

空气添加方式对甲烷自热重整、制氢特性影响的热力学分析

闫云飞, 张杰, 张力

(重庆大学 动力工程学院 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030)

摘要:应用热力学平衡常数法分析了空气的稀释添加和取代添加方式对甲烷自热重整、制氢特性的影响。结果表明:增加空碳比时,两种添加方式都使甲烷水蒸气重整反应程度降低,以至于逆向;水气转换反应程度在稀释添加时逐渐升高,取代添加时则降低。增大空碳比 α ,稀释添加方式促进 H_2 产生和 CH_4 转化,而取代添加方式则起抑制作用,当空碳比 α 与0.5倍的水碳比 β 之和 $\alpha + 0.5\beta = const = 2$ 时, α 从0增大到1,稀释添加时 CH_4 转化率由94.54%上升到97.89%,取代添加时由99.11%下降到78.02%。空碳比对稀释添加方式下的 H_2/CO 摩尔比几乎无影响,在 $const = 2$ 时, α 为0~2时 H_2/CO 摩尔比保持在4.3~4.4之间;当 α 为0.1和2时取代添加方式 H_2/CO 摩尔比急剧降低,分别为6.63、4.30和2。

关键词:稀释添加;取代添加;热力学;平衡常数法;自热重整;制氢;空碳比

中图分类号: O642; TK911 文献标识码: A

引言

甲烷制氢工艺主要有甲烷催化裂解、甲烷二氧化碳重整、甲烷水蒸气重整和甲烷自热重整^[1-10],前3种工艺都需要从外界添加热量,从而导致反应装置变得复杂,而甲烷自热重整、制氢通过合理的热量耦合,可以依靠反应产生的热量自发进行下去,有利于简化装置和操作条件。

空气作为甲烷自热重整、制氢的重要原料,其添加方式直接影响到 H_2 产量和甲烷转化以及 H_2/CO 摩尔比的大小。因此,本研究应用热力学平衡常数法分析了空气的稀释添加和取代添加方式对甲烷自热重整、制氢特性的影响,为深入研究甲烷自热重整、制氢技术和工艺条件的确定提供理论依据。

收稿日期: 2012-09-20; 修订日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906103)

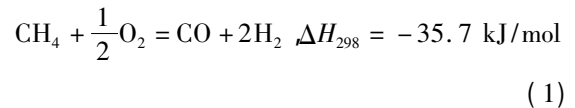
作者简介: 闫云飞(1978-),男,河南平顶山人,重庆大学副教授、博士。

1 热力学模型

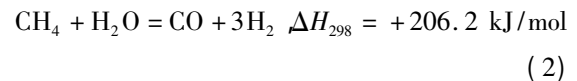
1.1 甲烷自热重整反应体系

甲烷自热重整反应是应用放热的部分氧化反应、水气转换反应和强吸热的水蒸气重整反应热量的耦合来实现制氢系统的自热运行。其独立反应式有3个。

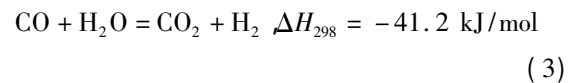
部分氧化:



甲烷水蒸气重整:



水气转换:



建立以上反应的平衡常数关系式,从而得到反应平衡时各组分的变化情况。

1.2 热力学平衡常数

CH_4 、 H_2O 、 CO 、 H_2 、 CO_2 、 O_2 等各物质的热力学数据参见文献[11]。标准反应热效应 ΔH^\ominus 与温度 T 的关系可通过基尔霍夫(Kirchhoff)方程来确定^[11]:

$$d\Delta H^\ominus(T) = \Delta C_p dT \quad (4)$$

而:

$$\Delta C_p = \Delta A_1 + \Delta A_2 \times 10^{-3} T + \Delta A_3 \times 10^5 T^{-2} \quad (5)$$

代入方程(4)并积分,可得:

$$\Delta H^\ominus(T) = \Delta A_1 \times T + 0.5 \Delta A_2 \times 10^{-3} T^2 - \Delta A_3 \times 10^5 T^{-1} + I_0 \quad (6)$$

