

牛粪污螺旋挤压式固液分离机优化设计与试验

关正军¹ 王新志¹ 张旭¹ 王伟东²

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院, 大庆 163319)

摘要: 为优化螺旋挤压式固液分离机工作参数,研究了牛粪尿 TS 质量分数为 10% 时,变径螺旋轴分离段锥度、分离筛笼栅条间隙、螺旋轴转速、出料端部压力对机器分离效率、原料的固体去除率和机器能耗的影响。经参数优化和试验验证,在螺旋轴分离段锥度 2.68°、分离筛笼栅条间隙 1 mm、螺旋轴转速 60 r/min、出料端部初始压力 3 250 N 时,分离效率可达 746.18 kg/h,固体去除率可达 49.84%,分离后固体的含水率为 61%,分离效果较好。

关键词: 牛粪; 固液分离; 螺旋挤压; 参数优化

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0192-06

Optimal Design and Experiment of Screw Extrusion Solid-liquid Separator for Cow Manure

Guan Zhengjun¹ Wang Xinzhi¹ Zhang Xu¹ Wang Weidong²

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Biological Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Solid-liquid separating is an effective way to pre-treat dairy manure. In order to further reduce the moisture content of separated solid and improve the efficiency of solid-liquid separation, a new screw extrusion separator was designed based on the theory of changing diameter screw compression and material characteristics of cow manure. The screw extrusion separator was constituted by feed hopper, feed sleeve, separation sleeve, separation screen, screw axis, discharge device with press-adjusting spring, three-phase motor and so on. Both the diameter of axis and the pitch of screw blade were changed in a linear fashion. The design equations of diameter and blade pitch were elaborated. The paper studied the relationship between separation performance and structure of screw axis, structure of separation screen, rotational speed of screw axis, press of discharge end. The separation performance was expressed in two main following aspects: separation efficiency and solid removal rate. An orthogonal experiment was done, which took taper of screw axis, clearance size of separation screen, rotational speed of screw axis and press of discharge end as factors. The experiment results indicated that the optimal condition for the separator was as follows: the taper of screw axis was 2.68°, the clearance size of separation screen was 1 mm, the rotational speed of screw axis was 60 r/min, and the press of discharge end was 3 250 N. Validation test showed that the separation efficiency was 746.18 kg/h, the solid removal rate was 49.84% and the moisture content of separated solid was 61%. The results showed that the separator met the expected requirements and achieved running well. Compared with original separator, DN140 screw extrusion solid-liquid separators was more efficient, its solid removal rate was lower and power was higher. It would be an promising approach for pretreatment of cow manure by using the new machine.

Key words: cow manure; solid-liquid separation; screw extrusion; parameter optimization

引言

第一次全国污染源普查公报^[1]数据显示,畜禽养殖业粪便年产生量 2.43 亿 t,尿液年产生量 1.63 亿 t。利用固液分离技术对畜禽粪便进行处理,能够有效提高有机成分的利用率,是实现畜禽养殖粪污资源化利用和无害化处理的重要环节。KAPARAJU 等^[2]通过研究牛粪固液分离后的产气效果,发现固液分离后的牛粪颗粒明显细化,对厌氧发酵产气率有明显的正向促进作用;关正军等^[3]对牛粪固液分离后进行了分离液厌氧发酵技术研究,结果表明与原牛粪相比,用牛粪分离液发酵甲烷产率有明显提高,水力停留时间明显缩短。

