[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.01.016

基于正交实验法的双转子空心圆盘 干燥机干燥参数优化

胡国呈,董金善,崔 锋

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘 要:为了探究污泥处理设备空心圆盘干燥机的干燥性能,为污泥干燥提供可参考的操作参数,笔者采用计算流体力 学(CFD)方法对双转子空心圆盘干燥机内部流场进行数值模拟。研究了转子转速、蒸气温度和进料量对干燥效果的影 响,并运用正交实验分析各因素干燥效果的影响大小。模拟结果表明:提高转子转速缩短了颗粒在干燥机内部的停留时 间,使干燥机出口处的水分的质量分数有所上升;正交实验表明影响干燥效果的因素中蒸气温度>进料量>转速,并存 在最优的参数组合。本研究可为污泥干燥过程提供可供参考的操作参数。

关 键 词:空心圆盘干燥机;计算流体动力学;正交实验;内部流场

中图分类号:TK124;X703.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)01-0085-07

Optimization of Drying Parameters of Double Rotor Hollow Disc Dryer Based on Orthogonal Experiments

HU Guocheng, DONG Jinshan, CUI Feng

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to explore the drying performance of the hollow disc dryer for sludge treatment equipment, thus providing reference operation parameters for sludge drying process, the computational fluid dynamics (CFD) method was used to simulate the internal flow field of double rotor hollow disc dryer. The effects of rotor speed, steam temperature and feed rate on drying effect were studied, and the effects of various factors on drying effect were analyzed by orthogonal experiment. The simulation results show that the increase of rotor speed shortens the residence time of particles in the dryer and increases the volume fraction of water at the outlet of the dryer. Orthogonal experimental results show that the order of factors affecting the drying effect is steam temperature > feed rate > speed, and there is an optimal combination of parameters. This method can provide reference operation parameters for sludge drying process.

Keywords: hollow disc dryer; CFD (Computational Fluid Dynamics); Orthogonal experiment; internal flow field

随着人口数量不断增加,日常生产生活产生的污水量也越来越大,随之而来的是污水处理后产生的二次污染物——污泥。污泥是一种介于液体和固体之间的、具有浆态特征的浓稠物质,通常呈絮状,易于用泵输送,但很难通过自然沉降进行固液分离^[1]。污泥按 其来源主要可分为2类:生活污泥和工业污泥。生活 污泥是人类在满足日常生活的前提下、经脱水处理后 的产物,含有大量的植物生长所必需的 N,P,K,Ca 等 元素及有机物^[2],具有一定的肥效;工业污泥是人类 为满足自身的某种需求、从事工业生产活动而产生的 污染物,包括印染、造纸、化工、冶金和电镀污泥等。工 业污泥中含有大量的重金属元素和有害杂质,如果随 意堆放而不采取有效的处理、处置措施,将对人类生产 生活、动植物生长和环境安全造成极大的危害^[3-7]。因 此对污泥进行有效的处理、处置既能实现资源的再利 用,也有利于人类与环境的和谐相处。在污泥处理的 基础研究方面,马学文等^[8-9]利用了不同质量等级污泥 颗粒研究了污泥干燥过程和失重速率的变化规律。方

收稿日期:2019-07-25;修回日期:2019-10-12

第一作者简介:胡国呈(1995),男,安徽铜陵人,硕士,主要研究方向为过程设备现代设计方法。。E-mail:1711139335@ qq. com

静雨^[10]实验证明了污泥导热系数与干燥速率之间的 关联性。刘欣^[11]对比了2种典型印染污泥静态干燥 特性,进一步对干燥工艺进行了探索和研究。当前对 污泥干燥的研究趋势是利用太阳能、超声波等新技术 手段协同干燥机进行污泥干燥处理,而对应用最为广 泛的空心圆盘干燥机的研究较少。

课题组利用计算流体力学软件 FLUENT 对双转子 空心圆盘干燥机进行数值模拟,考察了干燥机在不同 转速、不同蒸气温度和不同进料量下的干燥性能,并利 用正交实验法确定了该干燥机的最佳操作条件,为实 际工业生产提供一定的参考。

1 双转子干燥机模型与计算方法

1.1 干燥机及其转子结构

课题组以某公司设计的双转子空心圆盘干燥机为 研究对象,干燥机结构如图1所示。

空心圆盘干燥机的主要结构包括:空心转子、机身 和传动系统。空心转子是双转子空心圆盘干燥机的核 心结构,由2根尺寸不同的空心轴管和数个空心圆盘 通过焊接而成,在干燥过程中一方面起到对污泥的推 动作用,另一方面构成了运动加热面。



