

DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90099

基于离散元方法的餐厨垃圾螺旋挤压装置性能研究

Study on performance of kitchen waste spiral extrusion device based on discrete element method

冯 硕 王延刚 王信锬 袁 浩 刘 巍 郭鹏宁

FENG Shuo WANG Yan-gang WANG Xin-kun YUAN Hao LIU Wei GUO Peng-ning

(山东大学机电与信息工程学院, 山东 威海 264209)

(College of Mechanical and Information Engineering, Shandong University, Weihai, Shandong 264209, China)

摘要:目的:提高餐厨垃圾变螺距挤压脱水装置脱水效果。方法:基于离散元方法,分析颗粒的挤压状态,改变填充系数、螺旋转速、倾角,模拟装置内物料颗粒的挤压情况。结果:变螺距的螺旋挤压脱水装置在有一定倾角的情况下,填充系数增高,转速加快,物料颗粒间的挤压力会随之增大。结论:在填充率为 60%、螺旋转速为 60 r/min、倾角为 15°时,螺旋挤压装置的挤压性能显著提高。

关键词:螺旋挤压机构;离散元仿真;餐厨垃圾;挤压性能

Abstract: Objective: To study the physical and geometric factors that affect the extrusion effect between particles in the spiral extrusion dewatering device for kitchen waste, and to provide reference for selecting the parameters of the spiral extrusion and dewatering device. **Methods:** Based on the discrete element method, the state of the extruded particles was analyzed, and the extrusion situation of the material particles in the device was simulated by changing the filling coefficient, spiral speed and inclination angle. **Results:** When there was some inclination angle in the screw extrusion dehydration device with variable pitch, the filling coefficient increased and the rotation speed up, and the extrusion pressure between the material particles increased accordingly. **Conclusion:** When the filling rate is 60%, the screw speed is 60 r/min, and the angle is 15°, the extrusion performance of the screw extrusion device can be significantly improved.

Keywords: screw extrusion mechanism; discrete element simulation; kitchen waste; extrusion performance

基金项目:山东省重点研发计划(编号:2019GSF109059)

作者简介:冯硕,男,山东大学在读硕士研究生。

通信作者:王延刚(1981—),男,山东大学高级实验师,博士。

E-mail: wangyg@sdu.edu.cn

收稿日期:2021-10-13

餐厨垃圾为餐饮垃圾和厨余垃圾的总称,是城市固体垃圾的主要组成部分。螺旋挤压式脱水装置是一种被广泛采用的餐厨垃圾脱水装置^[1-3]。在衡量一个脱水装置的脱水能力强弱时,关键在于其挤压性能的好坏。因此,借助仿真技术对螺旋挤压机构的挤压性能进行分析,对于改进脱水装置的设计参数具有指导意义。

在脱水因素研究中,李鑫^[4]根据物料填充螺槽的状态,将螺杆分为未充满段、充满段和摩擦段,而挤压脱水主要发生在充满段;贺李萍^[5]研究发现,在影响除水率的主要因素中,初始含水率大于螺旋转速;张林枫^[6]研究表明糖泥在螺旋脱水机中的脱水率与物料本身的质量、压力和加载方式相关;孙邦雨^[7]探讨了螺旋结构、螺旋转速、物料初始含水率对脱水效果的影响。在颗粒的动态研究中,陈彦超^[8]研究得出螺旋转速、螺距、填充系数对颗粒速度影响较大;基于离散单元法,辛垚谕等^[9]研究了颗粒在双螺旋机内的运动以直线运动为主,周向运动为辅。

目前,有关螺旋机构挤压效果的研究多集中于实物试验,而缺少基于基本力学原理的理论设计指导。研究拟基于离散元分析方法,设计离散化虚拟试验,探究螺旋挤压过程中颗粒运动行为及机构各参数对挤压脱水效果的影响,旨在寻找挤压脱水性能最好的一组参数。