畜禽养殖粪便的固液分离方法主要有:筛分分离、带式压滤分离、高速离心分离、螺旋挤压分离等^[4],其中螺旋挤压式分离的分离效果最好、效率最高,适合规模化养殖场使用^[5]。由于缺少统一的标准和理论依据,当前市场上的螺旋挤压式固液分离机结构多采用等轴径等螺距设计,少数变轴径变螺距结构也是凭经验加工,没有具体设计依据。杨明珍等^[6]研究了变径螺旋压榨,建立了变径压榨纯物理方程;笔者针对牛粪在螺旋挤压过程中含水率渐变的特点,对牛粪在不同含水率条件下的物料特性进行分析,建立了牛粪螺旋挤压机螺旋轴变径变螺距物理模型,在之前试制机器的基础上,进一步优化了螺旋轴结构、重新设计了可调压式出料端组件、将开放式的分离榨条优化为内置式分离筛笼,研制出一种新型变螺距变轴径螺旋挤压固液分离设备^[7-11]。本文基于自主研制的 DN140 型螺旋挤压式固液分离设备对牛粪污进行固液分离,通过正交试验,研究螺旋轴锥度大小、筛笼间隙大小、螺旋轴转速和出料端初始压力大小 4 个因素对固液分离效果的影响,确定新机型的最佳工艺参数,为技术推广应用和生产实践提供指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

DN140 型螺旋挤压式固液分离机结构如图 1 所示。工作原理是通过重力过滤、挤压过滤和高压压榨 3 个阶段将粪便的液体与固形物分离。

工作过程是:粪污由进料斗进入喂入套筒,锁紧螺母压紧调压弹簧将出料阀盖紧压在出料端组件(图 2)的开口处,机体内形成密闭空腔,螺旋轴在调速电动机(调速范围 20 ~ 100 r/min)带动下推送物料向前移动,在前进到分离套筒后,由于螺旋轴分离段的叶片螺距渐小、轴径渐大,相对空间变小,压力

变大,粪便的液体被挤出,通过分离筛笼后从液体出料口流出,由于螺旋叶片和分离筛笼内壁贴合紧密,牛粪内的粗纤维被剪断磨碎,固形物在螺旋轴的推动下继续向前运动,在出料端口的锥形腔内形成高压,液体进一步挤出,剩余固形物将出料阀盖顶起,从出料端口的锥形腔排出,完成整个固液分离过程。

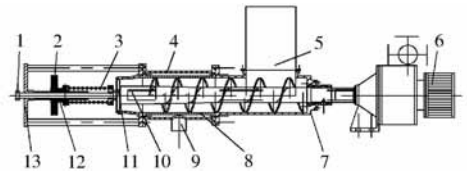


图 1 螺旋挤压式固液分离机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of solid-liquid separator

1. 定位芯轴 2. 锁紧螺母 3. 调压弹簧 4. 分离套筒 5. 进料斗 6. 调速电动机 7. 喂入套筒 8. 分离筛笼 9. 液体出料口 10. 螺旋轴 11. 出料阀盖 12. 压力传感器 13. 出料端组件



图 2 出料端组件实物图

Fig. 2 Diagram of discharge end

本设备的核心部件是如图 3 所示的变螺距变轴径的螺旋轴。轴体根据功能不同分为 4 段,分离段为变

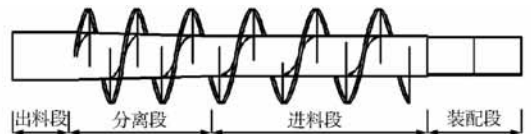


图 3 变轴径变螺距螺旋轴

Fig. 3 Screw axis with variable diameter and pitch

轴径,其它 3 段皆为等轴径。通过研究牛粪在不同含水率下体积随压强变化规律以及摩擦与剪切特性试验^[7],确定了轴的工作体积变化情况和摩擦角 F 的临界值,根据经验公式可以反映出分离段轴径的变化。

$$V = \frac{\pi D^2 l}{4} - \frac{\pi (d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2) l}{12} \quad (1)$$

式中 V ——轴分离段工作体积

D ——螺旋叶片外径

d_1 ——进料段螺旋轴直径

d_2 ——出料段螺旋轴直径

l ——螺旋轴分离段长度

根据经验公式确定叶片的螺距和螺旋倾角为

$$L = \pi d \tan \alpha \quad (2)$$

$$\alpha = 90 - \phi \quad (3)$$

式中 L ——叶片螺距 d ——螺旋轴直径

α ——螺旋倾角 ϕ ——摩擦角

1.2 试验原料

试验用原牛粪取自哈尔滨市综合奶牛养殖场的新鲜牛粪,初始总固体(TS)质量分数为16.37%,规模化养牛场内牛粪尿集中后的混合物TS质量分数约为10%。根据以上数据换算后,本试验按水料质量比0.65将12.3 kg原牛粪与8 kg水均匀混合,以模拟规模化养牛场内牛粪尿混合物的状态,作为每组固液分离试验的原料。

