

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.02.007

## 桨叶干燥机的内部流场数值模拟分析

付双成<sup>1,2</sup>, 雒维文<sup>1,2</sup>, 陆明佳<sup>1,2</sup>, 袁惠新<sup>1,2</sup>, 刘雪东<sup>1,2</sup>, 郭文元<sup>3</sup>

(1.常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164;2.常州大学 江苏省绿色过程装备重点实验室,江苏 常州 213164;3.中石化宁波工程有限公司,浙江 宁波 315103)

**摘要:**桨叶干燥机是目前应用比较广泛的污泥干化处理设备,桨叶干燥机结构简单、紧凑,运行过程中不产生高温和高浓度粉尘,安全性高。以实物样机为参考进行建模,利用计算流体力学(CFD)软件对桨叶干燥机内部推料过程和污泥蒸发过程进行模拟研究。结果显示,圆盘刮片式桨叶具有搅拌作用,可以加速污泥的热量传递,有利于污泥水分进行蒸发,并且有明显的轴向推料作用;污泥蒸发过程的模拟利用 UDF 自定义蒸发模型,污泥进入到干燥机中经历了快速的升温、饱和温度下的蒸发过程,在出口附近的刮片附近蒸发过程减弱,污泥含水量趋于平稳。模拟结果可为改进桨叶干燥机的结构和提高干燥机的干化效率提供了参考。

**关键词:**污泥干化;推料;蒸发;数值模拟

中图分类号:TK 173

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)02-0053-07

## Numerical Simulation Analysis of Internal Flow Field of Paddle Dryer

FU Shuangcheng<sup>1,2</sup>, LUO Weiwen<sup>1,2</sup>, LU Mingjia<sup>1,2</sup>, YUAN Huixin<sup>1,2</sup>,  
LIU Xuedong<sup>1,2</sup>, GUO Wenyuan<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. Sinopec Ningbo Engineering Co., Ltd., Ningbo 315103, China)

**Abstract:** Paddle dryer is currently widely used sludge drying equipment, and it is simple and compact in structure. It does not produce high temperature, high concentration and of dust and it shows high safety during operation. The physical prototype was used as a reference for modeling. The computational fluid dynamics (CFD) software was used to simulate the internal pushing process and sludge evaporation process of the blade dryer. The results show that disc scraper paddle had stirring effect. It could accelerate the heat transfer of sludge. It is conducive to sludge evaporation, and there was a clear

收稿日期:2019-10-04。

基金项目:中国石化科技开发资助项目(319007-2)。

作者简介:付双成(1976—),男,黑龙江绥化人,博士,副教授。E-mail:fushch711@163.com

引用本文:付双成,雒维文,陆明佳,等.桨叶干燥机的内部流场数值模拟分析[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(2):53-59.

role in the axial thrust; The sludge evaporation process simulation used UDF custom evaporation model. The sludge entered the dryer, and it experienced rapid warming and the evaporation process at saturation temperature. The evaporation process weakened in the vicinity of the exit of the blade, and the sludge moisture content tended to be stable. The simulation results can provide a reference for improving the structure of the paddle dryer and improving the drying efficiency of the dryer.

**Key words:** sludge drying; pushing material; evaporation; numerical simulation

自 20 世纪 80 年代起,中国开始大规模建设现代污水处理厂,但污泥处理处置一直被忽视。污泥含水率高(一般为 98%),脱水后含水率仍大于 80%,体积庞大,不易处理<sup>[1]</sup>。由于中国污水处理产业的迅速发展和污水厂的建设和运行情况,污泥产生量必将大幅度增长,污泥处理将成为中国一个更加突出的环境问题<sup>[2]</sup>。

近年来,随着科技的快速发展,污泥处理技术不断改进,应用比较广泛的是污泥干化处理技术。污泥干化是指通过加热污泥,使其中的水分蒸发,从而实现污泥含水率降低的过程,达到污泥干化的目的,它是一种利用烟气、水蒸气或者工业余热使污泥中水分蒸发的深度脱水技术<sup>[3]</sup>。

