

队员信息


# 基于离散格点模型的布袋除尘器系统稳定性分析

## 【摘要】

袋式除尘器因它优良的过滤效率，低廉的成本，可过滤的粉尘种类之广等优势在垃圾焚烧场中有广泛的应用。但是对它的工作过程和工作效率的分析显得很困难。一方面是因为它牵扯到的过滤过程是随时间改变而改变的非平衡过程；另一方面是因为布袋的工作受到很多不同方面因素的影响。对这两个方面的内容进行综合模拟评估，以期提出对工厂排放尾气合理的监控方案是本文的主要目的。

本文第一部分对单个纤维的吸附作用的主要的两个机理做了模拟。运用了四阶的 Runge-Kutta 来解决惯性吸附问题，运用了结合宏观流场分布的随机行走模型对扩散问题做出了解答。

本文第二部分采用了从逾渗模型之中借鉴的离散格点模型来描述单个布袋纤维结构，考虑了在布袋工作时的各个不同因素，过程对它的实际效率的影响。同时找到了量化描述布袋损坏程度的方法，并用这种方法来对整个除尘器系统做了稳定性预测。提出了根据环境最大承载量确定的垃圾焚烧厂规模的上限。

第三部分对新型的除尘方法做了评估。

## 【关键词】

逾渗格点模型，非平衡过滤，系统稳定性评估，布袋除尘器，四阶 Runge-Kutta，随机行走模型

## 【问题重述】

袋式除尘器的主要工作原理是纤维网状结构对混杂在空气之中的杂质（粉尘，液滴等，以下统称为粉尘）的过滤作用。这个过程由于复杂性，无法精确地求解。同时对除尘器的设计，对工作条件的设定和管理会强烈地影响废气的处理效果。在实际应用中，应当考虑主要的因素，并且用切实可行的方法来对系统进行预估，监控。这样才能减少对环境的污染以及对居民的干扰。

主要影响除尘效果的因素有：进入气体温度（分布），进入气体压强，进入气体速度，滤袋性质（孔隙大小，厚度），杂质质量（分布），杂质半径（分布），清灰周期，喷吹压力，滤袋两边压差等。

## 【问题分析】

1. 在过滤的过程之中，粉尘和空气的脱离是由于粉尘碰撞到纤维丝之后收到纤维丝的吸附作用。这样的过程从原理上分为：
  - （1） 粉尘颗粒直径过大，直接由于机械式的阻挡，未能通过纤维层。这部分粉尘在布袋外侧形成粉尘初层。
  - （2） 颗粒直径适中的粉尘，能够进入布袋的内部，但在纤维丝周围由于惯性的原因，脱离绕过纤维的空气流线，碰撞到纤维丝上。
  - （3） 颗粒直径较小的灰尘，会由于它所做的无规则的布朗运动，在纤维丝周围时有一定的概率被吸附。
2. 过滤的过程是一个非平衡的过程。在过滤的过程之中，不断有粉尘被纤维吸附，又由于布袋两边的压差，流动的空气以及清灰脉冲喷气等的磨损作用，不断有灰尘脱离纤维丝，又有纤维丝自身损坏。这两个过程同时进行。它们作用大小受到除尘器工作状况的影响。

3. 过滤分为三个过程：
  - (1) 粉尘在布袋内部的堆积
  - (2) 粉尘初层积累到一定程度后，起到主要过滤效果的就主要是它。粉尘基本不再进入布袋内部。
  - (3) 清灰过程。在此过程中，由于喷孔发出的脉冲的气流产生瞬时高压，布袋发生高频振动，将吸附在布袋外侧的尘饼抖落，同时也会在一定程度上把布袋内部的粉尘和纤维磨损。
4. 影响布袋除尘器工作效果的因素，可以分成两大类：
  - (1) 较好控制的工作参数。这些参数会直接影响过滤过程吸附和磨损这两个过程的进行速度，从而影响布袋的工作效率和工作周期。
  - (2) 设定好的工作参数的波动。例如温度，压强出现过大，过小值。由于缺少对布袋除尘器具体结构，设计的信息，这部分因素无法精确地计入稳定性的计算之中，只能通过对它们出现概率的分析，做以粗略预测。

#### 【模型假设】

1. 除粉尘外的空气部分看作连续流体
2. 粉尘碰撞到纤维丝，就会被吸附
3. 不考虑粉尘所带的电荷
4. 不同颗粒直径的粉尘按“问题分析”中的方法分为三类，对同一类的粉尘不做区分
5. 一个布袋由众多平行的纤维层组成，它们的初始结构具有统计意义上的相同性
6. 同一个过滤装置中的各个不同的滤袋相互统计独立

说明：

1. 在一般布袋除尘器的工作温度（几百摄氏度）下，空气的自由程处在 $10^{-8}\text{m}$ 的数量级上，而布袋的孔隙则处在 $10^{-6}\text{m}$ 的数量级上。可以看到，空气分子自由程远小于滤袋孔隙。因而假设 1 是具有很好的合理性的。在这个假设下，就可以对空气流通过流体力学的方法做以简单可行的描述。
2. 灰尘碰撞到纤维丝，会由于它和纤维丝之间的范德华力，被纤维丝吸附。
3. 在特殊情况下，有的粉尘颗粒可能带有电荷。这对于吸附作用具有促进的作用。但由于本文主要考虑的是较为普遍的情况，这部分的因素不考虑在内。
4. 实际情况下，粉尘直径的分布一定是连续的。但是如此处理问题，在描述过滤过程时会有无法解决的困难。这个假设是对问题的简化。
5. 对粉尘过滤起主要作用的，是与粉尘所处的气流前进方向垂直的纤维。这些纤维组成了一个纤维层。这样的分析可以把三维的网状结构转化为多个二维结构来处理。
6. 由于缺少对过滤器结构的信息，无法对每一个布袋进行分别的分析，所以只能假定它们是全同的。这个假设在一定范围内足以描述实际情况。

#### 【符号说明】

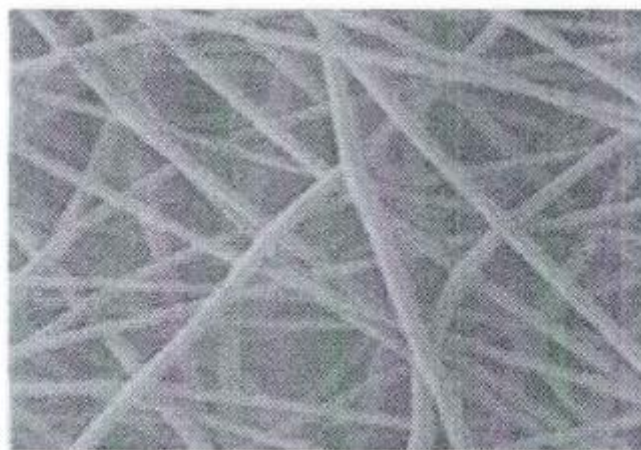
滤袋外气体温度	$T_e$ (K)	滤袋外气体压强	$P_e$ (kPa)
滤袋外气体流速	$v_e$ (m/s)	过滤速率	$V$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

滤袋厚度	$h$ (mm)	滤袋纤维层填充比	$\alpha$
纤维层纤维丝填充率	$p$	滤袋纤维直径	$d$ ( $\mu\text{m}$ )
纤维层所在处气压	$P$ (kPa)	纤维层两边压差	$\Delta P$ (Pa)
纤维层所在处参照流速(考虑了纤维填充影响后的修正流速)			$v$ (m/s)
粗颗粒直径	$d_1$ ( $\mu\text{m}$ )	粗颗粒数密度	$n_1$ ( $1/\text{m}^3$ )
中颗粒直径	$d_2$ ( $\mu\text{m}$ )	中颗粒数密度	$n_2$ ( $1/\text{m}^3$ )
细颗粒直径	$d_3$ ( $\mu\text{m}$ )	细颗粒数密度	$n_3$ ( $1/\text{m}^3$ )
清灰周期	$t$ (s)	清灰喷压	$P_c$ (kPa)
清灰偏斜喷角	$\theta$ (rad)	清灰喷速	$v_c$ (m/s)
滤袋内压强	$P_i$ (kPa)	滤袋两边压差	$\Delta P_t$ (Pa)

### 【模型建立】

#### 1. 单根纤维对粉尘颗粒的过滤作用<sup>[1]</sup>

布袋中存在着综合交错的网状纤维。这些纤维的分布，去向，粗细完全随机。将单个纤维近似为圆柱体，是一种很好的处理方法。单根纤维对粉尘的过滤机理主要有：拦截作用，惯性作用以及扩散作用。研究单根纤维的吸附效果，是研究布袋过滤效果的基础。



针刺滤料的内部结构

图 1

- (1) Kuwabara 流场给出了二维坐标系中与气流横交的圆柱周围的速度分布。对于平行排列的圆柱，设它的填充比为  $\alpha$ ，直径为  $d$ 。对单根纤维，有直径为  $b$  的同轴围绕。令  $b$  的取值使得邻近的纤维丝的同轴圆柱相切。因而有关系：

$$\alpha = \frac{d^2}{b^2}$$

Kuwabara 流场流函数方程以及径向速度分量  $v_r$ ，切向速度分量  $v_\theta$  的公式为：

$$\psi = \frac{vd}{4Ku} [2r * \ln r - r(1 - \alpha) + \frac{1}{r} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\alpha}{2} r^3] \sin \theta \quad (1)$$

$$v_r = \frac{v}{2Ku} [2r * \ln r - r(1 - \alpha) + \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\alpha}{2} r^2] \cos \theta \quad (2)$$

$$v_\theta = -\frac{v}{2Ku} [2r * \ln r + (1 - \alpha) - \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{3\alpha}{2} r^2] \sin \theta \quad (3)$$

