

除尘技术

中国建筑工程出版社

除 尘 技 术

[日] 通商产业省公害保安局 主编

李 金 昌 译

中国建~~筑~~工~~业~~出版社

本书是摘译日本通商产业省公害保安局主编的《公害防止技术和法规——大气篇》一书的第五章和附录二编成的，定名为《除尘技术》。

书中比较详尽地论述了各种类型除尘装置的原理、性能、适用范围、选择方法和维护管理等，还对各行业窑炉的烟尘成分进行了具体分析，可供环境保护工作者，特别是从事消烟除尘工作的工人和技术人员参考。

監修 通商産業省公害保安局

公害防止の技術と法規

（大気編）

公害防止の技術と法規編集委員会・1972年

* * *

除 尘 技 术

李 金 昌 译

*

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：5 1/2 字数：122 千字

1977年6月第一版 1977年6月第一次印刷

印数：1—20,280 册 定价 0.42 元

统一书号：15040·3338

译 者 的 话

《除尘技术》是由日本通商产业省公害保安局主编的《公害防止技术和法规——大气篇》一书的第五章和附录二译成的。

原书第五章比较详尽地论述了各种类型除尘装置的原理、性能、适用范围、选择方法和维护管理等，还对各行业窑炉的烟尘成分及其除去方式进行了具体分析，并举有实例，附有大量数据；附录二介绍了烟道排出烟气中烟尘量的具体测定法。这些内容，对环境保护工作者，特别是从事消烟除尘工作的工人和技术人员，有一定的参考价值。

有鉴于此，译者遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，译献读者。由于译者政治思想和业务水平有限，缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

本书译文承谷剑宽、洪太杓等同志协助校核。

一九七六年三月

目 录

§ 1 除尘装置的除尘性能表示法及其特性	1
1-1 前言	1
1-2 除尘装置的除尘效率	2
1-3 分级除尘效率	4
1-4 尘粒分散度与分级除尘效率和总除尘效率的关系	7
1-5 除尘效率、分级除尘效率与粉尘流入量、捕集量和 排出量之间的关系	12
1-6 通过率	15
1-7 处理烟气量和除尘效率	15
1-8 含尘浓度和除尘效率	18
1-9 串联运行时的总除尘效率	19
[参考] 运行中除尘装置除尘效率测定值的特性	21
§ 2 除尘方式	30
2-1 前言	30
2-2 除尘装置的种类	30
2-3 除尘装置的原理和性能	31
2-3-1 重力除尘装置	31
2-3-2 惯性除尘装置	34
2-3-3 离心力除尘装置	36
2-3-4 洗涤除尘装置	42
2-3-5 声波除尘装置	57
2-3-6 过滤除尘装置	59
2-3-7 电除尘装置	72
§ 3 煤烟的发生源及其特性	82

3-1	前言	82
3-2	锅炉	82
3-3	钢铁	88
3-4	化铁炉	94
3-5	水泥	98
3-6	骨料干燥炉 (干燥器)	101
3-7	黑液回收锅炉	102
3-8	有色金属	103
3-9	垃圾焚化炉	113
§ 4	除尘装置的选择和维护管理	116
4-1	前言	116
4-2	除尘装置的选择	116
4-3	集烟的方法	126
4-4	维护和管理	132
§ 5	烟道排出烟气中烟尘量的测定法	141
5-1	适用范围	141
5-2	测定概要	141
5-3	测定位置的选择和测点的确定	141
5-4	烟气中含湿量的测定和烟气容 (比) 重的求法	145
5-5	烟气流速及流量的求法	152
5-6	烟尘的采样法	153
5-7	用集尘管测定烟尘的方法	162
5-8	用滤纸测定烟尘的方法	165
5-9	烟尘浓度的计算	168
5-10	总烟尘量的计算	169

