

基于 EDEM 的翻板冷却器布料器 布料效果的离散元仿真优化

李庚¹, 薛亚南¹, 黄永娜¹, 申燕², 张京明³, 林凤岩², 王伟², 郑峰²

(1. 山东凯斯达机械制造有限公司, 山东 济宁 272000; 2. 济宁市机械设计研究院有限公司, 山东 济宁 272000;
3. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 山东 威海 264209)

摘要:翻板冷却器是一种采用逆流冷却原理的立式冷却设备。为解决翻板冷却器布料不均的问题,更好地适应多形态、多物状的物料,基于 EDEM 软件,针对以大豆颗粒为代表的颗粒料和以大豆低温粕为代表的粕粉料,对翻板冷却器布料器的布料情况进行了离散元仿真。通过中心组合试验回归分析的方法,以颗粒分布离散率为响应值,对撒料盘与铅锤面的倾斜夹角(简称“撒料倾角”)和转轴转速进行了优化,并将优化结果应用于检疫性大豆灭活工艺冷却工段的翻板冷却器布料器。结果表明:物料类型为以大豆颗粒为代表的颗粒料时,撒料倾角为 53.59°、转轴转速为 45.91 r/min 时布料效果最优,颗粒分布离散率为 2.44%;物料类型为以大豆低温粕为代表的粕粉料时,撒料倾角为 49.02°、转轴转速为 46.45 r/min 时布料效果最优,颗粒分布离散率为 2.99%。实际工程应用结果表明,大豆颗粒布料总体均匀,冷却情况较好。综上,基于 EDEM 对翻板冷却器布料器的布料效果进行优化具有可行性和有效性。

关键词:翻板冷却器;布料器;离散元;EDEM;颗粒料;粕粉料

中图分类号:TS223;TS203

文献标识码:A

文章编码:1003-7969(2023)07-0143-06

Discrete element simulation optimization of the distribution effect of the distributor of the flap cooler based on EDEM

LI Geng¹, XUE Yanan¹, HUANG Yongna¹, SHEN Yan², ZHANG Jingming³,
LIN Fengyan², WANG Wei², ZHENG Feng²

(1. Shandong Chemsta Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jining 272000, Shandong, China; 2. Jining Machinery Design and Research Institute Co., Ltd., Jining 272000, Shandong, China; 3. School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: Flap cooler is a kind of vertical cooling equipment based on counter current cooling principle. To solve the problem of uneven distribution of materials in the flap cooler and better adapt to materials with multiple forms and shapes, based on EDEM, discrete element simulation was conducted on the distribution of the distributor of the flap cooler for granular materials represented by soybean particles and meal powder materials represented by soybean low-temperature meal. Through the method of regression analysis through central combination experiments, the distribution dispersion rate was used as the response value to optimize the inclination angle (referred to as the inclination angle between the sprinkling tray and the lead hammer surface), as well as the rotational speed of the shaft. The optimization results were applied to the distributor of the flap cooler in the cooling section of the quarantine soybean inactivation process. The results showed that when the material type was represented

收稿日期:2022-12-06;修回日期:2023-04-21

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)
(2021CXGC010808)

作者简介:李庚(1990),男,工程师,硕士,主要从事油脂
工程技术装备的研发设计(E-mail)287908708@qq.com。

by soybean particles, the optimal distribution effect was achieved when the inclination angle was 53.59° and the rotational speed of the shaft was 45.91 r/min, with a distribution dispersion rate of 2.44%; when the material type was

represented by soybean low-temperature meal, the optimal distribution effect was achieved when the inclination angle was 49.02° and the rotational speed was 46.45 r/min, with a distribution dispersion rate of 2.99%. The actual engineering application results showed that the soybean particle distribution was generally uniform and had good cooling performance. In summary, it is feasible and effective to optimize the distribution effect of the distributor for the flap cooler based on EDEM.