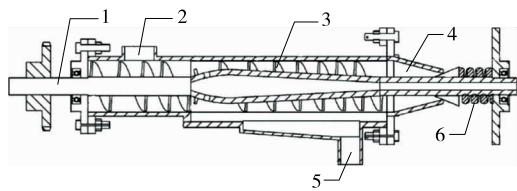
1 螺旋挤压脱水机

1.1 脱水机整体结构及工作原理

螺旋挤压机构的整体结构如图 1 所示,粉碎后的物料从顶部的人料口进入,通过螺旋叶片结构不断地挤压脱水,剩余的滤饼被输送到机构末端。末端是整个装置的挤出段,变径的外通道滤网以及带有弹簧的锥形挤压块将剩下的滤饼进行再次挤压脱水,最后挤压过的固体从后端排出。

1.2 脱水机结构参数

以餐厨垃圾螺旋挤压装置为研究对象,装置各参数



1. 螺旋轴 2. 入料口 3. 螺旋叶片 4. 出料口 5. 下端出水口
6. 弹簧锥形挤压块

图 1 螺旋挤压机构

Figure 1 Screw extrusion mechanism

见表 1、表 2,通过三维软件 Solidworks 建立螺旋挤压装置模型,装置采用变螺距挤压物料颗粒的方式进行脱水。

2 脱水机设计原理

2.1 颗粒力学分析

在螺旋挤压装置挤压物料过程中,物料颗粒受到诸多力的作用,将之视为质点。在颗粒受力情况中,将螺旋叶片当作一个支撑斜面,按照螺旋线展开,进行离散元力学分析^[10]。

如图 2 所示,螺旋叶片轴对颗粒状物料施加一个法向推力 N_1 , N_1 和物料受到的叶片摩擦力 F_a 合成为合力 F 。对该合力 F 进行分解,其中的径向分力 F_z 推动物料向前运动,周向分力 F_t 会促使物料离开叶片。由于摩擦力 F_a 与周向分力 F_t 的存在,物料不会与螺旋轴发生同步运动。

已知颗粒流中一个颗粒的运动是由移动和转动合成的结果,可用牛顿第二定律描述单个颗粒运动时的受力情况^[11-12]：

表 1 螺旋挤压装置各参数

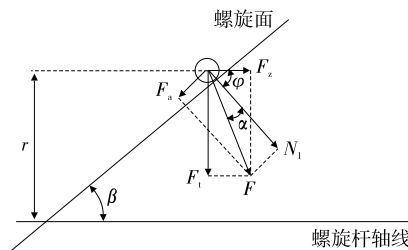
Table 1 Parameters of screw extrusion device

参数	参数值/mm
螺旋轴轴径	35
螺旋轴长度	800
螺旋管体内径	105
螺旋管壁厚度	6
螺旋叶片厚度	4

表 2 螺距参数

Table 2 Pitch parameter mm

高度	螺距	圈数	直径
0	45	0.000	38
100	55	2.000	38
200	65	3.666	38
300	75	5.095	38
400	85	6.345	38
500	95	7.456	38
600	105	8.456	38



α 为摩擦角, φ 为螺旋升角, r 为物料距轴线的距离

图 2 螺旋装置运输物料颗粒的受力分析

Figure 2 Force analysis of screw device transporting material particles

$$F_{n,ij} = \frac{4}{3} E^* \delta_n^{3/2} - \sqrt{\frac{20}{3}} \beta [E^* m^* (R^* \delta_n)^{1/2}]^{1/2} * v_{n,ij}^{rel}, \quad (1)$$

$$F_{t,ij} = -\min\{\mu_{s,ij} F_{n,ij} | 8G^* \sqrt{R^* \delta_n \delta_t} + \sqrt{\frac{80}{3}} \beta (G^* \sqrt{R^* \delta_n m^*})^{1/2} * v_{n,ij}^{rel}\}, \quad (2)$$

式中：

$F_{n,ij}$ ——颗粒 $i、j$ 之间的法向接触力, N;

$F_{t,ij}$ ——颗粒 $i、j$ 之间的切向接触力, N。

2.2 物料脱水影响因素

2.2.1 物理因素

(1) 填充率:填充率是指散体状物料的颗粒占有其堆积体体积的程度。如果填充率改变,输送物料的轴向和周向速度也会随之发生变化。填充系数的值为:

$$\varphi = \frac{Q}{47D^2 H n \lambda \epsilon}, \quad (3)$$

式中：

φ ——填充率;