§1 除尘装置的除尘性能 表示法及其特性

1-1 前 言

在烟气中悬浮的固体粒子，适宜于分离捕集的粒径，在0.01微米（如炭黑粒子）到100微米（如硅砂粒子）之间；烟气的含尘浓度，即单位体积烟气中含有的固体粒子的重量，稀者为0.01克/米³，浓者达100克/米³以上。净化含尘浓度为0.01克/米³（即10毫克/米³）以下的气体时，可采用较厚的过滤材料或纤维填充物，或者用双区的电除尘器，这些皆称为空气过滤器。烟气中具有上述那样范围很广的粒径和浓度的粉尘在活动时，不但在运动学和流体力学上非常复杂，而且在除尘运转操作过程中还伴随出现扩散、凝并、吸附或带电等的物理现象，另外还对装置产生高温氧化和腐蚀，有时甚至还可能引起爆炸等化学现象。因此表示除尘装置一般的性能几乎是不可能的。但是，如果已知含粉尘或烟雾的烟气性质，则用基于这些性质的除尘效率以至通过率，或者压力损失等来表示除尘装置的性能，就成为可能的了。可是，从环境卫生角度来看，在这些性能中，最重要的应是除尘装置出口处烟气的含尘浓度。

如果掌握了现代除尘技术，那么把各企业排出烟气的含尘浓度降到0.1克/米³以下是没有什么困难的；若在这种浓度下，即使是烟尘，肉眼也是看不见的。氧化铁的烟气等，

浓度达 $0.2\text{克}/\text{米}^3$ 左右时,才略微看到一点红色。烟的遮光程度,决定于烟气中所含 1微米 以下微粒的比表面积大小。因此,要消除烟气的颜色,就必须以高效率的除尘装置来捕集这种微粒(称为烟雾物质),这就不得不提高设备费用。

在选择除尘装置的型式时,除上述性能外,还必须考虑包括设备安装面积在内的设施费和运行维护费,设备性能的可靠性和装置的耐用年限,以及操作运行、维修管理等的难易。装置的型式应由制造厂和用户双方直接协商决定。

1-2 除尘装置的除尘效率

除尘装置的除尘性能,通常用除尘效率来表示,符号为 η 。它的定义,如图1所示。设装置进口处的粉尘流入量为 S_i (克/秒),烟气含尘浓度为 C_i [克(粉尘)/标米³];出口处的粉尘流出量为 S_o (克/秒),烟气含尘浓度为 C_o (克/标米³)。另一方面,除尘装置分离捕集的粉尘流量为 S_c (克/秒),则除尘效率用下式表示:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{S_c}{S_i} \times 100 \\ &= \left(1 - \frac{S_o}{S_i}\right) \\ &\quad \times 100(\%) \quad (1-1a)\end{aligned}$$

这里,浓度单位中的标米³(Nm³),是指该烟气在标准状态(0°C, 760毫米汞柱)下的体积。假设换算成标准状态的烟气量为 Q_N ,则含尘浓

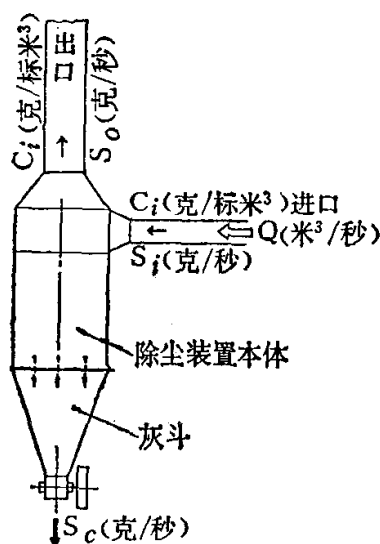


图1 有关除尘装置性能
的表示符号

度以 $C = S/Q_N$ (克/标米³) 表示, 故式 (1-1a) 可变为如下形式:

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o Q_o}{C_i Q_i} \right) = \left(1 - \frac{C_{oN} Q_{oN}}{C_{iN} Q_{iN}} \right)$$

设 $Q_i = Q_o$, 则

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o}{C_i} \right) \times 100(\%) \quad (1-1b)$$

