doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.017

葡萄埋藤压实一体机关键部件设计与试验

沈聪聪　马　帅　廖雲智　谭好超　徐丽明
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：针对我国北方露地葡萄种植区犁铲式葡萄埋藤机由于碎土效果差导致覆土不严实易透风，进而使葡萄藤冬季受冻的问题，本文设计了一种带有镇压辊的幅宽可调的葡萄埋藤压实一体机，并应用离散元法和田间试验对机具镇压辊进行选型和工作参数优化。利用 EDEM 建立土块和土壤基底离散元模型，对铁笼镇压辊、尖形橡胶镇压辊和弧形橡胶镇压辊碎土效果进行了仿真试验，最终选择铁笼镇压辊。设计三因素五水平二次回归正交组合试验探究铁笼镇压辊碎土最佳参数组合，根据仿真试验结果对机具作业参数进行优化；以仿真优化的工作参数进行田间试验，验证机具作业性能。仿真结果表明，对土壤粘结键断裂率影响由大到小为：圆管数量、前进速度、镇压力，且圆管数量与前进速度具有显著的交互作用；对土壤压力影响由大到小为：圆管数量、前进速度、镇压力；以土壤粘结键断裂率和土壤压力最大进行多目标参数优化，得到最优参数组合为：前进速度 3.53 km/h、镇压力 452 N、圆管数量 21 个。最优参数组合下进行田间试验，可得碎土率为 82.3%，镇压辊镇压后比镇压前土壤紧实度提高 11.6 kPa。对整机进行埋藤作业，可得覆土厚度为 401 mm、覆土宽度为 1 120 mm，试验结果满足葡萄埋藤碎土镇压作业要求。

关键词：葡萄埋藤机；铁笼镇压辊；碎土；镇压；EDEM
中图分类号：S224.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)12-0185-10　　**OSID**：

Design and Experiment of Key Components of Grapevine-burying and Soil-compacting Machine

SHEN Congcong　MA Shuai　LIAO Yunzhi　TAN Haochao　XU Liming
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Due to the low temperature and strong wind in Ningxia in winter, in order to prevent the grapevines from being frostbitten and air-dried, it is necessary to prune the vines and remove them from the shelves, and take soil from the rows to bury them for the winter. In response to the problem of grapevines freezing in winter due to poor soil coverage caused by inadequate soil fragmentation in moldboard-type grape burying machines used in open field vineyards in northern China, an adjustable-width vine-burying and soil-compaction machine equipped with a compaction roller was developed. Discrete element method (DEM) simulations were employed to select the appropriate compaction roller type and optimize the machine's operational parameters. A discrete element model of soil clods and soil substrate was established by using EDEM software, and soil fragmentation performance tests were simulated for three types of compaction rollers: iron cage, pointed rubber, and curved rubber rollers. Based on the simulation results, the iron cage roller was selected as the optimal roller type. A three-factor, five-level quadratic regression orthogonal test was designed to explore the best parameter combination for the soil fragmentation process with the iron cage roller. Operational parameters were then optimized according to the simulation results, and field trials were conducted by using these optimized parameters to validate the machine's performance. The simulation results indicated that the main factors influencing soil bond breakage rate in descending order were the number of tubes, forward speed, and compaction force, with a significant interaction effect between the number of rods and forward speed.

收稿日期：2025-02-10　修回日期：2025-02-28
基金项目：财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系项目(CARS-29)和国家自然科学基金项目(32301710)
作者简介：沈聪聪(1998—)，男，博士生，主要从事生物生产自动化技术与装备研究，E-mail：447756510@qq.com
通信作者：马帅(1993—)，男，副教授，主要从事生物生产自动化技术与装备研究，E-mail：mashuaicoe@cau.edu.cn

Similarly, the main factors affecting soil pressure in descending order were the number of rods, forward speed, and compaction force. A multi-objective parameter optimization was performed to maximize both soil bond breakage rate and soil pressure, resulting in an optimal combination of a forward speed of 3.53 km/h, compaction force of 452 N, and 21 cylindrical rods. Field tests under these optimal parameters achieved a soil fragmentation rate of 82.3%, with soil compaction increased by 11.6 kPa after compaction. In grapevine burying operations, the machine achieved a soil cover thickness of 401 mm and a width of 1 120 mm, the results met the relevant standards and fulfilled the requirements for grapevine burial operations.

Key words: grape vine-burying machine; iron cage compaction roller; break up the soil-block; compaction; EDEM

0 引言

目前,葡萄在我国北方地区种植广泛,但由于北方气候寒冷干燥,容易对葡萄藤造成风干和冻害[1]。故需在入冬前将葡萄藤剪枝后下架并从行间起土对其进行掩埋,以助安全过冬[2]。在人工埋土过程需投入大量人力、物力,存在劳动强度大、作业效率低等问题[3-5]。而使用现有埋藤机埋土后,由于存在较大土块,易透风、不密实的土垄容易使葡萄藤受冻。目前我国北方地区埋藤环节已经引进了一些机械设备,但大多采用人工和机械共同作业的方式,机械自动化水平不高[6]。主要原因在于当地种植模式多样、葡萄行距不一以及机具埋土质量不高等问题[7]。因此,针对已有埋藤机存在的不足,研制一款幅宽可调、埋藤覆土效果好的埋藤压实一体机具有重要意义。

国外葡萄种植区域多处于温带至亚热带地区,全年气候温和,不需要进行埋藤作业,故无相关研究[1]。国内埋藤机根据作业方式不同可分为直抛式、犁耕式、旋耕式和联合作业式等类型[8]。章慧全[9]研制的 3MT-5.0 型埋藤机,主要由起土犁和埋土器组成,在作业时挂接在拖拉机后方,随着拖拉机前进埋土器将起土铲铲起的土壤松碎后抛至葡萄藤上,完成埋藤作业;余慧燕[10]研制的 MT-35 型埋藤机,主要由松土铲、抛土器以及机架组成,在作业时,通过松土铲将土疏松后经抛土器抛至葡萄藤上;徐丽莹[11]研制的 20PF-A 型葡萄埋藤机,作业时拖拉机输出动力经传动轴、皮带轮传输到覆土铲,覆土铲将土挖出后再经升土器抛到葡萄藤上,完成埋藤作业;刘忠军等[12]研制的葡萄埋藤机,挂接在拖拉机后部,采用旋耕取土和抛土相结合的方式,完成埋藤作业。现代农装科技股份有限公司研制的 PMT-75 型葡萄埋藤机[13],采用后三点悬挂方式挂接于拖拉机,作业时旋耕刀碎土后,起土铲铲入地面,达到足够深度后铲起土壤并向前抛送至水平输送带上,水平输送带将土壤抛送至葡萄藤上。综上所述,犁耕式埋土机结构简单、起土量大、成本较低,是目前应用较多的埋土机。但由于该机型缺少碎土装置,土壤破碎效果较差,作业后会有较大的土块,从而导致土垄透风漏风。近年来,国内外学者多利用离散元法(Discrete element method, DEM)对农业机械关键部件进行设计、分析和优化[14]。

