doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.013

基于逆向工程的羊草种子离散元模型构建与参数标定

贺长彬[1,2]　杜超宇[1]　王　超[1]　吴美红[1]　叶元文[3]

(1.内蒙古农业大学机电工程学院,呼和浩特 010018;
2.牧草饲料生产全程智能化装备内蒙古自治区工程研究中心,呼和浩特 010018;
3.湖北永祥农机装备有限公司,安陆 432015)

摘要:为提高羊草种子离散元模型的准确性与精度,并为羊草种子排种系统及关键部件的设计优化提供可靠的模型参考,开展了羊草种子离散元高保真模型构建与接触参数标定研究。应用逆向工程技术构建了羊草种子真实几何模型,并利用 Hentz-Mindlin(no slip)颗粒接触模型和单球体填充法,建立了离散元仿真模型。测定了羊草种子的本征参数。采用碰撞试验和斜面滚动试验,分别对羊草种子与 PLA 塑料板、Q235 钢板间的碰撞恢复系数、滚动摩擦因数进行了标定。通过最陡爬坡试验和二次旋转正交试验,筛选并优化了种间碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数等关键接触参数。通过台架试验,对相关参数进行验证,结果表明,仿真试验与台架试验的排种质量流率相对误差小于 3%,各行排种量一致性变异系数差值小于 5%。研究结果表明基于逆向工程技术构建的种子离散元三维模型具有较好的适用性和较高的模型精度,为羊草的排种过程仿真分析及排种装置结构优化提供了模型依据和参数支撑。

关键词:羊草种子;离散元;接触参数;参数标定;3D 扫描

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)11-0146-10　　**OSID**:

Reverse Engineering-based Discrete Element Model Construction and Parameter Calibration for *Leymus chinensis* Seeds

HE Changbin[1,2]　DU Chaoyu[1]　WANG Chao[1]　WU Meihong[1]　YE Yuanwen[3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*
2. *Inner Mongolia Engineering Research Center of Intelligent Equipment for the Entire Process of Forage and Feed Production, Hohhot* 010018, *China*
3. *Hubei Yongxiang Agricultural Machinery Equipment Co., Ltd., Anlu* 432015, *China*)

Abstract: Aiming to enhance the accuracy and fidelity of the discrete element model (DEM) for *Leymus chinensis* seeds, and provide a reliable model basis for the design and optimization of seed metering systems and critical components, focusing on the construction of a high-fidelity discrete element model and the calibration of contact parameters for *Leymus chinensis* seeds, utilizing reverse engineering techniques, a realistic geometric model of *Leymus chinensis* seeds was developed. Subsequently, by employing the Hentz-Mindlin (no slip) particle contact model and the single-sphere filling method, the discrete element simulation model was established. Intrinsic mechanical properties, including triaxial dimensions, thousand-seed weight, bulk density, elastic modulus, and Poisson's ratio were measured. Collision recovery coefficients and rolling friction coefficients between the *Leymus chinensis* seeds and PLA plastic plates, as well as Q235 steel plates, were calibrated by using collision tests and inclined plane rolling tests, respectively. Furthermore, critical contact parameters, including the inter-seed collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient, were identified and optimized by using the steepest ascent experiments followed by a quadratic orthogonal rotation design. Subsequently, these calibrated parameters were validated through bench tests. The results indicated that

收稿日期:2025-07-29　修回日期:2025-08-19

基金项目:内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT24046)、内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(BR220506)、国家自然科学基金项目(52465032)、内蒙古自治区自然科学基金项目(2024LHMS05001)、内蒙古自治区一流学科科研专项项目(YLXKZX-NND-046)和内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0019)

作者简介:贺长彬(1991—),男,副教授,博士,主要从事草地机械化改良技术研究,E-mail:changbin_he@imau.edu.cn

the discrepancy in seed metering mass flow rate between the simulation and bench tests was less than 3%, and the difference in the coefficient of variation for seed metering quantity per row was less than 5%. The findings can provide a foundational model and parameter support for the simulation analysis of the *Leymus chinensis* seed metering process and the structural optimization of seed metering devices. Moreover, it further demonstrated the good applicability and high accuracy of the three-dimensional discrete element model of seeds constructed by using reverse engineering techniques.

Key words: *Leymus chinensis* seeds; discrete element; contact parameters; parameter calibration; 3D scanning

0　引言

羊草(*Leymus chinensis*)是一种广泛分布于我国北方草原的多年生禾本科植物,凭借其卓越的生态适应性及抗逆特性,在水土保持、防风固沙、调节碳汇和生态修复等方面发挥重大作用[1-2]。然而,当前我国天然羊草草原面临生态系统脆弱性加剧、保护修复力度不够、科技支撑能力不足等问题。研究表明,机械化补播作业能有效提升退化草场修复效果,对退化天然羊草草原修复具有重要意义。

作为播种机械的核心部件,排种器的性能直接影响播种质量与均匀性。离散元法(Distinct element method, DEM)通过数值模拟揭示排种器内种子的运动规律,通过粒子间相关接触模型重构种子群体动力学行为,为排种装置结构优化提供理论支撑,已成为相关机械装备研究的重要手段[3]。其中,种子离散元模型的构建与物理力学参数标定是该技术的核心难点。在进行标定工作中,材料的基本本征参数可以通过台架试验获得,而接触参数的测量因影响因素较多,难以获取准确的数值,所以需要通过必要的仿真试验与台架试验对接触参数进行标定和优化[4]。目前,国内外学者主要围绕农作物种子开展了相关研究,通过对小麦[5]、棉籽[6]、油茶籽[7]、玉米[8-9]、萝卜[10]、油莎豆[11-12]、苜蓿[13]和绿豆[14]等种子进行仿真参数标定得到了相关种子的接触参数,结果表明,不同种子因外形尺寸差异和物理学特性不同,接触参数具有明显差异性。针对不同的播种作业需求和关键装置的设计要求,需专门对相关种子进行模型构建与参数标定,以便为播种装备及关键排种部件的优化设计提供技术支持。

