

收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化

谢伟^{1,2} 彭磊¹ 蒋蘋¹ 孟德鑫¹ 王修善^{1,2}

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 智能农机装备湖南省重点实验室, 长沙 410128)

摘要: 针对与油菜薹机械化收获中的切割、夹持输送、打捆等关键环节密切相关的油菜薹茎秆离散元仿真模型缺乏准确粘结参数的问题,以“油蔬两用”双低型油菜收获期油菜薹机械化夹持段茎秆为研究对象,利用 EDEM 仿真软件提出三轴空间坐标法构建油菜薹夹持中段茎秆双层粘结离散元仿真模型。采用 Design-Expert 软件依次设计了 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验,完成油菜薹夹持中段茎秆仿真粘结参数标定。利用标定的参数优化构建剪切和径向压缩模型进行相应仿真试验,通过与物理试验对比分析,对模型参数进一步优化。结果表明,内芯-内芯的法向/切向接触刚度、表皮-内芯法向/切向接触刚度,以及表皮-表皮法向接触刚度对茎秆力学性能影响显著,分别为 1.94×10^7 、 9.56×10^8 、 6.28×10^9 N/m;所有力学模型的仿真值与实测值相对误差不大于 3%,且茎秆受力变化趋势基本一致,表明标定优化后的参数具有可行性和准确性。所构建的油菜薹茎秆双层粘结离散元模型能表征其内部结构的力学特性差异,可为油菜薹茎秆相关系统的数值模拟研究提供模型基础。

关键词: 油菜薹; 夹持段茎秆; 双层粘结模型; 参数优化; 离散元

中图分类号: S225.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0112-09

OSID:



Discrete Element Model Building and Optimization of Double-layer Bonding of Rape Shoots Stems at Harvest Stage

XIE Wei^{1,2} PENG Lei¹ JIANG Pin¹ MENG Dexin¹ WANG Xiushan^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2. Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Changsha 410128, China)

Abstract: Aiming at the problem of lack of accurate bonding parameters in the discrete element simulation model of rape shoots stems, which is closely related to the key links of mechanized harvesting of rape shoots stems, such as cutting, transport by clamping, and baling, the stems of mechanized clamping section of rape shoots in the double low rape harvesting period of “oil and vegetable dual-use” were used as research objects. Using EDEM simulation software, a method to construct a discrete element simulation model of double-layer bonding of the middle clamping section stems of the rape shoots was proposed by using three-axis spatial coordinates method. Design-Expert software was used to design the Plackett-Burman test, the steepest climb test and the Box-Behnken test to complete the calibration of the simulation bonding parameters of the clamping section stems of rape shoots. The shear and radial compression models were constructed by using the optimized solutions of calibrated parameters, and the corresponding simulation tests were carried out. The model parameters were further optimized by comparative analysis with the physical test. The results showed that the normal/tangential contact stiffness of inner core to inner core, the normal/tangential contact stiffness of epidermis to inner core, and the normal contact stiffness of epidermis to epidermis had significant effects on the mechanical properties of stems, and the results were 1.94×10^7 N/m, 9.56×10^8 N/m and 6.28×10^9 N/m, respectively. The relative error between simulated values and measured values of all mechanical models was not greater than 3%. And the force change trend of the stem was basically the same, indicating that the optimized calibration parameters were feasible and accurate, and the constructed double-layer bonding discrete method model of stems of rape shoots characterized the difference in mechanical characteristics of its

收稿日期: 2022-11-05 修回日期: 2022-12-20

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40250、2021JJ40249)和湖南省教育厅优秀青年项目(22B0220)

作者简介: 谢伟(1988—),男,实验师,博士生,主要从事智能农业装备与技术研究,E-mail: 444012168@qq.com

通信作者: 蒋蘋(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备与技术研究,E-mail: 5229889@qq.com

internal structure, which can provide a model basis for the numerical simulation of the related system of stem of rape shoots.

Key words: rape shoots; clamping section of stems; double-layer bonding model; parameter optimization; discrete element

0 引言

随着我国现代育种技术的进步,以湖南省为主要来源地的双低型油菜“油蔬两用”种植技术逐步成为主流^[1-4]。油菜菜用(简称油菜薹)茎秆水分足,富含丰富的糖类和膳食纤维,比薹尖、叶片更脆嫩爽口^[5-6]。收获期油菜薹嫩茎部分的破损程度是检验收获质量好坏的重要依据。目前,为保证机械化有序收获对油菜薹薹尖部分的完整性,以及在机械化切割过程中增强主茎秆支撑作用力,往往在油菜薹植株生长到65~80 cm时收获1茬,留茬后再抽生的油菜薹不再采摘,用于收获菜籽。收获时留茬高度在30~40 cm进行切割,并对切割位置往上部分20 cm左右的长度进行夹持输送和后期的打捆处理,以最大限度保证薹尖部分15~20 cm的长度零损伤。油菜薹有序收获时,植株被切割、夹持输送、打捆等作业,其机械力学特性主要由夹持段茎秆承担。

近年来,随着计算机技术的发展,EDEM仿真软件被用于对农作物进行仿真参数标定,揭示其内部力学特性^[7-9]。文献[10-13]利用EDEM仿真软件Hertz-Mindlin with Bonding接触模型分别对胡麻茎秆、饲用油菜茎秆、水稻秸秆、玉米秸秆建立了具有表面韧性的茎秆离散元模型,证明利用该粘结模型标定茎秆或类似茎秆类作物是可行的。同时,国外学者基于离散元模型对柔性作物茎秆的压缩、剪切、弯曲等力学特性进行了研究^[14-16]。综上,目前在对秆类作物进行力学性能研究时,往往将作物看作各向同性,简化为一种组织组成,所建立的EDEM仿真模型为一种同类属性颗粒粘结而成。由于油菜薹夹持段茎秆主要由条状纤维表皮和未出现髓腔与木质化的内芯组成,其中表皮属于各向异性,在机械化有序收获过程中,往往夹持段茎秆表皮未损伤,但内芯已经遭到损伤。因此应用一种同类属性颗粒进行仿真时误差较大。类似的,邹舒畅等^[17]、刘禹辰等^[18]利用EDEM仿真软件对苕麻和玉米秸秆建立了双层力学模型,这些都为油菜薹夹持段茎秆力学特性的离散元建模提供了思路。

