

多端口进料微型管式重整制氢反应器性能研究

田丽萍, 徐晗, 龚小炜, 党政

(西安交通大学建筑环境与能源应用工程系, 710049, 西安)

摘要: 针对传统管式重整反应器甲烷转化率较低的问题,设计了一种具有多端口进料结构的微型管式重整制氢反应器,并采用 COMSOL 多物理场模拟软件对该反应器的重整性能进行了计算研究,分析了反应温度、汽碳比等工作参数对其性能的影响规律。计算结果表明:当反应温度在 773~973 K 范围内变化时,甲烷转化率以及产物中 H_2 、CO 的摩尔分数会随反应温度升高而增大;当汽碳比在 2~4 范围内变化时,甲烷转化率随汽碳比增大而增大,而产物中 H_2 、CO 的摩尔分数则随着汽碳比的增大而减小;沿气体流动方向,甲烷转化率和产物中 H_2 、CO 的摩尔分数受进料多端口特征的影响呈锯齿状波动变化,并呈总体上升趋势,在反应器出口处达到最大值。将多端口进料结构反应器与传统管式反应器进行比较研究,发现所提出的新结构反应器分别在 600~1 100 K 的反应温度区间以及 2~5 汽碳比区间内其甲烷转化率都高于传统管式反应器;在 873~973 K 区间内甲烷转化率可达 93% 左右;当汽碳比增大到 4 后,继续增大汽碳比对甲烷转化率的提高已无明显作用,建议合理的汽碳比区间为 3~4。

关键词: 多端口进料;制氢;重整反应;反应器

中图分类号: TK91 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0029-07

Research on the Performance of Multi-Inlet Micro-Tubular Reforming Reactor for Hydrogen Production

TIAN Liping, XU Han, GONG Xiaowei, DANG Zheng

(Department of Building Environment and Energy Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Considering the low methane conversion rate of traditional tubular reforming reactor, a multi-inlet micro-tubular reforming reactor for hydrogen production was designed in this paper, and the influences of operation parameters on the reforming performance were studied by COMSOL multiphysics software. The results indicated that the raise of reaction temperature from 773 K to 973 K would improve the methane conversion rate as well as H_2 and CO mole fractions. With the increase of steam/carbon ratio from 2 to 4, the methane conversion rate is improved, while H_2 and CO mole fractions are decreased. And also, the methane conversion rate and H_2 and CO mole fractions present a sawtooth shape fluctuation, however showing an overall rising trend along the axis of the reactor and reach their maximum values at the outlet. In addition, compared the multi-inlet tubular reforming reactor with the traditional tubular reactor, a conclusion can be drawn that the methane conversion rate of present reactor is higher than the traditional tubular reactor when the reaction temperature varies from 600 K to 1 100 K, and the

methane conversion rate reaches 93% in the range of 873-973 K. When the steam/carbon ratio changes from 2 to 5, the methane conversion rate of this reactor is higher than that of traditional tubular reactor. However the increase of steam/carbon ratio exhibits no significant effect on the improvement of methane conversion when the steam/carbon ratio is higher than 4. Thus, the optimal steam/carbon ratio is from 3 to 4.

Keywords: multi-inlet feeding; hydrogen production; reforming reaction; reactor

催化重整是一种被广泛应用、节能高效的制氢方法^[1],其中甲烷水蒸气重整制氢技术因原料易获得而在催化重整制氢领域占据主导地位。工业上甲烷蒸汽重整制氢技术已经较为成熟,但这种大规模的制氢技术不能满足燃料电池等新型分布式能源系统紧凑、小型化的要求^[2-3],因此催化重整制氢装置的小型化是本领域迫切需要研究解决的问题。