本文以羊草种子为研究对象,其粒径小、形态复杂、不规则度高等特点,使其在离散元模型构建和参数获取过程中存在一定难度。为提高建模精度,采用三维扫描结合逆向工程技术,重建羊草种子的三维几何模型,并基于单球体填充方法建立离散元仿真模型。相较于传统图像采集方法,逆向工程技术能够获取高密度点云数据,重构具有高几何保真度的复杂颗粒模型,显著提升建模效率与仿真几何一致性。已有研究表明,该方法已广泛应用于水稻等作物籽粒的离散元建模中,并在仿真精度与仿真-实测结果一致性方面表现优异,可为复杂种子建模提供可靠支撑[15]。在此基础上,通过台架试验测定种子的三轴尺寸、千粒质量、密度、弹性模量等本征参数,结合碰撞、摩擦和滚动试验,获取种子与常见排种器接触材料之间的接触参数。采用堆积角仿真配合响应面优化方法对种间接触参数进行优化,分析各参数对堆积行为的影响,并以外槽轮排种器为对象进行仿真验证,评估建模精度与参数适用性。本文构建集真实几何建模、参数测定与排种验证于一体的离散元参数标定方法,以期为羊草播种过程的仿真研究及播种装置结构设计提供模型依据和参数参考,并为其他牧草种子的离散元建模提供思路。

1　材料与方法

1.1　试验方法

采用台架试验对羊草种子基本物理参数进行测量,主要涉及羊草种子之间、羊草种子颗粒与 PLA 塑料和 Q235 钢板 2 种不同材质板材之间的接触参数,然后结合 EDEM 仿真,得到实际物理试验值与仿真值的数学模型;以真实测量的堆积角为目标值,运用响应曲面试验,建立羊草种子颗粒间接触参数的二元回归方程,利用 Design-Expert 软件的优化模块,以堆积角为目标,对模型求解最优解,得出羊草种子间的接触参数。根据标定羊草种子颗粒与不同材料以及种间接触参数的结果,分析仿真和堆积试验相对误差,确定标定参数的可靠性。最后,通过排种器台架试验,验证所得羊草种子标定参数的准确性。

1.2　试验材料及仪器

选用中草 27 号羊草种子为试验材料,生产企业为内蒙古蒙草生态环境(集团)股份有限公司。

选用达宏美拓 DH-300X 型固液体两用密度测试仪(精度 0.001 g/cm^3,称量范围 0.005 ~ 300 g)测定种子密度,选用 TMS-Pro 型质构仪测定种子泊松比和弹性模量,选用 MTB1000D-B 型高精度电子天平(最小读数精度为 0.01 g)测定羊草种子千粒

质量,选用东莞市力测电子科技有限公司 SM－XS－001 型摩擦系数测定仪和德国 pco. dimax S 高速摄像机对摩擦因数和碰撞恢复系数进行测量。

2 物性参数测定

2.1 本征参数测定

2.1.1 基本参数测定

随机选取 100 粒羊草种子,然后使用 ImageJ 软件,分别对羊草种子长度 L、宽度 W 和厚度 T 进行像素分析,如图 1 所示,得到具体尺寸参数。

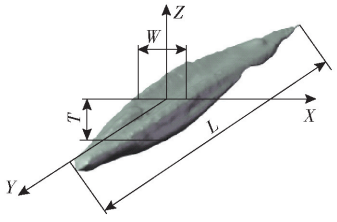


图 1 羊草种子基本尺寸测量

Fig. 1 Basic size measurement for *Leymus chinensis* seeds

采用 MTB1000D－B 型高精度电子天平(最小读数精度为 0.01 g)测量羊草种子千粒质量,试验重复 5 次。使用深圳市达宏美拓密度测量仪器有限公司固液体两用密度测试仪进行密度测试,随机选取 5 组羊草种子测量其密度 ρ,并取平均值。测得相关参数如表 1 所示。羊草种子等效粒径 d 计算公式[12]为

$$d = \sqrt[3]{LWT} \tag{1}$$

经计算,得到羊草种子平均尺寸的等效粒径 d 为 1.69 mm。

表 1 羊草种子基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of *Leymus chinensis* seeds

参数	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	千粒质量/g	密度/(g·cm^{-3})
最大值	9.65	1.68	1.22	2.42	0.299
最小值	6.08	0.56	0.32	2.16	0.247
平均值	7.45	1.05	0.62	2.35	0.276 2
标准差	1.14	0.28	0.24	0.14	0.026

2.1.2 泊松比与弹性模量

泊松比是反映材料横向变形的弹性常数,指材料在单向受拉或受压时,横向正应变与轴向正应变绝对值比值[16]。

根据文献[17]对种子充种姿态及概率的研究,经计算可知,羊草种子平躺姿态的充种概率为 59.76%,侧卧姿态充种概率为 35.26%,竖立姿态充种概率为 4.97%。同时羊草种子为细长型粒子,其厚度方向尺寸最小,受力后易产生明显变形,有利于准确测得横向应变,所以该方向受力状态更贴近实际播种过程中种子受挤压变形的情形,故在进行试验时,沿种子厚度 T 向进行加载。

随机选取羊草种子 30 粒做重复试验,试验前分别测量其长度 L、宽度 W 和厚度 T。试验时,将羊草种子水平放置于压缩板上,采用直径为 20 mm 的圆形压缩头,通过设备自带程序设定压缩头加载速度为 1 mm/min、压缩比例为 30%。试验过程中,利用软件处理模块得到种子压缩试验过程中的载荷-位移数据,同时使用 ImageJ 软件测得种子长度方向的变形量,测得羊草种子泊松比为 0.27,弹性模量为 2.23×10^7 Pa,剪切模量为 8.97×10^6 Pa。

