DOI:10.13732/j.issn.1008-5548.2006.04.007

超细粉体在微型旋风分离器中的分级性能研究

党君祥，李　刚，钟圣俊

(东北大学　工业爆炸及防护研究所，辽宁 沈阳　110004)

摘　要：研究了微型旋风分离器的分级特性，目的是通过微型旋风分离器将1 μm左右的超细粉从细粉中分离出来。对4种微型旋风分离器在不同流速下的分级效率进行了实验研究，并采用无因次的Rosin-Rammler坐标对测试数据进行了整理。实验表明，分级效率与斯托克斯数*Stk*之间关系在Rosin-Rammler坐标上为一条直线，采用微旋风器可对微粉进行分级，分割粒径可以达到1.3 μm。

关键词：微型旋风器；超细粉体；分级效率；分割粒径

中图分类号：TQ172.6+88.1　　**文献标识码**：A

文章编号：1008-5548(2006)04-0023-04

Study on Classification Capability of Mini-cyclones for Super-fine Powder

DANG Jun-xiang, Li Gang, Zhong Sheng-jun

(Industrial Explosion Protection Institute, Northeastern University, Shenyang, 110004, China)

Abstract: The classification features of mini-cyclones were investigated aiming to separate super-fine powder around 1 μm from fine powder. Classification efficiencies of different particle diameters were measured in four types of mini-cyclones with different flow rates, and the experimental data were analyzed in the Rosin-Rammler coordinates. The experiments showed that the classification efficiency was a linear function of the Stokes number in Rosin-Rammler coordinates. The small cyclones can be used to classify fine particles, and the cutting diameter can be as fine as 1.3 μm.

Key words: mini-cyclone; super-fine powder; classification efficiency; cutting diameter

超细粉通常是指颗粒粒径小于某一数值的粒子集合体。粒径小于0.5 μm的粒子习惯上称为超微粒子，20 μm以下的颗粒称为微粒子[1]。超微颗粒具有较大的比表面积、较高的活性，在其制备和使用过程中容易聚集或团聚，从而影响了由其所制成的材料的质量和性能[2]。随着现代科技的发展，应用部门对超细粉体提出了越来越高的要求，不仅要求粉体极细，而且粒径分布要窄，对于分级设备的研究要求更高。超细粉体的分级问题不仅仅是一个简单的分离问题，其分级理论涉及空气动力学、磁学、电学、水力学等多学科。

各种形式的旋风器作为气固分离设备的除尘器已广泛地应用于冶金、化工、食品等各个行业，作为粉体分级设备美国环境保护局南方研究所(EPA)对多段旋风仪进行了深入的研究。1980年日本粉体工学会会长井一谷钢对旋风分级性能进行研究[3]。本文对微型旋风分级特性做了进一步的分析探索，试图通过微型旋风器将1 μm左右的超细粉从微粉中分离出来。

1　旋风分级理论

如果认为粉体粒子与气流具有相同的速率，那么在切线速度v_0做旋转运动的气流中，对于半径为r位置、质量为m的粒子必然受到径向的离心力作用，即

$$F=m\frac{v_0}{r}\frac{\pi}{6}d_p\rho_p\frac{v_0^2}{r} \tag{1}$$

式中　d_p为粒子直径，m；ρ_p为粒子密度，kg/m³。

当离心力与该粒子做径向运动时所受的阻力相平衡时，可得出粒子的径向运动速度，即

$$v_r=\frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}\frac{v_0^2}{r} \tag{2}$$

粒子的径向运动速度v_r亦即为其向旋风器器壁沉降的速度。由此可得到旋风器的收集效率公式

$$\eta=1-\exp[-\frac{\pi\rho d_p^2 h v_0}{9\mu ab}] \tag{3}$$

式中　h为筒体高度，m；a为旋风进口高度，m；b旋风进口宽度，m；μ为气体动力粘性系数，Pa·s。

在讨论各种分级设备的分级性能时，必然用到一个重要概念，即分割粒径。分割粒径的定义是[4]：粒子的分级效率为50%所对应得粉体粒子的粒径，以

收稿日期：2005-11-28。

基金项目：教育部归国留学人员基金项目，编号：L2004014508。

第一作者简介：党君祥(1963-)，男，双学士，高级工程师，E-mail: iepi@mail.neu.edu.cn。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

