

## 管型结构对提升管流动特性的影响

陈志伟<sup>1</sup>, 罗保林<sup>1</sup>, 冯伟<sup>2</sup>, 任天瑞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100080; 2. 中国石油化工洛阳石化工程公司, 洛阳 473005)

**摘要:**采用边壁补气模拟重油催化裂化提升管反应装置中气体的膨胀行为, 通过比较直管型提升管和锥型提升管中的气-固流动行为, 研究了锥形提升管结构对油气膨胀所带来的流动特征变化的适应与改善. 实验结果表明, 相对于直管型提升管, 锥型提升管对流化气量的变化有较好的适应能力, 且能有效地改善床层内的颗粒速度、空隙率的径向分布以及压力的轴向分布.

**关键词:**循环流化床; 提升管; 结构; 流动特征

**中图分类号:** TQ051.1<sup>+3</sup>    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-606X(2002)06-0485-06

### 1 前言

提升管中的气、固两相流动, 由于影响因素多, 流动规律相当复杂. 提升管反应器中气、固两相局部和整体流动结构的不均匀性, 直接影响到了循环流化的质量. 尤其在重油催化裂化反应装置中, 由于油气的受热膨胀和裂化反应所造成的气体体积增加, 对流体的流动行为产生了很大的影响, 使得反应器中的流动行为更为复杂. 对于提升管反应器的改造, 大部分都集中于气固相出口和入口<sup>[1-5]</sup>、以及内构件<sup>[6,7]</sup>的研究上. 在提升管形状的改变上, Schut等<sup>[8]</sup>研究了锥度较大的扩大段中气固两相的流动行为, 认为颗粒是沿着扩散型的流线运动的, 同时将产生大量的返混. 本文研究锥度较小、高度较高的倒锥型提升管扩大段中的流体流动行为, 并与直管相比较, 以考察提升管结构对流化气体体积改变所带来的流动特征的变化适应与改善.

### 2 实验装置

实验装置如图1所示. 装置由有机玻璃制成, 总高4500 mm. 分别采用直管和锥型提升管进行实验, 直管内径100 mm, 锥型管扩大段高度1000 mm, 最大内径150 mm, 最小内径与直管相同, 上端缩小段高度200 mm. 预提升器内径100 mm, 内输送管内径68 mm, 高度50 mm, 预提升蒸汽入口管内径30 mm, 与内输送管之间的距离200 mm, 喷嘴内径12 mm, 入射角度30°.

本工作对于提升管结构的改变主要体现在补气装置和锥型提升管. 实验中采用两个补气装置, 其中预提升补气装置以及预提升器采用LIU等<sup>[1]</sup>的研究成果, 该补气装置用以遏制喷嘴区域颗粒的“贴壁效应”, 并防止颗粒在喷嘴下方内输送管外堆积; 而在提升管内使用沿边壁环隙的提升管补气装置来模拟气体在生产装置中的膨胀行为. 两种补气方式基本相同, 气体首先进入补气装置的气包, 通过均匀分布于管壁上的直径10 mm的8个小孔进入喷嘴区域或提升管; 进入的气体由于内输送管的阻挡, 由环隙沿管壁向上进入喷嘴区域或提升管. 补气量以内管和环隙的表现气速相等为原则.

实验固体物料采用FCC催化剂颗粒, 密度 $2.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 平均粒径 $5.29 \mu\text{m}$ ; 气体采用空气, 密度 $1.168 \text{ kg/m}^3$ , 粘度 $1.808 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

