

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.04.006

畜禽垃圾螺旋挤压脱水过程数值模拟研究

徐 稳¹, 董淑宏^{1,2}, 张 洪^{1,2*}, 于培师^{1,2}, 赵军华^{1,2}, 张 林³

- 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
- 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;
- 江苏惠霖环保科技有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要:为探究畜禽垃圾在螺旋挤压脱水过程中压力与液相体积分数的变化情况,根据畜禽垃圾的处理需求,课题组设计了连续螺旋和间断螺旋2种结构的挤压螺杆。通过计算流体动力学的方法,对不同工况下的畜禽垃圾的挤压过程进行数值计算,研究了影响挤压脱水效果的主要因素;并通过试验验证了数值计算的可靠性。结果表明:间断螺旋对挤压过程有良好的促进作用,畜禽垃圾螺旋挤压脱水主要影响因素影响程度由大到小次序为螺杆转速、入料液相体积分数和入料粒径。该研究可为后续螺旋挤压机挤压螺杆的结构优化提供参考。

关键词: 畜禽垃圾;螺旋挤压机;连续螺旋;间断螺旋;计算流体动力学

中图分类号:TH224;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)04-0042-10

Numerical Simulation Study on Spiral Extrusion Dehydration Process of Animal Waste

XU Wen¹, DONG Suhong^{1,2}, ZHANG Hong^{1,2*}, YU Peishi^{1,2}, ZHAO Junhua^{1,2}, ZHANG Lin³

- School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
- Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
- Jiangsu Huilin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu 224000, China)

Abstract: In order to explore the change of pressure and liquid phase volume fraction in the process of spiral extrusion dehydration of livestock and poultry waste, two kinds of extrusion screws, continuous screw and intermittent screw, were designed according to the treatment requirements of livestock and poultry waste. Through the computational fluid dynamics method, the extrusion process of livestock and poultry waste under different working conditions was numerically calculated, and the main factors affecting the effect of extrusion dehydration were studied. The reliability of numerical calculation was verified by experiments. The results show that the intermittent spiral has a good promoting effect on the extrusion process, and the main influencing factors for the dehydration of livestock and poultry waste by spiral extrusion in descending order are screw speed, feeding liquid phase volume fraction, and feeding particle size. The research can provide reference for the structural optimization of screw in subsequent screw extruders.

Keywords: livestock and poultry garbage; screw extruder; continuous spiral; intermittent spiral; CFD (Computational Fluid Dynamics)

畜禽垃圾资源化利用技术中,固液分离是必不可少的一步^[1-2]。螺旋挤压固液分离机因成本低、易规模化、自动化处理等优点^[3],广泛应用于畜禽垃圾的固液分离处理工艺中。但是,螺旋挤压机对不同类型的

收稿日期:2022-12-19;修回日期:2023-05-24

基金项目:国家自然科学基金(11972171)。

第一作者简介:徐稳(1999),男,安徽宣城人,硕士研究生,研究方向为机电检测与控制。通信作者:张洪(1966),男,江苏无锡人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机器人智能控制、机电检测与控制技术。E-mail:1105399774@qq.com

物料适应性较低,挤压脱水性能并不稳定。对螺旋挤压脱水过程进行分析,能给螺旋挤压机结构的改进和畜禽垃圾处理工艺的优化提供参考。

螺旋挤压脱水的过程较为复杂,试验难以观测内部流场的情况,对螺旋挤压过程进行建模是研究挤压脱水过程的理想办法。压榨过滤理论^[4]、基于面积平均加权的混合理论^[5]、塑料挤出理论^[6]、计算流体力学^[7]和微元段离散分析法^[8]等方法都被尝试用来建立螺旋挤压作用下物料流动的数学模型,并取得了一定的研究成果。

螺旋挤压机挤压脱水性能受到物料的性质和挤压参数的影响。物料初始液相体积分数、螺杆形式、螺杆转速及物料黏度等都是影响挤压脱水的重要因素。通过对畜禽垃圾螺旋挤压的影响因素进行优化研究,可以有效提升螺旋挤压机的挤压脱水性能,从而提升挤压机对不同类型物料的适应性。

课题组针对畜禽垃圾螺旋挤压过程的压力与液相体积分数分布规律展开研究,采用计算流体力学的方法(computational fluid dynamics, CFD)研究连续螺旋和间断螺旋对畜禽垃圾挤压脱水性能的影响,并进一步研究了各相关因素影响下螺杆挤压脱水性能。

1 数值计算

1.1 物理模型

螺旋挤压固液分离机结构如图1所示。物料经破碎处理后由入料口均匀进入挤压腔,在在挤压螺杆的推动下,物料朝着出料口方向移动。物料推进过程中,在连续螺距段完成堆积,随后进入挤压螺距段。随着挤压腔的逐渐变小,在出口阻力的作用下,物料受到挤压作用,液体经滤网过滤流入集液斗,完成收集。压榨后的滤饼会从出料口送出,实现预定的固液分离功能。

课题组为实现螺旋挤压机对于畜禽垃圾处理的功能,设计了图2所示2种结构的挤压螺杆。图2中的连续螺旋结构和间断螺旋结构均采用变螺距设计,螺距从入料到出料逐级递减。间断螺旋结构的挤压段为5段螺距,螺距之间差值为20 mm,螺旋轴锥度为6°;连续螺旋结构的挤压段分为7段,螺距之间差值为15 mm,螺旋轴锥度为4°。