本文设计一种幅宽可调的葡萄埋藤压实一体机,以提高机具适用性;结合现有镇压辊及其埋藤碎土镇压作业特点,设计铁笼镇压辊,并利用离散元仿真软件对比铁笼镇压辊与其他 2 种常用镇压辊的碎土镇压效果;通过正交组合试验确定铁笼镇压辊最佳结构参数与作业参数组合,通过田间试验验证机具作业性能,以期提高起土铲式埋藤机埋土作业质量,为葡萄藤埋土作业提供一种切实可用的机械。

1 整体结构与工作原理

由于各地区地理位置与气候条件不同,葡萄种植方式和种植行距也不同,故葡萄行距与埋土方式存在差异。以宁夏地区传统的单臂篱架式葡萄园为例,该地区土质类型为沙壤土,土壤粘性弱,土质结构松散。入冬前,将修剪后葡萄藤下架捆绑并放置在沟中,在其上方覆土掩埋。篱架行距为 3.0 ~ 3.2 m,株距为 40 ~ 60 cm,密度 5 205 ~ 8 325 株/hm^2,每间隔 6 m 垂直栽 1 根水泥柱[2]。埋藤机覆土形成的土垄截面近似为等腰梯形(图 1),位于水泥柱一侧,土垄下底宽 100 ~ 120 cm,上底宽 50 ~ 80 cm,高为 25 ~ 40 cm,为保护葡萄藤根部,要求行间起土位置距葡萄藤根部约 50 cm[15]。

1.1 整机结构

如图 2 所示,3MY-120 型葡萄埋藤压实一体机主要由主机架、三点悬挂架、幅宽调节液压缸、滑动支架、起土机构和镇压机构等组成。起土机构安装在滑动支架下端面,滑动支架通过幅宽调节液压油缸与主机架相连,可在液压油缸作用下沿主机架左右滑动;镇压机构通过 U 形螺栓安装在滑动支架尾部,便于拆卸;可通过销轴和螺母对镇压力度和镇

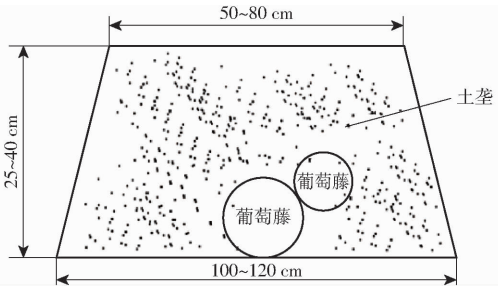

图 1　葡萄埋土土垄截面示意图

Fig. 1　Schematic of cross section of grape soil ridge

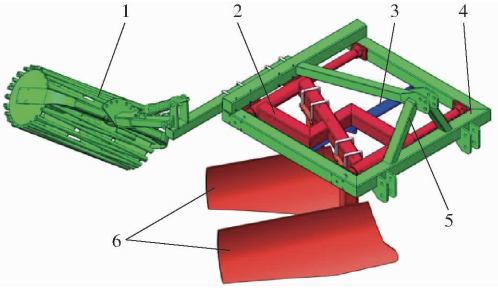

图 2　3MY－120 型葡萄埋藤压实一体机结构

Fig. 2　3MY－120 type grape vine-burying and soil-compaction machine structure

1. 镇压机构　2. 滑动支架　3. 幅宽调节液压缸　4. 主机架
5. 三点悬挂架　6. 起土机构

压辊角度进行调节；镇压机构上装有回位弹簧、限位板和限位杆，可以实现对石柱的避障功能和对地面的仿形功能。

1.2　工作原理

图 3 为埋藤作业示意图，在田间作业时，葡萄埋藤压实一体机通过三点悬挂方式与拖拉机连接，并将幅宽调节液压缸的 2 根液压油管与拖拉机连接，根据葡萄藤行距、埋土厚度和起土位置调节起土机构入土深度和作业幅宽。为了适应不同葡萄园种植行距，本文设计的液压缸调节范围为 0 ~ 450 mm。在拖拉机带动下，埋藤机沿着机具前进方向运动，起土机构在行间铲起土壤并将土壤沿着铲面向侧方输送至葡萄藤上方，尾部镇压机构对形成的大块土壤进行破碎，并对土垄表面进行压实。在地头换行时，控制拖拉机上的液压控制按钮，缩回幅宽调节液压缸，并升起三点悬挂机构，方可对机具进行转移。在起土机构和镇压机构共同作用下，可实现一次性起土、埋土、碎土、镇压以及埋藤作业。

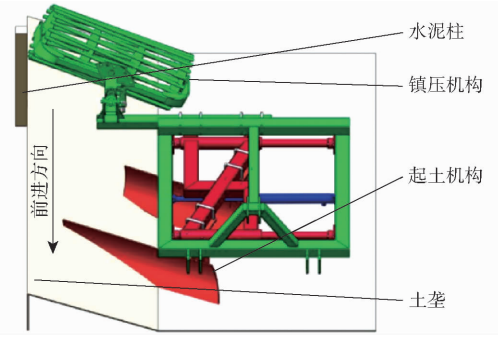

图 3　埋藤作业示意图

Fig. 3　Schematic of vine burial operation

1.3　整机主要技术参数

整机以尺寸 100 mm × 100 mm × 6 mm 方管焊接而成的主机架作为支撑，其他所有零部件都安装在此机架上，整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1　埋藤压实一体机主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of grape vine-burying and soil-compacting machine

参数	数值
外形尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	2 500 × 1 800 × 1 300
配套功率/kW	≥38
作业速度/(km·h^{-1})	3 ~ 7
适应行距/m	2.5 ~ 3.5
入土深度/mm	0 ~ 350
作业宽度/mm	1 200

