

# 操作条件对双循环回路变径提升管压降的影响

王向辉<sup>1,3</sup>, 高士秋<sup>1</sup>, 宋文立<sup>1</sup>, 许友好<sup>2</sup>, 张久顺<sup>2</sup>

(1. 中国科学院过程工程研究所多相反应重点实验室, 北京 100080; 2. 中石化石油化工科学研究院, 北京 100083;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 针对生产清洁汽油组分的催化裂化新工艺, 建立了具有双循环回路的变径提升管冷模实验装置. 提升管由下部具有较小床径、较高气速的气力输送区和上部具有较大床径、较低气速的快速流化区组成, 循环物料可在提升管的下部和中部分别加入, 形成主、副两个循环回路. 分析了系统主、副循环回路的压力平衡关系, 研究了操作条件对提升管压降的影响. 结果发现, 主、副循环回路的提升管压降均随表观气速的增加而降低; 增加2个循环回路中任意一个固体循环速率时, 将使另一循环回路的固体循环速率降低, 但总固体循环速率和2个循环回路的提升管压降均升高. 2个循环回路相互影响并保持各自的压力平衡, 在固体循环速率控制阀处, 只有循环管端压力大于提升管端压力才能维持系统正常操作. 增加系统藏料量、循环管直径、副循环供料床高度和直径均有利于维持循环系统的正常操作.

**关键词:** 提升管; 循环流化床; 循环回路; 压降; 压力平衡

**中图分类号:** TQ021      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2006)06-0872-06

## 1 前言

循环流化床反应器因其可连续操作、生产能力大、反应器内温度均匀等诸多优点被越来越多地应用于工业过程中, 石油催化裂化提升管反应器及循环流化床锅炉是其应用的典型代表. 我国成品汽油中催化裂化汽油占80%以上, 烯烃含量高达40%~65%, 远不能满足国家为保护环境而提出的车用汽油标准. 为减少汽油中的烯烃含量, 提高异构烷烃含量, 许友好等<sup>[1,2]</sup>通过对催化裂化反应机理的分析并综合烯烃在不同类型反应器上得到的反应结果, 提出了生产清洁汽油组分的催化裂化新工艺MIP(Maximizing Iso-paraffins). 该工艺的关键设备之一为一种新型提升管反应器—双循环变径提升管反应器. 根据催化裂化反应的特性, 提升管分为2个不同的反应区, 下部是具有较小床径、较高气速的气力输送区, 上部是具有较大床径、较低气速的快速流化区, 二者由扩径段相连. 在扩径段上部设置连通管实现由循环管向提升管扩径段的二次加料, 形成了主、副2个固体循环回路, 达到在提升管扩径段增加颗粒浓度的目的.

过去几十年里, 人们对提升管内气固两相流的流体力学特征进行了大量的研究<sup>[3,4]</sup>, 但对提升管和循环管间的压力平衡关系及气固两相流在变径提升管内流动状态的研究甚少. Bi等<sup>[5]</sup>认为循环系统内“噎塞”等不稳定现象的出现是由于提升管与循环管间压力的不平衡造成的. 他们在分析整个循环系统压力平衡的基础上建立了预测模型, 发现操作稳定性和系统的最大固体循环

速率与系统装料量、设备结构等因素有关. Bai等<sup>[6]</sup>对各种形式的高密度循环流化床系统的压力平衡进行了分析, 建立了提升管内颗粒浓度、固体循环速率的预测模型, 讨论了操作条件及设备结构对固体循环速率的影响. Schut等<sup>[7]</sup>通过实验研究了气固两相流流经方形扩径提升管时的流动特征, 发现扩径后气体与固体颗粒因自身惯性不同而导致二者运动轨迹的分离, 从而在扩径区产生强烈的颗粒返混. Marjanovic等<sup>[8]</sup>研究了气固两相流及单一流体在通过突然扩径圆管时的流型结构, 在系统能量守恒和物质守恒的基础上建立了两相流浓度场和速度场的计算模型, 并实验研究了扩径后压力场的变化. Wang等<sup>[9]</sup>建立了具有双固体循环回路的变径提升管反应器, 研究了2个循环回路固体循环速率的变化规律及提升管内空隙率和颗粒速度的轴向及径向分布.

为了掌握这种具有双固体循环回路的变径提升管反应器内气固两相流的流体力学特征, 本工作通过循环系统的压力平衡研究了操作条件对提升管2个循环回路压降的影响, 分析了二者间的相互关系.