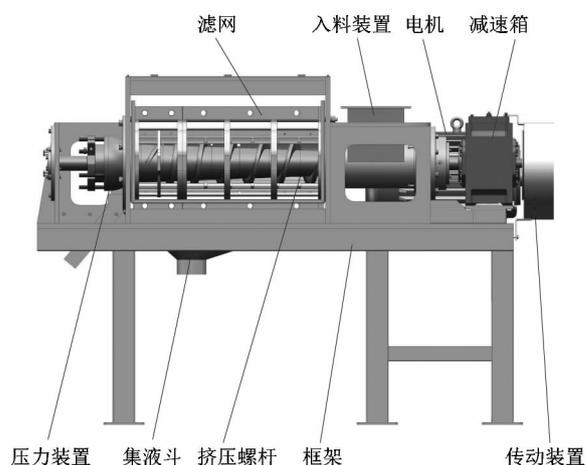


图1 螺旋挤压机

Figure 1 Screw extruder

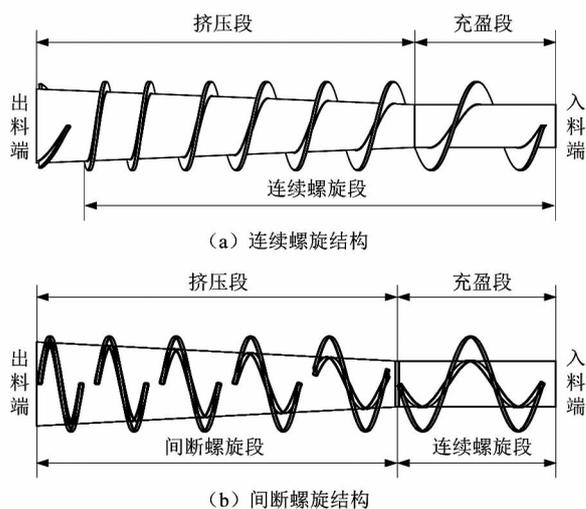


图2 挤压螺杆

Figure 2 Extruding screw

1.2 数值计算工况

影响螺旋挤压效果的因素很多,试验研究成本较高,因此在试验之前先进行数值研究。可根据实际处理情况设计不同工况,确定影响畜禽垃圾挤压效果和脱水效果的主要因素。

常见的畜禽垃圾经过絮凝或破碎处理后的平均颗粒直径为0.15~2.00 mm,物料中水的质量分数为73%~85%^[9-11],对应入料液相体积分数约为76%~88%。课题组设计3组如表1所示的工况,对间断螺旋结构和连续螺旋结构在这3组工况下的处理效果展开研究,再通过流域内的压力与出口物料液相体积分

数数据对 2 种挤压螺杆的脱水效果进行评估。同时,课题组为了验证螺杆结构对低含水入料的挤压脱水效果,将 A1 工况下入料的液相体积分数设为 62%。

表 1 螺旋结构研究工况

Table 1 Working conditions of spiral structure research

工况	入料粒径 d_p/mm	入料液相体积 分数 $H_p/\%$	螺杆转速 $n/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
A1	1	62	25
A2	1	88	25
A3	10	88	25

合理的工艺参数选取,能最大限度提高螺杆挤压效果,提高物料的脱水效果。选取对挤压过程影响最大的入料粒径、入料液相体积分数和螺杆转速展开单因素分析。探究各因素对流域内压力和液相体积分数的影响规律,具体研究工况如表 2 所示。

表 2 工艺参数研究工况

Table 2 Working condition of process parameter study

工况	入料粒径 d_p/mm	螺杆转速 $n/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	入料液相体积 分数 $H_p/\%$
B1	0.15	25	82
	1.00	25	82
	5.00	25	82
	10.00	25	82
B2	1.00	5	82
	1.00	10	82
	1.00	25	82
	1.00	40	82
B3	1.00	25	76
	1.00	25	82
	1.00	25	88

1.3 数学模型

由于 RNG κ -epsilon 模型在数值计算近壁区域的流动方面有着良好的效果^[12],而本次计算要关注螺旋轴近壁区域流动情况,故采用 RNG 模型进行数值计算,方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\kappa \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j}) + G_\kappa - \rho\epsilon; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) - C_{1\epsilon} G_\kappa \frac{\epsilon}{\kappa} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (2)$$

式中: $i, j \in \{1, 2, 3\}$, 1, 2, 3 分别表示 x, y, z 这 3 个方向; ρ 为流体密度; u_i 为 i 方向流速; x_i 和 x_j 为坐标位置; ϵ 为湍动耗散率; κ 为湍动能; G_κ 为湍动能的产生项,由平均速度梯度引起; μ_{eff} 为湍流有效黏性系数; $C_{1\epsilon} = 1.42$; $C_{2\epsilon} = 1.68$; $\alpha_\kappa = \alpha_\epsilon = 1.393$ 。

选用欧拉多相流模型数值计算畜禽垃圾破碎后固液相贯穿的混合状态。液相和固相的质量守恒方程和能量守恒方程如下^[13-14]:

1) 液相质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_q \rho_q) + \nabla \cdot (f_q \rho_q \mathbf{v}_q) = 0 \quad (3)$$

2) 固相质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_s \rho_s) + \nabla \cdot (f_s \rho_s \mathbf{v}_s) = 0; \quad (4)$$

$$f_q + f_s = 1 \quad (5)$$

3) 液相能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (f_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -f_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + f_q \rho_q \mathbf{g} + \mathbf{R}_{qs} \quad (6)$$

4) 固相能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (f_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = -f_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + f_s \rho_s \mathbf{g} + \mathbf{R}_{qs} \quad (7)$$

式(3)~(7)中: ∇ 为向量算子,用于进行梯度等运算; f_q 为液相体积分数; f_s 为固相体积分数; \mathbf{v}_q 为液相速度矢量; \mathbf{v}_s 为固相速度矢量; ρ_p 为液相物理密度; ρ_s 为固相物理密度; \mathbf{g} 为重力加速度矢量; τ_q 为液相的压力应变张量; τ_s 为固相的压力应变张量; p 为流体压力项; p_s 为颗粒压力项; \mathbf{R}_{qs} 为相之间的相互作用力。

筛网结构采用多孔介质模型进行模拟。其本质是将固体结构部分简化为对流体的阻力效果,即动量方程后的黏性损失项和惯性损失项^[15-17],其方程如下:

$$S_i = -(D\mu r_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |r| r_i) \quad (8)$$

式中: S_i 为 i 方向上动量方程源项, μ 为黏度, r 为速度, r_i 为垂直于多孔介质表面的速度分量, C_2 为惯性阻力系数, ρ 为流体密度, D 为黏性阻力系数。

