

涡轮薄层污泥干化的热质传递过程与关键参数研究

胡成明¹, 张斌¹, 张振², 肖尧¹

(1. 青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 山东智奇环境技术有限公司, 山东 济宁 272213)

摘要: 涡轮薄层污泥干化是涉及导热、对流传热与传质、高速旋流相耦合的复杂过程, 掌握污泥的耦合干化机理与规律、确定干化设备核心参数, 是该技术成功应用的关键。本文用机理分析方法构建涡轮薄层干化过程传热、传质的数学模型, 基于该模型对污泥干化过程开展数值模拟, 揭示涡轮薄层干化过程单一气相和气固两相流的速度、温度和含水率的分布规律, 探究涡轮薄层干化的关键技术及参数。设计开发涡轮薄层污泥干化系统并开展实验研究。结果表明: 干化机内部的桨叶阵列设计能够实现物料的顺利运输, 桨叶末端是干化机内混合传热效果最佳位置, 最优桨叶安装角度为 45° , 出口污泥含水率可降至20%。

关键词: 涡轮薄层; 传热传质; 气固两相流; 数值模拟

中图分类号: TK173 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.05.011

[引用本文格式] 胡成明, 张斌, 张振, 等. 涡轮薄层污泥干化的热质传递过程与关键参数研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 79-85. HU Cheng-ming, ZHANG Bin, ZHANG Zhen, et al. Study on heat and mass transfer process and key parameters of turbine thin layer sludge drying[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 79-85.

Study on Heat and Mass Transfer Process and Key Parameters of Turbine Thin Layer Sludge Drying

HU Cheng-ming¹, ZHANG Bin¹, ZHANG Zhen², XIAO Yao¹

(1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, China, Post Code: 266061; 2. Shandong Zhiqi Environmental Technology Co., Ltd., Jining, China, Post Code: 272213)

Abstract: The drying of turbine thin layer sludge is a complex process which involves the coupling of heat conduction, convective heat transfer and mass transfer and high-speed swirling flow. The key to the successful application of this technology is to master the coupling drying mechanism and rule of sludge and determine the core parameters of drying equipment. In this paper, the mathematical model of heat and mass transfer in the thin layer drying process of turbine was built by method of mechanism analysis. Based on this model, the numerical simulation of the sludge drying process was carried out to reveal the distribution rule of velocity, temperature and water content of single gas phase and gas-solid two-phase flow in turbine thin-layer drying process. The key technologies and parameters of the thin layer drying process of turbine were explored. The turbine thin layer sludge drying system was designed and developed, and experimental research was performed. The results show that the blade array design of dryer can realize the smooth transportation of materials. The end of the blade is the best position for mixing heat transfer in the dryer. The optimal blade installation angle is 45° . The water content of outlet sludge can be reduced to 20%.

Key words: turbine thin layer, heat and mass transfer, gas-solid two-phase flow, numerical simulation

收稿日期: 2021-05-11; 修订日期: 2021-07-28

基金项目: 山东省重点研发计划(2019GHY112002)

Fund-supported Project: Key Research and Development Program in Shandong Province(2019GHY112002)

作者简介: 胡成明(1997-), 男, 安徽滁州人, 青岛科技大学硕士研究生。

通讯作者: 张斌(1978-), 男, 山东淄博人, 青岛科技大学博士生导师。

引 言

污泥的处理是节能环保和高端装备领域的热点问题^[1-2]。以热干化为代表的污泥干化技术,作为污泥无害化、减量化和资源化过程中的必需和重要环节^[3-4],其理论研究、装备制造和工程实践等方面仍有诸多问题急待解决。作为一种先进的直接-间接联合热干化技术——涡轮薄层干化^[5-6]耦合了热传导和热对流原理,干化过程高效,可以将含水率 80%~90% 的湿污泥直接干化到含固率 80% 以上,减量化效果显著;其系统灵活可控,能很好地适应污泥含水率的变化;其高度惰性化工艺回路,保证了其在处理含油、含烃等工业危废污泥时具有高安全性^[7]。