近年来,国内外学者对微型重整制氢反应器的结构与性能优化进行了一系列实验及模拟研究。Xu 等人建立的甲烷重整反应及水汽转换反应的速率方程得到了业界的广泛认可,后来的大量研究工作都引用这一成果,为催化重整反应装置的发展奠定了理论基础^[4]。Ghouse 等人利用模拟软件构建了一个二维、多相的活塞流管式反应器模型,并得到影响反应器性能的重要参数以及在动态条件下,各反应组分浓度及转化率沿反应器长度的变化,模拟结果经过了可靠的实验验证^[5-7]。Chang 等人研发了一种 kW 级自热重整反应器,与传统重整反应器相比,该装置大大增加了重整腔的受热面积,使其受热更加均匀,极大地提高了燃料转化率^[8-9]。茹浩磊等人设计了一种多重列管重整器,采用工业燃烧器给其供热,内置天然气重整催化剂,重整反应管的数量由反应气体的处理量来决定^[10]。经过实验验证,将重整温度维持在 973~1 073 K,重整性能得到了很好的发挥,制氢量达到 108 L/min。以上研究仅关注了重整制氢装置的传热特性,但对传热与重整反应之间的耦合机理缺乏深入研究;另外,现有的催化重整制氢装置多采用单端口集中进料的方式,因甲烷蒸汽重整制氢具有强吸热且反应剧烈的特点,导致在集中进料方式下化学反应集中在反应器进口处发生,而反应器的大部分反应面积未被充分利用,使甲烷转化率大大降低,同时还造成了较大的温度梯度,会缩短催化剂的使用寿命,严重时将导致催化剂失效。

针对现有技术的不足和缺陷,本文提出一种具有多端口进料新结构的微型管式催化重整制氢反应器,并采用 COMSOL 多物理场模拟软件建立物理

模型,分析求解了反应器内部的热流场及甲烷重整耦合反应过程,并与传统管式反应器作对比,着重分析了汽碳比、反应温度等参数对反应器性能的影响,为重整反应器结构的优化设计和运行操作提供了理论支持。

1 反应器结构及模拟计算

1.1 多端口进料催化重整反应器结构

本文提出的多端口进料重整制氢反应器的结构如图 1 所示,它由依次布置的预混器、多端口进料管和重整器组成。多端口进料管沿重整器中心线布置,包含于重整器内部,多端口进料管沿轴线方向有 6 排进料端口,每排端口处有 3 个沿进料管圆周方向均匀分布的通孔,通孔沿径向开设。重整器本体与预混器之间形成一个法兰密封端面,该密封端面间安装有耐高温耐腐蚀的密封垫圈并由螺栓紧固,以避免气体泄漏。在反应器内设置两个测温点,用于实验时测量反应器内沿轴向的温度变化。

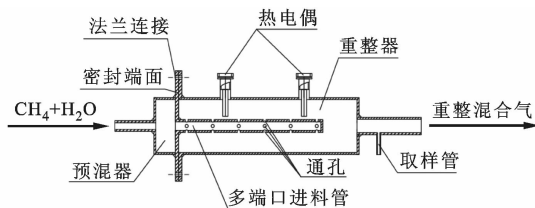


图1 多端口进料重整制氢反应器结构

甲烷和水蒸气注入预混器混合,然后流经多端口进料管的各个通孔,均匀地引入重整器反应腔,从而保障重整器不同区域内重整反应及水汽反应能够全面充分地发生,以期提高甲烷转化率,催化重整后的富氢气体(H_2 、 CO 、 CO_2 等)将被作为燃料引入后续 SOFC 电堆发电,同时通过气体取样口,可以在装置运行时采样分析重整反应产物的组分。

1.2 反应器模拟计算

采用 COMSOL multiphysics 多物理场化工模拟软件对上述多端口进料催化重整反应器内部发生的甲烷重整过程进行数值模拟,考察反应条件对催化重整制氢反应器性能的影响,确定反应器在特定

反应条件下的甲烷转化率,获得反应器性能数据。

1.2.1 反应器物理模型 本文多端口进料催化重整反应器的几何结构总体具有轴对称特点,因此其内部的流动、传热以及重整化学反应具有轴对称性,可以将计算区域简化处理为如图 2 所示的二维轴对称结构,在此基础上进行数值计算建模。