Key words: flap cooler; distributor; discrete element; EDEM; granular materials; meal powder materials

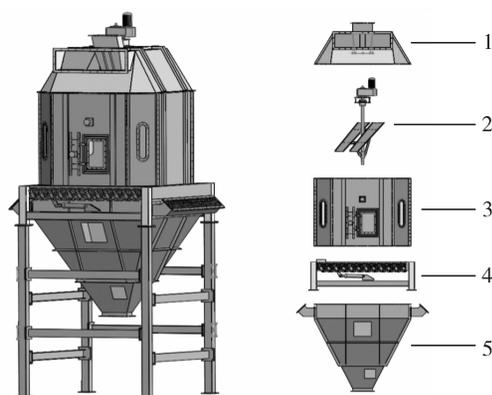
翻板冷却器是一种采用逆流冷却原理的立式冷却设备,它综合了卧式冷却器和立式冷却器的特点,取长补短,具有外形简洁美观、出料流畅均匀、冷却均匀、动力消耗低、物料普适性强等特点,被广泛应用于粮油、饲料加工行业,是目前国际上主流的冷却设备^[1-2]。然而,随着翻板冷却器在大豆低温粕脱溶、膨化大豆加工、粮食无害化处理等诸多领域中应用的推广^[3],所处理物料形态、性状各不相同,出现了布料器布料不均的现象。针对该问题,为了更好地适应诸如颗粒料、膨化料、压片料、粕粉料等多形态、多物状的多元化市场需求,需要对翻板冷却器布料器进行优化设计。

闫宏^[4]对四面锥式、旋转布料式两种结构的布料器进行了原理性分析;项文娟^[5]对旋转布料式布料器进行了静力学分析。但是,上述研究并未涉及物料在布料器作用下的布料情况以及针对不同类型物料的布料情况。EDEM 是世界上首款基于离散元技术,专门用于解决工程领域中颗粒系统仿真和分析的颗粒力学仿真软件,借助于 EDEM 软件,可以简便快捷地建立颗粒系统的参数化模型,研究和探索颗粒的力学性质、物料性质及其他物理特性,控制和管理每个颗粒的信息(如质量、温度和速度等)以及作用在其上的力。EDEM 所提供的强大处理功能,不仅可以模拟散状物料加工处理过程中颗粒体系的运动过程与特征,同时还可协助科研人员进行理论研究和分析,以及对各类离散料的处理设备的设计测试和优化。因此,EDEM 被越来越广泛地应用于涉及颗粒系统的各个领域^[6]。由于翻板冷却器布料过程中物料颗粒群属于散粒体,故本研究基于 EDEM 软件,通过调整撒料盘与铅锤面的倾斜夹角(简称“撒料倾角”)和转轴转速这两个影响布料效果的主要因素,运用中心组合试验回归分析方法对翻板冷却器布料器在以大豆颗粒为代表的颗粒料和以大豆低温粕为代表的粕粉料这两大类物料时的布料情况进行了离散元仿真试验分析,优化翻板冷却器

布料器的布料效果,为提升翻板冷却器布料的物料冷却效果提供理论依据。

1 翻板冷却器布料器结构特点及工作原理

翻板冷却器采用立式总体布局,由上向下依次由上壳体、冷却仓、翻板组装、出料斗等组成,冷却仓内设有布料器,见图 1。



注:1. 上壳体;2. 布料器;3. 冷却仓;4. 翻板组装;5. 出料斗

图 1 翻板冷却器结构部件示意图

翻板冷却器冷却原理见图 2。如图 2 所示,待冷却物料通过前置闭风进料装置,经上壳体导料口进入冷却仓上部,流入布料器撒料盘内,撒料盘随电机驱动下的转轴不停转动,将物料均匀撒在冷却仓内,平铺在平行排列的多列翻板上,形成一定高度的料层。翻板冷却器工作时,冷风从出料斗上部进风口进入,自下而上穿过料层将物料热量带出,最后从料层顶部出风口排出。料层上部的热物料遇到的是热风,下部的冷物料遇到的是冷风,物料冷却效率高,物料在下行过程中得到均匀和充分的冷却,使得产品质量得到保证。

