

# 光生物制氢技术研究进展与经济分析

孙绍晖, 孙培勤, 陈俊武

(郑州大学化工与能源学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 氢能可作为汽车清洁能源替代石油等碳基能源, 但目前以石油、煤炭、天然气为原料生产氢气是不可持续的。通过热解、电解、光解和生物质化学分解等途径可以由太阳能制取可再生氢气。本文重点介绍其中的光生物法生产可再生氢能的国内外研究现状和发展趋势, 计算了几种光生物法制氢工艺的太阳能氢气(STHs)转换效率, 对比分析了近10年来该技术工业可行性的经济技术评估结果, 并估算了光生物法生产可再生氢能的全生命周期(LCA)CO<sub>2</sub>排放指标。

**关键词:** 光生物法制氢; 光能转化效率; 经济技术评估; 全生命周期分析

中图分类号: S215

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)01-0020-05

## Development and techno-economic analysis of photobiological hydrogen production

SUN Shao-hui, SUN Pei-qin, CHEN Jun-wu

(College of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Hydrogen can substitute carbonous energy such as oil as clean fuel for cars, but it is an unsustainable pathway to produce hydrogen from oil, coal or natural gas resources. The renewable hydrogen can be produced from solar by thermolysis, electrolysis, photolysis or biomass conversion methods. In this paper, the technologies and development of photobiological producing hydrogen are emphatically discussed. The STHs (solar to hydrogen energy efficiencies) of several routings are calculated, the results of techno-economic analysis of photobiological hydrogen producing systems in recent 10 years are summarized and compared with each other, and the life cycle assessment (LCA) method is used to evaluate the emission of CO<sub>2</sub> in this hydrogen production process.

**Key words:** photobiological hydrogen production; solar to hydrogen energy efficiency; techno-economic analysis; LCA

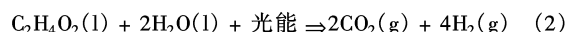
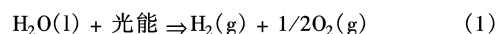
环境污染和能源危机的双重压力迫使各国积极寻找各种可再生的石油替代能源, 氢能具有热值高、排放物为 H<sub>2</sub>O、无毒无害的优点, 氢燃料电池混合动力汽车技术上已经成熟, 如果能大规模低成本地利用太阳能生产可再生氢, 氢燃料电池有可能取代烃类成为运输工具的主要动力, 从而大大减少碳排放。目前太阳能生产可再生氢的主要路径主要可分为热解、电解、生物质化学转化、光生物分解 4 类途径<sup>[1]</sup>。其中生物质转化是正常条件下, 绿色高等植物吸收 CO<sub>2</sub>, 利用光合作用把光能转化为化学能储存在生物质中, 然后通过生物化学法制氢。光解制氢省去了生物质的中间环节, 是在缺硫、缺氧环境下, 抑制正常光合作用, 利用某些微生物在太阳光照射下产生特定的酶, 酶催化分解水或有机物产生氢分子。除了上述直接利用太阳能的途径, 还有利用有机底物的暗发酵制氢途径。本文主要介绍微生物光解水制氢的经济技术最新进展。

## 1 原理

研究表明, 高等生物叶绿体的光合系统包括

PS-II 和 PS-I, PS-II 利用光能分解水产生氧气和电子, PS-I 利用光能和电子同化 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 为有机物。有些原核和真核微藻(如蓝藻和绿藻), 在光合作用无法正常进行时, 例如在缺氧、缺硫环境下培养的莱茵绿藻(*Chlamydomonas reinhardtii*), 生成碳水化合物途径受阻, 可以在 PS-I 中合成酶并利用这些酶催化 H<sup>+</sup> 和电子结合生成氢气。还有一类紫细菌(purple bacteria)仅有光合系统 PS, 能力不足以分解水, 在无氧条件下这类细菌可以分解简单有机酸(醋酸)产氢。近些年的分子生物学研究发现, 不同种类生物体、酶、化学环境下, 产氢机理和历程有所不同<sup>[2]</sup>:

(1) 根据微生物光解产氢利用的底物不同, 可以分为微藻光解水产氢、异氧型光合细菌光解有机物产氢。分解水和醋酸的化学反应式如下:



从热力学角度看, 水分解产氢以及醋酸分解产氢的标准状态吉氏自由能( $\Delta_r G^\ominus$ )分别为 237.1、75.4 kJ/mol, 都大于零, 因此上述分解反应如果没有额外的能量输入无法自发进行, 微生物需要利用

光能在特定酶催化下,经过一系列的生理代谢产生分子氢。

(2)酶系不同,产氢过程中的光能利用率和氢气生成速率有较大差别,按不同酶系可分为氢化酶或固氮酶<sup>[3]</sup>。①蓝藻和光合细菌固氮酶,酶的活性中心含钼、钨、铁,在把 N<sub>2</sub> 转化为氨的同时生成氢气,如果环境中没有氮气,固氮酶利用 ATP 和还原剂产氢,但产氢的光子利用率不高,还原 H<sup>+</sup> 需要过量的 ATP 和电子参与,另外酶催化的反应速率小于 10 s<sup>-1</sup>,整个产氢系统对氧敏感。②蓝藻和许多绿藻含有氢化酶,能催化 H<sup>+</sup> 和电子生成 H<sub>2</sub>。催化作用分为单向和双向可逆,单向酶含 FeS 簇只能催化 H<sub>2</sub> 为 H<sup>+</sup>,这种酶不能产氢。可逆氢化酶活性中心有 Fe 或 NiFe,和固氮酶一样对氧敏感。但是氢化酶还原 H<sup>+</sup> 不需要 ATP,光子理论转化效率和转化速率高于固氮酶。

(3)利用光生物法制氢的工艺流程可分为直接光解水法、间接光解水法和固氮酶利用水(微藻)或有机物(光合细菌)提供的电子在 ATP 参与下还原 H<sup>+</sup> 为 H<sub>2</sub> 3 种方法。①直接光解水法:基于氢化酶直接光解水得到氢气和氧气,然后分离得到氢气。②间接光解水法:首先光解水放出 O<sub>2</sub>,并储存有机物;第二阶段氢化酶利用光能,消耗储存有机物得到 H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>,实现氧气和氢气时空上的分离。整体的反应结果仍是分解水产氢,但是光子的利用效率比直接法低。③固氮酶利用水(微藻)或有机物(光合细菌)提供的电子在 ATP 参与下还原 H<sup>+</sup> 为 H<sub>2</sub>。由于氢氧混合气体的安全性以及氢化酶对氧气的敏感性,第 1 种直接光解水的工艺工业化面临的困难较大。第 3 种固氮酶制氢由于需要 ATP 参与,能量转化效率较低。第 2 种间接法方案是 2000 年加州大学 Berkeley 分校 Melis 等提出的,第一步在廉价的开放池子里培养绿藻,然后在密闭缺氧、缺硫环境下抑制 PS-II,激活氢化酶活性,氢化酶开始在 PS-I 系统分解有机物产生 H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>,2003 年发现,实际上这一过程中 PS-II 分解水产氧并没有停止,还原 H<sup>+</sup> 的电子主要来源于分解水,只是产生的氧被系统的呼吸作用所消耗,最终的净结果是光照消耗有机质产生氢气和 CO<sub>2</sub>。

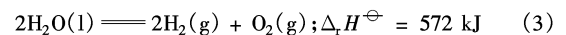
## 2 太阳能转化效率(STH)

直接法和间接法工艺路线的光生物化学转化的净效果虽然一致,但微生物所经历的生理代谢过程不同,其间涉及的光子利用率和最终的能量转化效

率(STH)并不一致<sup>[3]</sup>。需要注意的是,并非所有波长的太阳能都能被光合系统利用,微藻能吸收的有效光波长(PAR)范围为 400~700 nm,占全部太阳能量的 0.43~0.50。紫细菌(purple bacteria)可利用波长范围为 400~950 nm<sup>[2]</sup>。

