
2016 年“深圳杯”数学建模挑战赛

B 题论文

布袋除尘系统运行稳定性分析

队员： 彭昊 (山东大学计算机学院)
李翊谁 (山东大学计算机学院)
王城杰 (山东大学软件学院)

指导教师：刘保东教授

摘要

随着居民生活水平的提高,传统的填埋方式已经不能完全解决日益增多的垃圾产生量,以垃圾焚烧为主的处理方式成为我国解决“垃圾围城”问题的必由之路。但是由于我国在垃圾焚烧领域起步较晚,垃圾焚烧厂运行不稳定,加之信息不对称,导致居民对垃圾焚烧污染排放的担忧,对垃圾焚烧厂的选址和运营都造成了困扰。而现行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。

本文给出袋式除尘系统运行稳定性 φ 的定义为垃圾焚烧厂实际工况与正常工况污染物排放浓度的差值同实际工况与国标规定排放限额差值之比, φ 越小说明袋式除尘系统运行越稳定, $\varphi > 1$ 说明袋式除尘系统处于不稳定状态。

目前国内对垃圾焚烧袋式除尘系统稳定性方面的研究比较少,主要集中在定性研究方面。本文试图通过定量的方法,深入解析袋式除尘系统的除尘原理和运行机制量化评价袋式除尘系统的稳定性。本文将为研究袋式除尘器在正常工况下的除尘效率,本文从过滤原理入手,根据 PTFE(聚四氟乙烯)覆膜滤袋的纤维特性和表面过滤原理构建了粉尘颗粒床过滤效率和阻力计算模型,并与实际数据对比,证明用 PTFE 覆膜滤袋的袋式除尘系统在正常运行工况下可以达到 99.8%以上的运行效率,使粉尘排放浓度达到 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下,完全可以满足国标规定的排放要求。其次,本文对袋式除尘系统各种故障进行系统的分析将滤袋损坏分为破损与糊袋两类,从滤料的理化特性着手,创新性的提出袋式除尘系统滤袋的损坏是受运行温度,滤料的长期蠕变和滤袋磨损这三个主要因素共同作用的结果,并定量分析了三个因素各自对滤袋损坏的作用,构建滤袋 TCF(温度-蠕变-磨损)损坏模型,用以模拟袋式除尘系统的滤袋损坏情况,并用实际运行数据进行检验,取得了良好的效果。

本文结合袋式除尘系统正常工况下除尘效率模型和滤袋损坏的 TCF 模型对稳定性进行求解,结果显示一号炉的运行稳定性 $\varphi_1 = 0.2198$,二号炉的运行稳定性 $\varphi_2 = 0.8427$,采用新的除尘工艺的运行稳定性较一号炉提升 97.99%,较二号炉提升 98.66%。并且在现有稳定性的基础上根据大气污染的高斯扩散模型,以深圳市宝安区老虎坑垃圾焚烧发电厂计算周围 2.5 公里范围内颗粒物排放浓度的限额,推导出基于颗粒物排放的垃圾焚烧厂扩建的环境最大允许上限为 7365.14 吨每天。

关键词: 袋式除尘系统 稳定性 污染物排放标准 除尘效率模型 运行阻力模型 滤袋损坏的 TCF 模型 多元非线性回归 大气污染高斯扩散模型 排放限额 监测方案

目录

| | |
|---|----|
| 摘要 | 2 |
| 一、 问题重述与问题分析 | 5 |
| 1.1 问题重述 | 5 |
| 1.2 问题分析 | 5 |
| 二、 模型假设 | 6 |
| 2.1 袋式除尘系统适用范围界定 | 6 |
| 2.2 袋式除尘系统污染物排放的相关假设 | 7 |
| 三、 模型建立 | 7 |
| 3.1 袋式除尘系统运行稳定性分析 | 7 |
| 3.1.1 除尘系统稳定性评价指标 | 7 |
| 3.1.2 除尘系统稳定性评价建模流程 | 8 |
| 3.2 袋式除尘系统正常工况除尘效率模型 | 9 |
| 3.2.1 袋式除尘系统的工作原理 ^[3] | 9 |
| 3.2.2 模型假设 | 10 |
| 3.2.3 袋式除尘系统正常工况除尘效率子模型 | 10 |
| 3.2.3.1 袋式除尘系统除尘效率方程选型 | 10 |
| 3.2.3.2 袋式除尘系统除尘效率方程推导 | 11 |
| 3.2.3.2.1 除尘效率 | 11 |
| 3.2.3.2.2 孤立球体颗粒物捕集效率推导 | 11 |
| 3.2.3.2.3 孤立球体颗粒物捕集效率推导 | 12 |
| 3.2.4 袋式除尘系统除尘阻力子模型推导 | 14 |
| 3.2.4.1 袋式除尘系统除尘阻力方程推导 ^[14] | 14 |
| 3.2.4.2 袋式除尘系统非稳态阻力方程推导 ^[13] | 14 |
| 3.2.5 袋式除尘系统粉尘剥离率方程推导 ^[18] | 15 |
| 3.3、袋式除尘系统滤袋损坏的 TCF 模型 | 16 |
| 3.3.1 滤袋损坏原因分析 | 16 |
| 3.3.2 模型假设 | 16 |
| 3.3.3 滤袋破损子模型 | 16 |
| 3.3.3.1 断裂强度推导 | 17 |
| 3.3.3.1.1 温度对断裂强度的影响方程推导 | 17 |
| 3.3.3.1.2 长期蠕变对断裂强度的影响方程的推导 ^[22] | 18 |
| 3.3.3.2 断裂面积推导 | 23 |
| 3.3.3.2.1 磨损深度推导 | 23 |
| 3.3.3.2.2 磨损率推导 | 24 |
| 3.3.3.3 滤袋外部合力推导 | 25 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 3.3.4 滤袋糊袋子模型..... | 26 |
| 3.3.5 多元回归分析..... | 26 |
| 3.4 高斯扩散模型 | 27 |
| 3.4.1 模型简介 | 27 |
| 3.4.2 模型假设..... | 27 |
| 3.4.3 模型建立 ^[31] | 28 |
| 3.5 其他模型 | 31 |
| 3.5.1 垃圾焚烧飞灰粒径分布 | 31 |
| 3.5.2 垃圾焚烧烟气排放量方程..... | 32 |
| 3.5.3 二噁英吸附率..... | 32 |
| 四、 模型求解..... | 32 |
| 4.1 深圳市生活垃圾分析 | 33 |
| 4.1.1 深圳市生活垃圾成分分析 | 33 |
| 4.1.2 深圳市垃圾焚烧飞灰粒径 | 34 |
| 4.1.3 垃圾焚烧烟气排放量计算 | 35 |
| 4.1.4 烟气中污染物的产生浓度 | 35 |
| 4.2 正常工况与实际工况污染物排放求解..... | 36 |
| 4.2.1 正常工况条件下除尘效率、运行阻力及清灰周期求解..... | 36 |
| 4.2.2 实际污染物排放量估算 | 37 |
| 4.3 污染物排放浓度稳定性求解..... | 38 |
| 4.3.1 颗粒物排放浓度稳定性分析 | 38 |
| 4.3.2 二噁英排放浓度稳定性分析 | 39 |
| 4.3.3 重金属污染物排放浓度稳定性 | 40 |
| 4.4 扩建规模的求解 | 41 |
| 4.4.1 深圳市气象条件的确定 | 41 |
| 4.4.2 大气污染物检测敏感点的选取 | 42 |
| 4.4.3 污染物排放量限值计算 | 43 |
| 4.4.3.1 颗粒物决定的扩建规模计算 | 44 |
| 4.4.3.2 垃圾焚烧厂环境允许扩建规模的确定..... | 45 |
| 4.5 监测方案设计 | 45 |
| 4.5.1 监测方案设计..... | 45 |
| 4.5.2 监测建议..... | 46 |
| 4.6 问题二求解 | 46 |
| 五、 模型优缺点分析 | 47 |
| 六、 模型展望 | 47 |
| 参考文献..... | 47 |
| 附件： | 49 |

一、 问题重述与问题分析

1.1 问题重述

在中国，垃圾焚烧已经成为垃圾处理的主要手段之一。然而，民众对垃圾焚烧排放污染问题的担忧与日俱增。国标控制排放量与民众环保诉求之间的落差，已成为阻碍新建垃圾焚烧厂选址落地的重要因素。而阻碍国标提升的主要问题还是现行垃圾焚烧除尘工艺存在缺乏持续稳定性等重大缺陷。另外，在各地必须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。总之，现行垃圾焚烧除尘工艺无法持续稳定运行的缺陷是致使公众对垃圾焚烧产生危害疑虑的主要原因。因此，解决量化分析布袋除尘器运行稳定性问题尤为重要。

请收集资料，构建数学模型分析袋式除尘系统运行稳定性问题，并分析其运行稳定性对周边环境烟尘排放总量的影响。基于你的模型请回答下述问题：

1. 如果给定焚烧厂周边范围单位面积排放总量限额，在考虑除尘系统稳定性因素的前提下，分析讨论焚烧厂扩建规模的环境允许上限，并设计合理的环境保护综合监测建议方案；
2. 如果采用一种能够完全稳定运行、且除尘效果超过布袋除尘工艺的新型超净除尘替代工艺，你的除尘模型稳定性能提升多少？

1.2 问题分析

(1) 稳定性的定义

本文研究的袋式除尘系统运行稳定性不同于一般控制领域内稳定性的概念。对于垃圾焚烧厂，民众更关心污染物的排放是否一直达标，而非袋式除尘设备长期稳定运行，污染物的排放浓度是评判袋式除尘系统是否正常工作的重要标准，因此本文选择污染物的排放浓度作为袋式除尘系统稳定性的评判指标。

参照计量学对长期稳定性的定义^[1]：“被观测量在规定时间内仍保持不超过允许误差范围的能力”，本文给出袋式除尘系统运行稳定性的定义为：污染物排放浓度在规定时间内保持不超过标准规定排放限额的能力，表征为实际工况排放浓度与标准排放量限额差值/正常工况排放浓度与标准排放量限额差值。

(2) 问题一分析

问题一要求给定焚烧厂周围单位面积的排放总额，考虑袋式除尘系统稳定性，给出垃圾焚烧厂扩建规模的环境允许上限，并根据分析结果向政府提出环境保护的综合检测建议方案。为了达到问题一的要求，首先要对稳定性求解。布袋除尘系统运行工况可分为正常工况和非正常工况，实际工况为两者综合。

根据袋式除尘系统运行稳定性的定义,已知实际工况下污染物排放浓度和相关运行条件,国标污染物的排放限额,还需知正常工况下污染物排放浓度。由于袋式除尘器正常工况是理想工况,污染物排放浓度不能通过数据拟合求得,因此需根据袋式除尘系统的工作机理推导出袋式除尘系统在正常工况下的除尘效率模型和运行阻力模型,然后根据设备运行参数确定清灰间隔时间,对除尘效率积分求得一个清灰周期内袋式除尘系统平均除尘效率。根据烟气入口浓度求得正常工况下的排放浓度,再根据稳定性定义,求得稳定性和污染物实际最大的排放浓度。

为求得垃圾焚烧厂扩建规模的环境允许上限,需根据国标《环境空气质量执行评价标准》限额、垃圾焚烧厂周围环境敏感点分布和当地的气象和地形条件借助大气高斯扩散模型反推出单位时间内烟囱污染物的排放限额,并根据污染物的实际最大排放浓度确定污染物的排放流量限额,最后借助垃圾焚烧的烟气产生量,确定各污染物对应的环境扩建上限规模,取其中最小的作为垃圾焚烧厂扩建的环境允许上限。

根据问题二的要求,可将附件二中提供的条件带入稳定性评价模型中,重新计算稳定性。

二、模型假设

2.1 袋式除尘系统适用范围界定

研究袋式除尘系统运行稳定性,首先要对袋式除尘系统的适用范围做出界定,《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)和欧盟标准 2000/76/EU 对生活垃圾焚烧限值做出的规定^[2]如表 2-1 所示

表 2-1 生活垃圾焚烧炉排放烟气中的污染物限值国标与欧盟标准比较

| 污染物 | 单位 | 国标 | 欧盟标准 |
|-----------------|-----------------------|--------------|------------|
| | | GB18485-2014 | 2000/76/EU |
| 颗粒物 | mg/Nm ³ | 20 | 10 |
| HCl | mg/Nm ³ | 50 | 10 |
| SO ₂ | mg/Nm ³ | 80 | 50 |
| NO _x | mg/Nm ³ | 250 | 200 |
| CO | mg/Nm ³ | 80 | 50 |
| Hg | mg/Nm ³ | 0.05 | 0.05 |
| Cd | mg/Nm ³ | 0.1 | 0.05 |
| Pb | mg/Nm ³ | 1.0 | 0.05 |
| 二恶英类 | ngTEO/Nm ³ | 0.1 | 0.1 |

通过对垃圾焚烧工艺流程和袋式除尘机理的研究发现,袋式除尘系统的使用范围只适用于固态污染物,而对气态污染物无作用。为证明这一观点,本文利用附件数据中便携式烟气

分析仪提供的数据，分别对颗粒物、 SO_2 、NO、 NO_2 、CO、 NO_x 的排放浓度与袋式除尘系统除尘效率 η 进行了相关性分析，并对相关性做假设检验(原假设 H_0 :各污染物浓度与除尘效率无相关关系)，结果如图 2-1 所示：

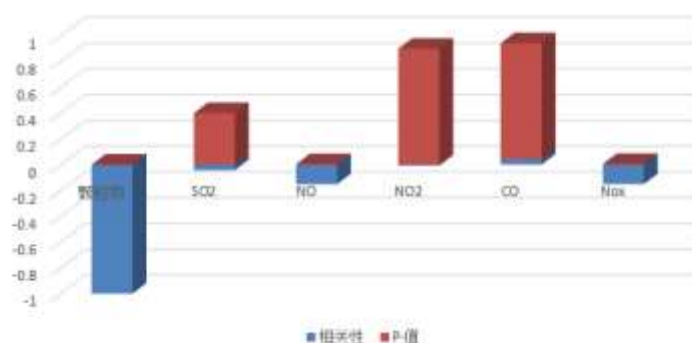


图 2-1 各污染物浓度与除尘效率的相关性检验

对上图数据进行分析可知在置信度为 0.95 的条件下， SO_2 、 NO_2 、CO 的 P-值均大于 0.05 即接受原假设，与除尘效率无关。而 p -值 <0.05 的污染物中，NO、 NO_x 与除尘效率相关性 $|r| < 0.3$ ，属于极微弱相关，所以可以断定 SO_2 、NO、 NO_2 、CO、 NO_x 的排放浓度与袋式除尘系统无相关关系。

便携式烟气分析仪并没有提供HCl、重金属类、二噁英等污染物排放的相关资料，但通过研究文献资料，可以确定重金属主要以固态的形式附着在颗粒物上，绝大部分的二噁英可以被活性炭和粉尘吸附。

所以，袋式除尘系统的适用范围为：颗粒物附着在颗粒物上的重金属、附着在活性炭和颗粒物上的二噁英。

2.2 袋式除尘系统污染物排放的相关假设

通过研究相关文献数据，在对问题做深入分析之后，本文做出如下假设：

- 1、假设污染物中 SO_x 、 NO_x 的排放浓度与布袋除尘系统的除尘效率相互独立，不存在相互关系；
- 2、假设垃圾焚烧产生的重金属完全附着在粉尘上；
- 3、假设绝大部分二噁英可以被粉尘和活性炭吸附，活性炭颗粒适用于袋式除尘系统的过滤范围

三、 模型建立

3.1 袋式除尘系统运行稳定性分析

3.1.1 除尘系统稳定性评价指标

上文给出袋式除尘系统运行稳定性的定义为：污染物排放浓度在规定时间内保持不超过标准规定排放限额的能力，表征为实际工况排放浓度与标准排放量限额差值/正常工况排放浓度与标准排放量限额差值。则袋式除尘系统的运行稳定性指标 ϕ 可以表示为：

$$\varphi = \frac{c_f - c_n}{c_L - c_n} \quad (3-1)$$

式中 c_f 、 c_n 为实际工况和正常工况下袋式除尘系统污染物排放浓度(mg/Nm^3)， c_L 为相应标准规定的污染物排放限额(mg/Nm^3)。

对于袋式除尘系统，稳定性指标 φ 越小说明稳定性越高， φ 越大说明稳定性越低； $\varphi = 1$ 为稳定性阈值，当 $\varphi > 1$ 时，袋式除尘系统排放的污染物浓度超过标准规定的排放限值，袋式除尘系统的运行处于不稳定状态。稳定性指标 φ 是与排放标准有关的参数，即使为同一座垃圾焚烧厂，采用不同的排放标准，稳定性指标 φ 也会有所不同。

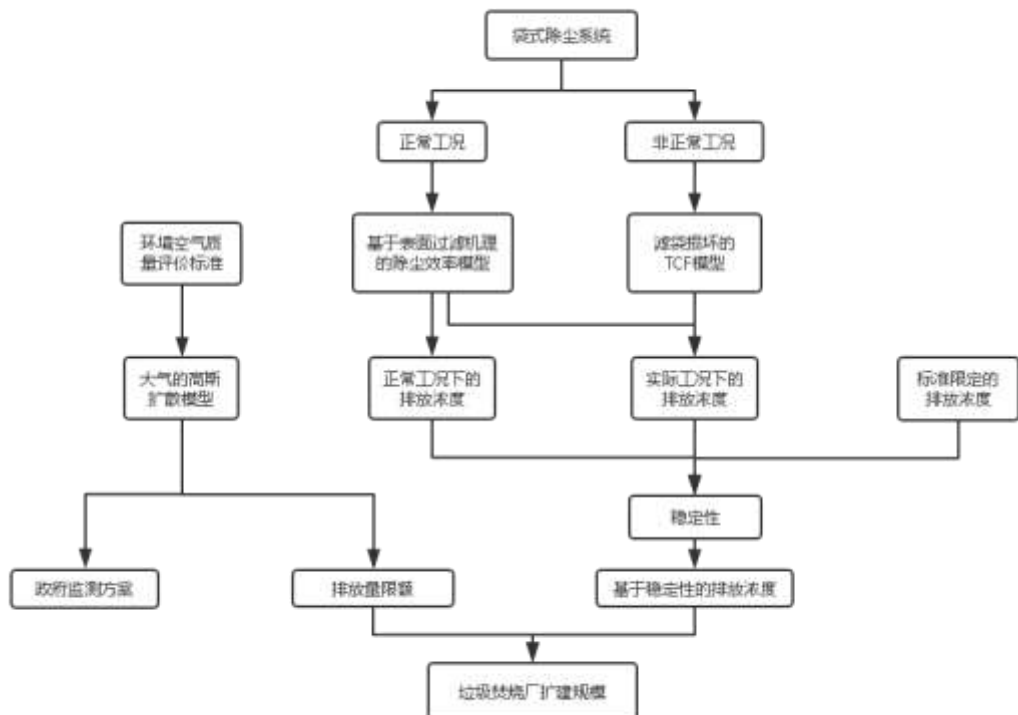
对于不同运行条件下的样本数据，也可以通过标准差比值的形式表示稳定性指标 φ ：

$$\varphi = \frac{\sqrt{\sum (c_f - c_n)^2}}{\sqrt{\sum (c_L - c_n)^2}} \quad (3-2)$$

当知道垃圾焚烧厂相关的运行参数，可以估计垃圾焚烧厂袋式除尘系统正常工况下的污染物排放浓度 c_n 和袋式除尘系统的运行稳定性 φ ，依据不同污染物的排放标准 c_L ，可对公式3-1进行变形，估计袋式除尘系统在稳定性为 φ 的条件下污染物的实际排放浓度：

$$c_f = c_n + \varphi(c_L - c_n) \quad (3-3)$$

3.1.2 除尘系统稳定性评价建模流程



3.2 袋式除尘系统正常工况除尘效率模型

3.2.1 袋式除尘系统的工作原理^[3]

垃圾焚烧厂袋式除尘器除尘是一个综合效应的结果。这些效应有滤料对尘粒的捕集和粉尘层对尘粒的捕集。

3.2.1.1 滤料对尘粒的捕集效应

滤料对尘粒的捕集包括惯性碰撞、筛滤、静电和重力沉降效应。

(1)惯性碰撞效应 惯性碰撞是过滤除尘的主要机制之一，一般粒径较大的粉尘主要依靠碰撞效应捕集当含尘气流接近滤料的纤维时，气流流线围绕捕集纤维迅速拐弯，其中较大的粒子由于惯性力的作用，偏离了流线，继续沿着原来的运动方向前进，同捕集纤维发生碰撞而被捕集。

(2)筛滤效应 当尘粒直径大于滤料孔隙时，尘粒即被滤料孔隙筛滤下来，因此筛滤效应能捕集粒径大于孔隙的粉尘。

(3)扩散效应 在气流中对粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的尘粒由于气体分子的运动撞击，使其产生布朗运动。这种尘粒的无规则运动，除了可能产生尘粒之间的聚集外，还有这向低浓度区扩散的趋势。由于捕集纤维表面的浓度较低，所以小尘粒向着纤维表面扩展，并与纤维碰撞而被捕集。

(4)静电效应 人造纤维编制的滤料，当气流穿过时由于摩擦产生的经典现象，同时许多尘粒在运输过程中由于摩擦也会产生静电。当尘粒随气流趋向滤料时，由于库仑力的作用，促使粉尘和纤维滤料碰撞，增强滤料对粉尘的吸附力而被捕集。

(5)重力沉降效应 对于粒径大、密度大的尘粒，在重力的作用下可以自然沉降到滤料上，这种作用称为重力沉降效应。

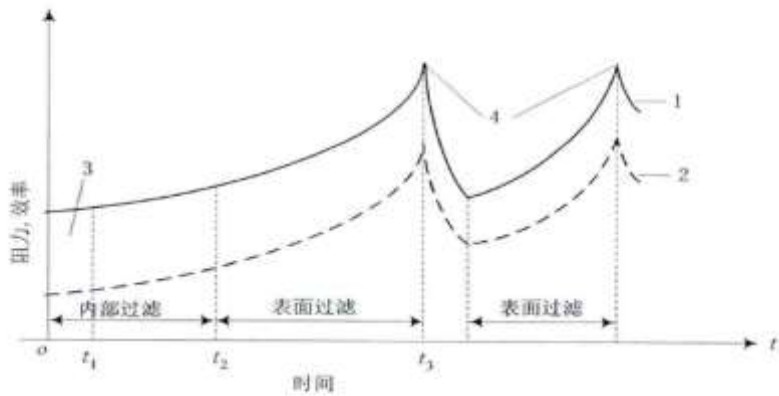
3.2.1.1 粉尘层对粉尘的捕集作用

粉尘层对尘粒的捕集也起到了十分重要的作用。由于滤袋是纤维织造成的，过滤开始时新的滤袋上没有粉尘，过滤操作一定时间后，由于扩散粘附等作用，尘粒在滤料网孔间产生架桥现象。一般合成纤维布的网孔为 $20\sim 50\mu\text{m}$ ，架桥现象很容易出现，使气流通过滤料的孔径变得很小，从而使滤料网孔机器表面迅速截留粉尘形成粉尘层，在清灰后依然残留一定厚度粉尘，称为粉尘初层。粉尘层中粉尘粒径通常比纤维小，因此粉尘层的形成，其筛滤、惯性、截留和扩散等作用都有所增加，使除尘效率显著提高。

当含尘气流流过清洁的滤料时，比滤布空隙大的微粒，由于重力作用沉降到滤料上，或因惯性碰撞作用被纤维挡住在滤料表面，或因筛滤作用被滤料孔隙筛滤下来沉集在滤料表面。比滤布空隙小的微粒和滤布的纤维发生碰撞后或经过时被纤维截留在滤料表面，小粉尘由布朗运动的作用留在滤布的表面和空隙中，最微小的粒子则可能随气流一起流经滤布跑掉了。

随着滤料上捕集的粉尘不断增加，一部分粉尘嵌入到滤料内部，一部分附着在表面，在织孔和滤袋表面形成灰膜(粉尘层)。灰膜又成为滤膜，煤气通过布袋和滤膜达到良好的净化除尘目的。当灰膜增厚，阻力增大到一定程度时，再进行清灰，除掉大部分灰膜，使阻力减小到最小，再恢复正常过滤。袋式除尘中，灰膜起着比滤料更重要的作用，使捕集尘的效率显著提高，滤布

则起着形成及支撑粉尘层即灰膜的作用,因而清灰时应保留粉层。图 3-1 为过滤除尘中效率和阻力随时间变化的非稳态过程。



过滤除尘中效率和阻力随时间变化的非稳态过程

1—效率变化曲线；2—阻力变化曲线；3—清洁滤料；4—清灰

图 3-1、过滤除尘中效率和阻力随时间变化的非稳态过程

3.2.2 模型假设

- 1、为方便计算，假设垃圾焚烧产生的颗粒物和活性炭颗粒都被视为没有粘性不带电荷的标准的球体；
- 2、由于本文研究的布袋除尘系统采用的是覆膜滤料，假设布袋除尘系统过滤只发生表面过滤，过滤作用主要为粉尘层的过滤效果，覆膜相当于一次粉尘层；
- 3、假设粉尘在进入布袋除尘系统之前已经被充分沉降。

3.2.3 袋式除尘系统正常工况除尘效率子模型

3.2.3.1 袋式除尘系统除尘效率方程选型

由于资料中提供的过滤介质为 PTFE 覆膜滤料，本文对 PTFE 覆膜滤料的理化性质进行研究，其中滤料部分参数^[4]如表 3-1：

| 生产厂家 | 滤料材质 | 滤料平均 厚度/mm | PTFE 薄膜 | | |
|-------|-----------------|---------------|---------|---------------------|-----|
| | | | 厚度/mm | 平均孔径/ μm | 填充率 |
| 广州华滤 | PTFE 覆膜+PTFE 基布 | 1.8 | 0.03 | 0.2~2 | 12% |
| 厦门三维丝 | PTFE 覆膜+PTFE 基布 | 1.2 | 0.03 | 0.2~2 | 12% |

