

研究论文

提升管-流化床耦合反应器颗粒约束返混区的 流动特性及约束作用分析

王德武, 卢春喜

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 针对催化汽油辅助反应器改质降烯烃工艺, 在一套提升管-流化床耦合反应器大型冷态实验装置上, 系统研究了提升管出口段的颗粒流动特性, 通过定义约束指数 R_i (R_i 为颗粒约束返混区实际截面平均固含率与理论截面平均固含率之比) 定量反映提升管出口分布器及流化床层的约束作用。结果表明, 与常规提升管相比, 耦合反应器提升管出口存在一个颗粒约束返混区, 其长度主要受表观气速、颗粒循环强度及上部流化床内颗粒静床高度影响; 由于出口设置了倒锥形分布器, 使得颗粒约束返混区靠近提升管出口区域在表观气速较低和颗粒循环强度较大时, 局部固含率最大值出现在量纲 1 半径 $\Phi=0.7$ 处; 颗粒约束返混区的约束指数在靠近出口的过程中逐渐增大, 气固流动受到分布器及上部流化床层的约束作用亦逐渐增强。

关键词: 耦合反应器; 提升管; 约束返混区; 流动特性; 约束指数

中图分类号: TQ 051.1; TQ 052

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 04-0859-07

Particle flow behavior and restriction in back-mixing region of riser-fluidized bed coupled reactor

WANG Dewu, LU Chunxi

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A large-scale cold model experimental setup of a riser-fluidized bed coupled reactor was established according to olefin reduction technology with auxiliary reactor for FCC naphtha upgrading. The particle flow behavior in the outlet region of the riser section was experimentally investigated in the setup. Furthermore, the restriction index R_i , the ratio between real and theoretical averaged cross-sectional solid holdups in the particle back-mixing region section, was defined to quantitatively show the restriction effect of the riser outlet distributor and upper fluidized bed on the particle flow behavior in this region. The experimental results showed that, compared with the conventional riser, there existed a particle back-mixing region in the riser outlet of the coupled reactor. The length of the particle back-mixing region was related to the superficial gas velocity, solids flux and the solids bed level in the upper fluidized bed. The maximum local solids holdup in the particle back-mixing region close to the riser outlet appeared at the non-dimensional radial position $\Phi=0.7$ at a lower superficial gas velocity and a higher solids flux. This was because an inverted taper gas-solid distributor was mounted at the riser outlet. The restriction index tended to increase with the axial position increasingly close to the riser outlet. At the same time, the restriction effect of the gas-solid distributor and upper fluidized bed on the gas-solid flow behavior was also gradually enhanced.

2007-08-28 收到初稿, 2007-12-08 收到修改稿。

联系人: 卢春喜。第一作者: 王德武 (1980—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (20490200); 国家杰出青年科学基金项目 (20525621)。

Received date: 2007-08-28.

Corresponding author: Prof. LU Chunxi. E-mail: lcx725@sina.com

Foundation item: supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China (20490200) and the Funds for Outstanding Young Researchers from the National Natural Science Foundation of China (20525621).

Key words: coupled reactor; riser; back-mixing region; flow behavior; restriction index

引 言

我国商品汽油有 80% 来自催化裂化过程, 而催化裂化汽油烯烃含量在 45%~60% (体积分数) 之间, 远不能满足《世界燃油规范》的标准, 为此中国石油大学(北京)开发了“催化裂化汽油辅助反应器改质降烯烃技术”^[1-2]。该技术针对降烯烃反应过程特点, 依托原催化裂化装置, 单独增设了提升管与流化床耦合形式的汽油改质反应器。耦合反应器中, 流化床反应器的功能主要用于延长反应时间, 提高降烯烃幅度。提升管反应器的功能主要有: 实现高温催化剂与低温油气的混合、换热及反应, 使得进入流化床反应器的气固混合温度相对较低且床内温度更为均匀, 进而提高降烯烃反应的选择性; 满足整个系统的压力平衡, 保证了催化剂在再生器-辅助反应器之间的正常循环流动; 使操作更灵活, 可以通过采取单独提升管操作或不同流化床层料位高度操作的方式调整反应时间, 进而满足不同降烯烃幅度的要求。迄今为止, 同类研究中只有少数研究者对上部流化床区域的流动特性进行了初步的研究^[3-6], 而对下部提升管内流动特性的研究还少有报道。为了进一步优化汽油改质反应器的结构和操作, 需要对此类耦合反应器的流体力学特性进行深入研究。同时, 通过对此类耦合反应器流体力学特性的深入研究, 也可对目前已广泛应用的 MIP 技术^[7-8]的设计及操作优化提供借鉴和参考。