## 2 实验装置及测量方法

依据MIP工艺原理, 用有机玻璃建立的冷模实验装置见图1. 提升管(A)高10.2 m, 由3部分组成: 下部 $\Phi 45\text{ mm} \times 3940\text{ mm}$ , 上部 $\Phi 90\text{ mm} \times 6200\text{ mm}$ , 二者之间由高60 mm的扩径段相连接. 循环管(B)  $\Phi 120\text{ mm} \times 10500\text{ mm}$ , 在高5.25 m处偏心设置 $\Phi 70\text{ mm} \times 2000$

收稿日期: 2005-09-02, 修回日期: 2005-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 90210034, 20221603)

作者简介: 王向辉(1977-), 男, 河北省承德市人, 博士研究生, 化学工程专业; 高士秋, 通讯联系人.

mm 的圆管(C), 形成上部固体循环回路的环形供料床, 在其底部通入少量气体使供料床内的物料流化. 在提升管高 0.5 和 4.25 m 处分别设置固体物料循环的连通管, 管内安装控制固体循环速率的蝶阀 E<sub>1</sub> 和 E<sub>2</sub>. 安装在循环管上部及上部连通管内的多孔蝶阀 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 分别用来测量系统总固体循环速率 G<sub>st</sub> 和副循环回路固体循环速率 G<sub>s2</sub>, 二者之差为主循环回路固体循环速率 G<sub>s1</sub>. 系统运行稳定后, 通过测量一定时间内蝶阀上累积的物料量来计算此状态下的固体循环速率<sup>[9]</sup>. 沿提升管和循环管共开有 25 个压力测孔, 分布见图 1, 采用 U 形管压力计测量循环回路各部分的床层压降.

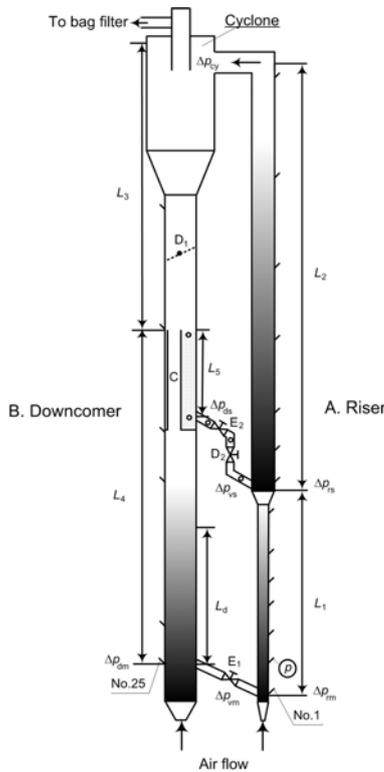


图 1 实验设备示意图  
Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

流化气体为常温、常压空气, 固体物料为平均粒径 82 μm、密度 1450 kg/m<sup>3</sup> 的 FCC 催化剂, 循环系统的总藏料量为 25 kg. 实验中, 经转子流量计计量后的气体由提升管和循环管底部分别进入循环系统. 在提升管内, 固体物料在气体曳力作用下与气体一起沿提升管上行, 到达提升管顶部后进入旋风分离器, 分离出的固体物料一部分落入循环管上部的环形供料床使其维持充满状态, 多余物料溢流, 随旋风分离下来的其他物料落入循环管下部. 经旋风分离器除去颗粒的气体再经布袋除尘器除去微小颗粒后排空. 经旋风分离下来的固体物料分别在循环管的下部和上部形成密相床层, 以产生物料循

环的推动力, 固体物料在此推动力作用下经过循环管和提升管间的连通管和蝶阀进入提升管的下部和中部, 形成主、副 2 个循环回路.

提升管入口表观气速 U<sub>gl</sub>=8~14 m/s, 扩径后的表观气速 U<sub>gII</sub>=0.25U<sub>gl</sub>; 下部循环回路固体循环速率 G<sub>s1</sub>=5.0~9.5 kg/min [52.4~99.6 kg/(m<sup>2</sup>·s)], 上部循环回路固体循环速率 G<sub>s2</sub>=0.5~3.5 kg/min [2.2~15.4 kg/(m<sup>2</sup>·s)]. 在不同操作条件下, 分别测量了循环系统 2 个固体循环回路的各部分压降.

### 3 循环系统的压力平衡

整个循环系统由主、副 2 个固体循环回路组成(图 1). 当系统内的固体颗粒在气体曳力作用下开始流化后, 提升管、循环管、气固分离器及固体循环速率控制阀构成了颗粒运动的闭合回路. 提升管和循环管的压降主要由颗粒质量、加速压降及摩擦压降组成. 下面分别分析 2 个固体循环回路的压力平衡关系.