本文以收获期油菜薹机械化夹持段茎秆为研究对象,针对夹持段茎秆表皮与内芯力学特性存在显

著差异的问题,选用Hertz-Mindlin with Bonding接触模型,采用2种不同材料属性颗粒模拟茎秆表皮和内芯,建立茎秆双层粘结离散元仿真模型。通过实测力学试验与仿真试验对照,标定茎秆表皮和内芯力学参数,探究茎秆力学特性,并进一步优化该模型的准确性和可靠性。旨在提高收获期油菜薹夹持段茎秆受力过程数值模拟的准确度,为后续油菜薹有序收获茎秆群体仿真提供研究基础。

1 材料与参数测定

1.1 基本物性参数

2021年9月15日,在湖南农业大学油菜基地,机械化条播种植“农大1号”甘蓝型优质双低型油菜,垄面宽度为1200 mm,单垄2行,行距400 mm,播种量4.8 kg/hm²,同步施复合肥625 kg/hm²。2022年2月1日采用五点法测得出苗后的植株平均密度为4.2 × 10⁵ 株/hm²,并利用精度为0.1 mm的卷尺测得田间100株油菜薹平均自然生长高为75.4 cm。单株油菜薹植株形态结构如图1所示,该植株主要由薹尖、枝干、叶片、主茎秆、根部等组成,主茎秆顶部脆嫩、底部粗壮,主茎秆近似圆柱形,其直径从薹尖到根部逐渐增大,且茎秆抗压强度和切割强度随直径的增大而递增。其中枝干将叶片与主茎秆相连呈扇形结构张开,且主茎秆上的枝干和叶片主要分布在薹尖上,叶片数量从基部到顶部逐渐递增,长度逐渐变短变小,且扇形张开角度逐渐递减,直到顶部由叶片将薹尖包裹。将油菜薹整株从顶部到底部依次划分为上、中、下3段。其中上段茎秆(长度为15~20 cm)较为脆嫩,其表皮与内芯可

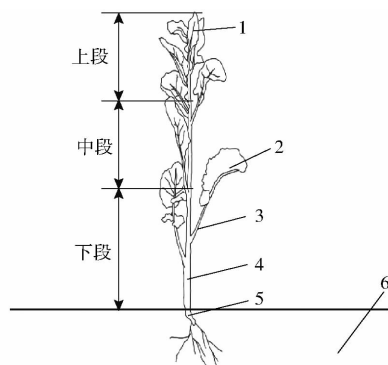


图1 油菜薹植株形态结构示意图

Fig.1 Schematic of plant morphology and structure of rape shoots

1. 薹尖 2. 叶片 3. 枝干 4. 主茎秆 5. 根部 6. 土壤

简化为一种组织组成;中段茎秆(长度为20 cm)和下段茎秆(长度为30~40 cm)较为硬实,一般连接有2~3根枝干,茎秆可简化为由条状纤维表皮和未出现髓腔与木质化的内芯组成。

随机选取高度基本一致的植株10株,去除上段和下段,保留去除枝干后的中段茎秆作为试验对象。通过10次测量取平均值,测得中段平均直径为15.02 mm,其中中段茎秆表皮平均厚度为1.97 mm,内芯平均直径为11.08 mm。利用MA35型赛多利斯水分测定仪测得表皮和内芯平均含水率分别为95.45%、96.79%。采用填充法,通过玉米粉填充茎秆与容器间隙获得体积,利用精度为0.001 g的JA5003型电子天平测定质量,计算得到表皮和内芯平均密度为944.30、782.60 kg/m³。利用YYD-1型茎秆强度测定仪(浙江托普仪器有限公司)在SANS-CMT6104型微机控制电子万能试验机(深圳市新三思材料检测有限公司)上进行茎秆弯曲试验,根据复合材料力学理论^[19],参考GB/T 1456—2021《夹层结构弯曲性能试验方法》得出内芯、表皮弯曲剪切模量分别为2.13、5.07 MPa。

1.2 力学特性测定

为精确建立收获期油菜薹夹持中段茎秆离散元模型,对其茎秆进行力学试验,为建立茎秆离散元模型及粘结参数标定提供依据。在油菜薹机械化收获过程中,油菜薹植株被切割、夹持输送、打捆等作业时,夹持中段茎秆所受力学特性是影响油菜薹收获损伤率的重要依据,其机械力学特性可视为各种外力的叠加,而复杂的力学行为主要可分解为弯曲、剪切和径向压缩等基本力学行为。

1.2.1 试验仪器与试样制备

利用SANS-CMT6104型微机控制电子万能试验机配合YYD-1型茎秆强度测定仪进行力学特性试验。仪器设备如图2所示。

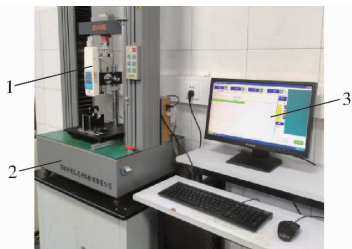


图2 力学特性测试仪器

Fig.2 Mechanical properties test instrument

1. 强度测定仪 2. 万能试验机 3. 计算机

在制备试样时,选取试样在中段茎秆直径测量平均值15.02 mm左右,制备时不保留节,试样不破裂,并对两端面进行修磨平整,使得两端面相互平行,并与轴线垂直。截取夹持中段茎秆中间段长度

