

文章编号: 1000-8241(2013)05-0566-05

# 环挡板对提升管反应器内气固两相流动的影响

谢腾腾 孙铁 邢玲 张素香

辽宁石油化工大学, 辽宁抚顺 113001

**摘要:** 为改善提升管反应器内气固两相速度及颗粒浓度径向分布的环-核特征, 采用欧拉两相流模型和SIMPLE算法, 对添加3种不同形式环挡板的提升管进行了流场与浓度场的分析, 并与传统提升管进行对比。计算结果表明: 添加环挡板并不能减弱提升管内气固两相的轴向返混, 对于某些特定结构甚至还会出现明显的涡流现象; 在提升管内添加环挡板能够较大程度地改善气固两相径向的速度分布和浓度分布, 使主体段的流动更加接近平推流状态, 有利于控制反应的进行。合理设定提升管中环挡板的结构和位置, 能够改善气固两相的流动状态, 从而控制和优化反应时间。(表1, 图9, 参12)

**关键词:** 环挡板; 提升管反应器; 环-核分布; 两相流动

**中图分类号:** TE96

**文献标识码:** A

**doi:** 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.05.025

## Impacts of ring baffle on gas-solid flows in riser reactor

Xie Tengting, Sun Tie, Xing Ling, Zhang Suxiang

Liaoning Petrochemical University, Fushun, Liaoning, 113001

**Abstract:** To improve the gas-solid velocity in the riser reactor and ring-core characteristics of radial distribution of particle concentration, Eulerian two-phase flow model and SIMPLE algorithms are used to analyze the flow field and concentration field for the riser with three different types of ring baffles and compared with the traditional riser. As shown from calculation results, installed ring baffles can not reduce axial back-mixing of gas-solid in the riser and even cause an obvious vortex in some specific structures, however, installed ring baffles in the riser can greatly improve the radial velocity distribution and concentration distribution of gas-solid flow so that the flow in the main section is closer to plug flow state to facilitate control of the reaction. Rational design of ring baffle structure and position in the riser can improve flow conditions of gas-solid to control and optimize reaction time. (1 Table, 9 Figures, 12 References)

**Key words:** ring baffle, riser reactor, loop-nuclear distribution, two-phase flow

提升管反应器是催化裂化装置的关键设备, 其内部流动表现出环-核特征: 气固两相速度与颗粒浓度径向分布的不均匀性。这一特点造成催化裂化过程中裂化过度、结炭量增加, 制约了轻油收率的进一步提高<sup>[1]</sup>。改善这一问题的关键在于控制与优化提升管反应器的反应时间。在时间控制上, 保证反应器中气体和固体反应历程相同是主要目标, 而环-核结构是主要障碍<sup>[2-7]</sup>。为削弱提升管反应器内气固流动的环-核特征, 改善两相速度及固相浓度的径向分布, 对添加环形挡板的提升管进行计算, 分析提升管反应器内流场与浓度场的分布, 寻求削弱提升管反应器内环-核流动特征、优化反应时间的方法。

## 1 提升管反应器物理模型

在催化裂化提升管反应器中进行着原料液雾的气化、气固两相湍流流动、传热、传质、裂化反应等复杂过程<sup>[1,8]</sup>。以下仅对提升管反应器内的气固两相流动进行研究。采用空气为气相, 固相密度为  $1\ 600\ \text{kg/m}^3$ , 颗粒直径为  $0.07\ \text{mm}$ 。

### 1.1 模型假设

在循环床提升管操作的大部分条件下, 流动的雷诺数均较高, 属于湍流流动。在气固悬浮流动过程中, 气固之间存在复杂的湍动作用, 为增强计算的收敛性, 做如下假设<sup>[9]</sup>:

①空间各处各颗粒相与流体共存,相互渗透,各相具有不同的群体速度、温度和体积分数。②颗粒相在空间中有连续的速度、温度及体积分数分布。③颗粒相与流体间除了时均运动相互作用外,还有湍流的相互作用以及自身的湍流对流、扩散、产生与消亡等,因而具有其自身的湍流输运特性,同时具有由于颗粒与颗粒间碰撞而引起的颗粒粘性、扩散与导热等输运特性。④忽略颗粒所受的浮力、附加质量力、Basset 力、Magnus 力、Saffman 力、热泳力、压降梯度力,仅考虑颗粒在流场所受的阻力和重力,认为颗粒群由同样质量和大小的颗粒组成。⑤湍流假定为各向同性,颗粒与颗粒之间的碰撞是造成颗粒间聚集和解体的主要原因。颗粒对气相湍流的影响主要表现为造成其湍动能的变化。

1.2 控制方程组

基于以上假设,采用欧拉算法的两相流模型进行模拟。气固两相流动的时均方程组如下<sup>[2,9]</sup>:

气相连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_g \rho_g v_j) = 0 \quad (1)$$

颗粒相数密度连续性方程:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(n_p v_{pj}) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{n_p v_{pj}}) \quad (2)$$

颗粒相似密度连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_p v_{pj}) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho_p v_{pj}}) \quad (3)$$

气相动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_g \rho_g v_i v_j) = & -\varepsilon_g \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i})] + \varepsilon_g \rho_g g_i \\ & + \frac{\rho_p}{\tau_{rp}}(v_{pi} - v_i) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_g \rho_g \overline{v_i v_i}) \end{aligned} \quad (4)$$

颗粒相动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_p v_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_p v_{pj} v_{pi}) = & -\varepsilon_p \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_p g_i \\ & + \frac{\rho_p}{\tau_{rp}}(v_i - v_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_p \overline{v_{pj} v_{pi}}) \\ & + \overline{v_{pj} \rho_p v_{pi}} + \overline{v_{pi} \rho_p v_{pj}} \end{aligned} \quad (5)$$

方程中  $\overline{n_p v_{pj}}$ 、 $\overline{\rho_p v_{pj}}$ 、 $\overline{v_i v_j}$ 、 $\overline{v_{pi} v_{pj}}$ 、 $\overline{\rho_p v_{pi}}$ 、 $\overline{\rho_p v_{pj}}$  未知,需通过湍流两相流模型封闭。

式中:  $t$  为时间, s;  $\varepsilon_g$  为气相湍动能耗散率,  $m^2/s^3$ ;  $\rho_g$  为气相密度,  $kg/m^3$ ;  $v_i$ 、 $v_j$  分别为气相的径向和轴向速度,  $m/s$ ;  $v_{pi}$ 、 $v_{pj}$  分别为颗粒相的径向速度和轴向速度,  $m/s$ ;  $n_p$  为催化剂颗粒数密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_p$  为催化剂颗粒材料密度,  $kg/m^3$ ;  $v_i$  为气相的径向速度,  $m/s$ ;  $p$  为静压, Pa;  $\mu$  为动力粘性系数,  $kg/(m \cdot s)$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\tau_{rp}$  为颗粒相运动松弛时间, s;  $\varepsilon_p$  为颗粒相湍动能耗散率,  $m^2/s^3$ ;  $\tau_{ij}$  为颗粒相所受剪切力, Pa。

1.3 提升管反应器的分类

对 3 种添加不同形式环形挡板的提升管进行了分析计算(图 1,其中  $L_1=1\text{ cm}$ ,  $L_2=2\text{ cm}$ ,  $d$  为环形挡板的径向宽度,  $y$  为环挡板到提升管下部参考面的高度)。根据  $d$  和  $y$  的不同,将提升管分成 3 类(表 1)。

