

垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行稳定性分析

摘要

以焚烧方法处理生活垃圾是我国社会可持续发展的重要途径，现行垃圾焚烧布袋式除尘系统的运行稳定性是现行垃圾焚烧产生危害的主要因素之一。而布袋差压、布袋直径、喷吹管喷嘴与布袋口的中心偏差距离、布袋的清洗频率与时间、烟气温度、烟道和本体漏气程度等是影响布袋式除尘系统稳定性的主要因素。因此，在此种实际情况下，需要建立相应的数学模型解决以下问题：

针对问题一，需要假设求解出各个影响因素与布袋式除尘系统稳定性的关系，并绘出相关图像，得出布袋式除尘系统稳定性的计算表达式，从而利用稳定性、设计除尘效率、国家排放标准与周边范围单位面积排放总量限额之间的关系，得出焚烧厂扩建规模的环境允许上限；并基于稳定性的影响分析结果与环境允许上限，向政府提出环境保护的综合监测建议方案。

针对问题二，由附件 2 可知，由于新型超净除尘工艺更高的稳定性，我们通过布袋式除尘工艺与新型除尘工艺稳定性对使用天数积分求得平均稳定性的提高量。

全文分析了各个影响因素对布袋式除尘系统稳定性的影响，建立了多个模型处理复杂的函数问题，由附件给定的信息、查找的资料与模型假设，实现了对提升技术与优化焚烧工况控制及运行维护规程的改进。

关键词：布袋式除尘系统稳定性 影响除尘系统稳定性各项因素 模型假设
环境允许上限 新型超净除尘

一 . 问题重述

我们采取模型假设的方法量化分析布袋除尘器运行稳定性问题,我们需要通过建立布袋式除尘系统稳定性的模型解决的问题有:

(1) 通过建立各个影响因素与稳定性之间的函数模型, 结合国家排放标准, 我们需要分析讨论焚烧厂扩建规模允许上限, 以及基于上述分析, 向政府提出环境保护综合监测建议方案;

(2) 我们通过建立及分析模型, 求得新式除尘系统与使用天数的关系, 对比布袋式除尘系统的稳定性, 求得稳定性的提高。

二 . 问题分析

问题一:

2.1.1 我们建立磨损程度和布袋差压的函数模型, 由附件 1 可知, 1#炉的布袋差压 1350Pa, 2#炉差压 1650Pa, 差压越大则布袋运行中承受的阻力越大, 会导致布袋损坏加剧;

2.1.2 我们建立磨损程度和喷吹压力的函数模型, 当一条布袋或一个室的布袋组清灰以后, 布袋表面仍有残留的粉尘层, 其压力损失只能降到 20%-80%。当清灰不彻底时, 附着层呈斑点状, 如果继续除尘, 则压力损失将会快速增加。

2.1.3 我们建立稳定性和布袋直径的函数模型, 已知布袋直径越大, 布袋间距离越小, 造成布袋与笼骨间的碰撞磨损, 增大了布袋的磨损程度;

2.1.4 我们建立磨损程度和布袋清洗频率的函数模型, 布袋清洗太过频繁会损坏由各种滤料纤维织造缝制的布袋, 造成布袋的磨损;

2.1.5 我们建立磨损程度和布袋清洗时间的函数模型, 布袋清洗时间过长会导致布袋泄漏、滤袋堵塞、滤袋寿命缩短、驱动寿命缩短;

2.1.6 我们建立稳定性和烟气温度的函数模型, 烟气温度过高容易造成布袋损伤, 大大减少布袋的使用寿命, 烟气温度过低, 容易造成烟气凝结, 吸附在布袋上, 易造成糊袋, 严重影响除尘效果。

2.1.7 我们讨论了稳定性与本体和烟道漏气程度的相关关系。

2.1.8 我们建立磨损程度和喷吹管喷嘴与布袋口的中心偏差距离的相关关系, 绘制了示意图。

2.1.9 我们讨论了运行稳定性对周边环境对烟尘排放总量的影响, 并得出相关表达式, 当稳定性取得最大值时, 取得扩建规模的环境允许上限。

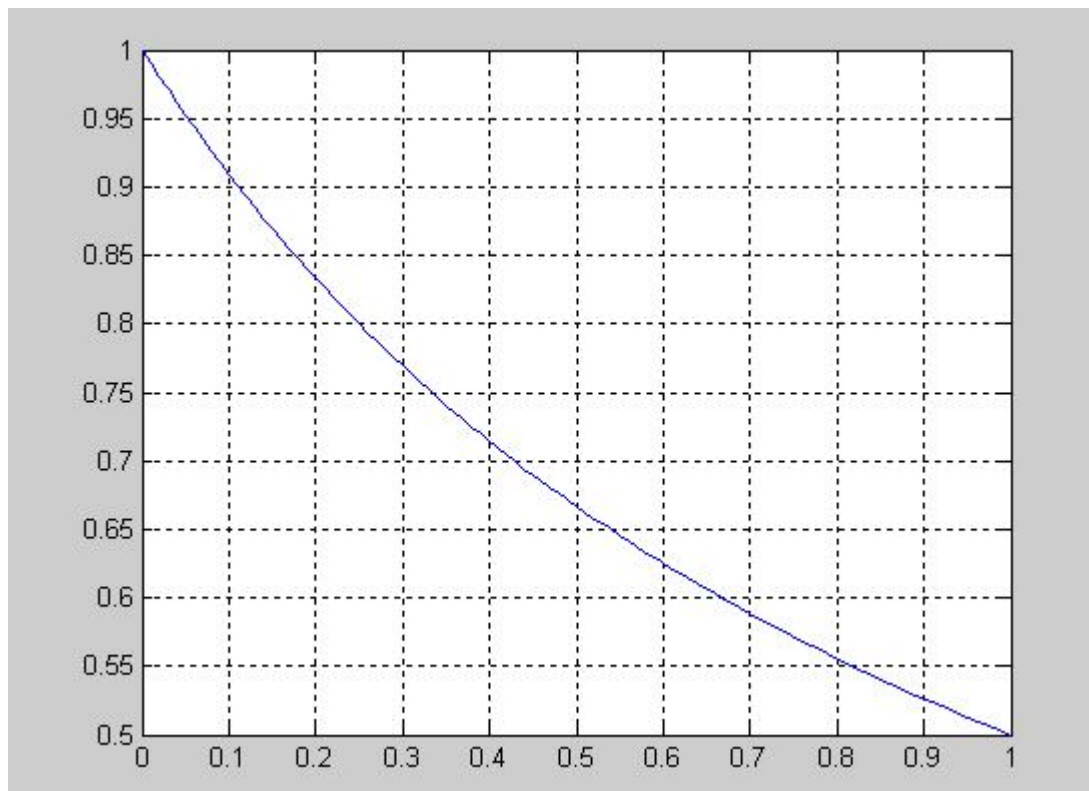
2.1.10 根据以上所建模型, 我们向政府提出了综合监测建议方案。

问题二: 由于新型超净除尘工艺完全克服老工艺除尘系统的缺点, 所以我们不考虑本体与管道漏气对新工艺的影响, 再求得新工艺稳定性与使用天数的关系, 将新老工艺的稳定性对使用天数积分后求得稳定性提升的平均值。