耦合反应器中, 设置在提升管出口的分布器把提升管与流化床串联起来, 分布器及其上部的流化床层对提升管内气固流动的影响还未见相关报道。提升管出口形式对气固流动的影响方面, 前人的研究^[9-12]主要集中于 C 形出口、L 形出口及 T 形出口等不同几何结构对提升管内气固流动的影响上, 所进行的研究表明, 不同形式的出口结构将对提升管出口颗粒运动造成不同程度的约束作用, 从而造成提升管内固含率轴向分布表现出上稀、下浓或两端浓、中间稀的分布特征。虽然有研究者^[13]定性描述了提升管出口约束的强弱, 但国内外还未有研究者对其进行定量的描述。鉴于提升管是该耦合反应器的重要组成部分之一, 上部分布器及流化床层将直接影响提升管出口处的气固流动特性, 进而影响到提升管内的气固接触及反应, 甚至影响到由此

进入流化床的气固特性, 因此本研究将主要考察提升管出口段的颗粒流动特性, 并定量分析分布器及流化床层的影响。

1 实验部分

1.1 实验装置及流程

图 1 为本实验装置流程示意图。装置主体由下部提升管和上部流化床组成, 提升管出口采用莲蓬头式分布器与流化床相连。提升管内径 $D_r = 100$ mm, 从底部分布板至莲蓬头式分布器锥体下方入口处的长度 $H = 8.2$ m; 流化床主体为内径 780 mm 的半圆形床, 高 5 m; 莲蓬头式分布器相对于流化床截面积的开孔率为 0.72%, 其结构尺寸见图 2。料仓在装置停运时用于储存流化床中的物料, 在装置刚开启时用于调控流化床中的存料量, 在装置正常运行时, 料仓一侧的循环管线关闭。空气由风机经缓冲罐、流量计分 3 路进入装置: 一路进入提升管底部, 为提升主风; 另一路进入料仓, 对物料起到流化松动作用; 第三路进入流化床锥体中, 流化并松动其中的物料。流化床层中的颗粒经循环管进入提升管中, 在提升主风的作用下向上运动, 在提升管出口, 气体和颗粒经莲蓬头式分布器进入流化床中, 气体经过流化床层后夹带进入稀相的少量颗粒进入旋风分离系统, 分离下来的颗粒通过料腿返回流化床层中, 气体经布袋除尘器净化后放空, 床层中的颗粒再经循环管进入提升管参与循环。

1.2 实验介质及操作参数

本研究所用固体介质为 FCC 平衡催化剂, 其物性参数见表 1; 流化介质为常温空气。提升管内表观气速 U_g 为 6.02~14.15 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应流化床内的表观气速 $U_{b,g}$ 为 0.31~0.58 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (包括锥体内的固定流化风量 0.017 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 基于提升管截面积的颗粒循环强度 G_s 为 9.77~106.09 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 流化床内颗粒的静床高度 H_b 分别为 0.35、0.49、0.75、1.06 m。

表 1 FCC 平衡催化剂颗粒物性参数

Table 1 Properties of FCC equilibrium catalyst particles

| Mean diameter / μm | Particle density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | Bulk density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | Repose angle / $(^\circ)$ |
|----------------------------------|---|---|------------------------------|
| 60 | 1500 | 929 | 31.3 |

