

超声场作用下污泥对流干燥过程的数值模拟

赵芳¹, 程道来¹, 陈振乾²

(1. 上海应用技术学院 城市建设与安全工程学院, 上海 201418; 2. 东南大学 能源与环境学院, 南京 210096)

摘要: 为了有效预测超声场作用下污泥对流干燥过程中内部水分迁移规律, 基于非平衡态热力学理论, 建立了超声场与热风联合作用下污泥对流干燥热质传递过程的数学模型. 模型中考虑了超声作用对污泥孔隙率、渗透率及湿扩散速率的影响, 以及污泥内部声压梯度引起的物料液相湿分渗透流. 对不同超声声能密度及对流温度作用下污泥内部湿度场分布进行数值模拟. 模拟结果表明, 超声作用有效加速了污泥干燥的湿分迁移速率, 且当超声作用密度与热风温度、风速等外部传质条件相匹配时, 才能发挥超声作用的最佳强化能力, 达到最优的干燥效率.

关键词: 超声波; 污泥; 干燥; 模拟

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

Numerical Simulation on Convection Drying Process of Sludge Under the Effect of Ultrasonic Field

ZHAO Fang¹, CHENG Daolai¹, CHEN Zhenqian²

(1. College of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: For effectively estimating the moisture migration patterns in convection drying process of sludge under ultrasonic irradiation, based on the theory of non-equilibrium thermodynamics, a mathematical model for the coupled heat and moisture transfer process in convection drying of sludge under the effect of ultrasonic field was established. In the model, the ultrasonic effects on porosity, permeability and effective moisture diffusion rate of sludge were considered, and the permeable flow driven by acoustic pressure gradient in sludge was also taken into account. The effects of ultrasonic energy density and temperature of hot air on the moisture content distribution in sludge drying process were numerically studied. The simulation results show that, the ultrasonic irradiation effectively accelerates the moisture migration rate of sludge, and when the ultrasonic density matches with the external mass transfer conditions such as air temperature and velocity, the ultrasonic effect can best enhance the convection drying process of sludge, and the optimal efficiency of drying can be achieved.

Key words: ultrasound; sludge; drying; simulation

收稿日期: 2014-01-11

基金项目: 上海市高校青年教师培养资助计划(ZZyyy13006); 上海应用技术学院引进人才科研启动项目(YJ2013-47)

第一作者: 赵芳(1982-), 女, 讲师. 研究方向: 多孔介质传热传质. E-mail: zhfn77@163.com

污泥干燥是污泥减量化及资源化处理中至关重要的一个环节,但污泥黏度大、成分复杂、固液分离性能差,所以热力干燥效率低且能耗巨大.近年来研究表明,超声波作为一种有效的辅助手段可以有效加快物料干燥速率.目前,超声波应用于干燥领域的研究较少,主要集中在食品脱水方面,且尚处于探索性试验阶段.Gallego-Juárez 等^[1-2]对蔬菜及水果的超声波干燥进行了一系列试验研究,并对超声波通过空气传播给物料及物料直接接触超声振板两种作用方式的干燥效果进行了对比.García-Pérez 等^[3-5]针对不同结构特征的物料,试验研究了气流速度、温度等因素对超声波对流干燥过程的影响,并通过建立扩散模型,探讨了物料内水分扩散系数随超声功率的变化关系.然而,文献中关于超声波作用下污泥干燥过程的模型研究较为罕见.污泥内部孔隙结构及组成成分复杂多样,污泥干燥过程中湿分迁移过程十分复杂,模型研究可以有效预测污泥干燥过程中湿分的迁移规律,为超声波技术在污泥热力干燥领域的工程实践及应用提供理论指导.

因此,针对超声波在污泥中的作用特性,综合考虑超声作用对污泥孔隙热质运输参数(孔隙率、渗透率及液体分子扩散系数等)的影响、声压梯度引起液相湿分挤压渗流及干燥中热量与质量传递过程中交叉耦合效应等因素,对超声处理与热风对流传合作用下污泥干燥过程建立数学模型,模拟研究超声作用对污泥干燥过程湿分迁移规律的影响.