此外, η 也可用下式代替式 (1-1a) 来表示:

$$\eta = \frac{S_c}{S_c + S_o} \times 100(\%) \quad (1-1c)$$

式 (1-1a) 主要是在实验室里, 以人工方法供给粉尘, 研究除尘装置性能时使用的, 而式 (1-1b) 及 (1-1c) 是对运行中的除尘装置进行粉尘采样, 供现场试验时应用的。

从除尘装置排到大气中的粉尘量 S_o , 由式 (1-1a) 得出下式:

$$S_o = S_i \left(1 - \frac{\eta}{100} \right) \text{(克/秒)} \quad (1-2a)$$

而排出烟气的含尘浓度 C_o , 由式 (1-1b) 以下式算出:

$$C_o = C_i \left(1 - \frac{\eta}{100} \right) \text{(克/标米}^3\text{)} \quad (1-2b)$$

因为排入大气的粉尘量是

$$S_o = C_o Q_o \text{(克/秒)} \quad (1-2c)$$

所以, 即使 C_o 在某一容许值以下, 如果烟气量 Q_o (米³/秒) 增大时, 就会出现 S_o 的绝对值增大的问题。

以上使用的粉尘量符号 S_i 、 S_o 或 S_o , 以及含尘浓度符号 C_i 或 C_o 中, 粉尘量的克数, 无论用重量或质量的单位都是可以的, 但工程单位一般是用重量克。如象空气过滤器那样含尘浓度极为低的场合, 含尘浓度可以用尘粒的个数或粉尘

造成的污染度来表示。

从以上各式可知, η 表示的是除尘装置的除尘效率, 不表示装置进口和出口或排气口的能量比如何, 所以, 不笼统地说相当于英语直译的效率, 在日本工业标准 JIS B 9909 中 (仿照 1967 年的表示法, 与德语除尘效率 Entstaubungsgrad 呼应), 把它称为除尘效率。

1-3 分级除尘效率

除尘装置的捕集对象, 也有烟雾的情况, 但一般可以说, 几乎都是固体粒子。这种情况, 将在后面各节讲到, 除尘效率总是首先受到粒子大小的很大影响。就是说, 即使在同一装置、同一运行条件下, 由于尘粒分散度的不同, 其性能也有显著的差别。这里, 假设粒子的大小为 x , 那么, 需要考虑对以它为中心的某一粒径范围 Δx 内的粉尘除尘效率问题。这种除尘效率称为分级除尘效率, 并以 η_x 表示。

现在, 按图 2 加以说明。设以某粒径 x 为中心具有 Δx 宽度的粉尘量 S_x (克), 对其总粉尘量 $\sum S_x$ (克) 的比例, 即百分数为 f , 则

$$S_x / \sum_{x_{\text{最小}}}^{x_{\text{最大}}} S_x = f (\%)$$

表示这个百分数 (频率) f 和粒径 x 关系的条状频率图或曲线就是工厂中常常被使用的以百分数表示的粒径分布曲线。如果粉尘的形状是针状或片状那样的非球形体, 用“直径”来表示其大小是不适宜的, 但可用处理烟气中粉尘的沉降速度 w_s (厘米/秒) 来表示。该图中 f_i-x 曲线表示除尘装置进口处粉尘粒径百分数分布曲线; f_c-x 曲线表示除尘装置捕集的粉尘百分数分布曲线。即 $f_i = S_{i,x} / \sum S_{i,x}$, $f_c = S_{c,x} / \sum S_{c,x}$,

