

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.05.014

畜禽垃圾螺旋挤压固液分离机优化设计

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

1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 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;
3. 江苏惠霖环保科技有限公司, 江苏 盐城 224021)

摘 要:针对螺旋挤压机对不同类型畜禽垃圾挤压脱水效果不佳和挤压过程的指标不明确的问题,课题组采用间断螺旋结构对螺旋挤压固液分离机进行优化设计。以压力梯度和出料中水的质量分数作为挤压脱水过程的评价指标,选择螺杆转速、开合行程和入料中水的质量分数为影响因素进行正交实验,探究工艺参数对挤压和脱水效果的影响。结果表明:螺旋挤压脱水过程中对压力梯度影响由大到小为入料中水的质量分数、螺杆转速和开合行程,对出料中水的质量分数影响由大到小为螺杆转速、入料中水的质量分数和开合行程。压力梯度的大小能有效反映挤压过程的挤压和脱水效果,调整螺旋挤压机的螺杆转速和开合行程可适应不同类型的物料;在螺杆转速为 25.00 r/min,开合行程为 45.00 mm 和入料中水的质量分数为 84.00% 时,螺旋挤压机能实现畜禽垃圾最佳挤压和脱水效果。

关 键 词: 畜禽垃圾;螺旋挤压;压力梯度;出料中水的质量分数;正交试验

中图分类号:TH122;TH112.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)05-0096-09

Optimization Design of Screw Extrusion Solid-Liquid Separator for Livestock and Poultry Waste

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

1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
3. Jiangsu Huilin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu 224021, China)

Abstract: To solve the problems of poor dewatering effect and unclear indexes of extrusion process of different types of livestock and poultry garbage by screw extruder, the screw extruder solid-liquid separator was optimized with discontinuous screw structure. Taking pressure gradient and mass fraction of water in discharge as evaluation indexes of extrusion dewatering process, orthogonal experiments were carried out with screw speed, opening and closing stroke and mass fraction of water in the feed as influencing factors to explore the influence of process parameters on extrusion effect and dewatering effect. The results show that the influence on pressure gradient during screw extrusion dewatering is, in descending order, mass fraction of water in the feed, screw speed and opening stroke. The influence on the mass fraction of water in discharge from large to small is the screw speed, the mass fraction of water in the feed and the opening and closing stroke. The pressure gradient can effectively reflect the extrusion dewatering effect during extrusion process. Adjusting the screw speed and opening stroke of the screw extruder can adapt to different types of materials. At the screw speed of 25.00 r/min, the opening and closing stroke at 45.00 mm and the mass fraction of water in the feed of 84.00%, the screw extruder can achieve the best extrusion and dewatering effect of livestock and poultry garbage.

Keywords: livestock and poultry garbage; spiral extrusion; pressure gradient; outlet humidity; orthogonal test

收稿日期:2023-01-11;修回日期:2023-07-10

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,主要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

畜禽垃圾主要指畜禽养殖过程中产生的粪污^[1]。随着农业生产规模的扩大,大量的畜禽垃圾被产生出来,且一直保持着较高的增长速率^[2]。这些畜禽垃圾具有巨大的潜在价值,经脱水处理后进行发酵或堆肥^[3-4],可实现资源无害化利用^[5-6]。而螺旋挤压机因结构简单和可靠性高等优势被广泛应用于畜禽垃圾的规模化脱水处理^[7-8]。提高螺旋挤压畜禽垃圾的挤压脱水效果,可获得较大经济效益^[9]。

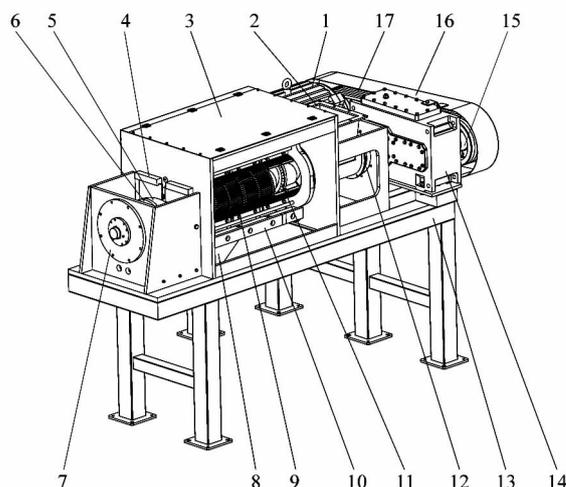
螺旋挤压机的结构参数的合理选取能有效提升挤压和脱水效果。研究人员通过改变螺旋叶片结构、螺杆长度^[10]和增加螺旋数量等方法来提高挤压螺杆的堆积性能,通过提升各螺距段的堆积性能,进而提高物料的挤压效果,从而提高脱水效果。

挤压过程工艺参数的选取也能影响物料的挤压和脱水效果。有机组分^[11]、黏度^[12]、入料中水的质量分数^[13]和螺杆转速^[14]等参数的合理选取,可以让物料形成松软的滤饼^[15],促进挤压过程中的过滤压榨作用,从而获得良好的挤压和脱水效果。