$\eta = \Delta_r H^\ominus / E_{\text{input light}}$ ,  $\Delta_r H^\ominus$  代表分解反应产出氢气的能量。 $E_{\text{input light}}$  代表微生物产氢过程中吸收的光能,为了估算最大效率,假定所吸收的光子 100% 被产氢过程利用。

### 2.1 氢化酶催化直接光解水



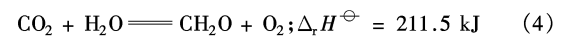
此过程中需要 8 个光子传递 4 个电子。在光合作用能吸收的有效光波长(PAR)范围内,1 mol 光子所含有的能量平均为 1 einstein = 209 kJ,因此可以推算出产氢过程最大能量效率为 34%。

### 2.2 固氮酶催化直接光解水

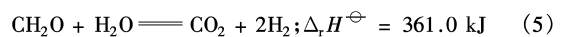
除了 4 个电子的传递需要 8 个光子以外,固氮酶催化制氢每个电子还需要 2 个 ATP,1 个电子通过电子传递系统产生 1 个 ATP,8 个 ATP 需要传递 8 个电子即 16 个光子,耗能是氢化酶的 2 倍。因此最大光能转化效率 17%。

### 2.3 氢化酶间接光解水

第一步固定 CO<sub>2</sub> 生成糖:



第二步分解糖生成 H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>:



总  $\Delta H = 572 \text{ kJ}$ , 固定 CO<sub>2</sub> 需要 4 个电子,即 8 个光子;水解糖过程 1 个电子需要 1 个光子。因此,上述历程总体需要 12 个光子,最大光能转化效率约 23%。

### 2.4 固氮酶间接光解水

除了氢化酶所需的 12 个光子外,固氮酶需要额外 8 个光子供应 ATP,整体历程需要 20 个光子,最大光能转化效率约 14%。

通过上述理论计算,绿藻产氢的光能利用率最大约达 30%,据统计<sup>[2]</sup>,实验室条件下 50 W/m<sup>2</sup> 产氢效率为 7%~9%,13 W/m<sup>2</sup> 产氢效率为 26%~35%,但是产氢速率太低没有实际意义。自然条件下藻类产氢的光能利用效率只有约 3%,远低于最大理论值。除了工程技术上的限制因素外,微生物自身的限制因素主要有:①光合有效辐射(PAR)只占太阳总辐射的 44% 左右。②藻类光合作用光子利用率低,存在光合作用饱和和吸收现象。植物在长期进化中倾向于吸收更多的光能,而不是更高的光

能利用率,在叶绿体的光合色素中只有一小部分处于特殊状态的叶绿素 a 能够进行光化学反应,将光能转化为电子能。其余的光合色素负责光能的吸收和传递,被称为捕光色素或天线色素,这部分天线色素对光子的吸收 90% 为无效吸收。③氢化酶逆分解消耗  $H_2$ 。④电子、质子在光合系统内代谢转移,传递速率低,动力学因素成为控速步骤,造成氢气生成速率低,而影响能量效率。如果商业化太阳能光生物制氢系统的转化效率提高到 15%,就能得到大规模的应用。