#### 3.1 主循环回路

将旋风分离器出口处压力作为参考点(101.3 kPa), 则循环管和提升管底部的压力, 即循环管和提升管的总压降可分别由式(1)和(2)表示:

$$\Delta p_{dm} = \rho_p (1 - \bar{\epsilon}_d) g L_d + \rho_p (1 - \bar{\epsilon}_1) g (L_3 + L_4 - L_d) + \Delta p_{ac3} + \Delta p_{ac4} + \Delta p_{fr3} + \Delta p_{fr4}, \quad (1)$$

$$\Delta p_{rm} = \Delta p_{cy} + \rho_p (1 - \bar{\epsilon}_1) g L_1 + \rho_p (1 - \bar{\epsilon}_2) g L_2 + \Delta p_{ac1} + \Delta p_{ac2} + \Delta p_{fr1} + \Delta p_{fr2}, \quad (2)$$

其中,  $\bar{\epsilon}_d$ ,  $\bar{\epsilon}_1$  分别为循环管的浓相和稀相平均空隙率, L<sub>d</sub> 为浓相床高,  $\bar{\epsilon}_1$ ,  $\bar{\epsilon}_2$  为提升管 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> 段的平均空隙率, Δp<sub>cy</sub> 为旋风分离器压降. 可见, 主循环回路提升管压降由固体循环速率为 G<sub>s1</sub> 的提升管 L<sub>1</sub> 段压降和固体循环速率为 G<sub>st</sub> 的提升管 L<sub>2</sub> 段压降两部分组成.

由循环回路的压力平衡, 主循环回路循环速率控制阀 E<sub>1</sub> 的压降为

$$\Delta p_{vm} = \Delta p_{dm} - \Delta p_{rm}. \quad (3)$$

#### 3.2 副循环回路

与主循环回路相似, 副循环回路中的循环管压降、提升管压降及固体循环速率控制阀压降可分别表示为

$$\Delta p_{ds} = \rho_p (1 - \bar{\epsilon}_1) g L_3 + \rho_p (1 - \bar{\epsilon}_5) g L_5 + \Delta p_{ac3} + \Delta p_{fr3}, \quad (4)$$

$$\Delta p_{rs} = \Delta p_{cy} + \rho_p (1 - \bar{\epsilon}_2) g L_2 + \Delta p_{ac2} + \Delta p_{fr2}, \quad (5)$$

$$\Delta p_{vs} = \Delta p_{ds} - \Delta p_{rs}, \quad (6)$$

其中,  $\bar{\epsilon}_5$  为副循环回路环形供料流化床的平均空隙率.

可见,副循环回路提升管压降仅由固体循环速率为  $G_{s1}$  的提升管  $L_2$  段压降决定。

双循环变径提升管反应器系统的正常操作条件是主副循环回路的循环速率控制阀压降  $\Delta p_{vm}$  和  $\Delta p_{vs}$  均维持正值,否则由提升管底部进入系统的流化气体将通过供料管“短路”进入循环管中,导致操作失常。MIP 工艺要求在提升管上部  $L_2$  段内维持较高的催化剂浓度,以利于二次反应的进行,故此只能通过增加循环管侧的压力来保证循环速率控制阀压降维持正值。对于冷态实验装置,由式(1)和(4)可知,循环管侧压力(循环推动力)随浓相区高度的增加而增加,即通过增加循环系统的总藏料量和副循环供料床高等方法可以增加循环管侧的压力。另外,增加循环管和供料床直径,使在不同固体循环速率时循环管浓相区高度保持相对恒定亦有利于正常操作的实现。在工业 MIP 装置中,主要采取增加循环管(再生器)顶压、增加系统总藏料量等方法来增加循环管侧的压力以维持设备的正常操作。

### 4 结果与讨论

分别改变主、副循环回路固体循环速率及提升管入口表观气速,测量了固体循环回路各部分的床层压降,分析了2个循环回路的相互影响。

#### 4.1 主循环回路固体循环速率的影响

固定副循环回路循环速率控制阀  $E_2$  的开度,主、副循环回路提升管压降  $\Delta p_{rm}$ ,  $\Delta p_{rs}$  和总固体循环速率  $G_{st}$ 、副循环回路固体循环速率  $G_{s2}$  随主循环回路固体循环速率  $G_{s1}$  的变化见图2。由图可知,主循环回路固体循环速率  $G_{s1}$  对循环回路的压降及固体循环速率有较大的影响,随  $G_{s1}$  的增加,副循环回路固体循环速率  $G_{s2}$  下降,总固体循环速率  $G_{st}$  增加,主、副循环回路的提升管压降  $\Delta p_{rm}$  和  $\Delta p_{rs}$  均呈增加的趋势。虽然  $G_{s2}$  随  $G_{s1}$  的增加而降低,但提升管总固体循环速率  $G_{st}$  随  $G_{s1}$  的增加而增