涡轮薄层干化的核心技术是涡轮旋流技术,深入理解涡轮干化室的工作原理以及物料在干化室内的流动、传热和传质状况,是提高干化效能和技术成功应用的关键,也是该领域学者关注的重点问题。Volchkov 等人^[8]研究了在离心力的流化作用下,获得稳定均匀的颗粒涡流层并控制颗粒停留时间的可能性,进而开展了颗粒流化床涡流室空气动力学及传热传质的实验和计算工作;陈月锋等人^[9]研究了涡轮干化室的基本构造和工作原理并对影响涡轮干化性能的主要因素进行了讨论。与此相关,由于涡轮干化室内部流动的复杂性以及试验条件的限制,无法对流场内部的流动状况以及热质传递过程进行精确的实验测定,数值模拟成为目前研究干化室流动、传热和传质的重要方法。Chokphoemphun 等人^[10]通过涡流产生原理,开展了改进矩形流化床干燥机中稻谷干燥过程的数值模拟及实验研究。Behery 等人^[11]对气流干化设备的传热传质过程进行了数值模拟,并将数值模拟结果与实验数据相对照。孙赞等人^[12]将涡轮薄层技术应用于淀粉干法变性,建立了涡轮干化机三维气固两相流动反应模型,并以此对淀粉的涡轮干法变性过程进行了数值模拟研究。目前,国内对涡轮薄层技术的自主研发仍处于起步阶段,其技术理论、核心参数和工程实践等方面仍存在诸多问题。

本文构建了干化室内部流体传热、传质的数学

模型,以此为基础开展干化过程的数值模拟,探究不同桨叶角度对干化过程中流动和热质传递的影响,揭示涡轮薄层单一气相和气固两相流的速度、温度和含水率等参量的分布规律,破解涡轮薄层干化的关键技术及参数。

1 干化原理

涡轮薄层干化机结构如图 1 所示。其主要由带有外夹套的圆柱形干化室、带有桨叶的转轴、进出料口及蒸汽进、排口等结构组成。干化室的外夹层中通有高温饱和蒸汽,使干化室的内壁得到均匀有效的加热。预热的工艺气体由进气口进入干化室,随干化的污泥一同由出气口排出。饱和蒸汽与高温工艺气体作为热源分别与污泥进行热传导和热对流过程,实现耦合干化。干化机的转轴上安装有规则排列的桨叶阵列,轴由电机驱动并带动桨叶实现高速旋转,形成强烈涡流。湿污泥进入干化室后,立刻被高速转动的桨叶打散,分布在干化室的内壁表面,形成一种连续的、高湍流的物料薄层。该薄层在工艺气体的助力下以一定的速率从进料端向出料端做环形螺旋线运动,物料颗粒不断与内壁接触、碰撞和导热,通过强烈的热对流完成干化过程。

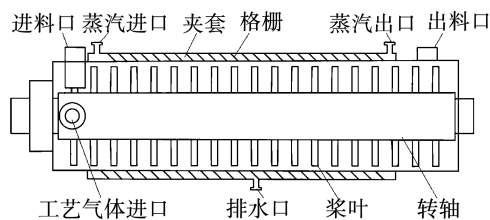


图 1 涡轮薄层干化机结构图

Fig. 1 Structure diagram of turbine thin layer dryer

2 传热传质过程分析

2.1 传热过程

根据热源不同将干化机内的传热过程分为两部分,即干化机内高温气体与污泥间的传热过程和夹套内的蒸汽与污泥间的传热过程。污泥薄层贴近壁面螺旋流动属于稀疏气固两相流动,颗粒间发生相互碰撞的频率较低,料层间的传热热阻可忽略不计;污泥粒径仅有几十微米,颗粒内部的传热阻力相较于整个干化过程的传热阻力可近似为零。

