

页岩颗粒在回转干馏炉内停留时间的正态性分析

李少华¹, 张立栋², 余侃胜¹, 张轩¹, 王擎¹

(1. 东北电力大学油页岩综合利用教育部工程研究中心, 吉林省 吉林市 132012;

2. 华北电力大学能源与动力工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Normality Analysis on Residence Time of Shale Particle in Rotary Retorting

LI Shaohua¹, ZHANG Lidong², YU Kansheng¹, ZHANG Xuan¹, WANG Qing¹

(1. Engineering Research Center for Oil Shale Comprehensive Utilization, Ministry of Education, Northeast Dianli University,

Jilin 132012, Jilin Province, China; 2. School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The experiments were carried out in a cool simulated rotary retorting, obtained oil shale tracer particles residence time based on different rotational speeds, angles of inclination and outlet diameter. To test the residence time normality the Shapiro-Wilk normality tests method was used, its outliers were detected and treated. The analysis show that residence time population distribution do not reject normality at detection level $\beta=0.05$. The test of outlier can detect straggler effective, make the sample mean of residence time more close to population expectation. Furthermore, through comparison of residence time probability density distribution different working conditions, the residence time population expectation and variance decrease followed by rotational speeds and angles of inclination increase.

KEY WORDS: shale; rotary retorting; residence time; normality tests

摘要: 搭建回转干馏炉冷态实验装置, 并通过试验得出了不同回转炉转速、倾角、出料口直径等操作与结构参数下页岩示踪粒子停留时间, 采用 Shapiro-Wilk 正态性检验方法对停留时间样本进行检验, 并进行正态样本离群值判断与处理。结果表明, 停留时间总体分布在检出水平 $\beta=0.05$ 下不拒绝正态性, 对停留时间样本进行离群值分析能有效的剔除歧离值, 使停留时间样本均值更接近其总体期望; 通过不同工况下停留时间概率密度分布可以看出, 停留时间总体均值及方差随转速、倾角的增加而减小。

关键词: 页岩; 回转干馏炉; 停留时间; 正态性检验

0 引言

页岩一般是富含有机质的沉积岩, 目前是石油

基金项目: 吉林省重大科技发展计划项目(20096034)。

Project Supported by Major Scientific and Technological Development Projects of Jilin Province (20096034).

等较为理想的补充能源, 处理时采用低温干馏技术, 是将页岩在干馏炉内隔绝空气加热到 450~600℃ 热解制取页岩油和燃料气, 干馏的方法可采用固体或气体热载体^[1]。本文以固体热载体页岩干馏工艺为基础^[2], 在回转式固体热载体干馏炉出口加装挡料板, 增加固体热载体与页岩在回转干馏炉内停留时间的同时可有效利用固体热载体的热量。页岩在干馏炉中的停留时间是干馏工艺中关键参数之一, 它直接关系到干馏气产量及干馏炉运行与结构参数的优化。停留时间过短, 页岩在干馏炉内未充分干馏, 导致产气率低; 停留时间过长, 在給料量一定时, 将浪费大量固体热载体的热量。因此, 页岩在回转干馏炉内的停留时间要控制适当, 才能得到较高的产气率及避免大量热量损失。页岩颗粒在回转干馏炉内运动是非连续的, 其沿回转干馏炉轴线向前运动的同时也会产生轴向扩散, 因此即使在相同工况下页岩在回转干馏炉内停留时间也并非单一确定值。因此很多学者曾对回转窑内物料停留时间分布进行研究, 李爱民、Li Shuiqing 等^[3-5]对石英砂和城市垃圾(municipal solid wastes, MSW)在回转窑内停留时间的分布进行比较, 得出石英砂的示踪粒子停留时间近似符合正态分布, 而 MSW 正态性较差。Abouzeid^[6]等基于轴向扩散推导了回转窑内物料停留时间概率近似服从正态分布的规律, 但是未对颗粒物料性质进行划分。王春华、陈文仲^[7-9]等对炭素在回转窑及变径回转窑内停留时间分布也做了相应的研究, 得出停留时间分布与正态分布比较接近, Liu Xiaoyan^[10]及文献^[11-13]