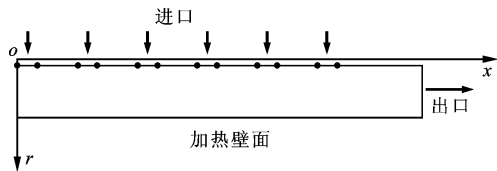


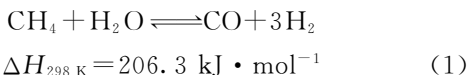
图 2 反应器模型计算区域示意图

本文采用的镍基甲烷重整催化剂是以镍为活性组分、氧化铝为载体、添加专用抗炭助剂的烧结型转化催化剂,呈灰黑色柱状,布置方式为均匀布置。原料气为甲烷和水蒸气。多端口进料管的长度为 210 mm、半径为 6.5 mm,进料孔的半径为 3.25 mm,进料孔处的气体流速按照保证与三维重整反应器具有相同进气流量的原则确定。重整反应器长度为 270 mm、半径为 40 mm,加热壁面长度为 270 mm。同时,由于化学反应速率是温度的非线性函数,而气体、固体温度场的变化又受到重整反应强吸热以及水汽反应放热的作用,因此传热过程与化学反应过程是相互耦合的,且模拟时设定催化剂均匀填充在重整器反应腔内,故气体的流动及扩散过程与化学反应过程也是相互耦合的。为了便于计算,需要对模型进行如下简化:

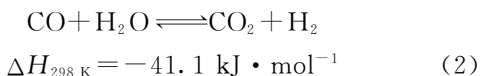
- (1) 反应气体为理想不可压缩流体;
- (2) 忽略催化剂内扩散,只发生表面反应;
- (3) 忽略重力对流动的影响;
- (4) 忽略多端口进料管内的流动与传热计算,在孔口位置设置入口边界条件。

1.2.2 化学反应与动力学模型 本文的化学反应与动力学模型如下。

重整反应



水汽反应



重整反应、水汽反应的反应速率 r_1 、 r_2 的表达式^[11]如下

$$r_1 = 1.75 \left(\frac{p_{\text{CH}_4}}{101\,325} \right)^{1.2} W_{\text{cat}} \exp \left(-\frac{57\,840}{RT} \right) \quad (3)$$

$$r_2 = 1.955 \times 10^6 \exp \left(-\frac{67\,130}{RT} \right) c(\text{CO}) c(\text{H}_2\text{O}) \quad (4)$$

式中: p_{CH_4} 为反应过程中 CH_4 的分压; W_{cat} 为催化剂床层密度; R 为热力学常数; T 为反应温度; $c(\text{CO})$ 为 CO 的浓度; $c(\text{H}_2\text{O})$ 为 H_2O 的浓度。

1.2.3 网格划分 对于本文的二维计算区域,通过网格测试发现当网格间距设置得足够小(最小间距为 0.08 mm)时,三角形网格与四边形网格一样能够获得良好的收敛效果和精度,并且收敛速度还比四边形网格要快。在网格划分时,由于径向尺寸比长度尺寸小得多,因此径向网格比长度方向密一些,因而最终选定细化自由剖分三角形非结构化网格,并采用 Delaunay 算法创建网格。

1.2.4 边界条件 本文针对反应器性能设计了多个工况,根据相应的反应工况设定了相应的边界条件,如进气口给定了温度、速度和反应物摩尔流量等相关参数,反应器加热壁面上给定了热流密度等参数。在整个模拟计算过程中将化学反应热设定为反应器的内热源。

本文各个计算工况下的甲烷总流量均为 $0.139 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,水蒸气的流量根据汽碳比确定,各个进料孔的甲烷流速均设定为相同值。

1.2.5 重整反应器性能表征 反应器的性能以反应后混合气体的含量(主要是 H_2 和 CO 的摩尔分数)和甲烷转化率来表征。甲烷转化率的表达式如下

$$\alpha_{\text{CH}_4} = \frac{c(\text{CO}) + c(\text{CO}_2)}{c(\text{CH}_4) + c(\text{CO}) + c(\text{CO}_2)} \quad (5)$$

式中: α_{CH_4} 为 CH_4 的转化率; $c(\text{CH}_4)$ 、 $c(\text{CO})$ 、 $c(\text{CO}_2)$ 为重整反应器轴向某截面处组分 CH_4 、 CO 、 CO_2 的浓度。

1.2.6 物理场计算方法 本文在 COMSOL 中选择了化学反应、物质传递、层流、流体传热共 4 个物理场,分别采用该模拟软件中的非等温流、温度耦合和流动耦合 3 个物理场耦合模块将各个物理场耦合在一起。然后,采用 PARDISO 求解器进行求解计算,其特点在于利用对称矩阵及多线程嵌套式剖析的预排序算法,可以不需要选主元从而节省内存,实现共享内存式并行处理。最终,通过迭代计算达到收敛之后,对数值分析结果进行总结归纳。