1 数学模型建立

1.1 条件假设

- a. 物料包含固、液和气三相,忽略不凝性气体的影响,蒸汽近似视为理想气体,物料内部含湿率连续分布,且忽略干燥过程中物料内部的相变过程;
- b. 物料中固体骨架刚性不可压缩;
- c. 忽略毛细力对液相对流的影响作用;
- d. 干燥过程中所有相处于局部热力学平衡,即各相局部温度一致;
- e. 干燥过程中固相体积及液相密度近似认为保持不变;
- f. 声压梯度作用下产生液相恒定渗流,在同一时刻流速处处相等,不考虑气相渗流.

1.2 控制方程组

图1给出了超声波作用下污泥对流干燥示意图,图中, x 表示沿样品厚底的坐标方向, H 为样品

厚度.如图1所示,污泥样品的上表面置于热气流中,且热气流流动方向与物料上表面保持平行,超声波作用于物料的下表面且由此传入物料内部,物料下表面保持绝湿.模型中,采用分形理论来表征物料内部孔隙率、渗透率及分子扩散率,综合考虑超声作用对物料内部孔隙分形维数的影响及声压梯度引起的物料液相湿分的挤压渗流作用.基于非平衡热力学理论,建立超声波作用下污泥对流干燥过程的数学模型.

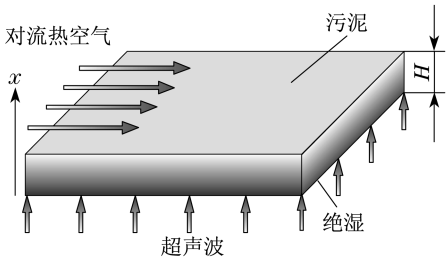


图1 超声波作用下污泥对流干燥示意图
Fig.1 Schematic diagram of the convection drying of sludge under ultrasonic effect

质量守恒方程

液相

$$\frac{\partial u_l}{\partial t} + \nabla \cdot (u_l w_l) = D_{\text{eff},l} \nabla^2 u_l + \delta_{m,l} D_{\text{eff},l} \nabla^2 T \quad (1)$$

气相

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = D_{\text{eff},g} \nabla^2 u_g + \delta_{m,g} D_{\text{eff},g} \nabla^2 T \quad (2)$$

能量守恒方程

$$C_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \epsilon S C_l \nabla \cdot (T w_l) = k_{\text{eff}} \nabla^2 T + \sum_{i=l,g} \xi_i a_{m,i} \nabla^2 u_i + q_m \quad (3)$$

式(1)–(3)中, t 为时间,s; u 为样品干基含湿率,kg/kg; w 为渗流速度,m/s; T 为温度,K; C 为容积比热容,J/(m³·℃); δ_m 为热梯度系数,1/K; D 为扩散系数,m²/s; k 为导热系数,W/(m·K); S 为液相饱和度; ξ 为湿梯度系数,K; ϵ 为物料孔隙率; a_m 为热扩散系数,m²/s; q_m 为单位体积产热率,W/m³.其中,下标eff表示多孔物料有效值; i 表示样品中气液不同相;l,g分别表示液相、气相.