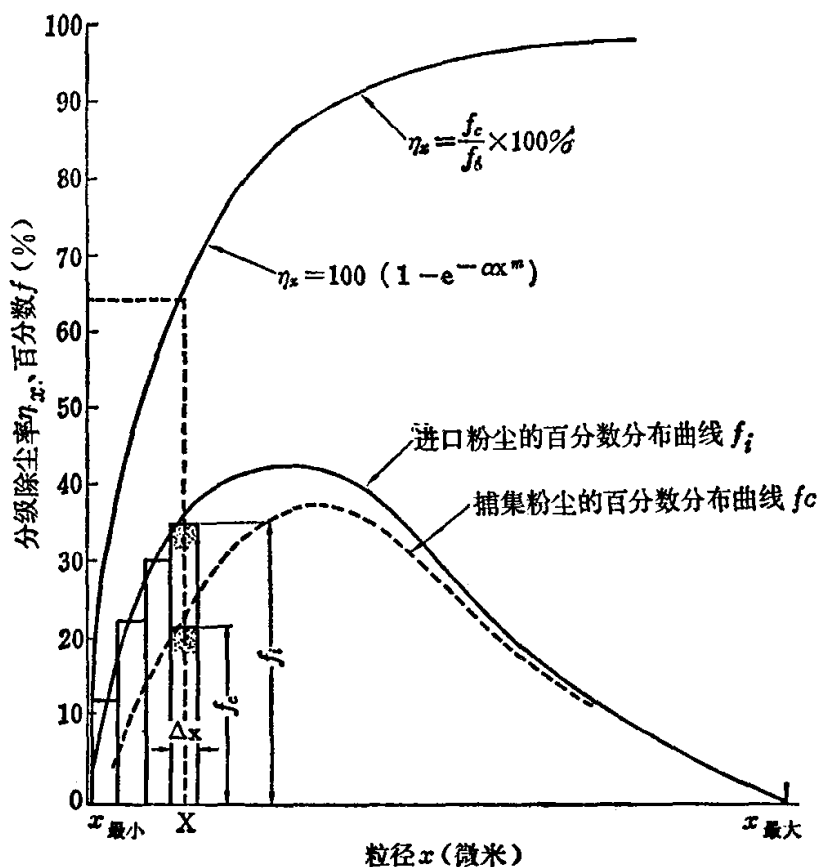


图 2 尘粒分散度和分级除尘率

因此假设进口处具有粒径范围 Δx 的平均粒径 x 微米的粉尘分量为 S_{ix} ，其中捕集的分量为 S_{cx} ，则对 x 微米粉尘而言，其除尘装置的分级除尘效率 η_x 与式 (1-1a) 一样表示如下：

$$\eta_x = \frac{S_{cx}}{S_{ix}} = \frac{S_{cx} / \sum S_{ix}}{S_{ix} / \sum S_{ix}} = \frac{f_c}{f_i} \times 100(\%) \quad (1-3)$$

现将所规定的运行操作条件下，各种除尘装置对于粉尘粒径的分级除尘效率示于图 3 中。这里，可以考虑粉尘微粒的最大比重为 $s = 2$ 。但是，这些分级除尘效率的特性曲