1.2.7 模型验证 为验证本文建立的数值计算模型的正确性,首先采用所建立的计算模型求解了彭昂设计的反应器^[12]的重整性能。在模型验证中,先对彭昂设计的重整反应器的简化模型^[12]进行建模,

其几何尺寸及运行参数见表 1,并将模拟计算结果与彭昂的实验结果^[12]做了对比,如表 2 所示。

表 1 模型验证的几何尺寸及运行参数

参数	文献[12]	本文
直径×长度/mm×mm	80×200	80×200
反应器体积/L	1	1
平均反应温度/K	843.15	845.26
甲烷进料量/L·min ⁻¹	2.3	2.3
汽碳比	2.5	2.5
燃料	CH ₄	CH ₄

表 2 模型验证结果

参数	文献[12]	本文
甲烷转化率/%	65	63.49
CH ₄ 摩尔分数/%	12	12.35
H ₂ 摩尔分数/%	66	66.18
CO 摩尔分数/%	6	6.35
CO ₂ 摩尔分数/%	16	15.12

由表 2 可以看出,在重整器出口截面上甲烷转化率、气体组分的计算值与实验值吻合较好,从而表明本文所建立的重整器计算模型是有效可靠的。

2 模拟结果与讨论

2.1 温度场及组分浓度场

本文选定的重整反应器基准运行条件是:汽碳比为 2.5:1;反应温度为 873 K;压力为 0.1 MPa。在此条件下首先求解分析了反应器内各物理场的变化规律,图 3 所示分别为重整反应器内部的温度场和 CH₄、CO、H₂ 浓度场分布图。

由图 3 可以看出:采用本文提出的多端口进料方式,可使反应气体沿反应器轴向呈较均匀分布,从而充分利用反应器的反应面积,使得重整反应及水汽反应进行的更全面;另一方面,化学反应在整个重整反应器内较均匀地发生,充分利用了重整反应器中的热量,使得重整反应器沿轴向的温度梯度较小,不易产生局部低温区。

2.2 反应温度的影响

反应温度是一个影响反应器性能的重要因素,这里以反应器重整反应腔内平均温度为考察对象。当汽碳比为 2.5:1、压力为 0.1 MPa 时,不同反应温度(773~973 K)下甲烷转化率、CO 和 H₂ 的摩尔分数沿反应器轴向的变化如图 4~图 6 所示。

