

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.013

玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定

王伟^{1,2} 蔡丹艳¹ 谢进杰¹ 张春岭^{1,2} 刘立超^{1,2} 陈黎卿^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036)

摘要: 为了提升秸秆粉料致密成型过程中离散元仿真所需参数的准确性,以玉米秸秆粉料为研究对象,利用 EDEM 软件中的 Hertz - Mindlin with JKR 粘结接触模型进行玉米秸秆粉料致密成型离散元仿真模型参数标定研究。首先,以接触参数的物理试验结果作为仿真参数选择依据,应用 Plackett - Burman 试验对初始参数进行筛选,方差分析结果表明,玉米秸秆粉料间滚动摩擦因数、粉料与不锈钢板间静摩擦因数以及 JKR 表面能对堆积角影响显著;其次,以堆积角为评价指标,应用 Box - Behnken 试验建立了堆积角与 3 个显著性参数的二次多项式回归模型,以物理试验得到的实际堆积角 42.60° 为目标值,对显著性参数进行寻优,得到最优组合为:秸秆粉料-粉料滚动摩擦因数为 0.05、秸秆粉料-不锈钢板静摩擦因数为 0.47、JKR 表面能为 0.05 J/m²;最后,在标定的参数下进行堆积角和模孔压缩试验对比,结果表明,仿真堆积角与实测堆积角相对误差为 0.68%,仿真与实际试验压缩位移相对误差为 0.98%,通过对比分析两次试验中秸秆粉料模孔压缩位移变化曲线的拟合情况,得出两曲线间的决定系数 R² 为 0.9627,说明所得相关参数可用于秸秆粉料致密成型离散元仿真。

关键词: 玉米秸秆粉料;致密成型;堆积角;离散元;参数标定

中图分类号: S216.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)03-0127-08

OSID:



Parameters Calibration of Discrete Element Model for Corn Stalk Powder Compression Simulation

WANG Weiwei^{1,2} CAI Danyan¹ XIE Jinjie¹ ZHANG Chunling^{1,2} LIU Lichao^{1,2} CHEN Liqing^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the parameters needed in the discrete element simulation process of the corn stalk powder, the Hertz - Mindlin with JKR Bonding contact model in EDEM software was used to calibrate the contact parameters of the discrete element model of corn stalk powder. Firstly, the physical test results of contact parameters were used as the basis for the selection of simulation parameters. Plackett - Burman test was used to screen the initial parameters. The results of variance analysis showed that the rolling friction coefficient between corn stalk powder, static friction coefficient between powder and stainless steel plate and surface energy JKR had significant effects on accumulation angle. Secondly, taking the relative error of accumulation angle as the evaluation index, the quadratic polynomial regression model of accumulation angle and three significant parameters was established by Box - Behnken test. Taking the measured accumulation angle of 42.60° obtained by physical experiment as the target value, the significance parameters were optimized, and the optimal combination was obtained as follows: corn stalk powder - corn stalk powder rolling friction coefficient was 0.05, corn stalk powder - stainless steel plate static friction coefficient was 0.47, and surface energy was 0.05 J/m². Finally, the accumulation angle and die hole compression test were compared under the calibrated parameters. The results showed that the relative error of simulation accumulation angle and measured accumulation angle was 0.68%, and the relative error of simulation compression displacement and measured compression displacement was 0.98%. By comparing and analyzing the fitting of the change

收稿日期: 2020-11-18 修回日期: 2020-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005008)、安徽省科技重大专项(202003a06020013)和安徽省重点研发与开发计划项目(202004a06020058)

作者简介: 王伟(1989—),男,讲师,博士,主要从事保护性耕作与智能农机装备研究,E-mail: wangww0618@163.com

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqChen@ahau.edu.cn

curve of the compression displacement of the corn stalk powder in the mold hole in the two tests, the coefficient of determination between the two curves was 0.962 7. The parameters obtained from the calibration can be used for DEM simulation of corn stalk powder mold hole densification.

Key words: corn stalk powder; dense forming; accumulation angle; DEM; parameter calibration

0 引言

农作物秸秆资源化利用是秸秆价值链开发利用的重要方式之一^[1]。将秸秆致密成型为生物质颗粒燃料,不但节省非可再生资源、缓解能源供应紧缺状况,而且减少秸秆焚烧对环境造成的危害^[2-3]。因此秸秆致密成型生物质颗粒燃料具有广阔的市场前景。

