**机械炉排式焚烧炉床面垃圾层厚计算及运行分析**

**胡洪铭 李君**

**深圳市鼎铸环保技术有限公司，广东深圳，518057**

**摘要**：床面垃圾层厚是影响生活垃圾焚烧炉焚烧状态的一个重要参数,床面垃圾层厚通过影响焚烧炉的配燃空气量和搅拌着火容易度，进而直接影响到生活垃圾烧透程度、床面停留时间与烟气污染程度。本文分析了生活垃圾样本焚烧所需的理论燃烧空气量，并测得配燃空气穿过生活垃圾层时引起的渗透压降，利用达西公式计算床面垃圾层厚，并通过实际应用中的焚烧炉数据进行对比验证。结果表明：达西公式可用于计算生活垃圾焚烧炉床面垃圾层厚。

**关键词**：机械炉排式焚烧炉 燃烧空气量 垃圾渗透率 压降

**引言**

随着我国城市化程度的日益提高，居民物资消耗增加，由此产生的生活垃圾也日益增加。现阶段我国人均产出生活垃圾已经达到约每年400kg的水平，且逐年以8%～10%的增长率增加。直至2017年，我国生活垃圾储存量将近60亿吨，共侵占土地5亿平方米。

生活垃圾焚烧处理作为最有效的减容方式，逐渐成为生活垃圾处理的最主要选择。国内已建、在建及将建生活垃圾焚烧厂使用的炉排主要有机械炉排、流化床以及其他炉排，而在日处理生活吨量方面，机械炉排：流化床：其他炉排的比例为14.92:3.25:1，可见机械炉排是未来生活垃圾焚烧处理的发展方向。

机械炉排一般具有单炉处理量大，无需预处理等优点。影响机械炉排垃圾焚烧的因素有生活垃圾的性质、停留时间、焚烧温度、配燃空气湍流度以及过量空气系数。生活垃圾配燃空气的供给量影响生活垃圾在焚烧炉床面的停留时间、烟气在炉膛的停留时间、生活垃圾的燃烧温度与配燃空气湍流度、生活垃圾烧透与否。而垃圾层厚是影响配燃空气供给的最关键因素，其表现为配燃空气穿透垃圾层时产生压降。而压降与生活垃圾层的固有渗透率、穿透空气量、空气的物理特性以及垃圾层厚有关。

生活垃圾堆体是一种孔隙结构材料，由于覆载荷与生物降解作用，垃圾堆体发生骨架变形时孔隙率变化会导致生活垃圾的固有渗透率产生变化。时间越长，生物降解作用越显著。新鲜生活垃圾的生物降解作用较弱，多孔介质特性相对趋于稳定。本文以YQZXH600型焚烧炉为例，利用测得配燃空气穿透垃圾层时产生的压降与新鲜生活垃圾的典型固有渗透率计算某一时段生活垃圾焚烧炉床面垃圾层厚，为焚烧炉的运行提供定量分析。

**研究方法**

 本文分析了国内特定地区的生活垃圾组分，通过计算得到生活垃圾可燃组分完全燃烧的理论需氧量和配燃空气量。在此基础上分析了加热膨胀后配燃空气穿透生活垃圾层时的流速，生活垃圾层的空气渗透率。并利用测得的配燃空气穿透生活垃圾层时产生的压降计算生活垃圾层厚。设计同等条件的生活垃圾摊铺试验进行实际厚度与计算厚度对比研究。

**生活垃圾样本**

本文计算的生活垃圾样本来自安徽某生活垃圾焚烧厂，原生垃圾成分为厨余46.83%，渣土17.8%，塑料15.71%，纸张11.56%，竹木5.22%，织物3.15%。原生垃圾的含水率为46.21%，经过一个星期的发酵(也叫生化降解)处理后，含水率降至30%左右。发酵处理后的生活垃圾由抓斗抛洒入生活垃圾焚烧炉进行摊铺焚烧。

**配燃空气量**

该生活垃圾样本的组分元素以及水分、灰分分析:

表1 生活垃圾样本元素含量及含水、灰分、可燃分百分比

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| C | H | N | S | O | Cl | 水分 | 可燃分 | 灰分 |
| 18.76 | 2.29 | 0.31 | 0.15 | 11.39 | 0.08 | 46.21 | 30.9 | 22.89 |