为100 mm的茎秆,预制12根茎秆,均分为2组,分别作为茎秆弯曲和剪切试样;截取夹持中段茎秆中间段长度为100 mm的茎秆,预制6根去除其表皮进行内芯弯曲试样,截取夹持中段茎秆中间部位长度为20 mm的茎秆,预制6根作为径向压缩试样。

1.2.2 试验方法与试验结果

试验时,下夹具固定,上夹具以加载速度200 mm/min对试样施加载荷,预紧力为5 N,更换不同试验夹具进行相应力学特性试验。同类试验重复6次,为减小试验误差,去除最大值和最小值后的4次试验值,取其平均值。保存同类试验加载过程中“时间-载荷”曲线图,用于后续与仿真试验对比分析。

(1)弯曲试验:采用三点弯曲试验方法。固定两端支撑点间距为40 mm,两端外延长度分别预留20 mm。其中上压头为拱形压头,拱形厚度为8 mm,内宽为30 mm,使试样在载荷作用下发生弯曲的同时,试样接触部分出现一定的径向挤压变形,跨中挠度增量通过设定万能试验机移动衡量的位移来实现,随着位移的增加,试样折断,并伴有清脆的断裂声,具有脆性。试样断裂时试验停止,此时弯曲力达到最大。去除试验最大值和最小值后,获得4次试验茎秆最大弯曲力分别为50.70、46.60、47.90、46.90 N,结果取平均值为48.03 N;其中茎秆弯曲平均扰度为8.28 mm。

(2)剪切试验:更换安装上端剪切刀具,参照弯曲试验操作过程,将试样水平插入固定在下端工作台上的一对圆管夹具内,确保刀具剪切面垂直对准下端夹具中心位置。当增大到最大载荷时,试样剪切力达到最大值,并伴有轻微的撕扯现象,最终试样因剪切而断裂。去除试验最大值和最小值后,获得4次试验茎秆的最大剪切力分别为55.90、54.30、62.80、51.50 N,结果取平均值56.13 N。

(3)径向压缩试验:更换相应夹具,将上、下平行压板夹具正确安装,参照弯曲试验操作过程,将试样垂直于油菜薹生长方向平稳地放入下端压板中间位置,通过上夹具的向下位移在试样工作区内产生径向压缩力,最终使试样因压缩而破坏。在试验现场观察发现,随着位移的增加,试样内芯有液体流出,茎秆出现破裂声时停止试验,第1个峰值作为茎秆最大径向抗压力,并记录相应径向压缩量。试验结束后,试样有明显不可恢复变形,同时表皮出现开裂,并有部分与内芯分离。去除试验最大值和最小值后,获得4次试验茎秆的最大径向抗压力分别为72.60、86.80、70.90、63.60 N,结果取平均值73.48 N。

2 茎秆离散元仿真模型建立

2.1 模型选择与连接力定义

在 EDEM 仿真软件中, Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型可用于模拟物料破坏、断裂等问题^[20-21]。根据梁理论^[20], 计算得到 Bonding 键之间的法向极限应力和切向极限应力, 计算公式为

$$\sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A_b} + \frac{2M_t}{J}R_b \quad (1)$$

$$\tau_{\max} < \frac{-F_n}{A_b} + \frac{M_n}{J}R_b \quad (2)$$

式中 σ_{\max} ——法向极限应力, MPa

τ_{\max} ——切向极限应力, MPa

F_n ——颗粒 Bonding 键所受法向力, N

M_t ——颗粒 Bonding 键所受切向力矩, N·m

M_n ——颗粒 Bonding 键所受法向力矩, N·m

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

在油菜薹机械化有序收获过程中, 油菜薹夹持中段茎秆可简化为表皮和内芯两种材料复合形成, 在 EDEM 软件中选取两种不同材料属性的颗粒 (Skin 颗粒和 Core 颗粒) 分别建立茎秆的表皮和内芯, 采用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型, 通过 Bonding 键将表皮颗粒与表皮颗粒之间、内芯颗粒与内芯颗粒之间、表皮颗粒与内芯颗粒之间连接在一起, 使得表皮与表皮、内芯与内芯及表皮与内芯之间都有一定的连接力, 且 3 种连接力大小不同, 即组内 (表皮-表皮之间和内芯-内芯之间) 和组间 (表皮-内芯之间) 的 Bonding 键参数有所差异。由于内芯属于无纤维材料, 细胞内充满了液体, 在建模过程中将内芯等效为各向同性结构。而表皮是通过沿着轴向方向的纤维由强度相对低的材料粘合在一起的, 在建模过程中将表皮看作各向异性结构, 在表皮条状纤维内 (颗粒之间的轴向) 和表皮条状纤维之间 (颗粒之间的径向) 设置两种接触参数相同且 Bonding 键不同的 Skin1 颗粒和 Skin2 颗粒, 以实现表皮在强度水平上, 其轴向与径向存在各向异性。

2.2 茎秆仿真模型构建

离散元仿真模型的参数准确性直接影响研究结果的可靠性^[22]。利用 EDEM 仿真软件中元颗粒模型中的基本球形颗粒构建茎秆仿真模型, 在创建基本球形颗粒时, 须设置颗粒物理半径和接触半径, 以及颗粒本征参数与表面接触参数。其中颗粒接触半径无实际物理意义, 但接触半径是判别是否在颗粒间添加 Bonding 键的重要依据, 其大小在很大程度上