分析表 3-1 的数据，与其他非覆膜滤料相比，非覆膜滤料的平均孔径比较大，在过滤的初始阶段粉尘颗粒会深入到无纺布内部发生深层过滤；而 PTFE 覆膜滤料的覆膜平均孔径仅

为 $0.2\sim 2\mu\text{m}$ 小于 99% 的粉尘粒径。由于其表面过滤的机理，从过滤的初始阶段，粉尘就被拦截在过滤介质表面。所以在计算覆膜滤料的过滤效率时，忽略内部过滤，覆膜滤料相当于一次粉尘层，直接应用粉尘层对粉尘过滤效率的计算方程是合理的。

3.2.3.2 袋式除尘系统除尘效率方程推导

3.2.3.2.1 除尘效率

在除尘工程设计中一般采用全效率作为考核指标。

(1) 全效率 全效率为除尘器除下的粉尘量与进入除尘器粉尘量之百分比^[3]，如式 1-1 所示

$$\eta = \frac{G_2}{G_1} \times 100\% \quad (3-4)$$

式中 η 为除尘器的效率 (%)， G_1 为进入除尘器的粉尘量 (g/s)， G_2 为除尘器除下的粉尘量 (g/s)。

由于现场无法直接测出进入除尘器的粉尘量，可以通过测量除尘器进出口气流中含尘浓度和相应的分量^[4]，根据式 2-1 计算：

$$\eta = \frac{Q_1 C_1 - Q_2 C_2}{Q_1 C_1} \times 100\% \quad (3-5)$$

式中 Q_1 、 Q_2 为除尘器入口和出口风量 (m^3/s)， C_1 、 C_2 为除尘器入口和出口粉尘浓度 (mg/m^3)。

(2) 总效率 在除尘系统中若有除尘效率分别为 η_1 、 η_2 、 $\eta_3 \cdots \eta_n$ 的几个除尘器串联运行时，除尘系统的总效率用 η 表示，按式 1-3^[4] 计算：

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_n) \quad (3-6)$$

3.2.3.2.2 孤立球体颗粒物捕集效率推导

由于在表面过滤的过程中起主导作用的捕集体为颗粒捕集体，本文将前人对单个圆球捕集体在各种捕集机理作用下的捕集效率进行了深入研究。单个圆球捕集体的捕集机理与单根纤维的捕集机理相似，都是筛分、碰撞、扩散、静电、重力等效应共同作用形成的。由于本文假定垃圾焚烧产生的粉尘为不带电荷的球体，并且在重力沉降室充分沉降，故本文假定单个球形粉尘的捕集效率主要由筛分、碰撞、和扩散作用综合决定。

(1) 单个球体的碰撞捕集效率

假定单个球体的碰撞捕集效率为 η_{ll} ，根据 Herner 给出的单个球体的碰撞捕集方程^[5]，当 $S_t > 0.3$ 时：

$$\eta_{ll} = \frac{S_t^2}{(S_t + 0.25)^2} \quad (3-7)$$

当 $0.0416 \leq S_t \leq 0.3$ 时：

$$\eta_{ll} = 0.0376 - 0.464S_t + 9.68S_t^2 - 16.2S_t^3 \quad (3-8)$$

当 $S_t < 0.0416$ 时

$$\eta_{ll} = \left[1 + \frac{0.75 \ln(4S_t)}{2S_t - 1.214} \right]^2 \quad (3-9)$$

式中 S_t 为斯特劳哈尔数 (Strouhal number) 是在流体力学中讨论物理相似与模化时引入的相似准则，表征当地惯性力与位移惯性力比，在本文的计算方程^[8]如式 1-6：

$$S_t = \frac{\rho_p C_0 d_p^2 v_0}{18 \mu d_f} \quad (3-10)$$

式中 ρ_p 为颗粒物的实密度(g/m³), C_0 为粉尘的初始浓度(mg/Nm³), v_0 为过滤风速(m/s), μ 为含尘气体的动力粘度(Pa·s), d_f 与 d_p 均为粉尘粒径(μm)。

(2) 单个球体的筛分捕集效率

假定单个球的筛分捕集效率为 η_{Rl} , Ranz W.E 给出的单个球体筛分捕集方程^[6]如公式 3-11:

$$\eta_{Rl} = \begin{cases} (1+R)^2 - \frac{1}{1+R} & 0 < R \leq 0.325 \\ 1 & R > 0.325 \end{cases} \quad (3-11)$$

式中 $R = d_p/d_f$, 其余参数意义同上。

(3) 单个球体的扩散捕集效率

假定单个球的筛分捕集效率为 η_{Dl} , Johnstons 给出的单个球体扩散捕集方程^[7]如式 3-12:

$$\eta_{Dl} = \frac{4}{Pe} (2 + 0.557 Re^{1/8} Pe^{3/8}) \quad (3-12)$$

其中 Re 为雷诺系数(Reynolds number)^[8], 表征流体运动中粘性作用和惯性作用相对大小的无因次数, 如式 3-13:

$$Re = vl/\gamma \quad (3-13)$$

式中 v 为特征长度(m/s), l 为特征长度(m), γ 为运动粘度(m²/s), 运动粘度可通过查表获得。

Pe 为佩克莱数(Peclet number)^[10], 用于研究反混影响的准数, 计算方程如式 3-14:

$$Pe = RePr \quad (3-14)$$

式中 Pr 为普朗特数(Prandtl number)^[11], 反应流体物理性质对对流传热过程的影响, 可以通过查表获得。

(4) 单个球体的综合捕集效率

假定单个球的筛分捕集效率为 η_{Sl} , 各种作用几乎不相互干扰, 则单个球的综合效率的捕集方程^[12]如式 3-15:

$$\eta_{Sl} = 1 - (1 - \eta_u)(1 - \eta_{Rl})(1 - \eta_{Dl}) \quad (3-15)$$

3.2.3.2.3 孤立球体颗粒物捕集效率推导

推导过程中本文以单元层作为桥梁, 把颗粒层的过滤效率与孤立球形捕集体的效率联系起来, 如图 3-2 将厚度为 H 的颗粒床层过滤器分为数个厚度为 dh 的单元层过滤体。则厚度^[12]为 dh 的单元层过滤体颗粒球体的数量 N 为:

$$N_{dh} = \frac{6\varepsilon A dh}{\pi d_p^3} \quad (3-16)$$

式中 ε 为粉尘的填充率, $\varepsilon = \rho/\rho_p$, 根据经验公式^[13] $\varepsilon = 0.106 + 0.0435 \ln(t)$, ρ 为粉尘的体密度(g/m³), t 为滤袋清灰后的运行时间, 其余参数同上。

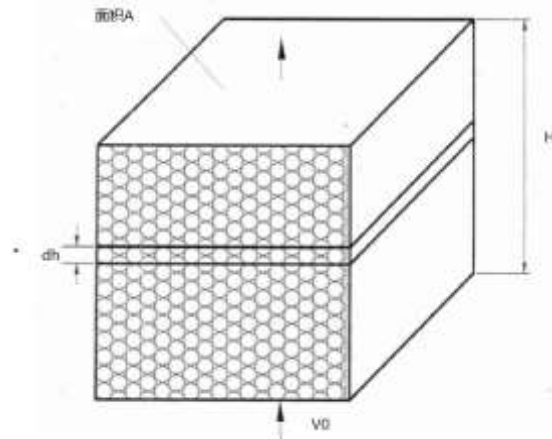


图 3-2 颗粒床层过滤模型

(1) 单元层效率与孤立球捕集效率的关系

对于孤立球形捕集体，某个颗粒球的效率为 η_{Sl} ，单个球捕集的粉尘量为 $\frac{\pi}{4} d_p^2 v_0 c \eta_{Sl}$ 。

在某一单元层有 N_{dh} 个颗粒球，捕集的粉尘量为 $N_{dh} A \frac{\pi}{4} \frac{v_0}{1-\varepsilon} d_p^2 c \eta_{Sl}$ ，所以一个单元层的效率^[12] η_{hl} 为：

$$\eta_{hl} = \frac{N_{dh} A \frac{\pi}{4} \frac{v_0}{1-\varepsilon} d_p^2 c \eta_{Sl}}{A v_0 \varepsilon} = \frac{3 d h \eta_{Sl}}{2 d_p} \cdot \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \quad (3-17)$$

这一结果表明颗粒床层的过滤效率是填充率和孤立球捕集效率的函数。为使颗粒床层获得较高的过滤效率，应尽量提高填充率，但填充率越高透气率越低，阻力将越高，应用时应综合考虑。

(2) 单元层效率与颗粒层床效率的关系

过滤实践证明：气溶胶粒子颗粒层中的浓度遵循对数规律^[12]，即：

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\lambda c \quad (3-18)$$

式中 c 为气溶胶粒子的质量浓度(kg/m³)， λ 为过滤系数。

过滤系数 λ 系数通常是时间和位置的函数，但在任意时刻将上式用于单元层，可认为 λ 是常数，因为 dh 很小，因此从 $z = (i-1)dh$ 到 $z = idh$ 对式 3-19 积分，得到单元层效率^[12]为：

$$\eta_{hl} = 1 - \frac{c_i}{c_{i-1}} = 1 - \exp(-\lambda dh) \quad (3-19)$$

因为 dh 很小，将上式级数展开^[12]，取前两项有极好近似，得：

$$\eta_{hl} = \lambda dh \left(1 - \frac{1}{2} \lambda dh\right) \quad (3-20)$$

可见，单元层效率近似为常数。因为颗粒层是由单元层串联组成，于是单元层效率 η_{hl} 与颗粒层床效率 η_K 的关系^[12]为

$$\eta_K = 1 - (1 - \eta_{hl})^{H/dh} \quad (3-21)$$

(3) 颗粒床层除尘效率随时间变化的方程

由于布袋除尘系统的除尘效率很高，本文假定一段时间内，布袋除尘系统内的粉尘完全附着在滤袋上，则颗粒床层增加的粉尘的重量为 ΔM ，可由式 3-22 计算：

$$\Delta M = c_0 A v_0 \Delta t \quad (3-22)$$

所以颗粒床层厚度随时间变化的方程^[12]为:

$$H = \frac{M}{A \varepsilon \rho_p} = \frac{c_0 v_0 t}{\rho_p \varepsilon} \quad (3-23)$$

令 $dh = d_p$ 将式 3-17 和式 3-23 带入式 3-24 得颗粒床层除尘效率随时间变化的方程^[12]为:

$$\eta_K = 1 - \left(1 - \frac{3\varepsilon}{2(1-\varepsilon)} \eta_{Sl}\right)^{\frac{c_0 v_0 t}{\rho_p d_p \varepsilon}} \quad (3-24)$$

3.2.4 袋式除尘系统除尘阻力子模型推导

3.2.4.1 袋式除尘系统除尘阻力方程推导^[14]

通过分析表 3-1 的数据, 覆膜对除尘系统的初始阻力贡献很小, 所以本文假定过滤介质的初始阻力只与基布有关, 则清洁状态下纤维过滤介质压力损失可以表达为^[15]:

$$\Delta P = F \cdot L_f \quad (3-25)$$

式中 L_f 为纤维过滤介质单位面积中纤维总长度, 计算如式 3-26:

$$L_f = \frac{4\alpha H}{\pi d_f^2} \quad (3-26)$$

F 为作用于单位纤维上的流体阻力:

$$F = F^* \mu v_0 \quad (3-23)$$

式中 α 为纤维介质的纤维填充率, 计算方法同 ε , H 为纤维介质的厚度(m), 其余参数同上。

对于无量纲的阻力, 不同研究者在不同的过滤介质及实验研究的情况下, 得出不同的关系表达式。本文采用 Henry 和 Ariman 在 1953 年通过数值计算得到压力损失的经验式^[16]:

$$\Delta P_0 = \frac{4\mu v_0 H}{d_f^2} (2.446\alpha + 38.16\alpha^2 + 138.9\alpha^3) \quad (3-24)$$

由于理论计算以均匀模型为基础, 而实际过滤介质的纤维分布是杂乱交织的, 因此将均匀模型中单纤维的性能直接积分, 得到的宏观性能与实际情况相差很大, 阻力也偏高。因此, 有必要对纤维的非均匀分布进行修正, 修正系数 λ_p ^[17]为:

$$\lambda_p = \exp(-3\sigma^2) + \frac{0.4\sigma^3}{\sigma^3 + 0.8} \quad (3-25)$$

通过分析, 不难得出结论, 滤袋的初始压力与时间无关, 而与过滤介质和过滤风速有关。

3.2.4.2 袋式除尘系统非稳态阻力方程推导^[13]

Global Darcy's law 指出含尘气体透过滤料的压降, 与平均流速成线性关系^[19]:

$$\Delta P = R \cdot H \cdot v_0 \quad (3-26)$$

式中 R 为空气流动阻力(kg/m²s), 其余参数意义同上。

由于表面过滤依靠薄膜及其上的粉尘层进行过滤的特性, 因此对其理论的研究主要集中在滤饼层的颗粒压缩过程, Kozeny 方程^[13]是颗粒过滤理论的基础, 可以表示为式 3-27:

$$\Delta P_t = v_0 \mu K_0 \left(\frac{6}{d_p} \right)^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} H \quad (3-27)$$

式中 K_0 为康采尼常数，其值为 5.0，其余参数意义同上。

根据研究可知，布袋除尘系统运行期间的阻力由初始阻力 $\lambda_P \Delta P_0$ 和粉尘层产生的阻力 ΔP_t 共同组成，所以布袋除尘系统在运行过程中产生的阻力的计算子模型^[13]如式 3-8：

$$\Delta P = \lambda_P \Delta P_0 + \Delta P_t \quad (3-28)$$

3.2.5 袋式除尘系统粉尘剥离率方程推导^[18]

本文通过研究和查阅相关文献，发现脉冲清灰并不能完全使粉尘剥离，而是留下一个粉尘残留层，而粉尘残留层越厚，脉冲清灰的间隔越低，将严重影响滤袋的寿命和除尘效率，因此研究脉冲清灰的粉尘剥离率是很重要的。

徐钟川等在 2011 年完成了脉冲喷吹袋式除尘器清灰性能的研究试验，结论为喷吹压力对脉冲清灰的粉尘剥离率影响最为显著。并在喷口直径为 4mm，喷吹时间为 0.1s，粉尘负荷为 0.7kg/m²，喷吹距离为 240mm，引射管喉部直径 130mm 的条件下，分别改变喷吹压力为 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45MPa 进行测试，结果如表 3-2

表 3-2 喷吹压力与清灰剥离率

| 喷吹压力(MPa) | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.45 |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 剥离率(%) | 40 | 51.67 | 57.67 | 66.67 | 80.00 | 79.33 |

本文对表中的数据进行了插值，结果如图 3-3 所示，因此知道相应的喷吹压力，可以对数据进行插值获得相应的脉冲清灰剥离率。

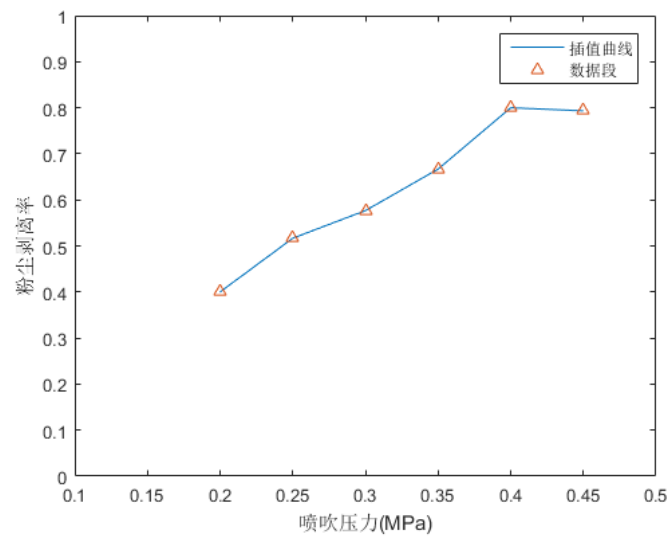


图 3-3 粉尘剥离率与喷吹压力的关系

3.3、袋式除尘系统滤袋损坏的 TCF 模型

3.3.1 滤袋损坏原因分析

根据实地调研和相关文献研究，本文将滤袋损坏分成两个主要类别：滤袋破损、滤袋糊袋。滤袋破损的原因主要和断裂强度和受到的外力有关；滤袋破损主要和温度有关。

3.3.2 模型假设

依据附表 2 中提供的两种滤袋的理化性能参数可知，PTFE 覆膜滤料具有优异的化学抗氧化性、化学抗水解性和化学抗酸碱性，可以假设滤袋损坏与烟气中的含氧量，含水率和酸碱碱性气体无关，为此本文利用附件数据中便携式烟气分析仪提供的数据，分别对含氧量、含水率、酸碱值与袋式除尘系统除尘效率 η 进行了相关性分析，并对相关性做假设检验(原假设 H_0 :各因素浓度与除尘效率无相关关系)，结果如图 3-4 所示：

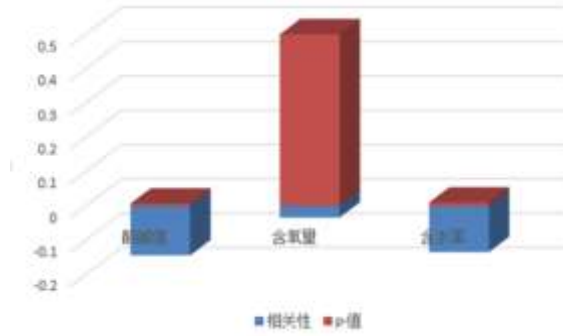


图 3-4 各因素与除尘效率相关性检验

对上图数据进行分析可知在置信度为 0.95 的条件下，含氧量的 P-值大于 0.05 即接受原假设，与除尘效率无关。而 p-值<0.05 的因素中，烟气酸碱值和含水率与除尘效率相关性 $|r| < 0.3$ ，属于极微弱相关，所以可以断定烟气中含氧量、含水率、酸碱碱性气体的浓度与袋式除尘系统无相关关系。

依据相关文献与资料，对滤袋损坏的 TCF 模型做如下假设：

- 1、滤袋损坏的原因与烟气中含氧量、含水率、酸碱碱性气体无关；
- 2、造成滤袋损坏的主要因素为：温度、材料长期蠕变、磨损

3.3.3 滤袋破损子模型

通过查阅相关文献可知造成滤袋破损的主要原因有：温度 T 、长期蠕变 ε 和磨损率 ω 。为了定量描述滤袋破损受各因素影响的情况，定义滤袋破损系数 $^{[20]}\delta$ 表征滤袋破损的概率：

$$\delta = \frac{F}{P} \quad (3-29)$$

式中 F 为滤袋在脉冲清灰时所受合力， P 为滤袋所受断裂强力。

断裂强力为纤维在拉伸至断裂前所能承受的最大拉力，断裂强力 $^{[20]}$ 可以表示为：

$$P = \sigma S \quad (3-30)$$

式中 σ 为断裂强度,用于表征材料本身的理化特性,与使用温度 T 和使用寿命 t 有关,而与受力 F 无关; S 为断裂面积与材料的磨损率、受力 F 和喷吹次数 t_s 有关

3.3.3.1 断裂强度推导

定义断裂强度保持率^[20]为一定温度下使用一定时间后材料断裂强度与初始断裂强度之比,任意时刻温度下 PTFE 滤袋的断裂强度 σ 可以用断裂强度保持率与初始断裂强度的乘积获得:

$$\sigma = \sigma_0 \theta_T \theta_t \quad (3-31)$$

式中 σ_0 为初始断裂强度, θ_T 为由温度决定的断裂强度保持率, θ_t 为由使用时间决定的断裂强度保持率。

3.3.3.1.1 温度对断裂强度的影响方程推导

由于聚四氟乙烯本身的材料性能参数,如拉伸强度、延伸率和热膨胀系数等都会随着温度的变化而变化,呈现出一种六边形,使得由其制成的滤料在不同的使用温度下表现出不同的性能,因此深入研究温度对于聚四氟乙烯材料特性的影响十分重要。

由于本文研究的主要滤料为 PTFE 滤料,而国内外在温度对 PTFE 滤料温度对断裂强度方面的研究比较少,难以找到相关数据,所以本文参照 PTFE 板材的相关实验数据,对 PTFE 滤料温度对断裂强度的影响方程做合理类推。惠嘉^[17]在 2006 年进行了温度对于聚四氟乙烯板材的力学性能试验,采用国标 GB/T 1040-1092 为拉伸试验标准,分别在 -65°C 、 -25°C 、 0°C 、 23°C 、 70°C 、 100°C 、 130°C 、 160°C 、 200°C 、 230°C 、 250°C 这 11 个温度下进行试验,试验结果^[17]部分如表 3-3:

| 表 3-3 温度与断裂强度保持率 | | |
|----------------------|----------|--------|
| $T/^{\circ}\text{C}$ | 拉伸强度/MPa | 强力保持率 |
| -65 | 41.91 | 1.4623 |
| -25 | 35.08 | 1.2240 |
| 0 | 28.66 | 1.0000 |
| 23 | 24.27 | 0.8468 |
| 70 | 21.73 | 0.7582 |
| 100 | 19.28 | 0.6727 |
| 130 | 19.42 | 0.6776 |
| 160 | 19.29 | 0.6731 |
| 200 | 18.28 | 0.6378 |
| 230 | 17.29 | 0.6033 |
| 250 | 15.48 | 0.5401 |

对表 3-3 中的数据进行拟合得到温度 T 对断裂强度 σ 的拟合方程^[21]为:

$$\sigma = 28.61 - 0.1538T + 8.748 \times 10^{-4}T^2 - 1.85 \times 10^{-6}T^3 \quad (3-31)$$

其中相关系数 $R^2 = 0.9885 > 0.85$,曲线拟合有效。拟合函数如图 3-3:

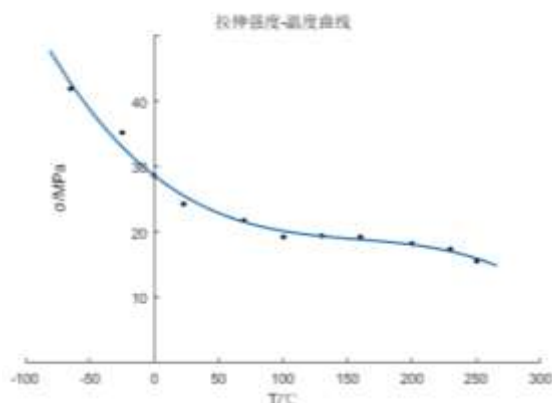


图 3-3 拉伸强度-温度曲线

假定在 0°C 下 PTFE 材料的强力保持率为 1, 则温度 T 对 PTFE 材料强力保持率 θ 的拟合公式^[21]为:

$$\theta = 0.9981 - 5.36 \times 10^{-3}T + 3.052 \times 10^{-5}T^2 - 6.46 \times 10^{-8}T^3 \quad (3-32)$$

式中相关系数为 $R^2 = 0.9835 > 0.85$,曲线拟合有效。

通过观察图表中的数据,可知拉伸强度 σ 为温度 T 的递减函数,拉伸强度的变化可分为三个区段对应温度范围分别为: $-65 \sim 100^\circ\text{C}$ 、 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 、 $200 \sim 250^\circ\text{C}$, 其中 115°C 为聚四氟乙烯材料的玻璃化温度 T_g , 在 $T_g \sim T_g + 100^\circ\text{C}$ 的范围内聚四氟乙烯的拉伸强度变化缓慢比较平稳。当温度超过 200°C 时, 聚四氟乙烯开始极微量分解, 拉伸强度下降速度加快。

3.3.3.1.2 长期蠕变对断裂强度的影响方程的推导^[22]

由长分子链聚集起来的纤维,在变形时除了分子链主价键的变形(键长和键角的改变)外,还有次价键逐步断裂而分子链逐步扩展、纤维结构重排的过程,这一过程使纤维的变形具有时间效应或时间依赖性。所以纺织纤维的力学性能兼具有弹性固体和粘性流体的变形特征,是一种粘弹性体。

当作用于粘弹性材料的应力不变时,应变随时间的增加而增加,材料内部的原子弹性移动到新的位置,随着时间的推移,应变继续发展,分子内旋结构脱开,这种现象就是蠕变^[19]。

弹性固体和粘性流体代表着粘弹性材料的两种极端形态,弹性固体在去除施加的外力后可恢复其原始状态,粘性流体则不具有变形完全恢复的可能性。这两种状态可以采用虎克弹簧^[20]和服从牛顿粘滞定律的粘壶模拟^[25], 如图 3-4:

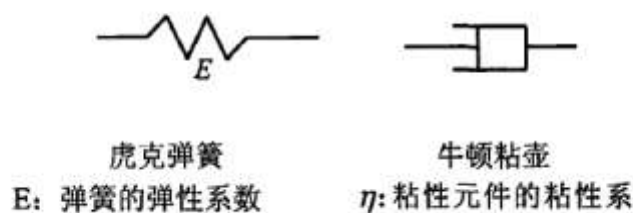


图 3-4 基本元件图

$$\text{对于虎克弹簧弹性元件}^{[23]}: \sigma = E\varepsilon \quad (3-33)$$

$$\text{对于牛顿粘壶粘性元件}^{[24]}: \sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3-34)$$

这两种基本元件以不同的方式组合成新的模型，用来描述线性粘弹性蠕变。

(1) Maxwell 模型

由一个虎克弹簧和一个牛顿粘壶串联而成，如图 3-5。根据串联原理即串联时各元件的应力是相同的，与模型的总应力相等，这个组合模型的总应变为粘性和弹性应变的和，设弹性元件应变为 ε_1 ，粘性元件的应变为 ε_2 。

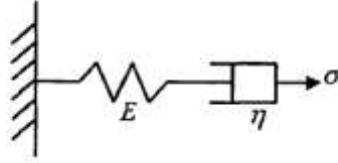


图 3-5 Maxwell 模型

该模型的本构方程^[22]为:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (3-35)$$

该模型的应变^[22]为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} t + \frac{\sigma}{E} \quad (3-36)$$

