doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.030

基于离散元的棉秆根系-土壤系统建模与起拔过程界面破坏机制研究

亚森江·白克力[1,2]　宋　玲[1,2]　岳　勇[1,2]　徐浩东[1,2]　幸仁圣[1,2]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆智能农业装备重点实验室,乌鲁木齐 830052)

摘要:当前棉秆起拔过程中,棉秆根系-土壤界面作用机制复杂,缺乏高精度仿真模型,进而导致起拔机械在结构设计与参数优化方面面临困难。为此,基于离散元法(DEM),构建了新疆棉田典型土壤的粘结模型及棉秆根系-土壤系统,系统揭示起拔过程中的界面力学响应与破坏机制。通过无侧限抗压试验与 Box-Behnken 设计(BBD)相结合,完成土壤粘结参数的标定,得到最优组合:单位面积法向粘接刚度 1.05×10^8 N/m^3、单位面积切向粘接刚度 3.09×10^8 N/m^3、单位面积法向粘结应力 6.95×10^5 Pa/m^2、单位面积切向粘结应力 6.69×10^5 Pa/m^2,仿真与试验结果的轴向压力误差为 1.7%。在此基础上,基于 EDEM 软件构建了棉秆根系-土壤系统模型,并通过仿真与田间试验对比验证,预测起拔力为 592.56 N,与实测值 598.2 N 的相对误差为 1%。进一步分析起拔力-时间曲线,界面响应过程可分为弹性加载、峰值加载、衰减和残余稳定 4 个阶段,分别对应剪应力积累、粘结破坏、根-土滑移及残余接触;揭示了剪切力主导起拔阻力演化,破坏模式受根径与土壤条件共同影响的机制。本研究为棉秆类作物根-土界面的高精度建模提供了仿真方法支撑,同时为起拔结构设计与作业参数优化提供理论基础。

关键词:棉秆根系起拔力模拟;离散元;土壤粘结模型;根-土界面;破坏分析

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0353-12　　**OSID**:

Modeling of Cotton Root-Soil System Based on Discrete Element Method and Investigation of Interface Failure Mechanisms during Uprooting Process

YASENJIANG Baikeli[1,2]　SONG Ling[1,2]　YUE Yong[1,2]　XU Haodong[1,2]　XING Rensheng[1,2]

(1. *Mechanical and Electronic Engineering Institute*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment*, *Urumqi* 830052, *China*)

Abstract: In the current cotton stalk pulling process, the interaction mechanisms at the root-soil interface are highly complex, and there is a lack of high-fidelity simulation models, which significantly hinders the structural design and parameter optimization of pulling machinery. To address this issue, the discrete element method (DEM) was employed to construct a cohesive soil model and a root-soil composite system representative of typical cotton fields in Xinjiang, aiming to systematically reveal the interfacial mechanical responses and failure mechanisms during the pulling process. Soil bonding parameters were calibrated by using unconfined compression tests combined with a Box-Behnken design (BBD) optimization approach, yielding optimal values: normal bonding stiffness of 1.05×10^8 N/m^3, tangential bonding stiffness of 3.09×10^8 N/m^3, normal bonding strength of 6.95×10^5 Pa/m^2, and tangential bonding strength of 6.69×10^5 Pa/m^2. The axial pressure simulation error was 1.7%, confirming model accuracy. Using these parameters, a root-soil model was constructed in EDEM software and validated against field tests, with the predicted uprooting force (592.56 N) closely matching the measured value (598.2 N), showing a 1% error. Uprooting force-time curve analysis revealed four distinct response stages: elastic loading, peak loading, attenuation failure, and residual stabilization, reflecting shear stress buildup, bond rupture, root-soil slippage, and post-failure contact. The results showed that shear stress dominated resistance evolution, and the failure mode was jointly affected by root diameter and soil conditions. The research can provide an effective simulation framework for modeling root-soil systems for the design optimization of uprooting mechanisms.

收稿日期:2025-05-08　修回日期:2025-05-30

基金项目:新疆维吾尔自治区青年科学基金项目(2022D01B91)

作者简介:亚森江·白克力(1987—),男,讲师,博士生,主要从事农业机械创新设计研究,E-mail:yasin@zju.edu.cn

Key words: root uprooting simulation of cotton stalk; discrete element method; soil bonding model; root - soil interface; failure analysis

0 引言

棉秆作为棉花生产的主要副产品,在生物质能源及材料制造领域具有重要应用价值[1],其高效回收可转化为生物燃料、有机肥料等高附加值产品,兼具环境效益与资源利用率提升功能[2]。当前,针对棉秆的整秆回收技术已发展出多种装备类型,如提拔式[3-4]、齿盘式[5]、对辊式[6]及链夹式[7]等主流机械结构。相较于传统的棉秆粉碎还田方式,整秆起拔技术具备显著优势,能够有效抑制土传病害、改善耕层结构,并促进地膜残留的同步回收。然而,作为典型的深根型作物残茬,棉秆根系在起拔过程中涉及复杂的根-土界面力学相互作用,这一过程不仅直接影响起拔阻力的演变规律,也决定根系破坏模式,进而对作业效率和设备性能产生关键影响。尽管现有研究在作业效果评估与阻力测量方面已取得一定进展,但对棉秆根系-土壤界面微观力学机制的系统研究仍显不足,尤其在数值建模与界面破坏特征表征方面仍存在空白[8-10],这在很大程度上限制了农机结构创新与作业参数优化的深入推进。因此,应构建基于离散元法的棉秆根系-土壤系统数值模型,系统揭示棉秆起拔过程中的界面破坏机制与阻力演化规律。

近年来,国内外学者围绕根系-土壤系统的力学特性展开了大量研究,形成了以离散元法(DEM)为主的界面接触与拉拔行为研究和以有限元法(FEM)为主的复合模型与剪切机制解析两大技术路线[11]。JIANG 等[12]在 DEM 框架下建立了棉秆根系-土壤接触模型并精准标定了接触参数,揭示了根-土界面力学规律,但研究仅限于理想砂土环境,未考虑新疆棉田土壤的粘结特性;WAN 等[13]通过甘草-土壤复合模型结合抗剪切与拉拔试验探讨了根系表面积效应,但试验作物单一且土层条件一致,难以推广至深根棉秆。另一方面,ZHU 等[14]基于 FEM 模拟了根系拔出与断裂失效模式,阐明了根茎分布与拉拔力的关联,却将土壤视作均质连续体,忽略了颗粒间界面破坏;张凯等[15]通过 DEM 分析了狗牙草根系-土壤复合体的抗剪切性能,指出了根密度和形态参数的重要性,但缺乏与田间试验的耦合验证;ZHANG 等[16]与 LIU 等[17]分别针对玉米和山药根系开展了直剪试验校准复合模型参数,虽获取了抗剪性能指标,却未深入刻画不同几何要素在微观尺度的破坏机制。综上,现有研究虽在数值模拟与试验验证方面取得重要进展,但针对棉秆这一深根残茬在复杂土壤条件下界面破坏机制及几何参数对起拔过程影响的系统性数值模拟与试验研究尚不充分,亟待进一步深入探索。

鉴于现有研究在区域性土壤粘结模型构建、系统仿真验证及界面剪切破坏机制刻画方面仍不充分,本文提出一套棉秆根系-土壤力学建模与界面破坏机制模拟方法。首先,基于 EDEM 软件构建适用于新疆棉田的区域性土壤粘结模型,并结合 BBD 优化方法实现土壤力学参数的高效拟合,为农业土壤力学建模提供思路和建议。随后,搭建棉秆根系-土壤系统模型,并通过仿真模拟与田间试验相结合的方式验证其可靠性,为起拔行为仿真提供技术支撑。开展棉秆起拔过程中根系-土壤界面剪切破坏机制建模,系统揭示不同几何参数对起拔阻力的影响规律,深化对棉秆根系-土壤界面力学响应的认识。为提升棉秆起拔效率及优化相关机械装备结构提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 土壤粘结参数标定