2.2 羊草种子接触参数测定

2.2.1 摩擦因数

使用东莞市力测电子科技有限公司生产的 SM－XS－001 型摩擦系数测定仪对动、静摩擦因数进行测量。分别测得种子与 PLA 塑料板、种子与 Q235 钢板间的动、静摩擦因数。试验重复 10 次,测得各材料间的动、静摩擦因数如表 2 所示。

表 2 羊草种子与各材料间摩擦因数

Tab. 2 Friction coefficients between *Leymus chinensis* seeds and materials

材料	静摩擦因数 μ_s	滑动摩擦因数 μ_k
羊草种子-PLA 塑料板	0.31	0.20
羊草种子-Q235 钢板	0.30	0.24
羊草种子-羊草种子	0.38～0.65	0.24～0.53

采用斜面滚动法[18]来测定种子与材料平板间的滚动摩擦因数 μ_r。试验时,运动状态控制十分重要。当斜面倾角过小时,种子可能无法滚动;过大则易引发滑动。经大量预试验观察,斜面倾角为 45°、羊草种子长度方向垂直于斜面方向时,羊草种子颗粒在接触材料上的运动为滚动。在固定斜面滚动距离 l 处,将种子由静止释放,使其沿斜面向下滚动,种子滚落至水平面后静止,测量种子的水平滚动距离 S。进行 5 组重复试验,每组试验重复 5 次,取其平均值,测得羊草种子在各材料上的水平滚动距离数据,如表 3 所示。

表 3 物理试验水平滚动最大距离测量结果

Tab. 3 Measurement results of maximum horizontal rolling distance in bench test mm

材料	l	水平滚动最大距离					
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	平均值
羊草种子	40	14.17	10.50	14.00	11.83	14.67	13.03
PLA 塑料板	60	41.80	46.00	39.00	35.20	35.60	37.28
Q235 钢板	60	27.40	24.80	24.20	31.80	28.40	27.32

2.2.2　碰撞恢复系数

碰撞恢复系数的定义为碰撞后运动物体在碰撞点的法向分离速度与碰撞前法向接近速度的比值。根据前期相关研究，本试验过程中有能量损失，为非弹性碰撞[19]。采用自由落体试验测定羊草种子颗粒与材料之间的碰撞恢复系数，使用德国 pco. dimax S 型高速摄像机记录碰撞过程，如图 2 所示。为使碰撞回弹运动更好观测，选择较大的下落高度。试验时，用镊子夹取羊草种子颗粒静止于距离待测底板材料正上方 h_1 = 20 cm 处，将毫米刻度纸竖直于镊子背后，松开镊子使羊草种子做自由落体运动，首次与底面放置的待测材料相撞，然后反弹到最高点位置与待测底板材料距离 h_1' 处。因羊草种子在碰撞时发生多点碰撞和快速翻转，所以为保证试验的准确性，每组重复试验 30 次，选取碰撞效果较好的 10 次试验记录数据并取平均值，结果如表 4 所示。

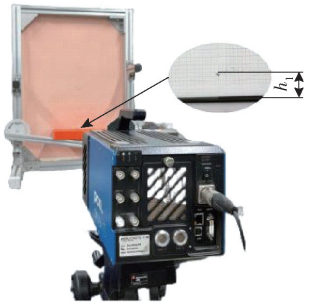


图 2　碰撞恢复系数测定试验

Fig. 2　Collision restitution coefficient test

表 4　碰撞恢复系数物理试验测定结果

Tab. 4　Results of collision restitution coefficient in bench test

材料	弹起最大高度/mm											碰撞恢复系数
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组	平均值	
Q235 钢板	42. 3	40. 9	22. 5	19. 9	20. 3	43. 6	27. 3	22. 4	15. 0	29. 0	28. 32	0. 22 ~ 0. 51
PLA 塑料板	17. 3	30. 1	18. 1	57	39. 3	22. 5	11. 3	24. 9	23. 0	13. 0	25. 65	0. 24 ~ 0. 47
种子	27. 1	21. 2	29. 3	14. 5	32. 6	22. 3	26. 0	11. 1	23. 9	21. 8	22. 98	0. 24 ~ 0. 40

2.2.3　堆积试验

散粒体物料堆积角反映物料散落性能和摩擦特性，但受颗粒自身特征和环境等影响。采用漏斗进行堆积角测定试验，漏斗进料口直径为 125 mm，出料口直径为 20 mm，试验装置如图 3 所示。试验时，向漏斗中装入 5 g 羊草种子，静置后拨开漏斗底部的挡板，种子从漏斗中漏出，在漏斗下方堆积。对堆积的种子堆进行拍照，再利用 Matlab 对图像进行处理得到完整轮廓曲线，步骤如图 4 所示。

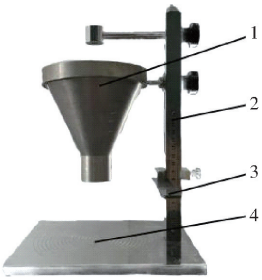


图 3　堆积试验装置

Fig. 3　Stacking test device

1. 漏斗　2. 标尺　3. 挡种板　4. 底座

利用 Origin Pro 2024 软件的图像数字化工具对提取到的堆积轮廓曲线建立坐标系，然后手动取点，将取得的数据绘制为点线图，得到精准的堆积轮廓曲线，重复进行 5 次。采用软件分析模块中的线性拟合功能，选取需要进行线性拟合的曲线部分，对每条曲线进行拟合，5 次堆积试验所得堆积角平均值为 39. 24°。