根据式 3-36 可以看出当应力 σ 作用在模型的瞬间，会产生一个瞬时的弹性伸长 ε_0 以后的应变增加量与时间成正比，当外力撤除后，模型变形会产生一个瞬时恢复，但不可能回到初始状态，因为变形 ε_0 是不可恢复的。

(2) Kelvin-Voigt 模型

Kelvin 和 Voigt 几乎同时发表用此模型来表示高弹性物体的力学性质的论文，由一个虎克弹簧和一个牛顿粘壶并联而成，如图 3-6。在这一模型中应力 σ 是弹簧弹性应力 σ_1 和粘壶的粘滞阻力 σ_2 之和。而弹簧和粘壶的应变是相等的。

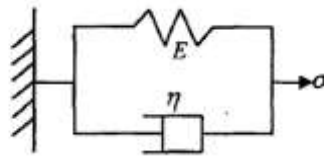


图 3-6 Kelvin-Voigt 模型

该模型的本构方程为^[22]:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3-37)$$

得到模型的应变为^[22]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \right) \xrightarrow{\tau_k = \frac{\eta}{E}} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \right) \quad (3-38)$$

当 $t \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow \frac{\sigma}{E}$ 是常数。式中 $\tau_k = \frac{\eta}{E}$ 是伏欧脱模型中的形变推迟时间，式 3-38 表明，在恒定应力下，模型的应变随时间 t 增加按指数规律增加，其中 τ_k 是一特征常数，由弹簧的弹

性系数 E 和粘性元件的粘滞系数 η 决定。在恒定应力作用下，模型不能产生瞬时变形，当变形达到恒定值 $\frac{\sigma}{E} \left(1 - \frac{1}{e}\right)$ 所需要的时间就是推迟时间^[22]。

由上述两个最简单的模型可知，两个模型不能同时描述纤维高聚物的应力松弛和蠕变过程，而是互补的。Maxwell 模型可以看成有弹性的液体，而 Kelvin-Voigt 模型可以看作是具有粘滞性的弹性固体。

(3) 三元件模型(开尔文标准线性固体模型)

由 Kelvin-Voigt 模型串联一个虎克弹簧组成，如图 3-7。根据串联原理，模型中并联的部分应变是相同的，应力为两者之和，容易得到模型的本构关系方程^[22]：

$$\frac{E_1 \eta}{E_1 + E_2} \dot{\varepsilon} + \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon = \frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} + \sigma \quad (3-39)$$

则此模型的蠕变方程^[22]为：

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (3-40)$$

蠕变方程 3-40 中，第一项表示急弹变形，第二项为缓弹变形，这里没有塑性变形，外加恒应力卸去后，变形可以完全恢复。

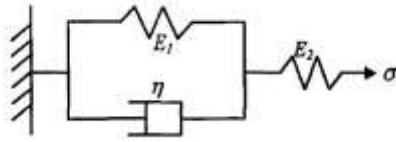


图 3-7 开尔文标准线性固体模型

(4) 六元件并联模型

谢莉清和张洪弟通过光杠杆法分析非织造土工布的蠕变性能，得到利用线性简易三元件力学模型能很好的模拟非织造土工布的蠕变性能^[27]。PTFE 滤料是 PTFE 覆膜纤维之间复合 PTFE 长丝基布，它的强力和抗蠕变性能明显优于非织造材料。简化滤料结构模型，把基布看作是一层非织造材料，及时两层非织造布复合在一起，若用三元件来模拟单一的非织造布，PTFE 覆膜滤料可以看作是由两个三元件模型相并联，本文是两个开尔文标准线性固体模型相并联，如图 3-8。

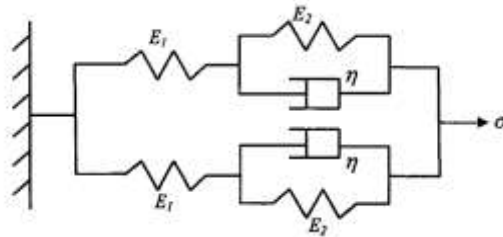


图 3-8 六元件并联模型

模型的本构关系式^[22]为：

$$\frac{E_1 + E_2}{2E_1 E_2} \sigma + \frac{\eta \sigma'}{2E_1 E_2} = \varepsilon + \frac{\eta}{E_2} \varepsilon' \quad (3-41)$$

PTFE 覆膜滤料的蠕变应变公式^[22]为：

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{2E_1} + \frac{\sigma}{2E_2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3-42)$$

王伟莎等在 2013 年完成了 $50 \times 100\text{mm}$ 的 PTFE 针刺非织造滤料在常温(23℃)和低载荷(20%)条件下的蠕变性能研究，部分数据如表 3-3 所示。采用公式 3-42 对表 3-4 的拟合方程

[22]为:

$$y = 7.4051 - 4.386e^{-0.3383x} \tag{3-43}$$

方程相关系数 $R^2 = 0.9144 > 0.85$ 拟合有效。通过将常数 p 、 q 、 k 还原为 E_1 、 E_2 、 η ，获得试样的应变公式[22]为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{30.42} + \frac{\sigma}{80.28} \left(1 - e^{-\frac{t}{121.31}}\right) \tag{3-44}$$

| 表 3-4 伸长量与时间关系 | | | |
|----------------|--------|------|--------|
| 时间 | 伸长量/mm | 时间 | 伸长量/mm |
| 1min | 2.33 | 8h | 6.63 |
| 2min | 2.52 | 15h | 6.72 |
| 4min | 2.75 | 20h | 6.81 |
| 6min | 2.87 | 30h | 6.97 |
| 10min | 3.14 | 72h | 7.19 |
| 13min | 3.56 | 100h | 7.48 |
| 20min | 3.87 | 120h | 7.67 |
| 25min | 4.21 | 168h | 7.78 |
| 30min | 4.78 | 216h | 7.88 |
| 1h | 5.02 | 264h | 7.97 |
| 2h | 5.37 | 360h | 8.15 |
| 3h | 5.85 | 480h | 8.23 |
| 5h | 6.21 | 500h | 8.28 |

由于国内外没有有关滤袋拉伸强度与长期使用时间的研究，本文参照武岳、叶瑾瑜[28]等在 2015 年完成的 PTFE 建筑膜材在常温环境中的耐候性试验数据进行类比，首先研究常温下 PTFE 材料断裂强度与应变之间的关系，进而推得 PTFE 滤袋的抗拉强度与使用时间的关系，部分数据如表 3-5 所示:

| 表 3-5 断裂强度保持率与时间和应变关系 | | | | |
|-----------------------|------|------|------|-------|
| 时间/年 | 1 | 2 | 4 | 7 |
| 应变/% | 9.43 | 9.67 | 9.90 | 10.08 |
| 经向强度保持率/% | 93.8 | 92.5 | 84.2 | 81.8 |
| 纬向断裂强度保持率/% | 92.9 | 92.1 | 88.7 | 84.1 |

表中应变的数据由式 4-18 计算得出，为确定经向断裂强度和纬向断裂强度保持率与应变的关系，本文分别对经向和纬向断裂强度保持率与应变做相关性分析，结果显示经向、纬向断裂强度与应变的相关系数 $p_1 = -0.9583$ 、 $p_2 = -0.9415$ ，说明经向和纬向的断裂强度保持率与应变都存在显著的线性相关关系，所以经向和纬向断裂强度保持率与应变的关系都

可以用式 4-19 表示:

$$\theta = a\varepsilon + b \quad (3-45)$$

其中 a 、 b 都是与材料有关的系数。

将式 4-14 带入 4-19 即可获得 PTFE 滤料在常温环境下断裂强度保持率 θ 对时间 t 的方程:

$$\theta = a \left(\frac{\sigma}{2E_1} + \frac{\sigma}{2E_2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \right) + b \quad (3-46)$$

采用 4-20 对经向断裂强度保持率和纬向断裂强度保持率与时间分别进行拟合, 得到拟合公式如 4-21 与 4-22, 拟合图像如图 3-9 所示。

$$\theta_j = 0.2173 e^{-0.2733t} + 0.7819 \quad (3-47)$$

相关系数 $R^2 = 0.9744 > 0.85$, 拟合有效。

$$\theta_w = 0.1621 e^{-0.3156t} + 0.8296$$

相关系数 $R^2 = 0.9545 > 0.85$, 拟合有效。

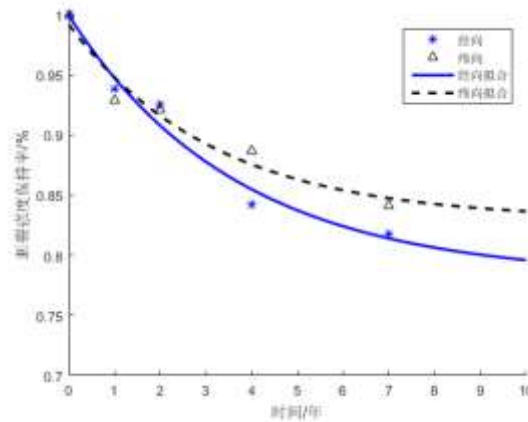


图 3-9 断裂强度-时间曲线

(5) 时温等效原理^[22]

在外力作用下, 高聚物材料从一种平衡状态通过分子运动过渡到另一种平衡状态是需要时间的, 这个时间被称为松弛时间, 这个过程被称为松弛过程。因为高聚物分子链间次价键作用力叫恰噶, 高分子运动单元的运动需要不断克服这种内聚摩擦阻力, 因而需要时间。运动单元大小不同, 所需时间不同。因此, 高聚物的松弛时间不是单一的, 而是一个比较宽松的时间分布, 即松弛时间谱。

高分子的运动也与温度有关, 温度增加, 一方面使运动单元活化, 使分子运动能量增加以克服运动单元以一定方式运动所需的位垒。另一方面是使高聚物的体积膨胀, 提供了运动单元可以活动的自由体积, 这样大大的加快了高聚物的松弛过程, 即松弛时间缩短了。

根据实验结果, 松弛时间 τ 和温度 T 有如下关系:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{\Delta E}{RT}} \quad (3-48)$$

式中 ΔE 为运动单元以某种方式运动所需的活化能; R 为气体常数; T 为绝对温度; τ_0 为常数。

上式表明温度增加, τ 下降, 松弛过程加快, 即可以在较短时间内观察到分子运动; 反之温度降低, τ 增加, 则需要较长时间才能观察到分子运动。因此, 同一个力学松弛现象即可移栽较高温度下和较短时间内观察到, 也可以在较低温度下和较长时间内观察到, 故升高温度与延长观察时间是等效的, 这个等效性可以借助一个转换因子 a_T 实现, 借助转换因子可以将某一温度下测定的力学数据变成另一温度下但在不同时间范围内的力学数据, 这就是时温等效原理的中心思想^[29]。

转换因子 a_T , 为温度的函数, 定义为: 在 T_1 、 T_2 两种温度下, 理想的高聚物蠕变应变如

图 3-10 所示, 根据时温等效原理, 将其中一条曲线沿横坐标平移 $\log a_T$, 两条曲线完全重合, 其中 $a_T = \frac{\tau}{\tau_s}$ 。

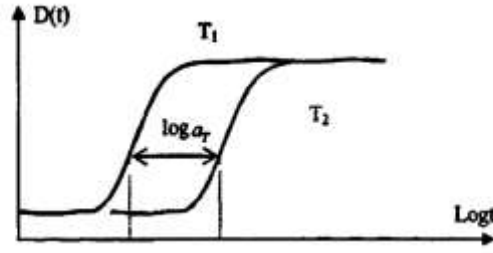


图 3-10 时温等效图

Williams Landel 和 Ferry 根据自由体积理论提出了经验公式, 即 WLF 方程^[30]:

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_S)}{C_2+T-T_S} \quad (3-49)$$

式中 C_1 、 C_2 是经验常数, T_S 为参比温度。因为 a_T 与温度和时间有关, 当选择不同温度作为参比温度时, WLF 方程的形式不变, 参数 C_1 、 C_2 不同。不同的材料, C_1 、 C_2 不同, 但有个普适常数即 $C_1 = 17.4$, $C_2 = 51.6$ 适用于没有特征的方程中。因此可以根据时温等效原理, 把常温下测得的蠕变和断裂强度数据, 根据上述公式, 进行运算, 得到高温下 PTFE 材料的力学性能。

3.3.3.2 断裂面积推导

滤袋在经过一段时间的磨损以后断裂面积可由初始断裂面积 S_0 和断裂面积保持率 θ_S 的乘积表示:

$$S = S_0 \theta_S \quad (3-50)$$

假设磨损长度一定, 断裂面积保持率 θ_S 可表示为:

$$\theta_S = \frac{S_0 - \Delta S}{S_0} = \frac{H_0 - \Delta H}{H_0} \quad (3-51)$$

式中 S_0 为初始断裂面积, ΔS 为磨损面积; H_0 为滤袋厚度, ΔH 为磨损深度

3.3.3.2.1 磨损深度推导

假设同一滤袋横向截面下, 非正对脉冲喷嘴部分受力情况相同, 且破损率较低。忽略气体喷吹过程中产生的热量, 以及该热量对滤袋该时刻性质的影响。测试点 O, 即滤袋上正对脉冲喷嘴的点, 其喷吹压力稳定, 气体湍流的影响效果较低。脉冲袋式除尘器清灰过程中的环境温度及出口负压稳定。清灰过程中的气室温度、压力稳定, 且喷吹气流紊流系数小。粉尘在滤袋形变达到最大时产生剥离。

首先磨损率进行定义, 磨损率是以单位时间内单位载荷下材料的磨损量表示:

$$\omega = \frac{V}{F \cdot S} \quad (3-52)$$

式中 ω 为磨损率(mm^3/Nm), V 为磨损体积(mm^3); F 为载荷(N), S 为荷所做功距离(m)

依据磨损率公式 3-52 可以获得磨损体积 V 为:

$$V = \omega Fvt \quad (3-53)$$

式中 v 为喷吹速度(m/s), t 为喷吹时间(s)。

假设磨痕处为一球形凹痕, 磨痕部位为圆弧 AB 凹槽部分, 又由于磨损部位相对滤袋而言很小, 且喷吹气流到喷吹点的时间很短, 因此可假设磨损部位的截面半径等于其喷嘴半径由几何关系得

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R \cdot r^2 - \frac{1}{3} \pi r^2 \cdot \sqrt{R^2 - (r)^2} \quad (3-54)$$

式中 R 为球形凹痕的曲率半径(mm), r 为脉冲清灰袋式除尘器的喷嘴半径(mm)。则该点的磨损深度 ΔH 可以表示为:

$$\Delta H = R - \sqrt{R^2 - (r)^2} \quad (3-55)$$

3.3.3.2.2 磨损率推导

通过 Rhee 的参数磨损方程进行定量分析, 方程形式为:

$$\omega = kF^a V^b t^c \quad (3-56)$$

ω 为聚合物材料损失; k 为磨损因子; F 为法向载荷; V 为滑动速度; t 为滑移时间; a, b, c 为与材料有关的参数。

根据附表中的数据, 获得法向载荷 F 、滑动速度 V 和滑移时间 t 与磨损率 ω 的关系如图 3-11 所示:

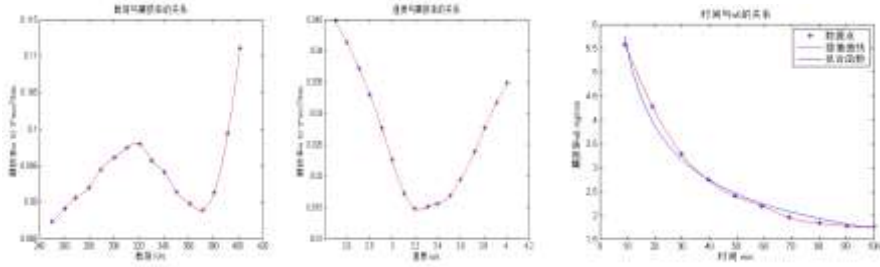


图 3-11 载荷、速度、时间与磨损率的关系

根据公式 3-56 对数据进行拟合, 得到拟合方程为:

$$\omega = (6.016 \times 10^3 F^3 - 2.089 F^2 + 1469 F) \cdot (-16.48 v^4 + 225.3 v^3 - 960.2 v^2 + 1328 v) \cdot t^{-0.504} \quad (3-57)$$

拟合公式相关系数 $R = 0.9901 > 0.85$, 拟合有效, 拟合曲线如图 3-12 所示:

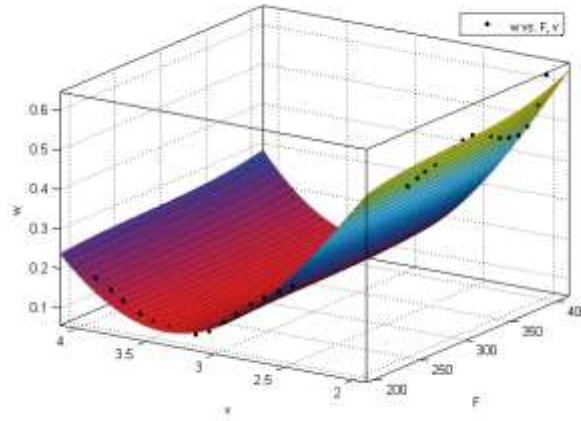


图 3-12 磨损率与载荷、速度的拟合曲线

3.3.3.3 滤袋外部合力推导

通过 W Humphries 与 J J Madden 推导出的，关于粉尘层和履带一起向外运动过程中由于滤带张力的作用使粉尘层从滤袋上分离的分离力公式：

$$F_d = 1.65 \frac{m_c}{m^6} K^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_p D^2}{t_R} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-57)$$

式中 F_d 为粉尘层从滤料上分离下来时单位面积上的分离力(N)， m_c 为单位面积滤料表面粉尘层的质量(g)， m 为单位面积滤料与粉尘层的质量之和(g)， P_p 为峰值压(Pa)， t_R 为峰值压到达时间(s)， K 为滤袋的弹性系数(kPa)， D 为滤料和粉尘层自由运动的位移，即相对初始位置的位移量(mm)。

对滤袋进行受力分析可知：

$$F = F_0 + 2F_p = ah\rho + 2(P - P_0)S \quad (3-58)$$

式中 F_p 为滤袋该部位所受的气压压力(N)， S 为为喷吹部位的截面面积(m^2)， a 为滤袋运动的加速度(m^2/s)， h 为为滤袋厚度(mm)， P_0 为滤袋的出口负压(Pa)， P 为峰压压值(Pa)， ρ 为滤袋材料的密度(g/mm^3)。

根据相关文献，利用附件中的数据，对一定条件下(0.3MPa 气源压力、脉冲阀开启时间为 100ms)，加速度、峰值压与距离的关系数据，获得加速度与峰压值随距离 x 变化的拟合方程为：

$$a = -0.1215x^3 + 1.525x^2 - 6.35x + 9.862 \quad (3-59)$$

当 $0.1 \leq x \leq 1.8$ 时

$$P = -5.741x^3 + 9.751x^2 + 0.8968x + 7 \quad (3-60)$$

$1.8 < x \leq 6$ 时

$$P = -0.04744x^3 + 1.118x^2 - 7.093x + 16.42 \quad (3-61)$$

拟合曲线如图 3-13 所示：

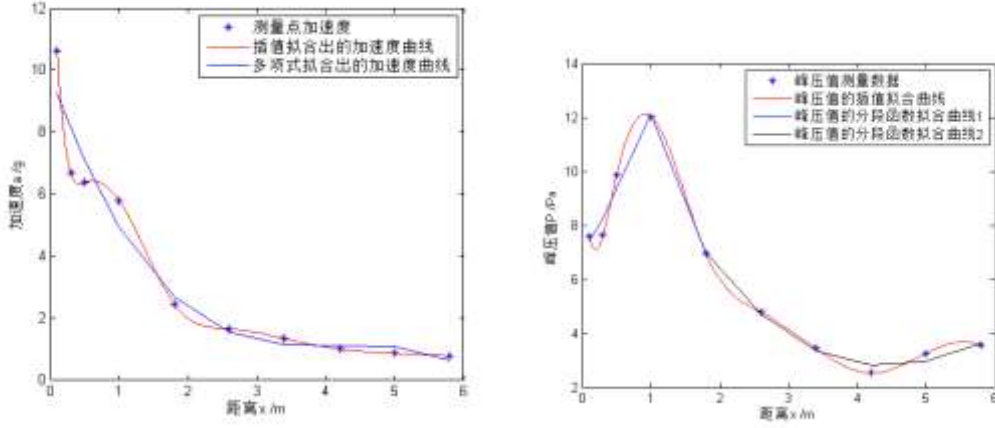


图 3-13 加速度、峰压值随距离变化关系

将公式 3-59、3-60、3-61 带入 3-58 可获得滤袋所受外部合力F为：

当 $0.1 \leq x \leq 1.8$ 时

$$F = (-0.1215x^3 + 1.525x^2 - 6.35x + 9.862)h\rho + (-5.741x^3 + 9.751x^2 + 0.8968x + 7.226 - P_0)\pi r^2 \quad (3-62)$$

当 $1.8 < x \leq 6$ 时

$$F = (-0.1215x^3 + 1.525x^2 - 6.35x + 9.862)h\rho + (-0.04744x^3 + 1.118x^2 - 7.093x + 16.42)\pi r^2 \quad (3-63)$$

3.3.4 滤袋糊袋子模型

根据相关文献可知，温度是导致滤袋糊袋的主要原因。由于国内外有关滤袋糊袋的相关研究比较少，且多为定量分析没有相关定性数据。因此本文定义了滤袋糊袋系数 γ 来表征温度对滤袋糊袋的影响

$$\gamma = \frac{T - T_l}{T_l} \quad (3-64)$$

式中 T_l 为露点温度，根据相关文献 $T_l = 130^\circ\text{C}$ 。

3.3.5 多元回归分析

通过滤袋破损子模型与滤袋糊袋子模型，本文获得了滤袋破损系数 δ 和滤袋糊袋系数 γ ，则袋式除尘系统实际工况下污染物的排放浓度 c_f 可以通过 δ 和 γ 表示，即：

$$c_f = c(\delta, \gamma) \quad (3-65)$$

但排放浓度 c_f 与滤袋破损系数 δ 和滤袋糊袋系数 γ 的关系为非线性的复杂的统计关系，缺乏相应的机理模型。为探究排放浓度 c_f 与滤袋破损系数 δ 和滤袋糊袋系数 γ 的关系，本文

采用多元非线性回归分析的方法来对袋式除尘系统实际工况下污染物的排放浓度进行预测。

为大致分析 c_f 与滤袋破损系数 δ 和滤袋糊袋系数 γ 的关系,首先利用附件中的数据做出 c_f 对 δ 和 γ 的散点图:

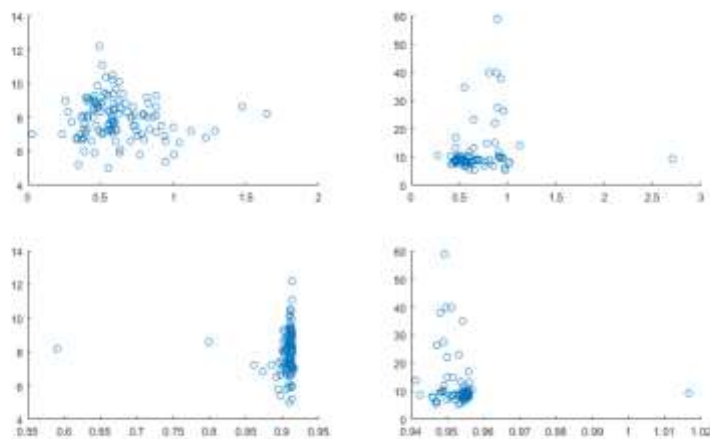


图 3-14 排放浓度 c_f 与滤袋破损系数 δ 和滤袋糊袋系数 γ 的散点图

观察散点图中的数据可知,无论 δ 和 γ 对 c_f 都呈指数增长的趋势,所以可以通过指数模型拟合。

破损系数拟合

$$c_f = ae^{b\delta} + \varepsilon \quad (3-66)$$

糊袋系数拟合

$$c_f = ae^{b\gamma} + \varepsilon \quad (3-67)$$

综合上面分析,结合 3-66 和 3-67 建立如下回归模型:

$$c_f = ae^{b\delta} + ce^{d\gamma} + \varepsilon$$

3.4 高斯扩散模型

3.4.1 模型简介

高斯扩散模式是在大量实测资料分析的基础上,应用湍流统计理论得到的正态分布假设下的扩散模式。一般总是把排放口或高架源在地面上的投影点作为坐标原点, x 轴正向沿平均风向水平延伸; y 轴在水平面上垂直 x 轴, x 轴左侧为正, z 轴垂直于水平面,向上为正,形成右手坐标系。

3.4.2 模型假设

假设所描述的扩散过程主要有以下几种:

- 1)下垫面平坦、开阔、性质均匀,平均流场平直、稳定,不考虑风场的切变;
- 2)污染源的源强均匀,连续

3)扩散过程中, 污染物本身是被动、保守的, 即污染物和空气无相对运动, 且扩散过程中污染物无损失、无转化, 污染物在地面被反射;

4)平均流场平直稳定, 平均风速和风向没有显著变化, 扩散在同一温度层集中发生, 平均风速大于 1.0m/s;

3.4.3 模型建立^[31]

当风速为 u m/s 时, 利用点源高斯扩散模型分析垃圾焚烧厂周边污染物浓度的变化情况。假设点源在没有任何障碍物的自由空间扩散, 不考虑下垫面的存在。

排烟口的实际高度为 H , 以排烟口在地面的投影点为坐标原点, 以风向方向为 x 轴, 铅直方向为 z 轴, 与 x 轴水平面垂直方向为 y 轴建立三维坐标系, 大气中的扩散是具有 y 与 z 两个坐标方向的二维正态分布, 当两坐标方向的随机变量独立时, 分布密度为每个坐标方向的一维正态分布密度函数的乘积。

