

玉米根系离散元模型建立及仿真参数标定研究

盛 越, 田海清, 王 迪, 刘 飞, 李大鹏, 肖子卿, 张红旗

(内蒙古农业大学 机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 为研究秸秆饲料收获机工作时玉米根土复合体受力变化情况, 利用离散元法建立了整根玉米根系颗粒粘结模型。根据玉米根系物理特性, 选取 Hertz-Mindlin with Bonding 颗粒接触模型; 为准确获取离散元仿真参数, 采用根系剪切试验与离散元仿真相结合的方法, 对离散元参数进行标定。以根系峰值剪切力为响应值, 采用 Design Expert 软件依次设计 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验与 Box-Behnken 试验, 得到最优仿真参数, 即颗粒间剪切模量为 6.6 MPa、粘结刚度为 $1.139 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 、极限应力为 1.1885 MPa。结果表明: 仿真值与实际值相对误差为 2.12%, 仿真标定结果真实可信。最终, 根据根系实际尺寸, 采用颗粒快速填充方法建立整根玉米根系模型, 旨在为后续秸秆饲料收获机械离散元仿真提供参考依据。

关键词: 玉米根系; 离散元; 参数标定; 仿真

中图分类号: S225.5; S183

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2023)02-0164-07

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2023.02.015

0 引言

我国为玉米种植大国, 2019 年播种面积为 4128 万 hm^2 , 占全国农作物总播种面积的 24.9%, 秸秆年产量约为 41724.63 万 t, 为国内农作物秸秆产量之首^[1-2]。所以, 提高秸秆资源的利用率具有重要意义。为此, 项目组研发了一种甩刀式秸秆饲料收获机, 能适应我国大部分地区秸秆收获作业, 可完成玉米秸秆的捡拾和粉碎, 收获后的秸秆饲料长度适中、适口性较好^[3]。但是, 我国西部地区土壤类型主要为壤土、沙壤土和沙土^[4], 土壤总体含沙量较高, 甩刀式秸秆收获机在捡拾粉碎秸秆时容易造成玉米根茬与土壤之间接触松动或玉米根茬被拔出, 导致收获秸秆中含土量较高, 严重影响秸秆饲料品质; 同时, 秸秆收获时根土间作用关系复杂, 难以通过传统试验的方式获取根土间受力变化情况, 故建立准确玉米根系模型进行仿真分析变得尤为重要。

离散元法用于分析复杂离散系统的运动规律与力学特性的一种新型数值计算方法^[5], 最早由 Peter Cundall 提出^[6], 并应用岩石边坡的运动分析。近年

来, 随着离散元理论和相关软件的不断完善, 越来越多的学者将离散元软件应用到农业机械设计中(如建立土壤和作物种子等颗粒模型), 对机具工作过程进行模拟仿真, 探究物料运动规律。由于离散元法可对微观颗粒进行精确分析, 且能够方便地控制变量进行多次重复性试验, 因此在根土力学研究中也广泛应用。高国华等学者利用离散元法对蔬菜拉拔力学性能进行探究^[7]; 蒋明静等学者采用离散元法模拟油松在黄土地区的根系拉拔试验, 分析了不同含水率下根土摩擦力特性^[8]; Bourrier 等通过离散元法分析了不同土壤下根系力学特性^[9]; Mao Zhun 等人用离散元法和有限元法模拟黏性土直根系剪切试验^[10]。但是, 目前多数研究在进行仿真时将根系建立为刚性不可变形的几何体, 根系模型不可被剪切或断裂, 且对于建立玉米根系整体仿真模型的研究较少。

为精确建立根系离散元模型, 笔者采用试验测试与离散元仿真相结合的方法对离散元参数进行标定。首先, 测定玉米根系实际剪切力学特性; 然后, 在离散元软件中建立根系剪切模型, 得出仿真中根系最大剪切力, 以实际根系最大剪切力为目标, 对仿真粘结参数进行标定, 并对参数进行检验试验, 以验证模型的可靠性; 最后, 根据实际根系尺寸建立整根根系仿真模型。

