

工艺与设备

F-T 合成反应器汽包换热系统动态响应研究

樊伟^{1,2}, 郝栩², 相宏伟², 徐元源², 李永旺²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030001)

摘要:建立了1个考虑自蒸发作用的汽包动态模型,引入自蒸发速度计算公式,将该汽包模型作为费托合成反应器的换热系统在 Aspen Dynamics 中进行动态模拟。考察了当存在反应器入口液相温度变化、反应器设定温度变化及新鲜气流量变化等扰动时系统的动态响应。结果表明使用“Flash”汽包模型对反应器温度波动的计算结果要比使用自蒸发汽包模型时偏小;与用固定温度冷却水移热相比,使用汽包换热更加有利于对反应器温度的控制。水蒸发压力差变化的补偿作用使得汽包蒸发面积对汽包自蒸发速率的影响很小。随着汽包-换热管体系中水体积以及水蒸气体积的增加,反应器温度的最大波动值变大;但随着传热温差的减小,水蒸气的体积变化对温度波动的作用减弱。

关键词: F-T 合成; 反应器; 汽包; 数学模型; 动态模拟

中图分类号: TQ052.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)03-0064-05

A study on dynamic behaviors of heat exchange system using steam drum in F-T synthesis reactor

FAN Wei^{1,2}, HAO Xu², XIANG Hong-wei², XU Yuan-yuan², LI Yong-wang²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;

2. Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China)

Abstract: With a steam drum (SD) model that contains the effect of evaporation, the dynamic response of heat exchange system for F-T synthesis reactor has been studied with an Aspen Dynamic software. The main perturbations are the following: some change of slurry temperature at the reactor inlet, the change of set point of the reactor temperature and the change of the flux of fresh gas. As a result, the fluctuation of the reactor temperature is smaller when the steam drum is calculated with the “Flash” module than that the “self-evaporation” steam drum module is used. It is shown that the steam drum gains more advantage in adjusting the reactor temperature compared with the water of constant temperature in removing the reaction heat. Since the compensation of the change of pressure difference for the water evaporation, the effect of the evaporation area on the flux of evaporation in steam drum can be neglected. With the volume of steam or water in the steam drum increasing, the fluctuation of the reactor temperature will increase; nevertheless, the decrease of the temperature difference for heat transfer will weaken the effect of the volume in steam drum.

Key words: F-T synthesis, reactor; steam drum; mathematics model; dynamic simulation

汽包一般应用于锅炉系统,按其循环水流动方式可分为自然循环和强制循环2种。随着对系统自动化要求的提高,对汽包系统的机理研究也进一步的深入。目前,对汽包的研究包括对汽包系统的动态响应、控制策略的研究以及仿真系统的开发,主要研究目的是对汽包的液位进行测量并改进自动控制系统^[1-9],而针对汽包在动态系统中相关作用的研究则较少。

费托合成是强放热反应,使用浆态床反应器有利于反应热的移出从而使反应器基本处于等温状

态^[10];而相对于使用冷却水移热,采用汽包系统换热有利于提高能量利用的品级。当前,节能降耗已经成为人类的共识。如何在保证反应器安全的前提下尽可能提高能量的利用效率,也成为了研究者关注的热点,这也对汽包动态响应预测的准确性提出了更高的要求。

本文中针对费托合成浆态床反应器,在 Aspen Custom Modeler[®] 11.1 中建立了采用汽包分级换热的两级全混浆态床反应器动态模型,并在 Aspen Dynamics[®] 11.1 中对反应系统状态改变时换热系统

收稿日期: 2009-10-14

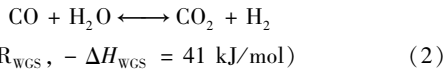
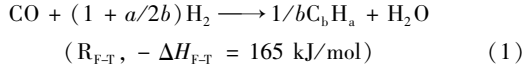
基金项目: 自然科学基金重大项目-0-1(20590361/B01); “863”计划-科技部-0-1(20071FT-1); “973”计划-科技部-0-1

作者简介: 樊伟(1979-),男,博士生, fanwei@126.com; 李永旺(1963-),男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为物理化学,通讯联系人, ywl@sxicc.ac.cn.

