doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.014

深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验

王学振[1]　岳　斌[1]　高喜杰[1]　郑智旗[1,2]　朱瑞祥[1,2]　黄玉祥[1,2]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.陕西省农业装备工程研究中心,陕西杨凌 712100)

摘要:翼铲的安装高度是带翼深松铲的关键结构参数之一,其对深松土壤扰动行为产生重要影响。综合运用 EDEM 和室内土槽试验,研究了翼铲安装高度(55、75、95、115、135 mm)对深松土壤扰动行为的影响。结果表明:随着翼铲安装高度增加,耕后犁底层土壤扰动面积先增大后减小,在翼铲安装高度为 75 mm 时最大,水平耕作阻力逐渐减小,深松铲铲尖和犁底层圆弧段所受水平耕作阻力为深松铲水平耕作阻力的主要来源(90% 以上),其随翼铲安装高度增大逐渐减小;翼铲安装高度直接影响耕作时不同深度土壤在不同方向的位移,当翼铲安装高度为 75 mm 时,深松铲纵向中心位置的各层土壤在耕作方向的最大位移相对较小,其犁底层土壤在竖直方向最大位移相对较大,表层和耕作层土壤在竖直方向最大位移相对较小;翼铲安装高度对土壤扰动效果产生重要影响,且离散元仿真能够准确模拟深松土壤的扰动过程,5 个翼铲安装高度下土壤膨松度、土壤扰动系数、土壤碎土系数、土壤纵向堆积角的试验值和仿真值的平均误差分别为 11.69%、11.54%、14.20%、9.64%。

关键词:深松铲;翼铲;安装高度;土壤扰动;离散元法;试验

中图分类号:S222.12+9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)10-0124-13

Discrete Element Simulations and Experiments of Disturbance Behavior as Affected by Mounting Height of Subsoiler's Wing

WANG Xuezhen[1]　YUE Bin[1]　GAO Xijie[1]　ZHENG Zhiqi[1,2]　ZHU Ruixiang[1,2]　HUANG Yuxiang[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The mounting height of the wing is one of the key structural parameters of the winged subsoiler, which greatly affects disturbance behavior of subsoiling. The disturbance behavior and resistance under different heights of the wing (55 mm, 75 mm, 95 mm, 115 mm and 135 mm) were compared and analyzed by the comprehensive use of EDEM and digitized soil-bin test. The results showed that with the increase of mounting height of the wing (MHW), the disturbance area of hardpan layer after subsoiling was increased first and then decreased, and it reached the maximum when MHW was 75 mm; moreover, the horizontal tillage resistance was decreased gradually with the increase of MHW, and the horizontal tillage resistance of the share and arc section in the hardpan layer was the main source of horizontal tillage resistance of subsoiler (more than 90%), which was also decreased gradually with the increase of MHW; MHW directly affected the displacement of different directions of soil at different depths during tillage. When MHW was 75 mm, the maximum displacement in the working direction of soil of each layer in the longitudinal center of the subsoiler was relatively small, the maximum displacement in the vertical direction of the soil in hardpan layer was relatively large, and the maximum displacement in the vertical direction of the top soil and the soil of tillage layer was relatively small; and a proper mounting height of the wing was of great importance to disturbance effectiveness, and the discrete element simulation could accurately simulate the disturbance behavior of subsoiling. The average errors of five mounting heights of the wing of soil bulkiness, soil disturbance coefficient, soil

收稿日期:2018-07-08　修回日期:2018-08-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200601、2016YFD020060101)、陕西省重点产业链项目(2018ZDCXL-NY-03-06)和杨凌示范区科技计划项目(2014NY-29)

作者简介:王学振(1993—),男,博士生,主要从事深松技术研究,E-mail:xzwang@nwsuaf.edu.cn

通信作者:黄玉祥(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事土壤-机器系统研究,E-mail:hyx@nwsuaf.edu.cn

fragmentation parameter and longitudinal accumulation angle of surface soil between simulation and experiment were 11.69%, 11.54%, 14.20% and 9.64%, respectively.