其中， $\psi$  为单位为  $m^2/s$  的流函数， $r = \frac{2\rho}{d}$  为无单位的径向距离单位， $v$  为考虑了纤维层考虑了纤维填充影响后的修正流速。由于布袋纤维层之中包含的空气极少，流入布袋的空气一定会流出，所以在各个相同面积的切面上，气流流速相同。考虑了纤维丝占有的体积，有：

$$v = \frac{v_e}{1 - \alpha} \quad (4)$$

$Ku$  为 Kuwabara 动力学因子：

$$Ku = -\frac{1}{2} \ln \alpha + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} - \frac{3}{4} \quad (5)$$

Kuwabara 流场的径向，切向速度分量满足层流的边界条件：在临近纤维表面处流速为零，在临近同轴圆柱表面处，流场为无旋场。

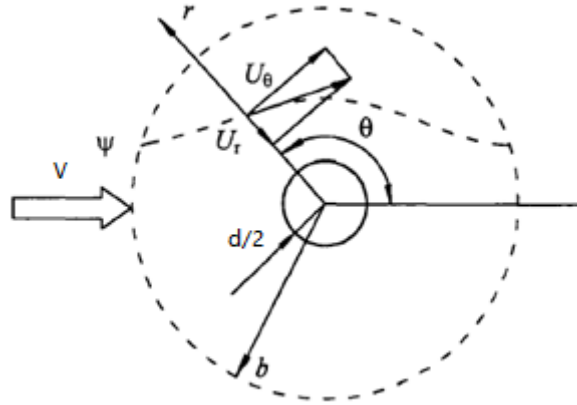


图 2

## (2) 惯性吸附作用的模拟

在较短时间内，流场可以看做是定常流，根据前面介绍的 Kuwabara 公式，结合牛顿运动定律，就可以确定较大粉尘由于惯性在脱离流线运动的轨迹，从而计算出被吸附的概率。

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F} \quad (6)$$

其中， $\vec{F}$  为粉尘颗粒受到的阻力。在本文研究的范围内，空气流速较小，粉尘的雷诺数必定小于 1。此时有阻力公式：

$$\vec{F} = 3\pi\eta d_0(\vec{v} - \vec{u}) \quad (7)$$

至此，问题转化为一个求解二阶线性微分方程组的问题。由于解析方法较为困难，同时为了计算的精度，考虑使用四阶 Runge-Kutta 法求解

这个初值问题。具体的计算过程和结果在【模型求解】中给出。

### (3) 扩散吸附作用的模拟

对于直径小于  $0.1 \mu\text{m}$  的粉尘,主要是随机的布朗运动引起它的被吸附。描述自由扩散的最直观且最恰当模型是随机行走模型。即认为粉尘的每次随机移动都与之前的运动无关,只由向各个方向运动的概率决定。而在实际的情况中,由于空气的宏观流动,在进行模拟时应考虑两方面的同时作用。在每一时刻的随机运动基础上,添加上粉尘所在处的流场速度,并将运动微分方程用有限差分来代替。由于粒子分布的随机性,随机选取大量个起始位置,做以统计平均,得到平均的吸附概率。

## 2. 布袋纤维网状结构的描述

可以通过纤维填充比(纤维体积占总布袋体积的比例)  $\alpha$ , 纤维的平均直径  $d$  来对纤维的分布进行刻画。这种刻画方式将纤维结构的统计平均值看作是它的属性,而把纤维的实际结构看作是随机产生的。

在与过滤模型极为相似的逾渗模型中,网状的复杂结构被抽象为数学上的整数格  $Z^n$ 。键是处在两个格点之间线段,可以被当作是处在半整数点上。每个键都具有两个状态:连通或阻断。前者的概率为  $p$ , 后者的概率为  $1-p$ 。而每个键的状态相互独立。此模型使用一个宏观统计量  $p$  借以伯努利概型来表征一个复杂网状结构的实际结构与宏观统计量的关系,具有直观,概括性强的特点。<sup>[2]</sup>

这个模型可以略做修改后应用在我们的过滤模型中。

前面说过,由于过滤过程之中起主要作用的是垂直于过滤方向的纤维丝,因而可以把一个三维的网状结构简化为多层二维网状结构。每次分析只要分析一层结构即可。

### (1) 初始纤维结构的建构

在初始时,为了简化计算过程,赋予每根纤维丝同样地直径  $\bar{d}$ 。实际材料的纤维填充比  $\alpha$  是可以作为已知量的。再这样的前提下,可以计算出相应的  $p$ :

$$p = \frac{4\alpha}{\pi\bar{d}^2} \quad (8)$$

根据  $p$  的数值,就可以画出一个纤维层的结构。下面的图是一个只画出较少格点的模型的示意图:

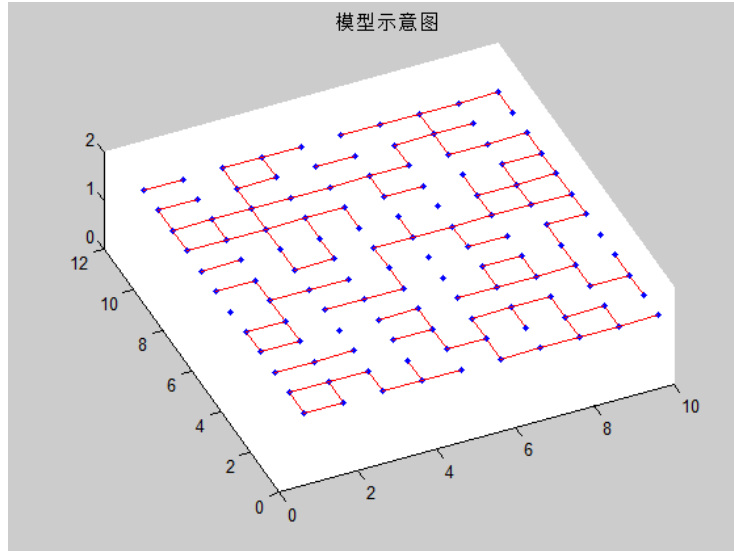


图 3

## (2) 网格结构的更新

在过滤的过程中，有的纤维丝上会有粉尘的堆积，有的纤维丝会发生磨损，而已经吸附上的粉尘也可能会因为气流的冲撞重新脱落。考虑到实际情况的复杂性，在网格模型中可以做出相应的抽象描述。

对二维的网格赋予一个矩阵  $A$  来描述处在各个键上的纤维粗细  $d$ 。若该矩阵上的某一元素为零，则代表对应的键处没有纤维。将被吸附的粉尘当作纤维的一部分，即把灰尘的堆积过程当作是对纤维结构改变的过程。而纤维结构的改变，可以通过矩阵  $A$  的改变刻画。与这种处理方法类似，纤维的磨损和粉尘颗粒的脱离都可以用  $A$  来表现。

除了粗颗粒没有进入纤维层以外，中颗粒和细颗粒都会对纤维结构产生影响。中颗粒和细颗粒都可以附在现有的纤维丝上，增加纤维的直径。另外，中颗粒还可以由生长作用在原先没有纤维的键处产生与自身直径相同的纤维。这个过程是对现实中粉尘在布袋纤维中的一定程度的堆积会提高粉尘的过滤效率的抽象化反应。

滤袋两侧存在压强差，有气流通过纤维层，纤维层受到磨损作用。由于实际中磨损的强度与布袋受到的阻力成正比，这里可以认为单层纤维受到两方面的磨损，分别正比于两边压差  $\Delta P$  与气流速度的平方。

## (3) 清灰过程的考虑

在过滤一段时间后，由于布袋外部形成较厚的尘饼，导致布袋两侧的压差变大。为了防止压差过大对布袋的损坏以及能源的浪费，每隔一段时间需要对布袋进行一个清灰过程。在脉冲式布袋除尘器中，清灰时通过一个发出高压脉冲气流的喷口来实现的。高压脉冲气流使得布袋发生高频振动，从而使附着在布袋外侧的尘饼发生变形脱落。在本模型中，可以认为一次清灰可以使所有布袋外部的粉尘脱落，即消灭了布袋的粉尘初层。

因为喷出气体的压强和方向也是实际影响布袋磨损速率的重要因素，所以在本模型之中也应有所反映。喷出的气体形成布袋内的局部高压，而布袋外的压强就变为了低压。如果喷口的方向还有所偏差，还应当将气流流动对布袋的磨损考虑在内。使用与 (2) 中相同的处理方法，

认为磨损速率分为两部分，分别正比于压差和气流速度的平方。

另外，清灰周期的大小也经由清灰对布袋结构磨损的量来对布袋的使用寿命产生影响。清灰周期过长，会使得布袋两边压差过大；清灰周期过短，会使得布袋的磨损加剧。

#### (4) 布袋损坏以及寿命的描述

布袋的各个纤维层都同时经历着上面所说的结构的改变。将这个过程看作是一个迭代过程。如果在某一时间  $t$  时，布袋的各个纤维层在相同位置出现一个大于最大粉尘颗粒直径的孔洞，则在此之后所有的粉尘可以不经阻拦地穿过布袋，也就是说布袋没有对空气起到良好的过滤作用，布袋的除尘效果会出现一个突降。将此时的布袋定义为损坏了的布袋，将这个时间  $t$  称为此布袋的寿命。 $t$  是对单个布袋稳定性的很好度量。

### 3. 整个除尘器稳定性的考虑

根据模型假设中的说明，对单个除尘器，它的各个布袋运作相互独立。因而各个布袋的状态相互独立，它们的寿命  $t$  相互独立。单个布袋的寿命  $t$  是一个随机的量，但是由于整个布袋除尘器中含有大量布袋，因而整体的稳定性作为一个统计量具有确定的值。

考虑在实际的运行之中，各个布袋所处的状态并不同步，即：在任何一时刻都有布袋可能到达寿命。将

$$p = \frac{t_0}{t} \quad (9)$$

定义为每一个布袋在时间段  $(0, t_0)$  内可能坏掉的概率。

根据各个布袋的全同性以及独立性，定义在时间段  $(0, t_0)$  内会出现布袋损坏的概率

$$p_s = np \quad (10)$$

定义为描述布袋除尘器稳定性的量，其中  $n$  为除尘器中含有的布袋个数。

### 4. 其他偶然性因素的考虑

除了本模型中主要考虑的因素——除尘周期，脉冲喷气口角度偏离，布袋两边的压差以及过滤速度等因素外，还有很多其他的因素会对布袋除尘器的稳定性有重要影响。但是由于这些因素难以在不知道具体信息的情况下做出量化分析，本文中不再做出讨论。但是需要注意的是，这些因素中的某些，如炉温的波动，空气渗漏，会对除尘效果产生巨大影响。因而在对布袋除尘器进行设计和管理时，都应全面考虑这些。

