

# 畜牧混合废弃物分选装置运行参数试验研究

王晓兵, 刘宏新\*

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为验证一种新型畜牧混合废弃物分选装置的功能并制定合理的运行参数, 以混合物料含水率  $MC$ 、进料流量  $Q$ 、柔性物分离器转速  $N_r$  为试验参数, 采用二次正交旋转组合试验设计, 建立评价指标与试验参数之间的回归模型, 并运用目标优化的方法对模型进行优化。研究结果表明, 试验样机能够实现混合物组分的按类分选, 试验因素组合为含水率 87.8%, 物料流量 41.6 L/min, 柔性物分离器转速 64.5 r/min 时可获得最高的柔性杂质分离率; 在以上因素情况下, 以沉降性杂质分离率及物料损失率作为评价指标, 试验得出沉降性杂质分离器的最佳转速为 6 r/min。研究为提高畜牧混合废弃物分选装置的分离性能及结构优化提供了依据。

**关键词:** 畜牧, 排泄, 装置, 分选, 运行参数, 分离率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.021

中图分类号: S216.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0112-05

王晓兵, 刘宏新. 畜牧混合废弃物分选装置运行参数试验研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 112—116.

Wang Xiaobing, Liu Hongxin. Experiments on working parameters of separating equipment for stockbreeding mixed rejectamenta[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 112—116. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

利用厌氧消化技术生产沼气是开发利用牲畜粪便, 消除畜牧养殖废弃物污染和开发生物质能的重要手段之一, 其技术日趋成熟<sup>[1-3]</sup>。但规模化的生产还面临一些实际问题, 其中预处理工艺及设备不配套较为突出, 由于实际收集的原料多是成份复杂的混合物, 如不经预处理直接进入生物发酵环节, 会影响分解率和产气率, 导致厌氧工段运行不稳定, 难以发挥最佳的产气能力, 且易造成管路堵塞及设备损坏<sup>[3-6]</sup>。因国内利用厌氧消化技术工业化、规模化处理畜牧混合废弃物的研究刚刚开始, 相关设备仍属空白<sup>[6-9]</sup>。国外发达国家由于草场面积等自然因素导致的畜牧业的生产方式与中国不尽相同, 相关研究也少有借鉴性。因此, 深入研究预处理工艺及设备具有重要的现实意义。

在综合分析畜牧混合物废弃物的组分及性质基础上, 拟定了由原料流态化、饲草等柔性杂质挑出、石块等重质杂质沉降清除、调质贮存等工序组成的预处理流程, 配套设计了核心设备流态混合物分选装置(发明专利 200710144782.6)<sup>[10-16]</sup>。本文对其进行试验研究以确定其最佳运行参数并验证功能结构的有效性。

## 1 试验准备

### 1.1 试验装置

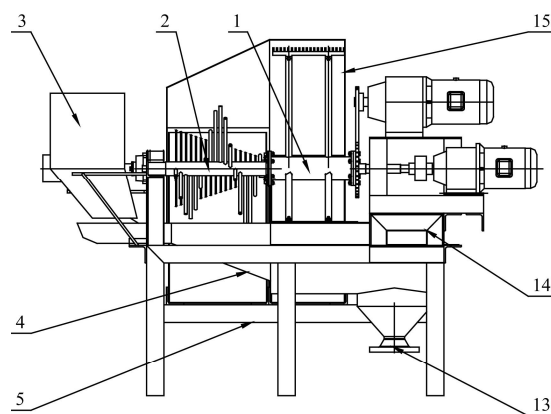
收稿日期: 2010-05-14 修订日期: 2010-06-20

项目基金: 国家科技支撑项目(2006BAD07A10); 黑龙江省科技攻关项目(GB06B502-1)

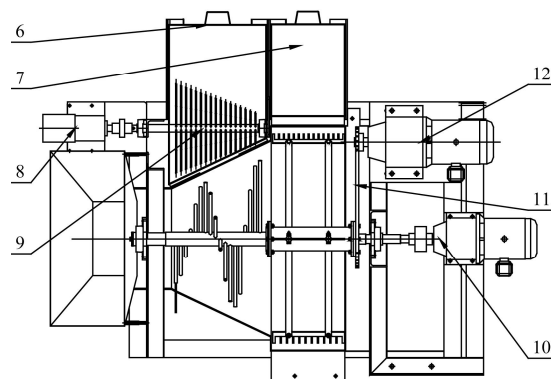
作者简介: 王晓兵(1983—), 男, 安徽人, 机械设计及理论。哈尔滨 东北农业大学工程学院, 150030。Email: wang-xb@qq.com