上决定了创建的颗粒所拥有的 Bonding 键数量, 只有在接触半径层面上发生重叠的颗粒之间才会被施加 Bonding 键, 此时颗粒之间产生粘结力, 设置合适的颗粒接触半径, 颗粒间生成相应 Bonding 键, 使茎秆离散元模型具有一定的柔性特征。

由于颗粒本征参数与真实参数数值一致, 考虑实际机械化有序收获作业情况和夹持段茎秆物理基本特性, 内芯被表皮包裹, 本文将试样茎秆组内与组间、试样茎秆与钢板间的表面接触参数设置为一致。参考文献 [11, 22 - 23] 确定本试验中表皮与内芯的泊松比和表面接触参数, 以及钢板的泊松比、密度和剪切模量。油菜薹茎秆的本征参数和表面接触参数如表 1 所示。

表 1 菜薹夹持中段茎秆本征参数和表面接触参数
Tab.1 Intrinsic parameters and surface contact parameters of stem in middle section of rape shoots clamping

参数	数值
表皮泊松比	0.33
内芯泊松比	0.33
钢板泊松比	0.30
表皮密度/(kg·m ⁻³)	944.30
内芯密度/(kg·m ⁻³)	782.60
钢板密度/(kg·m ⁻³)	7850
表皮剪切模量/MPa	5.07
内芯剪切模量/MPa	2.13
钢板剪切模量/MPa	7.94 × 10 ⁴
表皮-内芯碰撞恢复系数	0.4
表皮-表皮碰撞恢复系数	0.4
表皮-钢碰撞恢复系数	0.4
内芯-内芯碰撞恢复系数	0.4
表皮-内芯静摩擦因数	0.2
表皮-表皮静摩擦因数	0.2
表皮-钢静摩擦因数	0.2
内芯-内芯静摩擦因数	0.2
表皮-内芯滚动摩擦因数	0.01
表皮-表皮滚动摩擦因数	0.01
表皮-钢滚动摩擦因数	0.01
内芯-内芯滚动摩擦因数	0.01

根据实际测定的油菜薹中段茎秆尺寸, 设置表皮颗粒物理半径和内芯颗粒物理半径分别为 1.09、1.08 mm; 表皮颗粒接触半径和内芯颗粒接触半径分别为 1.2、2.4 mm。在 EDEM 仿真中, 随着仿真系统中颗粒数目的增多, 计算机的运算量呈几何倍数增加。因此, 为有效减少仿真时间, 提高仿真效率, 在保证模型误差较小的前提下尽量减少颗粒数量, 应用三轴空间坐标法, 采用有限的颗粒精准构建所需模型物理结构。具体方法为: 将夹持段茎秆近似为圆柱体, 在空间坐标系 OXYZ 中以 XOY 作为茎秆

的横截面, Z 轴作为茎秆的轴向方向, 点 $O(0,0,0)$ 为茎秆横截面的圆心坐标, 颗粒位置由其球心 X 、 Y 、 Z 三轴坐标确定, 横截面颗粒按树状呈圆周分布, 将所有构建的元颗粒横截面沿轴向无间隙叠加, 最终构建出所需长度的模型物理结构。

根据三轴空间坐标法, 元颗粒坐标系借助 PyCharm 软件应用 Python 语言进行程序编程, 开发出多边形截面颗粒茎秆坐标生成器_v0.2, 确定仿真模型表皮多边形边数为 18, 内芯多边形边数为 12 和 6, 通过添加表皮和内芯颗粒物理半径与茎秆试样实际尺寸相同, 设置全局变量, 在后处理界面分别提取所生成的 Skin1、Skin2、Core 颗粒的三维坐标数据, 其中茎秆模型横截面 Skin1、Skin2 和 Core 颗粒数量分别为 9、9、18 个。设置颗粒工厂, 生成单根茎秆离散元仿真模型, 最终测得模型直径为 14.91 mm, 导出模型。将仿真时间归零, 可作为颗粒模板, 进行后续仿真调用。以茎秆弯曲试样为例, 双层离散元基本模型如图 3 所示。在此模型基础上, 附加 Bonding 模型, 添加相应的粘结参数, 茎秆双层离散元模型创建的 Bonding 键参数共 4 组, 4 组 Bonding 键之间的关系分别为内芯颗粒之间、表皮颗粒与内芯颗粒之间、表皮颗粒之间轴向、表皮颗粒之间径向, 如图 4 所示。

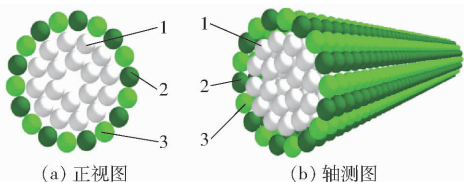


图 3 茎秆双层离散元基本模型

Fig. 3 Basic models of stem double-layer discrete element

1. Core 颗粒 2. Skin1 颗粒 3. Skin2 颗粒

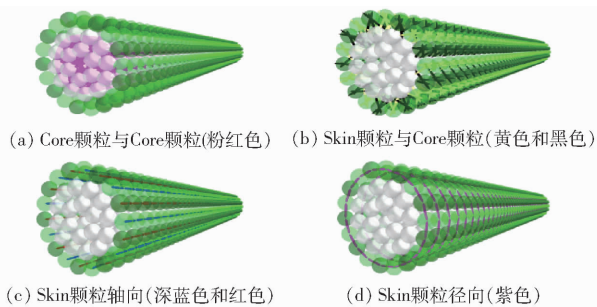


图 4 茎秆双层离散元模型 Bonding 键构成示意图

Fig. 4 Stem double-deck discrete element mode Bonding

仿真模型精度对颗粒间的运动学响应特性有较大影响, 根据 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型理论, 颗粒之间 Bonding 键强度主要由法向接触刚度、切向接触刚度、法向极限应力、切向极限应力和粘结半径等粘结参数决定。

