

回转筒内秸秆碎料回转周期和料层完全混合时间研究*

周敬之¹ 周知星² 冯俊小¹ 李十中²

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学核能与新能源研究院, 北京 100084)

摘要: 基于试验和理论分析,研究了回转筒型固态发酵罐内秸秆粉碎料的料床回转周期,建立了数学模型,其计算准确度达95%以上;结合图像分析法和料床回转周期,发现筒内上下料层完全混合时料层所转圈数与筒体转速关系不大,与筒内料体积填充率呈线性关系。由此回归并推导出只需知道筒内料体积填充率和筒体转速,便可预测上下料层完全混合的公式,其计算准确度达90%以上。提出了以上研究成果在工业级发酵罐中应用的方法。

关键词: 固态发酵 秸秆粉碎料 图像分析法

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0178-08

Rotary Cycle of Crushed Straw Material Bed and Complete Mixing Time of Layers in Rotary Cylinder

Zhou Jingzhi¹ Zhou Zhixing² Feng Junxiao¹ Li Shizhong²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Cylinder is used for solid-state fermentation, and the lower crushed straw material layer in the cylinder is lack of oxygen which leads to higher layer temperature, death of yeast and the decrease of fermentation efficiency. Rotating the cylinder will mix the material layers to balance temperature. It needs to forecast the complete mixing time of layers. Firstly, a rotary cylinder was built to analyze the mode of material bed's rotation, and a model to describe the rotary cycle (T) of material bed was built. As there were too many variables need to be measured, height difference and length of bed's arc edge which were hard to measure were replaced with easily measured cylinder rotary speed and material volume filling rate based on regression and error analysis. The calculation accuracy of the simplified formula was higher than 95%. Secondly, based on image analysis method and VB programming, complete tests were done to get the complete mixing time (τ_c) of upper and lower layers at different filling rates (0.2, 0.4, 0.6) and rotary speeds of cylinder (0.9, 4.5, 8.0 r/min). τ_c was divided by T to get rotation number of material bed (N_R) when two layers were completely mixed. The results showed that N_R had little relationship with rotary speed of cylinder and had linear relationship with filling rate. Based on regression and error analysis, a formula was built to calculate N_R at different filling rates. Multiplying T by N_R can derive a formula which was used to forecast τ_c of upper and lower layers. The calculation accuracy of the formula was higher than 90%. The way to get such a formula on other cylinders was also introduced. The result is helpful on designing and operating of cylinder in order to improve fermentation efficiency.

Key words: Solid state fermentation Crushed straw material Image analysis method

收稿日期: 2014-12-10 修回日期: 2015-01-12

* 中央高校基础科研业务费专项资金资助项目(FRF-SD-12-007B)、北京市教委共建资助项目、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101805)和北京科技创新基地培育和开发资助项目(Z14110000614005)

作者简介: 周敬之, 博士生, 主要从事固态发酵研究, E-mail: ustbzhoujingzhi@126.com

通讯作者: 冯俊小, 教授, 博士生导师, 主要从事热测试和新能源研究, E-mail: jxfeng@ustb.edu.cn

引言

生物质能源领域常用含淀粉植物的汁液以液态发酵制备燃料乙醇^[1-4]。李十中教授梯队研发的回转筒连续发酵罐使固态发酵技术第一次工业实用化,具有比液体发酵耗能低、污染少、节水、技术要求低等优点^[5],在山东、内蒙、非洲等地投产,取得优异的经济和环境效益。用回转圆筒对秸秆粉碎料进行固态发酵^[6-8],发酵过程中,居于上层的料接触氧气,下层料相对缺少氧气,使下层料的菌群增长速度、发酵效率、料层温度更高^[9-10]。但当温度超过临界值时,菌群会大量死亡,极大影响发酵效率^[11],这也是古代酿酒时间长的原因。转动筒体可使料在筒中回转,上下料层逐步掺混,以平衡料层温度。预测上下料层的完全混合时间,对回转筒发酵罐的设计和工况设定,有重要的意义。

目前国内外对回转圆筒内秸秆粉碎料的运动规律没有研究,颗粒领域已有研究多针对球形颗粒^[12-14]。球类颗粒与秸秆粉碎料存在极大差异,已有结论难以套用^[15-17]。本文以试验和理论分析为主要研究方法,兼以图像分析法,研究回转筒内秸秆粉碎料床的回转周期与填充率、筒体转速等因素的关系,并建立数学模型;研究上下料层的完全混合时间与料层回转周期的关系,建立数学模型,用以预测上下料层完全混合的时间。该模型的建立对回转筒发酵罐的设计和工况选择有重要意义。

1 料床回转周期研究

1.1 试验设计

要对回转筒内秸秆粉碎料的回转周期建立物理模型,需要先研究秸秆粉碎料的截面运动模式。本实验室有一套实验室级回转筒发酵罐设备。为研究方便,本文的试验台基于该实验室级发酵罐而设计^[18-19],其结构如图1所示,筒体内径400 mm,深60 mm。

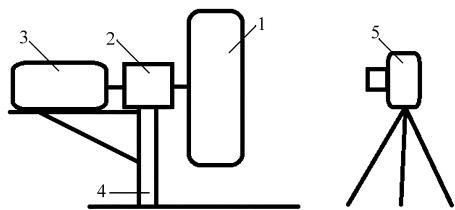


图1 试验台结构示意图

Fig. 1 Sketch map of test equipment

1. 回转筒体 2. 减速齿轮箱 3. 调速电动机 4. 支架 5. 照相机/摄像机

新制一批秸秆粉碎料^[20],观察不同填充率和筒体转速下,料在筒内的回转运动。

实验室级发酵罐的常用填充率为0.3~0.5,筒

体转速为1~7 r/min。本文试验台的填充率和筒体转速水平基于以上数据设立,并稍微扩大区间,其中填充率0.2~0.6;筒体转速0.9~8.0 r/min。

1.2 料层运动模式分析

采用示踪粒子法,观察发现:

(1)不存在不参与料的升落过程、没有截面平动的料层回转中心,所有颗粒都参与上升和下落过程。而传统球形颗粒料床多存在基本不运动的料自转中心区。

(2)料床外缘颗粒回转一周时,料床整体恰好回转一周。

(3)料床运动为“上移-下落”循环。一个料床运动周期分4部分:①贴壁上升。②离壁移动。③下落。④贴壁移补(移动补足路程至一个完整周期)。阶段①~②合并表示为图2a~2b,其中图2b所示时刻料床即将发生落料;阶段③为图2b~2d,垂直落料过程为自由落体;阶段④为图2d~2e,料从落点移到①阶段的始发点,其时长和阶段③相等。由此完成循环。料床外缘颗粒在一个周期中的运动过程如图2中五角星和轨迹线所示。

(4)与球形颗粒不同,料床外缘贴壁部分的粉碎料颗粒与筒体内壁之间没有相对滑移,其移动线速度大小等于壁面的线速度。

(5)在阶段①~②,即图2a~2b,料层外缘移动的线速度大小相等,故可合并为弧面运动过程。观察发现,在工况确定、筒体和料床均已稳定转动的情况下,外缘颗粒在该阶段走过的弧面长度基本为定值。

(6)观察发现,工况确定、筒体和料层均稳定转动的情况下,外缘颗粒在阶段③下落的高度差基本为定值。颗粒每次下落的形式不同,有一次大量颗粒的坍塌下落,也有多次连续少量颗粒的撒落。下落的间歇性是由料在弧边和下落边的速度差异决定的。颗粒下落速度远大于在弧边的运动速度。此外,单位时间筒体运输上去的料量为定值,由此推断单位时间的平均落料量也是定值。

(7)料与壁面分离点的位置高度是微波动的,料床发生落料时其高度便会略下降,两次落料之间其高度会微微回升,其平均位置随筒体转速增加而略有升高。

(8)高位置的料相对蓬松,低位置的料被压得相对致密。秸秆料层中长、粗颗粒越多,料层整体越蓬松,在长粗颗粒附近容易形成小的空腔。

由以上(2)~(6),结合图2,可建立料床回转周期的物理模型:料床回转周期为外缘颗粒弧面运动时间与外缘颗粒下落时间和外缘颗粒移补时间的

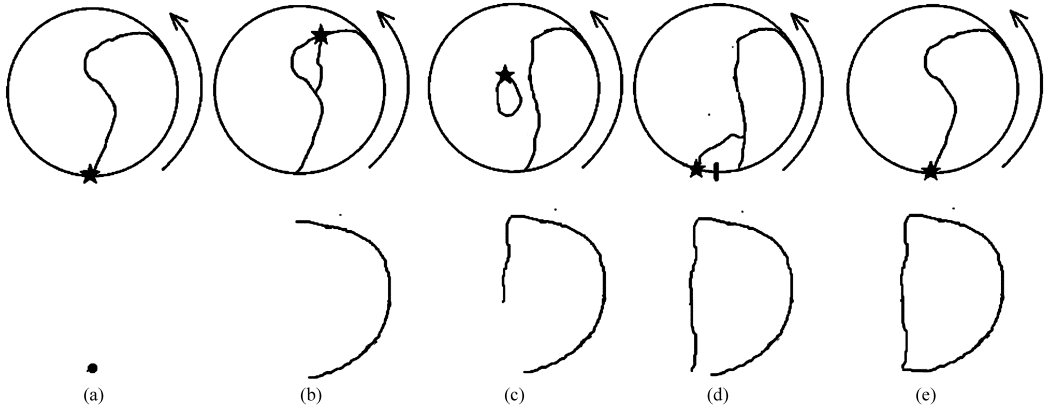


图2 料床回转运动及外缘颗粒(图中五角星)的运动轨迹示意图

Fig.2 Sketch map of rotary motion of material bed and trajectory of a particle

加和,其中外缘颗粒移补时间等于2次落料的间隔时间减去落料时间,由于其数量级相对于外缘颗粒贴壁移动时间而言过小,与颗粒下落时间处于同一数量级,并且数值接近,简化处理为与颗粒下落时间相等。

1.3 建立模型

设外缘颗粒从筒底运动到下落之前的轨迹弧面为 L ,即图3中弧 ABC , C 点时料床即将落料;颗粒下落垂直距离为 h ,即图3点 C 、 D 的高度差;颗粒的移补过程即图3中点 D 到点 A 。

运动弧 ABC 用时

$$t_{ABC} = \frac{L}{v_{ABC}} = \frac{L}{v_{cylinder}}$$

落体 CD 用时

$$t_{CD} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

移补 DA 用时

$$t_{DA} = t_{CD}$$

可建立料床回转周期的数学模型为

$$T = t_{ABC} + t_{CD} + t_{DA} = \frac{L}{v_{cylinder}} + 2\sqrt{\frac{2h}{g}} = \frac{60L}{\omega\pi d} + 2\sqrt{\frac{2h}{9.81}} \quad (1)$$

针对本文试验台 $d=0.4\text{ m}$,得计算式

$$T = \frac{60L}{\omega\pi d} + 2\sqrt{\frac{2h}{9.81}} = \frac{47.77L}{\omega} + 0.9\sqrt{h} \quad (2)$$

