

基于离心与惯性作用的新型气固分离装置的结构

刘显成, 卢春喜, 时铭显

[中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249]

摘要: 后置烧焦管出口的气固分离装置是实现后置烧焦管式组合再生工艺的关键设备之一. 在对气固分离机理系统分析的基础上, 开发了一种基于离心与惯性协同作用机理的新型气固分离装置. 以滑石粉为物料, 在相同实验条件下对9种不同结构尺寸的分离器的分离效率和压降进行了实验测定. 结果表明, 不加挡板、不加折边、开缝宽度相同、无因次排气管径在0.50~0.55范围内的结构比较合理.

关键词: 气固分离器; 分离效率; 压降

中图分类号: TQ028.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2005)05-0504-05

1 前言

针对催化裂化原料日益重质化的趋势, 开发了一种既能发挥管式烧焦的优点又能克服其不足的后置烧焦管式组合再生工艺. 后置烧焦管出口的气固分离装置是实现这种工艺的关键设备之一. 这种分离装置要求具有结构简单、气固分离效率高、压降低、操作弹性大等优点.

文献报道的气固分离装置多集中在催化裂化提升管反应器上, 如石油大学开发的FSC, VQS快分系统^[1,2], 已成功应用于催化裂化提升管反应器上. 这些气固分离装置的结构较为复杂且压降偏高, 因而不适于这种新型组合再生工艺. 依据惯性分离原理和附壁效应开发的下行床气固分离装置也有文献^[3-5]报道. 这些装置的设计思路为本装置的开发提供了有益借鉴. 清华大学开发的用于下行床的气固分离器^[3]气相通过中心管的一端排出, 而本研究所设计的分离器气相沿切向经过排气管上的窄缝时方向突然发生偏转而排出, 可减少颗粒夹带, 同时取消了切割板, 更便于实际应用.

为满足后置烧焦管式组合催化裂化再生工艺的要求, 本实验设计了9种不同结构尺寸的气固分离装置, 测定了不同操作条件下各结构的分离特性, 根据其性能优劣优选出了适宜的结构.

2 分离原理

气固分离装置的主视图和左视图如图1所示. 分离装置外壳呈拱门状, 中间为一开有2条窄缝的排气管. 操作过程中, 气固混合物竖直向上从拱门状外壳一侧进入分离器, 在分离装置内由于两相流中固相惯性力远大于气相, 进入分离器的固体颗粒沿拱门状的外壳运动,

经过180°的圆周运动, 从拱门状外壳的另一侧排出; 而大部分气体流经窄缝时方向发生偏转, 由排气管排出, 实现气固分离.

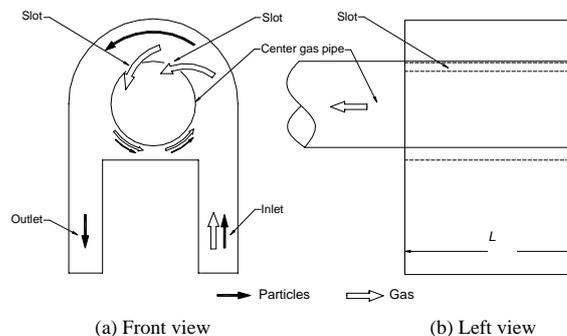


图1 分离器示意图

Fig.1 Schematic diagram of separator

3 实验装置及测量方法

气固分离装置主要结构参数包括气固混合物入口面积 $l_i \times L$, 颗粒出口面积 $l_o \times L$, 无因次排气管径 r/R , 开缝位置 α, β , 开缝宽度 d_1, d_2 等, 如图2所示, 其中入口宽度 $l_i=70$ mm, 长度 $L=300$ mm. 实验以图2所示的分离器为基本结构, 考察了无因次排气管径、开缝宽度、折边及挡板对分离效率及压降的影响.

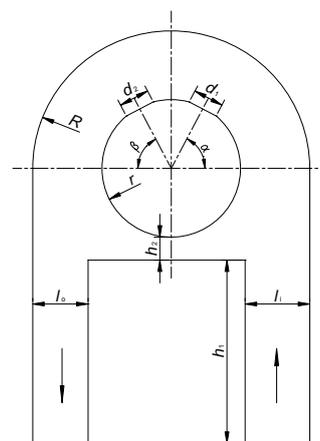


图2 分离器的标准型

Fig.2 Basic structure of separator

实验装置如图 3 所示. 所用气体为常温空气, 颗粒为 45 μm 滑石粉, 颗粒密度 2700 kg/m^3 , 中位粒径 $d_m=13.1 \mu\text{m}$, 粒度分布见表 1. 为便于操作, 采用离心风机在系统出口引风操作. 分离器入口表观风速范围 14.8~26.6 m/s , 颗粒浓度范围 9.8~98.3 g/m^3 .