颗粒在 Hertz - Mindlin with Bonding 模型接触

过程产生相互作用时, 法向接触刚度、切向接触刚度、法向极限应力和切向极限应力与重叠量有关, 并依据接触过程进行实时计算, 随着步长的增加而增加, 无法直接测量, 因此需要进行标定。

2.3 茎秆力学仿真模型

在茎秆力学仿真试验中, 相应仿真试验茎秆模型与实际试样长度相同, 为便于仿真模拟及计算, 将与茎秆力学试验无关的部件除去, 应用三维软件 SolidWorks 建立相应试验夹具模型, 以 .stl 格式导入 EDEM 软件中。为保证仿真的连续性, 综合考虑仿真精度与效率, 设置仿真计算固定时间步长为 2×10^{-6} s, 参照实测试验方法, 上夹具以 200 mm/min 加载速度对模型施加载荷, 预紧力为 5 N。茎秆力学仿真离散元几何模型如图 5 所示。

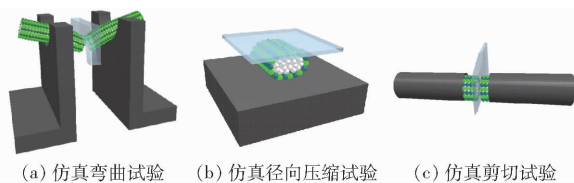


图 5 茎秆力学仿真试验

Fig. 5 Stem mechanical simulation tests

3 茎秆离散元粘结参数标定与力学性能分析

3.1 粘结参数范围选取

由于内芯等效为各向同性, 表皮具有各向异性特性, 设定粘结参数内芯-内芯的法向接触刚度和切向接触刚度、内芯-内芯的法向极限应力和切向极限应力、内芯-表皮的法向接触刚度和切向接触刚度、内芯-表皮的法向极限应力和切向极限应力一致。为探索其影响规律, 通过多次预仿真弯曲试验并结合饲料油菜、藤茎类物料类似物料仿真参数^[11,22], 适当扩大试验参数范围, 设定其粘结参数取值范围如表 2 所示。

表 2 菜薹夹持中段茎秆模型粘结参数

Tab. 2 Bonding parameters of stem model in middle section of rape shoots clamping

参数	数值
内芯-内芯法/切向接触刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$4 \times 10^6 \sim 4 \times 10^7$
内芯-内芯法/切向极限应力/Pa	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$
表皮-内芯法/切向接触刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$2 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$
表皮-内芯法/切向极限应力/Pa	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$
表皮-表皮法向接触刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$1 \times 10^9 \sim 9 \times 10^9$
表皮-表皮切向接触刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$1 \times 10^9 \sim 9 \times 10^9$
表皮-表皮法向极限应力/Pa	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$
表皮-表皮切向极限应力/Pa	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$

3.2 标定试验方法

弯曲试验可以反映茎秆内侧被径向压缩, 外侧

被拉伸,当张力达到峰值时,出现断裂。根据表2列出的各粘结参数取值范围,开展茎秆仿真弯曲试验,以最大弯曲力为试验目标值,采用仿真逼近的方法,不断调整茎秆粘结参数进行标定。试验评价指标为仿真最大弯曲力与实际最大弯曲力的相对误差最小值。

3.3 试验设计与结果分析

3.3.1 Plackett - Burman 试验

应用 Design-Expert 13.0.12 软件设计 Plackett - Burman 筛选试验^[24],以最大弯曲力为响应值,筛选出对弯曲力影响显著的粘结参数,如表3所示。表4为Plackett - Burman 试验的设计方案及仿真结果,表中 $X_1 \sim X_8$ 为表3中各因素的编码值。

表3 Plackett - Burman 试验因素编码

Tab.3 Coding of factors of Plackett - Burman test

因素	编码	
	-1	1
内芯-内芯法/切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	4 × 10 ⁶	4 × 10 ⁷
内芯-内芯法/切向极限应力/Pa	1 × 10 ⁸	1 × 10 ⁹
表皮-内芯法/切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	2 × 10 ⁸	2 × 10 ⁹
表皮-内芯法/切向极限应力/Pa	1 × 10 ⁸	1 × 10 ⁹
表皮-表皮法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	1 × 10 ⁹	9 × 10 ⁹
表皮-表皮切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	1 × 10 ⁹	9 × 10 ⁹
表皮-表皮法向极限应力/Pa	1 × 10 ⁸	1 × 10 ⁹
表皮-表皮切向极限应力/Pa	1 × 10 ⁸	1 × 10 ⁹

表4 Plackett - Burman 试验设计方案及结果

Tab.4 Design and results of Plackett - Burman test

序号	因素								大弯曲力/N
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	56.70
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	68.20
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	51.70
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	38.00
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	68.80
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	10.78
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	52.40
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	15.78
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	51.50
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	35.00
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	71.00
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	9.28

表5 Plackett - Burman 试验影响率分析结果显示:在仿真弯曲试验中,因素 X_1 、 X_3 、 X_5 对弯曲力影响显著,其余参数影响极小。因此,在后续的最陡爬坡试验以及 Box - Behnken 试验中只开展 X_1 、 X_3 、 X_5 共3个影响显著的粘结参数标定及优化,而其余非显著性因素取中间水平,即 x_2 取 5.5×10^8 Pa、 x_4 取 5.5×10^8 Pa、 x_6 取 5×10^9 N/m、 x_7 取 5.5×10^8 Pa、

x_8 取 5.5×10^8 Pa。

表5 Plackett - Burman 试验影响率分析

Tab.5 Analysis of contribution in Plackett - Burman test

因素	效应	均方和	影响率/%
X_1	11.50	396.98	7.18
X_2	0.20	0.12	0.002
X_3	27.21	2221.15	40.20
X_4	-0.46	0.64	0.012
X_5	30.18	2731.89	49.45
X_6	2.46	18.20	0.33
X_7	2.67	21.39	0.39
X_8	-0.96	2.78	0.05

