doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.05.019

液压驱动链式农田捡石机设计与试验

张佳喜[1,2]　郑亚鹏[1,2]　张　虎[3]　张　佳[1,2]　高继怀[4]　李江涛[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: 针对西北地区砂质土条件下农田捡石机土石分离效果较差、含土率高、漏石率高、机具适应性差等问题,设计一种液压驱动的链式农田捡石机械,可完成对耕层中石块的捡拾、输送、收集工作。通过对入土装置和输送分离装置等关键部件进行优化设计和理论分析,确定相关结构参数,重点开展石块在输送装置的运动分析,构建石块输送在不同阶段的运动模型,利用土石混合物在回流过程中发生的碰撞,增大石块表面附着土壤和土块的破碎程度,提高分离效率。通过 DEM - MBD 联合仿真,建立土石输送的仿真模型,以作业速度、输送链主轴转速和输送链分离行程作为试验因素,以漏石率和含土率为试验指标,进行单因素仿真试验,确定各因素的较优区间范围,并以该区间作为因素范围进一步开展二次正交仿真试验,得出最优工作参数组合,结果表明,当机具作业速度为 0.7 m/s,输送链主轴转速为 110 r/min,输送链分离行程为 2 700 mm 时性能最优,漏石率为 8.22%,含土率为 2.58%。在最优参数组合下,进行田间验证试验,得到漏石率为 8.03%,含土率为 2.62%,满足国家标准和行业要求。

关键词: 捡石机; 液压驱动; 输送分离; DEM - MBD 仿真; 正交试验

中图分类号: S225.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)05-0206-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Hydraulically Driven Chain-type Farm Stone Picker Machine

ZHANG Jiaxi[1,2]　ZHENG Yapeng[1,2]　ZHANG Hu[3]　ZHANG Jia[1,2]　GAO Jihuai[4]　LI Jiangtao[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 at the sandy soil conditions in the northwest region of the farmland stone picker soil and stone separation effect is not good, the soil content rate is high, the leakage rate is high, the machine adaptability is poor and so on, a hydraulically-driven chain-type farmland stone picker was designed, which can complete the picking up, conveying and collecting of stones in the tillage layer at one time. On the basis of the overall structure and working principle of this type of chain-type farmland stone picker, the design and theoretical analysis of the key components of the soil-entry device and conveying and separating device were optimized, the relevant structural parameters were determined, focusing on the motion analysis of the stone in the conveying device, the stone conveying in different stages of the motion model was built, using the collision of the soil and stone mixtures occurring in the reflux process to increase the stone surface attached to the soil and soil fragmentation, and increase the stone surface and soil fragmentation, and increase the soil surface and soil fragmentation, the degree of fragmentation of soil blocks to improve the separation efficiency. Through DEM - MBD joint simulation, the simulation model of soil and stone conveying was established, the test factor variables were controlled, and the leakage rate and soil content rate were used as the test indexes to carry out single-factor simulation experiments to determine the range of better intervals of each factor, and the optimal combination of working parameters was derived by further carrying out quadratic orthogonal simulation experiments with the intervals as the

收稿日期: 2024-11-24　修回日期: 2025-01-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02007-2-2)和新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A245)

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

level of the factors, and the results showed that, when the operating speed of the machine tool was 0.7 m/s, the rotational speed of the conveyor chain spindle was 110 r/min, and the separation stroke was 2 700 mm, at this time, the stone leakage rate was 8.22%, and the soil content rate was 2.58%. Under the optimal parameter combination, the field verification test was carried out, repeated three times, and the average value of stone leakage rate was 8.03%, and the average value of soil content rate was 2.62%, the performance met the national standards and industry requirements.

Key words: stone picker machine; hydraulic drive; conveyor separation; DEM – MBD simulation; orthogonal test

0　引言

西北地区土地资源丰富，耕地开发潜力巨大，但西北地区多以沙地、旱地为主，地块土质较硬且多砾石，如在新疆南部的棕漠土和北部的粟钙土中，粗砾的占比分别高达 33% 和 42%[1-3]。大量砾石不仅加剧土壤中水分、养分流失，还阻碍田间的机械化管理和作物的播种、出苗和生长[4]。因此，开发耕地的首要任务是完成对农田的去砾工作。西北地区人力资源不断流失，劳动力成本与日俱增，去砾工作强度大，人工难以完成，捡石机械的设计研制和推广应用成为当务之急。

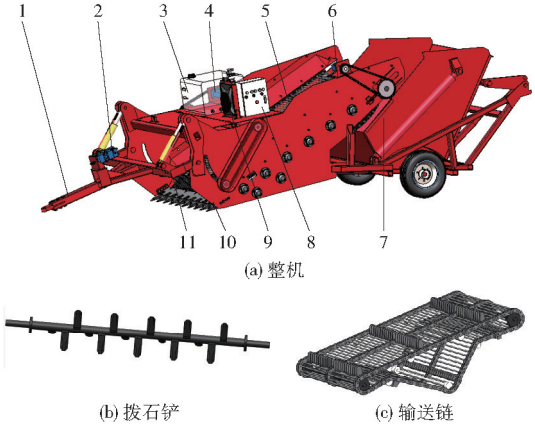
目前国内外对田间去砾装备已展开了诸多研究，研发的机型主要包括齿耙式、链式、滚筒式、螺旋输送式等[5-6]。康斯开尔公司研制的 SB5200 型捡石机[7]，齿耙的设计可使工作幅宽达到 5.2 m，但最大入土深度只有 7 cm，无法拾净耕层中的砾石；西班牙特格纳公司研制的特格纳捡石机可通过简单加装或拆除细筛杆来快速实现筛分尺寸调节，在土质松软地块最大捡石深度可达到 40 cm，但在土质坚硬地区，特格纳入土和捡石效果难以达到预期，同时其对牵引拖拉机功率要求高，购买成本高；链式相较于滚筒式和螺旋输送式，土石混合物的输送分离更快，效率更高，更适合大面积耕地开发的捡石工作。目前国内的捡石机，如牛丛等[8]设计的一种铲筛式农田捡石机，卜明杰等[9]设计的一款链式农田捡石机，机具体型小，作业灵活，适合在小块面积和土质疏松的农田工作，但入土铲在土质坚硬地块工作时容易磨损，工作寿命低，土石混合物在分离筛上不易发生碰撞回流，土石分离效果欠佳，同时传统机械传动的捡石机工作时常产生较大的振动和撞击，适应性差，在高强度的工作负荷下传动部件易受到损伤，并不适合大面积清石还田工作[10-12]。

针对上述问题，本文设计一种通过液压装置调控转速的链式捡石机。对挖掘装置和土石分离装置进行参数设计与理论分析，建立土石分离阶段石块运动方程，并建立砾石和土壤离散元模型，采用 DEM – MBD 耦合的方法，对漏土和漏石的过程进行仿真分析，并开展仿真试验，利用 Design-Expert 软件，得到最优参数组合，并进行田间试验验证[13-15]，以期为西北地区农田砾石机械化捡拾装备的研制提供理论支撑和参考。

1　整机机构与工作原理

1.1　整机结构

链式农田捡石机主要由牵引架、入土起石装置、液压传动装置、土石输送分离装置、集石料斗组成。其中液压传动装置主要包括液压油泵、油箱、拨石齿轴液压马达、输送链主轴液压马达、电磁控制箱、散热器；入土起石装置主要包括入土铲和拨石铲。结构如图 1 所示。