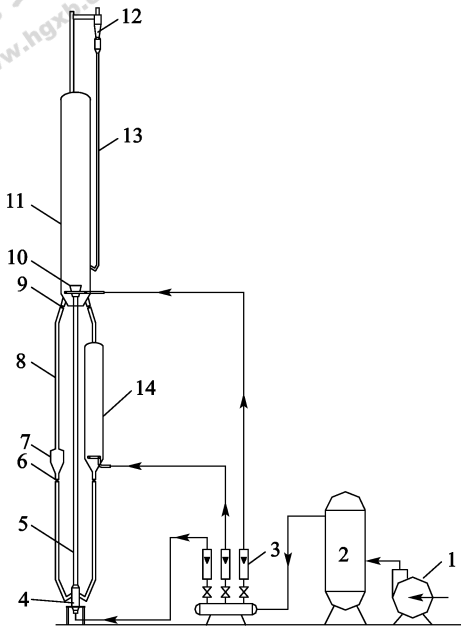


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental unit

- 1—air blower; 2—surging tank; 3—air flowmeter;
- 4—pre-lift zone; 5—riser; 6, 9—butterfly valve; 7—measuring tank;
- 8—particle returning pipe; 10—distributor; 11—fluidized bed;
- 12—cyclone separator; 13—dipleg; 14—storage tank

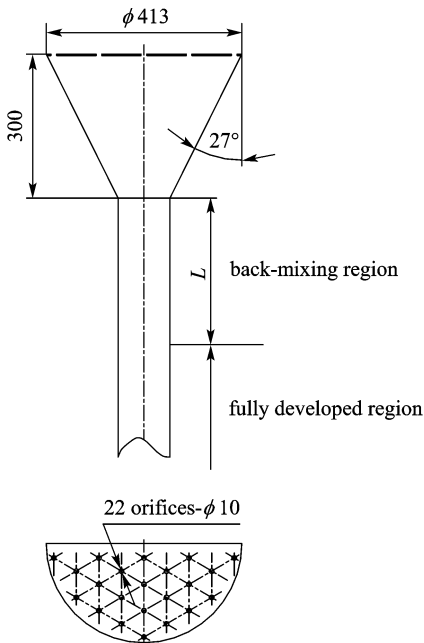


图 2 莲蓬头式分布器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lotus-shaped distributor

1.3 实验参数测量

颗粒循环强度采用容积法测定。截面平均固含率采用差压传感器测量，沿提升管高度向上共布置

了 11 个测量截面 (h 为 0.83、1.21、1.72、2.49、3.64、4.78、5.78、6.78、7.08、7.47、7.86 m)。局部固含率采用中国科学院过程工程研究所研制的 PV-4A 型光纤密度仪测定，沿提升管轴向共布置了 6 个测量截面 (h 为 0.83、1.73、3.50、5.33、7.08、8.06 m)，在每个截面上沿提升管径向布置了 5 个测量点，对应的量纲 1 半径 ($\Phi = r/R$) 分别为 0、0.30、0.50、0.70 和 0.90。由于提升管出口分布器及其下部 0.14 m 长的提升管部分伸入流化床中，故未在这部分布置测量点。