3.3.2 最陡爬坡试验

表6为最陡爬坡试验设计方案及结果(x_1 、 x_3 、 x_5 为 X_1 、 X_3 、 X_5 对应实际值),结果表明:试验4相对误差最小,为1.81%。粘结参数的低、中、高水平选取: x_1 为 1.84×10^7 、 2.56×10^7 、 3.28×10^7 N/m; x_3 为 9.2×10^8 、 1.28×10^9 、 1.64×10^9 N/m; x_5 为 4.2×10^9 、 5.8×10^9 、 7.4×10^9 N/m。

表6 最陡爬坡试验设计方案与结果

Tab.6 Design and results of the steepest ascent test

序号	x_1 / (N·m ⁻¹)	x_3 / (N·m ⁻¹)	x_5 / (N·m ⁻¹)	最大弯曲力/N	相对误差/%
1	4.00×10^6	2.00×10^8	1.0×10^9	8.95	81.37
2	1.12×10^7	5.60×10^8	2.6×10^9	22.10	53.99
3	1.84×10^7	9.20×10^8	4.2×10^9	36.50	24.01
4	2.56×10^7	1.28×10^9	5.8×10^9	48.90	1.81
5	3.28×10^7	1.64×10^9	7.4×10^9	61.00	27.00
6	4.00×10^7	2.00×10^9	9.0×10^9	71.60	49.07

3.3.3 显著参数的 Box - Behnken 试验和回归模型

设计内芯-内芯法/切向接触刚度、表皮-内芯法/切向接触刚度、表皮-表皮法向接触刚度的仿真试验因素编码,如表7所示。

表7 仿真试验因素编码

Tab.7 Coding of factors of simulation test

编码	因素		
	x_1	x_3	x_5
-1	1.84×10^7	9.20×10^8	4.2×10^9
0	2.56×10^7	1.28×10^9	5.8×10^9
1	3.28×10^7	1.64×10^9	7.4×10^9

表8为 Box - Behnken 试验设计方案及结果,采用 Design-Expert 软件建立最大弯曲力与3个自变量编码值的二阶回归模型

$$F' = 48.70 + 0.675X_1 + 3.43X_3 + 8.45X_5 + 0.20X_1X_3 + 0.05X_1X_5 - 0.35X_3X_5 - 0.25X_1^2 + 0.55X_3^2 - 0.35X_5^2 \quad (3)$$

表8 Box - Behnken 试验设计方案及结果

Tab.8 Design and results of Box - Behnken test

序号	X_1	X_3	X_5	最大弯曲力/N
1	-1	-1	0	45.20
2	1	-1	0	46.40
3	-1	1	0	51.20
4	1	1	0	53.20
5	-1	0	-1	38.80
6	1	0	-1	39.80
7	-1	0	1	56.30
8	1	0	1	57.50
9	0	-1	-1	36.80
10	0	1	-1	44.80
11	0	-1	1	53.70
12	0	1	1	60.30
13	0	0	0	48.70
14	0	0	0	48.70
15	0	0	0	48.70
16	0	0	0	48.70
17	0	0	0	48.70

对表8的试验模型进行方差分析,结果如表9所示,结果表明:方程模型 $P < 0.0001$, 呈现极显著性 ($P < 0.01$), 在统计学上是有意义的, 表明该模型因变量(最大弯曲力)与所有自变量之间均呈现极显著性; 决定系数 $R^2 = 0.9978$, 校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.9949$, 二者均接近1, 表明拟合方程有意义, 预测系数 $R^2_{pre} = 0.9641$ 与校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.9949$ 基本一致, 差值小于0.2, 其可靠度高。表9结果表明: 各因素对最大弯曲力的影响由大到小为: X_5 、 X_3 、 X_1 ; 在交互作用下, 仅 X_3^2 交互作用项对最大弯曲力影响显著, 其余交互作用项影响均不显著。

表9 Box - Behnken 试验方差分析

Tab.9 ANOVA of Box - Behnken test

方差来源	均方	自由度	F	P
模型	74.59	9	345.79	<0.0001**
X_1	3.64	1	16.90	0.0045**
X_3	93.85	1	435.04	<0.0001**
X_5	571.22	1	2648.04	<0.0001**
X_1X_3	0.16	1	0.7414	0.4176
X_1X_5	0.01	1	0.0464	0.8357
X_3X_5	0.49	1	2.27	0.1755
X_1^2	0.2632	1	1.22	0.3059
X_3^2	1.27	1	5.90	0.0454*
X_5^2	0.5158	1	2.39	0.1659
残差	0.2157	7		
失拟项	0.5033	3		
纯误差	0.0000	4		
总和	672.83	16		

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$), * 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

3.3.4 仿真最优参数求解与力学特性对比分析

以实测最大弯曲力 48.03 N 为目标, 利用 Design-Expert 软件得出的优化解有若干组, 最终选取与茎秆弯曲试验实测值相对误差在 1% 内的 3 组优化解, 分别为: 1.94×10^7 、 9.56×10^8 、 6.28×10^9 N/m; 2.02×10^7 、 9.40×10^8 、 6.28×10^9 N/m; 2.39×10^7 、 1.10×10^9 、 5.99×10^9 N/m。