冷却过程中,若物料分布不均则会出现仓内高低料层的情况。高料层部分存在冷风吹不透、上部物料得不到合理冷却的情况;低料层部分存在冷风不通过料层直接短路的情况。因此,物料在冷却仓内的均匀分布程度直接影响其在翻板冷却器内的冷却效果。

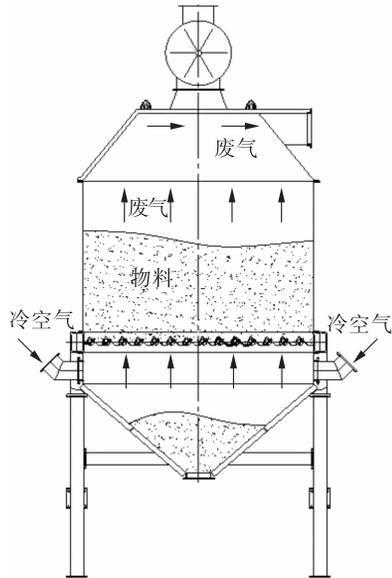


图2 翻板冷却器冷却原理

2 翻板冷却器布料运动模型的 EDEM 仿真与中心组合试验

2.1 翻板冷却器布料运动模型的 EDEM 仿真

2.1.1 离散元全局变量参数设置

接触模型是离散元仿真分析的基础, EDEM 常用的接触模型有 Hertz - Mindlin 无滑动模型、Hertz - Mindlin 黏结接触模型、线性黏附接触模型、运动表面接触模型、线弹性接触模型和摩擦电荷接触模型等, 针对不同类型仿真对象, 需要建立不同的接触模型^[7-9]。本研究主要探讨以大豆颗粒为代表的颗粒料和以大豆低温粕为代表的粕粉料这两大类物料, 其中: 大豆颗粒为带有外皮包裹的近球状颗粒, 因为有光滑外皮包裹, 物料之间相互作用的黏性力可忽略, 结合翻板冷却器布料器布料运动规律, 本仿真选择 Hertz - Mindlin 无滑动模型; 大豆低温粕主要为细微粉状颗粒及少量微小薄片颗粒混合物料形

态, 本文中主要探讨细微粉状颗粒的情况, 其相互作用时存在黏性力、碰撞力等, 结合翻板冷却器布料运动规律, 本仿真选择 Hertz - Mindlin 黏结接触模型。

通过查阅相关文献资料和试验测定^[10,11-16] 设置大豆颗粒、大豆低温粕粉和翻板冷却器布料器等仿真对象的材料属性和接触参数, 如表 1 和表 2 所示。其中大豆颗粒泊松比参考美国农业工程师协会标准取 0.40, 翻板冷却器布料器选取油脂机械中常用的碳钢(Q235 - B) 材质。

表 1 仿真对象的材料属性

材料	密度/(kg/m ³)	剪切模量/MPa	泊松比
大豆颗粒	1 290.00	63.00	0.40
大豆低温粕	1 860.00	52.00	0.32
碳钢(Q235 - B)	7 850.00	82 000.00	0.30

表 2 仿真对象的接触参数

接触对	碰撞恢复系数	最大静摩擦系数	滚动摩擦系数
大豆颗粒 - 大豆颗粒	0.30	0.39	0.17
大豆颗粒 - 碳钢(Q235 - B)	0.52	0.15	0.09
大豆低温粕 - 大豆低温粕	0.35	0.50	0.15
大豆低温粕 - 碳钢(Q235 - B)	0.50	0.20	0.12

