

# Diffusion and mixing behaviors of nozzle jet in the gas–solid riser

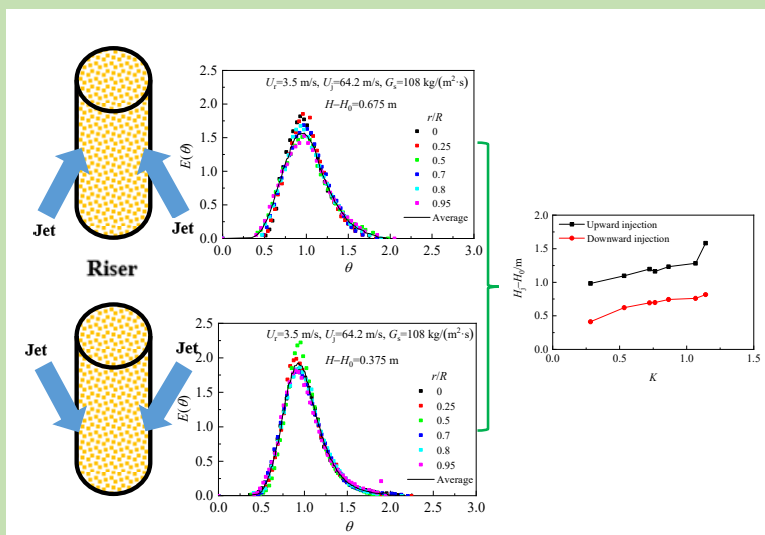
Zihan YAN, Jun XU, Yiping FAN, Chunxi LU\*

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

**Abstract:** The gas tracer technology was employed in this research to investigate the jet diffusion and its mixing with particles in the gas–solid riser. Studies were finished in a large scale cold model riser. In order to investigate the influence of different types of jets, both upward and downward injections were used during experiments. By introducing the jet characteristic concentration, the radial distributions of jet after injecting into the riser were obtained. Results showed that the distribution of jet concentration was more uniform for the case of downward injection. By detecting the tracer gas at various axial and radial points, the local residence time distributions of feed jet were obtained. On this basis, the dimensionless variance was calculated and comparison between upward and downward injections was made. It showed that the values of variance and their fluctuations were large at most axial cross sections when the jet was upward, indicating some serious local backing-mixing of feed jet. If the direction of injection changed to downward, the calculated value of variance was large under the feed nozzles, while the value of variance was small and its radial distribution was uniform at the locations above nozzles. This result meant that the jet-solid mixing flow can change into the likely plug flow from a likely full mixed flow easily and quickly under the influence of downward injection. Based on experimental results, the residence time variance was fitted with operating conditions and axial height. Empirical formulas for the cases of both upward and downward injections were obtained. Finally, comparing fitted results with the variance value in the riser full mixing zone, the influence height of jet in the riser was calculated. Results showed that the influence height of feed jet can be shortened by 50% if the downward injection was chosen.

By detecting the tracer gas at various axial and radial points, the local residence time distributions of feed jet were obtained. On this basis, the dimensionless variance was calculated and comparison between upward and downward injections was made. It showed that the values of variance and their fluctuations were large at most axial cross sections when the jet was upward, indicating some serious local backing-mixing of feed jet. If the direction of injection changed to downward, the calculated value of variance was large under the feed nozzles, while the value of variance was small and its radial distribution was uniform at the locations above nozzles. This result meant that the jet-solid mixing flow can change into the likely plug flow from a likely full mixed flow easily and quickly under the influence of downward injection. Based on experimental results, the residence time variance was fitted with operating conditions and axial height. Empirical formulas for the cases of both upward and downward injections were obtained. Finally, comparing fitted results with the variance value in the riser full mixing zone, the influence height of jet in the riser was calculated. Results showed that the influence height of feed jet can be shortened by 50% if the downward injection was chosen.

**Key words:** riser; jet; residence time



收稿: 2019-10-17, 修回: 2019-12-03, 网络发表: 2019-12-16, Received: 2019-10-17, Revised: 2019-12-03, Published online: 2019-12-16

基金项目: 博士后创新人才支持计划(编号: 216486); 中国石油大学(北京)科研基金资助(编号: 2462018YJRC016)

作者简介: 闫子涵(1989-), 男, 吉林省临江市人, 博士后, 化学工程与技术专业, E-mail: yanzihan2007@163.com; 卢春喜, 通讯联系人, E-mail: lcx725@sina.com.

**引用格式:** 闫子涵, 许峻, 范怡平, 等. 喷嘴射流在气固提升管内的扩散和混合行为. 过程工程学报, 2020, 20(7): 798–806.

Yan Z H, Xu J, Fan Y P, et al. Diffusion and mixing behaviors of nozzle jet in the gas–solid riser (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(7): 798–806, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219320.

喷嘴射流在气固提升管内的扩散和混合行为

闫子涵， 许 峻， 范怡平， 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：**为获得不同形式射流在提升管内的扩散特征和气固混合行为，利用气体示踪技术，在大型提升管冷模实验装置中考察向上和向下倾斜两种射流的影响。通过引入射流特征浓度获得射流相在提升管内的分布特征，通过计算停留时间方差获得提升管内射流的局部停留时间分布特征，根据停留时间方差与操作条件及轴向高度的拟合结果计算射流影响区高度。结果表明，斜向下的射流进入提升管后沿径向分布更均匀，且可使混合流体在较短的距离内实现由近似“全混流”到近似“平推流”的过渡，与斜向上的射流相比，向下倾斜的射流可缩短射流混合区高度约 50%。

