

# 提高旋风分离器捕集细粉效率的技术研究进展

孙国刚, 时铭显

(中国石油大学(北京)化学科学与工程学院, 北京 102249)

**摘要:**综述了国内外近几年提高旋风分离器捕集粒径  $5\ \mu\text{m}$  以下细粉效率的研究进展。最新的研究试验表明:新的组合式旋风分离器基本上能完全分离粒径  $1\ \mu\text{m}$  左右的微细颗粒,已突破了旋风分离器技术不能有效分离  $5\ \mu\text{m}$  以下微细颗粒的传统观念;促使超细颗粒预团聚的旋风分离器组合分离系统是目前最有应用前景的一种微细颗粒旋风除尘技术,值得进一步研究开发。

**关键词:**旋风分离器;设计;细粉;分离效率

**中图分类号:** TQ051.84

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2008)07-0064-06

## Progress in improving removal efficiency of gas cyclones for fine particles

SUN Guo gang, SHI Ming-xian

(Faculty of Chemical Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The current research status of improving the removal efficiency of gas cyclones for particles smaller than  $5\ \mu\text{m}$  is reviewed. It is shown that a modern cyclone separator can almost completely capture the particles larger than  $1\ \mu\text{m}$  when auxiliary devices and/or the conventional mechanisms are integrated with. By exploring the physical fundamentals of fine particle separation, new and innovative cyclone devices can be developed. Enhancing agglomeration of fine particles before entering a cyclone for them is looked to be a most prospecting way to reduce the emission of fine particles from the cyclone and worthy of further research and development.

**Key words:** cyclone; design; fine particle; separation efficiency

旋风分离器是一种主要利用离心力将颗粒从气流中分离的设备,具有结构简单、制造安装费用低、操作维护简便、分离效率高、压降适中、性能稳定,能在高温、高压、高颗粒浓度等苛刻工况长期稳定运行等优点,问世以来得到了广泛的研究和应用开发。一方面,旋风分离器的新结构层出不穷、应用领域不断扩大;已出现了螺旋型、蜗旋型、旁路型、旋流型、多管型及过滤旋风、静电旋风等各式旋风分离器,细粉捕集能力不断提高,现代高效旋风分离器已基本除净粒径  $8\sim 10\ \mu\text{m}$  以上的颗粒,对  $5\ \mu\text{m}$  以上的颗粒也有较好的捕集能力,已是工业上最常用的一种粉尘排放控制和产品回收设备。另一方面,随着激光测量、计算机数值模拟等现代技术的发展与应用,人们更加认识到旋风分离器的内部过程并不简单,许多问题值得进一步研究;用旋风分离器分离捕集  $5\ \mu\text{m}$  以下、 $1\ \mu\text{m}$  左右超细颗粒的工业应用一直未有重要突破;旋风分离器的结构设计与性能计

算至今仍不能完全摆脱经验。因此,多年来对旋风分离器的基础研究和挖潜从未间断,内容涉及分离机理、内部流动过程、性能计算模型、结构设计开发等各个方面。其结构设计开发研究从应用角度大致可分为提高细粉分离能力、降低阻力(能耗)、减小设备尺寸增加处理气量 3 个方面。目前人们已基本总结出了标准型高效旋风分离器几何结构及尺寸设计的一些基本准则,中国石油大学时铭显教授提出了旋风分离器尺寸分类优化设计方法并开发设计出了目前国内石化工业广泛应用的 PV 型高效旋风分离器<sup>[1]</sup>。本文仅对国内外近年有关提高旋风分离器捕集细粉能力方面的开发研究做一简要综述。

## 1 旋风分离器的基本结构及工作原理

按照产生旋转气流方式的不同,旋风分离器有许多不同的型式,但它们的工作原理都一样,只是性能上有所差异,以适应不同的应用场合。图 1 是一

收稿日期:2008-03-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2005CB221201)资助

作者简介:孙国刚(1961-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事多相分离及流态化工程方面的研究,010-89734820, ggsunbj@163.com。