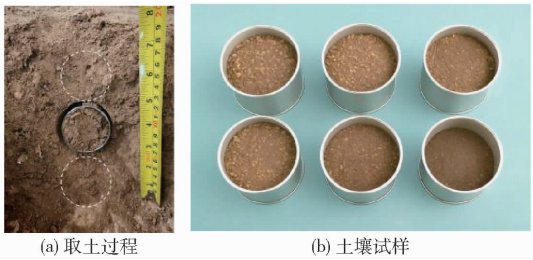
1.1.1 土壤物理参数

在试验田中,采用 S 形取样法(取样间距 10 m)等距设置 3 个取样点;每个取样点利用内径 100 mm 环刀法[18]采集两组平行土样,测得土壤干密度为(1 576 ± 12) kg/m^3。使用 TZS - 1K - G 型土壤水分测定仪测定得土壤含水率为(19.8 ± 0.4)%。土壤泊松比取 0.38[19];通过无侧限抗压强度试验测得土样弹性模量 E 为 2.0×10^7 Pa,换算得土样剪切模量为 7.25×10^6 Pa。土壤-土壤碰撞恢复系数为 0.4,土壤-土壤静摩擦因数为 0.8,土壤-土壤滚动摩擦因数为 0.3。

1.1.2 粘结参数标定试验

无侧限抗压强度表征材料在无侧向约束条件下承受轴向压力的最大承载能力[20]。试验采用原状土样,依据《土工试验方法标准》[18]将试样精加工为标准尺寸:直径 100 mm、高 100 mm 的圆柱体,对应截面积为 1 962.5 mm^2。取土样过程如图 1 所示。

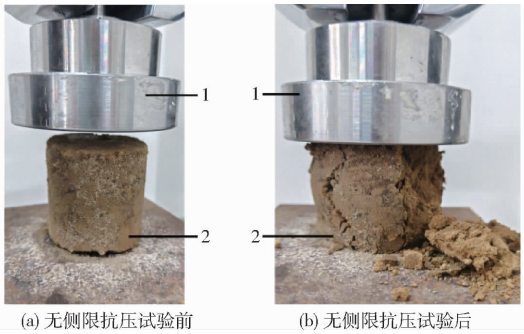
无侧限抗压试验(图 2)在新疆农业大学智能装备重点实验室内进行,所用设备为配备 2 kN 量程载荷传感器的电子万能试验机。试验采用应变控制加载,加载速率设为 2 mm/min,以保证轴向应变增量为 1 ~ 3%/min,总试验时间控制在 8 ~ 10 min。加



(a) 取土过程　　(b) 土壤试样

图 1　环刀取土

Fig. 1　Circular knife for soil extraction



(a) 无侧限抗压试验前　　(b) 无侧限抗压试验后

图 2　无侧限抗压试验

Fig. 2　Unconfined compression test

1. 上压盘　2. 土壤

载至峰值后继续加载，直至应变再增加 3% ~5% 时卸载；若试验过程中未出现明显峰值，则在轴向应变达到 20% 时终止，并取 15% 应变对应的应力值作为无侧限抗压强度指标。试验结束后，对加载前后的土样采用烘干法测定含水率。共完成 5 组平行试验，平均最大轴向荷载为 477.76 N，对应无侧限抗压强度平均值为 243.95 kPa。整个试验过程严格遵循《土工试验方法标准》[18] 的操作规范。

1.2　棉秆根系-土壤界面力学模型建立

1.2.1　棉秆根系物理参数

新陆早系列棉花是新疆主要产棉区种植面积最大的品种，具有较强的代表性[21]。为保证模型的工程适用性与物理一致性，本研究将棉秆根系几何形状参数（主根直径、分根直径、根系总长）作为定值输入，相关数值来源于对新陆早系列棉花典型生育期个体的实测及文献[22 -24]，具体见表 1。

1.2.2　Bonding 粘结模型

Bonding 模型是 EDEM 离散元软件中实现颗粒粘结的附加模块，通过在相邻颗粒间添加粘结键（Bond），同时约束法向和切向相对位移；当外载荷超过设定的临界应力时，粘结键即失效。粘结作用仅在颗粒接触半径范围内发生，其力学响应等效于法向与切向弹簧系统[25]。图 3 给出了该模型的二维结构示意图[26 -27]。

图 3 所示模型中，R 表示颗粒实际半径；R_c 为 Bond 键触发的最大接触半径——当两颗粒中心距

表 1　棉秆根系物理参数

Tab. 1　Cotton root physical parameters

类型	参数	数值
棉秆根系	密度/(kg·m^{-3})	1 080
	主根直径/mm	8.0
	侧根直径/mm	3.0
	根系总长/mm	250
	泊松比	0.35
	剪切模量/Pa	6.9×10^{8}
	分叉层级	2
	平均分叉角度/(°)	60
棉秆根系-棉秆根系	碰撞恢复系数	0.50
	静摩擦因数	0.41
	滚动摩擦因数	0.06
	单位面积粘结刚度/(N·m^{-3})	4.15×10^{10}
	单位面积粘结应力/(Pa·m^{-2})	5.60×10^{10}
棉秆根系-土壤	碰撞恢复系数	0.314
	静摩擦因数	0.625
	滚动摩擦因数	0.150

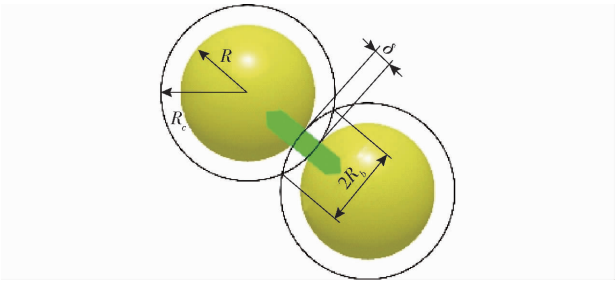


图 3　Bonding 模型平面示意图

Fig. 3　Bonding model plane diagram

小于 $2R_c$（即接触半径重叠）时即生成粘结键[28]；R_b 定义了粘结键法向截面的几何特征，用于计算法向接触面积。示意图中，两颗粒实体间未发生物理接触，因而法向重叠量 $\delta<0$。Bonding 模型中颗粒间的相互作用力与力矩的计算涉及粘结键法向截面积及惯性矩参数，详细计算公式参见文献[29 -30]。

Bonding 模型包含 5 个核心参数：单位面积法向刚度 K_n、单位面积切向刚度 K_t、临界法向应力 σ_n^c、临界切向应力 τ_s^c 及接触半径 R_c。其中 σ_n^c 与 τ_s^c 分别表示 Bond 键在法向拉伸和切向剪切加载下所能承受的最大应力；一旦实际应力 σ_n 或 τ_s 超过对应临界值，粘结键即发生断裂。其断裂判据可表示为[31]

$$\sigma_n^c<\frac{-F_n}{A_b}+\frac{2M_t}{J}R_b \tag{1}$$

$$\tau_n^c<\frac{-F_t}{A_b}+\frac{M_n}{J}R_b \tag{2}$$

式中　σ_n^c——临界法向应力，Pa

τ_n^c——临界切向应力，Pa

M_n、M_t——粘结键法向力矩和切向力矩，N·m

J——粘结键惯性矩，mm^4

F_n、F_t——粘结键法向力和切向力，N

A_b——粘结键法向横截面面积，m^2

综上所述，通过在颗粒间设置 Bond 键，可建立一种非接触式的粘结机制，不仅能够有效表征土壤内部复杂的粘结行为，还能直观反映颗粒间的能量传递特征。在仿真过程中，若采用非等径或非球形颗粒建模，会显著增加计算复杂度，并可能因颗粒排列不规则而引入较大的数据离散性[32-33]。已有研究表明，等径球形颗粒体系在模拟材料力学响应方面具有良好的代表性和稳定性[34]，在分析土壤破碎与变形特征时具备重要的参考价值，因此本研究选用等径颗粒构建土样力学模型。此外，土壤颗粒间因毛细作用形成的液桥结构[35]，在宏观上表现为含水率对粘结强度的增强效应，该现象亦可通过 Bond 键粘结机制加以模拟与分析。

