

第 3 章 空气除菌

桑庆亮

泉州师范学院

2019 年 4 月 3 日

一、空气中的微生物

空气中的微生物多为细菌，也有真菌、酵母和病毒。

空气中微生物的数量与环境条件有关：干燥、寒冷 vs. 潮湿、温暖；城市 vs. 农村；靠近地面 vs. 一定高度

二、通风培养对无菌程度的要求

1. 固体培养、一般发酵制曲需要空气量大，对无菌程度要求不高 → 一般采用离心式通风机 → 调温、调湿
2. 酵母培养以糖源为主，pH 值较低，且酵母生长速度快，能抵抗少量杂菌的影响 → 对空气无菌程度要求较低
3. 深层发酵需氧量大，对无菌程度要求严格；但也跟培养周期、培养条件有关。

一般工业要求：除菌后活孢子/菌个数为 $N=10^{-3}$ 个/罐。

3.2 空气除菌的方法

- ◆ 过滤除菌：通过采用定期灭菌的过滤介质来阻隔空气中含有的微生物以取得无菌空气的除菌方式——**深层过滤**。

常见过滤介质有：**天然纤维**（棉花等）、**合成纤维**（玻璃纤维等）、**烧结材料**（烧结金属、陶瓷、塑料等）。

发酵工业中**主要**采用过滤除菌方法制备大量无菌空气。

3.2 空气除菌的方法

- ◆ **加热灭菌**：利用空气压缩后温度的升高来实现空气的除菌。

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \quad T_1, T_2, P_1, P_2: \text{压缩前、后的温度、压力}$$

P_2/P_1 为压缩比； K 为多变指数，取1.3.

∴ 已知 P_2/P_1 和 $T_1 \rightarrow$ 可计算 T_2 .

例如： $T_1 = 30$ & $P_2/P_1 = 7$, ∴ $T_2 = 201.75$ (°C)

温度/°C	200	250	300	350
所需时间/s	15.1	5.1	2.1	1.05

3.2 空气除菌方法

◆ **辐射灭菌**：紫外线、 γ 射线、X-射线、声波等均可达到灭菌效果，但**难**以大规模使用。

◆ **静电除菌**：使空气中的微生物和尘埃成为**带电荷**，利用静电引力吸附，从而达到除菌的目的。

使用高压电场使微生物/尘埃**电离化** → 电极吸附

优点：能耗小，空气压缩损失小；

缺点：设备庞大、电极需定时清理

3.3 空气过滤除菌的预处理

空气被压缩时，微生物受到高温的影响，因此工业上采用的除菌方法，通常是**加热除菌**和**过滤除菌**的**综合处理**。

一般要求的低压无菌空气：鼓风机**增压** → **过滤器** → 无菌空气
深层培养过程的空气需加压过滤除菌，预处理过程主要是空气
加压 → 一般工业上采用**空气压缩机**来提高空气的压力 → 粗过滤以减少进入压缩机的微生物/尘埃 → 减轻主过滤器的负荷
空气加压可采用多级方式、每级配储气罐以稳定压力。

可降温使部分水滴沉积、防止过滤介质碳化/燃烧、保证发酵罐温度稳定 → 除油（旋风分离器，以分离 $\phi \geq 10\mu m$ 的颗粒）。

3.3 空气过滤除菌的预处理

介质过滤器利用颗粒状介质、网状介质的拦截作用来分离空气中的水滴、油滴，使之形成大的液滴，并从介质上落下，从而与空气分离。

丝网分离器具较高的分离效率，当直径为 $5\ \mu\text{m}$ 滴液的分离效率可达 99%，且能除去部分 $2 \sim 5\ \mu\text{m}$ 的较小颗粒。

通过**丝网分离器**的空气流速的最大值可由下式得到：

$$v_{\max} = K \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}}$$

K 为系数，一般取 0.107； ρ_L 、 ρ_G 分别为液滴、空气的密度， v_{\max} 为空气的最大流速。**实际操作流速**可取最大流速的 75%。

3.3 空气过滤除菌的预处理

空气的压缩：恒压吸气、压缩、恒压排气过程

绝热压缩过程：气体压缩，分子密度增大，分子的距离缩短，热能产生，且未向外传递，气温升高。

等热压缩过程：压缩过程中，气体产生的能量全部排出，气体压缩前后温度相等。

实际上无法做到完全绝热，也不可能是等热压缩过程。

3.3 空气过滤除菌的预处理

绝热压缩公式为：

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}$$

K 为绝热指数， $K = \frac{c_p}{c_v}$ ，其中 c_p 为比定压热容， c_v 为比定容热容，空气的绝热指数为 **1.4**。一般空气压缩是个多变过程， K 可用多变指数 m 代替，一般取值为 **1.3**。