1 根系剪切力学特性测定

1.1 试验材料及设备

试验所使用根系于 2020 年 10 月 20 日取自呼和

收稿日期: 2021-03-08

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化专项(2019CG034); 国家自然科学基金项目(51765055); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2017MS0537)

作者简介: 盛 越(1996-), 男, 石家庄人, 硕士研究生, (E-mail) shengyue602@163.com。

通讯作者: 田海清(1973-), 男, 呼和浩特人, 教授, 博士生导师, (E-mail) hqtian@126.com。

浩特市什不斜气村,为提高试验的可靠性,采用五点取样法对玉米根系进行取样。试验区玉米秸秆行距为 45mm,株距为 32mm,玉米品种为欣晟 18 号,根系含水率为 28.56%,根系密度为 $107.6\text{kg}/\text{m}^3$ 。玉米根系剪切试验采用 FTC 公司的 TMS-Pro 型专业研究级物性仪-质构仪,剪切力精度为 0.0001N ,示值误差不超过 $\pm 0.015\%$ 。

1.2 剪切试验及结果分析

根系剪切试验依据国家标准 GB/1939-2009 和 GB/1937-1991 进行,玉米单根根系如图 1 所示,剪切试验如图 2 所示。为减小剪切误差,分别取根系直径大于 2mm 及小于 2mm 的单根各 10 根,对每根根系剪切 2 次,取其平均值为最终结果。设置剪切前进速度为 $5\text{mm}/\text{s}$,回程速度为 $30\text{mm}/\text{s}$,测试距离为 60mm ,触发力为 1N ,每 0.1s 采集 1 个数据点,由数据处理器记录剪切力与剪切时间。直径 2.25mm 根系剪切试验后生成剪切力-时间曲线如图 3 所示。



图 1 单根玉米根系

图 2 剪切试验

Fig.1 A single corn root

Fig.2 Shear test

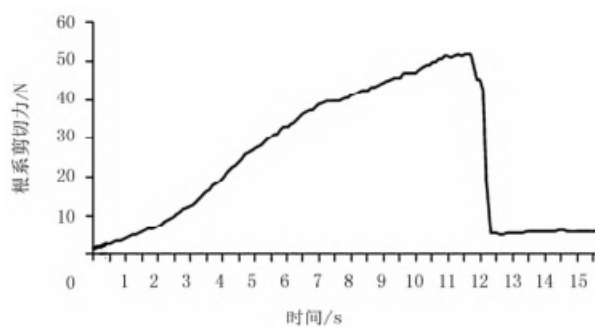


图 3 剪切力-时间曲线

Fig.3 Shear force-time curve

由图 3 可以看出玉米根系剪切力-时间曲线可分为 3 个阶段:第 1 阶段 $0\sim 11.7\text{s}$ 期间为线弹性阶段,剪切力随时间的增加而增大;第 2 阶段 $11.7\sim 12.5\text{s}$ 期间为断裂阶段,玉米根系结构断裂,剪切力达到最大值后迅速下降;第 3 阶段 $12.5\sim 15.6\text{s}$ 期间为摩擦阶段,根系被完全切断,但由于根系韧性切刀与根系之间仍

具有摩擦力。

20 组不同直径玉米根系剪切试验如图 4 所示。

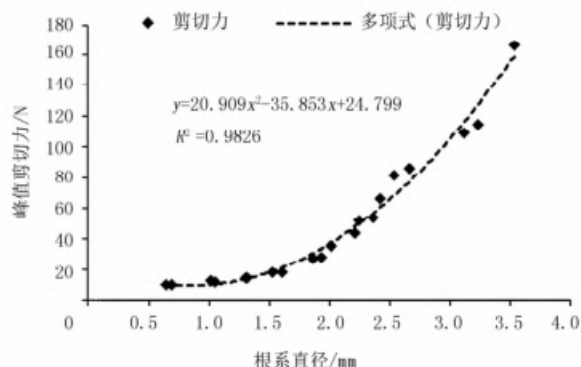


图 4 剪切试验结果

Fig.4 Shear test results

由图 4 可知:剪切力随着根系直径的增大而增大,并呈二次函数关系,关系式如式(1)所示,相关系数 $R^2=0.9826$ 。本次试验中,当根系直径为 3.54mm 时,峰值剪切力最大,为 167.052N ;当根系直径为 0.64mm 时,峰值剪切力最小,为 9.7892N ;平均峰值剪切力为 42.525N 。

