

基于 EDEM 的链铲式捡石机设计与试验

张佳喜^{1,2} 李江涛^{1,2} 张 虎³ 张 佳^{1,2} 高继怀⁴ 郑亚鹏^{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;
3. 新疆维吾尔自治区农牧业机械产品质量监督管理站, 乌鲁木齐 830052;
4. 新疆大丰戈农机制造有限公司, 博乐 833400)

摘要: 为解决捡石机捡石率低、壅土的问题,设计了一种链铲式捡石机。通过对入土铲板的受力分析,确定其结构参数;对拨石轴拨土和拨石过程进行运动学分析,明确拨石齿的运动轨迹及关键结构参数;通过 EDEM 确定了拨石轴对壅土区域的拨土作用以及拨出至输送链的速度。为评估捡石机的工作可靠性及作业效果,采用响应面法设计试验,考察前进速度、拨石轴转速和离地高度对捡石率与壅土高度的影响,并建立回归模型进行参数优化。试验结果表明,最优参数组合为:前进速度 0.844 m/s,拨石轴转速 338.9 r/min,离地高度 394.26 mm,此时模型预测捡石率 93.85%、壅土高度 250.57 mm。通过田间试验验证,捡石率和壅土高度相对误差分别为 2.97%、4.73%,捡石率和壅土高度相对误差均小于 5%,证明样机设计合理,满足捡石机作业要求。

关键词: 捡石机; 拨石轴; 壅土; 链铲式; EDEM

中图分类号: S222.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0122-12

OSID:



Design and Experiment of Chain Shovel Stone Picker Based on EDEM

ZHANG Jiayi^{1,2} LI Jiangtao^{1,2} ZHANG Hu³ ZHANG Jia^{1,2} GAO Jihuai⁴ ZHENG Yapeng^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Agricultural and Animal Husbandry Machinery Product Quality Supervision and Management Station, Urumqi 830052, China

4. Xinjiang Dafengge Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Bole 833400, China)

Abstract: Aiming to address the issues of low stone-picking rate and soil accumulation in stone pickers, a chain-and-scoop type stone picker was designed. Through force analysis of the soil-entering scoop plate, its structural parameters were determined. Kinematic analysis of the soil-shifting and stone-picking processes of the stone-picking shaft was conducted to clarify the motion trajectory of the stone-picking teeth and the key structural parameters. The action of the stone-picking shaft on disturbing the soil accumulation area and the velocity of stones thrown onto the conveyor chain were determined by using EDEM software. To evaluate the operational reliability and performance of the stone picker, response surface methodology was employed to design experiments investigating the effects of forward speed, rotational speed of the stone-picking shaft, and ground clearance on the stone-picking rate and soil accumulation height. A regression model was established for parameter optimization. The experimental results indicated that the optimal parameter combination was a forward speed of 0.844 m/s, a stone-picking shaft rotational speed of 338.9 r/min, and a ground clearance of 394.26 mm. Under these conditions, the model predicted a stone-picking rate of 93.85% and a soil accumulation height of 250.57 mm. Field validation tests showed relative errors between the measured values and the model predictions were 2.97% and 4.73%, respectively, both below 5%. This confirmed that the prototype design was reasonable and met the operational requirements of a stone picker.

Key words: stone picker; stone shifting shaft; soil accumulation; chain-shovel type; EDEM

收稿日期: 2026-03-04 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02007-2-2)、科技创新领军人才项目(2024TSYCLJ0014)、新疆人才发展基金项目(XJRC-2025-JY-YJ-GX-QNZ-007)和新疆科技援疆项目(2026E01021)

作者简介: 张佳喜(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事循环农业技术与装备研究,E-mail: 563810112@qq.com

0 引言

耕地资源是保障国家粮食安全与农业可持续发展的基石。然而,我国现有耕地中,中低产田占比近 70%,其中土壤砾石含量高是制约耕地质量提升的关键障碍因素之一^[1-3]。农田中的石块不仅会改变土壤结构,降低其保水保肥能力,还会影响作物对养分的吸收,加速土壤水分蒸发,阻碍作物出苗与根系生长,导致减产。此外,耕作层中的石块显著增加了农机具的作业阻力与磨损^[4-6],推高了农业生产成本,严重制约了农业机械化的发展。目前,我国农田捡石仍以人工捡拾为主,但这种方法仅能清除地表石块,无法处理农机作业耕作层中的石块。因此,迫切需要研制一种高效的捡石装备,以清理农机作业耕作层中的石块^[7-10]。

针对耕作层捡石,国内外科研工作者已经开展了大量研究。例如,加拿大公司研制的 SRW-1400 型捡石机采用旋转侧向堆放技术,通过螺旋排列的高硬度齿片连续拨动,将地表和浅埋石块整齐推送至设备最右侧。然而,该设备主要针对表层石块处理,对耕作层嵌入土壤的石块清理能力有限^[11]。西班牙的特格纳捡石机具有作业深度大、土石分离效果好、筛分精度高、石块收集尺寸可调、可靠性强等特点,并能同步清理部分杂草灌木。然而,其结构相对复杂、购买和维护成本较高,限制了其在生产实际中的使用^[12]。林涛等^[13]设计了一种面向丘陵作业环境的小型捡石机,对其进行静力学分析,减少工作阻力,但在使用过程中也出现了铲板壅土的问题。牛丛等^[14]设计了一种铲筛式农田石块捡石收集机,对捡石机链筛进行 EDEM 仿真优化,以提高机具作业性能并得到最优作业参数。综上所述,国内外针对不同结构的捡石机进行了深入研究,但仍普遍存在铲板壅土、上石率低、成本较高等问题^[15]。

为此,本文结合新疆农田的砾石现状,设计一种液压驱动的链铲式农田捡石机。通过对入土铲-拨石轴协同作业进行理论分析与参数设计,确定关键结构参数;运用离散元法,建立石块-土壤离散元模型,对入土铲工作过程进行仿真分析;通过开展田间试验,利用 Design-Expert 软件确定最佳参数组合。以期为西北地区砂砾质农田提供一种高效、实用的捡石装备。

1 机具结构与工作原理

1.1 机具结构

链铲式捡石机主要由牵引装置、液压传动系统、输送链、卸料斗、入土铲板、拨石轴等主要部件组成,

其中入土铲板与拨石轴为主要工作部件,整机结构如图 1 所示。

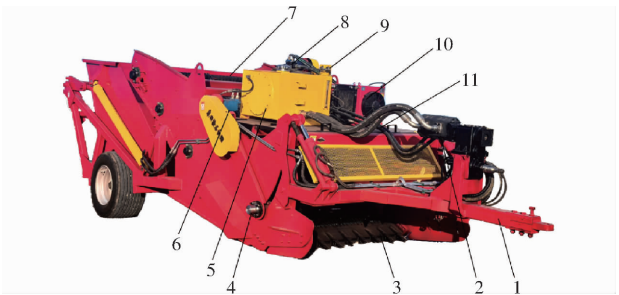


图 1 链铲式捡石机整机结构图
Fig.1 Chain-shovel stone picker complete machine structural diagram

1. 牵引装置 2. 液压油泵 3. 入土铲板 4. 拨石轴 5. 液压油箱 6. 拨石轴液压马达 7. 输送链 8. 卸料斗 9. 输送链液压马达 10. 散热器 11. 控制箱

1.2 工作原理

拖拉机通过牵引装置带动捡石机前行,为其提供前进动力。拖拉机后输出轴连接液压油泵,液压油泵经过电磁阀与液压马达相连,驱动拨石轴转动。通过控制箱调节液压马达转速,可控制拨石轴和输送链的运行速度。机具作业时,土石混合物经入土铲板进入拨石轴工作区域,被拨石轴向后击打并拨送至输送链,最终经过输送链筛后端落入集石箱。机具主要技术参数如表 1 所示。

表 1 捡石机主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of stone picker

参数	数值/类型
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	7 400×3 320×2 300
配套功率/kW	≥164
工作幅宽/mm	2 000
驱动方式	液压驱动
挂接形式	牵引式