2 实验结果与讨论

2.1 颗粒约束返混区的确定

图 3 给出了提升管内截面平均固含率的轴向分布。由图可以看出，沿提升管高度向上，截面平均固含率在提升管底部先降低 ($\frac{d\bar{\epsilon}_s}{dh} < 0$)，在中部趋于稳定 ($\frac{d\bar{\epsilon}_s}{dh} = 0$)，在提升管顶部又有所升高 ($\frac{d\bar{\epsilon}_s}{dh} > 0$)，整体上表现为 C 形分布特征，这主要是由于提升管出口的分布器及流化床层对出口处向上运动的颗粒形成较强的约束作用造成的。在此约束作用下，部分颗粒折流向下运动，在向下运动的同时，还与向上运动的气体和颗粒发生激烈的动量交换，使颗粒团的平均运动速度减慢，致使截面平均固含率增加。在前人^[14-15]所进行的代表性研究中，提升管出口采用光滑的弱约束结构，其截面平均固含率沿轴向向上是先降低，进入充分发展区后基本不再发生变化，表现为明显的上稀下浓分布。对比文献 [14-15] 的研究结果可以得出，若本研究中提升管出口为无分布器及流化床层的弱（或无）约束形式，在提升管出口处截面平均固含率将沿图 3 中虚线所示规律变化。因此，根据截面平均固含率轴向分布的实际特征，把本研究的提升管分为颗粒加速区、充分发展区和颗粒约束返混区，颗粒约束返混区的起点为截面平均固含率开始增大的点，即曲线由 $\frac{d\bar{\epsilon}_s}{dh} = 0$ 向 $\frac{d\bar{\epsilon}_s}{dh} > 0$ 变化的拐点处。理论上，颗粒约束返混区的范围还应包括莲蓬头式分布器的垂直高度 300 mm，但为便于分析与讨论，本文中颗粒约束返混区仅指从起点到莲蓬头式分布器锥体下端面间的提升管区域，其长度以 L 计。

颗粒约束返混区的长度 L 受操作条件的影

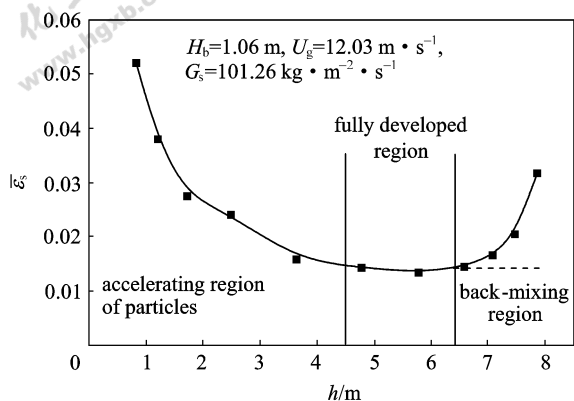


图 3 截面平均固含率沿轴向的分布
Fig. 3 Axial distribution of averaged cross-sectional solids holdup

如图 4 所示。由图 4 (a) 可见，在 U_g 一定的情况下， L 随着颗粒循环强度的增大而呈增大趋势，随着上部流化床内颗粒静床高度 H_b 的增加而增加，高颗粒循环强度时 H_b 对 L 的影响程度要大于低颗粒循环强度的情形；由图 4 (b) 可以看出，在颗粒循环强度 G_s 相同或相近的情况下， L 随着表观气速的增加而呈减小趋势，随着上部流化床内颗粒静床高度 H_b 的增加而增加，低气速时 H_b 对 L 的影响程度要大于高气速时的情形。当颗粒循环强度较小时，折流向下运动的颗粒数量较少，向上运动的气体和颗粒与向下运动的颗粒在较短的时间内即完成动量交换，因而 L 较短；当颗粒循环强度增大时，二者动量交换时间延长，因而颗粒向下流落的距离延长，进而 L 增加。当表观气速较低时，向上的气流和颗粒速度比较低，动能比较小，对折流向下流动的颗粒团的作用力较弱，因而 L 较长；提高表观气速后，向上运动的颗粒速度加大，上、下运动的颗粒团之间动量交换强度随之增强，导致 L 缩短。颗粒静床高度的增加对提升管出口颗粒运动的阻力增加，导致更多的颗粒折流向下，所以 L 随 H_b 的增加而增加。

2.2 颗粒约束返混区固含率径向分布

图 5 给出了颗粒约束返混区固含率的径向分布特征。由图可以看出，沿提升管径向，局部固含率整体上仍呈中心小、边壁大的环-核结构分布，环-核两区边界在量纲 1 半径 $\Phi = 0.7$ 附近，在测量截面不断靠近提升管出口的过程中，截面各径向位置固含率都呈增大趋势。比较图 5 (a)、(b) 可以看出，当表观气速较低、颗粒循环强度较大时 [图 5 (a)]，靠近提升管出口局部固含率最大值将不再位