1.4 计算网格与边界条件

螺旋挤压机模型有较多复杂几何细节,对挤压过程影响较小,且因为与主体尺寸过大,几何细节的解析会显著增加网格数量。因此采用SCDM软件对模型进行简化。为尽量避免计算过程中回流对结果的影响,设置出口域和集水域,并延长出料面和出水面与挤压流域的距离,流域划分如图3所示。使用多面体网格对流动空间进行离散,网格模型如图4所示。经过网格无关性验证,当多面体网格面数量达到80万时可以排除网格数量对计算结果的影响。最后将网格导入FLUENT进行数值计算。

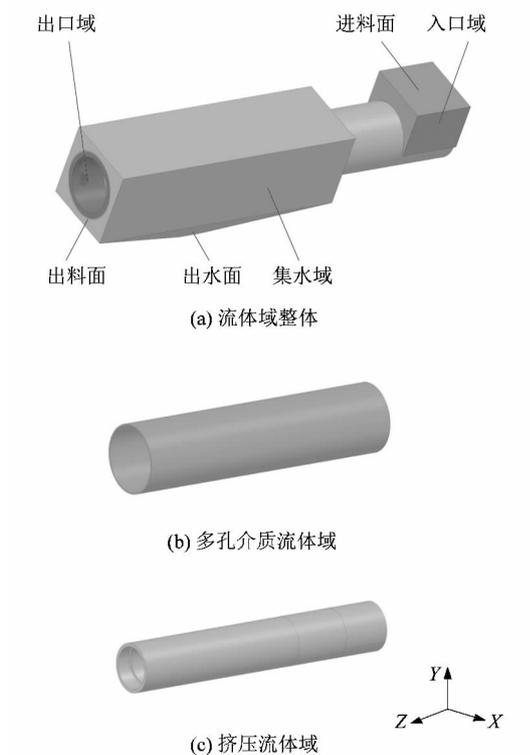


图3 计算域

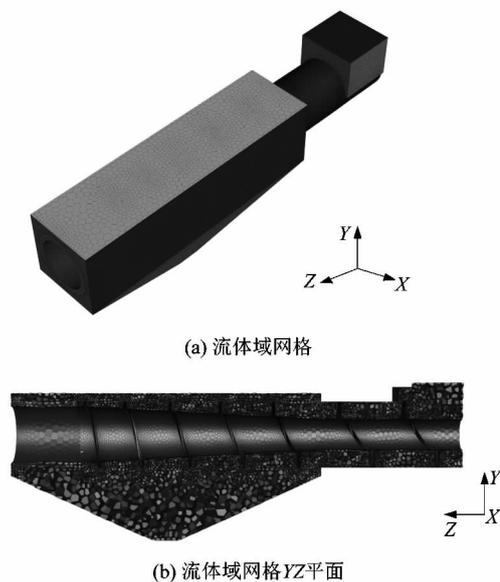
Figure 3 Calculation domain

采用速度入口和压力出口边界条件,具体边界设置如表3所示。

表3 边界条件设置

Table 3 Boundary condition setting

边界	边界条件	备注
进料面	速度入口	入口速度 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
出水面	压力出口	出口压力 0.01 MPa
出料面	自由流出	
交界面	内部	内部面
螺旋壁面	旋转壁面	相对静止



(a) 流体域网格

(b) 流体域网格YZ平面

图4 计算网格

Figure 4 Computing grid

2 数值计算结果分析

为分析各工况下间断螺旋挤压情况和物料脱水效果,选择2条线段来监测流域内压力值和液相体积分数,监测位置如图5所示。课题组通过研究流域内压力值和物料液相体积分数的分布情况,来评定新方案对不同类型畜禽垃圾的挤压效果和脱水效果。

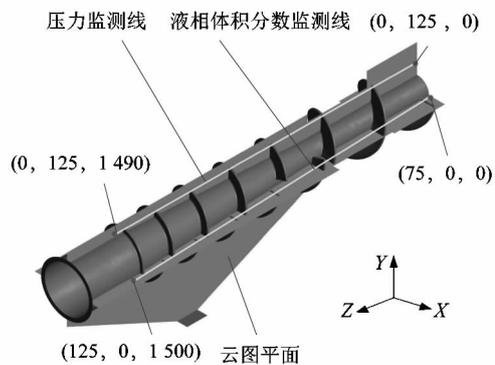


图5 压力与液相体积分数监测位置

Figure 5 Pressure and liquid phase volume fraction monitoring locations

2.1 螺旋结构对流域内挤压脱水效果的影响

如图6所示,连续螺旋结构在表1所示的3个工况下的最大压力水平和压力梯度均大于间断螺旋结构。这是由于连续螺旋的螺距较短,物料在入料处的

快速堆积引起压力水平增大。而间断螺旋结构加大了连续螺距段的螺距,避免入料处压力水平过大;同时间断的设置能有效堆积物料,使各螺距段间的压力过渡更为平缓。

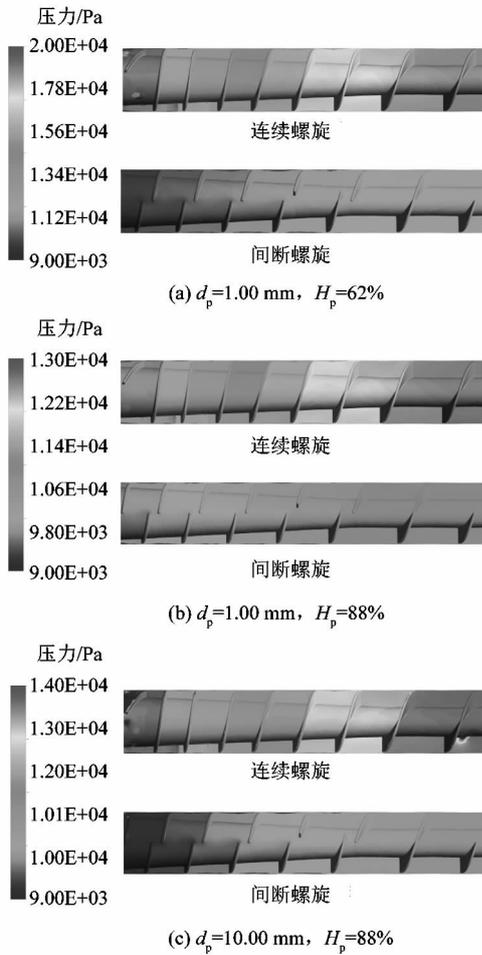


图6 连续和间断螺旋螺杆结构流域内压力分布对比

Figure 6 Comparison of pressure distribution in watershed with continuous and discontinuous spirals screw structures