2 关键部件设计

2.1 入土铲板设计

挖掘铲结构如图 2 所示。入土铲由入土铲尖和三角板在铲板上交替分布组成。入土铲尖通过销轴与铲板连接,三角板通过焊接与铲板连接。考虑到西北地区的土壤,含石量大、石块尺寸不一,导致挖掘过程中阻力大、挖掘部件易损坏,因此挖掘装置的铲尖角度不宜过小,同时,针对不同的土壤条件,应对入土铲的倾角进行调整。农田一般的耕作深度在 200 mm 左右,因此捡石机的平均捡石深度为 200 ~ 220 mm。捡石机入土铲入土时所受到的阻力如图 3 所示。为了减少捡石机入土铲的入土阻力,对铲尖的结构参数进行了设计。

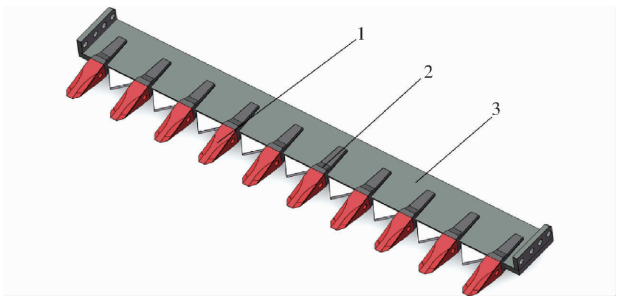


图2 挖掘铲板

Fig. 2 Excavator bucket

1. 可更换铲尖 2. 铲尖底座 3. 固定铲板

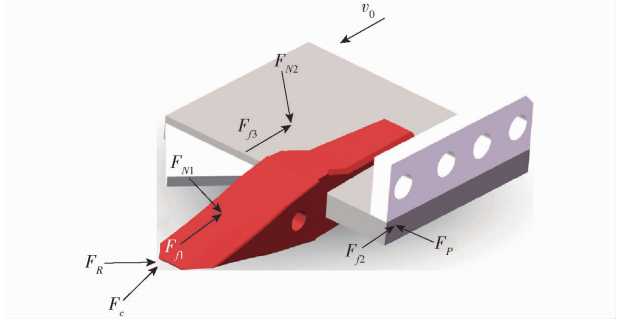


图3 入土铲受力图

Fig. 3 Soil shovel force diagram

挖掘铲板随着牵引装置的下降,前端进入土壤进行破土,对挖掘铲的分析可知^[16-18],如图3所示,入土铲所受的阻力包括入土铲铲尖两侧的摩擦力,铲尖上下面的摩擦力、土壤内聚力,土壤对铲面和铲体侧面的压力以及摩擦力。捡石机入土铲的阻力为

$$\begin{cases} F_{N1} = (F_c + \rho h \tan \psi) bh \\ F_{N2} = bhl\rho g \\ F_{f1} = \mu_1 F_{N1} \\ F_{f2} = \mu_1 F_p \\ F_{f3} = \mu_1 F_{N2} \\ F_R = bhl\rho \tan(\alpha + \psi) + kf \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_{N1} ——土壤对铲尖的压力,N
 F_{N2} ——土壤对铲面的压力,N
 F_c ——土壤内聚力,N
 F_p ——土壤对铲体侧面的压力,N
 F_{f1} ——铲尖受到的摩擦力,N
 F_{f2} ——铲体受到的摩擦力,N
 F_{f3} ——铲面受到的摩擦力,N
 F_R ——土壤切削阻力,N
 ρ ——土壤容重,g/cm³
 α ——入土铲尖倾角,(°)
 ψ ——土壤内摩擦角,(°)
 l ——入土铲铲面长度,mm
 b ——入土铲铲面宽度,mm
 h ——铲尖到地平面的高度,mm

μ_1 ——土壤与 Q235 钢之间的摩擦因数
 k ——比阻力系数
 f ——被铲起土壤的截面面积,mm²
 g ——重力加速度,m/s²

由于铲板固定在侧板上,铲板的受力也会对铲体产生阻力,铲体侧面的总摩擦力遵循经典摩擦定律,因此需要计算铲体侧面的法向挤压力,作用在铲体单侧单位面积上的法向挤压力可以用被动土压力理论估算,即

$$F_p = \int_0^h (\rho_g z K_p + 2c\sqrt{K_p}) dz = \frac{1}{2} \rho_g h^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\psi}{2} \right) + 2ch \left| \tan \left(45^\circ + \frac{\psi}{2} \right) \right| \quad (2)$$

式中 z ——计算点深度,mm
 K_p ——被动土压力系数
 c ——土壤粘聚力,kPa
 ρ_g ——土壤重度,kN/m³

铲体入土时所受到的阻力 F_z 为

$$F_z = F_{f1} + F_{f2} + F_{f3} + F_R = \mu_1 \left[(F_c + \rho_g h \tan \psi) bh + bhl\rho_g g + \frac{1}{2} \rho_g h^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\psi}{2} \right) + 2ch \left| \tan \left(45^\circ + \frac{\psi}{2} \right) \right| + bhl\rho_g \tan(\alpha + \psi) + kf \right] \quad (3)$$

由于捡石机的工作场景多为砂砾质农田,砂砾质土相较于壤土堆积角更小,在达到一定的堆积角时,砂砾质土会自然向下塌陷,因此为了让石块和土壤能够沿着铲板向后方输送进入输送链条,需要确保入土铲铲面的倾角小于砂砾质土的堆积角。砂砾质土壤的堆积角为 30°~34°,根据切削试验数据得知,25°~30°范围内综合阻力最低且刀具寿命可接受。因此入土铲铲尖角度取值为 25°,入土铲安装倾角也为 25°。

2.2 拨石轴设计

机具工作过程中,铲板入土铲起土壤,土壤在铲板上做斜向上运动,然而,在运动过程中,会出现速度的分层现象:下层的土壤受铲板直接带动,获得较大的速度;上层土壤因惯性作用,速度较低,运动相对滞后。这一速度差导致上下层土壤之间发生相对剪切和翻滚,进而使上层土壤在铲板后侧逐渐堆积,形成壅土现象,而下层土壤则相对顺利地通过铲板。这种因速度分布不均引发的内部流动紊乱,是造成土壤在铲板后方堆积的主要原因。

拨石轴及拨石齿排布如图4所示。通过拨石轴在机具工作过程中做回转运动带动拨石齿对土壤和

石块进行拨进运动。拨石轴既随机具前进,又围绕自身做回转运动,其运动轨迹为机具前进速度和回转运动的合成,拨石轴的运动轨迹呈余摆线,如图 5 所示。

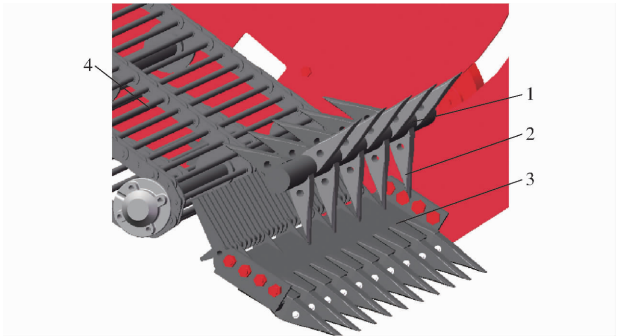


图 4 拨石轴安装位置关系图

Fig. 4 Diagram of installation position of stone-setting shaft

1. 拨石轴 2. 拨石齿 3. 入土铲 4. 输送链条

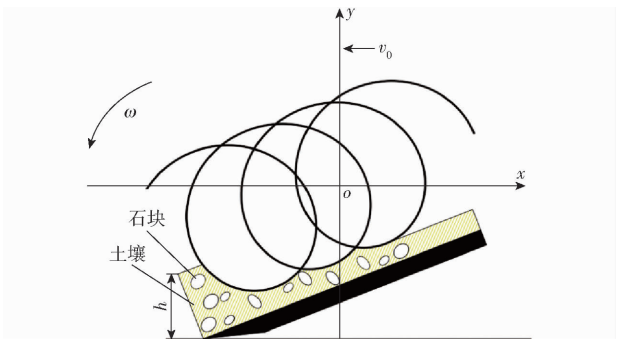


图 5 拨石装置运动轨迹

Fig. 5 Motion trajectory of stone-pushing tooth

以机具前进方向的反方向为 x 轴,竖直向上方向为 y 轴,建立直角坐标系 oxy 。对拨石齿尖顶点进行运动分析,其运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x(t) = vt + r\cos(\omega t) \\ y(t) = r\sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $x、y$ ——齿顶点在 x 轴和 y 轴方向上位移, mm

v ——机具前进速度, m/s

r ——拨齿转动半径, mm

ω ——拨齿转动角速度, rad/s

t ——机具作业时间, s

由式(4)可得拨齿在接触土石混合物的水平速度 v_x 和竖直速度 v_y 为

$$\begin{cases} v_x = v - r\omega\sin(\omega t) \\ v_y = -r\omega\cos(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $v_x、v_y$ ——拨齿接触土石混合物瞬间的水平、竖直速度, m/s