### 5. 根据布袋除尘器的稳定性对垃圾焚烧站的环境承载上限做以估计

出现布袋损坏的除尘器，它的过滤效果出现急剧的下落。正常工作时的过滤率为  $\eta$ ，则实际在时间段  $(0, t_0)$  内的过滤率  $\eta'$  为：

$$\eta' = \sum_{j=1}^n \binom{n}{j} p^j (1-p)^{n-j} \frac{n-j}{n} \eta \quad (11)$$

若地区单位面积限额为  $\zeta$  (总量/面积)，地区面积为  $S$ ，则

$$v_{max} = \frac{\zeta S}{\eta' t_0} \quad (12)$$

其中， $v_{max}$  为垃圾焚烧站允许最大时的排废气速率。这个量就限制了垃圾焚烧站的最大承载规模。

### 6. 在理想化的新式除尘器的前提下对垃圾焚烧站的环境承载上限做估计



不需要考虑偶然性的因素，只以最佳的除尘率来计算。

$$v_{max}' = \frac{\zeta S}{\eta_{max} t_0} \quad (13)$$

### 【模型求解】

#### 1. 单根纤维对粉尘颗粒的过滤作用

##### (1) 惯性吸附作用的模拟

为了便于数值求解，先对各变量进行无量纲处理，并且把③，④中的流场速度变换到直角坐标系求解。令：

$$x^* = \frac{2}{d} x; y^* = \frac{2}{d} y; t^* = \frac{2v}{d} t; S = \frac{2\rho_0 v d_0^2}{9\eta d} * Ku \quad (14)$$

其中， $\rho_0$ 为粉尘的密度。

则有粉尘颗粒的运动微分方程：

$$S \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + 2Ku * \frac{dx^*}{dt^*} - (f(r)\cos^2\theta + g(r)\sin^2\theta) = 0 \quad (15)$$

$$S \frac{d^2 y^*}{dt^{*2}} + 2Ku * \frac{dy^*}{dt^*} - (f(r) - g(r))\sin\theta\cos\theta = 0 \quad (16)$$

其中， $f(r) = 2r * \ln r - r(1 - \alpha) + \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\alpha}{2} r^2$ ， $g(r) = 2r * \ln r + (1 - \alpha) - \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{3\alpha}{2} r^2$ ，都是无量纲的量。

而将 $r = \frac{2\rho}{d} = \sqrt{x^{*2} + y^{*2}}$ 及 $\sin\theta = \frac{y^*}{\sqrt{x^{*2} + y^{*2}}}$ ， $\cos\theta = \frac{x^*}{\sqrt{x^{*2} + y^{*2}}}$ 带入，即可得到关于 $x^*$ 与 $y^*$ 的二阶线性微分方程。

再利用初值： $x_0^*, y_0^*, \frac{dx^*}{dt^*}_{t^*=0} = 1, \frac{dy^*}{dt^*}_{t^*=0} = 0$ ，使用四阶的 Runge-Kutta 法

即可得到它们的解。这里不再详述具体的程序编写，只给出运算结果并对结果进行分析。完整的程序见附录。

a. 吸附概率-纤维直径关系图。其中其他参数设置为：

填充比  $\alpha = 0.20$ ，粉尘直径  $d_0 = 2 \mu m$ ，粉尘的密度  $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ，空气流速  $v$  为  $1 \text{m/s}$ 。

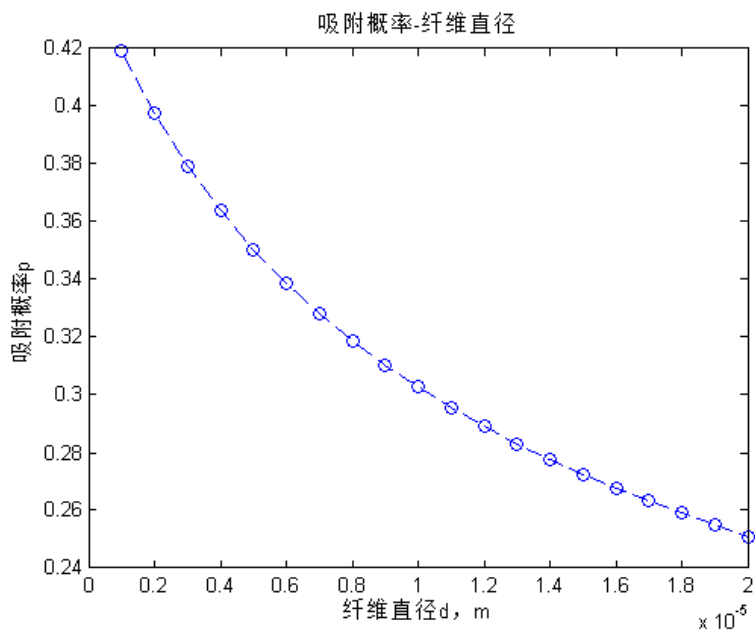


图 4

b. 吸附概率-粉尘直径关系图。其中其他参数设置为：

填充比  $\alpha = 0.20$ ，纤维直径  $d=10 \mu m$ ，粉尘的密度  $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ，空气流速  $v$  为  $1 \text{m/s}$ 。

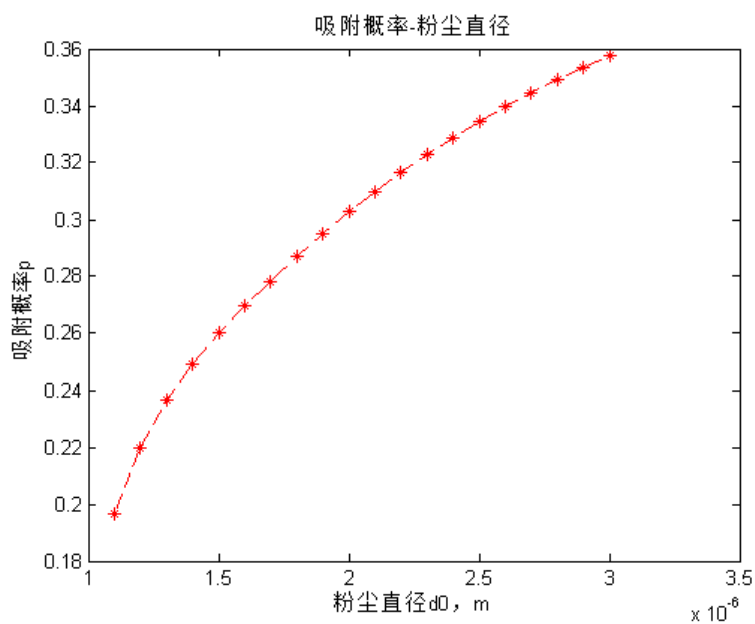


图 5

c. 吸附概率-空气流速的关系图。其中其他参数设置为：

填充比  $\alpha = 0.20$ ，纤维直径  $d=10 \mu m$ ，粉尘的直径为  $d_0=2 \mu m$ ，粉尘的密度  $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ 。

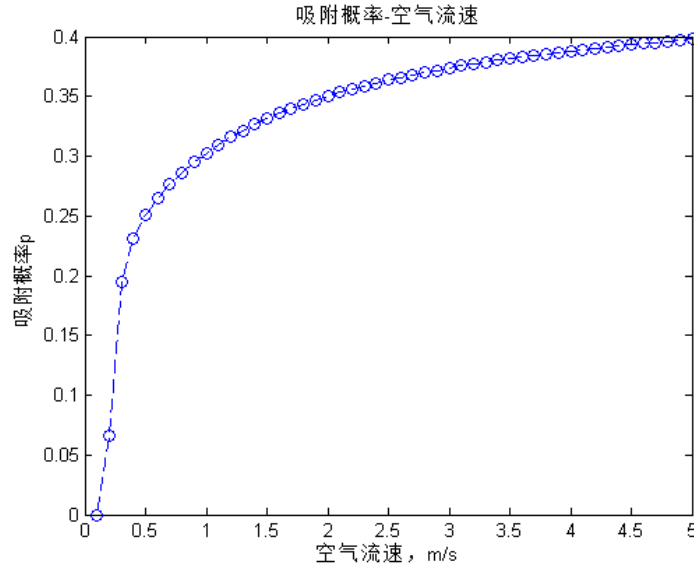


图 6

#### d. 结果分析

从图中可以看出，对于同一直径的粉尘颗粒，在其他参数一定时，减小纤维的直径，增加空气流速，都对过滤效果就有极大的促进作用。另外，在所有外部条件一致时，粉尘的直径增大，它因为惯性作用被吸附的概率就越大。

这部分的计算结果，可以应用在对布袋整体除尘效果的分析之中。

#### (2) 扩散吸附作用的模拟

$$\text{粉尘的平均自由程 } \bar{\lambda} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi n d_0^2} \quad (16)$$

其中  $n$  为粉尘数密度， $d_0$  为粉尘直径。

对粉尘的布朗运动做以简化处理的模型即是随机行走模型：认为粉尘每一次前进的距离都是  $\bar{\lambda}$ ，方向完全随机。考虑了流场的速度后，得到近似的差分公式：

$$\vec{x}(t_{k+1}) = \vec{x}(t_k) + t * \vec{v}(\vec{x}(t_k)) + \bar{\lambda}(\cos\beta\hat{e}_x + \sin\beta\hat{e}_y) \quad (17)$$

