

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90129

基于 EDEM 固液分离装置螺旋轴参数优化与试验

Optimization and test study on parameters of helical axis based on EDEM solid-liquid separation device

常金攀 果霖 贺小梅 王建坤 方启明

CHANG Jin-pan GUO Lin HE Xiao-mei WANG Jian-kun FANG Qi-ming

(云南农业大学机电工程学院, 云南 昆明 650201)

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

摘要:目的:解决餐厨垃圾固液分离装置脱水率低,出料不畅的问题。方法:对餐厨垃圾固液分离装置关键部位螺旋轴进行参数优化,基于 Creo 对固液分离装置进行三维建模;通过 EDEM 仿真软件对挤压过程进行仿真分析,制作优化后的螺旋轴样机并进行实验验证。结果:优化后的螺旋轴结构参数为输送距离 373 mm,压缩距离 180 mm,螺旋轴压缩端直径 96 mm,螺旋叶片直径 98 mm,螺旋轴长度 553 mm;EDEM 仿真分析得出固液分离装置出料口的受力范围为 2.7~4.5 N,平均受力 3 N,出料速度范围为 1.3~4.7 m/s,平均速度 1.9 m/s。结论:优化后的餐厨垃圾固液分离装置样机脱水率明显提高,出料顺畅,脱水效果优于优化前。

关键词:固液分离装置;螺旋轴;优化设计;EDEM 仿真分析;餐厨垃圾

Abstract: Objective: To solve the problems of low dehydration rate of solid-liquid separation device and discharge not free of kitchen waste. **Methods:** By Optimizing the parameters of the key parts of the solid-liquid separation device, modeling the solid-liquid separation device based on Creo, analyzing the extrusion process through EDEM simulation software, the optimized screw shaft prototype was made and verified. **Results:** The optimized spiral shaft structure parameters were conveying distance 373 mm, compression distance 180 mm, compression end diameter 96 mm, spiral blade diameter 98 mm and axis length 553 mm; the force range of solid-liquid separation device was 2.7~4.5 N, with average force of 3 N, and discharge speed range of 1.3 ~ 4.7 m/s with average speed of 1.9 m/s. **Conclusion:** The dehydration rate of kitchen waste solid-liquid separation device is significantly improved, the discharge is smooth, and the dehydra-

tion effect is better than that before optimization.

Keywords: solid-liquid separation device; helical axis; optimization design; EDEM simulation analysis; kitchen waste

餐厨垃圾为食物垃圾的一种。据统计^[1],中国每年产生餐厨废弃物 4 000 多万 t,且还在以每年 5%~10% 的增速上涨。餐厨垃圾长时间得不到处理,其有害物质可能会不断扩散,进而污染水资源,土地资源,危害人类健康^[2]。目前国内外利用先进的工艺技术和科技技术研制了餐厨垃圾处理设备,资金投入较大,设备维护成本较高,费工费时,还无法保证处理效果达到预期。侯嘉鑫等^[3]研制了一种绿色厨余垃圾处理器,但在压榨过程中是通过人力进行研磨和挤压,处理效率低;罗文苑等^[4]设计了一种小型餐厨垃圾处理设备,集自动化、小型化、低能耗于一体,但无法调节螺旋杆转速,压缩效率不高;金荣通等^[5]设计的厨余垃圾处理器,居民在家中可直接对厨房食物垃圾进行初步处理但螺旋挤压脱水装置的压缩距离过短,对食物残渣的挤压力不够,因此在排出时有水流带出;黄将诚等^[6]设计了一种食物垃圾处理器,可以在搅拌和压榨过程中进行智能切换,操作简单,但在控制系统设计方面需进一步优化。王浩璇等^[7]设计了一种餐厨垃圾渣液分离机,实现了快速而有效的固液分离,但在粉碎和固液分离的智能控制方面需进一步优化。

