

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.009

苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定

陈涛¹ 衣淑娟¹ 李衣菲¹ 陶桂香¹ 曲善民² 李睿³

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学动物科技学院, 大庆 163319;

3. 太原理工大学机械与运载工程学院, 太原 030024)

摘要: 针对目前牧草收获、粉碎加工设备输送和切割等机构研究过程中离散元仿真缺乏准确模型的问题, 以含水率高、物理力学特性较为复杂的苜蓿现蕾期茎秆为研究对象, 借助 EDEM 仿真软件, 分别基于 Hertz - Mindlin (no slip) 和 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型对物理参数和粘结参数进行标定。以休止角和剪切试验为基础, 通过 Plackett - Burman 试验、Steepest ascent 试验和 Box - Behnken 试验确定了苜蓿茎秆的泊松比、剪切模量、碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等物理参数和法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力、临界切向应力、粘结半径等粘结参数。以确定的物理参数进行休止角仿真试验, 结果表明, 仿真休止角与物理试验休止角相对误差为 0.52%; 以确定的粘结参数进行剪切仿真试验, 结果表明, 仿真剪切破坏力与物理试验仿真破坏力相对误差为 0.86%, 说明所标定的参数能够真实反映苜蓿现蕾期茎秆的物理和力学特性。

关键词: 牧草; 苜蓿茎秆; 休止角; 剪切破碎; 离散元; 参数标定

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0091-10

OSID:



Establishment of Discrete Element Model and Parameter Calibration of Alfalfa Stem in Budding Stage

CHEN Tao¹ YI Shujuan¹ LI Yifei¹ TAO Guixiang¹ QU Shanmin² LI Rui³

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. College of Animal, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In view of lack of accurate models for discrete element simulation in the current research and development process of forage harvesting, crushing, processing equipment transportation and cutting, the alfalfa budding stem with high moisture content and complex physical and mechanical characteristics was taken as the research object. With the aid of EDEM simulation software, the physical parameters and bonding parameters were calibrated based on Hertz - Mindlin (no slip) and Hertz - Mindlin with bonding contact models respectively. Based on angle of repose and shear test, physical parameters such as Poisson's ratio, shear modulus, impact recovery coefficient, static friction coefficient, rolling friction coefficient and bonding parameters such as normal contact stiffness, tangential contact stiffness, critical normal stress, critical tangential stress and bonding radius of alfalfa stem were determined through Plackett - Burman test, the Steepest ascent test and Box - Behnken test. The relative error between the simulated angle of repose and the physical angle of repose was 0.52%. The results showed that the relative error between the simulated shear failure force and the physical test simulation failure force was 0.86%, which indicated that the calibrated parameters can truly reflect the physical and mechanical characteristics of alfalfa stems at the budding stage. It provided a reliable model and parameter calibration method for the discrete element simulation in the research and development process of forage machinery, and also provided a reference for the research and development, optimization design and power matching of the conveying and cutting mechanisms of forage harvesting and crushing processing equipment.

Key words: forage grass; alfalfa stem; angle of repose; shear crushing; discrete element; parameter calibration

收稿日期: 2022-09-12 修回日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52275246)和黑龙江省科技计划项目(YS20B10)

作者简介: 陈涛(1996—), 男, 博士生, 主要从事牧草粉碎机械研究, E-mail: 2841662304@qq.com

通信作者: 衣淑娟(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事牧草粉碎机械研究, E-mail: yishujuan_2005@126.com

0 引言

在牧草机械化收获、粉碎加工环节中,剪切是必不可少的一道工序。牧草的剪切特性研究,目前还没有与收获、粉碎等设备研发相结合,致使刀具的受力分析、机具的功率匹配不够精确。牧草的力学特性参数已成为牧草加工设备研发的制约因素。

农业机械与各类农业物料的接触作用及其对农业机械设计工作的影响是现代农业装备数字化设计重要内容和难点^[1]。离散元法作为一种基于不连续性假设的计算机数值模拟方法,可以用于仿真分析农业物料与机械装备间的相互作用关系,能够缩短研发周期,为现代农业装备数字化设计提供了手段,目前已在农业工程领域得到广泛应用^[2-3]。为了减小离散元仿真试验与实际试验的差异,国内外学者专门对物料参数标定的研究也在逐渐增多^[4-6]。

国内外现有的离散元仿真参数标定研究主要是针对各种农作物茎秆、土壤、种子等物料^[7-8]。对于牧草茎秆建立离散元模型的研究较少,尤其是结合牧草茎秆力学特性参数建立离散元柔性仿真模型的研究还未见报道。

苜蓿的收获阶段从现蕾期持续到盛花期,盛花期产量最高,但质量较差,现蕾期营养价值最高,因此大多数农户都选择在现蕾期对苜蓿进行收割^[9-11]。但苜蓿现蕾期茎秆含水率高,切割时需要的力较大,现有的切割机构刀片设计时并没有精确结合剪切力,致使强度不够,而且功率匹配不够精确,导致功耗较大。本文以苜蓿现蕾期茎秆为研究对象,利用 EDEM 离散元仿真软件分别基于 Hertz-Mindlin(no slip)和 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型建立苜蓿茎秆离散元刚性和柔性模型,通过 Plackett-Burman 试验、Steepest ascent 试验和 Box-Behnken 试验确定苜蓿茎秆的泊松比、剪切模量、碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等物理参数和法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力、临界切向应力、粘结半径等粘结参数。为牧草收获、粉碎加工设备输送和切割机构优化设计提供参考。

1 苜蓿茎秆本征参数测量

1.1 试验材料

试验所用苜蓿茎秆选自黑龙江省大庆市杜尔伯特县乾禾牧草种植基地。采集的苜蓿无病虫害、无明显机械损伤、在现蕾期自然状态下齐地刈割,去除枝叶,经多次测量与计算,得到其物理特性参数为:茎秆长度为 500 mm,茎秆直径为 3 mm,平均密度为

996 kg/m³,平均含水率为 78.4%。

1.2 苜蓿茎秆物理参数测量

建立苜蓿茎秆离散元模型所需要的物理参数包括泊松比、剪切模量,苜蓿茎秆-苜蓿茎秆和苜蓿茎秆-钢板的静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数,采用物料特性试验台和 CTM2050 型万能力学试验机对物理参数进行测量。

1.2.1 静摩擦因数

静摩擦因数是指最大静摩擦力与接触面间的正压力比值^[12]。本文利用斜面仪对苜蓿茎秆-苜蓿茎秆、苜蓿茎秆-钢板的静摩擦因数进行测量,测量装置如图 1 所示。试验前,将斜面仪底座水平放置,将测量平面调节为水平状态。