已知 T_1 、 P_1 、 P_2 ，即可计算 T_2 。

3.3 空气过滤除菌的预处理

湿空气：大气一般为干空气和水蒸汽的混合物，称为湿空气。

空气绝对湿度/湿含量/绝对湿度

$$H = \frac{\text{湿空气中水气的质量}}{\text{湿空气中干空气的质量}}$$

$$H = \frac{M_w P_w}{M_g P_g} = \frac{M_w}{M_g} \frac{P_w}{P - P_w} = 0.622 \cdot \frac{P_g}{P - P_w}$$

其中，**H** 为湿含量/绝对湿度，**M_w**、**M_g** 分别为水和空气的摩尔质量，**M_w** = 18，**M_g** = 29；**P_w**、**P_g** 分别为空气中水蒸汽与干空气的分压；**P** 为湿空气总压。

3.3 空气过滤除菌的预处理

在一定温度及总压下，湿空气的水气分压 P_w 与饱和水蒸汽压力 P_s 之比的百分数，称为**相对湿度** ψ 。

$$\psi = \frac{P_w}{P_s} \times 100\%$$

相对湿度 ψ 与**湿含量** H 的关系为：

$$H = 0.622 \cdot \frac{\psi P_s}{P - \psi P_s}$$

空气湿含量 H 表示空气中水汽含量的绝对值；相对湿度 ψ 反映湿空气吸收水汽的能力。

3.3 空气过滤除菌的预处理

$\psi < 100\%$ 的湿空气**冷却**, P_s 和 P 随温度而下降, H 保持不变.

——**等湿冷却**阶段

$$H = 0.622 \cdot \frac{\psi P_s}{P - \psi P_s} \Leftrightarrow \psi = \frac{P}{P_s} \cdot \frac{H}{H + 0.622}$$

ψ 达 100% 时, 水蒸汽达到饱和, 这时的温度称为**露点**.

随温度继续下降, 水蒸汽凝结成水, 绝对湿度 H 开始下降, 而

ψ 维持**100%**. ——**减湿冷却**阶段

3.3 空气过滤除菌的预处理

等湿冷却阶段：冷却温度一直高于露点，湿空气

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \frac{P_1}{P_{s_1}} \cdot \frac{H}{H+0.622} \\ \psi_2 &= \frac{P_2}{P_{s_2}} \cdot \frac{H}{H+0.622} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \psi_2 = \psi_1 \frac{P_{s_1}}{P_{s_2}} \frac{P_2}{P_1}$$

例：大气温度为 15 °C，相对湿度 70%，经空压机压缩到 3×10^5 Pa，温度上升到 120 °C，已知 15 °C 和 120 °C 时的饱和蒸汽压分别为 1710 和 1.986×10^5 Pa，空气压缩后的相对湿度为

$$\psi_1 = \psi_0 \frac{P_{s_0}}{P_{s_1}} \frac{P_1}{P_0} = 0.70 \times \frac{0.70}{1} \times \frac{3 \times 10^5}{1 \times 10^5} = 0.0181$$

3.3 空气过滤除菌的预处理

达到露点时, 水蒸汽的分压为 P_{sd} , 总压已达 3×10^5 , $\psi = 100\%$, 代入公式, 得:

$$P_{sd} = P_{s_1} \frac{\psi_0}{\psi_d} \frac{P_1}{P_0} = 1710 \times \frac{0.70}{1} \frac{3 \times 10^5}{1 \times 10^5} = 3591 \quad (Pa)$$

根据温度与饱和水蒸汽压的关系, 查得露点为 27°C . 随时间温度升高到露点以上, 如 40°C , 就不会有水析出, 其相对湿度为

$$\psi_2 = \psi_0 \frac{P_{s_0}}{P_{s_2}} \frac{P_2}{P_0} = 0.70 \times \frac{1710}{7381} \times \frac{3 \times 10^5}{1 \times 10^5} = 0.4865$$

为使压缩空气相对湿度低于 100% , 可先将空气冷却至露点, 析出水后再加热至一定温度, 以保证过滤介质不会因湿度太大而不能正常运行.

