喷气引射旋风子式超微粉分级机研究①

叶　菁　陈家炎　吴海棠
（武汉工业大学材料工程系，武汉 430070）

摘　要

喷气引射旋风子式超微粉分级机，是利用喷射旋风和引射抽吸组合流气动特性，根据喷嘴并联、扩压管串联的结构方式设计的一种新型超微分级装置，具有粉料强化离散和变径精密分级的效果。实验表明，其最小平均分级粒径已达到 0.15μm。文中还提出了喷气引射旋风子速度场和分割粒径计算式。

关键词：喷气　引射　旋风子　分级

近年来分级技术正向着三个方向发展一超微分级、精密分级和节能分级。其中，超微和精密分级是与对物料的超微粉碎要求伴随而来的问题，能否有效地实现对超微粉的精密分级，往往最终决定着对超微粉的功能性应用程度。所以，超微精密分级是现代粉体加工技术研究的重要内容。超微粉分级机有三种结构形式：一是旋风子分级机，二是高速涡轮分级机，三是强惯性分级机。当分级粒径为 0.5μm 时，处理量每小时已达数公斤到数十公斤[1]。

旋风子超微粉分级仪最初是由美国研制成的，该仪为五级旋风子，最小一级分级粒径为 0.38μm[2]。1980 年日本研制的旋风分级仪，最小一级分级粒径约为 0.34μm[3]。1987 年东北大学研制的五段旋风粒度分级仪也具有良好的分级性能，最小一级分级粒径为 0.8μm[4,5]。但目前这些旋风分级仪由于受结构设计和多段串联阻力所限，分级处理量都很小，通常仅适用于烟道测尘粒度分级，离实用的超微粉分级机还有一些距离。

针对现有缺陷，我们于 1991 年研制成一种喷气引射旋风子式超微粉分级机，利用喷射旋风和引射抽吸组合流气动特性，以及串并联同时利用的方法，使其分级粒径、粒度调整和处理量等性能都得到了明显改善，平均分级粒径达到了 0.15μm，处理量提高到 0.22～1.4 kg/h，在一定程度上达到了利用旋风子进行超微粉分级的实用效果。

1　喷气引射旋风子式超微粉分级机结构设计及工作原理

1.1　喷气引射旋风子结构设计

现有旋风分级仪，采用的是旋风分离器结构，使每级旋风子只能以前后串联的方式组成多段旋风仪，分级粒径不能做相对调整，只能通过调整总流量来同时改变每一级的分级粒径，这就造成了现有旋风分级仪做为分级机使用的最大缺点一粒度调整困难。另一方面，由于只利用了旋风分级原理和多段串联组合方式，使系统阻力增大，从而限制了分割粒径和处理量的提高。此外，现有旋风分级仪在结构上没有粉料快速离散的强化措施，也影响了分级效率的提高。

喷气引射旋风子以喷射扩压和引射抽吸流动使粉料快速离散和强制分级为设计原理，主要由 1—引射喷嘴、2—扩压管、3—中心排出

① 收稿日期：1993 年 4 月 17 日

管、4—旋风体、5—集料室等组成(图 1)。

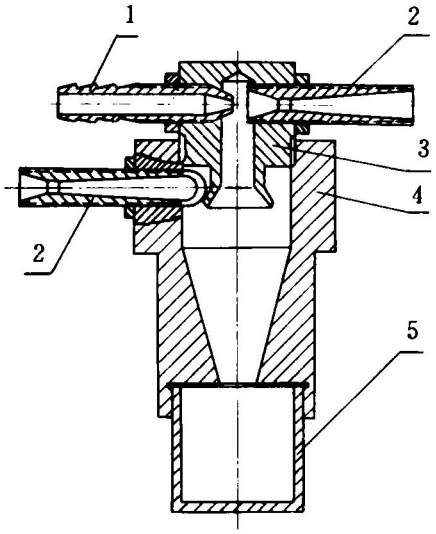

图 1　喷气引射旋风子结构

1.2　喷气引射旋风子工作原理

被分级的超微粉随引射喷嘴高速气流喷入扩压管，在扩压管内加速、混合、扩压、离散后进入旋风体内，并在强制涡流动和引射抽吸形成的环汇流动的组合流场内得到分级，粗粉在重力作用下随下旋气流沿壁面落入集料室，微粉则在引射气流的抽吸作用下由喇叭形中心排出管排出。