### 3 光生物转化技术科研进展

1896 Jackson 等人发现丝状蓝藻 *Anabaena* 能够产氢的现象,1942 年 Gaffron 研究发现斜生栅藻 *Scenedesmus Obliquus* 无氧无光照能诱导产氢,加以光照能提高产氢速率。直到 1970 年之后,光生物产氢技术逐渐受到关注,有关菌种筛选、化学因素诱导、基因工程改良、酶的作用机制、金属有机合成模拟酶催化等各方面研究取得许多成果。1982 年,Greenbawn 提出一步法间接光解水产氢的工艺。2000 年 Melis 开发了莱茵衣藻 *Chlamydomonas reinhardtii* 缺硫连续 70 h 两步法间接光解产氢的工艺。进入 21 世纪,各国对可再生氢能的研发兴趣和投入大大增加,随着藻类分子生物学研究的不断深入,许多光合作用以及产氢相关的基因被识别破译,使科学家可以有针对性地采用物种基因诱变和克隆技术陆续研制出一些优异产氢物种。如 Berberoglu 等<sup>[4]</sup> Berkeley 分校的 Melis 在美国能源部(DOE)一项 2004—2010 年氢能研究项目中,针对野生莱茵衣藻叶绿体天线尺寸大、光利用率低的问题,通过 DNA 插入突变和高通量筛选技术剪短只能吸收光能、传递光能但不能将光能转换的叶绿素天线 Chl antenna 的长度。这一项目 2003 年筛选出 *tla1* 突变体,2005 年筛选出 *tla2* 突变体,天线尺寸减少到原来的 42%,到 2008 年经过基因改造的绿藻 *tlaR* 入射光能量利用率达到 25%。美国国家可再生能源实验室(NREL)的 Maria 研究小组与法国和俄罗斯的合作者<sup>[5]</sup> 2000—2006 年针对产氢持续性和对氧的耐受度问题,通过基因工程把耐氧[FeFe]和[NiFe]氢化酶基因植入蓝藻中,期望提高产氢持久性和对  $O_2$  的耐受性。2007 年,The Regents of the University of California<sup>[6]</sup> 诱变与硫酸盐输送有关的通透酶,通过在 *CrepSulP* 基因上游或下游插入一个反义多核苷酸引物,使绿藻吸收硫受阻,在含硫环境中具有持续产氢能力。我国近

几年国家自然科学基金陆续资助了一些生物制氢方面的研究,如 2005—2007 年厦门大学龙敏南太阳能生物光解水制氢系统的研究、2007—2009 年河南农业大学张全国光合生物制氢体系的热效应及其产氢机理研究、2006—2009 年重庆大学廖强光生物制氢中光生化转化与传输机理的研究、2009—2011 年青岛生物能源与过程研究所范晓蕾基于基因改组技术的绿藻[FeFe]氢化酶改良的研究、中国科学院大连化学物理研究所的陈兆安基于微藻生物燃料电池技术的绿藻光解水制氢机理的研究。

除了生化工程改良优选微生物以外,工艺技术方面也不断取得进展。如采用分光系统减少表面光照强度,提高深层细胞入射光强。反应器选用高透光率、高耐候性、低氢渗透率和一定机械强度的材料制造。早期的工艺设计把藻类露天培养和密闭反应器产氢过程分开,采用间歇法产氢。2002 年 NREL 专家设计 2 个连串反应器,在反应器 1 的低硫介质中培养绿藻细胞,氧的生成不及呼吸作用的消耗,向生物反应器 1 中鼓泡送入  $CO_2$  和少量氧气,细胞可以在反应器 1 中通过光合作用和消耗醋酸盐获得能量生长。从反应器 1 向反应器 2 连续输送细胞液体,处于厌氧状态的细胞不会使反应器 2 处于有氧状态。受厌氧环境诱导的细胞开始合成氢化酶,然后开始产氢。这种设计使得反应器 2 已经处于厌氧状态,因此连串反应系统内不存在间歇反应系统内有氧向无氧的过渡态。反应器 2 不断向外排出细胞液体,使藻细胞在反应器 2 中的平均停留时间保持在 2 天,从而实现了几周的持续产氢。2009 年,Directed Technologies 公司的 James 等在 DOE、UC - Berkeley 分校、NREL、Princeton 大学等科研机构技术支持下,总结了较有前途的 5 种微生物(耐氧氢化酶绿藻、耐氧氢化酶蓝藻、硫酸盐通透酶改良绿藻、固定化缺硫绿藻、PNS 紫色无硫细菌)和 4 种反应工艺(生长和产氢时间相当的单个反应床、生长和产氢分开的 2 个间歇反应床、生长和产氢分开的 2 个连续式 Chemostat 反应床、产氢时间远大于生长阶段的单个 Chemostat II 反应床),对每种微生物给出 1 t/d 规模的工厂设计方案,并提出光生物产氢与生产废弃物发酵产氢相结合的制氢模式,有利于降低成本。