针对目前餐厨垃圾固液分离装置中存在的脱水率低,出料不畅问题,研究拟针对原有的餐厨垃圾固液分离装置中螺旋轴的结构进行参数优化,并对螺旋轴进行 EDEM 离散元仿真分析,对制作样机进行实验验证,旨在为新型固液分离装置的设计和优化提供一定的参考和依据。

1 固液分离装置螺旋轴结构优化

试验设计的餐厨垃圾处理器主要包括粉碎装置、固液分离装置、油水分离装置、控制装置 4 部分,压缩装置作为餐厨垃圾处理器的关键部分,由机架、减速机、螺旋

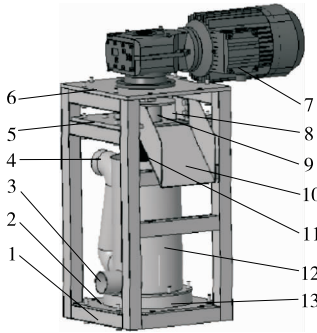
作者简介:常金攀,男,云南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:果霖(1986—),男,云南农业大学副教授,在读博士。

E-mail:1265120@qq.com

收稿日期:2021-11-04

杆、出料叶片、出料板、过滤网等组成。固液分离装置的关键部件为螺旋轴,其决定了脱水率的高低。图 1 为基于 Creo 三维制图软件绘制的固液分离装置三维图。



1. 机架 2. 底板 3. 出水口 4. 进料口 5. 分离中板 6. 减速机板 7. 减速机 8. 出料叶片 9. 螺旋轴 10. 出料口 11. 过滤网 12. 外壳 13. 底座

图 1 固液分离装置
Figure 1 Solid liquid separation device

1.1 工作原理

餐厨垃圾处理过程:将餐厨垃圾缓慢投入粉碎装置进料口处,粉碎,研磨,粉碎后的餐厨垃圾直径约为 3 mm,在水流的冲击下流入固液分离装置进行挤压脱水。挤压脱水工作原理:食物残渣在螺旋轴的输送阶段作轴向运动和径向运动,水流经过滤网排出,剩下的固体残渣被输送至压缩阶段,随着空间逐渐变小,进入压缩阶段后在螺旋轴和滤网的挤压和摩擦下将残渣中的水分和油脂经过滤网缝隙排出,而固体残渣在螺旋轴的离心力和出料叶片的旋转作用下排出。挤压脱水过程中,可以通过控制装置调节螺旋轴转速,处理含纤维量不同的食物残渣。

1.2 螺旋轴结构参数优化

螺旋轴的主要结构参数有螺旋输送距离、螺旋压缩距离、螺旋轴压缩端直径、螺旋叶片直径、螺旋叶片厚度、螺距等。为了进一步研究螺旋压缩距离、螺旋轴压缩端直径和螺旋叶片直径 3 个因素对螺旋轴工作性能指标的影响,采用 $L_9(3^1)$ 的正交表进行三因素三水平正交试验,并应用 EDEM 软件进行模拟仿真,得出最优结构参数组合。正交试验因素水平表见表 1,试验设计及结果见表 2。

由表 2 可知,平均受力最优方案为 $A_2B_3C_2$,平均速度最优方案为 $A_2B_2C_1$ 。对于平均受力指标来讲,B 的极差最大,故取 B_2 最好;对于平均速度指标来说,C 的极差最大,故取 C_1 最好。因此最优的参数组合为 $A_2B_3C_1$,即螺旋轴压缩距离 180 mm,螺旋轴压缩端直径 96 mm,螺旋叶片直径 97 mm,根据样机大小,将螺旋轴总长度设计为 553 cm,螺旋叶片厚度选取 4 mm,螺距为 50~10 mm 线性渐变,进料螺旋均选用 15°螺旋角。图 2 为优化后的螺旋轴二维图。

