

太阳热化学循环反应分解 CO₂ 的研究进展与技术分析

陈伟^{1,2}, 张军^{1,2}

1. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071
2. 中国科学院国家科学图书馆武汉分馆, 武汉 430071

摘要 在全球气候变化已成为国际性热点问题的大背景下, 通过将 CO₂ 转化成高附加值的燃料, 实现 CO₂ 的资源化利用是解决这一问题的可行途径之一, 而将这一过程与太阳能利用相结合有助于解决因 CO₂ 化学惰性较强, 其转化在热力学上不利带来能耗较高的挑战。在多种利用太阳能将 CO₂ 转化为能源载体的方法中, 利用高温太阳能能进行两步热化学循环反应分解 CO₂ 以制取合成燃料是一个新兴研究方向。本文详细介绍了国外科研机构在这方面的发展现状及研究重点, 并对该技术的原理和未来需要开展的基础研究工作进行了分析。未来的研究重点将集中在: (1) 开展多相化学反应流辐射热传递的理论和试验基础研究; (2) 设计直接受辐射的太阳能化学反应器, 可直接吸收聚焦的太阳热能, 辐射热传递效率较高; (3) 开展高温太阳能化学反应器的材料研究。国内具有一定太阳能高温热(化学)利用工作基础的研究机构有必要开展这一领域的研究工作, 为中国实现碳减排做出贡献。

关键词 太阳热能; 二氧化碳; 热化学循环

中图分类号 TK519

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.18.009

Research Progress and Technical Analysis of High Temperature Solar Thermochemical CO₂-splitting Cycle

CHEN Wei^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}

1. Wuhan Documentation and Information Centre of Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
2. Wuhan Branch, National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

Abstract In the context of the global climate change, as an international hot issue, the CO₂ utilization through its conversion into high value-added fuels is one of the possible ways to solve this problem. CO₂ is chemically inert and it is difficult to convert it into other molecules thermodynamically, and these problems can be solved through the use of the solar energy. Among various approaches on converting CO₂ into an energy carrier by the solar energy, a promising new method is developed for the production of the synthetic fuel from solar-driven two-step CO₂-splitting thermo-chemical cycles. In this paper, first review the research progress and research priorities in this field. We also analyze the technical principle and the basic studies that are required in the future. The future research should focus on: (1) the fundamental analysis of the radiation heat exchange coupled with the kinetics of the heterogeneous thermo-chemical systems; (2) the design of advanced chemical reactor concepts based on the direct irradiation of reactants for efficient energy absorption; (3) the development of high-temperature materials ($T > 1500^{\circ}\text{C}$) for thermo-chemical reactors. Domestic research institutions working in the fields of high-temperature solar thermo-chemical utilization should pay more attention to this area.

Keywords solar thermal; carbon dioxide; thermochemical cycle

收稿日期: 2011-11-09; 修回日期: 2012-06-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向支持项目(KGCX2-YW-701); 中国科学院太阳能行动计划项目(Y2KZ01)