三．模型假设

3.1

假设布袋式除尘系统稳定性 w 与布袋磨损程度 M 为负相关
相关关系如下图



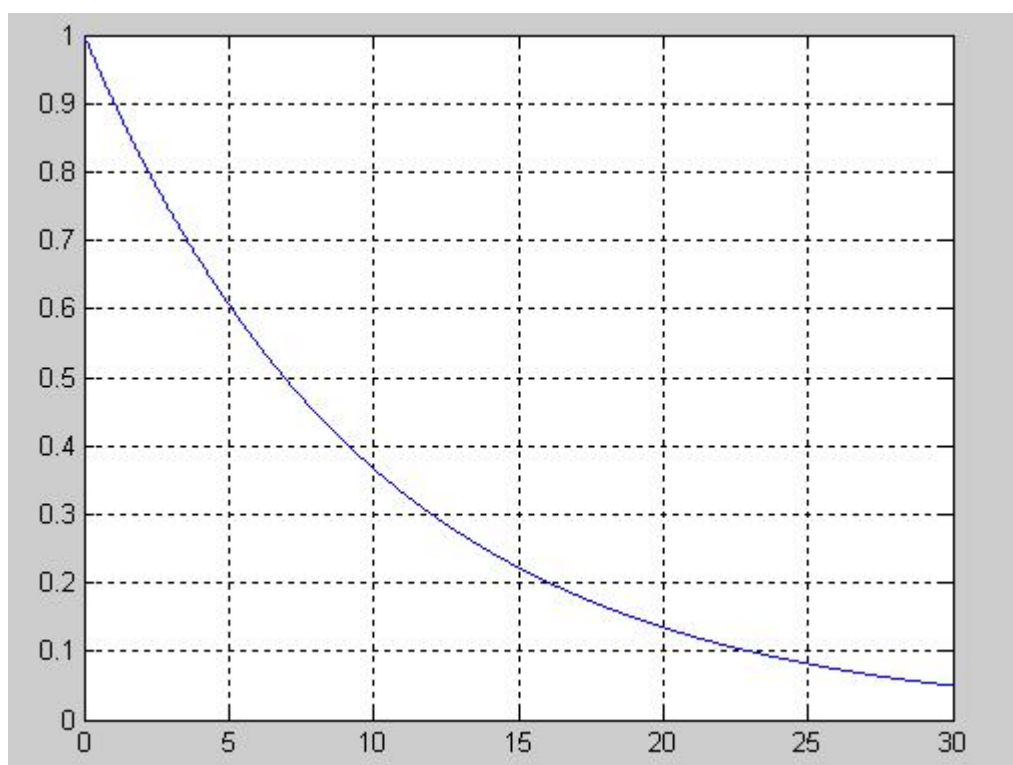
(图 1)

3.2

假设磨损程度 M 与使用天数 N 在研究范围内约为指数相关
基本符合表达式:

$$M=e^{-\tau N}$$

图像为:



(图 2)

3. 3

定义稳定性 W 表达式为:

$$W = \frac{\eta_1}{\eta_2} * 100\%$$

$\eta_1 = \frac{S_3}{S_1} * 100\%$, 为布袋式除尘系统的真实除尘效率;

S_3 为单位体积燃烧烟气中被除尘器所吸附的烟尘含量;

S_1 为单位体积进口烟气中烟尘含量;

$\eta_2 = 99.9\%$, 为布袋式除尘系统设计时的理想除尘效率。

3. 4

本模型所讨论的一切变量关系均在控制单一变量时实现。

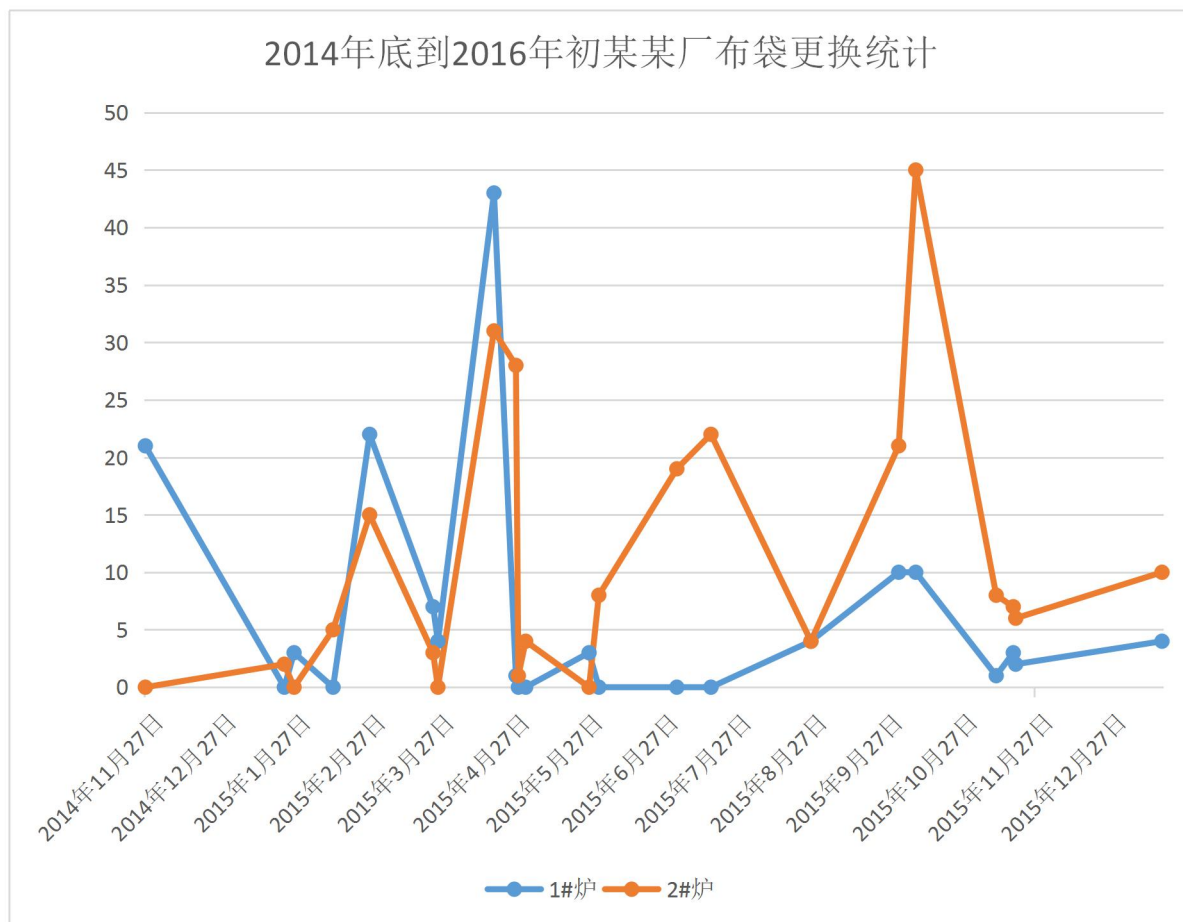
四 . 符号说明

P_0	布袋差压
d	布袋直径
f	布袋清洗频率
t	布袋清洗时间
T	烟气温度
P	喷吹压力
Q	本体和烟道漏气程度
x	喷吹管喷嘴与布袋口的中心偏差距离
M	磨损程度
W	稳定性
S	有效过滤面积
u	烟道泄气程度

五. 模型建立及求解

问题一：

5. 1



(图 3)

从图中可以看出，前期 1#炉和 2#炉的更换数量差别不大，而后期 2#炉更换数量远高于 1#炉，由附件 1 比较 1#炉和 2#的差别可知，布袋差压，布袋直径以及布袋气源压影响布袋的使用寿命。

分析完各个影响因素后，我们用 MATLAB 绘制了一些图像。

5. 1. 1 磨损程度与布袋差压的关系模型

根据附件 1 中表 1 和表 3，1#炉和 2#炉的对比，我们分析布袋差压可能与布袋磨损程度具有一定的相关性，并猜测布袋磨损程度与布袋差压呈正相关。

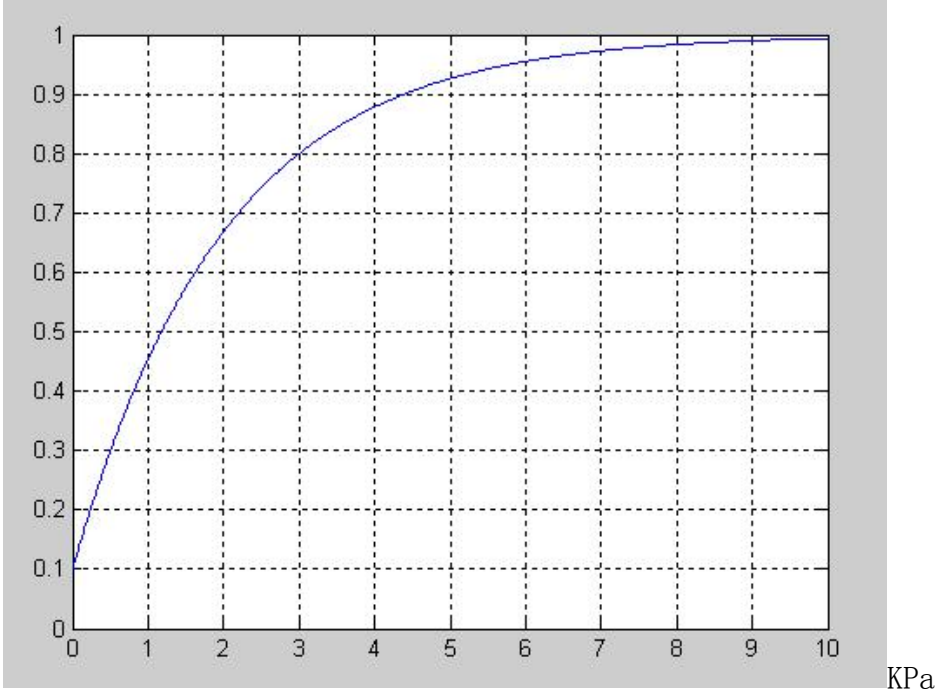
更换时间	更换数量及炉号		备注
	1#炉	2#炉	
2014 年 11 月 27 日	21	0	1#炉 6U 积灰，烧坏布袋 21 条
2015 年 1 月 23 日	0	2	
2015 年 1 月 27 日	3	0	
2015 年 2 月 12 日	0	5	
2015 年 2 月 27 日	22	15	1#炉 6D、6U 积灰，烧坏 19 条
2015 年 3 月 25 日	7	3	