1.2.3 棉秆根系-土壤起拔力学模型参数设置

为精确模拟棉秆根系在土壤中的起拔过程及其受力特性，本文采用多尺度离散元建模方法构建棉秆根系-土壤耦合系统的数值仿真模型。首先，基于三维建模软件完成棉秆根系三维实体结构的重建，并将其导入 EDEM 离散元仿真平台。材料本构关系采用 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型[23]。针对棉秆根系的生物力学特性，依据田间实测样本构建包含棉秆根系结构的三维几何模型。通过 Python API 进行二次开发，实现模型的参数化网格剖分(网格分辨率为 3.1 mm)，并导出网格质心坐标矩阵，进而建立网格与颗粒系统的几何拓扑映射关系。

在 EDEM 中，采用分层建模策略构建棉秆根系-土壤系统模型：棉秆根系部分采用系统离散元方法建模，初步生成半径为 1.5 mm、接触半径为 1.8 mm 的基元颗粒，随后通过 Meta - particle 模型将其与棉秆根系三维网格坐标系进行空间绑定；土壤采用单球体颗粒建模，颗粒半径设为 2 mm，接触半径为 2.4 mm，确保模型能够准确反映田间实际情况。

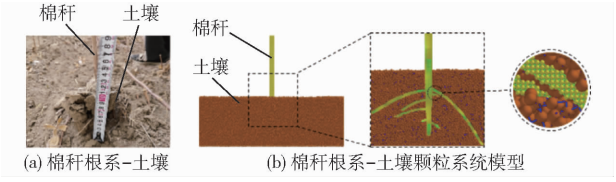


图 4 棉秆根系-土壤离散元系统模型

Fig. 4 DEM model construction of soil interface between cotton stalk and root

图 4 展示了棉秆根系-土壤系统模型的整体结构与离散元建模细节。图 4b 则描述了基于离散元法的棉秆根系-土壤系统建模流程，显示了棉秆根系-土壤颗粒之间建立的 Bond 粘结键结构，用以模拟棉秆根系与土壤之间因物理粘结与力学连接。该结构为后续分析棉秆根系起拔过程中颗粒间的受力传递与破坏行为提供了基础。

1.3 棉秆根系-土壤系统模型可靠性验证

1.3.1 起拔力离散元仿真模拟试验

为验证所构建棉秆根系-土壤离散元模型的准确性与适用性，本文基于 EDEM 平台开展了棉秆根系起拔过程的数值仿真试验。仿真方案严格对应田间试验条件，确保各项参数保持一致。接触模型选用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型，其中 Bond 粘结参数(如单位面积法向刚度、临界法向/切向应力等)依据本研究的标定试验结果设定。棉秆根系与土壤间的接触摩擦参数设定为[11]：静摩擦因数 0.45，滚动摩擦因数 0.10。在仿真过程中，借助 EDEM 后处理模块实时监测棉秆根系各关键部位的受力状态，提取起拔过程中根-土界面的法向力与切向力分量，进而合成总起拔力随时间变化的曲线。

为评估模型预测能力，将仿真所得平均起拔力与田间实测数据进行对比，计算相对误差，并引入皮尔逊相关系数[11]，量化仿真结果与实测值间的拟合程度，从而验证模型的精度与可靠性。

此外，为进一步揭示棉秆根系起拔过程中土壤颗粒运动特征及粘结破坏行为，本文对仿真中的土壤颗粒位移场与 Bond 键断裂分布进行了分析。该分析旨在探索根-土界面在剪切加载作用下的微观破坏机制，并将仿真结果与田间试验中观察到的棉秆根系-土壤分离形态进行对比，从而验证模型在结构响应层面的合理性与物理一致性。图 5 展示了典型仿真结果，包括起拔过程中土壤颗粒位移演化与粘结键破坏区域的空间分布特征。

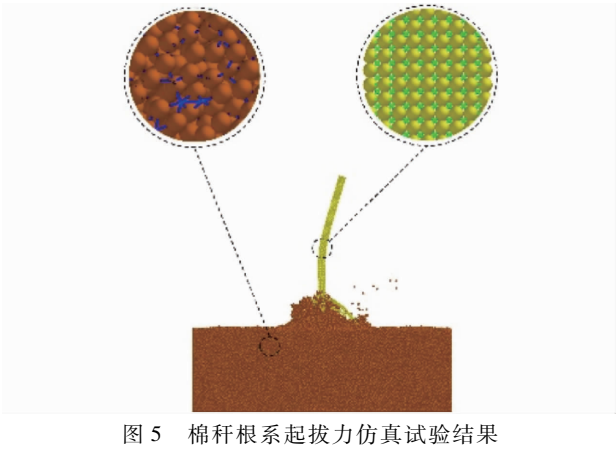


图 5 棉秆根系起拔力仿真试验结果

Fig. 5 Simulation results of root pull force of cotton stalk

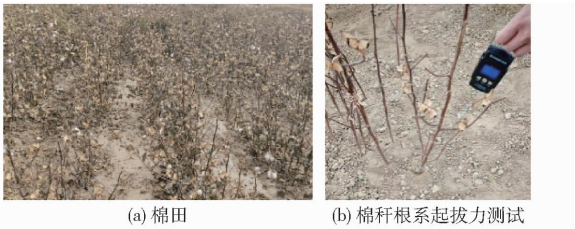
1.3.2 田间试验

棉秆根系起拔力是评估其收获难度和机械作业负载的重要指标参数[9]，该力值由土壤变形阻力、根系断裂强度及根-土之间的粘结力共同构成[10]。

为获取棉秆根系收获所需的实际起拔力，并验证棉秆根系-土壤离散元模型的可靠性，本文开展了田间实测试验。

试验地点位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州库尔勒市阿瓦提乡（东经 86°06′，北纬 41°68′）的某农户棉田。试验选用棉花品种为“新陆早 66 号”。通过 AW314 型电子拉力器完成棉秆根系起拔操作，并实时采集起拔力数据。

图 6a 为取样棉田，图 6b 为田间棉秆根系起拔力测试场景。辅助测试仪器包括 TJSD－750－2 型土壤坚实度测定仪、TZS－1K－G 型土壤水分测定仪、卷尺等。测得试验棉田土壤紧实度平均值为 447.3 kPa，土壤含水率平均值为 19.8%，为仿真建模及试验分析提供数据支撑。



(a) 棉田　　(b) 棉秆根系起拔力测试

图 6　棉田试验

Fig. 6　Cotton field tests

为减小试验误差，确保数据的代表性与可靠性，本文采用“双对角线五点取样法”[11]对试验棉田中的棉秆根系进行起拔力测定。依据该采样方法，将试验田划分为 5 个测量区域，并在每一区域内分别进行 10 组棉秆根系起拔力测试，共计完成 50 组有效测量。

试验前统一设定棉秆根系起拔角度为 60°[10]，如图 6b 所示，利用 AW314 型电子拉力器记录每株棉秆根系完成起拔所需的最大拉力，作为该样本的起拔力测量结果。

2　结果与分析

2.1　土壤-土壤粘结参数标定

为验证所构建二阶回归模型对棉秆根系-土壤系统响应变量（轴向压力）的拟合有效性，并探究法向刚度、切向刚度、法向粘结强度及切向粘结强度等关键参数的主效应与交互效应影响规律，本研究采用 Box－Behnken 试验设计法（BBD）开展四因素三水平正交试验[36]。各试验因素编码如表 2 所示。

基于所构建的四因素三水平 BBD 试验方案，完成了多组参数组合下的数值仿真试验，获得了相应条件下土壤轴向压力的响应结果。各组试验设计参数与仿真输出结果如表 3 所示，X_1、X_2、X_3、X_4 为因素编码值。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Experimental factors codes