如图7所示,连续和间断螺旋2种螺杆结构在出口面上边缘位置存在液相体积分数较高的条状涡带。连续螺旋的涡带范围较大,物料液相的平均体积分数较高,间断螺旋结构的涡带分布范围较小,整体脱水效果好。这是因为出口轴径较小,出口形成的滤饼较厚,螺旋轴上部的物料渗流效果差,较难脱水。间断螺旋结构通过调整螺旋轴进出口轴径比,使前端螺距将滤饼压实。而后端螺距降低了滤饼的厚度,更好逐级压

缩脱水,提升了整体的脱水效果。

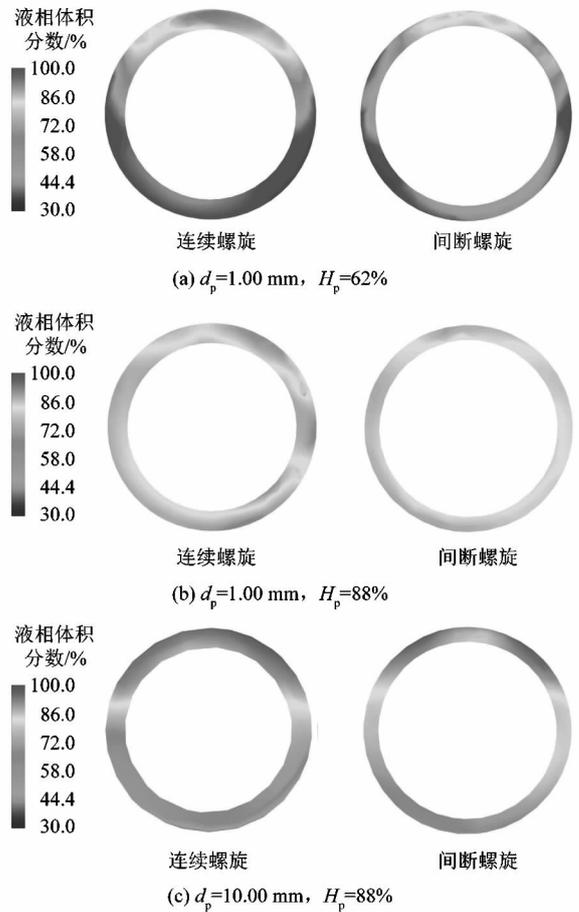


图7 连续和间断螺杆结构出口物料液相体积分数对比

Figure 7 Comparison of outlet liquid phase volume fraction of continuous and intermittent screw structures

如图8(a)所示,在A1工况下,连续螺旋结构压力曲线波动较大,在Z为500~1500mm时压力迅速降低到最低值,随后压力快速升高,有明显波峰和波谷,波动幅度将近8000Pa;而间断螺旋模型在挤压段内的压力变化幅度较为平缓,整体压力波动幅度不超过4000Pa。在A2和A3工况下,连续螺旋结构和间断螺旋结构的整体压力都维持在较低水平,连续螺旋结构在Z为500~1200mm时的压力变化幅度均大于间断螺旋结构,在1200~1500mm时趋于稳定。由图8(a)可以看出间断螺旋结构在不同工况下都具有较为稳定的挤压效果,各个螺距段间的压力能够平缓过渡,不会出现压力突变的情况。

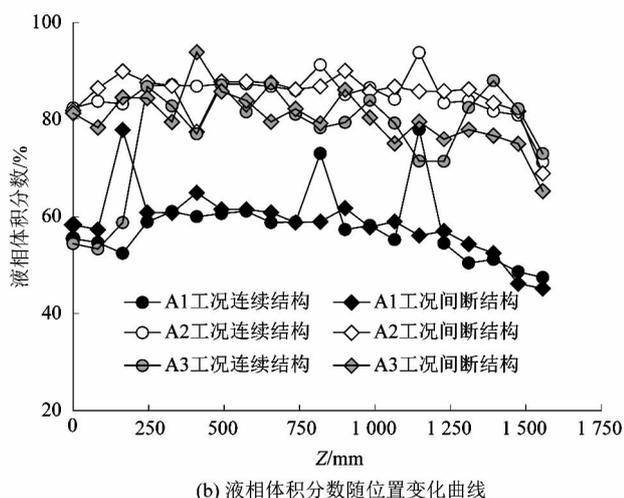
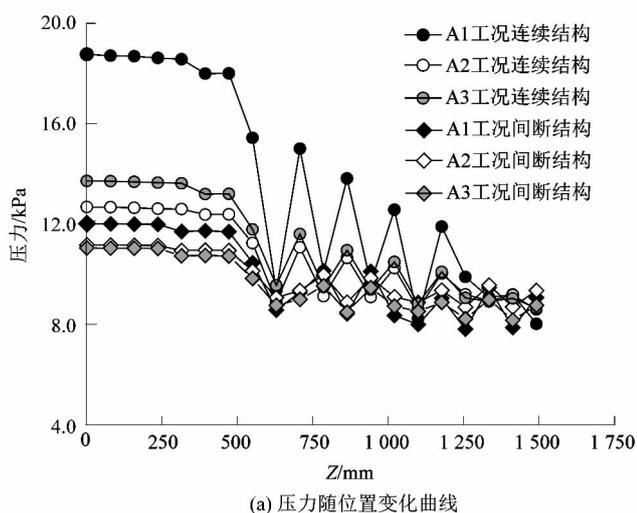