当反应温度一定时,甲烷转化率和产物中 H₂、

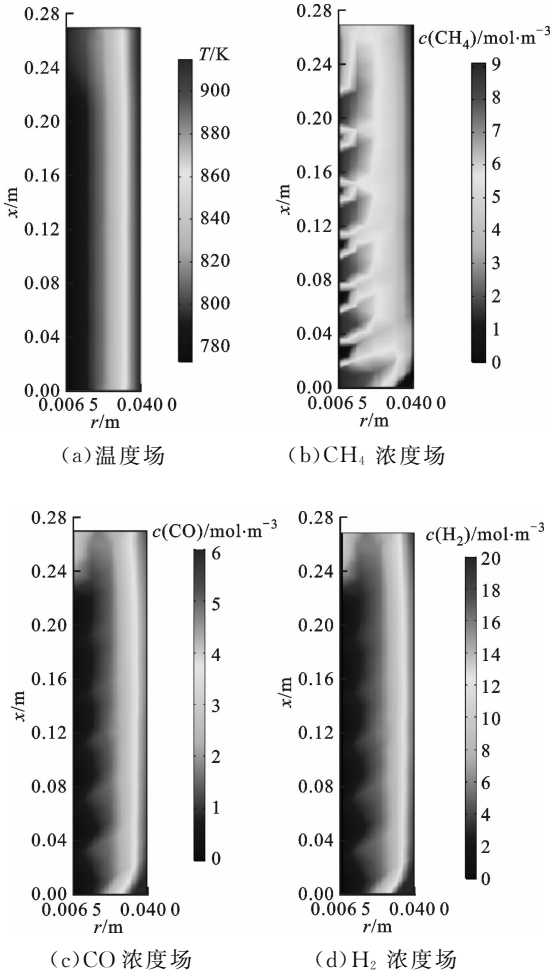


图 3 反应器内各物理场云图

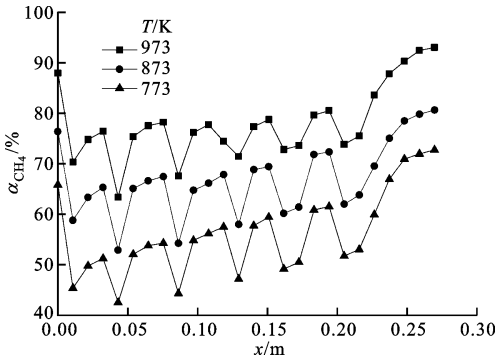


图 4 不同反应温度下甲烷转化率沿反应器轴向的变化

CO 的摩尔分数沿反应器轴向呈锯齿状变化,在各个进气端口处有明显下降,但各曲线总体上呈上升趋势,并在反应器出口处达到最大值。在反应器前端($x=0$ 处),由于存在流动涡旋,反应物在反应器中的停留时间增加,反应进行得更加充分,从而使甲烷转化率及 CO、H₂ 的摩尔分数较大;之后,在反应器进料管沿轴向的 6 个不同端口位置处,依次有新鲜的甲烷及水蒸气原料气补充输入,从而导致相应位置处甲烷转化率和产物中 H₂、CO 的摩尔分数局

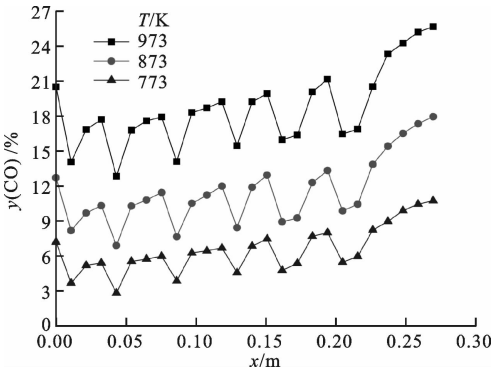


图 5 不同反应温度下 CO 的摩尔分数沿反应器轴向的变化

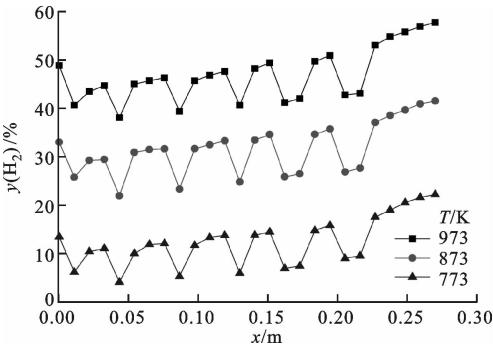


图 6 不同反应温度下 H₂ 的摩尔分数沿反应器轴向的变化

部下降,各物理量沿着反应器轴向呈锯齿状变化;在右端最后一个进料端口处,反应气体全部输入完毕,重整腔内下游重整反应充分进行,同时反应生成物随着气体流动方向在末段积累,使得甲烷转化率及 CO、H₂ 的摩尔分数上升,并在出口处达到最大值。

从图 4~图 6 可以看出:在反应器同一位置处,甲烷转化率随反应温度升高而增大;产物中 H₂、CO 的摩尔分数也随着反应温度的上升而增大。这是因为甲烷水蒸气重整反应是吸热反应,反应温度的升高有助于提高甲烷转化率,而水汽反应是放热反应,因此反应温度的升高促使其朝反向进行,导致产物中 CO 的摩尔分数增大,但由于重整反应占主要地位,故产物中 H₂ 的摩尔分数也随着反应温度的升高而增大。

2.3 汽碳比的影响

当反应温度为 873 K、加热壁面热流密度为 500 W·m⁻²、压力为 0.1 MPa 时,不同汽碳比(2~4)下甲烷转化率、CO 和 H₂ 的摩尔分数沿反应器轴向的变化如图 7~图 9 所示。

