



太阳能热化学研究进展

潘莹^{1,2}, 洪慧¹, 金红光¹

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 主要从热化学水解制氢、太阳能-天然气重整制合成燃料、太阳能、煤气化制合成气, 以及利用太阳能裂解其他含碳燃料和控制 CO₂ 排放等方面, 简要评述了太阳能热化学燃料转化技术的发展现状及难点及发展趋势。概述了将聚集的太阳能热能向化学燃料的热化学转换过程的最新发展动态。这个转变实现了太阳能的储存, 同时使得太阳能可以从太阳能丰富的地区运输到太阳能缺乏但人口密集的地区。

关键词 太阳能热化学; 水解制氢; 天然气重整; 煤气化; 化石燃料裂解; CO₂ 减排

中图分类号 TK519, TK91

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)07-0110-06

Progress in R&D on Solar Thermochemical Conversion

PAN Ying^{1,2}, HONG Hui¹, JIN Hongguang¹

1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100190, China

2. Graduate University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract This paper reviews the recent developments of studies of thermochemical conversion of concentrated solar thermal energy to chemical energy. The conversion has the advantage of producing long term storable energy carriers from solar energy and enables solar energy transportation from the sunbelt to remote population centers. The thermochemical conversion pathway is characterized by a theoretical high efficiency. However, there are special features in solar processes in comparison to conventional thermochemical processes—high thermal flux density and frequent thermal transients because of the fluctuating and intermittent insolation—and conventional industrial thermochemical processes are generally not suitable for solar driven processes. Therefore, the adaptation to such features of solar thermochemical processes has been an important R&D task in this research field. Thermochemical steam or CO₂ gasification of coal, steam or CO₂ reforming of methane, and splitting of fossil fuel, are industrially important endothermic processes to produce useful chemical fuels such as hydrogen, synthesis gas and C₂-hydrocarbons, which have been considered as solar thermochemical processes. The technical difficulties and potential to conduct these endothermic processes by utilizing concentrated solar radiation as the process heat are recommended here. A low temperature solar thermochemical power plant with inherent CO₂ recovery using methanol-fueled chemical-looping combustion is also given.

Keywords solar thermochemical process; water splitting; coal gasification; methane reforming; thermal decomposition of fossil fuels; CO₂ control

0 引言

太阳能以其储量的无限性、开发利用的清洁性, 成为 21 世纪解决开发利用化石能源带来的能源短缺、环境污染和温室效应等问题的有效途径之一^[1]。太阳能热化学主要是利用

热化学反应过程, 将所聚集的太阳能转化为碳氢燃料的化学能。太阳能与化石燃料互补的热化学能量转化系统可以在太阳能资源丰富的地方进行太阳能热化学过程并进行动力循环, 也可以将太阳能转化为二次燃料运输到其他地方进行动

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB227301); 国家自然科学基金重点项目(50836005); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA05Z101)

作者简介: 潘莹, 硕士研究生, 研究方向为太阳能热化学, 电子信箱: panying@mail.etp.ac.cn; 金红光(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E400100045M; E120170054S), 研究员, 研究方向为化工-动力多联产、能源动力系统 CO₂ 减排、太阳能热利用, 电子信箱: hgjin@mail.etp.ac.cn

力循环等,实现太阳能的存储,解决单独热发电系统发电不稳定、不连续问题,提高太阳能转化利用效率。太阳能热化学的研究受到了国内外学者的广泛重视,特别是德国和瑞士科学家们提出太阳能与天然气重整相结合的能量系统^[2-9],开辟了太阳能热化学利用的新方向。

本文从太阳能热化学应用领域概述太阳能热化学燃料转换方法,如水解反应、甲烷重整耦合、煤气化和化石燃料裂解(图1),评述这些太阳能热化学过程的最近发展现状,展望太阳能热化学转换技术的发展趋势。