加,使副循环回路的提升管压降  $\Delta p_{rs}$  升高。同时,提升管  $L_1$  段的颗粒浓度亦随  $G_{s1}$  的增加而增加,故主循环回路提升管压降  $\Delta p_{rm}$  随  $G_{s1}$  的增加而增加。对于副循环回路,由于环形供料流化床始终维持充满状态,因而上部循环管压降基本维持不变,由于提升管压降  $\Delta p_{rs}$  的增加导致副循环回路的固体循环速率  $G_{s2}$  有所降低,此时,为了维持  $G_{s2}$  不变,需要增加控制阀  $E_2$  的开度。

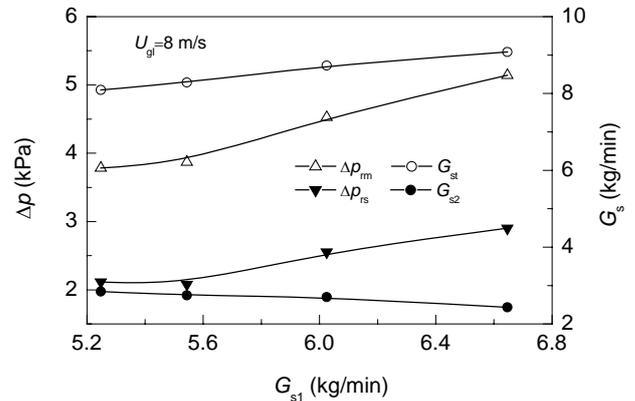


图2 控制阀  $E_2$  开度恒定时主循环回路固体循环速率的影响  
Fig.2 Influence of  $G_{s1}$  on  $G_{st}$ ,  $G_{s2}$ ,  $\Delta p_{rs}$  and  $\Delta p_{rm}$  as the opening of  $E_2$  fixed

维持副循环回路固体循环速率  $G_{s2}$  恒定,主循环回路固体循环速率  $G_{s1}$  对主、副循环回路压降的影响见图3。由图3(a)可知,在主循环回路,随  $G_{s1}$  的增加,循环管压降  $\Delta p_{dm}$  降低,提升管压降  $\Delta p_{rm}$  升高,作用于固体循环速率控制阀  $E_1$  上的压降  $\Delta p_{vm}$  因控制阀开度的增大而逐渐降低。在表观气速相同时,提升管  $L_1$  段和  $L_2$  段的床层平均空隙率  $\bar{\epsilon}_1$  和  $\bar{\epsilon}_2$  随  $G_{s1}$  的增加而降低,提升管压降和藏料量增加。因循环系统总藏料量恒定,可知循环管内的固体藏料量将随提升管藏料量的增加而降低,循环管内浓相区高度下降。虽然循环管上部稀相区空隙率的下降使压降有所增加,但远不能补偿因浓相区高度降

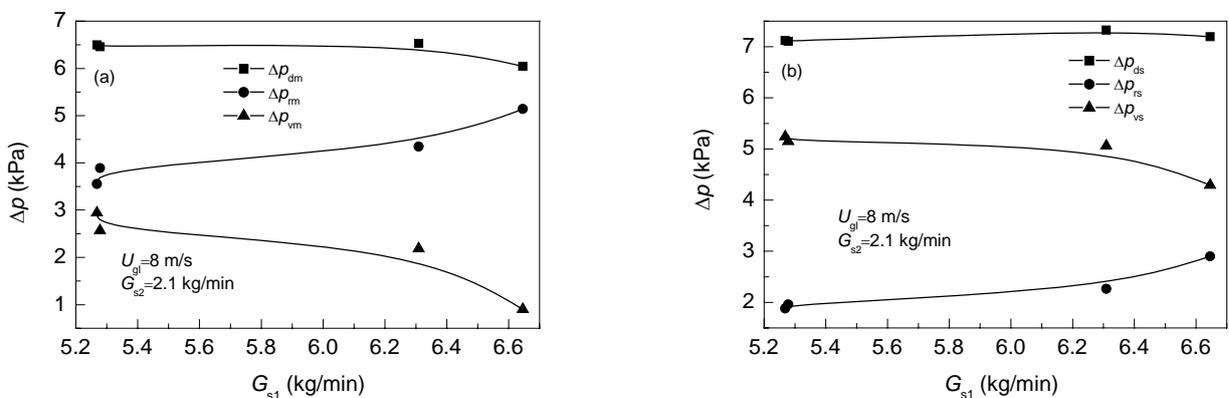


图3 主循环固体循环速率对主、副循环回路压降的影响  
Fig.3 Influence of  $G_{s1}$  on pressure drops of both circulating loops

低引起的压降下降, 故循环管的总压降降低. 图 3(b)给出了副循环回路的提升管压降 $\Delta p_{rs}$ 、循环管压降 $\Delta p_{ds}$ 及固体循环速率控制阀压降 $\Delta p_{vs}$ 随 $G_{s1}$ 的变化情况. 随 $G_{s1}$ 的增加,  $\Delta p_{rs}$ 升高,  $\Delta p_{vs}$ 降低, 而 $\Delta p_{ds}$ 只有少许增加. 循环管压降主要由副循环回路的环形供料床决定, 因供料床维持充满状态而压降基本不变, 故循环管压降的少许增加是因为循环管上部稀相区空隙率的降低造成的. 由图 2 可知, 固体循环速率 $G_{s2}$ 随 $G_{s1}$ 的增加而下降, 为维持固体循环速率 $G_{s2}$ 基本恒定, 需要增大控制阀 $E_2$ 的开度, 导致循环控制阀压降 $\Delta p_{vs}$ 降低.