$$y = 20.909x^2 - 35.853x + 24.799 \quad (1)$$

2 离散元接触模型选择

由于根系剪切模型仿真设计根系模型破碎过程,根系模型受力及颗粒个体之间的力学作用较为复杂,离散元颗粒之间碰撞对仿真结果有重要影响。因此,结合实际情况并参考相关文献^[11-12],选用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型作为玉米根系离散元仿真的接触力学模型。其原理是使离散元软件中的颗粒之间生成粘结键,颗粒之间产生粘结力并使其具有一定的柔性特征。图 5 为颗粒粘结键围观模型示意图。颗粒粘结后受力分析如式(2)~式(7)所示。

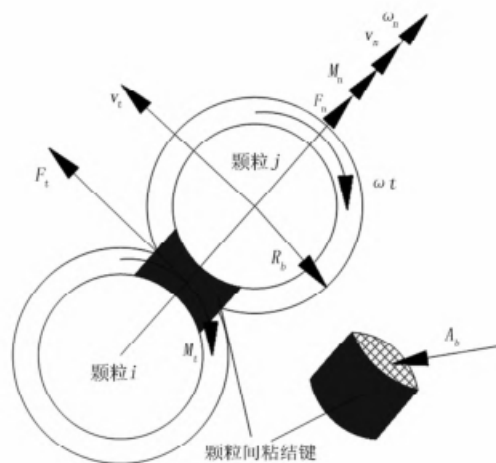


图 5 颗粒间粘结键模型

Fig.5 Intergranular bond model

$$F_n = - \int V_n \cdot S_n \cdot A_b \cdot \delta_t$$

(2)

$$F_t = - \int V_t \cdot S_t \cdot A_b \cdot \delta_t$$

(3)

$$M_n = - \int \omega_n \cdot S_t \cdot J \cdot \delta_t$$

(4)

$$M_t = - \int \omega_t \cdot S_n \cdot \frac{J}{2} \cdot \delta_t$$

(5)

$$A_b = \pi R_b^2$$

(6)

$$J = \frac{1}{2} \pi R_b^4$$

(7)

式中 F_n —颗粒粘结键所受法向力(N);
 F_t —颗粒粘结键所受切向力(N);
 M_n —颗粒粘结键所受法向力矩(N·m);
 M_t —颗粒粘结键所受切向力矩(N·m);
 v_n —颗粒法向速度(m/s);
 v_t —颗粒切向速度(m/s);
 S_n —粘结键法向刚度(N/m³);
 S_t —粘结键切向刚度(N/m³);
 ω_n —颗粒法向角速度(rad/s);
 ω_t —颗粒切向角速度(rad/s);
 A_b —接触面积(mm²);
 J —粘结球形空间惯性矩(m⁴);
 R_b —粘结半径(mm);
 δ_t —时间步长(s)。

离散元仿真时,当粘结键受到的法向和切向应力大于法向极限应力或切向极限应力设定值时,粘结键断裂。法向极限应力、切向极限应力计算公式为

$$\sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A_b} + \frac{2M_t}{J}R_b$$

(8)

$$\tau_{\max} < \frac{-F_t}{A_b} + \frac{M_n}{J}R_b$$

(9)