(a) 整机

(b) 拨石铲　　(c) 输送链

图 1　链式农田捡石机整机及部件结构图

Fig. 1　Chain type farmland stone picker whole machine and component structure diagrams

1. 牵引架　2. 液压油泵　3. 液压油箱　4. 拨石齿轴液压马达　5. 输送分离筛　6. 输送链主轴液压马达　7. 集石料斗　8. 电磁控制箱　9. 散热器　10. 入土齿　11. 拨石铲

1.2　工作原理及主要参数

捡石机动力通过拖拉机后输出轴传递给液压油泵，油泵前后两个工作容腔一侧与油箱相连，另一侧通过阀块与两个液压马达相连，以液压油为介质，通过油泵带动两个液压马达工作，以实现拨石齿和输送分离筛的转动。田间作业时，捡石机由拖拉机牵引驱动，入土齿入土，搅动土层的同时铲起土壤一定深度内的石块，旋转的拨石齿不断将石块拨入输送分离筛，分离筛各杆条之间均匀分布，保持有一定的

间隙,在输送过程中,一些细砾和较小的土块从链杆间隙中分离还田,实现石块和土壤以及其他一些杂物分离,完成输送分离的石块收集进料斗当中,捡石工作进行一段时间后,通过液压油缸将料斗支起倒转完成卸石,所卸的石块堆放在一处,最后由卡车统一装运处理。捡石机主要技术参数见表 1。

表 1 捡石机主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of stone picker machine

参数	数值/型式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	6 200×2 400×1 950
工作幅宽/mm	2 000
驱动方式	液压驱动
作业形式	间歇式
挂接形式	三点悬挂
含土率/%	≤5
漏石率/%	≤12

1.3 传动结构

液压系统的阀块中设有油量调节阀,机具作业时,拖拉机驾驶员可以通过控制进入液压马达中的液压油量实现对输送链和拨石轴的无级变速,而传统的齿轮传动只能通过更换齿轮改变传动比进行变速,操作流程繁琐;传统齿轮传动振动大,稳定性差,而液压传动稳定性好,适应能力强,同时在捡石作业时,输送链与侧板间隙之间有时会发生卡石,通过转动电磁控制箱上旋钮,使输送链反转,可有效解决卡石问题。液压传动原理图如图 2 所示。

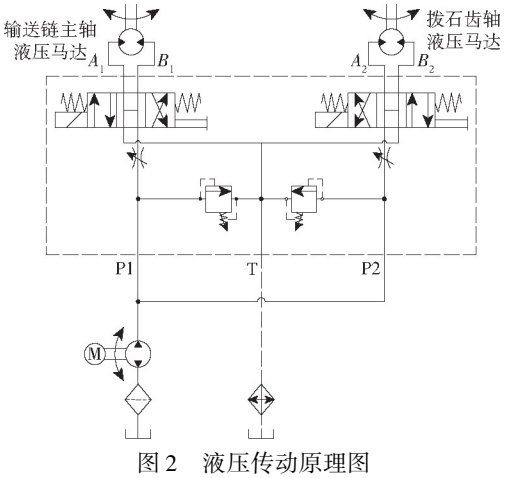


图 2 液压传动原理图

Fig. 2 Hydraulic drives schematic

2 关键部件设计

2.1 挖掘装置

2.1.1 结构设计

挖掘装置主要由挖掘铲、弹簧销轴、三角板、铲板组成,考虑到西北地区土壤含水率低,土壤质地较硬,挖掘铲入土过程中阻力大,一般的尖齿型入土铲虽然入土性能好但在工作中容易发生磨损,因此在对铲体前端设计时,以一定倾角的平面入土,平均分担入土阻力,同时两侧相倾,保证一定的铲刃倾角,兼顾入土性能和部件的使用寿命。另外,铲体和铲板之间通过弹簧销轴固定连接,一旦挖掘铲发生损坏,可通过拆卸弹簧销轴及时更换铲体。结构简图如图 3 所示。

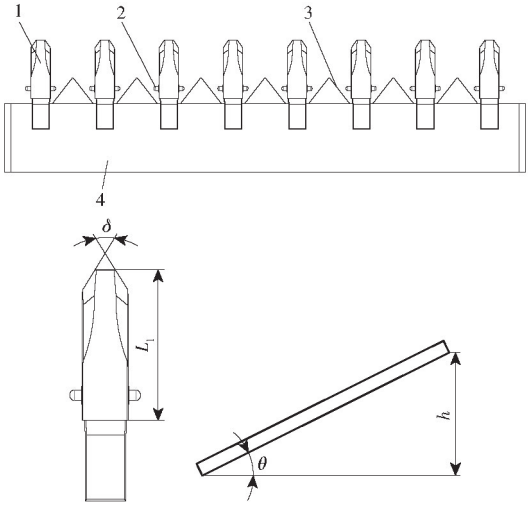


图 3 挖掘装置结构简图

Fig. 3 Structural sketch of excavator mechanism

1. 挖掘铲 2. 弹簧销轴 3. 三角板 4. 铲板

2.1.2 挖掘装置参数确定

铲刃倾角 δ 需满足[16-17]

$$\delta < 90° - \varphi \tag{1}$$

式中 φ——土壤对钢的摩擦角,取 30°~34°

铲刃倾角与入土性能直接相关,倾角越小入土性能越好,但部件耐磨性随之下降,考虑到砂质土土质较硬,机具工作过程中对铲体的磨损程度较其他类型土壤更大,同时为兼顾较优的入土性能,取 δ = 45.8°。

铲体长度 L_1 由铲面倾角 θ 和挖掘深度 h 决定,计算公式为

$$L_1 = \frac{h}{\sin\theta} \tag{2}$$

新疆地区种植的农作物以哈密瓜和棉花为主,对于种植哈密瓜等浅根系植物的农田捡石深度一般在 20 cm 左右,而对于种植棉花等深根系植物的农田捡石深度在 40 cm 左右,而农田含石情况复杂,石块在 0~40 cm 耕层内均有分布,入土部件入土时受限,难以一次完成该深度的捡石工作,若入土深度过大不仅使捡石效率降低,还会影响部件寿命,因此挖掘深度 h 取 150~200 mm,铲面倾角 θ 取 25°。

2.2 土石输送分离装置

2.2.1 结构设计

输送分离装置主要作用是对掘起的土石混合物

进行筛分和输送。该装置主要由导向胶轮、挡块、托链轮、驱动链轮和张紧轮组成，结构简图如图 4 所示。

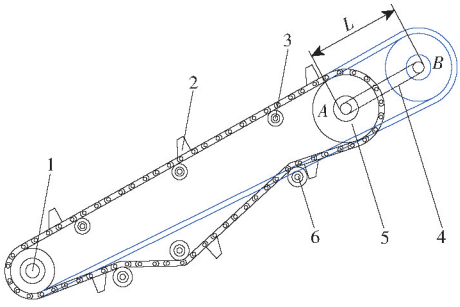


图 4　链式输送分离装置结构简图

Fig. 4　Chain conveying and separating device structure sketch

1. 导向胶轮　2. 挡块　3. 托链轮　4. 侧板导轨　5. 驱动链轮　6. 张紧轮

输送分离筛的运行速度和分离行程是影响输送分离装置分离效率的重要因素[18-20]。输送分离筛主轴由液压马达驱动，其转速可以通过调节输入液压马达内的液压油量进行控制。分离行程越长，土石分离效果越好，但土石在输送分离筛上的输送时间增加，输送效率降低且输送过程中漏石率增大，从而影响整机的作业和捡石效率。因此在保证装置输送效率的同时，兼顾理想的分离效果，设计输送分离筛时，通过在捡石机侧板上开设长度 L，倾角与输送方向一致的导轨，使输送链主轴可以沿着导轨上下滑动，实现分离行程伸缩调节。A、B 两点分别位于导轨始端与终端，图 4 中分别表示出了驱动链轮位于导轨点 A、B 时输送链的整体结构。这样设计的好处在于装置可以依据所输送土壤的类型和湿度，灵活调节分离行程，兼顾输送和分离效率，提高捡石机在不同作业环境下的适应性，如在含水率较低的砂土中进行捡石作业时，土石在较短的分离行程上就能得到有效分离，因此可缩短分离行程提高输送效率；若在含水率较高的黏土中作业时，土石之间粘附性强，不易分离，依据实际情况合理增加分离行程，保证分离效率的同时兼顾输送效率。

