

人工光合成太阳燃料制备途径及规模化

李仁贵, 李灿*

中国科学院大连化学物理研究所, 催化基础国家重点实验室, 洁净能源国家实验室(筹),
大连 116023

摘要 从人工光合成太阳燃料的基本概念和反应过程、规模化太阳能分解水制氢的主要途径和可行性分析、人工光合成液态太阳燃料甲醇的技术路径及应用前景等方面, 分析了人工光合成领域的发展现状。仿习自然光合作用基本过程, 提出了通过“光反应”和“暗反应”耦合实现规模化人工光合成太阳燃料的新途径。

关键词 人工光合成; 太阳能分解水制氢; 太阳燃料

由于人类过度消耗化石资源, 导致发生气候变化、生态失衡, 两极冰川融化加速、海啸洪水等极端天气频发, 对人类生存带来挑战。人工光合成过程是一类有望主动缓解这一生态恶化趋势的最直接的途径, 是面向解决人类生存发展的重大基础科学问题。利用太阳能将水和 CO_2 转化为 H_2 或碳氢分子等燃料, 不仅可满足人类对能源的需求, 还可优化世界能源结构。一旦在效率和成本上取得突破性进展, 将有可能改变世界能源格局, 从根本上实现能源可持续发展和人类社会生态文明。

人工光合成是相对于自然光合作用而言, 绿色植物光合作用体系是在太阳光下可将水和 CO_2 转化为糖类等生物质, 而人工光合成太阳燃料就是一

个道法自然的过程, 通过光催化、光电催化、电催化等途径将水和 CO_2 直接转化为太阳燃料(图1)。人

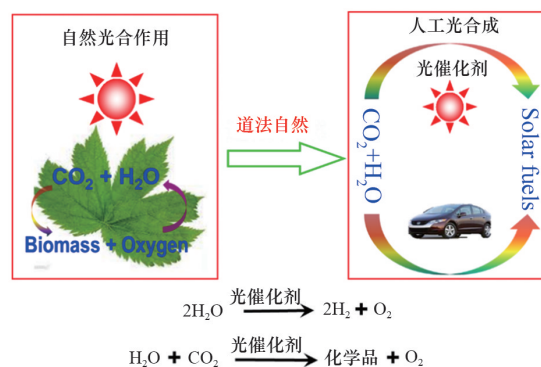


图1 自然光合作用与人工光合成

收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2020-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(21633010, 21673230); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDY-SSW-JSC023); 中国科学院大连化学物理研究所创新基金项目(DICP ZZBS201610)

作者简介: 李仁贵, 研究员, 研究方向为太阳能光催化, 电子信箱: rgl@dicp.ac.cn; 李灿(通信作者), 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为催化材料、催化反应和光谱表征, 电子信箱: canli@dicp.ac.cn

引用格式: 李仁贵, 李灿. 人工光合成太阳燃料制备途径及规模化[J]. 科技导报, 2020, 38(23): 105-112; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.23.011

工光合成过程涉及2类主要反应:水分解为 H_2 和 O_2 ,水和 CO_2 合成化学物质。这两个反应看似简单,其实是最具挑战的化学反应,被称之为科学领域“圣杯”式难题,尤其是水分解反应是人工光合成的瓶颈反应。人工光合成意义下的水分解途径,目前主要有纳米颗粒光催化、光电催化和光伏发电耦合电催化分解水等。

人工光合成领域近年来正受到世界各国的高度重视,国际竞争已异常激烈。以美国为代表的发达国家投入了大量人力、物力和财力,试图在这一领域占据国际领先地位。美国能源部于2010年成立人工光合成联合研究中心(Joint Centre for Artificial Photosynthesis, JCAP),由加州理工学院以及劳伦斯伯克利国家实验室等多家科研机构共同组成研究团队,提出到2025年氢能将占整个能源市场8%~10%的发展目标。欧洲各国对人工光合成的研究始终给予极大关注,例如瑞士联邦工学院 Michael Grätzel 领导的“NanoPEC”项目,联合欧洲7大研究机构,重点开展高效太阳能分解水制氢研究。日本人工光合成化学工艺技术研究组合(ARP-Chem)于2012成立“清洁可持续化学工艺基础技术开发(革新性催化剂)”项目,集合日本多家企业、研究机构的科研队伍展开联合攻关,10年内共提供约数百亿日元作为项目研发资金,用于人工光合成的基础科学和应用技术开发。沙特阿拉伯这样盛产石油的国家,也开始和其他国家开展联合研究,将太阳能作为未来替代化石资源的新能源。中国科学技术部和国家自然科学基金委员会分别设立国家重点研发计划(“973计划”)和重大项目支持相关领域的研究,中国科学院也于2009年启动“太阳能行动计划”,旨在应对国际竞争,在这一极具挑战的领域占据国际前沿。