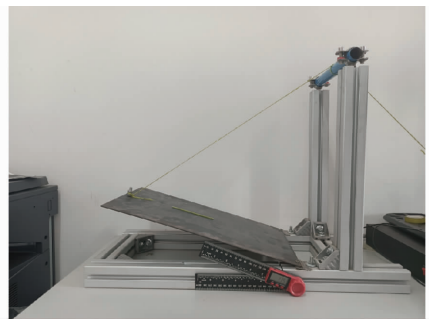


图 1 苜蓿茎秆静摩擦因数测量装置

Fig. 1 Measuring device for static friction coefficient of alfalfa stem

测量苜蓿茎秆-钢板的静摩擦因数时,将钢板用螺母固定在斜面仪的测量平面上,然后将苜蓿茎秆轴向沿测量平面的长度方向放置在钢板上,顺时针缓慢转动测量平面,观察到苜蓿茎秆在钢板上刚发生滑动时,停止转动,用量角器测量此时测量平面的倾斜角度,计算得到苜蓿茎秆与钢板之间的静摩擦因数为

$$f_s = \tan\alpha \quad (1)$$

式中 f_s ——苜蓿茎秆-钢板静摩擦因数

α ——静摩擦因数临界角, (°)

测量苜蓿茎秆-苜蓿茎秆的静摩擦因数时,用均匀排列的苜蓿茎秆排替换钢板即可。经过多次测量,得到苜蓿茎秆-苜蓿茎秆静摩擦因数在 0.3 ~ 0.5 之间,苜蓿茎秆-钢板的静摩擦因数在 0.4 ~ 0.6 之间。

1.2.2 滚动摩擦因数

滚动摩擦因数是指一个物体在另一个物体表面作无滑移的纯滚动或有滚动趋势时,物体在接触面产生的形变对滚动的阻碍作用^[13]。将苜蓿茎秆径向沿测量平面的长度方向放置在钢板上,顺时针缓慢转动测量平面,观察到苜蓿茎秆在钢板上刚发生纯滚动时,停止转动,用量角器测量此时测量平面的

倾斜角度,测量装置和受力分析如图2所示。

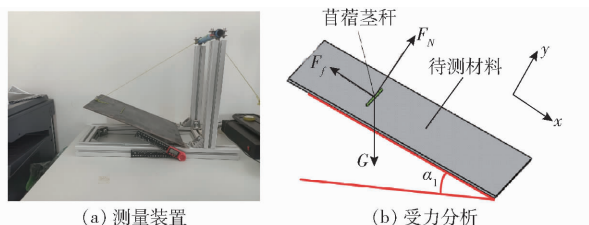


图2 苜蓿茎秆滚动摩擦因数测量装置与受力分析图

Fig.2 Alfalfa rolling friction coefficient measurement device and force analysis diagram

苜蓿茎秆在滚动的过程中,在斜面上所受到滚动摩擦力偶矩与斜面对其支持力成正比,当斜面倾斜到一定程度时,苜蓿茎秆产生滚动趋势。由受力分析可得

$$M = fF_N \quad (2)$$

$$F_N - G\cos\alpha_1 = 0 \quad (3)$$

$$Gr\sin\alpha_1 - M = 0 \quad (4)$$

$$f = \frac{M}{F_N} = r\tan\alpha_1 \quad (5)$$

式中 M ——滚动摩擦力偶矩, $N \cdot m$

f ——滚动摩擦因数

F_N ——斜面对苜蓿茎秆的支持力, N

G ——苜蓿茎秆重力, N

α_1 ——苜蓿茎秆滚动摩擦临界角, $(^\circ)$

r ——苜蓿茎秆半径, mm

测量苜蓿茎秆-苜蓿茎秆的滚动摩擦因数时,用均匀排列的苜蓿茎秆排替换钢板即可。经过多次试验可以获得苜蓿茎秆-苜蓿茎秆的滚动摩擦因数在 0.05 ~ 0.25 之间,苜蓿茎秆-钢板的滚动摩擦因数在 0.1 ~ 0.3 之间。

1.2.3 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数是衡量物体变性后恢复原来形状能力的参数,为碰撞结束时接触点的瞬时法向分离速度与碰撞前法向接近速度的比值^[14]。测量原理如图3所示。

试验时,使苜蓿茎秆从碰撞板高度为 H 的落料口下落,做自由落体运动,与下方的碰撞板进行碰撞,碰撞板的倾斜角度可以调节,而且碰撞板上面的碰撞材料可以根据试验目的进行更换。忽略空气阻力,此过程苜蓿茎秆仅受重力作用,根据运动学原理,苜蓿茎秆与碰撞板发生接触碰撞前的瞬时运动速度计算公式为

$$\begin{cases} v_0 = gt \\ H = \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 v_0 ——苜蓿茎秆发生碰撞前速度, m/s

t ——苜蓿茎秆自由下落时间, s

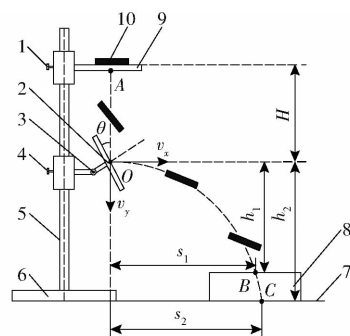


图3 苜蓿茎秆碰撞恢复系数测量原理图

Fig.3 Motion analysis of alfalfa stem collision recovery coefficient

- 1.4. 锁紧螺母
2. 碰撞板
3. 碰撞板角度调节螺母
5. 支撑杆
6. 支撑底座
7. 试验台平面
8. 接料盘
9. 物料下落基准面
10. 苜蓿茎秆

由式(6)可知苜蓿茎秆在碰撞板点 O 处碰撞前的瞬时速度 v_0 为

$$v_0 = \sqrt{2gH} \quad (7)$$

假设苜蓿茎秆与碰撞板碰撞结束后反弹的运动轨迹是做平抛运动,即水平方向做分速度为 v_x 的匀速直线运动,竖直方向做分速度为 v_y 的匀加速直线运动,忽略苜蓿茎秆几何形状的影响,可得苜蓿茎秆反弹的运动轨迹为抛物线,根据平抛运动原理可得

$$\begin{cases} s = v_x t_1 \\ h = v_y t_1 + \frac{1}{2}gt_1^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 t_1 ——苜蓿茎秆反弹运动时间, s

s ——苜蓿茎秆水平方向运动的位移, m

h ——苜蓿茎秆碰撞后自由落体高度, m

由于从苜蓿茎秆在落料口自由下落到与碰撞板发生碰撞的时间 t 难以准确测得,所以很难准确求得反弹后的水平分速度 v_x 和竖直分速度 v_y ,调整接料盘高度,进行 2 次试验,采用高速摄像机拍摄 2 组不同接料盘高度条件下苜蓿茎秆的反弹轨迹,分别测量水平位移 s_1 、 s_2 和竖直位移 h_1 、 h_2 ,得到苜蓿茎秆水平方向分速度 v_x 和竖直方向分速度 v_y ,计算公式为