**关键词：**提升管；射流；停留时间

中图分类号：TE624.41      文献标识码：A      文章编号：1009-606X(2020)07-0798-09

1 前 言

催化裂化是炼油工业中重要的二次加工过程，在炼油工业中地位显著，提供了我国市场 70%以上的汽油和约 30%的柴油产品。在现代的催化裂化装置中，提升管反应器是进行裂化反应的主要场所，高价值的产品如汽油、柴油、液化气等均在其中得到<sup>[1]</sup>。提升管内原料油经过高效雾化喷嘴喷入反应器后，与再生器的再生催化剂迅速混合发生反应。研究<sup>[2]</sup>表明，50%以上的裂化反应在提升管的进料混合区内完成，该区域内的原料射流与催化剂颗粒间的流动及混合行为将直接影响催化裂化的产品质量和分布。针对该区域内气固流动及混合特征，许多研究者进行了实验和数值模拟。范怡平等<sup>[3-6]</sup>及鄂承林等<sup>[7,8]</sup>通过大型冷模实验获得了提升管进料混合段内颗粒相和射流相的轴径向分布特征，考察了不同操作条件的影响，得到了有利于气固两相分布的适宜操作条件。Theologos 等<sup>[9,10]</sup>将集总动力学模型与流体动力学结合，对进料混合段内的汽化过程及结构尺寸等参数的影响进行了模拟和预测。高金森等<sup>[11-13]</sup>利用所建立的气-液-固三相流动反应模型，对提升管进料混合段内复杂的原料雾化、流动、传热及反应过程进行了模拟，其结

果反映了工业提升管反应器进料区内的复杂流动及反应过程。王洪斌等<sup>[14]</sup>采用三维数值模拟考察了喷嘴射流角度及速度对提升管内流动的影响，结果表明射流角度对提升管内流动和反应均有较大影响。陈昇等<sup>[15]</sup>采用数值模拟的方法考察了不同射流方向对进料混合区内流动行为的影响，结果表明喷嘴向下倾斜进料对油剂间的接触和混合更有利。Yan 等<sup>[16]</sup>及王钊等<sup>[17]</sup>在此基础上采用冷模实验的方法进一步验证了上述结论。上述针对提升管进料混合区的研究中，更多关注颗粒相和射流相的轴径向分布特征，而针对射流扩散特征和混合行为的研究相对较少。本工作利用气体示踪技术，通过大型冷模实验考察了不同射流方式对进料混合区内气固流动行为的影响。

2 实 验

2.1 实验介质及操作条件

固体颗粒采用典型的 FCC 平衡剂，该颗粒为 A 类颗粒，主要物性参数见表 1。实验中的流化气体介质为常温空气。受冷模实验条件所限，考虑实际工业反应中原料油的汽化过程极短(约 0.2 s)<sup>[18]</sup>，采用空气作为喷嘴射流介质。

表 1 FCC 催化剂物性参数  
Table 1 Physical parameters of FCC catalyst

Parameter	Average particle diameter/ $\mu\text{m}$	Particle diameter/ $\mu\text{m}$	Particle density/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Bulk packing density/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Value	79	30~90	1200	929

结合工业催化裂化提升管反应器的操作条件，实验中预提升段气速  $U_r=2\sim4\text{ m/s}$ ，射流在喷嘴出口的速度

$U_j=60\sim80\text{ m/s}$ ，装置中提升管内颗粒循环强度  $G_s=60\sim120\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

## 2.2 实验装置及研究对象

实验在大型冷模循环流化床中进行,图1为实验装置示意图。提升管内径 $\Phi=186\text{ mm}$ ,装置总高 $14000\text{ mm}$ ,射流喷嘴的安装位置为预提升气体分布器以上 $4.5\text{ m}$ 。

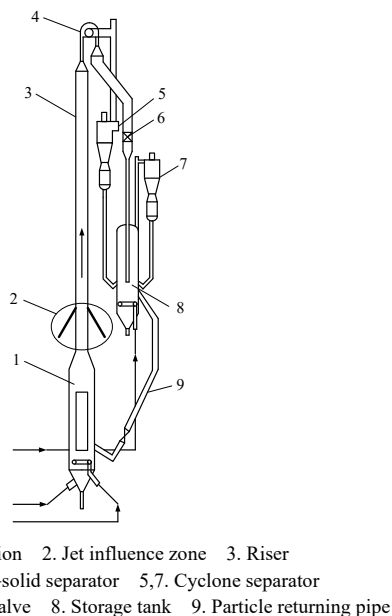


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

为考察不同形式喷嘴射流对提升管内气固流动及混合特征的影响,采用喷嘴向上倾斜和向下倾斜两种方式,如图2所示。为方便对比分析,喷嘴与提升管轴向的夹角均为 $30^\circ$ 。

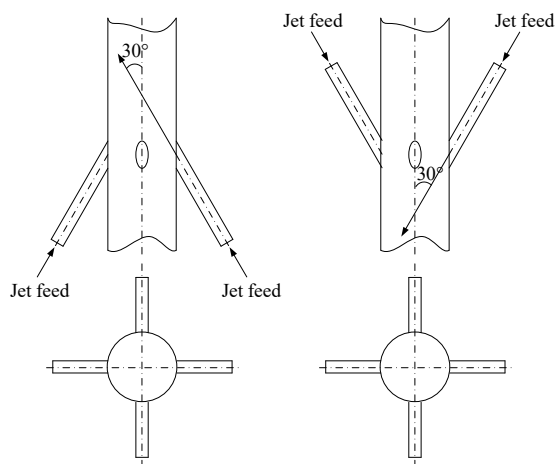


图2 提升管射流混合区的结构示意图

Fig.2 Structure sketch of the jet mixing zone in riser

## 2.3 实验方法

采用脉冲气体示踪方法,将氦气作为示踪气体与喷

嘴射流一同注入提升管中。在提升管内不同轴向位置用采样管将气体引出<sup>[19]</sup>,引出后的气体通过SR-2050型在线热导式气体分析仪进行在线分析,获得不同轴向位置示踪气体的浓度分布和浓度变化,用于分析喷嘴射流与预提升气固两相流的混合行为。提升管内固含率采用PV-6D型光纤颗粒浓度测量仪测定,测量时由光源发出的光信号经光纤照射到颗粒群,反射光被另外一束光纤接收后转换为电压信号,其强度与光强成正比,放大后的电压信号经A/D转换可反映颗粒浓度,进而可求得固含率。