#### 4.2 副循环回路固体循环速率的影响

固定主循环回路循环速率控制阀 $E_1$ 的开度, 主循环回路提升管压降 $\Delta p_{rm}$ 、副循环回路提升管压降 $\Delta p_{rs}$ 、总固体循环速率 $G_{st}$ 、主循环回路固体循环速率 $G_{s1}$ 随副循环回路固体循环速率 $G_{s2}$ 的变化关系见图 4.

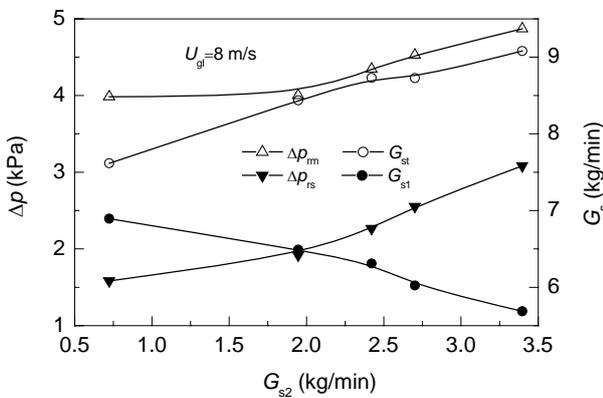


图 4 控制阀 $E_1$ 开度固定时副循环回路固体循环速率的影响  
Fig.4 Influence of  $G_{s2}$  on  $G_{st}$ ,  $G_{s1}$ ,  $\Delta p_{rm}$  and  $\Delta p_{rs}$  as the opening of  $E_1$  fixed

由图 4 可知, 随 $G_{s2}$ 的增加,  $\Delta p_{rm}$ ,  $\Delta p_{rs}$ 和 $G_{st}$ 增加,  $G_{s1}$ 稍有下降. 随 $G_{s2}$ 的增加, 提升管压降 $\Delta p_{rs}$ 因提升管 $L_2$ 段颗粒浓度的增加而增加. 主循环回路的循环管压降因藏料量的下降而降低, 使固体物料由循环管进入提升管的推动力降低, 故主循环固体循环速率 $G_{s1}$ 减小. 提升管下部 $L_1$ 段压降因 $G_{s1}$ 的减小而下降, 但提升管上部 $L_2$ 段压降随 $G_{s1}$ 的增加而升高, 两种相反作用的结果使主循环提升管压降 $\Delta p_{rm}$ 随固体循环速率 $G_{s2}$ 的增加而增加. 可见, 在提升管中部补充加料量的增加将导致提升管压降 $\Delta p_{rm}$ 和 $\Delta p_{rs}$ 增加, 即 $G_{s2}$ 的加入使提升管内颗粒浓度增加, 达到了在提升管扩径段增加颗粒浓度的目的.

主循环固体循环速率 $G_{s1}$ 恒定时, 副循环固体循环速率 $G_{s2}$ 对 2 个循环回路压降的影响见图 5. 由图 5(a)可知, 随 $G_{s2}$ 的增加, 主循环回路的循环管和固体循环速率控制阀压降降低而提升管压降升高. 随 $G_{s2}$ 的增加, 提升管上部 $L_2$ 段平均空隙率 $\varepsilon_2$ 下降而下部 $L_1$ 段平均空隙率 $\varepsilon_1$ 基本维持不变, 使提升管压降增加; 循环管压降因固体藏料量的减少而降低. 为维持固体循环速率 $G_{s1}$ 不变, 需要增加循环速率控制阀 $E_1$ 的开度, 因而控制阀压降降低. 由图 5(b)可知, 随 $G_{s2}$ 的增加, 副循环回路的提升管压降和循环管压降升高而循环速率控制阀 $E_2$ 压降降低. 提升管压降因颗粒浓度的增加而升高, 循环管压降因上部稀相区空隙率的降低而升高. 固体循环速率控制阀压降随阀开度的减小及固体循环速率的增加而升高, 在增加固体循环速率 $G_{s2}$ 时需要增大控制阀 $E_2$ 的开度, 两种相反作用的结果使作用于固体循环速率控制阀 $E_2$ 上的压降略有降低.