Q ——螺旋挤压机的运输能力, t/h;

D ——螺旋叶片的公称直径, m;

H ——螺距, m;

n ——螺旋轴转速, r/min;

λ ——物料特性, t/m³;

ϵ ——倾斜输送系数。

(2) 最大转速:螺旋转速在实际作业中,当输送量 Q 为定值时,螺旋轴转速不应过快,且要根据物料属性、螺旋挤压机的功率对螺旋轴转速进行配合,转速的最大值由经验公式得出^[13]：

$$n_{max} = \frac{A}{\sqrt{D}}, \quad (4)$$

式中：

A ——物料的综合系数。

2.2.2 几何因素

(1) 螺旋倾角:随着倾角的增大,重力分量逐渐在物料挤压过程中显现出来,使得颗粒之间的挤压力增大。

但螺旋挤压机输送物料的质量与倾角紧密相关,其质量流率随倾角的增大而降低,并且越接近垂直状态时,物料质量流率的减小趋势越大^[14],当螺旋挤压机腔体内质量流率下降时,颗粒间的挤压效果会降低,所以在分析螺旋倾角的过程中,也要考虑倾角增大带来的输送效率降低的问题。

(2) 螺距:螺距决定了物料在螺旋机内的滑移角度,同时决定了螺旋叶片的升角,影响螺旋装置的输送效率和填充效率^[15],进而导致挤压效率的改变。

$$\tan\varphi = \frac{s}{\pi D}, \quad (5)$$

式中:

s ——螺距,mm;

D ——螺旋轴直径,mm;

φ ——螺旋升角,°。

3 脱水机 EDEM 仿真及分析

3.1 动态模拟

利用软件 EDEM 模拟颗粒在挤压过程中的运动和受力情况,先合理选择材料的物性参数,需处理的物料是餐厨垃圾,其密度和稻谷的密度相近,故采用稻谷密度代替。装置采用钢为材料,故几何体采用钢密度。接触参数采用稻谷和钢的数值,各参数取值见表 3 和表 4。

单个颗粒体积为 39.8 mm³,采用双球模型来模拟物料颗粒的实际形状,形状的不规则性用正态分布来体现,颗粒均值为 1,标准差为 0.05,同时通过计算得到螺旋轴可容纳颗粒个数约为 71 554,表 5 为螺旋挤压装置在容纳不同颗粒数目下的填充系数。

表 3 材料物理参数

Table 3 Physical parameters of materials

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
物料	0.4	1.1×10 ⁷	1 053
钢	0.3	7.0×10 ¹⁰	7 850

表 4 颗粒的接触参数

Table 4 Contact parameters of particles

相互作用	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
颗粒—颗粒	0.6	0.5	0.01
颗粒—几何体	0.3	0.3	0.01

表 5 填充系数对照表

Table 5 Filling factor comparison table

颗粒个数	填充系数/%	颗粒个数	填充系数/%
28 622	40	50 081	70
35 772	50	57 235	80
42 926	60		

餐厨垃圾的含水率一般为 70%~85%,由于物料是湿颗粒,颗粒之间有黏性,故颗粒的接触模型采用 Hertz-Mindlin with JKR 模型,颗粒与几何体的接触模型采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型。重力加速度取 9.81 m/s²,求解器中模拟单位时间步长为 6.5×10⁻⁵ s,总时长为 18~20 s,数据记录时间间隔为 0.01 s,网格单元个数为 50 000~100 000,网格大小设置为最小半径的 3.0~3.5 倍。颗粒模型和 EDEM 模型如图 3 和图 4 所示。

3.2 数据分析与处理

3.2.1 填充率 模拟水平螺旋装置,螺旋轴转速为 60 r/min,入料口处粒子生成速度分别为 2 500,3 000,3 500 颗/s,其 $T=18.5$ s 的填充率分别为 41%,51%,60%时的颗粒运动情况(见图 5)。