过3000 h,太阳能制氢的成本与化石资源制氢的成本相当,具有可大规模工业应用的可能。

目前,太阳能分解水制氢的主要途径大体可分为以下4类:光催化分解水制氢、光电催化分解水制氢、光伏-光电耦合制氢和光伏-电解水串行途径(图2)。从太阳能制氢未来规模化应用的角度考虑,光催化分解水制氢是工艺简单、易操作和直接投资成本低的途径,但目前太阳能转化利用效率低。Domen 研究组^[2]构建的固体Z机制分解水体系,STH效率为1.1%;李灿研究组^[3-4]研发的氢农场技术,根据目前的实验数据初步估算STH效率可达1.8%,还在进一步提升之中。光电催化分解水需要将光催化剂负载在导电基底上制成电极,在少许偏压(或无偏压)下实现完全分解水。光电催化分解水在过去几年内发展迅速,在一些典型的光阳极半导体材料上,例如 $BiVO_4$ 、 Ta_3N_5 和Si等典型光阳极体系上,STH效率超过2.0%^[5-7]。光催化和光电催化分解水制氢体系的关键是发展兼具宽光谱捕光和高效电荷分离的光催化剂材料。

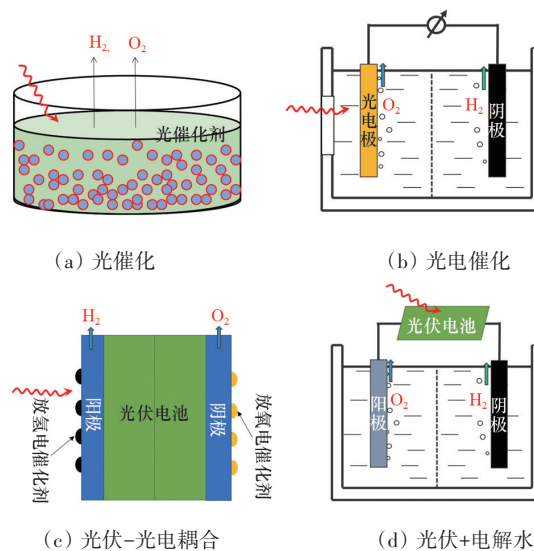


图2 太阳能分解水制氢途径

1 太阳能分解水制氢的可行途径

美国能源部对化石资源制氢和太阳能分解水制氢成本进行了粗略估算^[1],若利用纳米颗粒光催化剂的太阳能到氢能转化效率(solar-to-hydrogen efficiency, STH)超过10%、催化剂稳定工作时间超

光伏-光电耦合体系是将光伏电池和光电催化结合的一种叠层器件,光伏-光电耦合体系的STH效率在多个体系上已超过10%,部分多结光伏器件耦合体系的STH效率可达到更高^[8]。此外,与光伏-光电耦合体系的基本原理类似,利用光伏发

电和电解水技术的串联(光伏+电解水)实现光-电-氢转化,也是太阳能分解水制氢的可行途径。STH效率由光伏电池效率和电解水效率的乘积决定,STH效率超过10%,采用多结光伏电池的体系的STH效率甚至可超过30%^[9-10]。需要注意的是,光伏-光电耦合体系是将光伏电池和电解水催化剂耦合在一个系统里,实现太阳能到氢的直接转化,而光伏+电解水途径是先将太阳能转化为电能,再将电能转化为氢能。光伏-光电耦合和光伏+电解水制氢体系的关键是发展高效的电解水催化剂材料。