1.3 试验仪器设备

试验所用的仪器设备如表1所示。

表1 试验仪器设备

Tab.1 Experimental apparatus equipments

试验仪器名称	生产厂家
秒表	深圳正速达电子有限公司
UT232型数字钳式功率计	优利特科技有限公司
环形称量传感器	北京龙鼎金陆测控技术公司
CHBE07型力值显示控制仪	苏州迅鹏仪器仪表有限公司
ALC-4100.1型电子天平	北京赛多利斯仪器有限公司

1.4 试验方案设计

变径螺旋轴作为设备的核心部件,分离段锥度是首要考察因素。另外,螺旋轴转速、分离筛网间隙、出料端部压力直接影响分离效率和出料含水率,因此,试验主要考察的影响因素为:螺旋轴体分离段锥度、螺旋轴转速、分离筛网栅条间隙以及出料端部初始压力,分别记为*A*、*B*、*C*、*D*。为方便调控和监测,本试验的出料端初始压力*D*指的是传感器测得的调压弹簧处的作用力。

DN140型固液分离机的螺旋轴进料段设计直径为65 mm,分离段设计长度为320 mm,出料段直径理论范围为65~140 mm。根据经验和机器实际设计校核尺寸,加工了如图4a所示的3条出料段直径分别为65 mm、80 mm、95 mm,即分离段锥度分别为0°、2.68°、5.36°的螺旋轴。

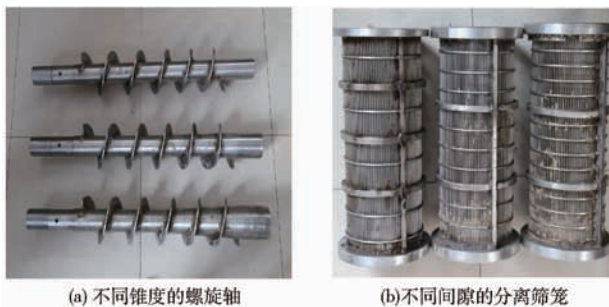


图4 螺旋轴和分离筛笼

Fig.4 Screw axes and separating screens

参考牛粪螺旋压榨固液分离参数优化试验^[8],榨条最佳间隙为1.5 mm,本试验用的DN140型固液分离机将榨条改进为如图4b所示的间隙密度

更大的分离筛笼,以1.5 mm为基准,考察分离筛笼间隙分别为1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm时的分离效果。

评价螺旋挤压式固液分离机工作性能的指标主要是分离效率(记为*M*)、固体去除率(记为*N*),另外,机器的工作能耗是否在合理范围内也是评价机器工作性能的一项次要指标,通过测定试验时电动机工作功率(记为*W*)的形式反映出来,其中

$$M = \frac{w + m}{t} \quad (4)$$

$$N = \frac{yq}{wp} \times 100\% \quad (5)$$

式中 *w*——原牛粪质量 *m*——加水量
t——分离完成耗费的时间, h
p——原牛粪TS质量分数
y——分离后固形物质量
q——分离后固形物TS质量分数

由于每一组试验都需要更换分离筛网和螺旋轴、调整转速、改变端部压力,工作量较大,为了简化试验过程,减少试验时间,同时尽可能全面地反映机器在不同因素影响下的工作性能,采用四因素三水平正交试验,因素间无交互作用,螺旋轴转速在调速电动机转速20~100 r/min范围内选择水平40、60、80 r/min,出料端初始压力选择水平为2 500、3 250、4 000 N。利用Design-Expert 8.0设计软件进行因素水平编码,得到表2所示的9组试验安排。