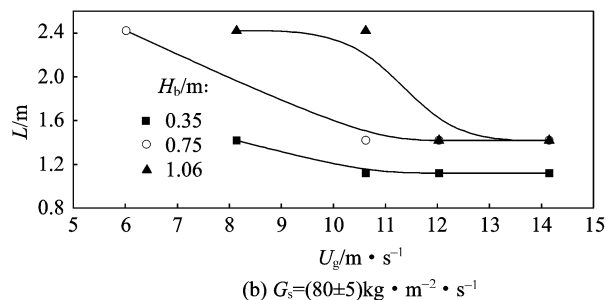
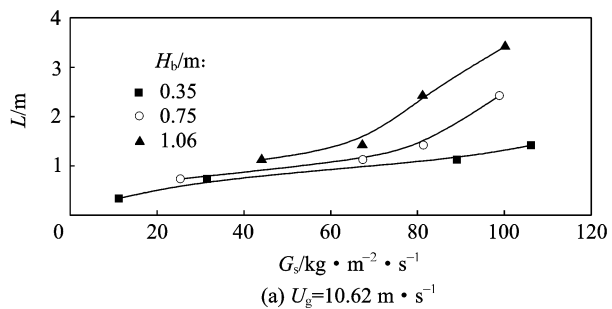


图 4 操作条件对颗粒约束返混区长度的影响
Fig. 4 Effect of operating conditions on length of back-mixing region

于边壁处，而是出现在量纲 1 半径 $\Phi = 0.7$ 处，在 $\Phi > 0.7$ 时固含率反而降低。造成该区域固含率径向分布的差异是提升管出口倒锥形分布器 (图 2) 影响的体现，当颗粒进入流化床时受到分布器及密相流化床层的约束作用，一部分颗粒被反弹沿分布器边壁向下流动，由于分布器的边壁与提升管边壁间存在一定锥角，反弹的颗粒由于惯性在提升管出口并不是立即靠近边壁向下运动，而是沿原方向运动一段距离后才在气固上升主流的作用下靠近提升管边壁向下流动，因此在提升管出口处存在一段局部固含率最大值不在边壁的区域。当气速较高、颗粒循环强度相对较低时 [图 5 (b)]，气体动能较大，且折流向下的颗粒数量减少，颗粒沿分布器边壁向下运动至提升管出口后在很短的距离内即融入向上运动的气固主流当中，因此在所测截面处局部固含率最大值与常规提升管相似，仍在靠近边壁处。

图 6 给出了流化床内颗粒静床高度对颗粒约束返混区固含率径向分布的影响情况。由图可见，随着颗粒静床高度的增加，同一截面各径向位置的固含率均增加，由此说明流化床内颗粒藏量增加将会使提升管出口阻力增大、约束作用增强、返混颗粒数量增多，但在本实验操作条件下，颗粒静床高度的改变仅对各径向位置固含率值有影响，而对固含