污泥干化处理主要包括直接接触干化法和间接接触干化法 2 种<sup>[4]</sup>,间接接触干化法因其热效率高、污染物排放低等优点应用更广泛。桨叶干燥机是一种效能较高的污泥间接干化设备,其中间安装带有圆盘刮片桨叶的转轴,桨叶用作污泥的搅拌和推料,转轴中心通入热蒸汽用来间接加热污泥。桨叶干燥机工作原理为:污泥从物料进口通入,转轴中的热蒸汽将污泥中的水分进行加热蒸发,同时转轴带动圆盘转动,将污泥进行搅拌,加强污泥热量传递并且将其推向出口,经过不断的搅拌和蒸发过程,加热生成水蒸气从上面出口流出,而干化后的污泥达到工艺要求后从下面出口排出。整个污泥蒸发的过程是一个复杂并且伴有传质传热的相变过程。

## 1 研究现状

日本是利用桨叶式污泥干燥机干化技术进行污泥干化起步较早的国家。YAMAHATA 等<sup>[5]</sup>在 1984 年对桨叶干燥机里面的污泥特性进行实验研究,得出了干化机的传热模型。IMOTO 等<sup>[6]</sup>对日本国内污泥干化进行总结,介绍了一种楔形桨叶干燥机,它是以蒸汽作为热源,研究了干化速率随桨叶干燥机长度的变化规律。此后,法国学者 FERRASSE 等<sup>[7]</sup>对桨叶干燥机进一步研究,通过实验主要研究了搅拌速度,温度等对污泥干化效率的影响。LECOMTE 等<sup>[8]</sup>建立了简单的污泥干化的数学模型,通过实验对模型进行验证,得到该模型预测值与实验值接近。

与国外相比较,国内用桨叶干燥机处理污泥的研究比较晚<sup>[9]</sup>。夏磊等<sup>[10]</sup>在 MVR 技术中对空心桨叶干燥机干燥污泥恒速段实验进行了研究,得出降低干燥压力和压缩比可以提高系统的运行效率。但是,该实验只是对污泥干燥恒速阶段进行研究,没有对污泥干燥全过程进行研究。董富荣<sup>[11]</sup>对桨叶干燥机处理污泥优势进行阐述,但是没有进一步研究整个污泥干化过程。易浩勇<sup>[12]</sup>对楔形桨叶干燥机的干燥特性和干燥过程进行研究,分析了干燥温度和颗粒大小对干燥特性的影响,但是该过程将污泥假设为污泥颗粒,与实际污泥运动有一定区别。

综上所述,利用污泥干燥机进行污泥干化技术基本停留在试验阶段,而且对于污泥干化的过程处于摸索阶段。文章从工程应用的角度出发,采用计算流体力学方法,运用 FLUENT 软件对桨叶干燥机内的流场分布和传热传质过程进行数值模拟,以实现桨叶干燥机整个蒸发过程的可视化,可以更加详细地了解桨叶干燥机内部蒸发过程及特点,从而为桨叶干燥机结构改进提供理论依据和工程指导。

## 2 物理模型的建立和网格划分

根据桨叶干燥机实物模型进行1:1建模,建模结构和叶轮圆盘结构如图1和图2所示。桨叶干燥机模型外形尺寸为1 140 mm×5 500 mm×2 110 mm,进出口直径均为350 mm。圆盘直径为1 000 mm,中间转轴直径为345 mm,其中每隔180 mm间距装配一个圆盘刮片结构,总共28个圆盘刮片,4个刮片分别对称均布在圆盘上。采用非结构化四面体网格结构,网格总数量在420万左右,桨叶干燥机整体模型网格如图3所示。