由图 7~图 9 可知:当汽碳比一定时,甲烷转化率及 CO、H₂ 的摩尔分数沿反应器轴向的变化规律

与温度一定时的情况一致,即甲烷转化率和产物中 H₂、CO 的摩尔分数沿着反应器轴向呈锯齿状变化,在各个进口处有明显下降,齿峰齿谷交替出现,但各曲线总体上呈上升趋势,并在反应器出口处达到最大值。

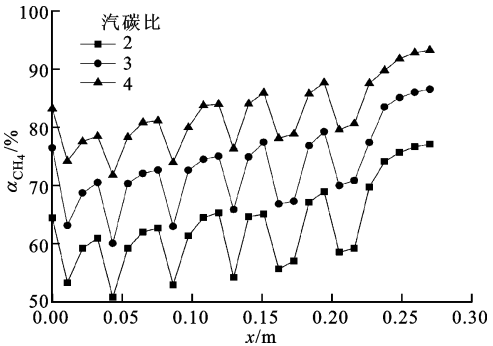


图 7 不同汽碳比下甲烷转化率沿反应器轴向的变化

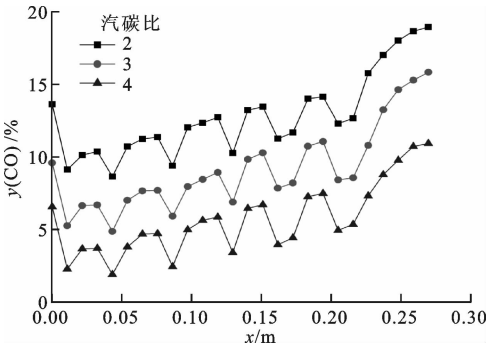


图 8 不同汽碳比下 CO 的摩尔分数沿反应器轴向的变化

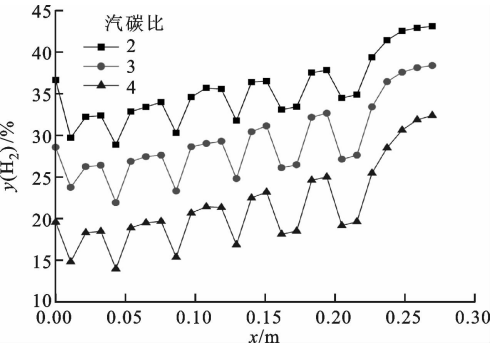


图 9 不同汽碳比下 H₂ 的摩尔分数沿反应器轴向的变化

在反应器同一位置处,甲烷转化率随汽碳比增大而增大,而产物中 H₂、CO 的摩尔分数则随着汽碳比的增大而减小。其主要原因在于:在反应器同一位置处,汽碳比的增大促使重整反应向生成氢气的方向进行,提高了甲烷的转化率,但由于大量的水蒸气未参加反应,导致水蒸气的摩尔分数增大,因此 H₂ 的摩尔分数相应降低。同理,CO 的摩尔分数呈现了与 H₂ 的摩尔分数类似的变化趋势。

图 10 为不同汽碳比下反应器出口处 H₂ 的摩

尔流量变化,由图可知, H_2 的摩尔流量随着汽碳比的增大而升高,当汽碳比增大到 4 以后, H_2 的摩尔流量接近最大值并趋于稳定。因此,汽碳比的最佳区间为 3~4。

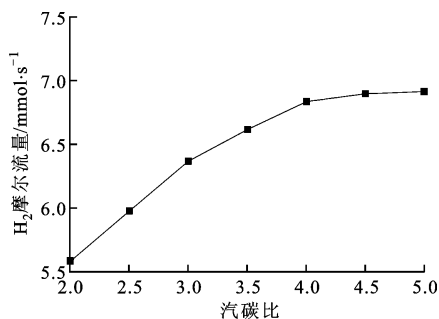


图 10 不同汽碳比下反应器出口处 H_2 摩尔流量的变化

2.4 两种结构下反应器性能对比分析

本文进一步研究比较了所设计的新型结构反应器与传统管式反应器的性能差别,图 11 为圆管式反应器的计算区域,本文对其模拟计算做以下规定:

- (1)传统管式反应器的长度、内径与本文设计的多端口进料反应器相同;
- (2)模拟过程中,化学反应与动力学模型、所采用的物理场及计算方法、网格划分方法及边界条件的设置均与上文中的多端口进料反应器相同;
- (3)燃料进料量与多端口进料反应器的总燃料进料量相同,只是改变了进料方式和设置位置。

