

定壁温下甲烷自热重整产氢暂态特性数值模拟

张 力¹ 张 苗² 闫云飞¹

(1. 重庆大学 动力学院 重庆 400030; 2. 机械工业第三设计院 重庆 400039)

摘 要: 采用甲烷自热重整的详细反应机理,通过数值模拟的方法研究了恒壁温、微型直通道内的 CH_4 、 O_2 、 H_2O 镍基催化剂上的自热重整反应。重点分析了混合物组分及质量流量对自热重整产氢暂态特性的影响。结果表明,在较高温度下,微型反应器出口 H_2 产量达到最大值所需的时间受混合气质量流量影响较大,而受混合物组分影响很小;氢气产量达到稳定所需的时间随 H_2O 、 CH_4 摩尔比的增大而缩短,随 O_2 、 CH_4 摩尔比的增大而增长。 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 摩尔比为 1:0.5:3.5 时,氢气体积分数可在 90 ms 时稳定于 54%。

关 键 词: 微通道; 甲烷; 自热重整; 暂态特性

中图分类号: TK16 文献标识码: A

符号说明

D —物质的扩散系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
 h —比焓/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;
 M_s —第 s 种物质的摩尔质量/ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$;
 P —压力/ Pa ;
 q —反应热/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$;
 R —气体常数/ $\text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$;
 R_s —第 s 种物质化学反应的净产生或消耗速率/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$;
 t —时间/ s ;
 u —速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 T —温度/ K ;
 Y_s —组分 s 的质量分数;
 λ —导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$;
 μ —动力粘性系数/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$;
 ρ —密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

引 言

微型燃烧器具有能量密度高、寿命长、体积小、重量轻、结构简单等优点,同时也存在面容比大、散热速率大、燃烧难以稳定进行的缺点。因此,如何使燃料在微型燃烧器内保持高效、稳定地燃烧是微型燃烧器的研究重点。

钟北京等人提出碳氢燃料预混催化重整产氢燃

烧技术能显著改善微燃烧器内的燃烧状况^[1]。甲烷自热重整制氢过程能够很好的耦合吸放热过程,实现系统的自供热,过程能耗低^[2]。目前,这方面的研究大多集中于对反应稳态性能的探讨,也有学者^[13~15]利用数值模拟的方法研究了甲烷自热重整的暂态特性,但反应都是在大空间下进行的,针对微反应器内的甲烷自热重整暂态特性的研究较少。为进一步了解微反应器内甲烷自热重整反应的本质,找到控制反应的有效途径,有必要对甲烷自热重整制氢的暂态特性进行数值模拟。

本研究通过数值模拟分析定壁温条件下,管径为 1 mm 的微型直通道中甲烷、氧气、水蒸气自热重整反应的暂态特性,探讨了反应气组分和质量流量变化对微通道内甲烷自热重整产氢暂态特性的影响。

1 模型的建立

1.1 物理模型

计算中采用的物理模型是直径为 1 mm,长度为 10 mm 的直管反应器,管道内部涂有镍基催化剂,忽略内壁面涂覆催化剂对体积的影响。

1.2 数学模型

重整反应器的尺寸较小,故相对于常规反应器而言,忽略甲烷燃烧的空间反应,只考虑甲烷部分氧化以及甲烷水蒸气重整的表面反应。计算中忽略体积力、流动中耗散作用以及气体辐射等因素的影响。数学模型包括的控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

组分方程:

收稿日期: 2010 - 12 - 01; 修订日期: 2011 - 01 - 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906103)

作者简介: 张 力(1956 -),男,重庆人,重庆大学教授。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_s) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_s) = \frac{\partial}{\partial x_i}(D\rho \frac{\partial Y_s}{\partial x_i}) + R_s \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (3)$$

能量方程:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\sum_s D\rho \frac{\partial Y_s}{\partial x_j} h_s) + q \quad (4)$$