\*通信作者: 刘宏新(1971—), 男, 工学博士, 教授, 博士研究生导师。哈尔滨 东北农业大学工程学院, 150030。Email: Lcc98@163.com

试验装置如图 1 所示, 进料、传动、分选、出料、防溅外罩等部分组成, 技术参数见表 1 所示。



a. 主视图(外罩剖视)



b. 俯视图(摘去外罩)

1. 沉降物分离器 2. 柔性物分离器 3. 进料槽 4. 离槽 5. 机架 6. 柔性物收集箱 7. 沉降物收集箱 8. 1<sup>#</sup>减速机 9. 锥形齿刷 10. 2<sup>#</sup>减速机 11. 链 12. 3<sup>#</sup>减速机 13. 法兰 14. 电机座 15. 外罩

图 1 流态混合物分选装置

Fig.1 Stockbreeding mixed rejectamenta separating machine

表 1 分选装置技术参数  
Table 1 Technical data

名 称	指 标
尺寸/mm	1 800×1 200×1 500
功率/kw	4.8
生产率/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	40
柔性物清除能力/mm	长度≥40
固形物清除能力/mm	直径≥10

设备工作时，原料从进料槽 3 进入分离槽 4，当流态原料流经分离槽中长 400 mm，倾角为 30°的锥形段时，柔性物分离器 2 轴上周向间隔 30°，轴向间隔 20 mm 的左旋螺旋刷杆，将其中的柔性杂质从混合物料中挑出，挑出物在母线锥角为 30°的锥形齿刷 9 的清理作用下落入收集箱 6，而后，沉降物分离器 1 轴向均布的 3 组齿耙，将物料中直径大于 10 mm 的石块等沉降性杂质捞出并落入收集箱 7 中，其余有效物料通过分离槽底部法兰 13 联接的管道输送至后续工位。

1.2 试验原料

原料取自哈尔滨市香坊区养牛场，含水率平均值为 81.2%，相应的干物质量 TS 为 18.8%，杂质占牛粪总质量的平均值为 11.29%。其中柔性杂质是较为稳定的杂质来源，变化范围在 5.63%~8.68%，平均为 7.20%。

1.3 试验方案

试验因素为物料含水率  $MC$ 、进料流量  $Q$ 、柔性物分离器转速  $N_r$ ，各因素水平根据预试验确定为： $MC=82\% \sim 98\%$ 、 $Q=16 \sim 84 \text{ L/min}$ 、 $N_r=16 \sim 84 \text{ r/min}$ 。试验采用二次正交旋转组合设计方法，进行 3 因素 5 水平全因素试验，试验因素水平编码如表 2 所示。

表 2 因素水平编码表  
Table 2 Experimental variables and levels

水平	含水率 $MC/\%$	进料流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	柔性物分离器转速 $N_r/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
1.682	98	84	84
1	95	70	70
0	90	50	50
-1	85	30	30
-1.682	82	16	16

试验响应指标确定为柔性物分离率  $SR_1$ ，因石块等沉降性杂质的分离相对容易，该部分工作部件运行参数在优化的柔性杂质分离参数的基础上进行。为保证试验数据的可比性，杂质按平均值采用人工添加进干净原料中的方式进行计算，相应分离率以分选出的杂物与添加量在相同含水率与清洁度的情况下计算得出。

2 试验分析及优化

2.1 数据结果分析

试验结果如表 3 所示。

应用 Design-Expert 软件得出柔性物分离率的方差分析结果如表 4 所示。

表 3 试验数据表  
Table 3 Experimental data

试验号	$x_1$ 含水率 $MC/\%$	$x_2$ 进料流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	$x_3$ 柔性物分离器转速 $N_r/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$y$ 柔性物分离率 $SR_1/\%$
1	1(95)	1(70)	1(70)	78.4
2	1(95)	1(70)	-1(0)	48.6
3	1(95)	-1(30)	-1(30)	81.4
4	1(95)	-1(30)	1(70)	93.3
5	-1(85)	1(70)	1(70)	87.2
6	-1(85)	1(70)	-1(30)	73.5
7	-1(85)	-1(30)	1(70)	97.1
8	-1(85)	-1(30)	-1(30)	95.6
9	1.628(98)	0(50)	0(50)	80.5
10	-1.628(82)	0(50)	0(50)	95.6
11	0(90)	1.628(84)	0(50)	60.7
12	0(90)	-1.628(16)	0(50)	98.1
13	0(90)	0(50)	1.628(84)	95.2
14	0(90)	0(50)	-1.628(16)	50.5
15	0(90)	0(50)	0(50)	90.3
16	0(90)	0(50)	0(50)	89.1
17	0(90)	0(50)	0(50)	88.5
18	0(90)	0(50)	0(50)	91.3
19	0(90)	0(50)	0(50)	87.4
20	0(90)	0(50)	0(50)	90.6
21	0(90)	0(50)	0(50)	89.1
22	0(90)	0(50)	0(50)	89.2
23	0(90)	0(50)	0(50)	91.3