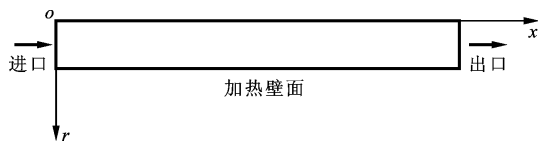


图 11 传统管式反应器模型计算区域示意图

2.4.1 反应温度对甲烷转化率的影响 图 12 给出了当汽碳比为 2.5:1、压力为 0.1 MPa、反应温度在 673~1 173 K 之间时,两种不同结构下反应器出口处甲烷转化率的变化规律。由图可见:两种结构下甲烷转化率都随着反应温度的升高而增大,最后趋于稳定;本文设计的重整反应器甲烷转化率在各个温度区间都高于传统管式反应器,最高可达 93% 左右,且在 873~973 K 内就已经接近最高甲烷转化率,而传统管式在 1 023~1 123 K 内,这就降低了实验设备的高温负荷,从而提高了反应器运行的稳定性。

2.4.2 汽碳比对甲烷转化率的影响 图 13 给出了当反应温度为 873 K、压力为 0.1 MPa、汽碳比在 2

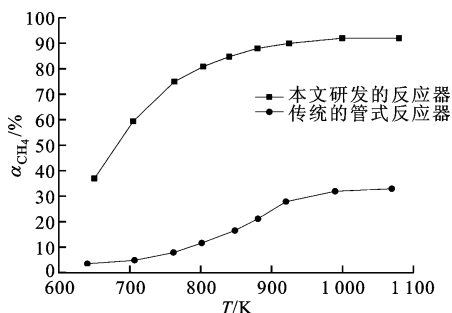


图 12 两种结构下反应温度对甲烷转化率的影响

~5 之间时,两种不同结构下反应器内甲烷转化率的变化规律。从图中可以看出,当反应温度一定时,甲烷转化率随着汽碳比的增大而不断增大,最终趋于稳定,且本文设计的重整反应器甲烷转化率在各个汽碳比区间都高于传统管式反应器,最高可达 93% 左右。但是,汽碳比并非越高越好,由于水蒸气的热容和潜热比较大,水量大会消耗较多的热量,进而影响反应器的性能。从图 13 还可以看出,当汽碳比增大到 4 后,继续增大汽碳比对甲烷转化率的提高已无明显作用,因此建议汽碳比在 3~4 之间。

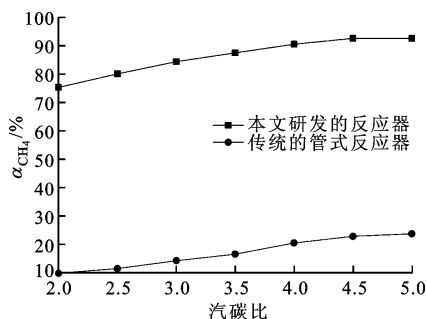


图 13 两种结构下汽碳比对甲烷转化率的影响

3 结论

本文提出了一种具有多端口进料结构的微型管式催化重整制氢反应器,采用 COMSOL 多物理场数值模拟软件对该反应器内的热流动、甲烷重整反应过程进行了数值计算,研究了反应温度、汽碳比对重整性能的影响规律,得到如下结论。

(1)当反应温度、汽碳比一定时,沿反应器轴向,甲烷转化率和产物中 H_2 、CO 的摩尔分数受进料端口结构特征影响呈锯齿状波动变化,但各物理量沿气体流动方向呈总体上升趋势,并在反应器出口处达到最大值。

(2)在汽碳比为 2.5:1、压力为 0.1 MPa 的条件下,当反应温度在 773~973 K 范围内变化时,甲烷转化率、产物中 H_2 、CO 的摩尔分数随反应温度升

高而增大;在反应温度为 873 K、压力为 0.1 MPa 的条件下,汽碳比在 2~4 范围内时,甲烷转化率随汽碳比增大而增大,而产物中 H_2 、CO 的摩尔分数则随着汽碳比的增大而减小。