拨齿在拨土时的绝对速度 v_a 为

$$v_a = \sqrt{v^2 - 2vr\omega\sin(\omega t) + (r\omega)^2} \quad (6)$$

在机具的工作过程中,常因壅土作用导致铲板

上的土石混合物过多难以进入输送链筛,并且增加了阻力;拨石装置的主要作用是对铲板上的土石混合物进行击打,从而避免壅土。捡石机的拨石装置通过液压马达提供动力进行旋转,对入土铲上的土石混合物进行击打。将砂砾质农田中较小的石块与土壤一起视为整体进行分析。假设在机具工作过程中,挖掘装置始终匀速前进,且入土深度保持稳定,铲板上土石混合物的高度和流向基本保持不变。拨石齿与土石混合物最先接触的位置为齿尖。以拨石装置的回转中心 o 为坐标原点,机具前进方向的反方向为 x 轴,垂直 x 轴向上的方向为 y 轴,建立坐标系,如图 6 所示。

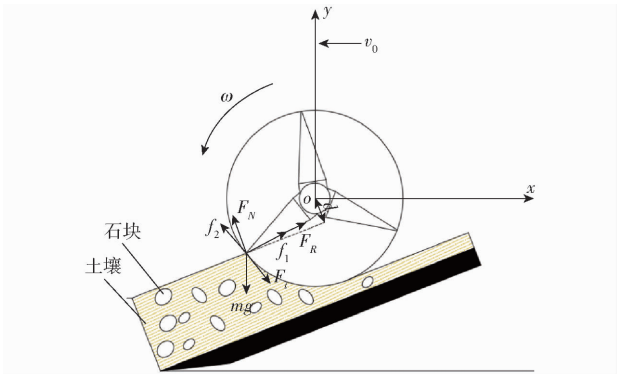


图 6 拨石装置工作示意图

Fig. 6 Schematic of stone-throwing device

当拨齿接触到砂砾质土壤时,可以对土壤受到的力进行分析。石块在沿坐标轴方向的受力公式为

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = f_1 \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + F_R \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + F_t \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + f_2 \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) \\ m \frac{d^2y}{dt^2} = F_N + f_1 \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + F_R \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) - F_t \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + f_2 \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) - mg \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \mu_2 F_R \\ f_2 = \mu_3 mg \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) \\ F_R = \omega^2 Rm \\ \sin\gamma = \frac{d}{R} \end{cases} \quad (8)$$

式中 F_N ——地表对石块的支持力, N

F_t ——拨轴对石块的打击力, N

$f_1、f_2$ ——石块相对地表和拨齿的摩擦力

$\mu_2、\mu_3$ ——石块相对于土壤和拨齿的摩擦因数

β ——拨齿两面的夹角, ($^\circ$)

- γ ——拨齿回转中心与石块接触点连线与地面的夹角, (°)
 d ——拨石轴回转中心到砂砾质土壤的直线距离, mm
 m ——石块质量, kg
 R ——拨石轴回转半径, mm

联立式(7)、(8),对微分方程求解可得石块与土壤在接触点 x 、 y 方向的分速度为

$$\begin{cases} v_x = \mu_1 \omega^2 R t \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + \omega^2 R t \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + \\ F_t \frac{t}{m} \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + \mu_2 g t \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \\ \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) \\ v_y = F_N \frac{t}{m} + \mu_1 \omega^2 R t \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + \\ \omega^2 R t \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) - F_t \frac{t}{m} \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + \\ \mu_2 g t \sin\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) \cos\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

由公式(9)可得,影响拨石轴对石块拨进运动的拨石装置结构参数包括 γ 、 β 、 ω 和 d ,其中 γ 受到拨石轴安装位置的影响;拨石装置在工作中,需要直接对石块进行击打和拨进,为了保证拨石齿的结构强度, β 取 20° , R 取 270 mm。

随着机具前进,挖掘铲将石块铲起,使其沿铲板表面斜向上移动。当石块运动到铲板后端时,拨石轴的拨齿会击打该处的土壤与石块。为探究石块在拨石轴作用下的运动规律,并分析其成功拨出的条件。将石块视为质点,捡石机与拨石轴均匀速运动,忽略空气阻力的影响,在石块被拨出的瞬间,其运动可视为斜向上的抛出运动。为了研究石块被拨出后的运动规律,需要对石块被抛出的极限条件进行分析,石块在被抛出前一瞬间的受力图如图 7 所示。

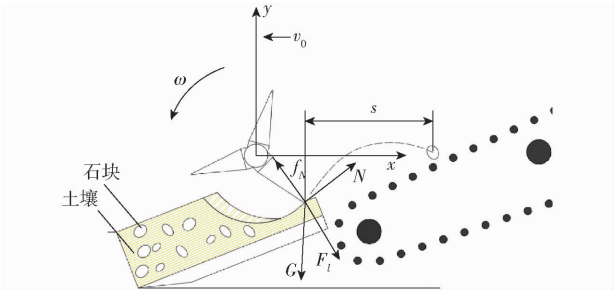


图 7 拨石装置拨出示意图

Fig. 7 Schematic of stone-removing device

以拨石轴回转中心为坐标系的原点,将前进方向的反方向设为 x 轴正方向,垂直于地面向上设为

y 轴正方向。石块沿着铲板斜向上运动,当其达到拨石轴工作区域后,会被拨石轴击打并抛出铲板。石块沿着铲板斜向上移动,当其到达拨石轴的工作区域后,会被拨石轴击打并抛出铲板。石块被抛出的极限条件为离心力大于其反方向的摩擦力。拨出瞬间的拨石齿对石块的力为 0,石块向后的力由离心力和重力提供,离心力的方向沿着齿面向下,拨出方向与重力的夹角为 θ ,可得到方程

$$\begin{cases} F_l + G \cos(90^\circ - \theta) - f_N \geq 0 \\ F_l = m \omega^2 R \\ G = mg \\ f_N = \mu_3 N \end{cases} \quad (10)$$

- 式中 F_l ——石块受到的离心力, N
 f_N ——石块在齿面上受到的摩擦力, N
 G ——石块重力
 N ——石块受到的击打力

其中,石块受到的离心力随着回转半径以及石块拨出瞬间的角速度增大而增大,由式(10)可得出石块被抛出的极限条件为^[19-20]

$$\omega^2 \geq \frac{g(\mu_3 \cos \theta - \sin \theta)}{R} \quad (11)$$

石块在机具前进速度与拨齿作用的共同影响下获得运动速度。当砂砾质土壤沿铲板运动时,同时受到拨石齿的拨出作用,其飞出铲板的速度为二者的合成速度;该速度可分解为沿 x 轴与 y 轴的两个分速度,进而可求得 x 、 y 方向的位移分量。石块抛出后,在重力作用下落向输送链筛,进入碰撞、破碎、分离阶段,设此段的水平位移为 x_1 。在不考虑风场的情况下,石块在重力场中的抛射轨迹可描述为

$$\begin{cases} x = x_1 + \omega R t \sin \theta - v_0 t_1 \\ y = y_1 + \omega R t \cos \theta - \frac{g t_1^2}{2} \end{cases} \quad (12)$$