可燃组分其反应过程及耗氧量

$C+O\_{2}\rightarrow CO\_{2}$；

$2H\_{2}+O\_{2}\rightarrow 2H\_{2}O$；

$S+O\_{2}\rightarrow SO\_{2}$。

该生活垃圾焚烧厂设计焚烧量是600000kg/天，即是25000kg/小时。则每小时焚烧该生活垃圾样本所需理论配燃空气量[1]。

元素C：$25000×0.1876=4690 kg/h$，$4690÷12=390.833 Kmol/h$；

元素H：$143.125 Kmol/h$；

元素O：$88.984 Kmol/h$；

元素S：$1.172 Kmol/h$。

焚烧25000kg的该生活垃圾样本理论需氧量

$$M\_{O\_{2}}=390.833+143.125-88.984+1.172=446.146 Kmol$$

所需要理论配燃空气量$V\_{air}=446.146÷0.21×22.4=47588.9 Nm^{3}/h$（P=1atm，T=226℃）

该生活垃圾焚烧炉的过量配燃空气系数e一般取为1.8，则配燃空气量$V\_{air}=47589×1.8=85660 Nm^{3}/h$（P=1atm，T=226℃）

生活垃圾焚烧炉在焚烧生活垃圾时，具有一定厚度的生活垃圾堆层均匀铺在炉排床面上，燃烧从生活垃圾堆层的上方开始，以层燃的方式向下燃烧。生活垃圾焚烧炉的布风孔设置在炉排上，即位于生活垃圾堆层的下表面，一次配燃空气穿过布风孔后透过生活垃圾堆层参与燃烧。二次配燃空气则直接在生活垃圾上层吹入参与补充燃烧。本文介绍的生活垃圾焚烧炉在实际运行中，一次配燃空气体积流量:二次配燃空气体积流量比例设定为4:1，二次配燃空气体积流量在自动控制中设定为跟随一次配燃空气体积流量。

则一次配燃空气体积流量计算$V\_{air1}=85660×\frac{4}{1+4}=68528 Nm^{3}/h$（P=1atm，T=226℃）

其中一次配燃空气常用的温度是226℃，一次配燃空气压力(表压)比大气压力低3个数量级，因而一次配燃空气绝对压力取1atm，则一次配燃空气密度为$ρ\_{g}=0.73kg/Nm^{3}$（P=1atm，T=226℃）[8]。

根据理想气体状态方程$PV=nRT$，

——P为气体压强，单位Pa；

——V为气体体积，单位m3；

——n为气体的物质的量，单位mol；

——T为体系温度，单位K；

——R为理想气体常数，单位J/（mol·K）。

一次配燃空气温度上升，体积将膨胀，膨胀后的体积与常态（P=1atm，T=20℃）体积比值$i=\frac{273.15+226}{273.15+20}=1.7027$

则一次配燃空气体积$V\_{rair}=68528×1.7027=116683m^{3}/h$（P=1atm，T=226℃）

生活垃圾焚烧炉炉排床面从前端到后端按照生活垃圾燃烧过程共分为四个区：干燥区、燃烧区一、燃烧区二、燃烬区，见图1。在生活垃圾焚烧炉的实际运行中，按照生活垃圾在焚烧炉床面完整的燃烧过程分析，干燥区、燃烧区一、燃烧区二、燃烬区的配燃空气体积流量比例设为3:2.5:2.5:2，对应地，各区的面积比例设置为与各区的配燃空气流量比例一致，依顺序测得各区布风孔面积分别为73606、65948、65948、62392mm2。



图1 压力测点布置与焚烧炉示意

**压降及垃圾层厚**

**布风孔压降**$∆P\_{2}$

布风孔是设在生活垃圾焚烧炉床面均匀布置的透风孔，本文介绍的生活垃圾焚烧炉设置的单个布风孔直径为d布风=φ16mm，长度为L布风=20mm。布风孔的功用是使一次配燃空气均匀透过生活垃圾焚烧炉床面摊铺的生活垃圾层。