因素	编码		
	－1	0	1
单位面积法向粘结刚度 x_1/(N·m^{-3})	1×10^8	3×10^8	5×10^8
单位面积切向粘结刚度 x_2/(N·m^{-3})	3×10^8	5×10^8	7×10^8
单位面积法向粘结应力 x_3/(Pa·m^{-2})	3×10^5	5×10^5	7×10^5
单位面积切向粘结应力 x_4/(Pa·m^{-2})	3×10^5	5×10^5	7×10^5

表 3　土壤-土壤粘结参数 BBD 试验结果

Tab. 3　BBD test results for soil－soil bond parameters

试验序号	因素				轴向压力
	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1/N
1	－1	－1	0	0	419.84
2	1	－1	0	0	484.64
3	－1	1	0	0	478.00
4	1	1	0	0	505.80
5	0	0	－1	－1	403.31
6	0	0	1	－1	434.45
7	0	0	－1	1	435.79
8	0	0	1	1	443.25
9	－1	0	0	－1	406.66
10	1	0	0	－1	476.26
11	－1	0	0	1	450.60
12	1	0	0	1	473.60
13	0	－1	－1	0	411.69
14	0	1	－1	0	467.99
15	0	－1	1	0	447.63
16	0	1	1	0	470.65
17	－1	0	－1	0	407.86
18	1	0	－1	0	475.08
19	－1	0	1	0	448.08
20	1	0	1	0	473.46
21	0	－1	0	－1	430.84
22	0	1	0	－1	448.82
23	0	－1	0	1	429.80
24	0	1	0	1	491.14
25	0	0	0	0	443.35
26	0	0	0	0	456.93
27	0	0	0	0	437.87
28	0	0	0	0	429.65
29	0	0	0	0	435.83

对 BBD 试验结果进行了回归方程拟合与方差分析，其统计分析结果如表 4 所示。

试验共设置 29 组工况，使用 Design-Expert 软件进行响应面分析，数据导入 EDEM 仿真平台进行模拟，仿真输出轴向力响应。对回归模型进行显著性检验，评估模型拟合优度及各参数影响程度。

得到的二阶回归方程为

$$\begin{aligned}Y_1 = {} & 440.73 + 23.15X_1 + 19.83X_2 + 9.65X_3 + \\ & 10.32X_4 - 9.25X_1X_2 - 10.46X_1X_3 - 11.65X_1X_4 - \\ & 8.32X_2X_3 + 10.84X_2X_4 - 5.92X_3X_4 + \\ & 16.49X_1^2 + 14.86X_2^2 - 6.09X_3^2 - 5.43X_4^2 \end{aligned} \quad (3)$$

表 4 土壤-土壤粘结参数回归模型方差分析

Tab. 4 ANOVA for regression model of soil - soil bond parameters

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	19 849.54	14	1 417.82	46.79	<0.000 1
X_1	6 431.07	1	6 431.07	212.22	<0.000 1
X_2	4 718.75	1	4 718.75	155.71	<0.000 1
X_3	1 117.47	1	1 117.47	36.87	<0.000 1
X_4	1 278.03	1	1 278.03	42.17	<0.000 1
X_1X_2	342.25	1	342.25	11.29	0.004 7
X_1X_3	437.65	1	437.65	14.44	0.001 9
X_1X_4	542.89	1	542.89	17.91	0.000 8
X_2X_3	276.89	1	276.89	9.14	0.009 1
X_2X_4	470.02	1	470.02	15.51	0.001 5
X_3X_4	140.19	1	140.19	4.63	0.049 4
X_1^2	1 763.16	1	1 763.16	58.18	<0.000 1
X_2^2	1 431.77	1	1 431.77	47.25	<0.000 1
X_3^2	240.81	1	240.81	7.95	0.013 7
X_4^2	191.46	1	191.46	6.32	0.024 8
残差	424.26	14	30.30		
失拟	0	10	0	0.12	0.944 2
误差	424.26	4	106.07		
总和	20 273.80	28			

从表 4 中可以看出，模型整体具有极高的统计显著性（$P<0.000\ 1$），回归模型能够有效描述轴向压力的变化趋势。X_1、X_2、X_3 与 X_4 的 F 值分别为 212.22、155.71、36.87 与 42.17，P 值均远小于 0.000 1，显著性极强，表明 4 个因素均对响应变量产生高度显著影响。这是由于 Bond 模型参数直接控制了颗粒间力的传递强度与断裂阈值，是决定轴向加载响应的主控因素，说明仿真模型参数设定合理、物理意义明确。

从表 4 中还可以看出，部分变量间的交互作用项与非线性项也达到了显著水平，说明系统响应存在明显的多因子耦合效应与非线性行为。例如交互项均显著（$P<0.05$）；非线性项等亦表现出显著性（$P<0.05$），说明系统响应不仅取决于单因素线性变化，还受到因子间协同作用的影响。这是由于颗粒接触行为在加载过程中表现出非线性刚度-应力响应特性，同时不同粘结参数在应力传递路径中存在相互耦合，使得系统呈现出显著的非线性与复杂交互特性。

综上说明，模型拟合精度高，变量影响显著，既反映了各参数对土壤力学响应的贡献，也揭示了其耦合机制，验证了所构建多参数 Bond 模型在仿真土壤颗粒系统中的可靠性与适用性。该模型为优化土壤仿真参数提供了理论依据与技术支撑。

图 7 展示了 EDEM 仿真过程中土壤样本在压缩加载下的 Bond 键断裂能量分布情况。图中颜色由蓝至红表示断裂能量的增加，红色区域代表高能耗断裂区域。可以观察到，断裂面主要沿样本一侧倾斜延伸，表现为典型的剪切破坏路径。这说明在加载过程中颗粒间粘结键首先在侧向受剪区域发生破坏，随后贯通形成宏观破裂面，符合实际压缩过程中的应力传递与破坏规律。

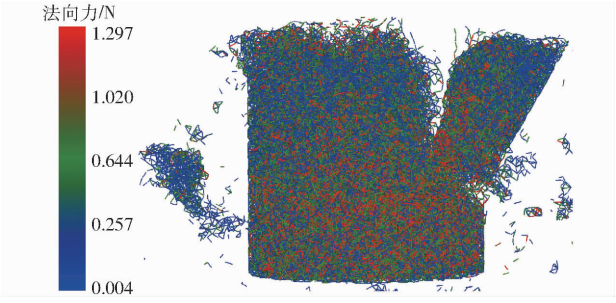


图 7 压缩过程中土壤 Bond 键断裂能量分布图

Fig. 7 Bond breakage energy distribution of soil under compression

2.2 棉秆根系-土壤粘结参数标定

为了提高区域性棉田土壤建模的精度与界面行为模拟的可信度，基于 Box - Behnken 试验设计法对棉秆根系-土壤界面关键粘结参数进行优化标定，土壤-土壤间粘结参数根据前文标定试验得到的最优组合设置。通过设置单位面积粘结刚度、单位面积粘结应力及单位面积粘结半径 3 个因素，分别在 3 个水平下开展试验设计，并以起拔力 Y_2 为响应值进行响应面建模。

表 5 为试验因素编码，表 6 为 17 组 BBD 仿真试验结果，表 7 为回归模型方差分析结果。

表 5 棉秆根系-土壤粘结参数试验因素编码

Tab. 5 Experimental factors and codes for bond parameters of root - soil system

因素	编码		
	-1	0	1
单位面积粘接刚度 x_5/(N·m^{-3})	4×10^8	6×10^8	8×10^8
单位面积粘结应力 x_6/(Pa·m^{-2})	1×10^6	2×10^6	3×10^6
单位面积粘结半径 x_7/mm^{-1}	1.2	1.4	1.6

根据试验数据，构建了二次多项式回归模型

$$Y_2 = 513.16 + 53.85X_5 + 29.01X_6 + 16.09X_7 - 5.01X_5X_6 + 8.00X_5X_7 + 2.12X_6X_7 + 36.60X_5^2 - 7.43X_6^2 - 0.73X_7^2 \quad (4)$$