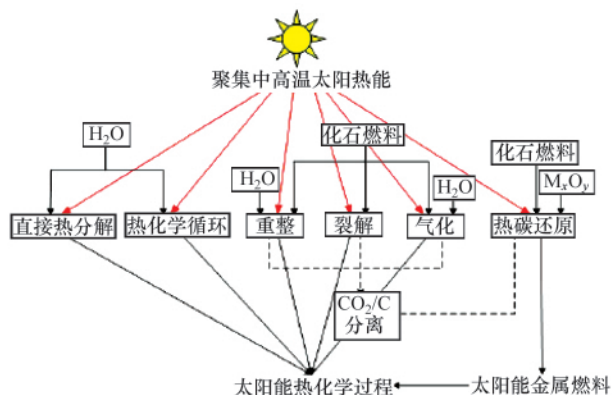


图1 太阳能热化学燃料转换方法

Fig. 1 Thermochemical routes for the conversion of fossil fuel

1 太阳能与化石能源互补的系统集成原理

1.1 太阳能热化学的热力学分析

由热力学第一定律可以计算太阳能反应器的太阳能吸收效率 $\eta_{\text{absorption}}$ 为吸收的太阳能净热量与来自集热器的太阳能之比。假设没有热传导和热辐射的损失,太阳能吸收效率 $\eta_{\text{absorption}}$ 可以定义为^[10-11]

$$\eta_{\text{absorption}} = \frac{\alpha_{\text{eff}} Q_{\text{aperture}} - \varepsilon_{\text{eff}} A_{\text{aperture}} \sigma T^4}{Q_{\text{solar}}} \quad (1)$$

其中, $Q_{\text{absorption}}$ 为集热器的总能量, Q_{solar} 为采光口面积 A_{aperture} 上吸收的热量, α_{eff} 和 ε_{eff} 分别为腔体吸收器的吸收率和发散率, T 为反应器温度, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

由热力学第二定律可以计算最大的热机效率 $\eta_{\text{energy,ideal}}$ 。由于太阳能转换过程同时受到太阳能吸收效率和卡诺效率的限制,所以总效率为

$$\eta_{\text{energy,ideal}} = \eta_{\text{absorption}} \times \eta_{\text{Carnot}} = \left[1 - \left(\frac{\sigma T_{\text{H}}^4}{IC} \right) \right] \times \left[1 - \left(\frac{T_{\text{L}}}{T_{\text{H}}} \right) \right] \quad (2)$$

其中, T_{H} 和 T_{L} 为卡诺循环的上限和下限反应温度。

通过式(2)可以得到在最大效率下的最优温度 T_{optimum} 为

$$\frac{\partial \eta_{\text{energy,ideal}}}{\partial T} = 0 \quad (3)$$

假定能流均匀分布,式(2)可以得到以下关于 T_{optimum} 的隐式方程为

$$T_{\text{optimum}}^5 - (0.75 T_{\text{L}}) T_{\text{optimum}}^4 - \left(\frac{\alpha_{\text{eff}} T_{\text{L}} IC}{4 \varepsilon_{\text{eff}} \sigma} \right) = 0 \quad (4)$$

Steinfeld等^[11]得出式(4)的数值解,如图2所示。Steinfeld等得出太阳能热流强度在 1000 kW/m^2 和 10000 kW/m^2 时,吸收器最佳反应温度在 $800 \sim 1700 \text{ K}$ 。目前,太阳能与化石能源相结合的热化学能量转化系统研究多集中在 $900 \sim 1200^\circ\text{C}$ 的高温太阳能的转化和利用。相关成果多是侧重高温太阳热化学反应器研制、催化剂研制,或复杂太阳能集热器阵列汽阻、高温直接吸收式真空管材料等。然而,从能的综合梯级利用和不同能源品位互补方面,太阳能热化学利用能量系统的热力学基础研究尚未深入探索,尤其是对太阳能与化石能源的品位互补耦合的能量转化、释放机理,太阳能与化石能源互补的多功能系统集成原理等方面缺乏研究。

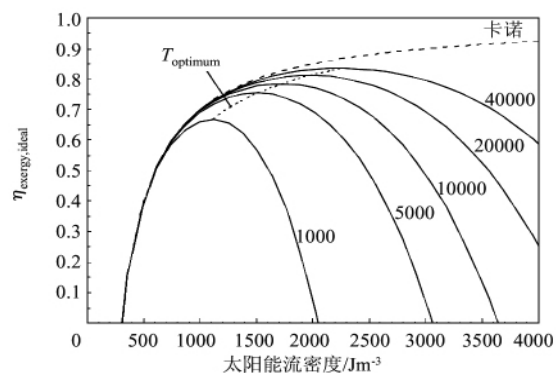


图2 当太阳辐照强度分别为1000,5000,...,40000时, $\eta_{\text{exergy,ideal}}$ 随温度 T_{H} 的变化,同时示出卡诺效率和最佳腔体温度
Fig. 2 The ideal exergy efficiency $\eta_{\text{exergy,ideal}}$ is shown as a function of the operating temperature T_{H} for a blackbody cavity-receiver converting concentrated solar energy into chemical energy [Eq. (2); $T_{\text{L}}=298 \text{ K}$]. The solar flux concentration is the parameter: 1000, 5000, ..., 40000; also plotted is the Carnot efficiency and the locus of the optimum cavity temperature T_{optimum} (Eq. (4))