注：括号中数字表示试验因素的实际数值。

表 4 方差分析表  
Table 4 Variance analysis table

来源	平方和	自由度	均方和	$F$ 值	$Prob>F$
A	435.21	1	435.21	31.49	<0.0001
B	1 488.3	1	1 488.30	107.68	<0.0001
C	1 277.3	1	1 277.32	92.41	<0.0001
$A^2$	0.085	1	0.085	6.129E-003	0.9388
$B^2$	155.52	1	155.52	11.25	0.0052
$C^2$	471.44	1	471.44	34.11	<0.0001
AB	30.81	1	30.81	2.23	0.1593
AC	87.78	1	87.78	6.35	0.0256
BC	113.25	1	113.25	8.19	0.0133
误差	179.69	13	13.82		
总和	165.72	22			

注：A、B、C 为软件处理时的因素代号，分别对应试验因素  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 。

从方差分析结果“ $Prob>F$ ”项可知，A、B、C 极显著， $B^2$ 、 $C^2$ 、AC、BC 在水平  $\alpha=0.05$  时显著，而因素  $A^2$ 、AB 不显著。将不显著项剔除，二次回归方程为

$$y = 89.55 - 5.65x_1 - 10.44x_2 + 9.67x_3 - 3.13x_2^2 - 5.45x_3^2 + 3.31x_1x_3 + 3.76x_2x_3$$

## 2.2 图形分析

结合数学模型,以柔性物分离率变化等值曲线曲面图为例进行分析。

由图 2 可知,流量置“0”水平 50 L/min 时,含水率和柔性物分离器转速对柔性物分离率综合作用规律较为简单,柔性物分离器转速处于高速时,流状混合物分选装置具有很高的分离率,随着转速的减小分离率逐渐下降。在高转速时,含水率对分离率的影响较小,几乎成线性关系,随着转速的降低,含水率对分离率的影响,逐渐增强。因此,在含水率和转速对分离率的交互作用中,对分离率影响较大的因素是柔性物分离器转速。按分离率高低区域排序,依次为高转速与低含水率、高转速与高含水率、低转速与低含水率,最差为低转速与高含水率。

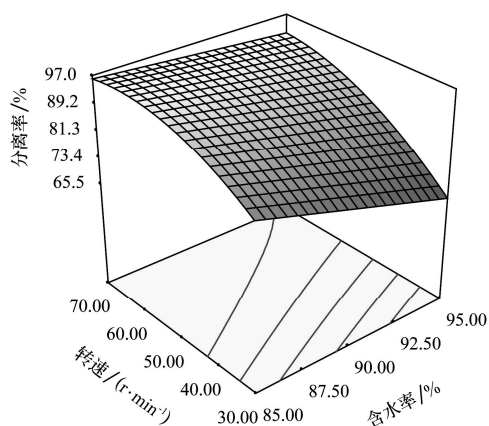


图 2 含水率和转速对柔性物分离率影响的等值曲线曲面图

Fig.2 Influence of water ratio and rotating speed on separation rate of flexible ingredients

由图 3 可知,含水率置“0”水平 90%时,等值曲线和曲面变化较大,说明  $Q$ 、 $N_r$  两因素对分离率的作用明显。流量的增大明显不利于分离率的提高,而转速的不断加大则可以弥补流量增长所带来的负面影响,由此也可证明,在整机机构允许的情况下增大转速是适应大流量的有效手段。理论最佳区域是小流量与高转速的组合。

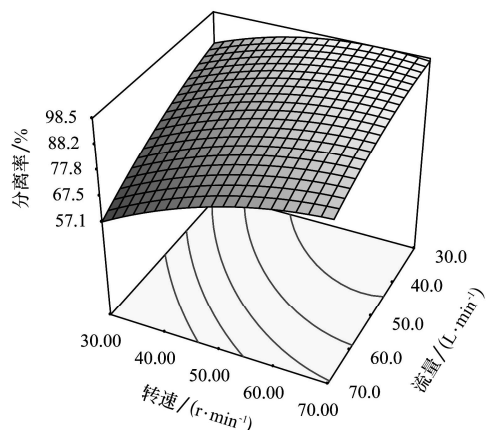


图 3 流量和转速对分离率影响的等值曲线曲面图

Fig.3 Influence of feed rate and rotating speed on separation rate of flexible ingredients