所以下风向的任意一点

$C(x, y, z, t)$ 的浓度分布函数为:

$$C(x, y, z, t) = A(x) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (3-68)$$

式中:

C 代表空间点 (x, y, z) 的污染物的浓度, kg/m^3 ;

$A(x)$ 为待定函数;

σ_y 、 σ_z 分别为水平、垂直方向的标准差, 即 y 、 z 方向的扩散参数, m 。

由守恒和连续假设条件 1) 和 2), 在任一垂直于 x 轴的烟流截面上有:

$$q = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u C dy dz \quad (3-69)$$

式中: q ——源强, 即单位时间内排放的污染物, kg/s ;

u ——平均风速, m/s 。

将式(3-59)代入式(3-60), 由风速稳定假设条件 3), A 与 y 、 z 无关积分可得待定函数 $A(x)$:

$$A(x) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \quad (3-70)$$

将式(3-61)代入式(3-59), 得到空间连续点源的高斯扩散模式:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (3-71)$$

上式为无界空间连续点源扩散的高斯模型, 然而在实际中, 由于地面的影响, 烟羽是有界的. 根据假设可以把地面看做一镜面, 当污染物到达地面后被全部反射时, 可以按照全反射原理, 用“像源法”来求解空间某点 k 的浓度:

实源的贡献为:

$$C_1(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} \right) \quad (3-72)$$

像源的贡献为:

$$C_2(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \quad (3-73)$$

则该处的实际浓度为:

$$C(x, y, z) = C_1(x, y, z) + C_2(x, y, z) \quad (3-74)$$

综合上面的公式得到连续点源高斯烟羽扩散模型:

$$C(x, y, z, t, H) = \frac{Q(x)}{\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \left[\exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right] + \left[\exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right] \right\} \quad (3-75)$$

实际中,高架点源扩散问题中最关心的是地面浓度的分布状况,尤其是地面最大浓度值和它离源头的距离。令 $z=0$,地面全部反射时高架点源的地面浓度公式:

$$C(x, y, z, h) = \frac{Q(x)}{\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (3-76)$$

若已知地面某点的浓度 $C(x, y, z, h)$, 可根据公式(3-68)算出 $Q(x)$:

$$Q(x) = \frac{C\pi\sigma_y\sigma_z}{\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2}\right]\right\}} \quad (3-77)$$

①扩散参数 σ_y 、 σ_z 的确定^[32]

模型所需参数的选取对模型的求解至关重要,通常情况下利用该地区多年气象资料选取气象参数。本模型中选择我国 GB3840—91《制定地方大气污染物排放 标准的技术方法》采用的经验公式确定扩散参数 σ_y , σ_z :

$$\begin{cases} \sigma_y = \gamma_1 \cdot x^{\alpha_1} \\ \sigma_z = \gamma_2 \cdot x^{\alpha_2} \end{cases} \quad (3-78)$$

式中, γ_1 、 α_1 、 γ_2 及 α_2 称为扩散系数。这些系数由实验确定,在一个相当长的 x 距离内为常数。为了确定扩散系数,需要对该地大气稳定度等气象因素进行分析。大气稳定度等级的划分是使用帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分类法,分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定六级。它们分别由 A、B、C、D、E、F 表示。首先从式 3-79 算出太阳倾角 δ :

$$\delta = \vartheta(\theta) \times \frac{180}{1000\pi} \quad (3-79)$$

$$\begin{aligned} \vartheta(\theta) = & 6.918 - 399.912 \cos \theta_0 + 70.257 \sin \theta_0 - 6.758 \cos 2\theta_0 + 0.907 \sin 2\theta_0 \\ & - 2.697 \cos 3\theta_0 + 1.480 \sin 3\theta_0 \end{aligned}$$

$$\theta_0 = \frac{360d_n}{365} \quad (3-80)$$

d_n 是一年中日期序数, 取值为 0,1,2,...,365

计算出太阳高度角 h_0 :

$$h_0 = \arcsin\{\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos(15t + \lambda - 300)\} \quad (3-81)$$

φ 是当地纬度, t 是北京时间, λ 是当地经度 再从附件 A 由太阳高度角 h_0 和云量查出太阳辐射等级, 根据地面风速和附件 B 确定当时的大气稳定度。最后从附件 C 根据大气稳定度确定扩散系数。

2) 排烟口有效高度的确定

当烟气达到一定的高度后, 风速对抬升高度的影响会增大, 因此本文从有风不稳定、有风稳定以及无风三种情况分析并计算烟气抬升高度 ΔH 。

① 有风 ($u \geq 1.5 \text{ m/s}$):

中性和不稳定条件, 建议按下式计算烟气抬升高度 Δh 。

(1) 当烟气热释放率 Q_h 大于或等于是 2100 KJ/s , 且烟气温度与环境温度的差值 ΔT 大于或等于 35 K 时, ΔH 采用下式计算:

$$\Delta h = n_0 Q_h^{n_1} h^{n_2} u^{-1} \quad (3-82)$$

$$Q_h = 0.35 P_a Q_v \frac{\Delta T}{T_s} \quad (3-83)$$

其中, n_0 、 n_1 、 n_2 分别为烟气热状况及地表系数、烟气热释放率指数、排气筒高度指数, n_0 、 n_1 、 n_2 的选取见附件 D; Q_h 表示烟气热释放率, P_a 是大气压力, Q_v 为实际排烟率, ΔT 表示烟气出口温度与环境温度差, $\Delta T = T_s - T_a$, T_s 为烟气出口温, T_a 为环境大气温度。

(2) 当 $1700 \text{ KJ/s} < Q_h < 2100 \text{ KJ/s}$ 时,

$$\Delta h = \Delta h_1 + (\Delta h_2 - \Delta h_1) \frac{Q_h - 1700}{400} \quad (3-84)$$

$$\Delta h_1 = 2(1.5 V_s D + 0.01 Q_h) / u - 0.048(Q_h - 1700) / u \quad (3-85)$$

其中: V_s 表示排气筒出口处烟气排出速度, 单位为 m/s ; D 是排气筒出口直径, 单位为 m ; Δh_2 则按式 (14) 的方法计算, 按附件 D 中 n_0 、 n_1 、 n_2 中 Q_h 值较小的一类选取。

(3) 当 $Q_h \leq 1700 \text{ KJ/s}$ 或者 $\Delta T < 35 \text{ K}$ 时,

$$\Delta h = 2(1.5 V_s D + 0.01 Q_h) / u \quad (3-86)$$

② 有风 ($u \geq 1.5 \text{ m/s}$), 稳定条件, 建议按下式计算烟气抬升高度 Δh

$$\Delta h = Q_h^{\frac{1}{3}} \left(\frac{dT_\alpha}{dz} + 0.0098 \right)^{-\frac{1}{3}} u^{\frac{1}{3}} \quad (3-87)$$

其中, $\frac{dT_\alpha}{dz}$ 为烟囱几何高度以上的大气温度梯度, K/m 。这里要保证 $\frac{dT_\alpha}{dz} > -0.0098$ 。

③ 静风和小风 ($u < 1.5 \text{ m/s}$) 时, 建议按下式计算烟气抬升高度 Δh

$$\Delta h = 5.50 Q_h^{\frac{1}{4}} \left(\frac{dT_\alpha}{dz} + 0.0098 \right)^{-\frac{3}{8}} \quad (3-88)$$

式中符号同上, 但 $\frac{dT_\alpha}{dz}$ 取值不宜小于 0.01 K/m 。当 $-0.0098 < \frac{dT_\alpha}{dz} < 0.01 \text{ K/m}$ 时, 取 $\frac{dT_\alpha}{dz} = 0.01 \text{ K/m}$; 当 $\frac{dT_\alpha}{dz} \leq -0.0098 \text{ K/m}$ 时, 按 (1) 中的方法计算, 但风速 u 一律取 1.5 m/s 。

3.5 其他模型

3.5.1 垃圾焚烧飞灰粒径分布

垃圾焚烧飞灰的基本性质随垃圾的来源, 焚烧炉类型、焚烧操作条件的变化而有所差别, 其中可能含有大量的二恶英和重金属等污染物质。不同垃圾焚烧厂所产生的飞灰性质也不尽相同, 但与地域分布有很大关系。本文收集了中国各个地区飞灰筛下累积分布如表 1-1^[33]。

表 3-6 各地区飞灰筛下累积分布比较

| 广州市 ^[33] | | 华东地区 ^[34] | | 华北地区 ^[35] | | 西南地区 ^[36] | | 台湾地区 ^[37] | |
|---------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| 粒径分布 | 筛下累积 | 粒径分布 | 筛下累积 | 粒径分布 | 筛下累积 | 粒径分布 | 筛下累积 | 粒径分布 | 筛下累积 |
| /μm | 分布/% | /μm | 分布/% | /μm | 分布/% | /μm | 分布/% | /μm | 分布/% |
| <38.5 | 6.28 | <30 | 8 | <61 | 36 | <38 | 18.8 | <37 | 24.5 |
| 38.5~75 | 75.5 | 30~38.5 | 23 | 61~96 | 46 | 38~75 | 55.4 | 37~73 | 60.2 |
| 75~125 | 87.9 | 38.5~54 | 46 | 96~120 | 57 | 74~100 | 68.1 | 74~124 | 83.1 |
| 125~200 | 92.8 | 54~74 | 73 | 120~180 | 77 | 100~250 | 96.5 | 125~209 | 93.9 |
| 200~450 | 97.1 | 74~154 | 89 | 180~250 | 82 | 250~1000 | 99.8 | 210~296 | 98 |
| >450 | 100 | >154 | 100 | >250 | 100 | >1000 | 100 | >297 | 100 |

注：以上五个地区的飞灰均为炉排炉产生的垃圾焚烧飞灰
根据相关文献研究, 垃圾焚烧厂焚烧产生的粉尘粒径 d_p 分布服从对数正态分布规律^[13], 即:

$$f(\ln d_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_g}} \exp[-\frac{(\ln d_p - \ln d_{pm})^2}{2 \ln^2 \sigma_g}] \tag{3-89}$$

其中 d_{pm} 为中位粒径(m), σ_g 为几何标准偏差。为此本文对五组数据粒径的对数所对应的分布状况进行正态分布检验, 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下, 五组数据所对应的 p 值如表 1-2, 正态分布概率图如图 1-1:

表 3-7 不同地区的 p 值

| 地区 | 广州市 | 华东地区 | 华北地区 | 西南地区 | 台湾地区 |
|---------|-----|------|------|------|------|
| p-value | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

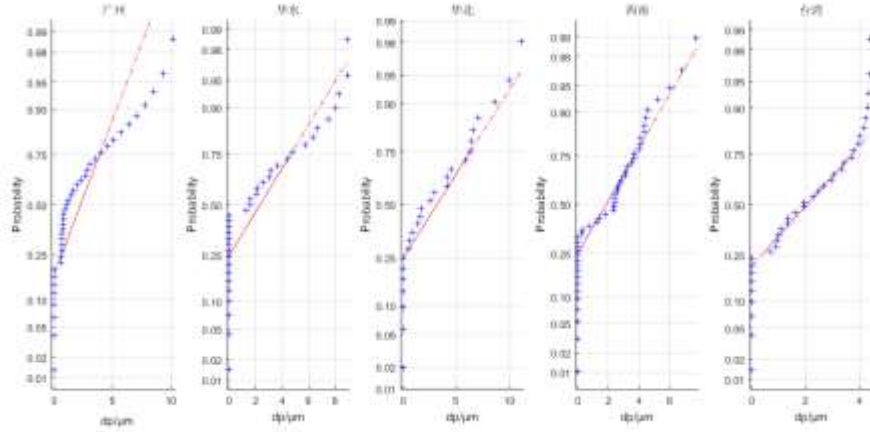


图 3-14 不同地区粉尘粒径对数的概率分布图

3.5.2 垃圾焚烧烟气排放量方程

(1) 单位重量燃烧所需空气量计算^[38]

$$L_0 = 8.89C + 267.H + 3.33S - 3.33O \quad (3-90)$$

式中 L_0 为垃圾燃烧所需理论空气量(Nm^3/kg), C 、 H 、 S 、 O 分别为垃圾应用中相对应元素的比例

(2) 单位重量燃烧产生的总烟气量计算^[38]

$$L_v = (\alpha - 0.21)L_0 + 1.867C + 0.7S + 0.8N + 11.2H + 0.62Cl + 1.24W \quad (3-91)$$

式中 L_v 为垃圾燃烧产生的总烟气量(Nm^3/kg), $\alpha=1.8$ 为空气过剩系数, W 为垃圾含水率, 其余参数意义同上。

3.5.3 二噁英吸附率

垃圾焚烧产生的二噁英组成成分复杂, 有气相和固相两种形态, 分别被活性炭和粉尘吸附。经查阅相关文献^[22], 二噁英的吸附率约为 98.10%, 对应二噁英排放浓度 c_{TCDD} 为:

$$c_{TCDD} = c'_{TCDD}[0.981(1 - \eta) + 0.019] \quad (3-92)$$

式中 c'_{TCDD} 为二噁英的原始浓度, η 为颗粒物的除尘效率

四、 模型求解

4.1 深圳市生活垃圾分析

4.1.1 深圳市生活垃圾成分分析

生活垃圾中含水率比较高,不宜直接进行燃烧,需要经过一段时间的酵解之后才能进行垃圾焚烧发电。本文参照深圳市宝安区老虎坑垃圾焚烧厂 2014 年 4 月和 2015 年 3 月的垃圾成分及热值检测结果报表^[39],对深圳市 2015 年生活垃圾的垃圾组成分析、垃圾工业分析、垃圾元素分析、垃圾热值等四方面的分析。垃圾酵解 1、3、5 天的分析结果如图 1-3、1-4、1-5、1-6 所示。

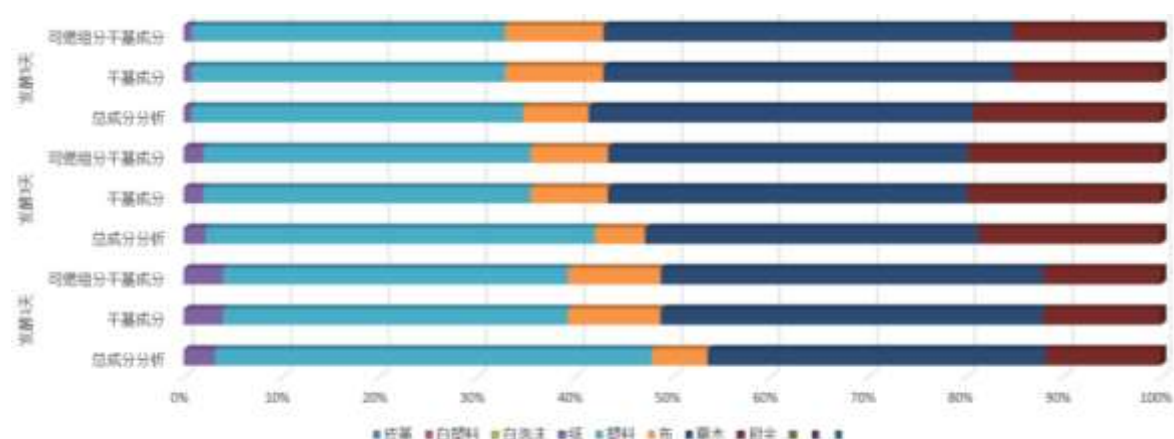


图 4-1 垃圾组成成分分析

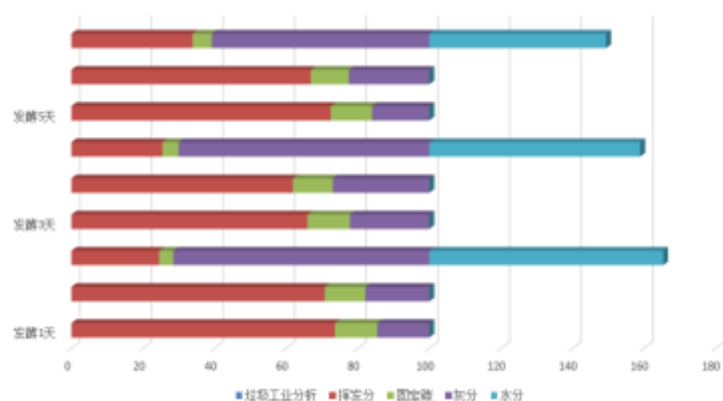


图 4-2 垃圾工业分析

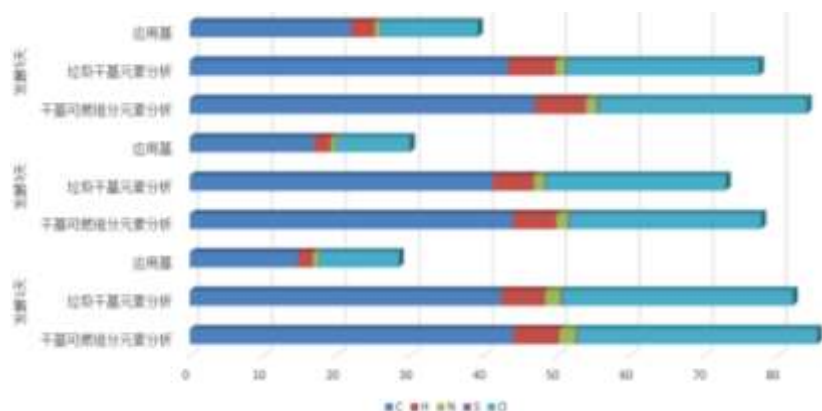


图 4-3 垃圾元素分析

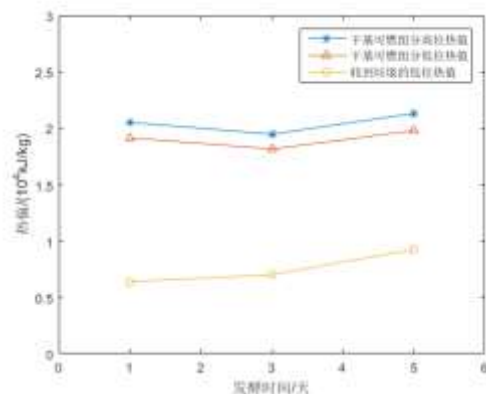


图 4-4 热值分析

根据垃圾的热值特性分析数据^[39]，深圳市垃圾焚烧厂的进场垃圾低位热值的平均值约为6300kJ/kg，经过五天发酵，在垃圾池中去除 15%的渗滤液后，垃圾低位热值增加约1000kJ/kg，则入炉垃圾低位热值约为 7300 kJ/kg。为更好地预测当前深圳市生活垃圾现状，本文在后文计算中采用深圳市宝安区老虎坑三期环评报告书中提供的数据，相关数据如表 1-3 和 1-4 所示

表 4-1 垃圾设计参数^[39]

| | |
|---------------|------------------------------|
| 垃圾低位热值 | 最高：10467 kJ/kg (2500kcal/kg) |
| | 最低：6280kJ/kg (1500kcal/kg) |
| | 设计点：8792 kJ/kg (2100kcal/kg) |
| 垃圾中不可燃物(灰分)含量 | 18~22% |

表 4-2 设计进炉垃圾成分和热值一览表^[39]

| 低位热值 | | H ₂ O | 灰分 | C | H | O | N | S | Cl |
|-------|---------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| kJ/kg | kcal/kg | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| 8792 | 2100 | 46 | 19.1 | 18.6 | 2.81 | 12.5 | 0.50 | 0.15 | 0.34 |

1.1.2 深圳市垃圾焚烧飞灰粒径

由于没有找到深圳市垃圾焚烧颗粒物粒径相关数据，而广州市在地理、气候、生活垃圾成分等方面与深圳市有一定的相似性，因此本文参考广州市某垃圾焚烧厂布袋除尘器飞灰进行研究^[22]。对用公式 3-89 对广州市生活垃圾焚烧飞灰粒径的拟合方程如式

$$f(d_p) = \frac{1}{2.54 \times 10^{-4} d_p} \exp \left(- \left(\frac{\ln d_p - 4.01}{0.399} \right)^2 \right)$$

相关系数 $R^2 = 0.9871 > 0.85$,拟合有效。拟合曲线如图 4-5 示。

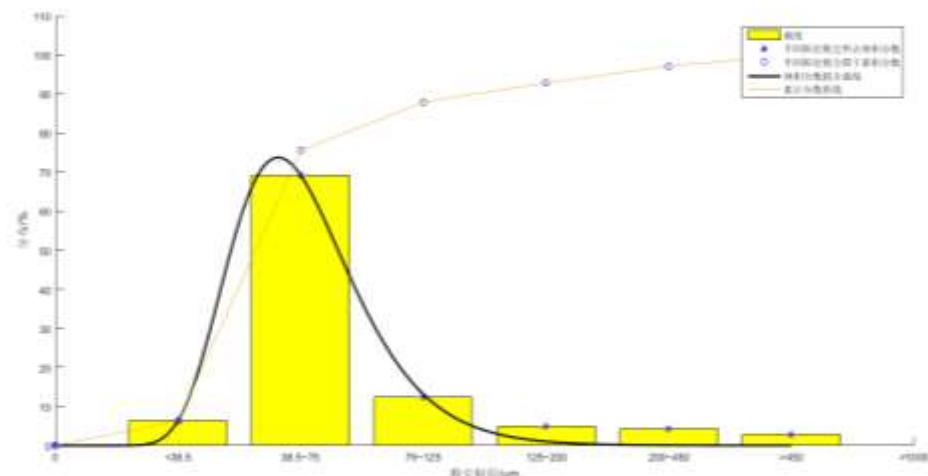


图 4-5 广州市垃圾焚烧粉尘粒径分布和筛下累积分布

根据拟合解得广州市生活垃圾焚烧飞灰的粒径均值为27.82μm

4.1.3 垃圾焚烧烟气排放量计算

垃圾焚烧的烟气产生量与生活垃圾的元素组成有密切关系，将表 1-4 中的数据带入公式 3-90，3-91，解得深圳市入炉垃圾的烟气产生量为4400Nm³/t

4.1.4 烟气中污染物的产生浓度

垃圾焚烧过程中烟气污染物的产生浓度，与进炉垃圾成分有着密切的关系，同时焚烧工况也会直接影响氮氧化物、二噁英等的产生浓度。根据白良成编著的《生活垃圾焚烧处理工程技术》，生活垃圾焚烧主要烟气污染物的原始浓度老虎坑垃圾焚烧厂二期最大浓度，三期设计浓度整理的数据和本文采用数据^[40]如表 1-5:

表 1-5 生活垃圾焚烧烟气污染物原始浓度一览表

| 污染物名称 | 参考浓度 ^① mg/Nm ³ | 二期最大浓度 ^② mg/Nm ³ | 三期设计浓度 ^③ mg/Nm ³ | 本文采用浓度 mg/Nm ³ |
|-----------------------------|---|---|---|------------------------------|
| 颗粒物 | 1000~6000 | 1203 | 1000~5000 | 3000 |
| NO _x | 90~500 | 34.0 | 300~400 | 350 |
| SO ₂ | 20~800 | - | 500~900 | 700 |
| HCl | 200~1600 | 826 | 800~1300 | 1050 |
| Pb+Sb+As+Cr+ Co+Cu+Mn+Ni | 1~50 | 4.50 | 5~30 | 17.5 |
| Hg | 0.1~10 | 0.00032 | 0.1~0.2 | 0.15 |
| Cd+Tl | 0.05~2.5 | 1.404 | 0.05~2.5 | 1.25 |
| 二噁英类 (TEQ) | 1~10 ng/m ³ | 1.95 ng/m ³ | <5 ng/m ³ | 2.5 ng/m ³ |

注：①《生活垃圾焚烧处理工程技术》，生活垃圾焚烧烟气污染物原始浓度一览表^[7]

- ②老虎坑垃圾焚烧发电厂二期工程环保竣工验收实测烟气污染物最大产生浓度一览表
- ③老虎坑垃圾焚烧发电厂三期工程焚烧烟气污染物设计产生浓度一览表

4.2 正常工况与实际工况污染物排放求解

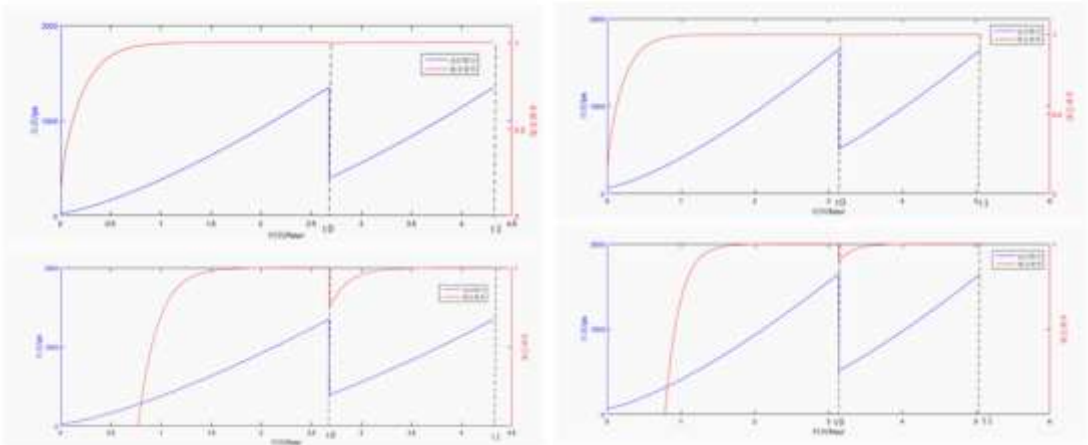
4.2.1 正常工况条件下除尘效率、运行阻力及清灰周期求解

在已知袋式除尘系统相关参数的条件下，袋式除尘系统正常工况下的除尘效率只与颗粒物浓度 c_0 ，烟气流量 L ，烟气温度 T 和设备最大运行阻力 P 这四个因素有关。依据附表 2、附表 3 中的袋式除尘系统的相关参数，假定 1 号炉和 2 号炉的颗粒物浓度 c_0 ，烟气流量 L ，烟气温度 T 和设备最大运行阻力 P 如表 4-6 所示：