2015 年 3 月 27 日	4	0	
2015 年 4 月 19 日	43	31	22 日烟气检测前检查，更换 1#炉 1U 玻纤布袋
2015 年 4 月 28 日	1	28	烟气检测不合格后更换

对附件 1 中表 4 的数据进行分析，

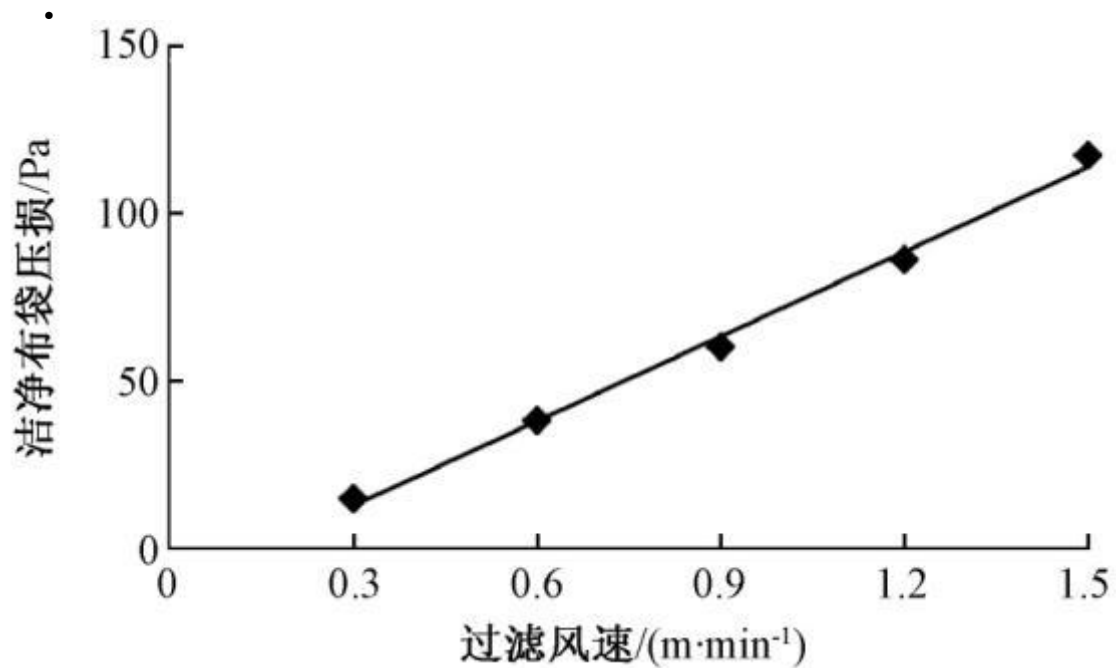
	1#炉更换布袋数更多	2#炉更换布袋数更多	1#炉与 2#炉更换布袋数相同
天数	7	14	1

除了 2014 年 11 月 27 日至 2015 年 4 月 28 日的 3 次有关 1#炉出现重大事故而导致的大量更换布袋，其他的大部分日常布袋磨损程度 1#炉都小于 2#炉。基于此，考虑到尘粒在绕过滤袋时因惯性力作用与纤维碰撞拦截，布袋压差越大，受力越大，碰撞越猛。且细微的尘粒受气体分子冲击做布朗运动，当布袋差压越大时，气体分子运动速度越快，布朗运动越剧烈，因而布袋与尘粒碰撞更剧烈，布袋磨损程度越大。进而，我们可做出布袋磨损程度与差压之间的关系。



(图 4)
(一般情况下，差压保持在 1.2KPa~3KPa 之间)

5.1.2 磨损程度与喷吹压力的关系模型



(图 5)

由图 5 可知:随着过滤风速的提高,空气通过洁净布袋的压力损失越来越大,基本呈线性关系,与洁净滤料的压力损失表达式(3)基本符合,式(3)为理想状态下洁净滤料压力损失与过滤风速的关系,在本试验过程中忽略其他因素的影响

$$P_0 = \zeta_0 \cdot \mu \cdot v \quad (3)$$

式中: P_0 为洁净滤料压损, Pa; ζ_0 为洁净滤料阻力系数, m^{-1} , 一般取值为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$; μ 为气体黏度, Pa·s; v 为过滤风速, m/s。

尽管喷吹压力在 0.1 ~ 0.3 MPa 增加喷吹压力时清灰效果变化明显,但是只有在喷吹时间足够长的情况下才能达到要求的清灰效果。喷吹时间为 50 ms 时,由于采用在线清灰,喷吹时间过短,喷吹阀膜片打开并不完全,喷入的压缩空气量不足,会使部分被吹落的粉尘在落入灰斗之前又重新吸附在布袋上,导致清灰效果不能满足要求。在喷吹时间为 150 ms 的条件下,增加喷吹压力到 0.6 MPa 时,除尘器出口会出现“冒灰”现象,这是清灰过度的表现。喷吹时间为 200 ms 时,喷吹压力达到 0.3 MPa 时布袋压力损失就已经很小,继续增加喷吹压力布袋压力损失反而增加,这是由于喷入压缩空气量过大使得已经沉积在灰斗的粉尘又被吹起形成“二次灰”吸附在布袋上,使压力损失增加。喷吹的压缩空气量过大,会使进入布袋除尘器的烟气受阻,速度变慢,使得烟气中携带的粉尘堆积于连接管道中,导致管道阻塞。

根据以上分析,控制喷吹压力在 0.3-0.4 MPa,喷吹时间在 100 ~ 150 ms,

满足清灰要求，可指导实际工程现场根据实际的压缩空气源对喷吹压力和喷吹时间进行选择。但是喷吹压力越大，越容易造成布袋的磨损。在本试验中，选择喷吹压力 0.3 MPa，喷吹时间 120 ms。

喷吹压力过大时会造成清灰过度，使除尘器出口产生“冒灰”的现象。

清灰过程中喷入过多的压缩空气会使沉积在除尘器灰斗里的粉尘重新扬起，并随烟气重新吸附在布袋上，影响清灰结果。^[1]

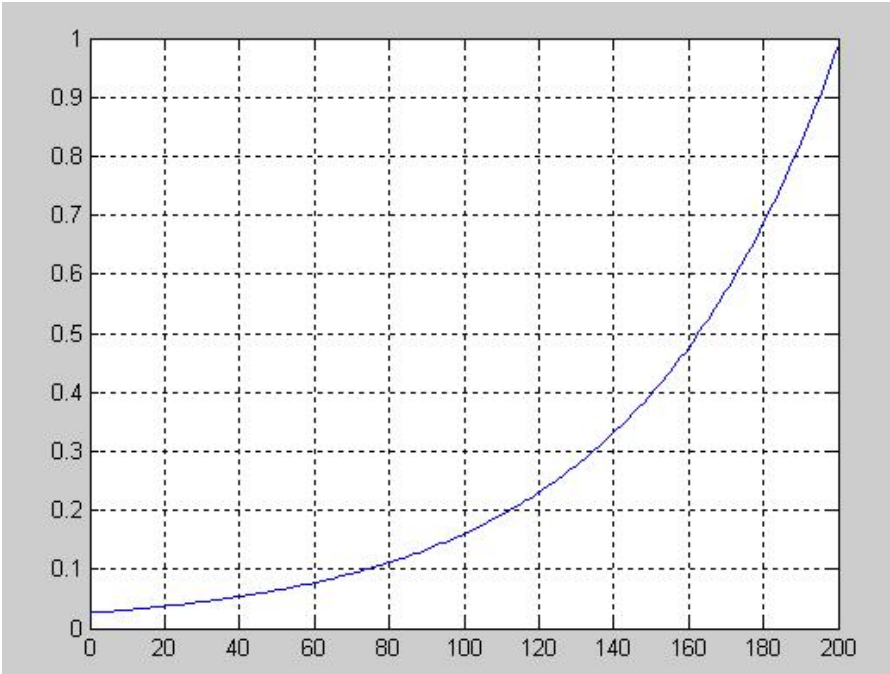
5.1.3 稳定性与布袋直径的关系模型

下面我们来讨论布袋直径对各个变量的影响。

(1) 磨损程度 (M) 与布袋直径 (d) 的关系

根据附件 1 中造成布袋磨损的主要原因，在原腔室截面积不变的情况下，当布袋直径增大时，布袋的体积会随之而增大，增大了有效过滤面积的同时，单位体积的灰斗中相邻布袋之间的距离便会减小，进而更容易造成布袋间碰撞磨损或是笼骨弯曲，笼骨与布袋底部间隙过小进而会造成布袋与笼骨间的碰撞磨损。