图 8 压力和液相体积分数随位置变化曲线

Figure 8 Pressure and liquid volume fraction versus position

如图 8(b) 所示,在 A1 工况下,连续螺旋结构的物料中液相体积分数在 $Z = 750$ mm 和 1200 mm 处出现了较为明显的波动,物料中液相体积分数突然上升,随后快速下降,幅度大于 20%,存在有明显的波峰;间断螺旋结构仅在 $0 \sim 500$ mm 的充盈段液相体积分数发生突变,挤压段曲线下降较为平缓。从整体曲线趋势来看,2 条曲线重合度较高,均保持平缓的下降速率,脱水效果较为一致。在 A3 工况下,连续螺旋结构和间断螺旋结构的物料液相体积分数变化幅度较大,连续螺旋结构在 $Z = 1400$ mm 处出现了较大的曲线波动,间断螺旋结构的物料液相体积分数曲线变化较为平缓,无较大波动情况。2 条曲线下降趋势与 A1 工况

保持一致。这表明连续螺旋可能存在滤饼脱水不均的情况,螺杆未能均匀挤压物料,可能造成滤饼未能均匀脱水,出现局部堵塞的情况。在 A2 工况下,连续螺旋和间断螺旋的物料液相体积分数下降都非常缓慢,仅在 $Z > 1300$ mm 时有较为明显的下降趋势,但是末端的物料液相体积分数与 A3 工况较为接近。这表明在低粒径高含水物料的工况下,连续螺旋和间断螺旋整体的脱水效果一般,虽然能通过末端的挤压作用实现较大的物料液相体积分数的下降,但是不能满足逐渐降低,需要增大末端的压力来实现良好的脱水效果。

综合以上分析,连续螺旋结构能较大程度提升流域内压力变化,但是不能进一步提升挤压脱水效果。而间断螺旋结构挤压段之间的压力过渡平缓,具有良好的挤压效果。这表明间断螺旋结构对不同类型物料的适应性较好,能够在良好的挤压效果基础上,保证脱水效果。因此,后续数值计算均采用间断螺旋结构。

2.2 工艺参数对挤压性能影响

2.2.1 入料粒径对流域内压力和液相体积分数分布的影响

如图 9 所示,随着入料粒径的增大,流域内的最大压力水平呈增大趋势,从入料到出料的压力变化幅度较为剧烈。如图 9 所示,随着入料粒径的增大,物料在连续螺旋段内能更快发生堆积,因而该区域内的压力幅值明显增大。同时,图 9(d) 中由于粒径的增大,连续螺旋下侧形成了低压区。这是由于在靠近挤压螺杆部分的颗粒过于密集,聚集的颗粒群之间压力变化较大,形成了压差。但是入料粒径的增大并未提升末端螺距段的压力水平,仅提升了充盈段和第 1 螺距段内的压力,对挤压效果的提升无较大影响。

如图 10 所示,物料在挤压螺杆推动下开始脱水,整体液相体积分数逐渐降低。随着粒径的增大,液相体积分数更加均匀,从入口到出口呈减小趋势。此时小粒径物料由于自身的重力作用,沉积在流域内下方,较难形成滤饼。如图 10(a) 和 (b) 所示, 0.15 mm 和 1.00 mm 入料粒径下,流域内的液相体积分数呈较为平缓的递减趋势。如图 10(c) 和 (d) 所示, 5.00 mm 和 10.00 mm 的入料粒径的流域内的物料液相体积分数在各螺距段间有着较大幅度的波动。从出料面的平均液相体积分数来看,4 组工况下的出口液相体积分数

相差不大,说明粒径的变化对流域内的脱水效果影响较小。

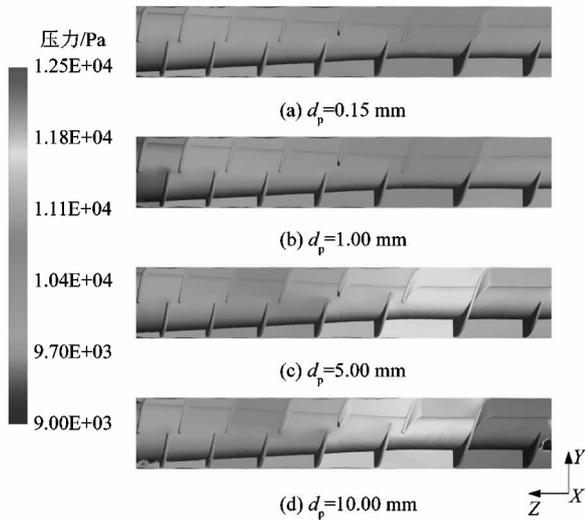


图 9 入料粒径对流域内压力分布的影响
Figure 9 Effect of feeding particle size on pressure distribution in watershed

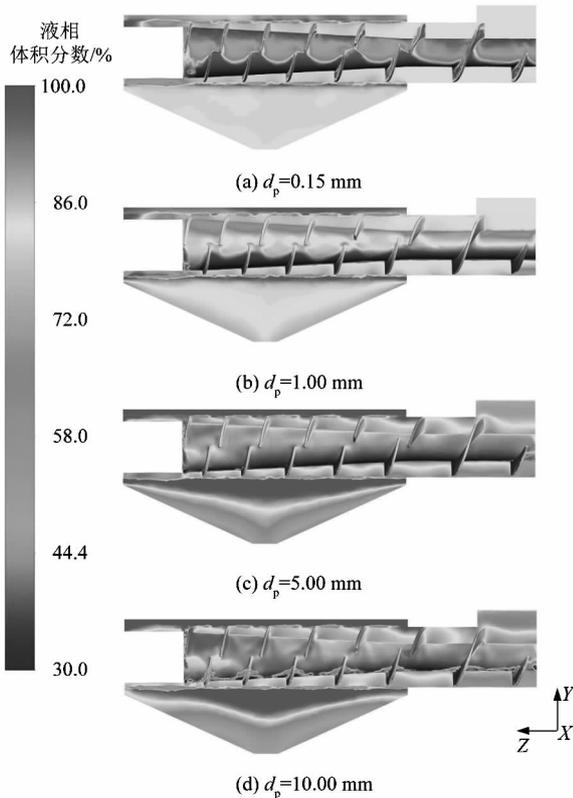


图 10 入料粒径对流域内液相体积分数分布的影响
Figure 10 Effect of feeding particle size on liquid phase volume fraction distribution in watershed

