



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行稳定性分析

垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行稳定性分析

摘要

本文主要研究垃圾焚烧厂布袋式除尘系统稳定性提升问题。探究了如何对布袋除尘器运行稳定性进行量化分析,建立布袋除尘器稳定性与周边环境烟尘排放量的关系以及垃圾焚烧厂扩建规模同周边环境烟尘排放量的关联。主要从以下四个方面进行分析,除尘效率逐渐下降的原因及对策,烟气超温和超压时除尘器可靠性分析,烟道和本体漏风对布袋性能的影响分析以及气动阀组、控制系统对除尘器的影响。

本文对上述的三个着手点分别进行了研究,并查阅了大量的相关资料,分别建立了相关的模型,并给出了建议的监测方案。。在模型的建立和对于所给问题求解的过程中我们发现,通过对一些已有现状的改动,布袋式除尘系统的稳定性就可以得到提升,例如将炉差压限制在一定的范围内,调整布袋间的间距,调整喷吹管喷嘴与布袋口的位置,调节布袋的清洗频率,对除尘器飞灰进行定期清理等。本文不仅对上述问题进行了分析,还相应地研究了其解决方案,即如何提高除尘器的设计质量、如何与国家标准相结合达到环保要求并且保证安全、可靠运行。

烟道和本体的漏风漏水以及气动阀组、控制系统对除尘器的影响也是提升袋式除尘系统稳定性的重要因素。时间周期控制,压差控制,手动控制共同构成了除尘控制系统。

垃圾焚烧一直都是人民重点关注的话题,社会公众对垃圾焚烧产生的危害报以了越来越深的质疑。而其中的二噁英更是成为了普遍关注的问题。二噁英类剧毒物质会对环境造成很大的危害,有效控制二噁英类物质的产生与扩散,直接关系到垃圾焚烧及垃圾发电技术的推广和应用。现行除尘工艺的不稳定性,使得这类问题一直都无法得到良好的解决。因此,对于布袋除尘器稳定性的量化分析,成为了深入揭示现行垃圾焚烧烟气处理缺陷并促进除尘技术进步的重中之重。对量化布袋除尘器稳定性与周边环境烟尘排放量的关系,周边环境烟尘排放量和扩建规模的关系进行分析,更有利于提高群众的生活质量,创造良好的社会效益。

关键词: 量化分析 湍流模型 控制系统 监测点布置

一、问题背景

如今，以焚烧方法处理生活垃圾已是我国社会维持可持续发展的必由之路。另外，在各地不得不建设大型焚烧厂集中处理垃圾的情况下，采用现行除尘工艺的大型焚烧厂即便其排放浓度不超标，却仍然存在排放总量限额超标的问题，也会给当地的环境带来重大的恶化影响。而垃圾焚烧除尘工艺不能持续稳定运行的缺陷，是致使社会公众对垃圾焚烧产生危害疑虑的主要原因。因此，优化除尘工艺的稳定性对焚烧工况控制及运行维护规程有所帮助。

量化分析就是将一些不具体，模糊的因素用具体的数据来表示，分析数据化，从而达到分析比较的目的。

这是一种兼具性思考的方法用以探讨动态系统中无法用单一的数据关系，而必须用整体、连续的数据关系才能加以解释及预测的行为。

我国垃圾焚烧状况数据统计表					
年份	焚烧厂数量（座）	焚烧厂平均规模（吨/日）	无害化处理能力（吨/日）	焚烧处理能力（吨/日）	焚烧能力所占比例
2001	36	181	224736	6520	2.90%
2002	45	226	215511	10171	4.70%
2003	47	319	219607	15000	6.80%
2004	54	313	238519	16907	7.10%
2005	67	493	256312	33010	12.90%
2006	69	579	258048	39966	15.50%
2008	74	697	315153	51606	16.40%
2010	104	817	387607	84940	21.90%
2011	109	863	409119	94114	23.00%
2012	138	889	446268	122649	27.50%

二、问题重述

本文主要讨论的是现行垃圾焚烧除尘工艺中袋式除尘系统的稳定性提升问题。如今的垃圾焚烧除尘工艺不能持续稳定操作的这一缺陷已经致使社会公众对垃圾焚烧产生的危害有了疑虑。布袋除尘器作为一种除尘率可达到 99.99% 的高效除尘设备，其运行的稳定性更是对衡量现有除尘工艺起到了决定性的影响。

在相关数据资料的基础上，建立合理的数学模型，从以下三个方面展开研究：

- (1) 建立合理的指标，对布袋除尘器运行稳定性进行量化分析。
- (2) 查找相关数据，建立布袋除尘器稳定性与周边环境烟尘排放量的关系，分析前者对后者的影响。
- (3) 分析已有的标准及现状，根据已有数学模型，确定稳定情况下扩建规模同周边环境烟尘排放量的关联。

三、问题分析

1. 问题 1 的分析

问题一旨在建立指标分析布袋除尘稳定性与周边环境烟尘排放量的关系。对于垃圾焚烧厂而言，其烟尘排放量主要受国家焚烧污染控制标准的约束，因此要满足垃圾焚烧厂的扩建需求，首先需要考虑如何在使废弃排放量等低于国家标准限定的情况下，对于焚烧厂进行扩建，增加其垃圾焚烧总量。布袋除尘稳定性的量化在这个过程中起到的作用是提升除尘效率，使得在国家标准和民众需求的约束之下，垃圾焚烧处理厂即使扩建了原有规模，仍能使自己的废弃排放量维持在一定范围内。现有除尘工艺不仅要考虑排放浓度是否超标，更要考虑排放总量限额是否超标，通过此类约束对布袋除尘稳定性进行量化，就能合理直接地解决问题 1。基于建立的模型以及分析结果，便能详细地对环境保护的检测方案提出建议。

2. 问题 2 的分析

问题 2 的展开应建立在已有的模型以及问题 1 的分析之上。“能够完全稳定运行”、“除尘工艺超过布袋除尘工艺”以及“超净”是题干中的重点。问题一的解决主要依靠于模型中不同的参数的设定，如地区面积、单位面积排放量、除尘效率、焚烧炉的台数及高度和焚烧厂的垃圾总量等等，而一旦加入了诸如“超净”等约束条件之后，原有模型中的除尘效率就可以从变量变为定量，和除尘效率相关的所有参数和指标的变化条件都会相应调整。通过对这种新型布袋除尘工艺的各个参数进行设计限定，带入并调整原有模型，就可以得出量化除尘稳定性提升的计算方法，从而解决问题。