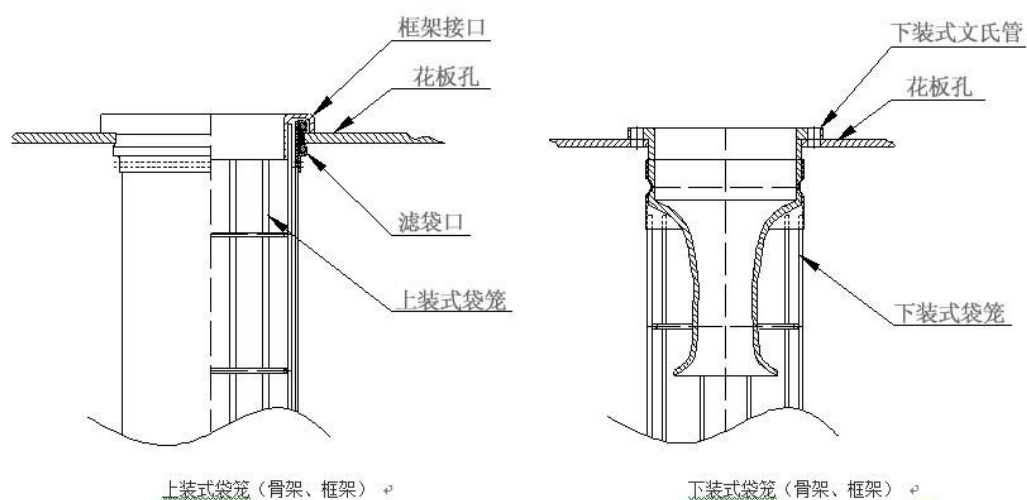
我们发现，当布袋的直径较小时，即使适当增大布袋直径，布袋之间的距离也是足够大的，进而磨损程度的变化较小。当布袋直径较大时，只需稍增大布袋的直径，相邻布袋及笼骨之间的碰撞面积便会显著增大，在温度，风力一定的情况下，布袋更容易磨破，磨损程度变化得较快。于是，我们得到磨损程度与布袋直径之间近似有以下关系：



(图 6)

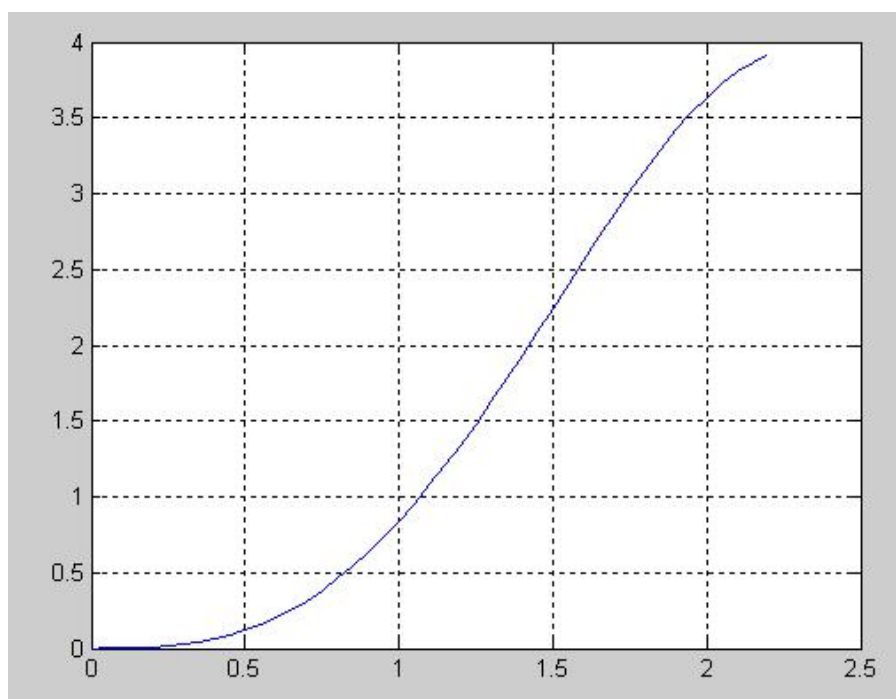
即在灰斗内布袋个数保持不变的情况下，磨损程度 (M) 与布袋直径 (d) 近似呈现以上关系。

(2) 有效过滤面积 (S) 与布袋直径 (d) 的关系



(图 7)

根据资料，布袋与微小尘粒相互接触，其有效过滤面积与布袋表面积在一定程度上呈正相关的关系，而布袋表面积与布袋直径呈二次函数的关系。但在布袋大到一定程度时，由于有笼骨的影响，有效接触面积不会一直无限增大下去，因此可做出以下关系。



(图 8)