将 $\Delta H^\ominus(298)$ 代入式(6)中,可求得积分常

数 I_0 。

根据范特·霍夫 (Van't Hoff) 方程:

$$d \ln K / dT = (\Delta H^\ominus (T) / RT^2) dT \quad (7)$$

和方程:

$$\Delta G^\ominus (T) = - RT \ln K \quad (8)$$

可得:

$$\ln K = - I_0 / RT + \Delta A_1 \times \ln T / R + \Delta A_2 \times 10^{-3} T / 2R + \Delta A_3 \times 10^5 / 2RT^2 - I_K / R \quad (9)$$

将 $\Delta G^\ominus (298)$ 代入式 (9) 求得积分常数 I_K 。

则反应平衡常数与温度的函数关系为:

$$\ln K_1 = 5919 T^{-1} + 6.682 \ln T - 4.099 \times 10^{-3} T - 2.706 \times 10^{-2} T^{-2} - 21.792 \quad (10)$$

$$\ln K_2 = -22790 T^{-1} + 8.156 \ln T - 4.421 \times 10^{-3} T - 4.330 \times 10^3 T^{-2} - 26.030 \quad (11)$$

$$\ln K_3 = 5087 T^{-1} + 1.560 \ln T - 1.509 \times 10^{-4} T - 4.762 \times 10^4 T^{-2} - 13.933 \quad (12)$$

其中 K_1 、 K_2 、 K_3 分别表示反应 1、2、3 的平衡常数。温度较低时,容易发生歧化反应形成积炭,造成催化剂失活,高温可以抑制积炭的形成^[12],故取 $T = 1000$ K,考察空气的不同添加方式对甲烷自热重整反应的影响,可得 $K_1 = 2.304 \times 10^{11}$, $K_2 = 19.256$, $K_3 = 1.252$ 。可见,甲烷部分氧化反应远比甲烷水蒸气重整反应和水气转换反应容易进行。

$$\begin{cases} K_2 = \frac{[CO][H_2]^3}{[CH_4][H_2O]} = \frac{(0.42n_{air}^0 + y - z)(0.84n_{air}^0 + 3y + z)^3}{(n_{CH_4}^0 - 0.42n_{air}^0 - y)(n_{H_2O}^0 - y - z)(1.63n_{air}^0 + n_{CH_4}^0 + n_{H_2O}^0 + 2y)^2} \\ K_3 = \frac{[CO_2][H_2]}{[CO][H_2O]} = \frac{z(0.84n_{air}^0 + 3y + z)}{(0.42n_{air}^0 + y - z)(n_{H_2O}^0 - y - z)} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $[CO]$ 表示 CO 的摩尔浓度,其它类似。将 $K_2 = 19.256$, $K_3 = 1.252$ 代入方程 (13), 利用 MATLAB 编程解方程组, 求出反应平衡时各组分的摩尔含量, 进而分析空气的不同添加方式对甲烷自热重整制氢特性的影响。

2 结果和讨论

定义甲烷转化率: $C_{CH_4} = \frac{n_{CO} + n_{CO_2}}{n_{CH_4} + n_{CO} + n_{CO_2}} \times$

100%; 组分生成量: $Y_i = n_i / n_{CH_4}^0$, mol/mol。

保持水碳比 β 不变, 在此基础上增加空碳比 α 并定义为空气的稀释添加方式; 增加空碳比, 同时将按比例降低水碳比的添加方式定义为空气的取代添

1.3 组分平衡模型

设进料气中 $n_{CH_4}^0 = 1$ mol, 空气和水蒸气分别表示为 n_{air}^0 、 $n_{H_2O}^0$ 。定义: 空碳比 $\alpha = n_{air}^0 / n_{CH_4}^0$, 水碳比 $\beta = n_{H_2O}^0 / n_{CH_4}^0$ 。

设甲烷部分氧化反应中甲烷转化了 x (mol), 甲烷水蒸气重整反应中甲烷转化了 y (mol), 水气转换反应中 CO 转化了 z (mol)。缺氧条件下氧气完全消耗, 体系平衡时各组分的摩尔含量 n_i 如表 1 所示。

表 1 平衡时各组分的摩尔含量
Tab. 1 Mole content of various constituents when a balance is being maintained

组分	n_i / mol
H ₂	$0.84n_{air}^0 + 3y + z$
CO	$0.42n_{air}^0 + y - z$
CO ₂	z
CH ₄	$n_{CH_4}^0 - 0.42n_{air}^0 - y$
H ₂ O	$n_{H_2O}^0 - y - z$
N ₂	$0.79n_{air}^0$
总量	$1.63n_{air}^0 + n_{CH_4}^0 + n_{H_2O}^0 + 2y$