将准确称重的滑石粉通过加料斗均匀加入系统, 由空气携带进入分离器. 分离下来的滑石粉进入灰斗, 气体由排气管排出. 分离器压降用 U 形管压差计测得. 每一实验条件下取 3 组平行数据的平均值作为该条件下的实测值. 分离效率 η 采用下式计算:

$$\eta = \frac{\text{分离器灰斗收集的物料量}}{\text{加入系统的物料量}} \times 100\%$$

表 1 滑石粉的粒度分布

Table 1 Particle diameter distribution of talcum powder

Particle diameter (μm)	2	2.52	3.17	4	5.04	6.35	8	10.1	12.7	16	20.2	25.4	32	40.3
Cumulative weight (%)	0.111	2.29	5.15	8.83	13.45	19.42	26.9	36.69	48.42	62.11	77.39	91.67	97.67	99.68

4 结构优选步骤

先考察挡板的影响. 在保持标准型分离器其他结

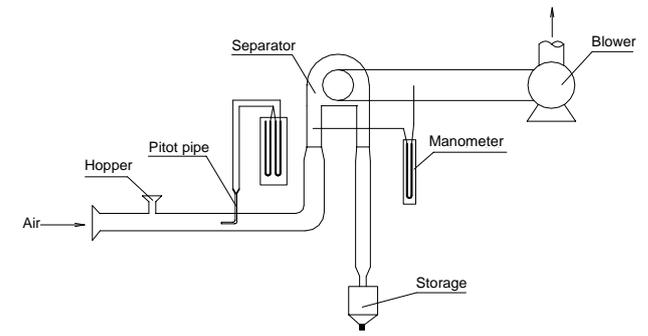


图 3 实验装置简图

Fig.3 Schematic diagram of experimental set-up

构尺寸相同的情况下, 考察 3 种结构: 全封闭、半封闭、全开放(无挡板)型式, 结构如图 4 所示.

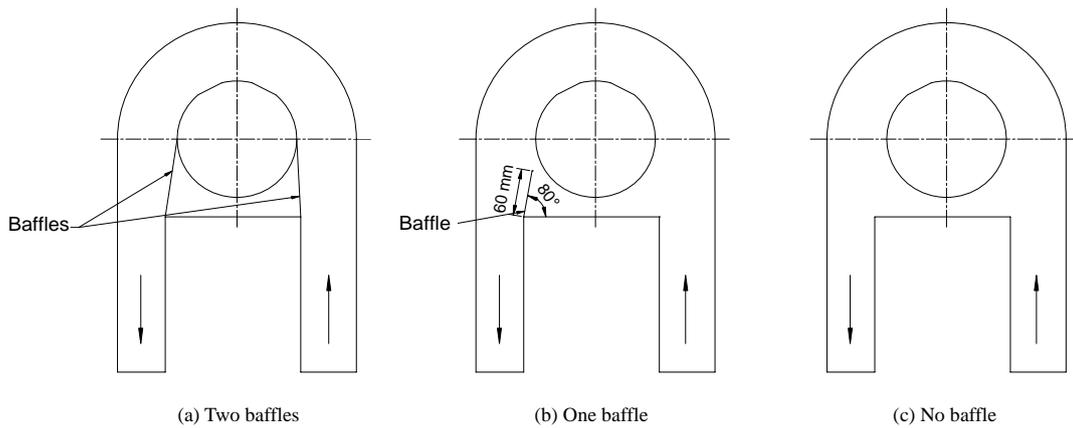


图 4 不同挡板型式分离器

Fig.4 Separators with different baffles

以分离效率和压降的综合特性为优化目标, 优选出一种理想结构后, 进一步考察折边的影响. 折边就是在标准型分离器气流出口的开缝处加一与排气管切向成 30°角的挡板, 其宽度为缝宽的一半, 具体结构见图 5.