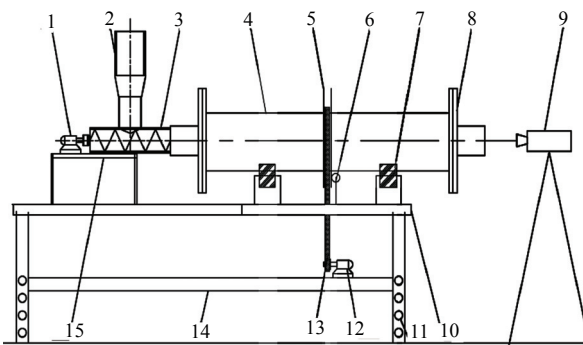
也对颗粒物料在回转窑内停留时间进行了研究。颗粒停留时间是流化床的非常重要指标^[14-15]，然而这些研究得出的停留时间的分布规律并未进行检验。

鉴于此，本文通过正态性检验对不同操作参数及结构尺寸下停留时间正态性进行检验，并对服从正态性分布的工况进行示踪粒子停留时间正态样本离群值的判断，为油页岩颗粒在油页岩干馏炉内停留时间得到更加可靠统计学规律提供依据。

1 实验

1.1 实验模型

实验装置如图1所示，回转干馏炉长 L 为600 mm、内径 D 为125 mm；出口挡料板直径 D_c 为70 mm；本实验采用六叶式廊式布置翻料板，尺寸为直板段28 mm、弯板段8 mm、直板段与弯板段夹角 90° 。回转干馏炉转速 n 可以在0~20 r/min实现无级变速，选取3.4、6.8、10、13.3、17 r/min等5种作为研究对象；倾角 α 可在 $0\sim 5^\circ$ 调整(入口高于出口可通过调节底座轴向两端的高度差来控制)，选取 2.16° 、 3.24° 、 4.33° 作为研究倾角。



1—螺旋给料机电机；2—给料斗；3—螺旋给料机；4—回转干馏炉；5—挡圈；6—定位轮；7—拖轮；8—出口挡板；9—摄像机；10—支架；11—倾角调节；12—传动电机；13—传动皮带；14—电机支架；15—给料机支架。

图1 回转干馏炉冷态实验装置

Fig. 1 Diagrammatic sketch of rotary retorting

1.2 实验物料

实验物料采用页岩颗粒，固体热载体采用循环流化床的循环灰，其物料形状性质等参数见表1。

表1 实验物料特性

Tab. 1 Character of material

实验物料	粒径分布/mm	颗粒形状 ^[16]	球形度 ^[16]	安息角/°	堆积密度/(kg/m ³)
油页岩	2~12	片理状、带棱	0.42~0.683	42.8	0.974
固体热载体	0~1	类球形颗粒	0.665~0.989	39.8	0.883

1.3 实验方法

采用示踪粒子(由相同物料染色制备，示踪粒子

粒径取8种(2、4、6、7、8、9、10、12 mm))的方法研究回转干馏炉的操作特性和结构特性等因素对页岩颗粒在其内部停留时间分布的影响。页岩与固体热载体送入干馏炉前按照质量比为1:3分别称取足量的物料，经螺旋给料机同时连续送入干馏炉内，当回转干馏炉在特定工况下，当运行达到稳定后，将示踪粒子送入回转干馏炉，测量示踪粒子由进料口至出料口流出时所需时间，对不同工况采用相同方法重新记录八种粒径的停留时间。页岩颗粒在干馏炉内向前运动的同时会受到其周围颗粒的弹性碰撞，由于受力不同等原因，即使在同一工况下，即同时送入干馏炉内的页岩颗粒的停留时间也不尽相同，本文采用统计学方法对页岩颗粒在回转干馏炉内停留时间分布进行正态性检验。