然而,螺旋挤压机处理畜禽垃圾的工艺参数对挤压过程的挤压和脱水效果的影响研究不够精确,导致螺旋挤压机在处理不同类型畜禽垃圾时适应性较差,存在挤压和脱水效果不佳的问题。因此,课题组采用间断螺旋结构对螺旋挤压机的挤压螺杆进行优化设计,对筛网和出口阻压结构重新设计,以开合行程、螺杆转速和入料中水的质量分数为影响因素进一步研究了各交互因素影响下的物料挤压和脱水效果,得出了禽畜垃圾螺旋挤压脱水的最佳工艺参数。研究为后续螺旋挤压机结构优化和固液分离机的智能化控制方法提供了参照。

1 螺旋挤压结构与工作原理

课题组提出的螺旋挤压机主体结构由三相电机、减速机、框架和挤压螺杆等组成,如图1所示。螺旋挤压固液分离机启动后,畜禽垃圾从入料装置均匀送入,物料在挤压螺杆的推动下沿着轴向方向运动。随着螺距和轴径的逐渐变化,挤压腔内的空间逐渐减小。在挤压螺杆的推动下物料逐渐受压实现脱水。水分从筛网滤出,经集液斗收集后排出。脱水后的物料从末端的出料口排出,实现畜禽垃圾的脱水处理。



1—三相异步电机;2—入料管;3—盖板;4—滑槽;5—阻压炮头;6—夹紧套;7—从动轴承座;8—集水斗;9—筛条;10—滤水笼;11—挤压螺杆;12—主动轴承座;13—主框架;14—减速器;15—带轮;16—带轮罩;17—V带。

图1 螺旋挤压机结构

Figure 1 Schematic structure of screw extruder

2 关键零部件设计

2.1 挤压螺杆设计

畜禽垃圾物料的形状、密度等特性较为复杂。挤压机运作时,不同类型的畜禽垃圾物料填充系数有较大差别,影响挤压脱水效果。为实现螺旋挤压机对不同类型的畜禽垃圾均具有一定的适应性,结合企业产品的研发经验,采用间断螺旋对挤压螺杆结构进行重新设计。间断螺旋可以使物料在间断处堆积,当物料堆积到一定程度时被推向下一螺距段,能有效提高物料的填充因数,使挤压螺杆具有较好的堆积效果。因而间断螺旋结构挤压机对不同特性的物料都有适应性。在间断处可配合设置阻料齿,物料在间断处堆积时,能对挤压过程中的滤饼进行翻料。相对于连续螺旋,断续螺旋能有效避免纤维物料附着在螺杆上,避免出现抱料的情况。

螺旋叶片直径根据《机械化运输手册》^[16]进行设计:

$$D \geq K \left(\frac{Q}{\varphi \rho \delta} \right)^{-2.5} \quad (1)$$

式中: D 为螺旋叶片直径, Q 为物料输送量, ρ 为物料体积密度, φ 为输送时物料填充因数, K 为物料综合特

性因素, δ 为倾斜向上输送时输送量的校正因数。

按照粒状输送物进行设计, 令: $\varphi = 0.2, K = 0.06, \rho = 0.7 \text{ t/m}^3, \delta = 1, Q = 4 \text{ t/h}$ 。经计算得出 $D \geq 229 \text{ mm}$, 最后根据实际加工情况与螺旋轴直径标准, 圆整后叶片直径 D 取 250 mm 。

螺距段的设计公式为^[17]:

$$S = kD. \quad (2)$$

式中: S 为螺距; k 为物料综合特性因素, 一般为经验取值, 送料段 k_1 取 $1.00 \sim 2.00$, 压缩段 k_2 取 $0.65 \sim 0.75$, 出料段 k_3 取 $0.30 \sim 0.50$; D 为螺旋叶片直径。

螺旋轴分为充盈段、挤压段和摩擦段。充盈段应采用推力强且具有连续作用的连续螺旋, 设置较大的螺距以快速堆积物料, 此时物料受到的轴向分力较大, 有利于物料的推进。螺距 $s_0 = 1.5D$, 取 $s_1 = 375 \text{ mm}$ 。

随着螺杆的推进, 采用较小的螺距能使挤压腔里空间逐级减少。此时增大轴向力, 可以促进物料的挤压脱水。因此, 将挤压段分为 5 段, 圆整后的第 1 ~ 5 段螺距 $s_1 \sim s_5$ 分别为 $190, 170, 150, 130$ 和 110 mm 。在

第 5 螺距段和出料口之间设置 100 mm 的光轴摩擦段来建立更好的出口压力水平。

挤压过程中, 滤饼厚度会影响滤液的渗流效果。可以通过设计变径螺杆来调整挤压过程中的滤饼的厚度。由于变径螺旋叶片和滤网加工难度较高, 所以选择变轴径的方式提升螺旋挤压机的压缩比。变轴径螺杆的半锥角取值一般在 3.5° 左右^[18]。按照半锥角为 3.0° 进行设计, 螺旋轴直径 $d_0 = 120 \text{ mm}$, 确定末端螺距段轴径 $d_1 = 220 \text{ mm}$ 。为避免出口过小造成堵塞, 确定光轴摩擦段轴径 $d_2 = 200 \text{ mm}$ 。