据平衡常数的定义, 甲烷水蒸气重整反应和水气转换反应的平衡方程为:

加方式, $const$ 表示空碳比与 0.5 倍的水碳比之和, 即 $\alpha + 0.5\beta = const$ 。则对于空气的取代添加方式, 水碳比 β 随空碳比 α 和 $const$ 的变化关系为: $\beta = 2 \times (const - \alpha)$ 。考察 $const = 1, 1.5, 2, 2.5$ 和 3 时空气的两种添加方式对甲烷自热重整制氢反应的影响。当 $(const, \alpha)$ 分别为 $(1, 0.5)$ 、 $(1.5, 0.75)$ 、 $(2, 1)$ 、 $(2.5, 1.25)$ 和 $(3, 1.5)$ 时, 对于空气的两种添加方式 β 值相等, 分别为 1、1.5、2、2.5 和 3, 此时的空碳比记为 α_0 。

2.1 空气的不同添加方式对 y 、 z 值的影响

由于 y 表示甲烷水蒸气重整反应中的甲烷转化量, z 表示水气转换反应中 CO 的转化量, 因此其值反映了这两个反应的进行程度。

甲烷水蒸气重整反应是可逆强吸热反应, 由图 1(a)、图 1(b) 可以看出, 随着空碳比的增加, 空气

的稀释添加和取代添加都会导致其反应程度下降, 以至于逆向进行(定义由 CH_4 、 H_2O 生成 CO 、 H_2 为正向反应)。这是因为对于稀释添加方式, 空碳比的增加, 甲烷迅速与氧气反应而被快速消耗掉, 从而导致参与水蒸气重整反应的甲烷量减少, 抑制了该反应的进行。对于取代添加方式而言, 空碳比的增加意味着水碳比的减小, 且由甲烷部分氧化反应生成的 CO 和 H_2 增多, 从而导致甲烷水蒸气重整反应程度降低。增大 $const$, 会使反应体系中的空气和水含量增加, 从而有效促进甲烷水蒸气重整反应的发生。当 $const$ 不变 $\alpha < \alpha_0$ 时, 取代添加方式水含量较大, 甲烷水蒸气重整反应更容易发生; $\alpha > \alpha_0$ 时, 取代添加方式下水含量已经很小, 不利于该反应进行, 因此此时反应程度低于稀释添加方式。

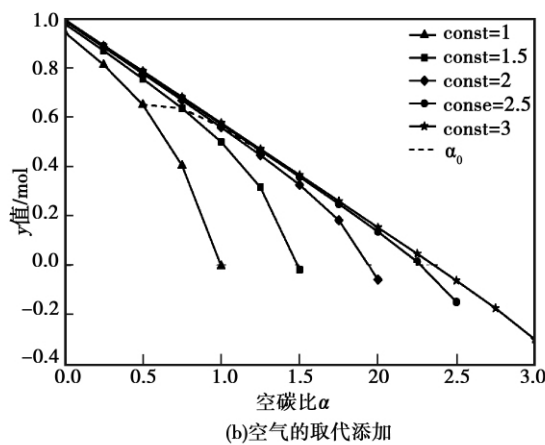
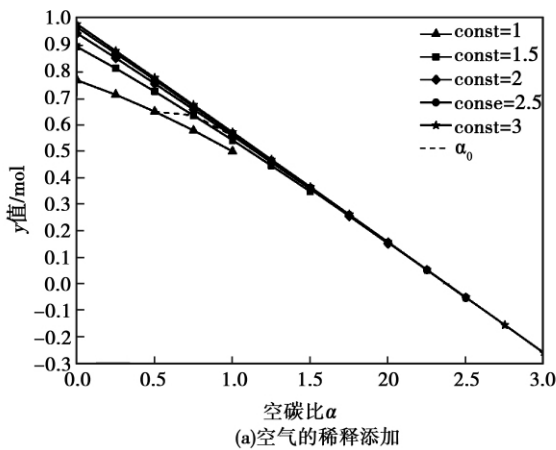