设 X_1, X_2, \dots, X_m 是来自总体 X 的一个样本，将试验全部页岩颗粒称为总体 X ， $T(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 是 X_1, X_2, \dots, X_m 的函数，则 $T(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 为一统计量，由于 $T(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 是随机变量的函数，因此统计量是一个随机变量，设 x_1, x_2, \dots, x_m 是相应于样本 X_1, X_2, \dots, X_m 的样本值，则称 $T(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是 $T(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 的观测值。在相同的条件下，对总体 X 进行 m 次重复独立观察得到 m 个结果 X_1, X_2, \dots, X_m ，同时具备如下性质：

- 1) X_1, X_2, \dots, X_m 都与总体具有相同的分布。
- 2) X_1, X_2, \dots, X_m 相互独立。

本文利用来自示踪粒子停留时间样本 $T(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 的信息，推断不同工况下页岩颗粒总体 X 停留时间的分布情况。

页岩在回转干馏炉内取样本量为 m 的随机停留时间样本，其样本均值用式(1)计算：

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (1)$$

用停留时间样本方差表示该工况下示踪粒子停留时间偏离 \bar{X} 的程度：

$$S^2 = \frac{1}{m-1} \left(\sum_{i=1}^m X_i^2 - m\bar{X}^2 \right) \quad (2)$$

式中： m 为样本观测数； \bar{X} 为停留时间样本均值； S^2 为停留时间样本方差。

2 结果与讨论

2.1 样本观测值

由于中心极限定理说明了不仅从正态总体抽取样本时，样本平均数这一统计量要服从正态分

布，即使是从非正态总体进行抽样，只要是大样本（容量 $m \geq 30$ ），样本平均数也趋向于正态分布。因此为更好检验停留时间正态性，选择样本量 $m=16$ 的小样本。现将出料口直径为 70 mm 的不同工况下停留时间样本观测值(T/min)按由小到大顺序排列，如表 2 所示。

表 2 不同工况下停留时间样本观测值
Tab. 2 Residence time sample observed value of different operating conditions

$\alpha/(\circ)$	$n/(\text{r}/\text{min})$	T/min
2.16	17	3.13,4.4,4.63,4.86,4.86,4.86,4.9,5.16, 5.33,5.52,5.58,5.83,5.98,6.5,6.51,7.2
		4.17,6.6,17.6,25.6,35.6,83,7.02,7.22, 7.6,7.65,7.75,7.76,7.82,8.53,8.66,10.17
	10	6.08,6.16,6.33,6.35,6.4,6.5,6.77,6.83, 6.85,6.97,7.16,7.25,7.76,9.33,9.5,13.69
		7.87,8.07,8.9,9.25,9.45,9.77,10.2,10.55,10.88, 11.24,11.66,11.75,12.18,12.25,12.8,13.9
3.24	17	2.6,2.69,2.7,2.78,2.83,3.07,3.08,3.2, 3.22,3.23,3.31,3.31,3.9,4.2,4.3,4.41
		2.48,2.7,2.94,2.95,3.01,3.08,3.1,3.16, 3.41,3.5,3.53,4.16,4.17,4.35,4.9,5.45
	10	2.83,2.83,3.08,3.42,3.83,3.85,4.13,4.77, 4.8,4.93,5.13,5.15,5.33,5.37,5.75,6.33
		4.3,4.95,4.97,5.4,5.43,5.77,5.78,6.31, 6.57,6.73,6.78,7.4,7.66,8.25,10.47
4.33	17	1.6,1.9,2.1,2.12,2.13,2.16,2.17,2.33, 2.4,2.5,2.5,2.57,2.67,2.83,3.3,3.16
		1.42,1.67,1.83,1.93,1.95,2.12,2.25,2.5, 2.66,2.69,2.81,2.86,3.05,3.33,3.4,3.53
	10	2.24,2.5,2.66,2.7,2.71,2.83,3.01,3.08, 3.28,3.58,3.6,3.62,3.75,3.75,3.95,4.02
		2.57,3.12,3.25,3.26,3.35,3.5,4.4,16, 4.33,4.5,4.75,4.83,5.33,5.53,5.58,6
3.4	17	4.66,4.76,5.55,5.58,5.68,6.6,18,6.21, 6.5,6.57,6.69,6.71,8.32,8.75,9.38,9.5
		11.15,11.37,11.5,12.68,15.13,15.66,16.49,
	10	6.45,6.47,8.3,8.83,9.4,9.5,9.8,10.5,11.13, 11.15,11.37,11.5,12.68,15.13,15.66,16.49,
		6.57,6.73,6.78,7.4,7.66,8.25,10.47