2.2.2　输送分离装置参数确定

挖掘铲铲起的土石混合物由拨石铲拨入分离筛，其中一些较小的土块和细砾在输送过程中通过杆条之间的间隙落下还田，而尺寸比杆条间隙更大的土块以及粘附在石块表面的泥土若未受到一定强度的“破坏”就无法及时分离。当输送分离筛的倾斜角度小于土石与杆条之间的摩擦角时，土石将较为稳定地随着分离筛输送进入料斗，土石回流和翻滚的情况不易发生，因此，附着在石块表面的土壤和土块与杆条之间的碰撞次数减少，土块内的应力变化不大，难以分解，影响装置分离效率。在确定输送分离筛面倾角时，使其略大于“土石-杆条”的摩擦角，促使土石回流[21-24]。回流时，土石持续翻滚，翻滚中土石与杆面撞击产生一定高度的弹跳，而后回落，如此反复，直至土块与挡块发生碰撞，而后在杆条和挡块的支撑下稳定向上输送。

土石混合物从开始进入分离筛到输送进入料斗可以分为 4 个阶段，每个阶段的受力分析如图 5 所示。

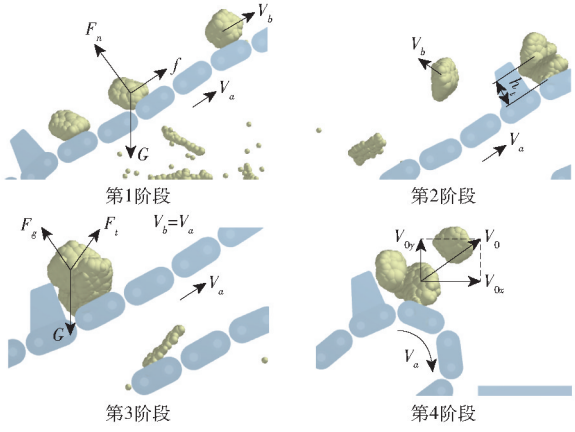


图 5　每个阶段的受力分析

Fig. 5　Force analysis of every stage

2.2.2.1　第 1 阶段

土石混合物进入输送链，随着输送链一同向后输送。开始时，石块的输送速度比输送链线速度小，石块相对于输送链向后运动，因此两根相邻杆条对石块的摩擦力之和沿筛面向上，石块沿筛面做向上的加速运动。石块在筛面上的受力分析如图 6 所示。

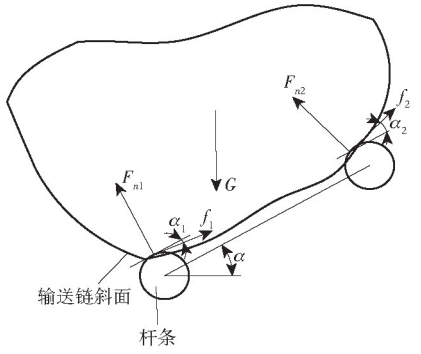


图 6　石块在筛面上的受力分析

Fig. 6　Force analysis of stone on sieve surface

分离筛筛面由杆条组成，石块在向后输送的过程中，可以认为是支撑在两条相邻的杆条之间，因此，石块在筛面上受到的支持力 F_n 和摩擦力 f 可以分解为前后两根杆条对石块的支持力 F_{n1} 和 F_{n2} 以及摩擦力 f_1 和 f_2。对石块与杆条之间的受力情况进行分析，得

$$\begin{cases} F_u = f_1\cos\alpha_1 + F_{n1}\sin\alpha_1 + f_2\cos\alpha_2 \\ F_d = G\cos\alpha + F_{n2}\sin\alpha_2 \end{cases} \tag{3}$$

$$ma = F_u - F_d \tag{4}$$

式中 F_u——石块受到的沿筛面向上的分力,N

F_d——石块受到的沿筛面向下的分力,N

G——石块重力,N

α——分离筛筛面倾角,(°)

α_1、α_2——摩擦力 f_1、f_2 与分离筛斜面的夹角,(°)

m——石块质量,kg

a——输送时石块沿斜面方向上的加速度,m/s²

当 $a>0$ 时,石块沿筛面向上做加速运动;$a=0$ 时,石块做匀速运动,随分离筛平稳向上输送;$a<0$ 时,受重力影响,石块重心发生偏移,前杆条对石块的支持力 F_{n1} 减小,前杆条的支撑作用下降,石块在分离筛面上向下滑动并发生顺时针的滚动。

输送链相邻杆条间隙过大,在输送过程中容易造成漏石,间隙过小,又会影响土壤还田,含土率增大,同时,整体尺寸小于 25 mm 的石块对农田管理影响较小,不在捡石范围内,因此为兼顾两者确定相邻杆条间隙为 25 mm,杆条的直径为 15 mm。

2.2.2.2 第 2 阶段

石块回流,沿筛面向下滑动和滚动。翻滚时,石块与筛面之间存在一定高度差,石块回落至筛面,与筛面碰撞后发生“弹跳”,直到被挡块阻挡,停止滚动。翻滚前,石块具有一定的动能,滚动过程中,石块弹起,动能转变为重力势能,回落至筛面,重力势能转变为动能。石块和杆条碰撞时,忽略发生的形变,因此可以认为两者之间的碰撞属于弹性碰撞,碰撞时,不会造成机械能的损失。假设石块滑动和滚动的距离为相邻两挡块之间的间距,在滑动和滚动过程中,满足能量守恒定律,有

$$E_k = mgl_d\sin\alpha + E_f \tag{5}$$

$$E_m = mgl_d\sin\alpha + E_f + E_c \tag{6}$$

式中 E_k——石块与挡块碰撞前外力对石块做的功,J

E_m——石块与挡块碰撞前的动能,J

E_c——石块翻滚前的动能,J

E_f——石块滚动和滑动时摩擦力所做的功,J

l_d——相邻挡块之间的间距,mm

石块与挡块碰撞,停止滚动,在碰撞瞬间,石块弹起一定的高度,由于碰撞不会引起机械能的损失,因此可以认为石块与挡块碰撞前的动能在碰撞后完全转变为重力势能,即

$$E_m = mgh_t \tag{7}$$

式中 h_t——石块与挡块碰撞后弹跳的高度,mm

g——重力加速度,m/s²

为防止石块弹起时越过挡块,进入下一个区域,从而影响输送效率,因此挡块在竖直方向上的高度需大于石块跃起的高度,即

$$h_l\cos\alpha > h_t \tag{8}$$

式中 h_l——挡块高度,mm

联立式(6)~(8),可得

$$h_l > \frac{mgl_d\sin\alpha + E_f + E_c}{mg\cos\alpha} \tag{9}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2E_m}{m}} \tag{10}$$