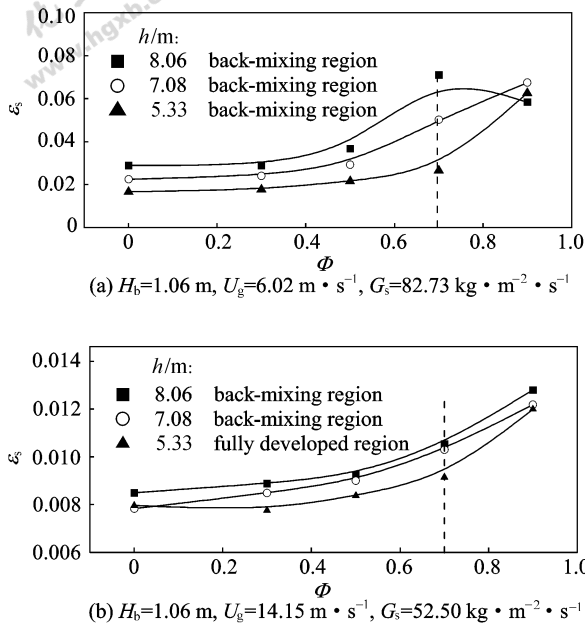


图 5 固含率沿径向的分布

Fig. 5 Typical radial distribution of solids holdup

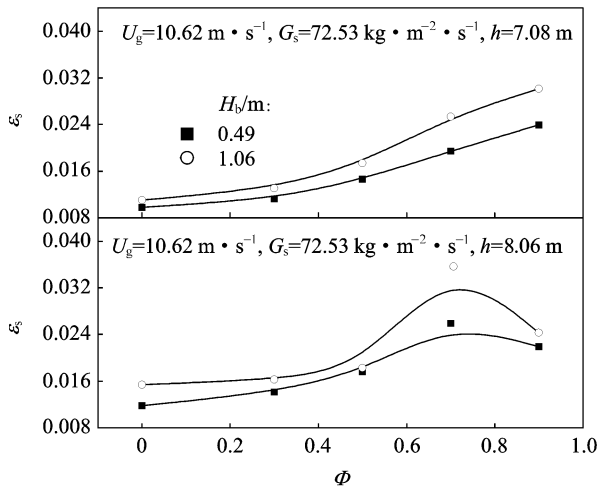


图 6 流化床内颗粒静床高度对固含率沿径向分布的影响

Fig. 6 Effect of solids bed level in fluidized bed on radial distribution of solids holdup

率分布曲线的变化趋势影响较小。

2.3 颗粒约束返混区的约束指数

由上面的分析可知，本研究中提升管出口处的分布器及上部流化床层对颗粒约束返混区内颗粒有较强的约束作用，约束越强，颗粒约束返混区的截面平均固含率越大，为了定量地表示分布器及上部流化床层对颗粒约束返混区内气固流动的约束程度，本文将分布器及流化床层的约束作用综合起来考虑，并定义一个量纲 1 参数“约束指数”，以 R_i 表示。引入 R_i 的出发点与颗粒约束返混区的确定

依据相同，即若本研究中提升管出口为无分布器及流化床层的弱（或无）约束形式，在提升管出口处截面平均固含率将沿图 3 中虚线所示规律变化，正是由于出口约束的存在导致截面平均固含率增加，且截面平均固含率增加的程度与约束的强弱直接相关，因此以实验测得颗粒约束返混区的实际截面平均固含率 $\bar{\epsilon}_{s,e}$ 与无约束时的理论截面平均固含率 $\bar{\epsilon}_{s,e}^*$ 之比即可表示约束的强弱，故定义

$$R_i = \frac{\bar{\epsilon}_{s,e}}{\bar{\epsilon}_{s,e}^*} \quad (1)$$

R_i 值越大，表示约束越强，无约束时 $R_i=1$ 。

综合考虑各种影响因素，对本研究中提升管内充分发展区和颗粒约束返混区的截面平均固含率进行分别回归，关联式如下：

充分发展区， $L_1 < h < (H-L)$

$$\bar{\epsilon}_s = 0.0220 \epsilon_s'^{0.7213} Fr^{-0.5321} \quad (2)$$

颗粒约束返混区， $(H-L) \leq h \leq H$

$$\bar{\epsilon}_s = 0.0284 \epsilon_s'^{0.5749} Ar^{-8.8462} \left(\frac{h}{D_r}\right)^{5.6519} \left(\frac{H_b}{D_r}\right)^{0.0295} \quad (3)$$

式 (2) 的相对误差在 $\pm 16.4\%$ 以内，平均相对误差为 4.8% ；式 (3) 的相对误差在 $\pm 30\%$ 以内，平均相对误差为 3.6% 。