2　关键结构设计

2.1　起土机构设计

起土机构主要由 2 个部件组成：铲柱和起土铲。起土铲焊接在铲柱前表面下部，铲柱通过 U 形螺栓固定安装在滑动支架下表面。拖拉机带动埋藤机作业时，铲尖入土挤压并推动土壤，翻起后的土壤沿铲面向一侧滑向葡萄藤上方，进而实现覆土埋藤。前铲整体尺寸为 1 300 mm × 500 mm(长 × 宽)，后铲整体尺寸为 1 100 mm × 500 mm(长 × 宽)。

起土机构作业时，起土铲不仅需将较多的土壤从行间翻转到垄面，还应具有一定的碎土功能。为确定合适的耕深和耕宽，为避免产生回垄、立垡现象，起土铲能稳定将土壤从固定垄垄沟翻到中央垄面的条件为[16]

$$K = \frac{d}{m} > 1.27 \tag{1}$$

式中　K——宽深比

d——作业宽度，cm

m——作业深度，cm

起土铲覆土角 δ 应满足[16]

$$\delta = \arcsin\frac{1}{K} < 52° \tag{2}$$

根据宁夏地区葡萄园埋藤农艺要求[17]，埋藤深度一般为 25 ~ 40 cm，作业宽度为 80 cm 左右，代入式(1)、(2)可得 $K \approx 2.3$，$\delta = 26°$满足要求。

设计时确定起土铲铲面导曲线为抛物线形，如图 4 所示。根据文献[16]可知，导曲线开度 L 在导曲线高度 h 一定时，其值越小则曲面越陡峭，碎土能

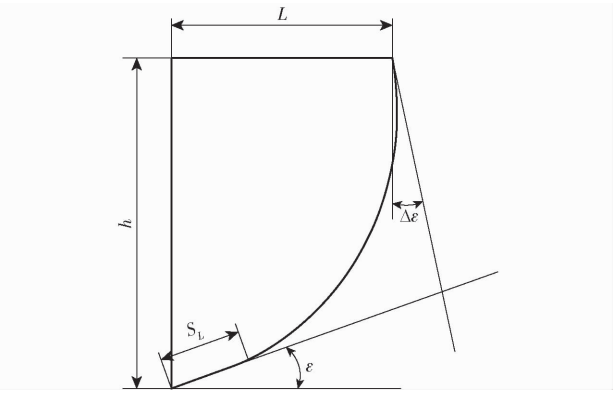

图 4 导曲线形状与参数

Fig. 4 Parameters of guiding curve

力越强,但铲体阻力越大;开度 L 越大,曲面越平缓,翻土能力越强,但碎土效果减弱。设计时,根据双铲铲体耕宽为 80 cm,同时考虑双铲犁体曲面翻土、碎土能力,取双铲曲面顶端最大高度 h 为 500 mm,L 取 294 mm。安装角一般为 25°~30°,由图 4 可知,当安装角 ε 减小时,双铲翻土能力增强,考虑到埋土厚度,取安装角 ε 为 25°。始端直线长度 S_L 一般为 30~60 mm,其值随作业深度而异。由于设计起土作业深度为 35 cm,相对应始端直线长度 S_L 取较大值 60 mm。切线夹角 ω 计算式为

$$\omega = 90° + \varepsilon - \Delta\varepsilon \tag{3}$$

式中 $\Delta\varepsilon$——上端点切线与铅垂线夹角,(°)

埋藤作业时,为便于土垡翻转,导曲线上部向前扭曲取 $\Delta\varepsilon$ 为 10°,则 ω 为 105°。

2.2 镇压机构设计

如图 5 所示,镇压机构主要由横梁、镇压力调节弹簧、上连接梁、下连接梁、回位弹簧以及镇压辊等组成。镇压机构通过 U 形螺栓连接在滑动支架尾部;通过调整镇压力调节弹簧能够改变镇压辊镇压力;回位弹簧能够在镇压机构与水泥柱碰撞时缩回,实现对水泥柱避让;镇压辊能够在作业过程中实现随地形运动,通过限位杆与限位板来调节其运动范围;镇压辊通过两端立式轴承座连接在镇压辊梁上,可根据不同作业要求更换镇压辊类型。

镇压辊作为镇压机构核心部件,结构如图 5 所示,结合已有 2 种常用镇压辊(弧形橡胶镇压辊以及尖形橡胶镇压辊)结构形式及其埋藤机作业特点,设计了一种铁笼形式镇压辊,作业时 3 种镇压辊可通过两端方形座轴承连接在镇压辊机架上。

镇压辊直径直接影响碎土镇压效果,镇压辊直径越小,土壤压实效果越不理想,易出现壅土现象,碎土效果不佳;镇压辊直径越大,镇压辊所受阻力越大,因此为保证镇压辊碎土镇压能力,镇压辊直径满足

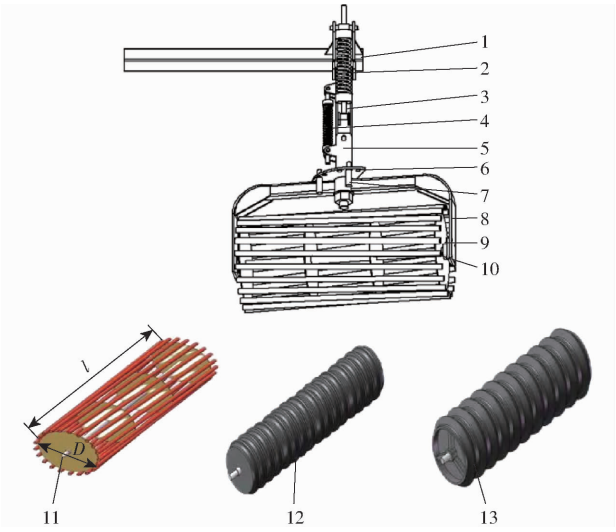

图 5 镇压机构结构示意图

Fig. 5 Schematic of structure of compaction structure

1. 横梁 2. 镇压力调节弹簧 3. 上连接梁 4. 回位弹簧 5. 下连接梁 6. 限位板 7. 限位杆 8. 镇压辊机架 9. 立式轴承座 10、11. 铁笼镇压辊 12. 弧形橡胶镇压辊 13. 尖形橡胶镇压辊

$$D \geqslant \frac{2b}{1 - \cos\alpha} \tag{4}$$

式中 D——镇压辊直径,mm

b——镇压辊辙深度,mm

α——镇压辊翻转角,(°)