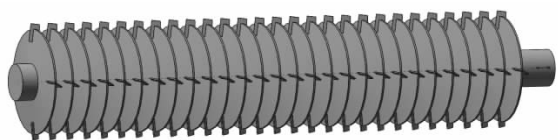
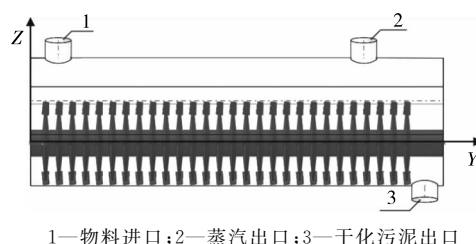


图2 桨叶干燥机圆盘结构图

Fig.2 Structure of the paddle dryer disc



1—物料进口;2—蒸汽出口;3—干化污泥出口

图1 桨叶干燥机结构图

Fig.1 Structure of the blade dryer



图3 桨叶干燥机整体网格图

Fig.3 Overall grid diagram of the dryer blade dryer

## 3 物性条件和边界条件设置

进料物性参数的设置:进料污泥的组成为水(80%)和沙子(20%)的均匀混合物,水的密度为1 000 kg/m<sup>3</sup>,沙子的密度为1 600 kg/m<sup>3</sup>。污泥物料的进口速度  $v=0.0053$  m/s,温度为常温300 K;中间的轴设为热壁面,温度为423 K。

边界条件的设置:物料进口设置为 Velocity-inlet,水蒸气出口设置为 Pressure-outlet,干化污泥出口设置为 Pressure-outlet。其中桨叶干燥机转轴及桨叶区域设置为动区域,转轴的转速  $\omega=10$  r/min,转向为逆时针;其他区域为静区域。

求解方法中设置 Gradient 为 Green-Gauss Cell Based,设置 Pressure 为 Body Force Weighted,采用 QUICK 格式,通过 FLUENT 软件进行模拟。

## 4 数学模型

对于桨叶干燥机内物料的流动和传热过程可由以下基本方程来描述:

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

式中: $\rho$  为密度,kg/m<sup>3</sup>;  $u_i$  表示  $i$  方向的速度分量,m/s;源项  $S_m$  是从分散的二级相中加入到连续相的质量,kg。该方程是质量守恒方程的一般形式,它适用于可压流动和不可压流动。

动量方程(在惯性坐标系中  $i$  方向上)为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: $p$  为静压,Pa;  $\tau_{ij}$  为应力张量;  $g_i$  和  $F_i$  分别为  $i$  方向上的重力体积力和其他外部体积力,N。

应力张量由式(3)给出,为

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

能量方程为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (4)$$

式中:  $T$  为温度, K;  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向上的速度分量, m/s;  $c_p$  为比热容, kJ/(kg · K);  $k$  为流体的传热系数;  $S_T$  为黏性耗散项。

污泥黏度与温度之间的关系根据 Andrade 通用式

$$\mu = K_M e^{E/k'T} \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为污泥黏度,  $10^{-3}$  Pa · s;  $K_M$  为污泥黏度相关系数;  $E$  为黏流活化能, kJ/mol;  $k'$  为气体常数, 取 8.314 kJ/(mol · K)。

根据 Lee 模型中, 液体和水蒸气蒸发的质量转移由蒸汽运输方程决定, 为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{v}_v) = m_{lv} - m_{vl} \quad (6)$$

式中:  $\alpha_v$  为蒸汽体积分数;  $\rho_v$  为蒸汽密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mathbf{v}_v$  为蒸汽速度, m/s;  $m_{lv}$  为蒸发过程中液体转换为蒸汽的质量转移率, kg/(s · m<sup>-3</sup>);  $m_{vl}$  为冷凝过程中气体转换为液体的质量转移率, kg/(s · m<sup>-3</sup>)。