光伏发电的成本正在快速下降,世界范围内光伏电池的装机量迅猛增长,且大规模电解水制氢技术也在快速发展之中。可以预期,未来光伏发电和规模化电解水制氢的串联,将是最有可能实现大规模应用的太阳能制氢途径。

2 规模化太阳能分解水制氢的前景分析

从近期太阳能分解水制氢研究的态势来看,光伏+电解水途径实现光-电-氢转化,有望率先实现太阳能分解水制氢工业化应用。以单晶硅光伏电池为代表的规模化光伏电池总装机量和市场占有率正在大幅提升。随着电池制备技术的提升和工艺的不断改进,单晶硅光伏电池成本明显降低,且其光电转化效率被不断刷新,大面积光电转换效率已达24%以上。除了大型并网光伏电站外,与建筑相结合的光伏发电系统、小型光伏系统、离网光伏系统等也将快速兴起。光伏发电的成本正在持续下降并逼近煤电发电成本。假定光伏电池的光电转化效率达到20%,电解水的电能转化效率若超过70%,则光伏+电解水体系的太阳能利用效率已经可以突破14%。随着光伏发电和电解水成本的进一步下降,光伏+电解水制氢的成本有望与传统的化石资源制氢相抗衡,将是未来最有可能实现工业化应用的太阳能分解水制氢技术。如果考虑传统化石资源制氢的环境和生态成本,光伏+电解

水制氢将是未来替代化石能源制氢非常有前景的途径。中国许多地区有丰富的太阳能,但是因为地理位置和并网困难等原因导致严重的弃光现象,如果能将这部分废弃的太阳能利用起来并通过电解水转化为氢能,将具有十分可观的经济效益和重要的社会意义。

从太阳能分解水制氢的长远目标考虑,利用粉末纳米颗粒光催化剂及光电催化体系,实现规模化太阳能分解水制氢仍然是亟需攻克的方向。要实现STH达到10%的目标,科学家们对于半导体光催化剂的吸光范围和表观量子效率需要满足的条件做了粗略估算^[11]。如图3^[11]所示,如果光催化剂的吸收带边在400 nm,即使其量子效率达到100%,其理论最高STH效率仍不足3%;如果光催化剂的吸收带边在500 nm,其量子效率达到100%时STH效率仍然小于10%;当光催化剂的吸收带边拓展至600 nm时,如果量子效率达到60%以上,就可以实现STH效率超过10%;若光催化剂的吸光范围更宽,则满足10%的STH效率所需的量子效率更低。因此,研发高效稳定的宽光谱捕光半导体材料(尤其是吸光带边在600 nm以上),是太阳能分解水制氢未来规模化应用的努力目标。在具有宽光谱捕光材料的条件下,高效的电荷分离和催化过程成为更具挑战的2个研究方向。只有在解决高效电荷分离效率的前提下,才有望拓宽吸光范围和加速催化反应而达到更高的STH效率。

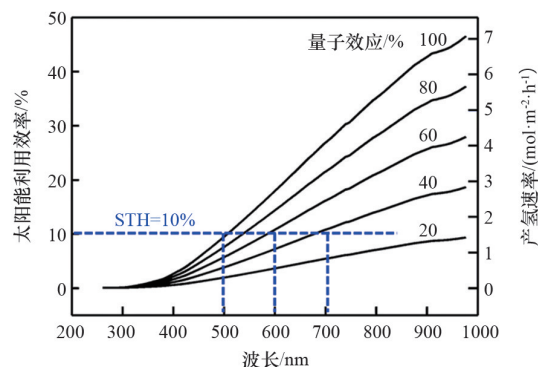


图3 半导体光催化剂的波长、量子效率与太阳能利用效率之间的关系

3 光催化分解水的应用探索

光催化分解水制氢因其工艺简单、易操作及直接投资成本低等优点,被认为是未来实现规模化太阳能制氢有希望的途径之一。但是,光催化过程极其复杂,涉及光催化剂捕光产生光生电子和空穴、光生电荷分离和迁移以及光生电荷参与的氧化和还原反应。整个过程经历3个重要环节:捕光,光生电荷分离及界面转移,表面光催化反应。尽管目前纳米颗粒光催化剂的水分解效率尚低,研究人员已开始尝试进行未来可规模化应用的探索。Domen 研究组^[12]提出了光催化完全分解水规模化应用的平板反应器模型(图4^[12]),该模型采用密封的平板反应池,主要由上层有机玻璃板、水层、光催化剂层、垫片层和下层有机玻璃板构成,反应池顶端有气体收集出口。采用金属 Al 掺杂的 SrTiO₃作