间断螺旋轴的间断距离越大, 物料在腔体内的滞留时间越长, 从而挤压效果越好。根据现有研究结果^[19], 间断距离 $t = 35 \text{ mm}$ 时能取得较好的堆积效果。

挤压螺杆结构如图 2 所示。物料在第 1 和第 2 螺距段形成较为疏松的滤饼结构, 挤出游离水和少量毛细水。在第 3 ~ 5 螺距段开始压榨, 挤出物料的大量毛细水和小部分内部包覆水。随着滤饼厚度减少, 脱水效果不断加强。

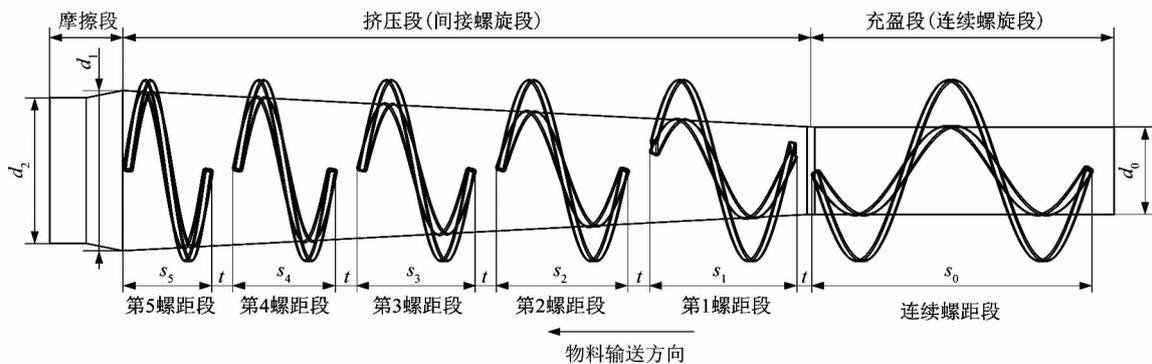


图 2 挤压螺杆

Figure 2 Extrusion screw

2.2 出口结构设计

传统的螺旋挤压机采用出口配重的方式来形成出口压力。但是在实际生产过程中, 出口配重会造成出口面上压力分布不均, 进而导致挤压后的物料整体含水量质量分数相差较大。因此, 设计出口截面调节结构, 实现对出口物料均匀阻碍, 结构如图 3 所示。该结构通过螺钉调节开合门之间的行程, 进而调节出口截面大小, 从而实现出口阻力的均匀调节。

2.3 筛网结构设计

传统筛网的筛条结构是三角形或者矩形, 每 2 个筛条之间的间隙是等腰三角形。挤压时, 物料被推到三角形间隙处, 间隙空间从外到内逐渐缩小, 在挤压力的作用下排出液体。这种形状的楔形条筛网排列较为平整, 但处理物料有一定的局限性, 在处理纤维料较多的物料时, 挤压腔内的物料与楔形筛网不断摩擦, 使进入的物料形成的滤饼表面较为紧实, 极易产生抱料的

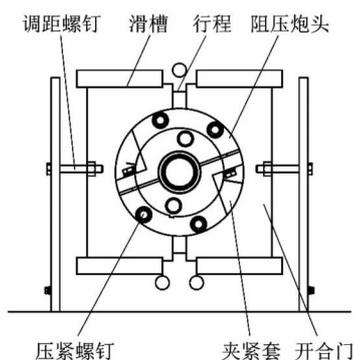


图 3 出口结构

Figure 3 Outlet structure

情况。因此,为尽量减少堵塞发生,设计直角梯形式筛条,结构如图 4(a)所示。为合理选择筛条的结构参数,对筛条进行了受力分析,如图 4(b)所示。

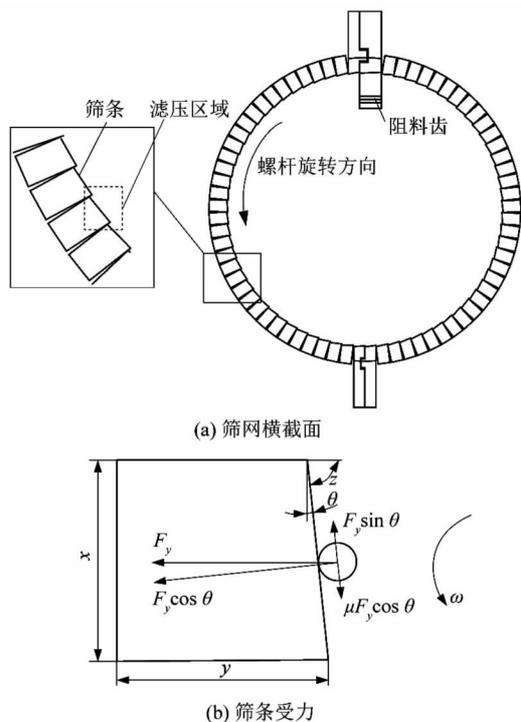


图 4 筛网结构

Figure 4 Screen structure

将物料简化为微元体,仅考虑螺旋段挤压作用。螺杆对物料的作用力分解为推动物料行进的轴向分力 F_x 和挤压作用的径向的分力 F_y 。挤压过程中,径向分力 F_y 可分解为沿着筛条斜面方向的分力 $F_y \sin \theta$ 和垂直于斜面方向的分力 $F_y \cos \theta$,当 θ 越小时,垂直于斜面方向的分力越大,物料受到的挤压力也越大。为保