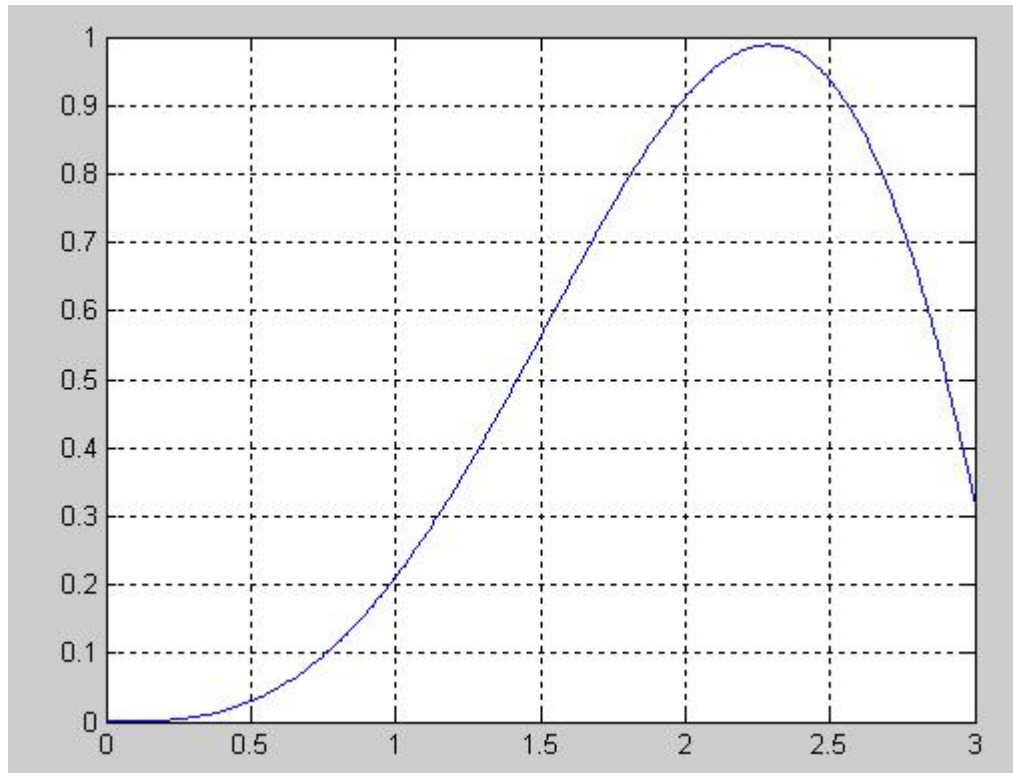
(3) 系统稳定性与布袋直径的关系

根据资料，系统稳定性与单位面积内的有效面积和磨损程度存在关系，且当单位面积内的有效面积增大，磨损程度减小时，稳定性增大。

即

$$W = S * (1 - M) / (4 * \pi * d^2)$$

做出图像得：

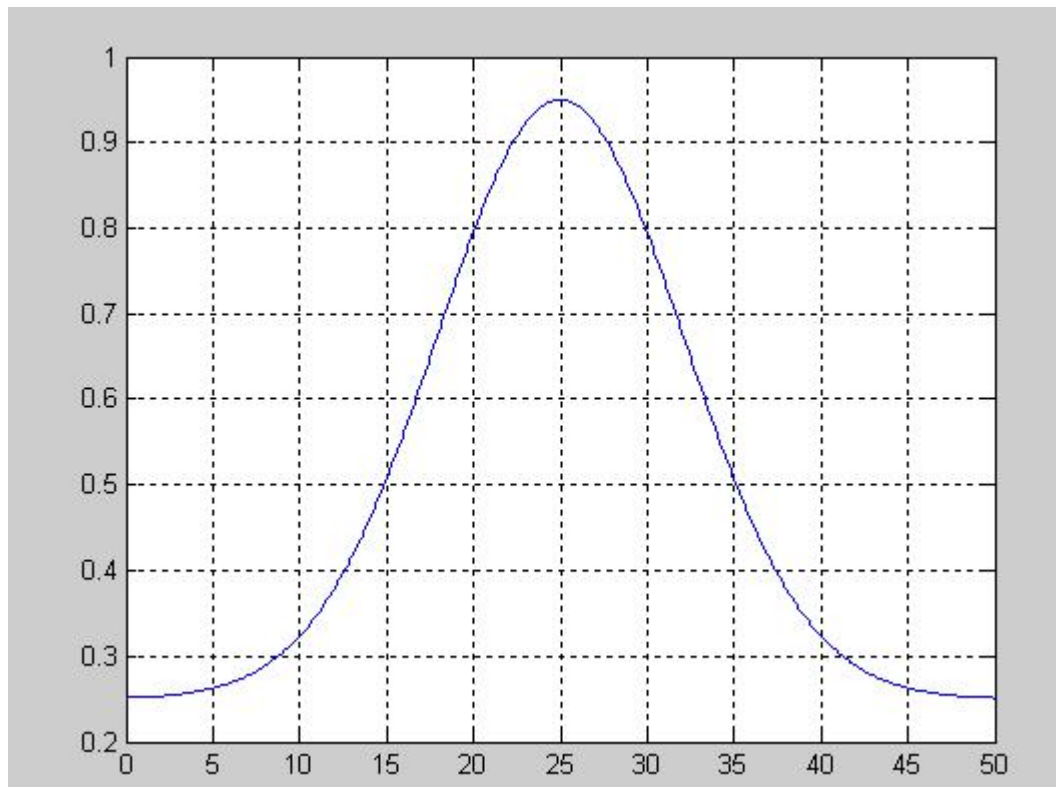


(图 9)

5.1.4 磨损程度与布袋清洗频率的关系模型

下面开始分析系统稳定性与布袋清洗频率的函数关系。

根据资料，随着时间的增加，布袋表面会沾有尘粒，若不定期清理，除尘效率会降低，系统稳定性也会降低，因此应定期清理，但若是清理太频繁，会加速布袋的磨损。因此，可简要做出系统稳定性与清洗频率的函数关系：

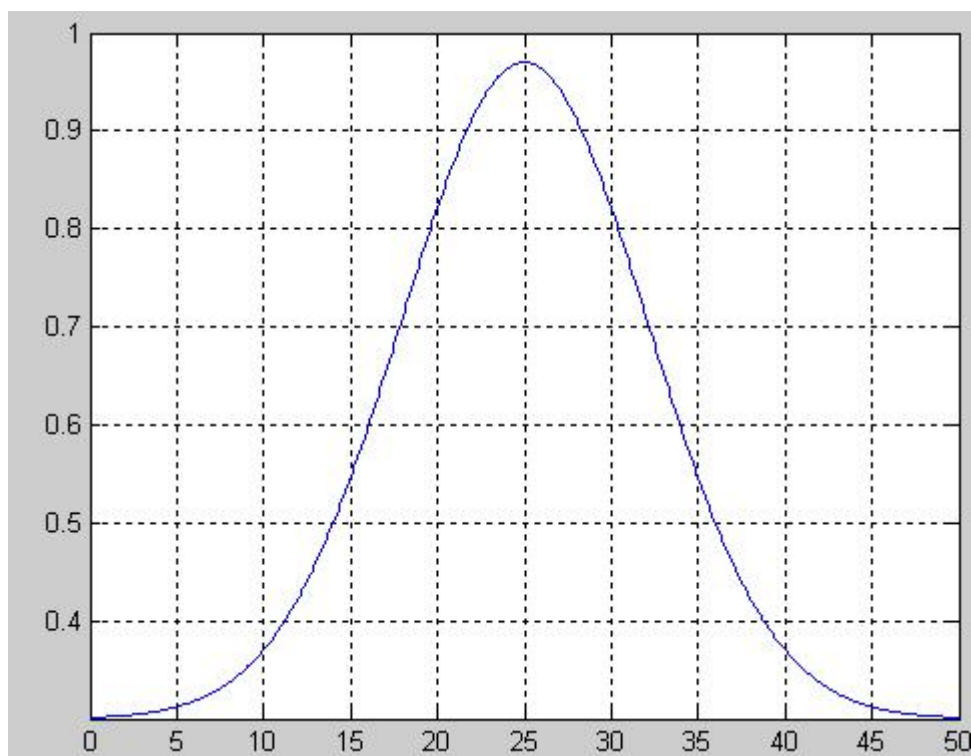


(图 10)

由图像可以看出，存在某一确切值 f_0 使得布袋在理想情况下在该频率下系统稳定性最高，但由于布袋的清洗与布袋的受损情况呈直接关系，而磨损程度受诸多方面（如温度过高，差压不同，与进口之间的距离等）的影响，即存在有限不可数个 $f_1, f_2, f_3 \cdots f_n$ 使布袋在该情况下清洗最佳。我们将 $f_1, f_2, f_3 \cdots f_n$ 定义为清洗或更换布袋的除尘效率临界清洗频率。为了方便以后单一变量对象的探讨，令此后布袋的清洗和替换都是在与之对应 f_i 的布袋除尘效率临界情况下进行的。

5.1.5 磨损程度与布袋清洗时间的关系模型

由图像可知磨损程度 M 和清洗时间 t 基本呈二次函数关系，清洗时间过长，会产生泄漏，使滤袋的寿命缩短，造成滤袋的堵塞，缩短驱动部分的寿命，使得布袋的磨损加剧；而如果清洗的时间过短，会导致一开始收尘作业，阻力立即增高，影响布袋除尘系统的运行。



(图 11)

5.1.6 稳定性与烟气温度的关系模型

滤料的温度老化曲线见图 12:

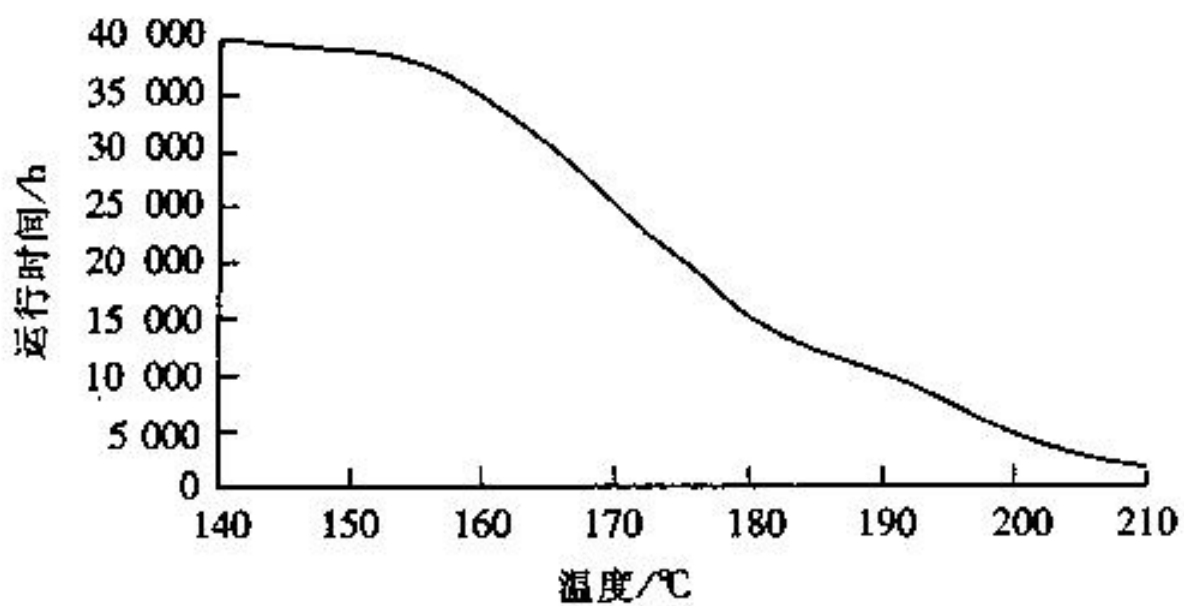


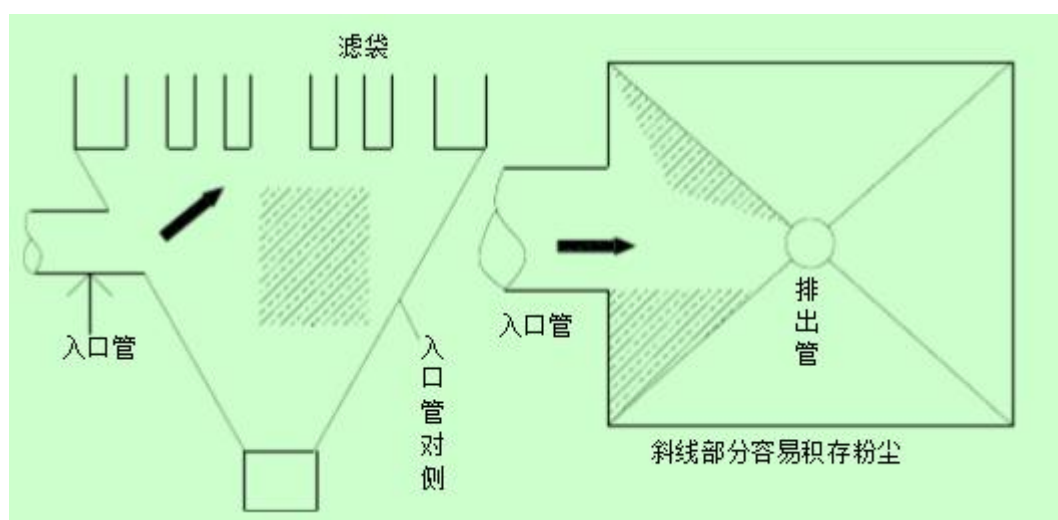
图 1 Ryton 滤料的温度老化曲线

(图 12)

从图 12 中可知，排烟温度在 140 附近运行时，Ryton 滤料的寿命可达 40000h，当烟气温度升高到 150 时，随着温度的升高其寿命的折损逐渐增加，达到 230 以上时，滤料的寿命折损为零，滤料将被烧毁，因此运行时应严格控制排烟温度。^[2]

5.1.7 稳定性与本体和烟道漏气程度的关系模型

本体与烟道漏气将会导致粉尘堆积、飞灰结块、吸入雨水积存、烟气结露等现象（图示为粉尘堆积）



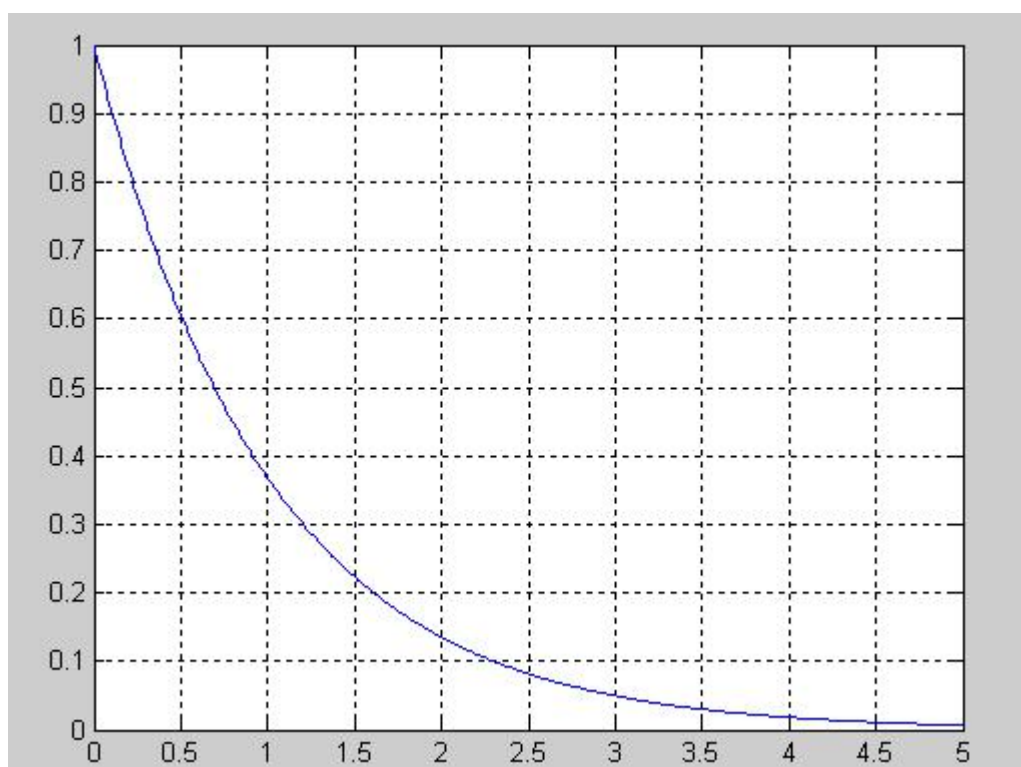
（图 13）

从而产生堵塞程度加强，pH 降低加速腐蚀，含氧量升高加速氧化等影响，导致布袋式除尘系统本体、烟道等部分加速毁坏，从而导致除尘系统的稳定性降低。

（1）稳定性与堵塞程度的关系

由于管口堵塞，将导致烟气疏导无法继续，从而使除尘效率下降，布袋式除尘系统的稳定性下降。

堵塞程度（ u ）与稳定性（ W ）基本符合下图关系：



(图 14)

(2) 稳定性与 pH 值的关系

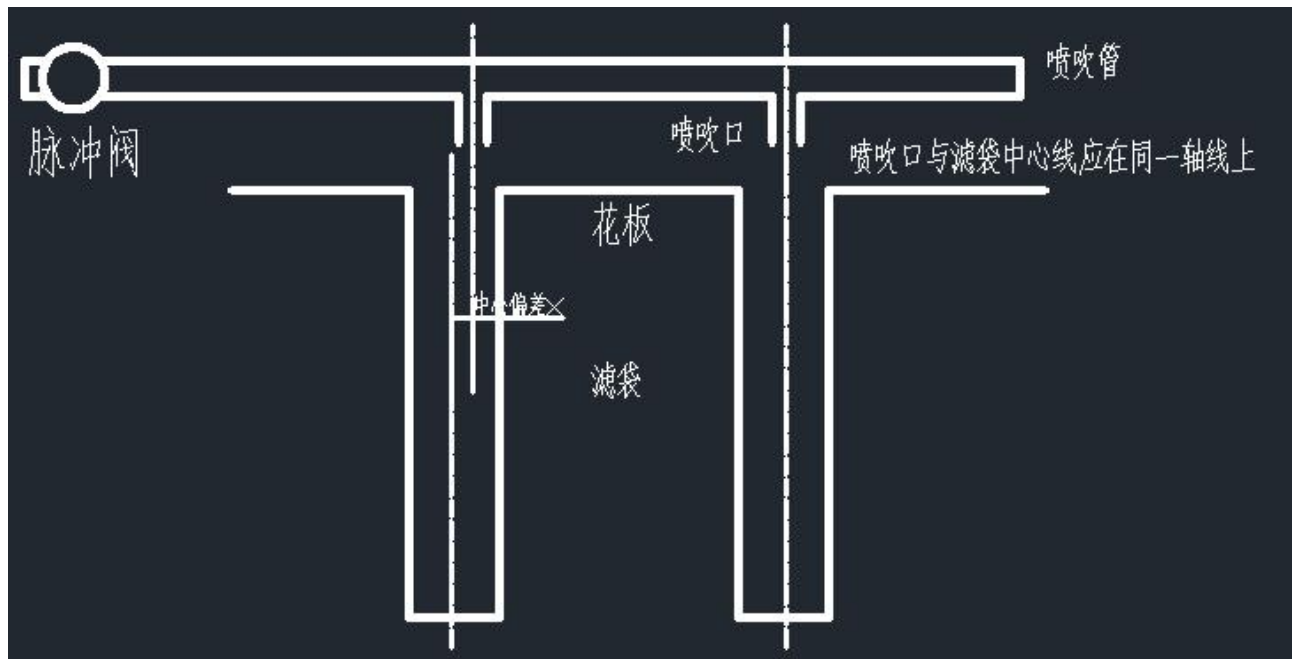
烟气结露、雨水积存等导致因素 pH 值降低时, 本体与烟道中积液的 H^+ 升高, 一方面 H^+ 与除尘器结构件直接反映, 加速了化学腐蚀, 另一方面, pH 值降低, 也会促进析氢腐蚀的发生, 加速电化学腐蚀; 从而加大本体与烟道的漏气程度, 产生恶性循环, 降低布袋式除尘系统的运行稳定性。

