

## 离心式细粉空气分级机的设计与工业应用

孙国刚, 田志鸿

(中国石油大学(北京) 过程装备实验室, 北京 102249)

**摘要:** 根据对离心式空气分级机分级机理与流场研究, 找出了影响分级粒径和分级精度的主要因素; 总结了一套细粉空气分级机的设计方法; 并进一步为国内石油催化裂化催化剂生产厂设计了4套催化剂细粉分级生产装置, 成功地将催化剂产品中小于20 μm的细粉含量控制在1.5%~3%, 使国产的裂化催化剂产品粒度分布达到了国际市场的要求。

**关键词:** 离心式空气分级机; 分级机理; 设计

中图分类号: TQ051.8

文献标识码: A

文章编号: 1008-5548(2007)04-0046-04

## Design of Rotor-type Air Classifier and Its Industrial Application

SUN Guo-gang, TIAN Zhi-hong

(Laboratory of Petrochemical Process and Equipment,  
China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The operation principle of a rotor-type air classifier was analyzed and main parameters that affected the cut size, cleanness and recovery were chased down. A design measure to this fine particle classifier was then proposed. Four centrifugal air classifiers were designed and employed in FCC catalyst production units in China. The content of fines less than 20 μm in the catalyst products is cut down to 1.5%~3% by use of classifier, which meets the requirements of the international market for particle size distribution of catalyst products.

**Key words:** rotor-type air classifier; mechanism of classification; design

现代科技的发展对粉体物料的粒度、形状、表面特性等提出了越来越严格的要求。如用作精细陶瓷釉料的锆英石粉, 要求平均粒径为1~2 μm; 超细碳酸钙粉作涂料时, 要求2 μm以下的微细粉含量超过90%; 而作填料时, 只要求2 μm以下的微细粉含量达40%; 显象管生产用的氧化铝微粉要求平均粒径在1.5~5.5 μm。上述的严格粒度要求只有通过粉体进行精细的分级处理才能达到<sup>[1,2]</sup>。

FCC催化剂是炼油厂流化催化裂化生产工艺的一个关键。我国自20世纪60年代自行生产FCC催化剂以来, 催化剂的粒度分布一直与国际著名品牌存

收稿日期: 2007-10-14。

第一作者的简介: 孙国刚, (1961-), 男, 博士教授, 博士生导师。电话: 010-89734820, 62395765, E-mail: ggsun@163bj.com。

在相当的差距。国际上普遍要求将20 μm以下的细粉含量控制在3%以下, 而国产催化剂20 μm以下的细粉含量大多在8%~10%, 有时甚至更高。因为20 μm以下的细催化剂加入到装置后, 一般还未能发挥催化作用就很快进入后续油气分馏塔和再生烟气, 不但增加后续设备的负担和环境污染, 也增加装置的生产成本。为控制20 μm以下的细催化剂含量, 国内催化剂生产厂曾与有关科研单位合作, 对催化剂生产工序中喷雾干燥造粒工段进行改造、优化, 如改变料浆的压力、喷雾头结构等, 但均未获得满意的结果。后来催化剂生产厂与石油大学(北京)合作, 提出了将喷雾干燥造粒出来的半成品催化剂中小于20 μm的细粉(主要是旋风分离器下部分)及时分选出来, 然后再将这些细粉粉碎、重新成胶回用的技术方案, 不仅控制了催化剂产品的粒度分布, 提高了产品质量, 而且细粉回用还可提高料浆的固含量, 提高原料的成品率, 增加收率、降低污水固含量等。其核心设备LHC-F型离心式气流分级机, 分级范围广、调节手段灵活、分级精度高、操作简便、运转可靠。本文中主要结合FCC催化剂产品的粒度控制要求, 介绍LHC-F型离心式气流分级机的工作原理及技术特点和在国内的3大FCC催化剂厂的实际应用。

## 1 气流分级机理

依据分级介质的不同, 当今工业精细分级机可分为两大类: 一是以空气为介质的干法分级机, 如空气旋流式分级机和涡轮(转子)分级机; 二是以水等为介质的湿法分级机, 如水力旋流器、离心机等。