其中， $t$  为步长，角度  $\beta$  为完全随机的变量。

由于  $t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi n \bar{v} d_0^2}$ ，其中  $\bar{v}$  为粉尘的平均速度，可以用  $v$  近似替代。对粉尘的位置做出迭代求解，判断是否被纤维吸附，再随机选取初始点，对结果做出平均统计。由于统计的偶然性因素较多，可能数据分布较为分散，因而为了获得较为精确的平均值信息，需要对大量的颗粒分别求解，再做统计平均。

下面是模拟结果：

#### a. 吸附概率-过滤流速关系图

除了流速其余参数的设置为：填充比  $\alpha = 0.20$ ，纤维直径  $d=12 \mu m$ ，

粉尘的直径为  $d_0=0.2 \mu m$ 。

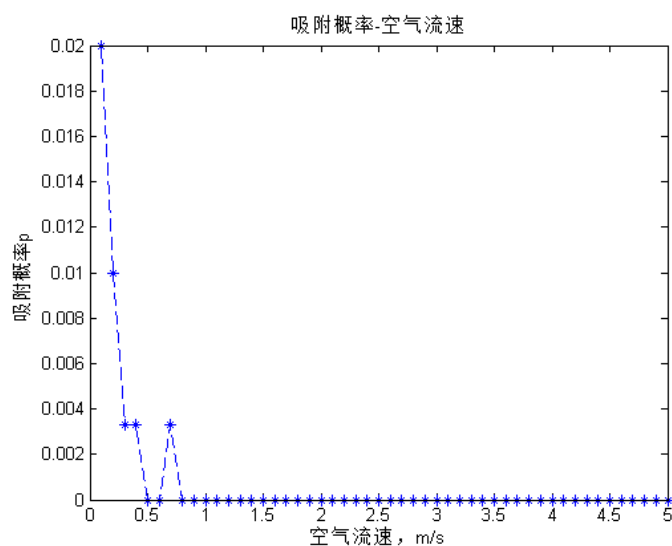


图 7

从图中可以看到与惯性作用不同，随着过滤速度的增大，被吸附概率会急剧降低。在过滤速度为 0.5m/s 以上时，可以基本认为已经不存在扩散吸附。这与实际情况是相符的。

b. 吸附概率-粉尘直径关系图

除了粉尘的直径，其余参数的设置为：填充比  $\alpha = 0.20$ ，纤维直径

$d=12 \mu m$ ，

过滤速率  $v$  为 0.3m/s。

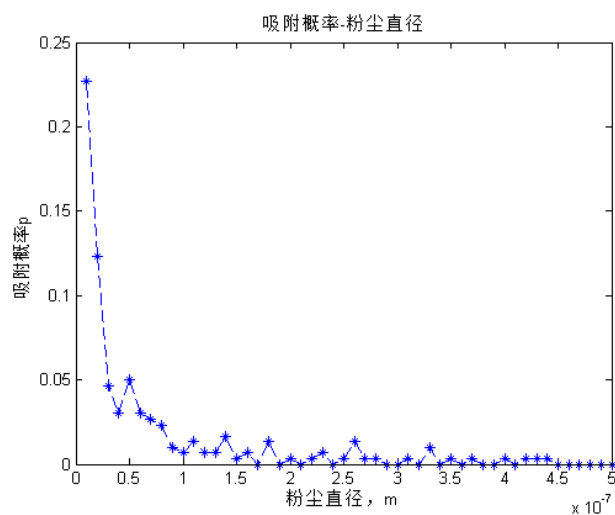


图 8

c. 吸附概率-纤维直径关系图

除了纤维的直径，其余的参数设置为：填充比  $\alpha = 0.20$ ，过滤速率

$v$  为 0.3m/s，粉尘直径  $d_0$  为  $0.2 \mu m$ 。

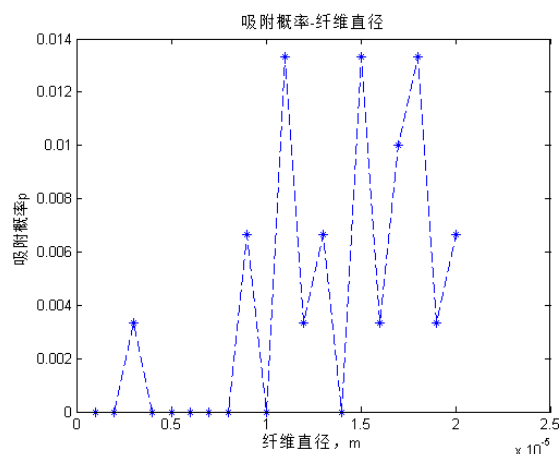
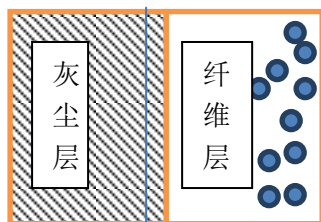


图 9

### (3) 两种吸附机理的综合分析

- 盲目的提高过滤速率并不能很好地提高系统整体的过滤效果，因为提高速度增加因惯性作用过滤的较大的颗粒过滤效果的同时，更小的颗粒（直径小于  $0.5 \mu m$ ）则会出现过滤效果急剧下跌。
- 在同样的工作条件下，两种不同的过滤机理产生的过滤效果随着粉尘颗粒的直径大小变化方向相反。在粉尘颗粒很大或粉尘颗粒很小的这两个极端情况下，过滤的效率都较高，但对与颗粒直径处在这两者之间的粉尘，整个系统对它们的过滤效率会出现一个极小值。而这个极小值的具体位置跟具体的工作环境有关，也与布袋实际所处的阶段有关。可以考虑把中等大小的颗粒过滤效果作为监控过滤器总体除尘效果的指标。
- 从模拟的结构来看这两个模型的结构与实际情况符合较好，因而可以认为，该模型已经考虑了实际过滤中单个纤维丝发挥的效果的主要方面。

## 2. 布袋除尘器稳定性分析



将布袋沿法向区分为纤维层和灰尘层。纤维在纤维层中以纤维单元的形式平行于表面排列且相互平行或正交；灰尘颗粒认为是均质的球形；模型中以纤维层中从初始到出现贯穿布袋的通孔表征稳定性；当布袋的外表面被较大的灰尘颗粒填满后，开始形成灰尘初层。此后所有灰尘均落在纤维层外，填充满成为灰尘层。灰尘堆积一定时间后，发生清灰过程，去除全部灰尘层和灰尘初层，之后的灰尘颗粒又被填入纤维层，构成循环。

### (1) 模型基本参数

1) 纤维层参数:

纤维 PTFE 密度  $\rho_{\text{hof}}=2200(\text{kg}/\text{m}^3)$ , 纤维层密度  $\rho_{\text{hoff}}=630(\text{kg}/\text{m}^3)$  纤维层总填充率  $\alpha_0=\rho_{\text{hoff}}/\rho_{\text{hof}}=28.64\%$ ;

2) 进入气流的参数:

气流速率  $v_0=1(\text{m}/\text{s})$ , 气源压力  $p_0$ , 气流温度  $\text{Tempre}_0=493.15(\text{K})$ , 气流密度  $\rho_{\text{ho}}=29\text{e-}3/(8.31*\text{Tempre}_0)*p_0=2.26(\text{kg}/\text{m}^3)$ , 流体的动力粘度  $\mu=2.6\text{e-}5(\text{Pa}\cdot\text{s})$ , 灰尘质量浓度  $c_0=0.04(\text{kg}/\text{m}^3)$ , 灰尘密度  $\rho_{\text{hohui}}=1000(\text{kg}/\text{m}^3)$ , 三种灰尘直径  $d_{\text{hui}}=0.2, 2, 15(\mu\text{m})$ , 对应的质量分数  $\text{percent}=0.44, 0.55, 0.01$

3) 出口气流的参数:

气流速率  $v_{\text{end}}=v_0=1(\text{m}/\text{s})$ , 气流差压  $\Delta p=1000(\text{Pa})$

4) 时间

迭代步长  $\Delta t=0.01(\text{s})$ , 工作周期  $\text{period}=70(\text{s})$

5) 清灰

$t_{\text{clean}}=0.15(\text{s})$ ,  $p_{\text{clean}}=0.4\text{e}6(\text{Pa})$

(2) 初始结构构建

整个纤维层的结构是借鉴于逾渗模型。具体来说, 是对整个空间划分成离散的周期性格点  $(x, y, z)$ , 相应的周期性长度——晶格常数  $a_0=20\mu\text{m}$ , 来确定离散的尺度。

简单考虑,  $z$  轴上只有一层周期性格点, 在迎着入口的风的面上有一个二维点阵  $(10 \times 12)$ , 它代表了  $xy$  面的一个局部, 事实上, 通过周期性边界条件可是使得模型中研究的区域变得尽量小。 $x$  轴方向上的半整数点构成新的矩阵  $(10 \times 11)$ , 这个矩阵就是用以标记最小的纤维单元, 它表示的是  $x$  轴方向上相邻格点间是否存在纤维单元。相应的, 在  $y$  轴方向上也存在矩阵  $(9 \times 12)$ 。通过人为给定在半整数点上出现纤维单元的几率, 我们就在模型中的初始结构中保证了随机的平均分布, 出现纤维单元的概率

$$P_{\text{xian}} = \alpha_0 \times \frac{2}{\pi} \frac{a_0^2}{d_0^2} \quad (18)$$

其中  $d_0$  是纤维单元的平均直径,  $a_0$  是纤维单元的长度。

短小的纤维单元是与实际的被针刺撕碎的纤维相符而各个纤维的粗细的差异性是通过让各纤维单元直径满足均匀分布  $U(d_0, d_0/10)$ 。将纤维单元直径作为属性, 以相应的位置存放在矩阵中。特别地, 让处于同一轴上的邻近纤维单元有相同的直径。