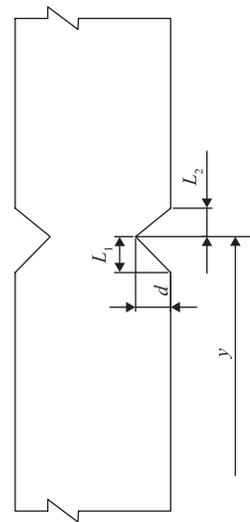


图 1 提升管反应器环挡板结构示意图

表 1 提升管反应器的分类

提升管类型	径向宽度/cm	环挡板与提升管下部参考面间距/m				
结构 1	1.5	1.0	2.0	3.0	4.0	—
结构 2	1.5	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
结构 3	2.0	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5

1.4 算法控制与边界条件的设置

基于上述控制方程,在 Fluent 中采用 Eulerian 两相流模型,气相为初始相,颗粒相为第二相,固相入口处颗粒体积分数为 55%,湍流模型采用 k-epsilon(2eqn),算法采用耦合 SIMPLE 算法和一阶迎风格式离散<sup>[10-11]</sup>。松弛因子设置为 0.2,增强模型的收敛性。

采用瞬态求解器,时间步长设置为 0.002 s,时间步数为 10 000,即 20 s 的流动时间,打开时均选项,进行迭代计算。

## 2 计算结果

### 2.1 传统提升管反应器内流动特征

根据传统提升管不同截面上的气相速度分布情况(图2,其中 $r/R$ 为截面点距管壁的距离与提升管半径的比值)可知,在同一截面上,气体的速度分布有很大差异,呈现出明显的环-核流动特征,即中心部位速度大,靠近壁面区域速度小,整体呈抛物线状分布;随着在提升管反应器内的高度上升,抛物线趋于平缓,同一截面上的速度差异减小;靠近壁面区域,出现了速度小于0的现象,即返混现象,在 $y=5\text{ m}$ 的截面上表现最为明显。无论是环-核特征还是返混现象,都不利于控制反应时间。

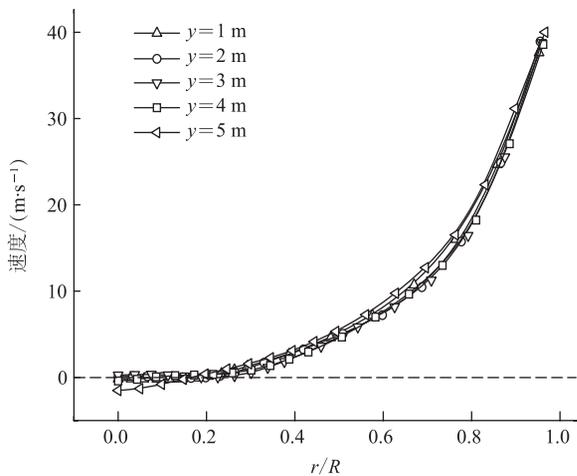


图2 传统提升管反应器内气相速度分布

根据颗粒相速度与气相速度在截面 $y=4\text{ m}$ 上的对比结果(图3),由于气固两相的湍动作用,中心区域两者的速度相差不大,靠近边壁的区域则存在较为明显的催化剂滑落现象,并存在一定程度的返混现象。根据提升管反应器内颗粒相的体积分数分布(图4),在低截面,中心颗粒浓度显著低于边壁,形成所谓的环-核流动结构,即在提升管反应器中心的催化剂颗粒浓度低,而在边壁处,颗粒浓度高;随着截面升高,由于气固湍动的不断加强,颗粒浓度的环-核特征减弱,浓度分布趋于均匀。

计算结果表明:气固两相的速度分布与固相浓度的分布都呈现出明显的环-核特征,并且边壁处存在一定程度的返混,这与提升管反应器内实际的流动状况非常接近<sup>[2]</sup>,从而说明气固两相湍流流动模型对气固两相湍流机制和相互影响的模化是准确的,具有很好的预测性。

