

# 新型旋风管内颗粒浓度分布的实验研究

孙治谦, 金有海, 王建军, 张艳

[中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 东营 257061]

**摘要:** 在 Shell 型旋风管基础上进行了结构与尺寸的优化匹配, 得到一种新型高效旋风管. 采用等动采样方法, 对新型旋风管内的颗粒浓度场进行了测试与分析. 实验结果表明, 新型旋风管开有排尘槽的锥形排尘结构有较好的分离效果, 并在一定程度上可以降低颗粒的返混; 加设导流锥结构可显著减少短路流, 并能使细小颗粒受到较强的惯性作用而得到分离. 灰斗上方区域, 沿轴向上颗粒浓度呈下降的趋势, 表明内旋流对颗粒具有较强的二次分离作用. 对粒级效率的估算结果表明, 新型旋风管可将粒径大于  $7\ \mu\text{m}$  的颗粒全部除净,  $3\sim 7\ \mu\text{m}$  的细小颗粒的粒级分离效率可达 86% 以上, 而相同操作条件下 Shell 型旋风单管仅能将  $10\ \mu\text{m}$  以上的颗粒除净. 本工作为旋风管的结构改进、尺寸优化乃至工业推广应用提供了必要的基础.

**关键词:** 旋风管; 等动采样; 颗粒浓度分布

**中图分类号:** TQ051.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2008)03-0432-06

## 1 前言

催化裂化第三级旋风分离器(简称三旋)是催化裂化装置能量回收系统的关键设备, 其性能的好坏直接影响烟机转轮的叶片寿命和能量回收系统的长周期安全运行<sup>[1]</sup>. 目前, 国内外大多数三旋都是采用立管式多管旋风分离器, 其核心部件是导叶式旋风管. 因此, 对三旋的研究归结于对单管的性能研究.

国外普遍应用的催化裂化立管式三旋最早由美国 Shell 公司于 20 世纪 60 年代开发应用, 1975 年英荷 Shell 公司取消了旋风管的泄料盘, 克服了泄料孔易被堵塞的缺点. 工业应用发现, 由此旋风管组成的三旋可完全除净  $20\ \mu\text{m}$  以上的颗粒, 但大于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒约有 3%~6% 由排气芯管逃逸. 国内对于旋风管的研究起步较晚, 虽然中国石油大学等相继开发出了一系列高效旋风管, 但是在工程应用中仍存在堵塞、磨损、单管压降偏高等问题<sup>[2-5]</sup>. 因此, 需要在研究国内外典型旋风管的基础上, 不断改进和开发新型高效低阻旋风管, 以提高三旋的各项性能指标.

旋风管内是复杂的三维湍流旋流场, 颗粒运动伴随扩散与碰撞, 其初始条件也有一定的随机性, 迄今尚无法完全从气固两相流基本方程出发用数值模拟来求解, 国内外的研究者只能在大量的气固两相流动参数测量实验的基础上, 结合各自的假设及理论分析建立相关的分离机理模型. 因此, 固相颗粒浓度分布的测量是研究旋风分离机理的基础之一.

目前在旋风分离器或旋风管内气固两相流动参数

的实验研究大多集中在纯气相流场, 对固相颗粒浓度分布的研究相对较少, 而对于旋风分离器内固相颗粒浓度分布的研究多集中于蜗壳式旋风分离器<sup>[6-8]</sup>, 对于导叶式旋风管内固相颗粒浓度分布的研究还少见报道, 仅有王建军等<sup>[9,10]</sup>针对 PDC 和 PSC 型旋风管进行了相关研究, 得到了旋风管内颗粒浓度分布的一般规律, 提出了在旋风管内的不同区域存在不同的颗粒分离机理的观点. 本工作采用等动采样的方法, 全面测定新型旋风管内颗粒浓度场, 绘制了颗粒总浓度分布曲线、粒级浓度分布曲线以及中位粒径分布曲线, 总结出颗粒浓度沿径向和轴向的分布特点, 为旋风管的结构改进、尺寸优化乃至工业推广应用提供了必要的基础.