种典型的旋风分离器结构示意图,它由切向入口、圆筒及圆锥体形成的分离空间、净化气排出口与捕集颗粒排出口等几部分组成。含尘气流沿切向进入分离器,沿外壁由上而下旋转(称为外旋流),到达锥体底部,逐渐转变为沿轴线向上旋转(称为内旋流),最后经排气管排出;气流中的尘粒在离心力作用下被甩向器壁,在重力作用和气流的带动下沿器壁落入底部灰斗,经排尘口排出。

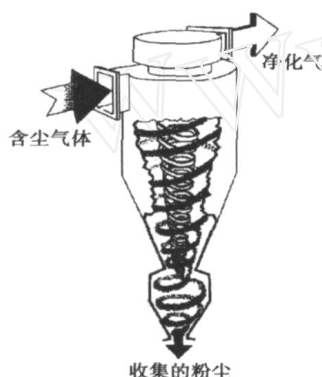


图1 旋风分离器结构示意图

旋风分离器内主流为三维强旋双层旋转湍流。此外,还有几处局部二次流,主要有: 环形空间的纵向环流(上灰环); 排气管下口附近的短路流,它会夹带大量颗粒短路进入排气管,对分离很不利;

气流旋转中心偏离设备几何中心,偏流、不对称流; 内旋流不稳定,“摆尾”形成若干个偏心的纵向环流,把已浓集在器壁处的颗粒重新卷扬。提高旋风分离器的细粉捕集效率就是设法抑制分离器内这些对分离不利的次级涡旋流动,充分发挥有利的旋转流动。

## 2 提高旋风分离器细粉捕集效率的技术研究进展

### 2.1 在排气管下口增设二次分离元件

细粉最终都是从排气管逃离分离器的,降低从排气管逃逸的细粉量便是提高旋风分离器细粉收率最有效的措施。由于内旋流进入排气管时仍处于旋转状态,它包含超过正常气流流动所需要的能量,同

时,由于离心力的作用也还会继续从气流中分离尘粒。因此有人提出过各种方案以回收排气管中的压力和能量及提高分离效率。已往的试验表明,在分离器入口、排气管内加各种挡板、翼片等,结果往往都是压降降低,效率也降低;原因是降低了旋涡旋转强度。但在排气管以下一定部位加装导流翼片、圆盘及圆锥型挡板等却可提高分离效率(压降不增或增加很少,甚至下降)。如采用下端封闭边上开槽(或孔)的出口管能防止灰斗中已分离的颗粒被卷入排气管,不仅能有效降低压力损失,还能提高分离效率<sup>[2]</sup>。

图2是一种在排气管下口增设二次分离元件的分离器结构示意图<sup>[3-4]</sup>。它用在火电厂煤粉制粉系统中,可使分离效率比普通旋风分离器提高3%~6%,明显降低进入下游排粉机的粉尘量,延长排粉机叶轮使用寿命。因为含尘气流切向进入分离器,粉尘因离心力被甩向筒体边壁,随外旋流落入锥斗,即一次分离;部分细小尘粒进入内旋流上行,在靠近百叶窗时被碰撞反弹后二次分离到筒体边壁区。此外,通过百叶窗间隙可提前排除大部分净化气流,从而有利于提高效率、降低压降。

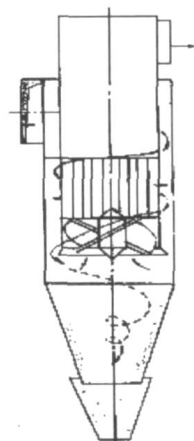


图2 排气管下口带二次分离元件的旋风分离器结构示意图

中国石油大学(北京)近年开发出了一种排气管末端分离结构——塔式排气管<sup>[5-6]</sup>。用450目滑石粉进行对比实验,采用塔式排气管,分离效率比

(上接第63页)

### 参考文献

- [1] 马文婵,谭心舜. 甲苯二异氰酸酯的制备方法和工业化生产[J]. 河北化工, 2004, 27(2): 1-4.

- [2] 杨霞,毕荣山,李玉刚,等. TDI装置光气回收系统的节能改造[J]. 化工进展, 2004, 23(10): 1125-1127.
- [3] 孙宏. 20 kt/aTDI装置工艺改进[J]. 化工设计, 2002, 12(1): 45-48.
- [4] 程华农,岳金彩,郑世清. 甲苯二异氰酸酯光气回收系统工艺改进与优化[J]. 化学工程, 2006, 34(6): 68-71.