农作物秸秆粉料致密成型过程即为揉碎的纤维颗粒相互挤压、破裂、剪切填充的过程,从而使木质素软化、塑化、硬化成生物质颗粒^[4]。国内外学者围绕农作物秸秆力学特性、生物质致密成型机理、成型工艺参数优化等方面进行了相关研究。MAZOR等^[5]基于离散元和有限元相结合的方法,通过分析粉末在给料区和压实区的运行状态,得出粉料密度参数的变化曲线;ALIZADEH等^[6]提出了一种粘性粉末混合物分离模拟仿真参数标定方法;孙启新等^[7]基于木质素本构特征探讨了纤维颗粒的黏结力对秸秆塑性成型过程的影响;李永奎等^[8]基于软球模型的秸秆粉料颗粒研究了玉米秸秆在单向受压状态下的力学行为;冯俊小等^[9]定量分析了采用实验法和离散元法的滚筒内秸秆粉料颗粒的混合状态;文献[10-13]针对不同类型秸秆粉料进行了生物质环模致密成型机模孔结构和工艺参数的优化设计。综上所述,研究生物质颗粒机环模与压辊相互作用下挤压力对秸秆粉料的作用过程,有助于合理选取致密成型工艺参数;离散元法广泛应用于土壤、粉末等颗粒物料压缩试验中^[14-17],为分析秸秆粉料致密成型过程的力学行为提供了有效手段。

农作物秸秆粉料在致密成型过程中属于典型的粘弹性纤维散体物料,其物料特性与已有研究物料接触参数差异较大,相关研究较少,且缺乏物料参考。本文以玉米秸秆粉料样品为研究对象,选取 EDEM 软件中“Hertz - Mindlin with JKR Cohesion”接触模型,通过秸秆粉料堆积角和模孔压缩仿真对比试验,标定玉米秸秆粉料离散元模型的接触参数,以期为玉米秸秆粉料的致密成型离散元模拟提供基础性参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 材料成分测定

试验选用安徽农业大学皖北试验站(116°97'E,

33°63'N)收获后的玉米秸秆,将其粉碎过筛,称取自然风干的玉米秸秆粉料 0.3 ~ 0.5 g,通过醋酸、丙酮等试剂处理后离心振荡,沉淀洗涤后测定玉米秸秆粉料精细化研磨成分(木质素、纤维素、半纤维素、果胶等);加热情况下用醋酸、硝酸混合液处理,水洗去杂,测定试验材料纤维素和半纤维素约占 72%,木质素占 18% ~ 25%。

1.1.2 堆积角测定

通过秸秆粉碎机将秸秆样品粉碎成细小颗粒,选用 14、20 目网筛筛选出粒径范围 1 ~ 1.4 mm 的秸秆粉料颗粒为堆积角试验材料。参照文献[18-21]采用注入法测量玉米秸秆粉料的堆积角,如图 1 所示,漏斗出料口直径 10 mm,锥度为 60°不锈钢圆形底盘直径 90 mm,漏斗下端口距不锈钢圆形底盘上表面 80 mm。测量时将所制备的玉米秸秆粉料缓慢倒入漏斗中,使用玻璃搅拌棒轻微搅动,防止粉料堵塞漏斗出料口。在不锈钢圆盘堆积一定数量的粉料后,停止向漏斗中添加秸秆粉料,待粉料堆积高度不再发生变化时,用相机拍摄玉米秸秆粉料堆正视图,采用 Matlab 软件中的图像数字化工具进行处理,试验重复 10 次取平均值,得到堆积角平均值为 42.60°。

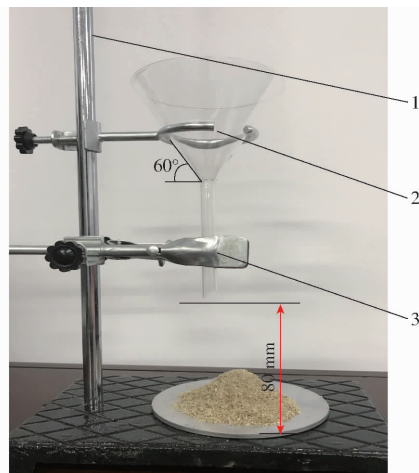


图 1 堆积角测定仪

Fig. 1 Stacking angle tester

1. 铁架台 2. 漏斗 3. 夹子

1.2 仿真模型

1.2.1 接触模型选取

玉米秸秆粉料致密成型过程颗粒间存在粘附现象,常用的 Hertz - Mindlin 接触模型仅考虑弹性变形,不考虑颗粒模型间的粘结力,难以准确模拟秸秆

粉料的作业情况^[22-23]; Hertz - Mindlin with Bonding 常用于模拟破碎、断裂等问题,采用小颗粒粘结成大块物料,外力作用下颗粒间粘结力会产生破碎及断裂效果,该接触模型虽然可用来模拟粘结颗粒,但该模型仅局限于有限大小的“胶粘剂”粘结,适用于模拟混凝土和岩石等较坚硬介质^[24-25];而 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 接触模型是一种建立在 Hertz 理论上的粘结性颗粒接触模型,考虑到湿润颗粒间粘结力对颗粒运动的影响,适用于模拟颗粒间因静电、水分等原因发生明显粘结和团聚的物料,如黏泥土等^[26]。玉米秸秆粉料中含有木质素,致密成型过程由于内摩擦力的作用产生热量,温度上升会造成木质素的软化,为纤维颗粒的团聚提供粘结力。因此选用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 接触模型对玉米秸秆粉料进行离散元参数标定。其 JKR 粘结简化模型如图 2 所示,模型中的法向弹性力可较好地表征颗粒间的粘弹性特征,其法向弹性力基于法向重叠量和表面能,即