四、模型建立与求解

1. 模型假设

假设 1：选取单条滤袋作为研究对象，将喷口区间、滤袋内外作为计算区域。喷吹气流沿滤袋长度方向的轴线是对称的，故可简化为二维问题。

假设 2：脉冲气流为高压气流，密度可变；是常温计算条件

假设 3：袋径大于 130 时，布袋净间距一般大于布袋的半径。按布袋直径 160，长 6000 考虑，可假设的模型为：出口与布袋同轴，直径 400、高度为 6300 的圆柱面。

假设 4：在喷嘴出口处，喷嘴直径远小于滤袋直径，故可假定喷吹气流

假设 5：袋式除尘过程中过滤气体不考虑重力，与壁面无滑移，流动处于湍流状态，在含尘气体进口均匀分布。

假设 6: 袋室简化模型只考虑含尘气体入口至净化气出口区域, 不考虑喷吹管、文丘里等内部构件。

假设 7: 袋室具有几何结构对称性, 只取二分之一作为流体计算区域。

假设 8: 袋式除尘过程中过滤气体中尘粒设为密度恒定的球形颗粒, 在随气体流动中无破损、变形等现象, 在含尘气体进口均匀分布且尘粒进口速度等于过滤气体。

假设 9: 含尘气体中的粉尘粒径较小, 平均粒径仅为 19 μm , 具有较好的流动性, 将这些粉尘和气体的混合物看做一种均匀介质。

假设 10: 气流速度远低于音速, 因此可不考虑气体的可压缩性。

假设 11: 袋式除尘器稳定运行过程中, 气体与壁面间温度差很小, 因此不考虑气体与壁面间的热传递, 各壁面为绝热边界。

假设 12: 由于袋式除尘器中滤袋数量庞大, 因此, 只能取袋式除尘器中有限数量的滤袋进行模拟。

假设 13: 实际中, 袋式除尘器随着处理烟气量的增加和清灰过程的循环, 滤袋表面堆积的粉尘量是不断变化的, 而在此仅做静态模拟, 也就是分别在一定的粉尘厚度的情况下, 对内部气流的分配作近似的模拟分析。

2. 对布袋除尘器运行稳定性进行量化分析

在研究布袋除尘器运行稳定性时, 有四个方面是不容忽视的。首先是除尘效率逐渐下降的原因及对策, 其次是烟气超温和超压时除尘器可靠性分析, 随后是烟道和本体漏风对布袋性能的影响分析, 最后是气动阀组、控制系统对除尘器的影响。

要纳入考虑范围内的因素有检测区域的环境, 地形是简单亦或是复杂所对应的高斯模型, 大气扩散系数, 袋式除尘器性能的技术参数, 烟气排放浓度的折算方法除尘器漏风率的指标等等。

常见监测点设置方法比较		
布点方法	优点	缺点
功能区布点	测点少，现场工作量小	区域代表性差
网格布点	区域代表性好	测点多，现场工作量大
圆形布点	局部代表性好	区域代表性差，工作量较大
扇形布点	代表性一般	多个污染源代表性差
模型测算布点	区域代表性好，现场工作量小	计算量大

监控因子的分类		
污染物类别	污染物	物理化学特性
常规污染物	HCL SO ₃ NO ₃	具有强烈刺激性气味 密度一般大于空气而小于颗粒物 易溶于水 污染物扩散范围较广 受气象条件影响较大
特殊污染物	颗粒物、汞、铅、二噁英	富集于烟尘中 密度较大 难溶于水 污染物扩散范围较小 受气象条件影响小

高温防腐气箱脉冲袋式除尘器性能的技术参数		
项目	改造前（卧式静电除尘器）	改造后（PPC128-8 抗结露气箱脉冲袋式除尘器）
处理风量	60000	60000
入口含尘浓度（标况）	≤ 100	≤ 1000
出口粉尘排放浓度（标况）	≤ 100	≤ 50
除尘效率	99.98	99.995
运行阻力	1000	1470-1770
工作温度	≤ 150	≤ 150
箱体外形尺寸	9950*4790*7500	9950*4790*2820

(1) 模型选择

布袋除尘器运行稳定性的量化分析可以采用 **RNG k- ϵ** 湍流模型，其采用重整化群技术推导得到，与 **standard k- ϵ** 湍流模型的形式很相似。首先包含 **RNG** 模型在 ϵ 方程中增加了改善速度梯度较大的流动精确性的附加项，其次也应考虑漩涡对湍流的影响，从而增加对漩涡流的模拟精度。同时也应适当地加入考虑滤袋模型。由于多孔跳跃介质（一维多孔介质）具有更好地稳定性和收敛性，更不容易在扰动下发散，在对袋式除尘器的研究中，多孔跳跃介质模拟滤袋是主要研究方式，其中，我们会用到滤袋压力降模型：

将气体通过含预滤层的滤袋产生的压力降称为基准压降 ΔP_{BF} ；将气体通过滤饼产生的压力降称为粉尘降压 ΔP_C ，总压降 ΔP 的表达式如下：

$$\Delta P = \Delta P_{BF} + \Delta P_C \quad [1]$$

a. 达西定律描述气体通过含预滤层的滤袋的过程：

$$\Delta P_{BF} = \frac{\mu}{\alpha} V L_{BF}$$

其中：

L_{BF} ——含预滤层的滤袋厚度，单位 m

α ——含预滤层的滤袋渗透率，单位 m^2

μ ——气体动力粘度，单位 Pa.s

V ——气体通过多孔介质的速度，单位 m/s

b. 用 Blake-Kozeny 方程来描述气体通过滤饼的过程:

$$\Delta P_c = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2} V L_c$$

其中:

D_p ——粉尘颗粒平均粒径, 单位 m

ε ——滤饼孔隙率

L_c ——滤饼厚度, 单位 m

(2) 模型展开

关键方程

a. 弹性力学基本方程

平衡方程

$$x \text{ 方向: } \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \bar{f}_x = 0$$

$$y \text{ 方向: } \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \bar{f}_y = 0$$

$$z \text{ 方向: } \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \bar{f}_z = 0$$

$$\text{矩阵形式: } A\vec{\sigma} + \vec{f} = 0$$

$$\text{其中的应力向量: } \vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]^T$$

$$\text{体积力向量: } \vec{f} = [\bar{f}_x, \bar{f}_y, \bar{f}_z]$$

$$\text{微分算子: } B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

几何方程

小变形假设下的应变向量和位移响亮的几何关系:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \gamma_{xz}$$

矩阵形式: $\vec{\varepsilon} = L\vec{u}$

位移向量: $\vec{u} = [u \quad v \quad w]^T$

应变向量: $\vec{\varepsilon} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]$

微分算子: $L = A^T$

物理方程

应力-应变关系, 即弹性关系。

矩阵表达式:

$$\vec{\sigma} = D\vec{\varepsilon} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \vec{\varepsilon}$$