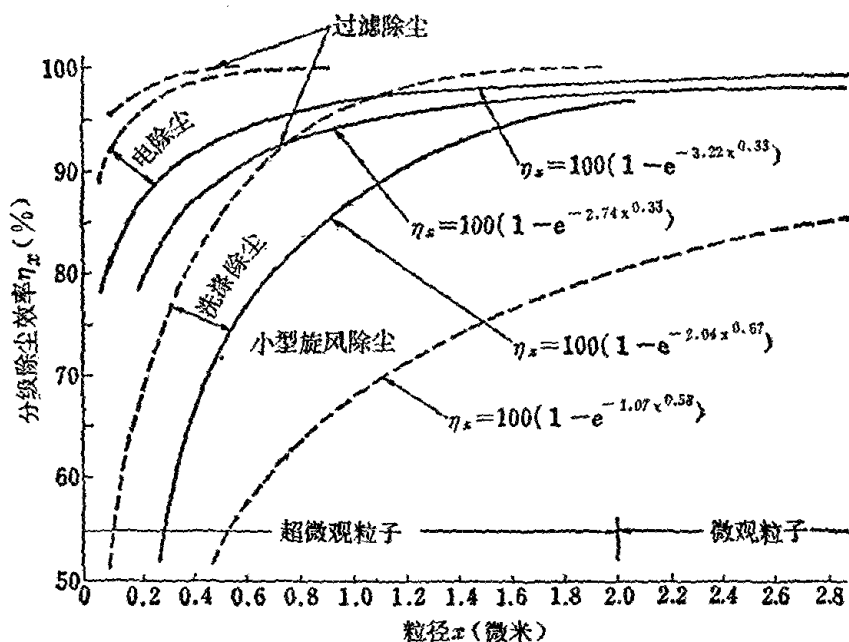


图 3 各种除尘装置的分级除尘效率

线，不仅是决定于粉尘的粒径，而且与粉尘的比重有关，同时，由于这一特性，曲线随粉尘的凝并性、吸附性和带电性等物理性质不同而有很大变化，所以，不能直接从这个图上判断各种型式除尘装置优劣的顺序。

图 4 表示旋风除尘器的分级除尘效率。实线表示老式，虚线表示新式的旋风除尘装置。请注意，该图横轴粒径 x 的数值，比图 3 增大了一位。

图 3 和图 4 中为各曲线写的 η_x 和 x 关系的方程式，均以下面的指数函数表示：

$$\eta_x = 1 - e^{-\alpha x^m} \quad (1-4)$$

上式右边第 2 项表示逸散粉尘的比例，粒径 x 的系数 α 值越大，逸散量越少，因此，这意味着装置的分级除尘效率增

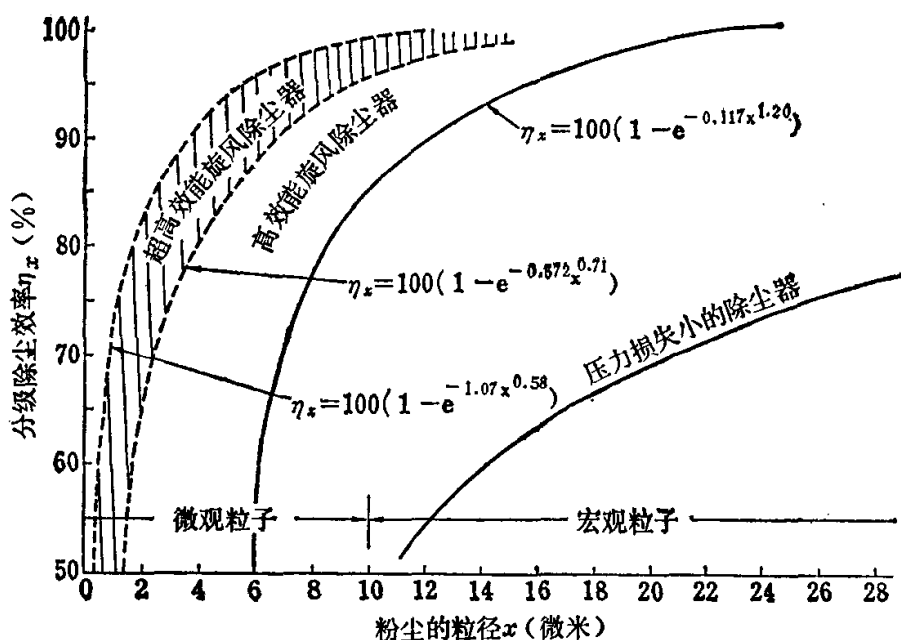


图 4 旋风除尘器的分级除尘效率

大。这些例子中，在 $m=0.33\sim 1.20$ 的范围内， x 的指数 m 值越大， x 对 η_x 的影响也越大。对粒径的分级除尘效率的特性表现最明显的是旋风除尘器和洗涤除尘器，而其它型式的除尘器，实际上多数不能由图 3 明显地表示出来。