为吸光半导体材料(SrTiO₃:Al),在 RhCrO_x作为助催化剂时,光催化剂在 365 nm 处的完全分解水量子效率可达到 56%,并在 331 K 温度条件下,STH 达到 0.6%。在模拟太阳光照射测试下,该光催化剂经过 1300 h 的持续照射后,其平均 STH 效率可以保持在 0.3% 以上。此平板反应池产生的 H₂ 和 O₂ 混合共存,需要额外增加 H₂ 和 O₂ 分离装置,H₂ 和 O₂ 的分离仍然存在一定的技术挑战和成本问题。此外,所采用的 SrTiO₃ 基光催化剂仅能吸收紫外光,限制了其太阳能转化利用效率。该研究组^[12]又构建了 BiVO₄/Au/SrTiO₃:La,Rh 固体 Z 机制分解水体系,在 419 nm 处的表观量子效率达到了 30% 以上,STH 效率为 1.1%。虽然距离规模化应用要求的效率还有差距,但是与以往绝大多数半导体光催化剂相比已经有了数量级的飞跃。

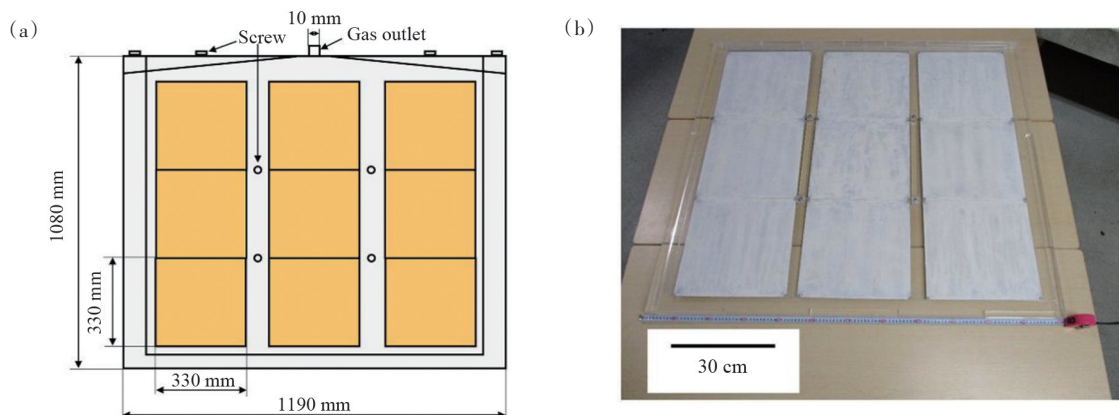


图4 太阳能光催化完全分解水的平板反应装置实例^[12]

李灿研究组^[3-4]从自然光合作用原理获得启发,借鉴了农场大规模种植庄稼的思路,提出了规模化太阳能储存利用的氢农场(hydrogen farm project, HFP)策略(图5),避免了 H₂ 和 O₂ 分离等问题,且反应器无需密封,便于规模化应用。绿色植物光合作用的第一步是叶绿体利用太阳能将水分解为 O₂ 和还原性氢物种(即绿色植物光合作用并不直接放出 H₂),同时把能量储存在还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)和三磷酸腺苷(ATP)中,储存的能量参与碳固定反应。对应地,HFP策略的

第一步利用半导体光催化剂进行水氧化反应放出 O₂,同时将捕获的太阳能储存在特定储能介质(如可溶性离子对)中,储能介质从氧化态转化至还原态,这一过程无需密封和气体收集,具有实现规模化太阳能捕获和储存利用的可行性,这一步类似于自然光合作用的“光反应”。HFP策略的第二步是将含有还原态储能介质的溶液收集并集中产氢,这一步可在电催化或光电催化电解池中进行,同时将还原态储能介质转化至氧化态循环利用,这一步近似于自然光合作用的“暗反应”。此外,储能介质中