根据达西定律,液相渗流流速 w_l 为

$$w_l = - \frac{K_l}{\epsilon \mu_l} (\nabla p_u - \rho_l g H) \quad (4)$$

式(4)中,物料内部声压梯度 ∇p_u 可表示为

$$\nabla p_u = p_H - p_0 = Z_{\text{Ac}} \epsilon (\bar{v}_0 - \bar{v}_H) \quad (5)$$

孔隙流体质点平均运动速度 $\bar{v}$ 为^[6]

$$\overline{v} = \overline{v_0} e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - k_c x)} \tag{6}$$

多孔物料孔隙通道有效声阻抗 Z_{Ae} 为

$$Z_{\text{Ae}} = R_{\text{Ae}} + jX_{\text{Ae}} \tag{7}$$

多孔物料有效声阻 R_{Ae} 和有效声抗 X_{Ae} 分别表示为^[7]

$$R_{\text{Ae}} = \frac{4H \sqrt{2\mu\omega\rho_1}}{\pi(r_{\text{max}}^4 - r_{\text{min}}^4)} \tag{8}$$

$$X_{\text{Ae}} = \frac{3H\rho_1\omega}{\pi(r_{\text{max}}^3 - r_{\text{min}}^3)} \tag{9}$$

式(4)—(9)中, K_l 为液相有效渗透率, m^2 ; μ_l 为液相流体动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; ρ_l 为液相流体密度, kg/m^3 ; p 为声压, Pa ; H 为样品厚度, m ; α 为声衰减系数, $1/\text{m}$; x 表示声传播距离, m ; ω 为角频率, rad/s ; k_c 为波数; j 为虚数单位; r_{max} , r_{min} 分别为物料孔隙半径最大值及最小值. 其中, 下标 0, H 分别表示声传播的起点及终点位置.

多孔物料的热质输运性能与物料内部的孔隙结构分布密切相关, 而多孔物料内部孔隙空间结构的杂乱无章, 难以用传统几何方法进行科学描述. 相关研究表明, 采用分形几何表征多孔介质的微观孔隙结构成为研究多孔物料热质传输特性的一种最为科学有效的方式^[8]. 因此, 本文采用分形几何对污泥内部孔隙分布特征进行描述, 采用分形维数对超声作用下物料的热质输运参数进行表征, 具体推导过程参考文献^[7-10]. 其中, 超声作用下物料水分有效扩散系数 $D_{\text{eff},1}$ 可表示为^[7]

$$D_{\text{eff},1} = \left(\frac{r_{\text{max}}}{r_0}\right)^{d_f-2} \left(\frac{L_0}{r_0}\right)^{2(1-d_w)} \cdot \frac{d_f + 2d_w - 2}{d_f} \frac{1}{6} \frac{\delta^2}{\tau_0} e^{\frac{\beta_1 M}{R(T+\Delta T)} - G} \tag{10}$$

蒸汽有效扩散系数 $D_{\text{eff},g}$ 为

$$D_{\text{eff},g} = \frac{D_v D_{\text{kn}}}{D_v + D_{\text{kn}}} \tag{11}$$

式(10)—(11)中, r_0 表示孔隙半径尺度, m ; L_0 表示毛细管代表性直线长度, m ; d_f 表示孔隙表面分形维数; d_w 表示孔隙通道分形维数 ($1 < d_w < 2$); I 为声强, W/m^2 ; δ 为分子平均自由程, m ; τ_0 为平衡态液相分子振动周期, s ; G 为分子激活能, J/mol ; R 为普适气体常量, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 为分子摩尔质量, kg/mol ; c_l 为液相中超声传播速度, m/s ; β 为声弛豫吸收系数, $1/\text{m}$; D_v , D_{kn} 分别为蒸汽分子扩散系数及克努森扩散系数, m^2/s .

1.3 边界条件

初始条件

$$T|_{t=0} = T_{\text{ini}} \tag{12}$$

$$u|_{t=0} = u_{\text{ini}} \tag{13}$$

$$\overline{v}|_{t=0} = \overline{v}_{\text{ini}} \tag{14}$$

边界条件

$$T|_{x=0} = T_u \tag{15}$$

$$-D_{\text{eff},g} \frac{\partial w_g}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \tag{16}$$

$$-SD_{\text{eff},1} \frac{\partial w_1}{\partial x} - (1-S)D_{\text{eff},g} \frac{\partial w_g}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \tag{17}$$

$$- \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} + \epsilon SC_1 T w_1 \Big|_{x=H} = \alpha_h (T - T_{\text{air}}) + h_{\text{fg}} \zeta \alpha_m (u - u_{\text{air}}) \tag{18}$$

$$-SD_{\text{eff},1} \rho_s \frac{\partial u_1}{\partial x} - (1-S)D_{\text{eff},g} \rho_s \frac{\partial w_g}{\partial x} + Su_1 w_1 \Big|_{x=H} = \alpha_m (u - u_{\text{air}}) \tag{19}$$