(3)将本文设计的重整反应器与传统管式反应器对比分析后可得:本文反应器的甲烷转化率在 600~1 100 K 的反应温度区间内都高于传统管式反应器,最高可达 93%左右,且在 873~973 K 区间内就已经接近最高甲烷转化率数值;本文反应器甲烷转化率在汽碳比 2~5 的区间都高于传统管式反应器,当汽碳比增大到 4 后,继续增大汽碳比对甲烷转化率的提高已无作用,因此建议汽碳比在 3~4 之间。

参考文献:

- [1] 李文兵, 齐智平. 甲烷制氢技术研究进展 [J]. 甲烷工业, 2005, 25(2): 165-168.
LI Wenbing, QI Zhiping. Progress on technical study for production of hydrogen from methane [J]. Nature Gas Industry, 2005, 25(2): 165-168.
- [2] U. S. Department of Energy. 2013 Fuel cell technologies market report [R]. Washington, USA: Department of Energy-Fuel Cell Technologies Office, 2014: 1-15.
- [3] 衣宝廉. 燃料电池原理、技术、应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 24-59.
- [4] XU J, FROMENT G F. Methane steam reforming: diffusional limitations and reactor simulation [J]. AIChE, 1989, 35(1): 97-103.
- [5] JAFFER H G. A multi-scale dynamic two-dimensional model for catalytic steam methane reforming reactors [J]. Hydrogen Energy, 2013, 38: 9984-9999.
- [6] 杨国刚, 岳丹婷, 袁金良. 甲烷重整器内部传递过程的数值模拟 [J]. 甲烷工业, 2008, 28(3): 121-123.
YANG Guogang, YUE Danting, YUAN Jinliang. Numerical simulation on inner-transfer process in natural gas reformer [J]. Nature Gas Industry, 2008, 28(3): 121-123.
- [7] 冯靓婧, 曹长青. 甲烷蒸汽催化重整制氢过程的数值模拟 [J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 57-62.
FENG Liangjing, CAO Changqing. Numerical simulation of methane steam reforming for hydrogen Produc-

tion [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2015, 36(1): 57-62.

- [8] GHANG T G, LEE S M. An experimental study on the reaction characteristics of a coupled reactor with a catalytic combustor and a steam reformer for SOFC systems [J]. Hydrogen Energy, 2012 (37): 3234-3241.
- [9] KANG Sanggyu, LEE Kanghun. Development of a coupled reactor with a catalytic combustor and steam reformer for a 5 kW solid oxide fuel cell system [J]. Applied Energy, 2014(114): 114-123.
- [10] 茹浩磊, 王家海. 固体氧化物燃料电池发电系统中重整器的设计与测试 [J]. 化学工程与装备, 2013, 9(9): 25-28.
RU Haolei, WANG Jiahai. The design of reformer in SOFC [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2013, 9(9): 25-28.
- [11] NAGATA S, MOMMA A, KATO T, et al. Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer [J]. Journal of Power Sources, 2001(101): 60-71.
- [12] 彭昂. kW 级燃料电池热电联产系统中天然气重整制氢体系的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 7-46.

[本刊相关文献链接]

- 罗健旭, 彭培培, 徐颖, 等. 污水处理过程的多目标优化. 2017, 51(3): 129-135. [doi:10.7652/xjtuxb201703022]
- 张向宇, 陆续, 高宁, 等. 烟气脱硝用尿素水解制氨工艺试验研究. 2016, 50(7): 39-44. [doi:10.7652/xjtuxb201607007]
- 鲍泽威, 杨福胜, 吴震, 等. 金属氢化物热泵反应器吸氢过程的温度变化特性. 2016, 50(3): 76-80. [doi:10.7652/xjtuxb201603012]
- 胡海军, 李康, 武玮, 等. 电化学充氢下 2.25Cr1Mo0.25V 钢氢脆敏感性研究. 2016, 50(7): 89-95. [doi:10.7652/xjtuxb201607014]
- 潘华, 郭玉慧, 刘颀婷, 等. Ag 改性 Mn/H-beta 催化剂的甲烷低温催化燃烧. 2015, 49(5): 122-127. [doi:10.7652/xjtuxb201505019]
- 杨诏, 李祥晟. 高压环境下高炉煤气化学反应机理敏感性分析及机理简化. 2015, 49(11): 39-43. [doi:10.7652/xjtuxb201511007]

(编辑 荆树蓉)