式中 v_s——石块与挡块碰撞前的速度,m/s

假设石块与挡块碰撞后,石块的瞬时速度变为 0,碰撞过程满足动量定理

$$I = m(0 - v_s) = -mv_s \tag{11}$$

结合式(9)、(10)得

$$I = -\sqrt{2m(mgl_d\sin\alpha + E_f + E_c)} \tag{12}$$

式中 I——石块的碰撞冲量,N·s

碰撞冲量越大,土块和粘附在石块表面的土壤越容易破碎,土石的分离效果就越好。由式(12)可知,冲量 I 主要与挡块间距 l_d、分离筛筛面倾角 α 有关,间距和倾角越大,冲量就越大。但两者过大时,会导致石块与挡块发生碰撞时石块越过挡块,没有挡块阻挡,石块将沿筛面持续回流。为确保石块可以稳定沿分离筛向上输送,且有良好的分离效果,确定相邻挡块间距 $l_d=700$ mm,挡块高度 $h_l=100$ mm。土壤与钢之间的摩擦角一般为 30°~34°,石块与钢之间的摩擦角一般为 32°~35°,筛面倾角大于土石与钢之间的摩擦角是土石可以在筛面上回流的必要条件,因此确定分离筛的倾角 $\alpha=35°$。

2.2.2.3 第 3 阶段

石块与挡块碰撞,停止滚动,并在挡块和杆条的支持力 F_t 和 F_g 共同作用下,石块受力平衡,石块的速度与输送链速度相同,稳定向后输送,有

$$\boldsymbol{F}_t + \boldsymbol{F}_g + \boldsymbol{G} = 0 \tag{13}$$

2.2.2.4 第 4 阶段

石块输送至分离筛末端,两者分离,石块落入集石料斗中,最终完成砾石的输送收集工作。考虑到分离筛主轴可以通过侧板上的导轨实现上下滑动来改变分离行程,因此需消除伸缩分离行程对石块收集的影响,即无论主轴如何沿着导轨滑动,分离筛末端的石块都能被料斗收集,不会出现石块飞出料斗的情况。分别对主轴位于导轨 A 点(分离行程最短)和 B 点(分离行程最长)位置时,进行石块的运动分析,得到相关参数,最终确定输送分离装置和集

石料斗安装的相对位置。

当分离筛主轴位于导轨 A 点，石块从输送链末端落至料斗底部的运动模型可以简化为石块斜抛的平面简图，如图 7 所示。

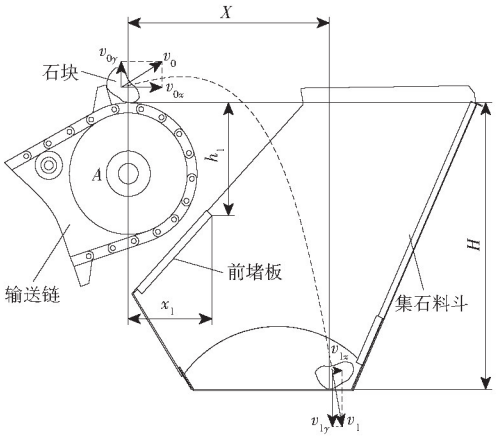


图 7　点 A 处石块在筛面末端的运动分析

Fig. 7　Analysis of motion of stone at end of sieve at point A

石块的运动方程为

$$\begin{cases} X = v_{0x}t \\ H = \dfrac{1}{2}gt^2 - v_{0y}t \end{cases} \tag{14}$$

式中　v_{0x}——石块抛离时的瞬时速度在水平方向分速度，m/s

v_{0y}——石块抛离时的瞬时速度在垂直方向分速度，m/s

H——石块落至料斗时垂直方向发生的位移，mm

X——石块落至料斗时在水平方向上的位移，mm

t——石块落至料斗时所用时间，s

在第 3 阶段中，石块受力平衡，随分离筛匀速朝末端输送，因此，在石块被抛离前的瞬时速度 v_0 可以近似看作分离筛的线速度，即

$$v_0 = \frac{\pi n(r_1 + d_1)}{30} \tag{15}$$

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0\cos\alpha \\ v_{0y} = v_0\sin\alpha \end{cases} \tag{16}$$

式中　n——分离筛主轴转速，r/min

r_1——分离筛主动轮分度圆半径，mm

d_1——链节有效厚度，mm

石块在抛落过程中，需越过前堵板才能落入料斗之中。石块从抛落点至前堵板顶端的垂直距离为 h_1，因此运动时间 t_1 的表达式为

$$t_1 = \frac{v_{0y} + \sqrt{2gh_1 + v_{0y}^2}}{g} \tag{17}$$

因此在 t_1 时间内，石块在水平方向上发生的位移 l_a 的表达式为

$$l_a = v_{0x}\frac{v_{0y} + \sqrt{2gh_1 + v_{0y}^2}}{g} \tag{18}$$

石块需越过前堵板落入料斗，即

$$x_1 \leqslant l_a \tag{19}$$

式中　x_1——石块抛离点至前堵板顶端的水平距离，mm

联立式(17) ~ (20)可得

$$x_1 \leqslant \frac{v_0^2\sin\alpha\cos\alpha + v_0\cos\alpha\sqrt{2gh_1 + v_0^2\sin^2\alpha}}{g} \tag{20}$$

将主轴沿导轨向上滑动，延长分离行程，达到提高土石分离率的目的。主轴位于导轨 B 点，石块在分离筛面末端抛离后的运动模型简图如图 8 所示。

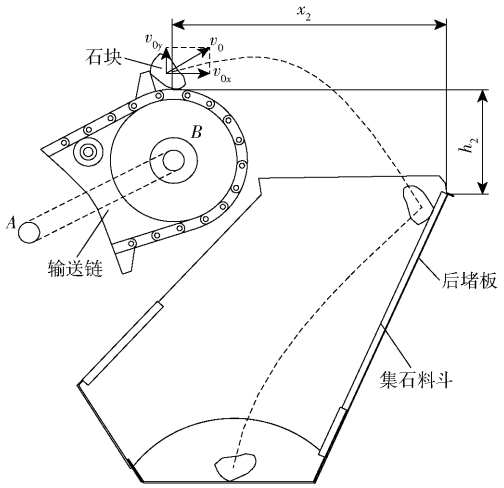


图 8　点 B 处石块在筛面末端的运动分析

Fig. 8　Analysis of motion of stone at end of sieve at point B

延长分离行程后，输送的提升高度提高，石块抛离点的高度高于集石料斗，此时需要防止石块在抛离过程中直接越过后堵板，落回农田中。

石块抛离点与后堵板最右侧顶点之间的高度差为 h_2，因此运动时间 t_2 的表达式为

$$t_2 = \frac{v_{0y} + \sqrt{2gh_2 + v_{0y}^2}}{g} \tag{21}$$

在 t_2 时间内，石块在水平方向上发生的位移 l_b 的表达式为

$$l_b = v_{0x}\frac{v_{0y} + \sqrt{2gh_2 + v_{0y}^2}}{g} \tag{22}$$

为防止石块飞出料斗而落回农田，石块抛离点至后堵板右侧顶端的水平距离 x_2 需满足

$$x_2 \geqslant l_b \tag{23}$$

联立式(21) ~ (23)得

$$x_2 \geqslant \frac{v_0^2\sin\alpha\cos\alpha + v_0\cos\alpha\sqrt{2gh_2 + v_0^2\sin^2\alpha}}{g} \tag{24}$$