作者简介: 陈伟, 助理研究员, 研究方向为能源与科技战略情报, 电子邮箱: chenw@mail.whlib.ac.cn

0 引言

近 10 年来, 各国科研人员已探索了多种利用太阳能将 CO_2 转化为能源载体的方法, 包括生物化学法、人造光合作用、光催化还原法等^[1-3]。2009 年 12 月 11 日的《科学》杂志报道了美国桑迪亚 (Sandia) 国家实验室利用高温太阳能产生两步热化学循环反应, 基于特定金属氧化物体系分解 CO_2 制取 CO , 继而结合水煤气变换 (Water Gas Shift) 反应产生 CO 和 H_2 合成气, 利用费托法来制取液体碳烃燃料, 其已制作出了样机并进行了示范^[4], 引起了研究业界的关注。实际上, 利用太阳能分解 CO_2 研究虽然是近两年引起研究人员注意的研究方向, 但其工作基础来自于利用高温太阳能作为热源、基于金属氧化物进行两步热化学循环反应分解水制氢的研究。国外已有不少机构开展了多年的太阳能两步热化学循环反应制氢研究, 如瑞士 Paul Scherrer 研究所 (PSI)^[5]、德国 DLR 技术热力学研究所^[6]、西班牙 CIEMAT^[7]、日本新潟大学^[8]、美国加州理工学院、美国科罗拉多大学^[9]等; 随后研究人员发现, 从热力学角度来看, 在高温 ($>800^\circ\text{C}$) 条件下 CO_2 稳定性要比 H_2O 差, 因此热化学循环制氢的一些原理能用于把 CO_2 还原成 CO , 继而利用 CO 可作为化工原料或合成燃料等, 更适用于现有的基础设施。在此基础上开展了分解 CO_2 研究, 但目前还处于起步阶段, 主要是美国桑迪亚国家实验室和瑞士 PSI 开展了较多工作。他们具体结合太阳能集热器和太阳能反应器进行实验研究, 应用日光炉 (定日镜+碟式聚光器) 作为热源, 研究的金属氧化物体系包括 ZnO/Zn 、(掺杂 $\text{Co})\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ 和 $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ 。美国加州理工学院最近也开始进行基于 $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ 体系同时分解 CO_2 和 H_2O 的研究, 但主要还处于实验室阶段^[10]。

1 研究进展与重点

1.1 美国桑迪亚国家实验室

美国桑迪亚国家实验室开展的高温太阳能分解 CO_2 的工作基于实验室 “Reimagining Liquid Transportation Fuels: Sunshine to Petrol” 项目。该项目的 PI 是 James E. Miller。合作伙伴包括来自威斯康星大学、西北大学、德州理工大学和科罗拉多大学的研究人员。项目受到桑迪亚国家实验室内部导向研发项目 (LDRD) 资助, 同时美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 也给予了若干资助。

研究人员基于在太阳能集热领域和太阳能热化学循环分解水制氢领域的工作基础开发了一套示范系统, 其主要组成包括: 面积达 95m^2 的定日镜, 228 面玻璃反射镜构成的直径约 6.7m 的碟式聚光器和反向旋转环形接收反应换热器 (Counter Rotating Ring Receiver Reactor Recuperator, CR5) 的设备。定日镜和碟式聚光器构成了日光炉, 两者中间放置了一个类似于百叶窗帘的衰减器用于调节辐射功率水平。日光炉总热功率达到 16kW , 峰值太阳辐射通量为 $500\text{W}/\text{cm}^2$ 。

CR5 是个筒状的金属设备, 内部有两个腔室, 一个称为热室, 另一个是冷室; 贯穿中间的是 14 个飞盘状的环, 每个

环的外缘由以氧化钇稳定的氧化锆 (YSZ) 为基底的掺杂钴的铁氧体材料 ($\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$) 组成, 钴可帮助改变反应步骤的热动力学。这些圆环沿着单一的轴向排列, 但有 2 个马达驱动的轴使圆环交替地分别按顺时针和逆时针方向旋转 (即一个圆环顺时针旋转, 相邻的另一个逆时针旋转), 转速约为 $1\text{r}/\text{min}$ 。具体运行过程是: 通过碟式聚光器聚焦太阳光, 透过 CR5 表面的石英窗折射到设备的热室中, 产生高温, 加热圆环, 使温度上升到 1500°C , 使铁氧化物还原, 释放氧分子。随着环的旋转, 环上加热的部分旋转到冷室, 温度降低到 1100°C , 同时通入 CO_2 , 还原的 FeO 与之反应, 打破碳氧键, 生成 CO , FeO 重新被氧化为 Fe_3O_4 。环继续旋转, 刚刚被氧化的铁氧体材料又回到温度较高的热室, 再次被加热至 1500°C 。如此重复上述反应。在这个反应系统里, 两个温度非常关键: 铁氧体要被加热到合适的温度才能释放氧原子, 又需要降低到合适的温度才能与 CO_2 反应。为了保证产生合适的温度, 相邻的圆环向着相反的方向旋转。也就是说, 每个圆环被加热的部分在向温度较低的反应室旋转时, 相邻的陶瓷环会帮助它降低温度。更为重要的是, 圆盘的反向旋转可使还原与氧化反应在不同温度下同时发生, 而使热损失减少到最小。研究人员指出, 反向旋转换热器可使最大的潜在热动力学效率从约 35% 提高到超过 70%。