在离心式气流分级机中, 颗粒的分级主要依据不同粒径的颗粒在旋转的离心力场中受力运动差异来进行。颗粒在离心力场中离心加速度为 $r\omega^2=v_t^2/r$ 。对于涡轮式分级机而言, 流体的旋转速度(切向速度 $v_t$ )很大程度上取决于涡轮的旋转速度。若颗粒处单分散状态, 颗粒的密度为 $\rho_p$ , 形状为球形, 粒径 $d_p$ , 并可认为颗粒速度与气体速度一致, 则颗粒所受到的离心力为:

$$F_c = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_g) \omega^2 r = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_g) \cdot \frac{v_t^2}{r} \quad (1)$$

假设颗粒很少,在离心力场中的沉降可按层流沉降考虑,则使颗粒向旋转中心运动的流体介质曳力为:

$$F_d = k \rho_g d_p^2 v_t = 3\pi \eta d_p v_t \quad (2)$$

分级轮外边缘附近气流旋转速度最大,可认为分级就在分级轮外缘附近进行。分级粒径  $d_c$  可用分级轮外缘区颗粒径向加速度为零(即  $F_c = F_d$ ) 的颗粒粒径表示。则可计算出离心式分级机中颗粒的离心沉降速度  $v_t = \frac{\rho_p - \rho_g}{18\eta} d_p^2 \omega^2 r$ 。此时,理论上可认为颗粒绕旋转半径  $r$  的分级圆轨道不停运转。当  $F_c > F_d$  时,颗粒将向外飞向器壁,成为粗产品,并由分级机底部排出;当  $F_c < F_d$  时,颗粒随中心气流经分级轮排出,成为细粉产品。由  $F_c = F_d$  可算出分级粒径  $d_c = \frac{1}{v_t} \sqrt{\frac{18\eta r v_t}{\rho_p - \rho_g}}$  代入分

级轮转速  $n = \frac{60v_t}{2\pi r_0}$ , 则得分级粒径:

$$d_c = \frac{9.55}{n} \sqrt{\frac{18\eta r v_t}{r_0(\rho_p - \rho_g)}} \quad (3)$$

由于通常有物料颗粒密度远大于气流介质密度,故可取  $\rho_p - \rho_g \approx \rho_p$ 。设气体流量为  $Q$ , 分级轮的有效高度为  $h$ , 则气体流经分级轮的径向速度  $v_r$  可取  $v_r = Q/2\pi r_0 h$ , 则最终可将分级粒径写成:

$$d_c = \frac{9.55}{n} \sqrt{\frac{18\eta Q / (2\pi r_0 h)}{r_0(\rho_p - \rho_g)}} = \frac{16.16}{nr_0} \sqrt{\frac{nQ}{h\rho_p}} \quad (4)$$

对于一定的分级机和物料, (4) 式可表达成:

$$d_c = k\sqrt{Q/n} \quad (5)$$

从上述的分级机理可以得出: (1) 分级粒径(切割粒径)与分级轮转速成反比, 转速越高, 分级粒径越小; (2) 分级粒径与气体流量成正比, 即气体流量增加, 分级粒径亦随之增加; (3) 分级机的结构性能与物料性质不同时, 分级粒径亦不同。以上分析是在颗粒浓度较低、气粒相间无干扰、无滑移的条件下做出的。当固相浓度较高, 颗粒间会发生碰撞、吸附、凝聚等现象, 同时, 分级机内还可能存在着局部涡流和湍流等等, 所有这些都使实际分级效果偏离理论分析。因此, 工业分级机的设计都必须针对实际应用要求进行必要的试验分析, 才能获得满意的实际分级效果。

## 2 分级机的设计分析

LHC-F 型分级机设计的主要特点是采用多道切

向进风, 使气流在分级器内形成稳定的、对称的旋转流场。物料进入方式可依据用户现场情况有多种选择。进料分洒到离心力场中, 粗颗粒被移向边壁, 细颗粒被携带到分级轮附近, 旋转分级轮和下部进气旋转力场相配合, 分级点控制清楚。粗粉在下落过程中再经过底部二次风淘洗, 将粗粉中可能夹带的少量细粉再次淘洗出来, 以保证较高的切割精度。分级轮的结构设计及操作转速对分级粒径的控制、细粉带出量有决定性的影响。分级轮外缘附近粒子的运动轨迹较为复杂。当叶片数量过多(间隔过小)时, 叶片对粒子的拦截、碰撞次数增多, 粒子运动轨迹变长, 在叶片外侧造成粒子长期停留的态势, 此时使更多的微粒飞向粗粉侧; 当叶片数量过少(间隔大)时, 则粗粉混入细粉的可能性增加。这表明, 涡轮叶片数量是分级机设计的重要参数。