表 4-6 除尘效率相关参数

| 设备 | 颗粒物浓度(mg/Nm³) | 烟气流量(Nm³) | 烟气温度(°C) | 设备最大运行阻力(Pa) |
|------|---------------|-----------|----------|--------------|
| 1 号炉 | 2500 | 300000 | 207.5 | 1350 |
| 2 号炉 | 2500 | 300000 | 207.5 | 1650 |

将表 4-7 中的数据带入公式 3-24 和 3-28，计算出 1 号炉和 2 号炉运行阻力与除尘效率随时间变化的曲线如图 4-7：



注：左侧上下分别为一号炉除尘效率在 0~1 和 0.98~1 范围内的曲线，右侧上下分别为二号炉除尘效率在 0~1 和 0.98~1 范围内的曲线

图 4-7 除尘效率和运行阻力随时间变化曲线

图 4-1-3 表示的为除尘效率和运行阻力的两阶段图像，其中 $0\sim t_0$ 阶段为为清洁滤料的除尘效率和运行阻力随时间变化的曲线， $t_0\sim t_1$ 阶段由于脉冲清灰过程不能使粉尘层完全剥离，此阶段除尘效率与运行阻力与 $0\sim t_0$ 阶段不同，并且之后的除尘效率和运行阻力的变化趋势与 $t_0\sim t_1$ 阶段相同， $0\sim t_0$ 阶段时间很短可以忽略，所以本文对 $t_0\sim t_1$ 阶段的曲线进行积分，求出一号炉的除尘效率均值 $\eta_1 = 99.82\%$ ，二号炉的除尘效率均值 $\eta_2 = 99.72\%$ 。

4.2.2 实际污染物排放量估算

利用滤袋破损模型中对滤袋的破损系数 δ 和糊袋系数 γ 进行回归分析，以一号炉为例获得一号炉袋式除尘系统实际工况 c_f 排放浓度对破损系数 δ 和糊袋系数 γ 的回归方程为：

$$c_f = 0.721e^{1.667\gamma} + 3.14 \times 10^{-17}e^{43.6\delta} + 0.2187$$

拟合图像如图 5-1 所示

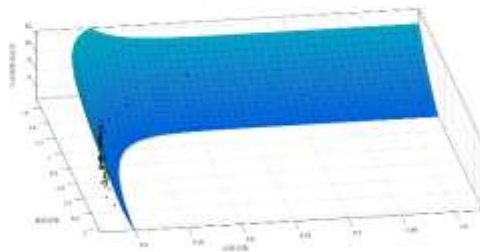


图 5-1 随破损系数 δ 和糊袋系数 γ

为验证模型正确性，将附件中提供的数据带入回归方程得到实际工况排放浓度的估计，并与实际工况排放浓度进行比较如图 5-2 所示。

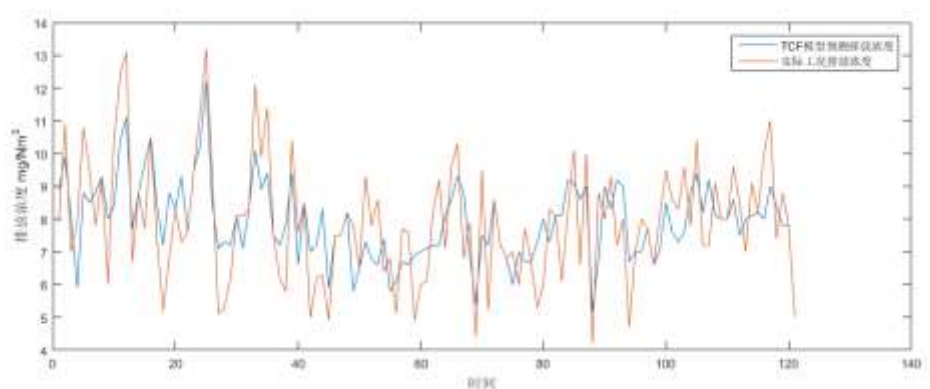
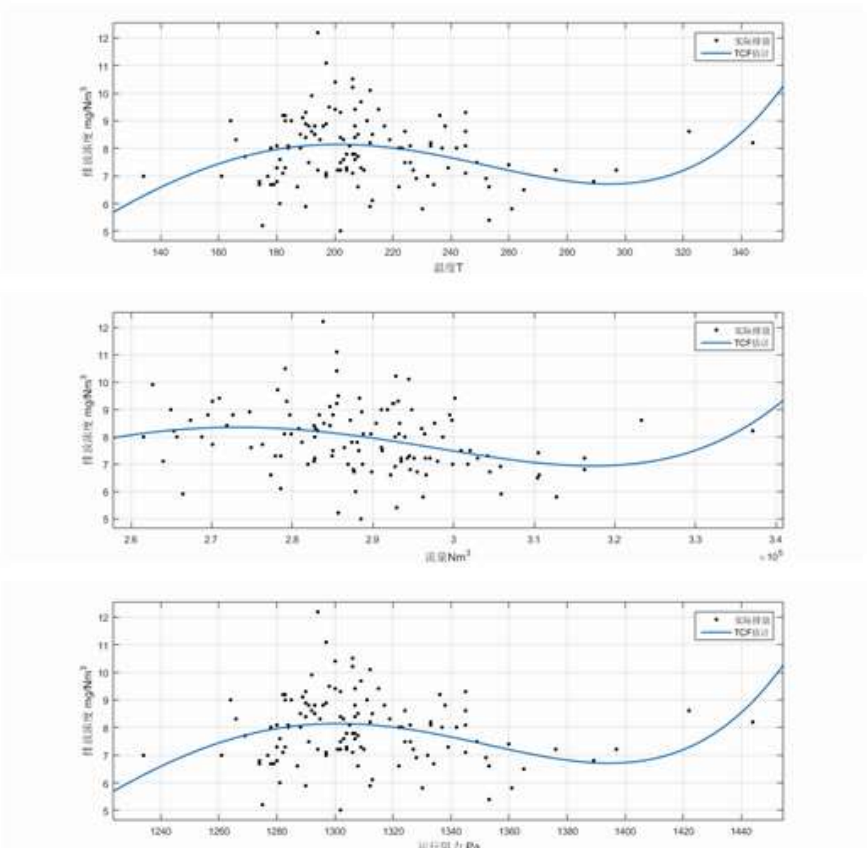


图 5-2 TCF 损坏模型预测排放浓度与实际排放浓度

通过对图片分析，可以认为滤袋 TCP 损坏模型可以较为准确的预测在给定运行条件下，垃圾焚烧厂污染物实际排放浓度。在确定垃圾焚烧厂袋式除尘系统相关运行参数的条件下，

袋式除尘系统的实际排放浓度只与温度 T 、烟气流量 V 还有清灰阻力 P 相关，对三个因素的分



析如图 5-3 所示

4.3 污染物排放浓度稳定性求解

4.3.1 颗粒物排放浓度稳定性分析

根据附件中便携分析仪提供的相关数据，假定垃圾焚烧厂袋式除尘系统烟气入口浓度都为 $2500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，一号炉的运行阻力为 1350Pa ，二号炉的运行阻力为 1650Pa 。计算出 1 号炉和 2 号炉袋式除尘系统正常工况和实际工况粉尘浓度变化曲线图图 4-8 和图 4-9 所示：

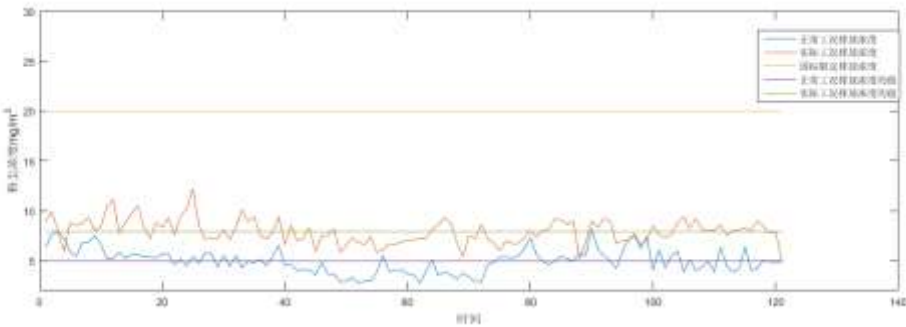


图 4-4-1 一号炉粉尘浓度变化

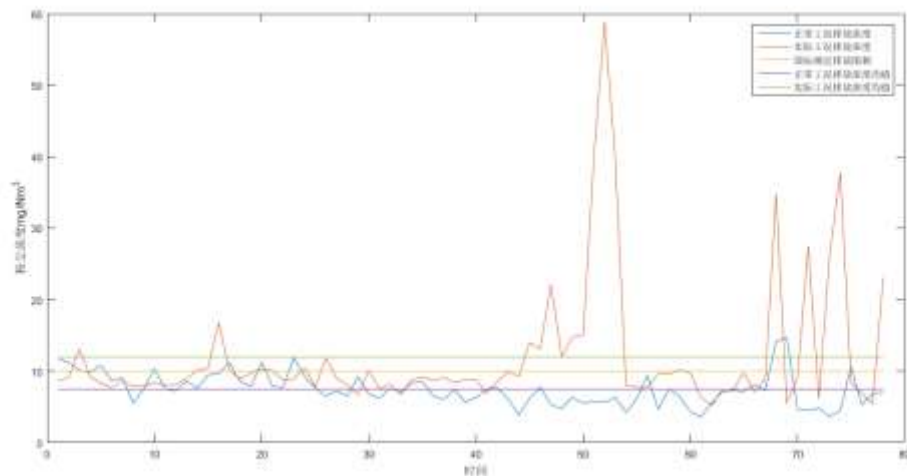


图 4-4-1 二号炉粉尘浓度变化

根据公式 3-1 解得一号炉的除尘效率稳定性 $\varphi_1 = 0.2198$ ，二号炉的除尘效率稳定性 $\varphi_2 = 0.8427$.根据除尘效率稳定性的定义 φ 越大，袋式除尘系统越不稳定， $\varphi = 1$ 为稳定性限值，当 $\varphi > 1$ 时袋式除尘系统运行过程排放浓度超标。因此一号炉和二号炉的袋式除尘系统均处于稳定状态，但一号炉稳定性高于二号炉的稳定性。一号炉正常工况下颗粒物排放浓度为 4.963 mg/m^3 ，二号炉正常工况下颗粒物排放浓度为 7.464 mg/m^3

4.3.2 二噁英排放浓度稳定性分析

根据附件中便携分析仪提供的相关数据，假定垃圾焚烧厂袋式除尘系统烟气入口浓度都为 2500 mg/Nm^3 ，一号炉的运行阻力为 1350 Pa ，二号炉的运行阻力为 1650 Pa 。计算出 1 号炉和 2 号炉袋式除尘系统正常工况和实际工况二噁英浓度变化曲线图图 4-10 和图 4-11 所示：

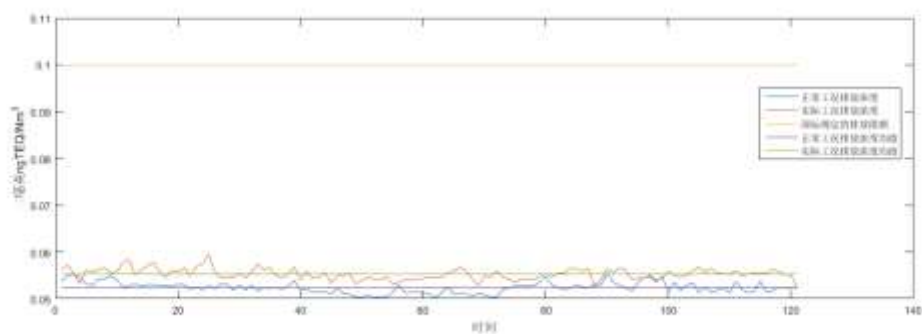


图 4-10 一号炉二噁英排放浓度随时间变化

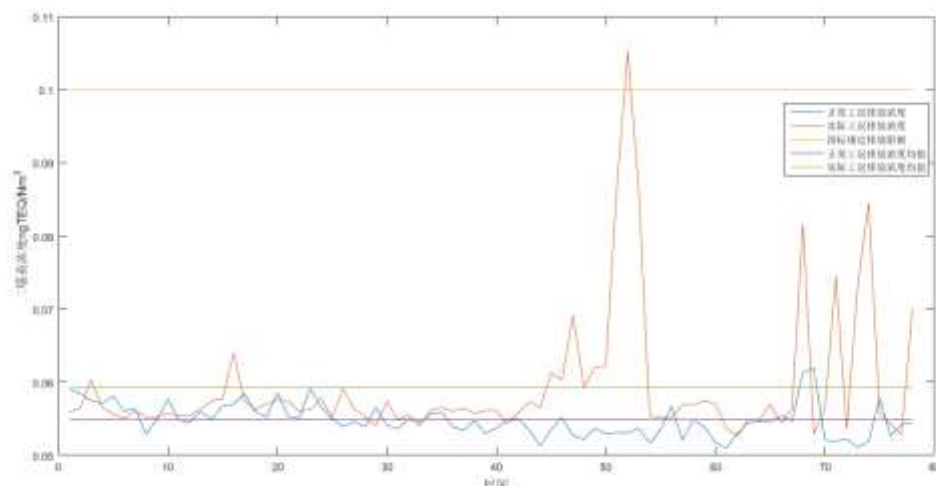


图 4-11 二号炉二噁英排放浓度随时间变化

根据公式 3-1 解得一号炉的除尘效率稳定性 $\varphi_1 = 0.0040$, $\varphi_2 = 0.0130$ 。一号炉正常工况下二噁英排放浓度为 0.009713 ng/m^3 , 二号炉正常工况下二噁英排放浓度为 0.01221 ng/m^3 。根据袋式除尘系统稳定性的定义, φ 越大, 袋式除尘系统越不稳定, $\varphi = 1$ 为稳定性限值, 当 $\varphi > 1$ 时袋式除尘系统运行过程排放浓度超标。因此一号炉和二号炉的袋式除尘系统均处于稳定状态, 但一号炉稳定性高于二号炉的稳定性。

4.3.3 重金属污染物排放浓度稳定性

根据附件中便携分析仪提供的相关数据, 假定垃圾焚烧厂袋式除尘系统烟气入口浓度都为 2500 mg/Nm^3 , 一号炉的运行阻力为 1350 Pa , 二号炉的运行阻力为 1650 Pa 。根据公式 3-1, 计算出一号炉和二号炉对于重金属污染物的袋式除尘系统运行稳定性如图 4-12 所示:

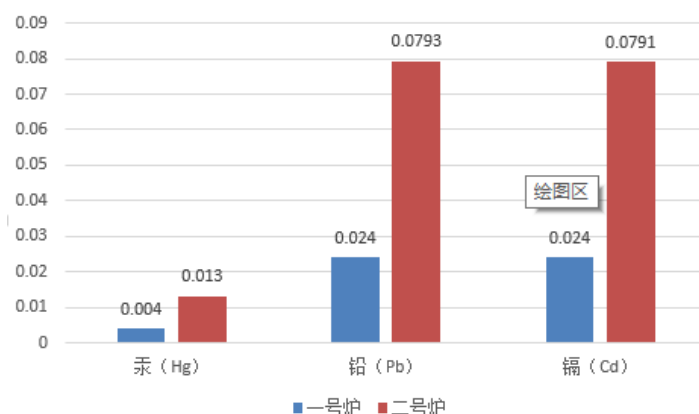


图 4-12 重金属污染物对应的稳定性

通过对图 4-12 分析可知, 虽然对于重金属污染物排放, 二号炉稳定性仍低于一号炉, 但均未超过 0.1, 可以认为对于重金属污染物的排放, 一号炉和二号炉袋式除尘系统的运行是稳定的。

4.4 扩建规模的求解

4.4.1 深圳市气象条件的确定

深圳是中国南部海滨城市，毗邻香港。位于北回归线以南，东经 $113^{\circ} 46'$ 至 $114^{\circ} 37'$ ，北纬 $22^{\circ} 27'$ 至 $22^{\circ} 52'$ 。地处广东省南部，珠江口东岸，深圳属亚热带季风气候，长夏短冬，气候温和，日照充足，雨量充沛。

1、风速风向的确定

由深圳市从1995年到2014年累年各月平均风速数据知，深圳市年平均风速为3.5m/s，深圳市各月平均风速如图4-13所示：

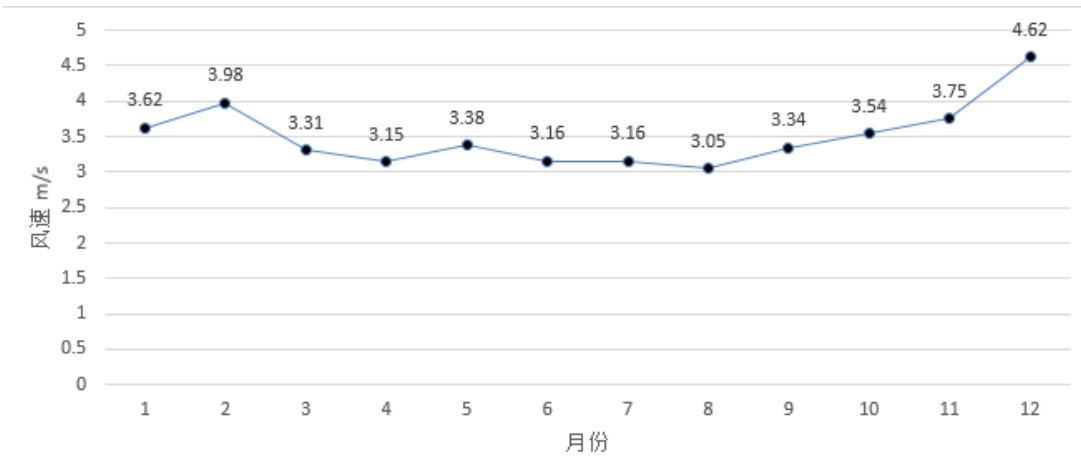


图 4-13 深圳市各月平均风速

深圳市的主风向为东北风，累年各项风频如图4-14所示

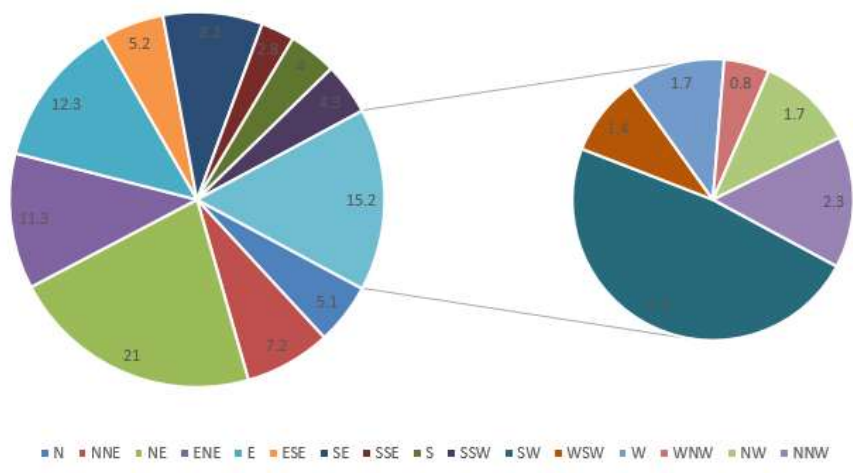


图 4-14 深圳市累年各项风频

2、扩散参数 σ_y σ_z 的确定

通过对正午太阳高度角的统计计算发现数据集中在 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ，太阳辐射等级在多数+1~-1之间，结合风频风速统计数据，确定大气稳定度选择D，从而 σ_y σ_z 的确定由下列公式计算：

$$\sigma_y = 0.08x(1 + 0.001x)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_z = 0.06x(1 + 0.015x)^{\frac{1}{2}}$$

3、烟气抬升高度 ΔH 的计算

根据深圳市的具体地理参数， ΔH 详细计算方法如下：

模型中 P_a 取标准大气压强 $1013.25P_a$ ，查找文献资料可知 Q_v 为 346687.5 KJ/s ， $T_s=273 \text{ K}$ ， $\Delta T = 20 \text{ K}$ ，即可得出 $Q_h=2502.02 \text{ KJ/s}$ 。再由附件 D 得 n_0 、 n_1 、 n_2 ，取风速 u 。得到计算公式：

$$\Delta H = (0.332 \times (2502.02^{\frac{3}{5}}) \times (h^{\frac{2}{5}}))/u$$

从而排烟口的有效高度为：

$$h = H + \Delta H$$

4.4.2 大气污染物检测敏感点的选取

由于不清楚题目中给出的垃圾焚烧厂的具体位置，本文以深圳市宝安区老虎坑垃圾焚烧发电厂为例^[39]，参考《深圳市宝安区老虎坑垃圾焚烧发电厂三期环评》，根据《建设项目风险技术评价导则》(HJ/T169-2004),确定污染物评价范围为以烟囱为中心半径 3000m 的范围，敏感点如图 4-15 所示：

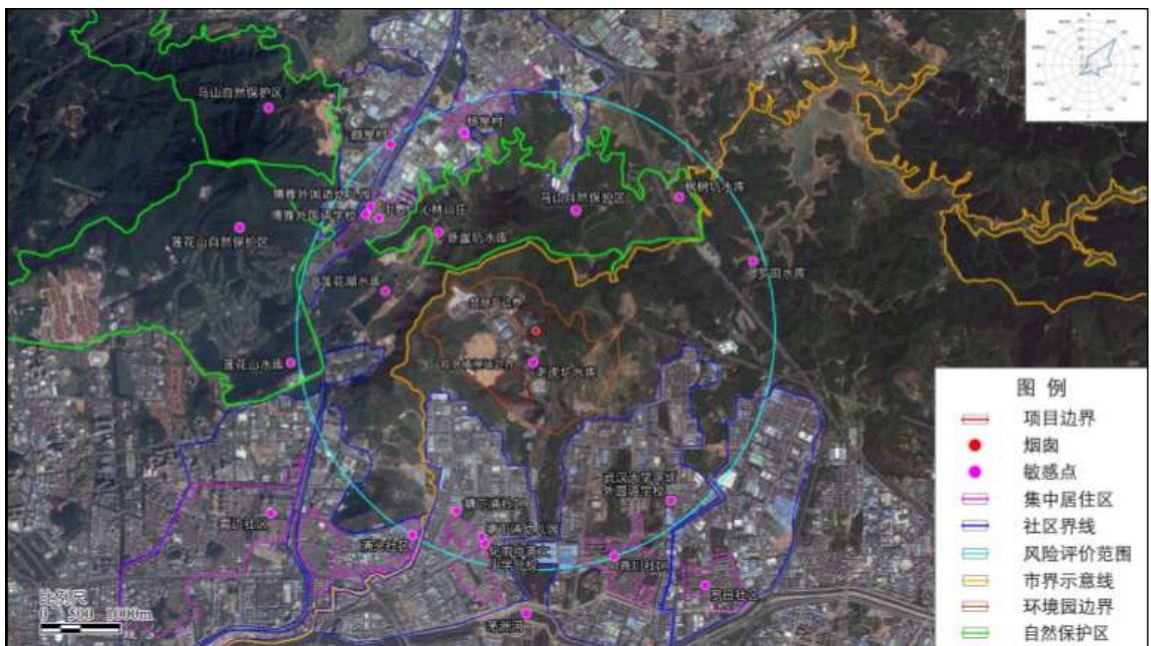


图 4-15 环境保护目标分布示意图

为简化数据处理的复杂度，本文在众多敏感点选取五个有代表性的敏感点，用以计算污染物排放限额。敏感点的情况和地理位置分别如表 4-8 和图 4-16 所示：

| 表 4-8 敏感点数据 ^[39] | | | | | | |
|-----------------------------|---------|---------------|---------------|-------------|------------------|------|
| 编号 | 监测点 | 坐标 | 相对于焚烧厂的方位角与方向 | 距离厂区距离 m | 主风频月 | 最小风速 |
| 1# | 马鞍山生态公园 | N 22°50'28.0" | 19° NNE | 1819.49 | 1, 2, 3, 11, 12 | 4.15 |
| | | E 113°51'26.8 | | | | |
| 2# | 中惠·沁林山庄 | N 22°50'18.9" | 303° WNW | 2608.81 | 1, 2, 3, 11, 12 | 2 |
| | | E 113°49'48.9 | | | | |
| 3# | 莲花山水库旁 | N 22°49'35.0" | 268° W | 2417.29 | 4, 5, 6, 7, 8 | 2.67 |
| | | E 113°49'40.5 | | | | |
| 4# | 塘下涌村 | N 22°48'08.7" | 192° SSW | 2629.44 | 4, 5, 6, 7, 8, 9 | 2.8 |
| | | E 113°50'44.9 | | | | |
| 5# | 燕川社区 | N 22°48'06.2" | 158° SSE | 2854.11 | 4 | 5.94 |
| | | E 113°51'43.0 | | | | |



图 4-16 敏感点分布图

其中 1#、3#监测点位于大气一类区，执行一类区相应标准，其余监测点执行二类区标准。一类区直径小于 15μm 颗粒物浓度年平均标准为 55μg/Nm³，二类区直径小于 15μm 颗粒物年平均标准为 115μg/Nm³^[39]。

4.4.3 污染物排放量限值计算

要考虑污染物的排放限值，需保证所有的点污染物的监测结果都要符合大气污染排放标准。因此本文在计算时考虑所有敏感点的极端情况，即当风向朝向敏感点时，根据标准和敏感点坐标计算出烟囱排放量限值。

4.4.3.1 颗粒物决定的扩建规模计算

1、颗粒物排放限值计算

利用表 4-8 中提供的敏感点的数据,由公式 3-77 高斯扩散模型计算出的各敏感点单位时间内颗粒物的最大排放量如图 4-17:

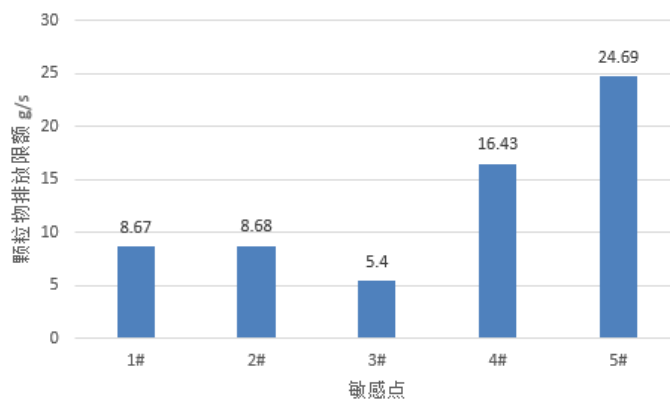


图 4-17 各敏感点颗粒物排放限额

考虑到最极端的情况,排放量的限值为 $Q_{lim} = 5.4\text{g/s}$ 。

2、颗粒物排放浓度的计算

由公式 4-24 和 4-28 计算出一号炉与二号炉袋式除尘系统的除尘效率均值,假定垃圾焚烧厂颗粒物入口浓度均值 $C_0 = 2500\text{mg/Nm}^3$,求得一号炉袋式除尘系统正常工况下的污染物排放浓度 $C_{n1} = 4.963\text{mg/Nm}^3$,二号炉 $C_{n2} = 7.464\text{mg/Nm}^3$ 。已知一号炉的稳定性 $\varphi_1 = 0.2198$,二号炉的稳定性 $\varphi_2 = 0.8427$ 。根据公式(3-90)可求得排放浓度。

一号炉的排放浓度:

$$C_{t1} = 8.268 \text{ mg/Nm}^3$$

二号炉的排放浓度:

$$C_{t2} = 18.028 \text{ mg/Nm}^3$$

$$C_t = (C_{t1} + C_{t2})/2 = 13.148 \text{ mg/Nm}^3$$

3、颗粒物决定的垃圾焚烧厂扩建规模上限计算

排放流量由排放量和排放浓度计算得到:

$$V = \frac{Q}{C}$$

得到最大排放流量:

$$V_{max} = 410.708 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

参照宝安三期环评提供的数据,假定垃圾焚烧厂每年工作 8000h,则该垃圾焚烧厂一年最大的烟气产生量为 $1.18 \times 10^9 \text{ Nm}^3/\text{y}$,根据 4.1.3 可知深圳市一顿垃圾产生的烟气量为 4400 Nm^3 ,所以该垃圾焚烧厂依据颗粒物给出的年处理规模的上限约为为 268.8 万吨/y,折合 7365.14 t/d。

4.4.3.2 垃圾焚烧厂环境允许扩建规模的确定

参照颗粒物决定的最大环境允许扩建规模的计算过程，分别计算二噁英、和重金属类污染物决定的日处理量上限如图 4-18 所示：

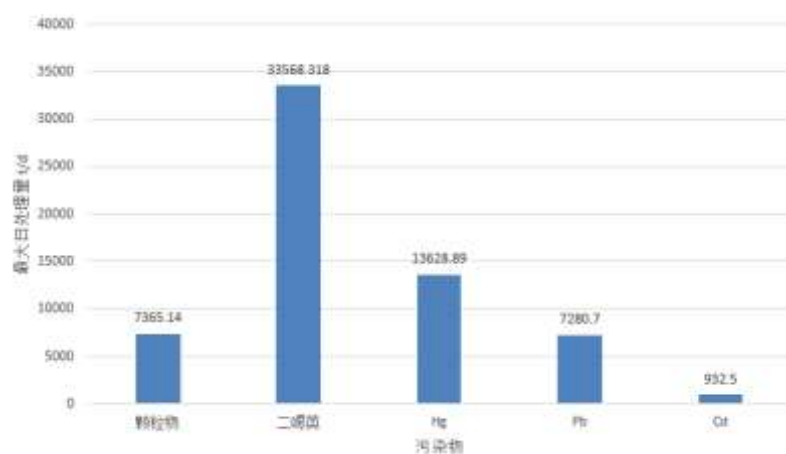


图 4-18 各污染物所决定的垃圾焚烧厂最大日处理量

根据图 4-18 知，当周围环境的颗粒物浓度达到环境空气质量评价执行标准上限时，垃圾焚烧厂的垃圾日处理量为 7365.14 t/d；当二噁英浓度达到环境空气质量评价执行标准上限时，垃圾焚烧厂的垃圾日处理量为 33568.18t/d；当重金属浓度达到环境空气质量评价执行标准上限时，垃圾焚烧厂的垃圾日处理量为分别为 13628.89 t/d、7280.7 t/d、932.5 t/d。

为了保证所有指标均符合环境空气质量评价执行标准，要取所有计算值的最小值。即垃圾焚烧厂扩建规模上限为 932.15 t/d，而根据该垃圾焚烧厂提供的流量数据，该垃圾焚烧厂的日处理量约为 1200 t/d,如果该垃圾焚烧厂位于宝安区老虎坑，则该垃圾焚烧厂无再扩建潜力，如果仅以颗粒物为排放标准，则该垃圾焚烧厂环境允许的最大扩建规模为 7365.4 t/d。

4.5 监测方案设计

垃圾焚烧厂运营期环境监测是从保护环境与人群健康出发，针对焚烧厂周边的环境特殊性，设置经常性的环境监测点与监测项目，掌握运营过程中的环境质量动向，提高环保效益，积累日常环境质量资料。

4.5.1 监测方案设计

本文在查阅相关资料和充分理解袋式除尘的基础上提出如下监测方案。

- 1、**确定敏感点** 根据垃圾焚烧厂所在地的自然环境、社会环境和相关污染物排放限定标准等决定环境保护范围，确定敏感点。

-
- 2、**建立长期监测网络** 考虑到监测技术和成本，不可能完成对二噁英和重金属等污染物的实时监测，可在确认的敏感点中常设颗粒物污染监测系统。由于重金属，二噁英等污染物与颗粒物的排放有较为显著的相关关系，可以通过颗粒物的排放粗略估计二噁英重金属等污染物的排放。
 - 3、**按主风频抽检** 政府监测部门可按照垃圾焚烧厂当地的风频、风向等气象条件，按照主风频月对应的敏感点进行抽检，确保垃圾焚烧厂周围群众的健康。
 - 4、**重点监测重金属污染** 本文通过环境扩建限额的研究，发现虽然该垃圾场镉类污染物排放决定的除尘系统运行稳定性的值小于 0.1，但镉类重金属污染物在监测中仍然可能存在超标现象，说明国标在垃圾焚烧污染物排放方面的标准不能满足环境监测标准的要求，所以在今后垃圾焚烧厂运行过程中需重点监测。

4.5.2 监测建议

首先加强企业自行监测力度，依据《生活垃圾焚烧污染控制标准》和《环境监测管理办法》等规定，建立企业监测制度，对排放污染物尤其是二噁英和重金属的排放状况及其对周边环境的影响展开自行监测，保存原始监测记录，并公布监测结果。

企业自行监测时，烟囱排放烟气要进行在线监测，包括温度、烟量、硫氧化物和氮氧化物等；二噁英和重金属的排放量要每季度监测一次；厂界特征污染物，包括臭气浓度、硫化氢等每季度监测一次；工业固废要每天实时记录。所有记录数据应汇总成报告归档，以便环保主管部门进行监管

企业应及时关注国家及地方对垃圾焚烧发电行业的标准要求，以及污染治理新技术的应用情况，条件成熟时及时进行污染治理设施的更新换代，以致力从源头削减污染物排放量。若环境质量出现明显恶化趋势，需联合环保部门调查分析评价区域污染源排放变化情况，必要时协同环保部门制定区域污染物减排方案。

对于环境主管部门，加强对企业自行监测的监管，保证定期检查企业自测数据以及报告。并且依据《生活垃圾焚烧污染控制标准》对垃圾焚烧厂进行日常监督性监测，对焚烧炉渣热灼减率与烟气中颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、氯化氢、重金属类污染物和一氧化碳

的监测应每季度至少开展 1 次，对烟气中二噁英类的监测应每年至少开展 1 次。另外，对周边环境的居民点、学校、饮用水源保护区、自然保护区、大气一类区等设定为敏感点进行重点监测，尤其是当敏感点处于下风向时更要着重监测。

4.6 问题二求解

由于问题二没有给出完善的数据，很难估计所给垃圾焚烧厂所给条件的实际运行工况。因此本文利用垃圾焚烧厂正常工况下污染物的排放浓度与新标准给定的污染物的排放浓度差值与垃圾焚烧厂正常工况下的比值衡量稳定性能提升的程度，表示为 $(c_{old} - c_{new})/c_{old}$ 。

所以以颗粒物为排放标准采用新工艺对稳定性的提升一号炉为 97.99%，二号炉袋式系统为 98.66%。以二噁英为排放标准采用新工艺对稳定性的提升一号炉为 97.98%，二号炉袋式系统为 97.94%

五、模型优缺点分析

1、模型优点

在构建袋式除尘系统运行稳定性评价的模型中本文主要使用机理模型，从除尘系统的运行原理出发，构建了袋式除尘系统除尘效率和运行阻力模型，同时针对各种不同滤袋损毁情况构建了滤袋损坏的 TCF 模型，能够比较准确的模拟滤袋损坏对除尘系统排放浓度的影响。由于主要采用机理模型，模型的迁移性能较好，可以更容易的根据计算垃圾焚烧厂的正常工况排放浓度和实际工况排放浓度。

模型对于稳定性确定除了依赖于实际浓度和标准限额外，还依赖于正常工况排放浓度的计算，从而能够更好地反映袋式除尘系统的运行稳定性。

2、模型缺点

(1)损坏 TCF 模型对实际工况污染物排放浓度的估计是基于大量的实验，实验环境不能很模拟实际情况下袋式除尘系统的运行，所以预测结果不够精确。

(2)粉尘运动过程中，粉尘的带电荷性质所带来的影响。

(3)对于滤袋糊袋导致的损坏因素分析中，未考虑酸性气体对其影响程度，未作相关影响性评价。

六、模型展望

对于滤袋损坏的 TCF 模型可以进一步进行优化，还可以考虑经济因素对袋式除尘系统运行稳定性的影响。

参考文献

- [1] 百度百科. http://baike.baidu.com/link?url=90GTfyEHCvwT_4PkA4_3nPd3c3pfCXDLp0S-zkft_QjWjOBuNV1YZ5yr_IcE1R_cj4YqwmQKXidC_Lk4eOfa.
- [2] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 生活垃圾焚烧污染控制标准(GB 18485-2014)[M]. 北京,2014.
- [3] 韩明荣. 袋式除尘技术在高炉煤气除尘中的应用研究[D]. 硕士学位论文. 燕山大学, 2006(9).

-
- [4] 袁雪玲. 环境湿度对 PTFE 覆膜滤料的性能影响研究[D]. 硕士论文.北京化工大学,2015(5).
- [5] Liu.B.YH.and Rubow.K.L.Process of the 5th World Filtration Congress. Nise. Paris.1991.3.11
- [6] L.b. Stechkina and N.A. Fuchs. Studies on fibrous aerosol filters. IV. Calculation of aerosol deposition in model filters in the range of maximum penetration. Ann.Occup.Hyg.1969.12.1-10.
- [7] DaVies.C.N. Definitive equations for the fluid resistance of spheres. Proc. Phys.Soc.1945.259-274
- [8] Wikipedia. https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%B7%E8%AF%BA%E6%95%B0#cite_ref-Sinnott_1-0
- [9] 百 度 百 科 .http://baike.baidu.com/link?url=dYa2-yD4-u94-eT2g3eMp7knIEwefvb8_S4Vu59WluDyqMiPs7CDSy_MHVcRMd1rERqwHuhInIfJRIWEUuNeXq
- [10] Wikipedia. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%A9%E5%85%8B%E8%8E%B1%E7%89%B9%E6%95%B0>
- [11] Wikipedia. Effects of Prandtl number and a new instability mode in a plane thermal plume. R. Lakkaraju, M Alam. Journal of Fluid Mechanics, vol. 592, 221-231 (2007).
- [12] 周军. 袋式除尘器的除尘效率研究[D]. 硕士论文. 西南交通大学,2007(4).
- [13] 王赓.膨胀聚四氟乙烯(ePTFE)覆膜滤料过滤性能的研究[D].硕士论文.北京化工大学,2015(3).
- [14] 徐 芳, 付海明, 晋瑞芳, 朱 辉. 纤维过滤介质过滤压力损失理论计算. 过滤与分离 Journal of Filtration& Separation,2008. Vol.18.30-33
- [15] 克莱德·奥尔编 [美]. 邵启祥译.过滤理论与实践[M].北京:国防工业出版社,1982.
- [16] 《袋式除尘器》编写组.脉冲袋式除尘器[M].北京:冶金工业出版社,1978.
- [17] 蔡杰.空气过滤 ABC[M].北京:中国建筑工业出版社.2002.
- [13] 王赓. 膨胀聚四氟乙烯(ePTFE)覆膜滤料过滤性能的研究[D]. 硕士论文. 北京化工大学, 2015(3).
- [18] 徐钟川. 脉冲袋式除尘器清灰性能研究[D]. 东北大学,2011(6).
- [19] 隋海滨. 土的渗透特性的离心模拟研究[M]. 河海大学水电学院, 南京(210098).
- [20] 杜柳柳. 袋式除尘器用 PTFE 复合滤料性能的试验研究[D].东华大学, 2008(1).
- [21] 惠嘉. 温度对聚四氟乙烯材料特性的影响研究[J]. 火工品,2006(2).
- [22] 王伟莎. PTFE 针刺非织造滤料蠕变性能的研究[D]. 硕士论文. 东华大学,2013(1).
- [23] 张少实, 庄茁. 复合材料与粘弹性力学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [24] Y. C. Fung. Foundations of Solid Mechanics, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1965.
- [25] Wikipedia. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%89%9B%E9%A1%BF%E6%B5%81%E4%BD%93>
- [26] 于伟东,储才元. 纺织物理[M].第一版.上海:中国纺织大学出版社,2001.12:79-80.
- [27] 谢莉清,张洪弟. 用光杠杆法测试分析非织造土工布的蠕变性能[J]. 产业用纺织品,2001(2):32-34.

- [28] 武岳,叶瑾瑜,徐旺,李宗晟. PTFE 建筑材料膜材寒冷地区耐候性自然暴露试验研究.建筑
材料学报,2015(12),Vol.18:1017-1023.
- [29] 隋耀华. 土木合成材料的蠕变特性及蠕变量预测研究[D].长沙交通学院,2003.
- [30] 李艳琴. 复合土工膜蠕变性能的研究[D]. 山东大学, 2006.
- [31] <http://wenku.baidu.com/view/90f855a9b0717fd5360cdc0a.html?from=search>
- [32] GB3840—91 《制定地方大气污染物排放 标准的技术方法》
- [33] 叶秀雅. 生活垃圾焚烧飞灰的特性及其与垃圾渗滤液的联合处理[D].华南理工大学,2012(5).
- [34] 冯军会, 何品晶, 曹群科,等. 不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属分布和浸出性质[J]. 环境科
学研究, 2005, (04): 63-66+70.
- [35] 裘娜. 城市生活垃圾焚烧飞灰中重金属的形态分析[D].济南:山东大学,2008.
- [36] 李娜, 郝庆菊, 江长胜, 等. 重庆市垃圾焚烧飞灰粒径分布及重金属形态分析[J].
环境化学, 2010, (04): 659-664
- [37] Kuen-Sheng Wang, Chang-Jung Sun, Chung-Chi Yeh. The thermotreatment of MSW incinerator
fly ash for use as an aggregate: a study of the characteristics of size-fractioning [J]. Resources,
Conservation and Recycling, 2002, 35(3): 177-190.
- [38] 周玉彩. 垃圾焚烧发电工艺参数的计算方法. 浙江旺能环保股份有限公司(未发表).
- [39] 广西环科院环保有限公司. 宝安区老虎坑垃圾焚烧发电厂三期工程环境影响报告书.
深圳市宝安区城市管理局,2015(12).
- [40] 白良城.生活垃圾焚烧处理工程技术[M]. 中国建筑出版社,2009[4].

附件：

附件 A:

太阳辐射等级

| 总云量/低云量 | 夜间 | h0 | | | |
|---------|----|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| | | $h0 \leq 15^\circ$ | $15^\circ < h0 \leq 35^\circ$ | $35^\circ < h0 \leq 65^\circ$ | $H0 > 65^\circ$ |

| | | | | | |
|------------------|----|----|----|----|----|
| $\leq 4/ \leq 4$ | -2 | -1 | +1 | +2 | +3 |
| 5~7/ ≤ 4 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| $\geq 8/ \leq 4$ | -1 | 0 | 0 | +1 | +1 |
| $\geq 5/5\sim 7$ | 0 | 0 | 0 | 0 | +1 |
| $\geq 8/ \geq 8$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

注：云量（全天空十分制）观测规则见中央气象局编定的《地面气象观测规范》第 3.3 节。

附件 B

大气稳定度的等级

| 地面风速 $m \cdot s^{-1}$ | 太阳辐射等级 | | | | | |
|-----------------------|--------|-----|----|---|----|----|
| | +3 | +2 | +1 | 0 | -1 | -2 |
| ≤ 1.9 | A | A~B | B | D | E | F |
| 2~2.9 | A~B | B | C | D | E | F |
| 3~4.9 | B | B~C | C | D | D | E |
| 5~5.9 | C | C~D | D | D | D | D |
| ≥ 6 | D | D | D | D | D | D |

注：地面风速（ $m \cdot s^{-1}$ ）系指离地面 10m 高度处 10 分钟平均风速，如使用气象台（站）资料，其观测规则与中央气象局的《地面气象观测规范》第八章相同。

附件 C

横向扩散参数幂函数表达式系数值

(取样时间 0.5 h)

| 稳定度 | α_1 | γ_1 | 下风距离, m |
|-----|------------|------------|-----------|
| A | 0.901074 | 0.425809 | 0~1000 |
| | 0.850934 | 0.602052 | >1000 |
| B | 0.914370 | 0.281846 | 0~1000 |
| | 0.865014 | 0.396353 | >1000 |
| B—C | 0.919325 | 0.229500 | 0~1000 |
| | 0.875086 | 0.314238 | >1000 |
| C | 0.924279 | 0.177154 | 1~1000 |
| | 0.885157 | 0.232123 | >1000 |
| C—D | 0.926849 | 0.143940 | 1~1000 |
| | 0.886940 | 0.189396 | >1000 |

| | | | |
|-----|----------|-----------|---------|
| D | 0.929418 | 0.110726 | 1~1000. |
| | 0.888723 | 0.146669 | >1000 |
| D—E | 0.925118 | 0.0985631 | 1~1000 |
| | 0.892794 | 0.124308 | >1000 |
| E | 0.920818 | 0.0864001 | 1~1000 |
| | 0.896864 | 0.101947 | >1000 |
| F | 0.929418 | 0.0553634 | 0~1000 |
| | 0.888723 | 0.0733348 | >1000 |

纵向扩散参数幂函数表达式系数值

| 稳定度 | α_2 | γ_2 | 下风距离, m |
|-----|------------|-------------|------------|
| A | 1.12154 | 0.0799904 | 0~300 |
| | 1.51360 | 0.00854771 | 300~500 |
| | 2.10881 | 0.000211545 | >500 |
| B | 0.964435 | 0.127190 | 0~500 |
| | 1.09356 | 0.057025 | >500 |
| B—C | 0.941015 | 0.114682 | 0~500 |
| | 1.00770 | 0.0757182 | >500 |
| C | 0.917595 | 0.106803 | >0 |
| C—D | 0.838628 | 0.126152 | 0~2000 |
| | 0.756410 | 0.235667 | 2000~10000 |
| | 0.815575 | 0.136659 | >10000 |
| D | 0.826212 | 0.104634 | 1~1000 |
| | 0.632023 | 0.400167 | 1000~10000 |
| | 0.55536 | 0.810763 | >10000 |
| D—E | 0.776864 | 0.111771 | 0~2000 |
| | 0.572347 | 0.5289922 | 2000~10000 |
| | 0.499149 | 1.03810 | >10000 |
| E | 0.788370 | 0.0927529 | 0~1000 |
| | 0.565188 | 0.433384 | 1000~10000 |
| | 0.414743 | 1.73421 | >10000 |
| F | 0.784400 | 0.0620765 | 0~1000 |
| | 0.525969 | 0.370015 | 1000~10000 |
| | 0.322659 | 2.40691 | >10000 |

附件 D

n_0 、 n_1 、 n_2 的选取

| Q_h , KJ/s | 地表状况（平原） | n_0 | n_1 | n_2 |
|---|----------|-------|-------|-------|
| $Q_h > 21000$ | 农村或城市远郊区 | 1.427 | 1/3 | 2/3 |
| | 城市及近郊区 | 1.303 | 1/3 | 2/3 |
| $2100 < Q_h < 21000$ $\Delta T \geq 35K$ | 农草或城市远郊区 | 0.332 | 3/5 | 2/5 |
| | 城市及近郊区 | 0.292 | 3/5 | 2/5 |

附件 E:

| 月份 | 方位角 | 风速 | 月份 | 方位角 | 风速 |
|----|-----|----------|----|-----|----------|
| 1 | 20 | 4.149254 | 7 | 200 | 4.423077 |
| 1 | 30 | 4.188406 | 7 | 180 | 5.716667 |
| 1 | 10 | 4.033898 | 7 | 170 | 6.044776 |
| 1 | 360 | 4.289474 | 7 | 160 | 4.865854 |
| 1 | 60 | 2.75 | 7 | 190 | 4.888889 |
| 1 | 340 | 3.933333 | 7 | 150 | 4.275862 |
| 1 | 80 | 2.25 | 7 | 210 | 4.666667 |
| 1 | 120 | 3.464286 | 7 | 220 | 4.5 |
| 1 | 999 | 0.927273 | 7 | 260 | 3.571429 |
| 1 | 110 | 4.363636 | 7 | 280 | 3.5 |
| 1 | 40 | 3.80597 | 7 | 300 | 4.272727 |
| 1 | 70 | 2.153846 | 7 | 310 | 4.5 |
| 1 | 90 | 2.692308 | 7 | 290 | 3.857143 |
| 1 | 230 | 2.875 | 7 | 50 | 4 |
| 1 | 270 | 2.7 | 7 | 60 | 2.833333 |
| 1 | 240 | 2.285714 | 7 | 30 | 5 |
| 1 | 210 | 2.333333 | 7 | 20 | 5.222222 |
| 1 | 190 | 2.625 | 7 | 360 | 5.4 |
| 1 | 180 | 3.045455 | 7 | 10 | 5.416667 |
| 1 | 170 | 3 | 7 | 340 | 5.357143 |
| 1 | 130 | 3.111111 | 7 | 40 | 4.307692 |
| 1 | 50 | 2.6 | 7 | 350 | 5.75 |
| 1 | 280 | 3.285714 | 7 | 320 | 4.363636 |
| 1 | 260 | 3 | 7 | 330 | 4 |

| | | | | | |
|---|-----|----------|---|-----|----------|
| 1 | 250 | 2.444444 | 7 | 100 | 3.16 |
| 1 | 200 | 3.076923 | 7 | 110 | 4.25 |
| 1 | 100 | 3.666667 | 7 | 120 | 3.909091 |
| 1 | 160 | 2.4 | 7 | 80 | 2.888889 |
| 1 | 320 | 3 | 7 | 240 | 3 |
| 1 | 290 | 4.25 | 7 | 270 | 3 |
| 1 | 140 | 2.666667 | 7 | 250 | 2.5 |
| 1 | 220 | 2 | 7 | 999 | 1.363636 |
| 1 | 150 | 2.2 | 7 | 70 | 2.8 |
| 1 | 330 | 4.0625 | 7 | 140 | 4 |
| 1 | 300 | 4.111111 | 7 | 230 | 6.285714 |
| 1 | 310 | 3.6 | 7 | 90 | 3 |
| 1 | 350 | 4.230769 | 7 | 130 | 3 |
| 2 | 30 | 4.103448 | 8 | 120 | 2.909091 |
| 2 | 40 | 3.333333 | 8 | 999 | 1 |
| 2 | 20 | 5 | 8 | 220 | 3.625 |
| 2 | 10 | 4.3 | 8 | 210 | 3.074074 |
| 2 | 350 | 3.9 | 8 | 200 | 3.645161 |
| 2 | 340 | 3.545455 | 8 | 190 | 4.195652 |
| 2 | 360 | 4.130435 | 8 | 170 | 5.144444 |
| 2 | 60 | 2.416667 | 8 | 160 | 4.648148 |
| 2 | 120 | 3.902778 | 8 | 150 | 3 |
| 2 | 80 | 1.833333 | 8 | 110 | 2.4375 |
| 2 | 999 | 0.916667 | 8 | 100 | 2.4 |
| 2 | 50 | 3.333333 | 8 | 70 | 2.357143 |
| 2 | 320 | 3.25 | 8 | 80 | 2.076923 |
| 2 | 280 | 2.916667 | 8 | 130 | 3.25 |
| 2 | 270 | 3 | 8 | 240 | 2.294118 |
| 2 | 190 | 3.4 | 8 | 230 | 2.909091 |
| 2 | 180 | 3.407407 | 8 | 180 | 4.948718 |
| 2 | 170 | 3.9 | 8 | 90 | 2.111111 |
| 2 | 150 | 3.666667 | 8 | 260 | 2.5 |
| 2 | 160 | 3.666667 | 8 | 250 | 2.125 |
| 2 | 110 | 4.378378 | 8 | 270 | 2.666667 |
| 2 | 90 | 2.375 | 8 | 290 | 4.375 |