由于设置了引射喷嘴和扩压管以及喇叭形中心排出管，一方面使粉料的加速、混合和离散效果得到强化，另一方面在强化离心力场的同时，加强了排出管气体的抽吸力，使离心力和轴向携带力的平衡点能在更大范围内调整，分级效果因此得到改善。

1.3　喷气引射旋风子式超微粉分级机构成及工作原理

喷气引射旋风子式超微粉分级机如图 2 所示，由四级喷气引射旋风子串并联组成，主要部件有：1—空压机、2—节流阀、3—过滤减压阀、4—配气板、5—转子流量计、6—调节阀、7—料斗、8—电振给料机、9—引射加料器、10—喷气引射旋风子组、11—调压集尘器。其中，旋风子组中的各旋风子按直径从大到小的顺序以下列方式联接构成：第一级旋风子上的进料管与引射加料器相联，出料扩压管作为第二级的进料扩压管与第二级旋风子相联；第二级旋风子的出料扩压管再作为第三级的进料扩压管与第三级旋风子相联，第三级旋风子的出料扩压管作为第四级的进料扩压管与第四级旋风子相联。这样，构成了旋风子组的扩压管串联联接形式。引射加料器上的引射喷嘴和各级旋风子上的引射喷嘴分别与各流量计上的调节阀相联，构成了旋风子组的引射喷嘴并联联接形式。

工作时，粉料从料斗加入，经电振给料机控制加料速率，由引射加料器喷入第一级旋风子进行分级，从集料室获得第一级微粉(粗)；由第一级旋风子出料扩压管排出的微粉进入第二级旋风子再行分级，在相应的集料室获得第二级微粉(较细)；以此类推获得第三级超微粉(细)和第四级超微粉(更细)。从第四旋风子出料扩压管排出的超微粉由调压集尘器收下获得第五级超微粉(最细)。

由于喷气引射旋风子组采用了扩压管串联

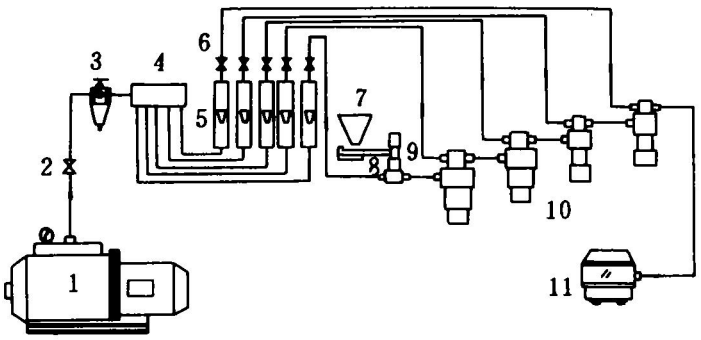

图 2　喷气引射旋风子式超微粉分级机系统示意图

引射喷嘴并联的结构形式，使分割粒径能够通过改变每一级的喷射压力和调整集尘器的抽力进行任意调定。

2　喷气引射旋风子理论分割粒径分析

2.1　速度场分析

旋风子的分级理论目前大都以研究旋风分离器为基础，基于对涡流场中离心力和向心携带力平衡的考虑，建立分割粒径关系式[6, 7]。本研究根据喷气引射旋风子的流动特征，在离心力平衡的基础上进一步考虑了引射抽吸对分级流场的影响，即考虑切向喷射产生的速度环量所形成的涡流动和引射抽吸在排出管喇叭口处产生的气力半径所形成的环汇流动之组合流场流动特性。根据对其流动关系的分析，可以建立引射喷嘴出口处和中心排出管喇叭口处的压力为

$$p_a = p_2 - \frac{8}{\pi^2}\rho Q_2^2\left(\frac{1}{d_a^4}\frac{1}{d_2^4}\right) \tag{1}$$

$$p_k = p_1 + \rho\left(\frac{\Gamma}{2\pi}\right)^2\left(\frac{2}{D^2} - \frac{2}{D_k^2}\right) \tag{2}$$