2.1.2 仿真模型的建立

2.1.2.1 翻板冷却器布料器仿真模型的建立

通过工程实践应用和闫宏^[4]、项文娟^[5]等的研究可知, 翻板冷却器布料器撒料倾角和转轴转速是影响其布料效果的主要参数。通过调节带动转轴转动的变频电机频率可以实现转轴转速的调整, 经优化设计撒料倾角可调节的布料器结构, 布料器由撒料盘、转轴、连接杆和定位套等零件组成, 利用三维建模软件创建其实体仿真模型, 结果见图 3。

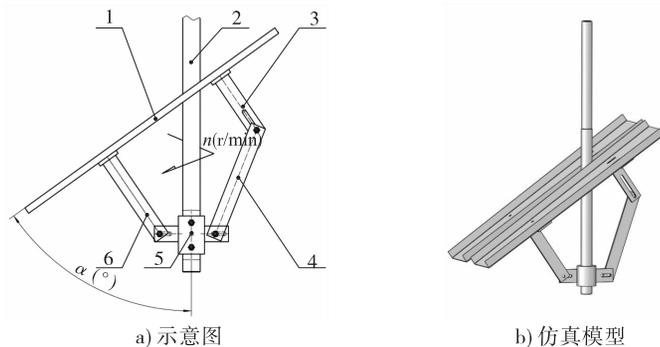


图3 布料器结构零部件示意图及三维实体仿真模型

2.1.2.2 颗粒模型的建立

针对以大豆颗粒为代表的颗粒料, 王扬等^[10] 研究发现, 大豆颗粒形状与椭球形相似度较高, 大豆颗

粒建模时可简化成椭球形; 于建群等^[17] 发明了一种大豆颗粒几何建模方法, 得出了大豆颗粒球形率与填充球模型数量的变化规律。综合上述研究成果并

联系工程应用中大豆颗粒的实际性状,本文采用5球充填大豆颗粒模型作为颗粒料的代表仿真模型,具体见图4。大豆低温粕形状以细粉和细小不规则片状为主,目前国内针对大豆低温粕的参数标定研究较少^[12],但存在与其类似的小麦粉离散元参数标定研究^[18],经过实物测量对比,大豆低温粕粉与小麦粉在物理性状上存在较高的相似性,故本文中引用小麦粉的离散元参数标定方法近似代替大豆低温粕的相关离散元分析参数。为了进一步简化分析模型,提高仿真效率,本文中将大豆低温粕模型统一为直径0.25 mm(60目)的单球形模型。

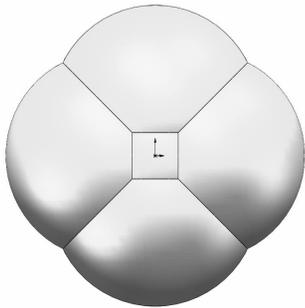


图4 大豆颗粒模型

2.1.3 颗粒工厂的设置

创建虚拟生成区域即颗粒工厂,虚拟工厂按照翻板冷却器上壳体导料口的截面面积大小和位置高度,其形状为矩形,设定虚拟平面中心坐标为($X=300\text{ mm}$, $Y=0\text{ mm}$, $Z=2\ 360\text{ mm}$),长边为350 mm,短边为310 mm。

对于以大豆颗粒为代表的颗粒料,设置颗粒为动态随机生成方式,颗粒数量根据工程实际日产量倒推计算求得,设定颗粒生成速度为4 500粒/s,生成颗粒总数为90 000粒。实际工程应用中,翻板冷却器进料方式为关风器进料,为尽量真实地模拟颗粒从关风器叶轮进入翻板冷却器导料口的实际进料情况,需考虑关风器叶轮对大豆颗粒作用的加速度和重力加速度的影响,通过计算前述两加速度在大豆颗粒从关风器进料至翻板冷却器导料口最下端(本次模拟的初始基准面)运动过程中的作用,设置本模拟中大豆颗粒向下的初始速度为0.7 m/s。

对于以大豆低温粕为代表的粕粉料,设置颗粒为动态随机生成方式,颗粒数量根据工程实际日产量倒推计算求得,设定颗粒生成速度为6 000粒/s,生成颗粒总数为90 000粒。同前述颗粒料的模拟情况,通过计算关风器叶轮作用加速度和重力加速度在粕粉颗粒从关风器进料至翻板冷却器导料口最下端(本次模拟的初始基准面)运动过程中的