2.1.1 蒸汽与污泥间的换热

蒸汽与污泥间的传热系数 h_{ws}^* 为:

$$\frac{1}{h_{ws}^*} = \frac{1}{h_{vaper}} + \frac{1}{h_{ws}} + \frac{1}{h_{wall}} \quad (1)$$

式中: h_{vaper} —蒸汽与干化室外壁间的传热系数; $W/(m^2 \cdot K)$; h_{ws} —干化室内加热壁与污泥间的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_{wall} —干化室壁面的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

h_{vaper} 和 h_{wall} 可分别由管内对流换热公式和傅里叶导热公式求得; h_{ws} 是整体换热系数的重要组成部分。在干化室内的强烈湍流作用下, h_{ws} 与壁面接触的污泥发生碰撞传热和辐射传热, 未与壁面直接接触的污泥通过气体层传递热量。使用式(2)计算 h_{ws} :

$$h_{ws} = \varphi_m(h_{wp} + h_r) + (1 - \varphi_m)h_g \quad (2)$$

式中: φ_m —加热壁表面的污泥附着系数; h_{wp} —污泥颗粒与干化室内壁间的碰撞换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_r —干化室内壁面对污泥颗粒的辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_g —污泥颗粒与内壁未接触时内壁面与污泥颗粒间的气体对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

h_r 可由玻尔兹曼辐射公式求得。如图2(a)所示, h_g 由内壁面与近壁面气体边界层间的换热系数 h_g^c 、气体导热层与污泥颗粒间的换热系数 h_g^d 组成。 h_g^c 可由牛顿冷却定律及边界层理论式和干化室内壁与气体边界层间的瞬时换热系数联立求得; h_g^d 由热传导方法推导得出。两热阻串联, 整理得^[13]:

$$\frac{1}{h_g} = \frac{l_m}{3.08\lambda_g} Pr^{-1/3} + \frac{r_p}{3\lambda_g} \quad (3)$$

式中: r_p —污泥颗粒半径, mm; λ_g —气体边界层的导热系数, $W/(m \cdot K)$; l_m —污泥颗粒之间的平均距离, mm。

图2(b)为污泥颗粒与壁面碰撞的示意, 为计算 h_{wp} , 假设污泥颗粒与内加热壁面之间的接触方式属于弹性碰撞, 碰撞换热过程依据 Hertz 提出的球体与壁面的碰撞理论, 球体颗粒与壁面之间的接触面积和接触时间的关系为:

$$\frac{dA_s}{dt} = \left[(\pi u_s r_p)^2 - \frac{4}{5\sqrt{\pi}} \frac{E_s}{m_s} A_s^{5/2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: A_s —污泥颗粒与干化室内壁面的接触面积, m^2 ; u_s —污泥颗粒螺旋前进的线速度, m/s ; m_s —污泥颗粒的质量, kg ; E_s —弹性模量, Pa 。

利用导热微分方程求解常物性且碰撞时间极小的情况下, 污泥颗粒与干化机内加热壁面间的传热量为:

$$q_{wp} = \frac{0.87(T_w - T_m)A_{\max}t_{\max}^{-1/2}}{(\rho_p c_p \lambda_p)^{-1/2} + (\rho_w c_w \lambda_w)^{-1/2}} \quad (5)$$

推导结果为式(6):

$$h_{wp} = \frac{0.87A_{\max}t_{\max}^{-1/2}}{\pi r_p^2 [(\rho_p c_p \lambda_p)^{-1/2} + (\rho_w c_w \lambda_w)^{-1/2}]} \quad (6)$$