在本研究中颗粒在提升管中的运动在多数条件下已经达到充分发展的程度，在无约束的情况下，截面平均固含率将趋于稳定，且 $\bar{\epsilon}_{s,e}$ 和 $\bar{\epsilon}_{s,e}^*$ 缺乏普遍适用的理论模型，故以式 (2) 近似计算颗粒约束返混区无约束时的理论截面平均固含率 $\bar{\epsilon}_{s,e}^*$ ，以式 (3) 计算值近似代替实际截面平均固含率 $\bar{\epsilon}_{s,e}$ ，把式 (2) 和式 (3) 带入式 (1)，得到分布器及流化床层对颗粒约束返混区各轴向位置的约束指数计算式

$$R_i = \frac{\bar{\epsilon}_{s,e}}{\bar{\epsilon}_{s,e}^*} =$$

$$1.2909 \epsilon_s'^{-0.1464} Ar^{-8.8462} Fr^{-0.5321} \left(\frac{h}{D_r}\right)^{5.6519} \left(\frac{H_b}{D_r}\right)^{0.0295} \quad (4)$$

图 7 给出了一定条件下颗粒约束返混区约束指数随提升管高度的变化情况。由图可见，在颗粒约束返混区各轴向位置的约束指数不同，在提升管高度增加（靠近提升管出口）的过程中，约束指数相应增加，表明提升管出口的分布器及流化床层对颗粒约束返混区的约束作用在各轴向位置是不同的，越靠近提升管出口，气固运动受到的约束作用越强。

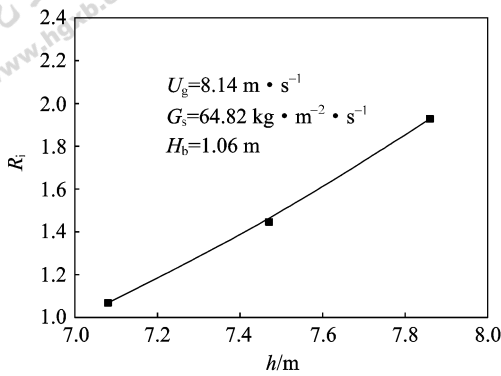


图 7 颗粒约束返混区约束指数沿轴向高度的变化

Fig. 7 Axial distribution of restriction index in back-mixing region

3 结 论

(1) 与常规提升管相比，耦合反应器提升管内截面平均固含率沿轴向呈两端大、中间小的 C 形分布特征，在提升管出口区域存在一个颗粒约束返混区；颗粒约束返混区的长度随表观气速的增大而减小，随颗粒循环强度及上部流化床内颗粒静床高度的增大而增加，上部流化床内颗粒静床高度的影响在低气速及高颗粒循环强度时更显著。

(2) 颗粒约束返混区内固含率径向分布在表观气速较高、颗粒循环强度相对较小时与常规提升管相似，在表观气速较低、颗粒循环强度较大时，在颗粒约束返混区上部靠近提升管出口区域局部固含率最大值出现在量纲 1 半径 $\Phi = 0.7$ 处；随着上部流化床内颗粒静床高度的增加，颗粒约束返混区局部固含率均增加。

(3) 颗粒约束返混区的约束指数在靠近提升管出口的过程中逐渐增大，气固流动受到分布器及上部流化床层的约束作用逐渐增强。

符 号 说 明

Ar ——Archemides 数, $Ar = d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g / \mu_g^2$

D_r ——提升管直径, m

d_p ——颗粒平均粒径, μm

Fr ——Froude 数, $Fr = U_g / \sqrt{gd_p}$

G_s ——颗粒循环强度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

g ——重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

H ——提升管总高度, m

H_b ——流化床内的颗粒静床高度, m

h ——提升管轴向高度, m

L, L_1 ——分别为颗粒约束返混区和颗粒加速区长度, m

R ——提升管半径, m

R_i ——约束指数

r ——提升管径向位置, m

$U_{b,g}, U_g$ ——分别为流化床和提升管内表观气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

U_i ——终端沉降速度, $U_i = 1.74 \sqrt{gd_p (\rho_p - \rho_g) / \rho_g}$, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