理想气体状态方程:

$$p = \rho RT \sum \frac{Y_s}{M_s} \quad (5)$$

1.3 化学反应机理

甲烷自热重整反应机理主要是在甲烷部分氧化和甲烷水蒸气重整的基础上联合提出的。基于基元反应的详细反应机理,能更好地揭示反应的内在规律和特性,据此本研究采用 Olaf. Deutschmann 等人提出的详细反应机理^[6]。此机理共包括甲烷氧化和甲烷水蒸气重整在内的 42 个基元反应,其中 6 个吸附基元反应、30 个表面化学基元反应和 6 个解吸附基元反应,共涉及 13 种表面相组分: Ni、H₂O、H、OH、CO、C、CH₃、CH₂、CH、CH₄、O、CO₂、HCO 和 7 种气相组分: CH₄、O₂、H₂O、CO₂、CO、H₂、N₂。

1.4 计算方法

使用计算流体力学软件 CFD 模拟了 CH₄、O₂、H₂O、N₂ 混合物在微型直管反应器中的催化自热重整过程。通过改变混合物质量流量以及反应物中 CH₄、O₂、H₂O 3 种组分比例,其中组分比例通过惰性气体 N₂ 的量来调节,研究它们对甲烷在微腔内催化自热重整产氢的暂态特性的影响。根据微腔的结构和流动特性,采用六面体形式的结构化网格,网格大小取为 0.1 mm,计算结果与网格大小无关,整个模型划分后,计算单元体总数约 1.4 万个。

采用层流模型,流体密度根据理想气体方程计算,流体混合气体的传热系数、粘滞系数和导热系数根据组分特性的质量加权平均来计算。计算中离散格式采用二阶迎风格式,采用双精度非耦合求解器求解控制方程组,解的收敛根据控制方程残差值来判断,能量残差取值为 10⁻⁶,其余均为 10⁻⁴,求解方法采用 SIMPLE 算法。

边界条件设置为:入口采用质量流量边界条件,反应物入口温度均设定为 300 K;出口为压力边界条件,出口压力为大气压;壁面采用无滑移等温边界

条件,壁面温度恒定为 973 K。初始条件为:反应开始之前,微直管反应器壁面已涂有镍基催化剂,壁面温度为 973 K,管内无气体存在。

2 模型验证

采用 D. L. Hoang 等人的实验研究结果为对比依据^[4],以甲烷自热重整反应装置(直径为 30 mm,长为 200 mm 的直圆管)为对象建立物理模型。按照 D. L. Hoang 实验研究中的实验条件与部分工况,利用 Fluent 软件及动力学模型进行甲烷、氧气和水蒸气催化自热重整数值模拟。甲烷与空气混合气体的流量保持 2 L/min 不变,CH₄、空气摩尔比为 1:3.5,反应混合气体初始温度为 873 K,反应器壁面为绝热边界条件。为研究混合组分中水蒸气甲烷摩尔比,即水碳比对整个催化自热重整反应的影响,设定水蒸气、甲烷摩尔比由 1 变化到 3,间隔为 0.5。数值分析结果与 D. L. Hoang 等人实验结果对比如图 1、图 2 所示。图中氢气的产生率为反应器出口产生氢气摩尔量与反应器进口甲烷的摩尔量之比。

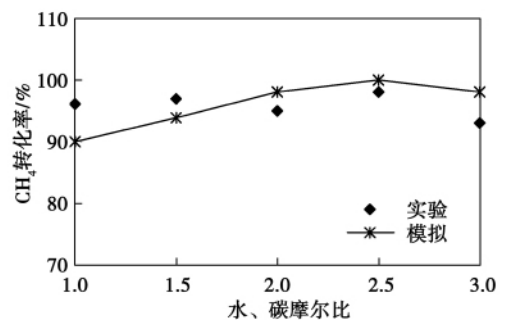


图1 CH₄转化率的实验结果和数值计算结果对比

Fig. 1 Comparison of the test results of the CH₄ conversion rate with the numerically calculated ones