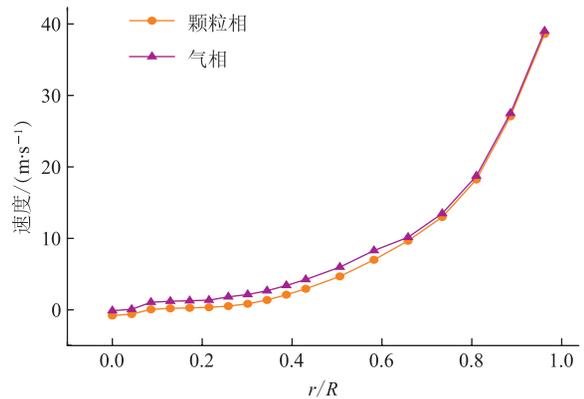


图3 传统提升管反应器相同截面气固两相速度对比曲线

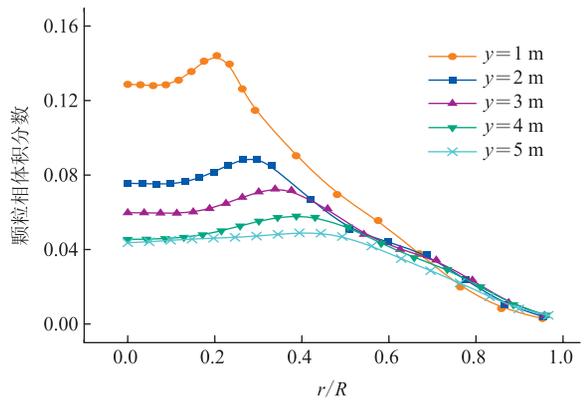


图4 传统提升管反应器内颗粒相体积分数分布

### 2.2 不同结构计算结果的对比

由图3中气固两相速度的对比可知,经气固两相的充分湍动后,颗粒相速度分布与气相速度分布相似度极高,故在此仅对气相速度进行分析。根据不同形式提升管内 $y=3\text{ m}$ 截面上气相速度的分布(图5),对比传统提升管反应器,添加环挡板的3种提升管内的环-核流动特征均有不同程度的减弱,呈现出比较缓和的抛物分布,更加接近平推流动。但结构2和结构3均出现明显的负速度,并且在环挡板部位出现明显的涡流现象(图6、图7)。

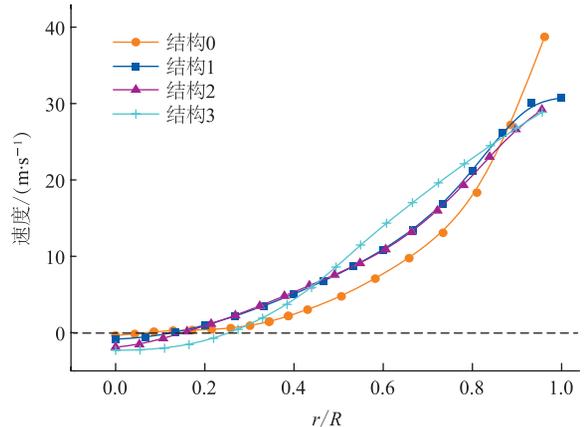


图5 不同提升管反应器内气相速度对比曲线

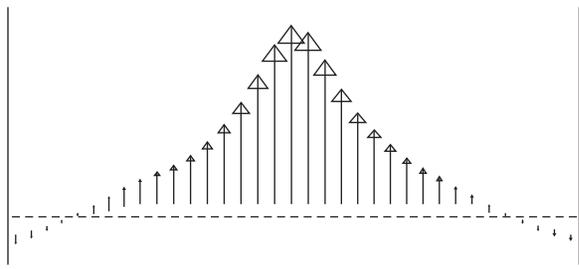


图6 壁面附近的回流

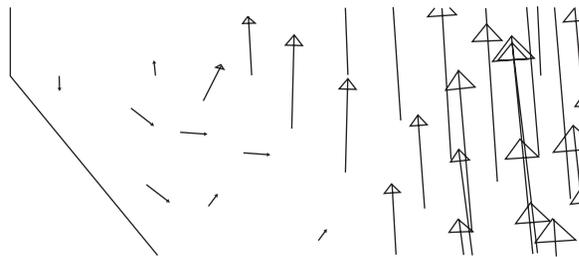


图7 提升管反应器环挡板附近的涡流

根据颗粒相浓度的对比结果(图8),3种添加环挡板的提升管反应器内颗粒相浓度分布均优于传统提升管。结构1为平缓的抛物型分布,结构2和结构3在半径较小部位呈现出较大的浓度梯度,靠近中心部位变化平缓。3种结构均削弱了浓度分布的环-核特征。