该模型可用于预测不同粘结参数组合下的起拔响应。

以田间起拔力试验最大值 598.2 N 为最优值对

表 6　棉秆根系-土壤粘结参数 BBD 试验结果

Tab. 6　BBD test results for bond parameters of root - soil system

试验序号	因素			起拔力
	X_5	X_6	X_7	Y_2/N
1	-1	-1	0	454.72
2	1	-1	0	571.94
3	-1	1	0	522.76
4	1	1	0	619.94
5	-1	0	-1	485.35
6	1	0	-1	577.55
7	-1	0	1	504.53
8	1	0	1	628.73
9	0	-1	-1	463.53
10	0	1	-1	517.31
11	0	-1	1	488.47
12	0	1	1	550.73
13	0	0	0	522.73
14	0	0	0	496.22
15	0	0	0	537.81
16	0	0	0	489.39
17	0	0	0	519.67

表 7　棉秆根系-土壤粘结参数回归模型方差分析

Tab. 7　ANOVA for regression model of root - soil band parameters

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	38 149.01	9	4 238.78	18.41	0.000 4
X_5	23 198.58	1	23 198.58	100.73	<0.000 1
X_6	6 732.64	1	6 732.64	29.23	0.001 0
X_7	2 071.10	1	2 071.10	8.99	0.020 0
X_5X_6	100.40	1	100.40	0.44	0.530 2
X_5X_7	256.00	1	256.00	1.11	0.326 8
X_6X_7	17.98	1	17.98	0.078	0.788 0
X_5^2	5 641.18	1	5 641.18	24.50	0.001 7
X_6^2	232.25	1	232.25	1.01	0.348 7
X_7^2	2.23	1	2.23	0.009	0.924 4
残差	1 612.06	7	230.29		
失拟	18.50	3	6.17	0.015	0.996 9
误差	1 593.56	4	398.39		
总和	39 761.08	16			

试验因素进行最优参数组合寻优，得到棉秆根系-土壤单位面积粘结刚度、棉秆根系-土壤单位面积粘结应力、棉秆根系-土壤粘结半径最优组合为：7.80×10^8 N/m^3、2.18×10^6 Pa/m^2、1.422 mm^{-1}。

从表 7 可见，单位面积粘结刚度（$P<0.000\ 1$）、单位面积粘结应力（$P=0.001$）与单位面积粘结半径 X_7（$P=0.02$）对起拔力具有显著影响，为影响棉秆根系起拔行为的主导因素。具体而言，当 X_5 与 X_6 由低水平升高至高水平时，起拔力从 571.94 N 提升至 628.73 N，表明增强界面粘结性能可有效提升系统抗拔能力。

此外，X_5^2（$P=0.001\ 7$）非线性效应表现突出，表明其边际效应不容忽视。模型验证中，中心点重复试验（试验序号 13～17）起拔力波动较小，进一步说明回归模型稳定可靠，验证了前文土壤粘结参数标定试验结果的可靠性。优化结果为棉秆根系-土壤力学参数的定量获取提供了可行方法，也为后续棉秆根系-土壤界面剪切破坏仿真研究提供了准确的参数基础与理论支撑。

2.3　起拔力仿真模拟试验

2.3.1　起拔力-位移曲线

为深入揭示棉秆根系起拔过程中棉秆根系-土壤界面的力学响应机制，明确界面破坏的时序演化与主控因素，以棉秆根系-土壤粘结最优组合为条件，开展全过程的动态仿真分析。该研究不仅有助于深化对根-土耦合行为的力学认知，也为优化机械拔秆参数、提升作业效率提供理论支撑与量化依据。

如图 8 所示，通过在棉秆主根顶部施加恒定速率的竖向位移，实现对棉秆根系-土壤系统的起拔加载，获取起拔力随时间变化的响应曲线。

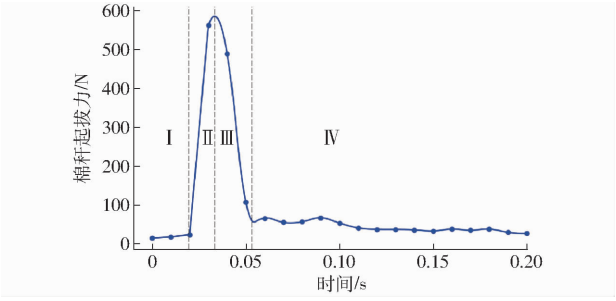


图 8　棉秆根系起拔力-时间关系曲线

Fig. 8　Force - time response curve during uprooting process of cotton stalk

模拟结果表明，棉秆根系起拔过程中的力学行为可划分为以下 4 个阶段：

弹性加载阶段Ⅰ（0～0.02 s）：起拔力随时间的增加逐渐上升，由 0 逐渐上升至 40 N，曲线呈线性增长趋势。这表明在起拔初期，棉秆根部与土壤之间的接触主要处于弹性阶段。土壤颗粒仅发生微小位移，棉秆根系-土壤界面的剪切力逐渐增加，但尚未达到临界破坏状态，系统整体仍处于弹性响应区间。

峰值加载阶段Ⅱ（0.02～0.03 s）：起拔力由 40 N 进一步上升并达到最大值约 590 N，是整个过程中的应力峰值阶段。此时界面由弹性接触转变为塑性滑移，土壤颗粒沿棉秆根系表面发生局部剪切破坏，剪应力接近极限状态。

衰减阶段Ⅲ（0.03～0.06 s）：起拔力迅速降低至约 100 N，说明界面粘结破坏迅速扩展，棉秆根系-土壤之间发生滑移与分离，局部棉秆根系可能发生断

裂,系统能量快速释放。

残余稳定阶段Ⅳ(0.06 ~ 0.20 s):起拔力保持在 0 ~ 60 N 范围内小幅波动,表明大部分棉秆根系已脱离土壤,仅残余接触产生少量阻力。系统整体进入稳定输出阶段,破坏过程基本完成。

起拔力仿真试验结果为 589.3、593.3、592.9、603.7、583.6 N,5 次重复仿真中获得的平均起拔力为 592.56 N,表明模拟具有良好的重复性与稳定性。

2.3.2 根起拔破坏模式分析

为深入理解棉秆根系-土壤界面在拔秆过程中所呈现的破坏机制,结合 EDEM 仿真可视化结果,对起拔过程中的典型力学响应及结构演化进行分析。如图 9 所示,棉秆根系在起拔过程中主要呈现 2 种破坏模式:拉拔破坏与根断裂破坏。

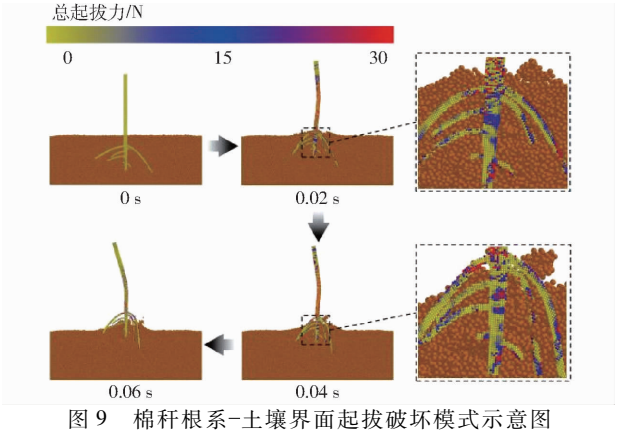


图 9 棉秆根系-土壤界面起拔破坏模式示意图

Fig. 9 Schematic of root - soil interface pull-up and destruction mode

拉拔破坏模式:当棉秆根系-土壤界面所承受的剪切力达到极限值 τ_{max} 时,界面发生滑移破坏,棉秆根系逐步与周围土颗粒脱离,整体被完整拔出。此过程中,棉秆根系结构未发生明显断裂,主要体现为粘结破坏主导的界面分离。