PV 型高效旋风分离器同比提高 2 % 左右,同时压降还可降低 13 % 以上,使细粉的捕集效率明显提高。

奥地利 PMT Zyklontechnik 公司<sup>[7]</sup>发明了一种叫 Hurrivane 的旋涡导流器,加装在旋分器排气管入口,据称可在效率不变的前提下,使分离器压降降低 30 % 以上;或在压降不变的前提下,收尘效率提高 5 % ~ 8 %,处理气量还有所增加。在旋风分离器内部若再增设 1 个向下的排气管,上下排气管之间,用 2 个相向的旋涡导流器联结,则构成 1 个双排气管的旋风分离器,这项技术称为“哈里克隆(Hurriclon)”。则可在保持原分离效率的情况下,使旋风筒的阻力下降约 50 %,或者在阻力稍降的前提下,使分离效率得到大幅度的提高,如对进口粒径 5 ~ 30  $\mu\text{m}$  水泥粉料的分离效率由常规分离器的 92 % ~ 93 % 提高到 98 %,而分离器的压降却不到 1 kPa。倪文龙<sup>[8]</sup>也设计了类似的双出风口旋风分离器,用于替代水泥生产过程中的选粉机,与单排气口的旋风分离器相比,阻力损失减小 15 % ~ 41 %,除尘效率增加 2.6 % ~ 11.3 %,获得了明显的降阻提效效果。

## 2.2 从旋风分离器中抽出部分气体

从旋风分离器中抽出部分气体,可以优化分离器内部流场和主动发挥不同区域的颗粒浓集分离作用,这是最简便的提高分离效率的方法。早在 1951 年,Stairmand 就指出分离器料斗抽气可以提高收尘效率<sup>[9]</sup>。但当时并未引起重视,直到 1986 年才有人对抽气位置和抽气量与收尘效率的关系进行了实验研究<sup>[10]</sup>。结果认为:灰斗抽气比排气管抽气更有效;灰斗抽气 15 %,可以减少出口气体中粉尘 40 % 以上。目前人们已做了相当多的试验研究,抽气位置包括灰斗、排气管、筒体及锥体等分离器各个部位。所有的试验基本上都得到结论:抽气可以提高旋风分离器对细粉的捕集效率、提高总收尘率,而分离器压降无变化。从分离器下部排尘口、灰斗抽气可以减少旋风分离器下部气体返流和颗粒返混、提高分离效率,且抽气量越大,效率提高越多;但当抽气率大到一定值,效率的提高就不再明显<sup>[11-12]</sup>。这一特征抽气率为 10 % ~ 20 %,因试验条件和模型结构、尺寸不同而有所差别。进一步的研究还发现,灰斗抽气对效率提高的幅度与分离器入口的颗粒浓度密切相关。入口颗粒浓度越高,灰斗抽气的影响越显著;当入口颗粒质量浓度低于 5  $\text{g}/\text{m}^3$  时,灰斗抽气几乎没有影响。因此,若入口颗粒浓度较高,仅采用灰斗抽气往往不能使尾气达标排放;且从灰斗抽出的尘量大,处理费用也会相应的增加。排气口

抽气对于尾气排放控制则显得更为直接,抽出的气体或另行净化排出或直接返回分离器本体;抽气返回分离器进行再分离,往往会获得更好的效果。

Wysk 等<sup>[13]</sup>曾报道过一种称为 Core Separator 的抽气循环旋风分离系统,用于净化煤粉炉尾气。测试结果认为,该分离器的切割粒径  $D_{50}$  小于 0.5  $\mu\text{m}$ ,且总效率为 94.7 % ~ 98.0 %;并且这种势流分离器基本可除去 3  $\mu\text{m}$  以上的颗粒,除尘效率要优于多管旋风分离器和文氏管除尘器,与中等效率的静电除尘器相当。但未再发现后续的研究或应用报道。