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*} \alpha^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \quad (2)$$

其中

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - U_1^2}{E_1} + \frac{1 - U_2^2}{E_2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

式中 F_{JKR} ——JKR 法向弹性力, N

α ——两接触颗粒之间法向重叠量, m

δ ——两接触颗粒之间切向重叠量, m

γ ——表面能, J/m²

E^* ——等效弹性模量, Pa

R^* ——等效接触半径, m

E_1, E_2 ——接触颗粒弹性模量, Pa

U_1, U_2 ——接触颗粒泊松比

R_1, R_2 ——接触颗粒接触半径, m

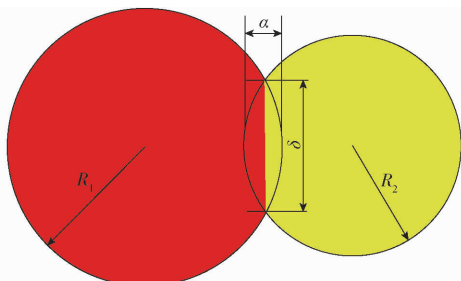


图 2 JKR 粘结模型示意图

Fig. 2 Schematic of JKR bonding model

当表面能 $\gamma = 0$ 时, JKR 法向弹性力变为 Hertz - Mindlin 法向力, 为

$$F_{JKR} = F_{Hertz} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

即使颗粒并不是直接接触, JKR 接触模型也提供吸引凝聚力, 颗粒间具有凝聚力的法向、切向最大间隙为

$$\alpha_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2E^*} - \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\delta_c = \frac{\alpha_c^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha_c}{E^*}} \quad (7)$$

式中 α_c ——颗粒间非零凝聚力时法向最大间隙, m

δ_c ——颗粒间非零凝聚力时切向最大间隙, m

当颗粒并非实际接触并间隔小于 δ_c , 此时 JKR 凝聚力达到最大值, 即

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2} \pi\gamma R^* \quad (8)$$

1.2.2 仿真参数选取

结合国内外文献对粉体颗粒与不锈钢板离散元仿真参数的设置^[27], 本研究中各仿真参数如表 1 所示。模拟所需玉米秸秆粉料本征参数设定为: 密度 390 kg/m³、泊松比 0.3、剪切模量 2.5×10^7 Pa, 不锈钢板密度为 7 850 kg/m³、泊松比为 0.3、剪切模量为 7×10^{10} Pa。颗粒生成方式为 Dynamic, 生成速率设为 5 000 个/s, 生成数量设为 25 000, 仿真时间设为 6.0 s, 时间步长为 0.01 s, 网格尺寸为 3.0R, 颗粒粒径 d 为 1.2 mm, 由于模拟条件及时间限制, 仿真采用球形颗粒。颗粒模型粒径变化范围设置为满足平均值、标准差为 0.1 mm 的标准正态分布, 得到玉米秸秆粉料颗粒的离散元简化模型。为了确保粉料颗粒快速稳定, 设定颗粒以重力加速度自由落体从

表 1 玉米秸秆粉料颗粒堆积角仿真参数

Tab. 1 Parameters of angle of repose simulation model for corn stalk powder particles

参数	数值
玉米秸秆粉料密度/(kg·m ⁻³)	390 ^a
玉米秸秆粉料泊松比	0.20 ~ 0.27 ^a
玉米秸秆粉料剪切模量/Pa	$2.4 \times 10^7 \sim 3.5 \times 10^7$ ^a
不锈钢板密度/(kg·m ⁻³)	7 850 ^b
不锈钢板泊松比	0.3 ^b
不锈钢板剪切模量/Pa	7×10^{10} ^b
粉料-粉料恢复系数 x_1	0.15 ~ 0.30 ^c
粉料-粉料静摩擦因数 x_2	0.4 ~ 0.8 ^c
粉料-粉料滚动摩擦因数 x_3	0.01 ~ 0.18 ^c
粉料-不锈钢板恢复系数 x_4	0.15 ~ 0.30 ^c
粉料-不锈钢板静摩擦因数 x_5	0.3 ~ 1.2 ^c
粉料-不锈钢板滚动摩擦因数 x_6	0.01 ~ 0.11 ^c
JKR 表面能 x_7 /(J·m ⁻²)	0.01 ~ 0.10 ^c