2.2 夏皮罗-威尔克法对停留时间正态性检验

由于停留时间是小样本，采用夏皮罗-威(Shapiro-Wilk)方法对停留时间的正态性进行检验将会收到良好的检验效果，具体步骤参见文献[17]，对表 2 所列工况用夏皮罗-威尔克法进行停留时间样本正态性检验，得到皮罗-威尔克法检验的统计量 W 值见表 3。

将表格中不同工况下 W 值与查表得到的 $W(m, P)$ 值对比，得到 W 小于 0.887 的工况有 $\alpha=2.16^\circ$ 、 $n=10 \text{ r}/\text{min}$ 与 $\alpha=3.24^\circ$ 、 $n=17 \text{ r}/\text{min}$ ，因此这 2 个工

表 3 夏皮罗-威尔克法 W 值
Tab. 3 W of Shapiro-Wilk method

$\alpha/(\circ)$	$n/(\text{r}/\text{min})$	W
2.16	17	0.975 9
	13.3	0.963 3
	10	0.677 7
	6.8	0.980 1
3.24	3.4	0.965 6
	17	0.876 6
	13.3	0.906 4
	10	0.947 3
4.33	6.8	0.943 1
	3.4	0.943 5
	17	0.978 9
	13.3	0.963 6
3.4	10	0.939 0
	6.8	0.958 1
	3.4	0.895 0
	17	0.978 9

况下停留时间样本值拒绝正态性假设。

2.3 正态样本离群值的判断与处理

根据国标数据的统计处理和解释—正态样本离群值的判断和处理(GB/T 4883—2008)得知判断和处理离群值有 3 种目的：1) 识别与诊断；2) 估计参数；3) 检验假设，因此针对停留时间的正态性还可对停留时间样本观测值进行离群值分析。对未知标准差情形离群值(样本中的一个或几个观测值，离其他观测值较远)的判断规则是：1) 在限定检出离群值的个数不超过 1 时，可以使用格拉布斯(Grubbs)检验法和狄克逊(Dixon)检验法；2) 当限定检出离群值的个数大于 1 时，可使用偏度-峰度检验法和狄克逊检验法的重复使用方法。由于本实验样本数较小，因此采用重复使用狄克逊检验法对表 1 中停留时间样本进行离群值分析，对表 1 中不同工况下停留时间样本进行离群值分析，其高端值及低端值计算结果见表 4。经对比样本狄克逊上下统计量 D_{16} 及 D'_{16} ，从表 4 中可以看出仅干馏炉倾角 2.16° ，转速 $10 \text{ r}/\text{min}$ 的工况存在高端歧离值，其他工况均未发现歧离值(统计离群值或歧离值)。

从图 2 可明显看出干馏炉在倾角为 2.16° 、转速为 $10 \text{ r}/\text{min}$ 的工况下，剔除歧离值后的正态概率密度拟合结果明显优于剔除前，同时经计算停留时间样本观测值均值从 7.496 减小到 7.083，停留时间样本观测值方差从 1.938 降低到 1.099，因此可以认为剔除歧离值后页岩颗粒在回转干馏炉内停留时间样本观测值的离散程度减弱，可以更好的表示该工况下平均停留时间，以期达到该工况下页岩颗粒的停留时间期望值。

表4 狄克逊检验法计算停留时间低端值和高端值
Tab. 4 Low-end value and high-end value of residence time by Dixon testing method