## 2 实验

### 2.1 实验背景

本研究在美国壳牌公司的 Shell 型旋风管的基础上进行结构与尺寸的优化匹配, 将旋风管排气芯管内径由 147 mm 增加到 154 mm, 在排气芯管末端增设导流锥, 且用开有 2 条排尘槽的锥形排尘结构取代直筒形排尘结构, 得到了一种新型高效旋风管, 其结构与尺寸如图 1 所示.

通过性能实验发现, 在入口流量  $Q_i=2100\sim 2700\ \text{m}^3/\text{h}$ 、入口粉尘浓度  $C_i=1\ \text{g}/\text{m}^3$ 、底部泄气率  $q=0$  的相同操作条件下, 新型旋风管比 Shell 型基准旋风管的分离效率高约 3%~5%, 而两者的压降基本相当, 这表明新型旋风管具有良好的分离性能. 通过对新型旋风管的流场测试发现, 其主要分离空间和锥形排尘结构内气流

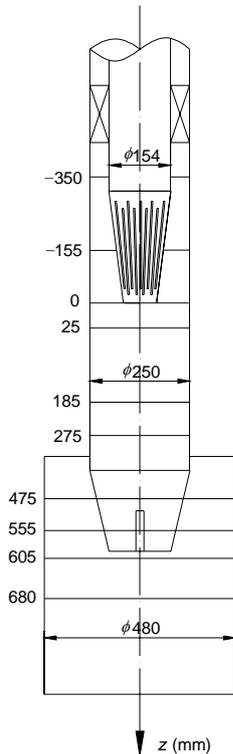


图 1 旋风管结构尺寸与截面布置  
Fig.1 Structural dimensions of cyclone tube and section configuration

的旋转强度比 Shell 型旋风管高, 边壁下行流和中心区域上行流速度较大, 这对保持较高的分离效率非常有利. 为进一步揭示新型旋风管的分离机理, 本工作在性能实验及流场测试的基础上, 全面测定新型旋风管内颗粒浓度, 对旋风管内颗粒浓度分布的形态及特点进行深入研究.

### 2.2 实验装置

本实验装置主要由鼓风机、通风管道系统、旋风管本体、测量系统、加尘装置和采样系统六部分组成. 装置见图 2. 鼓风机由两台离心式风机串联, 旋风管的筒体及灰斗均由厚度为 6 mm 的透明有机玻璃制成, 排气管及导向叶片均为钢件. 实验用粉尘为滑石粉, 其中位粒径为 10.13  $\mu\text{m}$ .

加尘采用气力输送方式, 利用压缩机提供的压缩空气, 将粉尘通过喷射加料器连续送入旋风管入口管道, 与鼓风机送来的空气充分混合后进入进气室, 经导向叶片产生旋转运动后进入旋风管分离空间. 在惯性力作用下, 分离下来的粉尘进入灰斗后被收集, 而分离后的净化气体则由排气芯管进入排气室, 由出口管线经烟囱排入大气. 整个装置处于正压下操作.