的响应进行了模拟研究。

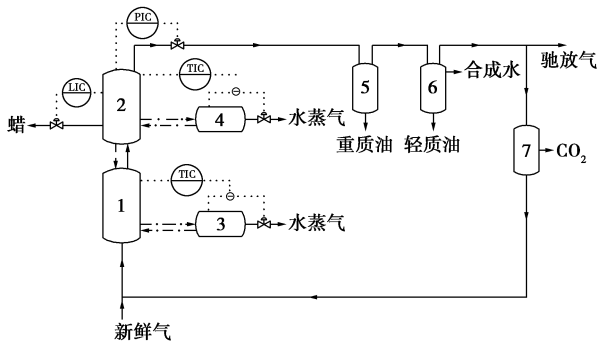
1 模型介绍

F-T合成过程由F-T反应与水煤气变换反应(WGS)组成:



其中 b 表示平均碳数, a 表示烃类中平均氢原子数^[11]。由式(1)可以看出费托反应是一个强放热反应,在生产前对其汽包冷却系统进行模拟研究可有效提高系统运行安全性及能量的利用效率。

在本研究采用的流程中,浆态床反应器采用两级串联全混流反应器模型进行模拟。首先,新鲜合成气与循环气混合后进入反应器,在反应器中发生反应,反应后气相通过压力控制阀流出,而液相则通过液位控制阀流出。随后,气相经热阱及冷阱对产品进行分离,在分离产品后,部分尾气经驰放作燃料气使用,其余尾气脱除CO₂后与新鲜气混合重新进入反应器。反应器温度、压力、流量均采用自动控制。具体流程如图1所示。



1—级反应器;2—二级反应器;3,4—汽包;5—热阱;
6—冷阱;7—脱碳单元

图1 简化模拟流程

在模拟体系中,汽包作为冷却系统对每级反应器进行温度控制,对于每个汽包冷却系统,均由串级PID控制器对其压力进行控制,在串级控制器中,反应器温度作为主控制变量,汽包压力作为参考控制变量,而汽包蒸汽出口阀门的开度则作为操作变量。对于汽包系统内部,饱和水相首先进入下降管中,在与补充的新鲜水混合后进入反应器内部换热管中,吸收部分费托反应热后首先达到该压力下的饱和温度,随后部分水相气化产生蒸汽,蒸汽-水混合相返回汽包内部,水相与蒸汽相进行分离。汽包系统的

循环过程如图2所示。

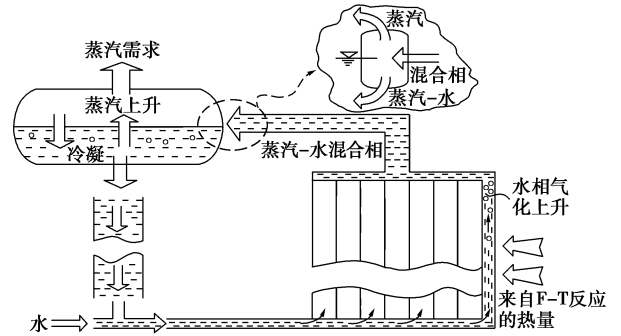


图2 汽包-下降管-上升管循环流程示意图

当系统处于稳态时,假设汽包内水和水蒸气均处于饱和状态,整个循环过程中压力保持一致。汽包的质量、能量衡算方程分列如下:

汽包中总能量衡算方程:

$$n_{SD} c_{p,SD} \frac{dT_{SD}}{dt} = F_V H_V \quad (3)$$

汽包中蒸汽相质量衡算方程:

$$\frac{dn_{SD}^C}{dt} = F_{SD,in}^C - F_{SD,out}^C + F_V \quad (4)$$

汽包中水相质量衡算方程:

$$\frac{dn_{SD}^L}{dt} = F_{SD,in}^L - F_{SD,out}^L - F_{SD,eye}^L - F_V \quad (5)$$

