最丰富的物质，在构成宇宙的物质中约占 75%。在地球上的氢主要以其化合物，如水(H₂O)、甲烷(CH₄)、氨(NH₃)、烃类(C_nH_m)等形式存在。水是地球上分布最广的物质，水在地球上几乎是无所不至，水就是地球上名副其实的“氢矿”。

氢具有可再生性。氢通过化学反应产生电能(或热能)并生成水，而水又可由电解再转化为氢和氧，如此循环，永无休止。可以说，只要有太阳和水，就会有氢。

氢是环保、高效能源。使用氢燃料电池，通过电化学反应将氢转化为电能和水，过程中不排放CO₂和NO_x，没有任何污染，另外氢燃料电池的效率最差也有 35%~45% (通常都更高)，高过诸多种类的内燃机，其效率只有 20%~30%。

氢由于具有以上特点，可以同时满足资源、环境和可持续发展的要求，是其他能源所不能比拟的，所以备受重视。

三、氢能源分析

完整的氢能源体系包括氢的制备、储存、运输、分配和应用。氢的制备与储存直接影响其成本，氢的应用关系到氢的市场；氢的安全性问题则直接影响其应用范围。以下将分别对氢的各个方面进行讨论。

氢的制备 氢是一种二次能源，其生产方法很多，但目前主要依赖于化石能源。在全球范围内，氢的制取 48%来自天然气，30%来自石油，18%来自煤，只有 4%来自水的电解。在各种制氢技术和工

艺中，考虑 CO₂ 的排放，则利用天然气制取氢气工艺的成本最低，其次是利用煤炭气化法和生物质气化制氢法、水电解法，最后是利用可再生资源发电电解制氢法、核能发电制氢和利用生物质发酵制氢的方法。目前，化石能源制氢成本最低，在近期有巨大的环境、经济、安全、效率方面的吸引力。但从长远来看，化石能源制氢受到本身资源和碳排放的制约，而利用生物质、太阳能、风能等可再生能源制氢则是永恒的发展方向。可再生能源制氢的方法很多，如可再生能源(太阳能、风能、海洋能等)发电——电解水制氢；热化学法制氢，包括太阳能热分解水制氢；太阳能光化学分解水制氢；太阳能光电化学分解水制氢；模拟植物光合作用分解水制氢；光合微生物制氢；等等。在太阳能制氢方面，最近《科学》杂志上报道了关于光催化水解制氢的最新情况，美国麻省理工学院(MIT)已成功研制了一种由钴和磷等元素组成的新型环保水解催化剂，若能进一步改进，就有可能较好地解决低成本制氢问题。

可再生能源制氢的实质是利用可再生能源代替化石能源，主要还是从水中提取氢！从近期和中期的角度来看，利用可再生能源制氢在整个制氢中所占的比例还是有限的，原因是受成本的制约。化石能源制氢仍将起主导作用，但是随着世界各国环境法规的日益严格以及社会对洁净的可再生能源需求的大幅度增长，我们有理由相信根据各地条件的特点，多种制氢方法将协同发展。

氢储存与运输 H₂在一般条件下为气态，密度很低，仅为空气的 1/14，这就给如何储氢带来了困难。如何廉价有效地对氢进行储存，并且便于使用和运输，是目前研究的热点。目前常用的大规模储氢技术有压缩储氢、液化储氢、金属氢化物储氢和吸附储氢等(表 1)。

表 1 常用储氢技术

储氢方法	原理	优点	缺点
压缩储氢	在高压下将 H ₂ 以气态储存于高压容器中	成本低，压力高，运输和使用方便	能量密度低，能耗大，使用和运输有危险
液化储氢	将液化后的 H ₂ 储存于真空绝热容器中	能量密度大	能耗大，成本高，绝热要求高，使用不方便
金属氢化物储氢	H ₂ 与金属反应并以固体金属氢化物的形式储存	单位体积储氢密度大，压力平稳，运输和使用安全	单位质量储氢量小，金属氢化物易破裂，材料成本高
吸附储氢	根据吸附理论，利用多孔材料(如纳米碳管)物理吸附 H ₂	储氢能力大	纳米碳管技术不成熟，价格昂贵

目前, 输送 H_2 的方式主要有两种, 一种是车船输送, 通过储氢容器装在车、船等运输工具上进行输送, 适合用户数量较为分散且需求量不大的情况; 另一种是管线输送, 与天然气管道类似, 适用于用量大的情况。

氢虽然有很好的可运输性, 但不论是气态氢还是液态氢, 在使用过程中都存在着一些问题: 首先, 由于氢特别轻, 单位能量所占的体积大, 使得运输成本较高; 其次, 氢特别容易泄漏, 真空密封的氢燃料箱, 每 24 小时的泄漏率达到 2%, 而汽油一般一个月才泄漏 1%, 因此对储氢容器和输氢管道的要求较高, 设备成本上升; 最后, 氢易燃易爆, 而液氢温度极低, 在运输和使用过程中对安全要求较高。