表2 正交试验安排表

Tab.2 Orthogonal test arrangements

序号	螺旋轴分离段锥度 <i>A</i> /(°)	分离筛网间隙 <i>B</i> /mm	螺旋轴转速 <i>C</i> /(r·min ⁻¹)	出料端初始压力 <i>D</i> /N
1	0	1.0	40	2 500
2	0	1.5	60	3 250
3	0	2.0	80	4 000
4	2.68	1.0	60	4 000
5	2.68	1.5	80	2 500
6	2.68	2.0	40	3 250
7	5.36	1.0	80	3 250
8	5.36	1.5	40	4 000
9	5.36	2.0	60	2 500

1.5 试验

试验于2015年11月13日至11月20日在东北农业大学黑龙江省农业生物环境与能源工程重点实验室进行。在进行固液分离前,先完成原牛粪和水按水料质量比0.65的混合作,调整电动机转速,完成功率计、调压弹簧和压力传感器的安装调试。试验装置如图5a所示。

先将牛粪倒入固液分离机内,然后开机运行,当

固形物如图 5b 所示开始从出料端挤出时,按下秒表

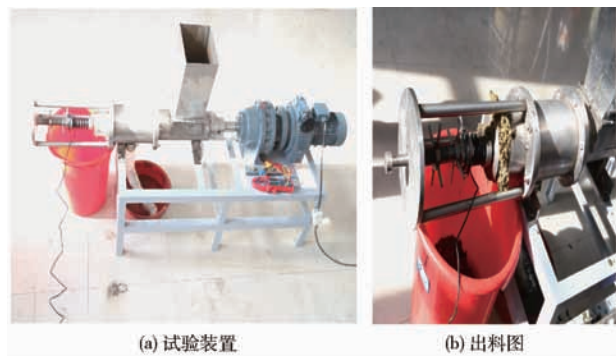


图 5 固液分离试验装置

Fig. 5 Test apparatus of solid-liquid separator

计时并记录功率计的示数,当出料端不再出料时关停秒表,记录时间,关闭电动机,对出料端挤出的固形物称量并取样,切断电源,更换螺旋轴和筛笼,清洗机器内壁,重复之前的步骤进行下一组试验。待 9 组试验完成后,分别测定每组分离固形物的 TS 质量分数求平均值并记录。

2 试验结果与数据分析

2.1 各因素对单指标的影响程度分析

各试验因素对每个评价指标的影响程度一般用极差分析来完成,应用正交设计助手软件,对试验结果和各评价指标数据的极差分析结果如表 3 所示。

表 3 试验结果和单指标分析

Tab. 3 Test results and range analysis

序号	因素				分离效率 $M/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	固体去除率 $N/\%$	工作功率 W/kW
	分离段锥度 $A/(\text{°})$	分离筛笼间隙 B/mm	螺旋轴转速 $C/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	出料端初始压 D/N			
1	0	1.0	40	2 500	616.06	44.25	1.91
2	0	1.5	60	3 250	626.23	46.75	2.42
3	0	2.0	80	4 000	403.15	36.25	2.62
4	2.68	1.0	60	4 000	744.76	47.73	2.92
5	2.68	1.5	80	2 500	557.03	42.66	2.77
6	2.68	2.0	40	3 250	418.08	40.06	2.60
7	5.36	1.0	80	3 250	796.93	46.17	3.82
8	5.36	1.5	40	4 000	621.69	40.51	3.38
9	5.36	2.0	60	2 500	618.03	41.46	3.65
\bar{M}_1	548.48	710.25	551.94	597.04			
\bar{M}_2	573.29	601.65	663.00	604.75		试验指标:分离效率	
\bar{M}_3	669.88	479.95	576.70	589.87		主次因素: $B、A、C、D$	
R	121.40	239.50	111.06	14.88		最优组合: $A_3B_1C_2D_2$	
\bar{N}_1	42.42	46.05	41.61	42.79			
\bar{N}_2	43.48	43.31	45.31	44.33		试验指标:固体去除率	
\bar{N}_3	42.71	39.26	41.69	41.50		主次因素: $B、C、D、A$	
R	1.06	6.79	3.70	2.83		最优组合: $A_2B_1C_2D_2$	
\bar{W}_1	2.32	2.88	2.63	2.78			
\bar{W}_2	2.76	2.86	3.00	2.95		试验指标:功率	
\bar{W}_3	3.62	2.97	3.07	2.97		主次因素: $A、C、D、B$	
R	1.30	0.10	0.44	0.19		最优组合: $A_1B_2C_1D_1$	