式(12)—(19)中, T_u 为超声波换能器温度, K ; α_h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; α_m 为对流传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; h_{fg} 为汽化潜热, J/kg ; ζ 为气液相变系数; ρ_s 为物料干基密度, kg/m^3 . 其中, 下标 ini 表示初始值, air 表示空气侧. 表 1 给出了模型中主要涉及的物性参数取值, 具体的数值计算过程可参考文献^[7,11-12].

表 1 模型中主要物性参数取值
Tab.1 Values of main physical parameters in the model

参 数	数 值
干物料热容 $C_s/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	8.73×10^5
液相湿分热容 $C_l/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	4.2×10^6
气相湿分热容 $C_g/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	2.1×10^6
液相分子激活能 $G/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	5.3×10^3
分子摩尔质量 $M/(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$	18
汽化潜热 $h_{\text{fg}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	2.557×10^3
物料表面空气温度 T_{air}/K	298
物料初始含湿率 $u_{\text{ini}}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	7.143 3
声弛豫吸收系数 β/m^{-1}	0.073
对流换热系数 $\alpha_h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	12.13
对流传质系数 $\alpha_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.417×10^{-2}
液相分子平均自由程 δ/m	3×10^{-10}
液相热梯度系数 $\delta_{\text{m},1}/\text{K}^{-1}$	1.26×10^{-2}
气相热梯度系数 $\delta_{\text{m},g}/\text{K}^{-1}$	0.423
干物料导热系数 $k_s/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.128
液相湿分导热系数 $k_l/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.564
气相湿分导热系数 $k_g/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.023
气液相变系数 ζ	0.672
湿梯度系数 ξ/K	1.86×10^{-2}
干物料密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.41×10^3
液相分子平衡位置振动周期 τ_0/s	10^{-13}

对于非稳态模型采用控制体积法对微分方程组分别进行离散,基于高斯-赛德尔与超松弛迭代法对控制单元内离散方程组进行求解.在数值求解中,通过变换划分网格尺寸,对网格独立性进行判定,且在同一时间节点内,温度与湿度场同时耦合迭代计算至稳定状态后,开始下一步时间节点的计算.

2 模拟结果及讨论

2.1 超声波作用下污泥含湿率分布随干燥时间的变化

图2(a)–(c)给出了有无超声波作用时污泥内部含湿率分布随干燥时间的变化,其中样品厚度为15 mm,热气流温度为80 ℃,流速为1.0 m/s.如图所示,未加入超声作用时(见图2(a)),干燥时间从1 800 s增加到7 200 s时,污泥样品内部中心位置处($x = 7.5$ mm)含湿率从6.863 kg/kg降至4.652 kg/kg,减少幅度为2.211 kg/kg.通过超声处理后,且随着声能密度的增加,物料内部各处含湿率经历相同时间后降低幅度逐渐增大.当声能密度为0.4 W/mL时(见图2(b)),在相同的干燥时间内,物料内部中心位置处($x = 7.5$ mm)含湿率从6.702 kg/kg降至3.729 kg/kg,降低幅度为2.973 kg/kg.当声能密度为0.8 W/mL时(见图2(c)),物料中心位置处含湿率降低幅度增大至3.605 kg/kg.由此可见,在超声波作用下,物料干燥速率明显增大.这是由于超声波在污泥内部传播时,会产生空化效应及机械效应,由此产生微射流及剪切力将污泥絮体颗粒破碎,释放其中的有机物,从而使污泥孔隙体积增大且孔隙的连通性增强,致使污泥内部水分迁移阻力减小.此外,超声波作为一种机械波,在物料内部传播过程中会形成声压梯度,由此会形成液相湿分沿声传播方向的挤压渗流.综上可以得出,超声作用下物料内部沿超声传播方向湿分迁移速率加快,超声作用有效强化了污泥内部湿分运输过程,且声能密度越大,超声强化效果越明显.