为了考察排气管径的影响, 在标准型分离器基础上将排气管径 D 分别扩大 10%, 33% 和缩小 20% (见图 6), 并与标准型分离器进行对比, 选出最佳结构. 最后, 考察开缝宽度对分离性能的影响, 即将开缝分为两种情况: 一种开缝宽度都为 33 mm ; 另一种开缝一宽一窄, 靠近气固相入口处缝宽 33 mm , 另一条缝宽 26 mm , 如图 7 所示.

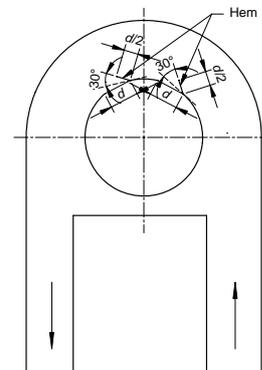


图 5 带折边的分离器

Fig.5 Separator with hems at the slot

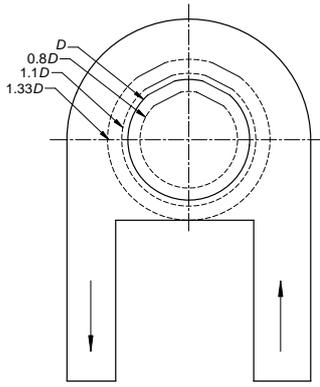


图6 不同排气管径
Fig.6 Separators with different center pipe diameters

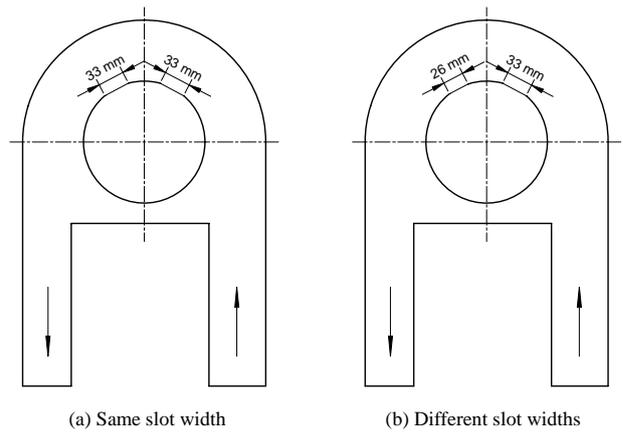


图7 不同缝宽示意图
Fig.7 Schematic diagram of separators with different slot widths

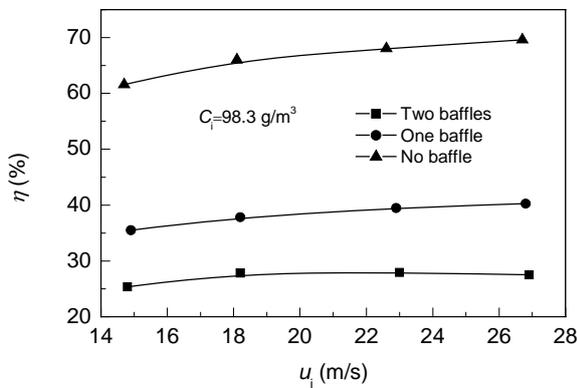


图8 挡板对分离效率的影响
Fig.8 Effect of baffle on separation efficiency

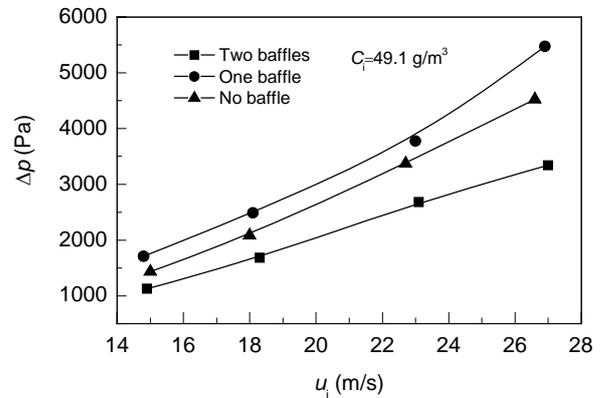


图9 挡板对分离器压降的影响
Fig.9 Effect of baffle on pressure drop

5 结果及分析

5.1 挡板的影响

图8和9为全封闭、半封闭、全开放(无挡板)3种不同结构的分离装置在不同操作条件下的分离效率和压降的实验结果. 由图可知, 在相同条件下, 全开放式分离器的分离效率明显高于其他两种型式, 而压降介于其他两种型式之间. 从压降和效率的实验结果可以推断, 这种新型分离装置的分离机理属离心与惯性协同分离机理. 全封闭式结构主要以惯性分离为主, 离心分离所占比例较小, 因此其压降和效率最低; 半封闭式的分离机理中离心分离占一定比例, 因此其效率和压降均比全封闭式的要高, 特别是其压降在3种结构中最高, 主要是由于挡板在离心分离时产生的阻力造成的; 全开放(无挡板)式的分离机理中离心分离占的比例最大, 因此其分离效率明显高于其他两种型式, 而压降比半封闭式的还要低.