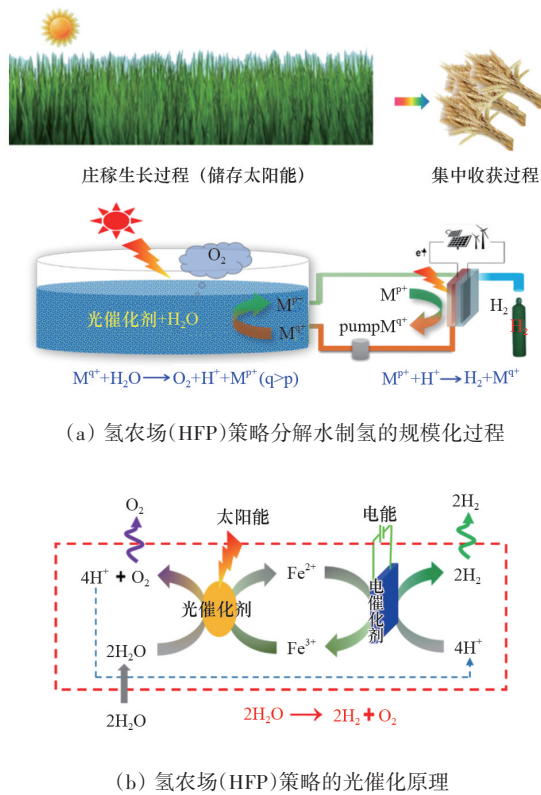


图5 规模化太阳能分解水制氢的“氢农场”策略示意

储存的太阳能除了用于产氢之外,还可以与 CO_2 还原、 N_2 还原合成氨等反应耦合起来,制备燃料或化学物质。

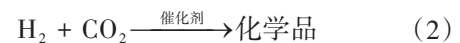
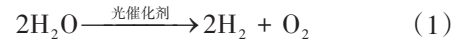
HFP中水氧化反应是通过半导体材料的光催化过程来实现(主要的储能步骤),第二步放氢过程在很小的过电势下即可实现。HFP策略暗合了自然光合作用中光反应和暗反应的原理,类似于农场大规模种植庄稼,即大面积播种利用植物的光合作用储存并收集太阳能,待庄稼成熟后集中收割粮食(储存的太阳能)。

实现HFP策略有2个关键:一是发展高效水氧化光催化剂;二是抑制储能介质氧化态和还原态之间的逆反应。本研究组在初期的探索中采用暴露晶面可控调变的 BiVO_4 光催化剂作为水氧化光催化剂,在 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 离子对作为储能介质的条件下,水氧化量子效率可高达60%以上。同时,利用 BiVO_4 光催化剂不同暴露晶面之间独特的电荷分离特性,将氧化反应和还原反应在不同暴露晶面上实现空间上的分开, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 离子对之间的逆反应得到有

效抑制。并利用 BiVO_4 光催化剂进行了户外真实太阳光照射条件下的试验,成功验证了HFP策略的可行性。HFP策略有效避免了 H_2 和 O_2 混合问题,同时该策略对光催化剂能带结构要求较低,热力学上仅需满足储能离子对存在条件下的水氧化反应即可,未来具有广阔的应用前景。

4 人工光合成太阳燃料

光催化直接还原 CO_2 制备燃料和化学品面临诸多挑战,距离可规模化应用较为遥远。其实,直接进行一步 CO_2 和水的转化反应,并不符合自然光合作用的原理,且在光(电)催化体系面临气液固三相共存的问题,目前来看,并不是未来规模化太阳燃料合成最为理想的途径。从前面提到的人工光合成的总反应式($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \xrightarrow{\text{光催化剂}} \text{化学品} + \text{O}_2$)来看,该反应又可分解为下面2个反应的串行:



即可以先通过光催化分解水反应制备 H_2 ,再进行 CO_2 加氢反应合成燃料和化学品。分解水反应是热力学爬坡反应,是太阳能储存的过程,相当于自然光合作用中的“光反应”;而 CO_2 催化加氢生成燃料和化学品的反应是热力学自发进行的反应,这个过程相当于自然光合作用中的“暗反应”。人工光合成也可模拟自然光合过程,利用“光反应”过程储存太阳能,再通过“暗反应”过程合成燃料及化学品等。

广义来讲,人工光合成包括所有利用“光反应”储存的太阳能来制备各类化学物质的反应。人工光合成未来的一个重要发展方向将是合成生物学,即在太阳能作用下,由空气中 CO_2 和 N_2 合成氨基酸、蛋白质、糖和核酸等人类生命活动不可缺少的基本物质,将是更具挑战的科学难题。对比自然光合作用过程,人工光合成中的“光反应”和“暗反应”过程可用图6来描述。自然光合作用中的“光反应”是利用叶绿体在光照下将水分解为 O_2 和还原性氢物种,同时把能量储存在NADPH和ATP中,

“暗反应”则是利用还原性氢物种和 NADPH、ATP 进行 CO₂ 固定反应合成糖类物质；人工光合成的“光反应”是利用光催化剂将水分解为 O₂、高能质子和电子，“暗反应”是利用高能质子和电子进行产氢、甲醇及氨等燃料制备以及合成氨基酸等各类反应。

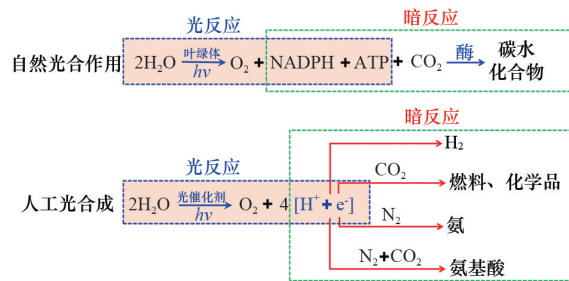


图6 人工光合成中的“光反应”与“暗反应”

太阳燃料(solar fuels)是所有利用太阳能生产的燃料的总称,包括 H₂、CO、CH₄ 等气体燃料,以及甲醇、乙醇为代表的液体燃料。由于气体燃料大规模储存和运输较为困难,液态燃料更具优势。液态太阳燃料(liquid solar fuels),俗称“液态阳光”(liquid sunshine),指利用太阳能将水和 CO₂ 转化为甲醇等液态燃料。

George A. Olah 等^[13]曾提出“甲醇经济”(methanol economy)的概念,是指以液体甲醇为能源载体替代化石燃料,作为能源和合成烃类等化学品的原料。甲醇作为一种能量储备载体,可直接作为燃料或燃料添加剂(如汽油中添加甲醇等)应用,且方便运输;同时,甲醇也可以作为合成烃类等化学品的原料。“甲醇经济”包含的主要内容有:(1)用现存天然气作为原料,通过新的更方便的途径转化为甲醇;(2)利用工业废气 CO₂ 通过催化加氢生产甲醇,最终目标是以大气中的 CO₂ 作为碳源;(3)甲醇和二甲醚用来作为便利的交通燃料,直接应用于内燃机或燃料电池中;(4)以甲醇作为原料进行碳氢化合物等化学品的生产。

以 CO₂ 为原料制取甲醇的技术中,最为关键的问题是 H₂ 的来源。若 H₂ 从化石资源获取,则制氢过程本身会排放大量的 CO₂;若从太阳能分解水制

氢获取(通过光催化、光电催化、光伏+电催化等途径),则制氢的过程是环境友好的。太阳能分解水制取的 H₂ 和空气中捕获的 CO₂,进一步通过催化过程转化为甲醇(即液态太阳燃料过程生产甲醇),甲醇作为液体燃料消耗后产生的 CO₂ 又可以循环利用,这样形成一个完整的碳平衡循环。该过程具有非常广阔的应用前景和重要的社会意义(图7)。