由图 1 及图 2 可以看出,本研究应用的催化重整动力学模型的计算结果与实验结果的变化趋势一致,吻合较好,模拟结果和实验结果的相对误差小于 14%,说明所采用的模型是合理的,可以反映出重整反应的基本变化规律。

3 计算结果与讨论

在模型获得验证的基础上,进一步分析了定壁温条件下,反应原料气中 O₂、CH₄ 摩尔比(简称氧碳比)、H₂O、CH₄ 摩尔比(简称水碳比)和原料混合气

质量流量变化对微细腔中甲烷催化自热重整暂态特性的影响,获得反应过程中氢气量随时间的变化规律,得到产氢量达到最大和产氢量达到稳定的反应时间。文中所有图上的时间轴均以混合气体在微型直管反应器中反应后,第一个流体微粒流出管道的时刻作为时间起点,即时间坐标轴上的零时刻。

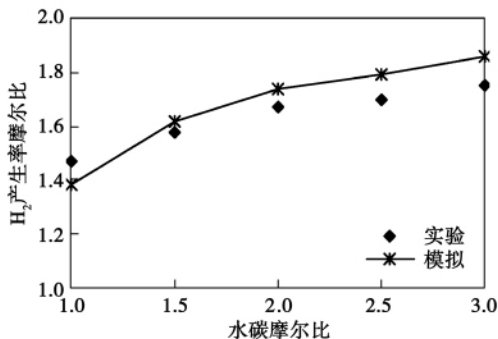


图 2 H₂ 产生率的实验结果和数值计算结果对比

Fig. 2 Comparison of the test results of the H₂ productivity with the numerically calculated ones

3.1 氧碳比的影响

图 3 给出壁面温度为 973 K, H₂O、CH₄、O₂、N₂ 混合气体质量流量为 6 g/h,混合气中 H₂O、CH₄ 摩尔比为 2.0 时,反应器出口 H₂ 体积分数随时间和反应原料气中氧碳比的变化规律。图 4 给出了 O₂、CH₄ 摩尔比为 0.4, H₂O、CH₄ 摩尔比为 2.0 时,反应器出口处甲烷、氧气、水蒸气和氢气质量分数随时间的变化特性。

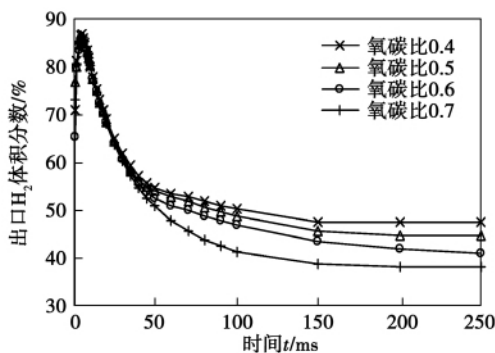


图 3 不同氧碳比,出口 H₂ 体积分数随时间的变化

Fig. 3 Change of the H₂ volumetric fraction at the outlet at various oxygen/carbon ratios with time

(1) 恒定 H₂O、CH₄ 摩尔比时,不同 O₂/CH₄ 摩尔比下,反应器出口处氢气的体积分数随时间变化的趋势。在反应的初始阶段,氢气体积分数在 5 ms

左右时迅速增加至最大值,随后则缓慢下降,直到反应达到稳定,产物组分不再变化。从图中还可看出在反应刚开始时氢气产量迅速增加但是随着时间的推移增加速度有所减缓。例如,从氧碳比为 0.5 的曲线上可知,从 1 到 2 ms 时,氢气体积分数由 73% 变化为 83%,从 4 到 5 ms 时,氢气体积分数由 86% 增加到 87%,增幅明显下降。