表 1 试验因素水平表

Table 1 Table of test factors

水平	A 螺旋压缩 距离/mm	B 螺旋轴压缩端 直径/mm	C 螺旋叶片 直径/mm
1	140	92	97
2	180	94	98
3	220	96	99

表 2 正交试验方案及结果

Table 2 Test scheme and test results table

序号	A	B	C	平均受 力/N	平均速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
1	1	1	1	1.0	1.5
2	1	2	2	2.0	1.1
3	1	3	3	2.4	0.9
4	2	1	2	1.6	1.2
5	2	2	3	2.6	1.5
6	2	3	1	3.0	1.9
7	3	1	3	1.5	1.2
8	3	2	1	2.1	1.4
9	3	3	2	3.2	1.0
平均 受力	K_1	5.4	4.1	6.1	$A_2B_3C_2$
	K_2	7.2	6.7	6.8	
	K_3	6.8	8.6	6.5	
	R	1.8	4.5	0.7	
平均 速度	K_1	3.5	3.9	4.8	$A_2B_2C_1$
	K_2	4.6	4.0	3.3	
	K_3	3.6	3.8	3.6	
	R	1.1	0.2	1.5	

2 EDEM 仿真分析

2.1 仿真模型建立

通过 Creo 软件建立餐厨垃圾固液分离装置优化后的三维模型,为了使 EDEM 离散元仿真计算更加方便、准确,对固液分离装置进行简化,省略不必要的结构。保留固液分离装置中的螺旋杆、过滤网、出料叶片、出料板、进料口等结构,省去减速器、机架等结构。将三维模型保存为 *.igs 格式,导入 EDEM 前,选择以毫米为单位进行导入,导入 EDEM 后的固液分离装置实体模型如图 3 所示。

2.2 仿真参数设置

导入模型后,对残渣颗粒和不锈钢的物理特性进行

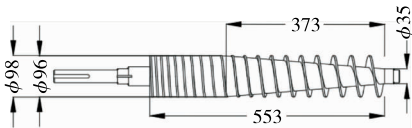


图 2 螺旋轴二维图

Figure 2 Two-dimensional plot of the helix axis



图 3 压缩装置实体模型

Figure 3 Solid model of the compression unit

参数设置(见表 3)。对导入后的螺旋轴添加驱动,速度方向为顺时针方向 200 r/min,结束时间 $\geq$ 仿真时间。添加虚拟几何体至食物残渣进口处,于几何体上添加颗粒工厂,设置动态生成颗粒,颗粒总数 30 000,生成速度 1 000 颗/s,颗粒初始速度 1 m/s,速度方向垂直于食物残渣进口界面,对仿真环境进行设定,保存。仿真前,设置固定时间步长为 20%,仿真时间 22 s,采样时间 0.05 s,选取合适的单元网格。仿真完成后,进入 Analysis 界面进行数据处理,并对仿真结果进行分析。

2.3 颗粒接触模型

EDEM 仿真可以获得包括颗粒等疏松材料与机器表面相互作用的内部行为,系统内元素之间相互碰撞的级别、频率和分布,每个颗粒的速度和位置,与散货中颗粒冲击、磨损、凝聚和分离相关的能量,金属微粒结构的应力链和结构完整性^[8]。

运用 EDEM 离散元软件进行压缩过程仿真,用颗粒模型代替食物残渣,最大程度地还原食物残渣的物理特性,使仿真结果更加接近真实情况,图 4 为颗粒模型,颗粒直径大小为 4 mm 左右,质量为 2.4 g,表 4 为材料的相互接触参数。运动过程中,颗粒与颗粒之间会产生相互作用力。物料之间存在相互作用的黏性力、碰撞力等^[9], Hertz-Mindlin 模型是 EDEM 中使用的默认模型,在力的计算方面精确且高效。该模型中,法向力分量基于 Hertzian 接触理论^[10],切向力模型基于 Middlin-Deresiewicz 模型^[11]。因此,根据实际情况,采用 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型^[12-13]。

2.4 结果与分析

通过对餐厨垃圾固液分离装置仿真产生的相关数据

表 3 材料属性参数

Table 3 Property parameters of the material

材料	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量
残渣	0.25	800	$1\text{e}+06$
不锈钢	0.30	7 800	$8\text{e}+10$