式中　喷射速度环量 $\Gamma = 8Q_1R_p/d_1^2$，则喇叭口处流速为

$$u_k = \left[\frac{2}{\rho}(p_2 - p_1) + \left(\frac{\Gamma}{\pi}\right)^2\left(\frac{1}{D_k^2} - \frac{1}{D^2}\right) + \left(\frac{4}{\pi}\right)^2\left(\frac{Q_2^2}{d_a^4} + \frac{Q_1^2}{D_0^4} - \frac{Q_2^2}{d_2^4}\right)\right]^{1/2} \tag{3}$$

在排气管气力半径作用下，喇叭口处径向速度 u_{kr} 与 u_k 是成正比关系的，即 $u_{kr} = \lambda u_k$。

根据喇叭口处流动特征，可将其作为一个高度为 h 的环汇流动，由此可导出喷气引射旋风子径向速度为

$$u_r = \frac{\lambda D_k}{2r}\left[\frac{2}{\rho}(p_2 - p_1) + \left(\frac{2Q_1R_p}{\pi d_1^2}\right)^2\left(\frac{1}{D_k^2} - \frac{1}{D^2}\right) + \left(\frac{4}{\pi}\right)^2\left(\frac{Q_2^2}{d_a^4} + \frac{Q_1^2}{D_0^4} - \frac{Q_2^2}{d_2^4}\right)\right]^{1/2} \tag{4}$$

根据扩压管切向喷射在旋风子中形成的流动特征，可将其作为一个平面涡流动，由此可导出喷气引射旋风子切向速度为

$$u_\theta = \frac{4Q_1R_p}{\pi d_1^2}\frac{1}{r} \tag{5}$$

2.2　理论分割粒径

考虑以上流动特征并根据颗粒所受的离心力和气流径向携带力的平衡关系，可建立喷气引射旋风子的理论分割粒径为

$$d_k = K\{\mu d_1^4 D_k D^2\left[\frac{2}{\rho}(p_2 - p_1) + \left(\frac{2Q_1R_p}{\pi d_1^2}\right)^2 \times \left(\frac{1}{D_k^2} - \frac{1}{D^2}\right) + \left(\frac{4}{\pi}\right)^2\left(\frac{Q_2^2}{d_a^4} + \frac{Q_1^2}{D_0^4} - \frac{Q_2^2}{d_2^4}\right)\right]/(\rho_p - \rho)Q_1^2R_p^2\}^{1/2} \tag{6}$$

式中　$K = 3\pi m\sqrt{\lambda}/8$；$m$ 为分割值系数，与分割粒径通过率有关（$0.5 \leqslant m < 1$）；λ 为气力半径速度系数，与引射速度和扩压管流量有关（$0 < \lambda < 1$）

在计算任意一级喷气引射旋风子分割粒径时，式(6)中的 Q_1 是前几级喷射流量之总和。

3　喷气引射旋风子式超微粉分级机实验及分析

3.1　实验装置及条件

实验以 d50、d44、d40、d36mm 四种规格的喷气引射旋风子组为研究对象，试验压力调整范围为 0.14～0.45 MPa，流量调整范围为 0.13～0.4 Nm^3/min，处理量调整范围为 0.22～1.4 kg/h。其中，喷射压力由调压阀控制，每级喷射流量由转子流量计控制，系统抽吸力由调压集尘器控制，处理量由电振给料机控制。实验装置如图 2 所示。实验选用了五种超微粉，如表 1 所示。