主轴处于轨道 A 处时,石块抛落点至前堵板顶端的垂直距离 h_1 取 0.2 m,抛落点至前堵板顶端的水平距离 x_1 取 0.1 m。石块抛离的瞬时速度 v_0 近似于分离筛输送的线速度,为确保石块下落不会因前堵板受阻,根据公式计算出输送链线速度取整为 0.5 m/s,因此进一步可以得出输送链主动轮的最小转速为 56.2 r/min,取整为 56 r/min,即主动轮的分度圆半径为 0.075 m,链节有效厚度为 10 mm。当主轴沿轨道向上提升,石块抛离点介于前堵板和后堵板之间,石块总能落入集石料斗,不受输送筛线速度影响。主轴处于轨道 B 处时,石块抛落点至后堵板右端的垂直距离 h_2 取 0.3 m,抛落点至后堵板右端的水平距离 x_2 取 0.8 m,为确保石块不会越过后堵板飞出料斗,输送链最大的线速度取 2.3 m/s,即输送链主动轮的最大转速 258 r/min,输送链主动轮的转速可以通过液压流量控制阀进行调节。正常工作条件下,输送链主动轮转速一定位于 56 ~ 258 r/min 范围内,因此石块在末端抛离时总能落入料斗中。

3 离散元模型建立

3.1 土壤模型

需开垦的农田中土壤类型为砂质土,含水率低,土壤颗粒和土壤与石块之间的黏结力小,因此在 EDEM 中接触模型选用 Hertz - Mindlin with RVD Rolling Friction[25-26],该模型可以模拟土壤颗粒在输送过程中破碎—分离—还田整个过程,反映土石分离的效果,有利于得到准确的含土率指标。Hertz - Mindlin with RVD Rolling Friction 模型需要设置的参数及取值如表 2 所示。

表 2 模型参数

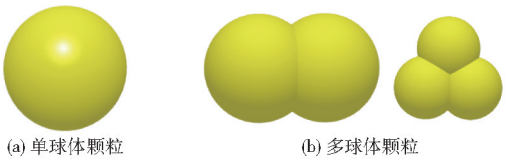
Tab. 2 Parameters for model

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	1×10^7
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	1×10^7
法向极限应力/Pa	1.5×10^5
切向极限应力/Pa	1.5×10^5
粘结半径/mm	2.0

为提升仿真效果,适当放大土壤颗粒,在 EDEM 中创建半径为 5 mm 的球体代表土壤颗粒,同时为模拟田间土壤的真实情况,另外建立两种多球体模型,如图 9 所示。

3.2 石块模型

在对荒地的实地调研中发现,土壤中存在的多为块状石块,直径主要在 70 ~ 150 mm 之间,同时也存在较多的扁平石块,这种类型石块截面面积较大,属于捡拾范围,但厚度小于 25 mm,在输送过程中,因回流翻滚容易从链杆间隙中漏出,对机具的捡石效率产生较大的影响。建立两种石块模型,块状石块直径为 100 mm,扁平石块厚度为 25 mm,石块形状如图 10 所示。



(a) 单球体颗粒 (b) 多球体颗粒

图 9 土壤颗粒模型

Fig. 9 Soil particle model



实物图 实物图

仿真图 仿真图

(a) 块状石头 (b) 扁平石头

图 10 石块颗粒

Fig. 10 Stone particle

3.3 离散元参数设定

为提高仿真结果的准确性,通过实地勘测和文献查阅,确定仿真试验涉及的参数,包括材料本征参数和材料间的接触参数,如表 3、4 所示。

表 3 仿真基本参数

Tab. 3 Basic parameters for simulation

参数	材料		
	石块	土壤	Q235 钢
密度/(kg·m^{-3})	1 600	1 667	7 850
泊松比	0.3	0.35	0.3
剪切模量/Pa	1×10^7	1.15×10^5	7.8×10^{10}

表 4 仿真相互作用参数

Tab. 4 Interaction parameters for simulation

项目	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
石块-石块	0.30	0.50	0.01
石块-土壤	0.06	0.50	0.01
石块-Q235 钢	0.20	0.50	0.01
土壤-土壤	0.13	0.56	0.27
土壤-Q235 钢	0.13	0.56	0.27

3.4　输送装置模型

在整个作业过程中，漏土和漏石主要发生在输送环节，因此为简化机械结构和分析过程，仅建立输送装置模型。在 Solidworks 中绘制输送链三维图并存为 xt 格式导入 RecurDyn 软件中，然后对输送链设置固定接触和转动约束，并对输送链主动轮转动副添加驱动，使输送链能够分别以不同的的转速运动，设置完成后以 wall 文件导入 EDEM 中，进行 DEM－MBD 联合仿真。在 EDEM 中，建立一个长×宽×高为 2 500 mm×2 000 mm×200 mm 的土槽，置于输送链前端，在土槽底部添加一个略大于土槽的平面，给平面添加一个 New Motion，并设置不同的初速度。土槽中的土石混合物能以此速度向输送链运动，模拟捡石机在拖拉机牵引下向前作业，因此对土槽所添加的初速度也可以作为机具的作业速度。土槽中块状和扁平石块的生成总数分别为 100 和 50。在输送链后端添加 box 代替集石料斗，收集输送完成的土石。输送仿真模型如图 11 所示。联合仿真界面如图 12 所示。

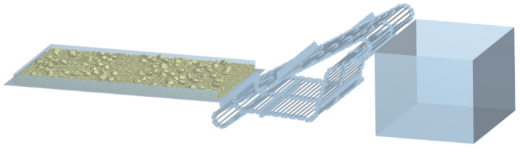


图 11　输送仿真模型

Fig. 11　Conveying simulation model

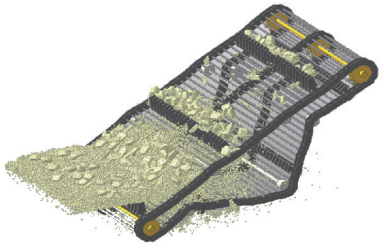


图 12　RecurDyn 仿真界面

Fig. 12　RecurDyn simulation interface

4　仿真试验

4.1　单因素仿真试验设计

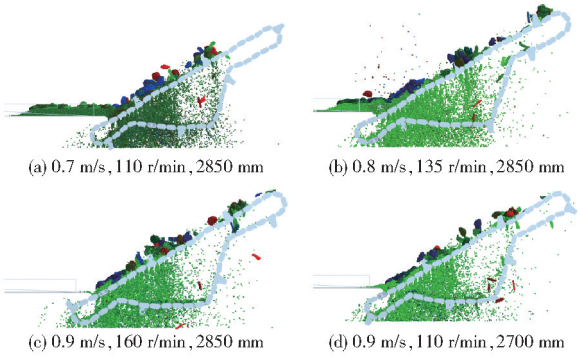
以作业速度、输送链主轴转速、输送链分离行程作为试验因素，漏石率和含土率作为试验指标，进行单因素试验，探究漏土漏石影响因素的主要取值范围。选取前进速度 0.6～1.0 m/s，输送链转速 60～160 r/min，输送链分离行程 2 550～3 150 mm，分离行程长度为从动轮和主动轮的中心距，当输送链主动轮主轴位于导轨 A 点时，输送分离行程最短，为 2 550 mm，主动轮主轴位于导轨 B 点时，分离行程最长，为 3 150 mm，长度可在该范围内调节。探明三者对漏石率和含土率的影响规律，为多因素试验设计提供理论依据。