布风孔引起的压力损失按短孔压力损失模型计算：

表2 布风孔压降

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 焚烧炉面区域 | 干燥区 | 燃烧区一 | 燃烧区二 | 燃烬区 |
| 布风孔面积mm2 | 73606 | 65948 | 65948 | 62392 |
| 布风孔气流速度v m/s | 33 | 30.8 | 30.8 | 26 |
| 压降模型 | $∆P\_{2}=ξ\frac{ρ\_{g}v^{2}}{2}$(气体局部阻力系数$ξ$取1.67)$∆P\_{2}$－布风孔压降，Pa$ρ\_{g}$－一次配燃空气密度，$kg/Nm^{3}$ν－布风孔配燃空气流速，$m/s$ |
| 压降数值KPa | 0.663 | 0.578 | 0.578 | 0.412 |

**生活垃圾堆层层厚计算**

**新鲜生活垃圾堆层孔隙率**

城市生活垃圾是一种大孔隙结构的多孔介质，其孔隙率受到生化降解与压缩的共同影响。从长期来看，生化降解将使生活垃圾的孔隙率增加，而覆应力则使生活垃圾有压实趋势。国内城市现阶段新鲜生活垃圾在覆应力不大（≤10KPa，可认为是国内生活垃圾1米深堆层覆应力）的情况下，孔隙率在φ=0.65～0.75左右 [2][3]。

**新鲜生活垃圾堆层最大压降**

根据曾刚等[3]，国内城市生活垃圾在含水率在30%左右时，密度在$ρ\_{MSW}=600\~650kg/m^{3}$。含水率与覆应力是影响生活垃圾密度的两大因素。因为本文介绍的焚烧炉床面生活垃圾堆层层高变化范围是h=0.5～1.2m。覆应力因素对生活垃圾密度的影响可以忽略不计。假设焚烧炉床面生活垃圾堆层所有孔隙均被堵塞，生活垃圾堆层被吹起引起的理论最大压降ΔPmax应等于单位面积床面上的生活垃圾的重[4]。

$∆P\_{max}=ρ\_{MSW}gh$ （1）

式中：ΔPmax－床面生活垃圾堆层理论最大压降，Pa；

 $ρ\_{MSW}$－城市生活垃圾密度，kg/m3；

 h－床面生活垃圾堆层层厚，m。

$$∆P\_{max}=ρ\_{MSW}gh＝650×9.8×1.2＝7.64KPa$$

在焚烧炉的实际运行中，床面生活垃圾堆层产生的压降总是小于ΔPmax。ΔPmax是设计一次配燃空气鼓风机最大风压的依据。

**固有渗透率与Klinkenberg影响**[5] [6] [7]

多孔介质材料固有渗透率是表征多孔介质材料容许流体通过能力的一个参数，与通过介质的流体性质无关。影响多孔介质材料固有渗透率大小的因素有：孔隙率、孔道尺寸与几何形状等。实验室测定多孔介质材料的固有渗透率时，采用达西定律作为测试理论依据。达西定律由法国工程师H.P.G.达西通过实验总结得到，描述饱和砂中水的渗流速度与水力坡降之间呈线性关系，因而又称线性渗流定律。其基本形式为

$ν=\frac{κ}{μh}\left[∆P-ρ\_{f}gh\right]$ （2）

式中：ν－渗流速度；

 κ－固有渗透率；

 μ－流体粘度；

 h－多孔介质材料堆层层厚；

 ΔP－多孔介质堆层引起的压降；

 $ρ\_{f}$－流体密度。

因（2）式中$ρ\_{f}gh$项对整体影响可以忽略不计，略去此项，则

$ν=\frac{κ∆P}{μh}$ （3）

L.J.Klinkenberg（1941）发现用气体作为测试多孔介质渗透率的流体时，测得的多孔介质渗透率要比使用液体作为测试流体时更大。这是由于使用气体作为测试流体存在“滑动效应（slip flow）”，即是在多孔介质通流孔道半径接近气体分子平均自由程，通流孔道对气体分子的输运起到一个加强作用。该现象被称为Klinkenberg现象。