结合文献研究结果<sup>[20,21]</sup>,对于喷嘴射流向上和向下倾斜两种方式,分别选取不同的轴向测量截面。将射流喷嘴入口所在截面设为基准截面 $H_0$ ,射流斜向上倾斜时,轴向测量截面为 $H_0+0.185\text{ m}$ , $H_0+0.375\text{ m}$ , $H_0+0.675\text{ m}$ , $H_0+1.075\text{ m}$ ;射流斜向下倾斜时,轴向测量截面为 $H_0-0.185\text{ m}$ , $H_0+0.185\text{ m}$ , $H_0+0.375\text{ m}$ , $H_0+0.675\text{ m}$ 。在每一个轴向测量截面,由中心向壁面选取6个不同的径向测点,分别为 $r/R=0, 0.25, 0.5, 0.7, 0.8, 0.95$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 射流特征浓度分布

氦气示踪仪的分析软件能直接给出氦气在采样点的实际浓度 $c_i$ 。由于测量时只能将纯气相引入热导分析系统进行分析,测量仪器给出的浓度为采样点处气相中氦气的浓度,而非气固混合物中氦气的浓度。由于总气量太大,实验中难以实现每次进入喷嘴中的示踪气体量与喷嘴进气的总量保持固定比例的稳态示踪,为精确控制示踪气体的射入量,每次注入喷嘴中氦气量保持固定。由于流场高度脉动,难以保证氦气注入量和喷嘴进气量保持固定比例,给不同实验工况下的比较带来一定困难。为消除以上两方面因素带来的影响,引入射流特征浓度 $C_{0i}$ ,用于反映喷嘴射流在进料段气固混合物中的分布,如式(1)所示。由式(1)可看出, $C_{0i}$ 为相对量,反映了任意测量截面内射流浓度沿径向的相对变化。

$$C_{0i} = \frac{c_i(1-\varepsilon_{pi})}{\frac{1}{A} \sum_{i=1}^n c_i(1-\varepsilon_{pi})A_i} \cdot \frac{Q_j}{Q_j + Q_a} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_{pi}$ 为局部固含率, $Q_j$ 为喷嘴射流总气量( $\text{m}^3/\text{h}$ ), $Q_a$ 为预提升气量( $\text{m}^3/\text{h}$ ), $A$ 为提升管横截面积( $\text{m}^2$ ), $A_i$ 为测点所在环形区域的面积( $\text{m}^2$ ), $c_i(1-\varepsilon_{pi})$ 为示踪气在气固混合物中的比例, $n$ 为径向测点个数。 $Q_j/(Q_j+Q_a)$ 为流量修正项,引入此项后,射流相流体的流量越大,提升管内氦气的平均浓度越高,而预提升气量越大,则氦气的浓度将越低,与实际情况相符。

图 3 为提升管内射流向上倾斜和向下倾斜时射流特征浓度的分布。从图 3(a)可看出, 射流斜向上倾斜时, 初始阶段(喷嘴以上 0.185 m 截面)靠近中心区的射流特征浓度较低, 表明喷嘴射流难以迅速扩散至提升管中心, 导致射流特征浓度在该截面沿径向的分布极不均匀, 较多的射流相流体集中于径向位置  $r/R \approx 0.2 \sim 0.6$  的区域。随轴向高度上升, 提升管中心区的射流浓度逐渐增大, 但沿径向的分布仍不均匀。随高度进一步提升, 射流特征浓度沿径向的分布逐渐趋于均匀, 表明射流与预提升气固两相流逐渐完成混合。

由图 3(b)可看出, 射流向下倾斜时, 整个射流影响区域内, 射流特征浓度沿径向的分布比喷嘴向上时更均

匀, 尤其是在射流与催化剂颗粒最初始的接触阶段(喷嘴以下 0.185 m)。在催化裂化提升管反应器中, 此分布特征对于油剂之间的接触和反应极为有利。在喷嘴以上 0.185 m 截面, 射流特征浓度呈现出中心区域相对较高而边壁区相对较低的分布特征, 且沿径向的变化梯度较大。当向下的喷嘴射流进入提升管后将很快到达提升管中心, 多股射流在提升管中心汇聚, 与预提升来流混合后共同沿提升管向上运动, 因而在喷嘴截面附近, 提升管中心处的射流特征浓度相对较高。随后, 随轴向高度增加, 射流与预提升来流逐渐混合均匀, 射流特征浓度沿径向的分布趋于均匀。