Key words: subsoiler; wing; mounting height; soil disturbance; discrete element method; experiment

0　引言

深松可有效改善土壤结构、降低犁底层土壤容重、提高土壤中营养物的利用率和土壤的蓄水保墒能力,继而促进作物根系生长,提高作物产量[1-6]。与立柱式深松铲和全方位深松铲相比,带翼深松铲不仅能够对深层土壤进行较大范围疏松,还能提高土壤的蓄水保墒能力[2,7]。翼铲的安装高度是带翼深松铲的关键结构参数之一,其对土壤扰动行为和深松效果产生重要影响[7]。

国内外学者围绕带翼深松铲对土壤扰动行为的影响开展了大量研究。SPOOR 等[8]发现增加翼铲长度可增大土壤扰动量、降低深松比阻,改变翼铲与铲尖的前后距离对土壤扰动量无明显影响;李洪文等[9]的研究表明,当翼铲较低、翼铲边缘超出铲尖和铲柄扰动范围以外时,松土截面形状发生改变,土壤侧向扰动范围增加;高焕文等[10]发现当翼铲安装在距离地表 10 cm 左右、铲距为 60 cm 时,带翼深松铲可对表土全部松动、底层土壤间隔疏松;GODWIN[11]研究表明,在翼形铲前加若干个浅松铲可显著增加土壤扰动面积;夏雷[12]基于离散元法和室内土槽试验研究了翼铲安装位置(安装高度、翼铲入土角和翼铲后倾角)和翼铲长度对垄高、垄宽和土壤宏观扰动轮廓的影响;HANG 等[2]从理论上分析了翼铲安装高度、张角和后倾角等安装参数对土壤扰动效果和耕作阻力的影响,并以耕作比阻为指标对翼铲的安装参数进行优化。已有研究主要分析了翼铲的结构参数和安装位置对直线型带翼深松铲耕后土壤宏观扰动的影响,并未结合翼铲与犁底层及铲柄的相对位置,研究翼铲安装高度对土壤微观扰动机理和耕作阻力的影响。

圆弧形铲柄是目前深松铲最常用的铲柄型式之一。现有研究表明,圆弧形深松铲加工方便、碎土功能更强,但受力更加复杂,且在小纵深比情况下,圆弧形等弯曲形深松铲与直线型深松铲相比具有较优的耕作性能[13-15]。因此,本研究以圆弧形带翼深松铲为对象,考虑翼铲与犁底层及铲柄的相对位置,利用离散元法和数字化土槽试验,研究翼铲安装高度变化对深松土壤的扰动行为和耕作阻力的影响,以期为具有弯曲形铲柄的深松铲翼铲安装高度的确定提供参考依据。

1　室内土槽试验

1.1　试验材料

试验在西北农林科技大学机械与电子工程学院室内数字化土槽中开展,该土槽长 26 m、宽 2.1 m、深 0.7 m。试验用土质为塿土,属于黄土母质上发育的农业土壤[16-17]。陕西省杨凌地区农田耕作层和犁底层厚度为 250 ~ 350 mm[18],耕作层厚度为 130 ~ 180 mm[2]。本文取耕作层厚度为 170 mm,犁底层厚度为 130 mm。为彻底打破犁底层,耕深设置为 300 mm。

带翼深松铲的结构、尺寸如图 1 所示。铲尖和铲柄分别为 JB/T 9788—1999 中规定的凿形铲尖和中型圆弧形铲柄,翼铲安装在圆弧形铲柄上,其水平方向的中心线与凿形铲尖底部距离为 H(图 1)。

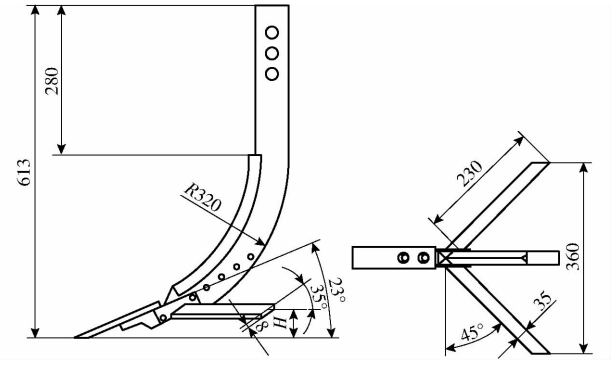


图 1　带翼深松铲结构图

Fig. 1　Structure diagram of winged subsoiler

翼铲安装过高不但无法有效扩大松土范围,而且会使深松铲对耕作层土壤过度扰动、降低地表平整度[7];反之,若翼铲安装位置过低,深松铲在入土时翼铲过早接触到土壤,影响深松铲的入土性能[2]。同时,适当降低翼铲安装高度,使之位于犁底层,可以对犁底层土壤进行较大范围疏松,提高土壤的蓄水保墒能力,减少土壤水分的蒸发量[16]。为扩大犁底层土壤扰动范围,结合凿形铲尖和中型圆弧形铲柄的尺寸及安装位置,确定翼铲最大安装高度为 135 mm;同时,为避免铲柄上用于固定铲尖的螺栓对翼铲安装产生影响,将翼铲的最低位置确定为 55 mm,如图 2 所示。因此,本研究确定的翼铲安装高度 H 分别为 55、75、95、115、135 mm。