证物料能受到挤压力,同时能向着筛网间隙移动,受力应满足:

$$F_y \sin \theta \geq \mu F_y \cos \theta. \quad (3)$$

化简式(3)得:

$$\theta \geq \arctan \mu. \quad (4)$$

钢材表面的摩擦因数 μ 取 0.15,代入式(4)可得 $\theta \geq 8.53^\circ$,圆整后 θ 取 10.00° 。

因此根据筛网结构参数 z 取 80° ,条宽和高度取筛条标准最大值,条宽取 10 mm,条高取 15 mm。根据研究,筛条缝隙取 0.8 mm^[20]。

新筛网结构的两个相邻筛条之间的间隙为单面倾斜型,倾斜度比原筛条结构更大。新筛网结构保留了原三角形筛条的尖角作用,可以有效破坏物料表面吸附水的表面张力,使脱水过程能够更快进行。随着物料中水的质量分数逐渐降低,物料与筛网的摩擦力增大,有效防止了物料打滑,使其在间隙中堆积。

3 试验

3.1 试验材料

试验选用的畜禽垃圾物料为盐城大丰区牧场奶牛粪便,按照《禽畜粪便固液分离机质量评价技术规范》(NY/T 31199—2017)^[21]中标准烘干法测定分离前固形物中水的质量分数为 79.73%,体积密度为 0.8 t/m^3 。

3.2 试验平台与测量仪器

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,如图 5 所示。

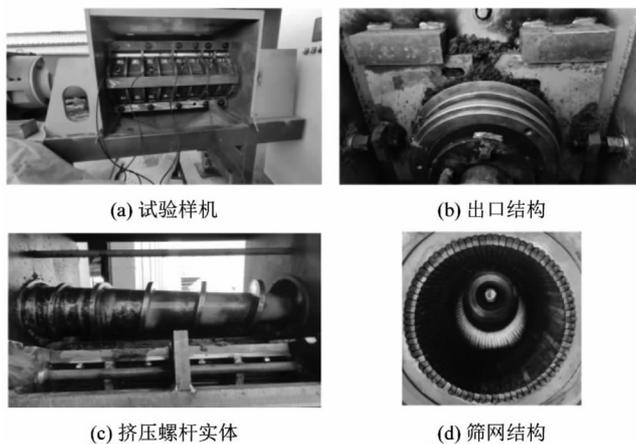


图 5 试验平台

Figure 5 Test platform

控制系统由 PLC、触摸屏和变频器组成,硬件部分集成在控制柜体中。使用时,通过改变变频器的输入频率调控螺杆的转速。

数据采集系统由压力传感器、水质量分数传感器和远程模块组成,压力传感器布置如图 6 所示,元件的型号和主要参数如表 1 所示。

3.3 试验方法

将 3 组原料分别经搅拌器充分搅拌,然后按照试验需求对原料添加自来水和干燥牛粪混合搅拌,以调

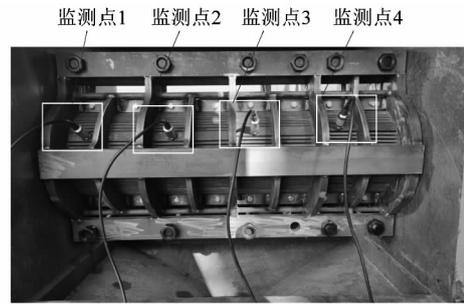


图 6 压力传感器布置图

Figure 6 Pressure sensor layout diagram

表 1 试验测试元件与仪器

Table 1 Test Elements and Instruments

模块	型号	参数
压力传感器	麦克-MPM489	压力量程为 0~5 MPa,精度为 ±1.0%
湿度传感器	威盟士-0-10V	湿度量程为 0~100%,精度为 ±2.0%
远控模块	巨控-GRM533Q	
变频器	ROBINCON-A600	功率为 55 kW
电子卤素水分测定仪	力辰-DHS-10A	水的质量分数量程为 0~100%,精度为 ±0.5%

整原料水的质量分数。通过水质量分数传感器对试验原料中水的质量分数进行监测,并根据标准烘干法对试验原料进行测量,保证试验原料中水的质量分数为 76.00%、82.00% 和 88.00%。

挤压试验时,先通过变频器调整螺杆转速至试验工况,再启动螺旋输送机均匀送料。机器内物料充盈后持续运行 10 min,运行结束后收集出口物料。每组结束后,机器空转排出余料,随后开始下一组测试。试验结束后再重复 1 次。

3.4 数据分析方法

按照标准烘干法对分离后的固形物中水的质量分数进行测定。

将监测点压力数据每隔 5 s 上传云端一次,得到大量数据样本。随后对数据样本进行过滤,剔除因未充盈和堵塞而造成的误差数据。最后统计每个监测点的平均值作为监测点的压力值。