d_{50}表示。

由此定义出发，上述旋风器“转圈理论”的分割粒径应为

$$d_{50}=\sqrt{\frac{6.24ab\mu}{\pi\rho_p hv_0}} \tag{4}$$

研究旋风器的另一个重要理论是“筛分理论”。假设在排气管下方有一与排气管半径相同的筛分面(圆柱面)，处在该面上的粒子在离心力作用下所产生的径向速度与返回气流的径向速度相等时，可以直接得到分割粒径，经整理为

$$d_{50}=\sqrt{\frac{9ab\mu}{\pi\rho_p hv_0}} \tag{5}$$

而由旋风器粒子的“传输理论”所得到的收集效率为

$$\eta=1-\frac{1}{\lambda L} \tag{6}$$

式中 $\lambda=\frac{3\pi\rho_p d_p^2 v_0}{16\mu ab}$；$L$ 为设想的运动气流的返回长度，此处可以认为 $L=h$。这样，按分割粒径的定义，可以得到该理论的分割粒径为

$$d_{50}=\sqrt{\frac{5.3ab\mu}{\pi\rho_p hv_0}} \tag{7}$$

为了对3种理论所得出的在相同条件下的计算结果进行比较，把3个公式整理成相同形式。从式(4)、(5)、(7)说明，由筛分理论所得出的分割粒径比转圈理论计算出的分割粒径约大20%，而由传输理论所得结果约比转圈理论所得结果小8%。3个理论所得结果的平均值与转圈理论所得结果相近。由于旋风器内部流场十分复杂，至今仍不能对旋风器的分级性能精确地加以描述，所以旋风器的收集理论(或分级理论)仍不够完善。然而，我们仍从中得出一些规律性的认识：

(1)随旋风筒直径的增大，其对粉体的分割粒径也增大；

(2)在一定范围内，随旋风器切线速度的增大，分割粒径变小；

(3)旋风器筒体直线段大时，分割粒径小；

(4)粒子密度大的粉体，分割粒径小；

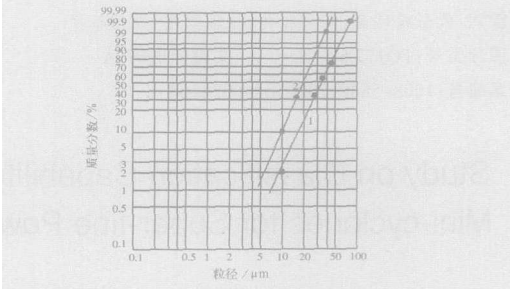
(5) 由于动力粘性系数随气体温度的提高而增大，所以气体温度高时，分割粒径变大。

由于旋风器分级理论不够完善，对旋风器分级性能的实验研究至今仍是不可或缺的。用微型旋风器对粉体进行分级时，分割粒径较小，可对微粉进行分级，所以对微型旋风器进行实验研究尤其重要。

2 微型旋风器的结构与实验系统

2.1 试样

实验用气溶胶粒子为白色的Al_2O_3，密度为3.61 g/cm³。由于Al_2O_3具有形状较规正、棱角少、易分散等优点，在我国目前尚无标准粉尘的条件下，采用Al_2O_3有一定的代表性。其原始分散度分别经显微镜法和沉降法测定分析后，用Rosin—Rammler坐标表示，见图1。



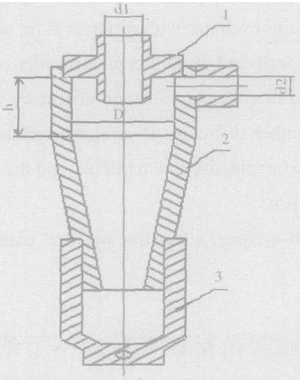
1.显微镜法； 2.沉降法

图1 氧化铝的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of Al_2O_3

2.2 微型旋风器的结构

微型旋风器的结构如图2所示。为了加工方便，其进口为圆形，结构参数见表1。



1—芯管；2—主壳体；3—灰斗

图2 微型旋风器结构示意图

Fig.2 Schematic picture of mini-cyclones

表1 微型旋风器的几何尺寸

Tab.1 Geometric size of mini-cyclones

型号	筒体高度 h/mm	筒体直径 D/mm	进口直径 d_2/mm	出口直径 d_1/mm
I	24	44.7	12	15
II	23.5	36.6	10	10.5
III	16.5	31.1	7.5	8.2
IV	12.3	25.4	5.1	5.9