如图 6 所示,为了保证镇压辊能够正常工作,翻转角 α 应小于等于 20°,经计算得镇压辊直径 D = 400 mm 时较为适宜。根据土垄斜边长度确定镇压辊长度 l 为 1 000 mm。

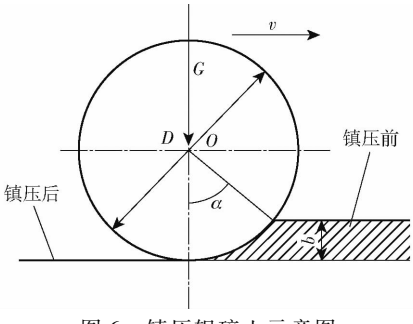

图 6 镇压辊碎土示意图

Fig. 6 Schematic of crushed soil on compaction roller

3 仿真模型建立与仿真试验

3.1 仿真模型建立

3.1.1 镇压辊模型构建

为综合判断不同结构形式镇压辊碎土镇压效果,使用 Solidworks 2018 分别建立 3 个镇压辊三维模型,将建立的三维模型保存为. STEP 格式(图 7)并导入到 EDEM 中。

3.1.2 葡萄藤埋土模型构建

宁夏地区葡萄园土壤质地为沙壤土,土质松散



图 7　3 种镇压辊

Fig. 7　Three kinds of compaction rollers

且颗粒小、结构形状差异不明显，因此建模时采用 EDEM 自带的基本颗粒单元单球形结构作为土垄基底模型。为真实反映铁笼镇压辊作业中土块具有不规则形状的特性，根据田间土块状况，在 Solidworks 2018 中建立长边 140 mm、短边 50 mm 多面体土块三维模型，并导入 EDEM 中，在 Geometries 面板建立边长为 200 mm 正方体，将土块包围在内部，如图 8 所示。在正方体上方建立颗粒工厂，采用动态生成颗粒方式使颗粒完全覆盖土块几何体，运用 EDEM 中前处理模块调整几何体形态，使得土块几何体中充满颗粒，继续仿真直至土壤颗粒充满整个正方体。最后在后处理模块中导出土块几何体内所有颗粒三维坐标数据，另存在 Excel 中，作为 Particle_Cluster_Data. txt（API 文件）预读取文件使用[18-19]。

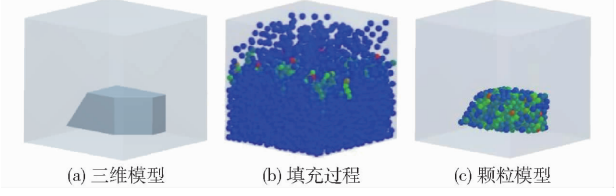

图 8　EDEM 中土块建模过程

Fig. 8　Modeling process of fertilizer block in EDEM

根据文献[16]设置颗粒 BPM 接触模型，由文献[18]可知，当土块颗粒团受到铁笼镇压辊的作用力大于法向切向力时，土块颗粒团粘结键便被破坏从而产生破碎效果。因此，为模拟土块土壤颗粒之间的粘结力，颗粒间使用 Bonding 模型，参数设置如表 2 所示。

表 2　土壤颗粒粘结参数

Tab. 2　Particle bonding parameters of soil

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	5.0×10^{7}
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	5.0×10^{7}
临界法向应力/Pa	5.0×10^{4}
临界切向应力/Pa	4.5×10^{4}
粘结半径/mm	6

图 8c 为粘结稳定的土块 Bonding 模型。仿真过程通过颗粒工厂生成直径为 90 mm、数量为 100 个土壤颗粒，再利用 API 接口插件 ParticleReplacement_v2. dll 在 4.5 s 时替换刚生成的 100 个土壤颗粒，同时生成 100 个土块颗粒群，并添加土块颗粒群内部颗粒间 Bonding 粘结力。颗粒间便可以通过粘结键粘结在一起形成 1 个土块颗粒群，土块颗粒群可承受切向和法向位移，当外界作用力达到临界法向和切向剪切应力时，粘结键断裂，颗粒群便发生破碎。稳定粘结一段时间后，总共生成 210 608 个粘结键，平均 1 个土块颗粒群包含 2 106 个粘结键，每个颗粒周围有 4.2 个粘结键，证明该模型粘结充分，土块颗粒群能达到仿真试验要求。

葡萄埋土压实一体机工作后土垄截面可简化为底角为 24°直角三角形（图 9a）。在 EDEM 中建立土垄模型，设置其基本尺寸（长 × 宽 × 高）为 2 700 mm × 1 100 mm × 400 mm，并在土槽上方建立颗粒工厂用于生成颗粒，最终生成的土垄模型如图 9b 所示。

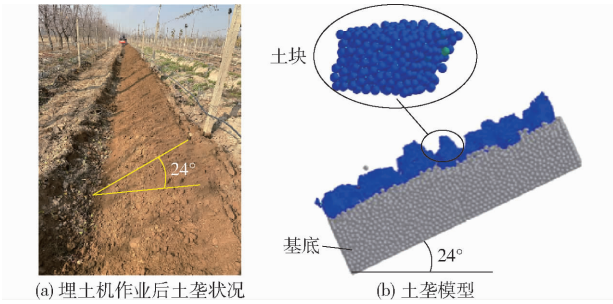

图 9　葡萄园土垄模型

Fig. 9　Vineyard ridge models

3.1.3　仿真参数设置

离散元仿真参数主要有土壤和铁笼镇压辊（Q235 钢）密度、泊松比以及剪切模量，接触参数包括土壤-土壤、土壤-Q235 钢之间恢复系数、静摩擦因数和动摩擦因数，参照本课题组先前针对该地区土壤标定方法及其试验[19-21]，仿真参数如表 3 所示。

表 3　仿真参数

Tab. 3　Parameters used in simulation

项目	参数	数值
土壤	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.0×10^{6}
	密度/(kg·m^{-3})	1 250
Q235 钢	泊松比	0.274
	剪切模量/Pa	2.11×10^{5}
	密度/(kg·m^{-3})	7.86×10^{3}
土壤-土壤	恢复系数	0.20
	静摩擦因数	0.50
	动摩擦因数	0.25
土壤-Q235 钢	恢复系数	0.54
	静摩擦因数	0.31
	动摩擦因数	0.13