(3) 灰尘颗粒在纤维层内被捕获

滤料从清洁状态开始捕获气流中的灰尘颗粒, 已知滤料可以通过惯性与拦截、扩散作用来捕获不同大小的颗粒。为了强调颗粒直径对于发生作用机制的影响, 模型中只引进 3 种直径的颗粒。选取  $d_{\text{hui}}=0.2\mu\text{m}$  的颗粒仅发生扩散作用,  $d_{\text{hui}}=2\mu\text{m}$  的颗粒发生扩散与拦截作用, 而  $d_{\text{hui}}=15\mu\text{m}$  的颗粒仅发生惯性作用。借由上述模拟得到的单个纤维捕获颗粒的结果, 得到惯性与拦截作用的捕获概率  $\text{pro}$

$$d_{\text{hui}} = 2\mu\text{m} \text{ 时, } \text{pro}_2 = 0.43 \quad d_{\text{hui}} = 15\mu\text{m} \text{ 时, } \text{pro}_3 = 0.52$$

而上述模拟概率值较小的扩散作用, 显然是与实际不符, 所以认为纤维群对

于小颗粒灰尘的捕集效率远远大于模拟值，取

$$dhui = 0.2\mu m \text{ or } 2\mu m \text{ 时, } pro1 = 0.5,$$

以上讨论的 2 种作用可以在灰尘颗粒被纤维单元捕获后等效地增加其直径，增加的量可根据球形颗粒改变圆柱形纤维的体积增量求得。对于大型颗粒它还会在纤维层表面因无法穿过部分孔隙而被阻挡，进而为形成灰尘初层做铺垫。

考虑到被拦截的中等颗粒易形成树枝状分叉的结构，使得纤维的捕获截面增大，甚至发生“架桥”的现象<sup>[3]</sup>，连接两个纤维，引入纤维单元的生成作用，使得在相邻的纤维单元间产生不同取向的新纤维单元，如下图：

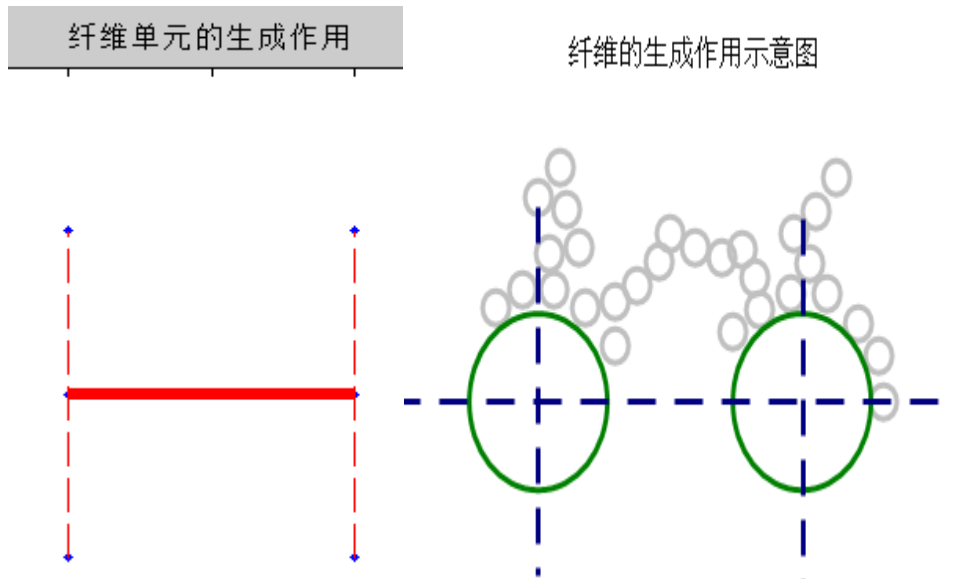


图 10

左图中虚线为可能存在的纤维单元，实线为因生成作用而产生的新纤维；右图中大圆为纤维单元，小圆为灰尘颗粒。

由于新纤维的生成是源自相邻的纤维单元发生都拦截作用后叠加的结果，因此假定生成新纤维的概率  $pro4$

$$dhui = 2\mu m \text{ 时, } pro4 = (pro3)^2 = 0.1845$$

假定一时间步长内，有足够多的颗粒被纤维单元捕获，因此可用统计平均值代替这段时间内被捕获的颗粒数，优化计算效率。又粒子数的估计值可知此假定只适用于小、中等颗粒，而大型颗粒因其粒子数少，在一时间步长内以概率  $pro1$  被阻拦在纤维层表面。

根据布袋除尘器在正常工况下的除尘效率有 99%，沿布袋法向的纤维薄层的质量浓度  $c$  认为是指数型衰减，即

$$c = c0 * \exp(-(1:zmax + 1) * 5/zmax) \quad (19)$$

其中  $zmax$  是法向纤维薄层的个数。

#### (4) 纤维因流速与差压的磨损

以上因素只确定纤维单元的增粗与生成，实际过程中气流会带走部分已被捕获的颗粒，差压会使纤维排列变化，这些量在模型中就被等效成纤维单元直径的减小。即纤维直径磨损速率(m/s)

$$vabration = con1 \cdot (\frac{1}{2} \rho_0 \cdot v_1^2 + con2 \cdot \Delta p) \quad (20)$$

其中 $con1$ 与 $con2$ 是待定系数， $v_1$ 是垂直于纤维的流速。根据实际问题中布袋两端差压过大容易造成在清灰过程中的磨损以及使用寿命的降低，而被气流带走的颗粒在模型中等效为纤维直径减小，所以认为流速带来的对纤维直径的磨损更大，可使 $|\frac{1}{2} \rho_0 \cdot v_1^2| = 10|con2 \cdot \Delta p|$ ， $con1$ 取决于实际的使用寿命，取 $con1 = 4.1667 \times 10^{-9}$ 。垂直于纤维的流速

$$v_1 = \begin{cases} v_0, & \text{有纤维单元} \\ v_0/(1 - \alpha_1), & \text{无纤维单元} \end{cases}$$

$\alpha_1$ 为该层纤维层投影的面填充率。

#### (5) 持续填充迭代

纤维层被颗粒持续填充直到生成了灰尘初层，而生成灰尘初层的判断条件为大颗粒填充满了 95% 的纤维层表面。根据这一特征时间  $time_0$  的尺度，结合实际滤料从清洁状态到出现灰尘初层的时间可估计大颗粒的质量分数。

#### (6) 灰尘层堆积

当出现了灰尘初层后，灰尘颗粒不再在纤维层内被捕获，灰尘颗粒在灰尘层上堆积，使得布袋两端的差压  $\Delta p_{all}$  增大：

$$\Delta p_{all} = \Delta p \cdot \exp(\lambda \cdot time);$$

$\lambda$ 由出现粉尘初层后以毛细管颗粒堆积模型<sup>[4]</sup>计算得大颗粒层两端的压差确定。

$$\lambda = \log\left(\frac{1}{\Delta p} (8\mu \cdot d_{hui} * \left(\frac{p_i}{4} * v_0\right) * \frac{\frac{p_i}{4} 1}{((\sqrt{2} - 1) * d_{hui})^2} + \Delta p)\right) / time_0$$

因此，出现灰尘层后，纤维层的磨损加剧，直至时间到了清灰的周期才停止

#### (7) 清灰过程

首先清灰过程是一个迅速的过程，在持续 0.1~0.2s 的脉冲压缩气流振动下，灰尘层全部消失，并且布袋纤维层受到了一个反向大压差的影响，通常状态下，对准的阀门不会有垂直于布袋的速率，因此磨损速率有一些提升；若阀门倾斜，磨损速率会变得相当大。实际情况体现在常见滤袋因高压气体偏吹而破裂。

#### (8) 判断布袋是否损坏

本文是通过寻找是否出现了通孔来判定布袋是否损坏。在纤维层的第一个薄层上寻找并记录下孔的位置，依次判断该孔是否为通孔便可实现。

### 【模型的验证和分析】

#### 1. 检验模型中初始布袋两边差压对其寿命的影响



由实际情况了解到布袋两边压差从 1000Pa 增大到 1600Pa 时，它的寿命是基本会减小到之前寿命的一半。使用本模型检验的结果如下：

deltap=1000Pa 时，寿命 time2=134.25s

deltap=1600Pa 时，寿命 time2=70.25s

计算结果确实和实际情况出现相同的规律。

2.验证模型中其他参数对寿命（即出现通孔的时间）的影响，见图 11.