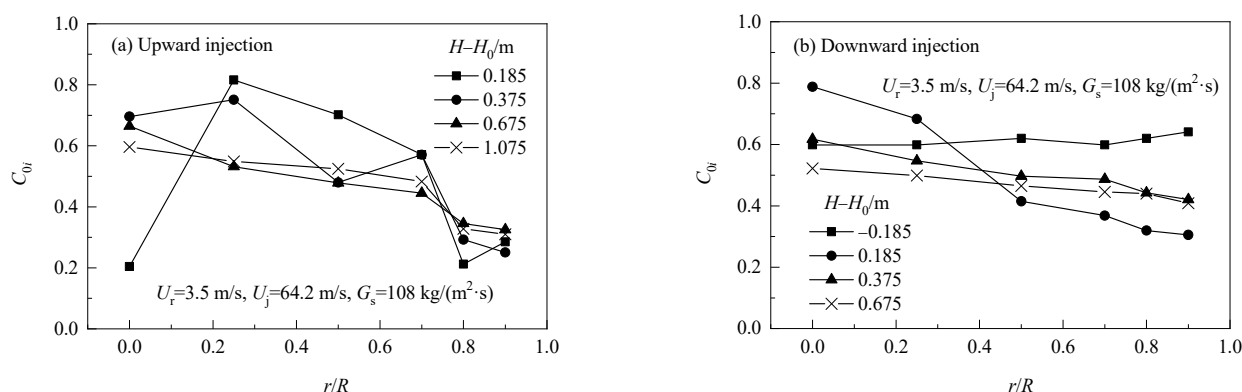


图 3 射流斜向上和向下时提升管内的射流特征浓度的分布

Fig.3 Distributions of jet characteristic concentration for upward and downward injections in riser

### 3.2 局部停留时间分布

实际的反应器中, 由于存在流体流速不均匀分布、湍流扩散、强制对流等影响因素, 流体质点形成一定的停留时间分布。根据停留时间分布曲线的特征可描述反应物在反应器内的流动状况。目前普遍使用的停留时间分布实验测定方法为示踪响应法, 通过示踪剂跟踪流体在系统内的停留时间。为研究喷嘴射流进入提升管后与预提升气固两相流的混合行为, 采用脉冲示踪的方法, 在进料喷嘴射流中脉冲注入氦气作为示踪剂, 同时在提升管内不同轴向位置处检测氦气浓度随时间的变化。将轴向位置的测点视为由喷嘴出口截面  $H_0$  至该轴向位置处所组成反应器的出口, 则可根据所得到的停留时间分布曲线分析喷嘴射流在各轴向区域的流动特征。为充分反映截面内射流相与催化剂颗粒和预提升气的混合特征, 实验中每个测量截面选取 6 个径向测点, 对任意时刻各径向测点得到的浓度  $c_i(t)$  进行加权平均, 作为该截面该时刻的平均浓度  $c(t)$ :

$$c(t) = \frac{1}{An} \sum_{i=1}^n c_i(t) A_i \quad (2)$$

式中,  $A_i$  为测点所在环形区域的面积( $\text{m}^2$ ),  $A$  为提升管横截面积( $\text{m}^2$ ),  $n$  为径向测点个数。

采用上述方法可分别得到喷嘴向上和向下倾斜时提升管内不同轴向测量截面的浓度-时间响应曲线。脉冲法得到的停留时间分布代表了物料在反应器中的停留时间密度, 即  $E(t)$ 。根据测点处的浓度响应曲线, 由式(3)可计算  $E(t)$ 。

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^\infty c(t) dt} \quad (3)$$

为了消除时间尺度对结果带来的影响, 数据处理时使用无因次停留时间  $\theta$ ,  $\theta = t/\bar{t}_i$ 。用  $\theta$  表示的停留时间分布密度为

$$E(\theta) = \bar{t}_i E(t) \quad (4)$$

图 4 和 5 分别为射流向上和向下倾斜时提升管内

不同轴向位置的停留时间分布密度  $E(\theta)$ , 可以反映不同时间流经检测点示踪剂的概率分布。部分测点停留时间分布密度曲线  $E(\theta)$  的拖尾较长, 表明流经该测点的示踪

气体在装置内的停留时间很长, 通常由于返混造成。由于进料段范围内各轴向测点距离很近, 各测点所得  $E(\theta)$  曲线可反映测点所在局部区域的射流相返混特征。