1-蒸气入口;2-转子;3-机身;4-夹套;5-夹套冷凝水出口;6--污泥出口;7--冷凝水出口;8--取样口Ⅱ9--水蒸气出口;10--取样 口Ⅰ;11--污泥进口。

> 图 1 空心圆盘干燥机结构示意图 Figure 1 Structural schematic diagram of hollow disc drver

空心转子结构见图 2,由左右轴头、空心轴管、圆 盘叶片、刮板和中心管等构成。圆盘叶片上刮板的设 置,使得污泥在旋转圆盘的剪切作用下,不断地被翻 抄、搅拌,有效地提高了圆盘壁面和污泥的传热效率; 同时也使被干化的污泥逐渐向前推移。



1-左轴头;2-刮板;3-圆盘叶片;4-空心轴管;5-中心管;6-回水管;7-右轴头。 图 2 空心转子结构示意图

图2 至心我了结构小息图

Figure 2 Structure sketch of hollow rotor

1.2 多相流模型

以市政污泥为干燥对象,多相流模拟所需计算参数如表1所示。

干燥机网格结构见图 3,由于干燥机结构较为复杂,网格划分采用非结构化四面体网格。

干燥机所在的动、静区域之间的速度传递通过 interface 来实现。将干燥机旋转和静止部分都设置为 流体,2 根轴转速相同,转向相反,空心转子的表面设 为旋转壁面,图4所示为单根转子动区域网格。

由于网格数量对模拟计算结果的精度会有影响, 通常网格数量越多,计算结果越精确,但是考虑到实际 计算中计算机的性能,工程中认可的计算模型为网格 数量的增加,对计算结果的影响很小。通过对课题组 所研究的干燥机进行网格无关性检验,确定动区域的 网格数量为160万左右,静区域的网格数量为240万 左右时即可满足计算精度的要求。

表1	多相流模拟所需参数

填充率/%	污泥进口温度/℃ 蒸气温度/℃		蒸气压力/MPa	汚泥进料量/(kg・h ⁻¹)	转子转速/(r・min ⁻¹)
35	25 220		0.6	7 500	8
	初始北八氏昌八粉/00				
颗粒粒径/mm	导热系数/(W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)		公热容/(J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)	颗粒密度/(kg ・m ⁻³)	一 初始小刀灰里刀数/%
0.8	0.07		1 400	1 176	75

Table 1 Parameters required for multiphase flow simulation



图 3 干燥机有限元网格模型

Figure 3 Finite element mesh model of dryer







1.3 模拟方法

相比于欧拉模型对计算机的高性能要求,mixture 混合物模型因其具有结果准确、迭代容易收敛及对计 算机的配置要求低等优点,而被广泛应用于求解各相 以相同速度运动的多相流中。本文中多相流模型即采 用 mixture 混合物模型。空心圆盘干燥机干燥效果的 模拟涉及多相流多组分运输,同时考虑重力作用,采用 Realizable *k* - ε 湍流计算模型。在进行迭代计算时, 计算结果的收敛性可通过监测物料出口处的速度来判 断。当污泥出口处的流速稳定时,可认为计算结果 收敛。

2 干燥机内多相流模拟结果与分析

影响干燥机干燥性能的因素有很多,文中主要研 究转速、蒸气温度和进料量对干燥效果的影响。为了 更加清楚地研究转速对干燥效果的影响,采用控制变 量法,模拟蒸气温度为 220 ℃,进料量为 7 500 kg/h, 转子转速分别取 6,8,10,12 r · min⁻¹各工况下干燥机 内流场的分布情况。

为便于了解干燥机内部的污泥分布情况,分别垂 直于轴线做以下截面:截面1表示取样口1所在的截 面,距离坐标原点900 mm;截面2表示蒸气出口所在 的截面,距离坐标原点1221 mm;截面3表示取样口2 所在的截面,距离坐标原点1600 mm;截面4表示临 近出口的截面,距离坐标原点1900 mm。各截面如图 5 所示。