3.3 空气过滤除菌的预处理

温度	P_s/kPa	温度	P_s/kPa	温度	P_s/kPa
0	0.61129	14	1.5988	28	3.7818
1	0.65716	15	1.7056	29	4.0078
2	0.70605	16	1.8185	30	4.2455
3	0.75813	17	1.9380	31	4.4953
4	0.81359	18	2.0644	32	4.7578
5	0.87260	19	2.1978	33	5.0335
6	0.93537	20	2.3388	34	5.3229
7	1.0021	21	2.4877	35	5.6267
8	1.0730	22	2.6447	36	5.9453
9	1.1482	23	2.8104	37	6.2795
10	1.2281	24	2.9850	38	6.6298
11	1.3129	25	3.1690	39	6.9969
12	1.4027	26	3.3629	40	7.3814
13	1.4979	27	3.5670	41	7.7840

3.3 空气过滤除菌的预处理

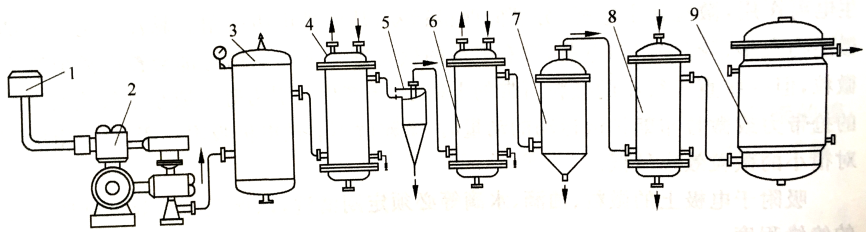
典型空气预处理流程：

- ❖ 一级压缩、二级冷却、加热预处理流程
- ❖ 一级压缩、一级冷却处理流程
- ❖ 一级压缩、一级冷却、冷热空气混合预处理流程

3.3 空气过滤除菌的预处理

一级压缩、二级冷却、加热预处理：

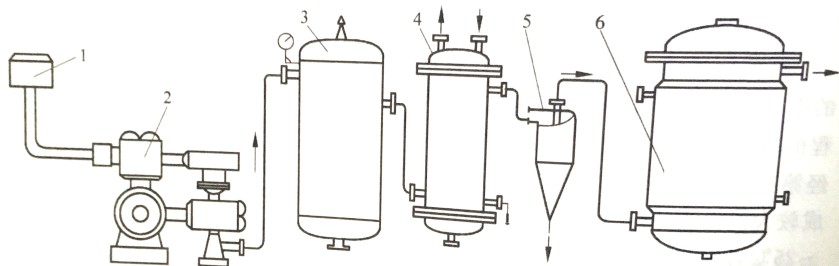
比较完善的空气预处理流程，适用于各种气候条件，能充分他
离空气中的水分。尤其适用于空气相对湿度大的潮湿地区。