图 1 空气的不同添加方式下 y 值随空碳比 (α) 的变化

Fig. 1 Change of the y value with the air/carbon ratio (α) under various air addition modes

由图 2 可知, 随着空碳比的增加, 水气转换反应进行程度在稀释添加时逐渐升高, 取代时逐渐降低,

增加 $const$ 会导致水气转换反应进行程度增大。这是因为, 对于稀释添加, 空碳比的增加会导致甲烷水蒸气重整反应耗水量降低, 体系中水含量增大, 有利于水气转换反应的进行。对于取代添加, 空碳比的增加导致水碳比减少, 促使水气转换反应进行程度减小, 从而导致水气转换反应进行程度下降。

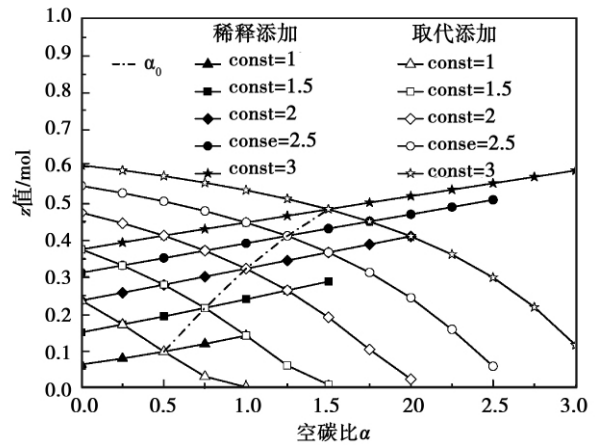


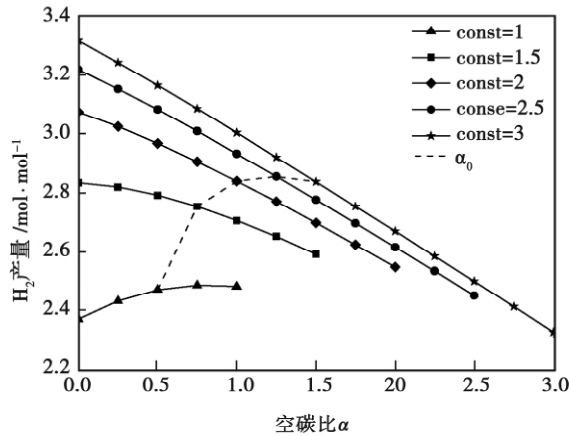
图 2 空气的不同添加方式下 z 值随空碳比 (α) 的变化

Fig. 2 Change of the z value with the air/carbon ratio (α) under various air addition modes

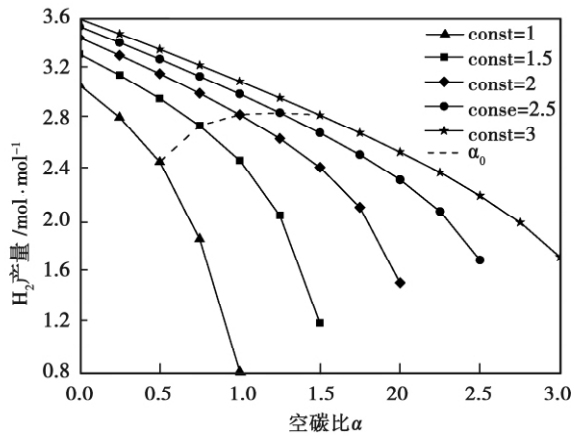
2.2 空气的不同添加方式对 H_2 产量的影响

由图 3(a) 可知, 对于空气的稀释添加方式, 在 $const > 1$ 时, 随着空碳比的增加, H_2 产量逐渐降低; $const = 1$ 时, 随着空碳比的增加, H_2 产量先升高而后略有降低。 $const$ 的增加有利于氢气的生成。对于 $const > 1$, 当 $\alpha = 0$ 时, 甲烷迅速与水反应, 生成 CO 和 H_2 , 从而导致反应体系中的 CH_4 浓度急剧降低, 同时由于甲烷水蒸气重整反应每消耗一个单位的 CH_4 可以生成 3 个单位的 H_2 , 故此时 H_2 产量最大。随着 α 的增加, 甲烷部分氧化反应消耗的 CH_4 量迅速增加, 反应体系中的 CH_4 浓度降低, 抑制了甲烷水蒸气重整反应的进行, 使其反应程度逐渐降低, 同时 H_2O 的消耗量逐渐降低, 当 α 增大到一定程度以后, 甲烷水蒸气重整反应逆向进行, 如 $const = 3$, $\alpha = 2.5$ 时, $y = -0.05 \text{ mol}$ 。反应中水浓度的升高有助于水气转换反应的进行, 从而使其反应程度逐渐升高, 但是甲烷水蒸气重整反应程度 (y) 减小的幅度大于水气转换反应程度 (z) 增大的幅度, 且甲烷部分氧化反应每消耗一个单位的 CH_4 仅生成两个单位的 H_2 , 从而导致 H_2 产量降低。对于 $const = 1$, 此时 α 和 β 都很小, CH_4 剩余量还很大, 增加 α 有利于 H_2