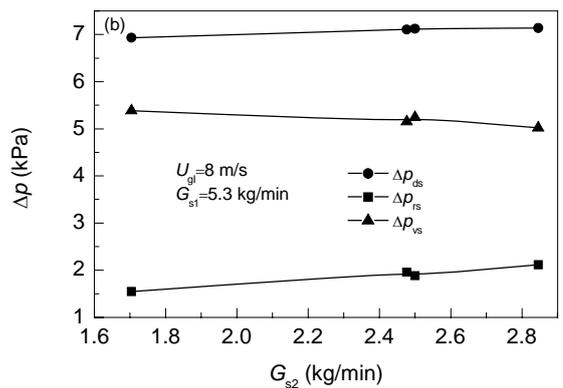
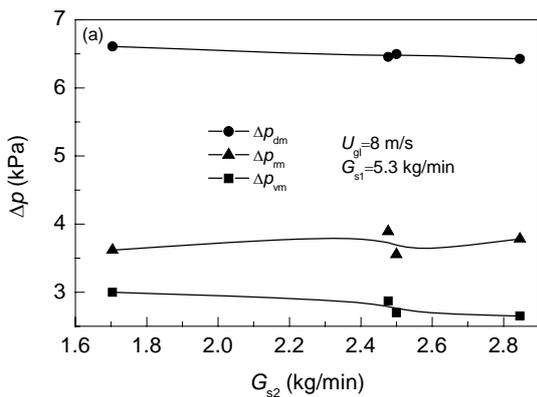


图 5 副循环固体循环速率对主、副循环回路压降的影响  
Fig.5 Influence of  $G_{s2}$  on pressure drops of both circulating loops

#### 4.3 表观气速的影响

固定主、副循环回路循环速率控制阀的开度, 主、副循环回路的固体循环速率和提升管压降随表观气速

的变化如图 6 所示. 由图可知, 随表观气速 $U_{g1}$ 的增加, 2 个循环回路的固体循环速率 $G_{s1}$ 和 $G_{s2}$ 均增加, 提升管压降 $\Delta p_{rm}$ 和 $\Delta p_{rs}$ 均降低. 随表观气速的增加, 气体对固

体颗粒的夹带能力增强,在固体循环速率控制阀开度不变时将有更多的固体颗粒被夹带上行,使固体循环速率增加.此时,虽然固体循环速率随表观气速的增加而增加,但提升管内的颗粒浓度却因表观气速的增加而降低,使提升管压降下降.

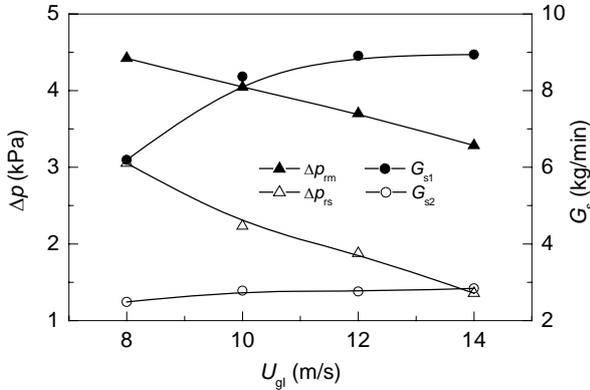


图6 控制阀开度固定时气速对固体循环量及提升管压降的影响  
Fig.6 Influence of  $U_{g1}$  on  $G_{s1}$ ,  $G_{s2}$ ,  $\Delta p_{tm}$  and  $\Delta p_{rs}$  as the opening of both  $E_1$  and  $E_2$  fixed

固体循环速率  $G_{s1}$  和  $G_{s2}$  维持不变时,表观气速  $U_{g1}$  对2个固体循环回路压降的影响如图7所示.图7(a)为主循环回路的压降变化,随  $U_{g1}$  的增加,循环管压降和循环速率控制阀压降升高而提升管压降降低.提升管压降的下降是由于提升管内颗粒浓度随气速增加而降低造成的,循环管压降的增加是藏料量增加的结果.由循环回路的压力平衡可知,此时固体循环速率  $G_{s1}$  有增加的趋势,为维持  $G_{s1}$  不变,需减小固体循环速率控制阀  $E_1$  的开度,即作用于阀  $E_1$  上的压降增加.由图7(b)可知,随表观气速增加,副循环回路提升管压降和循环管压降降低,固体循环速率控制阀压降升高.副循环循环管压降随  $U_{g1}$  的少许降低是因为上部稀相区颗粒浓度的下降造成的.为维持上部固体循环速率  $G_{s2}$  不变,同样需要减小固体循环速率,控制阀  $E_2$  的开度,导致作用于控制阀  $E_2$  上的压降增加.