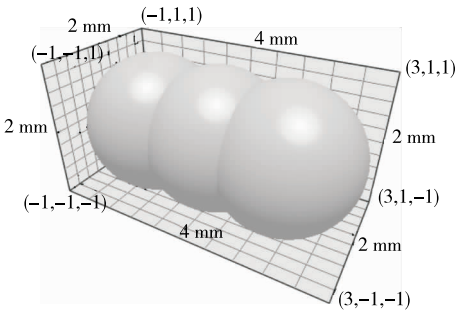


图 4 颗粒模型

Figure 4 The particle model

表 4 材料的相互接触参数

Table 4 Mutual contact parameters of the materials

接触对	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
残渣—残渣	0.25	0.5	0.01
残渣—不锈钢	0.25	0.5	0.01

进行处理与分析,得到优化后的螺旋轴颗粒速度云图、受力云图、出料口最大速度变化图、出料口最大受力变化图如图 5~图 8 所示。

由图 5、图 6 可知,颗粒在固液分离装置中经过输送阶段和压缩阶段,输送过程中,颗粒的速度、受力逐渐增大,在出料口处达最大。由图 7、图 8 可知,物料在 8 s 内被挤压排出,8 s 后颗粒的速度和受力幅度平稳,固液分离装置稳定运行。因此,选取 8~11 s 挤压过程进行仿真分析,得出固液分离装置出料口的受力范围为 2.7~4.5 N,平均受力 3 N,出料速度范围为 1.3~4.7 m/s,平均速度 1.9 m/s,该受力结果满足餐厨垃圾固液分离装置正常工作要求。为了验证仿真结果,需制作样机对仿真

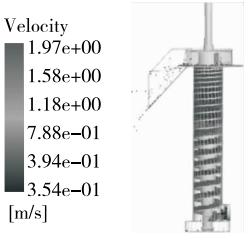


图 5 颗粒速度云图

Figure 5 Particle velocity cloud map

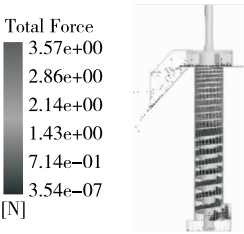


图 6 颗粒受力云图

Figure 6 Cloud map of particle particles

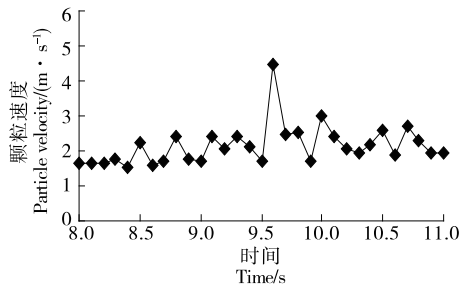


图 7 出料口最大速度变化图

Figure 7 Maximum speed change diagram of the material outlet

结果进行进一步验证。

3 实验验证

3.1 试验条件

选用餐厅的熟食作为试验材料,主要包括肉类、蔬菜、米饭等。对熟食进行粉碎,粉碎后的残渣在水流的冲击下进入固液分离装置,水流通过过滤网流入下水道,固体残渣在螺旋轴和过滤网的挤压和摩擦下,经出料口排出,对挤出的物料进行后续分析。

3.2 试验方法

为了使试验结果更具普遍性,对优化前后的螺旋轴进行比较,分别投入 20,25,30,35,40,45 kg 物料,计算每次试验物料的脱水率 ω 及处理量 M ,含水率 ω_0 。通过 WL 型餐厨垃圾含水率测定仪器测出,并按式(1)、式(2)分别计算物料脱水率和处理量。

$$\omega = \frac{M_1 - M_2}{M_1}, \tag{1}$$

$$M = \frac{M_2}{T}, \tag{2}$$

式中:

ω ——物料脱水率,%;

M ——物料处理量,kg/h;