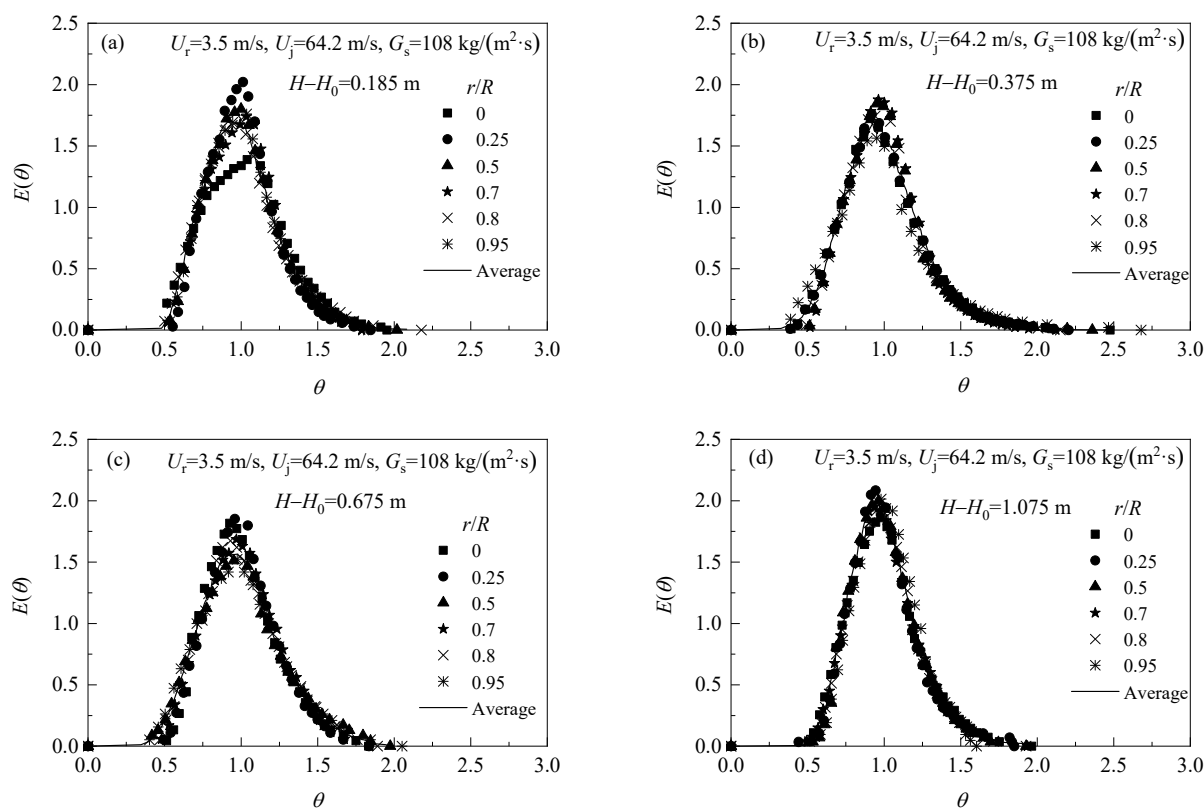


图4 射流向上倾斜时的  $E(\theta)$  分布  
Fig.4 Distributions of  $E(\theta)$  for upward injection

对比图4和5可看出, 喷嘴向上倾斜时, 多个测量截面得到的  $E(\theta)$  曲线均存在“拖尾”现象, 表明在某些区域存在严重的局部返混; 当喷嘴向下倾斜时, 在喷嘴以上截面,  $E(\theta)$  曲线多呈现“窄而高”的近似对称分布, 表明射流与预提升来流混合后可很快恢复为以近似“平推流”的方式沿提升管向上运动, 因而有望消除因严重局部返混引起的结焦等不良现象。

为了更为直观地反映局部混合特征, 用式(5)计算所得停留时间分布密度曲线的方差  $\sigma_\theta^2$ 。方差是停留时间分布离散程度的度量, 数值越大, 表明所在区域流动的返混程度越大。

$$\sigma_\theta^2 = \int_0^\infty \theta^2 E(\theta) d\theta - 1 \quad (5)$$

图6为射流向上和向下倾斜时提升管内不同轴向位置各测点处所得的停留时间方差。

由图6可知, 射流斜向上倾斜时, 在初始阶段, 各径向测点的方差数值波动较大, 表明射流在不同的局部区域停留时间分布差异较大, 在某些局部区域会出现较严重的返混; 射流斜向下倾斜时, 只在喷嘴以下0.185 m截面各径向位置的方差数值相对较高, 射流与催化剂最初始的接触阶段该特征对油剂间的混合有利, 在喷嘴以上各截面, 停留时间方差沿径向的变化不大且数值相对较低, 基本在0.05以下, 表明流动与平推流的形式较接近。对于催化裂化提升管的进料混合区, 较理想的条件是原料射流与预提升催化剂来流在初始接触时以接近“全混流”的状态充分混合, 而后在尽可能短的时间内恢复为接近“平推流”的流动。根据上述局部停留时间分布特征可明显看出, 斜向下的射流方式对于催化裂化提升管内油剂间的混合更有利。

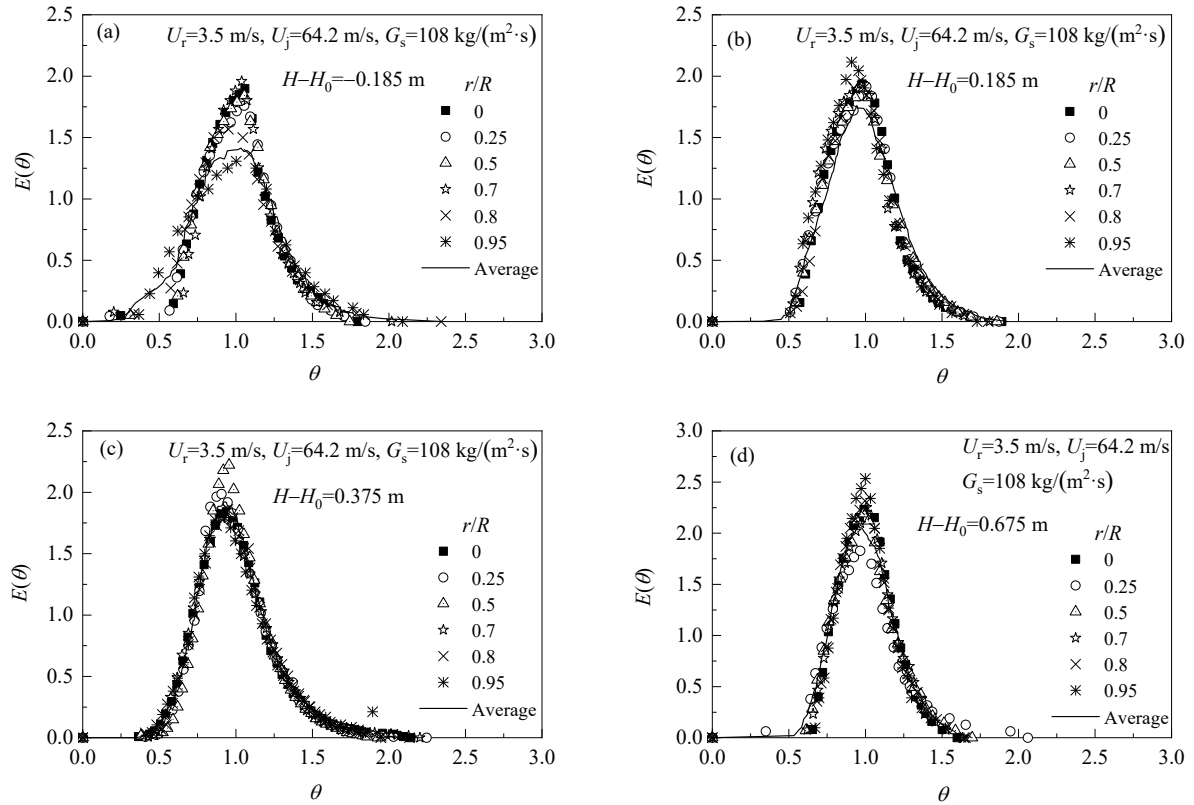


图5 射流向下倾斜时的  $E(\theta)$  分布  
Fig.5 Distributions of  $E(\theta)$  for downward injection