5.2 折边的影响

加折边的目的是阻止固体颗粒进入排气管, 然而从

图10所示的实验结果看, 折边不仅阻止了颗粒的进入, 同时也增大了气体进入排气管的阻力, 使分离效率降低, 压降增加. 因此, 加折边并没有起到提高分离效率的作用.

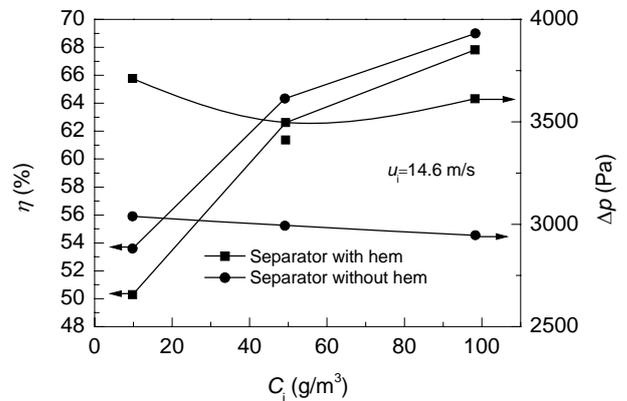


图10 折边对分离效率和分离器压降的影响
Fig.10 Effect of hem on the separation efficiency and pressure drop

5.3 排气管径的影响

将排气管半径 r 与分离器外壳圆弧段半径 R 之比 r/R 定义为无因次排气管径, 其对压降和分离效率的影响分别见图 11 和 12. 从图 11 可以看出, 随无因次排气管径的增大, 压降先迅速下降, 当无因次管径为 0.5~0.55 时, 压降基本保持不变. 进一步增大排气管径, 压降又开始降低. 这是因为管径增大使排气管中的气速降低. 但从图 12 可以看出, 排气管径并非越大越好, 当无因

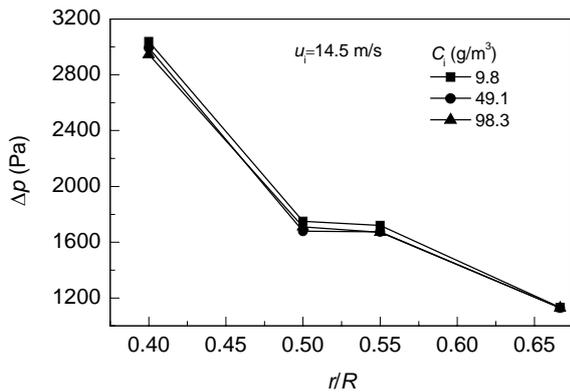


图 11 排气管径对分离器压降的影响
Fig.11 Effect of diameter of center pipe on pressure drop

次管径超过 0.55 时, 分离效率明显下降. 这是由于管径增大缩小了底部环形空间, 使离心分离的效率降低. 当排气管径扩大 33% 时, 底部环形空间已缩小为零, 此时相当于全封闭式分离器, 由前面的讨论可知, 分离效率明显降低.

由以上的讨论可知, 无因次排气管径在 0.5~0.55 内既可保证压降不太高, 同时又可保证分离效率不过低. 因此, 可作为确定最佳排气管径的依据.