力的边界条件

边界 S_σ 上单位面积的内力 T_x , T_y , T_z 应等于作用在边界上单位面积的面积力, 设边界外法线 \mathbf{N} 的方向余弦为 n_x , n_y , n_z , 边界上的内力可以转化为:

$$T_x = n_x \sigma_x + n_y \tau_{yx} + n_z \tau_{zx}$$

$$T_y = n_y \tau_{xy} + n_x \sigma_y + n_z \tau_{zy}$$

$$T_z = n_x \tau_{xz} + n_y \tau_{yz} + n_z \sigma_z$$

矩阵形式: $T = \bar{T}$

$$T = n \vec{\sigma}$$

$$n = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_y & 0 & n_z \\ 0 & n_y & 0 & n_x & n_z & 0 \\ 0 & 0 & n_z & 0 & n_y & n_x \end{bmatrix}$$

几何边界条件

在边界 S 上的位移为 u, v, w

$$u = \bar{u}$$

$$v = \bar{v}$$

$$w = \bar{w}$$

矩阵形式: $u = \bar{u}$

b. 流体力学基本方程

连续性方程

$$\text{连续性方程微分形式: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

$$\text{基于不可压缩假设的流体: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

N-S 方程

$$\text{X 方向: } \rho \frac{du}{dt} = \rho f_x + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]$$

$$\text{Y 方向: } \rho \frac{dv}{dt} = \rho f_y + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$\text{Z 方向: } \rho \frac{dw}{dt} = \rho f_z + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]$$

基于流体的密度和动力粘度均为常数的假设条件下的运动方程矢量形式:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad}(p) + \mu \nabla^2 \vec{v}$$

3. 布袋除尘器稳定性与周边环境烟尘排放量的关系

a. 数学模型

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{ui}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{uij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_{gi} + F_i$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

P 静压;

Fi 包含了其他模型的相关源项，如多孔介质和自定义源项；

τ 应力张量

湍动能 k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

耗散率 ε 方程：

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1t} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3t} G_b) - C_{2t} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

S_k 、 S_ε 用户自定义的源项

G_k 由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项；

G_b 由浮力引起的湍动能 k 的产生项；

Y_M 可压湍流中脉动扩张的贡献；

C_{1t} 、 C_{2t} 和 C_{3t} 为经验常数， $C_{1t} = 1.44$, $C_{2t} = 1.92$, $C_{3t} = 0.09$ ；

σ_k 和 σ_ε 分别是湍动能 k 和耗散率 ε 对应的普朗特数， $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

b. 控制微分方程

脉冲喷吹气流的流动过程采用的控制方程如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \bar{U}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$$

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}$$

能量方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U} T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_\tau$$

ρ 气体密度；

t 喷吹时间；

u, v 气流速；

入口气体流量方程:

$$q_m = 2000 \times t + 200; (t \leq 0.02)$$

$$q_m = 50 + 3125 \times (0.1 - t); (0.02 \leq t \leq 0.1)$$

非稳态的 Darcy 公式确定:

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{\partial P(t)}{\partial r}$$

v 为气体通过袋壁的径向速度, m/s ;

k 为滤袋渗透系数, m^2 ;

μ 为黏性系数, $pa \cdot s$;

$p(t)$ 为不同时刻的滤袋壁面压力值, pa ;

r 为径向距离, m ;

连续性微分方程形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

u 、 v 、 w 分别为流体在 x 、 y 和 z 方向上的瞬时速度分量, m/s

t 代表流体流经时间, s

ρ 代表流体的密度, kg/m^3

对于不可压缩流体, 其密度 $\rho = \text{const}$, 则式 (2.1) 可简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

动量守恒方程 (Navier-Stokes) 为运动方程, 牛顿第二运动定律运用于流体时的数学表达式, 其张量表达形式如下:

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho \bar{g}$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_{xy} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix}$$

$$\sigma = -PE + \tau$$

σ 流体微原体总应力张量

τ 粘性应力张量

P 静压力

Pa 推导得出: $\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\nabla P + \nabla \tau + \rho \bar{g}$

ρ 介质密度, kg/m^3 ;

u_i i 方向速度分量, m/s ;

s_{ij} i 方向质量发射源, kg/m^3

P 静压值, Pa;

τ_{ij} 应力张量, Pa;

s_j i 方向的动量源, Pa;

g_j i 方向的重力加速度, m/s^2 ;

μ 粘性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

δ_{ij} K 值;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_K + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_h + C_{3t} G_b) - C_{2t} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_t + S_t$$

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{v}{\sqrt{v^3 - 1 + C_w}} dv$$

G 湍动能

C 表示常量

S_h 用户自定义

S_t 用户自定义

c. Navier-stokes 方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = s_{ij}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + s_i$$

为了得到布袋除尘器稳定性与周边环境烟尘排放量的关系,我们对相关国家标准 GB 18484 危险废物焚烧污染控制标准进行了研究分析

焚烧炉的技术性能指标					
废物类型 \ 指标	焚烧炉温度 (°C)	烟气停留时间 (S)	燃烧效率 (%)	焚毁去除率 (%)	焚烧残渣的热 灼减率 (%)
危险废物	≥1100	≥2.0	≥99.9	≥99.9	<5
多氯联苯	≥1200	≥2.0	≥99.9	≥99.9999	<5
医院临床废物	≥850	≥1.0	≥99.99	≥99.9	<5

序号	污染物	不同焚烧容量时的最高允许排放浓度限值 (mg/m ³)		
		≤300 (kg/h)	300-2500 (kg/h)	≥2500 (kg/h)
1	烟气黑度	林格曼 I 级		
2	烟尘	100	80	65
3	一氧化碳 (CO)	100	80	80
4	二氧化硫 (SO ₂)	400	300	200
5	氟化氢 (HF)	9	7	5
6	氯化氢 (HCl)	100	70	60
7	氮氧化物 (以 NO ₂ 计)	500		
8	汞及其化合物 (以 Hg 计)	0.1		
9	镉及其化合物 (以 Cd 计)	0.1		
10	砷、镍及其化合物 (以 As+Ni 计)	1		
11	铅及其化合物 (以 Pb 计)	1		
12	铬、锡、锑、铜、锰及其化合物 (以 Cr+Sn+Sb+Cu+Mn 计)	4		
13	二噁英	0.5 TEQ ng/m ³		