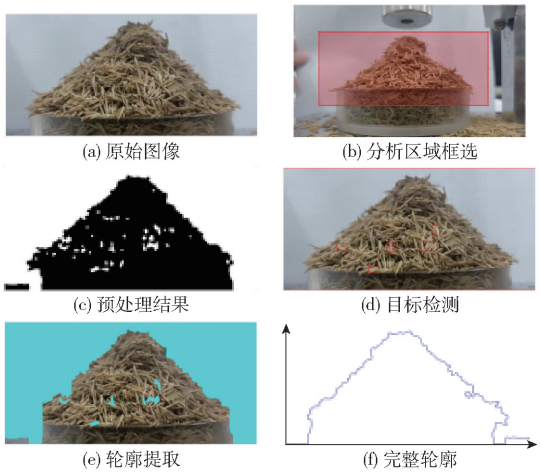


图 4　羊草种子堆积图像处理流程

Fig. 4　*Leymus chinensis* seeds accumulation image processing

3　离散元仿真试验

3.1　仿真模型构建

3.1.1　基于逆向工程的颗粒模型获取

基于羊草种子粒径微小特性，筛选几何尺寸与均值偏差较小的典型样本作为基准建模对象。采用逆向工程获取种子三维几何数据，相较于传统二维轮廓图像提取，能够更有效地还原形状复杂、各向异性的生物颗粒形态特征（长径比、表面曲率），并满足后续接触力学计算中的精度需求。通过逆向工程技术获得羊草种子的真实三维模型，具体流程为：采用威布三维 REEYEE 5M PLUS 型工业扫描系统（分

辨率 5 μm),基于蓝光结构光成像技术获取三维点云数据;利用 Geomagic Design X 进行点云去噪、曲面重构及拓扑优化;生成高保真颗粒轮廓模型(图 5),最终输出适用于离散元仿真的.stl 格式三维几何文件。

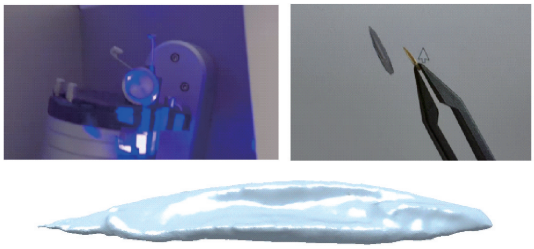


图 5 羊草种子颗粒三维扫描模型

Fig. 5 *Leymus chinensis* seed particle model

3.1.2 离散元模型

将羊草种子.stl 格式三维几何模型导入 EDEM 2022 软件,采用单球体填充算法(Mono-sphere packing algorithm)进行离散元建模。考虑到羊草种子较小,为平衡仿真时间与仿真准确性,颗粒填充数量设定为 160 个,仿真颗粒填充模型如图 6 所示。基于文献[20]对冰草种子的离散元标定研究(其几何形态与羊草种子具有高度相似性),结合羊草种子颗粒间表面粘附力较弱的特性,选用 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型,该模型适用于低粘附力颗粒体系的动力学仿真,符合羊草种子离散元建模的力学特征。结合前期预试验与文献资料,仿真参数如表 5 所示。

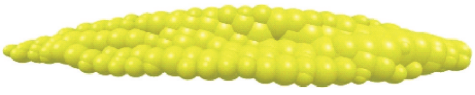


图 6 EDEM 颗粒填充模型

Fig. 6 EDEM particle filling model

表 5 仿真模型材料参数

Tab. 5 Material parameters for simulation model

参数	数值
羊草种子泊松比	0.27
羊草种子剪切模量/Pa	8.97×10^{6}
羊草种子密度/(kg·m^{-3})	276.2
PLA 塑料板泊松比	0.29
PLA 塑料板剪切模量/Pa	2.2×10^{8}
PLA 塑料板密度/(kg·m^{-3})	1 110
Q235 钢板泊松比	0.3[21]
Q235 钢板弹性模量/Pa	2.05×10^{11}[22-23]
Q235 钢板密度/(kg·m^{-3})	7 850[22-23]

3.2 接触参数仿真试验

3.2.1 碰撞恢复系数标定

利用 Solidworks 2018 绘制相应的落种装置,导入 EDEM 软件中,进行仿真落种试验,如图 7 所示。在仿真试验中,通过设置不同的羊草种子与材料之间的碰撞恢复系数,得到不同弹起高度,进一步得到羊草种子与不同材料之间碰撞恢复系数与弹起最大高度的数学模型。依据前文所做落种碰撞试验所测定的碰撞恢复系数,羊草种子颗粒与 Q235 钢板、PLA 塑料板的碰撞恢复系数范围选择在 0.27 ~ 0.47、0.24 ~ 0.53 之间。仿真落种试验时,为得到较为准确的碰撞后反弹高度,保存数据的时间间隔应较小,将步长设置为 20%,每 0.002 s 保存一次数据,进行 8 组仿真试验,每组重复 10 次,取最大反弹高度的平均值,得到碰撞恢复系数仿真试验结果,如表 6 所示。

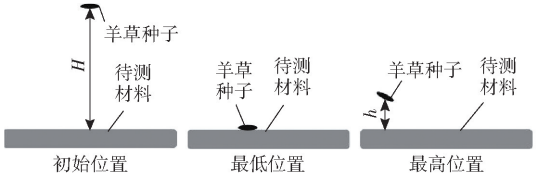


图 7 碰撞恢复系数标定试验

Fig. 7 Calibration experiment of restitution coefficient

表 6 碰撞恢复系数仿真试验结果

Tab. 6 Experimental results of restitution coefficient simulation experiment

序号	碰撞恢复系数		弹起最大高度仿真值/mm	
	PLA 塑料板	Q235 钢板	PLA 塑料板	Q235 钢板
1	0.20	0.20	7.70	9.09
2	0.25	0.25	12.56	11.87
3	0.30	0.30	14.88	16.24
4	0.35	0.35	18.01	22.70
5	0.40	0.40	26.68	27.84
6	0.45	0.45	32.91	36.68
7	0.50	0.50	41.13	45.50
8	0.55		52.73	