根据技术报告^[11-13]和公开发表的论文^[14-17]来看, 桑迪亚国家实验室的研究人员主要基于裂解 H_2O 制 H_2 和分解 CO_2 制 CO 过程对 CR5 进行了系统分析、建模和 SCOPING 研究, 对其核心部件之一——铁氧体材料圆环 (图 1^[8]) 进行了元素组成、结构、材料表征等方面的分析, 还对热氧化还原循环反应过程开展了热力学分析。其使用的金属氧化物材料主要是掺杂了其他金属元素 (主要是钴) 的铁氧体材料, 基准材料是 $\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{2.33}\text{O}_4$ 与 YSZ 按重量比 1:3 配比的混合物, 除此之外还试验了 $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ 体系, 试验结果显示两个体系均有希望作为实验候选体系, 但还存在着如烧结、碳沉积等缺陷。目前的研发重点集中在克服材料方面的挑战, 包括极端温度、热化学循环过程、反应的热力学和动力学分析、高度动态与复杂性、反应程度与利用率、失活、耐久性、大容量组建、太阳和气相界面、表面面积、辐射特性等。

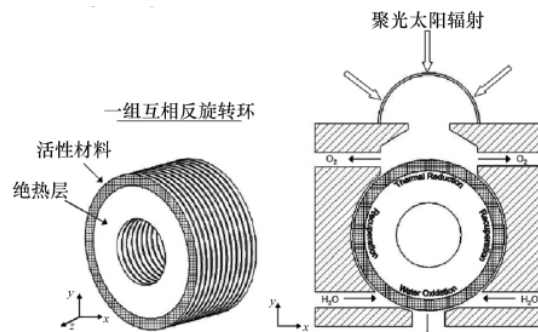


图 1 CR5 核心部件——铁氧体材料圆环

Fig. 1 Schematic diagram of the counter-rotating-ring receiver/reactor/recuperator (CR5)

1.2 瑞士 PSI 研究所

瑞士 PSI 太阳能技术实验室 Aldo Steinfeld 教授领导的研究团队在太阳热能分解 CO_2 上的研究主要基于他们在制氢和高温分解 ZnO 制 Zn 方面的工作,例如欧洲第五框架计划下的联合研究项目 SOLZINC (Solar carbothermic production of Zn from ZnO) 等。与桑迪亚国家实验室类似,PSI 在高温太阳热化学反应研究中所使用的日光炉由面积达 120m^2 定日镜和直径 8.5m 的碟式聚光器组成,中间同样也有类似于百叶窗帘的衰减器。日光炉的热功率在峰值聚光倍数超过 5000 个太阳的情况下能够达到 40kW 。

Aldo Steinfeld 团队之前在利用太阳热能进行两步热化学循环反应制氢方面做了很多有益的工作。他们首先对多种金属氧化物进行了热力学分析,探讨了它们直接分解或添加还原剂分解的热力学特性。从中找到有可能在未来大规模使用的金属氧化物。在此基础上进行了经济性分析,为技术发展提供参考,目的就是要降低整个过程的投资、运行以及维护费用。现在 Aldo Steinfeld 教授的研究团队在瑞士联邦能源局和 Baugarten 基金的资助下,把非常多的精力用于 ZnO/Zn 体系的研究。该技术的主要难点在于反应第一步生成物的快速冷却,避免 Zn 蒸汽与 O_2 的迅速结合。针对这个问题他们主要进行了 ZnO 的分解、Zn 的结晶及氧化试验,并且建立了 10kW 高温太阳热化学反应器(图 2)^[8]。相关的研究成果和这一反应器同时也应用于 PSI 利用太阳热分解 CO_2 的研究中。