- 式中 x_1 ——石块抛出前的水平位置, mm
 y_1 ——石块抛出前的垂直位置, mm
 t_1 ——石块抛出运动的时间, s
 v_0 ——机具稳定前进的速度, m/s

根据轨迹方程可得到石块水平抛出距离 s 为

$$s = \left(\frac{\omega R \sin \theta}{g} - v_0 \right) \left[\omega R \cos \theta + \sqrt{(\omega R \cos \theta)^2 + 2 g y_1} \right] \quad (13)$$

由式(11)、(13)可知,石块的抛出极限条件与拨石齿材料、拨石齿回转半径有关;抛出距离与前进速度、拨石轴转速、拨石齿回转半径有关;考虑到耕作层深度,石块抛出时的垂直距离与拨石轴和铲板的距离有关。

3 离散元模型建立

3.1 土壤模型建立

机具工作过程中,铲板起土和拨石轴对石块的拨进现象难以观察,因此使用 EDEM 软件对铲板起土和拨石轴工作过程进行仿真,得到入土-破土-拨石过程。西北的砂砾质农田表层普遍含水率低,但较深层的土壤含水率较高,捡石机需要入土 200 mm,铲板与拨石轴接触的土壤为湿土,因此土壤与土壤之间接触模型选择 Hertz - Mindlin with JKR;土壤与石块之间粘结力较大,因此在 EDEM 中的接触模型选择 Hertz - Mindlin with Bonding v2。Hertz - Mindlin with JKR 模型和 Hertz - Mindlin with Bonding v2 模型需要设置的参数如表 2 所示^[21-26]。

表 2 仿真特性参数

Tab.2 Simulation characteristic parameters		
参数	数值	来源
Q235 钢泊松比	0.30	文献[14]
Q235 钢剪切模量/Pa	7.8×10^{10}	文献[14]
Q235 钢密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850	文献[14]
土壤泊松比	0.35	文献[14]
土壤剪切模量/Pa	1.15×10^5	文献[22]
土壤密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 667	测量
石块泊松比	0.30	材料数据库
石块剪切模量/Pa	1×10^6	材料数据库
石块密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 600	测量
土壤-土壤碰撞恢复系数	0.13	文献[22]
土壤-土壤动摩擦因数	0.27	文献[22]
土壤-土壤静摩擦因数	0.56	文献[22]
土壤-石块碰撞恢复系数	0.06	文献[14]
土壤-石块动摩擦因数	0.01	文献[14]
土壤-石块静摩擦因数	0.50	文献[14]
土壤-Q235 钢碰撞恢复系数	0.13	文献[23]
土壤-Q235 钢动摩擦因数	0.27	文献[23]
土壤-Q235 钢静摩擦因数	0.56	文献[23]
石块-Q235 钢碰撞恢复系数	0.20	测量
石块-Q235 钢动摩擦因数	0.01	测量
石块-Q235 钢静摩擦因数	0.50	测量
石块-石块碰撞恢复系数	0.30	测量
石块-石块动摩擦因数	0.01	测量
石块-石块静摩擦因数	0.50	测量
土壤-石块间法向接触刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.82×10^7	标定
土壤-石块间切向接触刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.39×10^7	标定
土壤-石块颗粒间临界法向应力/kPa	151.32	标定
土壤-石块颗粒间临界切向应力/kPa	86.07	标定
粘结半径比例	1.25	标定
土壤间的 JKR 表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	6.30	标定

为更真实地模拟砂砾质农田的土壤特性,本研

究基于实际土壤样本的筛分结果构建颗粒模型。供试土壤为砂质壤土,其颗粒组成经筛分测量确定为:粒径大于 2 mm 的颗粒占比为 37%,粒径在 1 ~ 2 mm 的颗粒占比为 21%,粒径小于 1 mm 的颗粒占比为 42%。考虑到过小的颗粒会显著增加计算成本,为了提高仿真的进度和可行性,采用简化球体单元代替真实颗粒,如图 8 所示,分别使用半径为 4 mm 的单球体、双球体及三球体颗粒,并按照 42% (对应小于 1 mm 粒级)、21% (对应 1 ~ 2 mm 粒级) 和 37% (对应大于 2 mm 粒级) 的质量比例进行组合,以近似表征田间土壤的级配特征。

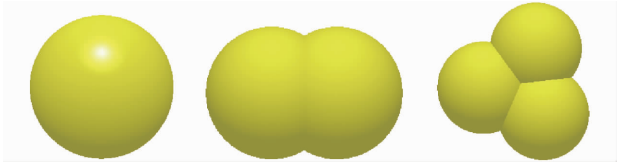


图 8 3 种土壤颗粒仿真模型

Fig. 8 Three soil particle models

3.2 石块模型建立

在前期的实地调研工作中,发现在砂砾质农田中多为块状,且直径主要为 20 ~ 260 mm,石块尺寸不一;砂砾质农田中存在的石块多为棒状、片状、块状,对收集到的石块进行尺寸和形状分类。为了能够模拟田间实际情况,对收集到的田间石块进行拍照收集数据,使用 Meshroom 软件进行散点建模,最终生成 .stl 格式,导入 Solidworks 对建模文件进行校正,最终建立 6 种石块模型,如图 9 所示。

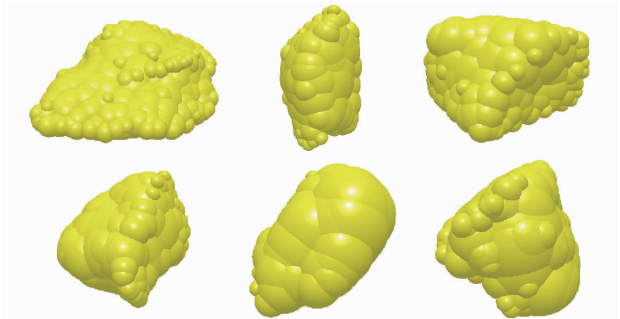


图 9 6 种石块模型

Fig. 9 Six stone block models

3.3 起土拨石装置模型

使用 Solidworks 软件对起土拨石装置进行绘制,为了在保证仿真真实性的基础上降低运算量,因此对起土拨石装置分别进行简化,导出为 .stl 格式并导入 EDEM 软件中。在 EDEM 软件中设置 box 尺寸为 3 000 mm × 2 000 mm × 300 mm,颗粒工厂分为上、中、下 3 层同时进行沉降生成土壤颗粒和石块模型,为探究石块在不同深度下的起土(石)效果、拨石效果和运动规律,在不同深度处分别生成了不同的石块。仿真模型如图 10 所示。