对表 6 的数据进行曲线拟合,得到二次多项式拟合曲线如图 8 所示。两种材料板材(PLA 塑料板、Q235 钢板)碰撞恢复系数 e 与弹起最大高度的曲线拟合方程为

$$y_{max1}=261.62e^{2}-72.21e+12.68\quad(R^{2}=0.995)\tag{2}$$

$$y_{max2}=237.67e^{2}-44.62e+8.40\quad(R^{2}=0.999)\tag{3}$$

式中 y_{max1}——PLA 塑料板弹起最大高度

y_{max2}——Q235 钢板弹起最大高度

拟合结果表明两个方程的决定系数均与 1 非常接近,表明回归方程模型极显著,数据真实可靠。将表 3 中实测落种物理试验的弹起最大高度平均值分别代入式(2)、(3)中,得到实测落种物理试验中弹起最大高度对应的碰撞系数分别为 0.401、0.398。

再将得到的数据输入 EDEM 中继续仿真，重复试验 5 次，取其平均值，得到其弹起最大高度仿真值，并与 PLA 塑料板和 Q235 钢板实测落种物理试验弹起最大高度比较，得出其相对误差分别为 0.01% 和 2.93%。故羊草种子颗粒与 PLA 塑料、Q235 钢板的碰撞恢复系数分别为 0.401、0.398。

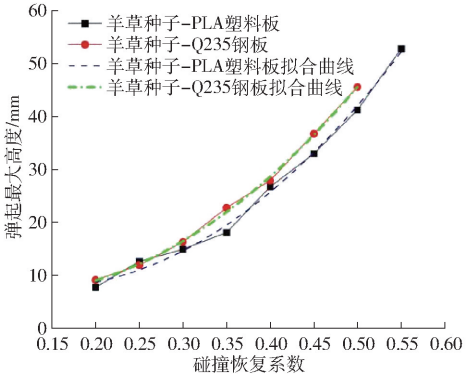


图 8　碰撞恢复系数与反弹最大高度拟合曲线

Fig. 8　Fitting curves of collision recovery coefficient and rebound maximum height

3.2.2　滚动摩擦因数标定

仿真滚动摩擦试验过程与实际物理试验过程保持一致，利用三维软件 Solidworks 建立对应的滚动摩擦因数测试装置，试验装置如图 9 所示。

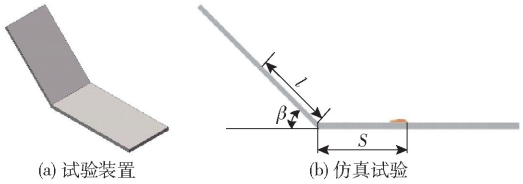


图 9　滚动摩擦因数标定试验

Fig. 9　Calibration experiment of rolling friction coefficient

在滚动摩擦仿真试验中，每次在斜面板同时生成 3 粒羊草种子，羊草种子颗粒与材料间的碰撞恢复系数、静摩擦因数采用上文已标定的参数，通过设置不同的羊草种子颗粒与材料之间的滚动摩擦因数，得到水平滚动的最大距离，进一步得到羊草种子与不同材料间滚动摩擦因数与水平滚动最大距离的数学模型。共进行 7 组仿真试验，每组重复进行 5 次，记录每次水平滚动最大距离，并取最大距离的平均值。经过大量预仿真试验，得出羊草种子颗粒与 PLA 塑料板和 Q235 钢板的滚动摩擦因数范围在 0.01 ~ 0.13 之间，试验结果如表 7 所示。对表 7 中的数据进行二次多项式曲线拟合，方程为

$$S_1 = 1\,540.79\mu_{r1}^2 - 326.6\mu_{r1} + 42.94 \quad (R^2 = 0.914) \tag{4}$$

$$S_2 = 587.3\mu_{r2}^2 - 166.24\mu_{r2} + 38.6 \quad (R^2 = 0.914) \tag{5}$$

式中　S_1——PLA 塑料板水平滚动最大距离

S_2——Q235 钢板水平滚动最大距离

μ_{r1}——PLA 塑料板滚动摩擦因数

μ_{r2}——Q235 钢板滚动摩擦因数

表 7　滚动摩擦因数仿真试验设计与结果

Tab. 7　Simulation test design and results of rolling friction coefficient

序号	滚动摩擦因数 μ_{ri}		水平滚动最大距离 S_i/mm	
	PLA 塑料板	Q235 钢板	PLA 塑料板	Q235 钢板
1	0.01	0.01	41.76	37.98
2	0.03	0.03	31.55	32.94
3	0.05	0.05	29.90	31.01
4	0.07	0.07	28.67	30.04
5	0.09	0.09	27.07	29.36
6	0.11	0.11	25.99	27.88
7	0.13	0.13	25.71	26.22

拟合结果表明两个方程的决定系数均与 1 非常接近，表明回归方程模型极显著，数据真实可靠。数据拟合曲线如图 10 所示。将物理试验测得的羊草种子颗粒以及 PLA 塑料板和 Q235 钢板的水平滚动距离分别代入式(4)、(5)中，解得滚动摩擦因数分别为 0.019、0.113。将解得的滚动摩擦因数输入 EDEM 仿真软件中，羊草种子颗粒与这两种材料的碰撞恢复系数和静摩擦因数均采用前文已经标定的数据，羊草种子颗粒间接触参数的设置对羊草种子颗粒与材料间接触参数标定无影响，故设置为零，仿真试验重复进行 5 次，取其最大值的平均值，比较与 PLA 塑料板、Q235 钢板物理试验滚动最大距离相对误差，结果分别为 2.99% 和 2.11%，其相对误差均在 5% 以内，说明仿真标定后的滚动摩擦因数与物理试验基本相吻合。

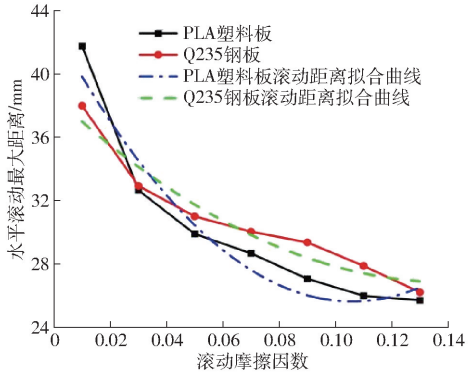


图 10　滚动摩擦因数与种子水平滚动距离拟合曲线

Fig. 10　Fitting curves of rolling friction factor and seed horizontal rolling distance