分离效率的评价目标是:分离效率越高,机器性能越好,因此,由表 3 中数据所反映的极差大小得到各几何参数对分离效率影响程度的主次顺序为: $B、A、C、D$,最优组合为 $A_3B_1C_2D_2$ 。

固体去除率的评价目标是:固体去除率越高,机器固液分离效果越好,各因素对固体去除率影响程度的主次顺序为: $B、C、D、A$,最优组合为 $A_2B_1C_2D_2$ 。

各试验因素对机器能耗影响程度的主次顺序为: $A、C、D、B$,机器工作时的能耗并不是一个主要指标,因为工作功率在合理范围内,既不超负荷运行,也不低负荷运行,各组试验测得的机器功率均在电动机额定功率范围内,因此在这里不分析其最优组

合。

2.2 方差分析

由于试验并未置空列,从极差分析中可知,对于分离效率 M 来说,端部压力 D 对其影响程度最小,所以将此因素作为误差项处理;对于固体去除率 N ,螺旋轴分离段锥度 A 对其影响程度最小,将此因素作误差项处理。

对于功率 W ,分离筛笼间隙 B 对其影响程度最小,将此因素作为误差项处理。查 F 分布表可知: $F_{0.1}(2,2) = 9, F_{0.05}(2,2) = 19, F_{0.01}(2,2) = 99$ 。利用 Design - Expert 8.0 设计专家软件对各指标进行方差分析得到数据如表 4 所示。

表4 方差分析
Tab.4 Variance analysis

指标	方差来源	偏差平方和 S_j	自由度 f_j	均方和 \bar{S}_j	F 值	显著水平
分离效率 M	A	28 770.05	2	14 385.06	31.94	显著
	B	86 047.21	2	43 023.26	95.52	显著
	C	19 450.61	2	9 725.30	21.59	显著
	误差(D)	900.82	2	450.41		
	总和	135 168.69	8			
		模型显著性			49.68	显著
固体去除率 N	B	70.08	2	35.04	38.53	显著
	C	26.85	2	13.43	14.76	不显著
	D	12.04	2	6.02	6.62	不显著
	误差(A)	1.82	2	0.91		
	总和	110.79	8			
		模型显著性			19.97	显著
功率 W	A	2.62	2	1.31	162.70	极显著
	C	0.33	2	0.17	20.72	显著
	D	0.07	2	0.03	4.24	不显著
	误差(B)	0.02	2	0.01		
	总和	3.04	8			
		模型显著性			62.56	显著

结合表4数据,对试验指标为分离效率 M 的结果进行方差分析,得到: $F_{0.01}(2,2) > F_A > F_{0.05}(2,2)$, $F_{0.01}(2,2) > F_B > F_{0.05}(2,2)$, $F_{0.01}(2,2) > F_C > F_{0.05}(2,2)$, A、B、C 均为显著因素。试验模型总体上呈显著性。

对试验指标为固体去除率 N 的结果进行方差分析,得到: $F_{0.01}(2,2) > F_B > F_{0.05}(2,2)$, $F_{0.05}(2,2) > F_C > F_{0.1}(2,2)$, $F_{0.05}(2,2) > F_D > F_{0.1}(2,2)$, B 为显著因素, C、D 均为次要因素。试验模型总体上呈显著性。

对试验指标为功率 W 的结果进行方差分析得到: $F_A > F_{0.01}(2,2)$, $F_{0.01}(2,2) > F_C > F_{0.05}(2,2)$, $F_{0.05}(2,2) > F_D > F_{0.1}(2,2)$, A 为极显著因素, C 为显著因素, D 为次要因素。试验模型总体上呈显著性。