- 式中 T ——料床回转周期, s
- L ——颗粒弧面运动长度, m
- v_{ABC} ——料外缘贴壁移动线速度, m/s
- $v_{cylinder}$ ——筒内壁线速度, m/s
- h ——颗粒下落距离, m
- g ——重力加速度,取 9.81 m/s^2
- d ——筒体内直径,取 0.4 m
- ω ——筒体转动速度, r/min

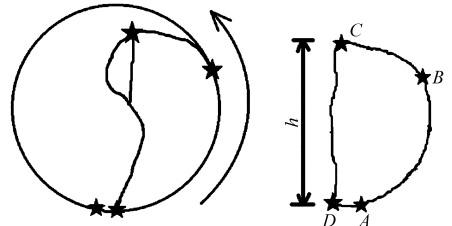


图3 参数 h 和 L 的示意图(L 即弧 ABC 的长度)

Fig.3 Sketch map of parameters h and L (L is length of arc ABC)

1.4 验证模型公式的准确度

用本文设计的试验台,采用示踪粒子法,测稳定状态下不同填充率和筒体转速的弧面长 L ,落料高度差 h ,代入式(2)得料床回转周期的计算值 T ;并用秒表测相应填充率和筒体转速下料床回转周期的试验值 T_s ,对比 T 和 T_s 以验证模型公式的准确度。填充率为 0.2 、 0.4 、 0.6 ,筒体转速为 0.9 、 4.5 、 8.0 r/min 。结果如表1所示,计算值 T 相对于测量值 T_s 的相对误差平均为 -0.35% ,相对误差绝对值最大为 2.28% 。计算准确度达 97.7% 以上,说明模型(1)及式(2)可靠。

表1 试验结果及式(2)计算值

Tab.1 Experimental results and calculated results with formula (2)

| 填充率 | 筒体转速 ω ($r \cdot \text{min}^{-1}$) | 弧面长 L/m | 落料 高度差 h/m | 计算值 T/s | 测量值 T_s/s | 相对 误差/ % |
|-----|---|--------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|
| 0.2 | 0.9 | 0.54 | 0.24 | 29.10 | 29.53 | -1.44 |
| | 4.5 | 0.55 | 0.26 | 6.30 | 6.21 | 1.43 |
| | 8.0 | 0.53 | 0.25 | 3.62 | 3.65 | -0.92 |
| 0.4 | 0.9 | 0.59 | 0.27 | 31.79 | 32.15 | -1.13 |
| | 4.5 | 0.61 | 0.29 | 6.96 | 7.03 | -0.97 |
| | 8.0 | 0.60 | 0.28 | 4.06 | 3.97 | 2.28 |
| 0.6 | 0.9 | 0.79 | 0.29 | 42.42 | 43.03 | -1.42 |
| | 4.5 | 0.79 | 0.29 | 8.87 | 8.81 | 0.71 |
| | 8.0 | 0.78 | 0.29 | 5.14 | 5.23 | -1.65 |

1.5 简化计算式

式(2)所需测量参数较多,有弧面长 L 、落料高度差 h 、筒体转速 ω ,且 L 与 h 的测量较复杂。为减少所需测量项,同时进一步简化公式,需研究 L 和 h 与 ω 之间的关系,看是否可用含 ω 的计算式代替 L 与 h 。

1.5.1 弧面长 L

将表 1 中不同填充率下,弧面长 L 与转速 ω 的数据作图 4。由表 1 试验结果和图 4 发现, L 与填充率的关系较大,随 ω 的变化较小,简化处理下可认为在本文所研究范围内, L 只与填充率有关。

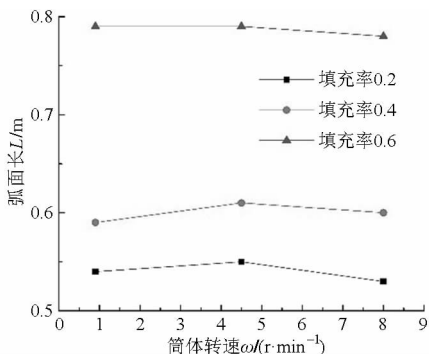


图 4 弧面长 L 随筒体转速 ω 的变化关系

Fig. 4 Changes of length of bed's arc edge L with rotary speed of cylinder ω

求相同填充率、不同转速下 L 的平均值,取该平均值为该填充率下的弧面长度代表值,作其与填充率的关系图,用于回归经验公式。由于回归经验公式需至少 6 个样本点才能确保回归的准确性,因此补充测量 6 个样本,即填充率 0.25、0.30、0.35、0.45、0.50、0.55 时的料床弧面长度 L 。使得回归样本达 9 个,并作图 5。

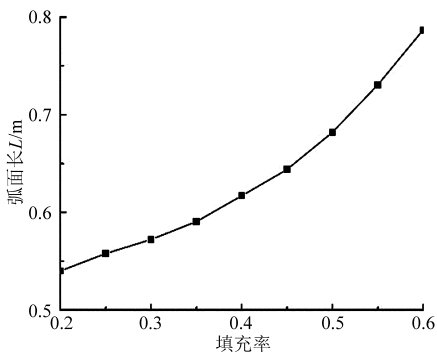


图 5 弧面长度与粉碎料体积填充率的变化关系

Fig. 5 Changes of average length of arc edge with volume filling rate of crushed materials