的产生,当 $\alpha \geq 0.75$ 时,继续增加空碳比,甲烷部分氧化反应和水气转换反应生成的 H_2 增加量小于甲烷水蒸气重整反应生成的 H_2 减小量,从而最终使 H_2 产量在达到最大值后略有下降。



(a) 空气的稀释添加



(b) 空气的取代添加

图3 空气的不同添加方式下 H_2 产量随空碳比(α)的变化

Fig. 3 Change of the H_2 production capacity with the air/carbon ratio (α) under various air addition modes

由图3(b)可知,取代添加时,随着空碳比的增加, H_2 产量逐渐降低且幅度逐渐增大。这是因为空气的增加迅速消耗掉 CH_4 ,使体系中 CH_4 浓度下降,而对于取代添加,增加空碳比会导致水碳比减小,抑制甲烷水蒸气重整反应和水气转换反应,甲烷水蒸气重整反应在空碳比增大到某一值后逆向,如 $const = 3, \alpha = 2.5$ 时 $y = -0.06$ mol。而甲烷部分氧化反应生成的 H_2 增加量小于甲烷水蒸气重整反应和水气转换反应生成的 H_2 减小量,最终使 H_2 产量降低。

由图3(a)、图3(b)可知,固定 $const, \alpha < \alpha_0$ 时,

取代添加 H_2 产量比稀释添加大; $\alpha > \alpha_0$ 时,取代添加 H_2 产量急剧降低,使其值小于对应稀释添加的值。

2.3 空气的不同添加方式对甲烷转化率的影响

由图4(a)、图4(b)可知,随空碳比的增加,稀释添加时甲烷转化率逐渐增大,取代添加时甲烷转化率逐渐减小。这是因为对于稀释添加方式,空碳比的增加会促进甲烷部分氧化反应,却抑制甲烷水蒸气重整反应,且因此而引起的参与反应的 CH_4 减小量小于甲烷部分氧化反应中参与反应的 CH_4 增加量,从而最终使甲烷转化率升高,如 $const = 2, \alpha$ 为 0 和 1 时,甲烷部分氧化反应消耗的 CH_4 增加了 0.42 mol,而甲烷水蒸气重整反应消耗的 CH_4 减少了 0.39 mol,最终甲烷转化率由 94.54% 上升到 97.89%。对于取代添加方式,空碳比的增加会使甲烷水蒸气重整反应的下降幅度越来越大,且消耗的 CH_4 减小量大于参与甲烷部分氧化反应的甲烷增加量,最终导致甲烷转化率下降,如 $const = 2, \alpha$ 为 0、1 和 2 时,甲烷水蒸气重整反应消耗甲烷量(y 值)分别为 0.99、0.56 和 -0.6 mol,而参与甲烷部分氧化反应的 CH_4 量分别为 0、0.42 和 0.84 mol,最终甲烷转化率分别为 99.11%、97.89% 和 78.02%。 $const$ 的增加有利于更多的 CH_4 参与反应,从而导致 CH_4 转化率升高,如取代添加, $\alpha = 1, const$ 为 1、2、3 时, CH_4 转化率分别为 41.51%、97.89% 和 99.59%。当 $\alpha < \alpha_0$ 时,取代添加能得到更高的甲烷转化率;当 $\alpha > \alpha_0$ 时,稀释添加方式甲烷转化率较高。