总之,经过几十年的发展,光生物转化技术目前还限于实验室规模,制氢成本仍较高,工业化面临的主要技术难题是:①改良优化微生物,提高太阳能利用率。②改良提高产氢微生物对氧的耐受力,保持稳定和持久产氢。③用遗传工程技术提高电子传输

速率,以便提高产氢率。④高效生物反应器的设计和与之相应的廉价制造材料。

#### 4 绿藻制氢经济技术分析

用单细胞生物通过光生物法生产氢燃料,主要有绿藻、蓝藻、光合成细菌3类微生物及间歇和连续2类工艺流程,微生物和工艺流程可以组合成不同的工艺路线。目前光生物法远未达到产业化阶段,一些专家在不同假设基础上对技术经济指标进行了评估和灵敏度分析,希望预测光生物法制氢技术在将来如何能达到或接近DOE制定的2.60美元/kg可再生氢目标价格。现对不同时期的几种典型预测进行介绍。表1中列出1998年IEA专家为两段间接光生物分解制氢法预测的数据<sup>[7]</sup>,2004年NREL的Amos预测300 kg/d全天候独立加氢站<sup>[8]</sup>,以及2009年Directed Technologies公司与DOE、NREL等专家评估10 t/d规模光生物产氢。3份报告时间不同,评估主体不同,但可以看出随着时间的推移,绿藻品种不断得到改良优化,使人们有信心用更高的光能利用率指标进行评估。而且反应器规格、气体

表1 不同时间独立绿藻制氢经济技术评估综合对比

时间	1998年	2004年	2009年
预测部门	IEA	NREL、DOE Amos等	Directed Technologies, Inc. James等
微生物种类	绿藻	截短天线 绿藻	耐氧氢化酶绿藻 LHC (Light Harvesting Complex) deletion mutant
生产工艺	两段间歇	生长、产氢 连串反应	Chemostat II 连续产氢
反应器单位成本/ 美元·m <sup>-2</sup>	—	10.0	10.5 <sup>①</sup>
生产规模/t·d <sup>-1</sup>	25.0	0.3	10.0
占用土地公顷	200	11	81
每年单位土地产 氢折合/GJ·m <sup>-2</sup>	0.548	0.119	0.541
总投资/百万美元	43.00	5.20	21.73
单位产品投资/ 美元·t <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>	4700	47500	6000
太阳能转化为氢气最大理 论值 <sup>②</sup>	STH 能量利用率	1.5% <sup>③</sup>	9.2% <sup>④</sup>
出厂价/美元·kg <sup>-1</sup>	1.40	13.53	2.41

注:①透光膜0.54美元/m<sup>2</sup>,池体0.47美元/m<sup>2</sup>,池沿7美元/m,阀门3.563万美元,其他配件721.66万美元,合计914.382万美元;②光能利用率:露天池生产酯类10%,培养池7%,生物反应器生产氢100%;③基于光饱和和吸收限制,氢气最大储存限制,10% PAR光能利用率;④基于生长、产氢100% PAR光子利用率,无光饱和和吸收限制。

收集、原料输送、管道、厂房布局等工艺条件逐渐细化。例如1998年预计露天池14座120万m<sup>2</sup>,培养池14万m<sup>2</sup>,沉降池14万m<sup>2</sup>,产氢光生物反应器14万m<sup>2</sup>,到2009年时设计的反应装置为200根Chemostat II型连续光生物反应器(330 m×12 m×10 cm)。和其他化学制氢方法相比,光生物转化法占地面积较大,这主要是因为单位土地面积太阳能密度低,直接利用太阳光获得能量需要占用大规模的土地。