式中: T_w 和 T_m —壁面与颗粒的温度, $^{\circ}C$; $t_{\max}$ —污泥颗粒单次与内壁面接触的时间, s ; $A_{\max}$ —颗粒与内壁面最大的接触面积, m^2 ; ρ_p 和 ρ_w —污泥颗粒的密度与壁面材料的密度, kg/m^3 ; c_p 和 c_w —颗粒和内壁面的比热容, $J/(kg \cdot K)$; λ_p 和 λ_w —颗粒与内壁面的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

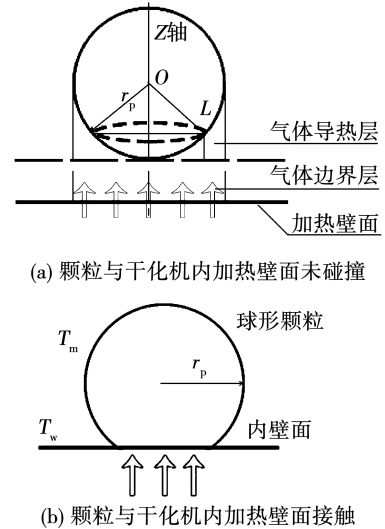


图2 换热过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat transfer process

2.1.2 工艺气体与污泥间换热

干化机内的高温气体以热对流的形式加热污泥颗粒, 使其升温实现热量交换。其对流换热系数由努塞尔数、雷诺数和普朗特数联立求得:

$$h_c = 0.11 \frac{u_c^{0.83} \lambda_k^{0.67}}{v_c^{0.5} d_s^{0.17}} \quad (7)$$

式中: u_c —工艺气体流速, m/s ; v_c —高温工艺气体的运动粘度, m^2/s ; d_s —污泥颗粒的直径, mm ;

λ_k —工体气体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.2 传质过程

基于污泥颗粒吸热水分蒸发,构建了干化室内气体和污泥颗粒的传质过程模型。

假设颗粒内的温度梯度忽略不计,当颗粒温度 T_s 小于蒸发温度时,颗粒被加热但水分不蒸发,此时不存在质量变化。连续相气体和颗粒之间的热平衡描述为:

$$Q_{gs} = hA_s(T_g - T_s) = m_s c_s \frac{dT_s}{dt} \quad (8)$$

式中: Q_{gs} —颗粒单位时间内吸收的热量, W ; A_s —颗粒的表面积, mm^2 ; T_g 和 T_s —气相和颗粒相的温度, K ; m_s —颗粒相的质量, kg ; c_s —颗粒相比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

当颗粒温度超过蒸发温度时,水蒸气从颗粒表面蒸发,此时干燥速率仅由颗粒表面传热和传质速率控制,此状态下水的汽化率为:

$$\dot{M}_{\text{out}} = \frac{dm_s}{V_s dt} = \frac{k_c M}{d_s} (C_{p,s} - C_g) = \frac{k_c M}{d_s} \left(\frac{p_{\text{sat}}(T_s)}{RT_s} - X_i \frac{p_{\infty}}{RT_g} \right) \quad (9)$$

式中: V_s —颗粒相的体积, m^3 ; R —气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; $C_{p,s}$ —颗粒表面水蒸气的质量浓度, kg/m^3 ; C_g —气相内部水蒸气质量浓度, kg/m^3 ; M —颗粒摩尔质量, kg/mol ; $p_{\text{sat}}(T_s)$ —颗粒在温度为 T_s 时的饱和蒸汽压力, Pa ; p_{∞} —颗粒周围气体的压力, Pa ; X_i —气体中水蒸气的体积分。

蒸发过程气相和颗粒之间的热平衡式为:

$$Q_{gs} = k_c A_s (T_g - T_s) = m_s c_s \frac{dT_s}{dt} + m_s L_{fg} \quad (10)$$