根断裂破坏模式:当加载过程中棉秆根系内部所承受的应力超过其结构强度极限,且高于界面粘结强度时,主根或部分侧根发生结构性断裂。该模式多伴随界面仍具有较高粘结强度,体现出材料破坏主导的破坏特征。

综上,棉秆根系起拔过程中破坏模式的形成取决于棉秆根系-土壤界面粘结强度与棉秆根系自身强度之间的相对关系。通过分析不同阶段的应力分布与结构响应,可为拔秆机械设计提供针对性的参数优化依据。

图 10 展示了不同根径条件下棉秆根系起拔过程中破坏模式的演化特征:图 10a 在受力较小的情况下,根部出现明显弯曲,但尚未发生实质性断裂,表现为初始弹性形变阶段;图 10b 当根径略大时,破坏模式趋于复合,部分根系发生断裂,同时出现一定程度的拉拔行为;图 10c 在进一步增大载荷的条件下,断裂成为主要破坏形式,根部出现清晰的断裂现象;图 10d 为最大受力状态下的完全破坏,根系整体被拔出。根径较小的侧根完全断裂,而主根因根径较大未发生明显结构性破坏。

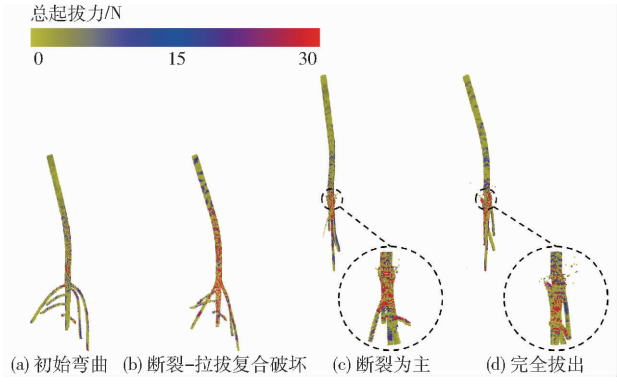


图 10 棉秆根系起拔破坏模式示意图

Fig. 10 Schematics of root pulling and destruction mode of cotton stalk

该系列图像清晰反映出根径增大使破坏模式由断裂型逐步向拉拔型过渡的规律性特征,对揭示棉秆根系-土壤系统的力学响应机制具有重要意义。

图 11 与图 12 展示了棉秆根系起拔过程中,土壤颗粒粘结键破裂数量随时间(0 ~ 0.20 s)的变化趋势。该过程同样可划分为与图 9 一致的 4 个阶段,进一步验证了前述对起拔行为的阶段划分依据。

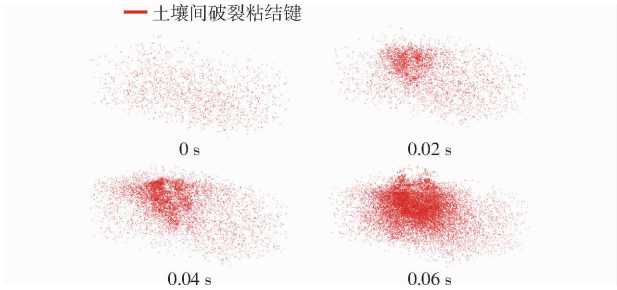


图 11 土壤间粘结键破裂分布随时间演化

Fig. 11 Soil adhesion bonds at different time points during cotton stalk uprooting

阶段Ⅰ(0 ~ 0.02 s):对应图 8 中起拔初始阶段,棉秆根系受力快速上升,导致土壤粘结键破裂数量急剧增加,从 0 迅速增长至约 7 000,反映出棉秆根系-土壤界面首次大规模破坏,力学响应强烈。

阶段Ⅱ(0.02 ~ 0.03 s):破裂数由约 7 000 增至 12 000,仍保持高速破裂状态。破裂增速有所减缓,但仍保持上升趋势,表明棉秆根系持续受力,根系逐步脱离土壤,粘结键持续破坏,是起拔过程的主破裂阶段之一。

阶段Ⅲ(0.03 ~ 0.06 s):对应图 8 中接近峰值

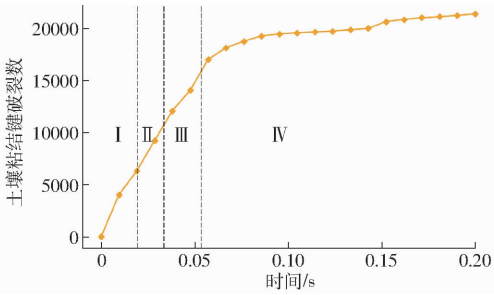


图 12　土壤粘结键破裂数随时间变化曲线

Fig. 12　Variation in number of fractured soil adhesion bonds over time

的过渡阶段，破裂颗粒数趋于稳定（约 17 000），增长持续放缓，表明棉秆根系已基本脱离主要根土接触区，土壤结构进入稳定破坏状态。

阶段Ⅳ（0.06 ~ 0.20 s）：为整个过程的末期，破裂数在 17 000 ~ 20 000 之间波动，增长速率显著降低。此时棉秆根系已几乎完全脱离土体，起拔力作用趋于消失，土壤结构破裂行为趋于稳定。

通过对比图 8 与图 12 可见，力学响应与土壤结构破裂行为在时间上具有高度一致性，进一步表明棉秆根系起拔过程中棉秆根系-土壤的耦合破坏机制具备明显阶段性特征。

2.3.3　棉秆根系-土壤界面剪切力分布特征

为了揭示棉秆根系起拔过程中阻力的主要来源及其演化路径，下面分析棉秆根系-土壤界面处剪切力的空间分布特征。通过量化剪切力在棉秆根系表面的分布变化，旨在阐明剪切破坏如何从主根扩展至分根区域，从而为界面破坏机制建模提供基础。该分析有助于优化农机具结构设计，提高拔秆效率。

图 13 展示了在不同起拔时间点（0、0.02、0.04、0.06 s）下，棉秆根系-土壤界面的剪切力分布图。模拟采用基于离散元法构建的三维棉秆根系-土壤模型，记录剪切力随时间的空间变化，揭示不同阶段剪切力场的集中区域与演化趋势。模拟设定中，棉秆根系模型包含主根与 3 条分根，土壤由粘结颗粒构成，界面剪切力通过颗粒间滑移接触力计算得到。起拔速度设为 0.05 m/s，总仿真时间为 0.06 s。

从图 13 可以看出，剪切力在棉秆根系-土壤界面呈现出明显的空间集中特征，主要集中于棉秆根系中下部区域，尤其是主根与分根交汇处。具体地，0.02 s 时主根中段周围剪切力达到最大值（约为 30 N），远高于分根周边的区域（不足 10 N）；0.04 s 后，高剪切力区域逐渐向分根方向扩展，但主根区域始终为剪切力主承载区。这是由于起拔初期棉秆根系垂向运动引发了主根与周围土壤的强接触摩擦，该部位结构紧密、受力集中，使剪切破坏首先在此发

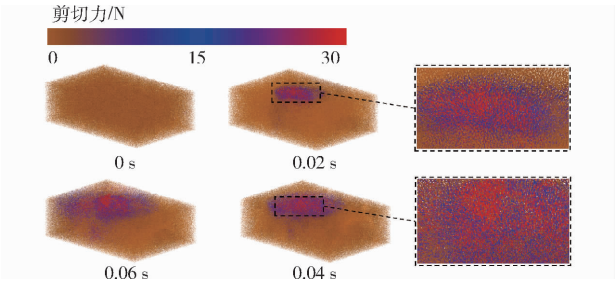


图 13　起拔过程中棉秆根系-土壤界面剪切力空间分布

Fig. 13　Shear force distribution map of cotton root - soil interface

生，模拟中的接触模型有效还原了该局部应力集中现象。同时，随着时间推移与位移增加，高剪切力区域逐步由主根扩展至分根周围，表现出剪切破坏区域的演化过程。具体地，0 s 时界面整体剪切力接近于 0；到 0.04 s，分根根部已出现明显红色剪切力区域；至 0.06 s，剪切力分布范围显著扩大，形成环绕整个棉秆根系的高剪切力带。这是由于在持续起拔过程中，棉秆根系逐步带动周围土壤颗粒运动，形成大范围滑移带，导致剪切力逐渐传导至更外围区域。该现象反映了界面破坏的层级推进机制。通过时序图与剪切力场分析，揭示了棉秆根系起拔过程中界面剪切力的集中分布特征及其随时间的演化路径。结果表明：主根中下部为阻力主要集中区，界面破坏具有明显“由内向外”的剪切扩展特征。