3.3　种间接触参数

3.3.1　最陡爬坡试验

基于前期预试验结果与文献分析，初步确定羊草种子的离散元模型参数范围如下：碰撞恢复系数

0.24 ~ 0.40,种间静摩擦因数 0.38 ~ 0.65,种间滚动摩擦因数 0.01 ~ 0.13。通过最陡爬坡法(Steepest ascent method)确定二次回归正交旋转组合设计的因子中心值与优化区间,具体试验设计与响应值如表 8 所示。数据显示,堆积角仿真误差随参数调整呈现先降后升趋势,其中试验 4 的相对误差(3.21%)达到最小值。据此选定试验 4 为三因素二次正交旋转组合设计的中心点,试验 3、5 分别作为种间碰撞恢复系数、滚动摩擦因数与静摩擦因数的低、高水平边界,进而建立回归模型。经模型优化后,羊草种子离散元参数的可行域为:碰撞恢复系数 0.28 ~ 0.36,种间静摩擦因数 0.47 ~ 0.59,种间滚动摩擦因数 0.04 ~ 0.07。

表 8 最陡爬坡试验设计与结果

Tab. 8 The steepest climbing test design and results

试验序号	种间碰撞恢复系数 e	种间静摩擦因数 μ_x	种间滚动摩擦因数 μ_r	仿真堆积角 $\theta'/(°)$	相对误差 $\delta/\%$
1	0.20	0.35	0.01	31.4	19.98
2	0.24	0.41	0.03	34.3	12.59
3	0.28	0.47	0.04	37.5	4.43
4	0.32	0.53	0.05	40.5	3.21
5	0.36	0.59	0.07	44.2	12.71
6	0.40	0.65	0.09	54.6	39.14
7	0.44	0.70	0.11	61.3	56.22

3.3.2 二次回归正交旋转组合试验

选取羊草种子离散元模型的碰撞恢复系数 e、种间静摩擦因数 μ_x 及种间滚动摩擦因数 μ_r 为自变量,以堆积角仿真值与台架实测值的相对误差为响应变量,采用三因素二次正交旋转组合设计(Box - Behnken design)开展参数优化。其中试验因素编码见表 9,完整试验方案与响应面分析数据见表 10,表中 A、B、C 分别表示 e、μ_x、μ_r 的编码值。

表 9 仿真试验因素编码

Tab. 9 Simulation test factors and coding

编码	因素		
	e	μ_x	μ_r
-1.682	0.253	0.429	0.030
-1	0.280	0.470	0.040
0	0.320	0.530	0.055
1	0.360	0.590	0.070
1.682	0.387	0.631	0.080

采用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合,得到回归方程的显著性检验结果如表 11 所示。由表 11 分析可知,种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数、种间滚动摩擦因数以及种间碰撞恢复系数与滚动摩擦因数的交互项(AC)对堆积角仿真误差的影响极显著,表明它们对模型拟合精度具有重要贡献。通过标准化回归因数的比较可进一步得出各因素对堆积角的影响权重从大到小依次为:静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数,其中静摩擦因数对堆积角误差的解释能力最强,是最主要的控制因素。对数据进行处理,得到响应曲面如图 11 所示。由图 11 可知,种间碰撞恢复系数、种间静摩

表 10 试验方案与结果

Tab. 10 Test scheme and results

试验	因素			相对误差
	A	B	C	$\delta/\%$
1	-1	-1	-1	16.14
2	1	-1	-1	11.31
3	-1	1	-1	13.21
4	1	1	-1	9.79
5	-1	-1	1	19.81
6	1	-1	1	11.11
7	-1	1	1	16.83
8	1	1	1	9.07
9	-1.682	0	0	19.27
10	1.682	0	0	8.51
11	0	-1.682	0	18.46
12	0	1.682	0	11.87
13	0	0	-1.682	7.49
14	0	0	1.682	10.21
15	0	0	0	4.23
16	0	0	0	3.97
17	0	0	0	2.58
18	0	0	0	4.68
19	0	0	0	3.83
20	0	0	0	4.16

表 11 方差分析

Tab. 11 Regression equation analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	582.28	9	135.18	0.000 01 **
A	134.17	1	280.19	0.000 01 **
B	30.93	1	64.60	0.000 01 **
C	8.77	1	18.32	0.001 6 **
AB	0.690 3	1	1.44	0.257 5
AC	8.43	1	17.60	0.001 8 **
BC	0.040 6	1	0.084 8	0.776 8
A^2	184.77	1	385.85	0.000 01 **
B^2	234.22	1	489.12	0.000 01 **
C^2	46.63	1	97.37	0.000 01 **
残差	4.79	10		
失拟	2.25	5	0.887 7	0.550 4
误差	2.54	5		
总和	587.37	19		

注:$P > 0.05$ 表明模型或因素不显著;* 表示影响显著($0.01 < P \leqslant 0.05$);** 表示影响极显著($P \leqslant 0.01$)。