| | | | | | |
|---|-----|----------|---|-----|----------|
| 2 | 230 | 3 | 8 | 310 | 4.315789 |
| 2 | 220 | 2.666667 | 8 | 330 | 4.142857 |
| 2 | 290 | 4.125 | 8 | 300 | 4.714286 |
| 2 | 300 | 3.709677 | 8 | 280 | 3.8 |
| 2 | 330 | 3 | 8 | 320 | 4.454545 |
| 2 | 70 | 1.888889 | 8 | 340 | 3.291667 |
| 2 | 310 | 3 | 8 | 60 | 2.75 |
| 2 | 100 | 3.902439 | 8 | 140 | 3.333333 |
| 2 | 260 | 2.5 | 8 | 30 | 2.888889 |
| 2 | 240 | 2 | 8 | 40 | 2.9375 |
| 2 | 200 | 3.1875 | 8 | 350 | 3.9 |
| 2 | 130 | 3.863636 | 8 | 360 | 3 |
| 2 | 140 | 3.625 | 8 | 20 | 4 |
| 2 | 250 | 2 | 8 | 10 | 4 |
| 2 | 210 | 3.142857 | 8 | 50 | 3 |
| 3 | 10 | 3.772727 | 9 | 70 | 2.821429 |
| 3 | 20 | 3.888889 | 9 | 100 | 2.794118 |
| 3 | 360 | 3.5 | 9 | 110 | 3.510204 |
| 3 | 350 | 3.25 | 9 | 120 | 3.342857 |
| 3 | 30 | 3.787879 | 9 | 160 | 4.37931 |
| 3 | 300 | 3.285714 | 9 | 170 | 5.169811 |
| 3 | 310 | 2.9 | 9 | 360 | 3.5 |
| 3 | 340 | 3.166667 | 9 | 90 | 2.708333 |
| 3 | 330 | 4.6 | 9 | 80 | 2.8 |
| 3 | 40 | 3.333333 | 9 | 200 | 3.911765 |
| 3 | 50 | 2.9 | 9 | 40 | 4.259259 |
| 3 | 60 | 2.541667 | 9 | 50 | 3.586207 |
| 3 | 100 | 3.170213 | 9 | 60 | 3.294118 |
| 3 | 110 | 3.555556 | 9 | 130 | 3.875 |
| 3 | 120 | 3.656716 | 9 | 150 | 4.375 |
| 3 | 200 | 3.052632 | 9 | 210 | 3 |
| 3 | 190 | 3.304348 | 9 | 190 | 4.108108 |
| 3 | 90 | 2.4 | 9 | 230 | 2.454545 |
| 3 | 999 | 0.973684 | 9 | 260 | 2 |
| 3 | 270 | 2.4 | 9 | 340 | 3.846154 |

| | | | | | |
|---|-----|----------|----|-----|----------|
| 3 | 320 | 1.8 | 9 | 240 | 2.555556 |
| 3 | 70 | 2.533333 | 9 | 220 | 2.875 |
| 3 | 80 | 2.3 | 9 | 180 | 4.8 |
| 3 | 130 | 3.5 | 9 | 270 | 2.666667 |
| 3 | 210 | 2.846154 | 9 | 999 | 1.133333 |
| 3 | 220 | 2.928571 | 9 | 20 | 3.785714 |
| 3 | 260 | 2 | 9 | 30 | 3.8125 |
| 3 | 230 | 2.090909 | 9 | 10 | 3.428571 |
| 3 | 160 | 4.512821 | 9 | 350 | 4 |
| 3 | 180 | 3.451613 | 9 | 140 | 3.666667 |
| 3 | 290 | 3.5 | 9 | 280 | 2.857143 |
| 3 | 240 | 2 | 9 | 250 | 2.25 |
| 3 | 140 | 4.818182 | 9 | 330 | 3.714286 |
| 3 | 170 | 3.947368 | 9 | 290 | 4 |
| 3 | 150 | 4.117647 | 9 | 320 | 3.75 |
| 3 | 280 | 3 | 9 | 300 | 5.5 |
| 3 | 250 | 2.5 | 9 | 310 | 5.5 |
| 4 | 140 | 4.111111 | 10 | 999 | 1.142857 |
| 4 | 160 | 5.932836 | 10 | 40 | 3.786885 |
| 4 | 180 | 4.890411 | 10 | 30 | 4.304348 |
| 4 | 170 | 5.529412 | 10 | 280 | 3.363636 |
| 4 | 150 | 4.727273 | 10 | 290 | 4.25 |
| 4 | 130 | 3.25 | 10 | 270 | 2.875 |
| 4 | 90 | 2.166667 | 10 | 180 | 3.961538 |
| 4 | 110 | 3.470588 | 10 | 190 | 3.636364 |
| 4 | 210 | 3.285714 | 10 | 80 | 2.866667 |
| 4 | 200 | 3.551724 | 10 | 20 | 4.435484 |
| 4 | 220 | 3.428571 | 10 | 360 | 2.842105 |
| 4 | 190 | 4.111111 | 10 | 70 | 3.5 |
| 4 | 100 | 3.571429 | 10 | 60 | 3.777778 |
| 4 | 999 | 1.357143 | 10 | 50 | 3.275862 |
| 4 | 30 | 3.888889 | 10 | 110 | 4.234375 |
| 4 | 350 | 3 | 10 | 140 | 3.75 |
| 4 | 50 | 4 | 10 | 100 | 3.78 |
| 4 | 360 | 4.088235 | 10 | 90 | 2.529412 |

| | | | | | |
|---|-----|----------|----|-----|----------|
| 4 | 280 | 3.375 | 10 | 120 | 3.595238 |
| 4 | 260 | 2.5 | 10 | 130 | 2.875 |
| 4 | 240 | 2.75 | 10 | 150 | 2.25 |
| 4 | 230 | 3 | 10 | 170 | 3.846154 |
| 4 | 300 | 2 | 10 | 160 | 3.25 |
| 4 | 290 | 4.214286 | 10 | 200 | 3.333333 |
| 4 | 270 | 5 | 10 | 220 | 2.6 |
| 4 | 40 | 4.208333 | 10 | 240 | 2.5 |
| 4 | 330 | 5 | 10 | 310 | 4.4 |
| 4 | 20 | 4.333333 | 10 | 300 | 4.636364 |
| 4 | 10 | 4.8125 | 10 | 320 | 3.166667 |
| 4 | 60 | 2.764706 | 10 | 340 | 3.75 |
| 4 | 80 | 2.25 | 10 | 350 | 2.75 |
| 4 | 340 | 4.2 | 10 | 10 | 4.121951 |
| 4 | 320 | 4 | 10 | 330 | 2 |
| 4 | 310 | 3 | 10 | 250 | 2.857143 |
| 4 | 120 | 3.4 | 10 | 260 | 2.571429 |
| 4 | 70 | 2.222222 | 10 | 230 | 3.666667 |
| 4 | 250 | 2 | 10 | 210 | 3 |
| 5 | 150 | 4.666667 | 11 | 20 | 4.6 |
| 5 | 170 | 5.891892 | 11 | 10 | 4.894737 |
| 5 | 160 | 5.940541 | 11 | 360 | 4.85 |
| 5 | 180 | 5.076923 | 11 | 340 | 4.8 |
| 5 | 20 | 2.363636 | 11 | 30 | 4.518519 |
| 5 | 140 | 4.454545 | 11 | 40 | 3.868421 |
| 5 | 120 | 4.176471 | 11 | 50 | 3.307692 |
| 5 | 130 | 4.1875 | 11 | 60 | 3 |
| 5 | 110 | 3.780488 | 11 | 70 | 2.470588 |
| 5 | 80 | 2.25 | 11 | 999 | 1.030303 |
| 5 | 30 | 4 | 11 | 100 | 3.414634 |
| 5 | 50 | 4 | 11 | 280 | 3 |
| 5 | 350 | 5 | 11 | 320 | 4.2 |
| 5 | 60 | 2.777778 | 11 | 90 | 2.75 |
| 5 | 999 | 0.594595 | 11 | 160 | 5.125 |
| 5 | 250 | 2.75 | 11 | 170 | 4.75 |

| | | | | | |
|---|-----|----------|----|-----|----------|
| 5 | 10 | 3.4 | 11 | 110 | 3.424242 |
| 5 | 100 | 3.6 | 11 | 80 | 2.538462 |
| 5 | 70 | 2.6 | 11 | 230 | 2.666667 |
| 5 | 40 | 3.8 | 11 | 260 | 2.6 |
| 5 | 360 | 3.7 | 11 | 210 | 3 |
| 5 | 200 | 2.8 | 11 | 180 | 3.2 |
| 5 | 220 | 4 | 11 | 190 | 3.25 |
| 5 | 190 | 4.444444 | 11 | 120 | 3.8 |
| 5 | 260 | 2.5 | 11 | 130 | 3 |
| 5 | 320 | 4 | 11 | 240 | 2.25 |
| 5 | 340 | 5 | 11 | 220 | 2 |
| 5 | 330 | 5 | 11 | 270 | 3.111111 |
| 5 | 90 | 2.75 | 11 | 290 | 4.111111 |
| 5 | 290 | 2 | 11 | 300 | 4.4375 |
| 5 | 230 | 3.5 | 11 | 350 | 3.5 |
| 5 | 210 | 2 | 11 | 310 | 4.2 |
| 5 | 240 | 5 | 11 | 330 | 3.833333 |
| 5 | 300 | 2 | 11 | 140 | 4 |
| 5 | 310 | 3 | 11 | 200 | 2.666667 |
| 6 | 160 | 5.447619 | 11 | 250 | 1.75 |
| 6 | 170 | 6.156489 | 12 | 50 | 4.016949 |
| 6 | 150 | 4.37037 | 12 | 40 | 4.228916 |
| 6 | 180 | 5.366197 | 12 | 70 | 3.810811 |
| 6 | 190 | 4.333333 | 12 | 110 | 3.576923 |
| 6 | 200 | 3.6 | 12 | 280 | 2.25 |
| 6 | 120 | 3.684211 | 12 | 250 | 2.6 |
| 6 | 340 | 6 | 12 | 220 | 2.285714 |
| 6 | 250 | 2.5 | 12 | 170 | 3 |
| 6 | 20 | 2 | 12 | 120 | 3 |
| 6 | 320 | 4 | 12 | 130 | 2.5 |
| 6 | 999 | 1.125 | 12 | 200 | 3.5 |
| 6 | 110 | 3.722222 | 12 | 230 | 3.6 |
| 6 | 140 | 4.142857 | 12 | 240 | 3 |
| 6 | 50 | 2.625 | 12 | 999 | 0.952381 |
| 6 | 80 | 2.333333 | 12 | 320 | 3.583333 |

| | | | | | |
|---|-----|----------|----|-----|----------|
| 6 | 30 | 2 | 12 | 360 | 4.272727 |
| 6 | 210 | 2.9 | 12 | 10 | 5.238806 |
| 6 | 90 | 2.857143 | 12 | 20 | 5.168539 |
| 6 | 40 | 3 | 12 | 30 | 4.591549 |
| 6 | 350 | 2 | 12 | 340 | 4.444444 |
| 6 | 330 | 2 | 12 | 330 | 3.777778 |
| 6 | 220 | 4 | 12 | 350 | 4.15 |
| 6 | 260 | 2 | 12 | 300 | 2.8 |
| 6 | 230 | 2 | 12 | 290 | 2.2 |
| 6 | 100 | 3.6875 | 12 | 60 | 3.898551 |
| 6 | 60 | 3.4 | 12 | 100 | 3.75 |
| 6 | 280 | 2 | 12 | 270 | 2 |
| 6 | 290 | 2 | 12 | 260 | 2.5 |
| 6 | 70 | 3 | 12 | 190 | 2.5 |
| 6 | 130 | 4 | 12 | 80 | 3.153846 |
| | | | 12 | 90 | 2.666667 |
| | | | 12 | 140 | 4 |
| | | | 12 | 310 | 1.5 |
| | | | 12 | 150 | 3 |
| | | | 12 | 160 | 4 |
| | | | 12 | 210 | 2.333333 |

附件 F

$v=2.0\text{m/s}$ ，运行时间为 30min 情况下的载荷与磨损率的关系表：

| | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 载荷 N | 250.0000 | 260.4025 | 269.0712 | 279.9071 | 289.4427 | 300.7121 | 310.6811 | 321.0836 |
| 磨损率 10^{-3} mm^3/Nm | 0.0873 | 0.0891 | 0.0906 | 0.0920 | 0.0944 | 0.0961 | 0.0974 | 0.0979 |
| 载荷 N | 330.6192 | 340.5882 | 350.5573 | 360.9598 | 371.3622 | 380.8978 | 391.7337 | 401.7028 |
| 磨损率 10^{-3} mm^3/Nm | 0.0957 | 0.0941 | 0.0914 | 0.0898 | 0.0889 | 0.0913 | 0.0993 | 0.1111 |

$F=200\text{N}$ ，运行时间为 30min 情况下的速度与磨损率的关系表：

| | | | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 速度 m/s | 250.0000 | 260.4025 | 269.0712 | 279.9071 | 289.4427 | 300.7121 | 310.6811 | 321.0836 |
| 磨损率 10^{-4} | 0.4483 | 0.4138 | 0.3721 | 0.3298 | 0.2768 | 0.2251 | 0.1723 | 0.1477 |

| | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| mm ³ /Nm | | | | | | | | |
| 速度 m/s | 330.6192 | 340.5882 | 350.5573 | 360.9598 | 371.3622 | 380.8978 | 391.7337 | 401.7028 |
| 磨损率 10 ⁻⁴ mm ³ /Nm | 0.1506 | 0.1559 | 0.1686 | 0.1946 | 0.2384 | 0.2766 | 0.3179 | 0.3495 |

F=200, v=2.0m/s 情况下, 时间与磨损量的关系表:

| | | | | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 时间 min | 9.1772 | 19.3038 | 29.7468 | 39.5570 | 49.3671 |
| 磨损率 mg/min | 5.5772 | 4.2685 | 3.2819 | 2.7383 | 2.3960 |
| 时间 min | 59.1772 | 68.9873 | 80.0633 | 90.1899 | 100.0000 |
| 磨损率 mg/min | 2.1946 | 1.9530 | 1.8322 | 1.7718 | 1.7718 |

附录 G

1.垃圾组成分析:

| | 垃圾成分特征 | 瓦片 | 玻璃 | 金属 | 皮革 | 白 塑 料 | 白 泡 沫 | 纸 | 塑料 | 布 | 草木 | 厨余 |
|------------------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 发 酵 1 天 | 总成分分析 | 0.98% | 0.52% | 0.52% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 1.21% | 16.77% | 2.13% | 12.97% | 4.44% |
| | 干基成分 | 0.34% | 0.52% | 0.49% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.71% | 6.23% | 1.67% | 6.90% | 2.13% |
| | 可燃组分干基成分 | 0.99% | 1.50% | 1.41% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 2.06% | 17.95% | 4.82% | 19.89% | 6.15% |
| 发 酵 3 天 | 总成分分析 | 1.20% | 1.20% | 0.40% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.86% | 15.09% | 1.93% | 12.91% | 7.09% |
| | 干基成分 | 0.94% | 1.18% | 0.40% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.36% | 5.97% | 1.41% | 6.56% | 3.53% |
| | 可燃组分干基成分 | 2.30% | 2.88% | 0.97% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.88% | 14.54% | 3.44% | 15.97% | 8.59% |
| 发 酵 5 天 | 总成分分析 | 3.17% | 0.24% | 1.04% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.37% | 15.71% | 3.11% | 18.21% | 8.89% |
| | 干基成分 | 2.65% | 0.23% | 1.01% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.19% | 7.40% | 2.32% | 9.66% | 3.51% |
| | 可燃组分干基成分 | 5.25% | 0.45% | 1.99% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.38% | 14.63% | 4.58% | 19.09% | 6.93% |

2.垃圾工业分析

| | | 挥发份 | 固定碳 | 灰份 | 水份 |
|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 发酵 1 天 | 干基可燃物工业分析 | 73.64% | 11.8% | 14.56% | |
| | 垃圾干基工业分析 | 70.77% | 11.34% | 17.89% | |
| | 原生垃圾工业分析 | 25.54% | 3.93% | 71.53% | 65.23% |
| 发酵 3 天 | 干基可燃物工业分析 | 65.95% | 11.85% | 22.20% | |
| | 垃圾干基工业分析 | 61.88% | 11.12% | 27.00% | |
| | 原生垃圾工业分析 | 25.42% | 4.57% | 70.01% | 58.92% |
| 发酵 5 天 | 干基可燃物工业分析 | 72.47% | 11.52% | 16.01% | |
| | 垃圾干基工业分析 | 66.89% | 10.63% | 22.48% | |

| | | | | | |
|--|----------|--------|-------|--------|-------|
| | 原生垃圾工业分析 | 33.85% | 5.38% | 60.77% | 49.39 |
|--|----------|--------|-------|--------|-------|

3.垃圾元素分析

| | | C (%) | H (%) | N (%) | S (%) | O (%) |
|--------|-------------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 发酵 1 天 | 干基可燃组组分元素分析 | 44.11% | 6.26% | 2.18% | 0.26% | 32.63% |
| | 垃圾干基元素分析 | 42.39% | 6.02% | 2.09% | 0.25% | 31.26% |
| | 应用基 | 14.70% | 2.09% | 0.73% | 0.09% | 10.87% |
| 发酵 3 天 | 干基可燃组组分元素分析 | 43.99% | 5.95% | 1.56% | 0.27% | 26.03% |
| | 垃圾干基元素分析 | 43.36% | 6.44% | 1.33% | 0.24% | 26.15% |
| | 应用基 | 21.95% | 3.26% | 0.67% | 0.12% | 13.23% |
| 发酵 5 天 | 干基可燃组组分元素分析 | 46.98% | 6.98% | 1.44% | 0.26% | 28.33% |
| | 垃圾干基元素分析 | 43.36% | 6.44% | 1.33% | 0.24% | 26.15% |
| | 应用基 | 21.95% | 3.26% | 0.67% | 0.12% | 13.23% |

4.垃圾热值

| | 发酵 1 天 | 发酵 3 天 | 发酵 5 天 |
|--------------------|--------|--------|--------|
| 干基可燃组分高位热值 (KJ/Kg) | 20520 | 19470 | 21310 |
| 干基可燃组分低位热值 (KJ/Kg) | 19150 | 18160 | 19780 |
| 收到垃圾低位热值 (KJ/Kg) | 6380 | 7000 | 9240 |

附录 H

滤袋理化性能参数

| 参数名称 \ 厂家 | 广州华滤 | 厦门三维丝 |
|-----------|--|--|
| 纤维 | 100%PTFE(聚四氟乙烯) | 100%PTFE(聚四氟乙烯) |
| 基布 | PTFE 基布 (100%) | PTFE 基布 (100%) |
| 克重 | 600 g/m ² | 750 g/m ² |
| 厚度 | 1.8 mm | 1.2mm |
| 透气量 | 8~12m ³ /m ² · min | 10m ³ /m ² · min |
| 化学处理方式 | PTFE 覆膜 | PTFE 覆膜 |
| 连续运行温度 | 250℃ | 240℃ |
| 瞬时耐受温度 | 270℃ | 260℃ |
| 化学抗酸性 | 优 | 优 |
| 化学抗碱性 | 优 | 优 |
| 化学抗水解性 | 优 | 完全不水解 |
| 化学抗氧化性 | 优 | 完全不氧化 |
| 化学抗磨损性 | 优 | 优 |
| 喷吹压力 | 0.35-0.4MPa | |
| 强制吹灰压力 | 0.4-0.54MPa | |

| | | |
|------|----------|--------------|
| 经向拉力 | 800 | 700 |
| 纬向拉力 | 1200 | 700 |
| 经向伸长 | < 15% | ≤2% |
| 纬向伸长 | < 15% | ≤2% |
| 后处理 | 定型, PTFE | 热定型, PTFE 涂层 |

程序代码

1、数据处理

数据提取

Data.R

```

tdata      <-matrix(0,nrow=355,ncol=46);
for(j in 1:355){
  if(j<10){
    con <- file(paste("F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据
/0000",j,".txt",sep=""), "r");
  }
  if(j>=10&&j<100){
    con <- file(paste("F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据
/000",j,".txt",sep=""), "r");
  }
  if(j>=100){
    con <- file(paste("F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据
/00",j,".txt", sep=""), "r");
  }

  start<-
c(4,4,4,4,12,11,10,10,10,10,10,10,10,10,10,11,10,12,12,10,10,11,11,10,10,10,10,10,10,11
,12,12,12,12,12,12,12,12,12,12,12,12,12);

  end <-
c(12,9,3,20,20,15,16,16,14,16,13,14,17,17,17,17,16,18,17,18,14,15,15,14,14,15,17,18,18,18,
15,17,17,17,17,17,17,17,17,17,17,17,17,17);

  #line<-readLines(con,n=1)

```

```

data <-c();
for(i in 1:49){
  line <-readLines(con,n=1)
  if(i>2&& i<49){
    if(length(line)!=0){
      temp <-substr(line,start[i-2],end[i-2]);
    }
    else{
      temp <-"";
    }
    data <-c(data,temp);
  }
}
tdata[j,] <-data;
}

write.csv(tdata,file="F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据.csv");

polyfit.R

data <-read.csv("F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据.csv");
desdata <-read.csv("F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/破损情况.csv");
appendix <-matrix(0,nrow=355,ncol=2);
colnames(appendix)<-c("dest1","dest2");
data <-cbind(data,appendix);
ncol(data)
for(i in 1:355){
  if(length(which(desdata$时间==paste(data[i,4],"",sep="")))!=0){
    data[i,48:49] <-desdata[which(desdata$时间==paste(data[i,4],"",sep="")),2:3];
  }
}

write.csv(data,file="F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据带破
损.csv");

for(i in 1:355){
  for(j in 1:48){
    if(is.na(data[i,j]) || data[i,j]==0){
      data[i,j]=0.000001
    }
  }
}

```

```

}
data <-cbind(data,(2500-data[,28])/25)
data <-data[-c(7:9),]
ph <-data[,32]+data[,38]+data[,44]
options(digits=4)
detect<-c(11:13,16,22,28,31,32,35,38,41,44,47 );
cor(data[,detect])
for(k in 1:length(detect)){
print(detect[k]-4);
print(cor.test(scale(data[,detect[k]]),scale(data[,28])),method="pearson");
}
print(cor.test(scale(ph),scale(data[,47])),method="pearson");

for(k in 1:length(detect)){
print(detect[k]-4);
print(cor.test(data[,detect[k]],data[,47]));
}
boxplot(data[,c(28,35,44)])

boxplot(data[,44])
for(m in 1:355){
if(data[m,35]>100){
print(data[m,c(28,35,44)])
}
}

plot(data[,2],data[,28],xlim=c(0,355),ylim=c(0,300))
lines(data[,2],data[,35]);

```

滤袋破损数据

puosun.R

```

data <-read.csv("F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据带破
损.csv");
destory <-data[which(data$dest2!=0),];
appendix <-matrix(0,nrow=355,ncol=1);
data[,5] <-as.Date(data[,5])
data[,5]
colnames(appendix)<-c("info");

```

```

data      <-cbind(data,appendix);
for(i in 1:nrow(destory)){
  date <-as.Date(destory[i,5])-((-3):3)
  for(j in 1:7){

    if(length(which(data$时间==date[j]))!=0){
      #temp    <-data[which(data$时间==format(date[j],"%Y-%m-%d")),];

      #ps <-rbind(ps,temp)
      data[which(data$时间==date[j]),51] <-1;
    }
  }
}

write.csv(data,"F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/监测数据带破损前
后.csv");

mean(data[which(data$info==0),29])
风速处理
speed.R

con<-file("F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/6370607102083dat.csv","r");
l=17494;
data<-matrix(0,nrow=17493,ncol=3)
for(i in 2:l){
  line <-readLines(con,n=1)
  data[i-1,1]<-substr(line,14,22);
  data[i-1,2]<-substr(line,41,44);
  data[i-1,3]<-substr(line,51,54);
print(i)
}
write.csv(data,"F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/风向.csv")
data<-data[which(data[,1]>20150100 &data[,1]<20151232),]
data[,1] <-floor(as.numeric(data[,1])/100)
data[,1] <-as.numeric(data[,1])%%100
data[,2]
result<-c();
for(i in 1:12){
  temp<-data[which(data[,1]==i),];
  wind<-unique(temp[,2]);

```

```

for(j in 1:length(wind)){
    speed<-mean(as.numeric(temp[which(temp[,2]==wind[j]),3]));
    t<-c(i,wind[j],speed)
    result<-rbind(result,t)
}
}
write.csv(result,"F:/Word 文件/大三下学期/深圳杯 2016/RD&P/speed.csv")

```

2、袋式除尘系统除尘效率及阻力(matlab)

```

function [ z ] = CalBol( x )
%CALBOL 粉尘剥离率插值
% 此处显示详细说明
p=[0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 ];
f=[40, 51.67,57.67,66.67,80,79.33]/100;
z=interp1(p,f,x,'liner');
end

function [ output1 ] = CalF1( T,t,uj,uw)
%CalF1 计算一号炉破损比
% 此处显示详细说明
f=5906/3600;
[j,w]=CalTime(T,3+t);
%断裂强度
u1=uj.*j.*CalT(T);
u2=uw.*w.*CalT(T);
s=(0.0018-h_solve(1,4,0.2,1.8,0.152,0.125,3).*(3+t).*365.*24./f).*0.001
fm=FM_solve(1,0.0018-
h_solve(1,4,0.2,1.8,0.152,0.125,3).*(3+t).*365.*24./f,0.152,0.125);
output1=u1.*s./fm;
%output2=u2.*s./fm;
end

function [M ] = CalMp( P0,A )
%CALMP 计算气体质量流量
% 此处显示详细说明
P0=P0*1000000
K=1.4;%绝热指数
R=287;%汽包中气体的密度
T=293;%温度