式(3)~(5)中, $F_{SD,eye}^L$ 是汽包循环水流量, F_V 是汽包中水的自蒸发速率。在这里,自蒸发是指随着汽包系统中饱和蒸汽密度的变化、饱和蒸汽、饱和水能量的变化而形成的汽包“动态产汽”^[11]。当系统状态改变时,汽包内的饱和水和水蒸气会发生自蒸发或冷凝,为了准确描述这一现象,本文引入基于统计原理的蒸发量计算公式^[12]:

$$F_V = 140 \times A_{SD} \times \Delta P \times \sqrt{\frac{M_w}{2\pi RT_{SD}}} \quad (6)$$

$$\Delta P = P_{w,s} - P_w \quad (7)$$

其中, F_V 即为汽包中水的自蒸发速率(kmol/h); A_{SD} 为汽包中水蒸发面积(m²); $P_{w,s}$ 为与温度相对应的水饱和蒸汽压, P_w 为水蒸气的实际压力(bar, 1 bar = 10⁵ Pa); M_w 是水的摩尔质量, R 为气体常数。下标SD表示汽包。当 F_V 为正数时表明汽包中水的蒸发量大于冷凝量;而当 F_V 为负数时则表明水的冷凝量大于蒸发量。

2 结果与讨论

本工作是对1个直径0.35 m、高度30 m的鼓泡浆态床反应器及相关体系进行模拟,操作条件如下:表观气速0.2 m/s,反应器温度523.2 K,反应器

压力 3 MPa,新鲜合成气中 H_2/CO 摩尔比 = 1,尾气循环比为 1,汽包蒸发面积为 2 m^2 ,汽包初始温度 499.5 K。

本文中所建立的自蒸发汽包模型,与传统使用的“Falsh”模型区别在于考虑了动态过程中汽包水的蒸发(冷凝)速率。在使用“Flash”模块进行计算时,气、液两相总是处于平衡状态,而使用自蒸发模型进行计算时气液两相的平衡需要 1 个动态过程。笔者首先研究了使用这 2 种模型对动态响应的影响(图 3)。图 3(a)是反应器入口液相温度降低 5°C 、使用不同汽包模型时反应器温度的动态响应,图 3(b)是反应器入口液相温度升高 5°C 、使用不同汽包模型时反应器温度的动态响应。图 3(c)和图 3(d)则分别是 2 种状况下汽包温度的动态响应。从图 3(a)和图 3(b)可以看出,使用“Flash”模块作为汽包模型时,对反应器温度波动的计算值总是偏小,这主要就是由于在“Flash”模块的计算中忽略了气-液两相的相平衡过程,这点也可以在图 3(c)和图 3(d)中观察到。从图 3(c)和图 3(d)中可以看出,使用“Flash”模块作为汽包模型时,汽包更快地达到平衡状态。因此,在动态模拟中使用自蒸发汽包模型可以更准确地描述汽包变化过程。