注: a 表示该项为物理试验测定, b 表示该项为查阅文献获得, c 表示该项为试验变量, 其范围为该变量取值的上下限。

圆柱底部流出,5.0 s 后形成一个稳定的颗粒堆,模型如图 3 所示。

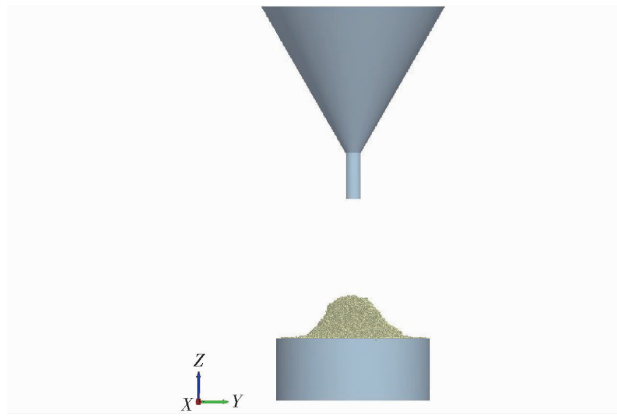


图 3 秸秆粉料堆积角仿真模型

Fig. 3 Simulation model of repose angle for stalk powder

1.3 参数标定试验设计

Plackett - Burman 试验是基于目标响应与各因素间关系,比较每个因素两水平间的差异来确定因素显著性。本文以玉米秸秆粉料堆积角为响应值,对仿真接触参数的显著性进行筛选。低水平设定为最初原始水平,高水平设为低水平 2 倍,试验参数如表 2 所示。

表 2 Plackett - Burman 试验参数

Tab. 2 Test parameters of Plackett - Burman

因素	低水平(-1)	高水平(1)
粉料-粉料恢复系数 x_1	0.15	0.30
粉料-粉料静摩擦因数 x_2	0.40	0.80
粉料-粉料滚动摩擦因数 x_3	0.01	0.02
粉料-不锈钢板恢复系数 x_4	0.15	0.30
粉料-不锈钢板静摩擦因数 x_5	0.30	0.60
粉料-不锈钢板滚动摩擦因数 x_6	0.01	0.02
JKR 表面能 $x_7/(J \cdot m^{-2})$	0.01	0.02

2 结果与分析

2.1 Plackett - Burman 试验因素显著性分析

Plackett - Burman 试验设计及结果如表 3 所示, $X_1 \sim X_7$ 为编码值,利用 Design-Expert 软件对该结果进行方差分析,得到各个接触参数显著性如表 4 所示。由表 4 可知,JKR 表面能、玉米秸秆粉料-粉料滚动摩擦因数 $P < 0.05$,对放大颗粒堆积角的影响极显著;玉米秸秆粉料-不锈钢板静摩擦因数 $0.05 < P < 0.1$,对放大颗粒的堆积角影响较为显著;而其余参数 $P > 0.1$,对放大颗粒的堆积角影响极小。为方便后续试验,在 Box - Behnken 试验中只考虑这 3 个影响显著性因素。其余参数结合文献[28]取值(粉料-粉料恢复系数 0.3、粉料-粉料静摩擦因数 0.6、粉料-不锈钢板恢复系数 0.3、粉料-不锈钢板

滚动摩擦因数 0.01)进行参数标定试验设计。

表 3 Plackett - Burman 试验设计及结果

Tab. 3 Design and results of Plackett - Burman test

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	堆积角 $\theta/(^\circ)$
1	1	1	1	-1	-1	-1	1	29.2
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	26.0
3	-1	1	-1	1	1	-1	1	29.8
4	1	1	-1	-1	-1	1	-1	22.8
5	1	1	-1	1	1	1	-1	24.9
6	1	-1	-1	-1	1	-1	1	29.9
7	-1	1	1	1	-1	-1	-1	25.8
8	1	-1	1	1	-1	1	1	31.5
9	-1	1	1	-1	1	1	1	33.3
10	1	-1	1	1	1	-1	-1	28.6
11	-1	-1	-1	1	-1	1	1	26.3
12	-1	-1	1	-1	1	1	-1	27.2

表 4 参数显著性分析

Tab. 4 Analysis of parameters of significance

参数	效应	均方和	F	P	显著性排序
x_1	-0.15	0.067	0.028	0.875	6
x_2	-0.52	0.800	0.330	0.594	4
x_3	2.75	22.690	9.440	0.037	2
x_4	-0.15	0.067	0.028	0.875	6
x_5	2.12	13.440	5.590	0.077	3
x_6	-0.45	0.610	0.250	0.642	5
x_7	4.22	53.340	22.190	0.009	1