1.2 太阳能热化学系统集成机理

针对当前高温太阳能热化学能量转化利用率低、对反应装置要求高和聚光系统昂贵等科技难题,从品位概念出发,金红光和洪慧^[12-15]创新性地提出利用 $100 \sim 350^\circ\text{C}$ 的中低温太阳能热化学与燃气轮机联合循环互补的总能系统。以太阳热解甲醇为实例,中低温太阳热能利用的反应机制如图3所示。

通过中温太阳热能与甲醇吸热分解特性的有机集成,低品位的中低温太阳热能转换为高品位化学能,并以合成气(CO 、 H_2)的形式被存储。随着合成气的燃烧,太阳热能在高温下释放,并且以高温热的形式通过燃气轮机布雷顿循环实现其热转功。可见,中低温太阳热能与化学反应相整合的能量转换过程不仅使其物理能的品位提升到化学能品位,而且打破了其常规的物理能能量转换利用范围;同时也为其与燃气轮机热力循环相结合提供了一个新的途径。通过过程能量守恒和焓平衡关系,建立了中低温太阳能品位提升与甲醇燃料燃烧化学能品位降低的简明关联特性为

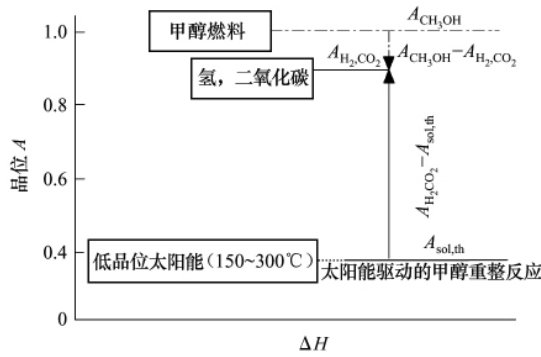


图3 中低温太阳能热解甲醇热化学能量转化过程机制

Fig. 3 Schematic diagram of the mechanism of thermochemical energy conversion integrating middle-temperature solar thermal energy and methanol fuel energy conversion process

$$\frac{A_3 - A_{\text{solth}}}{A_{\text{solth}}} = f(I, F, A_{\text{rea}}) \quad (5)$$

式中, A_3 、 A_{solth} 、 A_{rea} 分别为合成气品位、低温太阳热能、甲醇重整反应的品位; I 为太阳辐照强度, F 为甲醇反应流量, 式(5)简单地说明了太阳热能与太阳辐照强度和反应流量的关系。为验证中低温太阳能品位提升的能量转化机理, 金红光等^[16-17]在自主研制的 5kW 太阳能热化学反应实验装置中进行了太阳能热解甲醇的实验, 流程如图 4, 装置如图 5 所示。

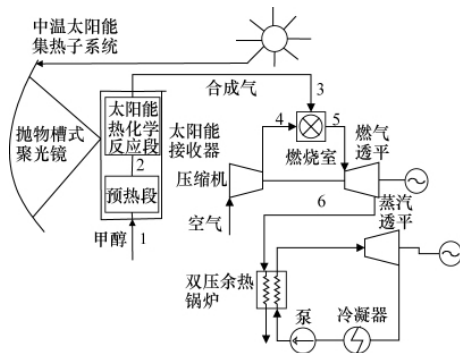


图4 中温太阳能/甲醇裂解的发电系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the new solar/methanol combined cycle hybrid plant