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3 测试系统

测试系统(图 3)包括风机 1、管道 2、发尘器 3、旋风组 4、流量计 5 及多段高压风机 6 组成，可以把 4 种旋风器串联测试，也可针对每个旋风器单独测试。

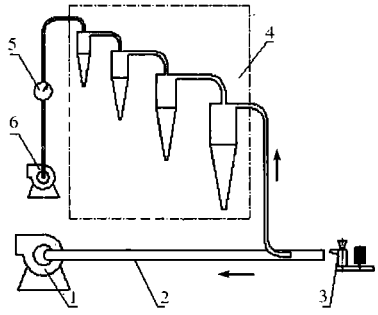


图 3 测试系统示意图

Fig.3 Schematic picture of measurement system

测试时采样流量分别控制在 25、27、30、40、50 L/min。每改换一组流量分别对每段微型旋风器测定分级捕集效果，在粒子密度不变的条件下，当改变采样流量，常温下实验。采样后的旋风器内表面均被清洗。将捕集到的收集物用万分之一天平称重，经显微镜法分析并与沉降法分析结果互相对照。求出分级收集率，从而得到分离粒径。

3 测试结果

把 4 种微型旋风器的测试数据，如果直接描述在直角坐标收集效率 η 与粒径的函数关系应为一条“S”形曲线。如果用 Rosin-Rammler 坐标(简称 R-R 坐标)描述各段旋风器的分级特性，应为一条直线。这种表示方法的优点是可直接从图形中读出不同条件下的分割粒径的大小，其缺点是难以表达各种因素的影响。如前所述，影响分割粒径的因素包括：微型旋风器的几何尺寸、切向速度、粒子直径、粒子真密度及气体的动力粘性系数(或气体的湿度)等，把这些诸多因素与分割粒径的关系表达清楚，用普通方法是困难的，而且工作量很大。然而，这 5 个因素恰好可以用无因次数，即 *Stk* 来概括，其表达式为

$$Stk=\frac{\rho d_p^2 v_0}{18\mu D} \tag{8}$$

把 R-R 坐标纵坐标作为分级效率，横坐标作为由式(8)算出的 *Stk* 数，对测试数据按此整理，由于微型旋风器的结构尺寸的比例不同，所得的结果如图 4。

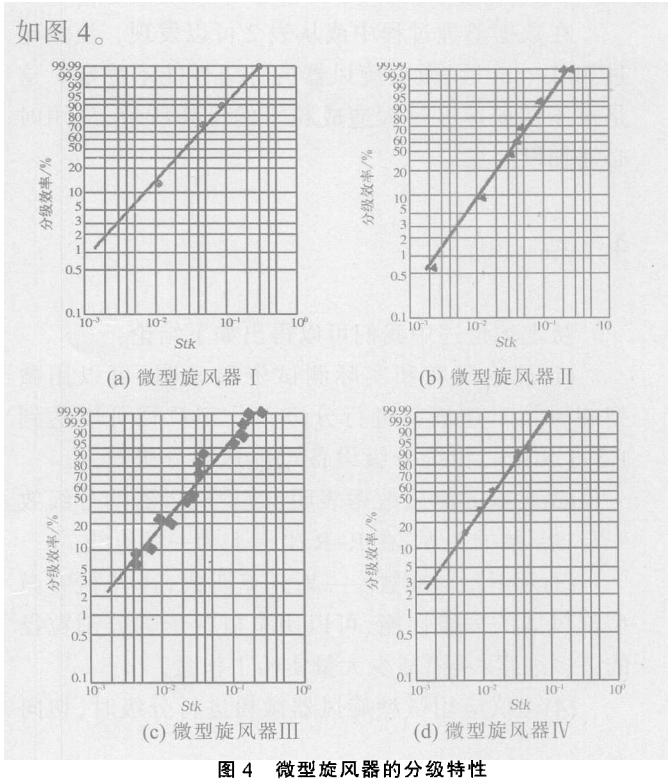


图 4 微型旋风器的分级特性

Fig.4 Separating properties of mini-cyclones

从图 4 可以看出，分级效率与 *Stk* 数在 R-R 坐标上均呈直线关系。当分级效率 η=50%时，可从图中查出某个旋风器所对应的斯托克斯数 *Stk*，从而可以确定在 D、ρ_p、v_0 及 μ 已知条件下的分割粒径 d_{50}。在常温条件下，各微型旋风器的分割粒径 d_{50} 如表 2 及图 5 所示。