结合对试验结果数据的极差分析和方差分析,螺旋轴分离段锥度大小是影响机器工作功率的首要因素,同时也是影响固液分离效率的主要因素,在试验范围内,分离段锥度越大,分离效率和机器功率均

呈现出逐渐变大的趋势;分离筛笼间隙是影响分离效率和固体去除率的主要因素,分离筛笼间隙越小,分离效率越高,固体去除率越高;螺旋轴转速是影响机器工作功率的主要因素,转速越高,功率越大;端部压力对于各个试验指标的影响均不显著,是一个次要因素。

2.3 工艺参数优化与验证试验

通过对试验结果的数据处理,结合设计专家软件,对各因素的不同水平综合分析,得到的符合各个指标理想状态各因素最优水平组合是:螺旋轴分离段锥度 2.68° 、分离筛笼栅条间隙 1 mm、螺旋轴转速 60 r/min、出料端初始压力 3 250 N,各指标的预测值分别为:分离效率 755.11 kg/h、固体去除率 49.95%、机器功率 2.91 kW。

对最优组合进行重复性检验,与模拟值对比。试验方法和试验条件与之前相同,试验重复 3 次以保证数据可靠性。试验结果如表 5 所示。从数据可以看出,分离效率的实测值与预测值之间的相对误差为 2.47%,固体去除率的实测值与预测值之间的

表5 最优水平组合方案重复性检验结果

Tab.5 Results of replicate test in combination scheme with optimal factors

序号	螺旋轴分离段锥度 $A/(\circ)$	分离筛笼间隙 B/mm	螺旋轴转速 $C/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	出料端压力 D/kg	分离效率		固体去除率		功率	
					实测值 $M/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	相对误差/ $\%$	实测值 $N/\%$	相对误差/ $\%$	实测值 W/kW	相对误差/ $\%$
1	2.68	1	60	325	769.26	1.91	49.45	1.12	2.70	7.22
2	2.68	1	60	325	723.56	4.23	50.95	2.00	2.85	2.06
3	2.68	1	60	325	745.71	1.28	49.13	1.64	2.80	3.78
平均值					746.18	2.47	49.84	1.59	2.75	4.35

相对误差为 1.59%, 机器功率的实测值与预测值之间的相对误差为 4.35%, 各个评价指标的预测值与实测值相对误差均小于 5%, 证明最优水平的组合是可信的, 能使机器在实际生产应用过程中达到较高的分离效率和固体去除率, 满足合适的功率和能耗。

牛粪经过固液分离后的液体通过厌氧发酵的方法进行资源化利用, 发酵试验表明, 与具有相近 TS 质量分数的稀释牛粪相比, 牛粪分离液单独发酵的产气量可以提高 32.68%, 甲烷产率也有大幅提高^[12], 而牛粪分离液与猪粪分离液最佳配比混合发酵情况下启动时间更短、产气量更多^[13]。

对于分离后的固形物来说, 由于粗长纤维已经剪断、磨碎, 结构松散, 可以压块处理, 这就对分离后固形物的含水率提出了要求, 如果含水率过高, 会对固液分离固形物的利用造成影响。研究表明, 物料含水率越高, 物料成型率越低, 设备能耗越高^[14-15]。笔者对验证试验中 3 组固形物的含水率做了测定, 为后续利用提供参考, 为生产实践提供指导, 从表 6 中数据可以看出, 本设备对牛粪进行固液分离后的固体含水率为 61% 左右, 较原牛粪有大幅降低, 由于气味更小、组织更松散, 经简单晾晒后比原牛粪更易达到最佳压块含水率。牛粪在固液分离前后的实物对照如图 6 所示。