输送链主轴转速 110 r/min，输送链分离行程 2 850 mm，在 EDEM 中对土槽添加不同初速度，作业速度分别选取 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 m/s，进行 5 组仿真试验。

作业速度 0.8 m/s，输送链分离行程 2 850 mm，在 RecurDyn 中对输送链主动轮转动副添加 Motion，输送链转速分别选取 60、85、110、135、160 r/min，进行 5 组仿真试验。

作业速度 0.8 m/s，输送链转速 110 r/min，输送链分离行程分别选取 2 550、2 700、2 850、3 000、3 150 mm，进行 5 组仿真试验。

仿真 3 s 时输送链输送情况如图 13 所示（选取其中 4 组仿真试验），从图中可以发现，因试验因素水平不同，从链杆间隙中下漏的石块和土壤有差别，在不同程度上影响漏石率和含土率指标。



(a) 0.7 m/s，110 r/min，2850 mm　(b) 0.8 m/s，135 r/min，2850 mm

(c) 0.9 m/s，160 r/min，2850 mm　(d) 0.9 m/s，110 r/min，2700 mm

图 13　不同因素水平下输送仿真图

Fig. 13　Simulation of transport with different levels of factors

4.2　单因素试验

农田捡石机实际作业时，田间的石块质量不容易测量，通常采用五点取样法来估测试验地内的石块质量。而在 EDEM 软件中，可以设置土槽内生成的石块数量并且可以得知石块的单体质量，因此可以精确计算出石块的总质量，同时创建与集石料斗体积和位置一致的 Grid Bin Group，测量集石料斗内所收集的土石混合物的质量。将土槽内石块的质量与料斗内石块质量的差值与土槽内石块总质量的百分比定义为漏石率，将集石料斗内土壤颗粒的质量与料斗内土石混合物总质量的百分比定义为含土率。漏石率 Y_1 和含土率 Y_2 的计算公式为

$$Y_1 = \frac{M_1 - M}{M_1} \times 100\% \tag{25}$$

$$Y_2 = \frac{M_2 - M}{M_2} \times 100\% \tag{26}$$

式中　M——集石料斗内石块质量，kg

M_1——土槽内石块总质量，kg

M_2——集石料斗内土石混合物总质量,kg

4.2.1 作业速度对试验指标的影响

选取作业速度 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 m/s,进行 5 组仿真试验,作业速度对漏石率和含土率的影响如图 14 所示。漏石率随机具作业速度增大不断减小,含土率随机具作业速度增大不断增大。产生这种单调趋势的原因为:作业速度在 0.6 ~ 1.0 m/s 的区间范围内上升时,单位时间内输送链的土石喂入量不断增大,在土石输送速度不变的情况下,随着输送链上的土石混合物不断增多,土石无法及时分离,土石分离效率下降,漏石率减少,含土率增大。图中作业速度在 0.7 ~ 0.9 m/s 区间内,漏石率下降趋势和含土率上升趋势都比较稳定。因此作业速度在 0.7 ~ 0.9 m/s 范围内,可较好兼顾漏石率和含土率,可以作为较优区间进行多因素仿真试验。

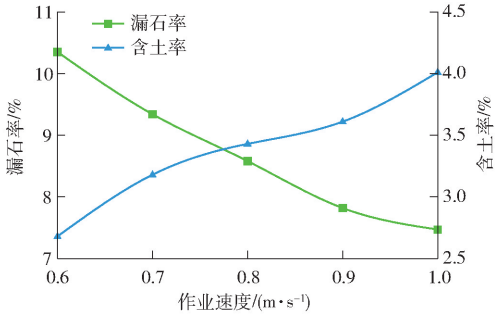


图 14 不同作业速度时试验指标的变化曲线

Fig. 14 Changes curves of operating speed on test index

4.2.2 输送链主轴转速对试验指标的影响

选取输送链主轴转速 60、85、110、135、160 r/min,进行 5 组仿真试验,输送链主轴转速对漏石率和含土率的影响如图 15 所示。漏石率随主轴转速增大呈现先增大后减小的趋势,含土率随主轴转速增大呈现先减小后增大的趋势。产生这种变化的原因为:输送链主轴开始以 60 r/min 运转,筛面运行速度较慢,土石容易在输送链前端堆积壅堵,导致土石无法及时筛分,因而漏石率增大,含土率减小。转速从 85 r/min 增大时,前端土石堆积现象消失,而输送链运行速度持续加快导致土石在输送链上输送分离时间不断减少,分离效果下降,漏石率减少,含土率增大。从图中可以看出当主轴转速达到 110 r/min 以上时,漏石率呈显著下降趋势,同时含土率上升缓慢。因此,选取输送链主轴转速为 110、135、160 r/min 进行多因素仿真试验。

4.2.3 输送链分离行程对试验指标的影响

选取输送链分离行程 2 550、2 700、2 850、3 000、3 150 mm,进行 5 组仿真试验,输送链分离行程对漏石率和含土率的影响如图 16 所示。漏石率随分离行程增大而增大,含土率随分离行程增大而减小。

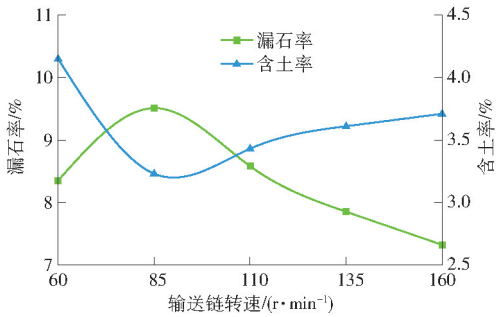


图 15 不同输送链转速时试验指标的变化曲线

Fig. 15 Changes curves of conveyor chain speed on test index

延长输送链分离行程,土石在输送过程中可以更充分分离,土壤和石块从链杆间隙中下漏的几率提高。从图中可以看出,分离行程对漏石率和含土率的影响呈递减和递增的趋势。根据单因素试验结果,选取分离行程 2 700、2 850、3 000 mm 进行多因素仿真试验。

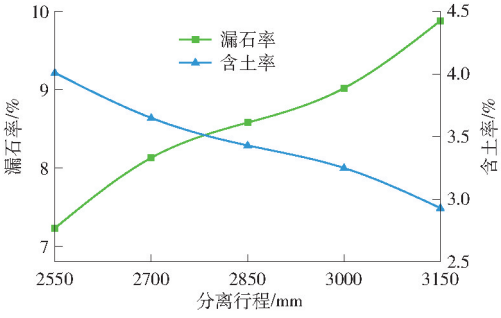


图 16 不同分离行程时试验指标的变化曲线

Fig. 16 Changes curves of separation stroke on test index

4.3 多因素仿真试验

在前期单因素试验基础上,确定机具作业速度、输送链主轴转速、输送链分离行程的较优区间范围,进行多因素二次正交旋转试验,设定的试验因素和编码如表 5 所示,仿真试验结果如表 6 所示(X_1、X_2、X_3 为因素编码值)。

表 5 试验因素和编码

Tab. 5 Factors and codes of test

编码	因素		
	作业速度/(m·s⁻¹)	输送链主轴转速/(r·min⁻¹)	输送链分离行程/mm
-1	0.7	110	2 700
0	0.8	135	2 850
1	0.9	160	3 000