$\alpha/(\circ)$	$n/(r/min)$	D'_{16}	D_{16}
2.16	17	0.445 1	0.272 4
	13.3	0.458 7	0.410 0
	10	0.076 9	0.592 4
	6.8	0.235 2	0.323 2
	3.4	0.260 1	0.410 9
3.24	17	0.062 5	0.122 8
	13.3	0.246 0	0.438 2
	10	0.098 4	0.295 4
	6.8	0.181 1	0.449 1
	3.4	0.213 1	0.166 1
4.33	17	0.406 5	0.311 3
	13.3	0.214 7	0.117 6
	10	0.278 1	0.198 5
	6.8	0.229 7	0.170 9
	3.4	0.217 6	0.189 8

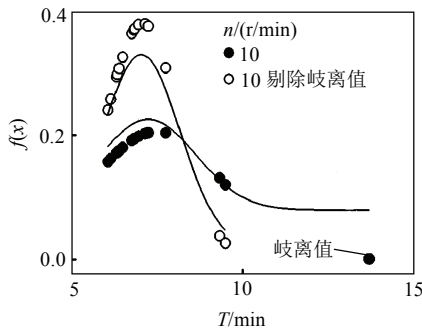


图2 剔除歧离值前后停留时间概率密度对比
Fig. 2 Comparison of pre and post out of straggler residence time probability density distribution

2.4 正态概率纸检验及偏度-峰度离群值判别

对于干馏炉倾角 3.24°、转速 17 r/min 的工况，在使用夏皮罗-威尔克检验法中计算 $W=0.8766$ ，小于查表得出的其临界值 0.887，虽未接受夏皮罗-威尔克正态性检验，但通过狄克逊离群值检验法未检出非正态分布的离群值，针对此工况做出正态概率纸来判断正态性，并对其采用偏度-峰度离群值检验法进行二次检验。

偏度统计量：

$$b_s = \sqrt{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^3 / [\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2]^{3/2} \quad (3)$$

峰度统计量：

$$b_k = m \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^4 / [\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2]^2 \quad (4)$$

计算 $b_s=0.743$ ， $b_k=2.287$ ，确定检出水平 $\beta=0.05$ ，查表得 $b_{0.95}(16)=0.83$ ， $b'_{0.95}(16)=4.14$ ，由于 $b_s < b_{0.95}(16)$ ， $-b_s < b_{0.95}(16)$ ， $b_k < b'_{0.95}(16)$ ，判定未发现高端或低端离群值，及未发现离观测值均值 \bar{x} 最

远的观测值为离群值。因此对于干馏炉倾角 3.24°、转速 17 r/min 的工况未拒绝该工况的正态性。

从图3可以看出，16个点基本在一条直线附近，故可接受该工况下停留时间正态性检验。

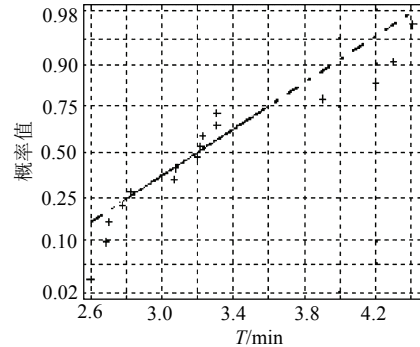


图3 $\alpha=3.24^\circ, n=17$ r/min 正态概率纸检验

Fig. 3 Normal probability paper at $\alpha=3.24^\circ, n=17$ r/min

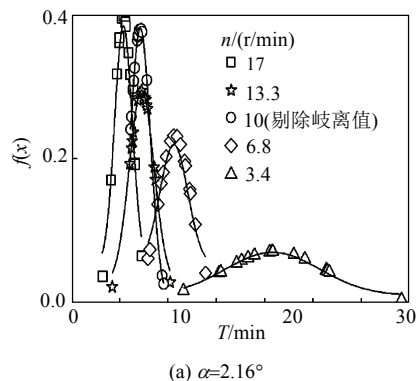
2.5 停留时间概率密度正态性分析

将页岩颗粒从回转干馏炉内流出过程看作是连续的，因此采用连续型正态分布概率密度公式(5)^[18]，对应将表1中停留时间样本观测值代入公式(5)中计算概率密度值并做图，如图4所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty \quad (5)$$