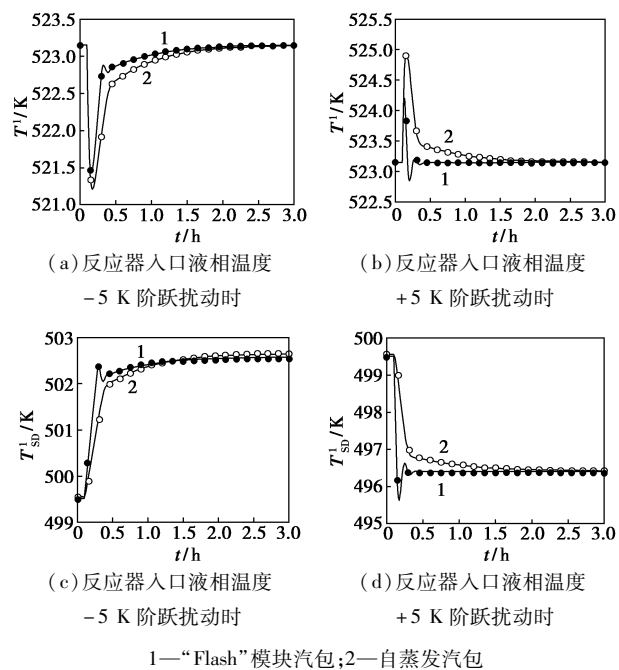


图 3 反应器入口温度扰动时,2 种模型对动态响应的影响

此后,笔者应用自蒸发汽包模型对扰动工况下汽包的调节作用以及部分汽包设计参数的影响进行了研究。首先,对提高反应器设定温度的工况进行

模拟,如图 4 所示。图 4(a)中显示了反应器温度的响应,图 4(b)中显示了汽包温度的响应。由 2 图可以看出,当反应器温度设定值提高 2 K 后,在控制器的作用下,汽包的温度逐步提高,从而使得反应器中冷却水温度提高,最终反应器温度达到设定值。由于随着反应温度的提高,反应速率会增加,从而造成反应放热速率增大,有利于提高反应器温度的提升幅度,所以稳定时汽包温度的提高小于 2 K[如图 4(b)所示]。

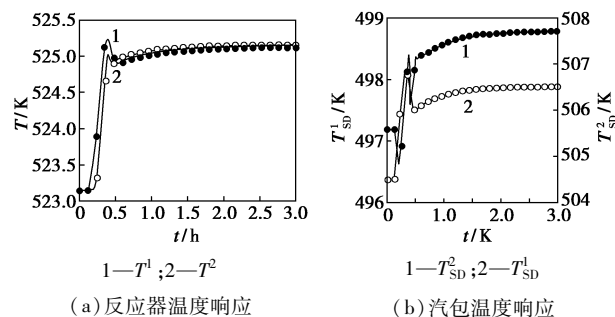


图 4 时间为 0.1 h 时,反应器设定温度由 523.2 K 调整到 525.2 K 时,反应器温度及汽包温度的响应

在工厂操作中,新鲜气流量经常会出现波动,因此笔者使用自蒸发汽包模型对新鲜气流量减少 25% 的扰动工况进行了模拟,如图 5 所示。由图 5 可以看出,当新鲜气流量发生改变时,由于负荷减小,反应器温度首先下降,随即在温度控制器的调节下反应器温度回到设定值。当新鲜气流量发生扰动后,由于随着空速的降低,单级反应器转化率提高,使得二级反应器受新鲜气流量变化的影响更大。

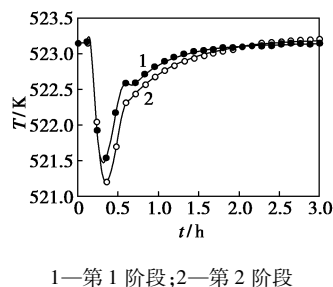


图 5 新鲜气流量减少 25% 扰动时反应器温度曲线

当新鲜气流量扰动发生时,在反应器温度开始下降到反应器温度最低的过程中,反应器中反应的放热速率 Q_R 与汽包冷却的移热速率 Q_C 也在逐渐变化,如图 6 所示。作为对照,在图 6 中 Q_{Cr} 表示冷却水温度保持为 498.5 K 时移热速率随反应器温度的变化。由图 6 可以看出,在反应器温度降低过程中由于温度控制器的作用提高了汽包的压力和温度,

有效降低了传热速率,使得反应器移热量与反应放热量更快地达到平衡,从而减小了反应器的温度波动。

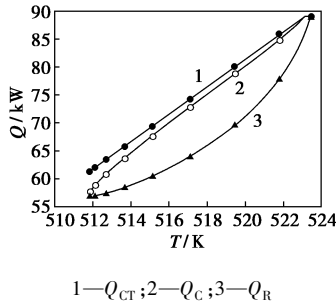


图6 新鲜气减少50%扰动时,反应器温度降低过程中 Q_C 、 Q_{CT} 以及 Q_R 的响应

图7显示了新鲜气流量减少25%扰动中当汽包蒸发面积不同时汽包自蒸发速率的响应情况,在此过程中汽包中实际温度对应的水饱和蒸汽压与汽包实际压力的压差 ΔP 变化如图8所示。当新鲜气流量减少时,自动控制的作用会要求提高汽包的温度,因此可以看出汽包内的蒸汽会迅速冷凝,随后,反应器温度逐渐回升,控制器调节作用减弱,汽包冷凝量逐步减小并最终达到稳定状态(图7所示)。在此过程中,可以观察到汽包蒸发面积的不同对汽包自蒸发速率变化的影响很小,这主要是由于汽包压差变化的补偿作用——在蒸发面积较小时,汽包的压差变化更为显著(如图8所示)。

