

研究简报

提升管出口 T 型弯头压降特性的实验分析

汪贵磊, 陈勇, 严超宇, 魏耀东

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 在大型循环流化床装置上, 以 FCC 催化剂颗粒为实验物料, 针对提升管出口 T 型弯头用动态压力传感器测量了操作参数和结构尺寸变化对其压降的影响, 系统地分析了 T 型弯头的压降特性。实验结果表明 T 型弯头的压降与颗粒浓度呈线性关系, 与入口速度(提升表观气速)呈二次方关系; T 型弯头出口管截面积的减小使得压降显著增大; T 型弯头盲管高度的增加可使 T 型弯头的压降降低, 但是当盲管高度增加到一定值时, 压降减小不明显。盲管高度对压降的影响是由于盲管高度的增加改变了提升管上部压力的分布, 使 T 型弯头入口压力减小, 导致 T 型弯头的压降降低; 同时盲管高度的增加也使提升管出口区域的负压约束区长度增加。盲管所形成的负压约束区构成了对提升管出口的约束作用, T 型弯头的盲管高度越大负压约束区越长, 约束作用越强。

关键词: 循环流化床; 提升管; T 型弯头; 出口结构; 两相流

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.02.027

中图分类号: TQ 021

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157(2014)02—0555—06

Experimental analysis of T-abrupt exit's pressure drop characteristics in riser

WANG Guilei, CHEN Yong, YAN Chaoyu, WEI Yaodong

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

Abstract: The pressure drop characteristics of T-abrupt exit of the riser were analyzed based on dynamic pressure data of gas-solids two-phase flow in a circulating fluidized bed equipment by using FCC catalyst particles, and varying the operation parameters and equipment dimensions. The pressure drop of T-abrupt exit changed linearly with inlet particle density, and quadratically with inlet gas velocity. It increased significantly with the decrease of outlet tube area of T-abrupt exit. Further, the pressure drop of T-abrupt exit decreased as blind tube length increased, but changed little above a specific length, because increased blind tube length changed the pressure distribution along the upper riser. As blind tube length increased, inlet pressure of T-abrupt exit decreased, hence pressure drop decreased. There was a negative pressure zone along the upper riser and blind tube, which constrained gas-solids two-phase flow in the riser. The longer the blind tube, the longer the negative pressure zone and the greater the constraint.

Key words: circulating fluidized bed; riser; T-abrupt exit; exit configuration; two-phase flow

引 言

提升管是进行气固两相反应、传质、传热等工

艺过程的重要反应器。提升管内的气固两相流动不仅受颗粒循环量、操作气速等工况参数的影响, 而且还与提升管出口结构密切相关^[1-4]。T 型弯头是提

2013-05-16 收到初稿, 2013-10-04 收到修改稿。

联系人: 魏耀东。第一作者: 汪贵磊(1988—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目(21176250)。

Received date: 2013-05-16.

Corresponding author: Prof. WEI Yaodong, weiyd@cup.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21176250).

升管出口与旋风分离器连接的常用部件。之所以选择 T 型弯头,是由于 T 型弯头的突出盲管部分在气固两相流动的转向过程中起到气垫作用,改变了运动颗粒对器壁的冲击角,可以有效地防止颗粒对管壁的冲蚀磨损,同时 T 型弯头结构简单,易于制造和维护。但是, T 型弯头对提升管反应器内气固两相的流动和压降有着重要影响^[4-6]。Ulrike 等^[7]、Chian 等^[8]的研究结果表明 T 型弯头内所形成的颗粒堆积导致了颗粒的返混,其结果对提升管出口端气固两相流的压力分布和浓度分布产生很大的影响。Cheng 等^[9]依此把 T 型弯头划分为一种提升管强约束的出口。Juray 等^[10]的模拟表明这种约束作用随 T 型弯头出口面积的减小而增大。崔鑫等^[11]的实验表明颗粒质量流率和入口速度越高,约束作用也越大。由于 T 型弯头的强约束作用,在提升管顶部的出口区造成大量颗粒的返混或滞留,使提升管顶部的固含率增大,导致提升管的轴向空隙率呈现“C”形分布。这也使提升管的轴向压力分布发生变化,进而影响到 T 型弯头的压降。虽然已经有文献对 T 型弯头的压降进行了实验^[12]和数值研究^[13-15],但 T 型弯头压降与这种约束程度的相互影响机制尚缺乏分析,也缺乏对 T 型弯头尺寸优化的研究。因此开展操作参数和结构尺寸对提升管出口 T 型弯头压降特性的研究是非常必要的。为此,本文在大型循环流化床实验装置上,考察提升管出口 T 型弯头的压降与操作气速、颗粒浓度、T 型弯头的出口管直径等操作条件和结构参数的关系,分析 T 型弯头的压降特性,以便为提升管出口 T 型弯头的优化设计提供基础数据。