Ray 等<sup>[14-15]</sup>设计了一种从旋风分离器顶部排气管抽气的机构(作者称之为 PostCyclone, PoC)。在一工业旋风分离器顶部排气管上加装该 PoC 的测试结果显示,可使 5  $\mu\text{m}$  以下颗粒的跑损减少 35 % 以上,5  $\mu\text{m}$  以上的粒子的捕集效率基本达 100 %。在直径 200 mm 和 400 mm 的标准 Stairmand 高效旋风分离器上分别加装不同设计的 PoC 进行实验室试验,结果发现,抽气率 25 % 之下,可使 1 ~ 3  $\mu\text{m}$  的颗粒跑损量减少约 30 %,5  $\mu\text{m}$  颗粒的跑损量减少约 50 %。如将 PoC 抽出的气体返回到旋风分离器入口再进行分离,则可使分离器的总效率增加 5 % ~ 6 %,出口细颗粒的跑损量减少 10 % ~ 12 %<sup>[16]</sup>。

邵国兴<sup>[17]</sup>也提出一种称为 R-S 型旋风分离器的排气管抽气分离系统。此结构在压降相近的条件下,且处理气量大于两级串联,分离效率优于两级旋风分离器串联;与三级串联旋风分离器的分离效率相近,而压降仅为三级串联的 60 %。R-S 型旋风分离器用于某化工厂从意大利引进的一套漂粉精生产装置中,取代原脉冲布袋除尘器进行漂粉精细粉的捕集与回收。系统的尾气风量为 20 000  $\text{m}^3/\text{h}$ ,采用 4 台 700 mm R-S 型分离器并联操作,另外用 2 台 400 mm 旋风分离器作为抽气的分离设备,增加 1 台风量为 5 000  $\text{m}^3/\text{h}$  的离心风机供抽气操作使用。经测定,在正常操作情况下,捕集效率可达 98 %,压降为 1 510 Pa,与引进的脉冲布袋除尘器操作性能相接近,取得了良好的应用效果。

Salcedo 等<sup>[18]</sup>采用文氏管作抽气器,将抽出的尾气循环到旋风分离器的进气口,构成一循环式旋风分离器系统。此系统不需要另设抽气风机,因而可应用于高温过程。据 Salcedo 等介绍,经数值模拟优化过的高效旋分器,与标准 Stairmand 高效旋风分离器试验对比,在可比的压降条件下,可使尾气粉尘排放降低 50 % ~ 75 %。经过实验室试验和中试研究之后,Salcedo 等在一家苯合成化工厂的磺胺酸流化

床干燥装置上进行了用该循环式分离器取代脉冲布袋过滤器的工业应用试验。流化床干燥气量为  $14 \text{ km}^3/\text{h}$ , 采用 12 个内径 500 mm 的高效旋分器与 2 个带有气体循环的旋分器处理。工业试验表明, 在进气粉尘质量浓度约  $8 \text{ g}/\text{m}^3$ , 排气循环率 21 % 的条件下, 旋分器压降为 1.9 kPa, 分离系统总压降 2.4 kPa; 分离器总效率 99.6 %, 出口的粉尘质量浓度为  $31 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 大于  $8 \mu\text{m}$  的颗粒已全部除尽。这种部分排气循环式分离器的出口粉尘排放量比普通高效旋分器同比低约 75 %; 与原布袋过滤器相比,  $0.4 \sim 4.0 \mu\text{m}$  的微细粒子的捕集效率低于布袋过滤器; 可以在一些场合替代过滤器或湿法文氏管, 满足排放标准和细颗粒回收要求, 比较有应用前景。

### 2.3 使颗粒进旋风分离器前发生团聚、并聚

超细颗粒在电场、磁场、温度场、声场中, 在光辐射下、在湍流的射流中、边界层横向速度梯度场中都可能发生成核和凝聚现象, 而且成核和凝聚的颗粒还会进一步长大<sup>[19-21]</sup>。使用吸附剂通过物理吸附和化学反应也可使超细颗粒发生化学团聚<sup>[21]</sup>。超细粒子团聚后再送入旋风分离器内分离, 分离效率便会显著提高。利用团聚效应来分离超细颗粒已渐成为超细粉除尘技术的一个发展趋势, 正在得到多方的研究, 如已出现将旋风分离器置于电除尘器后以收集静电凝并了的大颗粒团的试验。