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gs_1s_2(s_1 - s_2)}{2(h_1s_2 - h_2s_1)}} \\ v_y = \frac{h_1v_x}{s_1} - \frac{gs_1}{2v_x} \end{cases} \quad (9)$$

根据碰撞恢复系数的定义可得计算公式为

$$e = \frac{v_n}{v_{0n}} = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2} \cos\left(\theta + \arctan \frac{v_y}{v_x}\right)}{v_0 \sin\theta} \quad (10)$$

式中 e ——碰撞恢复系数

v_n ——碰撞后法向分离速度, m/s

v_{0n} ——碰撞前法向接近速度, m/s

θ ——碰撞板倾斜角度, ($^{\circ}$)

经过多次试验测量,求得苜蓿茎秆-苜蓿茎秆的碰撞恢复系数在 0.3 ~ 0.5 之间,苜蓿茎秆-钢板的碰撞恢复系数在 0.4 ~ 0.6 之间。

1.2.4 泊松比和剪切模量

本文在测量苜蓿茎秆泊松比和剪切模量时,采用 CTM2050 型万能力学试验机对苜蓿茎秆进行压缩试验,试验仪器如图 4 所示。

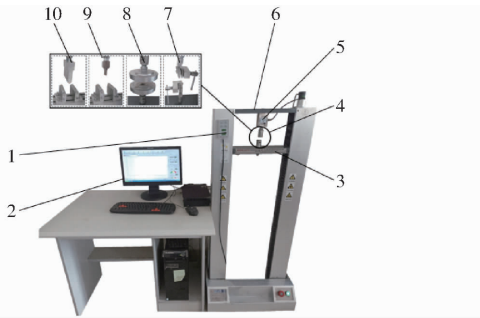


图 4 CTM2050 型微机控制电子万能力学试验机

Fig. 4 CTM2050 microcomputer-controlled electronic mechanics universal testing machine

1. 控制手柄
2. 计算机
3. 下活动梁
4. 夹具安装座
5. 力传感器
6. 上固定梁
7. 拉伸夹具
8. 压缩夹具
9. 剪切夹具
10. 弯曲夹具

泊松比是指材料在单向受拉或受压时,径向正应变与轴向正应变的绝对值比值,也叫横向变形系数,它是反映材料横向变形的弹性常数^[15]。采用定义法对苜蓿茎秆泊松比进行测量,计算公式为

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \right| = \frac{\Delta L/L}{\Delta H/H} \quad (11)$$

式中 μ ——泊松比

ε_x ——苜蓿茎秆径向应变

ε_y ——苜蓿茎秆轴向应变

ΔL ——苜蓿茎秆径向绝对变形量, mm

L ——苜蓿茎秆初始直径, mm

ΔH ——苜蓿茎秆轴向绝对变形量, mm

H ——苜蓿茎秆初始长度, mm

制作长度为 10 mm、平均直径为 3 mm 的苜蓿茎秆作为试验材料,进行压缩试验时,设定加载速度为 0.5 mm/s,加载时间为 10 s,加载结束后利用数显游标卡尺分别测量苜蓿茎秆径向和轴向变形量,进行 5 次重复试验。压缩过程如图 5 所示。

由式(11)计算得到苜蓿茎秆泊松比在 0.3 ~ 0.6 之间。

剪切模量是材料在剪切应力作用下,在弹性变形比例极限范围内,切应力与切应变的比值。它表征材料抵抗切应变的能力,计算公式为

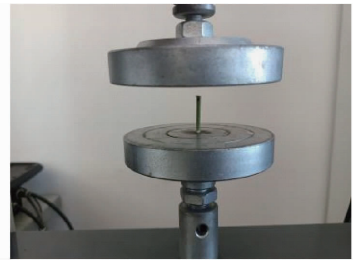


图 5 苜蓿茎秆压缩试验

Fig. 5 Alfalfa stem compression test

$$\begin{cases} G_1 = \frac{E}{2(1+\mu)} \\ E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \end{cases} \quad (12)$$

式中 G_1 ——苜蓿茎秆剪切模量, Pa

E ——苜蓿茎秆弹性模量, Pa

σ ——最大压应力, Pa

ε ——线应变

根据压缩试验,通过式(12)计算求得苜蓿茎秆的弹性模量约为 49.6 MPa,剪切模量约为 18.3 MPa。因为苜蓿茎秆直径较小,在压缩试验时误差较大,因此后续仍需要通过试验确定剪切模量最优值。

2 苜蓿茎秆休止角物理试验和剪切物理试验

休止角是反映颗粒物料流动、摩擦特性的参数^[16]。本文采用侧壁坍塌法对苜蓿茎秆休止角进行测量。装置的四壁与中间挡板由亚克力板制成,便于观察内部茎秆的流动情况,底部为钢板,中间挡板在外力的作用下可以在竖直方向上自由移动。将 300 根长度为 200 mm 的苜蓿茎秆放入测量装置的侧壁与挡板之间,等到茎秆完全静止后,将中间挡板上缓慢抽出,苜蓿茎秆整体向无遮拦的一侧流动,待流动停止后,对茎秆堆积成的斜面角度进行测量,测量装置和形成的休止角如图 6 所示。进行 5 次重复试验,得到苜蓿茎秆休止角 θ_0 平均值为 31.02°,变异系数为 1.08%。



(a) 苜蓿茎秆休止角测量装置

(b) 苜蓿茎秆休止角

图 6 苜蓿茎秆休止角测量试验

Fig. 6 Experiments of alfalfa stem angle of repose measurement

采用 CTM2050 型万能力学试验机对苜蓿茎秆进行剪切试验,制作长度为 80 mm、平均直径为 3 mm 的茎秆作为试验材料,将苜蓿茎秆放在支撑座

上,两支撑座间距为 30 mm,剪切刀具固定不动,支撑座以 5 mm/s 的速度向上移动,当刀具与茎秆发生接触时,计算机开始记录剪切载荷数据并生成剪切过程的位移-载荷曲线,试验装置如图 7 所示。每组试验进行 5 次,计算苜蓿茎秆剪切破坏力平均值为 43.25 N,变异系数为 1.25%。