作用,设置本模拟中大豆低温粕粉颗粒向下的初始速度为0.6 m/s。

2.1.4 仿真试验预模拟

为方便考察仿真试验中翻板冷却器布料效果,以冷却仓模型底部平面中心为原点建立平面直角坐标系,将冷却仓底部平面分为4个象限,定义仿真试验中颗粒分布数量最多象限的颗粒总数与颗粒分布数量最少象限的颗粒总数的差值与仿真试验中颗粒总数的比值为本次仿真试验颗粒分布离散率(η),分布离散率越大表示翻板冷却器布料器布料效果越差,反之分布离散率越小则翻板冷却器布料器布料效果越好。

通过预模拟发现,不论是以大豆颗粒为代表的颗粒料还是以大豆低温粕为代表的粕粉料,当翻板冷却器布料器转轴转速过低时物料颗粒主要集中在冷却仓中部,而当翻板冷却器布料器转轴转速过高时物料颗粒大部分洒落在冷却仓内壁,布料效果均不理想。选取模拟试验中翻板冷却器布料器转轴转速取值范围为33~47 r/min,此时物料颗粒在冷却仓内洒落较为均匀,布料效果较优。同时发现,当翻板冷却器撒料倾角过大时物料颗粒的流动性较差,翻板冷却器的布料情况存在不确定性,反之,当翻板冷却器撒料倾角过小时物料颗粒无法全面地洒落到整个冷却仓内,布料效果均不理想。结合预模拟结果和工程应用实际,选取模拟试验中翻板冷却器布料器撒料倾角取值范围为43°~57°。

2.2 中心组合试验优化

2.2.1 中心组合试验设计与结果

在预试验的基础上,以转轴转速(A)和撒料倾角(B)为考察因素,以颗粒分布离散率(η)为响应值进行二因素五水平的中心组合试验,中心组合试验因素与水平如表3所示。

表3 中心组合试验因素与水平

水平	A 转轴转速/(r/min)	B 撒料倾角/(°)
-1.414	35	45
-1	36.5	46.5
0	40	50
1	43.5	53.5
1.414	45	55

中心组合试验设计与结果见表4。按表4中心组合试验设计将转轴转速和撒料倾角两因素各水平下的参数输入 EDEM 软件中,分别进行离散元仿真,模拟上述两类物料颗粒在翻板冷却器布料器中的布料情况,得到颗粒分布离散率(见表4)。

表4 中心组合试验设计与结果

试验号	A	B	颗粒分布离散率/%	
			大豆颗粒	大豆低温粕
1	-1.414	-1.414	5.7	5.0
2	-1.414	-1	5.4	5.2
3	-1.414	0	4.3	5.5
4	-1.414	1	3.8	5.9
5	-1.414	1.414	3.4	6.1
6	-1	-1.414	5.4	4.6
7	-1	-1	5.0	4.9
8	-1	0	4.1	5.2
9	-1	1	3.6	5.6
10	-1	1.414	3.2	5.8
11	0	-1.414	4.9	4.1
12	0	-1	4.6	4.3
13	0	0	3.7	4.6
14	0	1	3.1	5.0
15	0	1.414	2.8	5.2
16	1	-1.414	4.4	3.2
17	1	-1	4.0	3.5
18	1	0	3.1	3.9
19	1	1	2.5	4.3
20	1	1.414	2.1	4.5
21	1.414	-1.414	4.1	2.6
22	1.414	-1	3.8	2.9
23	1.414	0	2.9	3.4
24	1.414	1	2.2	3.9
25	1.414	1.414	1.8	4.2

2.2.2 回归分析与验证

运用 Design - Expert 13.0 软件中的 Central Composite Design 中心组合试验回归分析功能单元,分别完成颗粒料和粕粉料两种类型物料以颗粒分布离散率为响应值的回归分析,方差分析结果分别见表5和表6。