2.2 Box - Behnken 试验及回归模型

应用 Box - Behnken 设计试验进行响应面分析并寻求最优解,以粉料-粉料滚动摩擦因数 x_3 、粉料-不锈钢板静摩擦因数 x_5 、JKR 表面能 x_7 为试验因素,堆积角 θ 为试验指标,选取表 5 各试验水平,共进行 17 组试验,试验方案及结果如表 6 所示。

表 5 Box - Behnken 试验因素编码

Tab. 5 Factors and codes of Box - Behnken test

编码	因素		
	粉料-粉料滚动摩擦因数 x_3	粉料-不锈钢板静摩擦因数 x_5	JKR 表面能 $x_7/(J \cdot m^{-2})$
-1	0.05	0.35	0.03
0	0.06	0.45	0.04
1	0.07	0.55	0.05

2.2.1 堆积角回归模型分析

应用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归拟合分析,可得堆积角 θ 的回归模型为

$$\theta = 41.23 - 1.12X_3 + 0.77X_5 - 1.92X_7 + 0.81X_3X_5 - 1.75X_3X_7 - 3.35X_5X_7 + 0.33X_3^2 + 1.85X_5^2 - 0.26X_7^2 \quad (9)$$

表 6 Box - Behnken 试验设计及结果

Tab.6 Design and results of Box - Behnken test

序号	X_3	X_5	X_7	堆积角 $\theta/(^\circ)$
1	1	0	1	36.14
2	0	0	0	41.06
3	0	1	1	39.26
4	1	-1	0	41.25
5	1	1	0	43.33
6	0	1	-1	49.02
7	0	-1	-1	39.68
8	-1	0	1	41.86
9	-1	0	-1	42.97
10	0	0	0	41.17
11	1	0	-1	44.25
12	0	0	0	41.26
13	0	-1	1	41.75
14	-1	1	0	43.95
15	-1	-1	0	45.12
16	0	0	0	41.38
17	0	0	0	41.26

Box - Behnken 试验模型方差分析结果如表 7 所示,分析可知,该拟合线性回归模型 $P < 0.01$,说明堆积角与所得回归方程关系极显著;其中粉料-粉料滚动摩擦因数 x_3 、JKR 表面能 x_7 、滚动摩擦因数-JKR 表面能 (x_3x_7)、静摩擦因数-JKR (x_5x_7) 以及静摩擦因数二次项 x_5^2 的 P 值均小于 0.01;粉料-不锈钢板的静摩擦因数 x_5 的 P 值小于 0.05,说明各个参数对堆积角的影响显著,表明了回归模型的有效性。决定系数 R^2 为 0.9704,校正决定系数 R^2_{adj} 为 0.9323,都趋近于 1,表明模型与实际试验拟合良好,试验误差小能够真实地反映实际情况;变异系数为 1.71%,表明试验具有较高可靠性,试验精确度 $A_p = 23.307$,说明模型具有良好的精确度。

表 7 Box - Behnken 二次回归模型方差分析

Tab.7 ANOVA of modified model of Box - Behnken

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	119.27	9	13.25	25.47	0.000 2
x_3	9.97	1	9.97	19.16	0.003 2
x_5	4.77	1	4.77	9.18	0.019 1
x_7	29.38	1	29.38	56.46	<0.000 1
x_3x_5	2.64	1	2.64	5.07	0.059 0
x_3x_7	12.25	1	12.25	23.54	0.001 9
x_5x_7	44.96	1	44.96	86.40	<0.000 1
x_3^2	0.47	1	0.47	0.91	0.373 0
x_5^2	14.44	1	14.44	27.76	0.001 2
x_7^2	0.27	1	0.27	0.53	0.490 9
残差	3.64	7	0.52		
纯误差	0.057	4	0.014		
总和	122.91	16			

$R^2 = 0.9704$ $R^2_{adj} = 0.9323$ $C_v = 1.71\%$ $A_p = 23.307$

2.2.2 回归模型交互效应分析

根据优化回归模型方差分析结果,可知滚动摩擦因数-JKR 表面能 (x_3x_7)、静摩擦因数-JKR 表面能 (x_5x_7) $P < 0.01$,表明对玉米秸秆粉料堆积角影响极显著。应用 Design-Expert 软件绘制滚动摩擦因数-JKR 表面能 (x_3x_7)、静摩擦因数-JKR 表面能 (x_5x_7) 交互作用的三维响应曲面,由图 4a 可知,粉料间滚动摩擦因数 x_3 与 JKR 表面能 x_7 的响应面曲线趋势基本相同,表明两个因素对堆积角影响显著度相似。如图 4b 可知,与粉料-不锈钢板静摩擦因数 x_5 方向上曲线比较,JKR 表面能 x_7 响应面曲线较陡,其等高线密度高于沿粉料-不锈钢板静摩擦因数 x_5 方向上的密度,表明 JKR 表面能 x_7 对堆积角影响较粉料-不锈钢板静摩擦因数 x_5 更为显著。