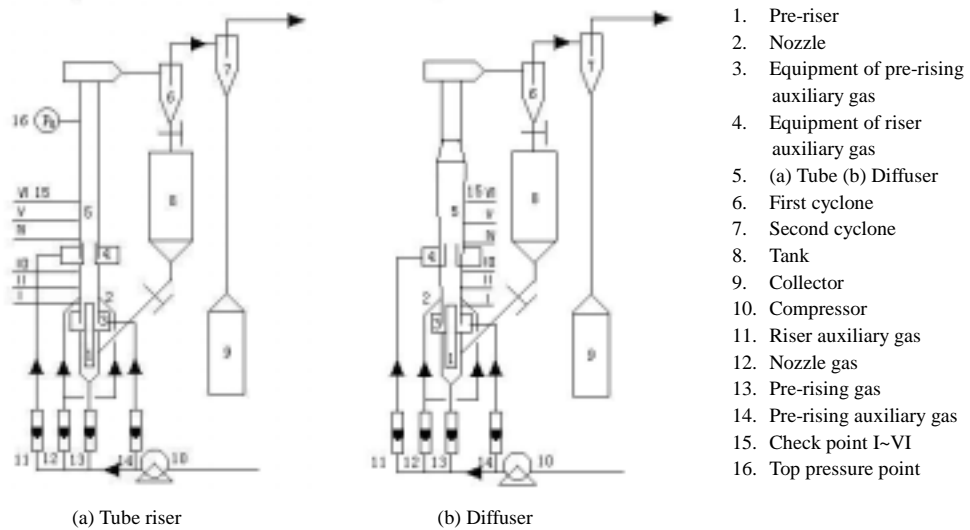


图 1 实验装置流程图

Fig.1 The sketch of experimental apparatus

实验测量喷嘴以下 0.2 m 到喷嘴以上 1.5 m 处的轴、径向颗粒速度、空隙率分布和床层压力轴向分布随气体流量和颗粒循环量的变化。从预提升器内输送管出口往上沿轴向依次设置 6 个测量点(I~VI)，测量点间隔为 200 mm。采用中国科学院过程工程研究所研制的 PV-4A 颗粒速度和空隙率光纤测量仪，基于相关性方法测量颗粒的速度和床层空隙率(颗粒浓度)。压力采用 U 型管测量，从最高测量点向下，间隔 200 mm 设 9 个测压点。催化剂循环量的测定采用称重法，设备运行时关闭料斗入口阀门，使循环物料进入收集罐中并计时，由测定的  $\Delta m/\Delta t$  计算得到颗粒循环量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 进口气量比率变化的影响

在固定总气量的情况下，改变预提升气量和喷嘴气量的比例，测量装置(a)中提升管补气结构上方(第 IV 点)的空隙率和速度的径向分布，得到图 2 所示的结果。

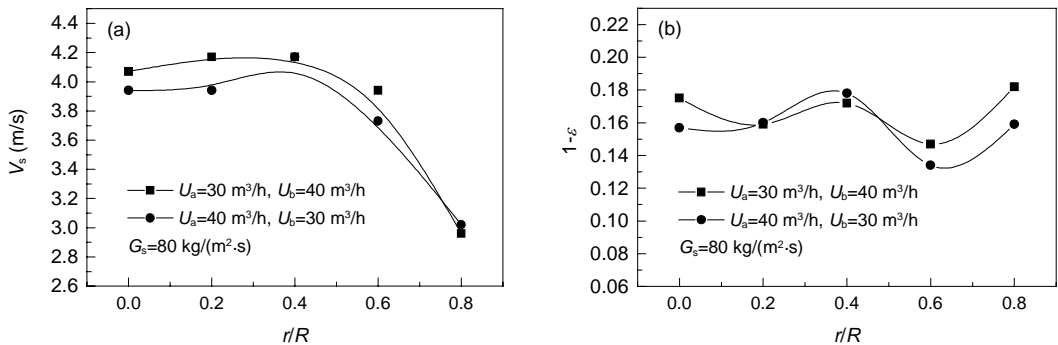


图 2 相同总气量下颗粒浓度和颗粒速度径向分布比较

Fig.2 Radial profile of solid fraction and particle velocity under the same global gas flux

在总气量不变的情况下，不同喷嘴气和预提升气比率下速度和空隙率的分布曲线非常接近，

说明在喷嘴区域发生了充分的混合, 消除了不同气量比率的变化对补气装置上方流型的影响. 考虑到测量误差及提升管内的波动, 在本实验的操作条件范围内, 可以认为流动特性的变化仅和总气量有关, 而与各部分气量的变化无关.

### 3.2 锥型提升管流动特征

#### 3.2.1 颗粒速度的径向分布

锥型提升管中的颗粒速度径向分布总体表现为中心高边缘低, 随颗粒循环量的增大和表观气速的降低, 颗粒速度降低. 同时在不同的床层高度表现出两种不同的径向分布特性. 图 3 为不同表观气速下 IV, V, VI 三点的径向颗粒速度分布, 表观气速较大时, V, VI 两点颗粒速度径向分布特征较为接近; 表观气速减小时, IV, V 两点颗粒速度分布特征趋向接近. 同样, 循环量增大时, V, VI 两点颗粒速度分布特征趋向接近, 循环量减小时, IV, V 两点颗粒速度分布特征趋向接近.