3.2　实验结果

上述粉料以一次分级后，获得四或五级超微粉，经 SKC－2000 型光透过式粒度分布测定仪测定，所得结果如图 3～图 6 所示。

3.3　相关分析

(1) 在处理量为 0.38kg/h 时，对石墨的超微分级结果表明：A 级旋风子 d_{50} = 0.31 μm，其中 0.25～0.8 μm 占 85.3%；B 级 d_{50} = 0.49 μm，其中 0.4～1.0 μm 占 80.1%；C 级 d_{50} = 0.81 μm，其中 0.7～1.5 μm 占 77.8%；D 级 d_{50} = 1.7 μm，其中 1.0～6.0 μm 占 65.1%。D 级

表 1 实验选用的超微粉

名 称	密度 /g·cm⁻³	粒度范围 /μm	d_{50}/μm	粘附性
石 墨	2.20	0.1～15.0	1.50	较弱
轻质碳酸钙	2.60	0.1～8.0	0.88	强
硅质岩	2.65	0.08～8.0	1.19	较强
石 英	2.66	0.05～5.0	0.54	一般
三氧化二铝	3.95	0.1～10.0	5.44	弱

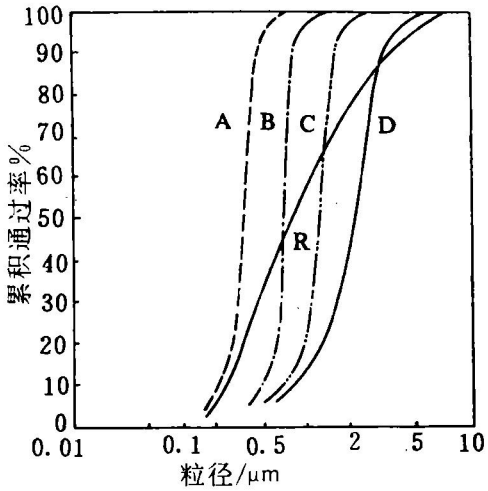

图 3 石墨分级粒度分布

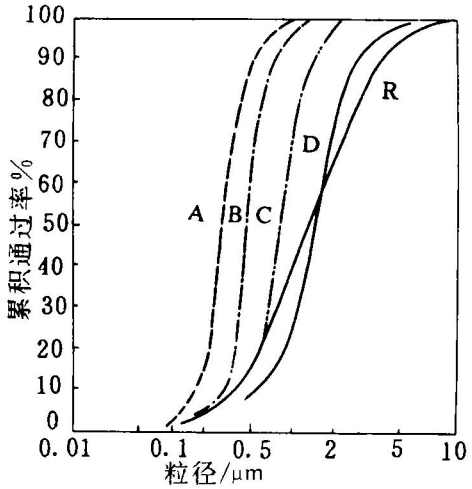

图 4 轻质碳酸钙分级粒度分布

旋风子(即第一级旋风子)所得粉料粒度分布较宽是由于第一级旋风子起到对粉料的预选作用，将大部分大于 1μm 的颗粒分选出来，而将超微粉送入后面的三级旋风子进行超微精密分级。