3.2 仿真分析

3.2.1 仿真过程

利用 EDEM 对 3 种镇压辊进行模拟仿真预试验[22-23]。将 3 个镇压辊的.igs 格式文件分别导入建立的葡萄园土垄模型中,橡胶镇压辊参数设置参照文献[20]。3 种镇压辊土块破碎效果如图 10 所示。由图 10 可知,弧形橡胶镇压辊和尖形镇压辊在仿真过程出现壅土、堆土现象,碎土不充分;分析前进阻力可知,铁笼镇压辊所受前进阻力相比于橡胶镇压辊略有增大,但对土块碎土、镇压效果更好,因此选择铁笼镇压辊做进一步探究。

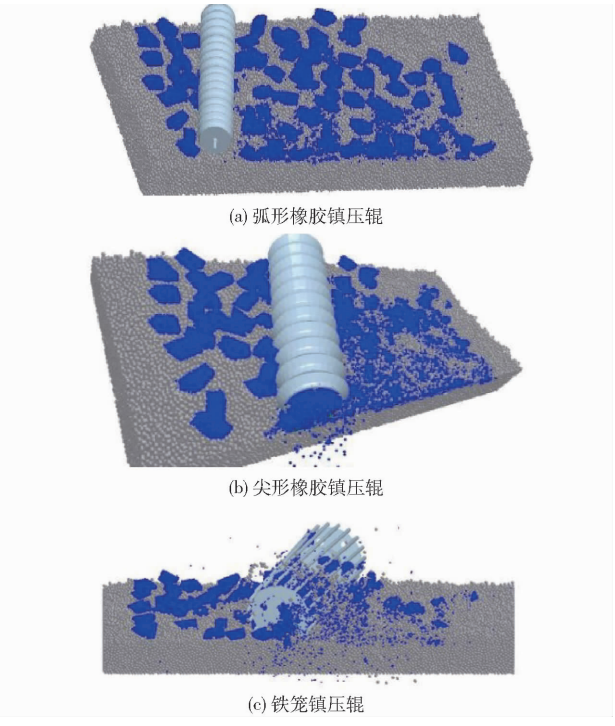

图 10 3 种镇压辊碎土镇压效果

Fig. 10 Compacting effects of three kinds of compaction rollers

在 EDEM 中对各种仿真参数进行设置。为保证仿真连续性,设置固定时间步长为 1.07×10^{-4} s(即瑞利时间步长的 10%),总仿真时间为 8.2 s,有效作用时间为 2.7 s(0~4.5 s 为土槽模型生成时间,4.5~5.5 s 为土槽旋转到与水平面呈 24°角时间,5.5~8.2 s 为铁笼镇压辊碎土镇压时间),仿真数据保存间隔时间设为 0.01 s,网格尺寸设置为土壤颗粒平均半径 3 倍,便于对仿真数据精准处理。

铁笼镇压辊在 EDEM 中碎土镇压作业状态如图 11 所示,铁笼镇压辊在垄面上与前进方向呈 110°工作。当镇压辊沿着 v 方向前进时,作业过程未出现堆土、壅土现象,碎土效果良好。

3.2.2 评价指标

结合宁夏地区葡萄藤碎土率与压实度农艺要求,选取粘结键断裂率(Z_1)和土壤所受压力(Z_2)作为评价指标。粘结键断裂率计算式为

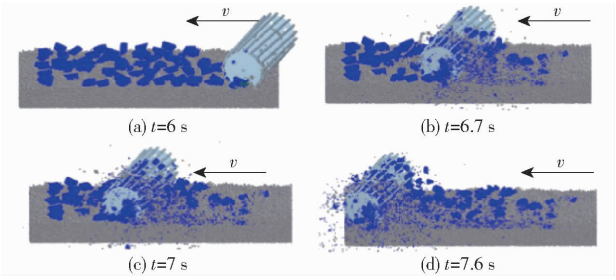

图 11 铁笼镇压辊仿真过程

Fig. 11 Simulation process of iron cage compaction roller

$$Z_1=\frac{M}{N}\times100\% \tag{5}$$

式中 M——土块颗粒团内断裂粘结键数量

N——生成的总粘结键数量

运用 EDEM 软件中后处理模块,对镇压辊工作过程的粘结键断裂状况进行分析。图 12 为镇压辊稳定工作状态下粘结键数量随时间变化曲线。铁笼镇压辊碎土过程是使土块颗粒团内粘结键发生断裂,断裂粘结键越多即比值越大,证明铁笼镇压辊碎土效果越好,破碎后土块颗粒团粒径越小,证明碎土性能越好为。

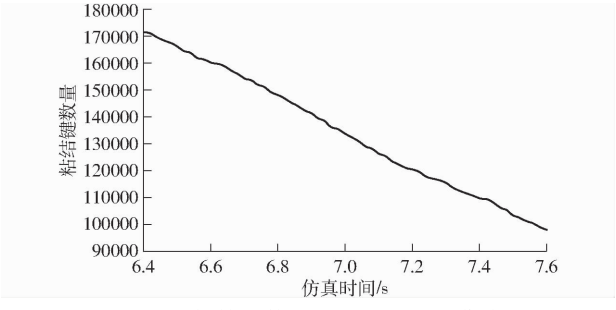

图 12 粘结键数量随时间的变化曲线

Fig. 12 Number of bonding bonds varied with time

3.3 仿真试验方案与结果分析

3.3.1 仿真试验方案

根据前期试验、单因素预试验,同时保证作业效率,作业速度需大于 0.5 m/s。参照文献[24-25],以前进速度 A、镇压力 B 以及圆管数量 C 为试验因素,以粘结键断裂率和铁笼镇压辊作业后土壤受到的压力为试验指标,进行二次旋转回归正交试验。试验因素编码如表 4 所示,试验方案及试验结果如表 5 所示,A、B、C 为前进速度、镇压力以及圆管数量编码值。

3.3.2 仿真结果

利用 Design-Expert V8.0.6 软件对仿真试验结果进行回归显著性分析和多元回归拟合[26-29],回归模型显著性分析结果如表 6 所示。对于粘结键断裂率 Z_1,A、B、C、AC、A^2、B^2 达显著性水平,其余项不显