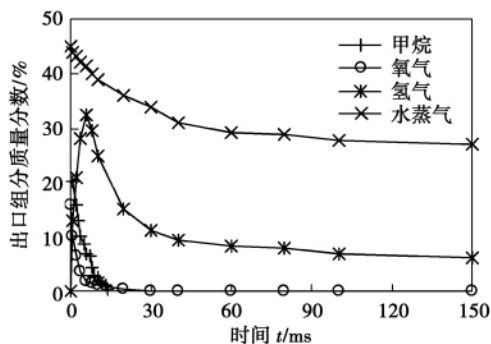


图 4 O₂、CH₄ = 0.4, H₂O、CH₄ = 2.0, 反应器出口 CH₄、O₂、H₂O 和 H₂ 质量分数随时间的变化

Fig. 4 Change of the CH₄, O₂, H₂O and H₂ mass fraction at the outlet of the reactor with time when O₂/CH₄ = 0.4 and H₂O/CH₄ = 2.0

由图 4 可以看出,随着反应的进行,反应物含量不断减少直到反应达到稳定。结合图 3 和图 4 可以知道,在反应刚开始的时候,放热的甲烷部分氧化占据主导,同时伴随较强烈的甲烷水蒸气重整,因此反应一开始氢气体积分数就有明显的增多,随着反应的进行,氧气量显著减少,甲烷部分氧化反应急剧减弱,此时,吸热的水蒸气重整开始占据主导,换言之,此时反应器中的产氢反应由开始时的部分氧化和水蒸气重整两个主要产氢反应减少为水蒸气重整这一个主要的产氢反应,加之氢气产量和反应混合物中甲烷浓度成正比,而此时反应器中的反应物浓度,特别是甲烷浓度较反应刚开始时低的多,因此产氢量也较反应之初低的多,随着时间的推移,甲烷不断被消耗,重整反应不断减弱,直至甲烷不再转化,产氢量才达到稳定。

(2) 恒定 H₂O、CH₄ 摩尔比时, H₂ 体积分数达到最大值所需的时间受 O₂、CH₄ 摩尔比的影响不大,均维持在 5 ~ 8 ms 左右。这是因为在反应进行的初始阶段,较高的反应温度削弱了组分变化对产氢量峰值出现时间的影响。而随着反应的进行,初始阶段的影响消失,此时不同的氧碳比对后续反应过程的不同影响便体现出来了。此外, H₂ 产量的最大值在

不同 O_2 、 CH_4 摩尔比下略微有所不同,但差别很小。 O_2 、 CH_4 摩尔比从 0.4 变化到 0.7 时,微细管出口氢气体积分数的最大值均在 86%~87% 之间。由于差别很小,可以认为是模型误差引起的。

(3) 恒定 H_2O 、 CH_4 摩尔比时,反应稳定后,产氢量随着 O_2 、 CH_4 摩尔比的增加逐渐降低。当 O_2 、 CH_4 摩尔比由 0.4 增加到 0.7,微细管出口氢气体积分数由 47.62% 下降到 38.03%。恒定水蒸气甲烷摩尔比时,氢气产量达到稳定所需的时间随氧气甲烷摩尔比的增加有所增加,氧气甲烷摩尔比由 0.4 升高到 0.7 时,氢气量稳定的时间由 150 提高到 200 ms。这是因为,混合气中氧气量的增加会使更多的甲烷参与氧化发生完全燃烧反应,减少甲烷部分氧化产氢的比例,同时也会削弱水蒸气重整的比例,不但使氢气产量下降,还推迟了氢气量的稳定。

3.2 水碳比的影响

壁面温度为 973 K、反应混合物质量流量为 6 g/h、 O_2 、 CH_4 摩尔比为 0.5 时, H_2O 、 CH_4 摩尔比对自热重整反应产氢量的影响如图 5 所示。图中氢气体积分数随时间变化的总体趋势和图 3 中一致。