许世森<sup>[22]</sup>分析了超细颗粒物的预团聚对旋风分离器高温除尘性能的影响, 他认为在高温湍流中, 同时存在热团聚、梯度团聚和湍流团聚, 并且随着超细颗粒物的直径增大, 这 3 种团聚作用依次增强。湍流脉动速度会促使颗粒碰撞并发生团聚, 且在湍流流动的边界层内, 对于粒径较小的微粒, 由于横向速度梯度引起的团聚效果也非常显著。这为高温下提高旋风分离器的细粉分离效率提供了一种新的方法。许世森进行了 900 下带预团聚的旋风分离试验, 即在旋风分离器之前, 加入 1 个高温旋风筒, 旋风筒中采用简单的导向叶片, 使得高温含尘气流适当旋转以促进尘粒的团聚和黏结, 然后再进入旋风分离器中分离。结果发现, 带预团聚的分级分离效率在高温状态下比不带预团聚的分级分离效率高, 而且也接近或超过常温下的分级分离效率; 与 800 下的分离效率相比, 带预团聚将分离器的切割粒径由无团聚时的  $3.7 \mu\text{m}$  减小到  $2.3 \mu\text{m}$ ;  $5.0 \mu\text{m}$  细尘粒的分级分离效率由 60 % 提高到 78 %。有关高温预团聚对旋风分离的影响还有待于进一步的研究开发。

Seville 等<sup>[23]</sup>采用错流过滤器在旋风分离器上游使细颗粒团聚。含尘气流沿与滤布平行的方向流过滤表面, 一部分气流垂直流过滤布, 颗粒在滤布表面累计, 并形成滤饼, 发生细粒团聚。改变操作条件, 使在滤布表面堆积的颗粒被吹入下游的旋风分离器中, 实现对细粉的分离。Seville 等在旋风分离器上游分别安装长 200 mm 与 400 mm 的内径 40 mm 过滤管, 用平均粒径  $5 \mu\text{m}$  的石灰粉进行试验评价十字流过滤促进颗粒团聚对旋风分离效率的影响。结果表明, 十字流过滤团聚可显著提高下游旋分收尘率; 带十字流过滤的旋风分离效率可高达 99 %, 比单旋风分离器时的效率提高 7 % ~ 9 %, 且过滤管长度越长, 颗粒团聚越明显, 提高旋分效率越多, 显示了非常好的前景。这些技术大多尚在探索阶段, 目前基本上还没有工业化应用。

### 2.4 采用机械回转产生强制离心力场

普通的旋风分离器靠进口机构使气流自然产生旋转运动, 无可动部件, 是静态旋风分离器。在普通旋风分离内部加入机械旋转部件, 利用其高速旋转获得人为可控、比气流自然旋转更强的强制离心力场, 则可显著提高分离效率, 可分离  $5 \mu\text{m}$  以下超细颗粒, 为超细粉尘的气固分离提供另一个新方法, 这便是动态旋风分离器。机械回转机构是动态旋风分离器的关键部件, 现已试验过多种结构方案。

陈海焱<sup>[24]</sup>将旋风分离器的排气管改为旋转涡轮, 用电机带动涡轮旋转, 做成一种最简单的动态旋风分离器。含尘气流逆流流向高速旋转的涡轮, 粉尘受到旋转流体和涡轮叶片所形成的离心力场作用, 被强制向外甩向分离器壁而被分离, 清洁的气体则在负压作用下进入涡轮中心从分离器顶部排出。用含有  $d_{90} < 4 \mu\text{m}$  的微细粉, 含尘质量浓度达  $12 \text{ g}/\text{m}^3$  的气固流做试验室模型试验, 通过涡轮除尘后出口的含尘质量浓度可控制到  $36 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 收集效率达 99.7 %。运转过程中收集系统可以保持稳定、可靠地运行, 除尘涡轮叶片及筒壁无明显黏附现象。