2.2.2 螺杆转速对流域内压力和液相体积分数分布的影响

如图 11 所示,转速对挤压流域内的压力水平有显著影响。如图 11(a)和(b)所示,转速越低,物料在流域内停留时间越长,物料与筛网间能够充分挤压。在出口处阻力作用下,第 5 螺距段的压力水平增大,提升了流域内的压力水平,促进螺杆的挤压效果。此时,由于入料速度不变,物料会堆积在连续螺距段,影响进料。如图 11(c)和(d)所示,转速提升,第 5 螺距段的压力水平降低。物料在流域内的停留时间变短,出口处较难形成有效阻力。出口压力水平降低影响了整体的挤压效果。在高转速下,物料快速堆积在间断处,但是因为密度太大,难以推进。连续螺旋持续施加压力,充盈段内压力增大会让挤压效果提前显现,发生堵塞。

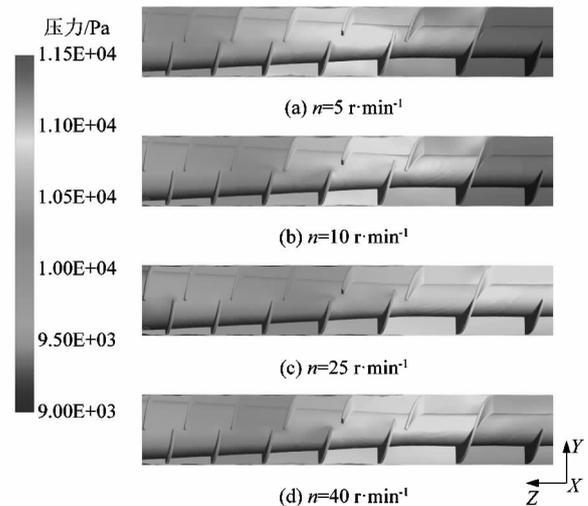


图 11 转速对流域内压力分布的影响
Figure 11 Effect of rotational speeds on pressure distribution in watershed

如图 12 所示,转速越低,集水域内液相体积分数越大,此时物料的脱水效果越好。在低转速条件下,物料在流域内有较长时间的停留,各螺距段内能够建立良好压力,缓慢推进。在第 1 和 2 螺距段处形成较为松软的滤饼,物料间隙游离水被析出。随着螺杆的推进,滤饼变得致密,物料内部的水分开始被挤出。此过程中主要发生压榨的作用。由于转速降低,流域内的整体压力水平提高,物料被逐级压缩,脱水效果提升。

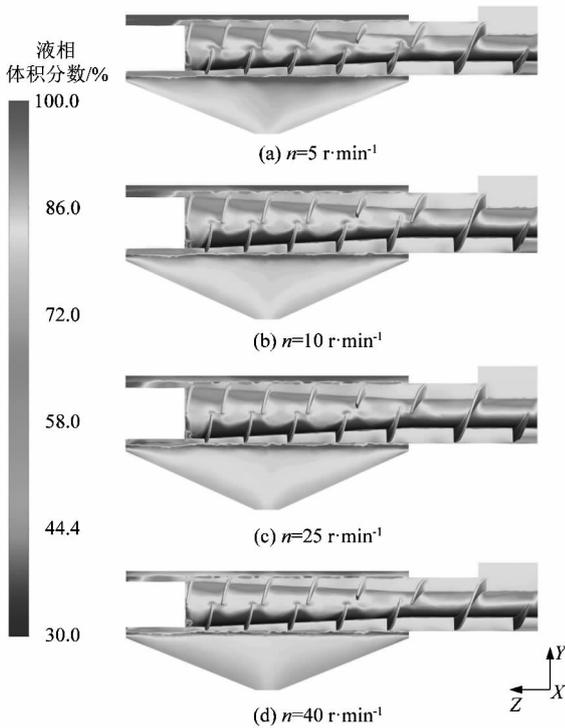


图 12 转速对流域内液相体积分数分布的影响
Figure 12 Effect of rotational speeds on liquid phase volume fraction distribution in watershed

2.2.3 入料的液相体积分数对流域内压力和液相体积分数分布的影响

如图 13 所示,流域内的压力水平随着入料中液相体积分数的减少而增大。图 13(a)显示在入料中液相体积分数较低时,颗粒密度较大,容易在充盈段形成较为致密的滤饼。随着螺杆的推进,致密的滤饼对螺杆推进阻碍越大,流域内各螺距段间的压力变化幅度增大。如图 13(b)和(c)所示,入料中液相体积分数较高时,颗粒密度处于较低水平,流域内难以建压。挤压段整体压力水平较低,各螺距段间的压力增幅平缓。

如图 14 所示,入料中液相体积分数为 76% 时,流域内整体液相体积分数分布较为均匀,物料的液相体积分数下降幅度较小。此时,流域从入料口到出口的颗粒的液相体积分数维持在较高水平。没有滤液的湿润时,过干的物料和筛网间有较大摩擦,极易造成螺距段内的堵塞。入料的液相体积分数为 88% 时,流域内液相的体积分数由入口到出口均明显递减。经过螺杆的挤压作用,出口处的物料液相体积分数有较大幅度的下降。入料的液相体积分数为 82% 时,液相体积分