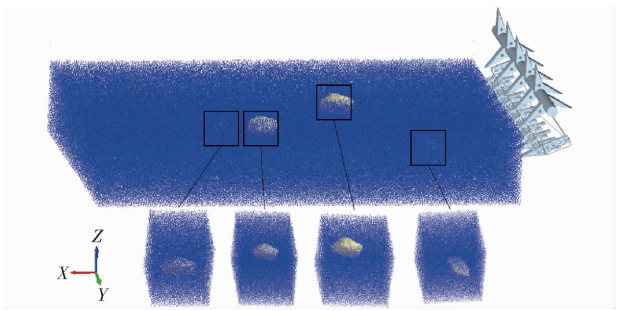


图 10 仿真模型
Fig. 10 Simulation model

4 入土铲-拨石轴仿真试验

4.1 仿真试验

利用 EDEM 中的 analyst tree,导出并统计不同位置土壤颗粒的速度,以反映作业过程中的土壤速度,如图 11 所示。

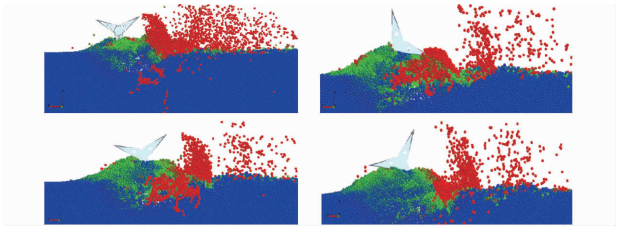


图 11 EDEM 仿真过程图
Fig. 11 EDEM simulation process diagram

机具实际进行田间作业中,壅土高度以及土壤的运动规律难以测量,因此使用划分网格,针对网格中的颗粒运动规律,颗粒数量进行壅土分析。对不同安装位置的拨石轴进行仿真模拟对比试验^[27]。机具以 0.6 m/s 的速度前进,拨石轴以 300 r/min 的转速旋转拨土,根据农艺要求起土拨石装置入土深度为 200 mm。根据捡石机的工作要求,机具前进速度为 0.6 ~ 1.0 m/s,取工作速度为 0.6 m/s,使用 EDEM 中后处理导出颗粒速度数据,如图 12 所示。起土拨石装置 1.4 s 开始工作,1.8 s 进入网格区域,在 3.2 s 离开网格区域;土壤在起土铲板上滑动,被铲板铲起向 x 轴方向运动以及 z 轴方向运动,随后通过铲板的土壤流动或者被拨石轴击打向 x 轴负方向,土壤通过铲板后向 z 轴负方向掉落;土壤在 y 轴

方向并无太大变化,但是被拨石轴击打的土壤在 y 轴方向上有明显的速度变化。

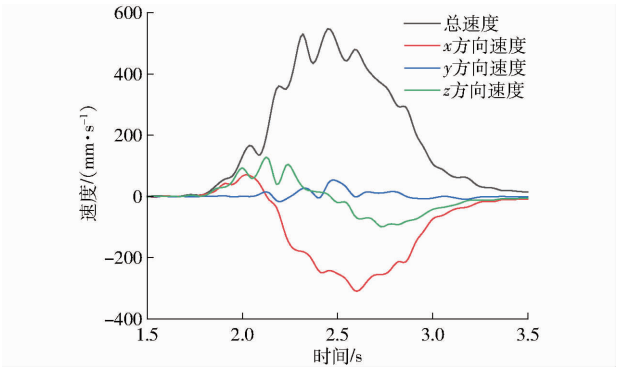


图 12 土壤颗粒在网格中的速度
Fig. 12 Velocity of soil particles in grid

4.2 土壤速度情况

为了能够更仔细地分析拨石轴对土壤的作用能否降低壅土,达到拨动土壤的效果,通过对仿真区域进行细化划分,在 4 枚不同拨石齿的位置添加 Grid Bin Group 进行两两对比分析^[28],每个位置划分为 5 层的方格,划分网格位置如图 13 所示。

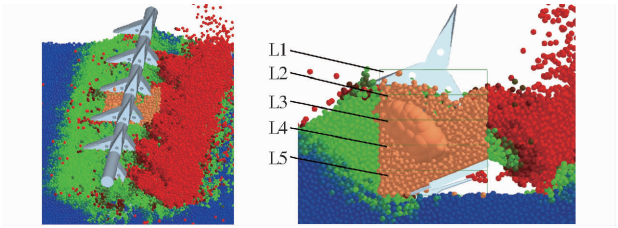


图 13 细分网格划分
Fig. 13 Subdivision mesh partitioning

土壤颗粒的运动趋势和速度情况如图 14 所示,铲板进入细分网格中,土壤先被铲板铲起,沿着铲板垂直方向运动,后由于铲板向前运动,土壤颗粒由于惯性向后运动。土壤向上运动阶段,在摩擦力和提升高度做功的影响下,速度逐渐降低。而后,土壤翻越铲板最高的位置,跌落到下一级输送链条。

在土壤铲起阶段,随着土壤深度的减少,土壤速度逐渐降低,并且在土壤翻越铲板最高位置前,土壤速度最低;在中上层土壤(L3、L4、L5 区域),拨石轴

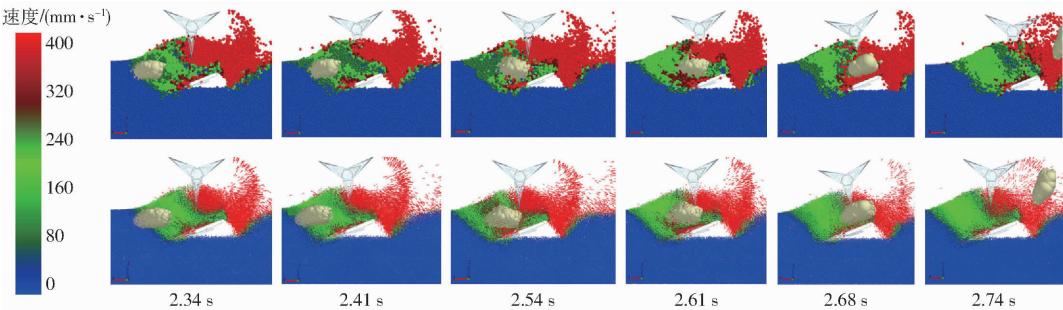


图 14 土壤颗粒的运动趋势和速度情况
Fig. 14 Movement trend and velocity of soil particles

击打土壤时,将会带动被击打区域周围的土壤以及中层土壤使其速度增加,拨石轴转速越高,被拨出的土壤速度越快。

5 田间试验

5.1 机具试验

试验位置为新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州博乐市五台工业园区厂房试验用地,试验场地土壤为砂砾质土壤。土壤含水率为 8% ~ 20%、土壤硬度为 39.13 kg/cm²、石块粒径为 2 ~ 40 cm。田间试验所需仪器为:TYD-2 型土壤硬度测量仪(0 ~ 100 kg/cm²)、QS-WT 型土壤温湿度仪(-50 ~ 65℃、0% ~ 100%)、ST-722 型激光转速表(6 ~ 99 999 r/min)、HY-607B 型电子地秤(0.1 ~ 300 kg)、电子秒表、10 m 皮尺、1 m 卷尺、取土环刀等。农田捡石机田间试验现场如图 15 所示。



图 15 机具田间试验现场图像

Fig. 15 Field test photos of machinery and equipment

5.2 试验指标与方法

试验参考 DG/T 229—2019《农田捡石机》进行。选定未经处理、含有石块的砂土地。在进行试验时,机具保持匀速行驶,调整好机具和拖拉机的不同水平的参数。调整好参数后,机具每前进 30 m 为一组,每个组前后各留出 10 m 作为稳定区域,测定 3 个行程,作业前记录待作业的 10 m 区域内的石块质量,测量测区内样机捡拾石块的总质量 G_s ,并收集测区作业深度内残留的、尺寸在样机捡拾能力范围内的石块,并测其总质量 G_c 。捡石率计算式为

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^3 Q_i}{3} \tag{14}$$

其中 $Q_i = \frac{G_{si}}{G_{si} + G_{ci}} \times 100\%$ (15)

式中 Q ——捡石率,%
 Q_i ——第 i 行程捡石率,%
 G_{si} ——第 i 行程测区内样机捡拾石块的总质量,kg

G_{ci} ——第 i 行程测区内规定的作业深度内残留样机捡拾石块尺寸范围内石块的总质量,kg

为测定样机的壅土高度,共进行 3 个行程试验。在每个行程中,当样机行驶至测量测区内时随时停机,选取铲板上壅土堆积的最高位置作为测量断面(如图 16 所示)。由于拨石轴的连续击打作用,铲板上壅土高度分布不均匀,因此需对该断面进行分段测量。在壅土最高位置处,自左向右依次记录每一段相对于地面的高度 H_{ij} 及其对应的水平宽度 B_{ij} ($j=1,2,\cdots,n$,其中 n 为分段总数)。样机的工作幅宽 $W=2$ m,各段的宽度占比为 B_{ij}/W 。则第 i 次行程的平均壅土高度 $\overline{H}_i$ 按照宽度加权计算,最终壅土高度 H 取 3 个行程的平均值的计算公式为

$$H = \frac{\sum_{i=1}^3 \overline{H}_i}{3} \tag{16}$$

其中 $\overline{H}_i = \sum_{j=1}^n H_{ij} \frac{B_{ij}}{W}$ (17)