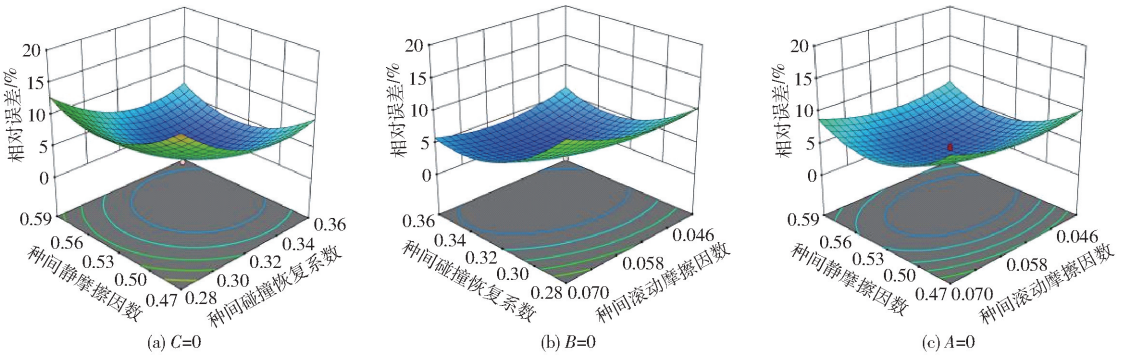


图 11　试验因素对堆积角影响的响应曲面

Fig. 11　Effects of test factors on stacking angle response surface

擦因数和种间滚动摩擦因数对堆积角相对误差的影响趋势都是先减小后增大，其中 AB 和 BC 对堆积角的相对误差影响并不显著，可能是种间静摩擦因数这单一因素对堆积角的相对误差影响较大，导致其交互作用影响较小。在回归方程中去除不显著项后，拟合到新的回归方程

$$\delta = 3.90 - 3.13A - 1.50B + 0.801\,4C - 1.03AC + 3.58A^2 + 4.03B^2 + 1.80C^2 \quad (6)$$

该回归模型的 F 值为 135.18，P 值小于 0.01，这意味着回归方程模型极显著，且失拟项的 P 值为 0.554，大于 0.05，说明所得回归方程(6)与实际拟合中非正常误差所占比例小，不存在其他影响指标的主要因素。回归方程的决定系数 R^2 为 0.992，说明该回归方程的拟合程度高，能够准确地反映出试验因素与堆积角相对误差间的关系，可用于堆积角的预测分析。

3.3.3　多目标优化参数

利用 Design-Expert 软件的优化模块，将堆积角相对误差的最小值设置为优化目标，求解得到的回归方程，分析响应曲面，对回归模型进行寻优。目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \delta = \min(A, B, C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant A \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant B \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant C \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

得到回归模型的最优参数组合为：种间碰撞恢复系数 0.337、种间静摩擦因数 0.540、种间滚动摩擦因数 0.053。将标定后的接触参数代入 EDEM 软件中进行 5 次堆积角仿真试验，测得堆积角平均值为 39.17°，与台架试验堆积角 39.24°的相对误差为 0.18%，说明所得最优仿真接触参数组合与实际基本一致，可用于后续的 EDEM 仿真试验。

4　台架试验

为进一步验证 EDEM 标定后的离散元模型和羊草种子颗粒接触参数的准确性，使用外槽轮排种器对羊草种子进行排种试验。该排种器主要采用 PLA 3D 打印方式加工，结构如图 12a 所示，该排种器主要由螺旋搅种轮、外槽轮、清种刷、隔料小腔和步进电机组成，对羊草种子进行台架试验。试验以质量流率和各行排种量变异系数作为试验指标，通过设定不同的槽轮转速进行台架与仿真试验。每次试验排种时间为 1 min，重复进行 5 次，分别记录每次排出种子的总质量与各通道排出的种子质量，计算各行排种量一致性变异系数，取 5 次试验的平均值进行对比。各行排种量一致性变异系数按照标准[24]进行计算。

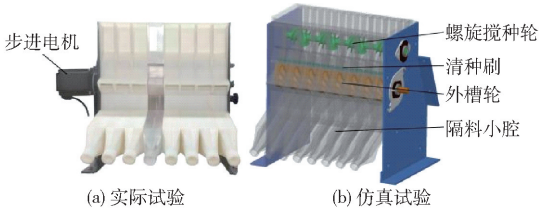


图 12　验证试验

Fig. 12　Verification tests

建立排种器的三维模型，如图 12b 所示。模型材料设置为 PLA 塑料，相关接触参数设定为标定好的数值。在排种器上方设置颗粒工厂，生成 1 kg 的羊草种子，待生成的种子完全落入排种器中并保持静止后，排种槽轮与螺旋搅种轮开始转动，设定槽轮转速与搅种轮转速相同。使用 EDEM 后处理模块，统计排种时间内各个通道中排出的羊草种子总质量，并计算各通道的质量流率与各行排种量一致性变异系数，然后与台架试验进行对比。

图 13 为试验指标的实测与仿真结果。仿真试验与台架试验总排种量相对误差为 1.38%，各行排种量一致性变异系数相对误差为 3.76%，均小于 5%。结果表明该方法能较好地反映羊草种子实际几何特征与接触行为特性，在播种过程关键运动行为(如滚动、姿态调整、相互碰撞等)的建模中表现出明显优于规则几何建模的精度优势。研究结果进

一步验证了逆向建模方法在复杂颗粒建模中的适用性与可推广性,具有较强的工程实用价值。

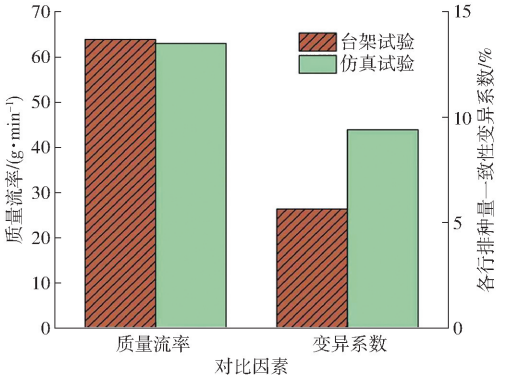


图 13 台架试验与仿真试验对比

Fig. 13 Comparison of bench test and simulation test

5 结论

(1)基于物理试验,系统测定了羊草种子的三轴尺寸、千粒质量、密度、弹性模量、剪切模量及泊松比等本征参数,并通过逆向工程技术,获得了羊草种子高保真三维颗粒模型,采用 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型,并以单球填充方式在 EDEM 中构建了离散元仿真模型。