式中： μ 、 σ ($\sigma > 0$)为常数，则称 x 服从为 μ 、 σ 的正态分布。

计算表1中各个工况停留时间样本观测值的概率密度值，并对其进行正态性拟合，将同一倾角不同转速的概率密度值分别绘成图4(a)、(b)、(c)。从图中看出样本观测值概率密度值与正态概率密度值均拟合较好，说明页岩颗粒在回转干馏炉内停留时间不拒绝正态性分布，对同一倾角不同转速的工况，从图中可以看出随着转速增大，停留时间 μ 及 σ 也随之减小；以图4(a)、(b)、(c)中 3.4 r/min 为例分析，倾角从 2.16°增大到 4.33°时，停留时间 μ 及 σ 明显缩小，同时 $f(x)$ 值逐渐增大；从公式(5)中也可以看出当 x 值趋近于该工况下停留时间均值 μ 时，只



(a) $\alpha=2.16^\circ$

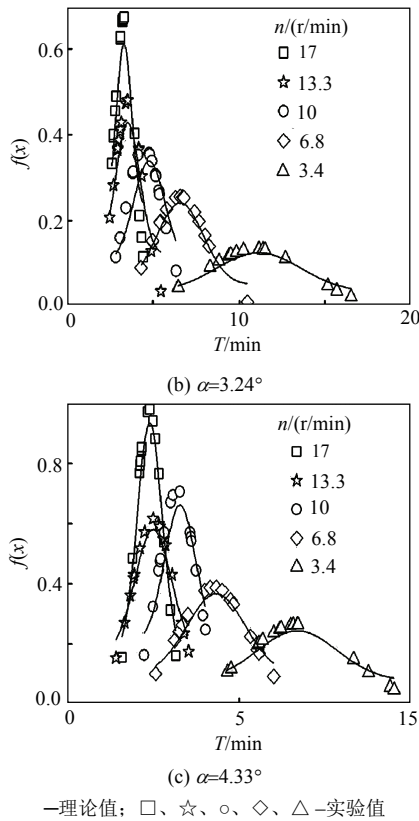


图 4 $D=125\text{ mm}$ 页岩颗粒停留时间概率密度分布
Fig. 4 Residence time probability density distribution of shale particle in $D=125\text{ mm}$

有其停留时间方差减小时才会出现 $f(x)$ 增大的情况，因此随着倾角的增大停留时间离散程度减弱，说明倾角对停留时间期望值及方差均有较大的影响。

2.6 放大干馏炉内径停留时间概率密度分布

为了解放大后回转干馏炉停留时间概率密度分布情况，将回转干馏炉内径 D 增到 210 mm 、长度及干馏炉出料口直径不变；操作参数方面，对转速 2.6 、 9.2 r/min 、3 种倾角 2.16 、 3.24 、 4.33° 分别进行实验。并对得到数据进行正态性检验及离群值分析，得出在干馏炉内径增大到 210 mm 时，停留时间数据同样不拒绝正态性，且未发现离群值，计算观测值的概率密度，如图 5(a)、(b)。

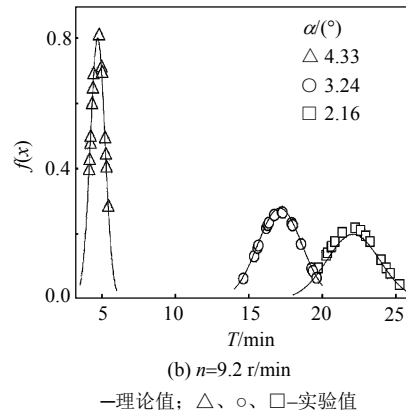
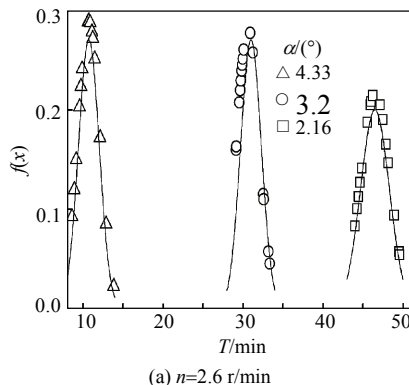