综上所述,主循环回路固体循环速率、副循环回路固体循环速率、表观气速等操作参数不能独立变化,任意一个参数的改变都将引起另外2个参数的变化,三者间通过循环回路及系统的压力平衡来约束自身的状态.

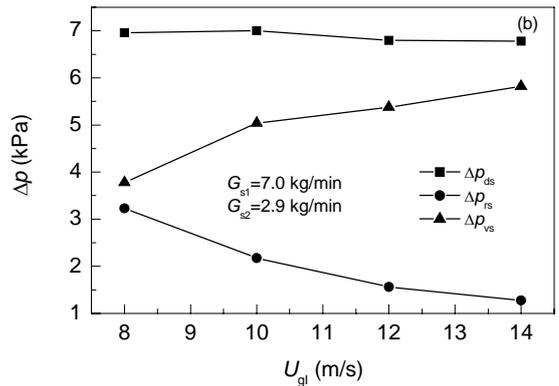
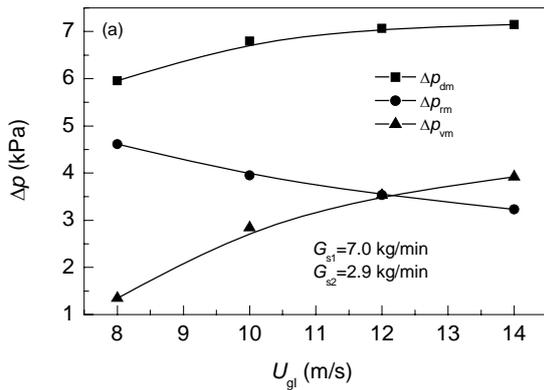


图7 下部表观气速对主、副循环回路压降的影响  
Fig.7 Influence of  $U_{g1}$  on pressure drops of both circulating loops

#### 4.4 循环系统的压力分布

循环系统主、副循环回路各部分压力沿循环系统轴向的变化见图8,右侧的示意图给出了图中各点在循环系统中的对应位置.由图可知,旋风分离器压降 $\Delta p_{cy}$ 较小(参见AI段),几乎可以忽略.对于副循环回路,提升管压降(HI段)除底部因扩径和补充加料导致颗粒浓度增加、床层压力沿轴向向上下降较快外,其余大部分沿轴向基本呈线性变化.对于主循环回路,在提升管 $L_1$ 段(FG)下部的颗粒入口区,固体颗粒进入提升管后在高速气体曳力作用下加速上升,产生了较大的加速压降,使床层压力沿轴向向上迅速下降;在连接 $L_1, L_2$ 段的扩径段(GH),扩径导致提升管内气速降低,颗粒浓度增加,

扩径段压降增加导致提升管压力在扩径处沿轴向向上下降较快.对于主副固体循环回路,循环管压降均由占主要部分的下部浓相区压降(BJ和DE)和上部稀相区压降(AB和AD)组成.在浓相区上部,相同轴向高度处提升管端压力均大于循环管端压力,正是由于循环管下部浓相区产生了较大的压降,才使固体循环速率控制阀处的循环管端压力大于提升管端压力,系统得以正常操作.对于主副循环回路中的固体循环速率控制阀,循环管端压力(E和J处)均大于提升管端压力(F和H处),即作用于控制阀上的压降均为正值.在此操作条件下循环系统能够正常运行,由提升管底部进入循环系统的气体不会“短路”进入循环管而引起操作失常.

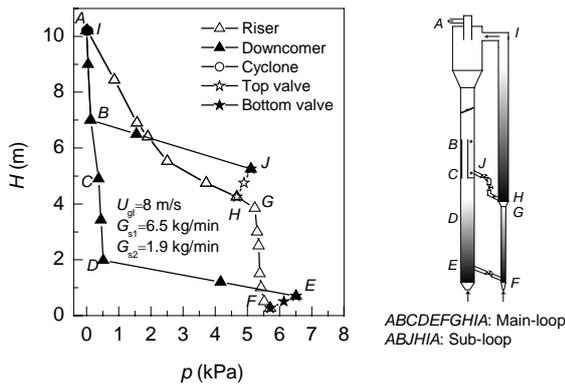


图 8 循环系统的压力分布  
Fig.8 Axial pressure profiles of dual-loop CFB system

### 5 结论

建立了双循环变径提升管反应器冷模实验装置, 通过分析主副循环回路的压力平衡关系研究了操作条件对提升管压降的影响, 得出如下结论:

(1) 增加主、副循环回路中任意一个回路的固体循环速率, 将使另一循环回路的固体循环速率降低, 但总固体循环速率和 2 个循环回路的提升管压降均升高, 提升管的固体颗粒浓度增加。