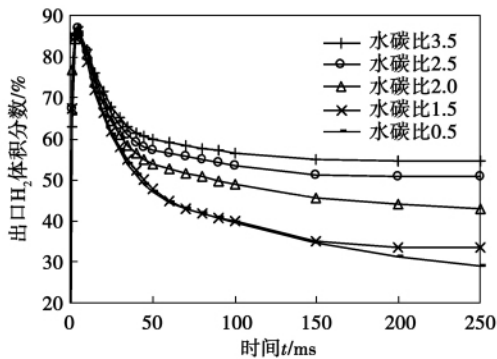


图 5 不同水碳比,氢气体积分数随时间的变化

Fig. 5 Change of the H_2 volumetric fraction with time at various water/carbon ratios

由此反映出:

(1) 恒定氧气甲烷摩尔比时,增加反应混合物中水蒸气的含量,可以提高反应最终的氢气产量。同一氧气甲烷摩尔比下, H_2O 、 CH_4 摩尔比越小,反应达到稳定所需要的时间越长。 H_2O 、 CH_4 摩尔比从 0.5 增加到 3.5 时,反应达到稳定所需的时间由 250 ms 减少为 90 ms。这是因为:在甲烷自热重整中,反应稳定所用时间主要受反应速度较慢的水蒸气重整的制约,而相同条件下,增加水蒸气将增强甲烷催化重整反应,这不但会使氢气产量增加,而且会加速水

蒸气重整反应的平衡,进而加速氢气产量的稳定。

(2) 相同条件下,氢气产量达到最大值所需的时间受原料气中水蒸气含量的影响不大。 H_2O 、 CH_4 摩尔比从 0.5 变化到 3.5 时,氢气量达最大所需的时间均维持在 6 ms 左右。

3.3 质量流量的影响

壁面温度为 973 K、 O_2 、 CH_4 摩尔比为 0.5、 H_2O 、 CH_4 摩尔比为 2.0 时,不同原料混合气质量流量下,微型直管反应器出口氢气体积分数随时间的变化特性如图 6 所示。

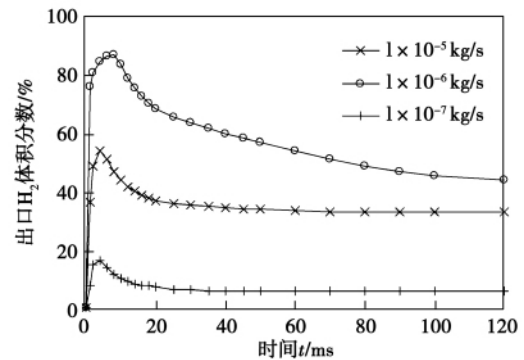


图 6 不同质量流量,氢气体积分数随时间的变化

Fig. 6 Change of the H_2 volumetric fraction with time at various mass flow rates

(1) 质量流量过大或者过小对重整反应产氢都不利。适中的反应气流量不但可以在反应终了时产生最多的氢气量,而且在反应过程中,产氢量的最大值也较高。反应气质量流量为 1×10^{-5} 和 1×10^{-7} kg/s 时,微型直管出口处的氢气体积分数在 30 ms 左右达到稳定,稳定值分别为 32% 和 5%;质量流量为 1×10^{-6} kg/s 时,氢气体积分数在 105 ms 左右稳定于 41%。

(2) 甲烷自热重整产氢量达最大以及产氢量达到稳定所需的时间受质量流量的影响较大。质量流量过大,反应来不及充分进行;质量流量过小,产氢量就小。因此在选择质量流量时,应该综合考虑反应速率和产氢量两个因素。

4 结论

定壁温条件下,在氧气甲烷摩尔比为 0.4~0.7、水蒸气甲烷摩尔比为 0.5~3.5 范围内,通过对微型直管内的甲烷自热重整产氢暂态特性的数值分析,得出结论:

(1) 在甲烷自热重整产氢过程中,随着反应的进行,微细管出口处的氢气体积分数随时间出现先增加后降低的趋势,且随着时间的推移,曲线上升的速度和降低速度都是逐渐减小的。