图 5 $D=210\text{ mm}$ 页岩颗粒停留时间概率密度分布
Fig. 5 Residence time probability density distribution of shale particle in $D=210\text{ mm}$

从图 5(a)、(b)中可以看出在同一转速下倾角从 4.33° 降低到 2.16° ，其概率密度 $f(x)$ 最高点值也是逐渐降低的，这与图 4 所得结果是一致的。从图 5(a) 与 (b) 对比来看，转速相对较低时，停留时间观测值分布值范围较宽，即标准差 σ 较大。

2.7 热态干馏炉停留时间应用分析

页岩在被固体热载体加热后，热载体热量传递给页岩表面，然后逐渐向页岩内部进行传热。页岩块度越小，热量越容易传至其中心。页岩热解的气态产物一起通过页岩内部空隙和毛细管扩散到块状页岩之外，页岩在 $450\sim 520\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时，页岩内的有机质(油母)生成页岩油蒸汽和热解气体的混合物以及固定碳^[19]。固定碳与页岩中原有无机矿物质一起形成半焦。孙佰仲^[20]通过电镜扫描仪分析，得到半焦在微观尺度其表面与油页岩不同，但在颗粒尺度下，其形貌等物性变化不大。另外在热态时，回转干馏炉干馏页岩时需要与外界隔绝空气，且炉内为微负压^[2]以方便热解气体流出，因此对 $2\sim 12\text{ mm}$ 页岩颗粒运动的影响可以忽略。

3 结论

- 1) 页岩颗粒在回转干馏炉内停留时间并非定值，通过停留时间样本观测值正态性分析，得出总体分布在检出水平 $\beta=0.05$ 下不拒绝正态性。
- 2) 采用正态样本离群值检验方法能很好地检出停留时间样本的离群值，为从样本的均值推断不同工况下总体停留时间期望起到了较好的数据质量监控作用。
- 3) 经过冷态干馏炉内径放大，其观测值的停留时间概率密度分布同样不拒绝正态性，其规律性为：停留时间期望随着回转干馏炉倾角的增大和转