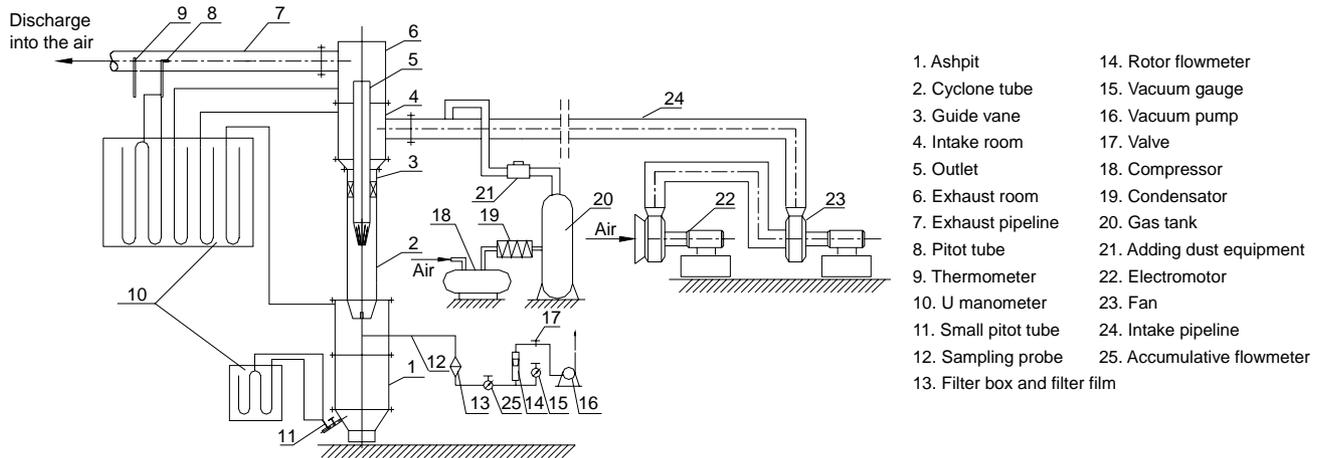


图 2 颗粒浓度测量的实验装置简图  
Fig.2 Experimental set-up of measurement for particle concentration distribution

### 2.3 实验方法

本实验采用等动采样法测量颗粒浓度<sup>[6]</sup>.

实验前, 首先用流场测试技术测定出所有采样点的气流速度. 采样过程中, 将采样嘴对准采样点来流方向, 调节抽吸泵阀门, 根据流量计读数保证采样气速与采样点气流速度相等. 采用干法捕集采样颗粒, 在一定采样时间内, 抽取一定量的含尘气流, 被抽出的颗粒捕集在

滤盒内的滤膜上, 然后在精度为万分之一的天平上称重, 可计算得出分离器内各采样点总浓度  $C$ . 将已称重的被采集粉尘颗粒样品分散于按照仪器要求制备好的空白液中, 在 Coulter LS230 型粒度分析仪上进行粒度分析, 得到样品的粒度分布, 即可计算得采样点粒径为  $d_p$  的颗粒的浓度  $C(d_p)$ . 每次采样时间控制在 3~15 min, 每个测点采样 3 次取平均值.

采样误差可由文献[7]提供的公式进行修正,采样截面布置见图1.图3~8中坐标原点取在旋风管的几何中心处.

### 3 结果与分析

#### 3.1 颗粒浓度沿径向的分布特点

根据新型旋风管的结构特点,分5个区域全面测量旋风管内颗粒总浓度、粒级浓度及中位粒径的分布.实验结果表明,在不同的区域内,颗粒浓度沿径向的分布呈现出不同的特点.

##### (1) 入口圆柱环形空间

导向叶片以下,旋风管内壁与排气芯管外壁间的环形区域称为入口圆柱环形空间.由图3可以看出,不同粒径( $d_p$ )的颗粒浓度分布形态大致相同,沿半径( $r$ )方向呈外高内低分布,颗粒由于受到很强的离心力的作用而被甩到旋风管边壁附近并形成高浓区.随着颗粒粒径的增大,其相对浓度逐渐降低,表明大粒径颗粒受到的离心力较大,容易分离.

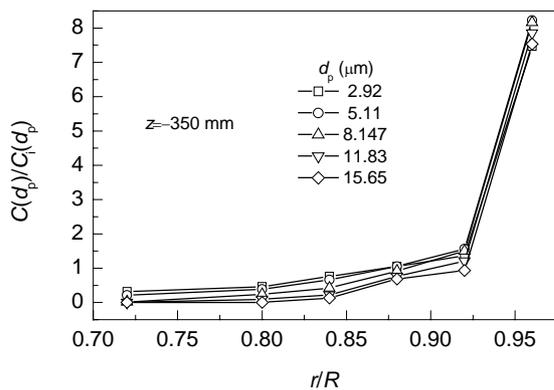


图3 圆柱环形空间颗粒粒级浓度沿径向的分布

Fig.3 Particle grade concentration distributions in the column annular space at different radial positions

含尘气流经导向叶片产生旋转运动后,在入口圆柱环形空间仅得到初步分离,湍流、旋转流及二次流尚未得到充分的发展,因此除边壁区域外,颗粒浓度变化较为平稳.