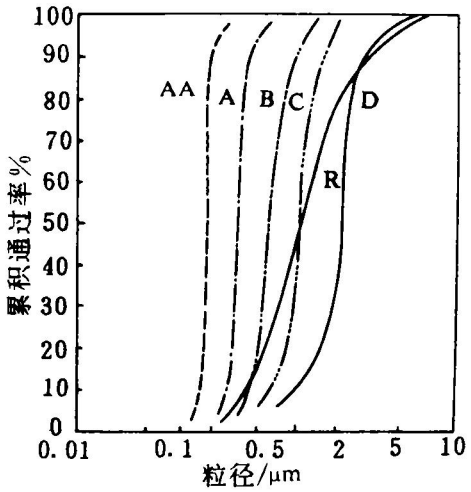

图 5 硅质岩分级粒度分布

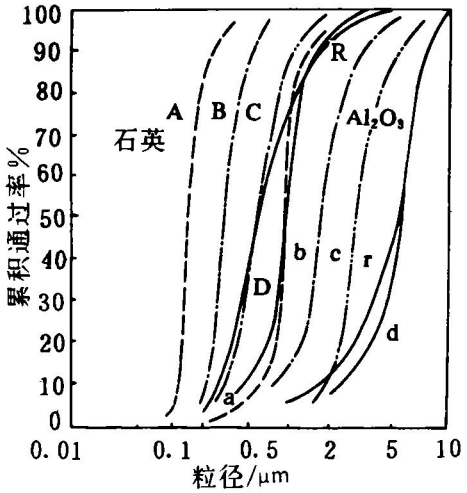

图 6 石英、三氧化二铝分级粒度分布

(2) 在处理量为 0.22kg/h 时，对轻质碳酸钙的超微分级结果表明：A 级旋风子 d_{50} = 0.39μm，其中 0.25～0.8μm 占 87.8%；B 级 d_{50} = 0.73μm，其中 0.6～1.4μm 占 85.0%；C 级 d_{50} = 1.44μm，其中 1.0～3.0μm 占 83.6%；D 级 d_{50} = 2.23 μm，其中 2.0～6.0 μm 占 53.9%。

(3) 在处理量为 0.35kg/h，对硅质岩的分级结果表明：AA 级集尘器所得粉料 d_{50} = 0.19 μm，其中 0.15～0.2μm 占 87.8%；A 级 d_{50} =

0.65μm，其中 0.6～1.1μm 占 64.2%；C 级 d_{50} =1.06μm，其中 1.0～1.8μm 占 68.3%；D 级 d_{50} =2.18μm，其中 1.5～5.0μm 占 86.6%。

(4) 在处理量为 0.48kg/h 时，对石英的分级结果表明：A 级旋风子 d_{50} =0.15μm，其中 0.12～0.2μm 占 74.1%；B 级 d_{50} =0.3μm，其中 0.2～0.6μm 占 82.4%；C 级 d_{50} =0.56μm，其中 0.4～1.0μm 占 72.1%；D 级 d_{50} =0.77μm，其中 0.8～3μm 占 54.8%。

(5) 在处理量为 1.4kg/h 时，对三氧化二铝的分级结果表明：A 级旋风子 d_{50} =0.92μm，其中 0.6～1.0μm 占 70.8%；B 级 d_{50} =1.79μm，其中 1.0～3.0μm 占 82.0%；C 级 d_{50} =3.68μm，其中 3.0～6.0μm 占 73.8%；D 级 d_{50} =6.02μm，其中 4.0～8.0μm 占 67.5%。

(6) 将旋风子设计和实验参数代入式(6)，可得各级旋风子的分割粒径理论值，并与实验值进行比较，其结果如图 7 所示。由图可以看出理论值普遍要比实验值小，这是由于在理论分析中忽略了粉料进入旋风子的浓度和旋风子壁面对气固流的滞止效应以及粉料的粘附作用，造成理论分割粒径偏小的结果。

(7) 将喷气引射旋风子式超微粉分级机分级效果与美国环境保护局南方研究所的多级旋风仪和日本京都大学的多级旋风仪，以及东北大学的多段旋风分级仪的分级效果进行综合比较，其结果如图 8 所示。由图可见，喷气引射旋风子式超微粉分级机在对石英超微粉的分级中，其最小分级粒径较现有的旋风子分级粒径减小了 67.6%以上。