1-4 尘粒分散度与分级除尘效率和总除尘效率的关系

图 2 中以虚线表示的捕集粉尘粒径、百分数分布曲线 f_o 与粒径 x 轴之间包围的图形面积，和以实线表示的粒径、百分数分布曲线 f_i 与 x 轴之间包围面积的比值，称为总除尘效率。即，设总除尘效率为 η ，则 η 是函数 f_o 对 x 的积分值，因而

$$\eta = \int_{x_{\text{最小}}}^{x_{\text{最大}}} f_c dx = \int_0^{\infty} f_i \eta_x dx \quad (1-5)$$

式中，函数 f_c 由式(1-3)导出 $f_c = f_i \eta_x$ ，而且积分下限 $x_{\text{最小}}$ 用0代替，上限 $x_{\text{最大}}$ 用 ∞ 代替，积分值也不变。又如图5所示，将给出的尘粒分散度，用粒子份数（按粒数或按重量） f 表示，比 x 微米大的尘粒在总粉尘量中所占比例，用积分份数 R 表示，则它和粒子份数 f 之间的关系为：

$$R = \int_x^{x_{\text{最大}}} f dx$$

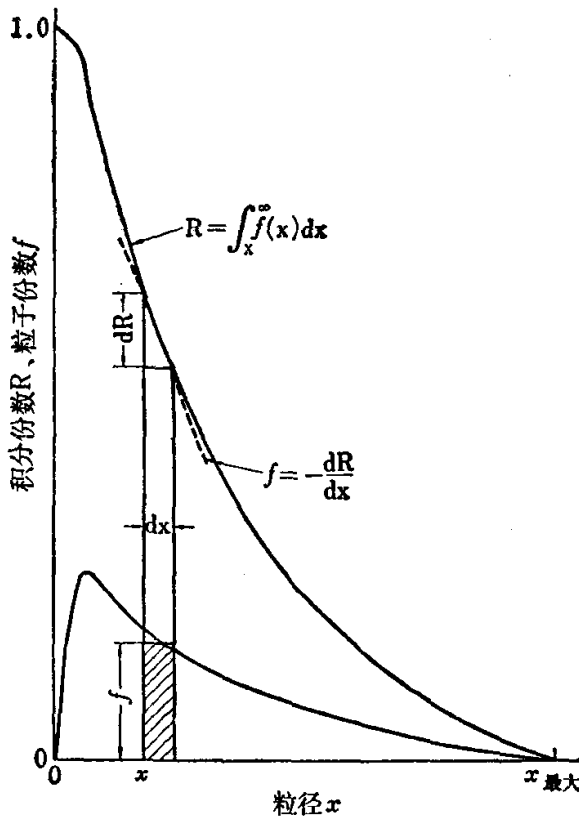


图 5 粒径的粒子份数分布和积分份数分布的关系

$$\text{或} \quad f = -\frac{dR}{dx} \quad (1-6)$$

一般地说，尘粒分散度用粒子份数 f 表示，不仅其曲线形状复杂，而且因粒径范围 Δx 的取法不同，曲线 f 的形状也不同，所以，给尘粒分散度的比较和其它处理带来了不方便。与此相反，如果尘粒分散度用积分份数 R 表示，则它与 Δx 的取法无关，成为单一的确定曲线，所以取任何一段的粉尘粒子大小，都是适合的。

现将作为除尘对象的尘粒分散度，用积分份数表示的罗辛-拉姆勒 (Rosin-Rammler) 分布公式的形式给出如下：

$$R = e^{-\beta x^n} \quad (1-7)$$

在此式中，粒径 x 的系数 β 值越大，粉尘就越细。对于 JIS 标准 Z-8901 (1963) 试验用粉尘，其粒径 x 的系数 β 和指数 n 值的研究结果，列于表 1 中。

日本工业标准 JIS Z-8901(1963) 试验用尘粒分散度公式

$R = \exp(-\beta x^n)$ 中的系数 β 和指数 n 值 表 1

粉 尘 名 称	系 数 β	指 数 n
第 2 类(硅砂)及第 7 类(关东亚粘土粉)	0.0280	0.95
第 3 类(硅砂)及第 8 类(关东亚粘土粉)	0.1405	0.76
第 4 类(滑石)	0.0923	1.07
第 5 类(粉煤灰)	0.4150	0.42
第 6 类(水泥)	0.0290	1.03