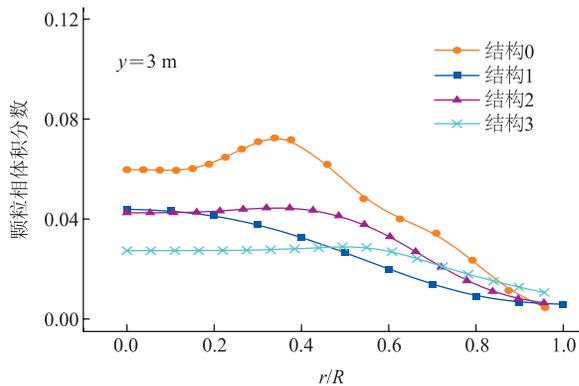
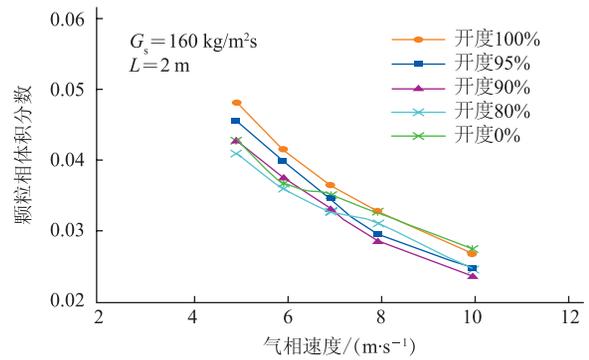
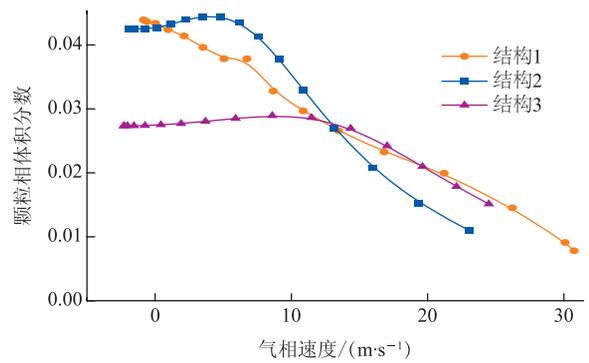


图8 不同结构提升管反应器内颗粒相浓度对比

祝京旭等<sup>[12]</sup>研究了不同边界条件、不同开环比例的环挡板式提升管内的轴向压力分布、浓度分布。其中,开环比例为环挡板处横截面面积与提升管其他部位的横截面面积之比。根据颗粒流量为  $160 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、初始气速为  $6 \text{ m/s}$  时  $2 \text{ m}$  处的高度截面上固体颗粒浓度随气相速度的变化情况(图9a),颗粒相浓度随着气相速度的增大而逐渐减小,即存在边壁浓度大、中心浓度小的特征。根据结构1、结构2、结构3三种不同结构提升管反应器同一截面上颗粒相浓度随气相速度的变化情况(图9b),由于初始条件不同,实验值与模拟值有明显的差异,但颗粒相浓度的变化趋势与实验值相似程度较高,验证了模拟结果的正确性。