由表5和表6可知,大豆颗粒和大豆低温粕的试验模型均极显著($p < 0.01$),失拟项均不显著($p > 0.05$),说明两类物料颗粒的回归模型均成立。对于大豆颗粒, R^2 为0.9951, R^2_{Adj} 为0.9915,对于大豆低温粕, R^2 为0.9881, R^2_{Adj} 为0.9797,两种物料模型的 R^2 和 R^2_{Adj} 均较高且接近,说明两种物料模型均具有较高的准确性和通用性。对于大豆颗粒,变异系数为1.99%,对于大豆低温粕,变异系数为2.08%,均小于10.00%,说明两种物料的回归方程预测性良好,均可以用来预测颗粒分布离散率。

对表4数据进行处理,分别得到以大豆颗粒为代表的颗粒料颗粒分布离散率(η_1)为响应值的回归方程($\eta_1 = 3.28 - 0.51A - 0.73B - 0.03AB + 0.17A^2 + 0.30B^2$)和以大豆低温粕为代表的粕粉料颗粒分布离散率(η_2)为响应值的回归方程($\eta_2 = 4.56 - 0.71A + 0.38B + 0.03AB - 0.05A^2 + 0.05B^2$)。

表5 方差分析(大豆颗粒)

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	7.13	5	1.43	281.96	<0.0001	极显著
A	2.08	1	2.08	411.29	<0.0001	极显著
B	4.31	1	4.31	851.34	<0.0001	极显著
AB	0.0025	1	0.0025	0.49	0.5048	不显著
A ²	0.2070	1	0.2070	40.92	0.0004	极显著
B ²	0.6157	1	0.6157	121.70	<0.0001	极显著
残差	0.0354	7	0.0051			
失拟项	0.0074	3	0.0025	0.35	0.7906	不显著
纯误差	0.0280	4	0.0070			
总和	7.17	12				

表6 方差分析(大豆低温粕)

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	5.23	5	1.05	116.66	<0.0001	极显著
A	4.02	1	4.02	448.34	<0.0001	极显著
B	1.17	1	1.17	130.22	<0.0001	极显著
AB	0.0025	1	0.0025	0.28	0.6137	不显著
A ²	0.0165	1	0.0165	1.84	0.2166	不显著
B ²	0.0183	1	0.0183	2.04	0.1964	不显著
残差	0.0627	7	0.0090			
失拟项	0.0107	3	0.0036	0.28	0.8411	不显著
纯误差	0.0520	4	0.0130			
总和	5.29	12				

通过 Design - Expert 13.0 软件进行参数优化组合,大豆颗粒模型的最佳条件为转轴转速 45.91 r/min 和撒料倾角 53.59°,在此条件下颗粒分布离散率为 2.43%;大豆低温粕模型的最佳条件为转轴转速 46.45 r/min 和撒料倾角 49.02°,在此条件下颗粒分布离散率为 2.99%。

将上述所求得颗粒料和粕粉料的最优颗粒分布离散率时的最佳转轴转速和撒料倾角值分别再次重复进行 3 次离散元模拟仿真试验,颗粒料 3 次重复仿真试验所得颗粒分布离散率分别为 2.44%、2.45% 和 2.43%,平均值为 2.44%,而粕粉料 3 次重复仿真试验所得颗粒分布离散率分别为 3.00%、2.97% 和 3.01%,平均值为 2.99%。通过重复试验,进一步验证了上述回归分析方程的准确性。

2.3 仿真成果在工程中的应用

检疫性大豆灭活工艺冷却工段中,翻板冷却器被用于大豆颗粒的冷却,将本仿真中翻板冷却器布料效果最佳条件时的转轴转速、撒料倾角等主要设计参数应用于优化设计。在实际工程应用中发现,大豆颗粒在翻板冷却器布料器作用下布料总体均匀,冷却效果良好。优化设计后翻板冷却器布料器实物和使用效果见图 5。