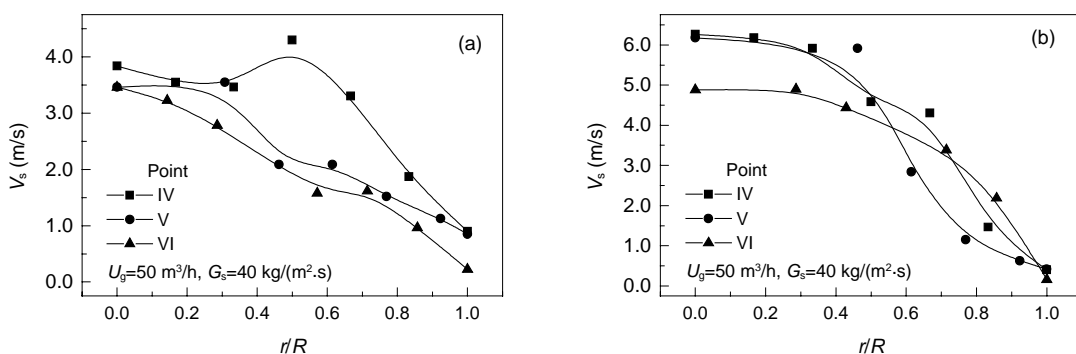


图 3 颗粒速度径向分布  
Fig.3 Radial profile of particle velocity

#### 3.2.2 颗粒浓度的径向分布

颗粒浓度随床层高度增加呈现不同的径向分布特征, 各测量点中心区域颗粒浓度相差不大, 差别主要表现在边缘颗粒浓度上. 如图 4 所示, 在第 IV 测量点, 径向颗粒浓度表现为中心稀边缘密的分布; VI 点的颗粒浓度径向分布则比较均匀, 在大部分的区域内, 近似于水平; V 点边缘颗粒浓度随表观气速和颗粒循环量的变化较大, 造成在较高表观气速和较低颗粒循环量下, V 点和 IV 点径向分布较为接近, 反之则和 VI 点径向分布较为接近.

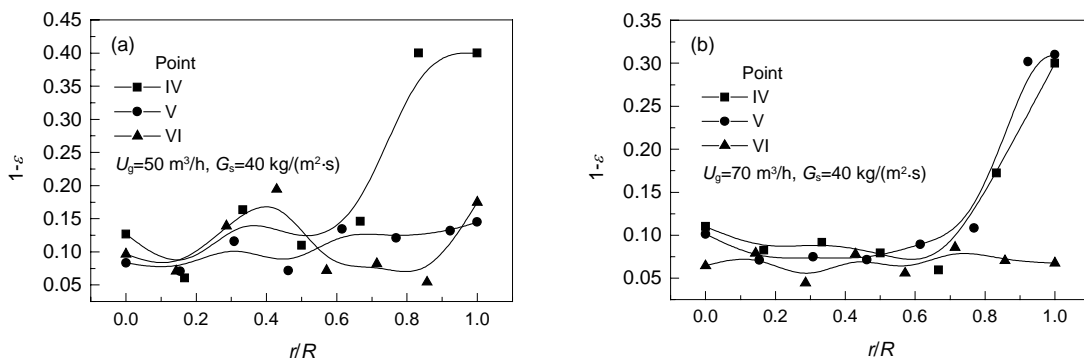


图 4 颗粒浓度径向分布  
Fig.4 Radial profile of solid fraction

### 3.3 锥型提升管与直管的比较

#### 3.3.1 颗粒速度分布的比较

在相同操作条件下,锥管和直管中的颗粒速度的比较如图 5 所示.可以看出,在第 V 测量点,直管和锥管的速度相差不大,径向分布也较相似;而在第 VI 测量点,锥管内径向颗粒速度的不均匀性较直管时有所减小,但由于管截面积的扩大,平均颗粒速度明显小于直管.