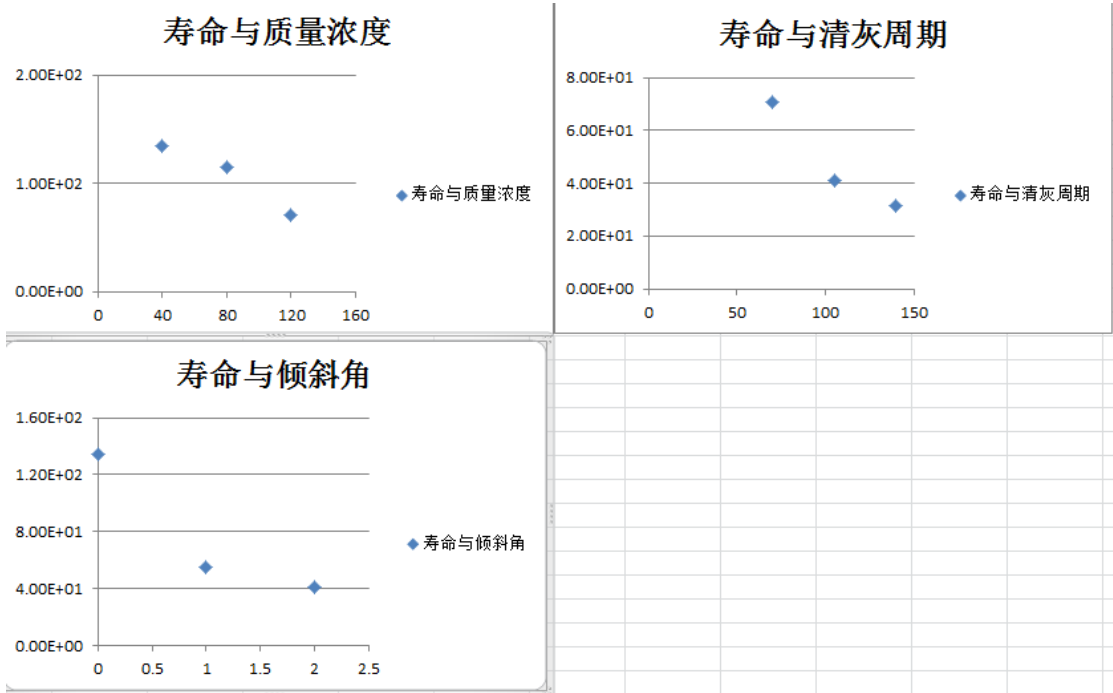


图 10

布袋的寿命随粉尘的质量浓度的增加，清灰周期的增长，清灰时脉冲喷口的角度偏差的增大等因素出现明显的减小。这也与实际中这些因素对除尘稳定性的影响相符合。

【模型评价】

1. 单个纤维丝的模拟中，惯性机理的模拟结果较为可靠，而扩散机理得到的结果虽然可以反映各个参数对过滤概率的大致影响，但具体的概率值过小。可能是由于对粉尘颗粒的自由程计算有误差。严格地讲，自由程的公式只适合于平衡态。把流场的直接影响加入随机行走模型的方法仍有待改进。
2. 对布袋的分层，划归格点的处理方式是一种把实际复杂的物品，过程利用抽象的结构代替的建模方式。再这样的描述下，各个工作过程中将布袋的过滤效率和磨损情况的变化看作是布袋自身纤维结构的变化，这样就可以把各个因素对布袋使用寿命的影响归结到这些因素对一个描述纤维层结构的直径矩阵的改变，最后再使用对布袋损坏条件的判断，确定各因素对布袋稳定性（使用周期）的影响。  
这样的模型主要特点是：简化，直观，易于实现模拟。同时它的计算结果也部分与实际相符。但是这只是一个近似的描述。因为实际的情况较模型考虑的因素复杂得多。

【参考文献】

【1】 朱辉，粉尘颗粒在纤维过滤介质表面沉积的计算机模拟，东华大学硕士毕

业论文：11-15，2009

【2】 Geoffrey Grimmett, Percolation, Springer, 1999,

【3】 袋式除尘器用 PTFE 复合滤料性能的试验研究，东华大学硕士毕业论文：21:22，2008

【4】 孙熙，袋式除尘技术与应用 11-15，2009

#### 【附录】

1.

a. 惯性作用下粉尘吸附的模拟

(1) `function h=h(c, m, n)`

`r=sqrt(m^2+n^2);`

`f=2*r*log(r)-r*(1-c)+(1/r^2)*(1-c/2)-(c/2)*r^2;`

`g=2*r*log(r)+(1-c)-(1/r^2)*(1-c/2)-(3*c/2)*r^2;`

`h=f*m^2/(m^2+n^2)+g*n^2/(m^2+n^2);`

(2) `function l=l(c, m, n)`

`r=sqrt(m^2+n^2);`

`f=2*r*log(r)-r*(1-c)+(1/r^2)*(1-c/2)-(c/2)*r^2;`

`g=2*r*log(r)+(1-c)-(1/r^2)*(1-c/2)-(3*c/2)*r^2;`

`l=(f-g)*m*n/(m^2+n^2);`

(3) 应用四阶Runge-Kutta差分公式，确定某一条件下的粉尘的运动轨迹，从而确定它是否被吸附。

`function dtm=Determine(y0, v, d0, d, c, ita, rho)`

`Ku=-(1/2)*log(c)+c-c^2/4-3/4;`

`S=(2*rho*v*d0^2/(9*ita*d))*Ku;`

`t=0.1;`

`%y=[y0, 0]; x=[-sqrt(1/c-y0^2), 0]; p=[1, 0]; q=[0, 0]; %`

`x0=-sqrt(1/c-y0^2);`

`%vec1=[x(1, 1), p(1, 1), y(1, 1), q(1, 1)]; vec2=[0, 0, 0, 0]; %`

`vec1=[x0, 1, y0, 0];`

`g=[0, 0, 0, 0]; k=[0, 0, 0, 0]; r=[0, 0, 0, 0]; s=[0, 0, 0, 0];`

`dtm=0;`

`for i=0:t:2`

`g(1, 1)=vec1(1, 2); g(1, 2)=(-2*Ku/S)*vec1(1, 2)+(1/S)*h(c, vec1(1, 1), vec1(1, 3));`

`g(1, 3)=vec1(1, 4); g(1, 4)=(-2*Ku/S)*vec1(1, 4)+(1/S)*l(c, vec1(1, 1), vec1(1, 3));`

`k(1, 1)=vec1(1, 2)+(1/2)*t*g(1, 2);`

`k(1, 2)=(-2*Ku/S)*(vec1(1, 2)+(1/2)*t*g(1, 2))+(1/S)*h(c, vec1(1, 1)+(1/2)*t*g(1, 1), vec1(1, 3)+(1/2)*t*g(1, 3));`

`k(1, 3)=vec1(1, 4)+(1/2)*t*g(1, 4);`

```

k(1,4)=(-2*Ku/S)*(vec1(1,4)+(1/2)*t*g(1,4))+(1/S)*l(c,vec1(1,1)+(1/2)
*t*g(1,1),vec1(1,3)+(1/2)*t*g(1,3));
r(1,1)=vec1(1,2)+(1/2)*t*k(1,2);

```

```

r(1,2)=(-2*Ku/S)*(vec1(1,2)+(1/2)*t*k(1,2))+(1/S)*h(c,vec1(1,1)+(1/2)
*t*k(1,1),vec1(1,3)+(1/2)*t*k(1,3));
r(1,3)=vec1(1,4)+(1/2)*t*k(1,4);

```

```

r(1,4)=(-2*Ku/S)*(vec1(1,4)+(1/2)*t*k(1,4))+(1/S)*l(c,vec1(1,1)+(1/2)
*t*k(1,1),vec1(1,3)+(1/2)*t*k(1,3));
s(1,1)=vec1(1,2)+t*r(1,2);

```

```

s(1,2)=(-2*Ku/S)*(vec1(1,2)+t*r(1,2))+(1/S)*h(c,vec1(1,1)+t*r(1,1),ve
c1(1,3)+t*r(1,3));
s(1,3)=vec1(1,4)+t*r(1,4);

```

```

s(1,4)=(-2*Ku/S)*(vec1(1,4)+t*r(1,4))+(1/S)*l(c,vec1(1,1)+t*r(1,1),ve
c1(1,3)+t*r(1,3));

```

```

vec2=vec1+(1/6)*t*(g+2*k+2*r+s);

```

```

vec1=vec2;

```

```

% fprintf('determine%d\n',i);%

```

```

if vec1(1,1)^2+vec1(1,3)^2<=1

```

```

    dtm=1;

```

```

    break

```

```

end

```

```

end

```

(4) 对每一种参数下，利用二分法，求出粉尘被吸附的概率。

```

function p0=Probability(v,d0,d,c,ita,rho)

```

```

yh=1/sqrt(c);yl=0;ym=(yh+yl)/2;del=abs(yh-yl);

```

```

while del>10^-3

```

```

    if Determine(ym,v,d0,d,c,ita,rho)==0

```

```

        yh=ym;

```

```

        ym=(yh+yl)/2;

```

```

        del=abs(yh-yl);

```

```

    else yl=ym;

```

```

        ym=(yh+yl)/2;

```

```

        del=abs(yh-yl);

```

```

    end

```

```

end

```

```

p0=yl*sqrt(c);

```

(5) 画出吸附概率-粉尘直径图：

```

clear all;

```

```

disp('输入填充比');

```

```

c=input('');

```

```

Ku=-(1/2)*log(c)+c-c^2/4-3/4;
ita=1.983*10^-5;%空气粘滞系数%
disp(' 输入粉尘密度,kg/m^3');
rho=input('');
disp(' 输入纤维直径d, 微米');
d=input('');
d=d/10^6;
disp(' 输入空气流速v, m/s');
v=input('');
d0=1.1:0.1:3;
d0=d0*10^-6;
p=linspace(0,0,20);
for i=1:1:20
    di=d0(1,i);
    p(1,i)=Probability(v,di,d,c,ita,rho);
end
plot(d0,p,'*-r');title(' 吸附概率-粉尘直径');xlabel(' 粉尘直径d0,
m');ylabel(' 吸附概率p');

```

(6) 画出吸附概率-纤维直径图:

```

clear all;
disp(' 输入填充比');
c=input('');
Ku=-(1/2)*log(c)+c-c^2/4-3/4;
ita=1.983*10^-5;%空气粘滞系数%
disp(' 输入粉尘密度,kg/m^3');
rho=input('');
disp(' 输入空气流速v, m/s');
v=input('');
disp(' 输入粉尘颗粒直径d0, 微米');
d0=input('');
d0=d0/10^6;
d=1:1:20;p=linspace(0,0,20);
d=d*10^-6;
for i=1:1:20
    di=d(1,i);
    p(1,i)=Probability(v,d0,di,c,ita,rho);
end
plot(d,p,'o--');title(' 吸附概率-纤维直径');xlabel(' 纤维直径d,
m');ylabel(' 吸附概率p');

```

(7) 画出吸附概率-空气流速图:

```

clear all;
disp(' 输入填充比');
c=input('');
Ku=-(1/2)*log(c)+c-c^2/4-3/4;