而蒸发过程中, 如果液体温度  $T > T_{sat}$  时, 则液体开始进行蒸发

$$m_{lv} = \lambda_{cof} \cdot a_1 \rho_l \frac{(T - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_{cof}$  为修正系数;  $a_1$  为液体体积分数;  $\rho_l$  为液体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $T_{sat}$  为液体饱和温度, 取 373.15 K。由于 FLUENT 软件中自带的蒸发冷凝模型并不适用污泥干化模拟, 因此针对本次模拟编写相应的蒸发 UDF 程序来建立修正系数  $\lambda_{cof}$  与污泥含水量的关系, 将编写好的 UDF 程序加载到 FLUENT 软件中进行计算。

## 5 桨叶干燥机推料过程和蒸发过程数值模拟与分析

桨叶干燥机中的污泥在蒸发干燥的同时, 还存在着轴向推料的功能, 这样才能保证设备的连续运行, 防止干燥后的污泥堵塞在桨叶干燥机中。因此, 本研究中的流场模拟分为两部分: 推料过程和蒸发过程。

### 5.1 推料过程的数值模拟与分析

污泥进入到桨叶干燥机中, 由于叶轮带来的热量使污泥中水分不断蒸发, 污泥的含水量逐渐减小, 流动性逐渐降低。如果不能提供一个轴向的推力, 就会导致桨叶干燥机阻塞。通过速度场来分析桨叶干燥机推料过程。

#### 5.1.1 切向速度分析

纵向截面( $X=0$  mm 截面)的切向速度  $v_t$  分布如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 速度较大区域集中在圆盘周边刮片附近, 主要是由于圆盘旋转带动, 其切向速度与半径成正比, 越靠近圆盘周边切向速度越大, 其合速度越大。最大速度出现在刮片附近,

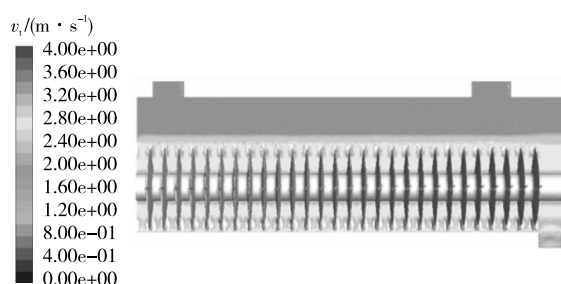


图 4  $X=0$  mm 横截面的速度分布图

Fig.4 Velocity distribution in  $X=0$  mm cross section

说明刮片对流场的改变较大。

$Y=400$  mm 截面切向速度  $v_t$  分布和速度矢量  $\mathbf{v}$  如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 中可以看出,刮片所在圆周区间的切向速度比较大,说明刮片带动污泥在圆盘的间隙内呈现圆周切向旋转运动;同时圆盘刮片可以搅拌污泥,有利于传热过程的进行。

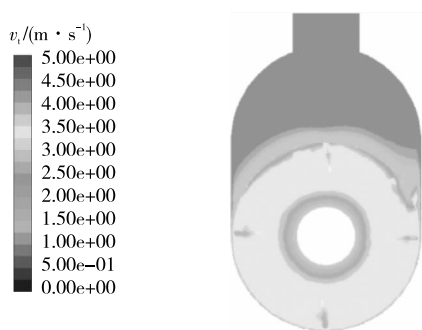


图 5  $Y=400$  mm 横截面的切向速度分布图

Fig.5 Tangential velocity distribution in  $Y=400$  mm cross section

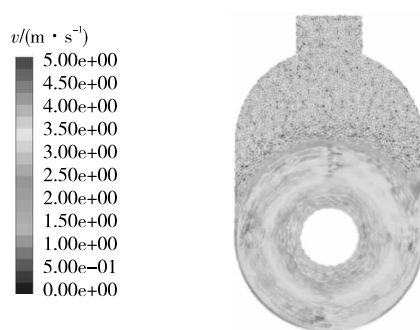


图 6  $Y=400$  mm 横截面的速度矢量图

Fig.6 Speed vector in  $Y=400$  mm cross section

### 5.1.2 轴向速度分析

$X=0$  截面轴向速度  $v_y$  分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出,轴向速度的较大区域主要集中在刮片所在区域,说明刮片是产生轴向推力的动力源。