氢的利用 氢能利用的主要方式有两种, 即通过氢燃料电池的电化学技术和直接燃烧利用的热化学技术。其中, 燃料电池技术又被人们视为氢能利用的终极解决方案, 是当前研究的重点和热点。

燃料电池是一种直接将储存于燃料(主要是氢)和氧化剂中的化学能通过电化学反应直接转化为电能的发电装置。其最大特点是能量转化过程中不受“卡诺循环”限制, 能量转换效率很高, 达到 60%~80%, 是普通内燃机的 2~3 倍。燃料电池种类较多, 其中质子交换膜燃料电池 (PEMFC)、固体氧化物燃料电池 (SOFC) 和直接甲醇燃料电池 (DMFC) 技术相对成熟。燃料电池用途十分广泛, 目前发展较为成熟的应用项目有: 氢燃料电池汽车, 分布式燃料电池电站以及便携式燃料电池。

燃料电池汽车用燃料电池取代常规的内燃机, 以氢气为燃料, 运行过程中不排放 CO_2 和 NO_x 等污染物, 产物只有水, 真正实现了“零排放”, 是未来汽车发展的方向。例如, 丰田公司的 FCHV-adv 零排放氢燃料电池车最高时速可达 155km/h, 一次充氢的续航里程达到 830km, 超过一般汽油汽车, 加氢也仅需 3 分钟; 已经达到实用的程度。2008 年北京奥运会, 我国自制的 3 辆氢燃料电池客车和 20 辆帕萨特领驭氢燃料电池轿车为奥运提供了服务。2010 年上海世博会, 则有 196 辆氢燃料电池车参与服务。

氢燃料电池汽车在最高时速、行驶里程和加注时间等技术环节已达到汽油车标准, 而且氢燃料环保可再生, 使得氢燃料电池汽车前景看好。国际汽车界宣布在 2015 年燃料电池汽车将进入商

业化阶段。

分布式氢燃料电池电站是燃料电池的又一大市场。例如, 美国联合技术公司 PureCell™ 200 型磷酸燃料电池 (PAFC) 电站功率达到 200kW; 日本厂商开发的 1 千瓦固体高分子燃料电池 (PEFC) 发电机组容积仅为 180 升, 可以放置到公寓阳台上。2009 年 5 月, 日本已开始商业化销售家用千瓦级热电联供燃料电池。

便携式燃料电池已经开始用于笔记本电脑电源、移动小电站, 乃至单兵电源, 应用范围不断扩大。新的调查显示: 2008 年全球出售大约 9000 台便携式燃料电池设备。主要是燃料电池的玩具及与越来越多的远程监测的小型发电机组。便携式燃料电池面临着其他电池的竞争。锂离子电池, 镍氢电池的新技术新产品不断推出, 电池可靠性也在不断提高, 所以短期内燃料电池难以取代原有的二次电池。便携式燃料电池的前景还是主要取决于其本身技术发展的程度。希望随着新材料的出现, 新技术的应用, 使便携式燃料电池在寿命、容量、可靠性方面都有质的提高, 则便携式燃料电池的前途是光明的。

直接燃烧氢气是利用氢能的另外一种方式。氢内燃机 (HICE) 是氢气直接燃烧技术的代表。其能量转化过程遵循“卡诺循环”, 效率只有燃料电池的约一半, 但是由于技术上继承了内燃机百年来积累的理论 and 经验, 没有太大的障碍, 成本较燃料电池低得多, 且运行过程中的排放也很低, 所以在汽车领域被视为由汽柴油车到氢燃料电池车的一个很好过渡。

HICE 的结构和工作原理与传统的内燃机没有本质区别, 但由于氢与传统的汽柴油燃料的性质不同, 如果不加以改进, 则会产生早燃、回火、爆燃等异常现象, 使发动机不能正常工作; 此外, 氢燃烧后生成水, 会使机油丧失润滑能力、火花塞短路并锈蚀气缸。

目前, 研究 HICE 的厂商主要有宝马、福特和马自达等, 其中, 宝马研制的 BMW H2R 采用的是一台排量为 6L 的 12 缸发动机, 最大输出功率超过 210kW, 百千米加速时间仅为 6s, 最高时速可达 302.4km/h。我国在 HICE 方面的研究起步较晚, 但发展迅速, 长安自主研发的“氢程”氢内燃机概念跑车, 百千米加速时间为 6.5s, 最高时速 230km/h,