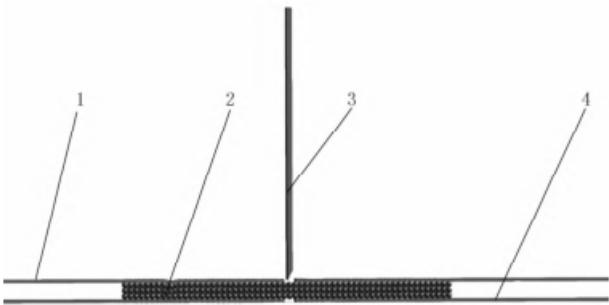
根据公式(2)~式(9)可知,Hertz-Mindlin with Bonding 模型需要设置的参数分别是:粘结键法向和切向刚度 S_n 、 S_t ,法向和切向极限应力 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$,粘结半径 R_b 。

3 离散元仿真参数标定及模型建立

3.1 仿真剪切模型建立

采用 SolidWorks 三维建模软件建立根系剪切模型,再通过 EDEM2018、ANSYS17.0、Fluent17.0 等软件,采用快速填充的方式将颗粒填充至三维模型中,生成模型如图 6 所示。为防止根系仿真过程中翘起而影响仿真结果,仿真模型中增加盖板。切刀运动速度与实际试验相同,数值为 5mm/s。仿真颗粒选用标

准球形颗粒,半径设置为 0.5mm,根系直径为 3mm。切刀、盖板、底板材料均为钢材,设置密度为 7850kg/m³,泊松比为 0.3,剪切模量为 7.9×10¹⁰Pa。仿真时间步长设为 10%。



1.盖板 2.根系 3.切刀 4.底板
图 6 剪切仿真模型
Fig.6 Shear simulation model

3.2 Plackett-Burman 试验

根系剪切仿真需设置 11 项参数,如表 1 所示。为确定对根系剪切仿真中有显著影响的参数,使用应用 Design Expert 软件进行 Plackett-Burman 试验设计,每个参数选取高低水平,分别通过编码-1 和+1 表示,共进行 12 组试验,每组试验仿真两次,选取平均值为根系剪切力。PB 试验设计与结果如表 2 所示。

表 1 Plackett-Burman 试验参数列表
Table 1 List of Plackett-Burman test parameters

符号	参数名称	单位	低水平(-1)	高水平(+1)
X_1	根系泊松比		0.20	0.40
X_2	根系剪切模量	MPa	5.00	10.00
X_3	根系恢复系数		0.60	0.80
X_4	根系静摩擦因数		0.50	1.00
X_5	根系动摩擦因数		0.10	0.20
X_6	根系-钢恢复系数		0.60	1.00
X_7	根系-钢静摩擦因数		0.35	0.60
X_8	根系-钢动摩擦因数		0.01	0.05
X_9	粘结刚度	MN/m ³	1.00	1.50
X_{10}	极限应力	MPa	1.00	1.50
X_{11}	粘结半径	mm	0.50	1.00

表 2 Plackett-Burman 试验设计与结果
Table 2 Plackett-Burman test design and results

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	剪切力/N
1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	102.54
2	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	189.38

续表 2

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	剪切力/N
3	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	96.26
4	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	100.31
5	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	145.62
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	85.35
7	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	155.52
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	152.44
9	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	103.32
10	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	162.44
11	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	123.68
12	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	120.56

运用 Design Expert 软件对 PB 试验结果进行方差分析,得到各参数的影响效果如表 3 所示。

表 3 Plackett-Burman 试验参数显著性分析

Table 3 Significance analysis of Plackett-Burman test parameters

参数	效应	均方和	影响率/%	显著性排序
X_1	13.585	553.69	4.79	5
X_2	35.055	3686.68	31.94	1
X_3	6.216	115.94	1.01	10
X_4	-7.914	187.92	1.63	9
X_5	-13.698	562.92	4.88	4
X_6	9.654	279.63	2.42	7
X_7	-9.636	278.61	2.41	8
X_8	6.075	110.71	0.96	11
X_9	25.312	1922.04	16.65	3
X_{10}	33.487	3363.97	29.15	2
X_{11}	-12.612	477.19	4.14	6