2.4 空气的不同添加方式对 H_2/CO 摩尔比的影响

由图5可知,随着空碳比的增加,稀释添加时 H_2/CO 摩尔比几乎保持不变,取代添加时 H_2/CO 摩尔比急剧下降。稀释添加 $const > 1$ 时,空碳比的增加会导致 H_2 、 CO 产量均呈下降趋势, $const = 1$ 时, H_2 、 CO 产量均呈上升趋势,且它们下降和上升幅度几乎一致,故 H_2/CO 摩尔比保持稳定,如 $const = 2, \alpha$ 分别为 0、1 和 2 时, H_2/CO 摩尔比分别为 4.32、4.30、4.4。取代添加 $const > 2$ 时,空碳比的增加会导致 H_2 产量下降、 CO 产量增加,从而促使 H_2/CO 摩尔比急剧下降; $const \leq 2$ 时,虽然在空碳比增加到一定程度以后 CO 产量会降低,但此时 H_2 降低更多, H_2/CO 摩尔比仍然呈下降趋势,如 $const = 2, \alpha$ 为 0、1、2 时, H_2/CO 摩尔比分别为 6.63、4.30、2。空碳比不变, $const$ 越大, H_2 产量越大,而 CO 产量越小,导致 H_2/CO 摩尔比随 $const$ 的增加而增加。 $\alpha < \alpha_0$ 时,取代添加能得到更高的 H_2/CO 摩尔比; $\alpha > \alpha_0$ 时,稀释添加 H_2/CO 摩尔比更大。

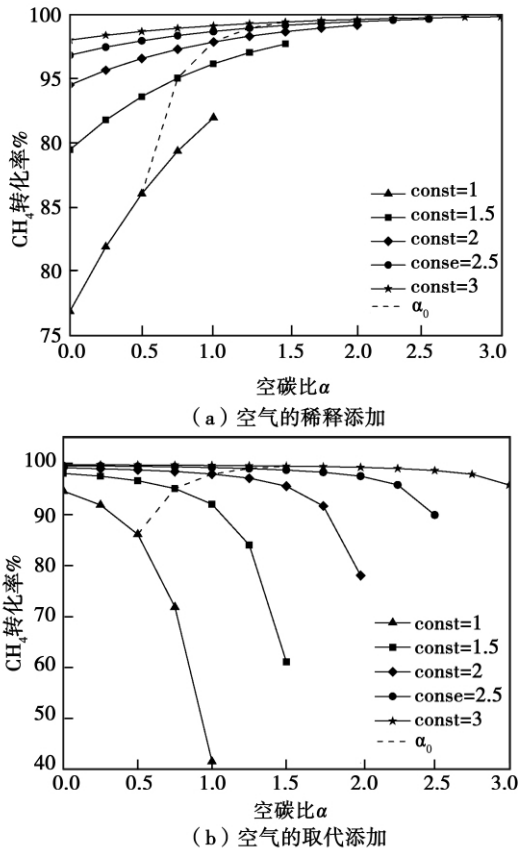


图4 空气不同添加方式下甲烷转化率随空碳比(α)的变化

Fig. 4 Change of the CH₄ conversion rate with the air/carbon ratio (α) under various air addition modes

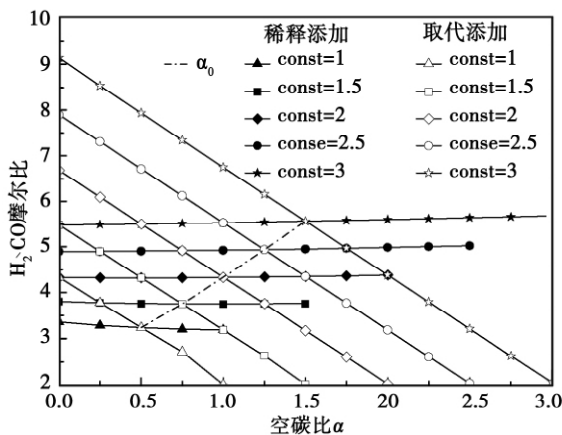


图5 空气不同添加方式下 H₂、CO 摩尔比随空碳比(α)变化

Fig. 5 Change of the H₂、CO mole ratio with the air/carbon ratio (α) under various air addition modes

3 结论

(1) 增加空碳比,两种添加方式都使甲烷水蒸气重整反应程度降低,以至于逆向进行;水气转换反应程度在稀释添加时逐渐升高,在取代添加时逐渐降低。*const* 的增大会同时促进甲烷水蒸气重整反应和水气转换反应。