图5 北京通州 5kW 太阳能热化学反应器试验装置

Fig. 5 Photo of the 5kW solar receiver/reactor prototype

通过实验得出, 甲醇分解反应过程的热力特性随太阳辐照强度变化的实验结果与理论计算值如图 6 所示。从图 6 实验数据可以看出, 一定甲醇流量下, 反应器效率和太阳能品位提升随辐照强度增加而增大, 在 500~700W/m² 范围内达到最大值。其原因在于, 该范围的太阳辐照强度可提供约 200~300℃ 的太阳热能, 与甲醇裂解反应的品位相匹配, 从而使反应吸收的太阳热能更多的转化为化学能。从图 6 中可以清楚看出, 实验数据与理论结果(基于式(5))相一致。上述研究从能的综合梯级利用和不同能源品位互补出发, 对太阳能与化石能源的品位互补耦合的能量转化、释放机理, 太阳能与化石能源互补的多功能系统集成原理等方面进行了深入研究, 验证了太阳辐照强度与反应特性的有机结合时促进太阳能热化学过程的关键因素。

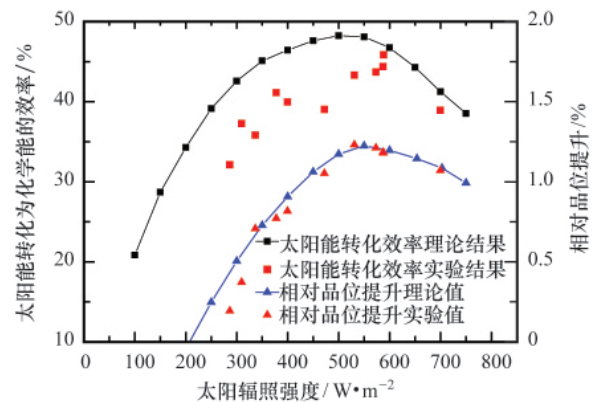


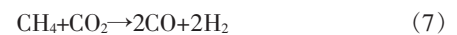
图6 太阳能转化为化学能的效率与太阳能相对品位提升随太阳辐照强度变化的实验和计算结果对比

Fig. 6 Thermochemical efficiency of solar thermal energy conversion into chemical energy and comparative upgrading of energy level of solar thermal energy for different mean solar flux

2 高温太阳热-天然气重整、裂解

2.1 太阳热驱动天然气重整制氢

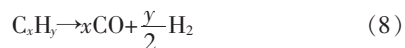
天然气重整制氢是一个强吸热反应, 其反应方程式为



操作温度为 770℃ 时重整的平衡转换率均可超过 90%。经过重整反应, 提升为化学能的太阳能占甲烷热值份额为 28%。反应产物的合成气可以通过传统的联合循环进行发电, 相应的可实现 CO₂ 减排大约 20%。目前, 澳大利亚在 Tapio Station 已经建立了世界上首台 50MW 太阳能驱动天然气水蒸汽重整的示范发电站^[18]。太阳能重整吸收/反应器置于 18m 高的塔上, 利用塔式聚光镜聚集高于 800℃ 的太阳热提供重整需要的反应热, 制取的合成气作为燃气轮机发电燃料, 推动透平发电。

2.2 太阳热驱动天然气裂解

太阳能高温裂解化石燃料过程是将天然气、油和其他碳氢化合物加热到高温下发生分解反应,可以利用下面的方程式统一表示为



碳氢化石燃料,经过裂解反应后,生成了固态的碳和气态的氢气。这样,分离制取高纯度的氢气只需简单地将固态碳黑分离出去即可,同时在该过程中发生了脱碳,不会产生的额外的 CO_2 排放。得到的碳黑可以作为有价值的材料进行出售,降低制氢的成本。美国、以色列和瑞士等国家对该方法非常重视,进行各种实验和理论研究。太阳能甲烷裂解制氢的原理如图 7 所示,甲烷气体先进入一个换热器,与反应产物进行热量交换,预热后的甲烷和一部分再循环氢气进入吸收/反应器,该反应器位于吸热塔的顶部,接收定日镜场反射的太阳能,在反应器中发生如下反应



在反应条件为 $1370^\circ C$ 、 $0.1 MPa$ 的情况下 CH_4 转化为 H_2 和 C 的转化率可达 67%。该反应提高了太阳能的品位,为太阳能的存储和运输提供了可能性。其主要优点在于制取高纯度氢气的同时,不向大气排放 CO_2 ,而是制得更有经济价值、易于储存且可用于未来碳资源的固体碳,减轻了环境的温室效应。