表 2 各微型旋风器的分割粒径

Tab.2 Cutting diameter of different mini-cyclones

型号	25	27.5	30	40
I	6.5	4.0	6.2	6.1
II	4.0	–	4.0	4.0
III	2.4	2.1	2.5	2.2
IV	1.3	1.3	1.8	1.4

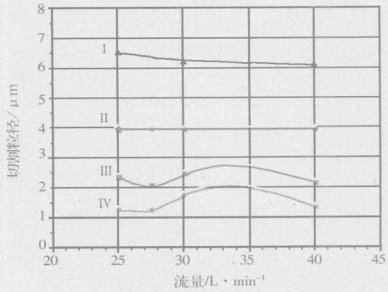


图 5 微型旋风器的分割粒径

Fig.5 Cutting diameter of different mini-cyclones

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在数据整理过程中或从表2可以发现，流量超过30 L/min后，微型旋风器的分级性能不稳定。这是由于切向速度过大造成粒子的反弹所致，应用时必需加以注意。

4 结 论

从上述论述中我们可以得出如下结论：

(1)理论研究和实际测试资料表明，可以用微型旋风器对超细粉进行分级，分割粒径可以达到1.3~1.5 μm，传统分级设备难以达到分级效率。

(2)大量的测试数据表明，微型旋风器的分级效率与 *Stk* 数的关系，在R-R坐标上为一条直线。

(3)采用相似准数——斯托克斯数 *Stk* 来研究微型旋风器的分级性能，可以用来概括影响分割粒径的诸多因素，从而减少大量实验工作量。

(4)建议应用微型旋风器微粉进行分级时，切向流速不大于25 m/s。

参考文献(References):

[1] 李青山，邢风兰，于天涛. 聚乙烯微粉蜡研究[J]. 中国粉体技术，2000，6(5): 23-24.
LI Qing-shan, XING Feng-lan, YU Tian-shi. Study on polymethylene wax superfines[J]. China Powder Science and Technology, 2000, 6(5): 23-24. (in Chinese)

[2] 张立德. 超细粉体制备与应用技术. 北京：化学工业出版社，2001.
ZHANG Li-de. Preparation and Application of Superfine Powders [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese)

[3] 张国权. 气溶胶力学——除尘净化理论基础[M]. 北京：中国环境科学出版社，2002.
ZHANG Guo-quan. Aerosol Mechanics——Basic Theory of Dedusting and Purification[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.(in Chinese)

[4] 向晓东.现代除尘理论与技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2002.
XIANG Xiao-dong. Theory and Technology of Modern Dedusting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002. (in Chinese)

寻求合作项目

超微粉碎设备智能化控制系统的开发

技术难题：国内现有的超微粉碎设备还停留在人工控制阶段，人工控制的局限性决定了设备的生产效果难以达到很高的要求。以分级操作为例，依靠调整分级电机的转速对产品的粒度进行筛选，在实际工作过程中，为了生产出特定粒度地颗粒，往往需要不断地对设备进行调整。当对粒度的要求较严格时，就对操作员的熟练程度提出了很高要求，增大了劳动强度。即便如此，人工操作往往不能达到很好的效果。人工控制还无法对紧急情况作出迅速的响应，使设备的安全性受到限制。因此当设计面向高端市场的设备时，根据实际需要，为设备引入智能控制功能，可以显著地提高产品性能、降低对操作员的要求，从而提高产品的竞争力。

控制操作过程的压力、温度等在规定的许可范围，保障人身、设备的安全。抑制外部干扰对过程参数的影响保证连续生产过程的平稳操作，将各参数维持在允许的波动范围内。使生产工况达到最优状态，提高产品的产量、质量，降低原材料与能源消耗，从而降低成本。要求对以下这些环节实现智能化控制：自动检测：传感、测量；监视：人机界面、显示仪表、屏幕监视器；自动调节：控制器、调节器；顺序控制：可编程控制器；自动保护：报警、连锁保护。

提供资金：150万元
有效时间：2006年1～12月
联系单位：浙江省粉体工程研究开发中心、浙江丰利粉碎设备有限公司
联系人：张再江主任
电话：0575-3103829
传真：0575-3180066
电子邮箱：zjfengli@mail.sxptt.zj.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net