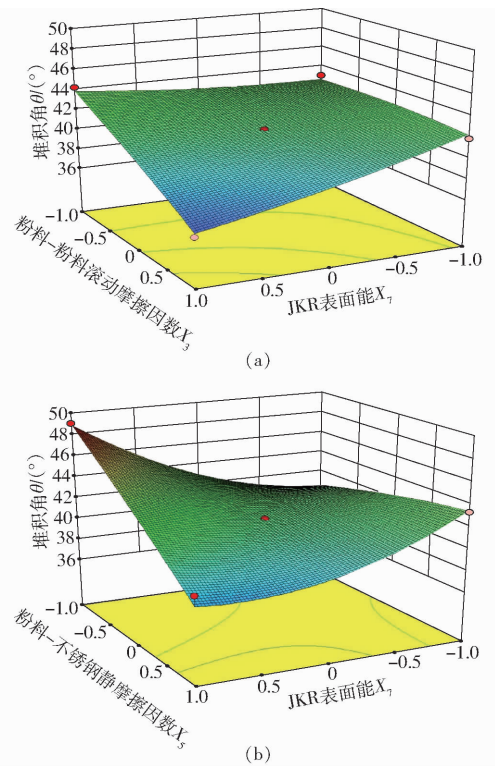


图 4 交互项响应面

Fig.4 Interaction response surface diagrams

3 参数优化与模型验证

3.1 堆积角验证试验

基于 Design-Expert 8.6 软件中的优化模块,以玉米秸秆粉料实际堆积角 42.60° 为目标值对堆积角的回归模型进行寻优,对得到的若干组解进行秸秆粉料堆积角仿真验证,得到与实际物理堆积角形状相近的一组最优解,即秸秆粉料-粉料滚动摩擦因数为 0.05,秸秆粉料-不锈钢板静摩擦因数为 0.47,JKR 表面能为 0.05 J/m^2 ;在 EDEM 2.6 软件中将 x_3 、 x_5 、 x_7 值设置为上述最优解,其余参数选取中间水

平,得到玉米秸秆粉料离散元模型,重复5次,其模型堆积角分别为 42.68° 、 42.92° 、 41.58° 、 43.16° 、 44.11° ,平均值为 42.89° 。与实际物理堆积角结果相对误差为0.68%,仿真结果与实际试验堆积角没有明显误差,试验对比如图5所示。

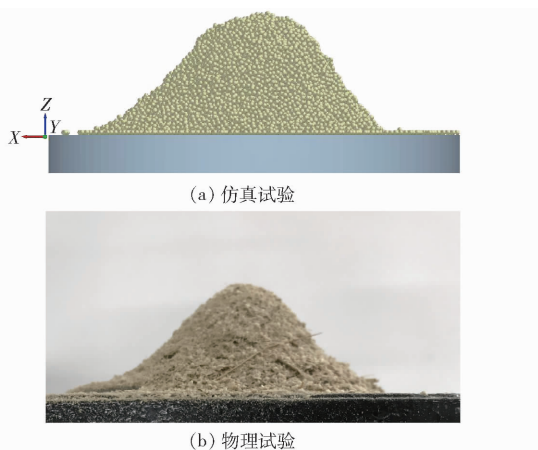


图5 物理试验与仿真试验对比

Fig.5 Comparison diagrams of actual test and simulation test

3.2 模孔压缩对比验证试验

为进一步验证离散元模型参数的准确性与合理性,设计玉米秸秆粉料模孔压缩对比验证试验:在 EDEM 软件中设置上述标定最优参数,并生成玉米秸秆粉料颗粒,通过仿真模拟玉米秸秆粉料在模孔中的压缩成型过程,并进行实际试验,对比压缩位移-挤压力变化的拟合情况。在 CATIA 软件中建立直径 22 mm 的模孔与压杆模型并导入 EDEM 软件中,待生成颗粒高度 75 mm 后压杆以 10 mm/min 的速度匀速下压,仿真试验结束后通过后处理模块导出运动过程中压力数据。同时取相同尺寸模孔与压杆模型置于万能力学试验机,模孔内注入相同高度的玉米秸秆粉料颗粒,经测定所选取玉米秸秆粉料含水率 9.75%,待调整模孔与压杆模型轴心处于相同位置后启动万能试验机,以与仿真相同的下降速度压缩粉料,并同步导出压缩位移-挤压力试验数据,试验效果如图6所示。