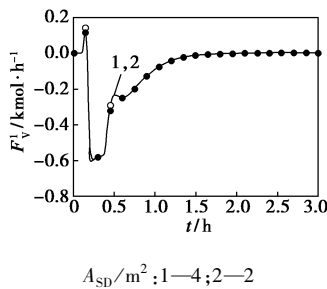


图7 不同汽包蒸发面积时,新鲜气流量减少25%变化时汽包自蒸发速率响应

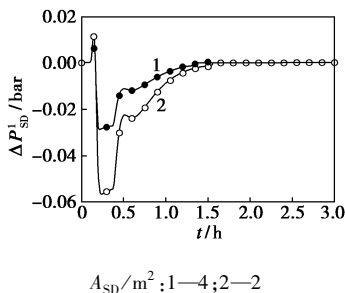


图8 不同汽包蒸发面积时,新鲜气流量减少25%变化时汽包内 ΔP 的响应
由于本系统采用的是汽包-沸腾水间接换热,

因此反应器的温度控制存在一定的滞后(如图5所示)。并且汽包形成的容量滞后与汽包的体积相关,如图9所示。

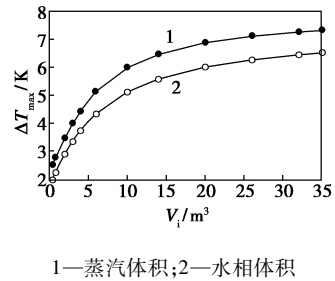


图9 新鲜气流量 F_0^G 阶跃减少时汽包中水相及蒸汽相体积对反应器温度最大波动值的影响

图9中,当研究水相的影响时,蒸汽体积为 2 m^3 ;当研究蒸汽相的作用时,水相体积为 2 m^3 。由图9可以看出,随着汽包-换热管体系中水体积以及水蒸气体积的增加(均由 0.4 m^3 增大到 35.0 m^3),反应器温度的最大波动值分别由 2.0 、 2.5 K 增大为 6.5 、 7.3 K ,因此减小汽包系统容积会有利于反应器的温度控制;而在实际中,如果汽包蒸发空间过小,水滴可能直接被蒸汽带出汽包,且不利于汽包液面控制,因此汽包的容积也不能过小。从图9中同样可以看出水体积与水蒸气体积有着相近的作用,这是由于汽包中水处于饱和点附近,此时水蒸气与水的比热容比较接近。图10中研究了反应器-汽包传热温差值设定不同时汽包中水蒸气体积的影响。从图10中可以看出,随着水蒸气体积的增加,传热温差的增大使得反应器温度的波动增大(当传热温差为 10 、 20 、 30 K 时分别对应于 1.3 、 3.5 K 和 4.8 K),因此可以认为随着传热温差的增加,水蒸气的体积变化对温度波动将产生更大的影响。