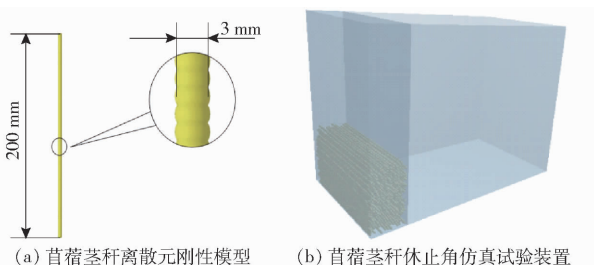
图 7 苜蓿茎秆剪切试验

Fig. 7 Alfalfa stem shear test

3 仿真模型建立

3.1 苜蓿茎秆休止角仿真模型

在 EDEM 软件中,采用 Hertz - Mindlin (no slip) 模型进行休止角仿真试验,苜蓿茎秆近似于圆柱体,通过球形颗粒组合的方法^[17-19],将 100 个直径为 3 mm 的球形颗粒依次排列组成长度为 200 mm 的苜蓿茎秆刚性模型,建立与物理试验结构尺寸相同的测量装置,静态生成 300 根茎秆,待茎秆堆积稳定后,移动挡板以 0.05 mm/s 的速度向上移动,茎秆发生坍塌形成休止角,所建立的茎秆刚性模型、休止角仿真试验装置、形成的休止角 θ_1 如图 8 所示。



(a) 苜蓿茎秆离散元刚性模型 (b) 苜蓿茎秆休止角仿真试验装置

(c) 苜蓿茎秆仿真休止角

图 8 苜蓿茎秆休止角仿真模型

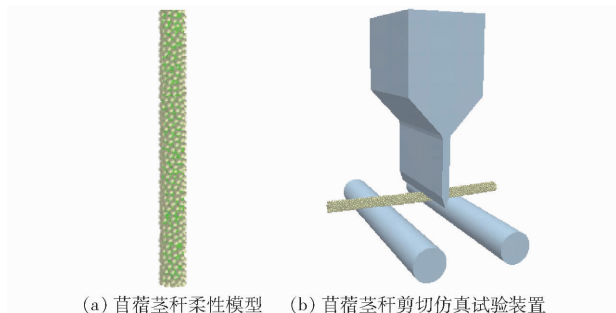
Fig. 8 Simulation model of alfalfa stem repose angle

3.2 苜蓿茎秆剪切仿真模型

采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型,形成在外力作用下可以发生破碎的苜蓿茎秆柔性模型,可用于模拟苜蓿茎秆的破碎过程。若要使颗粒之间产

生粘结,粘结半径要始终大于物理半径,如果粘结半径过小,粘结作用将十分脆弱,粘结半径过大,则颗粒之间无法产生粘结,通常情况下,粘结半径应比物理半径大 20% ~ 30%^[20-22]。

在 EDEM 中,建立直径为 3 mm、长度为 80 mm 的圆筒,使用半径为 0.4 mm 的球形颗粒进行填充,在三维软件 SolidWorks 中绘制与万能力学试验机结构尺寸相同的剪切刀具和支撑座,另存为 .igs 格式导入到 EDEM 软件中,两支撑座间距 30 mm,刀具向下剪切运动速度设置为 0.005 m/s。建立的苜蓿茎秆柔性模型和剪切仿真试验装置如图 9 所示。



(a) 苜蓿茎秆柔性模型 (b) 苜蓿茎秆剪切仿真试验装置

图 9 苜蓿茎秆剪切仿真模型

Fig. 9 Simulation model of alfalfa stem shearing

4 物理参数标定

4.1 休止角影响参数筛选

将苜蓿茎秆泊松比 x_1 ,剪切模量 x_2 ,苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞恢复系数 x_3 ,静摩擦因数 x_4 和滚动摩擦因数 x_5 ,苜蓿茎秆与钢板间碰撞恢复系数 x_6 ,静摩擦因数 x_7 与滚动摩擦因数 x_8 这些影响苜蓿茎秆仿真实物特性的物理参数作为试验因素,休止角为评价指标,开展仿真 Plackett - Burman 试验,筛选出对休止角影响显著的参数,根据物理试验测量值确定试验因素取值范围,如表 1 所示。试验选用 $N = 11$ 的 Plackett - Burman 设计,预留 3 个虚拟项作误差分析^[23]。试验方案与结果如表 2 所示,显著性检验结果如表 3 所示。

表 1 物理参数 Plackett - Burman 试验因素编码

Tab. 1 Physical parameters Plackett - Burman test level

因素	编码	
	-1	1
苜蓿茎秆泊松比 x_1	0.3	0.6
苜蓿茎秆剪切模量 x_2 /MPa	5	30
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞恢复系数 x_3	0.3	0.5
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆静摩擦因数 x_4	0.3	0.5
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆滚动摩擦因数 x_5	0.05	0.25
苜蓿茎秆-钢板碰撞恢复系数 x_6	0.4	0.6
苜蓿茎秆-钢板静摩擦因数 x_7	0.4	0.6
苜蓿茎秆-钢板滚动摩擦因数 x_8	0.1	0.3

表2 物理参数 Plackett – Burman 试验方案与结果

Tab.2 Physical parameters Plackett – Burman test scheme and results

序号	因素								休止角 $\theta_1 / (^\circ)$
	x_1	$x_2 /$ MPa	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	
1	0.6	30	0.3	0.5	0.25	0.6	0.4	0.1	34.73
2	0.3	30	0.5	0.3	0.25	0.6	0.6	0.1	34.34
3	0.6	5	0.5	0.5	0.05	0.6	0.6	0.3	35.46
4	0.3	30	0.3	0.5	0.25	0.4	0.6	0.3	36.05
5	0.3	5	0.5	0.3	0.25	0.6	0.4	0.3	29.87
6	0.3	5	0.3	0.5	0.05	0.6	0.6	0.1	35.93
7	0.6	5	0.3	0.3	0.25	0.4	0.6	0.3	29.95
8	0.6	30	0.3	0.3	0.05	0.6	0.4	0.3	22.72
9	0.6	30	0.5	0.3	0.05	0.4	0.6	0.1	27.11
10	0.3	30	0.5	0.5	0.05	0.4	0.4	0.3	32.83
11	0.6	5	0.5	0.5	0.25	0.4	0.4	0.1	39.94
12	0.3	5	0.3	0.3	0.05	0.4	0.4	0.1	25.05