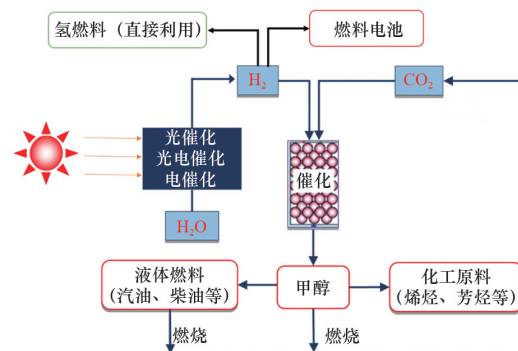


图7 太阳能分解水制氢与 CO₂ 资源化利用的耦合

“液态太阳燃料”合成的关键在于攻克2项核心技术:其一是高效低成本太阳能分解水制氢,主要通过太阳能光催化、光电催化和可再生电能(如光伏发电等)电解水制氢等;其二是实现高选择性、高活性、低能耗 CO₂ 催化加氢制甲醇。李灿研究组^[14]发展了具有自主知识产权的、高效稳定的分解水电催化剂,能量转换效率可达80%以上;发现了高活性、高选择性的 CO₂ 加氢制甲醇的固溶体 ZnO-ZrO₂ 催化剂,并于2018年7月在中国西部启动了千吨级液态太阳燃料的工业化示范项目。该项目已于2020年1月成功试车,是全球范围首个直接太阳燃料规模化合成的尝试。作为一种化学储能的形式,它解决了可再生能源间歇性和能源使用的随机性问题。太阳燃料合成可将分散的太阳能收集、长期储存,适应随机的能源应用市场需求。粗略估算,每吨太阳燃料甲醇相当于储存约1万 kW·h 的电能,利用太阳能生产100万 t 甲醇储存的电能相当于100亿 kW·h。

此外,太阳燃料甲醇也是一个理想的储氢分子,有助于解决氢燃料电池氢源的制、储、运、加技术的安全问题,使燃料电池技术成为真正意义上的

可持续清洁能源技术。可以借助太阳燃料技术建设“液态阳光”加氢站,解决加氢站建设中氢的储存和运输问题。同时,氢来自于可再生能源,实现了燃料电池全流程绿色清洁和CO₂零排放。此外,还可扩展为其他化学储氢路线(如利用甲苯、氨等作为储氢载体),并且与加油站、甲醇站等并存,适合社区和现行加油站使用,这将是未来加氢站最具优势的发展方向。

图8展示了未来液态太阳燃料的生产和供给路线,利用太阳能驱动整个CO₂参与的产业链循环,整个产业链条包括CO₂捕获、太阳能分解水制氢、CO₂催化转化、液态太阳燃料储存、运输和分配等,最后是终端用户使用,液态太阳燃料供能后排放的CO₂被回收再利用,形成完整的循环。未来规模化液态太阳燃料的生产和应用,将从根本上改善人类赖以生存的环境,具有重大而深远的社会生态意义。

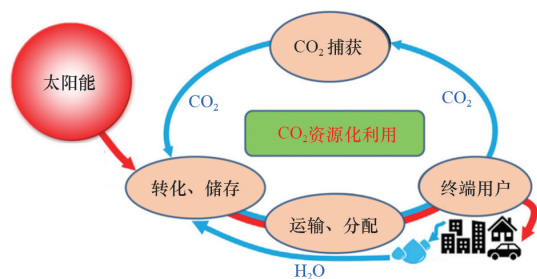


图8 液态太阳燃料的“制、储、运、用”示意

5 结论

人工光合成太阳燃料的研究是一个极具挑战性的课题,是化学科学领域的“哥德巴赫猜想”式的难题,涵盖一系列非常关键的基础科学问题,是基础科学领域的大科学难题,涉及化学、物理、生物和材料等多学科,并派生基础科学领域的交叉前沿研究课题。人工光合成太阳燃料又是能源颠覆性变革的基础,直接关系能源、气候变化与生态环境,催生能源新兴产业、从根本上缓解中国面临的能源安全和生态环境等问题。此外,仿习自然光合作用基本过程,人工光合成太阳燃料中的“光反应”和“暗

反应”耦合的研究将推进光电效应和合成生物学等领域的发展,未来有望在相关领域产生重大基础科学成果。中国在人工光合成领域已有较好的研究基础,前期研究取得了重要进展,但此领域方兴未艾,国际竞争非常激烈,亟需整合优势力量、聚焦核心科学问题。相信经过我们不懈的努力,一定能够占领国际人工光合成基础科学领域的制高点。