为了进一步说明刮片的轴向推动作用,在桨叶干燥机底部沿着轴向方向取一条直线,该直线处于圆盘和壳体的间隙内,该直线上的轴向速度  $v_y$  分布如图 8 所示。从图 8 中可以明显的看出,该直线上的大部分的速度方向都为正值,说明物料是沿着轴线向出口方向运动;轴向速度的大小分布呈现周期性,在每个圆盘间隙内的流速分布规律相似。

综上所述,通过轴向速度云图以及底部间隙轴向速度图中可以看出,该转轴转动时刮片具有向出口推料的作用,且效果明显。

### 5.2 污泥水分蒸发过程的数值模拟与分析

分别取污泥蒸发过程中不同时段  $X=0$  mm 截面含水量  $\alpha_1$  分布图进行分析,该过程包括物料刚进入桨叶干燥机,进行蒸发以及到污泥蒸发完之后排出 3 个过程,如图 9 所示。

从图 9(a)、图 9(b)可以看出,污泥刚开始进入到桨叶干燥机中,由于温度尚未达到饱和蒸发温度,所以泥浆中的含水量仍然很高。当污泥接触到圆盘以后,由于圆盘是一个高温恒温热源,污泥中的水开始迅速蒸发,从图 9(b)中可以看出其蒸发产生的蒸汽带着部分液体上升,圆盘上方空间出现水蒸气和水的混合物。

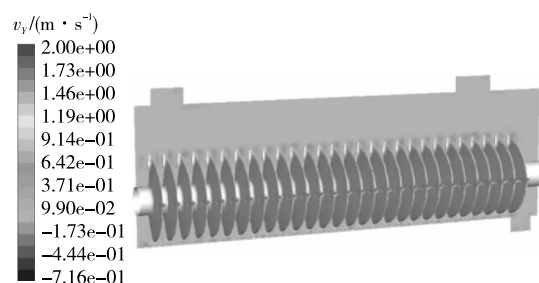


图 7  $X=0$  面的沙子的轴向速度分布图

Fig.7 Axial velocity distribution in sand with  $X=0$  surface

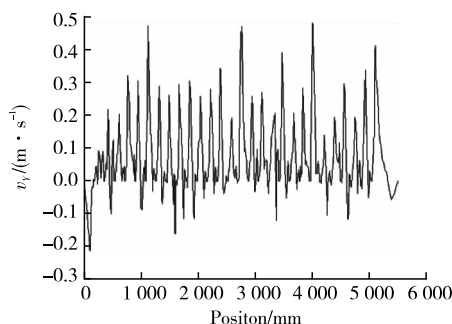


图 8 转轴底部间隙直线轴向速度

Fig.8 Linear axial velocity in the bottom of the shaft

从图 9(c)~图 9(f)可以看出,污泥落入圆盘间隙开始发生水分蒸发,主要蒸发过程发生在桨叶干燥机入口侧 1/3 这段空间内,同时也产生了大量的蒸汽,大量的蒸汽上升运动也会影响到进料污泥的运动。随着污泥在圆盘底部空间沿着轴向右侧运动的过程中,不断地与高温恒温的圆盘接触,继续发生蒸发过程。在桨叶干燥机中间的 1/3 区间发生的蒸发气量依然很大,随着蒸发过程的进行,污泥液固混合物的质量越来越少,在桨叶干燥机右侧 1/3 区间发生的蒸发的气量越来越少,最后几块圆盘的蒸发效果不明显。其主要原因有两方面:第一,经过前期蒸发的污泥的体积减小明显,大部分聚集在圆盘和壳体的间隙内,虽有刮片搅动和推动,但是与圆盘接触面积减小,影响了传热效果;第二,污泥混合物中的水分组成是十分复杂的,毛细结合水和内部结合水很难蒸发,污泥出口一定还会含有一定量的水。而模拟结果显示污泥出口的含水量和实际工况过程接近,说明本模拟过程和结果比较准确,能基本上反映桨叶干燥机内部的蒸发过程,可以为桨叶干燥机的优化设计提供指导。