表3 物理参数 Plackett – Burman 试验显著性检验结果

Tab.3 Results of significance test of physical parameters Plackett – Burman test results

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	282.07	8	35.26	19.30	0.016 7
x_1	1.44	1	1.44	0.79	0.439 7
x_2	5.91	1	5.91	3.23	0.170 0
x_3	19.05	1	19.05	10.43	0.048 2 *
x_4	175.57	1	175.57	96.11	0.002 3 **
x_5	55.38	1	55.38	30.32	0.011 8 *
x_6	0.37	1	0.37	0.21	0.681 4
x_7	15.64	1	15.64	8.56	0.061 2
x_8	8.70	1	8.70	4.76	0.117 0
残差	5.48	3	1.83		

注: * 表示差异显著 ($0.01 < P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P \leq 0.01$)。下同。

4.2 物理参数 Steepest ascent 试验设计

根据物理参数 Plackett – Burman 试验显著性检验结果可知,在苜蓿茎秆休止角仿真试验中,苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞恢复系数 x_3 、静摩擦因数 x_4 、滚动摩擦因数 x_5 对休止角有显著性影响,其它参数影响较小。以3个显著性参数为试验因素,以休止角和仿真休止角与物理休止角的相对误差为评价指标,进行 Steepest ascent 试验。其它影响较小的参数取物理试验测量值的中间水平,即 x_1 取 0.45、 x_2 取 17.5 MPa、 x_6 取 0.5、 x_7 取 0.5、 x_8 取 0.2,物理参数 Steepest ascent 试验方案和结果如表4所示。

由物理参数 Steepest ascent 试验结果可知,在3号水平时相对误差最小,所以最优区间范围在3号水平附近,因此以3号水平作为中心点,2号和4号

水平分别作为低水平和高水平进行后续的物理参数 Box – Behnken 试验。

表4 物理参数 Steepest ascent 试验方案与结果

Tab.4 Steepest ascent test scheme and results for physical parameters

序号	因素			休止角 $\theta_1 / (^\circ)$	相对误差 $\delta / \%$
	x_3	x_4	x_5		
1	0.30	0.30	0.05	25.02	19.30
2	0.35	0.35	0.10	29.15	6.03
3	0.40	0.40	0.15	31.76	2.39
4	0.45	0.45	0.20	34.73	11.96
5	0.50	0.50	0.25	36.94	19.08

4.3 物理参数 Box – Behnken 试验结果与分析

在 Design-Expert 12.0 软件中,以 Steepest ascent 试验中3号水平作为零水平,2号和4号水平分别作为低水平和高水平,进行三因素三水平 Box – Behnken 试验设计,中心水平设置5组重复,共进行17组苜蓿茎秆休止角仿真试验,其余非显著性参数与物理参数 Steepest ascent 试验设定一致。显著性物理参数编码如表5所示。试验方案与结果如表6所示。

表5 显著性物理参数编码

Tab.5 Significant physical parameter coding

编码	因素		
	x_3	x_4	x_5
-1	0.35	0.35	0.10
0	0.40	0.40	0.15
1	0.45	0.45	0.20

表6 物理参数 Box – Behnken 试验方案与结果

Tab.6 Experimental design and results of contact parameter response surface

序号	因素			休止角 $\theta_1 / (^\circ)$	相对误差 $\delta / \%$
	x_3	x_4	x_5		
1	0.35	0.40	0.10	29.59	4.61
2	0.35	0.40	0.20	31.77	2.42
3	0.45	0.40	0.10	31.32	0.97
4	0.45	0.40	0.20	33.45	7.83
5	0.40	0.35	0.10	29.17	5.96
6	0.40	0.35	0.20	30.47	1.77
7	0.40	0.45	0.10	31.47	1.45
8	0.40	0.45	0.20	32.98	6.32
9	0.35	0.35	0.15	27.58	11.09
10	0.45	0.35	0.15	28.34	8.64
11	0.35	0.45	0.15	29.47	4.99
12	0.45	0.45	0.15	34.13	10.03
13	0.40	0.40	0.15	31.28	0.84
14	0.40	0.40	0.15	31.87	2.74
15	0.40	0.40	0.15	31.48	1.48
16	0.40	0.40	0.15	31.40	1.23
17	0.40	0.40	0.15	31.59	1.84

采用 Design-Expert 12.0 软件对物理参数 Box - Behnken 试验结果进行方差分析,分析结果如表 7 所示。由分析结果可知, x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_3x_4 、 x_4^2 对休止角有极显著影响, x_3x_5 、 x_4x_5 、 x_3^2 、 x_5^2 对休止角的影响不显著。此休止角拟合回归模型 ($P = 0.0005$) 显著, 失拟项 ($P = 0.18$) 不显著, 表明该模型拟合程度较好, 无失拟现象发生。决定系数 $R^2 = 0.9588$, 校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.9058$, 与 1 非常接近, 变异系数为 1.73%, 较低, 说明此模型能够准确地反映真实情况, 可以用于休止角的预测。得到了苜蓿茎秆仿真休止角与 3 个显著性参数的二阶回归方程

$$\theta_1 = -29.14 + 48.27x_3 + 216.72x_4 - 57.66x_5 + 390x_3x_4 - 5x_3x_5 + 21x_4x_5 - 226.8x_3^2 - 430.8x_4^2 + 230.2x_5^2 \quad (13)$$

以物理试验休止角平均值 (31.02°) 为目标值, 应用 Design-Expert 12.0 软件的优化模块, 对二阶回归模型式 (13) 进行优化求解, 得到 x_3 、 x_4 、 x_5 最优参数组合为 0.44、0.39、0.13。计算得出休止角拟合值为 31.27° , 与物理试验休止角平均值相对误差为 0.81%, 说明所建立的苜蓿茎秆休止角预测回归模型较为准确。

表 7 物理参数 Box - Behnken 试验方差分析

Tab.7 Variance analysis of Box - Behnken test for physical parameters

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	46.92	9	5.21	18.09	0.0005**
x_3	9.75	1	9.75	33.83	0.0007**
x_4	19.50	1	19.50	67.68	0.0001**
x_5	6.34	1	6.34	21.99	0.0022**
x_3x_4	3.80	1	3.80	13.20	0.0084**
x_3x_5	6.3×10^{-4}	1	6.3×10^{-4}	2.2×10^{-3}	0.9642
x_4x_5	0.01	1	0.01	0.04	0.8505
x_3^2	1.35	1	1.35	4.70	0.0658
x_4^2	4.88	1	4.88	16.95	0.0045**
x_5^2	1.39	1	1.39	4.84	0.0637
残差	2.02	7	0.29		
失拟项	1.82	3	0.61	12.05	0.18
纯误差	0.20	4	0.05		
总和	48.93	16			