利用 Design-Expert 10.0.1 软件对试验结果进行多元线性回归拟合分析处理,并建立漏石率 Y_1、含土率 Y_2 对机具作业速度、输送链主轴转速、输送链分离行程的响应面回归模型,对其进行方差分析[27],结果如表 7 所示。

表 6　试验方案和结果

Tab. 6　Experimental programme and results

试验序号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	1	0	−1	7.53	3.88
2	0	−1	−1	8.08	2.98
3	1	1	0	7.25	4.12
4	0	0	0	7.92	3.55
5	0	0	0	7.95	3.61
6	1	0	1	8.42	3.25
7	0	0	0	7.95	3.58
8	0	−1	1	9.63	2.41
9	−1	−1	0	9.03	2.45
10	−1	1	0	7.82	3.82
11	0	0	0	7.98	3.67
12	0	1	1	8.37	3.43
13	−1	0	−1	7.61	3.37
14	1	−1	0	8.22	3.15
15	−1	0	1	9.92	2.13
16	0	1	−1	7.05	4.52
17	0	0	0	7.82	3.42

表 7　回归模型方差分析

Tab. 7　Regression model analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
漏石率	模型	9.27	9	1.66	203.39	<0.000 1
	X_1	1.1	1	1.1	216.29	<0.000 1
	X_2	2.5	1	2.5	493.25	<0.000 1
	X_3	4.61	1	4.61	909.56	<0.000 1
	X_1X_2	0.014 4	1	0.014 4	2.84	0.135 6
	X_1X_3	0.504 1	1	0.504 1	99.55	<0.000 1
	X_2X_3	0.013 2	1	0.013 2	2.61	0.150 1
	X_1^2	0.062 4	1	0.062 4	12.33	0.009 8
	X_2^2	0.004 9	1	0.004 9	0.975 4	0.356 2
	X_3^2	0.442 7	1	0.442 7	87.43	<0.000 1
	残差	0.035 4	7	0.005 1		
	失拟	0.020 1	3	0.006 7	1.75	0.294 8
	误差	0.015 3	4	0.003 8		
	总和	9.3	16			
含土率	模型	6.00	9	0.666 9	48.79	<0.000 1
	X_1	0.864 6	1	0.864 6	63.25	<0.000 1
	X_2	3.00	1	3.00	219.54	<0.000 1
	X_3	1.56	1	1.56	113.94	<0.000 1
	X_1X_2	0.04	1	0.04	2.93	0.130 9
	X_1X_3	0.093	1	0.093	6.8	0.035 0
	X_2X_3	0.067 6	1	0.067 6	4.94	0.061 5
	X_1^2	0.135 3	1	0.135 3	9.90	0.016 2
	X_2^2	0.000 3	1	0.000 3	0.000 9	0.976 4
	X_3^2	0.22	1	0.22	16.19	0.005 0
	残差	0.095 7	7	0.013 7		
	失拟	0.061 2	3	0.02	2.36	0.212 3
	误差	0.035	4	0.008 6		
	总和	6.10	16			

由表 7 可知，漏石率和含土率模型的 P 值均小于 0.000 1，极其显著，说明回归方程可靠性高，X_1、X_2 和 X_3 对 Y_1 和 Y_2 的 P 值均小于 0.000 1，影响极显著，漏石率 Y_1 和含土率 Y_2 与各因素回归模型为

$$Y_1 = 7.92 - 0.37X_1 - 0.56X_2 + 0.76X_3 - 0.36X_1X_3 + 0.12X_1^2 + 0.32X_3^2 \quad (27)$$

$$Y_2 = 3.57 + 0.33X_1 + 0.61X_2 - 0.44X_3 + 0.15X_1X_3 - 0.18X_1^2 - 0.23X_3^2 \quad (28)$$

由式(27)、(28)可得，对漏石率的影响由高到低分别是输送链分离行程、输送链主轴转速、作业速度，对含土率的影响由高到低分别是输送链主轴转速、输送链分离行程、作业速度。为进一步分析三因素两两交互对试验指标的影响程度，建立影响显著交互因素对漏石率和含土率的响应面图，如图 17 所示。

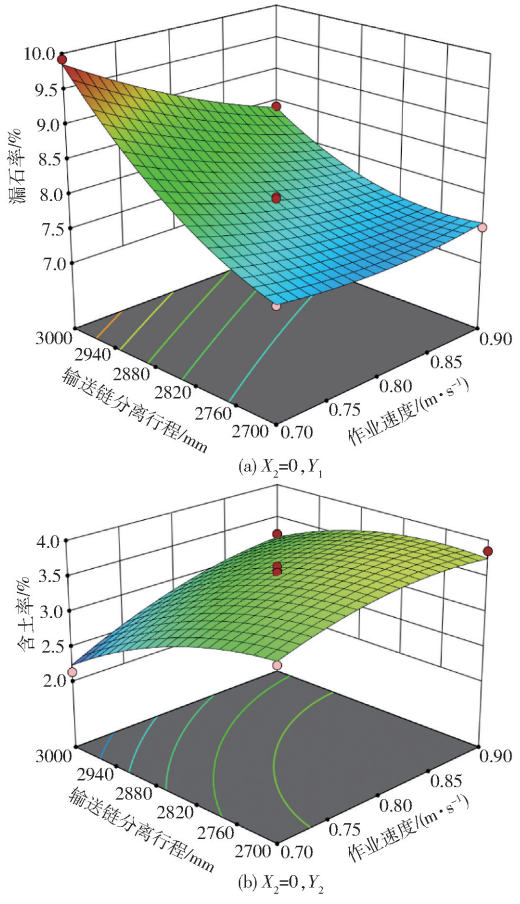


图 17　各因素交互作用对漏石率、含土率影响的响应曲面

Fig. 17　Effect of interaction of factors on stone leakage rate and soil content rate

由图 17a 可知，当输送链分离行程一定时，漏石率随作业速度的增加呈现逐渐减小的趋势；当作业速度一定时，漏石率随输送链分离行程的增加呈现逐渐增大的趋势。由图 17b 可知，当输送链分离行程一定时，含土率随作业速度的增加呈现逐渐增大的趋势；当作业速度一定时，含土率随输送链分离行

程的增加呈现逐渐减小的趋势。

4.4 试验优化

以最小漏石率和最小含土率为优化目标,以捡石机作业速度、输送链主轴转速、输送链分离行程为优化对象,利用 Design-Expert 建立目标函数和约束方程,即

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{29}$$

通过数值求解得到影响因素最优参数组合:作业速度为 0.7 m/s,输送链主轴转速为 110 r/min,输送链分离行程为 2 700 mm,此时,捡石机漏石率为 8.22%,含土率为 2.58%,满足农田砾石清除的要求。

5 田间验证试验

为验证仿真试验所得出的最优工作参数组合的合理性,2024 年 8 月 15 日在新疆维吾尔自治区博乐市精河县进行捡石机试验,如图 18 所示。作业效果如图 19 所示。