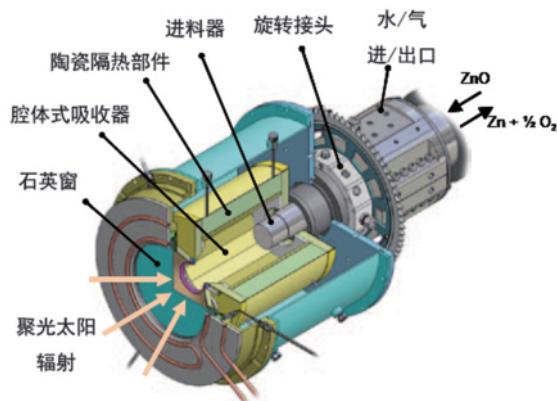


图 2 用于热化学循环反应第一步的 10kW 高温太阳热化学反应器

Fig. 2 Schematic diagram of the solar chemical reactor configuration

循环反应第二步即将 CO_2 还原为 CO 的过程,研究人员利用气溶胶流反应器(aerosol flow reactor)进行了研究,探讨了 Zn 蒸发成气态骤冷形成 Zn 纳米粒子与 CO_2 -Ar 气流在两种不同的反应器配置中的反应结果^[20]。在最近发表的研究论文中,研究人员还对 Zn/ZnO 和 $\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 这两种体系进行两步太阳热化学循环反应分解 CO_2 进行了热力学和动力学分析^[21-22],并且开始对两种体系进行两步太阳热化学循环反应同时分解 CO_2 和 H_2O 产生 CO 和 H_2 合成气进行研究^[23-24]。研

究人员现在的研究重点在于检验不同氧化还原配对的热力学性质并确定合适的进行下一步试验研究;理解气固反应的原理,利用热重分析来测定动力学速率规则并评估气态反应物的浓度和气体分压;为反应连续进行设计并组装一个过程反应器原型;开发一个耦合传热/质和化学动力学的反应器模型,并用试验结果进行验证;利用这一模型作为优化工艺和扩大规模的工具。

1.3 美国加州理工学院

美国加州理工学院材料科学和化学工程教授 Sossina M. Haile 领导的团队近期开展了利用高温热能同时转化 CO_2 和 H_2O 的研究。他们所使用的金属氧化物体系主要是掺杂了其他金属元素(如 Sm)的 $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ 体系。Haile 团队正和瑞士 PSI 的 Aldo Steinfeld 团队合作研究制造适用于 $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ 体系的太阳能反应器^[25]。

从研究论文来看,Haile 团队基于掺杂 15% 钐 (Sm) 的 $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ 体系进行 CO_2 和 H_2O 热化学还原反应,使用室内高温日光炉模拟器,温度范围在 800 — 1500°C 。在不进行热回收的情况下,热力学循环效率最高达到 13.2%。通过调整反应物组成和使用贱金属催化剂(如 Ni),反应结果可获得不同的燃料: H_2 、 CO 、合成气或 CH_4 ,显示了 $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ 体系在高温热化学循环反应转化 CO_2 和 H_2O 方面具有良好的应用前景^[26]。

研究人员目前的研究重点在于研究 Ce 基氧化物的材料性质;探索反应物结构在优化燃料生产率中的作用;制造基于反蛋白石结构的整体反应载体,具有以下特性:低弯曲度(对气相物质运输的低阻抗)短固态扩散路径、足够大的表面积、相比于颗粒反应载体能更好地防止晶粒粗化和性能下降;还要开展热力学和动力学研究阐明反应途径、进行系统优化。