正交试验采用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析,响应曲面采用 Origin 软件绘制。

3.5 正交试验

3.5.1 试验指标

试验针对流域内的挤压和脱水效果展开,压力变

化和水质量分数变化情况比较重要。在挤压过程中单个位置的壓力变化无法反映整体的挤压脱水情况,需要综合分析多个位置的壓力数据。为探究流域内的壓力变化,将壓力随螺杆推进位置变化的情况用壓力梯度进行描述,作为挤压效果的试验评价指标,记为 Y_1 。壓力梯度越大,挤压效果越好。在螺旋挤压过程中,无法测得物料中水的质量分数的准确数据,因而以出口物料中水的质量分数作为物料的脱水效果的评价指标,记为 Y_2 。出口物料中水的质量分数越低,脱水效果越好。

$$Y_1 = \left| \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \right| \quad (5)$$

式中: x_i 为第 i 个壓力监测点坐标, y_i 为第 i 个壓力监测点平均值, n 为壓力监测点数量, \bar{x} 为坐标的平均值, \bar{y} 为监测点壓力的平均值。

$$Y_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: m_1 为出口物料加热前的质量, m_2 为出口物料加热后的质量。

3.5.2 试验设计

在螺旋挤压机持续运行过程中,极少出现堵塞情

况,说明筛网结构可行。为进一步验证结构设计的合理性,以开合行程、入料中水的质量分数和螺杆转速为影响因素,探究对挤压效果和脱水效果的影响。设计3因素3水平正交试验,试验因素水平如表2所示。试验设计方案和结果如表3所示。

表2 试验因素水平表
Table 2 Table of test factor levels

水平	因素		
	A 螺杆转速/ (r · min ⁻¹)	B 开合 行程/mm	C 入料中水的 质量分数/%
1	5	30	76
2	10	40	82
3	25	50	88

3.5.3 回归模型与方差分析

根据正交试验结果,对螺杆转速A、开合行程B和入料中水的质量分数C进行多元回归拟合分析,得到以压力梯度和出料中水的质量分数为响应值的回归模型:

$$Y_1 = 1.08905 \times 10^5 + 344.633A + 582.674B + 2204.71C - 0.68475AB + 3.31625AC - 9.92417BC - 2.56585A^2 + 3.04090B^2 - 10.36972C^2; \quad (7)$$

$$Y_2 = -500.68139 + 2.20463A + 6.04621B + 9.81132C - 2.6250 \times 10^{-3}AB + 6.250 \times 10^{-3}AC - 0.011708BC - 0.077425A^2 - 0.060200B^2 - 0.054931C^2. \quad (8)$$

表4 方差分析表

Table 4 Analysis of variance

来源	压力梯度 Y_1				出口物料水的质量分数 Y_2			
	均方 $\times 10^5$	自由度	F 值	P 值	均方	自由度	F 值	P 值
模型	45.900 0	9	56.73	<0.000 1	623.87	9	116.80	<0.000 1
A	4.270 0	1	47.56	0.000 2	66.99	1	112.88	<0.000 1
B	4.030 0	1	44.81	0.000 3	42.60	1	71.77	<0.000 1
C	9.480 0	1	105.48	<0.000 1	52.79	1	88.94	<0.000 1
AB	0.188 0	1	2.09	0.191 8	0.28	1	0.46	0.517 5
AC	1.580 0	1	17.62	0.004 0	0.56	1	0.95	0.362 7
BC	14.200 0	1	157.80	<0.000 1	1.97	1	3.33	0.111 0
A ²	2.780 0	1	30.84	0.000 9	252.41	1	425.29	<0.000 1
B ²	3.890 0	1	43.32	0.000 3	152.59	1	257.11	<0.000 1
C ²	5.870 0	1	65.29	<0.000 1	16.47	1	27.74	0.001 2
残差	0.629 0	7			4.15	7		
失拟项	0.469 5	3	3.89	0.111 2	2.91	3	3.13	0.149 5
误差	0.161 0	4			1.24	4		
总和	465.000 0	16			628.02	16		

注: $P < 0.01$ (极显著); $P < 0.05$ (显著)。

表3 试验设计方案和结果

Table 3 Testdesign scheme and results

序号	A 螺杆转速/ (r · min ⁻¹)	B 开合 行程/mm	C 入料中水的 质量分数/%	Y_1 / (kPa · m ⁻¹)	Y_2 /%
1	5	30	82	1 532.1	44.57
2	25	30	82	1 293.4	50.43
3	5	50	82	1 346.5	49.33
4	25	50	82	833.9	54.14
5	5	40	76	2 747.0	47.82
6	25	40	76	1 800.1	53.31
7	5	40	88	1 659.7	53.26
8	25	40	88	1 508.7	60.25
9	15	30	76	2 594.9	50.14
10	15	50	76	829.1	56.54
11	15	30	88	716.4	55.63
12	15	50	88	1 332.4	59.22
13	15	40	82	1 250.6	63.25
14	15	40	82	1 394.6	63.14
15	15	40	82	1 330.9	63.34
16	15	40	82	1 273.9	64.32
17	15	40	82	1 244.9	62.85