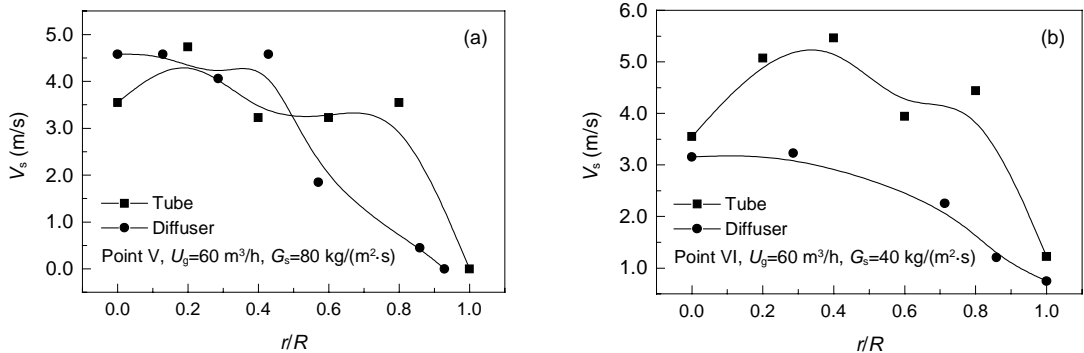


图 5 直管、锥管颗粒速度径向分布比较

Fig.5 Comparison of radial profile of particle velocity in two risers

#### 3.3.2 空隙率分布的比较

在相同的操作条件下,对提升管补气装置上方第 V, VI 测量点的径向颗粒密度分布进行比较,结果如图 6 所示.在第 V 点,随管径的增加,锥管中的颗粒浓度在边壁处有一定的上升,但是和直管相比则小得多,说明由于锥管管径的增加,管壁区域的颗粒浓度降低,且径向不均匀性减小.在第 VI 点,两种提升管结构的分布比较相似,但锥管中颗粒浓度略大于直管中颗粒浓度,与直管中颗粒浓度边缘略大于中心的径向分布相比较,锥管颗粒浓度径向分布更趋均匀.

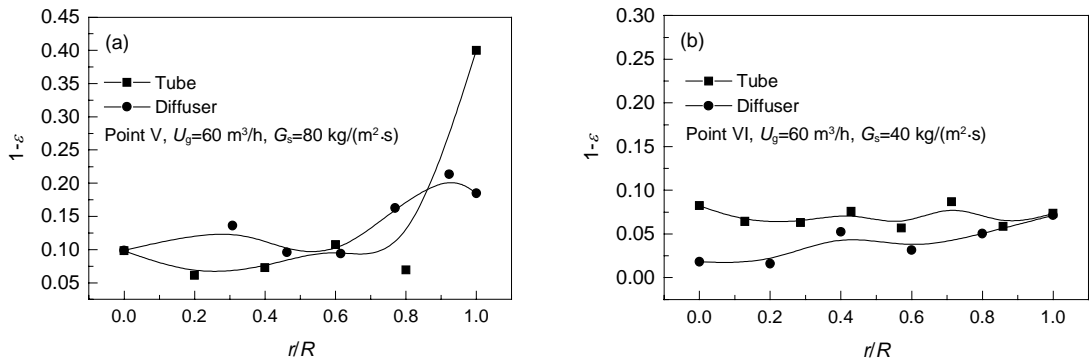


图 6 直管、锥管颗粒浓度径向分布比较

Fig.6 Comparison of radial profile of solid fraction in two risers

#### 3.3.3 床层压力轴向分布的比较

在相同操作条件下,直管和锥管中的绝对压力(表压)基本相同,锥管和直管中压力梯度表示为床层压力随床层高度的变化,以最高测压点为参照点,如图 7 所示.当循环量较小时,两者压力梯度差别不大;而当循环量较大时,直管中的压力梯度明显大于锥管中的压力梯度,说明锥管具

有较好的操作弹性. 图中  $H-H_0 = -1.0 \sim -0.4$  m 范围内, 锥管压力梯度的减小, 即装置中锥管的扩大段的压力降低. 说明扩大段能有效地降低床层的压力梯度.

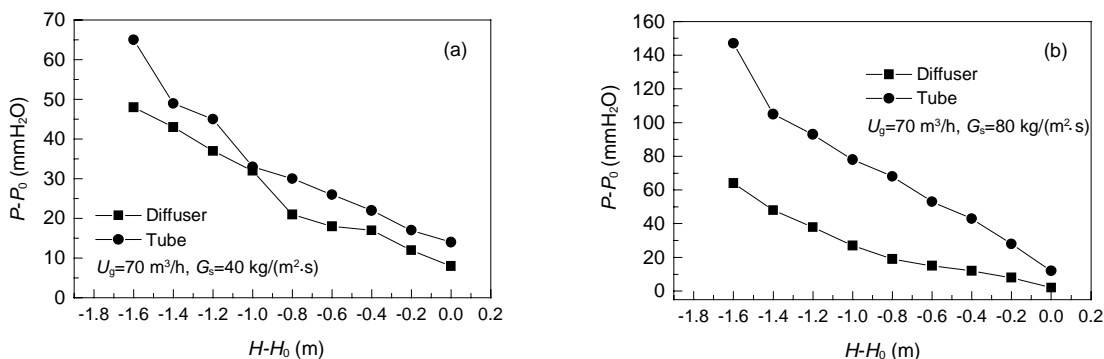


图7 不同循环量下直管、锥管压力轴向分布  
Fig.7 Comparison of axial profile of pressure in two risers

## 4 结论

锥型提升管扩大段中, 径向流动特征随床层高度而变化, 在较低循环量或者较高气速下在一定的床层高度将存在径向较均匀的速度和空隙率分布.