1 实验装置和测量方法

1.1 实验装置

循环流化床装置如图 1 所示。颗粒由流化床 2 经下料斜管 3 进入预提升器 4,再进入提升管 5,流经 T 型弯头 6 和水平管 7 进入旋风分离器 8,气固分离后通过立管 10 和 11,返回流化床 2,完成一个循环过程。流化床尺寸为 $\phi 600 \text{ mm} \times 8000 \text{ mm}$,提升管尺寸为 $\phi 200 \text{ mm} \times 12500 \text{ mm}$, T 型弯头尺寸见图 1(b), H 为 T 型弯头的盲管部分高度, D 为 T 型弯头出口管直径。实验采用 FCC 催化剂,平均粒径约为 $67 \mu\text{m}$,堆积密度约为 $940 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,颗粒密度约为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。催化剂循环量由返料斜管上的蝶阀控制,催化剂循环量的测量方法是通过关闭阀 9 计量立管内颗粒堆积一定高度所用的时间进行

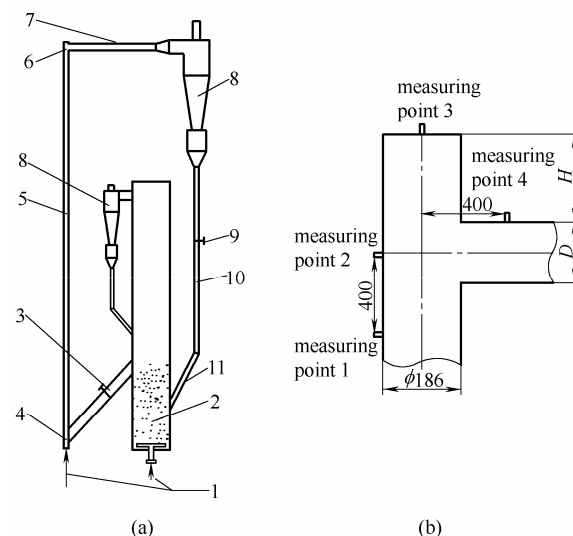


图 1 循环流化床实验装置和 T 型弯头

Fig.1 Experimental set-up and T-abrupt exit

1—fluidized gas; 2—fluidized bed; 3—conveying tube; 4—pre-lift; 5—riser; 6—T-abrupt exit; 7—horizontal pipe; 8—cyclone; 9—valve; 10, 11—dipleg

计算测定的。

1.2 测量方法

T 型弯头的压力采用动态压力传感器测量。动态压力传感器的量程为 $0 \sim 0.08 \text{ MPa}$,灵敏度 $25 \text{ Pa} \cdot \text{mV}^{-1}$,采样频率 200 Hz ,采样时间 60 s 。T 型弯头压力测量点位置见图 1(b)。