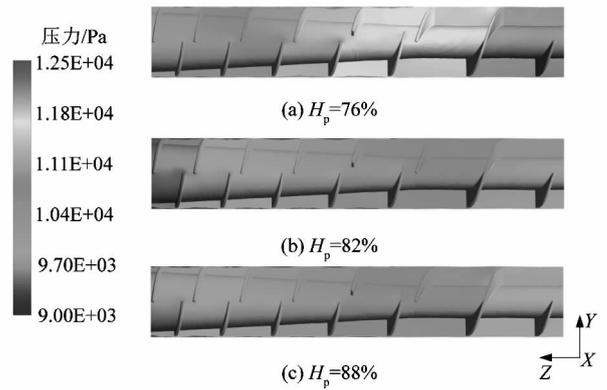


图 13 入料液相体积分数对流域内压力分布的影响
Figure 13 Effect of feeding liquid phase volume fraction on pressure distribution in watershed

数在流域内分布均匀性良好,流域内压力增量较小,挤压螺杆能实现对滤饼逐级压缩。

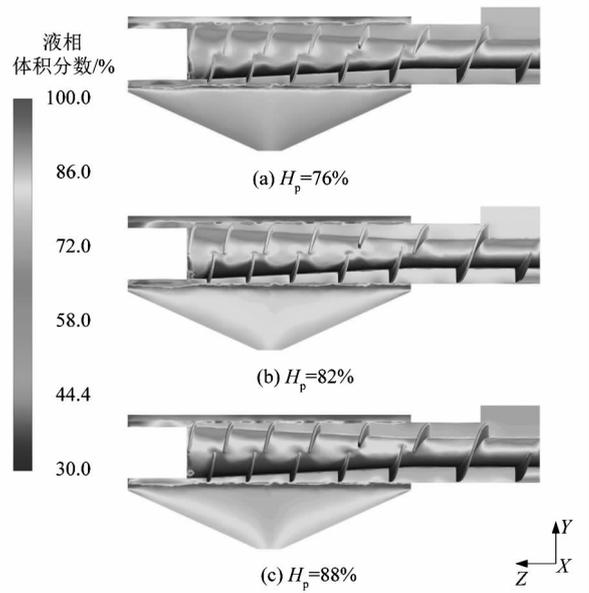


图 14 入料液相体积分数对流域内液相体积分数分布的影响

Figure 14 Effect of feeding liquid phase volume fraction on liquid phase volume fraction distribution in watershed

对流域内挤压效果和脱水效果影响程度:螺杆转速 > 入料中液相体积分数 > 入料粒径。而入料粒径对流域内的压力水平和液相体积分数分布影响较低,不能作为主要因素进行考虑。

3 试验验证

试验平台由螺旋挤压样机、控制系统和数据采集系统搭建而成。硬件部分集成在控制柜体中,如图 15(c)所示。设计的间断螺旋的实体模型,如图 15(b)所示。将设计的间段螺旋结构应用于螺旋挤压机,得到改进的螺旋挤压样机,如图 15(a)所示。在筛网隔条与水平面夹角 20°位置等距开螺旋孔,安装压力传感器。通过设置压力传感器对挤压过程的压力进行测定,筛网一侧设置如图 15(a)所示的 3 个压力测量点。

试验选用的畜禽垃圾物料为盐城大丰区牧场奶牛粪便,液相体积分数为 76.86%。对试验物料进行调湿,保持进料速度、初始液相体积分分数等与仿真设置条件一致。

选取研究方案中 B2 工况进行挤压试验。通过改变转速和入料的液相体积分数得到不同工况下的压力

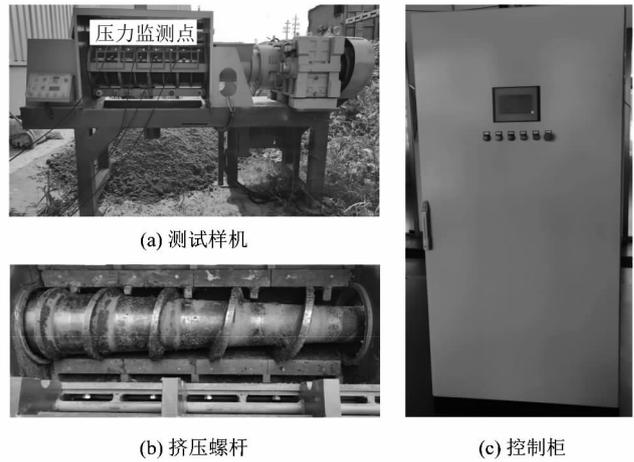


图 15 试验平台

Figure 15 Test platform

数据,提取相同位置仿真数据进行对比,结果如表 4 所示。

表 4 B2 工况下数值计算与试验数据对比

Table 4 Comparison between numerical calculation and test data under B2 condition

螺杆转速/(r · min ⁻¹)	数据来源	监测点 1 压力/Pa	监测点 2 压力/Pa	监测点 3 压力/Pa	最大误差/%
5	数值计算	9 518.4	8 938.1	10 132.30	2.3
	实测	9 302.0	9 135.9	10 356.70	
10	数值计算	9 279.9	9 423.6	9 874.00	7.4
	实测	9 545.0	9 827.0	10 605.00	
25	数值计算	9 321.5	9 450.2	9 585.30	11.4
	实测	9 293.0	9 498.0	10 680.00	
40	数值计算	9 577.5	9 343.5	9 794.91	7.8
	实测	10 326.0	9 807.0	10 478.00	

由于实际挤压过程物料的性质不可能达到理想工况的状态,使整体压力数据偏低。因此,数值计算值略低于实测值,最大误差为 11.4%。综合试验对比,压力数据的变化趋势是一致的。这表明计算模型有较高可信度,可用来对螺旋挤压脱水过程进行分析。

4 结论

课题组针对螺旋挤压机对畜禽垃圾的适应性展开研究,通过计算流体力学的方法建立畜禽垃圾螺旋挤压过程计算模型,对不同工况下流域的压力分布和液相体积分数分布情况进行分析。具体结论如下:

1) 利用计算流体力学的方法建立了畜禽垃圾螺旋挤压的计算模型,通过试验与数值计算的数据对比表明计算模型有较高可信度。

2) 研究设计的间断螺旋结构对不同类型畜禽垃圾都有良好适应性,能有效实现螺距段之间压力的平缓过渡,使物料实现均匀脱水。

3) 挤压效果和脱水效果可以通过流域内压力变化幅度表现出来。挤压脱水过程中影响压力和液相体积分数的主要影响因素影响程度为:螺杆转速 > 入料中液相体积分数 > 入料粒径。

参考文献:

[1] 蒯伟,徐艳,李厚禹,等.易腐垃圾处理技术及其效果研究进展[J].农业资源与环境学报,2022,39(2):356-363.