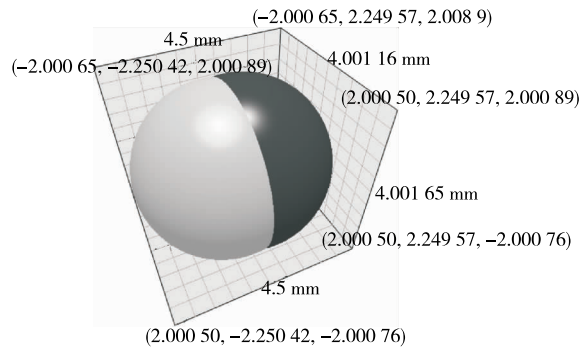


图 3 颗粒模型

Figure 3 Particle model

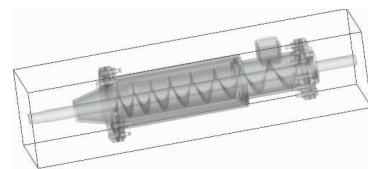


图 4 EDEM 模型

Figure 4 The model of EDEM

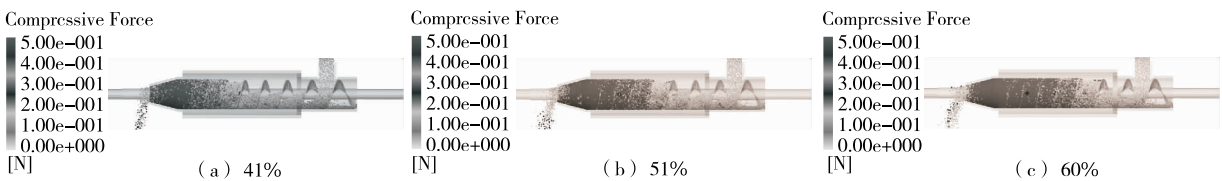


图 5 $T=18.5$ s 时不同填充系数的颗粒运动情况

Figure 5 Particle motion with different filling coefficients when $T=18.5$ s

当 $T=18.5$ s 时,螺旋挤压过程已进入稳定状态,填充率为 60% 的装置挤压段和充满段长度比 41%,51% 的更长,挤压力更大,挤压更充分。

由图 6 可知,当 $T < 12$ s 时,挤压过程尚未稳定,在充满段和挤压段形成之前,随着填充率的增加,颗粒所受挤压力的增长不明显。当 $T \geq 12$ s 时,物料颗粒所受挤压力随填充率的增大而增大,而且填充率越高,挤压力的增长速率越大,表明填充率越高,物料颗粒的挤压效果越好。

3.2.2 螺旋转速对挤压效果的影响 模拟水平螺旋装置,入料口处粒子生成速度为 4 000 颗/s,螺旋轴转速分别为 60,80,100 r/min 时的颗粒运动情况(见图 7)。

当 $T=20$ s,所有装置挤压过程稳定时,60 r/min 的



图 7 $T=20$ s 时不同螺旋转速的颗粒运动情况

Figure 7 Particle motion at different screw speeds when $T=20$ s

挤压效果最好,其挤压段和充满段长度更长,颗粒所受挤压力更大。

由图 8 可知,转速越低,挤压力发生明显变化的时间越晚,挤压力的变化速率越大,这是因为低螺旋转速的装置运输能力低,形成挤压段和充满段所花费的时间长,但其在挤压过程稳定后,挤压段和充满段的长度比高螺旋转速的更长,所以其挤压力变化速率更大,物料颗粒间的挤压更充分。因此,螺旋转速越小,挤压效果越好。

3.2.3 倾角对挤压效果的影响 模拟螺旋轴转速为 60 r/min 时,入料口处粒子生成速度为 3 000 颗/s,倾角分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 时的颗粒运动情况(见图 9)。