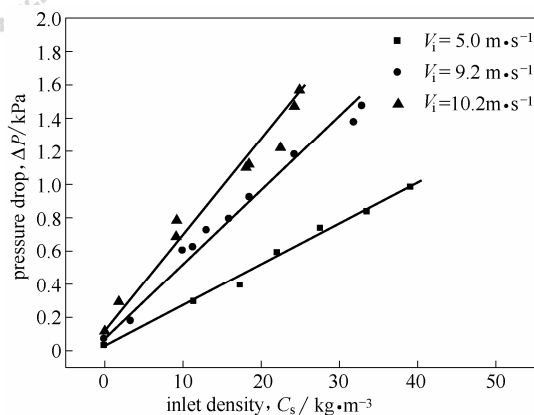
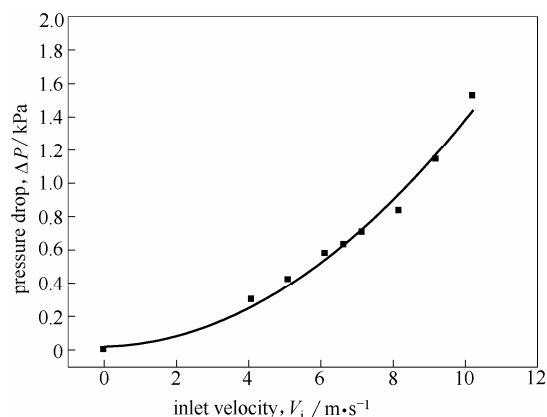
T 型弯头的压降 ΔP 取测量点 1 和测量点 4 动态压力平均值的差值。实验过程中操作参数主要改变提升管的提升风速度 V_f (相当于 T 型弯头的入口速度)和入口颗粒浓度 C_s (也是 T 型弯头的入口浓度);结构尺寸主要改变出口管的直径 D 和盲管高度 H 。

2 T 型弯头压降实验结果及讨论

2.1 操作参数对压降的影响

图 2 是 T 型弯头压降 ΔP 随入口颗粒浓度 C_s 变化的实验测量值。实验中 T 型弯头的出口直径为 186 mm 、盲管高度为 50 mm 。由图可见, T 型弯头的压降随着入口颗粒浓度的增加而增大,与颗粒浓度的变化基本呈线性关系。但入口速度越高则压降也越大。

图 3 是入口浓度为 $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时不同入口速度 V_f 时 T 型弯头压降 ΔP 变化。实验中 T 型弯头的出口直径为 186 mm 、盲管高度为 50 mm 。由图可见, T 型弯头的压降与入口速度近似为抛物线分布。随着入口速度的增加,压降急剧增大。当入口速度为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,压降是 0.25 kPa ;当速度增加到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图2 T型弯头压降 ΔP 随颗粒浓度的变化Fig.2 Pressure drop ΔP of T-abrupt exit with particle inlet density图3 T型弯头压降 ΔP 随入口速度的变化Fig.3 Pressure drop ΔP of T-abrupt exit with different gas velocity

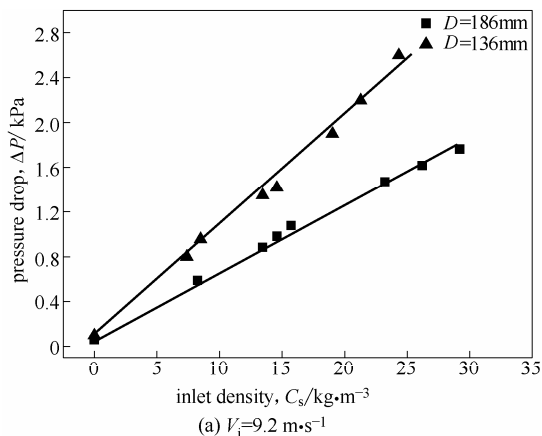
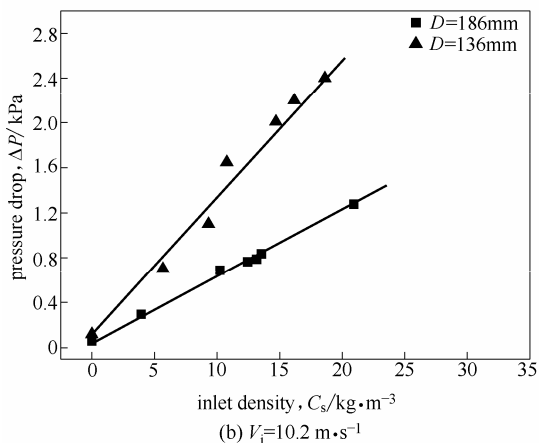
时, 压降增大到 1.38 kPa。