图 5 曲线形状类似指数函数,使用 1stOpt 软件,用麦夸特法结合通用全局优化法,对线条按照指数函数模型拟合,得经验式

$$L = 0.00107e^{8.7565x} + 0.5836 \quad (3)$$

式中 x ——粉碎料在回转筒内的体积填充率,单位为 1

拟合均方根误差为 0.0005 m,误差平方和为 1.18, $R^2 = 0.99997$,测定系数为 0.99997,满足准确度要求。

1.5.2 落料高度差 h

将表 1 中不同填充率下的落料高度差 h 对筒体转速 ω 的数据作图 6。

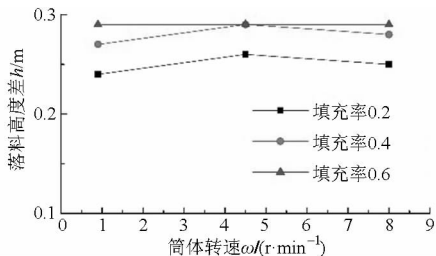


图 6 落料高度差 h 随筒体转速 ω 的变化关系

Fig. 6 Changes of height difference h with rotary speed of cylinder ω

由表 1 试验数据和图 6 发现,落料高度差 h 随转速 ω 的变化极小,简化处理下可认为在本文所研究范围内, h 与筒体转速 ω 无关。

求相同填充率、不同转速下 h 的平均值并取该平均值为该填充率下的弧面长度代表值,作其与填充率的线图。并补充测量 6 个样本,即填充率 0.25、0.30、0.35、0.45、0.50、0.55 时的落料高度差 h ,使得样本达 9 个,并作图 7。

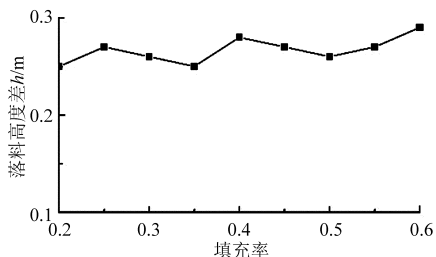


图 7 落料高度差与粉碎料体积填充率的变化关系

Fig. 7 Changes of average height difference h with volume filling rate of crushed materials

由图 7 发现,在所研究的颗粒填充率和筒体转速范围内,颗粒落料高度差随颗粒填充率变化不大,基本在 0.25~0.29 m 之间,由式(2)可知该范围内 h 的变动对 T 的计算影响极小。故简化处理下可认为本文研究范围内 h 为定值。对各填充率、各筒体转速下的 h 求平均值,得 0.27 m,取 h 为该定值。

1.5.3 简化结果

由 1.5.1 节和 1.5.2 节,可将式(2)简化为

$$T = \frac{47.77L}{\omega} + 0.9\sqrt{h} = \frac{47.77(0.00107e^{8.7565x} + 0.5836)}{\omega} + 0.9\sqrt{0.27} = \frac{0.051e^{8.757x} + 27.879}{\omega} + 0.469 \quad (4)$$

该计算式的适用范围为本文试验台及其原型的实验室级回转筒发酵罐,填充率为0.2~0.6,筒体转速为0.9~8.0 r/min。

1.5.4 简化计算式的准确度验证

用式(4),针对表1的工况,计算料床回转周期,与表1的料床回转周期测量值进行相对误差对比。结果如表2所示,计算值相对于测量值的相对误差平均为-0.95%,相对误差的绝对值最大为4.18,计算准确度达95%以上。

再在本文研究范围内随机取填充率、筒体转速,得2个工况,用式(4)预测料床回转周期,与实测值对比,结果如表3所示,准确度达95%以上。综上所述,式(4)满足使用要求。

表2 试验结果及式(4)计算值

Tab.2 Experimental results and calculated results with formula (4)

| 填充率 | 筒体转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 式(4)计算 值/s | 测量 值/s | 相对 误差/% |
|-----|----------------------------------|---------------|-----------|------------|
| 0.2 | 0.9 | 29.47 | 29.53 | -0.20 |
| | 4.5 | 6.27 | 6.21 | 0.96 |
| | 8.0 | 3.73 | 3.65 | 2.25 |
| 0.4 | 0.9 | 33.06 | 32.15 | 2.84 |
| | 4.5 | 6.99 | 7.03 | -0.60 |
| | 8.0 | 4.14 | 3.97 | 4.18 |
| 0.6 | 0.9 | 42.53 | 43.03 | -1.17 |
| | 4.5 | 8.88 | 8.81 | 0.81 |
| | 8.0 | 5.20 | 5.23 | -0.56 |

表3 由式(4)预测的料床回转周期与测量值对比

Tab.3 Comparison of calculated material layer rotary cycle with formula (4) and measured value

| 填充率 | 筒体转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 式(4)计 算值/s | 测量值/ s | 相对 误差/% |
|------|----------------------------------|---------------|-----------|------------|
| 0.39 | 4.26 | 7.23 | 6.90 | 4.76 |
| 0.56 | 3.38 | 10.95 | 10.51 | 4.31 |

2 料床回转周期与上下料层完全混合时间

如果能对回转筒内秸秆粉碎料上下料层的完全掺混时间进行数学建模,得到完全掺混时间的计算公式,则在回转筒发酵罐的设计和生工况选择时,就可以通过该公式进行预判,极大节约设计和生产成本。

为研究料床回转周期与上下料层完全混合时间的关系,先要研究上下料层的混合过程,这就需要表达混合度的指标。现有颗粒领域常用掺混度指标是接触数(Contact number),少数领域还用到Lacey index。这2个指标都只能由仿真软件获得^[21-22],无法在试验中得到。目前又没有对秸秆粉碎料进行