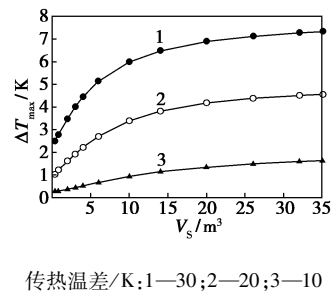


图10 新鲜气流量 F_0^G 阶跃减少35%时汽包中蒸汽相体积对反应器温度最大波动值的影响

3 结论

(1)分别建立了使用“Flash”模块及使用自蒸发汽包模型的F-T合成过程,相对于使用自蒸发汽包

模型时的模拟结果,研究发现使用“Flash”模块作为汽包模型会使得反应器温度波动的计算值偏小,而使用自蒸发汽包模型则可更好地描述汽包动态过程。

(2)相对于采用固定冷却水温度的冷却方式,使用汽包进行换热更加有利于反应器温度达到稳定值,并且有利于提高能量利用的品级。

(3)虽然蒸发速率与汽包蒸发面积成正比,但由于压差变化的补偿作用,在自蒸发汽包模型中改变汽包蒸发面积对水蒸发速率的影响很小。

(4)随着汽包-换热管体系中水体积以及水蒸气体积的增加,反应器温度的最大波动值变大;但随着传热温差的减小,水蒸气的体积变化对温度波动的作用减弱。

致谢:本文完成得到自然科学基金-重大项目-0-1:F-T合成关键问题研究(20590361/B01)、“863”计划-科技部-0-1:100万t级合成油技术(20071FT-1)、“973”计划-科技部-0-1:合成气制醇催化剂的资助;同时得到中科合成油技术有限公司的大力支持,特此表示感谢。

符号说明:

A_{SD} —汽包传热面积(m^2)	下标
C_p —定压热容[$J/(mol \cdot K)$]	C—汽包冷却
F —流量(mol/s)	CT—冷却水温度固定
H —焓(J/mol)	cyc—循环
M_w —水的摩尔质量(g/mol)	D—差值
n —物质的量(mol)	F-T—F-T反应
P —压力(bar)	in—入口
Q —放热或移热速率(kW)	out—出口
t —温度(K)	max—最大值
T —时间(h)	R—反应
V —汽包体积	S—水蒸气
上标	SD—汽包
1—一级	V—水蒸发
2—二级	W—水
G—气相	WGS—水煤气变换反应
L—液相	

参考文献

- [1] 项昆,索沂生,蒋滋康,等.循环双流化床汽水系统数学建模及动态仿真[J].电站系统工程,2003,19(6):52-54.
- [2] 张小桃,倪维斗,李政,等.基于现场数据的汽包压力动态建模研究与仿真[J].动力工程,2004,24(3):370-374.
- [3] 胥传普,曹祖庆.火电厂回热系统换热器动态过程汽侧空间饱和和水份额的研究[J].中国电机工程学报,1993,13(4):31-36.
- [4] Heimo Walter. Dynamic simulation of natural circulation steam generators with the use of finite-volume-algorithms: A comparison of four algorithms [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2007,15:565-588.
- [5] Steinmann Wolf-Dieter, Eck Markus. Buffer storage for direct steam generation [J]. Solar Energy, 2006, 80:1277-1282.
- [6] Kim T S, Lee D K, Ro S T. Analysis of thermal stress evolution in the steam drum during start-up of a heat recovery steam generator [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20:977-992.
- [7] Luyben William L. Mathematical modeling and control of a multi-boiler steam generation system [J]. Ind Eng Chem Res, 2004, 43:1839-1852.
- [8] Kim H, Choi S. A model on water level dynamics in natural circulation drum-type boilers [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32:786-796.
- [9] 王强,曹小玲,苏明.大容量余热锅炉汽包水位的建模分析[J].动力工程,2008,28(2):205-209.
- [10] Wang Yu, Fan Wei, Liu Ying, et al. Modeling of the fischer-tropsch synthesis in slurry bubble column reactors [J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47:222-228.
- [11] Van der Laan Gerard P, Beenackers Antonie A C M, Krishna Rajamani. Multicomponent reaction engineering model for Fe-catalyzed fischer-tropsch synthesis in commercial scale slurry bubble column reactors [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54:5013-5019.
- [12] 张以忱.真空材料[M].北京:冶金工业出版社,2005:74-79. ■

《现代化工》入选中国科学引文数据库核心期刊

《现代化工》创刊于1980年,为中国化工信息中心主办的综合性化工技术类期刊。经过近30年的发展,《现代化工》已经在化工领域有了很大的影响,一直入编《中文核心期刊要目总览》。今年,《现代化工》入编《2009—2010年中国科学引文数据库核心期刊》。目前,《现代化工》既是中文核心期刊也是科学引文数据库核心期刊。读者和相关单位可登陆中科院中国科学文献服务系统(<http://sdb.csdl.ac.cn>),点左下角“中国科学数据库来源期刊”查证。

——《现代化工》编辑部