式中: Y_1 为压力梯度, Y_2 为出料中水的质量分数, A 为螺杆转速, B 为开合行程, C 为入料中水的质量分数。

回归模型 Y_1 和 Y_2 的决定系数 R^2 分别为 0.986 5 和 0.993 4, 校正决定系数 R^2_{Adj} 分别为 0.969 1 和 0.984 9, 说明回归模型具有较高的可靠性。

如表4所示, 回归模型 Y_1 和 Y_2 的 P 值均小于 0.000 1, 说明回归模型极显著。2 个模型的失拟项 P 值均大于 0.05, 说明失拟项不显著, 回归模型与数据的拟合程度高。

回归模型 Y_1 中, C, BC 和 C^2 有极显著影响 ($P < 0.01$); AB, AC, A^2 和 B^2 有显著影响 ($P < 0.05$); AB 的影响不显著 ($P > 0.05$)。试验因素的影响从大到小依次为入料中水的质量分数、螺杆转速和开合行程。

回归模型 Y_2 中, A, B, C 和 A^2 有极显著影响 ($P < 0.01$); C^2 有显著影响 ($P < 0.05$); AB, AC 和 BC 的影响不显著 ($P > 0.05$)。根据三因素的均方值由大到小进行排序, 可以得出试验因素的影响从大到小依次为螺杆转速、入料中水的质量分数和开合行程。

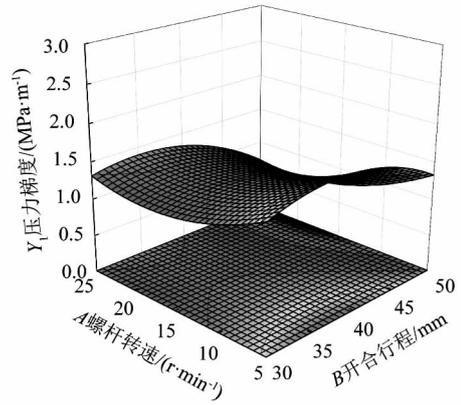
3.5.4 响应面分析

对回归模型的数据进行分析, 得到各交互因素影响的响应曲面如图 7 和 8 所示。

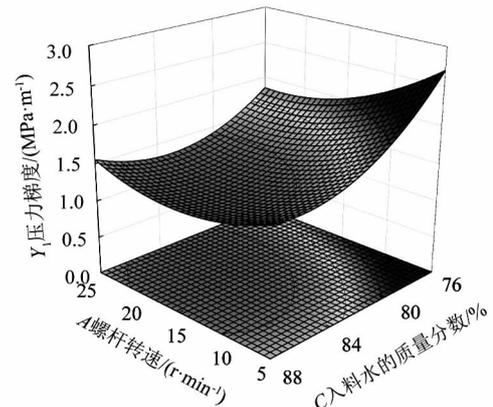
如图 7(a) 所示, 开合行程较大时, 随着螺杆转速的降低, 压力梯度呈上升趋势; 开合行程较小时, 随着螺杆转速的降低, 压力梯度呈先减小后增大趋势。螺杆转速较大时, 随着开合行程的减小, 呈压力梯度呈增大趋势。开合行程为 40.00 ~ 50.00 mm 时压力梯度的增长速率较大; 开合行程小于 40.00 mm 时, 压力梯度的增长速率缓慢。螺杆转速较小时, 随着开合行程的减小, 压力梯度呈先增大后减小趋势。这表明螺杆转速和开合行程单因素作用时, 对压力梯度影响较大, 但是交互因素对压力梯度的影响并不显著。

如图 7(b) 所示, 当入料中水的质量分数不变时, 随着螺杆转速降低, 压力梯度呈先减小后增大趋势。螺杆转速和入料中水的质量分数同时减小时, 曲面变化越陡峭, 压力梯度随螺杆转速变化幅度增大; 当螺杆转速变化时, 压力梯度曲面变化趋势与入料中水的质量分数变化趋势一致。就整体曲面的变化趋势来看, 螺杆转速和入料中水的质量分数之间存在交互作用, 对压力梯度变化影响较为显著。转速越低, 入料中水的质量分数越低, 压力梯度越大。

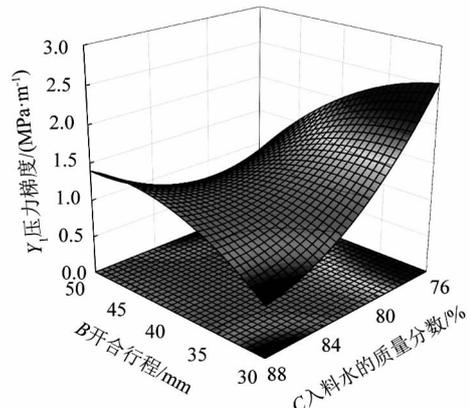
如图 7(c) 所示, 当入料中水的质量分数较高时, 随着开合行程的减少, 压力梯度呈逐渐减小的趋势; 当入料中水的质量分数较低时, 随着开合行程的降低, 压力梯度呈逐渐增大趋势, 且压力变化幅度较大。当开合行程较大时, 随着入料中水的质量分数的增大, 压力梯度呈增大趋势, 但是压力变化幅度较小; 当开合行程较小时, 随着入料中水的质量分数的降低, 压力梯度呈增大趋势, 且变化幅度较大。