表 6 固形物含水率

Tab. 6 Water content of solid

序号	分离后固体含水率/%	平均值/%	原牛粪含水率/%
1	62.42		
2	61.02	61.01	84.00
3	59.59		

3 结论

(1) 针对现有螺旋挤压式固液分离机普遍等轴径、等螺距、固定式配重加压的问题专门设计出一种

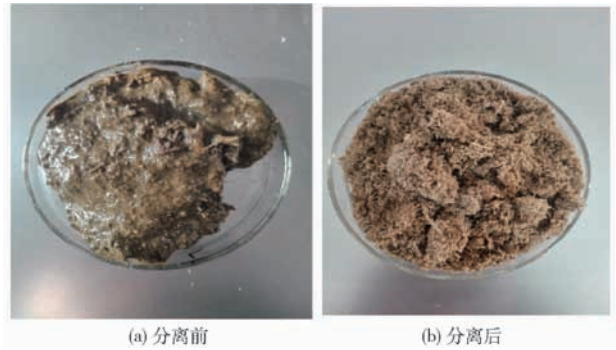


图 6 牛粪固液分离前后对比

Fig. 6 Comparison of before-and-after solid-liquid separated manure

新型螺旋挤压式固液分离机, 采用变轴径变螺距螺旋轴和压力可调的出料端。基于自主研发的 DN140 型牛粪固液分离机, 采用正交试验方式, 模拟规模化养牛场粪污条件下, 螺旋轴分离段锥度变化程度、分离筛笼栅条间隙大小、螺旋轴转速与出料端压力对分离效率、固体去除率和机器功率的影响。

(2) 通过数据处理, 分别找到了对每项评价指标影响最小的因素, 并将其作为试验误差项进行后续分析。借助设计专家软件分析并通过验证试验得到的最佳工艺参数是: 螺旋轴分离段锥度 2.68° 、分离筛笼栅条间隙 1 mm、螺旋轴转速 60 r/min、出料端部初始压力 3 250 N, 在此条件下, 机器可以实现最佳分离效果, 分离效率可达 746.18 kg/h、固体去除率可达 49.84%。

(3) 在最佳工艺参数条件下养牛粪污固液分离后固体的含水率为 61% 左右, 比原牛粪含水率下降了 23 个百分点, 比粪尿混合物含水率下降了 29 个百分点, 而采用配重加压、等轴径等螺距固液分离机分离后固体含水率普遍在 70% 左右, 本设备在不影响分离效率的同时, 实现了分离固体含水率的大幅下降, 对于今后在生产实践中利用本机器进行固液分离后的分离固体压块、分离液厌氧发酵处理等后续资源化利用具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报 [R]. 中华人民共和国国家统计局, 2010.
- 2 KAPARAJU P L N, RINTALA J A. Effects of solid-liquid separation on recovering residual methane and nitrogen from digested dairy cow manure [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(1): 120 - 127.
- 3 关正军, 李文哲, 郑国香, 等. 牛粪固液分离液两相厌氧技术 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 300 - 305.
GUAN Zhengjun, LI Wenzhe, ZHENG Guoxiang, et al. Technology for two-phase anaerobic fermentation by solid-liquid separation solution of dairy manure [J]. *Transactions of CASE*, 2011, 27(7): 300 - 305. (in Chinese)
- 4 杨柏松, 关正军. 畜禽粪便固液分离研究 [J]. *农机化研究*, 2010, 32(2): 223 - 225, 229.
YANG Baisong, GUAN Zhengjun. Study on the solid-liquid separation [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(2): 223 - 225, 229. (in Chinese)
- 5 吴丽丽, 刘天舒, 黄希国, 等. 畜禽粪便固液分离方法及设备应用分析 [C]. 中国农业机械学会 2010 年国际农业工程大会论文集, 2010.