4.4 苜蓿茎秆休止角仿真试验验证

为了验证标定物理参数的准确性和可行性, 对休止角影响显著参数取最优参数组合, 非显著参数取物理试验测定范围的中间值, 进行休止角仿真试验, 进行 5 次重复试验, 试验参数取值如表 8 所示。得到的仿真休止角平均值为 31.18° , 与物理试验休止角平均值之间的相对误差为 0.52%, 仿真试验与

物理试验得到的休止角非常接近, 说明标定的苜蓿茎秆物理参数准确可行。

表 8 苜蓿现蕾期茎秆离散元休止角仿真验证试验物理参数

Tab.8 Physical parameters of alfalfa stem repose angle verified by simulation of discrete element

参数	数值
苜蓿茎秆泊松比	0.45
钢板泊松比	0.30
苜蓿茎秆剪切模量/MPa	17.5
钢板剪切模量/Pa	7.94×10^{10}
苜蓿茎秆密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	996
钢板密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7850
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞恢复系数	0.44
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆静摩擦因数	0.39
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆滚动摩擦因数	0.13
苜蓿茎秆-钢板碰撞恢复系数	0.5
苜蓿茎秆-钢板静摩擦因数	0.5
苜蓿茎秆-钢板滚动摩擦因数	0.2

5 粘结参数标定

5.1 剪切破坏力影响参数筛选

将苜蓿茎秆法向接触刚度 x_9 、切向接触刚度 x_{10} 、临界法向应力 x_{11} 、临界切向应力 x_{12} 、粘结半径 x_{13} 这些影响苜蓿茎秆仿真力学特性的粘结参数作为试验因素, 剪切破坏力为评价指标, 开展仿真 Plackett - Burman 试验, 筛选出对剪切破坏力影响显著的参数, 试验选用 $N = 11$ 的 Plackett - Burman 设计, 预留 6 个虚拟项作误差分析。物理参数与休止角仿真试验一致, 法向接触刚度 x_9 、切向接触刚度 x_{10} 、临界法向应力 x_{11} 、临界切向应力 x_{12} 参考油菜等茎秆类作物^[13], 并结合团队前期研究成果和苜蓿现蕾期茎秆自身特性确定范围, 粘结半径取 0.48 ~ 0.52 mm, 取值范围如表 9 所示。试验方案与结果如表 10 所示, 方差分析如表 11 所示。

表 9 粘结参数 Plackett - Burman 试验取值范围

Tab.9 Bond parameters Plackett - Burman test value range

因素	编码	
	-1	1
法向接触刚度 $x_9 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.2×10^9	5.8×10^9
切向接触刚度 $x_{10} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.4×10^8	6.6×10^8
临界法向应力 x_{11} / Pa	1×10^6	6×10^6
临界切向应力 x_{12} / Pa	9×10^5	5×10^6
粘结半径 x_{13} / mm	0.48	0.52

5.2 粘结 Steepest ascent 试验设计

根据对粘结参数 Plackett - Burman 试验结果进

表 10 粘结参数 Plackett - Burman 试验方案与结果

Tab. 10 Plackett - Burman test protocol and results for bonding parameters

序号	因素					剪切破坏力 F_0/N
	$x_9/$	$x_{10}/$	$x_{11}/$	$x_{12}/$	$x_{13}/$	
	($N \cdot m^{-1}$)	($N \cdot m^{-1}$)	Pa	Pa	mm	
1	5.8×10^9	6.6×10^8	1×10^6	5×10^6	0.48	48.83
2	1.2×10^9	6.6×10^8	6×10^6	9×10^5	0.52	42.81
3	5.8×10^9	1.4×10^8	6×10^6	5×10^6	0.48	39.52
4	1.2×10^9	6.6×10^8	1×10^6	5×10^6	0.48	47.54
5	1.2×10^9	1.4×10^8	6×10^6	9×10^5	0.48	48.48
6	1.2×10^9	1.4×10^8	1×10^6	5×10^6	0.52	35.51
7	5.8×10^9	1.4×10^8	1×10^6	9×10^5	0.48	52.14
8	5.8×10^9	6.6×10^8	1×10^6	9×10^5	0.48	34.86
9	5.8×10^9	6.6×10^8	6×10^6	9×10^5	0.52	34.87
10	1.2×10^9	6.6×10^8	6×10^6	5×10^6	0.48	36.33
11	5.8×10^9	1.4×10^8	6×10^6	5×10^6	0.52	53.21
12	1.2×10^9	1.4×10^8	1×10^6	9×10^5	0.52	35.76

表 11 粘结参数 Plackett - Burman 试验显著性检验结果

Tab. 11 Results of significance test of Plackett - Burman test results of bonding parameters

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	550.81	5	110.16	41.39	0.000 1
x_9	24.08	1	24.08	9.05	0.023 *
x_{10}	31.30	1	31.30	11.76	0.014 *
x_{11}	0.028	1	0.028	0.011	0.921
x_{12}	12.04	1	12.04	4.52	0.077
x_{13}	483.36	1	483.36	181.6	<0.000 1 **
残差	15.97	6	2.66		
总和	566.78	11			

行显著性检验可知,在苜蓿茎秆剪切仿真试验中,法向接触刚度 x_9 、切向接触刚度 x_{10} 、粘结半径 x_{13} 对剪切破坏力有显著性影响,其它参数影响较小。以 3 个显著性参数为试验因素,以剪切破坏力和仿真剪切破坏力与物理剪切破坏力的相对误差为评价指标,进行 Steepest ascent 试验。其它影响较小的参数取物理试验测量值中间水平,即 x_{11} 取 3.5×10^6 Pa、 x_{12} 取 2.95×10^6 Pa,粘结参数 Steepest ascent 试验方案和结果如表 12 所示。

表 12 粘结参数 Steepest ascent 试验方案与结果

Tab. 12 Bonding parameters of the steepest ascent test plan and results

序号	因素			切破坏力 F_0/N	相对误差 $\sigma/\%$
	$x_9/$	$x_{10}/$	$x_{13}/$		
	($N \cdot m^{-1}$)	($N \cdot m^{-1}$)	mm		
1	1.20×10^9	1.4×10^8	0.48	39.21	9.34
2	2.35×10^9	2.7×10^8	0.49	41.84	3.26
3	3.50×10^9	4.0×10^8	0.50	43.82	1.31
4	4.65×10^9	5.3×10^8	0.51	45.56	5.34
5	5.80×10^9	6.6×10^8	0.52	47.72	10.34