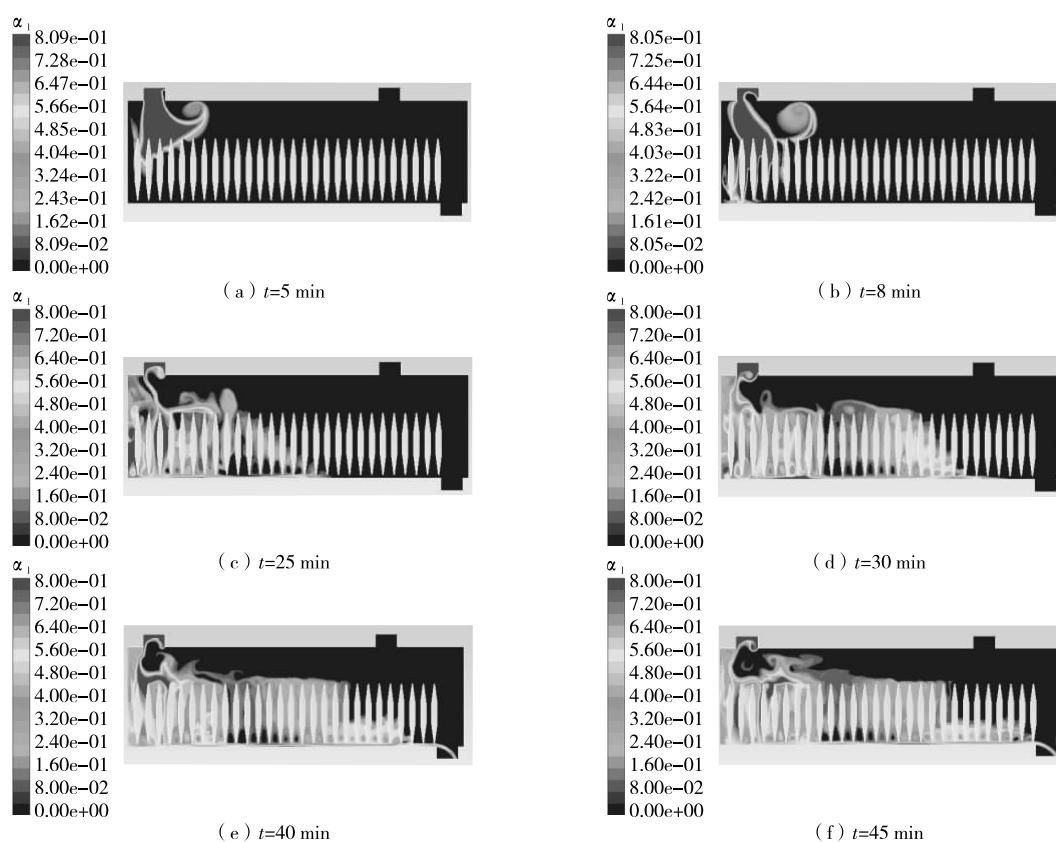


图 9 污泥蒸发不同时段  $X=0$  mm 截面含水量分布图

Fig.9 Distribution of water content in  $X=0$  mm section in different periods of sludge evaporation

## 6 结 论

通过对桨叶干燥机推料和蒸发过程的模拟,可以得到以下结论:

1) 圆盘上的刮片具有搅拌作用,可以加速污泥中热量传递,有利于蒸发过程的进行;同时刮片让桨叶干燥机的轴向推料的作用更加明显。

2) 在桨叶干燥机内部的蒸发模拟过程中,物料进入到桨叶干燥机中经历了快速的升温、饱和温度下的蒸发过程,大量的蒸发发生在入口附近 1/3 区域内,污泥含水量迅速降低;随着污泥被刮片的轴向推动和搅拌,蒸发过程进一步进行,在桨叶干燥机中间 1/3 区间污泥含水量继续降低,在出口附近的刮片