波兰 Chmielniak T 和 Bryczkowski A<sup>[25]</sup>也设计了类似的叶片涡轮旋转结构, 他们的排气管从分离器下部引出。在试验室内将这种带旋转结构的分离器和同直径 (168 mm) 的 Stairmand 高效旋分器进行性能试验对比。叶轮转速为 0、1 000、2 000、3 000、4 000 r/min, 入口质量浓度  $1.7 \sim 5.6 \text{ g}/\text{m}^3$ , 操作气量为  $100 \sim 230 \text{ m}^3/\text{h}$ 。结果收尘效率随叶轮转速增加而增加; 对试验的中位粒径  $10 \mu\text{m}$  的白云石 (Dolomite) 粉, 分离效率为 94.0 % ~ 96.1 %, 对于中

位粒径  $8\ \mu\text{m}$  的粉料,分离效率为  $90.0\% \sim 95.2\%$ ; 对应的 Stairmand 高效旋分器的效率则是  $84.2\%$  与  $83.0\%$ 。分离器压降总体上差别不大,高气量时还略低于 Stairmand 型。

针对超细颗粒跟随流体运动影响气粒分离的问题, Brouwers<sup>[26]</sup>发明了一种将旋风分离器离心力场和层流场耦合的旋转颗粒分离器。它的旋转排气管结构是由一组绕同一轴线旋转的管(槽)结构组成,设计好这些管槽的尺寸使其内部为层流流动。利用旋转的离心力场来加速超细颗粒在层流中的定向运动,从而创造性地解决了超细颗粒从气体中分离与跟随气流运动的矛盾,实现了用旋风分离器分离小于  $5\ \mu\text{m}$  的超细颗粒的目标,并且从气体层流中  $100\%$  分离的粒径还可以完全用理论进行预报计算。Brouwers 的试验证明,该装置可以完全分离  $0.1 \sim 5.0\ \mu\text{m}$  的呼吸性微细颗粒。该排气管既可由电机带动旋转,也可在排气管上设置叶片式结构,靠气流推力转动。

中国石油大学(北京)<sup>[27-30]</sup>试验了 3 种旋转排气管结构:竖排小管、卧排小管及叶轮式转子。分离器结构如图 3,筒体直径  $300\ \text{mm}$ 。分别用中位粒径  $12.74\ \mu\text{m}$  的 450 目滑石粉( $5\ \mu\text{m}$  以下的颗粒占  $17\%$ )和中位粒径  $7.5\ \mu\text{m}$  的 600 目滑石粉( $5\ \mu\text{m}$  以下的颗粒占  $31\%$ )进行测试。竖管式排气管的电机功率为  $2\ \text{kW}$ 。在转速  $2\ 000 \sim 3\ 600\ \text{r/min}$ 、分离器入口气速在  $10 \sim 20\ \text{m/s}$ 、分离器入口粉尘质量浓度  $5 \sim 10\ \text{g/m}^3$  的条件下,动态旋风分离器对 450 目滑石粉的分离总效率大于  $99\%$ ,接近  $100\%$ ;对 600 目滑石粉的分离总效率大于  $97\%$ ;  $1.7\ \mu\text{m}$  以上的颗粒已基本除净,试验数据和理论分析吻合得很好。分离效率总趋势是随排气管转速的增加而增加,但分离器入口气速变化对效率影响不大,即这种动态旋风分离器对操作气量波动的适应能力强,操作弹

性宽。整个静态部分的压降在  $100\ \text{Pa}$  左右。采用卧管式和叶片式旋转排气管方案时,分离器可连续操作、连续排尘,无堵塞问题。表明采用动态旋风分离器可以分离捕集回收  $5\ \mu\text{m}$  以下的超细颗粒;可在某些场合代替布袋过滤器或电除尘器及湿法洗涤除尘器。

动态旋风分离器的缺点也很明显,它结构复杂,机械回转机构难以用于高温等苛刻工况;离心力场和层流耦合的结构还存在设备单位体积的处理气量较小等问题。

### 3 结语

综上所述,人们对提高旋风分离器的细粉捕集效率已做了相当多的努力,研究试验了多种分离器结构及其组合分离系统,现已取得了不少进展。根据现有的研究报道,可以认为目前已突破了旋风分离器不能用于  $5\ \mu\text{m}$  以下微细粉尘分离的传统认识,在离心力分离基础上,耦合其他促进细粉分离机理的新式旋风分离系统可完全分离的颗粒粒径基本上已达到了  $1\ \mu\text{m}$ 。通过对微细粉分离机理的仔细研究,正在研究开发出新的可实用的分离装置。微细粉气固分离技术发展的方向之一是开发旋风分离器组合系统,促使超细颗粒预团聚是目前最有应用前途的微细粉旋风除尘技术,值得大力研究开发。