(2) 催化壁面温度较高时,甲烷自热重整产氢量达到最大值所需的时间基本不随反应物组分的改变而改变,受反应混合气质量流量的影响较大。混合气质量流量的数量级为 10^{-6} 时 (kg/s),产氢效果较好。

(3) 恒定 O_2 、 CH_4 摩尔比,增加水蒸气的量会使反应器出口氢气产量增多,且使氢气产量达到稳定所需时间缩短;恒定 H_2O 、 CH_4 摩尔比,增加氧气会使氢气最终产量下降,同时推迟氢气量的稳定。当 H_2O 、 CH_4 摩尔比 3.5, O_2 、 CH_4 摩尔比 0.5 时,自热重整可在最短的时间 90 ms 内达到稳定,且稳定后氢气产量最大,为 54%。

参考文献:

[1] 钟北京,洪泽恺.微燃烧器内甲烷催化燃烧的数值模拟[J].热能动力工程 2003,18(6):584-588.
ZHONG Bei-jing, HONG Ze-kai. Numerical simulation of the catalytic combustion of CH_4 in a microburner[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2003, 18(6): 584-588.

[2] 井强山.甲烷催化转化制合成气研究[M].郑州:郑州大学出版社 2008.
JING Qiang-shan. Study of the catalytic transformation of methane for preparing synthetic gases[M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press 2008.

[3] Rakass S, Oudghiri-Hassani H, Rowntree P, et al. Abatzoglou. Steam reforming of methane over unsupported nickel catalysts[J]. Journal of Power Sources 2006, 158(1): 485-496.

[4] Hoang D L, Chan S H. Experimental investigation on the effect of natural gas composition on performance of autothermal reforming[J]. International Journal of Hydrogen Energy 2007, 32(5): 548-556.

[5] WANG H M. Experimental studies on hydrogen generation by methane autothermal reforming over nickel-based catalyst[J]. Journal of Power Sources 2008, 177(2): 506-511.

[6] JANARDHANAN V M, DEUTSCHMANN O. CFD Analysis of a solid oxide fuel cell with internal reforming: coupled interactions of transport, heterogeneous catalysis and electrochemical processes[J]. Journal of Power Sources 2006, 162(2): 1192-1202.

[7] ZAHEDI M, NEZHAD S. Rowshanzamir. Autothermal reforming of methane to synthesis gas: Modeling and simulation[J]. International Journal of Hydrogen Energy 2009, 34(3): 1292-1300.

[8] SHI Li-ming, DAVID J, BAYLESS, MICHAEL E, et al. A CFD model of autothermal reforming[J]. International Journal of Hydrogen Energy 2009, 34(18): 7666-7675.

[9] 冉景煜, 胡建红. 微细腔内甲烷湿空气预混催化重整产氢特性[J]. 中国电机学报 2007, 27(8): 42-47.
RAN Jing-yu, HU Jian-hong. Characteristics governing the methane and wet air pre-mixing catalytic reforming and hydrogen production in micro-cavities[J]. Proceedings of China Electric Machinery, 2007, 27(8): 42-47.

[10] 张舒冬, 金英杰, 倪向前. 甲烷自热重整制合成气热力学平衡分析[J]. 当代化工 2009, 38(2): 165-169.
ZHANG Shu-dong, JIN Ying-jie, NI Xiang-qian. Thermodynamic equilibrium analysis of the synthetic gas preparation by self-heat reforming of methane[J]. Modern Chemical Industry, 2009, 38(2): 165-169.

[11] 王 胜, 王树东. 甲烷自热重整制氢热力学分析[J]. 燃料化学学报 2006, 34(2): 222-225.
WANG Sheng, WANG Shu-dong. Thermodynamic analysis of the hydrogen preparation by self-heat reforming of methane[J]. Journal of Fuel Chemistry, 2006, 34(2): 222-225.