附近蒸发过程减弱,污泥含水量趋于平稳,满足工艺要求。

3)桨叶干燥机圆盘提供了大面积的恒温热源,为蒸发过程提供了动力,能够实现污泥的干化过程。根据蒸发过程的模拟结果,圆盘及刮片的结构尚有很大的优化和提升空间。

## 参考文献:

- [1]单凤君. 城市污水污泥脱水的最新研究进展[J]. 工业水处理,2017,37(2):7-11.
- [2]孙光. 城市污水处理厂污泥的处置与综合利用[J]. 建筑与预算, 2017(1):39-41.
- [3]郝先鹏. 污泥热干化技术的研究进展[J]. 四川化工, 2015, 18(5):11-13.
- [4]李博. 污泥高效干化方法及干化焚烧系统的优化运行研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [5]YAMAHATA Y, IZAWA H, HASAMA K. Experimental study on application of paddle dryers for sludge cake drying[M]//Drying'85. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1985: 479-484.
- [6]IMOTO Y, KASAKURA T, HASATANI M. The state of the art of sludge drying in japan[J]. Drying Technology, 1993, 11(7):1495-1522.
- [7]FERRASSE J H, ARLABOSSE P, LECOMTE D. Heat, momentum, and mass transfer measurements in indirect agitated sludge dryer[J]. Drying Technology, 2002, 20(4/5):749-769.
- [8]LECOMTE D. Method for thermal design of paddle dryers; application to municipal sewage sludge[J]. Drying Technology, 2004, 22(10):2375-2393.
- [9]虞向峰, 王庆海, 曾贤平. 污泥干化技术的现状及发展方向[J]. 轻工科技, 2016(5):106-107.
- [10]夏磊, 程榕, 郑燕萍. MVR 技术用于空心桨叶干燥机干燥污泥恒速段实验研究[J]. 化工时刊, 2015, 29(3):14-17.
- [11]董富荣. 桨叶干燥机污泥干化处理应用[J]. 化工管理, 2015(36):96-97.
- [12]易浩勇. 污泥干燥特性及干燥过程研究[D]. 南京:东南大学,2006.

(责任编辑:李艳)

\*\*\*\*\*

## 【上接第 44 页】

- [10]李直霖. ZLG7290 扩展键盘在 ARM Linux 系统中的应用[J]. 机电工程,2011,41(10):1253-1256.
- [11]陶莉, 陈万培. 多通道 NAND Flash 存储芯片控制器的设计与实现[J]. 无线电工程,2018,48(9):810-815.
- [12]李振国, 何洋, 胡毅, 等. 一种 EEPROM 中高压产生电路的设计与实现[J]. 电子技术应用,2017,43(10):23-25,30.
- [13]张晶, 陈垚, 孙俊, 等. 嵌入式控制驱动状态转移事件的预测调度模型[J]. 计算机工程,2017,43(8):90-94, 100.
- [14]王剑平, 张云生, 张果, 等. 嵌入式控制状态转移的确定性实时语义[J]. 控制与决策,2014(1):83-88.
- [15]周立功. ZLG7290I-C 接口键盘及 LED 驱动器数据手册[DB/OL]. (2006-01-10)[2018-10-30]. <http://www.docin.com/p-53666426.html>.
- [16]ZHOU X J, SHI P, LI C C, et al. A dynamic state transition algorithm with application to sensor network localization[J]. Neurocomputing,2018,30(2):237-250.
- [17]江自强, 葛亚炬, 张乐年. STM32 的数据采集及存储系统设计[J]. 机械制造与自动化,2017,46(4):136-139.
- [18]ZHANG H F, KANG W. Design of the data acquisition system based on STM32[J]. Procedia Computer Science, 2013,5(17):222-228.

(责任编辑:李艳,谭晓荷)