### 参考文献

- [1] Shi M, Sun G, Wang Y, et al. Optimum design of cyclone separators [C]// Proceedings of 6th World Filtration Congress, Nagoya, 1993: 469 - 473.
- [2] Schmidt P. Unconventional cyclone separators[J]. International Chemical Engineering, 1993, 33(1): 8 - 17.
- [3] 岑可法. 气固分离理论及技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1997.
- [4] 郑国, 吴少华, 周荣志. 二次分离对细分分离器性能的影响[J]. 电站系统工程, 2003, 19(6): 17 - 18.
- [5] 刘振斌. 旋风分离器排气结构的改进试验[D]. 北京:中国石油大学, 2006.
- [6] 周雷. 旋风分离器新型排气芯管的研究开发[D]. 北京:中国石油大学, 2007.
- [7] Schwaiger G. Hurriclon/ Hurrivane: Low pressure loss/ high dedusting efficiency cyclone separator [J]. Cement Manufacturing Technology Symposium, 2000, 5(7): 24 - 31.
- [8] 倪文龙. 显著提高细粉捕集效率专利技术的研究与应用[J]. 化工矿物与加工, 2006(11): 29 - 32.
- [9] Stairmand C J. The design and performance of cyclone separators[J]. Trans Ind Chem Eng, 1951, 29: 356 - 383.

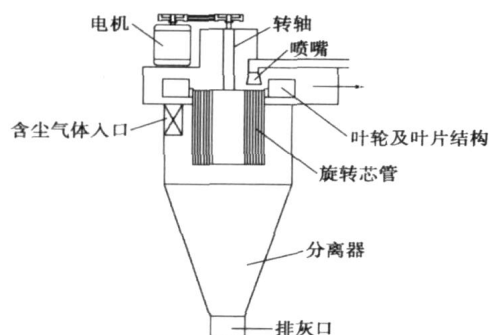


图 3 石油大学试验的动态旋风分离器

- [10] Sage P W, Wright M A. The use of gas bleeds to enhance cyclone performance[J]. *Filtration & Separation*, 1986, 23(11): 32 - 36.
- [11] 郭家松, 李峻宇, 邵国兴. 料斗抽气对旋风分离器分离性能研究[J]. *化工装备技术*, 1993, 14(1): 9 - 14.
- [12] 吴淑虹, 斯东坡, 池作合, 等. 中储式分离系统分离超细煤粉试验性能研究[J]. *电站系统工程*, 2004, 20(2): 11 - 13.
- [13] Wysk S R, Smolensky L A, Murison A. Novel particulate control device for industrial gas cleaning[J]. *Filtration & Separation*, 1993, 30: 29 - 31.
- [14] Ray M B. Post cyclone (PbC): An innovative way to reduce the emission of fines from industrial cyclones[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1997, 36: 2766 - 2774.
- [15] Tien Y J C, Ray M B. Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclone[J]. *Powder Technology*, 2000, 113: 97 - 108.
- [16] Liu Q, Ray M B. Recycling the flow of post-cyclone to increase the efficiency of reverse flow cyclone[J]. *J of Chem Eng*, 2001, 34(4): 540 - 544.
- [17] 邵国兴. R-S型旋风分离器的开发及在干燥过程中的应用[J]. *化工装备技术*, 1998, 19(5): 13 - 15.
- [18] Salcedo R L, Pinho M J. Pilot- and industrial-scale experimental investigation of numerically optimized cyclones[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2003, 42(1): 145 - 154.
- [19] 黄虹宾, 田志鸿, 时铭显. 声波团聚微粒技术的进展与分析[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 1995, 19(6): 126 - 131.
- [20] 张泾生, 罗立群. 细粒粉料磁分离技术的现状[J]. *矿冶工程*, 2005, 25(3): 25 - 29.
- [21] 魏凤, 张军营, 王春梅, 等. 煤燃烧超细颗粒团聚技术的研究进展[J]. *煤炭转化*, 2003, 26(3): 27 - 30.
- [22] 许世森. 温度和压力对旋风分离器高温除尘性能影响的研究[J]. *动力工程*, 1999, 19(4): 309 - 314.
- [23] Sibanda V, Greenwood R W, Seville J P K. Particle separation from gases using cross-flow filtration[J]. *Powder Technology*, 2001, 118: 193 - 201.
- [24] 陈海焱. 涡轮除尘技术[J]. *现代化工*, 2003, 23(1): 49 - 51.
- [25] Chmielniak T, Bryczkowski A. Method of calculation of new cyclone-type separator with swirling baffle and bottom take off of clean gas: Part Experimental verification[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2001, 40: 245 - 254.
- [26] Brouwers J J H. Particle collection efficiency of the rotational particle separator[J]. *Powder Technology*, 1997, 92: 89 - 99.
- [27] 陈民生. 动态旋风分离器的初步研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2002.
- [28] 王军. 细粉旋风分离器的研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2005.
- [29] Jiao J, Zheng Y, Sun G G. Numerical simulation of fine particle separation in a rotational tube separator[J]. *China Particuology*, 2005, 3(4): 219 - 223.
- [30] Jiao J, Zheng Y, Sun G, et al. Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 49: 157 - 166.