##### (2) 渐扩环形空间

旋风管内壁与导流锥外壁间的环形区域称为渐扩环形空间.由图4可知,与入口环形空间相比,渐扩环形空间在 $r/R < 0.92$ 范围内颗粒浓度分布稍有波动,但总体趋势仍然是边壁高、中心低.由已测得的流场数据可知,与 $z = -350$  mm截面相比, $z = -155$  mm截面切向、轴向速度稍有下降,但是波动略有上升,这说明经过了圆柱环形空间的初步分离,含尘气流的湍流及涡旋有所发展,从而导致了颗粒分布在小范围内波动.

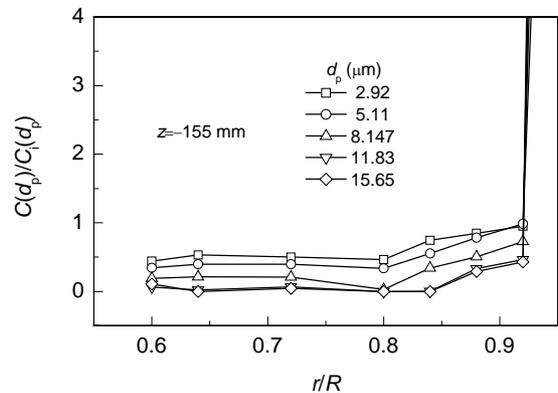


图4 渐扩环形空间颗粒粒级浓度沿径向的分布

Fig.4 Particle grade concentration distributions in the gradually expanded annular space at different radial positions

粒径为11.83和15.65  $\mu\text{m}$ 的曲线基本重合且浓度很低,表明此区域对粒径10  $\mu\text{m}$ 以上的大颗粒已经有非常好的分离效果.对于粒径为3~8  $\mu\text{m}$ 的细小颗粒,在 $0.6 < r/R < 0.8$ 的区域内颗粒粒级浓度较低且分布比较平缓,在 $r/R > 0.8$ 的区域内颗粒粒级浓度随 $r/R$ 的增大而迅速增加.其原因在于,新型旋风管带有侧缝的导流锥能使细小颗粒受到较强的惯性分离作用,使之甩到外旋流区域,从而得到分离.

##### (3) 主要分离空间

主要分离空间又称柱形分离空间,是指导流锥下口到排尘锥上口间的柱形区域.由图5知,由于 $z = 25$  mm和 $z = 275$  mm截面边壁处恰有滑石粉料螺旋线通过,故其浓度远高于 $z = 185$  mm截面,最高浓度可达入口浓度的数十倍.在 $r/R \geq 0.85$ 范围内,由于受下行流强旋转的影响,颗粒被甩向边壁,其浓度较高,且浓度梯度较大;而在 $r/R < 0.85$ 范围内,浓度值较低且变化幅度不大,表明大多数颗粒在分离空间内得到了比较充分的分离.