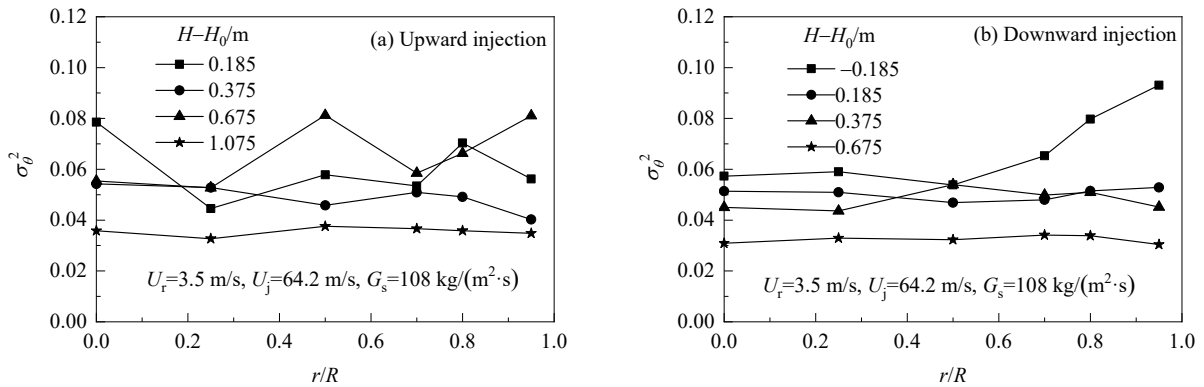


图6 射流向上和向下倾斜时的停留时间方差分布  
Fig.6 Distributions of residence time variance for upward and downward injections

### 3.3 射流影响区高度

对于提升管内充分发展区域的气相流动状况, 学者通过实验和数值模拟等方法进行了研究<sup>[22-24]</sup>, 结果表明操作条件对提升管内气相的流动状况影响较大。Mahmoudi 等<sup>[25]</sup>通过大量的实验数据, 根据提升管内  $F(t)$  曲线的分布特征, 得到了相关参数与操作条件的关系式, 由此可得到提升管充分发展区(即无射流影响的区域)内的停留时间方差  $\sigma_\theta^2$  与操作条件的关系[式(6)]。

$$\sigma_\theta^2 = 0.489 U_f^{-1.052} G_s^{-0.149} \quad (6)$$

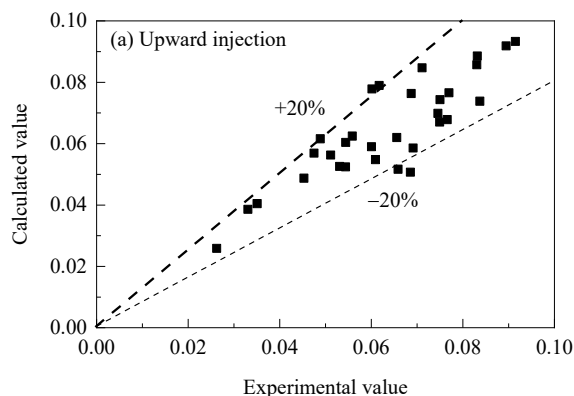
由于提升管射流影响区内的操作条件影响因素复杂, 为充分考虑各参数的影响, 用射流与预提升气固两相流的动量比  $K$  统一各操作条件的影响。

$$K = \frac{M_j}{M_r} = \frac{N \rho_j U_j^2 A_j}{(\rho_r U_r^2 + G_s v_p) \frac{\pi}{4} D^2} \quad (7)$$

式中,  $\rho_j$  和  $\rho_r$  分别为喷嘴射流及预提升气体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $N$  为喷嘴个数,  $U_j$  为喷嘴出口气速 ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $U_r$  为预提升气速 ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $A_j$  为喷嘴出口面积 ( $\text{m}^2$ ),  $G_s$  为提升管内颗粒循环强度 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ],  $v_p$  为预提升段颗粒平均速度 ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $D$  为提升管直径 ( $\text{m}$ )。

根据 3.2 节所得不同操作条件下的停留时间方差, 可拟合得到方差与操作条件(动量比  $K$ )及轴向高度  $H$  间的关联式。

喷嘴向上倾斜时:



喷嘴向下倾斜时:

$$\sigma_{\theta}^2 = K^{-0.006} \left( \frac{H}{H_0} \right)^{-4.386} \left( \frac{H}{D} \right)^{-0.838} \quad (9)$$

图 7 为停留时间方差实验值与拟合计算值的比较, 相对误差基本在  $\pm 20\%$  以内。

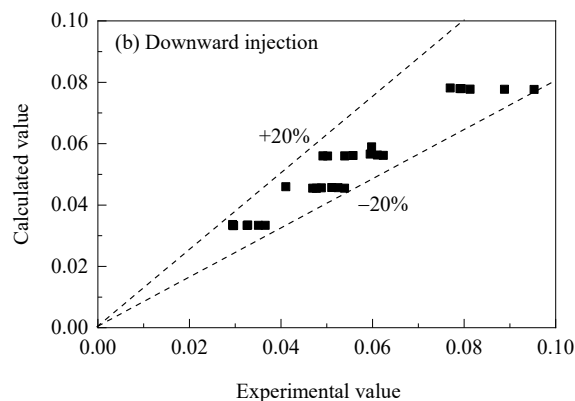


图 7 停留时间方差实验值与计算值的对比

Fig.7 Comparisons of residence time variance between experimental values and calculated values