2.2 超声声能密度、热风温度对污泥内部含湿率分布的影响

图3(a)–(d)(见下页)给出了热风对流温度分别为60, 80, 100, 120 ℃时,不同声能密度超声波(0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 W/mL)作用下污泥干燥7 200 s时污泥内部含湿率分布变化,其中样品厚度为15 mm,对流风速为1.0 m/s.如图所示,在同一对流温度下,与未加入超声作用时(0 W/mL)污泥含湿率分布相比,超声作用加快了物料干燥速率;在同

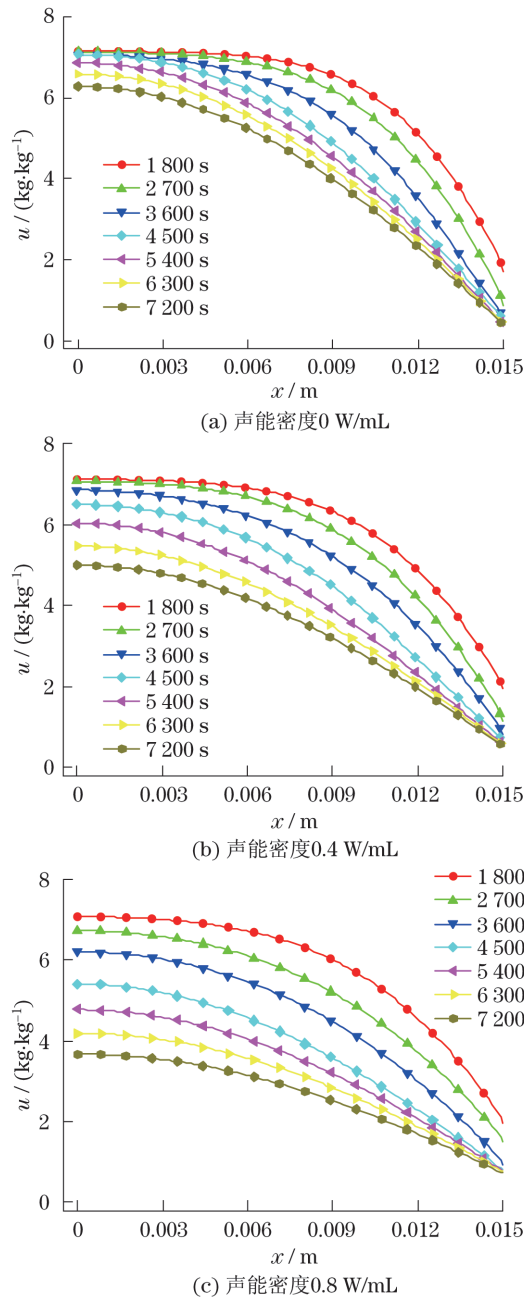


图2 污泥内部含湿量分布随干燥时间的变化

Fig.2 Change of the moisture content distribution of sludge with drying time

一声能密度作用下,污泥干燥速率随对流温度的增加而逐渐加快.当对流温度为60 ℃时(见图3(a)),声能密度从0.2 W/mL增加到1.0 W/mL,物料内部各处含湿率的变化趋势总体来看是逐渐减少.然而,在物料内部临近对流表面小区域内,含湿率分布却出现了相反的变化趋势.这是因为超声作用于污泥时,物料内部孔隙连通性增强,使水分迁移阻力减小,且沿声压梯度方向产生液相湿分挤压渗流,超声作用相当于增强了物料内部的湿分输运动力.而热