(2) 稀释添加,随空碳比的增加,*const* > 1 时, H₂ 产量逐渐降低, *const* = 1 时, H₂ 产量先升高而后略有降低;但取代添加,对于确定的 *const* 随空碳比的增加, H₂ 产量逐渐降低,且下降幅度逐渐增大。

(3) 增加空碳比,甲烷转化率在稀释添加时逐渐增大,在取代添加时逐渐减小;如 *const* = 2, α 从 0 增大到 1, 稀释添加时 CH₄ 转化率由 94.54% 上升到 97.89%, 取代添加时由 99.11% 下降到 78.02%。H₂、CO 摩尔比在稀释添加时几乎保持不变,取代添加时急剧下降。

(4) 对于确定的空碳比, *const* 的增大可增大 H₂、甲烷转化率和 H₂、CO 摩尔比。当 $\alpha < \alpha_0$, 取代添加比稀释添加得到更高的 H₂ 产量、甲烷转化率和 H₂、CO 摩尔比;当 $\alpha > \alpha_0$ 时, 组分变化趋势相反。

参考文献:

- [1] Rani M, Alizadehdakhl A, Pour A N, et al. CFD modeling of hydrogen production using steam reforming of methane in monolith reactors: Surface or volume-base reaction model [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2011, 36: 15602 - 15610.
- [2] Fan M S, Abdullah A Z, Bhatia S. Hydrogen production from carbon dioxide reforming of methane over Ni-Co/MgO-ZrO₂ catalyst: Process optimization [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2011, 36: 4875 - 4886.
- [3] Saraswat S K, Pant K K. Ni-Cu-Zn/MCM-22 catalysts for simultaneous production of hydrogen and multiwall carbon nanotubes via thermo-catalytic decomposition of methane [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2011, 36: 13352 - 13360.
- [4] 冉景煜, 赵柳洁. 微细腔内甲烷湿空气低温重整特性热力学分析 [J]. 物理化学学报 2010, 26: 2899 - 2906.
RAN Jing-yu, ZHAO Liu-jie. Thermodynamic analysis of the low temperature reforming characteristics of methane and wet air in a micro-chamber [J]. Acta Physico-Chimica Sinica 2010, 26: 2899 - 2906.
- [5] Jeong H H, Kwak J H, Han G Y, et al. Stepwise production of syngas and hydrogen through methane reforming and water splitting by using a cerium oxide redox system [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2011, 36: 15221 - 15230.
- [6] Chen L, Zhu Q, Hao Z, et al. Development of a Co-Ni bimetallic aerogel catalyst for hydrogen production via methane oxidative CO₂

reforming in a magnetic assisted fluidized bed [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2010 ,35: 8494 – 8502.

[7] Wang W ,Wang H ,Yang Y ,et al. Ni-SiO₂ and Ni-Fe-SiO₂ catalysts for methane decomposition to prepare hydrogen and carbon filaments [J]. International Journal of Hydrogen Energy ,2012 ,37: 9058 – 9066.

[8] 张 力 ,张 苗 ,闫云飞. 定壁温下甲烷自热重整产氢暂态特性数值模拟 [J]. 热能动力工程 2012 27(1) : 112 – 116 ,141. ZHANG Li ,ZHANG Miao ,YAN Yun-fei. Numerical simulation of the transient characteristics of the methane self-heat reforming-based hydrogen production at a given wall temperature [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2012 27(1) : 112 – 116 ,141.

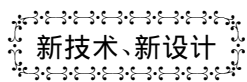
[9] 于建国 ,王玉璋 ,翁史烈. 进气管通道直径对直接内部甲烷蒸汽重整性能的影响 [J]. 热能动力工程 ,2011 ,26(6) : 760 – 763 ,780.

YU Jian-guo ,WANG Yu-zhang ,WENG Shi-lie. Influence of the passage diameter of an inlet pipe on the direct steam reforming performance of inner methane [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2011 26(6) : 760 – 763 ,780.

[10] Pinilla J L ,Torres D ,Lázaro M J ,et al. Metallic and carbonaceous-based catalysts performance in the solar catalytic decomposition of methane for hydrogen and carbon production [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2012 37: 9645 – 9655.