#### 5 净能量(NER)分析

NER是衡量整个生产工艺过程绿色程度的一个重要指标,该值大于1表示整个系统产出能量大于输入能量,意味着该能源生产过程是可持久的,例如2004年NREL对风/电解制氢工艺的评估NER=13.2。该值有时也会小于1,例如评估的天然重整制氢NER=0.66,意味着该过程输入能量大于输出能量,并不是可持续生产氢的绿色方法。2007年,澳大利亚Burgess等<sup>[9]</sup>比较玻璃、低密度聚丙烯、聚丙烯酸3种光生物反应器材料的净能量比率NER,NER=系统生命周期内输出H<sub>2</sub>能量/输入总能量,其中能量输入(系统生命周期中消耗的不可再生能源)主要包括:①建设中设备制造、安装能量,这方面主要是生物反应器,不同材料(玻璃、低密度聚丙烯LDPE、丙烯酸树脂)制造过程和生命周期中每年分摊的能耗不同。②生产运行中所需能量,微生物液体输送中管道、反应器直径、流速与能耗有关,较大的管径输送液体耗能较少。③氢气压缩和储存能耗,若氢气压缩至20 MPa、压缩设备和压力容器材料这一项约占氢能的10%。

按照产出H<sub>2</sub>的热值(氢气高位热值HHV或氢气低位热值LHV)估算,单位换算为MJ/m<sup>2</sup>。影响氢气能量输出的有关因素和参考值为:①光合作用产氢效率5%;②系统利用率,产氢微生物细胞培养生长占用设备,取值0.8;③光生物反应器透射率(T)影响藻类对光的吸收,取值0.85;④氢气收集效率,取值0.8。

选用直径0.090 m、厚度180 μm的LDPE管,在生命周期为3年的条件下,光生物法产氢过程每年输入能量包括:①光生物反应器自身能耗13.5 MJ/m<sup>2</sup>;②输送能耗3.6 MJ/m<sup>2</sup>;③氢气压缩能耗22.9 MJ/m<sup>2</sup>。每年输出能量为氢气高位热值,为229 MJ/m<sup>2</sup>。

NER=5.7,使用玻璃材料的NER稍低于低密度

聚丙烯,使用聚丙烯酸树脂薄膜厚度3 mm,虽然使用寿命20年,但净能量NER降低很多。

## 6 全生命周期分析(LCA)

评估预测光生物法制氢的LCA文献较少,本文根据上述NER分析,把光生物法制氢主要温室气体排放分为3项:反应器材料和制造、生产过程中液体动力输送、氢气压缩和相关设备制造。有一些和生物制氢类似的方法如Granovskii等<sup>[10]</sup>对风电制氢和太阳能电解制氢压缩到2 MPa的温室效应气体GHG(g/MJ)排放给出的数据为风电7.05,光电17.4,天然气重整75.7。2004年,Spath等<sup>[11]</sup>给出的风电制氢全球变暖潜能值折合为CO<sub>2</sub>质量(GWP)为970 g(CO<sub>2</sub>)/kg(H<sub>2</sub>),即8.08 g/MJ,可见这2份LCA独立报告对风电制氢的温室气体排放评估基本一致。

本文以NREL报告氢气压缩和设备GWP=170为基准,按照NER计算的氢气压缩与液体输送2项的能耗数据比例,给出液体输送的GWP为27,文献中给出反应器材料LDPE热值78 MJ/kg,平均GHG为1 990 g(CO<sub>2</sub>)/kg(LDPE)<sup>[12]</sup>,制成反应器的LDPE折合13.5 MJ/(m<sup>2</sup>·a),产氢229 MJ/(m<sup>2</sup>·a),于是反应器自身GHG为344 g/(m<sup>2</sup>·a),可换算为181 g(CO<sub>2</sub>)/kg(H<sub>2</sub>),3项合计GWP为380 g(CO<sub>2</sub>)/kg(H<sub>2</sub>),即3.17 g(CO<sub>2</sub>)/MJ。