现有研究侧重分析深松后土壤的宏观扰动状态及深松铲整体的受力情况,尚未明晰不同翼铲安装参数下深松铲不同部位的受力变化及其对相应位置

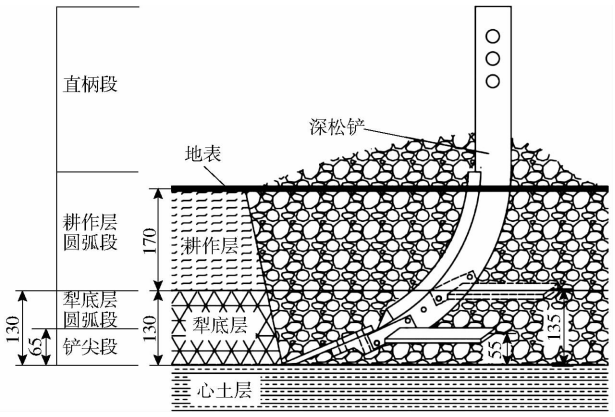


图 2 带翼深松铲分段情况

Fig. 2 Subsection of winged subsoiler

土壤的扰动机理。为此,本研究将带翼深松铲划分为直柄段、圆弧段和铲尖段,同时,考虑铲柄与犁底层的相对位置,利用深松时耕作层和犁底层交界面将圆弧段分为耕作层圆弧段和犁底层圆弧段(图 2),旨在揭示翼铲安装高度变化对不同位置土壤扰动行为和深松铲不同部位受力的影响。根据深松铲的高度(613 mm)、铲尖在竖直方向的长度(65 mm)、直柄段长度(280 mm)、犁底层厚度(130 mm),可以得到耕作层圆弧段和犁底层圆弧段在竖直方向的长度分别为 203 mm 和 65 mm(图 1、2)。

1.2 试验过程

试验前对选用的大田土壤参数进行了测定。大田土壤中石粒、砂粒和粉黏粒质量分数分别为 10.25%、82.29% 和 7.46%,耕作层(地表以下 0 ~ 170 mm)和犁底层(地表以下 170 ~ 300 mm)土壤含水率、土壤紧实度和土壤密度如表 1 所示。

表 1 试验土壤条件

Tab. 1 Soil conditions of test

耕层类型	大田土壤			土槽土壤		
	含水率/%	密度/(kg·m^{-3})	紧实度/kPa	含水率/%	密度/(kg·m^{-3})	紧实度/kPa
耕作层	16.72	1 356	3 398.6	17.02	1 404	3 564.4
犁底层	21.85	1 729	5 528.3	22.10	1 833	5 695.2

为保证土槽内的土壤条件符合大田土壤环境,在土槽试验前,采用分层处理的方法根据大田土壤参数进行土槽土壤制备[16]。首先取出土槽地表以下 170 mm 深度范围内的土壤,然后对剩余的土壤喷洒适量自来水,充分渗透后对表土进行旋耕,接着利用辊子和振动冲击夯依次进行压实;随后均匀回填取出的表土(约 85 mm),然后再次喷洒适量自来水,接着把剩余土壤均匀回填土槽,最后旋耕并压实表土(图 3);测得制备后土床耕作层(地表以下 0 ~ 168 mm)和犁底层(地表以下 168 ~ 300 mm)土壤含水率、土壤紧实度和土壤密度如表 1 所示。

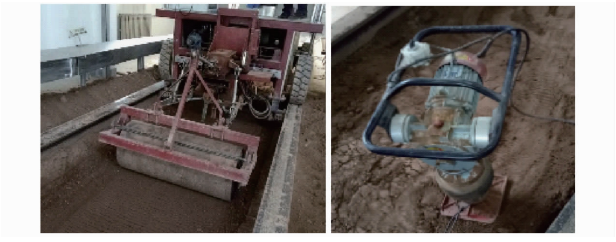


图 3 土槽土壤制备过程

Fig. 3 Soil preparation process in soil bin

土槽土壤制备完成后依次对 5 个不同翼铲安装高度下的带翼深松铲进行土槽深松试验。土槽试验中深松铲动力牵引装置为电力变频四轮驱动土槽试验车(哈尔滨博纳科技有限公司)[19]。为了保证试验条件的一致性,分别取土槽的前、后 3 m 为土槽车的加速区和减速区,土槽中间为试验测量区域。根据本地区实际深松作业速度,试验中耕作速度确定为 0.83 m/s[20]。深松铲和铲架通过三点悬挂装置与土槽车相连接,通过布置于左右悬挂装置、上拉杆上的传感器和无线设备将耕作过程中牵引阻力信号实时发送至计算机。