仿真与实际试验压缩过程中位移-挤压力曲线如图7所示。由两条曲线分析可知,在压杆压缩粉料初始阶段,粉料处于松散状态,位移变化量较大,随后粉料压缩致密,位移变化量逐渐减小,其中仿真试验所得稳定后最大压缩位移和压缩比分别为 34.96 mm、0.466,均接近于实际测量所得的 34.62 mm、0.461,最大压缩位移和压缩比相对误差分别为 0.98%、1.08%,相对误差较小;使用 Origin 软件分析得两条曲线的决定系数 R^2 为 0.9627,趋于1,说明两曲线拟合状况较好。综上可知,本文所标定玉

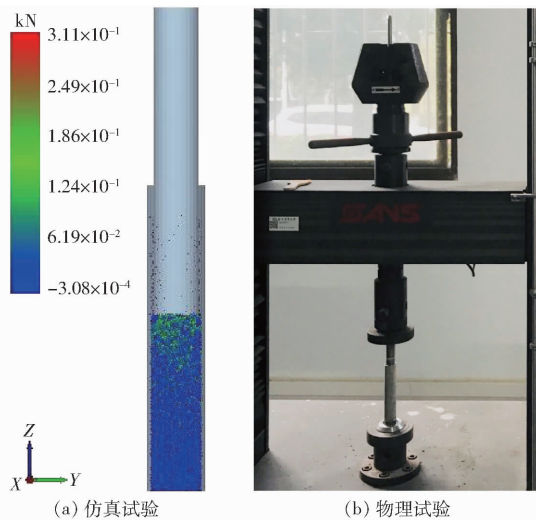


图6 玉米秸秆粉料压缩仿真与实际试验对比

Fig.6 Compressions of stalk powder simulation experiment and physical experiment

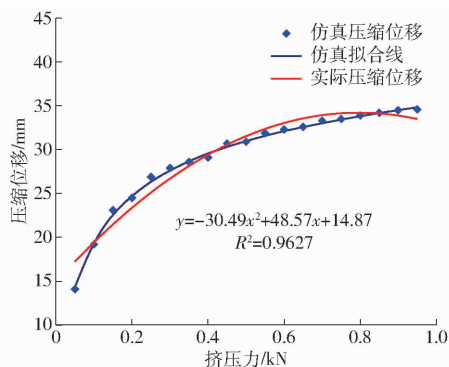


图7 压缩位移对比分析

Fig.7 Comparative analysis of compression displacement
玉米秸秆粉料颗粒离散元仿真模型参数准确可靠。

4 结论

(1)基于 EDEM 离散元仿真软件,选用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型对玉米秸秆粉料样品接触参数进行标定。由 Plackett - Burman 试验筛选出对玉米秸秆粉料堆积角影响显著的因素为表面能 JKR、粉料-粉料滚动摩擦因数及粉料-不锈钢板静摩擦因数。

(2)根据 Box - Behnken 试验结果建立并优化 3 个显著性参数与堆积角间的二次回归模型,由优化模型方差分析结果可知,除 3 个显著性参数 (JKR 表面能、粉料-粉料滚动摩擦因数及粉料-不锈钢板静摩擦因数) 的一次项外,交互项 JKR 表面能-滚动摩擦因数、JKR 表面能-静摩擦因数以及静摩擦因数的二次项对玉米秸秆粉料堆积角的影响也极显著。

(3)以秸秆粉料实际堆积角为目标,对回归方程进行寻优求解,得到显著性参数的最优组合为玉米秸秆粉料-粉料滚动摩擦因数 0.05、玉米秸秆粉料-不锈钢板静摩擦因数 0.47、JKR 表面能 0.05 J/m²。