离心式超细气流分级机的叶片结构常见有两种型式: 径向叶片和倾斜叶片(如图 1 所示)。有研究报道, 径向叶片分级轮, 常存在微细颗粒浮游于分级轮外侧的现象。而倾斜叶片(倾角  $\phi > 0$ ) 的分级轮, 由于颗粒流动方向倾斜于叶片半径方向, 故  $F_c$  与  $F_d$  不在同一直线上。沿倾斜叶片的迎风侧壁面上(上表面)几乎不存在流动力, 因此在分级粒径附近的微细颗粒更容易附着在叶片迎风侧的壁面上, 当  $\phi$  大时, 分级粒径变小; 而  $\phi$  小时, 分级精度较高(与同等级的径向叶片相比)。在倾斜叶片中, 粒子一旦进入叶轮内侧, 由于叶片流道变小, 使粒子被加速, 从而产生粒子在分级室内侧发生旋回现象, 这是粒子附着于倾斜叶片内侧的原因之一。所以,  $\phi$  角应有一适宜值。结构设计时应考虑这些因素的影响。设计分级要求较高的分级机时, 应采用较小的叶片夹角并适当增加叶片数量。

分级机的物料处理量和操作气量是一对关联的量, 可用分级机内固体物料浓度来控制。颗粒浓度增加, 细粉误入粗粉侧的概率增加, 分级精度下降, 分级粒径亦增大。因此, 分级机一定时, 必须严格控制处理

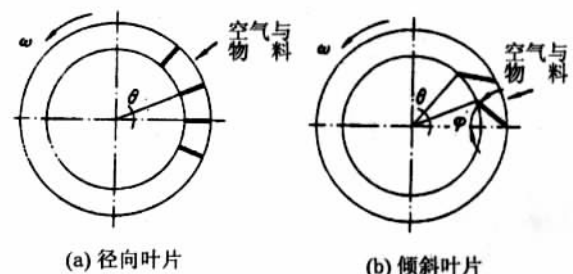


图 1 分级机叶轮示意

的颗粒浓度,不可随意超额。另外,设计还应注意转速随处理量的不同而可调节的问题。

### 3 分级机结构设计要点

(1) 分级轮直径。离心式分级机内流场研究表明:分级机内主流场和旋风分离器类似,是双层强旋流场,内旋流旋转向下,外旋流旋向上,存在一“零轴向速度面”。该面与器壁面基本平行,约为分级机筒体直径的0.6~0.7倍。因此,可取分级轮外缘直径(0.6~0.7)D。

(2) 分级轮高度 $h$ 。分级轮高度不可过小,否则 $v_r$ 增大, $d_c$ 增加,分级精度下降,但也不能过大,流场研究表明,流过分级轮的径向风速沿分级轮高度分布是不均匀的,太大的分级轮高度,必然导致分级性能下降。一般宜取 $h=(0.7\sim 1.0)D$ 。

(3) 分级轮叶片数 $N$ ,叶片宽度 $b$ 与倾角 $\phi$ 。叶片数 $N$ 的确定比较复杂,因为在一定转速 $n$ 下, $N$ 对 $d_c$ 和分级精度的影响与分级轮直径、处理粉料的浓度等多种因素有关。分级要求较高时,一般倾向于采用较多的叶片数。叶片宽度 $b$ 可由分级轮内径 $d_i$ 和外径 $d_o$ 及倾角 $\phi$ 算出。分级轮内径通常可取 $d_i=(0.3\sim 0.5)d_o$ ;叶片倾角常取 $\phi=0\sim 30^\circ$ 。

(4) 分级机筒体尺寸。分级机筒体直径 $D$ 可由气量 $Q$ 按截面表观风速 $v_0$ 确定。 $v_0$ 随分级机结构和处理物料性质而变,对于大多数物料,可选 $v_0=0.4\sim 1.0\text{ m/s}$ 。筒体高度 $H=(1\sim 1.5)D$ ,最多不超过 $2D$ 。

筒体的锥角,以防止物料堆积为准则,一般 $=30\sim 60^\circ$ 。

(5) 多边切向进风口。多道切向进风口截面以矩形为宜,截面尺寸可由气量 $Q$ 和进气速度确定。进气速度一般宜选 $10\sim 30\text{ m/s}$ 。