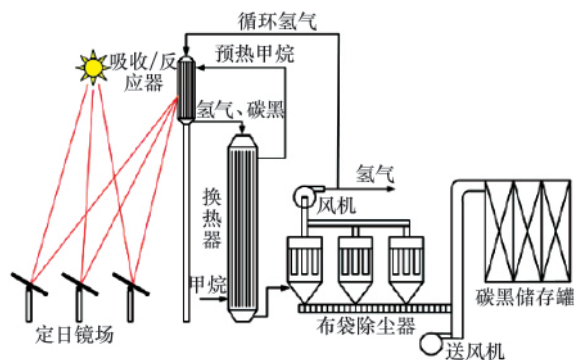


图 7 太阳能甲烷裂解制氢

Fig. 7 Hydrogen production by methane cracking driven by solar energy

3 太阳能驱动的煤气化

煤与 CO_2 或者水蒸汽的气化过程是一个强吸热反应,决定于能源和高温热量供给。利用高温太阳热量驱动煤气化的吸热反应在近 20 年成为热点研究方向^[19]。煤气化包括两个基本过程:高温分解和焦炭气化。

高温分解反应式为



焦炭气化实现了太阳能的储存,反应式为



这是一个强吸热反应,反应产物合成气有更高的热值,理想情况下,反应吸收的太阳能约占煤热值的 44%~45%。产生的合成气若用于发电(如传统的燃气轮机 GT、联合循环 CC 或者燃料电池),与传统的利用煤部分燃烧驱动煤气化反应相比可实现 CO_2 减排 30%^[20]。但该方法存在如下问题:反应生成的合成气 CO 和 H_2 需通过转换反应和 CO/H_2 分离技术才能最终得到纯的 H_2 ;由于煤的来源不同,制得的合成气有可能含有硫基和其他杂质。

Steinfeld^[21]提出一个两步循环反应来制高纯度 H_2 ,反应方程式为



这样,以上循环过程中第二步反应只有 H_2 这一种气态产物,可以直接将其用于 PEM 燃料电池而不会影响其催化剂。另一个好处是通过第一个反应将太阳能储存在固态 Mg 中,然后通过 Mg 与 H_2O 的放热反应,实现了太阳能的储存和运输。

4 太阳能热化学与控制 CO_2 排放

太阳能热化学不仅能够与燃料转化相结合,而且可以与 CO_2 捕获相结合。中国科学院工程热物理研究所开展了结合中低温太阳能热化学的化学链燃烧与 CO_2 分离一体化的研究,取得了一定成果。金红光和洪慧^[22-25]首次提出了将中低温太阳能与天然气进行互补利用的化学链发电系统,构思如图 8 所示。

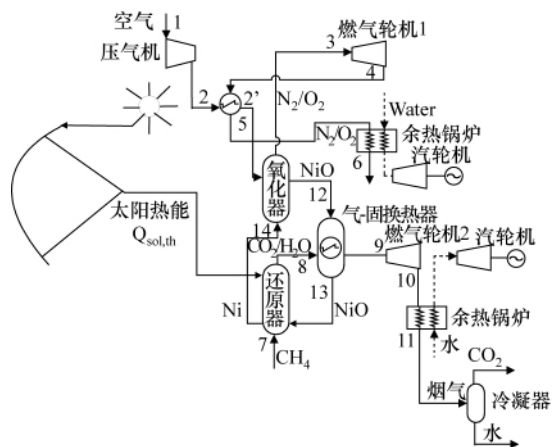


图 8 太阳能-天然气化学链燃烧发电系统

Fig. 8 Simplified flow diagram for solar hybrid system with chemical looping combustion

太阳能-天然气化学链燃烧发电系统集成的关键核心特点是:① 太阳热与甲醇化学链燃烧整合。在还原反应器,采用塔式定日镜聚光系统聚集约 $500^\circ C$ 的太阳热能,作为热源,提供天然气与氧化镍的吸热还原反应 ($CH_4 + 4NiO \rightarrow 4Ni + CO_2 + 2H_2O$) 所需的反应热。还原后的固体镍进入氧化反应器,与压缩空气发生强放热氧化反应 ($4Ni + 2O_2 \rightarrow 4NiO$)。此时,储存在