焚烧设施排放气体的分析方法			
序号	污染物	分析方法	方法来源
1	烟气黑度	林格曼烟度法	GB/T5468-91
2	烟尘	重量法	GB/T16157-1996
3	一氧化碳 (CO)	非分散红外吸收法	HJ/T44-1999
4	二氧化碳 (SO ₂)	甲醛吸收副玫瑰苯胺分光光度法	1)
5	氟化氢 (HF)	滤膜·氟离子选择电极法	1)
6	氯化氢 (HCl)	硫氰酸汞分光光度法硝酸银容量法	HJ/T27-1999 1)
7	氮氧化物	盐酸萘乙二胺分光光度法	HJ/T43-1999
8	汞	冷原子吸收分光光度法	1)
9	锡	原子吸收分光光度法	1)
10	铅	火焰原子吸收分光光度法	1)
11	砷	二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法	
12	铬	二苯碳酰二肼分光光度法	1)
13	锡	原子吸收分光光度法	1)
14	铈	5-Br-PADAP分光光度法	1)
15	铜	原子吸收分光光度法	1)
16	锰	原子吸收分光光度法	1)
17	镍	原子吸收分光光度法	1)
18	二噁英类	色谱-质谱连用法	2)

4. 焚烧厂扩建规模同周边环境烟尘排放量的关系

为了研究焚烧厂扩建规模同周边环境烟尘排放量的关系,我们小组对长春市生活垃圾综合电站的数据进行了分析。建厂至今,该厂已经实施了两期工程,一期工程生产规模为 2*260t/d 循环流化床垃圾焚烧炉 1*6MW 发电机组,二期工程生产规模为 1*500t/d 循环流化床垃圾焚烧炉+1*6MW 发电机组,全场生活垃圾日处理能力为 1020 吨。企业现在的一期工程的 1#、2#及 1#6MW 机组垃圾焚烧炉现已停用,企业现在实际运行的是二期工程的 3#焚烧炉及 2#6MW 机组,垃圾处理量是 500t/d。

对两期工程后的垃圾处理量、系统组成以及锅炉烟气排放状况,我们小组进行了分析对比。

一期工程设计垃圾处理量 (2×260t/d 焚烧炉)

小时焚烧量 (t/h)	日焚烧量 (t/d)	年焚烧量 (10 ⁴ t/a)	年/日运行小时数 (h)
18.67	480	15.3	8000/24

一期工程系统组成

设备名称	设备类型规格型号	
焚烧炉	种类	循环流化床锅炉(1#、2#)
	焚烧量(t/d)*台数	240*2
余热锅炉	种类	蒸汽锅炉
	额定出力(t/h)*台数	14*2
汽轮机	种类	凝汽式汽轮机(1#)
	出力(MW)*台数	6*1
发电机	出力(MW)*台数	6*1

一期工程锅炉烟气排放状况

种类	烟尘	SO ₂	NO _x	HCL	二噁英
浓度(mg/m ³)	77.75	239.1	244.85	73.0	7ngTEQ/Nm ³
排量(t/a)	57.9	135.3	138.6	41.3	0.0000068
处理措施	布袋除尘	石灰脱硫	低碳燃烧活性剂与烟气接触去除活性炭吸附		
排放去向	120m 高 2.5m 内径烟囱排		0.0000068m ³ /h 经污水处理厂处理后排放		

二期工程垃圾处理量(1×500t/d 焚烧炉)

小时焚烧量(t/h)	日焚烧量(t/d)	年焚烧量(10 ⁴ t/a)	年/日运行小时数(h)
20.83	500	16.67	8000/24

二期工程系统组成

设备名称	设备类型规格型号	
焚烧炉	种类	循环流化床锅炉(3#)
	焚烧量(t/d)*台数	500*1
余热锅炉	种类	蒸汽锅炉
	额定出力(t/h)*台数	35*1
汽轮机	种类	凝汽式汽轮机(2#)
	出力(MW)*台数	6*1
发电机	出力(MW)*台数	6*1

由两次工程可以看出,随着焚烧厂焚烧炉,余热锅炉数量的增加,垃圾焚烧厂的规模增加了。改扩建工程主要通过控制焚烧工况减少烟气污染物生成,其采用半干法中和+活性炭吸附+袋式除尘器的处理工艺,并且配备了烟气净化处理自动控制系统以及烟气在线监测仪,可以保证烟气净化处理系统稳定、连续地运行,有效地去除烟气等污染物。恶臭气体经负压抽风收集后焚烧处理,处理效率接近于 100%;事故时采用碱液吸收处理,处理效率达 90%以上。

五、模型求解

1.问题 1 的求解

对袋式除尘器的稳定性进行优化

(1) 从脉冲清灰的效果分析

由于脉冲清灰是袋式除尘器的过滤再生循环过程,相关的流场分布特性直接影响清灰性能,于是根据先前建立的模型,建立质量通量方程及非稳态流场模型,且实际应用表明,基于流场数值模拟探讨影响清灰效果及其规律,可为袋式除尘器喷吹清灰的优化设计提供指导性参考。

入口气体流量方程: $q=2000t+200;(t \leq 0.02)$

$$q=50+3125*(0.1-t);(0.02 \leq t \leq 0.1)[2]$$

t ——喷吹时间

q ——气流质量流量

出口采用压力出口边界条件,其出口静压为 0,固体壁面采用标准壁面函数;布袋采用多孔跳跃介质边界条件。

布袋作为渗透壁,内部沿半径方向的流动方程由非稳态的 Darcy 公式确定:

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{\partial P(t)}{\partial r}$$

为了便于比较不同喷嘴结构及尺寸的模拟图,我们将参数设定如下:袋子长度 6mm,直径为 160mm,喷吹管距袋口的高度为 200mm,喷吹压力为 3atm,喷嘴结构选取锥形喷嘴和文丘里喷嘴。

根据计算可得

开孔直径 10mm 的锥形喷嘴,最高速度达 711m/s,形成气流细而急,袋口速度约为 320m/s,袋底布袋内外压差为 1.05×10^5 Pa,袋底压力峰值为 2.25×10^5 Pa

开孔直径 20mm 的锥形喷嘴,最高速度达 707m/s,形成气流粗而短,袋口速度约为 200m/s,袋底布袋内外压差为 1.05×10^5 Pa,袋底压力峰值为 $2.25 \times$

10^5 Pa

开孔直径 30mm 的锥形喷嘴，最高速度达 712m/s，形成气流较粗，袋口速度约为 214m/s，袋底布袋内外压差为 $1.15 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，袋底压力峰值为 $2.35 \times 10^5 \text{ Pa}$

对 2atm、3atm、4atm、5atm、6atm 和 7atm 的喷吹压力进行模拟，发现随着压力的升高，袋底的压力峰值并未得到很大的提高，反而随着喷吹压力的升高，其压缩气体的消耗量增大，采用较低压，更有益于清灰。