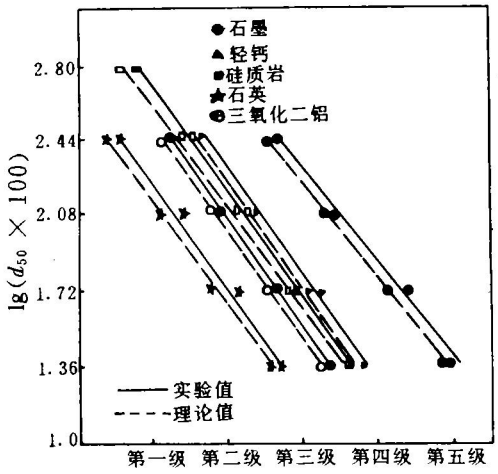

图 7　理论分割粒径与实验值比较

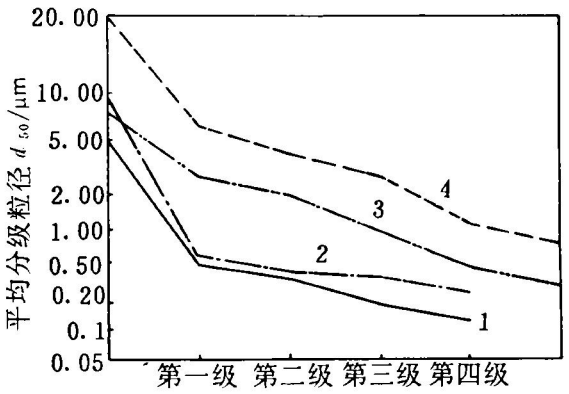

图 8　几种多级旋风子分级效果比较

1—喷气引射旋风子式超微粉分级机；
2—日本京都大学的多级旋风仪；
3—美国环保局南方研究所的多级旋风仪；
4—东北大学的多段旋风分级仪

4　结论

(1) 喷气引射旋风子利用喷射涡流和引射抽吸环汇流组合气动特性，以及喷嘴并联，扩压管串联的结构形式，使多级旋风子组分割粒径、粒度调整及处理量等性能得到明显改善，并在一定程度上达到了超微粉精密分级的实用效果。

(2) 喷气引射旋风子理论分割粒径与其结构和实验参数之间的关系如式(6)所示。

(3) 喷气引射旋风子式超微粉分级机可对 0.15～15μm 的超微粉同时进行四或五段的精密分级，处理量范围 0.22～1.4kg/h。

(4) 喷气引射旋风子式超微粉分级机将现有多段旋风仪平均最小分级粒径从 0.34μm 减小到了 0.15μm，其效果是十分明显而有意义的。

符号说明

d_1, d_2, d_3— 分别为扩压管出口、喷嘴进口和喷嘴出口截面直径，m；

D, D_k, D_0— 分别为旋风子、排出管喇叭口和排出

管直径，m；

K，m— 分别为分割粒径系数和分割值系数；

p_1，p_2— 分别为扩压管和喷嘴进口处压力，Pa；

P_n，P_t— 分别为喷嘴出口和排出管喇叭口处压力，Pa；

Q_1，Q_2— 分别为扩压管和喷嘴体积流量，m^3/min；

u_t— 喇叭口处速度，m/s；

u_r，u_θ— 分别为旋风子流场径向和切向速度，m/s；

Γ— 旋风子涡流场速度环量，m^2/s；

λ— 气力半径速度系数；

μ— 气体动力粘度，Pa · s；

ρ，ρ_p— 分别为气体和颗粒密度，kg/m^3。

参考文献

1 山田恭良. 化学装置，1988，2：43.

2 Smith W B，Wilson R R. Interagency Energy-Environment Research and Development Program Report. USA：1978.

3 大谷吉生，江见准，井伊谷钢一. 粉体工学会志，1984，5：29.

4 朴昌鹤，张歆伟，张国权. 通风除尘，1987，25(1)：25.

5 朴昌鹤. 通风除尘，1983，6(2)：14.

6 田中善之助，井上外志雄，日高重助，三轮茂雄. 粉体工学会志，1988，25(4)：29.

7 佐藤勇一，长岭拓夫，山田幸良. 粉体工学会志，1988，25(7)：17.