2.2 结构尺寸对压降的影响

2.2.1 出口管直径 D 对压降的影响 图4为入口速度为 $9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $10.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 盲管高度 H 均为 300 mm 时, 出口管径 D 分别为 186 mm 和 136 mm 两种弯头的压降 ΔP 随入口颗粒浓度 C_s 的变化。T型弯头的压降随出口管面积的减小而增大。当出口管径减小后, 形成了变径管流, 局部损失增大, 同时出口管内的流体速度增大, 压力减小, 导致T型弯头的压降增大。

2.2.2 盲管高度 H 对压降的影响 为了详细分析T型弯头盲管高度 H 对压降 ΔP 的影响, 实验中T型弯头的盲管采用了 0、50、150、300、500 mm 共 5 个尺寸, 对应的 H/D 是 0、0.27、0.81、1.62、2.70。

图5是盲管 H/D 对T型弯头的压降 ΔP 的影响。T型弯头的压降随着盲管部分高度的增加而降低。当盲管高度 H 为 0 时, 压降最大。逐渐增加盲管高

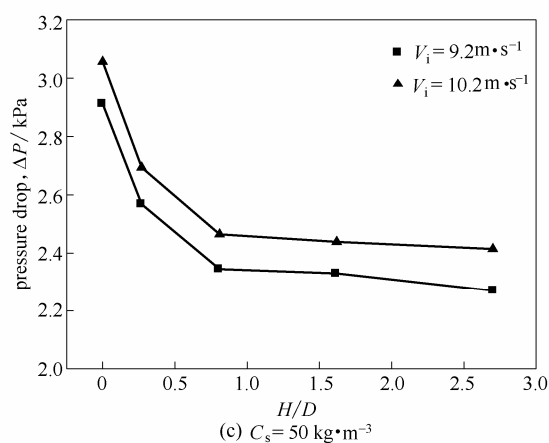
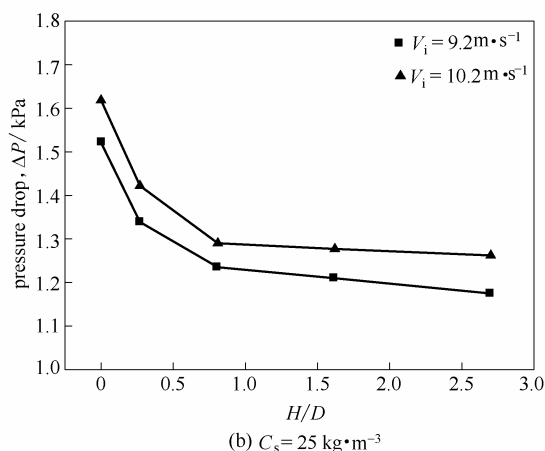
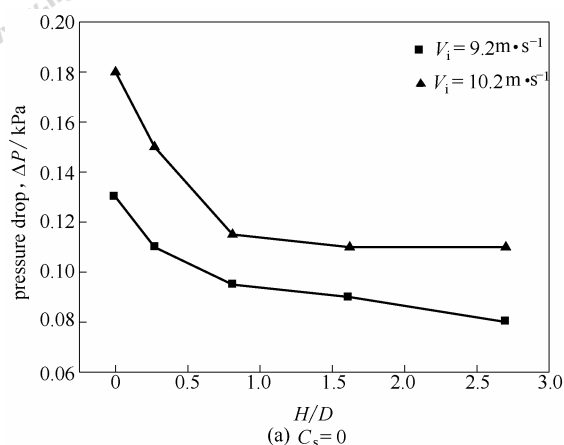
(a) $V_i=9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $V_i=10.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 图4 T型弯头压降 ΔP 的实验值Fig.4 Pressure drop ΔP of T-abrupt exit varying with exit area