图 14 展示了在不同加载阶段（N 为加载力）下剪切力方向的极坐标分布，反映了剪切力方向在时空维度上的变化规律，表示在不同加载阶段收集的剪切力数据点数量[37]。

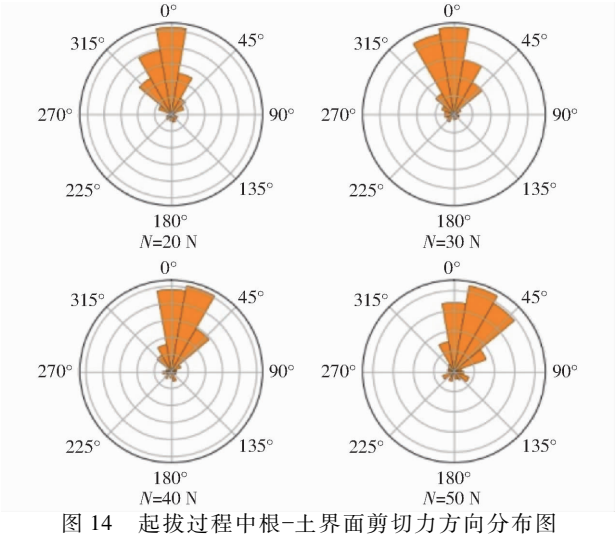


图 14　起拔过程中根-土界面剪切力方向分布图

Fig. 14　Shear force direction distribution map at root - soil interface during uprooting

从图 14 可以看出，剪切力方向在初期阶段（N = 20 N）表现出明显的集中性，主要分布在 0° ~ 40°区间；而在后期阶段（如 N = 50 N），剪切方向逐

渐向多个方向扩展,分布趋于离散,反映出剪切破坏过程从集中向多向扩散演化的趋势。具体来说,$N=20$ N 阶段的主方向柱状显著高于其他区间,而在 $N=50$ N 阶段,剪切力在 60°~120°等多个方向的分布频率也明显增加。这表明,在起拔初期,剪切力主要集中作用于主根中下部;随着加载加剧,剪切路径逐渐向分根方向扩展,体现出典型的"由内向外"推进机制。这一现象与界面结构松动及棉秆根系复杂构型下的非线性响应密切相关,支持了棉秆根系-土壤剪切破坏呈现"初集中-次扩展"的动态演化模式,从而为理解剪切破坏路径及其推进机制提供了理论依据。

2.4 田间试验结果

为验证离散元系统模型在模拟棉秆根系起拔过程中的有效性,对 5 个试验区域进行了棉秆根系起拔力的实测。结果如表 8 所示,5 个区域样本中起拔力最大值达到 598.2 N。相比之下,前文基于棉秆根系-土壤系统模型开展的起拔仿真模拟中,平均起拔力为 592.56 N,二者之间误差仅为 1%。一致的结果验证了所构建离散元系统模型在模拟棉秆根系起拔过程中的准确性与可靠性。

表 8 棉秆根系起拔力测量结果

Tab.8 Measurement results of cotton root lifting force

试验序号	起拔力/N				
	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5
1	437.2	509.3	466.4	481.7	556.8
2	582.7	547.8	593.1	598.2	590.3
3	421.5	489.6	429.5	438.9	413.9
4	584.7	594.2	554.0	575.5	530.2
5	444.8	432.7	503.6	452.3	567.3
6	536.1	578.3	587.6	595.1	589.2
7	597.4	582.5	417.3	515.0	445.7
8	458.9	447.2	562.1	585.4	588.0
9	572.4	523.9	496.4	426.1	497.5
10	413.2	591.7	581.9	541.7	582.8

3 讨论

离散元仿真结果表明,棉秆根系-土壤界面剪切力是决定棉秆根系起拔阻力的关键力学因素。在起拔初始阶段,随着位移的增加,界面剪切力逐步增大,整体呈线性增长,反映出典型的弹性阶段;当剪切力达到其极限值 τ_{max} 后,界面进入塑性滑移状态,起拔力也达到峰值。此时,土壤颗粒对根表面的接触力主要集中在主根与分根的交汇区域,呈现出沿根系轴向分布不均的特点,剪切力在界面形成局部集中的剪切带。该现象与张凯等[15]基于离散元模拟观察到的剪切集中区域一致,验证了本研究模型在界面力学行为刻画方面的有效性。仿真结果还表明,破坏模式主要表现为根-土界面发生塑性滑移,最终导致棉秆根系整体拔出。这一破坏过程与 ZHU 等[14]提出的"拔出-断裂双模式"理论中的"拔出主导型"破坏相一致,从力学响应的角度支持其界面行为划分框架。

通过与田间实测数据对比,本研究所得起拔力-位移曲线的趋势与峰值均与试验结果高度吻合,误差控制在 5% 以内,表明基于离散元法构建的模型在揭示棉秆根系起拔过程中的界面力学响应方面具有良好的准确性与适用性,为起拔机械参数优化提供了可靠的理论支撑。

4 结论

(1)基于 EDEM 离散元软件,以新陆早 66 号棉秆根系为研究对象,建立了棉秆根系-土壤系统模型,并结合试验与仿真方法,系统分析了起拔过程中根-土界面力学行为及破坏机制。

(2)基于 Bonding 模型构建土壤粘结模型,并通过无侧限抗压试验与 Box-Behnken 优化方法确定最优参数组合:单位面积法向粘接刚度 1.05×10^8 N/m^3、单位面积切向粘接刚度 3.09×10^8 N/m^3、单位面积法向粘结应力 6.95×10^5 Pa/m^2、单位面积切向粘结应力 6.69×10^5 Pa/m^2。该组合下 EDEM 模拟轴向压力为 477.75 N,与实测平均值 469.81 N 相对误差为 1.7%,该模型为根-土相互作用建模提供了力学性能准确、参数可控的土壤基础,确保了后续仿真具有较高的物理一致性与工程适用性。

(3)基于实测棉秆根系结构参数建立棉秆根系-土壤系统,并开展起拔力仿真与田间对比试验。棉秆根系-土壤单位面积粘结刚度、棉秆根系-土壤粘结应力、棉秆根系-土壤粘结半径最优组合为:7.80×10^8 N/m^3、2.18×10^6 Pa/m^2、1.422 mm^{-1}。仿真起拔力平均值为 592.56 N,田间实测值为 598.2 N,相对误差为 1%,该系统有效还原了棉秆根系拔出过程中根系嵌合与界面接触行为,为后续界面剪切机制分析与农机拔秆结构优化提供了基础支持。

(4)仿真结果显示,剪切力主要集中于主根中下部,随后沿分根方向扩展,形成典型的"由内向外"剪切演化路径。该破坏过程呈现出"初集中-次扩展"的时空推进模式,是棉秆根系结构与土壤接触响应的协同结果。揭示了根-土剪切破坏的层级推进机制,丰富了土体微观破坏传播路径的理解,为构建根-土界面力学模型和提升仿生农机具拔秆策略提供了理论依据。

参 考 文 献

[1] 王方正，师勇强，王文魁，等. 棉秆饲料化前景与技术分析[J]. 中国棉花，2022，49(11)：37－41.
WANG Fangzheng，SHI Yongqiang，WANG Wenkui，et al. Analysis of the utilization prospect and technology of cotton straw in feed[J]. China Cotton，2022，49(11)：37－41.（in Chinese）

[2] RAMANJANEYULU A V，PRASAD B，NAGULA S，et al. Crop residue management in cotton[J]. Chronicle of Bioresource Management，2021，5(1)：1－8.