## 2008 全国精馏技术交流与展示大会在大连隆重召开

由中国化工信息中心和中国石油和化工勘察设计协会化学工程设计专业委员会联合主办、由《现代化工》编辑部承办的“2008 全国精馏技术交流与展示大会——首届化工过程强化技术交流大会”于 2008 年 6 月 18 日在大连隆重开幕,共有近 250 名来自于全国各地的专家和代表光临本次大会。

目前,我国精馏技术发展很快,正在步入世界先进行列。在巨大的市场需求推动下,结合计算机等高新技术,发展了一系列精馏硬件、软件新技术,在精馏新设计方法和控制手段的应用、大型精馏设备技术、精馏操作新方法、新型高效填料和塔内件、精馏系统热集成及耦合等诸多技术领域实现了新的突破,为企业的技术进步,为我国经济发展做出了重要贡献。本次大会从过程强化的角度探讨、交流和展示我国近年来精馏技术的最新发展和新成果。

中国科学院资深院士、为我国精馏技术进步作出卓越贡献的天津大学余国琮教授担任了本次大会名誉主席,以 87 岁的高龄参加了会议并作了重要发言。本次大会主席化学工程联合国家重点实验室精馏分离实验室主任袁希钢教授热情洋溢地向与会代表作大会致辞和大会报告。中国科学院院士、清华大学费维扬教授从战略的角度,介绍了化工分离过程强化的若干新进展和发展方向。此外,全国塔

器专家委员会主任赵汝文教授、中华塔器技术专家联谊会会长杜佩衡教授、中国石化工程建设公司专业副总工程师孙希瑾、南京大学分离工程研究中心主任张志炳教授、上海化工研究院国家高效分离塔填料及装置技术推广中心项目经理唐善宏高级工程师、中北大学副校长山西省超重力化工工程研究中心主任刘有智教授、浙江工业大学化学工程设计研究所所长姚克俭教授、南京师范大学化学与环境科学学院副院长顾正桂教授、中国石油大学化学化工学院化工系主任孙兰义教授等专家共作了 20 个大会主题报告。这些报告,从不同的角度介绍了我国精馏新技术、精馏设备等的新进展、新成果,引起了与会代表的浓厚兴趣,整个会场气氛热烈,代表踊跃参与提问和讨论,专家与代表之间、代表与代表之间积极交流。

本次大会也打破了以往单一会议的模式,尝试了小型展览和会议结合的模式,并取得了很大成功。在会议筹备过程中,中国昊华化工(集团)总公司天津天大天久科技股份有限公司、天津河清化学工业有限公司、天津大学北洋化工设备有限公司、无锡市雪浪化工填料有限公司、天津海立科技发展有限公司、烟台台子楚天大化工填料厂等单位对本次大会给予了大力支持。(张)