度 H , T型弯头的压降开始急剧下降, 当 H/D 接近于 1 时, 压降变化比较缓慢, 下降的幅度不再明显。例如在入口速度为 $9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 颗粒浓度为 $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 当盲管的 H/D 从 0 增加到 1.0 时, 压降从 1.53 减小到 1.24, 降低了 19.0%。当盲管的 H/D 从 1.0 增加到 2.7 时, 压降从 1.24 减小到 1.18, 降低了 5.0%。

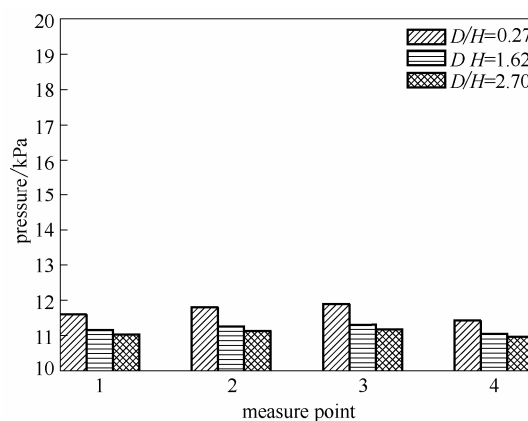
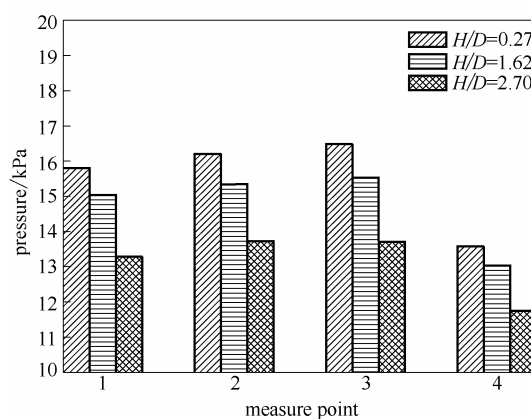
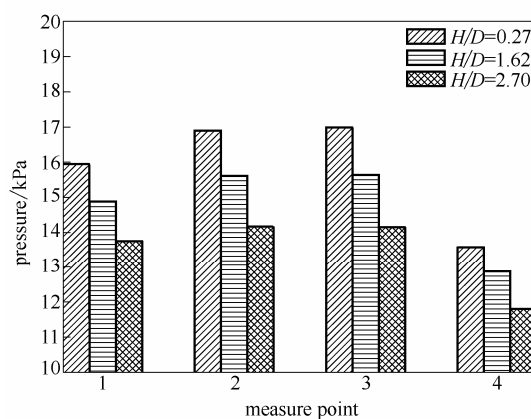
不同入口浓度时测量的压降结果表明盲管高度对压降的影响规律是一致的。但随着入口浓度的增大, 压降的绝对值是增大的。例如空气状态下, 入口速度为 $9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 当盲管的 H/D 从 0 增加到 2.7 时, 压降从 0.13 变化到 0.08。当入口浓度为 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 对应的压降从 2.92 变化到 2.27, 表明入口浓度增大后, T型弯头的压降变化幅度也增大。实验也表明入口速度增加使压降显著增大, 但对压降随 H/D 变化趋势的影响比较小。

2.3 盲管高度对压降的影响

2.3.1 盲管高度与T型弯头压力的关系 为了进一步分析盲管高度对T型弯头压降的影响, 在相同的

图 5 T 型弯头的压降 ΔP 随 H/D 的变化Fig.5 Pressure drop ΔP of T-abrupt exit with H/D

入口颗粒浓度和入口气速条件下, 测量了提升管 T 型弯头上 4 个点的压力随盲管高度的变化, 结果见图 6。实验表明沿着提升管, 由测量点 1 到测量点 3 压力逐渐增大, 在测量点 3 处的压力达到最大值。但由测量点 3 到测量点 4, 压力是降低的。测量点 4 的压力均小于测量点 1 的压力。当盲管高度 H 较小时, 压力梯度较大; 当盲管高度 H 较大时, 压力变化较平缓, 压力梯度较小。