```

```

ita=1.983*10^-5;%空气粘滞系数%
disp(' 输入粉尘密度, kg/m^3 ');
rho=input(' ');
disp(' 输入粉尘直径d0, 微米 ');
d0=input(' ');
d0=d0/10^6;
disp(' 输入纤维直径d, 微米 ');
d=input(' ');
d=d/10^6;
v=0.1:.1:5;
p=linspace(0, 0.5, 50);
for i=1:1:50
    vi=v(1,i);
    p(1,i)=Probability(vi, d0, d, c, ita, rho);
end
plot(v, p, 'o--');title(' 吸附概率-空气流速');xlabel(' 空气流速, m/s');ylabel(' 吸附概率p');
b. 扩散作用下粉尘吸附的模拟:
(1) function h=h(c, m, n)
function h=h(c, d, m, n)
r=sqrt(4*m^2/d^2+4*n^2/d^2);
f=2*r*log(r)-r*(1-c)+(1/r^2)*(1-c/2)-(c/2)*r^2;
g=2*r*log(r)+(1-c)-(1/r^2)*(1-c/2)-(3*c/2)*r^2;
h=f*m^2/(m^2+n^2)+g*n^2/(m^2+n^2);
(2) function l=l(c, m, n)
function l=l(c, d, m, n)
r=sqrt(4*m^2/d^2+4*n^2/d^2);
f=2*r*log(r)-r*(1-c)+(1/r^2)*(1-c/2)-(c/2)*r^2;
g=2*r*log(r)+(1-c)-(1/r^2)*(1-c/2)-(3*c/2)*r^2;
l=(f-g)*m*n/(m^2+n^2);
(3) function dtm=Determine(d, d0, c, v, x0, y0)
% a0=[12*10^-6, 0.2*10^-6, .2, .5, -6*10^-6, 0];
% [d, d0, c, v, x0, y0]=a0;
% d=12*10^-6; d0=0.2*10^-6; c=.2; v=.5; x0=-6e-6; y0=0;
t=sqrt(2)*d0/(3*c*17*10^-6); lamda=sqrt(2)*d0/(3*c);
m=100;
n=3*sqrt(c/2)*m; dtm=0;
Ku=-(1/2)*log(c)+c-c^2/4-3/4;
x1=x0; y1=y0;
for i=0:1:n
    beta=2*3.1415*rand(1,1);
    x2=x1+t*v*h(c, d, x1, y1)/(2*Ku*m)+lamda*cos(beta)/m;
    y2=y1+t*v*l(c, d, x1, y1)/(2*Ku*m)+lamda*sin(beta)/m;
    x1=x2; y1=y2;

```

```

        if (x2^2+y2^2)<=d^2/4
            dtm=1;
            break
        end
    end
end
(4) function p0=Probability(d, d0, c, v)
p0=0;
for i=1:1:300
    x=-d/(2*sqrt(c))+d/(sqrt(2))*rand(1, 1);
    y=-sqrt(d^2/(4*c)-x^2)+2*sqrt(d^2/(4*c)-x^2)*rand(1, 1);
    p0=p0+Determine(d, d0, c, v, x, y);
end
p0=p0/300;
(5) disp('输入填充比');c=input('');
disp('输入粉尘直径d0, 微米');d0=input('');d0=d0/10^6;
disp('输入纤维直径d, 微米');d=input('');d=d/10^6;
v=0.1:0.1:5;
p=linspace(0, 0, 50);
for i=1:1:50
    vi=v(1, i);
    p(1, i)=Probability(d, d0, c, vi);
end
plot(v, p, 'm--');title('吸附概率-空气流速');xlabel('空气流速, m/s');ylabel('吸附概率p');
(6) disp('输入填充比');c=input('');
disp('输入过滤速度, m/s');v=input('');
disp('输入纤维直径d, 微米');d=input('');d=d/10^6;
d0=0.01:0.01:0.5;d0=d0/10^6;
p=linspace(0, 0, 50);
for i=1:1:50
    d0i=d0(1, i);
    p(1, i)=Probability(d, d0i, c, v);
end
plot(d0, p, 'm--');title('吸附概率-粉尘直径');xlabel('粉尘直径, m');ylabel('吸附概率p');
(7) disp('输入填充比');c=input('');
disp('输入粉尘直径d0, 微米');d0=input('');d0=d0/10^6;
disp('输入过滤速度, m/s');v=input('');
d=1:1:20;
d=d/10^6;p=linspace(0, 0, 20);
for i=1:1:20
    di=d(1, i);
    p(1, i)=Probability(di, d0, c, v);
end
end

```

```
plot(d,p,'*--');title('吸附概率-纤维直径');xlabel('纤维直径,
m');ylabel('吸附概率p');
```

2. main1.m

```
%纤维层参数
rhof=2200;%纤维PTFE密度(kg/m3)
alpha0=630/rhof;%纤维层总填充率=纤维层密度/PTFE密度

%赋流体参数
deltap=1600;%布袋两端差压(Pa)
v0=1;%进入的气流速率
(m/s)!!!!!!!!!!!!
Tempre0=220+273.15;%进入的烟气温度的(K)
p0=320e3;%布袋气源压力(Pa)
rho0=29e-3/(8.31*Tempre0)*p0;%进入的气流密度(kg/m3)
c0=40e-3;%进入的烟尘质量浓度
(kg/m3)!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
mu=2.6e-5;%200° C流体的运动粘性系数(Pa.s)
%deltap0=4*(8*pi*1.4/Re)/(-log(alpha0)+2*alpha0-alpha0^2/2-3/2
)*alpha0/(1-alpha0)*1e-3*rho0*v0^2/d0^2;%愚蠢

vend=1;
Tempreend=195+273.15;%出口的烟气温度的(K)
pend=p0-deltap;
rhoend=29e-3/(8.31*Tempreend)*pend;

option1=0;%是否画示意图
t1;%结构初始化

Re=d0*v0*rhof/mu;%以障碍物为基准的雷诺数
dhui=[0.2,2,15]*1e-6;%取3种灰尘颗粒直径(m),
percent=[0.44,0.55,0.01];%各直径的灰尘的质量分
数!!!!!!!!!!!!!!
%以表征(扩散),(扩散,截断),(截断,惯性),以及(增加直径),(增加直径,
建立新纤维),(粉尘层堆积)
%dhui<<d0时,可忽略拦截效应
pro1=0.5;%碰撞概率:扩散效应与颗粒直径的关
系!
pro2=0.43;%碰撞概率:截断效应与颗粒直径的关
系!
```

```

    pro3=0.52;%碰撞概率： 惯性效应与颗粒直径的关
系
    !
    pro4=pro2^2;%形成新的纤维单元的概率,认为架桥两边同时需发生截断
效应
    deltat=50*1e-3/v0;%迭代时间步长

    v=linspace(v0,vend,zmax+1);%各纤维层的平均速率
    num0=zeros(2,1);
    num1=zeros(2,zmax+1);
    pro=[pro1;1-(1-pro1)*(1-pro2)];%增加纤维直径的概率
    for h=1:2
        num0(h)=1/(1000/(c0*percent(h))*dhui(h)^3);%进入的灰尘数密
度(个/m3) 灰尘颗粒密度=1000kg/m3

    num1(h,:)=num0(h). *a0^2/2*deltat*v.*exp(-(1:zmax+1)*5/zmax);%迭代
时间步长内通过一个半整数点所在的线的粒子数 (个)
    end

    con1=0.25e-6/60000;con2=0*1e-3;%磨损参数->人为选
定
    !!!!!!!!!!!!!

    num2=1/(1000/(c0*percent(3))*dhui(3)^3) *a0^2*deltat*v0;%迭代
时间步长内填充一个格点的大颗粒数(个)
    property0=zeros(xmax,ymax);%大颗粒是否填充了第1层的格点
    flag1=0;%判断大颗粒是否填满纤维表面
    flag2=0;%判断纤维层是否出现通孔
    time=0;%迭代时间步数(s)
    time2=0;%布袋破损时间(s)

    tclean=0.15;%清灰持续时间(s)
    pclean=0.4e6;%清灰压强(Pa)
    vclean=0;%可能存在的反向气流
    period=1*70;%清灰周期(s)
    pnum=0;%周期数置零(个)

    %多个周期
    while ~flag2
        while ~flag1 %找到出现粉尘初层的时间点
            v=linspace(v0,vend,zmax+1);%各纤维层的平均速率
            t2;%分配流速,因孔分布不同而变化
            t3;%开始迭代,小,中颗粒在纤维内堆积,大颗粒在表面堆积
            time=time+deltat;
            if ~mod(round(time/deltat),50),fprintf('迭代至%.3f秒,
填充%.3f,直

```



```

径%.2d\n', time, length(find(property0==0))/(xmax*ymax), xproperty(1,
1, 1, 1));end
    t5;%判断纤维层是否出现通孔
    if flag2==1, break;end
end
if flag2==1, break;end
time0=time;%记录开始出现粉尘初层的时间点

if time>=((pnum+1)*period), warning(' 周期选错了');end
while time<((pnum+1)*period), %灰尘持续堆积至清灰时刻
    t4;%灰尘层堆积, 得到总差压值, 纤维层继续磨损
    time=time+deltat;
    if ~mod(round(time/deltat), 50), fprintf(' 迭代至%.3f秒,
填充%.3f, 直
径%.2d\n', time, length(find(property0==0))/(xmax*ymax), xproperty(1,
1, 1, 1));end
    t5;%判断纤维层是否出现通孔
    if flag2==1, break;end
end
if flag2==1, break;end
time=(pnum+1)*period;
t6;%清灰, 使粉尘层消失,
t5;%判断纤维层是否出现通孔
flag1=0;
pnum=pnum+1;
fprintf(' 第%d个周期\n', pnum);
end
fprintf(' 是否破损flag2=%d\n', flag2);
fprintf(' 布袋寿命time2=%d\n', time2);
%布袋寿命

t1.m
%赋模型的几何尺度

d0=12e-6;%控制纤维直径用, 可认为是平均直径(m)
a0=20e-6;%点阵的晶格常数——人为给定 (m)
pxian=alpha0*a0*a0*2/(pi*d0*d0);%由填充率和晶格常数确定半整数
点上有无纤维的概率
rsize=[10, 12, 50]*a0;%实际总尺寸, 长, 宽, 厚 (m)
ssize=round(rsize/a0);%点阵大小
xmax=ssize(1);
ymax=ssize(2);
zmax=ssize(3);
xproperty=zeros(xmax, ymax-1, zmax, 2);%x整数轴上半整数点的性