[11] 叶大伦 ,胡建华. 实用无机物热力学数据手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社 ,2002. YE Da-lun ,HU Jian-hua. Practical Handbook of Thermodynamic Data of Inorganic Substances [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2002.

[12] Korup O ,Schlögl R ,Horn R. Carbon formation in catalytic partial oxidation of methane on platinum: Model studies on a polycrystalline Pt foil [J]. Catalysis Today 2012 ,181: 177 – 183.



Siemens 的 600 MW 级 IGCC 发电装置

据《Gas Turbine World》2012 年年度手册报道 ,Siemens Power Generation 已经推出了 600 MW 级 IGCC(整体煤气化联合循环) 动力装置。

列出了该公司商用 600 MW 级 IGCC 标准装置 ,该装置由 2 台燃气轮机和 1 台汽轮机组成。

燃气轮机	燃气轮机输出功率	汽轮机输出功率	装置总输出功率	装置净输出功率	装置净效率
5000F	232 MW	(MW) 可变	(MW) 可变	600 MW	38 – 40% (HHV)

* 装置性能将随煤燃料和现场条件而变化。

额定性能的设计依据

燃料	次烟煤
现场条件	15 °C 海平面 ,60% 相对湿度
燃气轮机型号	SGT6 – 5000F
汽轮机型号	SST – 5000
供货方式	商业供货
动力部分特性	
启动和备用燃料	天然气
燃料灵活性	合成气 ,高氢合成天然气
排放	5 mg/kg NO _x ,为达到更低的 NO _x 排放 ,可采用 SCR(选择催化还原) 后处理
气化部分特性	
气化器类型	携带流 ,干式给料 4 × SFG – 500 系列
氧化剂	氧
合成气高温冷却器	全水急冷
酸性气体清除	Selexol 或 Rectisol
灰渣处理方式	排渣
一体化处理	蒸汽 ,空气

(吉桂明 摘译)

main factor in improving the performance of the AP1000 booster pumps. Under the design condition the “positively bent blade” has a head of 12 meters higher than that of the traditional straight blade and an efficiency of 0.6% higher than that of the traditional one while 17 meters higher than that of the “negatively bent blade” and 0.7% higher than that of the “negatively bent one” thus meeting the requirements set for improvement in the performance of the booster pumps installed in the conventional island of the AP1000 nuclear power station. **Key words:** nuclear power booster pump ,radially-bent blade ,Bezier function ,hydraulic performance

空气添加方式对甲烷自热重整、制氢特性影响的热力学分析 = **Thermodynamic Analysis of the Influence of the Air Addition Modes on the Characteristics of Hydrogen Preparation Through a Self-heat-reforming of Methane** [刊 汉] YAN Yun-fei ZHANG Jie ZHANG Li (Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems ,College of Power Engineering ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(4) . - 425 ~ 430

By using the thermodynamic equilibrium constant method ,analyzed was the influence of the dilution and replacement addition of air on the characteristics of hydrogen preparation through a self-heat reforming of methane. It has been found that with an increase of the air/carbon ratio ,both addition modes will lower the extent of the methane and steam reforming reaction and even turn to the reverse direction. The extent of the water-gas conversion reaction will gradually increase when the dilution addition is adopted and will decrease when the replacement addition is adopted. To increase the air/carbon ratio α can promote the hydrogen production and CH_4 conversion in the dilution addition mode but play a prohibition role in the replacement addition mode. When $\alpha + 0.5\beta = \text{const} = 2$ and α increases from 0 to 1 ,the CH_4 conversion rate will increase from 94.54% to 97.89% in the dilution addition mode and that will decrease from 99.11% to 78.02% in the replacement addition mode. The air/carbon ratio will have almost no influence on the H_2/CO mole ratio in the dilution addition mode. When $\alpha + 0.5\beta = \text{const} = 2$ and α falls in a range from 0 to 2 ,the H_2/CO mole ratio will be kept in a range from 4.3 to 4.4. The H_2/CO mole ratio will decrease sharply in the replacement addition mode ,being 6.63 ,4.30 and 2 respectively when α equals to 0 ,1 and 2. **Key words:** dilution addition ,replacement addition ,thermodynamics ,equilibrium constant method ,self-heat reforming ,hydrogen preparation ,air/carbon ratio