当 $T=18.5$ s 时,倾角越大,装置尾部未被挤压的粒子越多,但在倾角变化时,所有装置的充满段和挤压段长度基本相同,挤压力变化不明显。

由图 10 可知, $0^\circ, 15^\circ$ 装置的充满段长度几乎相同,但由于倾角的存在, 15° 装置中颗粒在重力分量和螺旋轴轴向力的共同作用下,其挤压效果更好。 30° 装置颗粒平均挤压力低于 15° 装置的原因在于颗粒的重力分量过大,物料颗粒松散,甚至会掉落,所以造成挤压效果变差,18.5 s

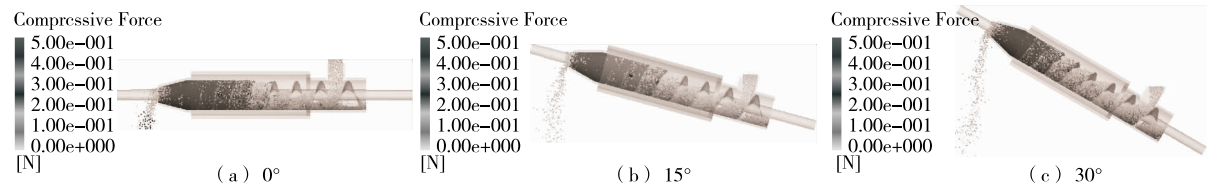


图 9 $T=18.5$ s 时不同倾角的颗粒运动情况

Figure 9 The movement of particles with different inclinations when $T=18.5$ s

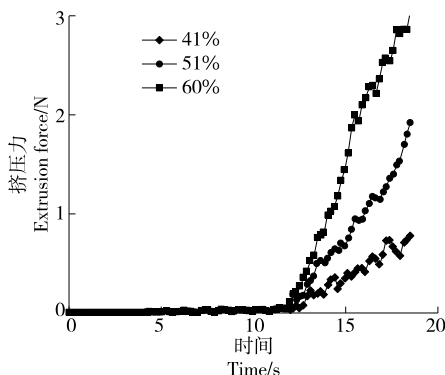


图 6 不同填充率下颗粒挤压力变化曲线

Figure 6 Variation curve of extrusion force under different filling rate

时,颗粒在不同倾角装置中所受挤压力大小为 15° 装置 $> 0^\circ$ 装置 $> 30^\circ$ 装置。因此,倾角为 15° 的装置挤压效果优于 0° 和 30° 装置。

4 结论

借助离散单元法对颗粒进行力学分析,研究了影响

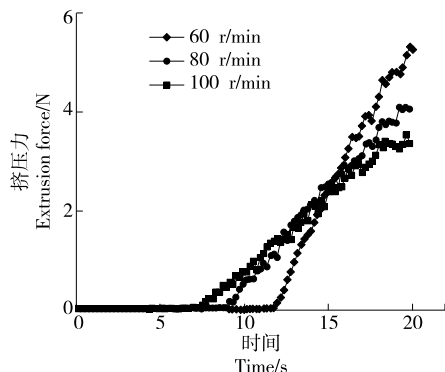


图 8 不同螺旋转速下颗粒挤压力变化曲线

Figure 8 Variation curve of extrusion force under different screw speeds

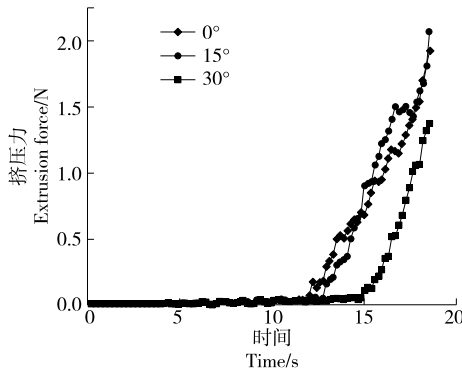


图 10 不同倾角下颗粒挤压力变化曲线

Figure 10 Variation curve of extrusion force under different inclination angles

变螺距挤压装置脱水效果的因素,并建立了螺旋挤压装置模型。结果表明,针对变螺距螺旋挤压装置,影响挤压效果的因素包括填充率、转速和倾角,填充率和转速对挤压力的影响明显,而从 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 变化的倾角对挤压力的影响较弱。在挤压过程稳定后,挤压主要发生在小螺距轴段的挤压段和充满段。螺旋挤压装置在填充率为60%、转速为60 r/min、倾角为 15° 时,挤压性能会显著提高。后续可以研究挤压装置对其他成分的餐厨垃圾的挤压效果,并得出规律性结论。