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Codes of experiment factors

编码	因素		
	前进速度/(km·h^{-1})	镇压力/N	圆管数量/个
1.353	7.0	800	22
1	6.5	748	21
0	5.0	600	18
−1	3.5	452	15
−1.353	3.0	400	14

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Scheme and results of experiment

序号	因素			粘结键断裂率 Z_1/%	土壤压力 Z_2/N
	A	B	C		
1	0	0	0	38.97	4 048.2
2	0	0	0	38.76	3 840.5
3	−1	−1	−1	30.33	2 850.2
4	0	−1.353	0	38.53	3 859.0
5	0	0	1.353	47.25	4 404.7
6	−1	1	1	46.57	4 142.4
7	1	1	−1	36.24	3 040.1
8	−1	1	−1	32.34	3 004.1
9	1	−1	1	46.32	4 041.8
10	1.353	0	0	40.83	3 927.3
11	−1	−1	1	44.48	3 814.3
12	−1.353	0	0	37.91	3 481.5
13	1	1	1	47.92	4 310.3
14	0	1.353	0	41.17	4 001.0
15	0	0	0	38.66	3 632.8
16	0	0	−1.353	30.45	2 562.0
17	1	−1	−1	35.67	3 235.0

著，对粘结键断裂率影响由大到小为 C、A、B；对于土壤压力 Z_2，A、C、C^2 达到显著性水平，其余项不显著，对土壤压力影响由大到小为 C、A、B。粘结键断裂率和土壤压力的回归模型的 P 均小于 0.01，而失拟项 P 均大于 0.05，说明回归模型极显著且失拟项不显著，回归有效，将不显著项删除后得到粘结键断裂率 Z_1、土壤压力 Z_2 回归方程为

$$Z_1 = 38.80 + 1.41A + 0.84B + 6.33C - 0.76AC + 0.42A^2 + 0.67B^2 \quad (6)$$

$$Z_2 = 3\,811.29 + 122.07A + 64.15B + 574.30C - 244.71C^2 \quad (7)$$

当镇压力为 600 N 时，前进速度 A 和圆管数量 C 的交互作用见图 13。随前进速度增大和圆管数量增多，粘结键断裂率增大；当圆管数量处于较低水平时，粘结键断裂率随着前进速度增大而增大，前进速度对粘结键断裂率的影响较大，粘结键断裂率较小。当圆管数量处于较高水平时，任意前进速度下粘结键断裂率较大且变化速率较小。因此选择较多的圆管数有利于提高粘结键断裂率，提高镇压辊对于前进速度的适应性。

表 6　回归模型显著性分析

Tab. 6　Significant analysis of regression model

项目	来源	平方和	自由度	F	P
粘结键断裂率	模型	503.46	9	451.33	<0.000 1 **
	A	23.06	1	186.04	<0.000 1 **
	B	8.32	1	67.01	<0.000 1 **
	C	462.55	1	3 732.00	<0.000 1 **
	AB	0.48	1	3.757	0.093 8
	AC	4.58	1	36.91	0.000 5 **
	BC	0.15	1	1.24	0.301 8
	A^2	1.15	1	9.25	0.018 8 *
	B^2	3.01	1	24.31	0.001 7 **
	C^2	0.11	1	0.86	0.383 5
	残差	0.87	7		
	失拟项	0.82	5	6.53	0.138 1
	误差	0.05	2		
	总和	504.32	16		
土壤压力	模型	4 497 000	9	19.19	0.000 4 **
	A	172 200	1	6.61	0.036 9 *
	B	47 951.40	1	1.84	0.216 9
	C	3 811 000	1	146.36	<0.000 1 **
	AB	20 848.82	1	0.80	0.400 6
	AC	80.65	1	0.003	0.957 2
	BC	50 816.72	1	1.95	0.205 1
	A^2	62 698.18	1	2.41	0.164 7
	B^2	5 223.39	1	0.20	0.667 8
	C^2	320 900	1	12.32	0.009 9 *
	残差	182 300	7		
	失拟项	96 002.22	5	0.45	0.798 7
	误差	86 278.58	2		
	总和	4 679 420	16		

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$）；* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P<0.05$）。

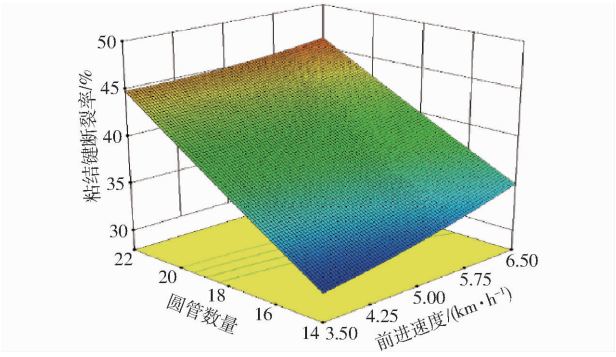

图 13　前进速度与圆管数量对粘结键断裂率的交互影响（$B=0$）

Fig. 13　Interaction effect of forward speed and number of tubes on breakage rate of bounded bonds ($B=0$)

3.4　参数优化

以粘结键断裂率和土壤压力最大为优化目标，利用 Design-Expert V8.0.6 软件对二次回归模型进

行多目标优化求解。根据铁笼镇压辊的实际工作条件、作业性能要求以及上述相关模型的分析结果，建立优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Z_1(A,B,C) \\ \max Z_2(A,B,C) \\ Z_1 \leqslant 100\% \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.353 \leqslant A \leqslant 1.353 \\ -1.353 \leqslant B \leqslant 1.353 \\ -1.353 \leqslant C \leqslant 1.353 \end{cases} \end{cases} \tag{8}$$

最终得到最优工作参数组合为：前进速度 3.53 km/h、镇压力 452 N、圆管数量 21 个，此时，粘结键断裂率 44.39%，土壤压力 4 039 N。

4 田间试验

于 2021 年 12 月中旬在银川市玉泉营葡萄小镇进行田间试验，葡萄行距为 3.2 m，试验地土质为砂壤土，测得土垄含水率为 3.3% ~5.0%。为验证机具在仿真得出最优工作参数组合下作业效果，实地检测埋藤压实一体机作业时起土性能参数和覆土性能参数，主要包括有：起土量、起土稳定性变异系数、土块碎土率、土壤坚实度差值、覆土厚度。试验过程及方法参照 DB64/T 915—2013《葡萄埋藤机》。