同一多孔介质，其气体测得的渗透率与液体测得的渗透率关系为：

$κ\_{air}=κ\_{L}\left(1+\frac{b}{P}\right)$ （4）

式中：$κ\_{air}$－气体渗透率，MD；

 $κ\_{L}$－液体渗透率，MD；

 b－Klinkenberg系数，MPa；

 p－平均压力，MPa。

$b=aμ\left(T/M\right)^{0.5}/r$ （5）

式中：a－取为7.32，常数；

 μ－气体粘度，mPa·s；

 T－绝对温度，K；

 M－气体分子量；

 r－通流孔道半径，μm。

$r=0.9\left(K\_{L}/∅\right)^{0.5}$ （6）

式中：φ－多孔介质孔隙率。

根据曾刚等[3]提出的新鲜生活垃圾固有渗透率计算模型，计得新鲜生活垃圾渗透率为：

$k\_{L}=2.48×10^{-11}×∅^{2.86}$ （7）

联合（7）、（6）、（5）、（4）式，计算得$κ\_{air}$。

将（3）式变形，并引入焚烧炉特性系数，计算床面生活垃圾堆层厚h

$h=C\_{pr}\frac{κ\_{air}∆P}{μν}$ （8）

式中：$C\_{pr}$－焚烧炉特性系数，与焚烧炉特性相关；

ν－空气渗流速度，由流量计与床面面积计算得到；

 $κ\_{air}$－空气渗透率；

 μ－空气粘度，226℃；

 h－生活垃圾堆层层厚；

 ΔP－生活垃圾堆层引起的压降，由压差传感器测得；

选取焚烧炉床面干燥区为对象计算：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 空气渗流速度 $ν$ | 空气粘度（226℃） $μ$[8] | 空隙率 $∅$ | 生活垃圾堆层引起的压降 $∆P$ | 固有渗透率 $κ\_{L}$ |
| 1.99 m/s | 2.6844×10－5 Pa·s | 0.75 | 0.9 KPa | 1.089×10-11 m2 |
| 通流孔道半径 $r$ | Klinkenberg系数 $b$ | 气体渗透率 $κ\_{air}$ | 焚烧炉特性系数 $C\_{pr}$ | 计算得堆层厚 $h$ |
| 11.65 MD | 0.0712 MPa | 1.8497×10-11 m2 | 2×106 | 0.62 m |

文中介绍的焚烧炉床面干燥区摊铺生活垃圾层厚为0.58m，计算得到的生活垃圾焚烧炉床面生活垃圾堆层厚与实际摊铺厚相差小于$\pm 10\%$，结果对于焚烧炉运行控制是可以接受的。

**结论**

本文通过压差传感器测得配燃空气穿过生活垃圾层时引起的渗透压降$∆P\_{3}$，利用固有渗透率模型计算得到国内新鲜生活垃圾的固有渗透率$κ\_{L}$，从而得到生活垃圾的气体渗透率$κ\_{air}$，最后通过达西公式计算得到床面垃圾层厚。结果表明，通过达西公式计算得到的生活垃圾焚烧炉床面垃圾层厚与实际应用中焚烧数据误差小于±10%，达西公式可有效用于生活垃圾焚烧炉床面垃圾层厚计算。

**参考文献：**

[1] 陈浩泉, 赵由才, 陆文龙. 航空垃圾焚烧炉空气量估算[J]. 环境卫生工程, 2004, 12(4):210-211.

[2] 徐晓兵, 李育超, 詹良通,等. 单一组分与多组分城市生活垃圾孔隙率特性对比研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4):599-606.

[3] Zeng G, Liu L, Xue Q, et al. Experimental study of the porosity and permeability of municipal solid waste[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2017.

[4] 郑锋, 姜迎春, 时勇. 对YG-35型循环流化床锅炉运行料层厚度测算和控制的分析[J]. 山东煤炭科技, 2006(1):20-21.

[5] 黄建章, 冯建明, 陈心胜. 获得克氏渗透率常规方法的简化[J]. 石油勘探与开发, 1994(4):54-58.

[6] Tanikawa W, Shimamoto T. Klinkenberg effect for gas permeability and its comparison to water permeability for porous sedimentary rocks[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2006, 3(4):1315-1338.

[7] Kallel A, Tanaka N, Matsuto T. Gas permeability and tortuosity for packed layers of processed municipal solid wastes and incinerator residue.[J]. Waste Management & Research the Journal of the International Solid Wastes & Public Cleansing Association Iswa, 2004, 22(3):186-94.

[8] 张家荣. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 新时代出版社, 1987.