在最优参数组合下通过仿真试验测得堆积角为 42.89° ,与实际物理堆积角结果的相对误差为 0.68% ,模孔压缩仿真与实际试验的最大压缩位移

和压缩比相对误差分别为 0.98% 、 1.08% 。说明基于JKR模型得到的接触参数可用于玉米秸秆粉料致密成型离散元仿真。

参 考 文 献

- [1] 王金武,唐汉,王金峰.东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL].农业机械学报,2017,48(5):1-21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)
- [2] 王久臣,戴林,田宜水,等.中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J].农业工程学报,2007,23(9):276-282. WANG Jiuchen, DAI Lin, TIAN Yishui, et al. Analysis on the development status and trend of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 276-282. (in Chinese)
- [3] 陈彦宏,武佩,田雪艳,等.生物质致密成型燃料制造技术研究现状[J].农机化研究,2010,32(1):206-211. CHEN Yanhong, WU Pei, TIAN Xueyan, et al. Research status of biomass dense molding fuel manufacturing technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(1): 206-211. (in Chinese)
- [4] 霍丽丽,赵立欣,田宜水,等.生物质颗粒燃料成型的黏弹性本构模型[J].农业工程学报,2013,29(9):200-206. HUO Lili, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Viscoelastic constitutive model of biomass pellet fuel molding[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 200-206. (in Chinese)
- [5] MAZOR A, OREFICE L, MICHRAFY A, et al. A combined DEM & FEM approach for modelling roll compaction process[J]. Powder Technology, 2018, 337: 3-16.
- [6] ALIZADEH M, ASACHI M, GHADIRI M, et al. A methodology for calibration of DEM input parameters in simulation of segregation of powder mixtures: a special focus on adhesion[J]. Powder Technology, 2018, 339: 789-800.
- [7] 孙启新,陈书法,董玉平.秸秆类生物质成型热黏塑性本构模型构建[J].农业工程学报,2013,31(8):221-226. SUN Qixin, CHEN Shufa, DONG Yuping. Construction of thermo viscoplastic constitutive model for straw biomass molding[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 31(8): 221-226. (in Chinese)
- [8] 李永奎,孙月铢,白雪卫.玉米秸秆粉料单模孔致密成型过程离散元模拟[J].农业工程学报,2015,31(20):212-217. LI Yongkui, SUN Yuezhu, BAI Xuewei. Discrete element simulation of single mold hole densification molding process of corn stalk powder[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 212-217. (in Chinese)
- [9] 冯俊小,林佳,李十中,等.秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J/OL].农业机械学报,2015,46(3):208-213. FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 208-213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150330&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.030. (in Chinese)
- [10] 丛宏斌,赵立欣,孟海波,等.立式环模秸秆压块机成型过程建模与参数优化[J/OL].农业机械学报,2014,45(10):187-193. CONG Hongbin, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Process modeling and parameter optimization of straw briquetting machine with vertical circular mould[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 187-193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141029&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.029. (in Chinese)
- [11] 李伟振,姜洋,饶曙,等.玉米秸秆和木屑及木钠混配成型工艺参数优化[J].农业工程学报,2018,34(1):198-203. LI Weizhen, JIANG Yang, RAO Shu, et al. Parameter optimization of corn stover blended with sawdust and sodium lignosulphonate compression experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 198-203. (in Chinese)
- [12] 田昆鹏,张彬,李显旺,等.果蔬皮渣颗粒成型机模孔结构设计及模拟优化研究[J].中国农业科技导报,2018,20(6):62-68. TIAN Kunpeng, ZHANG Bin, LI Xianwang, et al. Research on structure design and simulation optimization of mold hole of fruit and vegetable pellet molding machine[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(6): 62-68. (in Chinese)
- [13] 刘平义,骆龙敏,李海涛,等.秸秆多级辊压成型原理与装置设计[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):317-323. LIU Pingyi, LUO Longmin, LI Haitao, et al. Theory and device design of multi-stage roller forming for straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 317-323. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s049&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.049. (in Chinese)
- [14] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等.饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J/OL].农业机械学报,2020,51(6):73-82. LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.008. (in Chinese)
- [15] 向伟,吴明亮,吕江南,等.基于堆积试验的黏壤土仿真实物理参数标定[J].农业工程学报,2019,35(12):116-123. XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Physical parameter calibration of clay loam simulation based on accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116-123. (in Chinese)

- [16] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):49-56.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):49-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190206&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)
- [17] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):78-85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):78-85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)
- [18] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):115-122,142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):115-122,142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.013. (in Chinese)
- [19] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):125-135,142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):125-135,142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180514&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.014. (in Chinese)
- [20] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 基于RSM和NSGA-II的苜蓿种子离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(8):136-144.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA-II[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):136-144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200815&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.015. (in Chinese)
- [21] 于庆旭,刘燕,赖庆辉,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):123-132.
YU Qingxu, LIU Yan, LAI Qinghui, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):123-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.014. (in Chinese)
- [22] 鹿芳媛,马旭,谭穗妍,等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):93-99.
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):93-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.012. (in Chinese)
- [23] 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报,2016,32(12):247-253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Parameter analysis and calibration of wheat discrete element method based on stacking test[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12):247-253. (in Chinese)
- [24] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):140-147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):140-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
- [25] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):49-56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):49-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006. (in Chinese)
- [26] 罗帅,袁巧霞,GOUDA Shaban,等. 基于JKR粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):343-350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):343-350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180440&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.040. (in Chinese)
- [27] 王黎明,范盛远,程红胜,等. 基于EDEM的猪粪接触参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(15):95-102.
WANG Liming, FAN Shengyuan, CHENG Hongsheng, et al. Calibration of contact parameters for pig manure based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15):95-102. (in Chinese)
- [28] 陈争光,王德福,李利桥,等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报,2012,28(21):59-65.
CHEN Zhengguang, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Tensile and shear properties of corn straw husk[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21):59-65. (in Chinese)