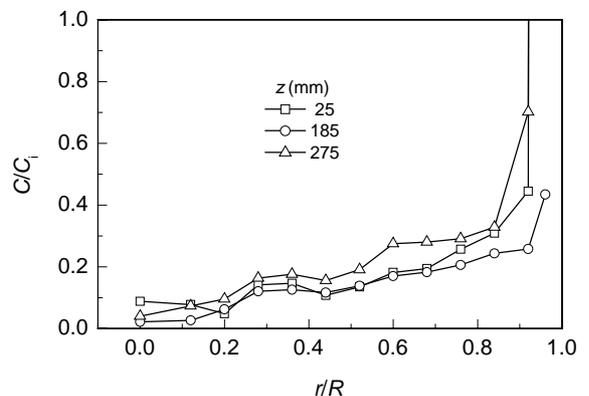


图5 主要分离空间颗粒总浓度沿径向的分布

Fig.5 General particle concentration distributions in the main separation space at different radial positions

值得注意的是, $z = 25$  mm截面中心区域附近浓度有

所回升, 是因为此截面在导流锥下部, 不可避免地存在短路气流夹带部分颗粒由排气芯管逃逸的现象, 造成此处局部浓度小幅升高. 短路流对旋风管的分离效率有较大的影响, 应当尽可能地降低主流中短路流的比例. 由于旋风管底部附近存在二次流, 携带部分颗粒产生返混夹带, 因而影响了颗粒浓度分布, 使其在由边壁到中心下降的同时产生小幅度的波动.

(4) 排尘锥内

如图 6 所示, 与环形空间、分离空间相比, 排尘锥内的颗粒浓度明显增大, 但基本上仍呈内低外高的变化趋势.  $z=475\text{ mm}$  截面颗粒浓度分布与主要分离空间相似, 而  $z=555\text{ mm}$  截面的颗粒浓度较高, 且在靠近中心区域有小幅升高. 这是由于  $z=555\text{ mm}$  截面位于排尘锥出口下端, 其气流湍流度较大, 存在一定的涡旋流. 在靠近排尘锥内壁处, 颗粒浓度已达到入口浓度的 3 倍以上, 表明从分离空间分离下来的颗粒在排尘锥内壁形成高浓区, 并不断排向排尘锥出口.

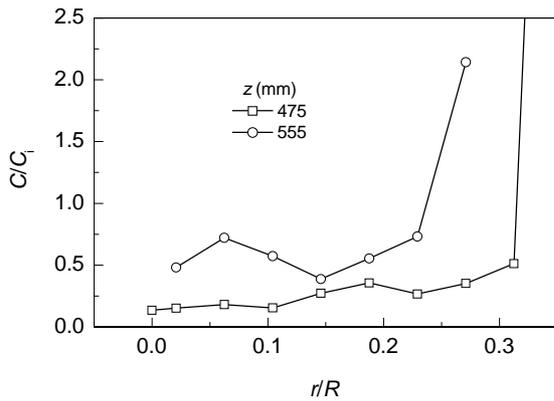


图 6 排尘锥内颗粒总浓度沿径向的分布  
Fig.6 General particle concentration distributions in the discharge dust cone at different radial positions

由图 7 可知, 与  $z=475\text{ mm}$  截面相比,  $z=555\text{ mm}$  截面上颗粒中位粒径分布较为平缓, 相对粒径均集中在  $0.25\sim 0.4$  之间, 尤其是排尘锥内壁边壁处颗粒中位粒径仅为入口的  $0.4$  左右. 出现上述情况的原因在于, 新型旋风管在排尘锥侧壁上开设有排尘侧缝, 使边壁附近的颗粒(尤其是大颗粒)得以顺利排出, 从而在很大程度上避免了排尘锥内部的径向返混现象, 有利于提高分离效率.

(5) 灰斗内

灰斗内颗粒总浓度分布呈现出中间高、两头低的形态, 峰值出现的位置位于排尘锥下口附近靠近内壁的区域. 峰值的出现表明大部分颗粒由排尘锥内壁排到灰斗

内, 形成了局部的高浓区域. 在灰斗的中心区域, 颗粒浓度较低, 表明只有较少的颗粒由上行流带到上层空间.