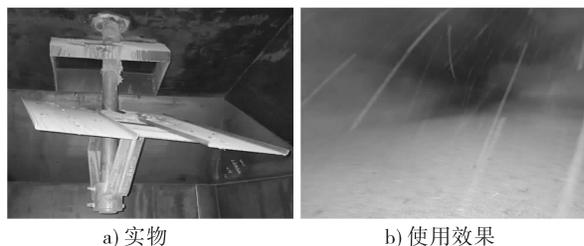


图 5 检疫性大豆灭活工艺用翻板冷却器布料器实物和使用效果

3 结论

通过离散元仿真中心组合试验发现:当物料类型为以大豆颗粒为代表的颗粒料时,翻板冷却器撒料倾角为 53.59°、转轴转速为 45.91 r/min 时布料效果最优,颗粒分布离散率为 2.44%;当物料类型为以大豆低温粕为代表的粕粉料时,翻板冷却器撒料倾角为 49.02°、转轴转速为 46.45 r/min 时布料效果最优,颗粒分布离散率为 2.99%。按仿真优化结果对翻板冷却器布料器参数进行优化设计并应用于工程实际,发现物料实际布料情况基本均匀。基于 EDEM 对翻板冷却器布料器的布料效果进行优化具有可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 曹康. 逆流冷却器的工作原理及应用[J]. 饲料工业, 1996, 17(5): 3-5.
- [2] 吴超超. 逆流冷却器结构、工艺和品控系统的新进展[J]. 内燃机与配件, 2018(7): 128-129.
- [3] 申燕, 吴畏, 杨爱国, 等. 翻板冷却器在大豆低温粕脱溶技术装备中的应用[J]. 中国油脂, 2018, 43(1): 158-160.
- [4] 阎宏. 逆流冷却器中撒料器撒料不均匀原因分析[J]. 中国油脂, 2011, 36(1): 71-72.
- [5] 项文娟. 饲料逆流冷却器结构优化及冷却模型分析[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
- [6] 孟杰, 孟文俊. 影响 EDEM 仿真结果的因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 49-51.
- [7] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真: 离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- [8] FAVIER J F, ABBASPOUR - FARD M H, KREMMER M, et al. Shape representation of axi - sym - metrical, non - spherical particles in discrete element simulation using multi - element model particles [J]. Eng Comput, 1999, 16: 467 - 480.
- [9] 成浩, 韩培锋, 苏有文, 等. 基于离散元方法的松散体滑动堆积特性及影响因素分析[J]. 物理学报, 2020, 69(16): 159-174.
- [10] 王扬, 吕凤妍, 徐天月, 等. 大豆颗粒形状和尺寸分析及建模[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(2): 507-517.
- [11] 陈凯凯. 散料离散元参数标定方法研究及应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [12] 李文苑, 幸福堂. 粉体颗粒的流动性模型研究现状[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(1): 53-55.
- [13] 顿国强, 杨永振, 郭艳玲, 等. 不同品种大豆种子充填特性的 EDEM 仿真分析[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(1): 93-98.
- [14] 程绪铎, 陆琳琳, 石翠霞, 等. 大豆内摩擦角的测定与实验研究[J]. 粮食储藏, 2010, 39(5): 12-15.
- [15] 冯家畅, 程绪铎, 严晓婕, 等. 大豆与仓壁材料摩擦系数的研究[J]. 大豆科学, 2014, 33(5): 787-789, 794.
- [16] 孙素杰, 尹福兰, 张基因, 等. 大豆种子颗粒物理性质对其运动的影响研究[J]. 农机化研究, 2015(5): 49-53.
- [17] 于建群, 闫东旭, 于亚军, 等. 一种大豆籽粒几何建模方法: CN201910737491.0[P]. 2019-11-15.
- [18] 李永祥, 李飞翔, 徐雪萌, 等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327.