在实际过程中，气流从喷嘴射入布袋，使袋底的压力急剧上升。袋口的压力会呈先下降后上升的趋势，这是因为袋底气流向上回流，便于袋口处的清灰。

因此得出结论：

锥形喷嘴开孔直径越大，布袋底部内外静压差越大，引流量逐渐减小。

喷吹高度的大小将影响射流的好坏和二次引流量的大小。

清灰时袋口的压力先下降后上升，而袋底内外静压差则先急剧上升后下降。

喷吹压力越高对清灰效果不是越好，随着其增大，喷吹系统的阻力损失越多。

(2) 从除尘器漏风角度分析[3]

除尘器性能的好坏直接影响烟气净化效果，评价除尘器性能好坏的一项重要指标是除尘器的本体。

$$\text{根据质量守恒有: } \frac{PV}{T} = \frac{P_1 V}{T_1} + \frac{P_1 \Delta V}{T_1}$$

$$\text{忽略温度影响: } \Delta V = \frac{(P - P_1) * V}{P_1}$$

$$\text{标况下的泄漏量: } \Delta V_0 = \Delta V * \frac{273}{273 + T_c} * \frac{B a + \Delta P c}{101325}$$

P 初始状态除尘器内绝对压力，P a；

P₁ 终了状态除尘器内绝对压力，P a；

V 除尘器体积，m³；

ΔV 泄漏量，m³；

ΔV_0 标况下的泄漏量，m³；

T_c 测试温度，摄氏度；

B a 当地大气压；

$\Delta P c$ 测试规定的相对静压，P a；

$$Q_{lo} = Q_s * \frac{273}{273 + T_s} * \frac{B a + \Delta P}{101325} * \alpha$$

Q_{10} 标态下漏风率为 α 时的漏风量, m^3/s ;

Q_s 除尘器实际正常运行风量, m^3/s ;

T_s 除尘器实际正常运行温度, 摄氏度;

ΔP 除尘器实际正常运行时的相对静压, Pa;

α 除尘器漏风率指标, %

实际漏风率的计算:

设除尘器内压力从 P 衰减至 P_1 所用的时间为 t_d , 测试温度为 T_c , 则标况下的泄漏率为:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta V_0}{t_d * Q_{s0}} * 100$$

$$Q_{s0} = Q_s * \frac{273}{273 + T_s} * \frac{B_a + \Delta P}{101325}$$

Q_{s0} : 标况下单台除尘器的正常烟气量, m^3/s .

(3) 环境保护综合监测建议方案

a. 布点方法

选择功能区布点, 网格布点, 圆形布点, 扇形布点和模拟测算布点。

b. 简单地形^[4]

对常规污染物的扩散引入微风扩散模型, 对于需要考虑重力沉降作用的特殊污染物扩散引入烟尘扩散模式, 即

$$\rho_1(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-y^2/2\sigma_y^2} \left[e^{-(z-H)^2/2\sigma_z^2} + e^{-(z+H)^2/2\sigma_z^2} \right] \quad (1)$$

$$\rho_2(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-(y^2/2\sigma_y^2)} \left[e^{-(z-H+v_t x/u)^2/2\sigma_z^2} + \alpha e^{-(z+H-v_t x/u)^2/2\sigma_z^2} \right] \quad (2)$$

$$v_t = \frac{d_p^2 \rho_p g}{18\mu} \quad (3)$$

c. 复杂地形

山地、丘陵、高原地区，垃圾焚烧厂周边地形往往属于复杂地形，复杂地形的污染物在某些方向扩散时会受到山地等地形的阻碍作用。为此，考虑地形对污染物扩散的影响，引入地形随动坐标 z 与地形修正系数 T ，得到复杂地形下适用于常规污染物的高架连续点源微风扩散模型和特殊污染物的高架连续点源烟尘扩散模式，即

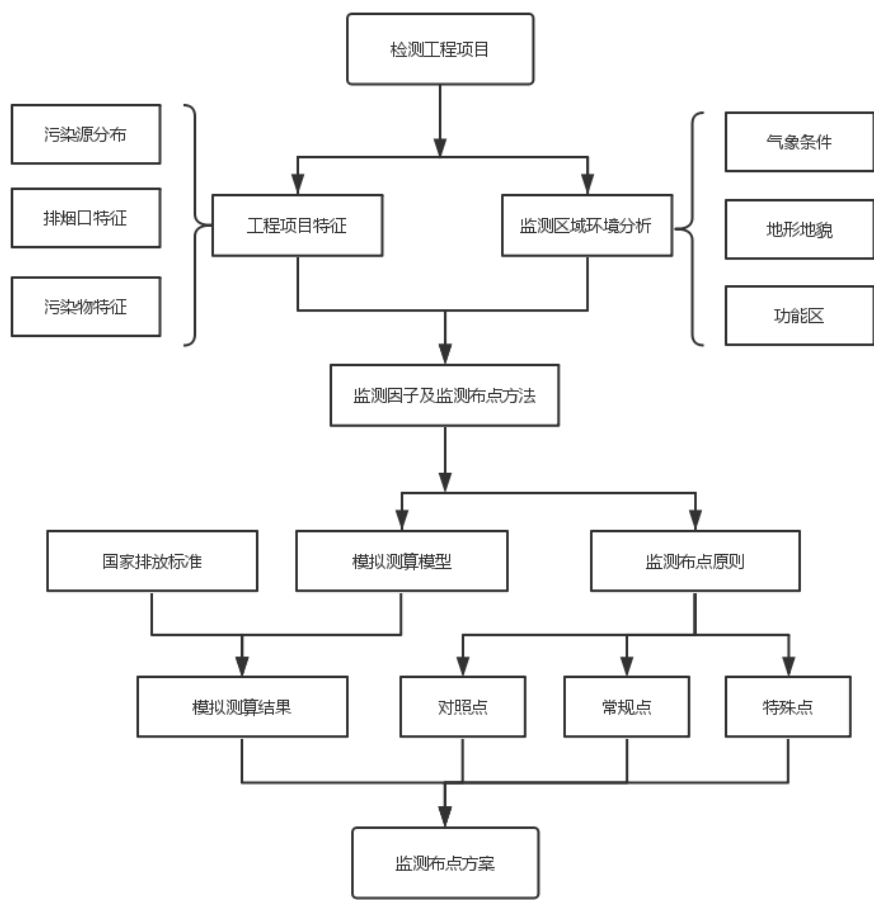
$$\bar{z} = H_e \frac{z - z_g}{H_e - z_g} \quad (4)$$