2.1 颗粒相速度场分析

由图 6 和图 7 可知,污泥以一定的速度进入干燥 机,经加速后达到转子部件处开始干燥过程,污泥在干 燥机内通过转子的不断旋转和搅拌,与热壁面进行换 热,水分不断蒸发。由于干燥机内部的 2 个转子转向 相反,所以,污泥在干燥机内被转子推向机身两侧,增 加了污泥与热壁面的接触面积,促进了水分蒸发,有利 于干燥。



图 6 转速为 8 r · min⁻¹ 中间截面颗粒相的速度云图 Figure 6 Velocity nephogram of particle phase with rotational speed in middle section of 8 r · min⁻¹









由图 8 可以看出,干燥机机身在污泥进料口处容 易形成死区,导致污泥积聚。因此,需要对该部位结构 进行合理优化,保证污泥的干燥效果。由图 9 可知,在 到达转子部件之前,污泥经过短时的加速过程,随后在 开始干燥过程中,由于污泥水分质量分数较高,黏性 强,所以污泥与圆盘表面粘合在一起,速度较低。伴随 干燥过程不断进行,水分蒸发,黏性降低,污泥到达出 口处的速度相对增加。



[制造・使用・改进]



- 图 9 转速为 8 r · min⁻¹截面 1~4 颗粒相的速度矢量图
- Figure 9 Velocity vector diagram of particle phase in section $1 \sim 4$ at 8 r \cdot min⁻¹
- 2.2 水分质量分数分析

转速为8 r · min⁻¹时各截面的平均水分质量分数 分布如图 10 所示。

湿污泥在干燥机腔体内部通过空心转子及刮板的 不断翻抄,与高温热壁面进行换热,蒸发水分。由图 10可知,干燥机夹套及空心转子处污泥的水分质量分 数最低,这是由于该处的污泥受热温度较其他位置高, 换热充分。随着污泥厚度的增加,水分质量分数增加, 这与试验的结果相符合。





图 10 截面 1~4 的水分质量分数分布 Figure 10 Distribution of water content in section 1~4

2.3 转速对干燥效果的影响

为研究转速对干燥效果的影响,在不改变其他操 作条件的基础下,设置转子转速分别为6,10,12,14 r·min⁻¹进行多相流数值模拟。图11 所示为出口截 面处的水分质量分数分布云图。







由图 11 可知,转速为 6 r · min⁻¹时,出口处的平 均水分质量分数是 26.34%;转速为 8 r · min⁻¹时,出 口处的平均水分质量分数是 26.86%;转速为 10 r · min⁻¹时,出口处的平均水分质量分数是 27.35%;转 速为 12 r · min⁻¹时,出口处的平均水分质量分数是 28.09%;转速为 14 r · min⁻¹时,出口处的平均水分质 量分数是 28.91%。由此可知,提高转子转速,出口污 泥水分质量分数略有增加。这主要是因为在干燥过程 中,随着转速的提高,污泥在干燥机内的驻留时间缩 短,但圆盘上的刮板对污泥的搅拌作用加剧,污泥颗粒 被充分抄翻,最终导致转子在高转速条件下的出口水 分质量分数稍高于低转速条件下的出口水分质量分 数。同时,较高的转速意味着较大的电机功率输出,增 加干燥成本,因此,采用双转子空心圆盘干燥机进行污 泥干燥时,转子转速不宜设置过大。

2.4 正交实验分析

由于干燥过程受多种操作参数的影响,为了获得 更好的试验结果,采用正交实验对操作参数及实验结 果进行优化。选择 L₉(3⁴)正交实验,转子转速分别为 6,8,10,12 r·min⁻¹;蒸气温度分别为 200,220,240, 260 ℃;进料量分别为 7 200,7 500,7 800,8 100 kg/h。

表2所示为 L₉(3⁴)正交实验因素水平表。表3 为经过 FLUENT 模拟后的污泥出口处水分质量分数。 表4 为实验数据的极差分析表。

表2 正交实验因素水平表 L₉(3⁴)

Table 2 Level table $L_9(3^4)$ of Orthogonal

experimental factors

实验水平	转速/(r・min ⁻¹) 蒸气温度/℃	进料量/(kg・h ⁻¹)
1	6	200	7 200
2	8	220	7 500
3	10	240	7 800
4	12	260	8 100