软件仿真的方法,基于仿真、接触数或Lacey index研究秸秆粉碎料上下料层的混合过程显然是不可能的,只能采用试验研究。

2.1 试验设计和混合程度的图像分析法

将新制秸秆粉碎料分为两部分,一部分保留原有黄色,一部分染为黑色,按照1:1的体积比,依次平铺在试验台回转筒内,形成上下两层。转动筒体会使料层随之回转、掺混。由于两料层的颗粒基本物理性质相同(尺寸、密度、摩擦因数、粘性、泊松比),按照概率论和试验观察,上下料层会随筒体转动而完全混合。截面上的颜色分布也会从泾渭分明的两块逐渐掺混、最终变为均一的灰色,过程如图8所示。料层混合过程和颜色变化过程完全同步,则截面的颜色掺混程度可以表达上下料层的掺混程度。

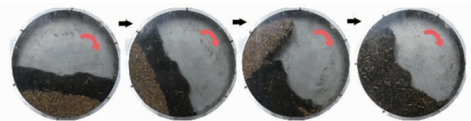


图8 染色料混合过程

Fig.8 Dyed situation and mixing process

基于图像分析法,处理回转筒截面照片并进行网格划分,编写软件计算图中所有秸秆粉碎料占据的格子数,和其中尚未掺混的、未染色秸秆粉碎料占据的格子数。显而易见:后者与前者的比值无量纲;初始时染色料层和未染色料层的体积比为1:1,故初始时该无量纲比值为 $1/(1+1)=0.5$;随混合进行,原色秸秆粉碎料占据区域越来越少直至消失,该比值会随之从0.5逐渐下降为0;混合过程和比值降低过程同步,如图9所示。

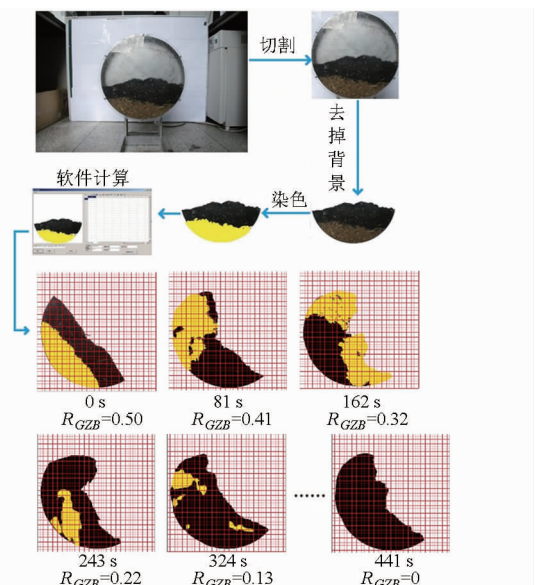


图9 图像分析法求格子比

Fig.9 Calculation of R_{GZB} using image analysis method

则该指标可表达上下料层的掺混程度。将该比值命名为格子比(GZB),其计算式为

$$R_{GZB} = \frac{N_w}{N}$$

式中 N ——所有秸秆粉碎料占据的格数(有料格数)

N_w ——在所有有料格中,尚未掺混的、未染色秸秆粉碎料的格数(原色料格数)

根据统计学原理, N 由四舍五入法求得:单格中,秸秆粉碎料量占据面积大于等于单格面积的50%,计有料格数加1,否则不计为有料格。未染色料占据该有料格的面积比为100%,计该有料格为一原色料格,否则不计为原色料格。

格子比的计算不需知道颗粒数,这使格子比既可从仿真软件得出也可从试验得出,这是接触数等指标不具备的优点。网格划分精细度是影响格子比计算值准确度的主要因素。本文通过大量研究发现,1.37倍颗粒特征长度的网格边长,得到的格子比在表达上下料层掺混程度上相对最准确。本文秸秆粉碎料颗粒特征长度多在10 mm,故网格尺寸为13.7 mm。

在不同的填充率、回转筒转速下作此试验,对筒体截面进行连续拍照,用图像分析法处理每一时刻的截面照片,得该时刻上下料层混合程度的格子比,作格子比-时间曲线,得曲线与横轴的交点对应的的时间,则该时间即该次试验上下料层的格子比完全混合时间 τ_c (图 10)。

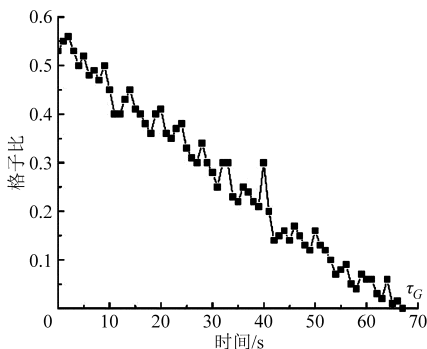


图 10 格子比完全混合时间

Fig. 10 Complete mixing time of R_{GZB}

填充率和筒体转速水平与上文相同,分别设置为0.2、0.4、0.6、0.9、4.5、8.0 r/min。该水平分布均匀覆盖了本试验台的工况范围。

2.2 上下料层的完全混合时间计算

将求得的各格子比完全混合时间作图 11,可知筒内上下料层基于格子比的完全混合时间随填充率升高和筒体转速减慢而增大。

由于图 11 还难以看出太多的规律性,引入前文

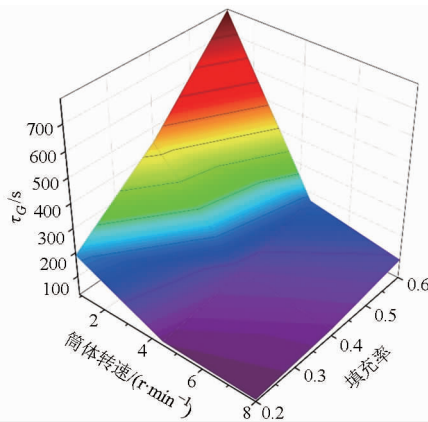


图 11 不同填充率和筒体转速的格子比完全混合时间

Fig. 11 Complete mixing time of R_{GZB} at

different filling rates and cylinder rotating speeds

研究的料床回转周期,将上下料层的完全混合时间换算为上下料层完全混合时料床累计回转的圈数 N_R ,即回转圈数等于格子比完全混合时间 τ_c 除以料床回转周期 T 。其中料床回转周期由式(4)计算。则可作立体图 12。