操作条件确定后, 可由式(6)得到提升管内充分发展区内的停留时间方差, 将其与式(8)或(9)结合, 即可得到进入充分发展区的高度  $H$ , 进而可以确定射流影响区的高度  $H_j$ 。射流向上和向下倾斜时的射流影响区高度的计算结果如图 8 所示。

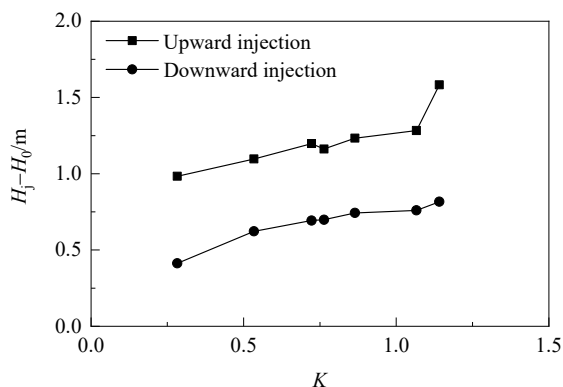


图 8 射流影响区高度的计算结果

Fig.8 Calculation results of jet influence height

从图 8 可看出, 射流向上和向下时射流影响区高度均随射流与预提升气固两相流动量比增大而增加。射流向下倾斜时, 提升管内的射流影响区高度明显缩短, 即

射流可在更短的时间内实现与预提升催化剂流的充分混合。与斜向上的射流相比, 采用斜向下的喷嘴射流可使射流影响区高度缩短约 50%。

## 4 结论

采用气体示踪技术在大型冷模实验装置中考察了提升管射流影响区内射流相的分布特征及其与催化剂颗粒的混合行为, 并对向上和向下两种射流方式进行了对比, 得到以下结论:

(1) 通过引入射流特征浓度可获得不同射流形式下影响区内的射流分布特征, 斜向下的射流进入提升管后沿径向分布更均匀。

(2) 通过在不同轴向位置对示踪气体进行检测, 可获得射流的局部停留时间分布特征及其方差。射流斜向下时, 大部分轴向截面获得的停留时间方差均小于 0.05, 提升管内的流动更易实现由接近“全混流”到接近“平推流”的过渡。

(3) 得到停留时间方差与操作条件及轴向高度间的关联式, 以此为基础计算了不同操作条件下的射流影响区高度。射流影响区高度随射流与预提升气固两相流动量比增大而增加; 采用斜向下的喷嘴射流可使射流影响