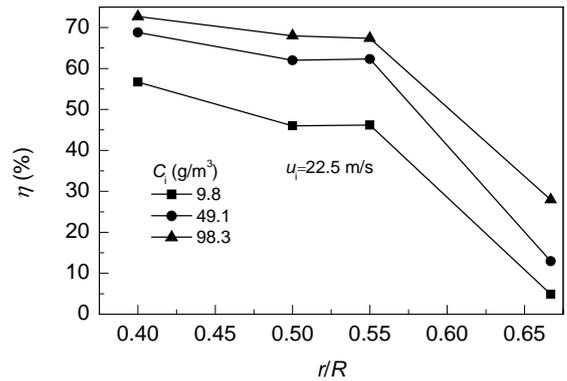


图 12 排气管径对分离效率的影响
Fig.12 Effect of diameter of center pipe on separation efficiency

5.4 开缝宽度的影响

窄缝宽度不等的分离器减小了开缝的总面积, 是为了增加气体通过窄缝的速度, 以期提高分离效率. 但如图 13 所示, 分离器的压降略有增加, 而分离效率几乎没有变化. 实验表明, 单纯靠减小开缝宽度增加气流的过缝速度, 不能提高分离效率.

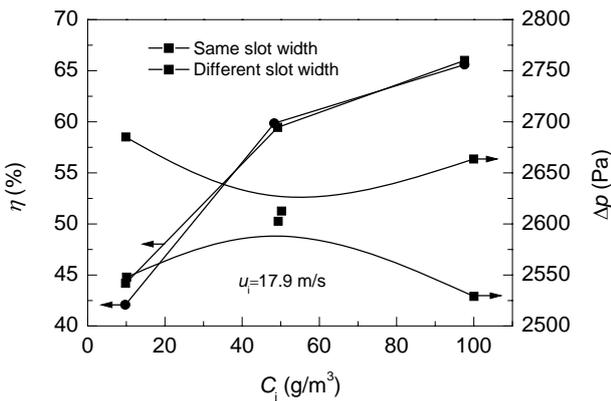


图 13 缝宽对分离效率和分离器压降的影响
Fig.13 Effect of slot width on separation efficiency and pressure drop

6 分离机理的定性分析

本研究所述的分离装置以惯性分离为主, 并结合了离心分离的作用. 竖直向上运动的气固两相流由分离器

进口进入后, 由于固体颗粒的惯性远大于气体, 因此有沿弧形外壳作圆周运动的趋势, 而气体则在经过窄缝时方向发生偏转而排出, 因而分离过程以惯性分离为主. 经过 180° 圆弧运动的颗粒大部分依惯性向下运动进入灰斗, 距离外壳较远的部分颗粒则被气体携带, 绕过排气管下方空间作圆周运动, 此时离心分离起主要作用. 绕过中心管返回入口区的气体和固体颗粒对刚进入分离器的混合物产生向外壳推动的作用, 阻止固体颗粒走短路而由窄缝排出. 不同挡板型式的实验结果也证明了这个观点, 全封闭式分离器固体颗粒易走短路, 压降最低, 分离效率也最低; 半封闭式利用了离心分离, 同时也不可忽视挡板的阻力, 因此效率提高的同时压降也有所提高, 而全开放式分离器更加充分地利用了离心分离机理, 同时减小了阻力, 因此分离效率最高而压降也有所降低. 排气管径的变化一方面影响惯性和离心分离的分离空间, 同时也显著影响排气管中的气速, 因此对分离效率和压降的影响都很大. 实验表明, 对于一定的分离器外壳尺寸, 最优排气管径的范围不大. 通过改变窄缝宽度以期提高分离效率的做法需综合考虑, 缝宽减小效率应增加, 同时对气体的阻力也增大, 压降升高, 最佳的开缝宽度还有待进一步研究. 折边的加入对固体颗粒有碰撞作用, 反弹回来的固体颗粒会扰乱整个流场, 使分离效率下降, 同时对气体的阻碍作用使压降增加.

因此,折边不宜作为改进分离器性能的因素.

这种新的分离装置以快速、粗分为目的,要求结构简单、压降低,分离平均粒径 $60\ \mu\text{m}$ 的固体物料效率大于 96% 即可满足工艺要求. 本实验采用 $45\ \mu\text{m}$ 的滑石粉作为考察不同结构效率的实验物料,主要是为了便于区分各不同结构的差别. 如果以分离较细颗粒(如平均粒径 $20\ \mu\text{m}$)为目标(如二级旋分),就不能采用以惯性分离机理为主的分离装置.

将优选出的分离器应用于后置烧焦管式组合催化裂化再生工艺的大型冷模实验(分离器入口宽度 $l_i=70\ \text{mm}$, 长度 $L=300\ \text{mm}$), 实验所用固体颗粒为平均粒径 $68\ \mu\text{m}$ 的 FCC 平衡剂, 实验结果见图 14. 以分离器入口截面积为基准, 在颗粒循环强度 $G_s=105.2\ \text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、表观气速 $5.28\sim 15.85\ \text{m/s}$ 的条件下, 分离效率大于 97%, 压降小于 2800 Pa.