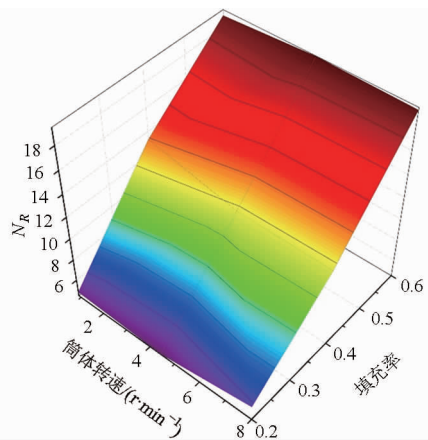


图 12 不同填充率和筒体转速下完全混合时料床回转圈数

Fig. 12 Rotary number of material bed when completely mixed at different filling rates and cylinder rotating speeds

由图 12 可发现较强的规律:上下料层完全混合时料床回转圈数与筒体转速关系不大,与填充率呈较好的线性关系。

对相同填充率、不同筒体转速下上下料层完全混合时的料床回转圈数求平均值,取该平均值为该填充率下上下料层完全混合时的料床回转圈数代表值。作料床回转圈数与填充率的相关曲线,并补充测量 6 个样本,即料体积填充率为 0.25、0.30、0.35、0.45、0.50、0.55 时,上下料层完全混合时料床转动的圈数。使得样本达 9 个,并进行经验公式回归,作图 13。

由图 13 可看出,各填充率下,上下料层完全混合时料床回转圈数与填充率之间呈较好的线性关

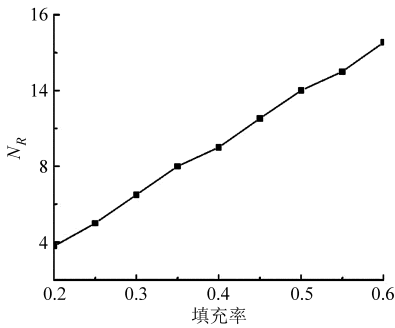


图13 料层完全混合时料床回转圈数与填充率的关系

Fig. 13 Rotary circle number of material bed when completely mixed at different filling rates

系。使用1stOpt软件,用麦夸特法结合通用全局优化法进行拟合,得经验公式

$$N_R = 30.205x + 0.357 \quad (5)$$

拟合的均方根误差为0.218,误差平方和为0.143, $R^2 = 0.998$,测定系数为0.998,满足准确度要求。结合式(4)可得

$$\tau_C = TN_R = \left(\frac{0.051e^{8.757x} + 27.879}{\omega} + 0.469 \right) (30.205x + 0.357) = \frac{(1.544x + 0.018)e^{8.757x} + 842.079x + 9.958}{\omega} + 14.173x + 0.168 \quad (6)$$

则由式(6),已知填充率 x 和筒体转速 ω ,便可预测本文试验台及其原型的实验室级回转筒发酵罐内上下料层完全混合时间。

2.3 料层完全混合时间计算式验证

用式(6),针对表1的工况,计算上下料层基于格子比的完全混合时间,并与基于图像分析法测得的格子比完全混合时间进行相对误差对比。结果如表4所示,计算值相对于测量值的相对误差平均为1.55%,相对误差绝对值最大为9.49%。计算准确度达90%以上。

表4 试验结果及式(6)计算值

Tab. 4 Experimental results and calculated results with formula (6)

| 填充率 | 筒体转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 式(6)计 算值/s | 测量值/ s | 相对 误差/% |
|-----|----------------------------------|---------------|-----------|------------|
| 0.2 | 0.9 | 203.29 | 189.00 | 7.56 |
| | 4.5 | 43.06 | 40.00 | 7.65 |
| | 8.0 | 25.54 | 28.00 | -8.80 |
| 0.4 | 0.9 | 414.61 | 441.00 | -5.98 |
| | 4.5 | 87.59 | 80.00 | 9.49 |
| | 8.0 | 51.82 | 48.00 | 7.97 |
| 0.6 | 0.9 | 781.87 | 786.00 | -0.53 |
| | 4.5 | 163.31 | 165.00 | -1.02 |
| | 8.0 | 95.66 | 98.00 | -2.39 |

再在本文研究范围内随机取填充率、筒体转速,得2组工况。用式(6)预测料层完全混合时间,与用图像分析法的实测值对比,结果如表5所示,准确度达90%以上。说明式(6)满足使用要求。

式(6)适用于本文试验台及其原型实验室级回转筒发酵罐的料床回转周期的计算,填充率范围0.2~0.6,筒体转速范围0.9~8.0 r/min。

表5 式(6)预测的完全混合时间与试验测量值对比

Tab. 5 Comparison of complete mixing time of R_{CZB} with formula (6) and measured values

| 填充率 | 筒体转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 式(6)计 算值/s | 测量值/ s | 相对 误差/% |
|------|----------------------------------|---------------|-----------|------------|
| 0.39 | 4.26 | 89.29 | 94.00 | 7.58 |
| 0.56 | 3.38 | 188.33 | 195.00 | -2.42 |