```

```

P=0.1013*1000000;%大气压
r=1.29;%空气密度
r0=P0./(R.*T)%气包中气体密度
t=2.*K./(K-1).*P0.*r0
t2=((P./P0).^(2/K)-(P./P0).^((K+1)/K))
M=A.*(2.*K./(K-1).*P0.*r0.*((P./P0).^(2/K)-(P./P0).^((K+1)/K))).^0.5;
end
function [ nkm ] = CalN1( c0,L,T,Ps)
%CalN1 计算一号炉的除尘效率
% 此处显示详细说明
format long g
l=0.72;%修正系数
Pp=2.3*10^3;%粉尘真密度
%c0=2.5*10^(-3);%粉尘浓度
a=0.6/1.8/2.2;%纤维填充率
df=10^(-5);%纤维直径
K0=5;%康采尼系数
S=1056*((0.165)^2/4*pi+0.165*6*pi);
[u,r,pr]=CalT(T);
v0=L./S./3600;%过滤风速
h=1.8*10^(-3);%滤布厚度
lp=lambaP(l);%修正系数
Re=reynold(v0,1,r);%雷诺数
Pe=peclet(Re,pr);%佩克莱数
dp=quad('diameter(d)',0,0.001);%粉尘粒径
dp2=quad('diameter2(d)',0,0.001);%粉尘粒径
dp3=quad('diameter3(dp)',8.311*10^(-6),287.1486*10^(-6));
dp4=quad('diameter4(dp)',9.115*10^(-6),262.34*10^(-6));
p0=deltaP0(u,v0,h,df,a);%初始压强
%-----根据压强确定时间-----
%

p1=lp*p0;
t1=0;
while p1<Ps
t1=t1+10;
e=epsion(t1);%粉尘填充率
H=deltaH(c0,v0,Pp,e,t1);%粉尘层厚度

```

```

pt=deltaPt(v0,u,K0,dp4,e,H);%粉尘层压强
p1=lp.*p0+pt;%运行压强
end
t=10:10:t1;
t0=t1*(1-CalBol(0.32));
e=epslion(t);%粉尘填充率
H=deltaH(c0,v0,Pp,e,t);%粉尘层厚度
pt=deltaPt(v0,u,K0,dp4,e,H);%粉尘层压强

p=lp.*p0+pt;%运行压强
%单个球体惯性捕集效率
nll=CalNll(Pp,c0,dp2,v0,u,dp);
%单个球体的筛分捕集效率
nrl=CalNrl(dp,dp3);
%单个球体扩散捕集效率
ndl=CalNdl(Re,Pe);
%单个球体综合捕集效率
nsl=CalNsl(nll,nrl,ndl);
%单层微元体捕集效率
sl=CalSl(nsl,e);
%颗粒床层捕集效率
nk=CalNk(sl,H,dp);
t2=t0:10:t1;
e1=epslion(t2);%粉尘填充率
H1=deltaH(c0,v0,Pp,e1,t2);%粉尘层厚度
pt1=deltaPt(v0,u,K0,dp4,e1,H1);%粉尘层压强
p2=lp.*p0+pt1;%运行压强
sl1=CalSl(nsl,e1);
%颗粒床层捕集效率
nk1=CalNk(sl1,H1,dp);
nkm=quad('polyfitNk(t)',t0,t1)/(t1-t0);
plot([t t1+10+t2-t0]/3600,[p p2])
%-----绘图-----
%-----%
%
% [AX,H1,H2] = plotyy([t t1+10+t2-t0]/3600,[p p2],[t t1+10+t2-t0]/3600,[nk nk1],'plot');
% set(AX(1),'XColor','k','YColor','b');

```

```

% set(AX(2),'XColor','k','YColor','r');
% ylim(AX(2),[0.98,1]);
% ylim(AX(1),[0,2000]);
% HH1=get(AX(1),'Ylabel');
% set(HH1,'String','压强/pa');
% set(HH1,'color','b');
% HH2=get(AX(2),'Ylabel');
% set(HH2,'String','除尘效率');
% set(HH2,'color','r');
% set(H1,'LineStyle','-');
% set(H1,'color','b');
% set(H2,'LineStyle','-');
% set(H2,'color','r');
% xlabel('时间/hour');
t1-t0
end
function [ nkm ] = CalN2( c0,L,T,Ps)
%CalN1 计算 2 号炉的除尘效率
% 此处显示详细说明
format long g
l=0.72;%修正系数
Pp=2.3*10^3;%粉尘真密度
%c0=2.5*10^(-3);%粉尘浓度
a=0.75/1.2/2.2;%纤维填充率
df=10^(-5);%纤维直径
K0=5;%康采尼系数
S=1056*((0.168)^2/4*pi+0.168*6*pi);
[u,r,pr]=CalT(T);
v0=L./S./3600;%过滤风速
h=1.2*10^(-3);%滤布厚度
lp=lambaP(l);%修正系数
Re=reynold(v0,1,r);%雷诺数
Pe=peclet(Re,pr);%佩克莱数
dp=quad('diameter(d)',0,0.001);%粉尘粒径
dp2=quad('diameter2(d)',0,0.001);%粉尘粒径
dp3=quad('diameter3(dp)',8.311*10^(-6),287.1486*10^(-6));
dp4=quad('diameter4(dp)',9.115*10^(-6),262.34*10^(-6));

```

```

p0=deltaP0(u,v0,h,df,a);%初始压强
%-----根据压强确定时间-----
%

p1=lp*p0;
t1=0;
while p1<Ps
t1=t1+10;
e=epslion(t1);%粉尘填充率
H=deltaH(c0,v0,Pp,e,t1);%粉尘层厚度
pt=deltaPt(v0,u,K0,dp4,e,H);%粉尘层压强
p1=lp.*p0+pt;%运行压强
end
t=10:10:t1;
t0=t1*(1-CalBol(0.32));
e=epslion(t);%粉尘填充率
H=deltaH(c0,v0,Pp,e,t);%粉尘层厚度
pt=deltaPt(v0,u,K0,dp4,e,H);%粉尘层压强
p=lp.*p0+pt;%运行压强
%单个球体惯性捕集效率
nll=CalNll(Pp,c0,dp2,v0,u,dp);
%单个球体的筛分捕集效率
nrl=CalNrl(dp,dp3);
%单个球体扩散捕集效率
ndl=CalNdl(Re,Pe);
%单个球体综合捕集效率
nsl=CalNsl(nll,nrl,ndl);
%单层微元体捕集效率
sl=CalSl(nsl,e);
%颗粒床层捕集效率
nk=CalNk(sl,H,dp);
t2=t0:10:t1;
e1=epslion(t2);%粉尘填充率
H1=deltaH(c0,v0,Pp,e1,t2);%粉尘层厚度
pt1=deltaPt(v0,u,K0,dp4,e1,H1);%粉尘层压强
p2=lp.*p0+pt1;%运行压强
sl1=CalSl(nsl,e1);
%颗粒床层捕集效率

```

```

nk1=CalNk(sl1,H1,dp);
nkm=quad('polyfitNk(t)',t0,t1)/(t1-t0);
%-----绘图-----
%-----%

% [AX,H1,H2] = plotyy([t t1+10+t2-t0]/3600,[p p2],[t t1+10+t2-t0]/3600,[nk nk1],'plot');
% set(AX(1),'XColor','k','YColor','b');
% set(AX(2),'XColor','k','YColor','r');
% ylim(AX(2),[0,1.1]);
% ylim(AX(1),[0,2000]);
% HH1=get(AX(1),'Ylabel');
% set(HH1,'String','压强/pa');
% set(HH1,'color','b');
% HH2=get(AX(2),'Ylabel');
% set(HH2,'String','除尘效率');
% set(HH2,'color','r');
% set(H1,'LineStyle','-');
% set(H1,'color','b');
% set(H2,'LineStyle','-');
% set(H2,'color','r');
% xlabel('时间/hour');
t1-t0
end

```

```

function [ ndl ] = CalNdl( Re,Pe)
%nDI 单个球体扩散作用捕集效率
% Re 雷诺数, Pe 佩克莱数
ndl=4./Pe.*(2+0.557.*Re.^0.125.*Pe.^0.375);

end

function [ nK ] = CalNk( nll,H,dp )
%NK 颗粒床层效率 nk
% nll 单层效率, H 粉尘层厚度, dp 粉尘层平均厚度
nK=1-(1-nll).^(H./dp+1);

```

```

end

function [nll] = CalNll( Pp,Cu,dp2,v,u,dp3 )
%nll 单个球形捕集体惯性捕集效率
% Pp 粉尘真密度,Cu 粉尘浓度,dp 粉尘粒径,v 过滤速度,u 空气动力系数,dp3 粉尘
    平均粒径

St=Pp*Cu*dp2*v*dp3/(18*u);
if St>0.3
    nll =St^2/(St+0.25)^2;
end
if St>=0.0416
    if St<=0.3
        nll=0.00376-0.464*St+9.68*St^2-16.2*St^3;
    end
end
if St<0.0416
    nll=(1+0.75*log(4*St)/(2*St-1.214))^(-2);
end

end

function [ nrl ] = CalNrl( dp,dp3 )
%CalNrl 单个球体的筛分捕集效率
% y 粉尘平均粒径, x 粉尘粒径
t=1+dp*dp3;
nrl=t.^2-1./t;
%nrl=t.^2-1.5.*t+0.5./t;
%if nrl>=0.95
    % nrl=1./(1+2.718.^(-nrl*3.1));
%end
end

function [ nsl ] = CalNsl( nll,nRl,nDl )
%nSL 孤立球效率
% 此处显示详细说明

```

```

nsl=1-(1-nll).*(1-nRI).*(1-nDI);
end
function [ sl ] = CalSl(nsl,e )
%CALSL 微元体内粉尘层单层效率
% e 填充率，nsl 单个粉尘捕集效率
sl=1.5.*nsl.*e./(1-e);
end
function [ u,v,pr] = CalT( x )
%CalT 计算温度相关系数
% 此处显示详细说明
t=[0
90
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
859.33
900
950
1000
];
temp=[15.800    11.900    2.280    0.740
19.940    19.910    3.045    0.704
20.400    20.800    3.130    0.700
22.450    26.200    3.570    0.685
24.500    31.600    4.010    0.670

```

| | | | |
|--------|---------|--------|-------|
| 26.350 | 37.750 | 4.425 | 0.660 |
| 28.200 | 43.900 | 4.840 | 0.650 |
| 29.950 | 50.850 | 5.270 | 0.645 |
| 31.700 | 57.800 | 5.700 | 0.640 |
| 33.250 | 65.400 | 6.130 | 0.630 |
| 34.800 | 73.000 | 6.560 | 0.620 |
| 36.350 | 81.200 | 6.990 | 0.615 |
| 37.900 | 89.400 | 7.420 | 0.610 |
| 39.300 | 98.200 | 7.845 | 0.605 |
| 40.700 | 107.000 | 8.270 | 0.600 |
| 42.050 | 116.500 | 8.710 | 0.595 |
| 43.400 | 126.000 | 9.150 | 0.590 |
| 44.883 | 137.866 | 9.654 | 0.584 |
| 45.900 | 146.000 | 10.000 | 0.580 |
| 47.150 | 156.500 | 10.450 | 0.569 |
| 48.400 | 167.000 | 10.900 | 0.557 |

```

];
u=interp1(t,temp(:,1),x,'liner').*0.000001;
v=interp1(t,temp(:,2),x,'liner').*0.000001;
pr=interp1(t,temp(:,4),x,'liner');
end
function [ j,w ] = CalTime(T,t)
%CalTime 计算长期蠕变引起的断裂力变化
% 此处显示详细说明
c1=17.4;
c2=51.6;
Ts=23;

aT=-c1.*(T-Ts)./(c2+T-Ts)./(365*24);
j=0.2173.*exp(-0.2733.*(t-aT))+0.7819;
w=0.1621.*exp(-0.3156.*(t-aT))+0.8296;
end
function [ v ] = CalVp( P0 )
%CalVp 计算喷口速度
% 此处显示详细说明
K=1.4;%绝热指数

```

```

R=287;%汽包中气体的密度
T=293;%温度
P=0.1013;%大气压
r=1.29;%空气密度
r0=P0.*1000000./(R.*T);%气包中气体密度

v=(2.*K./(K-1).*P0./r0.*(1-(P/P0).^(K./(K-1))))).^0.5;
end
function [ H ] = deltaH( c0,v0,Pp,e,t )
%DELTAH 颗粒床层厚度随时间变化函数
%   c0 颗粒物初始浓度
%   v0 过滤风速
%   Pp 粉尘密实度
%   e 填充率
%   t 时间
H=c0.*v0.*t./(Pp.*e);
end
function [ p0 ] = deltaP0( u,v0,H,df,a )
%DELTAPO 用于求解初压损失
%   u 空气动力粘度
%   v0 过滤风速
%   H 滤布厚度
%   df 纤维直径
%   a 填充率
p0=4.*u.*v0.*H./df.^2.*(2.446.*a+38.16.*a.^2+138.9.*a.^3);

end
function [ pt ] = deltaPt( v0,u,K0,dp,e,H)
%deltaPt 粉尘层运行阻力随时间变化的函数
%   v0 过滤速度
%   u 空气动力粘度
%   K0 康采尼常数
%   dp 粒径
%   e 填充率

```

```

% H 粉尘层厚度
pt=36*dp.*v0.*u.*K0.*e.^2./(1-e).^3.*H;

end

function [d ] = diameter( dp )
%粉尘粒径分布的密度函数
d=1./(2.54*10^(-2).*dp*1000000).*exp(-((log(dp)+log(1000000)-4.01)./0.399).^2);

end

function [d] = diameter2( dp )
%用于 dp2 的密度公式计算
% 此处显示详细说明
ds=1./(2.54*10^(-2).*dp*1000000).*exp(-((log(dp)+log(1000000)-4.01)./0.399).^2);
d=ds.^2;
end

function [ d ] = diameter3( dp )
%用于 1/dp 的密度公式计算
% 此处显示详细说明
ds=1./(2.54*10^(-2).*dp*1000000).*exp(-((log(dp)+log(1000000)-4.01)./0.399).^2);
d=1./ds;
end

function [ d ] = diameter4( dp )
%diameter4 用于求 1/dp2
% 此处显示详细说明
ds=1./(2.54*10^(-2).*dp*1000000).*exp(-((log(dp)-4.01+log(1000000))./0.399).^2);
d=1./(ds.^2);
%d=-1.2.*t.^(-7.008)+1.017;
end

function [ y ] = distrib( dp )
%DISTRIB 筛下累积分布函数
% 此处显示详细说明
a = -1.085;
b = 1.95*10^4 ;
c = 0.9976 ;
y=a*exp(-b*dp)+c;
end

function [ e ] = epslion( t )

```

```

%epslion 粉尘层填充率随时间变化函数
% 此处显示详细说明
e=0.106+0.0435.*log(t);

end

function [ F ] = FM_solve( x,h,p,r )
%UNTITLED14 此处显示有关此函数的摘要
% 此处显示详细说明
%x 袋口到测点的距离
%h 滤袋厚度
%p PTFE 滤袋材料的密度
%r

F= 9.8*(-0.1215*x.^3+1.525*x.^2-6.35*x+9.862)*h*p*pi*r^2;

end

function [ h ] = h_solve( x,v,t ,H,Pp,r,P0)
%UNTITLED12 此处显示有关此函数的摘要
% 此处显示详细说明
%x 测点与袋口的距离
%v 测点的喷吹速度
%t 脉冲阀的开启时间
%H 滤袋厚度
%n2 PTFE 滤袋材料的密度
%n3 喷嘴半径
%P0 出口负压，即滤袋外部气压大小
if 0.1<=x<=1.8
    F= 9.8*(-0.1215*x.^3+1.525*x.^2-6.35*x+9.862)*H*Pp*pi*r^2+...
        (-5.741*x.^3+9.751*x.^2+0.8968*x+7.226-P0)*pi*r^2;
elseif 1.8<x<=6
    F=9.8*(-0.1215*x.^3+1.525*x.^2-6.35*x+9.862)*H*Pp*pi*r^2+...
        (-0.04744*x.^3+1.118*x.^2-7.093*x+16.42-P0)*pi*r^2;
end

w= 10^-3*(6.016*F.^3-2.089*F.^2+1469*F)*(-16.48*v.^4+225.3*v.^3-
    960.2*v.^2+1328*v)*t.^-0.504;

syms R eq

```

```

eq=-w*F*v*t+(4*3.14*R*r^2)/3-(3.14*sqrt(R^2-r^2)*r^2)/3;
R=solve(eq,'R');
%h=R-sqrt(R.^2-n3^2)
h0=R-sqrt(R.^2-r^2);
h=vpa(h0,20);
end
function [ lp ] = lamdaP(x)
%lamdaP 用于求解纤维的修正系数
lp=exp(-3.*x.^2)+0.4.*x.^3./(x.^3+0.8);

end
function [ Pe ] = peclet( Re,pr )
%peclet 用于计算佩克莱数
% 此处显示详细说明
Pe=Re.*pr;

end
function [ nk ] = polyfitNk(t )
%polyfitNk 拟合 nk 的函数
% 此处显示详细说明
a = 1.006 ;
b = -1.106e-06 ;
c = -0.8161 ;
d = -0.001533 ;

nk=a*exp(b*t) + c*exp(d*t);
end
function [ Re ] = reynold( v,l,r )
% reynold 用于计算雷诺数
% 此处显示详细说明
Re=v.*l./r;

End
%%用于稳定性指标求解
clc,clear

```

```

data1=xlsread('F:\Word 文件\大三下学期\深圳杯 2016\MATLABD&P\1 号设备.xlsx');
data2=xlsread('F:\Word 文件\大三下学期\深圳杯 2016\MATLABD&P\2 号设备.xlsx');
[r1,c1]=size(data1);
n1=zeros(r1,1);
[r2,c2]=size(data2);
n2=zeros(r2,1);
for i=1:r1
    i
    temp=2500*(1-CaIN1(0.0025,data1(i,2),data1(i,1)*1.064,1350));
    n1(i)=temp;
end
% % n1=n1./2500.*2.5.*0.981+0.019*2.5;
% % data1(:,3)=data1(:,3)./2500.*2.5.*0.981+0.019*2.5;
n1=n1./2500.*1.25;
data1(:,3)=data1(:,3)./2500.*1.25;
plot(1:1:r1,n1)
hold on
plot(1:1:r1,data1(:,3))
hold on
plot(1:1:r1,0.1*ones(1,r1))
hold on
plot(1:1:r1,mean(n1)*ones(1,r1))
hold on
plot(1:1:r1,mean(data1(:,3))*ones(1,r1))
hold on
plot(1:1:r1,0.05*ones(1,r1))
hold on
plot(1:1:r1,0.04*ones(1,r1))

% for i=1:r2
%     i
%     temp=2500*(1-CaIN2(0.0025,data2(i,2),data2(i,1)*1.064,1650));
%     n2(i)=temp;
% end
% n2=n2./2500.*2.5.*0.981+0.019*2.5;
% data2(:,3)=data2(:,3)./2500.*2.5.*0.981+0.019*2.5;
% plot(1:1:r2,n2)

```

```

% hold on
% plot(1:1:r2,data2(:,3))
% hold on
% plot(1:1:r2,0.1*ones(1,r2))
% hold on
% plot(1:1:r2,mean(n2)*ones(1,r2))
% hold on
% plot(1:1:r2,mean(data2(:,3))*ones(1,r2))
% v11=0;
% v12=0;
% v21=0;
% v22=0
% for i=1:r1
%     v11=v11+(data1(i,3)-n1(i)).^2;
%     v12=v12+(20-n1(i)).^2;
% end
% for i=1:r2
%     v21=v21+(data2(i,3)-n2(i)).^2;
%     v22=v22+(20-n2(i)).^2;
% end
% f1=(v11/v12)^0.5
% f2=(v21/v22)^0.5
%
% v11=0;
% v12=0;
% v21=0;
% v22=0;
% for i=1:r1
%     v11=v11+((data1(i,3)-n1(i))/2500*0.15).^2;
%     v12=v12+(0.05-n1(i)/2500*0.15).^2;
% end
% for i=1:r2
%     v21=v21+((data2(i,3)-n2(i))/2500*0.15).^2;
%     v22=v22+(0.05-n2(i)/2500*0.15).^2;
% end
% f1=(v11/v12)^0.5
% f2=(v21/v22)^0.5

```

```

%
% v11=0;
% v12=0;
% v21=0;
% v22=0;
% for i=1:r1
%     v11=v11+((data1(i,3)-n1(i))/2500*17.5).^2;
%     v12=v12+(1-n1(i)/2500*17.5).^2;
% end
% for i=1:r2
%     v21=v21+((data2(i,3)-n2(i))/2500*17.5).^2;
%     v22=v22+(1-n2(i)/2500*17.5).^2;
% end
% f1=(v11/v12)^0.5
% f2=(v21/v22)^0.5
% v11=0;
% v12=0;
% v21=0;
% v22=0;
% for i=1:r1
%     v11=v11+((data1(i,3)-n1(i))/2500*1.25).^2;
%     v12=v12+(0.1-n1(i)/2500*1.25).^2;
% end
% for i=1:r2
%     v21=v21+((data2(i,3)-n2(i))/2500*1.25).^2;
%     v22=v22+(0.1-n2(i)/2500*1.25).^2;
% end
% f1=(v11/v12)^0.5
% f2=(v21/v22)^0.5
% v11=0;
% v12=0;
% v21=0;
% v22=0;
% for i=1:r1
%     v11=v11+((data1(i,3)-n1(i))/2500*2.5*0.981).^2;
%     v12=v12+(0.1-n1(i)/2500*2.5-2.5*0.019).^2;
% end

```

```

% for i=1:r2
%     v21=v21+((data2(i,3)-n2(i))/2500*2.50*0.981).^2;
%     v22=v22+(0.1-0.981*n2(i))/2500*2.5-2.5*0.019).^2;
% end
% v11
% v12
% v21
% v22
% f1=(v11/v12)^0.5
% f2=(v21/v22)^0.5

```

3、高斯扩散模型

```

%设定网格，下风向排放点距离 x 米，烟气中心轴水平距离 y 米
C=0.05;
x=input('x: ');
y=0;
gam1=0.110726;gam2=0.104534;
alp1=0.929418;alp2=0.826212;
gam3=0.146669;gam4=0.400167;
alp3=0.888723;alp4=0.632023;

sigy=gam3*x.^alp3;%水平扩散系数
sigz=gam4*x.^alp4;%垂直扩散系数

u=input('u: ');%风速
h=80;
detah=0.332.*(2502.02^0.6).*(h^0.4)*(1./u);
He=h;%+detah;
z=0;%高度

Cpi=C.*(pi*u.*sigy.*sigz+eps);%计算公式第一部分
ex1=exp(-0.5*(y./(sigy+eps)).^2);%计算公式第二部分
ex2=exp(-0.5*((z-He)./(sigz+eps)).^2)+exp(-0.5*((z+He)./(sigz+eps)).^2);%计算公式第三部分
Q=Cpi./(ex1.*ex2);%计算扩散气体浓度
Q

```

4、其他模型

```

%用于拟合对数正态分布曲线

```

```

clc,clear
format long g
x=0:6
x2=log(x);
x1=[0.01 19.25 56.75 100 167.5 325 450 ]/1000000;
x4=log(x1)
x3=[ 19.25 56.75 100 167.5 325 450 ];
y1=[0 6.28 75.5 87.9 92.8 97.1 100 ]/100;
z=y1(2:length(y1))-y1(1:(length(y1)-1));
hold on
bar(z,'y')
z1=z
z=[0.01 z]
scatter(x,z,'b*')
hold on
scatter(x,y1,'bo')

hold on
%对数正态分布密度函数

fun=@(p,x) p(1)./x.*exp(-((log(x)-p(2))/p(3)).^2/2);
[maxy,ind]=max(z);
%做非线性数据拟合
p=nlinfit(x,z,fun,[maxy*x(ind),log(x(ind)),1]);
%画拟合曲线
xl = min(x):0.01:max(x);
yfit=fun(p,xl);
%plot(xl*1000000,yfit,'k','linewidth',2);
hold on
%plot(x,y1);
axis([0 7 0 1.10])
xlabel('粉尘粒径/  $\mu$  m')
ylabel('分布/%')
set(gca,'XTickLabel',{'0','<38.5','38.5~75','75~125','125~200','200~450','>450','>1000'})
dp=x1;
a = 0.0254;
b = 4.008;

```

```

        c =          0.564 ;
        lj=1./(a.*dp.*1000000).*exp(-((log(dp)+log(1000000)-b)./c).^2)
        x5=(0:10:450)/1000000;
        plot(x1,lj)
        yn=interp1(x1,y1,9*10^(-6),'cubic') %三次样条插值
        %plot(x5,yn)
    %length(x5)

    clc,clear
    format long g
    x1=[19.25 56.75 100 167.5 325 450
        15 34.25 46.25 64 114 154
        30.5 78.5 108 150 215 250
        19 56.5 87 175 625 1000
        18.5 55 99 167 253 297
        ];
    y1=[6.28 75.5 87.9 92.8 97.1 100
        8 23 46 73 89 100
        36 46 57 77 82 100
        18.8 55.4 68.1 96.5 99.8 100
        24.5 60.2 83.1 93.9 98 100
        ];
    alpha=0.05;
    for i=1:5
        x=log(x1(i,1)-10):0.1:log(x1(i,6));
        y = interp1(log(x1(i,:)),y1(i,:),x,'spline');
        for j=1:length(y)
            if y(j)<0
                y(j)=0;
            end
        end
    end
    z=y(2:length(y))-y(1:(length(y)-1));
    z=[0 z];
    k=1;
    for s=1:length(z)
        if z(s)<0
            z(s)=0;

```

```

        end
    end

    while z(k)>=0&&k<length(z)
        k=k+1;
    end
    for l=k:length(z)
        z(l)=0;
    end
    %plot(log(x),z)

    [muhat,sigmahat,muci,sigmaci]= normfit(z);%参数估计 均值,方差,均值的 0.95 置信区
    间,方差的 0.95 置信区间
    subplot(1,5,i)
    normplot(z);
    [h,sig,ci,stats]= ttest2(z,muhat,0.01)    %假设检验
end

```