3.3 最陡爬坡试验

由表 3 可知,仿真参数根系剪切模量(X_2)、粘结刚度(X_9)、极限应力(X_{10})对根系剪切力影响显著。因此,对参数 X_2 、 X_9 、 X_{10} 进行最陡爬坡试验,进一步缩小参数取值范围,其他参数采用中水平数值。试验设计与结果如表 4 所示。由式(1)可求出根系直径为 3mm 时根系峰值剪切力为 105.421N,实际值与仿真数值比对可求出误差值。由表 4 可知:误差先减小后增加,可确定参数根系剪切模量(X_2)、粘结刚度(X_9)、极限应力(X_{10})取值范围为 6~7MPa、1.1~1.2×

10⁶N/m³、1.1~1.2MPa。

表 4 最陡爬坡试验设计与结果

Table 4 Design and results of the steepest climbing test

序号	参数 X_2	参数 X_9 /MN·m ⁻³	参数 X_{10} /MPa	剪切力 /N	误差 /%
1	5	1.0	1.0	67.678	-55.77
2	6	1.1	1.1	78.766	-33.84
3	7	1.2	1.2	117.986	10.65
4	8	1.3	1.3	156.892	32.81
5	9	1.4	1.4	192.882	45.34
6	10	1.5	1.5	236.678	55.46

3.4 Box-Behnken 试验和响应面设计

3.4.1 Box-Behnken 试验

通过 Box-Behnken 试验可对 X_2 剪切模量(参数 A)、 X_9 粘结刚度(参数 B)、 X_{10} 极限应力(参数 C)进行响应面分析,建立回归方程,得出 3 因素的最优解。Box-Behnken 试验因素水平表如表 5 所示,试验结果如表 6 所示。

表 5 Box-Behnken 试验因素水平表

Table 5 Box-Behnken test factor level table

水平	剪切模量 A /MPa	粘结刚度 B /MN·m ⁻³	极限应力 C /MPa
低(-1)	6.0	1.10	1.10
中(0)	6.5	1.15	1.15
高(+1)	7.0	1.20	1.20

表 6 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 6 Box-Behnken test design and results

序号	参数 A /MPa	参数 B /MN·m ⁻³	参数 C /MPa	剪切力 /N
1	0	0	0	101.423
2	0	0	0	103.442
3	0	1	1	114.423
4	-1	-1	0	80.454
5	1	0	1	109.587
6	0	-1	-1	80.546
7	0	-1	1	92.456
8	0	1	-1	90.966
9	0	0	0	103.112

续表 6

序号	参数 A /MPa	参数 B /MN·m ⁻³	参数 C /MPa	剪切力 /N
10	1	1	0	115.655
11	0	0	0	103.753
12	1	-1	0	103.789
13	-1	0	1	98.567
14	-1	0	-1	81.467
15	1	0	-1	96.355
16	0	0	0	105.445
17	-1	1	0	98.778

根据试验结果分析得出 3 因素与根系剪切力之间二次回归模型,即

$$F=103.44+8.27A+7.82B+8.21C-1.61AB-0.97AC+2.89BC-0.93A^2-2.83B^2-6.01C^2$$
 (10)

通过 Design-Expert8.0 对模型进行方差分析及显著性检验,方差分析中对回归方程的常数项、一次项、二次项和平方项进行显著性检验,如表 7 所示。 F 值和 p 值可显示出相关系数显著性,当 p 值小于 0.05 时视为该模型达到显著水平^[13],可利用该模型进行进一步优化设计。本模型 p 值<0.0001 达到极显著水平,同时失拟项 $p=0.084>0.05$,差异不显著,说明该模型在回归区域内具有较好拟合性^[14]。通过响应面拟合计算出决定系数 $R^2=0.9798$ 、 $R^2_{Adj}=0.9538$,表明该模型拟合度较高,具有可信度^[15]。由表 7 可知:剪切模量(参数 A)、粘结刚度(参数 B)、极限应力(参数 C)及二次项 C^2 对根系剪切力有极显著影响,交互作用项 BC 与二次项 B^2 对根系剪切力有显著影响。由 F 值大小可知,3 因素对根系剪切力影响程度依次是剪切模量>粘结刚度>极限应力。