2 技术分析

2.1 原理

直接打破 CO_2 碳氢键的一步热化学反应需要很高的温度,实验条件苛刻且耗能。研究人员将之分解为两个较为容易的步骤来实施,实现逆向的内燃过程:第一步是利用聚光太阳热能作为热源,在较高温度下进行高价态金属氧化物(ZnO 、 Fe_3O_4 、 CeO_2 等)还原的强吸热反应,释放出 O_2 ;第二步是较低温度下进行被还原后的低价态金属(Zn 、 FeO 、 Ce_2O_3)氧化的弱放热反应,生成 CO ,重新氧化为高价态的金属氧化物进入第一步循环反应。反应示意图见图 3。

Zn 基反应式:



Fe 基反应式:



此外,瑞士 PSI 的 Aldo Steinfeld 还分别对基于 Zn/ZnO 和 $\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 分解 CO_2 的两步热化学循环反应进行了热力学第

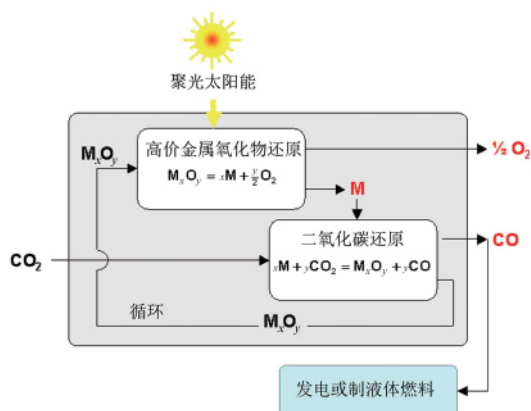


图 3 基于特定金属氧化物体系的两步太阳能热化学循环反应分解 CO₂ 的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the two-step CO₂-splitting solar thermochemical cycle

二定律分析,得出 Zn/ZnO 循环和 FeO/Fe₃O₄ 循环的太阳能转化为化学能的理论最大效率分别是 39% 和 29%。Zn/ZnO 循环转化效率较高的原因主要是由于降低了对太阳能输入量的需求以及减少了每摩尔 CO₂ 还原产生骤冷而导致的热损^[21]。

2.2 未来需要开展的基础研究工作

根据目前的研究情况来看,在太阳能热化学循环反应分解 H₂O 或 CO₂ 制取燃料领域需要解决的问题主要有:太阳能集热装置持续高温的获取;高温反应器、产物分离及采集器件的材料研究;进一步了解金属氧化物体系的反应和材料化学特性;反应器内部混合物直接分离技术的创新以及集热单元与化学反应单元的高效耦合研究等。因此,在未来需要开展的基础研究工作包括:

(1) 开展多相化学反应流辐射热传递的理论和试验基础研究。在高温热化学反应器的设计中,热辐射传输分析结合非均相化学体系的反应动力学(光学特性、反应物组成、化学反应进程中的相变化)分析是复杂而具有挑战性的问题。特别需要关注的是在吸收-辐射-散射粒子悬浮液中的辐射交换问题,这一问题在热裂解、气化、重整、分解和还原等热化学过程中均有涉及。

(2) 设计直接受辐射的太阳能化学反应器,可直接吸收聚焦的太阳热能,辐射热传递效率较高。光谱选择性反应器窗口能进一步加强对辐射的吸收。在气/固反应中使用纳米粒子可提高反应动力学和增强热/质传递。

(3) 开展高温太阳能化学反应器的材料研究,能够在高于 1500℃ 和大于 5000 个太阳辐射通量条件下保持化学和热稳定性。需要研发先进的陶瓷材料和覆层以在高温氧化气氛条件下正常工作和抵抗极大的热冲击。