(2)通过落体碰撞试验、摩擦因数与滚动因数测试试验与仿真对比试验,标定了羊草种子与 Q235 钢板、PLA 塑料板的碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数。

(3)以实测堆积角 39.24°为目标,采用响应面法对种间接触参数进行优化,确定最优参数组合为:碰撞恢复系数 0.337、静摩擦因数 0.540、滚动摩擦因数 0.053。仿真堆积角相对误差为 0.18%,验证了模型参数的有效性。

(4)进行了实际排种过程的台架试验与仿真验证试验,结果表明,总排种量相对误差为 1.38%,各行排种量一致性变异系数相对误差为 3.76%,均小于 5%,进一步验证了模型及参数的准确性,表明基于逆向工程技术所建立的种子离散元三维模型具有较高的精确性,也为其他牧草种子的离散元模型建立提供了有效的方法指导。

参 考 文 献

[1] ZHAO Dandan, MA Hongyuan, LI Shaoyang, et al. Seed germination demonstrates inter-annual variations in alkaline tolerance: a case study in perennial *Leymus chinensis*[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 397.

[2] GU Zhiwei, WANG Cheng, LI Luxin, et al. Decomposition of *Leymus chinensis* root residues in restored grasslands increased soil faunal abundance[J/OL]. Plant and Soil, 2025. DOI:10.1007/s11107-025-07485-5.

[3] ZHANG F, LUO Z, LI W, et al. Structural design and optimization of crushing and strip-laying device based on discrete element method with wet-adhesive flexible straw model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110537.

[4] 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)

[5] 马永超,王尊,石林榕,等. 冬小麦种子颗粒离散元仿真参数标定[J]. 中国农业大学学报,2025,30(3):175 - 184.
MA Yongchao, WANG Zun, SHI Linrong, et al. Determination the intrinsic parameters and calibration of contact parameters for wheat seed particles[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(3): 175 - 184. (in Chinese)

[6] 李元超,田辛亮,赵岩,等. 基于 Tavares 模型的多面体棉籽离散元参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):124 - 131,220.
LI Yuanchao, TIAN Xinliang, ZHAO Yan, et al. Parameter calibration and experiment of polyhedral cottonseed discrete element based on Tavares model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 124 - 131, 220. (in Chinese)

[7] 丁辛亭,李凯,郝伟,等. 基于 RSM 和 GA - BP - GA 优化的油茶籽仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(2):139 - 150.
DING Xinting, LI Kai, HAO Wei, et al. Calibration of simulation parameters of *Camellia oleifera* seeds based on RSM and GA - BP - GA optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 139 - 150. (in Chinese)

[8] 张荣芳,周纪磊,刘虎,等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):69 - 77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 69 - 77. (in Chinese)

[9] 刘瑞,李衍军,刘忠军,等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):1 - 8,18.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Zhongjun, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 1 - 8, 18. (in Chinese)

[10] 闫建伟,魏松,张万萍,等. 白萝卜种子颗粒接触参数标定[J]. 中国农机化学报,2023,44(8):1 - 11.
YAN Jianwei, WEI Song, ZHANG Wanping, et al. Calibration of discrete element contact parameters for white radish seed

particles[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 1 - 11. (in Chinese)
[11] 郑效帅,何晓宁,尚书旗,等. 油莎豆种子籽粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农机化研究,2024,46(2):172 - 178.
ZHENG Xiaoshuai, HE Xiaoning, SHANG Shuqi, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of cyperus esculentus seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024,46(2):172 - 178. (in Chinese)
[12] 陈永,高晓勋,金鑫,等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 58 - 69.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of cyperus esculentus seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(12):58 - 69. (in Chinese)
[13] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):136 - 144. (in Chinese)
[14] 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)
[15] 原建博, 李骅, 吴崇友, 等. 基于离散单元法的水稻籽粒快速颗粒建模研究[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(6): 1151 - 1158.
YUAN Jianbo, LI Hua, WU Chongyou, et al. Study on apace particle modeling of rice grain basis on the discrete element method[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, 41(6): 1151 - 1158. (in Chinese)
[16] ISO 527 - 1:2019. Plastics—determination of tensile properties—part 1: general principles[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
[17] 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 108 - 112.
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108 - 112. (in Chinese)
[18] 廖洋洋,尤泳,王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):14 - 22.
LIAO Yangyang, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration and experiment of discrete element model for mixed seeds of oat and arrow pea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):14 - 22. (in Chinese)
[19] WANG Lijun, WU Baoxin, WU Zhenchao, et al. Experimental determination of the coefficient of restitution of particle-to-particle collision for frozen maize grains[J]. Powder Technology,2018,338:263 - 273.
[20] 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 and calibration of physical property parameters for *Agropyron* seeds in a discrete element simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 46 - 54. (in Chinese)
[21] 王翠竹,潘发兴. Q235 和 Q345 材料的异型管弯曲成型质量的仿真研究[J]. 模具技术,2024(1):71 - 79.
WANG Cuizhu, PAN Faxing. Simulation research on bending forming quality of special-shaped tubes with different materials[J]. Die and Mould Technology, 2024(1):71 - 79. (in Chinese)
[22] 郭子涛,高斌,郭钊,等. 基于 J - C 模型的 Q235 钢的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击,2018,38(4):804 - 810.
GUO Zitao, GAO Bin, GUO Zhao, et al. Dynamic constitutive relation based on J - C model of Q235 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(4): 804 - 810. (in Chinese)
[23] 崔方方,丁凯,李奇林,等. 超声辅助磨削砂轮基体材料的振动性能研究[J]. 工具技术,2017,51(7):20 - 23.
CUI Fangfang, DING Kai, LI Qilin, et al. Study on vibration performance of wheel matrix materials for ultrasonic assisted Grinding[J]. Tool Engineering, 2017,51(7):20 - 23. (in Chinese)
[24] 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院,国家农机具质量监督检验中心. 牧草免耕播种机:GB/T 25421—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011.