### 4 LHC-F型细粉分级器的设计及工业应用结果

长岭、兰州和周村催化剂厂都是在现有生产线上增加一套分级、细粉回收系统(见图2~4)。分级物料是干燥塔尾气携带出经旋风分离器回收下来的细催化剂。根据现场空间,长岭催化剂厂分级器的进料设计了6根重力落料斜管(图3),分级器直径为1100 mm,总高约4800 mm,分级轮立式安装,直径约450 mm,分级轮转速为500~1200 r/min,总气量约为

2500~3200 m<sup>3</sup>/h,主风从进料下部锥体部分进入,在主风下部装有二次风。此分级器简称LHC-F3型。经开工调试后,在总气量2890 m<sup>3</sup>/h、分级轮转速为662.4 r/min时,分级后粗粉20 μm以下的细粉为1.8%;细粉中含20 μm以上的粗粉为12.9%,实际上从原粉料中带出大于20 μm的有用组分相当少,约占1%,牛顿分级效率(粗粉中实有的粗粒量和原料中的粗粒量之比与粗粉中实有的细粉量和原料中细粉量之比的差值 $N$ 为88.7%,一次调试成功。

兰州催化剂厂分级器进料方式设计为3组并联含湿热风(200℃)气体输送(见图4),物料切向进入分级器,主风、二次风(均为自然风)从锥体下部进入分级器;分级器直径为950 mm,分级轮直径为350 mm,转速为800~1400 r/min。处理气量为3000~

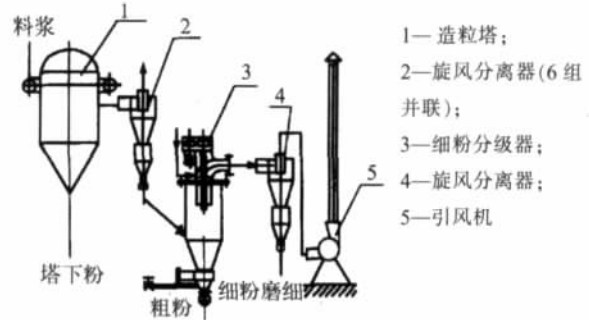


图2 长岭催化剂厂分级器流程图

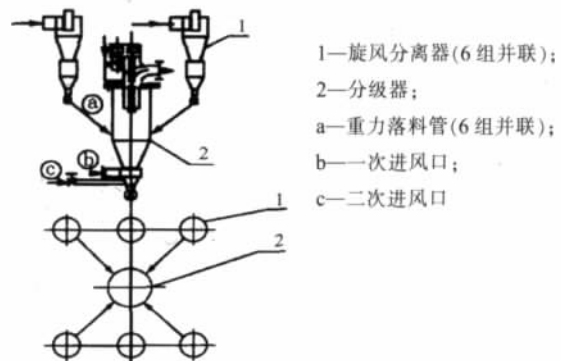


图3 长岭催化剂厂分级器平面布置图

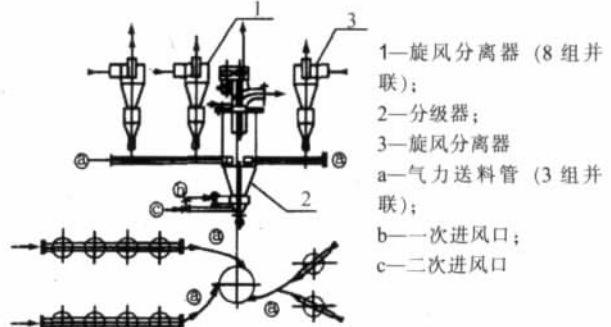


图4 兰州催化剂厂分级器平面布置图

(下转第50页)

流器的形状设计也因输送粉体的不同而有所变动。

## 1.2 设备优点

(1)可在管道近壁处形成气悬浮膜,消除了粉体输送的堵塞、磨损问题,输送料气比很高而且可调,输送速度大;(2)功能大,可直接充当制备浆体、搅拌器械的作用;(3)应用领域广,如干粉气化、制药、水泥、洗涤用品等加工制造行业。

## 2 CG型高浓度密相粉体输送技术

### 2.1 CG型高浓度密相粉体输送技术

传统的高浓度密相粉体输送技术工业化经验丰富、成熟,但是输送用管道的堵塞、严重磨损问题仍然难以解决,往往影响传统技术的最大化综合利用,CG型高浓度密相粉体输送技术在传统技术的基础上,采用特型管道为关键设备进行粉体输送,不仅克服了堵塞和磨损问题,而且大大简化了整个工艺流程,降低

(上接第48页)