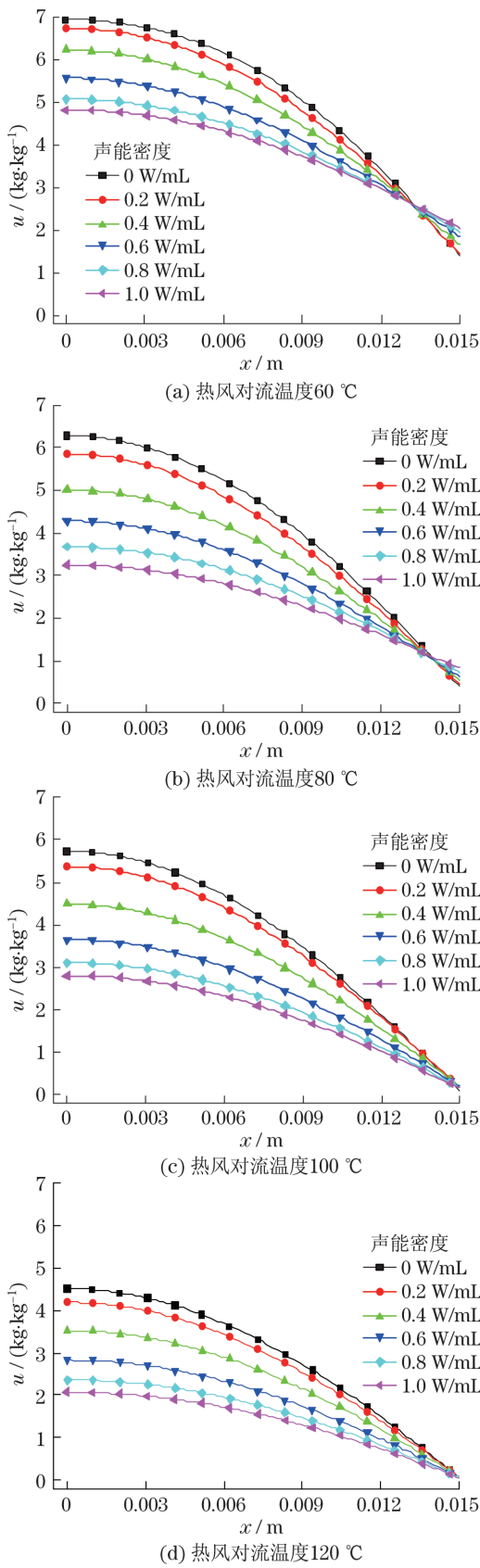


图3 超声波作用下污泥干燥 7 200 s 时含湿量分布
Fig.3 Moisture content distribution of sludge at the drying time of 7 200 s under ultrasonic effect

对流温度属于物料干燥的外部湿分传质条件,污泥上表面热风对流温度(60 °C)较低,造成对流表面湿分外部传输能力不足.因此,从物料内部聚集到对流表面区域的湿分迁移速率大于物料湿分对流传质速率,造成湿分在此处聚集,这时物料干燥速率主要由对流表面的湿分传质能力决定.此时,由于对流表面湿分传质能力的限制,超声对污泥对流干燥的强化作用没有完全发挥其效果.当对流温度为 80 °C 时,如图 3(b)所示,仅当超声声能密度大于 0.6 W/mL 时,临近对流边界区域内含湿率分布随声能密度增加而升高,且与对流温度为60 °C 时相比,含湿率随声能密度增强而升高的幅度减小,可见在对流边界处内外湿分传输速率不平衡的程度减轻.当热风对流温度增加至 100 °C (见图 3(c))与 120 °C (见图 3(d))时,污泥内部靠近对流边界区域湿分分布随声能密度增加而增加的反常变化趋势消失,这主要是由于对流温度升高使污泥表面外部湿分对流传质能力增强,在对流边界处内部湿分迁移速率小于或等于外部湿分传输速率.由此可见,超声作用影响了物料内部湿分传质能力,而热风对流温度、风速等条件决定了物料外部传质能力,而物料干燥过程通常同时由外部与内部传质条件两方面因素共同决定.因此,只有当超声声能密度与热风对流温度、风速等因素相匹配,超声作用强化污泥干燥湿分输运能力的潜力才能发挥至最佳效果,同时达到最优的污泥干燥效率.