4.1 试验设备与方法

试验设备有：3MY－120 型葡萄埋藤压实一体机、雷沃欧豹 M604 型拖拉机、TDR150 型土壤含水率测定仪（精度 ±3%，分辨率 0.1%）、SC－900 型土壤紧实度仪（测量压力 0 ~7 000 kPa，测量深度为 0 ~450 mm）、卷尺（浙江奥奔工具有限公司，0 ~5 m，精度 1 mm）。

起土量测量方法：葡萄埋藤压实一体机在正常作业工作情况下进行单行程试验，在埋藤机行程方向上等距选测 5 处，测量长度为 1 m，间隔 2 m。起土量和起土稳定性变异系数[30]计算式为

$$a = \frac{\sum a_i}{n} \tag{9}$$

$$V_j = \frac{S}{a} \times 100\% \tag{10}$$

其中

$$S = \sqrt{\frac{(a_i - a)^2}{n-1}} \tag{11}$$

式中 a_i——各点起土量，m^3/m

n——测定点数，个

a——平均起土量，m^3/m

S——标准差，m^3/m

V_j——起土稳定性变异系数，%

土块碎土率测定方法：在葡萄埋藤压实一体机作业前进方向上，间隔 2 m 选取 5 处 0.5 m × 0.5 m（长 × 宽）的 0.25 m^2 面积内已经被碎土镇压的土块，测量每个土块最长边，将土块分级处理，分为最长边小于 4 cm，最长边为 4 ~8 cm，最长边大于 8 cm 3 个级别。土块最长边小于 4 cm 总质量与测定区域内所有级别土块质量比值即为葡萄埋藤压实一体机作业后的碎土率[31]，计算式为

$$S_t = \frac{M_4}{M_S} \times 100\% \tag{12}$$

式中 S_t——碎土率，%

M_4——最长边小于 4 cm 的土块总质量，kg

M_S——测量区域内所有土块质量，kg

土壤坚实度测量，在双铲起垄面上（图 14），随机取 5 点在地表以下 200 mm 处，使用土壤硬度计测量试验地镇压前后土壤坚实度，并计算镇压前后之差，以增加值作为镇压辊镇压效果评价指标之一。

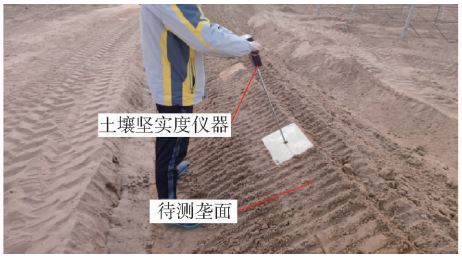

图 14 土壤紧实度测量示意图

Fig. 14 Schematic of soil compactness measurement

4.2 试验结果

试验时，将埋藤压实一体机与雷沃欧豹 M604 型拖拉机连接，依据仿真试验条件调整机具幅宽和作业参数。为突出比较镇压辊作用效果，对同一葡萄行先后以同种作业条件进行不带镇压辊起土作业和带镇压辊镇压作业，试验重复 3 次结果取平均值，最终田间试验结果如表 7 所示。

表 7 田间试验结果

Tab. 7 Results of field test

项目	参数	数值	指标
取土性能	取土量/($m^3 \cdot m^{-1}$)	0.35	≥0.22
	取土稳定性变异系数/%	9.8	≤10
	碎土率/%	82.3	≥70
覆土性能	镇压前后土壤压力增加值/kPa	11.6	≥10
	覆土宽度/mm	1 120	≥1 100
	覆土厚度/mm	401	≥200

田间作业效果如图 15 所示，田间试验结果表明，埋藤机覆土能力：覆土厚度为 401 mm、覆土宽度为 1 120 mm、镇压前后土壤坚实度增加 11.6 kPa，均符合规定指标参数。起土性能：起土量 a 为 0.35 m^3/m、碎土率 S_t 为 82.3%、起土稳定性变异系数 V_j 为 9.8%。整机设计达到葡萄埋藤碎土镇压的

作业要求。镇压前后土壤坚实度差值表明，铁笼镇压辊能够在一定程度上提高土垄坚实度。



图 15　作业效果对比

Fig. 15　Operation effect comparison

5　结论

(1)在传统双铲式埋藤机基础上进行改良，增设的液压缸实现刮土铲幅宽调节功能，能够适应不同葡萄园种植行距；在埋藤机尾部增设了铁笼镇压辊，在取土埋藤的同时实现对埋土土垄碎土镇压功能，提高了埋藤作业质量。

(2)设计了 3 种碎土镇压辊，并使用 EDEM 仿真软件对 3 种镇压辊进行碎土仿真，初步确定铁笼镇压辊碎土、镇压综合效果最优。三因素五水平二次回归正交组合试验结果表明，最优工作参数组合为：前进速度 3.53 km/h、镇压力 452 N、圆管数量 21 个，此时，粘结键断裂率为 44.39%，土壤压力 4 039 N。

(3)田间试验结果表明，铁笼镇压辊试验碎土率为 82.3%，满足埋藤要求。镇压前后土壤压力增加 11.6 kPa，起土性能：起土量为 0.35 m^3/m 和起土稳定性变异系数为 9.8%。样机覆土性能：覆土厚度为 401 mm、覆土宽度为 1 120 mm，可达到葡萄埋藤碎土镇压作业要求。

参　考　文　献

[1] 牛丛，马帅，徐丽明，等. 葡萄清土与防寒布回收机械化技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报，2021,42(3):29－39.
NIU Cong, MA Shuai, XU Liming, et al. Research status and prospect of grape soil clearing and cold-proof cloth recycling mechanization technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(3):29－39. (in Chinese)

[2] 马帅，徐丽明，许述财，等. 刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版)，2024,54(1):294－312.
MA Shuai, XU Liming, XU Shucai, et al. Design and experiment of grapevine cold-proof soil cleaner with combined scraping and brushing[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024,54(1):294－312. (in Chinese)

[3] 杨叶，梁堃. 葡萄起埋藤机械的研究现状与发展对策研究[J]. 农家参谋，2020(20):94－95.