3 结论

从文献资料来看,利用高温太阳能分解 CO₂ 研究目前还处于起步阶段,关注这一方向的研究机构还不太多。但由

于其工作原理类似于利用高温太阳能作为热源、基于金属氧化物进行两步热化学循环反应分解水制氢的研究,故开展分解 CO₂ 研究的机构基本上都有在太阳能高温热(化学)利用方面的工作积累,对反应的热力学和动力学分析比较深入,并建立有自己的集热装置(日光炉、碟式聚光器),能够较快地将理论研究成果在实验中进行验证,继而走向应用。国内在热化学循环分解水制氢方面的研究不太多,清华大学、西安交通大学和中国科学院电工研究所等少数机构在这方面做过一些工作^[27-30],但尚没有发现有国内机构开展了高温太阳能热化学循环分解 CO₂ 的研究。从世界范围来看,温室气体大量排放带来的气候变化问题已经成为人类共同面临的挑战,如何限制 CO₂ 的过量排放已成为各国可持续发展的重大战略性问题。我国作为能源消耗大国和碳排放大国,低碳转型和国际气候谈判的压力与日俱增。通过将 CO₂ 转化成高附加值的燃料,实现 CO₂ 的资源化利用无疑是解决这一问题的可行途径之一。因此,国内具有一定太阳能高温热(化学)利用工作基础的研究机构有必要开展这一领域的研究工作,为中国实现碳减排做出贡献。

参考文献 (References)

- [1] Skjanes K, Lindblad P, Muller J. BioCO₂-A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO₂ while producing H₂ and high value products[J]. *Biomolecular Engineering*, 2007, 24(4): 405-413.
- [2] Agrawal R, Singh N R. Solar energy to biofuels [J]. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2010, 1: 343-364.
- [3] Kumar B, Llorente M, Froehlich J, et al. Photochemical and photoelectrochemical reduction of CO₂ [J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2012, 63: 541-569.
- [4] Service R F. Sunlight in your tank[J]. *Science*, 2009, 326(5959): 1472-1475.
- [5] Steinfeld A. Solar thermochemical production of hydrogen—A review [J]. *Solar Energy*, 2005, 78(5): 603-615.
- [6] Pregger T, Graf D, Krewitt W, et al. Prospects of solar thermal hydrogen production processes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(10): 4256-4267.
- [7] Fresno F, Saavedra R F, Mancebo M B G, et al. Solar hydrogen production by two-step thermochemical cycles: Evaluation of the activity of commercial ferrites [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(7): 2918-2924.
- [8] Kodama T, Gokon N. Thermochemical cycles for high-temperature solar hydrogen production[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(10): 4048-4077.
- [9] Perkins C, Weimer A W. Solar-thermal production of renewable hydrogen[J]. *AIChE Journal*, 2009, 55(2): 286-293.
- [10] Chueh W C, Falter C, Abbott M, et al. High-flux solar-driven thermochemical dissociation of CO₂ and H₂O using nonstoichiometric ceria[J]. *Science*, 2010, 330(6012): 1797-1801.
- [11] Sandia National Laboratories. Initial case for splitting carbon dioxide to carbon monoxide and oxygen [R/OL]. [2007-12-31].<http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2007/078012.pdf>.
- [12] Sandia National Laboratories. Innovative solar thermochemical water splitting[R/OL]. [2008-02-28].<http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2008/080878.pdf>.