3.3 空气过滤除菌的预处理

一级压缩、一级冷却预处理：

适用于内陆气候干燥的地区。

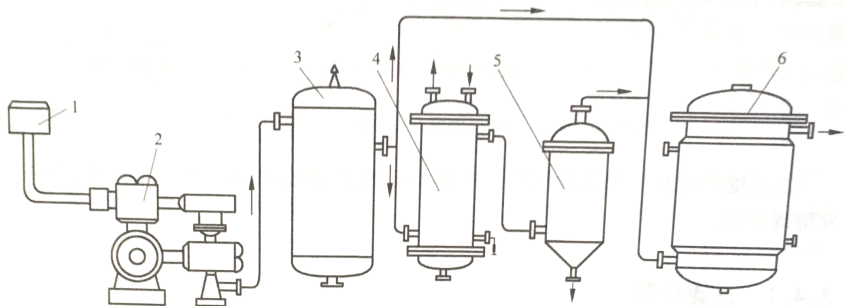


3.3 空气过滤除菌的预处理

一级压缩、一级冷却、冷热空气混合预处理：

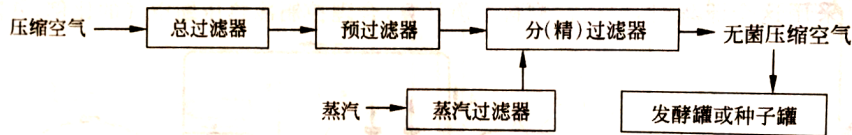
压缩后空气分两部分、一部分经冷却，与另一部分混合后通过过滤器。

优点：节省能源、流程简单；缺点：需要物料计算。



3.4 空气过滤设计

目前常用空气除菌流程：



通常总过滤器安装在无菌空气制备车间，预过滤、精过滤器和蒸汽过滤器安装在发酵罐旁边。

3.4 空气过滤设计

按孔径大小将过滤介质分为两类：

绝对过滤介质和**深层过滤介质**。

绝对过滤介质：孔隙小于被拦截微生物大小(孔径 $< 0.22 \mu\text{m}$)，

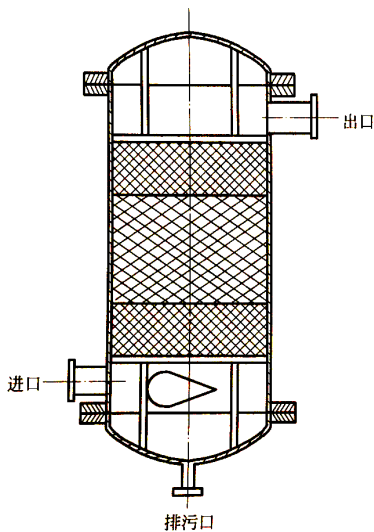
空气通过时将微生物留在介质一侧。如聚偏氟乙烯、聚四氟乙烯、聚乙烯醇、超细硼硅纤维等。

其中聚四氟乙烯常用，主要用于**精过滤器**的过滤介质。

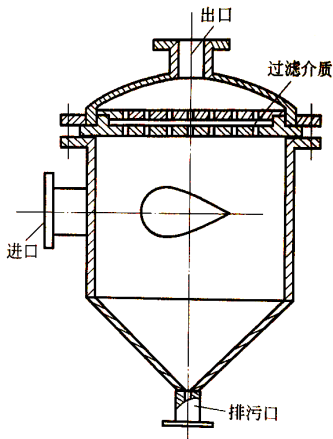
深层过滤介质：孔隙大于被阻隔的微生物，因而为达除菌效果，介质必须有一定的厚度。

分两类：一类包括棉花纤维、玻璃纤维、合成纤维和颗粒状活性炭等；另一类是将过滤材料制成纸、板或管状，如超细玻璃纤维纸、金属烧结板等。

3.4 空气过滤设计



滤层厚、效率低、成本低



滤层薄、效率高、成本高

3.4 空气过滤设计

空气过滤除菌的机理：

- ❖ 惯性冲撞滞留机理：微生物颗粒以一定速度向纤维垂直运动，空气受阻改变方向绕行，而微生物颗粒惯性较大不能及时改变方向，冲向纤维表面，再由于粘附、静电等作用而滞留纤维表面。

$$\eta_1 = \frac{b}{d_f}$$

其中 η_1 为单纤维惯性冲撞捕集效率； b 为宽度区间； d_f 为纤维直径。通常微粒运行速度越快，其运动惯性越大，受气流改变方向的干扰越小， b 越大。

3.4 空气过滤设计

实践证明, η_1 是微粒惯性力的无量纲参数 ϕ 的函数, 即

$$\eta_1 = f(\phi)$$

ϕ 与纤维直径、微粒直径、微粒运动速度成函数关系

$$\phi = \frac{c\rho_p d_p^2 v}{18\mu d_f}$$

c : 修正系数; ρ_p : 微粒密度; d_p : 微粒直径; v : 微粒流速; μ : 空气粘度; d_f : 纤维直径

3.4 空气过滤设计

空气流速 v 是影响惯性冲撞捕集效率 η_1 的重要参数, 改变 v , η_1 随之改变.