表3 多因素实验方案与结果

Table 3 Multivariate experimental scheme and results

		1		
灾心旦	转速/	蒸气温	进料量/	出口平均水分
头短亏	$(r \cdot min^{-1})$	度/℃	$(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	质量分数量/%
1	6	200	7 200	28.51
2	6	220	7 500	26.34
3	6	240	7 800	24.31
4	6	260	8 100	23.03
5	8	200	7 800	30.12
6	8	220	8 100	26.54
7	8	240	7 200	23.24
8	8	260	7 500	21.97
9	10	200	8 100	30.08
10	10	220	7 800	26.79
11	10	240	7 500	25.61
12	10	260	7 200	20.15
13	12	200	7 500	29.08
14	12	220	7 200	25.67
15	12	240	8 100	27.58
16	12	260	7 800	22.51

表3 极差分析表

Table 3Range analysis table										
因素	K_1	<i>K</i> ₂	<i>K</i> ₃	K_4	k_1	k_2	k_3	k_4	R	
转速	102.19	101.87	102.63	104.84	25.55	25.47	25.66	26.21	0.74	
蒸气温度	117.79	105.34	100.74	87.66	29.45	26.34	25.19	21.92	7.53	
进料量	97.57	103.00	103.73	107.23	24.39	25.75	25.93	26.81	2.42	

表 4 中:*K_i* 表示任一列上水平为 *i* 时,所对应的试验结果之和:*k_i* = *K_i*/4:

极差 $R = \max\{k_1, k_2, k_3\} - \min\{k_1, k_2, k_3\}$ 。

从表4可以看出,转子转速、蒸气温度、进料量的 极差分别为0.74,7.53,2.42,则上述各个因素对污泥 干燥效果的影响大小为蒸气温度>进料量>转速。由 表4可以得出最优的操作方案为 $A_2B_4C_1$,即空心转子 转速为8r·min⁻¹、蒸气温度为260 °C、进料量7200 kg/h。经过数值模拟后,得到出口处的污泥平均水分 质量分数为19.44%,小于正交实验结果中的最低水 分质量分数20.15%。

3 结论

课题组采用 CFD 软件对该空心圆盘干燥机的干燥过程进行多相流模拟,对转子设置不同转速以研究 其对与污泥干燥结果的影响。模拟结果分析表明:在 保持其他操作条件不变的情况下,提高转子转速,污泥 出口水分质量分数略有增加。这是因为转速的提高增 加了腔内污泥的搅拌作用,同时,污泥在腔内的停留时 间缩短,从而使干燥机的最终水分质量分数有所上升。

通过正交实验方法对各个影响污泥干燥效果的因素进行优化对比,发现各个因素对干燥效果的影响程度依次为:蒸气温度>进料量>转速,得到空心圆盘干燥机干燥污泥的最优方案为转速8r·min⁻¹、蒸气温

度为 260 ℃、进料量为 7 200 kg/h,在该条件下得到的 污泥出口水分质量分数为 19.44%。研究表明在类似 的空心圆盘污泥干燥机的操作参数的组合上存在最优 方案,课题组的研究成果可以为实际生产中确定最优 化的干燥参数以提高工作效率提供参考。

参考文献:

- [1] 肖文平. 城市污泥干化与焚烧技术研究[D]. 南京:南京大学, 2011:1.
- [2] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 城市污泥处理处置技术及资源化利用研究[J]. 生态科学,2006,25(4):375-378:375.
- BRENTON M. Process control advances safe sludge drying [J].
 Water and Wastewater International, 2003, 18(5):38.
- [4] 王湖坤.工业污泥处理与利用分析[J].工业安全与环保,2005(3):5.
- [5] 张辰. 城市污泥集约化处理[J]. 给水排水,2002,28(4):21-22.
- [6] 王裕明,胡建红,冉景煜,等.混合工业污泥燃烧及动力学特性实验研究[J].中国电机工程学报,2007,27(17):45.
- [7] 卢年春,李萍,凌云,等. 城市污泥综合利用研究[J]. 安徽农业科学,2005,33(11):2103.
- [8] 马学文, 翁焕新. 温度与颗粒大小对污泥干燥特性的影响[J]. 浙 江大学学报(工学版),2009,43(9):1661-1667.
- [9] 马学文,翁焕新,章金骏.不同形状污泥干燥特性的差异性及其成因分析[J].中国环境科学,2011,31(5):803-809.
- [10] 方静雨. 污泥干燥机理试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2011:42.
- [11] 刘欣.印染污泥干燥特性和干燥工艺的研究[D].广州:华南理 工大学,2010:53.