油菜薹机械化有序收获过程中, 茎秆不仅具有抗弯性, 还具有抗剪、抗压等力学特性。为进一步验证茎秆模型粘结参数的可行性, 确定茎秆双层粘结离散元模型在受力过程中数值模拟的准确度, 参照 1.2.2 节力学实测试验方法, 采用粘结参数优化解构建力学仿真模型进行离散元仿真剪切和径向压缩试验, 并与相关实测力学性能进行对比分析。模型与标准实测试样尺寸相同, 试验结果如表 10 所示。表中序号 1、2、3 对应 3 组优化解。

表10 实测力学试验与仿真试验结果对比

Tab.10 Comparison of measured mechanical test and simulation test results

项目	序号	最大弯曲力/N	弯曲扰度/mm	最大剪切力/N	最大径向压缩力/N
实测均值		48.03	8.28	56.13	73.48
仿真值	1	47.80	6.86	56.70	75.60
	2	48.00	6.86	62.50	76.70
	3	48.40	6.56	58.40	84.20
相对误差/%	1	0.48	17.15	1.02	2.89
	2	0.06	17.15	11.35	4.38
	3	0.77	20.77	4.04	14.59

由表 10 可知, 当内芯-内芯法/切向接触刚度为 1.94×10^7 N/m、表皮-内芯法/切向接触刚度为 9.56×10^8 N/m、表皮-表皮法向接触刚度为 6.28×10^9 N/m 时, 试验相对误差最小, 表明模型具有可靠性, 仿真模型可代替实际收获期油菜薹机械化夹持段茎秆进行相关力学试验。其中弯曲试验中, 最大弯曲力和扰度相对误差分别为 0.48%、17.15%; 剪切试验时, 最大剪切力相对误差为 1.02%; 径向压缩试验, 最大径向抗压力相对误差为 2.89%。最后, 对该组最优值的仿真时间-载荷与实测时间-载荷曲线进行对比, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 虽然仿真与实测曲线有一定差异, 但曲线整体趋势一致, 在曲线上升阶段呈线性关系。在实际试验过程中, 弯曲和剪切仿真与实测得到的茎秆破坏在形状上均无明显差异。在仿真径向压缩试验过程中, 仿真压缩量与实测试验位移相同时, 压缩力数值与实际数值基本相等, 但物料破坏情况还存在一定差异。

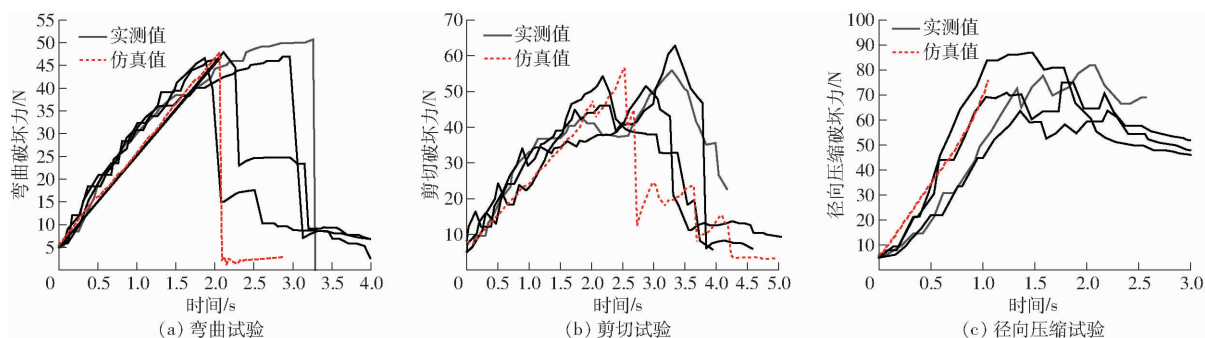


图6 实测力学试验与仿真试验时间-载荷曲线对比

Fig.6 Time-load curves of actual mechanical test and simulation test

4 结论

(1)以收获期油菜薹夹持段茎秆为研究对象,测定和计算了其茎秆与组成部分的基本物性参数。为体现茎秆的表皮与内芯的力学差异性,根据三轴空间坐标法,借助 PyCharm 软件应用 Python 语言进行程序编程,通过 EDEM 仿真软件 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型,最终构建茎秆双层粘结模型。

(2)以实际最大弯曲力为响应值,采用仿真逼近预测法对茎秆双层粘结模型参数进行了标定。通过 Plackett-Burman 试验设计筛选出内芯-内芯的法向/切向接触刚度、表皮-内芯法向/切向接触刚度、表皮-表皮法向接触刚度 3 个因素对最大弯曲力影响显著,由最陡爬坡试验缩小显著性参数标定范围,其区间值分别为 $1.84 \times 10^7 \sim 3.28 \times 10^7$ Pa、 $9.2 \times 10^8 \sim 1.64 \times 10^9$ Pa、 $4.2 \times 10^9 \sim 7.4 \times 10^9$ Pa。进一步通过 Box-Behnken 试验和方差分析得出若干组优化解,确定 3 组与茎秆弯曲试验实测值相对误差在 1% 内的优化解。

(3)利用标定后的 3 组优化参数构建茎秆双层

粘结模型,进行剪切和径向压缩仿真试验与物理试验的力学性能对比分析。以最大弯曲力、弯曲扰度、最大剪切力和最大径向抗压力的综合误差为最优值选取标准,结果分析得出优化解内芯-内芯法/切向接触刚度为 1.94×10^7 N/m、表皮-内芯法/切向接触刚度为 9.56×10^8 N/m、表皮-表皮法向接触刚度为 6.28×10^9 N/m 时,综合误差最小。其中最大弯曲力、弯曲扰度、最大剪切力和最大径向抗压力误差分别为 0.48%、17.15%、1.02% 和 2.89%。优化后的粘结参数进一步验证了模型的有效性和准确性,相比采用单层茎秆建模方法建立的离散元模型具有更高精度,能有效地反映茎秆表皮与内芯两者力学特性差异。