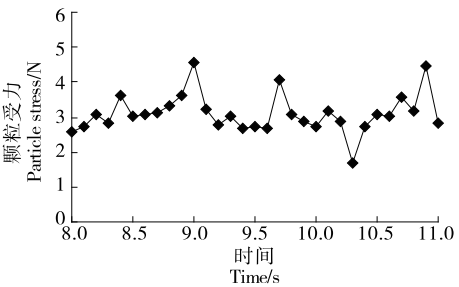


图 8 出料口最大受力变化图

Figure 8 Maximum force change diagram of the feeding outlet

M_1 ——投入粉碎机原始物料质量,kg;

M_2 ——挤出物料质量,kg;

M ——挤出物料处理量,kg/h;

T ——挤出物料所需时间,h。

3.3 结果与分析

由表 5 可知,当物料原始质量为 30 kg 时,优化前,餐厨垃圾固液分离装置的平均挤出物料质量为 10.6 kg,平均处理量为 106.38 kg/h,平均脱水率为 64.68%,挤出物料的平均含水率为 78.98%;优化后,餐厨垃圾固液分离装置的平均挤出物料质量为 5.52 kg,平均处理量为 315.5 kg/h,平均脱水率为 81.4%,挤出物料的平均含水率为 53.38%;优化后的脱水效果优于优化前的,说明优化后的装置在出料顺畅的情况下,提高了物料的脱水率。

4 结论

(1) 优化后的餐厨垃圾固液分离装置螺旋轴结构输送长度为 373 mm,压缩长度为 180 mm,螺旋轴压缩端直径为 96 mm,螺旋叶片直径为 98 mm,总长度为 553 mm。

(2) 通过 EDEM 离散元仿真软件对挤压过程进行仿真分析,得出固液分离装置出料口的受力范围为 2.7~4.5 N,平均受力 3 N,出料速度范围为 1.3~4.7 m/s,平均速度 1.9 m/s,固体残渣在螺旋轴输送阶段速度、受力

表 5 试验结果

Table 5 Experimental data table

试验号	物料原始质量/kg	挤出物料质量/kg	物料处理量/(kg·h ⁻¹)	物料脱水率/%	挤出物料含水率/%
优化前	1 20	7.5	102.5	62.5	79.8
	2 25	8.3	110.2	66.8	80.7
	3 30	10.2	108.3	66.0	78.6
	4 35	12.5	106.5	64.3	77.6
	5 40	14.5	104.4	63.8	78.2
优化后	1 20	4.2	310.7	79.0	52.2
	2 25	4.7	315.5	81.2	54.6
	3 30	5.1	320.4	83.0	53.7
	4 35	6.2	318.3	82.3	52.6
	5 40	7.4	312.6	81.5	53.8