由粘结参数 Steepest ascent 试验结果可知,在 3 号水平时相对误差最小,所以最优区间范围在 3 号水平附近,因此以 3 号水平作为中心点,2 号和 4 号水平分别作为低水平和高水平进行后续的粘结参数 Box - Behnken 试验。

5.3 粘结参数 Box - Behnken 试验

在 Design-Expert 12.0 软件中,以 Steepest ascent 试验中 3 号水平作为 0 水平,2 号和 4 号水平分别作为低水平和高水平,进行三因素三水平 Box - Behnken 试验设计,中心水平设置 5 组重复,共需进行 17 组苜蓿茎秆剪切破坏力仿真试验,其余非显著性参数与粘结参数 Steepest ascent 试验设定一致。显著性粘结参数编码如表 13 所示。试验方案与结果如表 14 所示。

表 13 显著性粘结参数编码

Tab. 13 Significant bond parameter coding

编码	因素		
	$x_9/(N \cdot m^{-1})$	$x_{10}/(N \cdot m^{-1})$	x_{13}/mm
-1	2.35×10^9	2.7×10^8	0.49
0	3.50×10^9	4.0×10^8	0.50
1	4.65×10^9	5.3×10^8	0.51

表 14 粘结参数 Box - Behnken 试验方案与结果

Tab. 14 Scheme and results of Box - Behnken test for bond parameters

序号	因素			剪切破坏力 F_0/N	相对误差 $\sigma/\%$
	$x_9/$	$x_{10}/$	$x_{13}/$		
	($N \cdot m^{-1}$)	($N \cdot m^{-1}$)	mm		
1	2.35×10^9	4.0×10^8	0.49	38.32	11.40
2	2.35×10^9	4.0×10^8	0.51	42.65	1.39
3	4.65×10^9	4.0×10^8	0.49	40.79	5.69
4	4.65×10^9	4.0×10^8	0.51	44.05	1.85
5	3.50×10^9	2.7×10^8	0.49	39.12	9.55
6	3.50×10^9	2.7×10^8	0.51	41.51	4.02
7	3.50×10^9	5.3×10^8	0.49	40.27	6.90
8	3.50×10^9	5.3×10^8	0.51	42.94	0.72
9	2.35×10^9	2.7×10^8	0.50	41.56	3.91
10	4.65×10^9	2.7×10^8	0.50	42.38	2.01
11	2.35×10^9	5.3×10^8	0.50	41.91	3.10
12	4.65×10^9	5.3×10^8	0.50	44.51	2.91
13	3.50×10^9	4.0×10^8	0.50	42.42	1.92
14	3.50×10^9	4.0×10^8	0.50	42.68	1.32
15	3.50×10^9	4.0×10^8	0.50	43.64	0.90
16	3.50×10^9	4.0×10^8	0.50	43.78	1.23
17	3.50×10^9	4.0×10^8	0.50	42.17	2.50

采用 Design-Expert 12.0 软件对粘结参数 Box - Behnken 试验结果进行方差分析,分析结果如表 15 所示。由分析结果可知,法向接触刚度 x_9 、切向接触刚度 x_{10} 、粘结半径 x_{13} 、粘结半径二次项 x_{13}^2 对剪

表 15 粘结参数 Box - Behnken 试验方差分析

Tab. 15 Analysis of variance of Box - Behnken test for bonding parameters

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	40.58	9	4.51	13.44	0.001 2 **
x_9	6.64	1	6.64	19.79	0.003 0 **
x_{10}	3.2	1	3.2	9.54	0.017 6 **
x_{13}	20	1	20	59.6	0.000 1 **
$x_9 x_{10}$	0.79	1	0.79	2.36	0.168 3
$x_9 x_{13}$	0.29	1	0.29	0.85	0.386 5
$x_{10} x_{13}$	0.02	1	0.02	0.058	0.816 0
x_9^2	0.12	1	0.12	0.37	0.561 1
x_{10}^2	0.43	1	0.43	1.29	0.294 0
x_{13}^2	8.95	1	8.95	26.66	0.001 3 **
残差	2.35	7	0.34		
失拟项	0.83	3	0.28	0.72	0.588 3
纯误差	1.52	4	0.38		
总和	42.93	16			

切破坏力有极显著影响,其余参数对剪切破坏力的影响不显著。拟合回归模型($P=0.0012$)显著,失拟项($P=0.5883$)不显著,表明该模型拟合程度较好,无失拟现象发生。决定系数 $R^2=0.9453$,校正决定系数 $R^2_{adj}=0.8749$,与1非常接近,变异系数为1.38%,较低,说明此模型能够准确地反映真实情况,可以用于剪切破坏力的预测。得到苜蓿茎秆仿真剪切破坏力与3个显著性参数的二阶回归方程

$$F_0 = -3964.3 + 10.85x_9 - 1.26x_{10} + 15795.5x_{13} + 0.3x_9x_{10} - 23.26x_9x_{13} + 5.38x_{10}x_{13} + 0.05x_9^2 - 0.25x_{10}^2 - 15577.5x_{13}^2 \quad (14)$$

以物理试验剪切破坏力平均值(43.25 N)为目标值,应用 Design-Expert 12.0 软件的优化模块,对二阶回归模型式(14)进行优化求解,得到法向接触刚度 x_9 、切向接触刚度 x_{10} 、粘结半径 x_{13} 的最优参数组合为 3.57×10^9 N/m、 4.01×10^8 N/m、0.5 mm。将其代入式(14),计算得出剪切破坏力拟合值为42.96 N,与物理试验剪切破坏力平均值相对误差为0.67%,说明所建立的苜蓿茎秆剪切破坏力预测回归模型较为准确。

5.4 苜蓿茎秆剪切仿真试验验证

为了验证标定粘结参数的准确性和可行性,对剪切破坏力影响显著参数取最优参数组合,非显著参数取物理试验测定范围的中间值,试验参数取值如表16所示,物理参数与休止角仿真试验相同,进行剪切仿真试验。

得到的仿真剪切破坏力为42.88 N,与物理试验剪切破坏力平均值之间的相对误差为0.86%,仿真试验与物理试验得到的剪切破坏力非常接近,说明标定的苜蓿茎秆粘结参数准确可行。

表 16 苜蓿现蕾期茎秆离散元剪切仿真验证试验参数

Tab. 16 Experiment parameters verified by discrete element shear simulation of alfalfa stem in budding stage