式中: L_{fg} —水的蒸发潜热, J/mol 。

3 干化过程数值模拟

基于传热、传质数学模型及干化过程中气固两相的体积、质量、动量和能量守恒公式展开数值模拟,获得干化机内部的动力学和热力学分布参数。

3.1 干化设备建模和网格划分

使用 Solidworks 软件对 $600 \text{ kg}/\text{h}$ 污泥处理量的设计机型进行结构缩比建模,如图 3 所示。模型总

长为 750 mm ,干化室直径为 100 mm ,转轴直径为 20 mm ,气体入口直径为 25 mm ,矩形进料口的尺寸为 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,矩形出料口尺寸为 $45 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,沿径向每截面布置 4 列桨叶,沿轴向布置 44 组桨叶,桨叶顶端与壁面间距为 2 mm 。 Y 轴方向为轴向方向,也是干化机内的正方向。

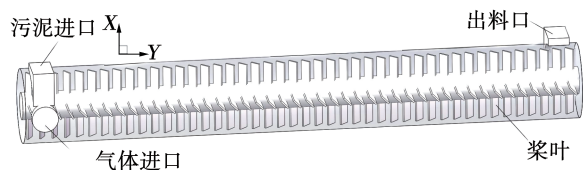


图 3 干化设备模型图

Fig. 3 Model diagram of dryer

网格划分采用非结构化网格,将整体结构划分为进料进气口、桨叶和转轴及出料排气口 3 部分,其相邻两部分间的交界面为 Interface 以实现相互间的数据交换。经网格无关性验证和优化,最后生成网格数 115 万的网格。

3.2 单一气相的速度分析

桨叶旋转产生的涡流对固相污泥的运动和传热会产生重要的影响。单一气相的模拟研究,有助于探究桨叶对干化室内流体的涡旋作用规律。模拟时进行如下假设:气相为不可压缩的流体,且处于充分发展的湍流状态;干化机内部温度恒定。气相入口流量为 $0.93 \text{ kg}/\text{h}$,桨叶全段的安装角度取 45° 如图 4,转速为 $1500 \text{ r}/\text{min}$ 。选择压力求解器,采用 SIMPLE 算法。

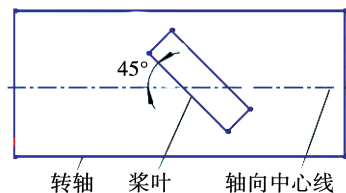


图 4 干化机桨叶与轴向方向成 45° 角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dryer blade at 45° angle to axial direction

沿轴向方向取 $y = 100, 300, 500$ 和 700 mm 等 4 个截面来分析干化机内部流场的流动规律。

3.2.1 速度分析

图 5(a)是桨叶 45°安装角度 4 个截面处的径向速度折线图,径向速度为正,表示气体向干化机壁面运动。从图 5(b)可知,4 个截面处的轴向速度在桨叶末端位置变化明显,表明气体在桨叶末端形成贴壁运动的气动层,轴向速度最大值接近 0.5 m/s。气体进入干化机后迅速被桨叶带动做涡旋运动,所以干化机进口 $y = 100$ mm 处的径向和轴向速度变化均较大。在 $y = 300$ 和 500 mm 的干化机中间段,径向速度接近于零,轴向速度逐渐减慢表明此处的干化机流场基本趋于平稳。 $y = 700$ mm 处的径向速度略有增加,有利于污泥顺利出料。4 个截面轴向速度近轴处均存在负值,反映此处存在气相反流作用,有利于污泥颗粒的混返。