ϵ_s ——局部固含率

ϵ'_s ——终端固含率, $\epsilon'_s = G_s / [\rho_p (U_g - U_i)]$

$\bar{\epsilon}_s$ ——截面平均固含率

$\bar{\epsilon}_{s,e}, \bar{\epsilon}_{s,e}^*$ ——分别为实际截面平均固含率和理论截面平均固含率

Φ ——提升管量纲 1 半径

μ_g ——气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

ρ_g, ρ_p ——分别为气体和颗粒密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

References

- [1] Yang Guangfu (杨光福), Tian Guangwu (田广武), Gao Jinsen (高金森). Reaction behavior and reaction heat of FCC naphtha olefin reformulation. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2007, **58** (6): 1432-1438
- [2] Luo Qiang (罗强), Zhang Weiyi (张威毅), Zhang Yang (张杨), Song Yang (宋阳). Commercial application of olefin reduction technology with auxiliary reactor for FCC naphtha upgrading. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 2006, **37** (1): 22-26
- [3] Hou Shuandi (侯栓弟). Numerical simulation of FCC gasoline catalytic conversion process. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2007, **58** (3): 623-629
- [4] Xu Cong (徐聪), Yuan Zhangfu (袁章福). Simulation of combined fluidized bed for producing titanium tetrachloride. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2004, **59** (9): 1459-1468
- [5] Huang Kefeng (黄克峰), Mao Anguo (毛安国), Xu Kejia (许克家), Hou Shuandi (侯栓弟). Cold-model study on a new FCC reactor system. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 2006, **37** (7): 47-53
- [6] Li Wenbing (李文兵), Yuan Zhangfu (袁章福), Yang Chengyan (杨成砚), Zheng Shaohua (郑少华), Liao Daihua (廖代华), Liao Ronghua (廖荣华). Study on a cold condition for a serial fluidized bed reactor. *Modern Chemical Industry* (现代化工), 2003, **23** (suppl.): 185-187
- [7] Xu Youhao (许友好), Zhang Jiushun (张久顺), Long Jun (龙军), He Mingyuan (何鸣元), Xu Hui (徐惠), Hao Xiren (郝希仁). Development and commercial application of FCC process for maximizing iso-paraffins (MIP) in cracked naphtha. *Engineering Science* (中国工

- 程科学), 2003, **5** (5): 55-58
- [8] Xu Youhao (许友好), Zhang Jiushun (张久顺), Long Jun (龙军). A modified FCC process MIP for maximizing *iso*-paraffins in cracked naphtha. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 2001, **32** (8): 1-5
- [9] Jin Y. The influence of exit structures on the axial distribution of voidage in fast fluidized bed//Kwauk M, Kunii D. Fluidization'88 Science and Technology. Beijing: Science Press, 1988: 165-173
- [10] Schnitzlein M G, Weinstein H. Flow characterization in high velocity fluidized beds using pressure fluctuations. *Chemical Engineering Science*, 1988, **43**: 2605-2614
- [11] Jin Yan (金燕), Zheng Qiayu (郑洽余). Experimental study on effects of exit geometric structures on performance of circulating fluidized bed boilers. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 1999, **20** (1): 129-132
- [12] Chen Limei (陈丽梅), Jin Yan (金燕). The effect of the exit configurations on the bed density of the circulating fluidized bed axial boiler. *Journal of Taiyuan University of Technology* (太原理工大学学报), 2006, **37**: 140-142
- [13] Cheng Yi (程易), Wei Fei (魏飞), Jin Yong (金涌). Classification of entrance and exit effects on the flow pattern in risers. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 1997, **28** (3): 41-46
- [14] Huang Weixing (黄卫星), Yi Bin (易彬), Yang Ying (杨颖), Pan Yongliang (潘永亮). Axial distributions of averaged solids holdups in a 16 m high CFB riser. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* (四川大学学报: 工程科学版), 2000, **32** (6): 38-41
- [15] Huang Weixing (黄卫星), Shi Yanfu (石炎福), Zhu Jingxu (祝京旭). Solids holdups of gas-solid two-phase upward flow in fully developed region of CFB riser. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2001, **52** (11): 963-968