参考文献(References)

- [1] Pinaud B A, Benck J D, Seitz L C, et al. Technical and economic feasibility of centralized facilities for solar hydrogen production via photocatalysis and photoelectrochemistry[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(7): 1983–2002.
- [2] Wang Q, Hisatomi T, Jia Q X, et al. Scalable water splitting on particulate photocatalyst sheets with a solar-to-hydrogen energy conversion efficiency exceeding 1%[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(6): 611–615.
- [3] 李灿, 李仁贵, 赵越, 等. 一种规模化太阳能光催化-光电催化分解水制氢的方法: CN107012474A[P]. 2017-08-04.
- [4] Zhao Y, Ding C M, Zhu J, et al. A hydrogen farm strategy for scalable solar hydrogen production with particulate photocatalysts[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 132(24): 9740–9745.
- [5] Kim T W, Choi K S. Nanoporous BiVO₄ photoanodes with dual-layer oxygen evolution catalysts for solar water splitting[J]. *Science*, 2014, 343(6174): 990–994.
- [6] Liu G J, Ye S, Yan P L, et al. Enabling an integrated tantalum nitride photoanode to approach the theoretical photocurrent limit for solar water splitting[J]. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9(4): 1327–1334.
- [7] Liu B, Feng S J, Yang L F, et al. Bifacial passivation of n-silicon metal-insulator-semiconductor photoelectrodes for efficient oxygen and hydrogen evolution reactions[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13: 221–228.
- [8] Cheng W H, Richter M H, May M M, et al. Monolithic photoelectrochemical device for direct water splitting with 19% efficiency[J]. *ACS Energy Letters*, 2018, 3(8): 1795–1800.
- [9] Bonke S A, Wiechen M, MacFarlane D R, et al. Renewable fuels from concentrated solar power: Towards practical artificial photosynthesis[J]. *Energy & Environmental*

- Science, 2015, 8(9): 2791–2796.
- [10] Jia J Y, Seitz L C, Benck J D, et al. Solar water splitting by photovoltaic–electrolysis with a solar–to–hydrogen efficiency over 30%[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13237.
- [11] Hisatomi T, Takanabe K, Domen K. Photocatalytic water–splitting reaction from catalytic and kinetic perspectives[J]. Catalysis Letters, 2015, 145(1): 95–108.
- [12] Goto Y, Hisatomi T, Wang Q, et al. A particulate photocatalyst water–splitting panel for large–scale solar hydrogen generation[J]. Joule, 2018, 2(3): 509–520.
- [13] 治 A. 奥拉, 阿兰·戈佩特, G. K. 苏耶·普拉卡西. 跨越油气时代: 甲醇经济[M]. 胡金波, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [14] Wang J, Li G, Li Z, et al. A highly selective and stable ZnO–ZrO₂ solid solution catalyst for CO₂ hydrogenation to methanol[J]. Science Advances, 2017, 3(10): e1701290.

Perspectives on artificial photosynthesis for solar fuels production

LI Rengui, LI Can*

Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Catalysis,
Dalian National Laboratory for Clean Energy, Dalian 116023, China

Abstract Artificial photosynthesis for solar fuels production is considered to be an energy disruptive technology in the future, which can fundamentally change the current situation of excessive utilization on fossil fuels. In addition, artificial photosynthesis is an interdisciplinary science involving many fields such as chemistry, physics, materials and biology, and is also a key scientific problem in fundamental science that attracts increasing worldwide interest. In this paper we briefly introduce the concept and key reactions of artificial photosynthesis and focus on the discussion of scalable solutions to solar hydrogen production via water splitting and corresponding technical feasibility analysis. Then we present an introduction and technique routes of liquid solar fuels (e.g. methanol), as well as their potential applications. Finally, we propose a feasible solution to mimic natural artificial process via the coupling of 'light reaction' and 'dark reaction' for large–scale solar fuels production .

Keywords artificial photosynthesis; solar hydrogen production via water splitting; solar fuels ●



(责任编辑 王志敏)