速的提高而减少,主要原因是单位时间回转干馏炉内增大倾角及提高转速都使颗粒轴向运动数量增多,提高了颗粒轴向速率。

4) 停留时间概率密度分布规律可为热态实验提供参考。

参考文献

- [1] 王擎, 桓现坤, 刘洪鹏, 等. 桦甸油页岩的微波干馏特性[J]. 化工学报, 2008, 59(5): 1288-1293.
Wang Qing, Huan Xiankun, Liu Hongpeng, et al. Microwave induced pyrolysis of Huadian oil shale[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(5): 1288-1293(in Chinese).
- [2] 李少华, 王擎, 刘洪鹏, 等. 油页岩干馏炼油、半焦燃烧发电集成工艺: 中国, ZL 200710055610.1[P]. 2010-03-17.
Li Shaohua, Wang qing, Liu Hongpeng, et al. The integrated system of oil shale rotarting refining and semi-coke combustion for power: China: ZL 200710055610.1[P]. 2010-03-17(in Chinese).
- [3] 李爱民, 李水清, 严建华, 等. 城市垃圾在回转窑内传输过程的冷态实验[J]. 化工学报, 2002, 53(9): 912-917.
Li Aimin, Li Shuiqing, Yan Jianhua, et al. Cold testing on transport process of MSW in rotary kiln[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53(9): 912-917(in Chinese).
- [4] 李爱民, 李水清, 严建华, 等. 固体废弃物在回转窑内停留时间的试验研究[J]. 化学反应工程与工艺, 2002, 18(2): 152-157.
Li Aimin, Li Shuiqing, Yan Jianhua, et al. Experimental research on mean residence time of solid materials in rotary kiln[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2002, 18(2): 152-157(in Chinese).
- [5] Li Shuiqing, Chi Yong, Li Rundong, et al. Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns: Part II. Theoretical and optirnal analyses[J]. Powder Technology, 2002, 126(3): 228-240.
- [6] Abouzeid A Z M, Mika T S, Satstry K V. The influence of operating variables on the residence time distribution for material transport in a continuous rotary drum[J]. Powder Technology, 1974, 10(6): 273-288.
- [7] 王春华, 陈文仲, 陈海耿, 等. 炭素回转窑内物料停留时间的实验研究[J]. 中国冶金, 2009, 19(3): 24-27.
Wang Chunhua, Chen Wenzhong, Chen Haigeng, et al. Experimental study on residence time of solids in carbon rotary kilns[J]. China Metallurgy, 2009, 19(3): 24-27(in Chinese).
- [8] 王春华, 陈文仲, 陈海耿, 等. 变径炭素回转窑内物料平均停留时间的计算[J]. 化工学报, 2009, 60(3): 574-579.
Wang Chunhua, Chen Wenzhong, Chen Haigeng, et al. Calculation of mean residence time of solids in variable diameter rotary kiln [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(3): 574-579(in Chinese).
- [9] Chen Wenzhong, Wang Chunhua, Liu Tie, et al. Residence time and mass flow rate of particles in carbon rotary kilns[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(4): 955-960.
- [10] Liu Xiaoyan, Specht Eckehard. Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(15): 5176-5181.
- [11] Furuuchi M, Ohno E, Gotoh K. Particle shape and residence time of granular materials in a rotating tilted cylinder[J]. Advanced Powder Technology, 1990, 1(2): 101-113.
- [12] Portillo P M, Ierapetritou M G, Muzzio F J. Effects of rotation rate, mixing angle, and cohesion in two continuous powder mixers—A statistical approach[J]. Powder Technology, 2009, 194(3): 217-227.
- [13] Descoins N, Dirion J L, Howes T. Solid transport in a pyrolysis pilot-scale rotary kiln: preliminary results stationary and dynamic results[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(2): 315-321.
- [14] Christensen D, Nijenhuis J, van Ommen J R, et al. Residence times in fluidized beds with secondary gas injection[J]. Powder Technology, 2005, 2008, 180(3): 321-331.
- [15] Harris A T, Davidson J F, Thorpe R B. Particle residence time distributions in circulating fluidised beds[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(11): 2181-2202.
- [16] 陶珍东, 郑少华. 粉体工程与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 7-10.
Tao Zhendong, Zheng Shaohua. Powder technology and equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 7-10(in Chinese).
- [17] 韩永志. 统计学在理化检验中的应用. 第六讲 正态分布及其检验 [J]. 理化检验-化学分册, 2000, 36(3): 138-141.
Han Yongzhi. The application of Statistics in the physical and chemical tests six speeches normal distribution and its tests(continuation) [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B(Chemical Analysis), 2000, 36(3): 138-141(in Chinese).
- [18] 盛骤, 谢士千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 56-62.
Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability and Mathematical Statistics[M]. 3rd ed. Beijing. Higher Education Press, 2001: 56-62(in Chinese).
- [19] 钱家麟, 尹亮. 油页岩-石油的补充能源[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008: 81.
Qian Jialin, Yin Liang. Oil Shale-supplement energy of petrolic [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008: 81(in Chinese).
- [20] 孙佰仲. 油页岩及半焦混合燃烧特性理论与试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
Sun Baizhong. Theory and experimental investigation on combustion characteristics of oil shale and semi-coke blends[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009(in Chinese).



李少华

收稿日期: 2010-10-09.

作者简介:

李少华(1957), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为能源有效利用与节能减排技术, 多相流动数值与实验研究, lsh@mail.nedu.edu.cn;

张立栋(1980), 男, 博士研究生, 主要从事油页岩综合利用, nedu1015@yahoo.com.cn;

余佩胜(1983), 男, 硕士研究生, 主要从事油页岩综合利用;

张轩(1984), 女, 硕士研究生, 主要研究油页岩综合利用, zhangxuanlsh@163.com;

王擎(1964), 男, 教授, 研究方向为油页岩的综合开发利用及清洁能源技术, rx888@126.com.

(责任编辑 王庆霞)