(a) $V_i = 9.2 \text{ m/s}$, $C_s = 0$ (b) $V_i = 10.2 \text{ m/s}$, $C_s = 25 \text{ kg/m}^3$ (c) $V_i = 10.2 \text{ m/s}$, $C_s = 50 \text{ kg/m}^3$ 图 6 不同操作条件下 T 型弯头测量点的压力值 P Fig.6 Pressure P of T-abrupt region with different operating conditions

2.3.2 T 型弯头的压降分析 提升管内上行催化剂颗粒在流经 T 型出口结构时, 部分催化剂颗粒由于惯性作用在盲管区域产生了催化剂颗粒的堆积, 在盲管内形成一个高颗粒浓度颗粒悬浮区。这种悬浮的催化剂颗粒依靠上行的气流的托举, 消耗了上升气流的能量。部分进入盲管的颗粒, 需要折返 180° 再转向 90° 进入水平管, 也增加了局部的阻力损失。

根据图6,提升管和T型弯头的压力分布见图7。提升管下部的气固两相流是正压差流动(AB段),压力逐渐减小,气固两相的速度增大,是正压力梯度流动。进入提升管出口区域后,压力开始增大,颗粒速度也开始减小(BC段),到C点压力达到最低。此时气固两相的速度动压转变为静压,压力开始增大,一直延续到盲管的顶部(CDE段),形成了一个负压梯度流动区。在盲管部分,气固两相的速度急速降低,转换为静压,导致盲管的静压显著增大。盲管的高度越大,造成颗粒减速区域越长,颗粒速度的变化越慢,C点的位置越低,负压流动区域CE也越长,整个负压流动区的负压差值也越大。相反,盲管高度越小,颗粒减速区域越短,颗粒速度的变化越快,C点的位置相对增高。

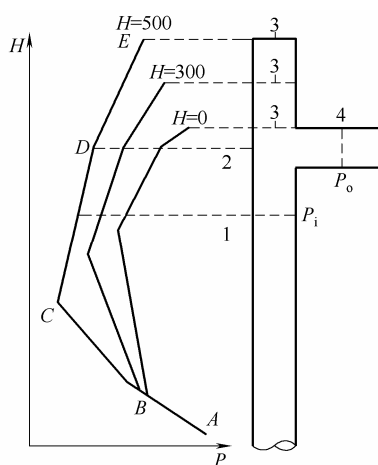


图7 T型弯头的压力分布

Fig.7 Pressure P in T-abrupt region

实验中T型弯管的压降 ΔP 是入口测量1点压力 P_i 与出口测量点4压力 P_o 的差值。对于1点压力 P_i ,是负压流动区的一点,T型盲管的高度越大,1点距压力转折点C越远, P_i 值也越小。虽然4点压力 P_o 随盲管的高度增加而减小,但测量1点压力 P_i 与出口测量点4压力 P_o 的差值是减小的,结果T型弯头的压降随盲管高度的增加而减小。

2.4 T型弯头盲管的约束作用

T型弯头对提升管出口气固两相流的约束表现为提升管轴向空隙率呈现“C”形分布,同时提升管的压力也呈“C”形分布。在T型弯头内,来自提升管的高速气固两相流,由垂直运动急转成水平运动。对于气体而言,由于盲管部分是一个滞留区,来自提升管的气流大部分气流转向水平管流出,但少部分气流在惯性作用下进入盲管区域,然后再转向流向水平管。盲管高度越长,这部分气流的量也

越大。对于颗粒而言,提升管内的是气体携带颗粒运动的,但到达提升管顶部时,颗粒在惯性作用下,大部分颗粒脱离流线运动到盲管区域,在顶部形成颗粒堆积,然后再折流而下流向水平管,少部分颗粒直接转向流进水平管。