(3) 稳定性与含氧量的关系

本体与烟道漏气导致除尘系统中含氧量上升, 从而加速除尘器结构件的氧化, 在中性或弱酸性条件下, 加速吸氧腐蚀的进行, 加大本体与烟道的损坏程度, 降低布袋式除尘系统的运行稳定性。

5. 1. 8 磨损程度与喷吹管喷嘴与布袋口的中心偏差距离的关系模型

喷吹管喷嘴与布袋的中心偏差, 使喷吹管喷出气流直接冲刷布袋上段, 增大布袋的磨损程度。



(图 15)

5.1.9 焚烧厂扩建规模的环境容许上限

我们用 A 表示地区面积，用 θ 表示单位面积排放总量限额，用布袋除尘系统排除的气体体积表示焚烧厂扩建规模的环境允许上限，用 V 表示，我们可以建立数学模型

$$\frac{S_3}{S_1} * 100\% = \eta_2 * W$$

$$S_1 = S_2 + S_3$$

$$S_2 * V = \theta * A$$

由这三个式子推出

$$V = \theta * A / [S_1 * (1 - 99.9\%)]$$

S_3 为单位体积燃烧烟气中被除尘器所吸附的烟尘含量；

S_2 为单位体积排放烟气中烟尘含量；

S_1 为单位体积进口烟气中烟尘含量；

$\eta_2 = 99.9\%$ ，为布袋式除尘系统设计时的理想除尘效率；

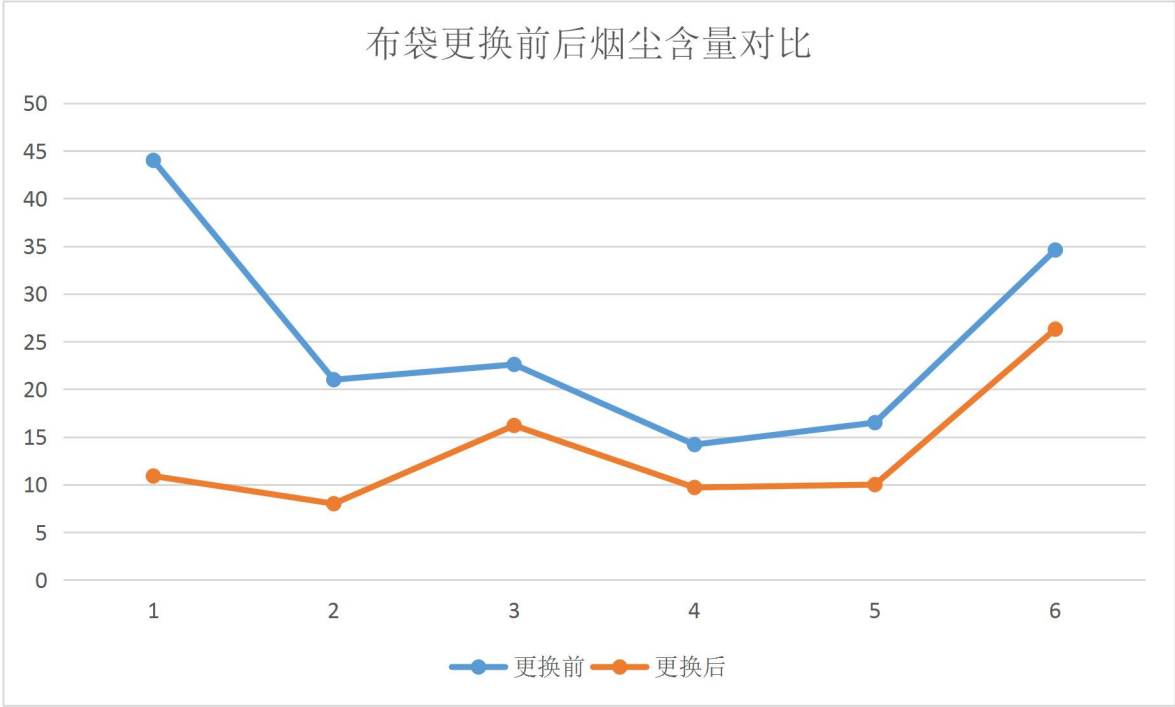
$\eta_1 = \frac{S_3}{S_1} * 100\%$ ，为布袋式除尘系统的真实除尘效率；

当稳定性 W 取得最大值，可获得最大排放体积 V 。

5.1.10 向政府提出的环境保护综合检测建议方案

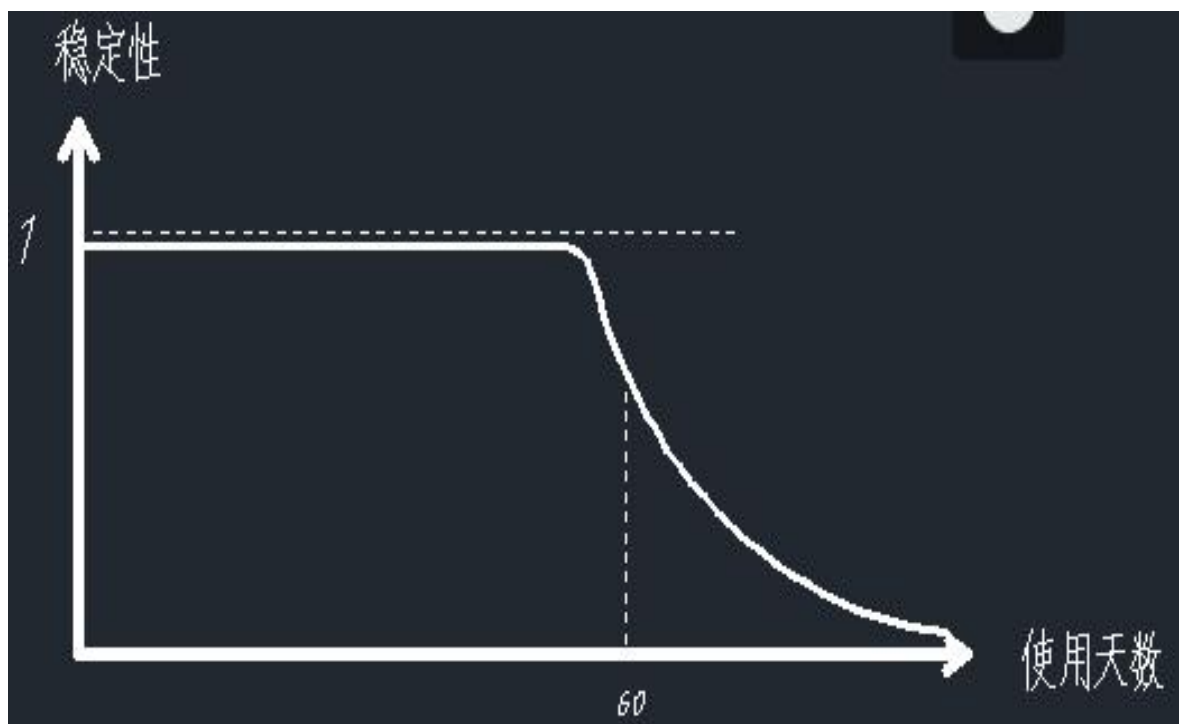
(1)从上述模型的建立和分析中，我们发现从布袋除尘系统排放的烟尘及二恶英等化学有毒物质的含量受诸多因素影响，由附件 1 表 4 可得其含量变化范围较大，从 $8\text{mg}/\text{m}^3$ 到 $44\text{mg}/\text{m}^3$ 不等，所以监测时政府既要设置平均值标准，又要设置瞬时最大值标准，以防瞬间排放量过大。

分析附件 1 表 4 中部分有效数据得出此图



(图 16)

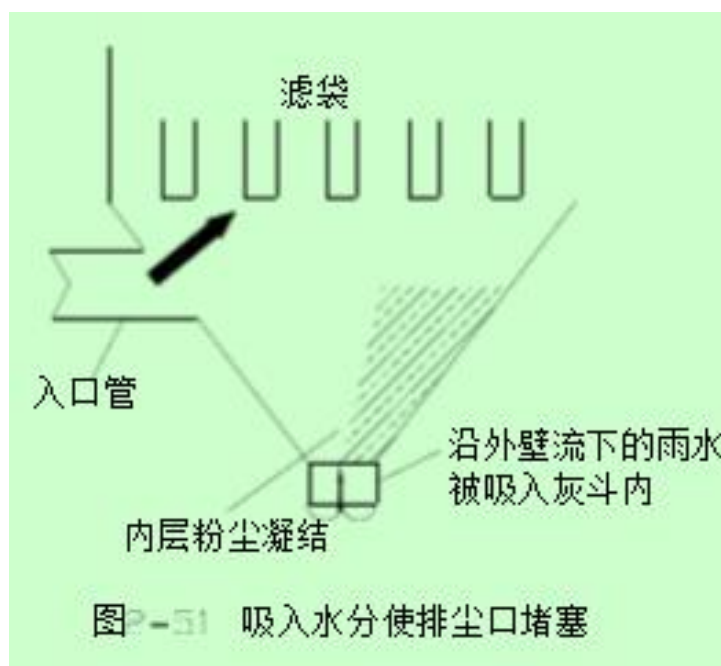
(2)分析附件 1 表 4 中有效数据得知，当布袋除尘系统未损坏或损坏程度较低时，较长时间内它的平均稳定性较高；布袋除尘系统损坏程度较高时，其稳定性能下降明显，关系基本符合下图：