表 7 Box-Behnken 试验方差分析表
Table 7 Box-Behnken test analysis of variance

方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
模型	1825.33	9	202.81	37.72	<0.0001**
A	546.48	1	546.48	101.63	<0.0001**
B	489.49	1	489.49	91.03	<0.0001**
C	539.54	1	539.54	100.34	<0.0001**
AB	10.43	1	10.43	1.94	0.2064
AC	3.74	1	3.74	0.70	0.4318

续表 7

方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
BC	33.33	1	33.33	6.20	0.0416*
A ²	3.68	1	3.68	0.68	0.4354
B ²	33.75	1	33.75	6.28	0.0407*
C ²	151.89	1	151.89	28.25	0.0011**
残差	37.64	7	5.38		
失拟项	29.35	3	9.78	4.72	0.084
纯误差	8.29	4	2.07		
总和	1862.97	16			

$R^2=0.9798$; $R^2_{Adj}=0.9538$; $CV=2.35\%$;

精密度 Adeq Precision=19.731

注: ** 表示该项极其显著($p<0.01$), * 表示该项显著($p<0.05$)。

3.4.2 回归模型交互响应分析

应用 Design-Expert 软件对不同因素之间交互作用进行分析,得出各因素之间响应曲面及等高线图。图 7 为颗粒剪切模量(参数 A)与粘结刚度(参数 B)对根系峰值剪切力影响的响应面与等高线。曲面坡度变化较大,表明参数 A 与 B 对根系峰值剪切力影响较大;等高线曲率平缓,表明参数 A 与 B 交互作用不显著。图 8 为颗粒剪切模量(参数 A)与颗粒间极限应力(参数 C)对根系峰值剪切力影响的响应面与等高线。曲面坡度变化较大,表明参数 A 与 C 对根系峰值剪切力影响较大;等高线曲率平缓,表明参数 A 与 C 交互作用不显著。图 9 为颗粒间粘结刚度(参数 B)与极限应力(参数 C)与对根系峰值剪切力影响的响应面与等高线。曲面坡度变化较大,表明参数 B 与 C 对根系峰值剪切力影响较大;等高线曲率较大,表明参数 B 与 C 交互作用显著。由此可知,颗粒间剪切模量、粘结刚度、极限应力与根系峰值剪切力均成正比关系。