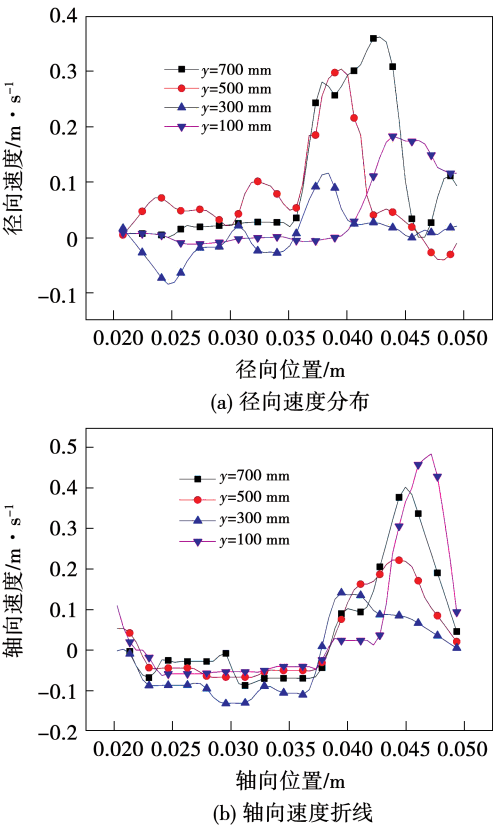


图5 桨叶安装角度 45°的速度分析

Fig. 5 Velocity analysis of blade installation angle of 45°

3.2.2 速度矢量分析

桨叶的旋转提高了干化机内部流场的湍流强度,在输送流体的同时,还增强了传热效果。图 6 为桨叶安装角度为 45°时的局部流场。由图 6 可知,

气体在干化机内由进口向出口流动的过程中,受到高速旋转桨叶的涡旋作用使其在干化机内螺旋运动。桨叶将动能传递给气体,沿着桨叶末端的方向,气体速度逐渐增大,叶片末端的速度最大为 7.5 m/s。桨叶顶端的矢量线密集,表明桨叶在贴近壁面处的作用明显,有利于污泥颗粒混合加速传热。可见,桨叶能够有效打散污泥颗粒,并在剪切、搅拌及输运 3 种方式作用下完成干化过程。

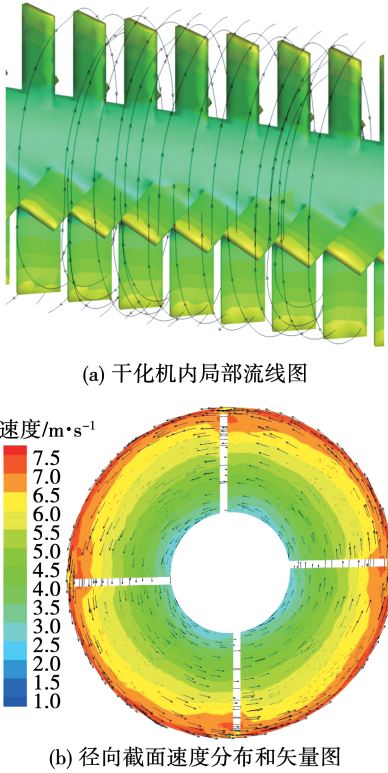


图6 桨叶安装角度为 45°的流场分布图

Fig. 6 Flow field distribution with blade installation angle of 45°

3.3 桨叶不同角度的气固两相数值模拟

桨叶安装角度直接影响污泥在干化室内的运动规律和干化效果,对比分别研究 30°, 45°和 60°桨叶安装角度对温度及沿程含水率的影响。

采用双流体模型及多相多组分输运模型。设定干化机内的气体为不可压缩流体,筒体内的湿污泥为连续流体。采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型;基于热质传递的数学理论构建蒸发模型;利用多重参考坐标系,设置动静区域;设置壁面无滑移,采用标准壁面函数;使用压力求解器和有限体积法进行求解。污泥和工艺气体性质及边界条件如表 1 所示。

表 1 气固两相数值模拟参数设置

Tab. 1 Parameter setting of gas-solid two-phase numerical simulation

参 数	数 值
湿污泥含水率/%	80
湿污泥颗粒直径/ μm	20
湿污泥进料速率/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	0.45
湿污泥进料温度/K	300
湿污泥密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 350
工艺气体温度/K	393
工艺气体中水蒸气含量/%	80
工艺气体流量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	0.93
工艺气体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.898
转轴的转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1 500
干化机壁面温度/K	453