(a) 螺杆转速和开合行程响应面图



(b) 螺杆转速和入料水的质量分数响应面图



(c) 开合行程和入料水的质量分数响应面图

图 7 交互因素对压力梯度响应面图

Figure 7 Response surface diagram of interaction factors to pressure gradient

如图 8(a) 所示, 出料中水的质量分数响应面曲面随螺杆转速和开合行程的变化幅度较大, 表明螺杆转速和开合行程对出料中水的质量分数存在一定的交互作用。当开合行程一定时, 随着螺杆转速的下降, 出料中水的质量分数呈先增大后下降的趋势; 当螺杆转速

一定时,随着开合行程的变化,出料中水的质量分数也呈先增大后下降的趋势。当螺杆转速为 5.00 r/min、开合行程为 30.00 mm 时,出料中水的质量分数达到最低。

如图 8(b)所示,响应曲面坡度变化较大。当入料中水的质量分数一定时,随着螺杆转速的下降,出料中水的质量分数呈先上升后下降的趋势,整体变化幅度较大;当螺杆转速一定时,随着入料中水的质量分数的降低,出料中水的质量分数呈下降趋势,但曲面坡度变化平缓,出料中水的质量分数变化幅度较小。这表明当入料中水的质量分数控制在一定范围时,可通过调整螺杆转速来获得较好的出料中水的质量分数。

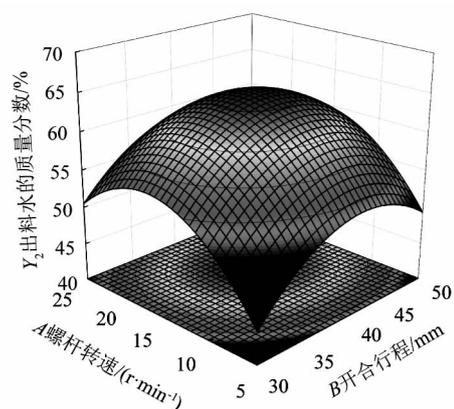
如图 8(c)所示,当入料中水的质量分数一定时,随着开合行程减小,出料中水的质量分数呈先增大后减小的趋势;当开合行程一定时,随着入料中水的质量分数的降低,出料中水的质量分数呈下降趋势,且开合行程越小,下降趋势越明显。曲面整体变化趋势与图 8(b)相近,开合行程影响的出料中水的质量分数变化幅度没有螺杆转速影响的程度大,这也表明了螺杆转速对出料中水的质量分数影响的显著性。

综合图 7 和图 8 可知,响应面变化趋势与回归模型的显著性分析趋势一致。单因素对压力梯度和出料中水的质量分数的影响较为显著。入料中水的质量分数越低、开合行程和螺杆转速越小,挤压过程的压力梯度越大,同时出料中水的质量分数越低。螺杆转速对压力梯度和出料中水的质量分数均有显著影响。压力梯度和出料中水的质量分数之间存在着一定的对应关系,可通过压力梯度来对挤压过程的挤压效果和脱水效果进行描述。当入料中水的质量分数在一定范围时,可保持开合行程一定,通过改变螺杆转速来调整挤压过程的挤压效果和脱水效果。

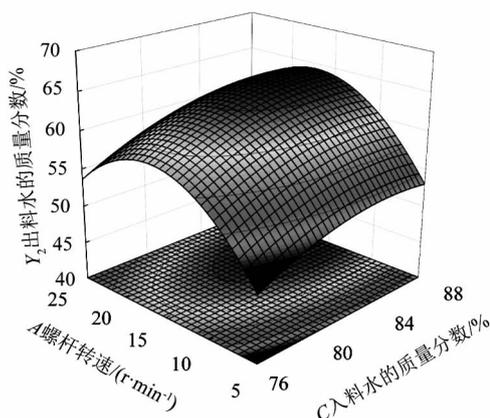
3.5.5 参数优化与验证

为使螺旋挤压机对物料挤压效果和脱水效果达到最优,对其工艺参数进行优化。

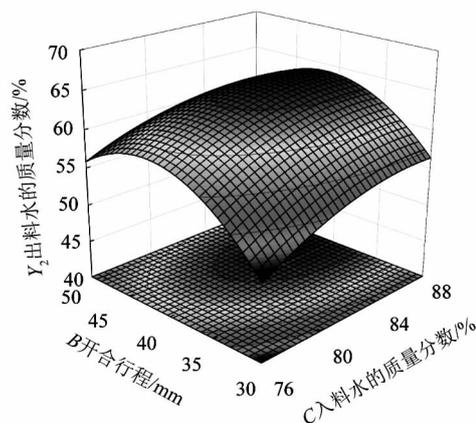
设置螺杆转速大于 20.00 r/min,开合行程大于 40.00 mm,保证较大的处理效率。出料中水的质量分数在 55%~65%,压力梯度保持在 1 000~1 500 kPa/m,避免压力梯度过大引起局部堵塞。得到最佳工作条件为:螺杆转速为 24.57 r/min,开合行程为 44.64 mm,



(a) 螺杆转速和开合行程响应面图



(b) 螺杆转速和入料水的质量分数响应面图



(c) 开合行程和入料水的质量分数响应面图

图 8 交互因素对出料中水的质量分数响应面图

Figure 8 Response surface diagram of interactive factors to water mass fraction at outlet