当气流速度下降到微粒的惯性力不足以使微粒脱离主导气流给纤维碰撞时, 微粒也随气流改变运动方向而绕过纤维前进, 即 $b = 0$, 惯性力无量纲参数 $\phi = 1/16$, 而 $\eta_1 = 0$. 此时惯性碰撞滞留效率等于 0, 该气流速度称为惯性碰撞的临界流速 v_c .

v_c 与纤维直径、微粒直径、微粒密度的关系为:

$$\frac{1}{16} = \frac{c\rho_p d_p^2 v}{18\mu d_f} \Rightarrow v = \frac{18\mu d_f}{16c\rho_p d_p^2} = 1.125 \frac{\mu d_f}{c\rho_p d_p^2}$$

v_c 受 d_f 、 d_p 的影响.

3.4 空气过滤设计

当气流速度较大时，应考虑惯性冲撞捕集效率 η_1 ，该值可按下面的经验公式计算：

$$\eta_1 = 0.75 \sqrt{2S_t} \quad \text{其中,} \quad S_t = \frac{d_p^2 \rho_p v}{18 \mu d_f}$$

S_t 为 Stokes 数. 当 ϕ 的等式中, $c = 1$ 时, $\phi = S_t$.

也可以理解为：

$$\eta_1 = f(\phi) \rightarrow \eta_1 = 0.75 \sqrt{\phi}$$

$$\text{其中,} \quad \phi = 2S_t = \frac{cd_p^2 \rho_p v}{18 \mu d_f} \quad (c = 2)$$

- ❖ 拦截滞留作用机理：当液化气流线中所携带的微生物颗粒与纤维接触时被捕集，称为拦截或阻截。

其效率取决于微粒的直径，与气流速度关系不大。微粒流线与单纤维介质的距离为

$$s = \frac{d_p}{2} \Rightarrow \begin{cases} s > \frac{d_p}{2} \text{ 时, 微粒与纤维不碰撞} \\ s < \frac{d_p}{2} \text{ 时, 微粒与纤维碰撞而被截留} \end{cases}$$

3.4 空气过滤设计

纤维对微粒的拦截捕集效率用 η_2 表示. 拦截滞留作用对微粒的捕集效率与气流的雷诺数以及微粒与纤维直径比的关系可总结为如下公式:

$$\eta_2 = \frac{1}{2 \cdot (2.00 - \ln R_e)} \left[2 \cdot (1 + R) \ln(1 + R) - (1 + R) + \frac{1}{1 + R} \right]$$

式中: R 为微粒直径与纤维直径的比, $R = \frac{d_p}{d_f}$

R_e 为气流雷诺数, $R_e = \frac{d_f v \rho}{\mu}$

当气流速度 v 小于等于气流临界流速 v_c 时, 该公式计算结果比较接近实际.

- ❖ 布朗扩散作用机理：微小颗粒受空气分子的碰撞，发生布朗运动，因此而与纤维介质相撞而被捕集。

布朗运动对微粒的捕集效率用 η_3 表示。

颗粒直径越小，气流速度越小，扩散捕集效率越高；反之则小。

3.4 空气过滤设计

- ❖ 静电吸附作用机理：干空气通过介质时，因运动摩擦产生电荷，使悬浮在空气中带电荷的微生物与过滤介质间通过静电引力而被捕集。

部分微生物带电：枯草芽孢杆菌 20% 带正电，15% 带负电，其余为电中性。

- ❖ 重力沉降作用机理：当颗粒所受重力大于气流的拖动力时，颗粒易沉降。大颗粒比小颗粒的沉降作用明显，只有在气流速度很低时，小颗粒才有可能沉降。

3.4 空气过滤设计

以上几种机理对微粒的捕集效率随参数变化有复杂的关系，目前尚无法准确计算。

一般认为，惯性冲撞、拦截和布朗扩散运动对颗粒的捕集效率较高，而静电吸附和重力沉降对微粒的捕集效率较小。

若假定惯性冲撞、拦截和布朗运动对颗粒的捕集效率互不影响，则单纤维对微粒的总捕集效率 η_0 为：

$$\eta_0 = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3$$

3.4 空气过滤设计

穿透率: $p = \frac{N_2}{N_1}$ 其中, $\begin{cases} N_1 -- \text{空气中过滤前的微粒数} \\ N_2 -- \text{空气中过滤后残留微粒数} \end{cases}$