在同样采用边壁环隙补气的情况下, 和直管相比, 锥型提升管管壁附近的颗粒浓度明显降低, 改善了颗粒浓度的径向分布特征; 锥形提升管扩大段区域内颗粒浓度呈现非常均匀的径向分布, 径向颗粒速度分布也有了较大的改善.

相对于直管型提升管, 锥型提升管降低了提升管内的压力梯度, 表现出较好的操作弹性和较好的对反应气体体积变化的适应性能.

符号表:

$G_s$	循环量 [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$P$	床层压力 (mmH <sub>2</sub> O)	$U_b$	喷嘴气量 (m <sup>3</sup> /h)
$H_0$	最高测压点高度 (m)	$r$	径向位置 (mm)	$U_g$	总气量 (m <sup>3</sup> /h)
$H$	床层高度 (m)	$R$	直管半径 (mm)	$V_s$	局部颗粒速度 (m/s)
$m$	催化剂物料质量 (kg)	$t$	时间 (s)	$\varepsilon$	空隙率
$P_0$	最高测压点压力 (mmH <sub>2</sub> O)	$U_a$	预提升气量 (m <sup>3</sup> /h)		

参考文献:

- [1] Liu X L, Feng W, Shi B Z. Catalyst Pre-riser in FCC Riser [A]. Proceeding of 7<sup>th</sup> Int. Conference on CFB [C]. Ontario: Canadian Society for Chemical Engineering, 2002. EQ1.
- [2] 华彬, 李洪钟, 刘献玲, 等. 提升管反应器预提升段结构的优化 [A]. 催化裂化协作组第六届年会报告论文集 [C]. 1997. 607-612.
- [3] 华彬. 快速流化床进料段径向空隙率分布的改善及加速段特性的研究 [D]. 北京: 中国科学院化工冶金研究所, 1991.
- [4] Miller A, Gidaspow D. Dense, Vertical Gas-Solid Flow in a Pipe [J]. AIChE J, 1992, 38(11): 1801-1815.
- [5] Pugsley T S, Milne B J, Berruti F. An Innovative Non-mechanical Solids Feeder for High Solids Mass Fluxes in Circulating Fluidized Bed Risers [J]. Powder Technol., 1996, 88: 123-131.
- [6] Jiang P J, Bi H T, Jean R H. Baffle Effects on Performance of Catalytic Circulating Fluidized Bed Reactor [J]. AIChE J, 1991, 37(9): 1392-1400.

- [7] Marzocchella A, Arena U. Mixing of a Lateral Gas Stream in a Two-dimensional Riser of a Circulating Fluidized Bed [J]. *Can. J. Chem. Eng.*, 1996, 74: 195–202.
- [8] Schut S B, Van der Meer E H, Davidson J F. Gas–Solids Flow in the Diffuser of a Circulating Fluidized Bed Riser [J]. *Powder Technol.*, 2000, 111: 94–103.

## Influence of Riser Shape and Configuration on Flow Characteristics in the Riser

CHEN Zhi-wei<sup>1</sup>, LUO Bao-lin<sup>1</sup>, FENG Wei<sup>2</sup>, REN Tian-rui<sup>1</sup>

(1. *Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *Luoyang Petro-chemical Engineering Corporation, Luoyang, Henan 473005, China*)

**Abstract:** The rapid expansion of oil gas has large influence on the operating performance and flow characteristics in the riser of FCCU. In the present work, the effect of riser shape on flow characteristics and the suitability of conical riser (diffuser) for expanding oil-gas flow were investigated. Auxiliary gas was introduced into the riser to imitate the expansion of oil gas in the riser in experiments. The axial profile of pressure and the radial profiles of particle velocity and voidage were measured. Comparison of experimental results in the tube-riser and the conical-riser shows that the particle concentration in the conical riser is almost uniform, pressure drop is lower than that in the tube riser, and flow characteristics are greatly improved. It seems that the conical riser (diffuser) has the advantage of operating flexibility over the tube riser, and is suitable for the rapid expanding oil gas.

**Key words:** circulating fluidized bed; riser; configuration; shape; flow characteristics