参数	数值
法向接触刚度/($N \cdot m^{-1}$)	3.57×10^9
切向接触刚度/($N \cdot m^{-1}$)	4.01×10^8
临界法向应力/Pa	3.50×10^6
临界切向应力/Pa	2.95×10^6
粘结半径/mm	0.5

6 结论

(1)通过物理试验测得苜蓿现蕾期茎秆平均直径为3 mm,密度为996 kg/m³,含水率为78.4%,以及苜蓿茎秆剪切模量、泊松比、苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数,苜蓿茎秆-钢板碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数的取值范围。试验测得苜蓿茎秆的休止角为31.02°,茎秆最大剪切破坏力平均值为43.25 N。

(2)泊松比、剪切模量、苜蓿茎秆-钢板碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数对休止角影响较小,其确定值分别为0.45、17.5 MPa、0.5、0.5、0.2;苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数对休止角均有显著影响。建立休止角的二次回归模型,以休止角物理试验测量值(31.02°)为目标值,优化求解得出苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为0.44、0.39、0.13,利用得到的物理参数建立仿真模型,进行休止角仿真试验,仿真结果与实测值相对误差为0.52%。说明标定的物理参数准确可信,所建立的首蓿离散元刚性模型与实际茎秆物理特性相近,可以为牧草输送机构的设计和离散元仿真提供参考。

(3)临界切向应力和临界法向应力对剪切破坏力影响不显著,其确定值分别为 3.5×10^6 Pa 和 2.95×10^6 Pa,法向接触刚度、切向接触刚度和粘结半径对剪切破坏力有显著影响,建立剪切破坏力的二次回归模型,以剪切破坏力物理试验测量值(43.25 MPa)为目标值,优化求解得到苜蓿茎秆法向接触刚度为 3.57×10^9 N/m、切向接触刚度为 4.01×10^8 N/m、粘结半径为0.5 mm。利用优化求解所得到的粘结参数对苜蓿茎秆进行参数标定,进行剪切仿真试验,实际剪切试验与仿真剪切试验的剪切破坏力相对误差为0.86%。说明标定的粘结参数准确可信,所建立的首蓿离散元柔性模型与实际茎秆力学特性相近,可以为牧草切割机构的设计和离散元仿真提供参考。

参 考 文 献

- [1] 吴昆,宋月鹏.农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J].农业机械学报,2022,53(6):1-20.
WU Kun,SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):1-20. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] NGUYEN T X, LE L M, NGUYEN T C, et al. Characterization of soybeans and calibration of their DEM input parameters[J]. Particulate Science and Technology, 2020,208:1-19.
- [4] MOUSAVIRAAD M, TEKESTE M Z, ROSENTRATER K A. Calibration and validation of a discrete element model of corn using grain flow simulation in a commercial screw grain auger[J]. Transactions of the ASABE, 2017,60(4):1403-1415.
- [5] JALAL K, JOANNA W, HEMAN R, et al. Modelling and simulation of fruit drop tests by discrete element method[J]. Biosystems Engineering,2021,212:228-240.
- [6] 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)
- [7] 宋占华,李浩,闫银发,等.桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):21-33.
SONG Zhanhua,LI Hao,YAN Yinfa,et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):21-33. (in Chinese)
- [8] 张胜伟,张瑞雨,陈天佑,等.绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J].农业机械学报,2022,53(3):71-79.
ZHANG Shengwei,ZHANG Ruiyu,CHEN Tianyou,et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):71-79. (in Chinese)
- [9] 王德成,贺长彬,武红剑,等.苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J].农业机械学报,2017,48(8):1-25.
WANG Decheng,HE Changbin,WU Hongjian,et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):1-25. (in Chinese)
- [10] 马文鹏,尤泳,王德成,等.多年生苜蓿地切根补播机低阻松土铲设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(2):86-95,144.
MA Wenpeng,YOU Yong,WANG Decheng,et al. Design and experiment of low-resistance soil loosening shovel for cutting roots and reseeded in perennial alfalfa field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):86-95,144. (in Chinese)
- [11] 梁海军,王涛,秦贵信.浅谈我国苜蓿产业的发展[J].中国饲料,2014(18):38-41.
LIANG Haijun,WANG Tao,QIN Guixin. On the development of China's alfalfa industry[J]. China Feed, 2014(18):38-41. (in Chinese)
- [12] 侯占峰,戴念祖,陈智,等.冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J].农业工程学报,2020,36(24):46-54.
HOU Zhanfeng,DAI Nianzu,CHEN Zhi,et al. Measurement of physical parameters of Agropyron seeds and parameter calibration of discrete element simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(24):46-54. (in Chinese)
- [13] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2014,101:24-33.
- [14] 彭才望,周婷,宋世圣,等.基于 Hertz 接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定[J].农业机械学报,2021,52(11):125-134.
PENG Caiwang,ZHOU Ting,SONG Shisheng,et al. Measurement and analysis of restitution coefficient of black soldier fly larvae in collision models based on Hertz contact theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):125-134. (in Chinese)
- [15] 张荣芳,焦伟,周纪磊,等.不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):227-235.
ZHANG Rongfang,JIAO Wei,ZHOU Jilei,et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):227-235. (in Chinese)
- [16] 吴孟宸,丛锦玲,闫琴,等.花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J].农业工程学报,2020,36(23):30-38.
WU Mengchen,CONG Jinling,YAN Qin,et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(23):30-38. (in Chinese)
- [17] 郝建军,龙思放,李浩,等.机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J].农业工程学报,2019,35(20):34-42.
HAO Jianjun,LONG Sifang,LI Hao,et al. Development of discrete element model and calibration of simulation parameters for mechanically-harvested yam[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(20):34-42. (in Chinese)
- [18] LEBLICQ T, SMEETS B, RAMON H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016,123:80-88.
- [19] 胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- [20] 张李娴.玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
ZHANG Lixian. Study on discrete element modeling method for mechanical properties of corn stalk[D]. Yangling: Northwest A&F University,2017. (in Chinese)
- [21] 牛智有,孔宪锐,沈柏胜,等.颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J].农业机械学报,2022,53(7):132-140,207.
NIU Zhiyou,KONG Xianrui,SHEN Bosheng,et al. Parameters calibration of discrete element simulation for pellet feed attrition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):132-140,207. (in Chinese)
- [22] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等.基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定[J].农业机械学报,2022,53(7):141-149.
DU Xin,LIU Cailing,JIANG Meng,et al. Calibration of Bonding model parameters for coated fertilizers based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):141-149. (in Chinese)
- [23] 李云雁.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2008.