滤层除菌效率 η 为: $\eta = \frac{N_1 - N_2}{N_1} = 1 - \frac{N_2}{N_1} = 1 - p$

单位滤层厚度的微粒浓度下降与空气中微粒浓度成正比:

$$-\frac{dN}{dl} = KN \quad K \text{ 为过滤常数, } \text{cm}^{-1}$$

$$\text{积分: } -\int_{N_1}^{N_2} \frac{dN}{N} = K \int_0^L dl \Rightarrow \begin{cases} \ln \frac{N_2}{N_1} = -KL \\ \text{或} \quad \text{对数残留定律} \\ \lg \frac{N_2}{N_1} = -K'L \end{cases}$$

3.4 空气过滤设计

填充系数为 8% 的 $16\mu\text{m}$ 棉花纤维的 K' 值

空气流速 $v/(\text{m/s})$	0.05	0.10	0.50	1.0	2.0	3.0
K'/cm^{-1}	0.193	0.135	0.1	0.195	1.32	2.55

$14\mu\text{m}$ 玻璃纤维的 K' 值

空气流速 $v/(\text{m/s})$	0.03	0.15	0.30	0.92	1.52	3.15
K'/cm^{-1}	0.567	0.252	0.193	0.394	1.50	6.05

3.4 空气过滤设计

K 或 K' 受多种因素影响，可以采用下面的经验公式计算：

$$K = \frac{4\alpha(1 + 4.5\alpha)}{\pi d_f(1 - \alpha)} \cdot \eta_0 \quad \text{其中,} \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha \text{ 为纤维填充率} \\ 0 < \alpha < 1 \end{array} \right.$$

当纤维直径较小，填充密度较大时，滤层较薄时，上式计算的 K 值比较符合实际；滤层较厚时，计算误差较大。

3.4 空气过滤设计

为了实验和计算的方便，可以采用过滤效率为 0.9 时作为设计计算对比基准：

$$\eta_{90} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} = 1 - \frac{N_2}{N_1} = 0.9$$

即穿透率 p 为 0.1: $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)_{90} = 1 - 0.9 = 0.1$

因此: $\lg\left(\frac{N_2}{N_1}\right) = \lg 0.1 \Rightarrow \lg\left(\frac{N_2}{N_1}\right) = -1$

根据对数残留定律，有: $\lg\left(\frac{N_2}{N_1}\right) = K' L_{90} = -1 \Rightarrow K' = \frac{1}{L_{90}}$

3.4 空气过滤设计

16 μm 玻璃纤维的 L_{90} 值

空气流速 $v/(\text{m/s})$	0.03	0.15	0.30	1.52	3.15
L_{90}/cm	4.05	8.50	11.70	1.53	0.38

$$\left. \begin{aligned} \lg \frac{N_2}{N_1} &= K'L \\ \lg \left(\frac{N_2}{N_1} \right)_{90} &= K'L_{90} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lg \frac{N_2}{N_1} = \frac{L}{L_{90}}$$

可以据此计算滤层厚度 L 及穿透率 $\frac{N_2}{N_1}$.

3.4 空气过滤设计

过滤压力降：压缩空气通过滤层时，与过滤介质的摩擦作用引起的压力降（ ΔP ）是一种能量损失，它受滤层厚度、空气流速、过滤介质性及、填充情况等的影响。 ΔP 可用下面的经验公式计算：

$$\Delta P = cL \frac{2\rho v^2 \alpha^m}{\pi d_f}$$

在相同的气流雷诺数下，空气通过玻璃纤维的压力降比棉花纤维的压力降要小。

3.4 空气过滤设计

评价一种过滤介质是否优越，主要是看其**过滤效率** (η)

$$\eta = 1 - p = 1 - \frac{N_2}{N_1} = \begin{cases} 1 - 10^{-\frac{L}{L_{90}}} \\ 1 - 10^{-K'L} \end{cases}$$

因此， η 是 K 或 K' 与 L ，或 L_{90} 与 L 的函数。

通常把 $\frac{KL}{\Delta P}$ 值作为综合性性的指标来评价空气过滤器的性能。

例题一