根据上述压力分布和颗粒的流动形态,可以将提升管压力增大区域定义为负压约束区,以下区域是正压加速区,见图8。正压加速区的特点是压力逐渐减小,压力梯度为正,颗粒加速上行;负压约束区的特点是压力增大,压力梯度为负。在负压约束区,根据颗粒的流动方向变化,又可以划分为无返混减速区、局部返混区、出口流出区、盲管全返混区,见图8。

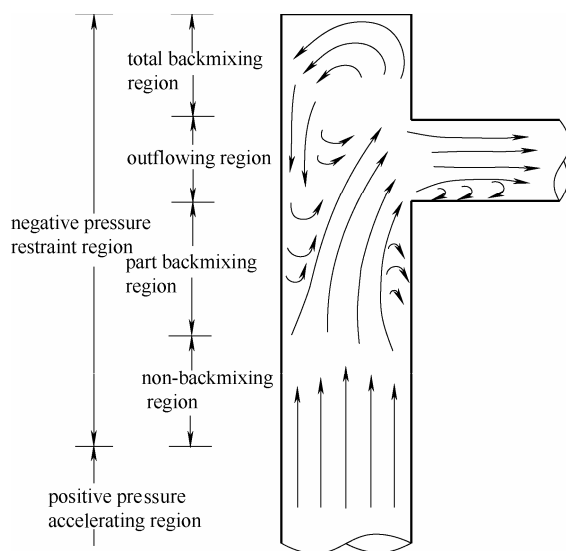


图8 T型弯头的流态分区

Fig.8 Gas-solid flow regime in T-abrupt region

在无返混减速区,颗粒的速度降低,动能减小,压力增大,气固两相是单向流动的;在局部返混区,由于存在着外侧的下行颗粒返混和内侧气流转向的涡流作用造成的颗粒返混,导致上行颗粒的流通面积减小,上行颗粒速度增大;在出口流出区,流出的颗粒来源于部分上行运动的颗粒,部分下行返混的颗粒,还有部分颗粒横向随气流直接流出弯头;在盲管全返混区,进入盲管的上行颗粒又全部返回下行。当盲管高度 H 较小时,负压约束区短,其中颗粒上行时缓冲距离较小,减速的距离短,颗粒与弯头顶部碰撞剧烈,颗粒返混强烈,盲管顶端的压力值较大。当盲管高度 H 较大时,负压约束区长,上行颗粒缓冲距离增大,颗粒与弯头顶部碰撞剧烈程度减小,颗粒返混变弱,顶端的压力值也随之降低。

在负压约束区内,上行颗粒的能量一方面需要维持颗粒的上行运动,另一方面需要平衡来自上部的颗粒返混下行,导致了压力沿轴向的增大,提升管压力呈“C”形分布。盲管的高度较小时,悬浮的颗粒量比较少,负压约束区比较短,约束作用不强,提升管颗粒浓度和压力的“C”形分布不明显。盲管的高度较大时,悬浮的颗粒量比较大,返混的气量和颗粒比较多,负压约束区随之增长,导致提升管的颗粒浓度和压力呈现更明显的“C”形分布,形成强约束作用。盲管的高度越大,堆积的颗粒量越大,这种影响也越明显,约束作用也越强。当气固两相流进入水平管后,垂流流动转为水平流动,气体和颗粒的速度逐渐提高,压力开始下降,是一种正压差流动。

3 结 论

(1) 提升管出口 T 型弯头的压降与入口颗粒浓度呈线性关系,与入口速度呈二次方关系;由于变径管流作用, T 型弯头的压降随出口管直径的减小显著上升。

(2) 提升管出口 T 型弯头的压降随盲管高度增大先是明显减小,然后趋于平缓。而产生这种现象的主要原因是盲管高度的变化影响了提升管顶部区域的压力分布,使 T 型弯头的入口压力随盲管高度的增加而降低。