参考文献

- [1] 张爱军, 吴靖宇, 戴小东. 餐厨垃圾与生活垃圾焚烧协同处理探讨[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 115-119.
ZHANG Ai-jun, WU Jing-yu, DAI Xiao-dong. Discussion on the cooperative treatment of kitchen waste and domestic waste incineration[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(1): 115-119.
- [2] 朱时菟, 管倬生. 浅谈家用餐厨垃圾处理机的现状[J]. 工业设计, 2021(4): 66-67.
ZHU Shi-min, GUAN Xing-sheng. Discussion on the present situation of kitchen waste disposal machine for home dining [J]. Industrial Design, 2021(4): 66-67.
- [3] 刘悦. 餐厨垃圾处理设备的现状与发展趋势[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(5): 108-110.
LIU Yue. Present situation and development trend of kitchen waste treatment equipment[J]. China Comprehensive Utilization of Resources, 2020, 38(5): 108-110.
- [4] 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: 15-17.
LI Xin. Study on mechanism of spiral extrusion dehydrator based on extrusion theory [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011: 15-17.
- [5] 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: 29-32.
HE Li-ping. Experimental study on dehydration of straw screw extruder[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015: 29-32.
- [6] 张林枫. 糖泥物料特性研究及糖泥螺旋挤压机械结构优化[D]. 柳州: 广西科技大学, 2017: 34-40.
ZHANG Lin-feng. Research on material characteristics of sugar sludge and mechanical structure optimization of sugar sludge spiral extrusion[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2017: 34-40.
- [7] 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: 52-58.
SUN Bang-yu. Research on solid-liquid separation technology and equipment of urban kitchen waste[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017: 52-58.
- [8] 陈彦超. 基于DEM螺旋输送机内颗粒运移规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018: 20-29.
CHEN Yan-chao. Study on particle transport law in screw conveyor based on DEM[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018: 20-29.
- [9] 辛垚谕, 朱向哲, 樊飙, 等. 基于离散元法的双螺旋输送机物料输送和受力特性分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2021, 41(4): 63-70.
XIN Yao-yu, ZHU Xiang-zhe, FAN Biao, et al. Analysis of material conveying and force characteristics of double screw conveyor based on discrete element method[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2021, 41(4): 63-70.
- [10] 涂亚东. 螺旋输送机输送性能及螺旋体磨损研究[D]. 荆州: 长江大学, 2018: 18-25.
TU Ya-dong. Research on transmission performance and spiral wear of screw conveyor[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018: 18-25.
- [11] 余书豪, 湛永祥. 螺旋轴直径对螺旋输送机性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(2): 32-37.
YU Shu-hao, ZHAN Yong-xiang. Influence of screw shaft diameter on performance of screw conveyor[J]. China Powder Technology, 2018, 24(2): 32-37.
- [12] 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 experiment of kitchen waste residue separator based on EDEM-Fluent simulation[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 130-136.
- [13] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 水泥技术, 2010(1): 29-33.
XIANG Dong-zhi, XU Yu-wei. Selection and determination of screw conveyor design parameters[J]. Cement Technology, 2010(1): 29-33.
- [14] 周思柱, 孙文斌, 吴帮雄, 等. 大倾角螺旋输送机质量流率主要影响因素试验研究[J]. 机械设计与制造, 2019(4): 103-106.
ZHOU Si-zhu, SUN Wen-bin, WU Bang-xiong, et al. Experimental research on main influencing factors of mass flow rate of large inclination screw conveyor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(4): 103-106.
- [15] 赵冬梅, 余书豪. 变螺距螺旋输送机的螺距设计与性能分析[J]. 机械设计与制造, 2018(6): 52-55.
ZHAO Dong-mei, YU Shu-hao. Screw pitch design and performance analysis of variable screw pitch screw conveyor [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(6): 52-55.