$$\rho_1(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-y^2/2\sigma_y^2} \left[e^{-(z-T_1 H)^2/2\sigma_z^2} + e^{-(\bar{z}+T_1 H)^2/2\sigma_z^2} \right] \quad (5)$$

$$\rho_2(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-y^2/2\sigma_y^2} \left[e^{-(z-T_1 H+v_1 x/u)^2/2\sigma_z^2} + \alpha e^{-(\bar{z}+T_1 H-v_1 x/u)^2/2\sigma_z^2} \right] \quad (6)$$

$$v_1 = \frac{d_p^2 \rho_v g}{18\mu} \quad (7)$$

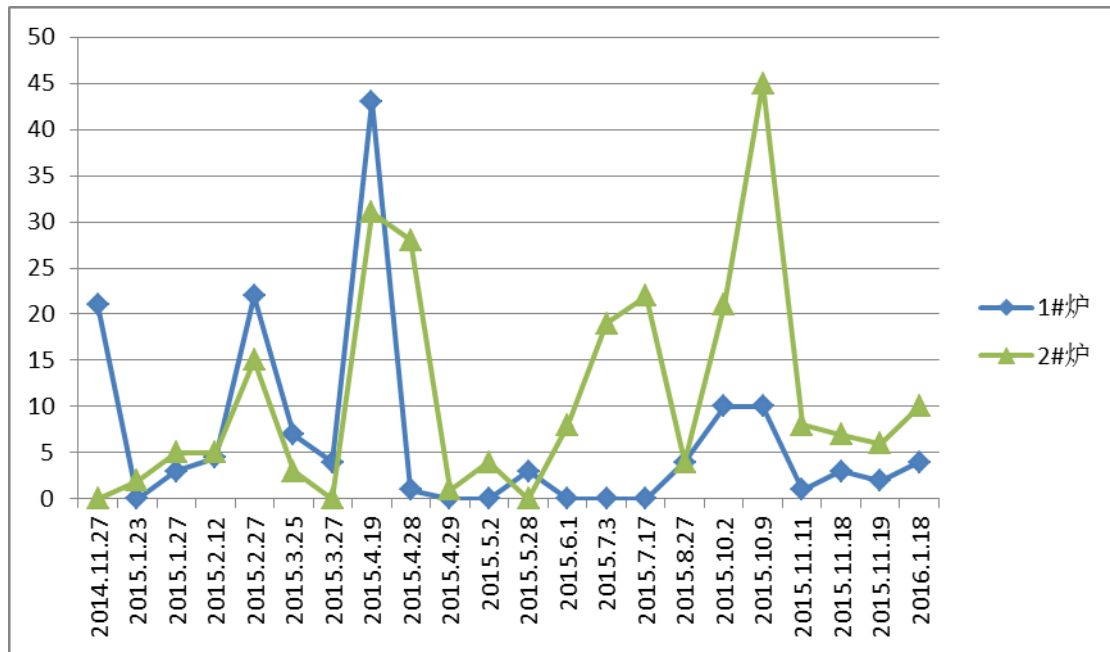
在求解高斯模型获得各污染物浓度最大值位置后，为了使所设立的监测点的监测结果能够较为准确地反映垃圾焚烧厂排放物对周边区域可能造成的最大影响，优先选择在各种污染物浓度最大地点附近处设置监测点。



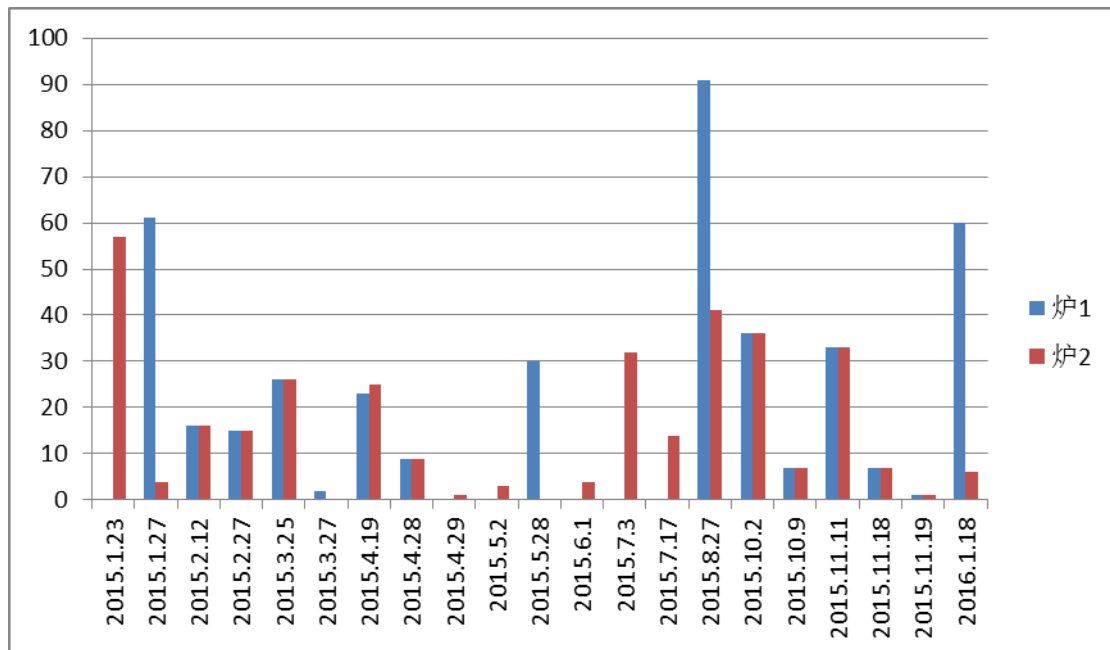
2.问题 2 的求解
问题 2 中的模型建立
模型研究对象

绘制 2014 年底至 2016 年初该厂的布袋更换统计折线图；统计炉 1 与炉 2 更换布袋的间隔天数，并绘制出条形图；炉 1 炉 2 更换布袋数量高峰期间隔天数；时间其中研究该厂的两个炉的布袋更换情况

2014 年底至 2016 年初某某厂布袋更换统计（表 5.1）



炉 1 与炉 2 更换布袋时间的间隔天数统计（表 5.2）



炉1炉2更换布袋数量高峰 期间隔天数		
	炉1	炉2
2014.11.27	0	
2015.2.27	92	92
2015.4.19	74	74
2015.5.2		13
2015.5.28	39	
2015.7.17		76
2015.10.2	127	
2015.10.9		84

(表 5.3)