(4)油菜薹夹持段茎秆的力学特性是影响机械收获过程中作物动力学行为的主要因素,该研究可为探讨油菜薹收获机械作业机理,开展机具耦合互动等相关研究提供理论指导。由于茎秆结构复杂,在 EDEM 软件中 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型并不能完全体现其力学特性,在径向压缩仿真过程中,仿真模型与实际试验物料破碎情况还存在一定差异。

参 考 文 献

- [1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese)
- [2] 任韵,朱建方,林宝刚,等. 浙江省油菜薹产业发展现状与对策[J]. 长江蔬菜,2021(4):32-34.
REN Yun, ZHU Jianfang, LIN Baogang, et al. Development status and countermeasures of rape shoots industry in Zhejiang Province[J]. Vegetables of Yangtze River, 2021(4): 32-34. (in Chinese)
- [3] 田军,朱传霞,胡金荣,等. 湖南省油菜薹产业发展现状与思考[J]. 长江蔬菜,2020(2):24-28.
TIAN Jun, ZHU Chuanxia, HU Jinrong, et al. Development status and consideration of rape shoots industry in Hunan Province [J]. Vegetables of Yangtze River, 2020(2): 24-28. (in Chinese)
- [4] 林宝刚,任韵,柳寒,等. 不同生态区对油菜薹营养品质的影响及摘薹后产量表现[J]. 核农学报,2020,34(9):2071-2079.
LIN Baogang, REN Yun, LIU Han, et al. Effects of different ecological zones on nutritional quality of rape shoots and yield performance of rape shoots after picking[J]. Chinese Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(9): 2071-2079. (in Chinese)
- [5] 伍守军. 一种油蔬两用油菜薹的种植方法:201710926614.6[P]. 2017-10-08.

- [6] 王涛,王婧泽,张林,等. 多主茎对采用油菜薹产量的影响[J]. 长江蔬菜,2020(16):30-33.
WANG Tao,WANG Jingze,ZHANG Lin,et al. Effect of multiple main stems on yield of rape shoots[J]. Vegetables of Yangtze River,2020(16):30-33. (in Chinese)
- [7] 陈树人. 计算机模拟技术及其在农业工程中的应用[M]. 镇江:江苏大学出版社,2011.
- [8] 陈燕,曾泽钦,王杰,等. 收获机虚拟环境模型与仿真平台构建[J]. 农业机械学报,2019,50(7):159-166.
CHEN Yan,ZENG Zeqin,WANG Jie,et al. Virtual environment construction and simulation platform of harvesting machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):159-166. (in Chinese)
- [9] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报,2021,52(4):1-20.
ZENG Zhiwei,MA Xu,CAO Xiulong,et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):1-20. (in Chinese)
- [10] 史瑞杰,戴飞,赵武云,等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报,2022,53(10):146-155.
SHI Ruijie,DAI Fei,ZHAO Wuyun,et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):146-155. (in Chinese)
- [11] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):73-82. (in Chinese)
- [12] 赵吉坤,宋武斌,李晶晶. 基于 EDEM 的水稻秸秆建模及力学性能分析[J]. 土壤通报,2020,51(5):1086-1093.
ZHAO Jikun,SONG Wubin,LI Jingjing. Modeling and mechanical analysis of rice straw based on discrete element mechanical model[J]. Chinese Journal of Soil Science,2020,51(5):1086-1093. (in Chinese)
- [13] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(9):58-65.
ZHANG Fengwei,SONG Xuefeng,ZHANG Xuekun,et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(9):58-65. (in Chinese)
- [14] LEBLICK T,SMEETS B,VANMAERCKE S,et al. A discrete element approach for modelling bendable crop stems [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2016,124:141-149.
- [15] SADRMANESH V,CHEN Y. Simulation of tensile behavior of plant fibers using the discrete element method (DEM) [J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing,2018,114:196-203.
- [16] KOVAC S,RADICS J P,KERENYI G. A discrete element model for agricultural decision support [C] // Proceedings 31st European Conference on Modeling and Simulation,2017:488-494.
- [17] 邹舒畅,苏工兵,邵运果. 基于离散元法的苕麻茎秆分离装置仿真优化与试验[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):60-67.
ZOU Shuchang,SU Gongbing,SHAO Yunguo. Simulation optimization and experiment of separation device for ramite stalks based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(1):60-67. (in Chinese)
- [18] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报,2022,53(1):45-54.
LIU Yuchen,ZHANG Fengwei,SONG Xuefeng,et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2022,53(1):45-54. (in Chinese)
- [19] 王士杰. 复合材料力学引导[M]. 重庆:重庆大学出版社,1987.
- [20] 王国强. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [21] LU Z,NEGI S C,JOFRIET J C. A numerical model for flow of granular materials in silos. Part 1: model development [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1997,68(3):223-229.
- [22] HORABIK J,MOLENDI M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering,2016,147:206-225.
- [23] 郭茜,张西良,徐云峰,等. 基于 EDEM 的番茄秸秆切割性能仿真及试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):1017-1022.
GUO Qian,ZHANG Xiliang,XU Yunfeng,et al. EDEM-based simulation and experiment on tomato cane straw cutting performance [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2018,36(10):1017-1022. (in Chinese)
- [24] 朱惠斌,钱诚,白丽珍,等. 基于 Plackett-Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. 中国农业大学学报,2021,26(12):221-231.
ZHU Huibin,QIAN Cheng,BAI Lizhen,et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett-Burman design and response surface methodology [J]. Journal of China Agricultural University,2021,26(12):221-231. (in Chinese)