```

```

质;(:, :, :, 1)纤维直径;(:, :, :, 2)垂直风速
    yproperty=zeros(xmax-1, ymax, zmax, 2);%y整数轴上半整数点的性质;

    if option1==1,figure(1);hold off;plot3(1,1,1,'. ');hold
on;title('模型示意图');end
    for k=1:zmax
        for i=1:xmax%沿x轴方向构建
            if
option1==1,plot3(i*ones(1, ymax), 1:ymax, k*ones(1, ymax),'. ');end
                m=rand(ymax-1, 1);
                xproperty(i, :, k, 1)=(m<=pxian);%确定是否有纤维
                for j=1:ymax-1, if xproperty(i, j, k, 1)>0, if
option1==1,plot3([i, i], [j, j+1], [k, k], 'r');end;end;end
                    if ~isempty(find(xproperty(i, :, k, 1)>0, 1))%赋直径
                        m=find(xproperty(i, :, k, 1)>0);
                        di=d0+0.1*d0*(rand(1)-0.5);%随机赋一直径, 在平均值
上下波动
                        xproperty(i, m(1), k, 1)=di;
                        if size(m, 2)>1,
                            for j=2:size(m, 2)
                                if
m(j)-m(j-1)==1, xproperty(i, m(j), k, 1)=di;
                                    else
di=d0+0.1*d0*(rand(1, 1)-0.5);xproperty(i, m(j), k, 1)=di;%随机赋一直
径
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            for j=1:ymax%沿y方向构建
                if
option1==1,plot3(1:xmax, j*ones(1, xmax), k*ones(1, xmax),'. ');end
                    m=rand(xmax-1, 1);
                    yproperty(:, j, k, 1)=(m<=pxian);%确定是否有纤维
                    for i=1:xmax-1, if yproperty(i, j, k, 1)>0, if
option1==1,plot3([i, i+1], [j, j], [k, k], 'r');end;end;end
                        if ~isempty(find(yproperty(:, j, k, 1)>0, 1))%赋直
径
                            m=find(yproperty(:, j, k, 1)>0);
                            di=d0+0.1*d0*(rand(1, 1)-0.5);%随机赋一直径
                            yproperty(m(1), j, k, 1)=di;
                            if size(m, 1)>1,

```

```

        for i=2:size(m,1)
            if
m(i)-m(i-1)==1, yproperty(m(i), j, k, 1)=di;
                else
di=d0+0.1*d0*(rand(1,1)-0.5);yproperty(m(i), j, k, 1)=di;%随机赋一直径
            end
        end
    end
end
end
end
    if option1==1, view([0, 90]);end
hold off;

t3.m
%确定各个半整数点上的流速
%c=c0*exp(-(1:zmax)*5/zmax);%每一纤维层碰撞前的灰尘质量浓度
(kg/m3) 假定指数衰减

alpha1=zeros(1, zmax);
for k=1:zmax%每一层的面填充率

temp=sum(sum(xproperty(:, :, k, 1)))+sum(sum(yproperty(:, :, k, 1)));%面上纤维单元总直径
    alpha1(k)=temp/(xmax*ymax*a0);%第k层的面填充率
end

for k=1:zmax%风速赋值, 孔隙与非孔隙
    xproperty(:, :, :, 2)=v(k);
    [l1, l2]=find(xproperty(:, :, k, 1)==0);
    for
l=1:length(l1), xproperty(l1(l, 1), l2(l, 1), k, 2)=v(k)/(1-alpha1(k));end;
    nd;
        yproperty(:, :, :, 2)=v(k);
        [l1, l2]=find(yproperty(:, :, k, 1)==0);
        for
l=1:length(l1), yproperty(l1(l), l2(l), k, 2)=v(k)/(1-alpha1(k));end;
        end
    for k=2:zmax%孔后对应的半整数点风速大
        [l1, l2]=find(xproperty(:, :, k, 1)==0);
        for
l=1:length(l1), xproperty(l1(l, 1), l2(l, 1), k+1, 2)=xproperty(l1(l, 1),
l2(l, 1), k, 2);end;

```

```

        [l1, l2]=find(yproperty(:, :, k, 1)==0);
        for
l=1:length(l1), yproperty(l1(l), l2(l), k+1, 2)=yproperty(l1(l, 1), l2(l
, 1), k, 2);end;
        end

```

t2.m

```

        %确定各个半整数点上的流速
        %c=c0*exp(-(1:zmax)*5/zmax);%每一纤维层碰撞前的灰尘质量浓度
(kg/m3) 假定指数衰减

        alpha1=zeros(1, zmax);
        for k=1:zmax%每一层的面填充率

temp=sum(sum(xproperty(:, :, k, 1)))+sum(sum(yproperty(:, :, k, 1)));%面
上纤维单元总直径
        alpha1(k)=temp/(xmax*ymax*a0);%第k层的面填充率
        end

        for k=1:zmax%风速赋值, 孔隙与非孔隙
                xproperty(:, :, :, 2)=v(k);
                [l1, l2]=find(xproperty(:, :, k, 1)==0);
                for
l=1:length(l1), xproperty(l1(l, 1), l2(l, 1), k, 2)=v(k)/(1-alpha1(k));e
nd;
                yproperty(:, :, :, 2)=v(k);
                [l1, l2]=find(yproperty(:, :, k, 1)==0);
                for
l=1:length(l1), yproperty(l1(l), l2(l), k, 2)=v(k)/(1-alpha1(k));end;
                end
                for k=2:zmax%孔后对应的半整数点风速大
                        [l1, l2]=find(xproperty(:, :, k, 1)==0);
                        for
l=1:length(l1), xproperty(l1(l, 1), l2(l, 1), k+1, 2)=xproperty(l1(l, 1),
l2(l, 1), k, 2);end;
                        [l1, l2]=find(yproperty(:, :, k, 1)==0);
                        for
l=1:length(l1), yproperty(l1(l), l2(l), k+1, 2)=yproperty(l1(l, 1), l2(l
, 1), k, 2);end;
                        end

```

t3.m

```

%灰尘层堆积
% alpha2=1-exp(-((time-0.75*time0))/time0*2);%这个时刻的粉尘层的
填充率;
% deltap2=%粉尘层两端的差压 from 书P8 缺未知量

%dp/dt=constant*p
lambda=log( (8*mu*dhui(3)*(pi/4*v0)*pi/4/((sqrt(2)-1)*dhui(3))
^2+deltap)/deltap ) / time0;
deltapall=deltap*exp(lambda*(time));%time=0->deltap2=deltap ;t
ime=time0->deltap2=8*mu*dhui(3)*(pi/4*v0)*pi/4/(0.414*dhui(3))^2;P
40 1-40

```

for k=1:zmax%小,中颗粒对纤维单元的磨损 1. 气流带走附在纤维周围的颗粒 2. 气流驱赶纤维至一旁,出现通孔,布袋损坏3. 框架与布袋有相对位移,磨损

```

%预计磨损速率与v^2成正比,与deltap成正比
[l1, l2]=find(xproperty(:, :, k, 1)~=0);
for l=1:length(l1)

vabrasion=con1*(xproperty(l1(l), l2(l), k, 2)^2+con2*deltap);%磨损速
率 (m/3)

xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)-vabrasion*de
ltapall;
    if
xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)<0, xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=0;end
    end
    [l1, l2]=find(yproperty(:, :, k, 1)~=0);
    for l=1:length(l1)

vabrasion=con1*(yproperty(l1(l), l2(l), k, 2)^2+con2*deltap);%磨损速
率 (m/3)

```

```

yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)-vabrasion*de
ltapall;
    if
yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)<0, yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=0;end
    end
end

```

```

t5.m
%判断纤维层是否出现通孔
[l1, l2]=find(xproperty(:, :, 1, 1)==0);

```

```

for l=1:length(l1),
    if flag2==1, break; end
    for k=2:zmax
        if xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)~=0, break; end
        if k==zmax &&
xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)==0, flag2=1; time2=time; end
        end
    end

[ll, l2]=find(yproperty(:, :, 1, 1)==0);
for l=1:length(l1),
    if flag2==1, break; end
    for k=2:zmax
        if yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)~=0, break; end
        if k==zmax &&
yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)==0, flag2=1; time2=time; end
        end
    end
end

```

t6.m

%清灰

%清灰使滤袋产生反向的压差, 压差大会使布袋在振动时与框架剧烈磨损

%高压气体偏吹造成滤袋破裂——常见

property0=zeros(xmax, ymax); %粉尘初层全部消失

if vclean~=0, %反向气流改变了半整数点上的风速

v=linspace(vclean, vclean, zmax+1); %各纤维层的平均速率

txproperty=xproperty; typroperty=yproperty;

for k=1:zmax

txproperty(:, :, k, :)=xproperty(:, :, zmax-k+1, :);

typroperty(:, :, k, :)=yproperty(:, :, zmax-k+1, :);

end

xproperty=txproperty; yproperty=typroperty;

t2;

end

txproperty=xproperty; typroperty=yproperty;

for k=1:zmax

txproperty(:, :, k, :)=xproperty(:, :, zmax-k+1, :);

typroperty(:, :, k, :)=yproperty(:, :, zmax-k+1, :);

end

xproperty=txproperty; yproperty=typroperty;

```

for k=zmax:1
    [l1, l2]=find(xproperty(:, :, k, 1));
    for l=1:length(l1)
        if
vclean~=0, vabrasion=con1*(xproperty(l1(l), l2(l), k, 2)^2+con2*pclean
);%磨损速率 (m/3)
            else vabrasion=con1*con2*pclean;end

xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)-vabrasion*tclean;

        if
xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)<0, xproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=0;end
        end
        [l1, l2]=find(yproperty(:, :, k, 1));
        for l=1:length(l1)
            if
vclean~=0, vabrasion=con1*(yproperty(l1(l), l2(l), k, 2)^2+con2*pclean
);%磨损速率 (m/3)
                else vabrasion=con1*con2*pclean;end

yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)-vabrasion*tclean;

            if
yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)<0, yproperty(l1(l), l2(l), k, 1)=0;end
            end
        end
end

```