区高度缩短约 50%。

## 参考文献

- [1] 汪申, 时铭显. 我国催化裂化提升管反应系统设备技术的进展 [J]. 石油化工动态, 2000, 8(5): 46–50.  
Wang S, Shi M X. Progress of domestic FCC riser reactor technology [J]. Petrochemical Industry Trends, 2000, 8(5): 46–50.
- [2] 高金森, 徐春明, 杨光华, 等. 催化裂化提升管反应器气液固 3 相流动反应的数值模拟 II. 原料液雾流动气化过程的数值模拟 [J]. 石油学报(石油加工), 1999, 15(4): 16–21.  
Gao J S, Xu C M, Yang G H, et al. Numerical simulation on the gas–liquid–solid three-phase flow-reaction in FCC riser reactors II. numerical simulation on the flow and evaporation of the feed spray [J]. Acta Petroleisina (Petroleum Processing Section), 1999, 15(4): 16–21.
- [3] 范怡平, 蔡飞鹏, 时铭显, 等. 催化裂化提升管进料段内气固两相混合流动特性及其改进 [J]. 石油学报(石油加工), 2004, 20(5): 13–19.  
Fan Y P, Cai F P, Shi M X, et al. The gas–solid two-phase flow and the improvement in the feedstock injection-mixing zone of FCC riser [J]. Acta Petroleisina (Petroleum Processing Section), 2004, 20(5): 13–19.
- [4] 范怡平, 叶盛, 卢春喜, 等. 提升管反应器进料混合段内气固两相流动特性(I)实验研究 [J]. 化工学报, 2002, 53(10): 1003–1008.  
Fan Y P, Ye S, Lu C X, et al. Gas–solid two phase flow in the feed injection zone of FCC riser reactions (I) experimental research [J]. CIESC Journal, 2002, 53(10): 1003–1008.
- [5] 范怡平, 叶盛, 卢春喜, 等. 提升管反应器进料混合段内气固两相流动特性(II)理论分析 [J]. 化工学报, 2002, 53(10): 1009–1014.  
Fan Y P, Ye S, Lu C X, et al. Gas–solid two phase flow in the feed injection zone of FCC riser reactions (II) analytical research [J]. CIESC Journal, 2002, 53(10): 1009–1014.
- [6] 范怡平, 时铭显, 叶盛, 等. 多股射流在提升管内的扩散与流动 [J]. 过程工程学报, 2002, 2(增刊): 405–409.  
Fan Y P, Shi M X, Ye S, et al. Diffusion and flow characteristics of multi-jet in the feed injection zone of FCC riser reactors [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2002, 2(S1): 405–409.
- [7] 鄂承林, 范怡平, 卢春喜, 等. 喷嘴进料对提升管进料段内颗粒浓度径向分布的影响 [J]. 过程工程学报, 2008, 8(1): 18–22.  
E C L, Fan Y P, Lu C X, et al. Effect of jet gas on solid hold-up profile in the feed injection section of the riser [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(1): 18–22.
- [8] 鄂承林, 蔡丹枫, 范怡平, 等. 喷嘴油气在提升管进料段的浓度径向分布及混合行为 [J]. 化工学报, 2010, 61(9): 2208–2216.  
E C L, Cai D F, Fan Y P, et al. Concentration distribution and mixing process of jet gas in feed injection zone of FCC riser [J]. CIESC Journal, 2010, 61(9): 2208–2216.
- [9] Theologos K N, Markatos N C. Advanced modeling of fluid catalytic cracking riser-type reactors [J]. AIChE Journal, 1993, 39(6): 1007–1017.
- [10] Theologos K N, Nikou I D, Lygeros A I, et al. Simulation and design of fluid-catalytic cracking riser-type reactors [J]. Computers and Chemical Engineering, 1996, 20(S1): S757–S762.
- [11] 高金森, 徐春明, 林世雄, 等. 催化裂化提升管反应器气液固 3 相流动反应的数值模拟 I. 气液固 3 相流动反应模型的建立 [J]. 石油学报(石油加工), 1999, 15(3): 16–22.  
Gao J S, Xu C M, Lin S X, et al. Numerical simulation on the gas–liquid–solid three-phase flow-reaction in FCC riser reactors I. development of the gas–liquid–solid three-phase flow-reaction model [J]. Acta Petroleisina (Petroleum Processing Section), 1999, 15(3): 16–22.
- [12] 高金森, 徐春明, 林世雄, 等. 催化裂化提升管反应器气液固 3 相流动反应的数值模拟 III. 流动传热及反应的数值模拟 [J]. 石油学报(石油加工), 1999, 15(5): 28–37.  
Gao J S, Xu C M, Lin S X, et al. Numerical simulation on the gas–liquid–solid three-phase flow-reaction in FCC riser reactors III. numerical simulation on the flow, heat transfer and reaction [J]. Acta Petroleisina (Petroleum Processing Section), 1999, 15(5): 28–37.
- [13] 高金森, 徐春明, 杨光华, 等. 催化裂化提升管反应器气液固 3 相流动反应的数值模拟 IV. 原料液雾油滴粒径变化的数值模拟 [J]. 石油学报(石油加工), 2000, 16(1): 26–30.  
Gao J S, Xu C M, Yang G H, et al. Numerical simulation on the gas–liquid–solid three-phase flow-reaction in FCC riser reactors IV. numerical simulation on the variation of the feed spray particles diameters [J]. Acta Petroleisina (Petroleum Processing Section), 2000, 16(1): 26–30.
- [14] 王洪斌, 徐春明. 渣油催化裂化提升管反应器性能的数值模拟—喷嘴射流速度与角度对流动反应的影响 [J]. 化工学报, 1999, 50(2): 200–207.  
Wang H B, Xu C M. Numerical simulation of the influence of injecting velocity and angle on flow and reaction in RFCC riser reactor [J]. CIESC Journal, 1999, 50(2): 200–207.
- [15] 陈昇, 王维, 闫子涵, 等. 基于 EMMS 曳力模型的提升管进料混合段模拟 [J]. 化学反应工程与工艺, 2014, 30(1): 71–78.  
Chen S, Wang W, Yan Z H, et al. Simulation of gas–solid mixing and flow in the feedstock zone of a riser by EMMS drag model [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2014, 30(1): 71–78.
- [16] Yan Z H, Fan Y P, Wang Z, et al. Dispersion of feed spray in a new type of FCC feed injection scheme [J]. AIChE Journal, 2016, 62(1): 46–61.
- [17] 王钊, 闫子涵, 范怡平, 等. 新型催化裂化提升管进料段内原料射流浓度分布的大型冷模实验研究 [J]. 过程工程学报, 2016, 16(1): 34–40.  
Wang Z, Yan Z H, Fan Y P, et al. Experimental study on distribution of feed jet gas concentration in the injection zone of a novel riser in a large scale cold mold [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(1): 34–40.
- [18] 刘德烈, 韩剑敏. LPC 型催化裂化反应进料喷嘴工业应用评价 [J]. 炼油设计, 1992, 2: 49–52.  
Liu D L, Han J M. Evaluation on commercial application of LPC type nozzle for FCC feed [J]. Petroleum Refinery Engineering, 1992, 2: 49–52.
- [19] 费广平, 李瑞军, 解东来, 等. 利用热导检测器实时检测混合气体组分含量的方法及装置 [J]. 化工进展, 2009, 28(12): 2257–2260.  
Fei G P, Li R J, Xie D L, et al. Method and apparatus for real-time gas concentration detection in gas mixture [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(12): 2257–2260.
- [20] Fan Y P, Ye S, Chao Z X, et al. Gas–solid two-phase flow in FCC riser [J]. AIChE Journal, 2002, 48(9): 1869–1887.
- [21] Yan Z H, Chen S, Wang Z, et al. Distributions of solids holdup and particle velocity in the FCC riser with downward pointed feed injection scheme [J]. Powder Technology, 2016, 304: 63–72.



- [22] Kruse M, Schoenfelder H, Werther J. Two-dimensional model for gas mixing in the upper dilute zone of a circulating fluidized bed [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1995, 73(5): 620–634.
- [23] Sterneus J, Johnsson F, Leckner B. Gas mixing in circulating fluidised-bed risers [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(1): 161–175.
- [24] Hua L N, Wang J W, Li J H. CFD simulation of solids residence time distribution in a CFB riser [J]. Chemical Engineering Science, 2014, 117: 264–282.
- [25] Mahmoudi S, Seville J P K, Baeyens J. The residence time distribution and mixing of the gas phase in the riser of a circulating fluidized bed [J]. Powder Technology, 2010, 203(2): 322–330.