3.3.1 温度场分析

由图 7 可知,3 种桨叶安装角度的干化机内温度分布变化趋势相似,沿轴向方向温度逐渐升高。进料端温度最低,污泥干化过程主要在中间段完成,中间区域温度梯度相较进口段小。靠近出口处温度最高,出口物料最高温度可达 440 K。污泥薄层贴壁运动的过程中,壁面导热起主导作用,壁面处温度最高,贴近内壁面的污泥薄层也处于明显的高温状态。而远离污泥薄层的区域受到工艺气体的对流换热作用,呈现均匀的温度分布。对比 3 种安装角度的温度分布,30°和 45°的桨叶安装角度可以实现现在进料段快速升温,并在干化室 3/4 长度的区域内形成均匀高温蒸发区域,有利于污泥稳定而快速蒸发,污泥出口处达到最高干化温度。

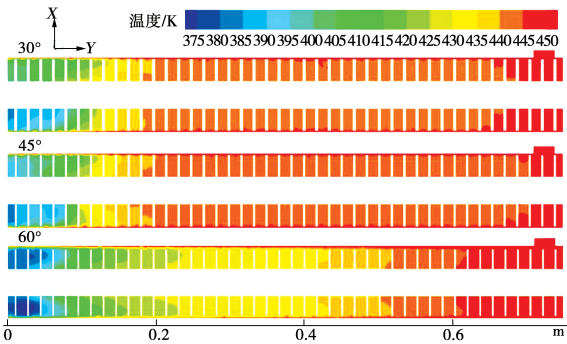


图 7 3 种桨叶安装角度的污泥温度分布

Fig. 7 Sludge temperature distributions with three kinds of blade installation angles

3.3.2 含水率分析

由图 8 可知,湿污泥从进料口运动至出料口的过程中,含水率在轴向和径向上都存在梯度,污泥含水率不断下降。在径向上,由于污泥贴近干化机内壁运动,出口端近轴处物料量少且含水率接近零。在轴向上,湿污泥进入干化机时的含水率最高为 80%,在经过干化机内强烈的热交换后,水分迅速蒸发,含水量不断降低,水分蒸发主要在干化机中后段完成,3 种安装角度出口处对应的污泥含水率均可达到 30% 以下。桨叶安装角度为 60°时,干化机内的温度变化较为缓慢,传热作用相比其它两种角度弱,所以含水率变化也相对缓慢。安装角度为 45°时,干化机相对干化效果最好,物料在距进料口 0.1 m 的位置开始蒸发,在近轴处全程保持着低含水率,出口含水率可以达到 20%。

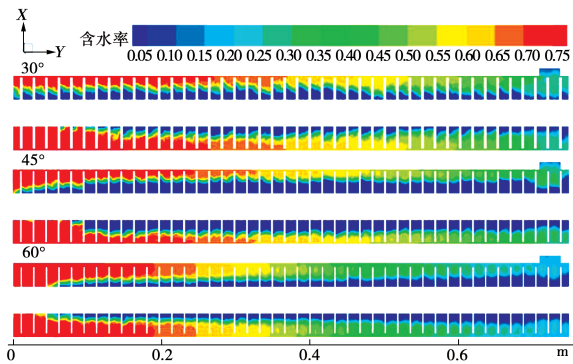


图 8 3 种桨叶安装角度的污泥含水率分布

Fig. 8 Sludge moisture distributions with three kinds of blade installation angles

3.4 基于数值模拟结果的实验研究

以数值模拟结果为指导,开展涡轮薄层干化系统的设计制造工作。各部件以模拟得到的最优结构参数进行设计加工,以最优模拟工况结果为依据排布桨叶阵列并调整桨叶安装角度。图 9 为设计加工的干化机及进料装置的实物图。整机装配完成及辅助设备选型后,搭建完整的实验系统并开展实验研究。