这里，根据式 (1-6) 和 (1-7)，以粒子份数表示进口粉尘的尘粒分散度的函数为：

$$f_i = \frac{dR_i}{dx} = n \beta x^{(n-1)} e^{-\beta x^n} \quad (1-8)$$

于是，将式(1-4)和(1-8)代入式(1-5)，求得的总除尘效率 η ，在理论上可以表示如下：

$$\begin{aligned}\eta &= \int_0^{\infty} n \beta x^{n-1} e^{-\beta x^n} \times (1 - e^{-\alpha x^m}) dx \\ &= n\beta \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-\beta x^n} dx \\ &\quad - n\beta \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-(\beta x^n + \alpha x^m)} dx \quad (1-9)\end{aligned}$$

作为除尘对象的粉尘，如表1中的滑石和水泥那样，当 $n \cong 1$ 时，上式右边的第一项为：

$$\begin{aligned}\beta \int_0^{\infty} e^{-\beta x} dx &= -\frac{\beta}{\beta} [e^{-\beta x}]_0^{\infty} = -(e^{-\infty} - 1) \\ &= -(0 - 1) = 1\end{aligned}$$

此时，式(1-9)就变为下式：

$$\eta = 1 - \beta \int_0^{\infty} e^{-(\beta x + \alpha x^m)} dx \quad (1-10)$$

再参照图4，如果采用粒径 x 的指数 $m \cong 1$ 的旋风分离器，则作为除尘装置的分级除尘效率 η_x 的函数形式，可将上式简化为：

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \beta \int_0^{\infty} e^{-(\beta + \alpha)x} dx \\ &= 1 - \frac{\beta}{-(\beta + \alpha)} [e^{-(\beta + \alpha)x}]_0^{\infty} \\ &= 1 + \frac{\beta}{\beta + \alpha} (e^{-\infty} - 1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 - \frac{\beta}{\beta + \alpha} \\
 &= \frac{\alpha}{\beta + \alpha} \quad (1-11)
 \end{aligned}$$

因此可以说，为要增大除尘装置的总除尘效率 η ，就要求表示除尘装置除尘特性的常数 α 值，远远大于表示粉尘颗粒大小的 β 值。这个问题就旋风除尘器来说，在图4中的微细粉尘（ β 值大）的情况下，需要采用 α 值很大的高效能除尘器。这就是将在各节中提到的小型旋风除尘器。相反，对于粒径大的粉尘（ β 值小）来说，在同图4中，采用 α 值比较小的（这时能减小旋风除尘器的压力损失）除尘器，即能获得满意的捕集效果。现在假设用 $\alpha=1$ 的旋风除尘器，分离捕集 $\beta=0.029$ 的水泥粉尘，则它的总除尘效率为：

$$\eta = \frac{\alpha}{\beta + \alpha} = \frac{1}{0.029 + 1} = 0.972 = 97.2\%$$

又，用同一个旋风除尘器，分离捕集 $\beta=0.0923$ 的滑石粉时，则总除尘效率就降为：

$$\eta = \frac{1}{0.0923 + 1} = \frac{1}{1.0923} = 0.915 = 91.5\%$$

试求，表示该性能特性的 α 值和后述旋风除尘器极限粒径公式（2-9）中的 x_c （译注：原文为 d_c ）之间的关系。

在式（1-4）中，如取 $m=1$ ，则

$$\eta_x = 1 - e^{-\alpha x}$$

这里对应于 $\eta_x=0.5$ 的粒径 x 是仅分离这种粒径粉尘50%的所谓极限粒径 x_c ，所以

$$0.5 = 1 - e^{-\alpha x_c}$$

由此

$$e^{-\alpha x_c} = 0.5 = 2^{-1}$$