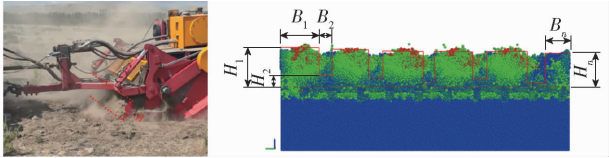


图 16 壅土测量位置示意图

Fig. 16 Diagram of soil embankment survey location

根据捡石机构分析结果,选取机具前进速度、拨石轴转速、拨石轴安装位置作为影响因素,在捡石机样机制作和改造时,安装位置难以测量,因此使用离地高度代替。试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Experiment factors and coding			
编码	前进速度/ (m·s ⁻¹)	拨石轴转速/ (r·min ⁻¹)	拨石轴离地高度/ mm
-1	0.6	200	320
0	0.8	300	370
1	1.0	400	420

5.3 试验结果与分析

根据 Box-Benhnken 响应面分析方法,以机具前进速度、拨石轴转速和拨石轴离地高度为影响因素,以捡石率和壅土高度为试验指标,进行三因素三水平正交试验,试验方案及结果如表 4 所示,表中 A、B、C 分别为前进速度、拨石轴转速、拨石轴离地高度的编码值。

5.4 回归模型建立与显著性检验

对试验数据进行多元回归拟合,建立捡石率和壅土高度的二次回归模型,进行方差分析,如表 5 所示。

表 4 试验方案及结果

Tab.4 Program and results of experiment

试验号	因素			试验结果	
	A	B	C	捡石率	壅土高度
				$Y_1/\%$	Y_2/mm
1	0	-1	1	92.32	296
2	0	-1	-1	89.54	281
3	0	1	-1	93.14	284
4	-1	0	1	91.63	259
5	-1	1	0	92.42	246
6	0	0	0	93.48	254
7	0	0	0	92.97	258
8	0	0	0	93.21	254
9	1	-1	0	91.32	269
10	1	0	1	92.73	260
11	0	0	0	93.35	255
12	0	1	1	93.77	259
13	1	1	0	92.93	254
14	1	0	-1	92.43	289
15	0	0	0	93.68	250
16	-1	0	-1	90.36	264
17	-1	-1	0	89.23	258

由表 5 可知,捡石率和壅土高度模型的 P 值均小于 0.001,因素 A 、 B 、 C 的 P 值小于 0.01,均极显著,失拟项的 P 值大于 0.05,拟合程度高,模型可解释 95% 以上的评价指标,表明该模型可用于机具的参数优化。通过对比两模型中 A 、 B 、 C 的 P 值可知,试验因素对捡石率的影响显著顺序由大到小依次为:拨石轴转速、机具前进速度、拨石轴离地高度;各试验因素对壅土高度的影响显著顺序由大到小依次为:拨石轴转速、拨石轴离地高度、前进速度。

通过对回归模型的分析,利用 Design-Expert 软件生成响应面图。由表 5 可知,捡石率(Y_1)模型中 AB 、 BC 交互作用的 P 值小于 0.05,表明这些交互作用对捡石率的影响均为显著,其他交互作用不显著;壅土高度(Y_2)模型中 AB 、 BC 交互作用的 P 值小于 0.05,表明 AB 、 AC 交互作用对壅土高度的影响为显著, BC 交互作用对壅土高度的影响为极显著。通过对试验结果进行回归分析,得到前进速度、拨石轴转速和拨石轴离地高度对捡石率(Y_1)和壅土高度(Y_2)的回归方程分别为

表 5 回归方程方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression equations

方差来源	捡石率 Y_1				壅土高度 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	30.59	9	31.28	<0.000 1	3 596.69	9	40.22	<0.000 1
A	4.16	1	38.3	0.000 5	231.12	1	23.26	0.001 9
B	12.13	1	111.6	<0.000 1	840.5	1	84.59	<0.000 1
C	3.1	1	28.53	0.001 1	253.12	1	25.48	0.001 5
AB	0.624 1	1	5.74	0.047 7	64	1	6.44	0.038 8
AC	0.235 2	1	2.16	0.184 7	90.25	1	9.08	0.019 6
BC	1.16	1	10.63	0.013 8	529	1	53.24	0.000 2
A^2	5.41	1	49.82	0.000 2	66.53	1	6.7	0.036 1
B^2	2.24	1	20.59	0.002 7	140.42	1	14.13	0.007 1
C^2	0.730 4	1	6.72	0.035 8	1 368	1	137.69	<0.000 1
残差	0.760 7	7			69.55	7		
失拟项	0.471 6	3	2.18	0.233 6	36.75	3	1.49	0.344 2
误差	0.289 1	4			32.8	4		
总和	31.35	16			3 666.24	16		

$$Y_1 = 93.34 + 0.721\,2A + 1.23B + 0.622\,5C - 0.395AB - 0.537\,5BC - 1.13A^2 - 0.729\,0B^2 - 0.416\,5C^2 \quad (18)$$

$$Y_2 = 254.2 + 5.37A - 10.25B - 5.63C - 4AB - 4.75AC - 11.5BC - 3.97A^2 + 5.78B^2 + 18.02C^2 \quad (19)$$

图 17a 是离地高度取中心水平(370 mm)时,前进速度和拨石轴转速的交互作用对捡石率的响应面图。捡石率随着拨石轴转速升高而先上升后放缓,因为随着拨石轴转速升高将壅土部分的石块向上拨

出;前进速度升高捡石率先上升后下降,随着前进速度升高铲板下层的土壤和石块被惯性带动下进入输送链,随着前进速度增大,过高的前进速度导致混合物被快速抛送至拨石轴区域,未能形成稳定、均匀的料层,导致石块在铲板上形成稳定滚动,捡石率下降。

图 17b 是前进速度取中心水平(0.8 m/s)时,离地高度与拨石轴转速的交互作用对捡石率的响应面图。捡石率随着拨石轴离地高度的增加而先上升后放缓,随着拨石轴离地高度的增加为石块和土壤提