续航里程大于 230km, 性能达到汽油机水平, 同时效率比同排量的汽油机高 30%以上, HC、CO 和 CO₂ 排放几乎为零。

将氢气和天然气按一定比例混合得到的气体燃料称为氢烷, 即为 HCNG。由于氢气燃烧速率快、着火极限宽, 掺入氢气会改善天然气燃烧特性, 提高混合气的燃烧速率、扩大稀燃极限, 从而提高发动机性能, 降低发动机的排放。

HCNG 技术在国外已有近 20 年的应用, 作为汽车燃料的技术也已经成熟。美国阳光车道 (Sunline) 公司在两辆天然气公交车上使用 HCNG 进行了近半年的对比示范运行, 总行驶里程达到 24000 英里; 我国也有公司研制并运行了 4 辆 HCNG 大客车, 总里程达到上万千米, 取得很好的结果。总的来说, HCNG 技术将对开拓氢能应用领域、降低城市汽车尾气的排放、加快我国氢能实用化步伐起到重要作用。

氢的安全性 氢在使用和储运中是否安全可靠, 是人们普遍关注的问题。氢的独特物理性质决定了其不同于其他燃料的安全性问题, 如更宽的着火范围、更低的着火能、更容易泄漏、更高的火焰传播速度、更容易爆炸等; 但是氢的高扩散性, 则是有利于安全的因素。

20 世纪 80 年代末, 德国、英国和日本三国的三个大汽车公司, 对于氢燃料的使用进行了试验和评估。三家公司一致认为, 氢燃料和汽油一样安全。即使撞车起火燃烧, 至多也不过引起一场大火, 但很快就能熄灭。物理学家 Amory B. Lovins 认为, 氢气有令人羡慕的安全记录。任何燃料都具有能量, 都隐藏着着火和爆炸的危险。和其他燃料相比, 氢气是一种高能而安全性高的气体。氢气在开放的大气中, 很容易快速逃逸, 而不像汽油蒸汽挥发后滞留在空间中不易疏散。氢焰的辐射率小, 只有 0.01~0.1, 而汽油空气火焰的辐射率大于 0.1, 即后者几乎为前者的 10 倍。这说明氢火焰散发的辐射热小, 危害小。事实证明, 氢气和其他燃料一样安全, 氢安全可以通过严格的规章来保证与实现。

四、CO₂ 减排离不开氢能

我国目前 CO₂ 排放量居世界第一, 而且根据我国的发展规划, 今后 40 年还要排出巨量的 CO₂。我国政府主动提出到 2020 年我国单位 GDP 的 CO₂ 排放量将比 2005 年降低 40%~45%。可是 2010 年上半

年, 单位 GDP 的能耗不减反而上升! 这要引起我国各界人士注意。笔者认为, 为了真正做到 CO₂ 减排, 必须要新思路: 要充分利用氢能。

减少 CO₂ 排放的途径主要有三个: 节约能源、提高能源转换及利用效率; 调整能源结构, 增加可再生能源的比重; 再就是利用现有煤炭时, 同时实现 CO₂ 捕集与储存。氢能在这三个方面都发挥着不可替代的作用。

利用氢能可以成倍提高能源效率, 也就是大幅减排了 CO₂。氢能的主要利用方式是燃料电池, 通过电化学反应直接将化学能转化为电能, 能量转化过程中不受“卡诺循环”限制, 能量转换效率很高。一般汽油车从油井到最终车轮的总能源效率仅为 13%, 而氢燃料电池汽车从油井到车轮的总能源效率可达 30%, 是汽油车的两倍多。另一方面, 氢燃料电池的发电效率也高于常规发电技术。在较低的发电功率(0.01~1MW)情况下, 普通往复式引擎的发电效率约为 30%, 燃料电池的效率可达 40%; 发电功率在 1~100MW 的范围内, 蒸汽轮机的发电效率也在 30% 左右, 而燃料电池的效率则达到 50%~60%; 在较高的发电功率(100~1000MW)范围, IGCC 的发电效率最高可达到 60%, 但如果以燃料电池结合蒸汽轮机还将获得更高的发电效率。相对传统能源, 氢能的利用大大提高能源利用效率, 从而减少化石能源的使用, 并最终实现 CO₂ 的减排。

在调整能源结构方面, 氢能也起着很重要的作用。目前, 可再生能源由于时空不稳定使其应用价值大为降低。目前, 电网不可能全部吸纳可再生能源发出的电, 大量的风力发电机空置。氢能可以很好地解决这一问题。首先, 氢可以将太阳能、风能等可再生能源的多余电力以氢气的形式储存起来; 然后, 在需要时, 再利用燃料电池将氢变成优质电力; 这样, 氢能可以使风能不受电网份额的限制; 此外, 氢能还可直接用作汽车的燃料。可以说, 氢能是连接可再生能源和用户的最好桥梁, 将不稳定的可再生能源转化为稳定的氢能, 再将氢能用于汽车或是发电, 达到调整能源结构的目的, 最终实现能源的低碳化, 减少 CO₂ 排放。