4 000 m<sup>3</sup>/h。在气量 3 200 m<sup>3</sup>/h、转速为 1 051.2 r/min 时,分级得到的粗粉中含 20 μm 的细粉为 2.7%,细粉中含大于 20 μm 的粗粉为 10.9%,其牛顿分级效率  $N_N$  为 88.9%。在设计过程中还注意到轴承润滑油受温度(即冷风、热风的热平衡)和热膨胀等其它因素的限制。

LHC-F型细粉分级器的工业应用参数及结果列于表1。由表1可知,上述两套细粉分级器的操作条件均在设计范围内,牛顿分级效率较高,分级轮周边实际切向速度与按理论模型计算的气体切向速度基本接近,计算分级粒径接近 20 μm,因此模型具有一定的可靠性。继长岭、兰州两催化剂厂应用 LHC-F 细粉分级器成功之后,周村催化剂厂于 2000、2001 年在其两套 FCC 催化剂生产装置上采用了两套 LHC-F 分级器分级系统,都获得了成功。

表1 LHC-F3型细粉分级器工业应用的主要参数和结果对比

用户	长岭	兰炼
设备直径/mm	1100	950
进气量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	2890	3200
进气速度/m·s <sup>-1</sup>	15.3	17.5
分级附近切向速度(计算)/m·s <sup>-1</sup>	16.1	19.2
分级轮周边速度/m·s <sup>-1</sup>	15.6	19.26
计算分级粒径/μm	19.7	19.1
原粉中<20μm颗粒质量分数/%	~17	~32
粗粉中<20μm颗粒质量分数/%	88.8	2.7
细粉中>20μm颗粒质量分数/%	12.9	10.9
$N_N$ /%	88.7	88.9

了费用。

CG型高浓度密相粉体输送技术采用特型管道担当输送任务,粉体在气力的推动下,直接送入下一个操作单元。粉体进入管道以后,在全方位气体的混配下,达到气、粉充分均匀混合雾化,形成了类似以气体为溶剂、粉体为溶质的浆体,粉体和管壁基本上不接触,消除了堵塞影响,缓和了磨损和静电带来的影响,极易于输送,也就是说,特型管道充当了输送和制浆两重作用,输送的过程也是成浆的过程,气体充当了溶剂、搅拌和输送的三重作用。整个过程产生的是输送液体的效果,简化了工艺,节约了能源。

### 2.2 CG型高浓度密相粉体输送技术优点

(1)优化了传统操作工艺,解决了粉体输送的堵塞问题,生产能力增大;(2)输送粉体物种范围(粒度)大,如煤粉、药粉、洗衣粉等;(3)生产和输送成本大大降低,环保性能良好。

## 5 结论

依据离心式气流分级原理和流场研究,找出了影响分级性能的主要因素,总结了一套离心式细粉空气分级器的设计方法。根据此方法,设计了4套FCC催化剂工业生产装置用分级机,成功地将FCC催化剂产品中含小于20 μm细粉18%(长岭催化剂厂)和约32%(兰州催化剂厂)的催化剂,降低到1.8%和2.7%。牛顿分级效率达88%~89%;且开工一次成功,有力地提高了国产催化剂的产品质量。这4套大型工业装置的应用成功,和最近实验室的进一步研究表明,依据这套方法可设计在5~100 μm之间任意分级操作的细粉分级器。

### 参考文献(References):

- [1] SHAPIRO M, GALPERIN V. Air classification of solid particles: a review[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44: 279-285.
- [2] KLUMPAR I V. Air classifiers[J]. Chemical Engineering, 1986 (3): 77-92.
- [3] 任德树. 粉碎、分级及团聚[M]//《化学工程手册》编辑委员会. 化学工程手册(第24篇). 北京: 化学工业出版社, 1989.
- [4] 时铭显. 气固非均一相分离[M]//《化学工程手册》编辑委员会. 化学工程手册(第21篇). 北京, 化学工业出版社, 1989.
- [5] 孙国刚, 田志鸿, 时铭显. 蜗轮式颗粒气流分级器: 中国, ZL96211931.8[P]. 1996.
- [6] 孙国刚, 任智, 时铭显. 蜗轮式气流分级机的流场测量与分级粒径计算[J]. 化工冶金, 1999, 20(增刊): 287-293.
- [7] 田志鸿, 孙国刚, 时铭显. 离心式细粉分级器的设计及工业应用[J]. 石油炼制与化工, 1999, 30(8): 46-49.