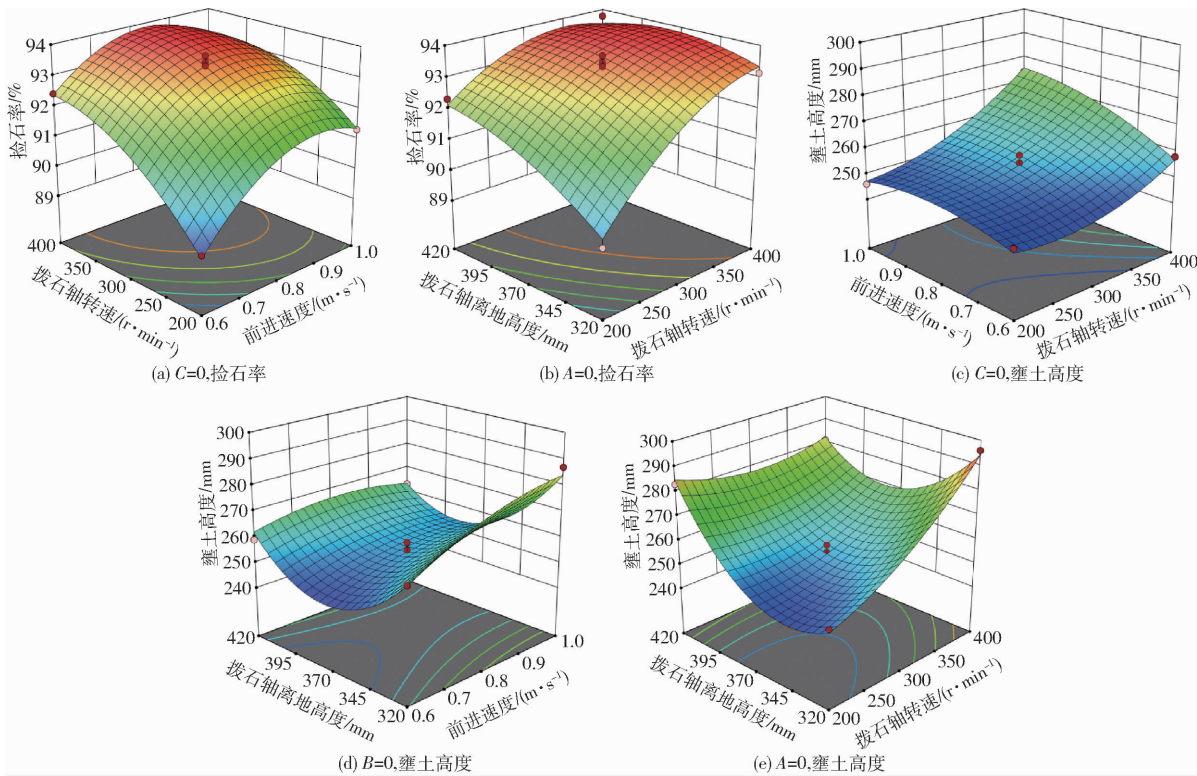


图 17 交互因素对试验指标影响的响应面

Fig. 17 Influence of interactive factors on test indexes

供更长的加速路径,使其获得更大的动能,减少因速度不足导致的回落;拨石轴转速增加捡石率先增加后降低,因为转速增加能有效破坏土壤对石块的粘附作用,增加的动能使得拨出的石块被更快地抛送至输送链,减少石块在拨石轴区域因滞留或滚动而导致的回落,从而提升了捡石率,当拨石轴转速过快导致土壤和石块被反向抛出。

图 17c 是拨石轴离地高度取中心水平(370 mm)时,前进速度和拨石轴转速的交互作用对壅土高度的响应面图。壅土高度随着前进速度的增加而先增加后放缓,因为前进速度的升高直接增大了单位时间内铲板推送至拨石轴前方的土壤体积,壅土高度增长趋势放缓因为高前进速度土壤在铲板上的堆积形态会发生变化,产生滑移。壅土高度随着拨石轴转速的增加而增加,因为高速旋转的拨齿将土壤以更高的速度和更大的散射角向后上方抛射,最终回落在铲板上显著增加壅土高度。

图 17d 是拨石轴转速取中心水平(300 r/min)时,离地高度和前进速度对壅土高度的响应面图。壅土高度随着离地高度的增加而先下降后上升,因为拨石轴对壅土位置击打,短时间内通过的土壤增加,表现为壅土高度下降;当拨石轴离地高度超过优值时,拨石轴接触不到壅土位置需要击打的土壤以及石块,土壤无法被及时有效地向后抛送,导致土壤壅土高度增加。壅土高度随着前进速度的增加而缓慢

递增,是因为速度越高物料通入量增加,增长缓慢因为土壤高度过高会导致土壤滑塌呈现增长缓慢趋势。

图 17e 是前进速度取中心水平(0.8 m/s)时,拨石轴离地高度和拨石轴转速对壅土高度的响应面。壅土高度随着离地高度的增加而先降低后增加,壅土高度随着拨石轴转速的增加而增加,其原因与图 16c、16d 一致。

以捡石率最大值和壅土高度最小值为优化目标,以前进速度、拨石轴转速、拨石轴离地高度为优化对象,使用 Design-Expert 软件对建立的线性回归模型进行优化,优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max X_1(A,B,C) \\ \min X_2(A,B,C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

运用 Design-Expert 软件求解得到最优参数组合:前进速度 0.844 m/s、拨石轴转速 338.9 r/min、拨石轴离地高度 394.26 mm,此时模型预测壅土高度 250.57 mm、捡石率 93.85%。

5.5 参数优化与试验验证

为了验证优化结果的准确性,采用与上述参数接近的数值,于新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州博乐市苏门托哈村,收获完成后的地块进行 3 次重复验证试验,结果取均值。考虑田间试验的可

行性,将工作参数调整为前进速度 0.85 m/s,拨石轴离地高度 394 mm,拨石轴转速 340 r/min,试验结果见表 6。

表 6 优化值、预测值和模拟值比较
Tab.6 Comparison of optimized values and predicted values

项目	捡石率/%	壅土高度/mm
试验平均值	91.14	263.00
模型预测值	93.85	250.57
仿真模拟值		253.78
试验基准相对误差/%	2.97	4.73/3.51

由表 6 的试验验证结果可知,捡石率试验平均值与模型预测值误差为 2.97%,相对误差小于 5%;壅土高度试验验证值与理论优化值误差为 4.73%、仿真模拟值与试验验证值相对误差为 3.51%,相对误差小于 5%,模型合理、参数优化结果可靠。即捡石机作业时,采用前进速度 0.85 m/s,离地高度 394 mm,拨石轴转速 340 r/min 的参数组合,此时捡石率为 91.14%,壅土高度为 263.00 mm,试验值与模型预测值相对误差均小于 5%^[29-30],满足捡石机作业要求。验证试验效果如图 18 所示。

6 结论

(1)针对现有捡石机存在捡石率低、壅土等问

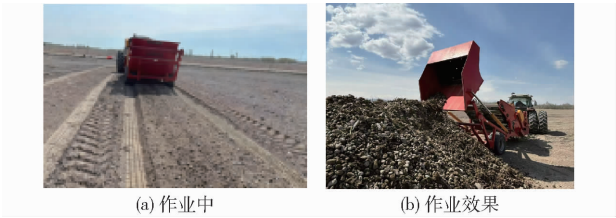


图 18 验证试验效果
Fig.18 Verification test effect diagrams

题,设计了一种链铲式农田捡石机。对拨石轴拨土和拨石过程运动学分析,确定了主要零部件的结构参数。

(2)通过正交试验分析前进速度、拨石轴转速、拨石轴离地高度对作业效果的影响,得出各试验因素对捡石率的影响显著顺序由大到小依次为:拨石轴转速、前进速度、拨石轴离地高度;各试验因素对壅土高度的影响显著顺序由大到小依次为:拨石轴转速、拨石轴离地高度、前进速度。

(3)通过 Design-Expert 软件优化得出的最优参数组合为:前进速度 0.844 m/s、拨石轴转速 338.9 r/min、拨石轴离地高度 394.26 mm,此时模型预测捡石率 93.85%。验证试验表明:在前进速度 0.85 m/s,拨石轴离地高度 394 mm,拨石轴转速 340 r/min 时,捡石率为 91.14%,壅土高度为 263.00 mm,试验值与模型预测值的相对误差均小于 5%,满足捡石机作业要求。

参 考 文 献

[1] 于玉真,郑玉才,高连兴,等. 农田捡石机捡石机理研究[J]. 农机化研究,2007(3):210-211.
YU Yuzhen, ZHENG Yucai, GAO Lianxing, et al. Study of rock picker in farmland and the mechanism of rock picking[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(3): 210-211. (in Chinese)

[2] 孙春蕾,杨红,韩栋,等. 全国高标准农田建设情况与发展策略[J]. 中国农业科技导报,2022,24(7):15-22.
SUN Chunlei, YANG Hong, HAN Dong, et al. Situation and countermeasures of well-facilitated farmland in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(7): 15-22. (in Chinese)

[3] 湛小梅,李亚丽,曹中华,等. 1JS-100 土壤捡石机的设计[J]. 农机化研究,2023,45(8):69-73.
ZHAN Xiaomei, LI Yali, CAO Zhonghua, et al. Design of 1JS-100 soil stone picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8): 69-73. (in Chinese)

[4] ARIAS N, ORCARAY L, BESCANS P, et al. Implications of rock fragments for soil quality evaluation: assessing changes in a gravelly irrigated soil following no till adoption[J]. Communications in Soil Science and Plant, Analysis, 2017, 48(22): 2663-2677.