煤的利用中 CO₂ 收集与埋藏, 即 CCS 技术首要步骤是煤的气化, 产生合成气 (CO 和 H₂), 再经水煤气变换得到 CO₂ 和 H₂, 通过分离, 就可以从相对纯粹的排气中捕捉 CO₂, 得到的 H₂ 则可以作为燃料

或进一步利用,可见,氢气在其中的作用十分重要。

五、氢能需突破

低碳时代,氢能正面临着前所未有的机遇,但是机遇与挑战并存,氢能迟迟不能得到大范围的推广应用,主要有以下几个问题:

(1) 成本问题。氢的生产和储运过程成本高,较之化石能源没有优势,燃料电池由于采用贵金属作材料也使得氢燃料电池汽车成本一直居高不下;

(2) 配套的基础设施建设不足。如加氢站及输运管线,由于耗资巨大,目前均处于试点阶段,基础设施跟不上,严重影响了氢能的推广应用;

(3) 氢能的发展缺乏相关的标准和法规。

随着环境和能源问题的日益严重,人们迫切需要一种合适的低碳能源来代替传统的化石能源。氢能使用过程不会产生 CO_2 和 NO_x 等污染物,又具有高效、可再生等优点,被人们誉为21世纪的理想能源。目前,许多国家都制定了氢能的发展计划,投入大量资金用于氢能研究。如美国的HFI(Hydrogen Fuel Initiative)计划,欧洲的HFP(Hydrogen and Fuel

Cells Technology Platform)计划,日本的Cool Earth计划,以及中国的国家中长期科技发展规划等。有理由相信:在科研工作者的努力、企业技术资金的投入和政府政策的扶持下,氢能必将在低碳时代发挥其重要作用。

(清华大学核能与新能源技术研究院100084)

作者简介

毛宗强博士,1947年出生,江苏淮阴人。清华大学核能与新能源技术研究院教授,博士生导师。自1970年起一直在清华大学从事科研工作,1993年起研究氢能与燃料电池等课题。2000~2005年期间为中国第一个国家973氢能项目的首席科学家。已发表160余篇文章,获得多项专利。主要中文编著有:《氢能——21世纪的绿色能源》、《燃料电池》、《无碳能源:太阳氢》等。现任中国可再生能源学会副理事长,氢能专业委员会主任,科技部“第三届973计划领域专家咨询组”能源专家,国际氢能学会(IAHE)理事会成员等。



科苑快讯

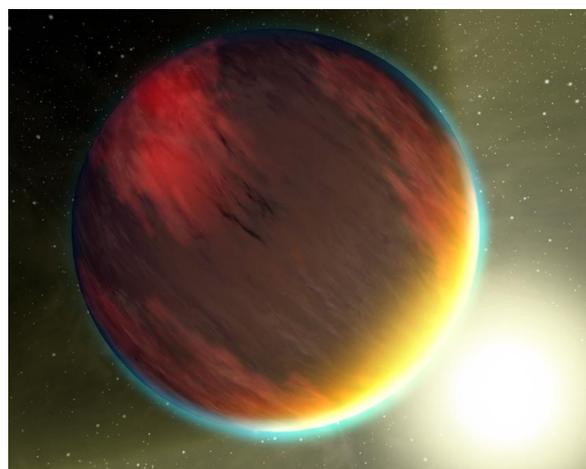
热木星不太可能有自己的卫星

热木星是指公转轨道非常接近其恒星以致气温极高的巨行星。太阳系中的巨行星——木星、土星和海王星都有卫星,而且有的个头比地球还大,但是最新研究表明那些热木星不太可能有自己的卫星。

法国尼斯大学的纳穆尼(Fathi Namouni)将这一发现发表在8月20日出版的《天体物理学杂志通信》(*Astrophysical Journal Letters*)上。他说热木星诞生于寒冷的外行星带,然后慢慢向自己的恒星迁移,这个过程大约需要10万年。他用计算机模拟了一颗热木星向其恒星迁移的过程,以木星为参照,他为热木星安排了4颗卫星,但最后却都丢失殆尽。随着其不断靠近恒星,3颗较远的卫星脱离原轨道,被恒星拖如一个拉长的轨道,而最近的卫星则一头撞向它,于是热木星失去了所有卫星。

不过也有同行认为,他对卫星消失这一现象解释得还不充分。事实上,卫星撞上热木星后溅到太空的碎片会形成新的卫星,但纳穆尼并未考虑这种

情况。但是支持纳穆尼的一派认为,他简明扼要地阐明了这一从未得到证实的猜测,因为太阳系中离太阳最近的水星和金星也都没有卫星。



太阳系外热木星想象图

(高凌云编译自2010年8月18日澳大利亚广播公司科技新闻)