入料中水的质量分数为 83.71%,此时压力梯度的预测值为 1 178.18 kPa/m,出口湿度的预测值为 59.3%。

为验证预测模型的效果,选取最佳参数组合:螺杆转速为 25.00 r/min,开合行程为 45.00 mm,入料中水的质量分数为 84.00% 进行重复试验,结果如表 5 所

示。由表 5 可知,实际值与理论值最大误差为 7.6%, 小于 10.0%,模型可靠度较高。

表 5 优化条件下各参数测量值

Table 5 Measured values of parameters under optimized conditions

序号	压力梯度 $Y_1/$		出口物料中水的		最大 误差/%
	$(\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$		质量分数 $Y_2/\%$		
	理论	实际	理论	实际	
1	1 178.18	1 132.00	59.303 9	58.510 0	3.9
2	1 178.19	1 089.00	59.304 0	62.340 0	7.6
3	1 178.20	1 231.00	59.304 1	56.930 0	4.4

4 结论

课题组对畜禽垃圾螺旋挤压固液分离机关键部件进行优化设计,以压力梯度和出料中水的质量分数为评价指标进行试验研究,确定了影响挤压脱水效果的关键因素,得到了最佳的工艺参数,具体研究结果如下:

1) 根据畜禽垃圾的处理需求,对螺旋挤压固液分离机的挤压螺杆、出口结构和筛网结构进行了优化设计,通过调节螺旋挤压机的转速和出口开合行程,可以很好地适应不同类型的畜禽垃圾。

2) 关键因素对压力梯度的影响由大到小为入料中水的质量分数、螺杆转速和开合行程;对出料中水的质量分数的影响次序由大到小为螺杆转速、入料中水的质量分数和开合行程。满足螺旋挤压机最佳挤压效果和脱水效果的工艺参数为螺杆转速 25.00 r/min、开合行程 45.00 mm 和入料中水的质量分数 84.00%。

3) 压力梯度与出料中水的质量分数相关性较强,可作为畜禽垃圾挤压过程的评价指标。

参考文献:

[1] 洪玉婷. 农村畜禽养殖污染现状及对策研究[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(9): 29-31.

[2] 李鹏昊, 姜铭北, 姚燕来, 等. 易腐垃圾的特点及资源化利用技术[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(10): 2095-2098.

[3] AZADI S, KARIMI-JASHNI A, TALEBBEYDOKHTI N, et al. Industrial composting of commingled municipal solid waste: a case study of shiraz city, Iran[J]. Journal of Environmental Treatment Techniques, 2020, 8(4): 1292-1293.

[4] SAFARK M, BUX M R, ASLAMU M. Waste to energy: power

generation potential of putrescible wastes by anaerobic digestion process at Hyderabad, Pakistan[J]. Journal of Material Cycles & Waste Management, 2017, 20(6): 1-9.

[5] 屈京, 马跃, 岳长涛, 等. 含油污泥脱水技术国内外研究现状[J]. 应用化工, 2021, 50(11): 3079-3086.

[6] QI S S, YUAN S J, WANG W, et al. Effect of solid-liquid separation on food waste fermentation products as external carbon source for denitrification[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 284(9): 124687.

[7] 丁凤娟. 微型智能餐厨垃圾处理设备开发[D]. 凤阳: 安徽科技学院, 2017: 9-13.

[8] 郭润红. 国产螺旋挤压机处理浆渣与生化污泥的应用[J]. 造纸装备及材料, 2017, 46(4): 13-15.

[9] 费辉盈. 禽畜粪便水分特征及生物脱水途径研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007: 6-19.

[10] 贺李萍. 秸秆螺旋挤压机的脱水试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015: 26-32.

[11] YU Y, LI P P, ZHANG J X, et al. Comprehensive insights into the organic fractions on solid-liquid separation performance of anaerobic digestates from food waste[J]. Science of the Total Environment, 2021, 800: 149608-149608.

[12] 杨阳. 高黏度物料固液挤压分离技术与装备研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 9-19.

[13] 郭鹏宁, 刘巍, 袁浩, 等. 基于微元离散模型的螺旋挤压脱水效率的分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(3): 1-8.

[14] 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: 29-31.

[15] 赵扬. 滤饼微观结构与压榨过滤理论的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 87-108.

[16] 张之仪. 机械化运输设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 96-133.

[17] LIU T Q, WANG J X, LI Y G, et al. Design and experiment of substrate grass seed blanket extrusion device[J]. Sustainability, 2022, 14(17): 1-21.

[18] 陈振. 基于螺旋轴和动静环优化设计的叠螺式脱水机的研发[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 23-25.

[19] 赵维松. 螺旋挤压固液分离机构优化设计与试验[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017: 40-50.

[20] 关正军, 王新志, 张旭, 等. 牛粪污泥螺旋挤压式固液分离机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 192-197.

[21] 农业农村部. 畜禽粪便固液分离机质量评价技术规范: NY/T 3119—2017[S/OL]. [2022-12-20]. <https://www.doc88.com/p-6426486518506.html>.