[2] 邵立明,崔广宇,廖南林,等.农村多源易腐垃圾机械预处理-强化自然通风阳光房堆肥技术及示范工程[J].环境卫生工程,2022,30(2):3.

[3] 孙邦雨.城市餐厨垃圾固液分离技术与装备研究[D].北京:北京

- 化工大学,2017:3-12.
- [4] 孙明文. 一维恒压压榨脱水理论在过滤机中应用[J]. 机械设计与制造,2006(3):50-52.
- [5] 邱爱红,龚曙光,谢桂兰,等. 变径变螺距螺旋轴参数化模型及性能仿真[J]. 机械工程学报,2008,44(5):6.
- [6] 李鑫. 基于挤出理论的螺旋挤压脱水机机理研究[D]. 北京:北京化工大学,2011:22-30.
- [7] 朱德文,赵维松,宗文明,等. 断齿式挤压脱水水道内流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2017,48(10):9.
- [8] 冯硕,王延刚,王信钰,等. 基于离散元方法的餐厨垃圾螺旋挤压装置性能研究[J]. 食品与机械,2022,38(4):109-113.
- [9] 李冰青,朱宁,叶小梅,等. 奶牛粪颗粒粒径分布及养分含量特征[J]. 江苏农业学报,2019,35(6):1354-1359.
- [10] 李鹏峰,隋克俭,李家驹,等. 破碎厨余垃圾进入市政污水管网的若干问题[J]. 中国给水排水,2020,36(16):35-39.
- [11] 吴远远,塞贡,郑明霞,等. 基于破碎处理的家庭厨余垃圾减量及其对下水的影响[J]. 环境工程学报,2016,10(5):2576-2580.
- [12] 侯秀宁,王玉龙,刘思瑶,等. 拖拉机驾驶室内非常规污染物排放的 CFD 模拟与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(24):22-29.
- [13] 丁小兵. 深海采矿两级离心泵固液两相流数值模拟研究[J]. 机械科学与技术,2017,36(11):1708-1714.
- [14] LI C Q,ZHANG M,WANG T, et al. Simulation and computational study of U-mold membrane components by CFD multiphase flow Euler model[J]. Materials Research Express,2019,6(7):076432.
- [15] BANERJEE A,PASUPULETI S,SINGH M K, et al. Influence of fluid viscosity and flow transition over non-linear filtration through porous media[J]. Journal of Earth System Science,2021,130(4):1-15.
- [16] CAO B W,QIAN F P, YE M M, et al. Pressure drop model for fibrous media in depth filtration: coupling simulation of microstructure and CFD porous media during dust loading [J]. Building and Environment,2021,202:108015.
- [17] DALIEV S, ABDULLAEVA B, KUBYASEV K, et al. Numerical study of filtration process of ground and pressure waters in multilayer porous media[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2020, 896(1):012069.

(上接第41页)

- [5] 程凯. 旋压成型车载 CNG 气瓶表面缺陷分析[D]. 邯郸:河北工程大学,2016:11-18.
- [6] 顾超华,姚彦辰,赵益明,等. 4130X 在 50 MPa 氢环境下的断裂力学性能试验研究[J]. 轻工机械,2021,39(5):8-13.
- [7] KWIATKOWSKI L,TEKKAYA A E,KLEINER M. Fundamentals for controlling thickness and surface quality during dieless necking-in of tubes by spinning[J]. CIRP Annals,2013,62(1):299-302.
- [8] ZOGHI H, AREZOODAR AF, SAYEAFI M. Enhanced finite element analysis of material deformation and strain distribution in spinning of 42CrMo steel tubes at elevated temperature[J]. Materials & Design,2013,47:234-242.
- [9] HUANG C,HUNG J,HUNG C, et al. Finite element analysis on neck-spinning process of tube at elevated temperature[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2011,56(9/10/11/12):1039-1048.
- [10] ROY B K, KORKOLIS Y P, ARAI Y, et al. Experimental and numerical investigation of deformation characteristics during tube spinning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2020,110(7/8):1851-1867.
- [11] 夏琴香. 特种旋压成形技术[M]. 北京:科学出版社,2017:106.
- [12] 邓春峰,邵飞,梅鹏程. 大容积高压气瓶旋压成型工艺研究[J]. 锻压装备与制造技术,2016,51(6):80.
- [13] HUA L,HAN X H. 3D FE modeling simulation of cold rotary forging of a cylinder workpiece [J]. Materials & Design,2009,30(6):2135.
- [14] LEXIAN H,DARIANI B M. An analytical contact model for finite element analysis of tube spinning process[J]. Journal of Engineering Manufacture,2008,222(11):1378.
- [15] MA K,ZHENG J Y,HUA Z L, et al. Hydrogen assisted fatigue life of Cr-Mo steel pressure vessel with coplanar cracks based on fatigue crack growth analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(38):20133.
- [16] SAJADIFAR S V, KETABCHI M, NOURANI M. Modeling of mechanical characteristics in hot deformation of 4130 steel[J]. Steel Research International,2011,82(8):938.
- [17] 全国气瓶标准化技术委员会. 大容积钢质无缝气瓶:GB/T 33145—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [18] 郭淑芬,岳也,刘长林,等. 国内外站用钢质无缝储氢容器标准规范研究[J]. 低温与特气,2019,37(3):2.
- [19] NAKASATO S,KOBAYASHI J, ITOH G. Hot spinning formability of aluminum alloy tube[J]. Procedia Manufacturing,2018,15:1263-1264.
- [20] 张涛. 旋压成型技术[M]. 北京:化学工业出版社,2020:43.