- [13] Sandia National Laboratories. Summary report: Direct approaches for recycling carbon dioxide into synthetic fuel[R/OL]. [2009-01-31].<http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/090399.pdf>.
- [14] Miller J E, Evans L R, Stuecker J N, *et al.* Materials development for the CR5 solar thermochemical heat engine[C]//Proceedings of the ASME International Solar Energy Conference. Colorado, 2006: 311-320.
- [15] River R B, Miller J E, Allendorf M D, *et al.* Solar thermochemical water-splitting ferrite-cycle heat engines [J]. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The Asme*, 2008, 130(4): 041001.
- [16] Allendorf M D, River R B, Siegel N P, *et al.* Two-step water splitting using mixed-metal ferrites: Thermodynamic analysis and characterization of synthesized materials [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22 (6): 4115-4124.
- [17] Miller J E, Allendorf M D, River R B, *et al.* Metal oxide composites and structures for ultra-high temperature solar thermochemical cycles [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(14): 4714-4728.
- [18] Schunk L O, Haeberling P, Wepf S, *et al.* A receiver-reactor for the solar thermal dissociation of zinc oxide [J]. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The Asme*, 2008, 130(2): 021009.
- [19] IEA SolarPACES Implementing Agreement. Solar fuels from concentrated sunlight [R/OL]. [2009-08-15].www.solarpaces.org/Library/docs/Solar_Fuels.pdf.
- [20] Loutzenhiser P G, Gálvez M E, Hischier I, *et al.* CO₂ splitting in an aerosol flow reactor via the two-step Zn/ZnO solar thermochemical cycle [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(5): 1855-1864.
- [21] Gálvez M E, Loutzenhiser P G, Hischier I, *et al.* CO₂ splitting via two-step solar thermochemical cycles with Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄ redox reactions: Thermodynamic analysis [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(5): 3544-3550.
- [22] Loutzenhiser P G, Gálvez M E, Hischier I, *et al.* CO₂ splitting via two-step solar thermochemical cycles with Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄ redox reactions II: Kinetic analysis [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23 (5): 2832-2839.
- [23] Stamatou A, Loutzenhiser P G, Steinfeld A. Solar syngas production via H₂O/CO₂-splitting thermochemical cycles with Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄ redox reactions[J]. *Chem Mater*, 2010, 22(3): 851-859.
- [24] Stamatou A, Loutzenhiser P G, Steinfeld A. Solar syngas production from H₂O and CO₂ via two-step thermochemical cycles based on Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄ redox reactions: Kinetic analysis [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(4): 2716-2722.
- [25] Smith D L. Put some sunlight in your tank[EB/OL]. [2009-10-01].http://pr.caltech.edu/periodicals/EandS/articles/LXXII2/CO2_to_Fuel.pdf.
- [26] Chueh W C, Haile S M. Ceria as a thermochemical reaction medium for selectively generating syngas or methane from H₂O and CO₂ [J]. *ChemSusChem*, 2009, 2(8): 735-739.
- [27] 张磊, 张平, 王建晨. 金属氧化物热化学循环分解水制氢热力学基础及研究进展[J]. 太阳能学报, 2006, 27(12): 1263-1269.
Zhang Lei, Zhang Ping, Wang Jianchen. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2006, 27(12): 1263-1269.
- [28] 张平, 于波, 陈靖, 等. 热化学循环分解水制氢研究进展[J]. 化学进展, 2005, 17(4): 643-650.
Zhang Ping, Yu Bo, Chen Jing, *et al.* *Progress in Chemistry*, 2005, 17(4): 643-650.
- [29] 张占涛, 王黎, 张睿. 太阳能热化学反应循环制氢技术及其最新发展[J]. 化工中间体, 2005(1): 1-5.
Zhang Zhantao, Wang Li, Zhang Rui. *Chemical Intermediate*, 2005(1): 1-5.
- [30] 李鑫, 李安定, 李斌, 等. 太阳能制氢研究现状及展望[J]. 太阳能学报, 2005, 26(1): 127-133.
Li Xin, Li Anding, Li Bin, *et al.* *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2005, 26(1): 127-133.

(责任编辑 岳臣)

· 学术动态 ·



“第三届水产工业化养殖技术研讨会”征稿

中国农业工程学会特种水产工程分会拟于2010年10月30—11月2日在杭州市举办“第三届水产工业化养殖技术研讨会”。届时将邀请国内外著名专家出席会议并做主题报告。

征稿范围:(1) 工业化养殖原理与技术;(2) 工业化养殖高效水处理技术;(3) 工业化养殖设施与装备;(4) 工业化养殖系统在线检测与智能控制技术;(5) 工业化养殖系统节能减排与废弃物资源化利用技术。

全文截稿日期:2012年9月25日

联系电话:0532-82898646

电子信箱:yinliuicas@gmail.com

大会网站:http://www.csae.org.cn/news_look.asp?typecode=0601&Id=2065