镍中的太阳热能被释放。氧化后的高温固体颗粒氧化镍由于重力作用,返回还原反应器。图 5 为在北京通州搭建的太阳能热化学反应器实验装置。② 零能耗分离 CO_2 的热力循环。分别来自氧化反应 (N_2/O_2) 和还原反应 ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$) 的高温气体产物经燃气透平 (GT1、GT2) 膨胀做功,燃气排气与双压蒸汽底循环组成余热锅炉型联合循环。由于燃料与空气不直接接触,燃气侧的气体生成物为高浓度的 CO_2 和 H_2O , CO_2 并未被氮气稀释。用简单的物理冷凝方法即可分离 CO_2 和 H_2O , 分离 CO_2 既不消耗额外的能量,也不需要高能耗的 CO_2 分离装置。以化学链燃烧为核心结合中低温太阳能热化学的热力循环系统实现了合理利用太阳能与 CO_2 分离一体化,实现了 CO_2 分离零能耗的突破,可以解决能源有效利用与环境相容的问题。

为了清晰地揭示太阳热能与化学链燃烧相结合的系统的特点和优势,对一个 2.1GWh 的典型新系统进行模拟分析,并与目前国际常规太阳能与天然气互补联合循环 (ISCC)、太阳能重整甲烷联合循环系统进行比较。表 1 阐述了新循环中太阳能热发电性能。由表 1 可明显看出,新循环太阳能净发电效率远高于常规太阳能与天然气互补的联合循环。可见,通过太阳能与化学反应的过程整合提高了太阳能热发电性能,实现 CO_2 的零能耗分离,是太阳能热化学与 CO_2 控制相结合的有效途径。

表 1 峰值辐照强度下的太阳热能转化效率
Table 1 Conversion efficiency of solar thermal energy at top solar flux

参数	新循环	太阳能甲烷重整	太阳能联合循环
输入到接受器表面太阳热能/kW	206.1*	287.8*	361.8*
反应吸收太阳热能/kW	183.4	256.2	32.0
太阳热能份额/%	18.6	24.2	28.6
瞬时太阳能热转功效率/%	31.8**	28.4**	24.4***

注: * 表示相对黑体接受器/反应器吸收率为 89%; ** 表示光学效率 65% 和反应器吸收效率为 80%; *** 表示采用间接传热介质, 光学效率 65% 和接受器效率 65%。

Notes: * means the black receive/reactor absorption efficiency of 89%; ** means the optical efficiency of 65% as well as reactor absorption efficiency of 80%; *** means an optical efficiency of 65% as well as a receiver efficiency of 65% for using heat transfer fluid technology in the ISCC.

5 结论与展望

目前,在太阳能热化学燃料转化研究中,太阳能驱动甲烷重整是最可行的利用太阳能的热化学技术。在将来的研发中,太阳能驱动甲烷重整必须将传统的、先进的动力技术与液化燃料生产技术联系起来。太阳能驱动的煤气化在将来是一个非常重要的话题,因为煤是世界上最丰富的化石燃料。水解和化石燃料裂解仍然需要催化剂或者工质的基础研究,

未来最重要的一点就是发现能满足实际过程中应用的具有再现性的循环工作介质。

近年来,国外太阳能热化学燃料转化技术研究不断完善和深化,而中国研究相对起步较晚。总体上说,大多研究集中在金属载体研发、太阳能吸收反应器研制和太阳能热化学动力学 3 个方向。但对太阳能热化学燃料转化能源系统方面的研究,还寥寥无几,有待深入。太阳能热化学燃料转化作为一种新颖、高效的太阳能热利用方式,在发电、清洁燃料生产等能源系统耦合上表现出很大的优势,特别是与 CO_2 控制有机结合,不仅能高效完成太阳热能的燃料转化,同时还能够实现超低能耗的 CO_2 捕集。以太阳能热化学为核心的能源系统不再是个别单元技术研究,而是着眼于不同功能、不同过程耦合的系统集成的研究,具有重要的理论价值和广泛的工程应用前景,是今后国际太阳能热利用发展的重要方向之一。

参考文献 (References)