实验所用市政污泥如图 10(a) 所示,经测定含水率为 83.3%。湿污泥以 600 kg/h 的质量流量进入干化系统;干化机转速设置为 400 r/min;工艺气体的流量为 6 000 m³/h。其他具体实验参数如表 2 所示。湿污泥进入干化机后 30 s 完成干化,干泥经

旋风分离器分离收集。如图 10(b)所示,干化后的污泥呈现均匀的细小颗粒状,颗粒直径小于 1 mm,测定干化后污泥的平均含水率为 23.7%。实验结果与数值模拟结果相符合,表明干化机具有优良的涡轮薄层干化能力,干化效果显著。



图 9 干化机实物图
Fig.9 Photo of dryer

表 2 实验工况

Tab.2 Experimental conditions

参 数	数 值
实验污泥含水率/%	83.3
湿污泥进料速率/kg·h ⁻¹	600
湿污泥进料温度/K	283
工艺气体温度/K	453
工艺气体流量/m ³ ·h ⁻¹	6 000
转轴的转速/r·min ⁻¹	400
热源供热温度/K	473



(a) 湿污泥 (b) 干化污泥

图 10 污泥干化效果

Fig.10 Effect of sludge drying

4 结 论

构建了涡轮薄层干化机内部流体传热、传质的数学模型,并建立干化机缩比模型,采用双流体方法

对涡轮薄层干化过程进行数值模拟,揭示涡轮薄层单一气相和气固两相流的速度、温度及含水率参量的分布规律。模拟结果显示,物料在涡轮薄层干化机内部沿着筒壁作螺旋运动,在干化机进口处与工艺气体混合,温度迅速升高至蒸发温度。最优桨叶安装角度为 45°,在此条件下,能够实现物料的顺利输运,出口物料温度 440 K,出口物料含水率可降至约 20%。模拟结果还清晰地呈现出物料在干化机内的自然返混效果,体现了涡轮薄层干化技术的优势。构建涡轮薄层干化机系统,并开展工程实践研究,实验数据验证了数值模拟结果,表明干化机具备优良的干化能力。

参考文献:

[1] 张 瑞. 污泥处理和处置技术在燃煤电厂的应用[J]. 节能与环保,2018,292(10): 54-55.
ZHANG Rui. Technological innovation and application[J]. Energy Saving and Environmental Protection,2018,292(10): 54-55.

[2] AN D,XI B,REN J,et al. Multi-criteria sustainability assessment of urban sludge treatment technologies:method and case study[J]. Resources,Conservation and Recycling,2016,128: 546-554.

[3] 许志欣,蓝 梅,孙文叶. 污泥热干化技术浅析[J]. 市政技术,2016,34(1): 117-120.
XU Zhi-xin,LAN Mei,SUN Wen-ye. Analysis of sludge hot drying technology[J]. Municipal Technology,2016,34(1): 117-120.

[4] XUE Y,WANG C,HU Z,et al. Thermal treatment on sewage sludge by electromagnetic induction heating:methodology and drying characterization [J]. Waste Management, 2018, 78: 917-928.

[5] 马 文. VOMM 涡轮干燥技术的特点[J]. 中国给水排水,2002,18(12):44.
MA Wen. Characteristics of VOMM turbo drying technology[J]. China Water Supply and Drainage,2002,18(12):44.

[6] 程俊梅. 石油化工剩余活性污泥干化技术探讨[J]. 安全、健康和环境,2016,16(7):34-37.
CHENG Jun-mei. Discussion on drying technology of residual activated sludge in petrochemical industry[J]. Safety,Health and Environment,2016,16(7): 34-37.

[7] 汪喜生,吕瑞滨. 污泥薄层干化工艺的 engineering 实践[J]. 净水技术,2017,36(10): 80-84.
WANG Xi-sheng,LYU Rui-bin. Engineering practice of technological process for sludge thin-layer drying [J]. Water Purification Technology,2017,36(10): 80-84.