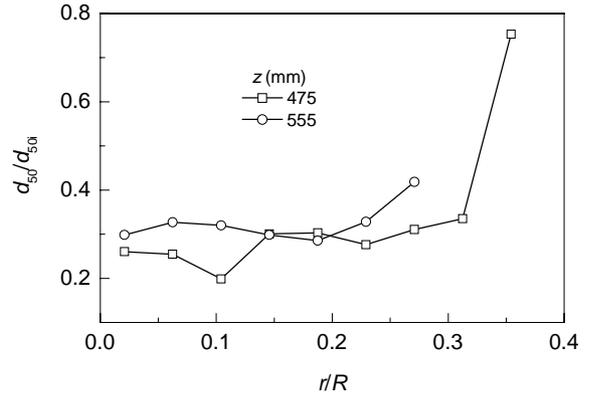


图 7 排尘锥内中位粒径沿径向的分布  
Fig.7 Middle particle size distributions in the discharge dust cone at different radial positions

由图 8 可知,  $z=605\text{ mm}$  的截面上, 粒径为  $10\text{ }\mu\text{m}$  以上的大颗粒粒级浓度很低, 这是绝大多数大颗粒在排尘锥内由排尘侧缝甩到灰斗边壁从而得到分离的又一印证. 在  $r/R < 0.05$  的中心区域, 浓度有反弹的趋势, 表明此区域不可避免地存在一定程度的返混.

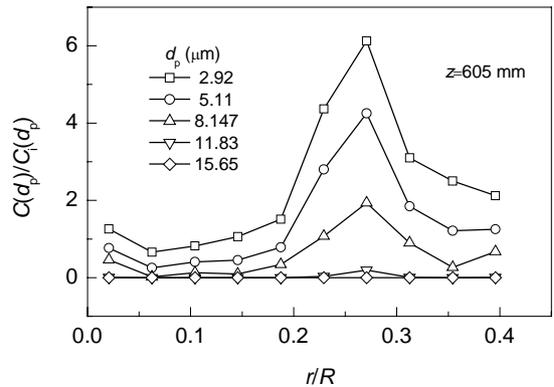


图 8 灰斗内颗粒粒级浓度沿径向的分布  
Fig.8 Particle grade concentration distributions in the ashpit at different radial positions

3.2 颗粒浓度沿轴向分布的特点

由图 9 可以看出, 以  $r=25\text{ mm}$  轴线为例, 在  $z < 500\text{ mm}$  范围内, 沿轴向向上的颗粒总浓度呈下降的趋势, 表明内旋流对从旋风管底部返混的颗粒具有较强的二次分离作用. 在  $z=550\text{ mm}$  附近颗粒总浓度出现峰值, 原因在于此处恰为排尘锥下口区域, 由于所有的颗粒均经此处下降到灰斗内, 而此处截面面积最小, 因此形成了一个局部高浓区.

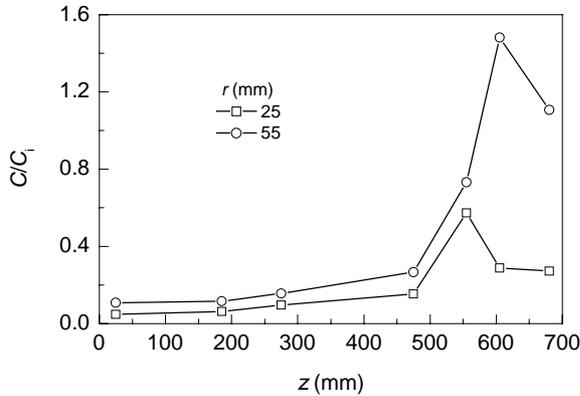


图9 旋风管内颗粒总浓度沿轴向的分布

Fig.9 General particle concentration distributions in the cyclone tube at different axial positions

由图10可知, 粒径为 $2.92\ \mu\text{m}$ 的颗粒从灰斗到入口圆柱环形空间的浓度变化趋势为先升高, 在排尘锥下口出现峰值, 而后降低. 在 $z=400\sim 550\ \text{mm}$ 范围内沿轴向向上的颗粒浓度减小的梯度较大, 而在 $z=0\sim 400\ \text{mm}$ 范围内减幅较小, 说明大部分细小颗粒在前一范围内得到了较充分的二次分离, 虽然一范围内二次分离的效果明显降低, 但仍有一定的效果, 表明要获得较高的分离效率, 需要保证足够的分离空间, 充分利用内旋流对细小颗粒进行二次分离.