(图 17)

由此得出在日常监测的基础上，应以 60 至 90 天为周期，进行重点监测。

(3)在上述数学模型中分析可得，由于积雪、积雨、气温下降等天气的影响，会导致飞灰结块、结板情况加重、pH 值降低，加速腐蚀除尘器结构件，导致布袋式除尘系统稳定性降低，排放超标可能性增大，所以在此类特殊天气下应重点监测。

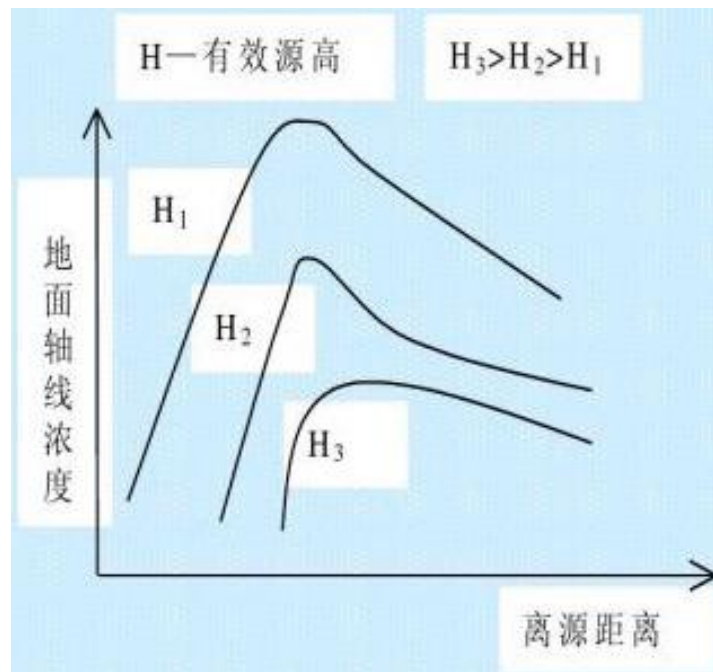


(图 18)

(4)政府在监测烟尘排放量是否达标的同时，也应去附近垃圾焚烧厂监测其布袋除尘系统的各项指标与焚烧工况及运行维护状况，若有可以改进的空间，则督促

他们以上述所建模型为参考及时优化工艺流程。

(5) 查找资料可知，距离污染源较远时，大气中烟尘与化学有毒物质的浓度随扩散面积的增大而减小（如下图所示），所以应根据离垃圾焚烧厂的距离设置不同的污染物排放标准，以防止在平均排放达标时垃圾焚烧厂附近污染物浓度仍较高，影响居民生活。



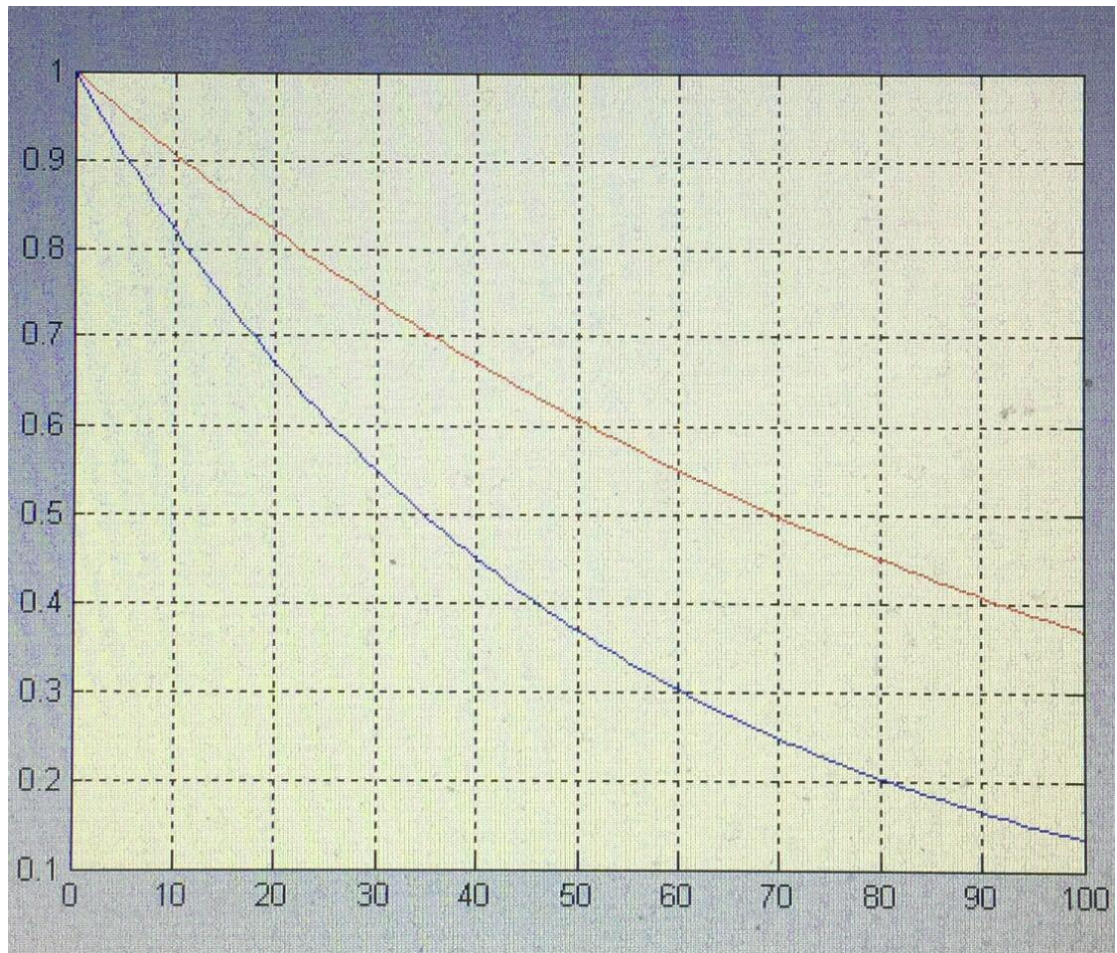
(图 19)

5.2 新工艺除尘系统稳定性提高

因为布袋磨损程度 M 与使用天数 N 呈正相关，传统工艺稳定性 $W1$ 与 M 成负相关，所以 $W1$ 与 N 为负相关；

因为滤料的过滤效果 G 与使用天数 N 成负相关，新型工艺稳定性 $W2$ 与 G 成正相关，所以 $W2$ 与 N 为负相关；

$W1$ 、 $W2$ 与 N 关系基本符合下图：



(图 20)

并且有公式

$$\Delta W = \frac{\int_{N1}^{N2} (W2 - W1) dN}{N2 - N1}$$

可以得出用新型超净除尘替代工艺，除尘模型的稳定性能提升的 ΔW 。

六．模型评价与推广

6.1 模型优点

有大量的图像及模型分析，能较为清除直观的看出影响布袋式除尘系统稳定性的因素与稳定性之间的关系。

模型建立综合考虑了各个因素，清晰易懂。

6.2 模型缺点

模型较为简单，仅在控制变量下分析各变量对稳定性的影响，未考虑各因素之间的相互影响。

6.3 模型推广

此模型属于假设模型图像分析类型模型，针对问题一的模型可用于综合优化垃圾焚烧布袋式除尘系统的工艺优化与改进，并可为政府环境保护系统对大气环境污染的综合监测提供参考依据。

参考资料及文献

[1]布袋除尘器处理高浓度粉尘的处理研究

冷廷双¹ 宋存¹ 廖洪² 梁宝瑞¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 首钢总公司能源环保产业事业部, 北京 100041)

[2]布袋除尘器的运行维护和寿命管理 张新民 7 内蒙古丰泰发电有限公司, 内蒙古 呼和浩特

[3]部分资料源自百度文库