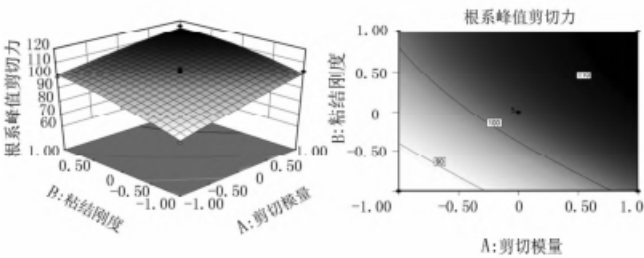


图 7 A 与 B 交互作用响应曲面及等高线

Fig.7 Response surface and contour line of interaction between A and B

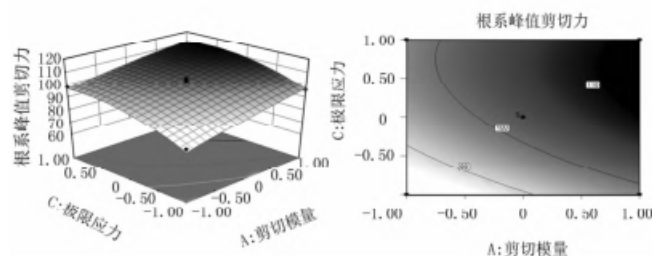


图 8 A 与 C 交互作用响应曲面及等高线

Fig.8 Response surface and contour line of interaction between A and C

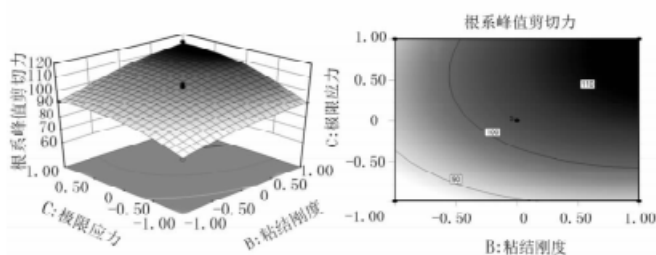


图 9 B 与 C 交互作用响应曲面及等高线

Fig.9 Response surface and contour line of interaction between B and C

3.4.3 最优参数求解

在 Design-Expert8.0 软件优化模块中,以实际测得直径 3 mm 根系峰值剪切力 105.421N 为目标,使得仿真结果最接近 105.421N,在多种结果中选择最优解,结果如下:颗粒间剪切模量为 6.6MPa,颗粒间粘结刚度为 $1.139 \times 10^6 \text{ N/m}^3$,极限应力为 1.1885 MPa。为检验模型预测准确性,对响应面优化结果进行试验验证,仿真采用求解出的最优解,其他参数采用中水平参数,进行 3 次重复试验。根系剪切仿真结果分别为 100.583、103.218、105.771N,平均值为 103.191N,与实际值相对误差为 2.12%,表明模型具有可靠性,仿真模型可代替实际根系物料进行相关力学试验。

3.4.4 玉米根系尺寸及模型建立

在试验地采用五点取样法取 80 株玉米秸秆,对玉米秸秆直径及根系直径进行测量,根系幅宽与秸秆直径关系散点图如图 10 所示。

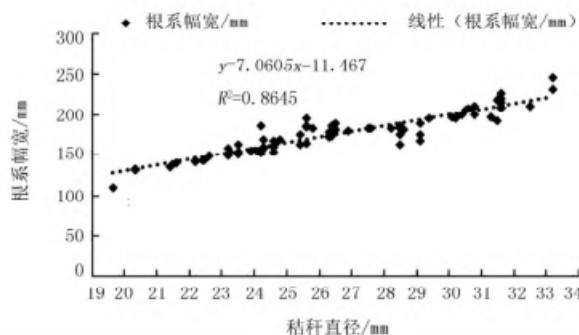


图 10 秸秆直径—根系幅宽曲线

Fig.10 Straw diameter-root width curve

由图 10 可知,秸秆直径与根系直径成正比关系。

经统计表明,该试验区所取 80 株玉米秸秆的直径处于 22.45~28.05mm 范围内数量最多。所以,本次仿真秸秆取直径 $a = 25\text{mm}$,对应根系幅宽 $b = 165.04\text{mm}$ 。最优离散元参数玉米根系离散元模型如图 11 所示。该模型采用快速填充方法形成,生成颗粒总数量为 12800,颗粒半径为 1mm,模型可替代实际根系进行力学分析及试验。

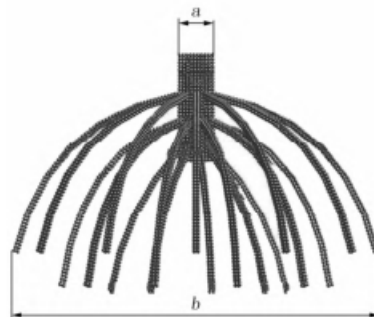


图 11 玉米根系离散元模型

Fig.11 Discrete element model of maize root system

4 结论

1) 为建立玉米根系离散元模型,以收获期玉米根系为试验材料,在质构仪上对玉米根系进行剪切试验,得出玉米根系剪切力学性能参数,并建立根系直径与峰值剪切力之间关系式。

2) 根据实际根系力学特性,选取 Hertz-Mindlin with Bonding 颗粒接触模型,并对接触模型进行力学分析,得出该模型需设置的参数分别是:粘结键法向和切向刚度 S_n 、 S_t ,法向和切向极限应力 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$,粘结半径 R_b 。