(3) 根据提升管 T 型弯头出口区域的压力分布和颗粒的流动形态,可以划分为正压加速区和负压约束区,其中负压约束区又可以划分为无返混减速区、局部返混区、出口流出区、盲管全返混区。由于 T 型弯头盲管的约束作用,使盲管内压力明显升高,造成提升管内的颗粒压力都呈现“C”形分布,盲管高度的增加使得颗粒返混量增大,负压约束区增长,约束作用增强,这种“C”形分布越明显。

References

- [1] Grace J R. Influence of riser geometry on particle and fluid dynamics in circulating fluidized bed risers //Proceedings of 5th International Conference on Circulating Fluidized Beds[C]. Beijing, 1999: 16-28
- [2] Brereton C M H, Grace J R. End effects in circulating fluidized bed hydrodynamics//Proceedings of 4th International Conference on Circulating Fluidized Beds[C]. AIChE, 1994: 137-144
- [3] Jin Yong (金涌), Zhu Jingxu (祝京旭), Wang Zhanwen (汪展文). Fluidization Engineering Principles (流态化工程原理)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001
- [4] Gupta A V S S K S, Reddy B V. Bed-to-wall heat transfer modelling in the top region of a CFB riser column with abrupt riser exit geometries [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**: 4307-4315
- [5] van Engelandt G, Heynderickx G J, de Wilde Juray, Marin G B. Experimental and computational study of T- and L-outlet effects in dilute riser flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, **66**: 5024-5044
- [6] Yan Aijie, Pärssinen J H, Zhu Jingxu. Flow properties in the entrance and exit regions of a high-flux circulating fluidized bed riser [J]. *Powder Technology*, 2003, **131**: 256-263
- [7] Ulrike Lacknermeier, Joachim Werther. Flow phenomena in the exit zone of a circulating fluidized bed [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2002, **41**: 771-783
- [8] Chian Wen Chan, Anke Brems, Shiva Mahmoudi, et al. Joseph Gargiuli. PEPT study of particle motion for different riser exit geometries [J]. *Particology*, 2010, **6**: 623-630
- [9] Cheng Yi, Wei Fei, Yang Guoqiang, Jin Yong. Inlet and outlet effects on flow patterns in gas-solid risers [J]. *Powder Technology*, 1998, **98**: 151-156
- [10] Juray De Wilde, Guy B Marin, Geraldine J Heynderickx. The effects of abrupt T-outlets in a riser: 3D simulation using the kinetic theory of granular flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, **58**: 877-885
- [11] Cui Xin(崔鑫), Wang Yin(汪印), Dong Li (董利), et al. Effect of fluidized bed configuration on solids circulation rate in high solids flux circulating fluidized bed [J]. *CIESC Journal (化工学报)*, 2010, **61** (1): 49-54
- [12] Chen Yong (陈勇), Wang Guilei (汪贵磊), Han Tianzhu (韩天竹), et al. An experimental analysis of pressure drop of the T-abrupt exit of FCCU riser [J]. *Petroleum Refinery Engineering (炼油技术与工程)*, 2012, **42** (1): 38-40
- [13] Wu Xuezhong, Jiang Fan, Xu Xiang, Xiao Yunhan. CFD simulation of smooth and T-abrupt exits in circulating fluidized bed risers [J]. *Particology*, 2010, **8**: 343-350
- [14] Wu Xuezhong(吴学智), Wang Xueyao(王雪瑶), Jiang Fan(姜凡), et al. The numerical investigation of gas-solid flow in a riser with a T-abrupt exit [J]. *Journal of Engineering Thermophysics (工程热物理学报)*, 2009, **30**(8): 1327-1330
- [15] Bao Fubing(包福兵), Chen Lihua(陈丽华), Lin Jianzhong(林建忠), et al. Optimization of T-shape blind elbow length in pneumatic conveying system [J]. *Hoisting and Conveying Machinery (起重运输机械)*, 2004, **5**: 46-50