[4] 马帅，徐丽明，袁全春，等. 葡萄机械化清土的发展现状与解决对策[J]. 农机化研究，2020,42(7):1－8.
MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Development status and countermeasures of grape mechanized soil clearing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(7):1－8. (in Chinese)

[5] 宋龙，周艳，何磊，等. 葡萄清土扒藤机械化技术研究现状与展望[J]. 新疆农机化，2023(5):25－28, 35.
SONG Long, ZHOU Yan, HE Lei, et al. Current research situation and prospect of grapevine picking up and soil cleaning mechanized technology[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(5):25－28, 35. (in Chinese)

[6] 沈晓贺，朱占江，杨莉玲，等. 新疆酿酒葡萄生产机械化现状与发展趋势[J]. 新疆农业科学，2024,61(增刊 1):147－152.

[7] 阿依努尔·依米提. 新疆葡萄埋藤机械化现状与发展方向[J]. 农业工程技术，2020,40(8):49－51.

[8] 王彤心，杨继红，苏媛，等. 我国葡萄埋藤和清土作业机械的应用现状[J]. 中外葡萄与葡萄酒，2023(6):117－123.
WANG Tongxin, YANG Jihong, SU Yuan, et al. Application status of grapevine burying and soil clearing machinery in China [J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2023(6): 117－123. (in Chinese)

[9] 章慧全. 3MT－5.0 型葡萄埋藤机的研制[J]. 农业科技与装备，2013(11):44－46.
ZHANG Huiquan. Development of 3MT－5.0 grapevine burying machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2013(11):44－46. (in Chinese)

[10] 余慧燕. 葡萄埋藤机的设计与性能研究[D]. 银川：宁夏大学，2017.
SHE Huiyan. Design and experiments of grape vine burying machine[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017. (in Chinese)

[11] 徐丽莹. ZOPF－A 型葡萄越冬覆土机通过鉴定[J]. 农机科技推广，2004(1):39.

[12] 刘忠军，杨学军，刘立晶，等. 葡萄藤越冬埋土机的设计[J]. 农机化研究，2012,34(2):113－115.
LIU Zhongjun, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Design and experiment on vine burring soil for over winter machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(2):113－115. (in Chinese)

[13] 蒙贺伟，李进江，坎杂，等. PM－1200 型悬挂式葡萄埋藤机研制[J]. 农机化研究，2012,34(2):97－100.
MENG Hewei, LI Jinjiang, KAN Za, et al. Development of PM－1200 suspended grapevine covering machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 97－100. (in Chinese)

[14] 王小波. 基于离散元法仿生深松铲的设计与试验研究[D]. 雅安：四川农业大学，2023.
WANG Xiaobo. Design and experimental study of biomimetic deep loose shovel based on discrete element method[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[15] 杨滨齐，周慧. 酿酒葡萄栽培技术要点[J]. 宁夏农林科技，2022,63(7):77.

[16] 何进, 李洪文, 张学敏, 等. 1QL－70 型固定垄起垄机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009,40(7):55－60.
HE Jin, LI Hongwen, ZHANG Xuemin, et al. Design and experiment of 1QL－70 bed former for permanent raised beds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(7):55－60. (in Chinese)
[17] 杜宏娟, 张磊, 赵立斌, 等. 贺兰山东麓酿酒葡萄适宜越冬埋土深度调查研究[J]. 现代农业科技, 2010(20):119－123.
[18] 宋学锋, 张锋伟, 戴飞, 等. 基于离散元的施肥机肥料块破碎装置参数的优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017,43(2):206－211.
SONG Xuefeng, ZHANG Fengwei, DAI Fei, et al. Parameter optimization for fertilizer block crushing device of fertilizer machine based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2017,43(2):206－211. (in Chinese)
[19] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018,34(18):21－27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(18):21－27. (in Chinese)
[20] 马帅, 徐丽明, 袁全春, 等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020,36(1):40－49.
MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(1):40－49. (in Chinese)
[21] 谭好超, 徐丽明, 马帅, 等. 刮板式有机肥条铺与旋耕混合施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(11):163－175.
TAN Haochao, XU Liming, MA Shuai, et al. Design and experiment of scraper organic fertilizer strip spreading and rotary tillage mixed fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):163－175. (in Chinese)
[22] MOMOZU M, OIDA A, YAMAZAKI M, et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2002,39(4):207－220.
[23] ZHANG Rui, LI Jianqiao. Simulation on mechanical behavior of cohesive soil by distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2006,43(3):303－316.
[24] 吕金庆, 尚琴琴, 杨颖, 等. 马铃薯杀秧机设计优化与试验[J]. 农业机械学报, 2016,47(5):106－114.
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):106－114. (in Chinese)
[25] 牛丛, 徐丽明, 闫成功, 等. 基于局部建模方法的卧式柔性清土辊性能优化[J]. 农业工程学报, 2023,39(1):50－59.
NIU Cong, XU Liming, YAN Chenggong, et al. Optmization of the performance of the horizontal flexible soil-clearing roller using partial modeling[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(1):50－59. (in Chinese)
[26] 杜哲, 李邓辉, 李心平, 等. 茶茎秆离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(1):311－320.
DU Zhe, LI Denghui, LI Xinping, et al. Calibration and experiment of discrete element model parameters for tea stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(1):311－320. (in Chinese)
[27] 毕津硕, 卢彩云, 李洪文, 等. 动态滑切分段式驱动圆盘防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(10):291－300.
BI Jinshuo, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Design and testing of dynamic sliding cutting segmented drive disc anti-blocking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(10):291－300. (in Chinese)
[28] 黄新平, 徐瑞华, 黄广杰, 等. 铲筛组合式生姜收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(5):309－318.
HUANG Xinping, XU Ruihua, HUANG Guangjie, et al. Design and experimrnt of combined shovel-screen ginger harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(5):309－318. (in Chinese)
[29] 张学宁, 尤泳, 王昭宇, 等. 板结羊草地折翼式松土铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(5):213－221.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Zhaoyu, et al. Optimization design and experiment of folded-wing for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(5):213－221. (in Chinese)
[30] 田荣昌. 圆锥式葡萄埋藤机的研制与试验[D]. 银川:宁夏大学, 2020.
TIAN Rongchang. Development and experiment research of conical grape vine burying machine[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020. (in Chinese)
[31] 张成亮. 联合整地机平整和镇压部件的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2012.
ZHANG Chengliang. Design and experiment on the flattening and compacting of combined cultivating implement[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)