图 18 捡石机田间试验场景

Fig. 18 Stone picker field trial



(a) 作业前 (b) 作业后

图 19 作业效果图

Fig. 19 Operation effect diagrams

试验前通过五点采样法,在试验地选取 5 个 1 m×1 m 的样点区域,采集 0~200 mm 深度范围内的石块,测量试验田中单位面积内石块的质量为 m,单次试验作业长度 20 m,作业幅宽 2 m,作业面积 40 m^2,在作业范围内的农田石块总质量 M_3 可近似等于 40m,作业后对料斗内的土石混合物称量,记为 M_4,筛分土壤后单独对石块进行称量,记为 M_5,漏石率 Y_1 和含土率 Y_2 的计算公式为

$$Y_1 = \frac{M_3 - M_5}{M_3} \times 100\% \tag{30}$$

$$Y_2 = \frac{M_4 - M_5}{M_4} \times 100\% \tag{31}$$

试验前,调节捡石机相关参数,作业速度调为 0.7 m/s,输送链主轴转速调为 110 r/min,输送链分离行程调为 2 700 mm,调整好参数进行田间试验,重复 3 次,将测得的试验数据代入式(30)、(31)中,计算漏石率和含土率,试验结果如表 8 所示。

表 8 田间试验结果

Tab. 8 Results of field trials %

试验序号	Y_1	Y_2
1	8.09	2.63
2	7.71	2.75
3	8.28	2.47
平均值	8.03	2.62

通过对田间试验得到的结果进行分析,当捡石机以最优的工作参数作业时,漏石率为 8.03%,含土率为 2.62%,与仿真试验所得参数基本一致,试验数据可靠性高,满足捡石机技术标准中所规定的漏石率小于等于 15%,含土率小于等于 8% 的要求,相较于当前国内捡石机漏石率普遍在 10%~12%,该机具作业效果更优。

6 结论

(1)针对目前的捡石机械作业效率低、土石分离效果不好,含土率高、漏石率高、适应性差等问题,在机具设计上,以液压驱动代替传统齿轮箱传动,实现输送链输送无级变速,对入土装置和输送分离装置等关键部件进行优化设计和理论分析,确定相关结构参数。

(2)建立石块在输送链上的运动模型,分析石块在不同阶段的受力情况和运动状态,通过 DEM-MBD 联合仿真,建立土石输送的仿真模型,控制试验因素变量,以漏石率和含土率为试验指标,进行单因素仿真试验。

(3)以较优区间范围为各因素水平,进行二次正交仿真试验,得到最优工作参数组合:作业速度为 0.7 m/s,输送链主轴转速为 110 r/min,输送链分离行程为 2 700 mm,此时,捡石机漏石率为 8.22%,含土率为 2.58%,并通过田间试验重复验证,测得捡石机平均漏石率为 8.03%,平均含土率为 2.62%,与仿真试验结果基本一致,机具各性能指标满足相关要求。

参 考 文 献

[1] 王凤娇,杨延征,上官周平. 西北五省(区)耕地质量等别差异性比较[J]. 干旱地区农业研究,2015, 33(2):230 - 236.
WANG Fengjiao, YANG Yanzheng, SHANGGUAN Zhouping. Comparisons on variations in qualities of arable lands in northwestern China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015,33(2):230 - 236. (in Chinese)

[2] 孔祥斌,陈文广,党昱裙. 中国耕地保护现状、挑战与转型 [J]. 湖南师范大学社会科学学报, 2023, 52(5): 31 - 41.
KONG Xiangbin, CHEN Wenguang, DANG Yuxuan. The current state, challenges and transformation of farmland protection in China[J]. Journal of Social Science of Hunan Normal University, 2023, 52(5): 31 - 41. (in Chinese)

[3] 张佳,王宏,李川江,等. 基于专利计量的农田土壤捡石机械化技术发展态势分析[J]. 中国农机化学报,2024, 45(6): 250 - 256.
ZHANG Jia, WANG Hong, LI Chuanjiang, et al. Analysis on the development trend of farmland soil stone picking mechanization technology based on patent bibliometrics[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 250 - 256. (in Chinese)

[4] 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 soil to promote the necessity of machine[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2010, 37(11):121 - 122,131. (in Chinese)

[5] 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 advance in the development of soil rock picker[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(11):274 - 279. (in Chinese)

[6] 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.

[7] 农田石头的“克星”——康斯开尔捡石机[J]. 农业机械,2018(5):118.

[8] 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 experiment of shovel-screen type farmland stone picking and collecting machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(12): 221 - 233. (in Chinese)

[9] 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 & Vehicle Engineering, 2022,60(10):31 - 35,41. (in Chinese)

[10] 王相友,孙景彬,许英超,等. 拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2017,48(10): 316 - 322,279.
WANG Xiangyou, SUN Jingbin, XU Yingchao, et al. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 316 - 322,279. (in Chinese)

[11] 魏忠彩,王兴欢,李学强,等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J] . 农业机械学报,2023,54(2):95 - 106.
WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 95 - 106. (in Chinese)

[12] 杨德秋,汪昕,刘萌萌,等. 自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J] . 农业机械学报,2024,55(1):85 - 95.
YANG Deqiu, WANG Xin, LIU Mengmeng, et al. Design and experiment of self-propelled potato collectingand bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 85 - 95. (in Chinese)

[13] LI Z, SUN W, WANG H, et al. Study on the process of soil clod removal and potato damage in the front harvesting device of potato combine harvester[J]. Agriculture,2024,14(11):1947.

[14] XIE S,ZHANG Y,LI J, et al. Analysis of breaking and separating characteristics of potato-soil aggregates based on the new type of swing separation sieve[J]. Agronomy,2024,14(6):1272.

[15] CHEN M,LIU X,HU P, et al. Study on rotor vibration potato-soil separation device for potato harvester using DEM - MBD coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,218:108638.

[16] 王法安,曹钦洲,李彦彬,等. 丘陵山区自走式马铃薯联合收获机设计与通过性试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊2):10 - 19.
WANG Fa'an, CAO Qinzhou, LI Yanbin, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled potato harvesterin hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp.2):10 - 19. (in Chinese)

[17] 王凤花,熊海辉,赖庆辉,等. 马铃薯收获机挖掘装置智能设计系统与评价方法研究[J]. 农业机械学报,2021, 52(8): 86 - 97.
WANG Fenghua, XIONG Haihui, LAI Qinghui, et al. Intelligent design system and evaluation method of potato harvester excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 86 - 97. (in Chinese)

[18] 张兆国,王海翼,李彦彬,等. 多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J] . 农业机械学报,2021,52(2):96 - 109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):96 - 109. (in Chinese)

[19] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等. 低位铺放双重缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019, 50(9):140 - 152.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Design and experiment of potato harvester using double cushionsfor low laying separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 140 - 152. (in Chinese)

[20] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):119 - 126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):119 - 126. (in Chinese)

[21] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):17 - 24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhong'en, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(6):17 - 24. (in Chinese)

[22] 杨然兵,田光博,尚书旗,等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(2):107 - 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107 - 118. (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. Optimisation and test of wavy screen surface parameters of potato harvester based on discrete elements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109 - 122. (in Chinese)

[24] 宋少龙,汤智辉,郑炫,等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 63 - 70.
SONG Shaolong, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cottonfield after plowing in Xinjiang of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 63 - 70. (in Chinese)

[25] 李晓晖,魏忠彩,苏国梁,等. 基于气固耦合的气筛式马铃薯清选装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(1):96 - 108.
LI Xiaohui, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Parameter optimisation and experiment of air-screen potato-stone cleaning device based on gas-solid coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 96 - 108. (in Chinese)

[26] 靳伟,丁幼春,农峰. 等. 抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(11): 71 - 82.
JIN Wei, DING Youchun, NONG Feng, et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth bar for residual film - soil - straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 71 - 82. (in Chinese)

[27] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010:146 - 157.