(2) 在固体循环速率控制阀开度一定时, 增加表观气速使主、副循环回路的固体循环速率增加, 但提升管压降降低, 固体颗粒浓度降低。

(3) 在主副循环回路固体循环速率控制阀处, 只有循环管端压力大于提升管端压力才能维持系统正常操作。增加系统藏料量、增加循环管直径、增加副循环供料床高度和直径等措施均有利于维持循环系统的正常操作。

### 符号表:

$g$	重力加速度 ( $m^2/s$ )		
$G_{s1}$	提升管 $L_1$ 段固体循环速率 ( $kg/min$ )		
$G_{s2}$	副循环补充加料固体循环速率 ( $kg/min$ )		
$G_{st}$	提升管 $L_2$ 段固体循环速率 ( $kg/min$ )		
$L$	高度 ( $m$ )	$U_{gl}$	提升管入口表观气速 ( $m/s$ )
$\Delta p$	压降 ( $Pa$ )	$\bar{\epsilon}$	平均空隙率
$\rho_p$	固体颗粒密度 ( $kg/m^3$ )		
下标			
ac	加速	cy	旋风分离器
d	循环管浓相	dm	下部循环回路循环管
ds	上部循环回路循环管	fr	摩擦力
l	循环管稀相	rm	下部循环回路提升管
rs	上部循环回路提升管		
vm	下部循环回路固体循环速率控制阀		
vs	上部循环回路固体循环速率控制阀		

### 参考文献:

- [1] 许友好, 张久顺, 龙军. 生产清洁汽油组分的催化裂化新工艺 MIP [J]. 石油炼制与化工, 2001, 32(8): 1-5.
- [2] 许友好, 张久顺, 杨铁男, 等. 一种制取异丁烷和富含异构烷烃汽油的催化转化方法 [P]. 中国专利: 1232069A, 1999-10-20.
- [3] Li J H, Kwauk M. Particle-Fluid Two-phase Flow—The Energy-minimization Multi-scale Method [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. 103-140.
- [4] Berruti F, Chaouki J, Godfroy L, et al. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed Risers: A Review [J]. Can. J. Chem. Eng., 1995, 73: 579-602.
- [5] Bi H T, Zhu J X. Static Instability Analysis of Circulating Fluidized Bed and the Concept of High Density Risers [J]. AIChE J., 1993, 39: 1272-1280.
- [6] Bai D R, Issangya A S, Zhu J X, et al. Analysis of the Overall Pressure Balance around a High-density Circulating Fluidized Bed [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1997, 36: 3898-3903.
- [7] Schut S B, van der Meer E H, Davidson J, et al. Gas-Solids Flow in the Diffuser of a Circulating Fluidized Bed Riser [J]. Powder Technol., 2000, 111: 94-103.
- [8] Marjanovic P, Levy A, Mason D. An Investigation of the Flow Structure through Abrupt Enlargement of Circular Pipe [J]. Powder Technol., 1999, 104: 296-303.
- [9] Wang X H, Gao S Q, Xu Y H, et al. Gas-Solids Flow Patterns in a Novel Dual-loop FCC Riser [J]. Powder Technol., 2005, 152: 90-99.

## Effects of Operating Conditions on Pressure Drops in a Dual-loop Circulating Fluidized Bed

WANG Xiang-hui<sup>1,3</sup>, GAO Shi-qiu<sup>1</sup>, SONG Wen-li<sup>1</sup>, XU You-hao<sup>2</sup>, ZHANG Jiu-shun<sup>2</sup>

(1. Multi-phase Reaction Laboratory, Institute of Process Engineering, CAS, Beijing 100080, China;

2. Res. Inst. Petroleum Processing, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A riser with varying diameter and dual-loop is set up to study the fluid catalytic cracking (FCC) process of maximizing iso-paraffins (MIP). The riser is composed of a bottom pneumatic transport region with smaller diameter and higher gas velocity and a top fast fluidization region with larger diameter and lower gas velocity. Particles are added to the riser at both the bottom and the middle positions, and two solids circulating loops named main-loop and sub-loop are formed. The pressure balance of the two solids circulating loops and the effects of operating conditions on pressure drops of the riser were investigated in experiment. The pressure drops of both main-loop and sub-loop of the riser decrease with increasing gas velocity. The total solids circulating rate and the pressure drop of the two solids circulating loops increase with increase in the either solids circulating rate, although the increase of one solids circulating rate leads to the decrease of the other. Two circulating loops are influenced by each other, and the prerequisite for normal operation is that pressure balances of both loops are maintained and the pressure of downcomer side is higher than that of riser side at each solids circulating rate control valve. The increase in inventory, downcomer diameter and downcomer height is helpful to maintain the normal operation of system.

**Key words:** riser; circulating fluidized bed; circulating loop; pressure drop; pressure balance