[3] 蔡佳麟，张佳喜，叶尔波拉提·铁木尔，等. 夹持带式棉秆收获机设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(10)：152－160.
CAI Jialin，ZHANG Jiaxi，YEERBOLATI·TIEMUER，et al. Design and test of clamping belt cotton straw harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(10)：152－160.（in Chinese）

[4] 谢建华，吴仕花，曹肆林，等. 夹持辊式棉秆拔取装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：101－111.
XIE Jianhua，WU Shihua，CAO Silin，et al. Design and test of clamping-roller cotton stalk pulling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(5)：101－111.（in Chinese）

[5] 张佳喜，汪珽珏，陈明江，等. 齿盘式棉秆收获机的设计[J]. 农业工程学报，2019，35(15)：1－8.
ZHANG Jiaxi，WANG Tingjue，CHEN Mingjiang，et al. Design of toothed disc cotton stalk harvester[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(15)：1－8.（in Chinese）

[6] 张佳喜，郜周明，蔡佳麟，等. 横轴对辊式棉秆起拔装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(7)：43－52.
ZHANG Jiaxi，GAO Zhouming，CAI Jialin，et al. Design and experiments of cotton stalk pulling machine with horizontal-counter rollers[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(7)：43－52.（in Chinese）

[7] 赵维松，谢建华，陈明江，等. 变刚度夹拔式棉秆整株拔取装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2024，40(20)：80－90.
ZHAO Weisong，XIE Jianhua，CHEN Mingjiang，et al. Design and experiments of the clamping and uprooting device with adjustable stiffness for a cotton stalk[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(20)：80－90.（in Chinese）

[8] 亚森江·白克力，张佳喜，郭刚，等. 新疆棉区棉秆机械化采收技术的综述与发展趋势[J]. 农机化研究，2025，47(10)：292－300.
YASENJIANG Baikeli，ZHANG Jiaxi，GUO Gang，et al. Review and development trend of mechanized cotton stalk harvesting technology in Xinjiang cotton region[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2025，47(10)：292－300.（in Chinese）

[9] 刘雄，张佳喜，陈明江，等. 棉秆起拔力关键因素的研究与试验[J]. 农机化研究，2021，43(9)：157－163.
LIU Xiong，ZHANG Jiaxi，CHEN Mingjiang，et al. Study and experiment on the key factors of pull-up force of cotton stalk[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2021，43(9)：157－163.（in Chinese）

[10] 薛党勤，张佳喜，刘雄，等. 棉秆拔取力测试装置正交优化分析研究[J]. 农机化研究，2021，43(10)：115－120.
XUE Dangqin，ZHANG Jiaxi，LIU Xiong，et al. Research on orthogonal optimization analysis of cotton stalk pulling resistance test device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2021，43(10)：115－120.（in Chinese）

[11] 张青松，郑中原，廖庆喜，等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报，2025，56(7)：20－37，149.
ZHANG Qingsong，ZHENG Zhongyuan，LIAO Qingxi，et al. Application status and prospect of coupled simulation in agricultural engineering research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(7)：20－37，149.（in Chinese）

[12] JIANG D，CHEN X，YAN L，et al. Parameter calibration of discrete element model for cotton rootstalk-soil mixture at harvest stage in Xinjiang cotton field[J]. Agriculture，2023，13(7)：1344.

[13] WAN L，LI Y，SONG J，et al. Modelling and verification of the liquorice-soil composite based on pulling test[J]. Biosystems Engineering，2024，247：63－76.

[14] ZHU J，LEUNG A K，WANG Y. Modelling root-soil mechanical interaction considering root pull-out and breakage failure modes[J]. Plant and Soil，2022，480(1)：675－701.

[15] 张凯，杨松. 基于离散元模拟的草本植物根系分布对黏土抗剪强度的影响研究[J]. 草原与草坪，2022，42(2)：59－66.
ZHANG Kai，YANG Song. Influence of herbal plant root distribution on soil consolidation capacity based on discrete element simulation[J]. Grassland and Turf，2022，42(2)：59－66.（in Chinese）

[16] ZHANG S，ZHAO H，WANG X，et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，204：107519.

[17] LIU Y，ZHAO J，YIN B，et al. Discrete element modelling of the yam root-soil complex and its verification[J]. Biosystems Engineering，2022，220：55－72.

[18] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京：中国计划出版社，2019.

[19] WU Z，WANG X，LIU D，et al. Calibration of discrete element parameters and experimental verification for modelling subsurface soils[J]. Biosystems Engineering，2021，212：215－227.

[20] GUNAYDIN O，GOKOGLU A，FENER M. Prediction of artificial soil's unconfined compression strength test using statistical analyses and artificial neural networks[J]. Advances in Engineering Software，2010，41(9)：1115－1123.

[21] 相吉山，谢宗铭，田琴，等. 北疆棉花“新陆早”系列品种主要性状分析[J]. 新疆农业科学，2010，47(8)：1535－1540.
XIANG Jishan，XIE Zongming，TIAN Qin，et al. Analysis on the main characters of“Xinluzao”series cotton cultivars in Northern Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2010，47(8)：1535－1540.（in Chinese）

[22] ZHANG P, ZHANG H, LI J, et al. Parametric calibration of cotton straw parameters in Xinjiang based on discrete elements [J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2022, 67(2): 314 – 322.

[23] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76 – 84, 108.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76 – 84, 108. (in Chinese)

[24] 靳伟, 张学军, 丁幼春, 等. 基于 EDEM – Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 89 – 98.
JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Experiment on suspension separation of residual film and impurity based on EDEM – Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 89 – 98. (in Chinese)

[25] 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)

[26] HANG C, GAO X, YUAN M, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168: 73 – 82.

[27] 张喜瑞, 胡旭航, 刘俊孝, 等. 香蕉秸秆离散元仿真黏结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 121 – 130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 121 – 130. (in Chinese)

[28] HU R, LIU H H, CHEN Y, et al. A constitutive model for unsaturated soils with consideration of inter-particle bonding[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 59: 127 – 144.

[29] 刘俊安. 基于离散元方法的深松铲参数优化及松土综合效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
LIU Junan. Study on subsoiler parameters optimization and comprehensive effect of subsoiling based on the discrete element method[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[30] 果霖, 方启明, 李明飞, 等. 滇中地区坡耕地红黏土离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 185 – 193, 285.
GUO Lin, FANG Qiming, LI Mingfei, et al. Parameter calibration for discrete element simulation of red clay soils in sloping cropland in Central Yunnan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 185 – 193, 285. (in Chinese)

[31] ZHAO W, CHEN M, XIE J, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107502.

[32] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130 – 140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130 – 140. (in Chinese)

[33] 谢方平, 吴正阳, 王修善,等. 基于无侧限抗压强度试验的土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 39 – 47.
XIE Fangping, WU Zhengyang, WANG Xiushan, et al. Calibration of discrete element parameters of soils based on unconfined compressive strength test[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 39 – 47. (in Chinese)

[34] 周华, 车海龙, 耿端阳, 等. 玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 49 – 60,113.
ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 49 – 60, 113. (in Chinese)

[35] 王学振. 土壤–带翼深松铲互作关系及其效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
WANG Xuezhen. Soil – winged subsoiler interactions and their effects[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[36] 胡伟, 刘吉柱, 李涛, 等. 闭式矩形静压气浮导轨快速优化设计[J]. 光学精密工程, 2024, 32(12): 1879 – 1890.
HU Wei, LIU Jizhu, LI Tao, et al. Rapid optimization design of closed rectangular hydrostatic air flotation guideway[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(12): 1879 – 1890. (in Chinese)

[37] ZHENG Z, SHI Z, WANG M, et al. Fatigue fracture and energy evolution characteristics of sandstone under water-ice phase transitions via the discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 179: 107023.