- 8 JORGE I, ANGELA M, JAYANTHA. A wetland simulation module for the MODFLOW ground water model[J]. *Groundwater*, 1998, 36(5):764-770.
- 9 MANSELL R S, BLOOM S A, SUN Ge. A model for wetland hydrologx description and validation[J]. *Soil Science*, 2000, 165(5):384-397.
- 10 REFSGAARD J C, STORM B. MIKE SHE in: computer models of watershed hydrology[C]// Englewood Cliffs, New Jersey: Water Resources Publications, 1995:809-846.
- 11 张金存, 芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2):286-292.
ZHANG Jincun, RUI Xiaofang. The current situation and future of the distributed hydrological model[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2):286-292. (in Chinese)
- 12 FREEZE R A, HARLAN R L. Blueprint of a physically-based digitally-simulated hydrologic response model[J]. *Journal of Hydrology*, 1969, 9(3):237-258.
- 13 KUMAR R, NIVARTHI S. Application of lattice Boltzmann method to study flow and dispersion in channels with and without expansion and contraction geometry[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1999, 31(5):801-819.
- 14 ZHOU J G. A lattice Boltzmann model for the shallow water equations[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, 191(32):3527-3539.
- 15 XU Kun. BGK-based scheme for multicomponent flow calculations[J]. *Journal of Computation Physics*, 1997, 134(1):122-133.
- 16 张东辉. 格子玻尔兹曼方法在水文学中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
ZHANG Donghui. Lattice Boltzmann method and some application to hydrology[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese)
- 17 LUO Lishi. Theory of the lattice Boltzmann method: lattice Boltzmann models for nonideal gases[J]. *Physical Review E*, 2000, 62:4982-4996.
- 18 宫兴龙, 付强, 邢贞相, 等. 基于格子玻尔兹曼法的 TOPMODEL 建模与应用[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7):181-186.
GONG Xinglong, FU Qiang, XING Zhenxiang, et al. Modelling and application of TOPMODEL based on LBM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7):181-186. (in Chinese)
- 19 毕超. 计算流体力学有限元及其编程详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- 20 汪德燿. 计算水力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 21 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 22 章光新, 张蕾, 范伟. 湿地生态水文与水资源管理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

(上接第 197 页)

- 6 杨明珍, 杨德武, 聂鑫, 等. 变径螺旋压榨理论研究[J]. *过滤与分离*, 2004, 14(3):12-14.
YANG Mingzhen, YANG Dewu, NIE Xin, et al. Theoretical study on the change diameter screw compression in theory [J]. *Journal of Filtration and Separation*, 2004, 14(3):12-14. (in Chinese)
- 7 庞皓升, 关正军. 牛粪固液分离机螺旋轴的改进[J]. *东北农业大学学报*, 2012, 48(3):34-38.
PANG Haosheng, GUAN Zhengjun. Improvement of cow muck solid-liquid separator of screw shaft [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 48(3):34-38. (in Chinese)
- 8 关正军, 李文哲, 杨柏松, 等. 牛粪螺旋压榨固液分离工艺参数的优化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12):276-279.
GUAN Zhengjun, LI Wenzhe, Yang Baisong, et al. Optimization on parameters of solid-liquid separation process of dairy manure by screw press [J]. *Transactions of CASE*, 2010, 26(12):276-279. (in Chinese)
- 9 庞皓升. 牛粪酸化后固液分离技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- 10 关正军, 张鸿琼, 李文哲, 等. 固液分离机变螺距螺旋轴: 中国, 201220402573.3[P]. 2013-01-23.
- 11 关正军, 张旭, 王新志. 一种螺旋挤压固液分离出料装置: 中国, 201520170947.7[P]. 2015-09-02.
- 12 关正军, 李文哲, 郑国香, 等. 固液分离对牛粪利用效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4):259-263.
GUAN Zhengjun, LI Wenzhe, ZHENG Guoxiang, et al. Effect of solid-liquid separation on utilization of dairy manure [J]. *Transactions of CASE*, 2011, 27(4):259-263. (in Chinese)
- 13 GUAN Zhengjun, SUN Xianli, BI Lanping, et al. Two-phase anaerobic fermentation by co-digestion of liquids separated from dairy manure with swine manure [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9(2):146-152.
- 14 侯振东, 田潇瑜, 徐杨. 秸秆固化成型工艺对成型块品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(5):86-89.
HOU Zhendong, TIAN Xiaoyu, XU Yang. Effects of densification processing on physical quality and mechanical properties of corn stover[J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(5):86-89. (in Chinese)
- 15 段建, 陈树人, 姚勇, 等. 环境秸秆压块机吨燃料能耗试验与工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1):149-155.
DUAN Jian, CHEN Shuren, YAO Yong, et al. Energy consumption test and process optimization for circular for mold briquetting machine[J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1):149-155. (in Chinese)