3) 采用实测试验与仿真相结合的方法,对离散元参数进行标定,通过 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验与 Box-Behnken 试验得到最优参数组合:颗粒间剪切模量为 6.6MPa,颗粒间粘结刚度为 $1.139 \times 10^6 \text{ N/m}^3$,极限应力为 1.1885MPa。对优化结果进行试验验证,得出仿真值与实际值相对误差为 2.12%,表明模型具有可靠性。

4) 通过田间测试得出玉米根系尺寸参数,以最优离散元参数为最终值,采用快速填充的方法建立了玉米根系离散元模型。

参考文献:

- [1] 刘德志.秸秆综合利用前景及存在的问题及对策[J].现代农业,2020(6):82.
- [2] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等.中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J].农业工程学报,2019,35(22):132-140.
- [3] 于智坤.9HS-170 型黄贮饲料收获机改进设计与试验研究

- [D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [4] 杜蒙,贾树海,丁青坡,等.内蒙古温带半湿润地区典型土壤系统分类及参比[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2017,38(3):24-29.
- [5] 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.
- [6] CUNDALLI P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [7] 高国华,谢海峰,王天宝.设施蔬菜收获机拉拔力学性能 EDEM 仿真与试验[J].农业工程学报,2017,33(23):24-31.
- [8] 蒋明镜,朱云刚.重塑黄土与植物根系界面摩擦离散元分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):210-215,221.
- [9] BOURRIER F, KNEIB F, CHAREYRE B, et al. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots[J]. Ecological engineering, 2013, 61(1): 646-657.
- [10] MAO ZHUN, YANG MING, BOURRIER F, et al. Evaluation of root reinforcement models using numerical modeling approaches[J]. Plant and soil, 2014, 381(1): 249-270.
- [11] 丁启朔,任骏, BELAL Eisa Adam, 等.湿粘水稻土深松过程离散元分析[J].农业机械学报,2017,48(3):38-48.
- [12] LIAKAS S, O'SULLIVAN C, SAROGLU C. Influence of heterogeneity on rock strength and stiffness using discrete element method and parallel bond model[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2017, 9(4): 575-584.
- [13] 陶厚永,曹伟.多项式回归与响应面分析的原理及应用[J].统计与决策,2020,36(8):36-40.
- [14] 张博,刘庆玉,薛志平,等.响应面法优化玉米秸秆微波辅助酸预处理条件[J].中国沼气,2017,35(2):51-55.
- [15] 李莉,张赛,何强,等.响应面法在试验设计与优化中的应用[J].实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.

Study on Establishment of Discrete Element Model of Maize Root System and Calibration of Simulation Parameters

Sheng Yue, Tian Haiqing, Wang Di, Li Fei, Li Dapeng, Xiao Ziqing, Zhang Hongqi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to study the force change of the corn root-soil complex when the straw forage harvester is working, a discrete element method was used to establish the whole corn root particle adhesion model. According to the physical characteristics of the corn root system, the Hertz-Mindlin with Bonding particle contact model was selected. In order to accurately obtain the discrete element simulation parameters, the method of combining the root shear test and the discrete element simulation was used to calibrate the discrete element parameters. Taking the root peak shear force as the response value, the Plackett-Burman test, the steepest climbing test and the Box-Behnken test were sequentially designed using Design Expert software to obtain the optimal simulation parameters: the inter-particle shear modulus is 6.6MPa, and the bonding stiffness is $1.139 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$, and the ultimate stress is 1.1885MPa. After experimental verification, the relative error between the simulated value and the actual value is 2.12%, which indicates the feasibility of simulation calibration. Finally, according to the actual size of the root system, a rapid particle filling method was used to establish the whole root corn root system model, which provides a reference for the subsequent discrete element simulation of the straw and feed harvesting machinery.

Key words: corn root system; discrete element method; parameter calibration; simulation