3 结论

对超声场与热风联合作用下污泥对流干燥湿分迁移过程进行了数值模拟,结果表明,在污泥对流干燥过程中加入超声处理后,有效加快了污泥干燥速率,且随着声能密度增加,超声处理对污泥湿分迁移的强化作用逐渐增强.此外,污泥干燥过程通常由外部与内部热质传输条件两方面因素共同决定,只有当超声声能密度(内部传质条件)与热风对流温度、风速等因素(外部传质条件)相匹配时,超声作用对污泥干燥过程中湿分输运能力的强化作用才能发挥至最佳效果,达到最优的能源利用率.

参考文献:

[1] Gallego-Juárez J A, Rodriguez-Corral G, Moraleda J C G, et al. New high-intensity ultrasonic technology for good dehydration [J]. Drying Technology: An International Journal, 1999, 17(3): 597 – 608.

production distribution facilities under uncertainty[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(1): 161-168.

[6] Bidhandi H M, Yusuff R M. Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(6): 2618-2630.

[7] 孙丽君, 胡祥培, 于楠, 等. 需求变动下的物流配送干扰管理模型的知识表示与求解[J]. 管理科学, 2008, 21(6): 112-120.

[8] 王旭坪, 杨德礼, 许传磊. 有顾客需求变动的车辆调度干扰管理研究[J]. 运筹与管理, 2009, 18(4): 16-24.

[9] 蒋丽, 丁斌. 多集散点 VRP 客户需求扰动的恢复模型[J]. 系统工程, 2010(12): 12-17.

[10] 王雅楠. 物流配送系统需求量变动的干扰管理模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[11] 乔非, 李莉, 马玉敏, 等. 基于模糊推理的半导体生产重调度策略研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 102-108.

[12] 马慧民, 叶春明, 张爽. 知识进化算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(9): 3282-3284.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 288 页)

[2] Gallego-Juárez J A, Riera E, de la Fuente Blanco S, et al. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices[J]. Drying Technology: An International Journal, 2007, 25(11): 1893-1901.

[3] García-Pérez J V, Cárcel J A, Benedito J, et al. Power ultrasound mass transfer enhancement on food drying [J]. Food and Bioproducts Processing, 2007, 85(3): 247-254.

[4] García-Pérez J V, Cárcel J A, Riera E, et al. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel [J]. Drying Technology: An International Journal, 2009, 27(2): 281-287.

[5] Cárcel J A, García-Pérez J V, Riera E, et al. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon[J]. Drying Technology: An International Journal, 2007, 25(1): 185-193.

[6] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础(下)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.

[7] 赵芳. 超声波辅助污泥热风干燥热湿耦合迁移过程的研究[D]. 南京: 东南大学, 2012: 49-63.

[8] Xu P, Mujumdar A S, Yu B M. Fractal theory on drying: a review [J]. Drying Technology: An International Journal, 2008, 26(6): 640-650.

[9] 赵芳, 陈振乾, 施明恒. 胡萝卜超声波预干燥热湿耦合迁移过程的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 349-354.

[10] 邹邦银. 热力学与分子物理学[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 2004.

[11] 董智广, 程道来, 郁鸿凌, 等. 电场对注入气泡和沸腾汽泡影响的研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(5): 491-493.

[12] 鲍伟, 马虎根, 张希忠. 流体在螺旋管内对流换热和降压性能的数值模拟[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(1): 84-88.

(编辑: 丁红艺)