3 放大到工业级回转筒发酵罐

对工业生产级设备,由于筒体尺寸发生了变化,筒体内直径 d 、落料高度差 h 、弧面长度 L 将发生变化,式(2)、(4)、(6)将不适用。观察工业生产录像发现:

(1)无论筒体尺寸如何,其内料的运动模式都符合图2、3和式(1)的模型,只是规模不同。上下料层完全混合时的料床回转圈数 N_R 与筒体转速的关系不大,与填充率 x 之间接近线性关系,则只需测不同填充率下的 N_R ,便可用直线模型回归出该具体工业生产级回转筒的 N_R-x 经验公式。

(2)仍可以用本文所列的研究方法,基于模型式(1)得出该具体工业级回转筒的料床回转周期计算简化公式,并验证其计算准确度。根据式(6)计算出该具体工业级回转筒发酵罐的上下料层的格子比完全混合时间,并验证其计算准确度。

该研究成果对工业级回转筒发酵罐的设计和工况选择有很好的预测意义^[23]。

4 结论

(1)建立了回转筒型固态发酵罐内秸秆粉碎料回转周期 T 的数学模型和计算公式,并对公式进行了简化,简化后公式的计算准确度在95%以上。

(2)结合图像分析法,发现在本文研究范围内,筒内上下料层完全混合时料层所转圈数 N_R 与筒体转速 ω 关系不大,与筒内填充率 x 呈较好的线性关系。由此回归出 N_R 与 x 的关系式。推导出只需 x 和 ω 便能预测料层完全混合时间的计算式,计算准确度在90%以上。

(3)给出了该研究成果在工业级设备上的应用方法。

参 考 文 献

- 1 严洪冬. 甜高粱茎秆成分变化规律及发酵研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
Yan Hongdong. Study on the variation law of components and fermentation of sweet sorghum stalk [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- 2 渠晖, 沈益新. 国内外甜高粱研究概况[C]//2012 第二届中国草业大会论文集. 北京: 中国畜牧业协会, 2012.
Qu Hui, Shen Yixin. The research situation on sweet sorghum at home and abroad[C]// The Collection of Theses of Second China Grassland Congress in 2012. Beijing: China Animal Agriculture Association, 2012. (in Chinese)
- 3 梅晓岩, 刘荣厚, 曹卫星. 甜高粱茎秆固态发酵制取燃料乙醇中试项目能耗分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 194-198.
Mei Xiaoyan, Liu Ronghou, Cao Weixing. Energy consumption analysis on pilot-scale plant of fuel ethanol production from sweet sorghum stalk by solid state fermentation [J]. Transactions of the CASE, 2012, 28(4): 194-198. (in Chinese)
- 4 金花, 侯霖, 刘一清, 等. 甜高粱茎秆生产燃料乙醇的研究[J]. 酿酒科技, 2009(7): 17-20.
Jin Hua, Hou Lin, Liu Yiqing, et al. Study of fuel ethanol production by sweet sorghum stalk [J]. Liquor-making Science & Technology, 2009(7): 17-20. (in Chinese)
- 5 韩冰, 王莉, 李十中, 等. 先进固体发酵技术(ASSF)生产甜高粱乙醇[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 966-973.
Han Bing, Wang Li, Li Shizhong, et al. Ethanol production from sweet sorghum stalks by advanced solid state fermentation (ASSF) technology[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 966-973. (in Chinese)
- 6 代树华. 甜高粱茎秆固态发酵酒精及饲料的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
Dai Shuhua. Study on production of ethanol and protein feed from sweet sorghum stalk by solid state fermentation [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009. (in Chinese)
- 7 钱世凯. 甜高粱茎秆固体发酵制乙醇工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Qian Shikai. Study on technology of producing alcohol from sweet sorghum by solid-state fermentation [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 8 田宜水, 李十中, 赵立欣, 等. 甜高粱茎秆乙醇全生命周期分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 132-137.
Tian Yishui, Li Shizhong, Zhao Lixin, et al. Life cycle assessment on fuel ethanol producing from sweet sorghum stalks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 132-137. (in Chinese)
- 9 刘杰, 郑士梅, 李原有, 等. 利用甜高粱茎秆提取乙醇的实验报告(第 I 报)——不同品种乙醇提取量的实验[J]. 酿酒科技, 2007(5): 51-53.
Liu Jie, Zheng Shimei, Li Yuanyou, et al. Experimental reports on ethanol production from sweet sorghum stems (I)—experiments on ethanol production from different species [J]. Liquor-making Science & Technology, 2007(5): 51-53. (in Chinese)
- 10 刘杰, 张占金, 宋冰, 等. 利用甜高粱茎秆提取乙醇的实验报告(第 II 报)——不同贮存时期茎秆乙醇提取量的实验[J]. 酿酒科技, 2008(9): 62-64.
Liu Jie, Zhang Zhanjin, Song Bing, et al. Experimental report on ethanol production from sweet sorghum stems(II)—experiments of ethanol production by sorghum stems of different storage period [J]. Liquor-making Science & Technology, 2008(9): 62-64. (in Chinese)
- 11 梅晓岩, 刘荣厚, 曹卫星. 甜高粱茎秆固态发酵制取燃料乙醇中试项目经济评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 243-248.
Mei Xiaoyan, Liu Ronghou, Cao Weixing. Techno-economic assesment on pilot-scale plant for fuel ethanol production from sweet sorghum stem by solid state fermentation [J]. Transactions of the CASE, 2011, 27(10): 243-248. (in Chinese)
- 12 李德付, 尹洪超, 张明, 等. 回转窑横截面颗粒流动特性数值模拟研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(6): 703-708.
Li Defu, Yin Hongchao, Zhang Ming, et al. Numerical simulation of granular flow behavior in the cross section of a rotary kiln [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(6): 703-708. (in Chinese)
- 13 李勇. 回转窑内物料运动与传热特性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Li Yong. Features analysis about the material movement and heat transfer process in the rotary kiln [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 14 徐欣. 回转窑物料运动规律及其实时监测[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
Xu Xin. Solids motion in rotary kilns; motion behavior and real-time monitoring system [D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)
- 15 耿凡. 细长柔性丝状颗粒运动特性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
Geng Fan. Study on dynamics behavior of flexible filamentous particles [D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese)
- 16 Schutyser M A, Padding J T, Weber F J, et al. Discrete particle simulations predicting mixing behavior of solid substrate particles in a rotating drum fermenter [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001, 75(6): 666-675.