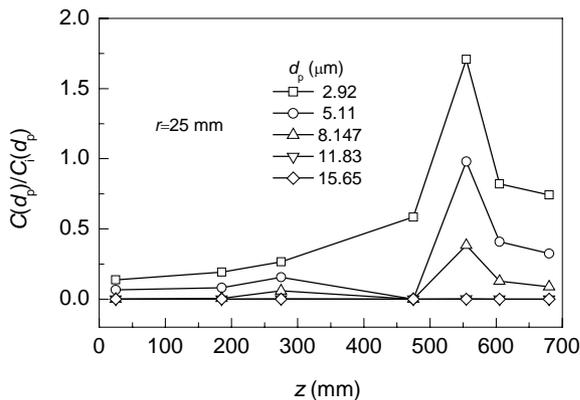


图10 颗粒粒级浓度沿轴向的分布

Fig.10 Particle grade concentration distributions in the cyclone tube at different axial positions

可近似认为, 导流锥下口 $z=25\ \text{mm}$ 截面处位于内旋流区域的颗粒全部由排气芯管逃逸, 可利用下式估算各级颗粒粒级效率( $\eta$ ), 并将结果绘于图11.

$$\eta = 1 - C(d_p) / C_i(d_p). \quad (1)$$

由图11可知, 新型旋风管可将粒径大于 $7\ \mu\text{m}$ 的颗粒全部除净, 对 $3\sim 7\ \mu\text{m}$ 的细小颗粒除尘效果也相当理想, 而相同操作条件下Shell型旋风单管仅能除净 $10\ \mu\text{m}$

以上的颗粒. 这充分表明新型旋风管与Shell型基准旋风管相比, 具有较高的粒级分离效率和良好的分离性能.

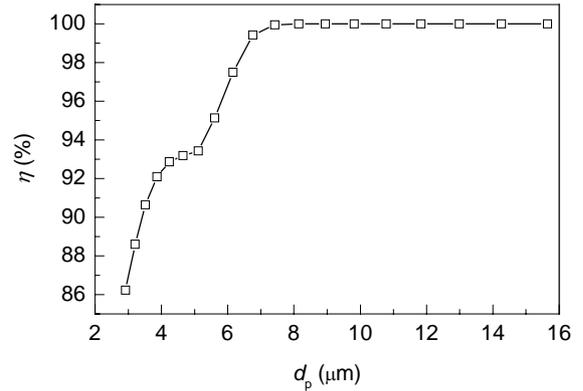


图11 各级颗粒粒级效率曲线

Fig.11 Particle grade efficiency curve at all levels of particle grade

## 4 结论

在美国壳牌公司Shell型旋风管的基础上进行了结构与尺寸的优化匹配, 得到一种新型高效旋风管. 采用等动采样的方法全面测定新型旋风管内颗粒浓度, 其分布特点如下:

(1) 导流锥下口截面中心区域附近浓度有所回升, 短路气流夹带部分颗粒由排气芯管逃逸; 主要分离空间底部存在二次流, 携带部分颗粒产生返混夹带, 导致颗粒浓度在由边壁到中心下降的同时产生小幅度的波动.

(2) 灰斗上方区域, 沿轴向向上的颗粒浓度呈下降的趋势, 表明内旋流对颗粒具有较强的二次分离作用. 要获得较高的分离效率, 需要保证足够的分离空间, 充分利用内旋流对细小颗粒的二次分离作用.

(3) 颗粒由排尘锥边壁排到灰斗内, 形成了局部高浓区域, 使灰斗内颗粒的总浓度分布呈现中间高、两头低的形态; 灰斗中心区域的颗粒浓度较低, 只有较少的颗粒随上行流带到上层空间.