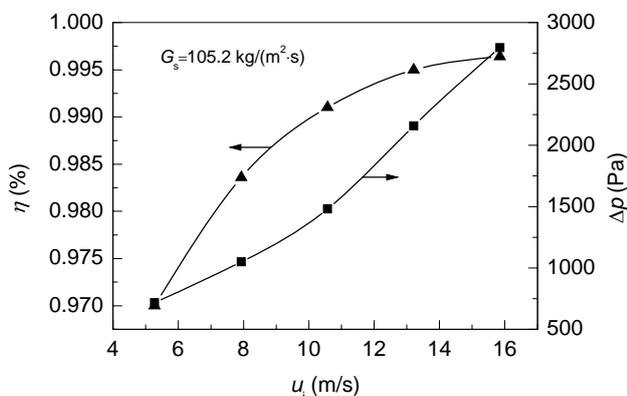


图 14 大型冷模实验结果

Fig.14 Experimental result of large scale cold model

7 结论

基于离心与惯性协同作用机理, 开发了一种用于 FCC 组合再生工艺后置烧焦管出口的气固分离器. 通过加尘实验比较了不同结构对分离效率和压降的影响. 结果表明, 适当的环形空间是气固有效分离的必要条件. 加折边及减小开缝面积只能增加分离器压降, 分离效率没有改善甚至降低. 不加挡板、不加折边、无因次排气管径在 $0.50\sim 0.55$ 内的分离器结构比较合理.

符号表:

C_i	分离器入口颗粒浓度 (g/m^3)	D	排气管直径 (mm)
d_m	颗粒中位粒径 (μm)	d_1, d_2	窄缝宽度 (mm)
L	分离器长度 (mm)	G_s	分离器入口颗粒循环强度 [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]
l_i	分离器入口宽度 (mm)	l_o	分离器出口宽度 (mm)
Δp	分离器压降 (Pa)	r	中心排气管内径 (m)
R	拱门状外壳内径 (m)	u_i	分离器入口表观气速 (m/s)
α, β	窄缝定位角 ($^\circ$)		
下标			
i	进口	o	出口
s	颗粒		

参考文献:

- [1] 曹占友, 卢春喜, 时铭显. 新型汽提式粗旋风分离器系统的研究 [J]. 石油炼制与化工, 1997, 22(3): 47-51.
- [2] 卢春喜, 蔡智, 时铭显. 催化裂化提升管出口旋流快分(VQS)系统的实验研究与工业应用 [J]. 石油学报(石油加工), 2004, 20(3): 24-29.
- [3] 杨艳辉, 钱震, 余皓, 等. 用于气固并流下行式反应器中的新型气固分离装置 [J]. 石油炼制与化工, 2000, 31(12): 24-27.
- [4] 李松庚, 林伟刚, 姚建中. 下行床弧面气固分离装置的分选效率实验 [J]. 过程工程学报, 2002, 2(1): 12-16.
- [5] 都林, 姚建中, 林伟刚. 下行床弧面气固快速分离器内的颗粒运动 [J]. 过程工程学报, 2003, 3(6): 481-485.

Structural Optimization of a Novel Gas-Solid Separator Incorporating Inertial and Centrifugal Separation

LIU Xian-cheng, LU Chun-xi, SHI Ming-xian

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

Abstract: As the feed stuffs of fluid catalytic cracking (FCC) become increasingly heavier, a new regeneration technology combining post coke-burning riser and conventional turbulent bed regenerator has been developed in this study. One of the key components of this technology is the gas-solid separator located at the outlet of the riser regenerator, having the advantages such as simple structure, high separation efficiency, low pressure drop and flexible operation. To meet these requirements a novel gas-solid separator incorporating inertial and centrifugal separation was investigated in detail. Talcum powder was employed as solid medium. Separation efficiency and pressure drop were experimentally tested in nine separator configurations under the same gas velocity and particle concentration at the separator inlet. The results show that a reasonable scheme is as follows: no baffle to block the solid circulation, no hem at the slots to obstruct gas entering the centre pipe, and dimensionless radius of centre pipe between 0.50 and 0.55.

Key words: gas-solid separator; separation efficiency; pressure drop