## 2.3 试验指标的优化

采用主目标函数法,应用 Design-Expert 软件进行优化求解。以分离率的回归方程作为试验指标函数,剩余的回归方程为约束条件,进行模型优化。

### 2.3.1 设计因素变量

因素变量:  $\bar{x} = [x_1, x_2, x_3]$ 。

### 2.3.2 试验指标函数

根据分离率性能的要求,试验指标的目标函数为

$$y = 89.55 - 5.65x_1 - 10.44x_2 + 9.67x_3 - 3.13x_2^2 - 5.45x_3^2 + 3.31x_1x_3 + 3.76x_2x_3$$

$$y \in [90, 100]$$

### 2.3.3 约束条件

本文选取因素变量的范围为约束条件,根据预处理工艺要求,物料含水率为 90%,产气量最多, COD 去除率也最多<sup>[8]</sup>;由试验结果可知,柔性物分离器转速处于高速时,流状混合物分选装置具有很高的分离率。因此,结合实际情况确定约束条件为

$$x_1 \in [85, 90], x_2 \in [30, 70], x_3 \in [30, 90]$$

### 2.3.4 优化

应用 Design-Expert 软件进行优化求解,得到满足试验指标范围的因素的最佳参数组合方案如表 5 所示。

表 5 最佳参数组合方案

Table 5 Best parameters combination

序号	含水率 MC/%	进料流量 $Q/(L \cdot \min^{-1})$	柔性物分离器转速 $N_r/(r \cdot \min^{-1})$	柔性物分离率 $SR_1/\%$	可行度
1	88.27	37.21	82.01	92.5	1.000
2	85.40	38.07	70.66	92.0	1.000
3	88.43	34.71	47.05	94.9	1.000
4	87.83	41.58	64.54	97.0	1.000
5	85.35	32.31	73.46	91.1	1.000
6	85.58	31.43	53.46	94.4	1.000
7	88.91	34.13	44.72	94.4	1.000
8	86.27	33.90	71.20	93.2	1.000
9	85.58	37.74	37.12	91.5	1.000
10	85.69	35.89	55.13	97.8	1.000

以上满足条件的方案中,从分离率来看较大且比较接近的方案是 10 号和 4 号,但 10 号方案流量较小,实际生产率低,因此,选择 4 号方案为最优方案。

## 3 附加试验

在上述最优方案的基础上,进行沉降物分离器转速  $N_c$  的单因素试验,以石质沉降物分离率  $SR_2$ 、物料损失率  $LR$  作为考察指标。

根据预试验的情况,确定转速试验区间为 2~10 r/min,试验数据如表 6 所示。柔性物分离率维持稳定,沉降物分离器根据设计要求能够将物料中直径大于 10 mm 的石质杂质全部捞出。随分离齿耙及杂质带出而损失的物料随转速的降低而迅速降低,转速在 4~6 r/min

时损失率较低且趋于稳定。根据试验结果，在能够达到较小的损失率又避免分离槽沉降室填满，沉降物分离器转速为 6 r/min 较合适。

表 6 附加试验数据表  
Table 6 Additional experiment data

序号	沉降物分离器转速 $N_c/(r \cdot \min^{-1})$	柔性物分离率 $SR_1/\%$	沉降物分离率 $SR_2/\%$	损失率 $LR/\%$
1	10	95.6	100.0	4.6
2	8	97.3	100.0	3.7
3	6	96.4	100.0	1.7
4	4	95.4	100.0	1.5
5	2	96.5	100.0	1.2

#### 4 结 论

分选装置能够实现混合物组分的按类分选，经分选处理后的原料满足后续沼气生产的需要。运行参数的最佳组合为含水率 87.8%，物料流量 41.6 L/min，柔性物分离器转速 64.5 r/min。在最佳柔性物分离因素组合情况下，石质沉降物分离器转速在保证分离率及有限物料损失率的情况下为 6 r/min。

通过试验效果和摄像观察，分选装置导流槽锥段的锥角及长度、沉降段环宽度等机械特征参数能够较好地配合分离部件的工作，但其结构参数在条件许可的情况下有待进一步的优化研究。