(4) 开有排尘槽的锥形排尘结构有较好的分离效果, 并在一定程度上可以降低颗粒的返混; 加设导流锥结构可显著减少短路流, 并能使细小颗粒受到较强的惯性分离作用而得到分离.

(5) 对颗粒粒级效率的估算结果充分表明, 新型旋风管具有较高的粒级分离效率.

符号表:

$C$	粉尘浓度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	$C_i$	入口粉尘浓度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
$C(d_p)$	粉尘粒级浓度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	$C_i(d_p)$	入口粉尘粒级浓度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
$d_{50}$	颗粒中位粒径 ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50i}$	入口颗粒中位粒径 ( $\mu\text{m}$ )
$d_p$	颗粒粒径 ( $\mu\text{m}$ )	$q$	旋风管底部泄气率
$Q_i$	旋风管入口流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$r$	旋风管径向坐标 (mm)
$R$	旋风管半径 (mm)	$z$	旋风管轴向坐标 (mm)
$\eta$	颗粒粒级效率		

## 参考文献:

- [1] 赵炯, 张清军, 阎勇, 等. 烟气轮机叶片损伤的原因及对策 [J]. 石化技术, 2002, 9(1): 22-24.
- [2] 曹云波. 催化裂化装置第三级旋风分离器的改造 [J]. 河北化工, 2002, (4): 46-48.
- [3] 阎国超. 炼油化工工艺及设备概论 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1998. 144-153.
- [4] 黄荣臻, 闰涛, 房家贵. 催化裂化第三级旋风分离器的现状和发展方向 [J]. 石油化工设备技术, 2005, 26(1): 29-31.
- [5] 陈光. 新型高效旋风管在催化裂化装置三旋中的应用 [J]. 辽宁化工, 2004, 33(11): 683-686.
- [6] Reinhardt B, Cordonnier A, Florent P. Use of an Isokinetic Sampling Probe: Results in a Cyclone [J]. Powder Technol., 1999, 101: 81-90.
- [7] 吴小林, 黄学东, 时铭显. 旋风分离器的颗粒浓度分布的实验研究 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(4): 54-59.
- [8] 徐景洪. 旋风分离器流场与浓度场分布 [J]. 大庆石油学院学报 [J]. 2002, 26(3): 43-45.
- [9] 王建军, 黄梓友. PDC 型旋风管内颗粒浓度分布的实验研究 [J]. 炼油设计, 2001, 31(12): 28-31.
- [10] 王建军, 金有海. PSC 型旋风管分离空间内颗粒浓度分布 [J]. 石油化工设备, 2002, 31(9): 13-15.

## Experimental Study on Particle Concentration Distribution in a Novel Cyclone Tube

SUN Zhi-qian, JIN You-hai, WANG Jian-jun, ZHANG Yan

*[College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong 257061, China]*

**Abstract:** A novel cyclone tube design is obtained on the basis of structural and dimensional optimization of Shell-type cyclone tube. By using isokinetic sampling method, the particle concentration distribution in the novel cyclone tube is measured and analyzed. The experimental result demonstrates that discharge dust cone with slots has better separation effect, flowguide cone can reduce short circuit flow greatly and makes small grain separated because of the strong inertia. Particle concentration decreases with axial coordinates increasing above the ashpit, which indicates that the inner revolving flow has a strong secondary separation effect. The estimation on particle grade efficiency suggests that the novel cyclone tube can separate particles of 7  $\mu\text{m}$  completely, for small particles of 3~7  $\mu\text{m}$ , its grade separation efficiency is above 86%. On contrast, Shell-type cyclone tube can only separate particles larger than 10  $\mu\text{m}$  completely in the same operation condition. This work provides a necessary basis for structural improvement, dimensional optimization and even industrial application of cyclone tube.

**Key words:** cyclone tube; isokinetic sampling; particle concentration distribution