(a) 实验值



(b) 模拟值

图9 环挡板提升管反应器内气固两相流动模拟结果与实验值的对比

### 3 结论

在提升管内添加环挡板能够改变提升管内的流动状况。在所计算的3种结构中,结构2和结构3虽然能够达到径向速度和浓度较为缓和的分布状况,但另一方面,环挡板的设置加剧了边壁处的返混现象,并在挡板部位出现涡流现象,不利于反应时间的控制;结构1则能够在没有加剧气固轴向返混的前提下,改善流动的环核特征。可以预测,通过合理设定环挡板的结构和位置分布,能够改善气固两相的流动状态,以接近和达到主体段的平推流状态,使控制和优化反应时间成为可能。

### 参考文献:

[1] 林世雄. 石油炼制工程[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2000: 317-387.  
 [2] 徐春明. 重油催化裂化反应过程分析[M]. 1版. 北京: 石油工业出版社, 2002: 62-93.  
 [3] 程易, 魏飞, 金涌. 从两相流型特征对提升管反应器出入口结构的分类[J]. 石油炼制与化工, 1997, 28(3): 41-46.

- [4] 蔡飞鹏, 范怡平, 时铭显. 催化裂化提升管反应器喷嘴进料混合段新结构及其流场研究[J]. 石油炼制与化工, 2004, 35(12): 37-41.
- [5] 杨艳辉, 贾新莉, 魏飞, 等. 内构件对高密度提升管颗粒浓度分布的影响[J]. 石油化工, 2001, 30(1): 32-36.
- [6] 魏飞, 杨艳辉, 金涌. 内构件对高密度提升管内气体混合行为的影响[J]. 化工学报, 2001, 52(9): 767-770.
- [7] 魏飞, 杨艳辉, 金涌. 内构件对高密度提升管流体力学行为的影响[J]. 化工学报, 2000, 51(6): 806-809.
- [8] 刘会娥, 杨艳辉, 魏飞, 等. 内构件对于提升管中颗粒混合行为的影响[J]. 化学反应工程与工艺, 2002, 18(2): 109-114.
- [9] 高金森, 徐春明, 林世雄, 等. 提升管反应器气固两相流动反应模型及数值模拟[J]. 石油学报, 1998, 14(3): 38-46.
- [10] 韩占忠. FLUENT-流体工程仿真计算实例与分析[M]. 1版. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 31-57, 92-124.
- [11] 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 1版. 北京: 清华大学出版社, 2004: 160-298.
- [12] Bu Jianjie, Zhu JingXu. Influence of ring-type internals on axial pressure distribution in circulating fluidized bed[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1999, 77(1): 26-34.

(收稿日期: 2012-07-24; 编辑: 杜娟)

**基金项目:** 辽宁省自然科学基金项目“龙卷板式空冷器龙卷流动形成机理及传热规律研究”, 20092182。

**作者简介:** 谢腾腾, 在读硕士生, 1989年生, 2010年毕业于北京石油化学学院过程装备与控制工程专业, 现主要从事压力容器、管道失效风险及剩余寿命评估的研究工作。

电话: 15141310673; Email: xiebeyond@sina.cn

Xie Tengpeng, reading master, born in 1989, graduated from Beijing Institute of Petrochemical Technology, process equipment and control engineering, in 2010, engaged in the research of assessment of failure risk and remaining life for pressure vessels and pipelines.

Tel: 15141310673, Email: xiebeyond@sina.cn

## ·行业动态·

### 第三十七期全国重要科技类期刊主编岗位培训班在京开班

2013年4月10—19日, 国家新闻出版总署第三十七期全国重要科技类期刊主编岗位培训班在京开班, 原新闻出版总署新闻报刊司司长王国庆、国务院参事室特约研究员姚景源、中央党校教授周熙明、原国家新闻出版总署新闻报刊司巡视员张泽青等亲临培训班进行了精彩的授课。《油气储运》杂志社主编、社长等参加了培训, 培训为期10天72学时, 学习了党的十八大文件精神, 新闻出版的性质、任务、方针、政策、法律、法规和职业道德准则, 期刊出版业务知识及国内外发展形势和动态, 分享了国内优秀期刊经验介绍, 内容丰富且极具指导意义。



《油气储运》杂志社 关中原