- [1] Lewis N. Toward cost-effective solar energy use [J]. *Science*, 2007, 315 (5813): 798–801.
- [2] Fletcher E A. Solar thermal processing: A review [J]. *J Sol Energy Eng*, 2001, 123(2): 63–74.
- [3] Steinfeld A. Solar thermochemical production of hydrogen – a review[J]. *Solar Energy*, 2005, 78: 603–615.
- [4] Tamme R, Buck R, Epstein M, *et al.* Solar upgrading of fuels for generation of electricity[J]. *J Sol Energy Eng*, 2001, 123(2): 160–163.
- [5] James R. The DOE office of solar energy technologies vision for advancing solar technologies in the new millennium [J]. *Solar Energy*, 2000, 69(5): 363–368.
- [6] Saad D. Unified model of solar thermal electric generation systems[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(5): 755–767.
- [7] Kribus A, Zaibel R, Carey D, *et al.* A solar-driven combined cycle power plant[J]. *Solar Energy*, 1998, 62(2): 121–129.
- [8] Romero M, Buck R, Pacheco J E. An update on solar central receiver systems, projects, and technologies [J]. *J Sol Energy Eng*, 2002, 124(2): 98–108.
- [9] Buck R, Bräuning T, Denk T, *et al.* Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems (REFOS)[J]. *J Sol Energy Eng*, 2002, 124(1): 2–9.
- [10] Fletcher E A, Moen R. Hydrogen and oxygen from water [J]. *Science*, 1977, 197(4308): 1050–1056.
- [11] Nakamura T. Hydrogen production from water utilizing solar heat at high temperatures[J]. *Solar Energy*, 1977, 19(5): 467–475.
- [12] Jin H, Hong H, Ji J, *et al.* Solar upgrading of research methanol-driven combined cycle using middle temperature solar collectors[C]//ASME Solar Conference, ISEC, Hawaii, USA, 2003.
- [13] Hong H, Jin H, Wang Z, *et al.* Solar thermal power cycle with integration of methanol decomposition and middle-temperature solar thermal energy[J]. *Solar Energy*, 2005, 78: 49–58.
- [14] 何鹏, 洪慧, 金红光, 等. 低温太阳热与甲醇化学链整合能量释放机理实验初探[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(2): 181–184.
He Peng, Hong Hui, Jin Hongguang, *et al.* *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(2): 181–184.

- [15] Jin H, Hong H, Sui J, *et al.* Fundamental study of novel mid- and low-temperature solar thermochemical energy conversion [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(5): 1135-1152.
- [16] Jin H, Sui J, Hong H, *et al.* Prototype of solar receiver/reactor with parabolic troughs[J]. *J Sol Energy Eng*, 2007, 129(4): 378-381.
- [17] Liu Q, Hong H, Yuan J, *et al.* Experimental investigation of hydrogen production integrated methanol steam reforming with middle - temperature solar thermal energy [C]//Proceedings of the 3rd International Green Energy Conference, Vasteras, 2007: S220-230.
- [18] Davey R, Stein W. Radiation nation [J]. *Solar Energy*, 2006, 144(3): 23-24.
- [19] Gregg D, Aiman W, Otuki H, *et al.* Solar coal gasification [J]. *Solar Energy*, 1980, 24: 313-321.
- [20] Taylor R, Berjoan R, Coutures J. Solar gasification of carbonaceous materials[J]. *Solar Energy*, 1983, 30(6): 513-25.
- [21] Ga' lveza M E, Freib A, Albisettia G, *et al.* Solar hydrogen production via a two-step thermochemical process based on MgO/Mg redox

- reactions—Thermodynamic and kinetic analyses[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(12): 2880-2990.
- [22] Hong H, Jin H, Liu Q. A novel solar-hybrid gas turbine combined cycle with inherent CO₂ separation using chemical -looping combustion by solar heat source[J]. *J Sol Energy Eng*, 2006, 128(3): 275-284.
- [23] Hong H, Jin H. A novel solar thermal cycle with chemical looping combustion[J]. *International J of Green Energy*, 2005, 2(4): 397-407.
- [24] 洪慧, 金红光, 杨思. 低温太阳热能与化学链燃烧相结合控制 CO₂ 分离动力系统[J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(5): 729-732.
- Hong Hui, Jin Hongguang, Yang Si. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(5): 729-732.
- [25] 金红光, 林汝谋. 能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Jin Hongguang, Lin Ruimou. Comprehensive cascade utilization of energy and gas turbine integrated system [M]. Beijing: Science Press, 2008.

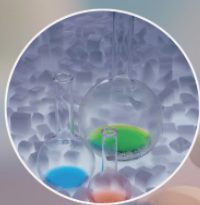
(责任编辑 王芷)

中国化学会第27届学术年会

时间: 2010年6月20—23日

地点: 福建·厦门

主办单位: 中国化学会



联系电话: 010-62625584

传真: 010-62568157

电子信箱: maria@iccas.ac.cn

通信地址: 北京2709信箱中国化学会 (100190)