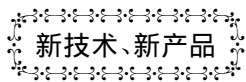
[12] YANG Zhi-bin, ZHANG Yu-wen, ZHANG Yun-yan. Hydrogen production from coke oven gas by methane reforming: thermodynamic analysis and experimental study[J]. Acta Phys. Chim. Sin. 2010, 26(2): 350-358.

[13] HOANG D L, CHAN S H. Modeling of a catalytic autothermal methane reformer for fuel cell applications[J]. Applied Catalysis 2004, 268(1-2): 207-216.

[14] Ovi Lian Ding, Siew Hwa Chan. Water-gas shift assisted autothermal reforming of methane gas-transient and cold start studies[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(1): 270-284.

[15] Heinzl A, Seifert P, Meyer B. Transient simulation of an autothermal reformer[J]. Fuel Processing Technology 2008, 89(7): 687-692.

(丛 敏 编辑)



新型“圆外摆轮”动力机械结构

该技术成果是一种全新的动力机械结构,以其为基础制造的泵与通常的离心泵、转子泵、齿轮泵在构造上截然不同。借助于未与主轴成直线并转动的轮和依次往复穿行于轮中的三个挡片,实现其功能。与常规结构设计相比更大的动力效应、更少的能源消耗、更小的尺寸、更低廉的造价以及更简便的维护等诸多功能。可用于各种尺寸的水泵、气泵、压缩机及水、汽轮机。

(如有需要者,请与编辑部联系)

定壁温下甲烷自热重整产氢暂态特性数值模拟 = **Numerical Simulation of the Transient Characteristics of the Methane Self-heat Reforming-based Hydrogen Production at a Given Wall Temperature** [刊, 汉] ZHANG Li, ZHANG Miao, YAN Yun-fei (Power College, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030), ZHANG Miao (Mechanical Industry No. 3 Designing Institute, Chongqing, China, Post Code: 400039) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(1). - 112 ~ 116

By adopting the detailed reaction mechanism governing the methane self-heat reforming and through using a numerical simulation method, studied was the self-heat reforming reaction of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ Ni-based catalytic agent in straight microchannels. The influence of the constituents of the mixture and the mass flow rate on the self-heat reforming hydrogen-production transient characteristics was mainly analyzed. The research results show that at a relatively high temperature, the time required for attaining a maximal H_2 production capacity at the outlet of the miniature reactor is substantially influenced by the mass flow rate of the gas mixture but influenced relatively little by the constituents of the mixture. The time required for attaining a stable hydrogen production capacity is shortened with an increase of the $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ mol ratio and extended with an increase of the O_2/CH_4 mol ratio. When the $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ mol ratio is 1:0.5:3.5, the hydrogen volumetric fraction can be stabilized at 54% in a shortest time period of 90 ms. **Key words:** microchannel, methane self-heat reforming, transient characteristics

风力机叶片动力特性实验台设计 = **Design of a Test Rig for Testing the Power Characteristics of a Wind Turbine** [刊, 汉] LI Hai-bo, LU Xu-xiang, LI Lu-ping, DENG Xiao-hu (Hunan Provincial Key Laboratory on "Renewable Energy Source Electric Power Technology", Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(1). - 117 ~ 121

Designed and developed was a wind turbine blade dynamic characteristics testrig, on which a wind turbine blade static load test, mode test, blade testing, blade non-destructive inspection, propeller and blade icing attached substance load simulation test, propeller and blade fatigue load test and destructive test setc. can be performed. On this basis, the composition of the equipment items, structural features and the main functions of the test rig were described. On the test rig, a static load and mode test of a wind turbine blade were conducted and a 6-order mode parameter of the wind turbine blade was obtained. The MAC and MOV two mode criteria were used to verify the test results. **Key words:** wind turbine blade, dynamic characteristics, static load, mode test

两级聚光光伏系统中砷化镓电池特性的实验研究 = **Experimental Study of the Characteristics of a Gallium Arsenide Cell in a Two-stage Concentrated Photovoltaic System** [刊, 汉] WANG Zi-long, ZHANG Hua, LI Ye