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 167 – 173. (in Chinese)
- 5 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588 – 1600.
Shen Bo, Zhang Shiyong, Zhong Yiping. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1588 – 1600. (in Chinese)
 - 6 Miao Yisheng, Yuan Ling, Wu Huarui, et al. Optimization of energy heterogeneous cluster-head selection in farmland WSN[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 441: 1010 – 1015.
 - 7 Hakan Bagci, Adnan Yazici. An energy aware fuzzy approach to unequal clustering in wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(4): 1741 – 1749.
 - 8 Kemal Akkaya, Mohamed Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 3(3): 325 – 349.
 - 9 Senouci M R, Mellouk A, Senouci H, et al. Performance evaluation of network lifetime spatial-temporal distribution for WSN routing protocols[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2012, 35(4): 1317 – 1328.
 - 10 Huang Feng, Zhao Chunjiang, Li Feifei, et al. An improved farmland WSN topology based on YG and clustering algorithm[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(21): 6463 – 6468.
 - 11 Sudhanshu Tyagi, Neeraj Kumar. A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(2): 623 – 645.
 - 12 吴华瑞, 赵春江, 张海辉. 农田无线传感器网络中的簇首轮换机制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2): 170 – 174.
Wu Huarui, Zhao Chunjiang, Zhang Haihui. Cluster head cycle-switching schemes for farmland wireless sensor networks[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2): 170 – 174. (in Chinese)
 - 13 Bara'a A Attea, Enan A Khalil. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(7): 1950 – 1957.
 - 14 Quan Wei, Zhao Futao, Guan Jianfeng, et al. An integrated link quality estimation-based routing for wireless sensor networks [J]. The Journal of China University of Posts and Telecommunications, 2011, 18(2): 28 – 33.
 - 15 李建洲, 王海涛, 陶安. 一种能耗均衡的 WSN 分簇路由协议[J]. 传感技术学报, 2013, 26(3): 396 – 401.
Li Jianzhou, Wang Haitao, Tao An. An energy balanced clustering routing protocol for WSN[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(3): 396 – 401. (in Chinese)
 - 16 洪榛, 俞立, 张贵军. 无线传感器网络自适应分布式聚簇路由协议[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1197 – 1205.
Hong Zhen, Yu Li, Zhang Guijun. An adaptive distributed clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1197 – 1205. (in Chinese)
 - 17 殷哲, 雷廷武, 董月群. 近红外土壤含水率传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 73 – 77.
Yin Zhe, Lei Tingwu, Dong Yuequn. Design and experiment of near infrared sensor for soil moisture measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 73 – 77. (in Chinese)
 - 18 Huang Feng, Zhao Chunjiang, Li Feifei, et al. A WSN routing and sleeping algorithm in agriculture intermittent data collection [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 513 – 517: 606 – 611.
 - 19 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感器研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216 – 226.
He Yong, Nie Pengcheng, Liu Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216 – 226. (in Chinese)
 - 20 陈庆章, 赵小敏, 陈晓莹. 提高无线传感器网络能效的双轮成簇协议设计[J]. 软件学报, 2010, 21(11): 2933 – 2943.
Chen Qingzhang, Zhao Xiaomin, Chen Xiaoying. Design of double rounds clustering protocol for improving energy efficient in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(11): 2933 – 2943. (in Chinese)

(上接第 185 页)

- 17 Puyvelde D R Van, Young B R, Wilson M A, et al. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis[J]. Powder Technology, 1999, 106(3): 183 – 191.
- 18 韩喆, 程婧璠, 林涛. 机械设计基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
Han Zhe, Cheng Jingfan, Lin Tao. Fundamentals of mechanical design [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- 19 吕太, 张墨, 张玉峰, 等. 粉煤灰转筒干燥装置实验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2003(4): 34 – 36.
Lü Tai, Zhang Mo, Zhang Yufeng, et al. Experimental and research on the rotary dryers of fly ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2003(4): 34 – 36. (in Chinese)
- 20 孙骊, 仇农学. 农产品物理特性及测量[M]. 重庆: 重庆出版社, 2007.
- 21 Chandratilleke G R, Yu A B, Bridgwater J. A DEM study of the mixing of particles induced by a flat blade[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 79: 54 – 74.
- 22 Jiang Maoqiang, Zhao Yongzhi, Liu Gesi, et al. Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer[J]. Particology, 2011, 9(3): 270 – 278.
- 23 梅从立, 束栋鑫, 江辉, 等. 基于电子鼻和高斯过程的秸秆固态发酵过程监测技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 188 – 193.
Mei Congli, Shu Dongxin, Jiang Hui, et al. Monitoring of straw solid-state fermentation based on E-nose and Gaussian process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 188 – 193. (in Chinese)