从表 5.2 中可以看出，炉 2 更换布袋的时间比炉 1 的更加密集，表明炉 2 的稳定性比炉 1 的要低。

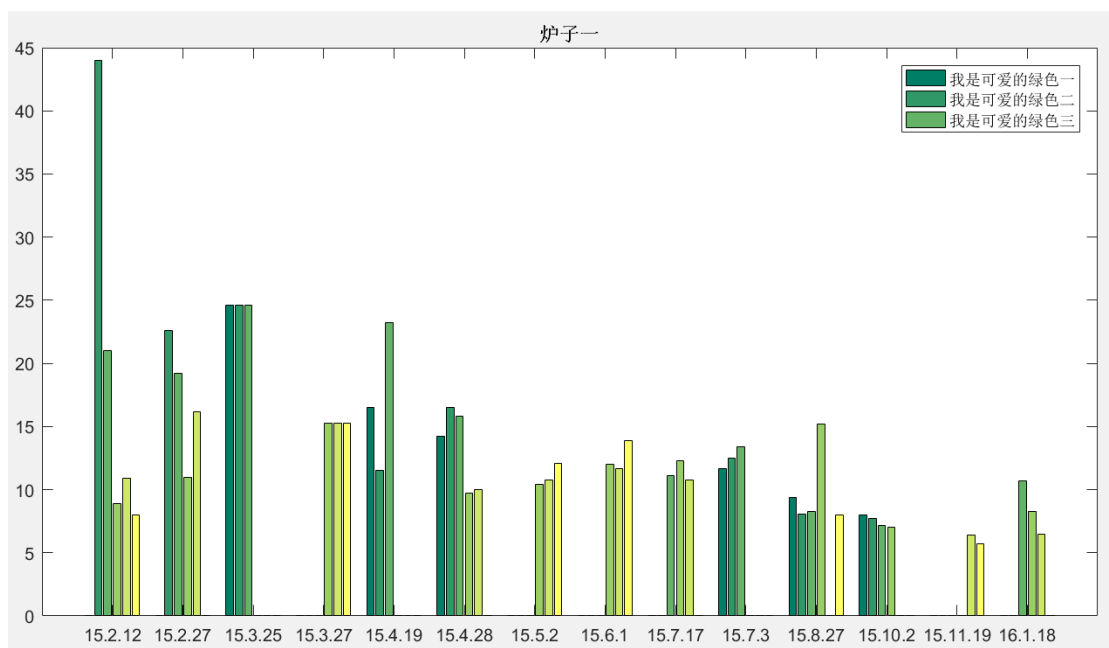
问题 2 中模型的建立

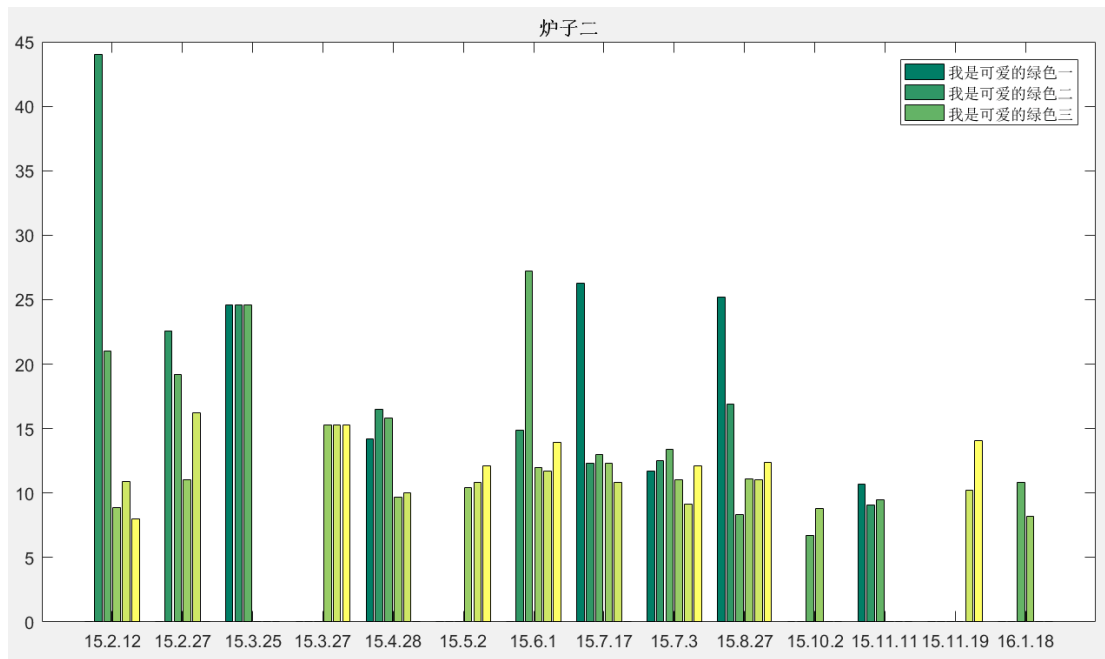
模型研究

我们用 matlab 绘制了该厂炉 1 和炉 2 布袋更换前后烟尘含量的对比，在轴的左侧为更换布袋前三天的烟尘含量，右侧为更换布袋后三天的烟尘含量。从图中柱形的变化的总体形势来看，更换布袋后的烟尘含量比更换前的明显下降。但由于该工厂的现行垃圾焚烧除尘工艺存在缺乏持续稳定性等重大缺陷。因此也存在着更换布袋后的含尘量比更换前的更高的情况。

经过研究发现，布袋式除尘器在实际使用过程中，由于烟气分布不均匀、温度过高或过低、压力过大等客观因素以及布袋本身气动阀组、控制系统等因素而造成布袋除尘的不稳定性。

通过选择与思考，我们建立了如下模型来解决布袋式除尘器除尘效率低下的问题，从而提高其稳定性。





模型选择:

关于袋式除尘器稳定性提高问题,可以采用 standard k- ε 湍流模型进行解决,由于假设流体是等温不可压缩、作定长流动,除尘效率逐渐下降的原因有烟气分布不均、气势局部过滤风速过高导致粉尘加剧冲击、磨损布袋。这一模型在 ε 方程中增加了改善速度梯度较大的流动精确性的附加项,考虑了漩涡对湍流的影响,增强了对漩涡流的模拟精度。其中,在新增进口处添加导流板,可以对除尘器入口处的射流分流,使袋式内气流分布更均匀,进出口压力差减小,除尘器各部分均能起到良好的除尘作用,从而有效得减少了滤袋的磨损,提高了除尘效率和运行的稳定性,为袋式除尘器的结构优化设计提供了依据。

现在将袋式除尘器分为两个均衡过程:

流体为等温不可压缩,作定长流动均衡过程。

进入袋式除尘器的气体种类均衡混合。

我们以优化二恶英的排放控制为例,分析其过滤优化方案。

在二恶英的过滤优化中,我们采用新型过滤方案。在烟气中喷入活性炭粉末并联合布袋除尘(Activated carbon injection (ACI) coupled with baghouse filtration (BF); ACI + BF)的携流式方法被广泛应用,是控制焚烧炉烟气二恶英排放的最经济有效的方法。

a. 吸附机理表示

1. 平衡吸附量 q (mg/g) 与比表面积 S_{ss} (m^2/g)、温度 T ($^{\circ}C$) 的关系式:

$$q = \frac{0.0086S_{ss}}{10^{-0.0125 \times 170}} \times 10^{-0.0125T}$$

2. 活性炭可用吸附位置数量与温度的关系式:

$$A_s = 5.31 \times S_{ss} \times 10^{-0.0125T-6}$$

其中, A_s 为活性炭可用吸附位置数量 (mol/g), T 为温度 ($^{\circ}C$)

3. 烟气中二恶英的吸附效率可表示为:

$$\eta_i = \frac{C_0 - C}{C_0} = 1 - \exp(-k_i A_0 t)$$

其中, C_0 和 C 分别为烟气中初始和最终的二噁英浓度, ngTEQ/Nm^3

b. 夹带流中的吸附模型

夹带流中的吸附效率可表示为

$$\eta_t = 1 - \exp\left\{-k_t \left[2\varphi_{\text{residual-carbon}} \times 10^{-0.0125T-3} C_{\text{dust}} + 10^{-0.0125T-5} C_{\text{lime}} + 5.31 \times S_{\text{SS}} \times 10^{-0.0125T-6} C_{\text{AC}}\right] t_1\right\}$$

其中, η_t 为夹带流中的吸附效率;

k_t 为夹带流中的吸附系数, $\text{Nm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$;

t_1 为夹带流接触时间, s。

c. 布袋滤饼中的吸附模型

布袋滤饼中二恶英的吸附效率可表示为:

$$\eta_f = 1 - \exp\left(-79.1(\rho_b \times 10^3) f_s \left(2\varphi_{\text{residual-carbon}} \times 10^{-0.0125T-3} f_D + 10^{-0.0125T-5} f_L + 5.31 \times S_{\text{SS}} \times 10^{-0.0125T-6} f_A\right) \frac{d\varepsilon}{v_f}\right)$$

其中, η_f 为布袋滤饼中二恶英的吸附效率;

ρ_b 为布袋滤饼的堆积密度, kg/m^3 ;

f_s 为未被占据的可用活性吸附位置比例;

$\varphi_{\text{residual-carbon}}$ 取 3.5%;

T 取 180°C ;

S_{SS} 取 850g/m^2 ;

f_D 、 f_L 、 f_A 分别为布袋滤饼中飞灰、碱性吸附剂、活性炭的质量分数;

v_f 为过滤速度, m/s ;

d. ACI + BF 系统对气相二恶英的脱除效率 η_g

$$1 - \eta_g = (1 - \eta_i)(1 - \eta_f)$$

e. ACI + BF 系统对气固相二恶英的总脱除效率 η

$$\eta = \varphi_s \eta_s + (1 - \varphi_s) \eta_g$$

其中, η_s 为布袋除尘器对固相二恶英的脱除效率。

模型求解

用该模型进行了硫化床垃圾焚烧炉和炉排焚烧炉达到 0.001ng TEQ/Nm^3 排放标准的活性炭喷入量的分析。发现活性炭消耗量随着温度的升高而增大，在同样的烟气温度条件下，炉排焚烧炉消耗的活性炭量高于硫化床焚烧炉，在计算所设定的条件下，只要保持低于 185°C 的运行温度，流化床垃圾焚烧炉不喷活性炭即可达到二噁英排放于 0.001ng TEQ/Nm^3 的标准；而高于 185°C 时，活性炭喷入量几乎随温度的增加而线性地增加。

· 六、模型的推广与改进

本文以湍流模型为基础模型，结合了布袋式除尘系统的相关资料，讨论了布袋式除尘系统稳定性的提升问题。由于最新版的污染排放国标都难以满足民众对二恶英等剧毒物质排放的控制要求，对于布袋除尘系统的优化成为了一个至关重要的问题。本文先是对于我国垃圾焚烧处理能力进行数据查找和分析，对应着长春市生活垃圾综合电站的两期工程改造的具体数据，进行对比和总结。同时对于题干的附件中的数据进行提炼，并运用 **MATLAB** 画出相应的柱状图。

通过分析探究影响布袋式除尘系统除尘效率的不同原因，本文对于如何对除尘效率进行优化也提出了多种方案，并且都有着数据的支持，如将炉差压限制在一定的范围内，调整喷吹管喷嘴与布袋口的位置等。整个研究过程不仅对于量化布袋式除尘器的稳定性有着积极意义，更为解决目前社会对于垃圾焚烧的争议提供了专业的数据分析、理论支持和参考意见。

本文在研究和讨论中，尽量贴近事实，采用互联网所能检索到的最新的数据资料作为理论支持背景，因此，分析论证过程和最终得到的结论都具有很强的时代性，对于当下的布袋式除尘系统的优化有很直观真实的呈现。

但是，无奈时间有限，可利用的资源有限，本文的研究仍然具有一定的不足。首先，数据大多来自于互联网，互联网数据虽然便捷，但是其真实性仍是有待讨论的，希望在日后的研究中能够更多地使用亲身统计得到的有效数据进行分析讨论；其次，本文研究内容并非广泛应用于中国各线城市，对于推广到全国各大城市可能会产生一定的误差，希望日后能够了解到更加全面的数据，针对这一课题进行完善；最后，本文所提出的布袋式除尘系统优化方案仅是针对于一般情况下提出的，为了能让优化方案更加完善，可以更多地结合不同的时空进行讨论，划分出不同地域不同类型的优化措施，使模型具有更强的推广意义。

参考文献

- [1]高洋洋, 袋式除尘器结构稳定性及非稳态流场的模拟与研究, 南昌大学, 2012-6
- [2]王作杰 张晓梅, 基于 CFD 数值模拟的袋式除尘器清灰性能影响研究, 中国硅酸盐学会环境保护分会学术年会论文集, 2009

- [3]何明礼，正压法测除尘器漏风率的理论探讨，工业安全与环保，38（7）：1，2012
- [4]刘鹤欣，采用高斯模型的垃圾焚烧污染物环境监测及布点，西安交通大学学报，49（5）：6，2015
- [5]姬亚，活性岩联合布袋脱除烟气中二恶英的机理研究，浙江大学，2012-3
- [6]毛锐 刘根凡，布袋除尘器结构改进的数值模拟研究，环境工程，2015-3