[5] 马方,陈中玉. 关于土壤捡石机推广的必要性探讨[J]. 湖南农机,2010,37(11):121-122,131.
MA Fang, CHEN Zhongyu. Picking up on the to promote the necessity of machine soil[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2010, 37(11): 121-122, 131. (in Chinese)

[6] 朱亮亮,赵东,严家家,等. 我国耕地质量现状及提升建议[J]. 山西农经,2021(11):159-160.
ZHU Liangliang, ZHAO Dong, YAN Jiajia, et al. Current status of cultivated land quality in China and suggestions for improvement[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2021(11): 159-160. (in Chinese)

[7] 于玉真,高连兴,马秀丽,等. 土壤捡石机的研究进展[J]. 农业工程学报,2007,23(11):274-279.
YU Yuzhen, GAO Lianxing, MA Xiuli, et al. Research progress of soil stone picker[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 274-279. (in Chinese)

[8] 马方,陈中玉. 多种土壤捡石机工作原理分析[J]. 湖南农机,2010,37(9):137-138,146.
MA Fang, CHEN Zhongyu. Analysis of working principles of various stone pickers[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2010, 37(9): 137-138, 146. (in Chinese)

[9] 李生泉,刘小刚,李栋梁. 基于动力学分析的农田捡石机应力动态建模与仿真[J]. 南方农机,2024,55(11):24–27.

[10] 于玉真,高连兴,李心平,等. 链齿式农田土壤捡石机栅条齿动力学分析[J]. 农机化研究,2007,145(5):49–51.
YU Yuzhen, GAO Lianxing, LI Xinping, et al. Kinematics analysis on chain tooth rock picker in the farmland soil[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,145(5):49–51. (in Chinese)

[11] 马方,高连兴,于玉真. 轮齿式浅耙型农田捡石机分捡装置研究[J]. 农机化研究,2007,145(5):115–117.
MA Fang, GAO Lianxing, YU Yuzhen. Research on selecting picking equipment of surface harrow type rack rail rock picker's mechanism and parts[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,145(5):115–117. (in Chinese)

[12] 马方,陈中玉. 国外土壤捡石机工作原理及特点分析[J]. 农业技术与装备,2010(12):9–10.
MA Fang, CHEN Zhongyu. Analysis of working principles and characteristics of foreign soil stone pickers[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2010(12):9–10. (in Chinese)

[13] 林涛,孙付春,陈硕,等. 面向丘陵作业环境的小型拾石机设计与优化[J]. 农业装备与车辆工程,2025,63(9):30–37.
LIN Tao, SUN Fuchun, CHEN Shuo, et al. Design and optimization of a small stone picker for hilly operating environments [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2025, 63(9):30–37. (in Chinese)

[14] 牛丛,邢钰婷,闫成功,等. 铲筛式农田石块捡拾收集机仿真与试验[J]. 中国农业大学学报,2022,27(12):221–233.
NIU Cong, XING Yuting, YAN Chenggong, et al. Simulation and test of shovel-screen type farmland stone pick-up and collection machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(12):221–233. (in Chinese)

[15] 卜明杰,刘洋礼,许渊,等. 复垦农田链式捡石机的设计与试验[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(10):31–35,41.
BU Mingjie, LIU Yangli, XU Yuan, et al. Design and test of chain stone picker for reclaiming farmland[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2022,60(10):31–35,41. (in Chinese)

[16] 秦宽,郎旭涛,沈周高,等. 茶园仿生往复开沟松土机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):29–39.
QIN Kuan, LANG Xutao, SHEN Zhougao, et al. Design and experiment of reciprocating furrowing and loosening machine for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(3):29–39. (in Chinese)

[17] 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 experiment of combined shovel-screen ginger harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):309–318. (in Chinese)

[18] 郝建军,张影,李兆玮,等. 滚筒式花生落果捡拾机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(5):343–352.
HAO Jianjun, ZHANG Ying, LI ZhaoWei, et al. Design and experiment of drum type fallen peanut picking up machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):343–352. (in Chinese)

[19] 张佳,杜亚坤,马小雯,等. 基于阿基米德曲线的螺旋拨齿式捡石机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):290–300.
ZHANG Jia, DU Yakun, MA Xiaowen, et al. Design and experiment of spiral toothed stone picking machine based on Archimedes curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):290–300. (in Chinese)

[20] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):41–51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):41–51,217. (in Chinese)

[21] 李骅,孟煜柏,齐新丹,等. 基于 Bonding V2 模型的蒜种离散元建模与参数标定[J]. 农业机械学报,2025,56(7):150–157,169.
LI Hua, MENG Yubai, QI Xindan, et al. Discrete element modelling method and parameter calibration of garlic species based on Bonding V2 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):150–157,169. (in Chinese)

[22] 杨玉婉,任旭光,杨明企,等. 基于离散元法的百合鳞茎弹性多趾揉搓辊组设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):48–59.
YANG Yuwan, REN Xuguang, YANG Mingqi, et al. Design and experiment of elastic multi-toed rubbing roller group for lily bulbs based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):48–59. (in Chinese)

[23] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):109–122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):109–122. (in Chinese)

[24] 刘虎,张泽豪,何琴英,等. 收获期艾草茎秆离散元仿真参数标定研究[J]. 中国农机化学报,2025,46(9):13–22.
LIU Hu, ZHANG Zehao, HE Qinying, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for harvest-period Artemisia argyi stems[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(9):13–22. (in Chinese)

[25] JIA X, ZHENG X, CHEN L, et al. Discrete element flexible modeling and experimental verification of rice blanket seedling root blanket[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 233:110155.

72.

ZHAO Jinwen, YU Jianqun, SUN Kai, et al. Modeling and verifying wheat roots using AgriDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(3): 63–72. (in Chinese)

[27] HAN Y, LING L, YAN B, et al. Calibration of DEM model for root–soil breakage in winter wheat during the regreening stage[J]. Agriculture, 2025, 15(23): 2427.

[28] 刘彩玲, 魏丹, 宋建农, 等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 82–89.

LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 82–89. (in Chinese)

[29] 郇晓龙, 冯猛超, 武传宇, 等. 基于 EDEM 的茶园土壤-有机肥混料离散元模型构建与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 267–278.

HUAN Xiaolong, FENG Mengchao, WU Chuanyu, et al. Construction and experiment of discrete element model for tea garden soil-organic fertilizer mixture based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 267–278. (in Chinese)

[30] 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)

[31] ZHAO J, YU J, SUN K, et al. A discrete element method model and experimental verification for wheat root systems[J]. Biosystems Engineering, 2024, 244: 146–165.

[32] 吕钊钦, 李汝莘, 董庆裕, 等. 小型小麦断根机的设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 162–164, 161.

LÜ Zhaoqin, LI Ruxin, DONG Qingyu, et al. Design of a small-scale wheat root-cutting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 162–164, 161. (in Chinese)

(上接第 133 页)

[26] SUN X, ZONG W, WEI X. DEM–MBD coupling-based analysis and experiment on loss reduction mechanisms of rapeseed pickup header in hilly and mountainous areas[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 238: 110817.

[27] 张绪, 李骅, 齐新丹, 等. 基于 EDEM 的大蒜挖掘铲减阻特性仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(12): 18–24.

ZHANG Xu, LI Hua, QI Xindan, et al. Simulation analysis of drag reduction characteristics of garlic digging shovel based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(12): 18–24. (in Chinese)

[28] 申世龙, 张佳喜, 王毅超, 等. 旋抛式耕层残膜回收机起挖装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 461–472.

SHEN Shilong, ZHANG Jiaxi, WANG Yichao, et al. Design and experimental of lifting device of rotary throw type topsoil residual film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 461–472. (in Chinese)

[29] 丁力, 袁业超, 李源源, 等. 大豆行间驱拨组合式除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 344–354.

DING Li, YUAN Yechao, LI Yuanyuan, et al. Design and testing of combined soybean inter-row roundup weeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 344–354. (in Chinese)

[30] 陈建能, 陈倩雯, 刘林敏, 等. 旋转式两工位名优茶采摘收集一体末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 136–144.

CHEN Jianneng, CHEN Qianwen, LIU Linmin, et al. Design and experiment of rotating two workstations integrated effector for famous tea picking and collection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 136–144. (in Chinese)