## 7 对比讨论

太阳能光电解水制氢技术发展很快,目前太阳能光伏电池能量利用率为10%,电解水按效率77%、总效率7.7%计算,2015年直接光电水分解制氢目标价格为5美元/kg,但是光电转化使用的硅材料价格较高,并且在材料生产中需要排放更多的GHG,适合在缺水地区推广。根据现在发展趋势,光生物制氢技术有望很快建立示范装置,并达到2015年制氢目标价格10美元/kg。光生物法温室气体排放量较少,适合建立在水资源较丰富的地区,并可结合微生物发酵、污水处理等技术,实现社会效益最大化。

文献[3]给出中等规模生物质气化制氢太阳能效率0.2%~0.4%,制氢目标价格7美元/kg。巴西甜高粱自身能量效率0.9%,制乙醇太阳能效率0.16%,价格0.264美元/L。相比之下,直接利用太阳能转化的效率高1个数量级,但其工厂所需的直接土地面积很大,受土地所限,直接转化太阳能的工厂生产规模反而比利用生物质转化的工厂规模小1~2个数量级,单位kWh投资高1个数量级还多。

文献[1]给出一辆氢燃料电池汽车每年行驶17 699 km,需消耗13.7 GJ H<sub>2</sub>,太阳能光电解制氢效率10%,电解水效率77%,光电转化系统和电解系统耦合效率93%。美国内华达(Nevada)州每年太阳能资源2 300 kWh/m<sup>2</sup>,于是每年H<sub>2</sub>产量为165 kWh/m<sup>2</sup>,即0.589 GJ/m<sup>2</sup>,每辆燃料电池车需要生产氢的收集太阳能土地面积为23.3 m<sup>2</sup>,总土地面积46.6 m<sup>2</sup>。以上是光电制氢估算结果,有意思的是0.589 GJ/m<sup>2</sup>的光电解水制氢评估结果与本文前面光生物转化法经济技术分析中1998年、2009年结果非常接近。根据截止2008年底我国0.65亿辆民用汽车保有量估算,光生物转化制氢要满足汽车加氢,需要10 t/d规模的制氢站1 852个,土地150万m<sup>2</sup>。

## 参考文献

- [1] Turner J A. A realizable renewable energy future[J]. Science, 1999, 285:687-689.
- [2] Akkerman I, Janssenb M, Rochac J, et al. Photobiological hydrogen production: Photochemical efficiency and bioreactor design[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27:1195-1208.
- [3] Prince R C, Khesghi H S. The photobiological production of hydrogen potential efficiency and effectiveness as a renewable fuel[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2005, 31:19-31.
- [4] Berberoglu H, Pilon L, Melis A. Radiation characteristics of *Chlamydomonas reinhardtii* CC125 and its truncated chlorophyll antenna transformants tla1, tlaX, and tla1-CW + [J]. Intl J Hydrogen Energy, 2008, 33:6467-6483.
- [5] King P W, Posewitz M C, Ghirardi M L, et al. Functional studies of [FeFe] hydrogenase maturation in an Escherichia coli biosynthetic system [J]. J Bacteriol, 2006, 188:2163-2172.
- [6] The Regents of the University of California. Modulation of sulfate permease for photosynthetic hydrogen production: US, 7176005 [P]. 2007-02-13.
- [7] 陈俊武, 李春年, 陈香生. 石油替代综论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
- [8] Amos W A. Updated Cost Analysis of Photobiological Hydrogen Production from *Chlamydomonas reinhardtii* green algae[R]. Milestone Completion Report, 2004, NREL/MP-560-35593.
- [9] Burgess G, Fernández-Velasco J G. Materials, operational energy inputs, and net energy ratio for photobiological hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32:1225-1234.
- [10] Granovskii M, Dincer I, Rosen M A. Greenhouse gas emissions reduction by use of wind and solar energies for hydrogen and electricity production: Economic factors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32:927-931.
- [11] Spath P L, Mann M K. Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis[R]. Milestone Report for the US Department of Energy's Hydrogen Program Process Analysis Task, 2004, NREL/MP-560-35404.
- [12] Patel M. Cumulative energy demand (CED) and cumulative CO<sub>2</sub> emissions for products of the organic chemical industry[J]. Energy, 2003, 28:721-740. ■