#### 【参 考 文 献】

- [1] 曾邦龙. 上海市畜禽场粪污治理沼气工程及资源综合利用[J]. 中国沼气, 2000, 18(3): 31—33.  
Zeng Banglong. Research on methane engineering of livestock manure equipment and resource comprehensive utilization of Shanghai city[J]. Transactions of the China Biogas, 2000, 18(3): 31—33. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李长生, 王应宽. 集约化猪场粪污处理工艺的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1): 86—90.  
Li Changsheng, Wang Yingkuan. Technology of swine manure treatment on intensive scaled swine farms[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1): 86—90. (in Chinese with English abstract)
- [3] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 张克强, 高怀友. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 34—35.
- [5] 胡启春, 宋立. 奶牛养殖场粪污处理沼气工程技术与模式[J]. 中国沼气, 2005, 23(4): 22—25.  
Hu Qichun, Song Li. Biogas engineering technology and modes for the treatment of dairy manure[J]. Transactions of the China Biogas, 2005, 23(4): 22—25. (in Chinese with English abstract)
- [6] 兰海娟, 蔡永辉, 张少华, 等. 规模奶牛饲养粪污处理工艺[J]. 乳业科学与技术, 2008, 129(2): 84—85.  
Lan Haijuan, Cai Yonghui, Zhang Shaohua, et al. Technology of cow manure treatment on intensive scaled cow farms[J]. Transactions of the Journal of Dairy Science and Technology, 2008, 129(2): 84—85. (in Chinese with English abstract)
- [7] Garcia H, Rico C, Garcia P A, et al. Flocculants effect in biomass retention in a UASB reactor treating dairy manure[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(14): 6028—6036.
- [8] Masse L, Masse D I, Beaudette V, et al. Size distribution and composition of particles in raw and anaerobically digested swine manure[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005, 48(5): 1943—1949.
- [9] Harald Anlauf. Recent developments in centrifuge technology[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 58: 242—246.
- [10] 王晓兵, 刘宏新, 王晓林. 畜禽养殖废弃物生物发酵前预处理系统设计[J]. 农机化研究, 2009(7): 118—120.  
Wang Xiaobing, Liu Hongxin, Wang Xiaolin. The pretreatment system design of poultry cultivation wastes in methane production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(7): 118—120. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨柏松, 关正军. 畜禽粪便固液分离研究[J]. 农机化研究, 2010(2): 223—229.  
Yang Baisong, Guan Zhengjun. Study on the solid-liquid separation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(2): 223—229. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang R H, Lei F. Chemical treatment of animal manure for solidliquid separation[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1998, 41(4): 1103—1108.
- [13] Moller H B, Lund I, Sommer S G. Solid-liquid separation of livestock slurry: Efficiency and cost[J]. Bioresource Technology, 2000, 74(1): 223—229.
- [14] 邢汝明, 李海莹. 粪便固液分离设备设计[J]. 环境卫生工程, 2007, 15(1): 25—27.  
Xing Ruming, Li Haiying. Design of night soil solid and liquid separation equipment[J]. Transactions of the Environmental Sanitation Engineering, 2007, 15(1): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张俊福, 余承烈. 高效固液分离设备的设计和试验[J]. 净水技术, 2005, 4(1): 66—68.  
Zhang Junfu, Yu Chenglie. Experiment and design of a new high efficient solid-liquid separation equipment[J]. Transactions of the Water Purification Technology, 2005, 4(1): 66—68. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张慧, 孙世钢. 螺旋式固液分离设备的分类及应用[J]. 大连大学学报, 2004, 25(4): 41—45.  
Zhang Hui, Sun Shigang. Classification and application of the screw-type solid/liquid separating sets[J]. Transactions of the Journal of Dalian University, 2004, 25(4): 41—45. (in Chinese with English abstract)

## Experiments on working parameters of separating equipment for stockbreeding mixed rejectamenta

Wang Xiaobing, Liu Hongxin<sup>※</sup>

(Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to validate the function and optimize the working parameters of a new stockbreeding mixed rejectamenta separating machine, water ratio, feed rate and rotating speed of flexible sundries separating shaft were taken as the experiment parameters, the recursive model of flexible sundries separating rate was gotten by means of quadratic orthogonal rotation experimental design. Result showed that the equipment could separate the mixture by sundries sort rightly, and the best working parameters combination were water ratio at 87.8%, feed rate at 41.6 L/min, rotating speed at 64.5 r/min, and the suitable rotating speed of the sediment separating shaft taken by additional experiment was 6 r/min. The results can provide references for improving the performance of the separating equipment.

**Key words:** animal, discharge, equipment, separation, working parameters, separation rate