稳定,在物料被挤出前,随着时间的增加,物料的速度和挤压力逐渐增大,且在出料口处均达最大值。

(3) 通过样机实验验证了 EDEM 对餐厨垃圾固液分离装置仿真的效果,优化后的螺旋轴脱水效果优于优化前,说明正交试验得出的参数为螺旋轴最优参数。

(4) 试验对螺旋轴参数进行了优化,此外,后续可以考虑通过优化过滤网孔隙直径的方式来提高食物残渣的脱水率。

参考文献

- [1] 刘如楠. 减少食物浪费,仅靠“光盘”远不够[N]. 中国科学报, 2021-08-13(4).
LIU Ru-nan. Reducing food waste, relying on the "CD" alone, is not enough[N]. Chinese Science Journal, 2021-08-13(4).
- [2] 祖柱. 餐厨垃圾无害化处理方案[J]. 低碳世界, 2021, 11(8): 249-250.
ZU Zhu. Kitchen waste harmless treatment plan[J]. Low Carbon World, 2021, 11(8): 249-250.
- [3] 侯嘉鑫,田沅沅,王金爽,等. 一种绿色厨余垃圾处理器的研制[J]. 辽宁化工, 2015, 44(7): 840-842, 845.
HOU Jia-xin, TIAN Yuan-yuan, WANG Jin-shuang, et al. Development of a green kitchen waste processor[J]. Liaoning Chemical Industry, 2015, 44(7): 840-842, 845.
- [4] 罗文苑,刘鹏,徐超. 小型餐厨垃圾处理设备的设计[J]. 广船科技, 2016, 36(3): 19-21.
LUO Wen-yuan, LIU Peng, XU Chao. Design of small restaurant kitchen waste treatment equipment[J]. Canton Ship Technology, 2016, 36(3): 19-21.
- [5] 金荣通,汪萌生,陈健,等. 新型厨余垃圾处理器的设计[J]. 江苏农机化, 2017(2): 23-26.
JIN Rong-tong, WANG Meng-sheng, CHEN Jian, et al. Design of a new kitchen waste processor[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2017(2): 23-26.
- [6] 黄将诚,吴明亮,马建国. 食物垃圾处理器的设计与研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(3): 112-116.
HUANG Jiang-cheng, WU Ming-liang, MA Jian-guo. Food waste processor design and research[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(3): 112-116.
- [7] 王浩璇,果霖,王一鸣,等. 基于 EDEM-Fluent 仿真的餐厨垃圾渣液分离机设计与试验[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 130-136.
WANG Hao-xuan, GUO Lin, WANG Yi-ming, et al. Design and test of restaurant kitchen waste slag separator based on EDEM-Fluent simulation[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 130-136.
- [8] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
HU Guo-ming. The discrete element method analysis and simulation of the particle system[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010.
- [9] 徐浩然,贺福强,薛亚军,等. 基于 EDEM 的多功能木质板材双螺旋搅拌机的结构优化设计与特性研究[J]. 机械强度, 2021, 43(2): 366-372.
XU Hao-ran, HE Fu-qiang, XUE Ya-jun, et al. Study on structure optimization design and characteristics of multi-functional wood plate double screw blender based on EDEM [J]. Mechanical Strength, 2021, 43(2): 366-372.
- [10] HARRINGTON B, VOORHEES C. The challenges of designing the Rocker-Bogie suspension for the Mars exploration rover[M]. Piscataway NJ: IEEE Press, 2004: 185-196.
- [11] LINDEMANN R A, VOORHEES C J. Mars exploration rover mobility assembly design, test and performance[M]. Piscataway NJ: IEEE Press, 2005: 450-455.
- [12] CUNDALL P A. The measurement and analysis of acceleration in rock slopes[D]. London: Imperial College of Science and Technology, 1971.
- [13] 宋春东. 基于离散元法的苜蓿秸秆振动压缩应力传递规律研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
SONG Chun-dong. Study on the transmission law of alfalfa straw based on discrete element method[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.

(上接第 62 页)

- [17] 胡丽俐,黎瑛,汪辉,等. 超高效液相色谱—串联质谱法测定蜂蜜中 10-羟基-2-癸烯酸[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 52-56.
HU Li-li, LI Ying, WANG Hui, et al. Determination of 10-hydroxy-2-decenoic acid in honey by ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 52-56.
- [18] 刘蓓蕾. 糖引发乙腈—水体系相分离萃取弱极性有机物的研究[D]. 保定: 河北大学, 2011: 6-9.
LIU Bei-lei. Extraction of weakly polar organic compounds with sugaring induced phase separation between acetonitrile-water[D]. Baoding: Hebei university, 2011: 6-9.
- [19] 栗有志,李芳,齐鑫,等. QuEChERS-高效液相色谱/串联质谱

- 法同时测定蜂蜜中 9 种新烟碱类杀虫剂残留[J]. 分析科学学报, 2015, 31(2): 203-207.
SU You-zhi, LI Fang, QI Xin, et al. Determination of nine neonicotinoid insecticides in honey by QuEChERS-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2015, 31(2): 203-207.
- [20] 周艳华,李涛,潘小红,等. 液液萃取—超高效液相色谱—串联质谱法快速检测原料乳中 18 种喹诺酮药物残留[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 63-69.
ZHOU Yan-hua, LI Tao, PAN Xiao-hong, et al. Simultaneous rapid determination of 18 quinolones residues in raw milk By liquid-liquid extraction and ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 63-69.