为准确获得深松后土壤的扰动轮廓,在深松结束后,利用土壤轮廓测量仪和方格边长为 1 mm 的坐标纸测量土壤的扰动轮廓,测量过程重复 3 次,相邻测量位置的间距为 3 m,测量过程如图 4 所示。

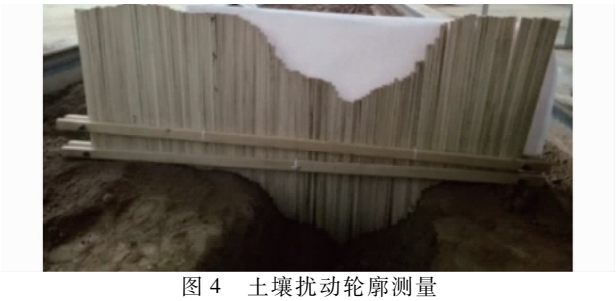


图 4 土壤扰动轮廓测量

Fig. 4 Soil disturbance measurement

土壤膨松度和土壤扰动系数可以作为衡量深松土壤扰动效果的评价指标[16,21],其计算式分别为

$$p = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\% \tag{1}$$

$$y = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \tag{2}$$

式中 p——土壤膨松度,%

A_q、A_h——耕前、耕后地表至理论深松沟底的横断面面积,mm^2

y——土壤扰动系数,%

A_s——耕前地表至实际深松沟底的横断面面积,mm^2

土壤纵向堆积角 α(图 5)反映了深松后土壤的纵向堆积程度[16],其定义公式为

$$\alpha = \arctan\frac{h}{d} \tag{3}$$

式中　d——铲柄直柄段刃口到铲前扰动土壤的最大距离，mm

h——铲前土壤堆积高度，mm

根据式(3)分别计算 5 个不同翼铲安装高度(55、75、95、115、135 mm)下的土壤纵向堆积角。

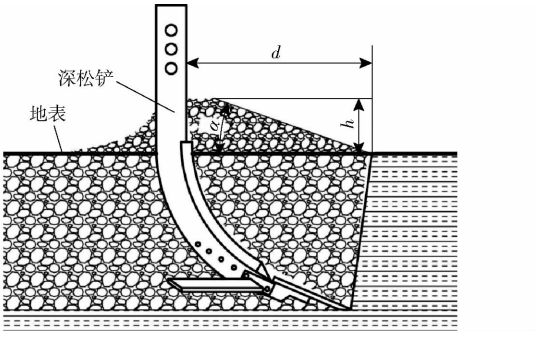


图 5　土壤纵向堆积角示意图

Fig. 5　Diagram showing accumulation angle of surface soil

深松后土壤的破碎程度是深松作业质量的重要指标之一。参考 GB/T 24675.2—2009，深松作业完成后，在土槽中间沿耕作方向每隔 3 m 取一个测量点，共取 3 个测量点；对于任意选定的测量点，在 0.5 m × 0.5 m 面积内，将耕深范围内长边小于 40 mm 的土块质量与土壤总质量之比作为碎土系数，将 3 个选定点的碎土系数平均值作为特定翼铲安装高度下的碎土系数。分别统计 5 个不同翼铲安装高度下的碎土系数。

2　EDEM 仿真分析

2.1　深松铲建模

为保证仿真结果的准确性，采用 CATIA 软件对试验用深松铲按 1∶1 的比例建立 3D 模型，并保存为. stp 格式[3]。

2.2　土壤颗粒及土壤接触模型

根据试验用农田土壤类型，选择 EDEM 2.7 中的 Hertz - Mindlin with Bonding 模型作为土壤颗粒间的接触模型[3,21]。该模型下土壤颗粒间具有粘结作用的圆柱形粘结键(图 6)，可代替土壤颗粒间的液桥，承受一定的力和力矩[3,22]。颗粒形状和尺寸常被视为离散元模型的重要参数[23-24]。现有研究表明，具有粘结键的土壤颗粒以块状形式出现，可较好地模拟土壤团聚体，在 Hertz - Mindlin with Bonding 模型下土壤颗粒单元的形状对于土壤颗粒间的相互作用影响较小[22]，因此本文选用 EDEM 中的基本球形颗粒作为土壤颗粒单元。离散元仿真中颗粒尺寸减小会导致仿真运行时间呈几何级数增长[25]，诸多研究者采用 8 mm 或以上半径的球体作为土壤颗粒模型，并较为准确地模拟了耕作部件与土壤的相互作用过程[26-28]，本研究确定土壤颗粒单元的半径为 8 mm。

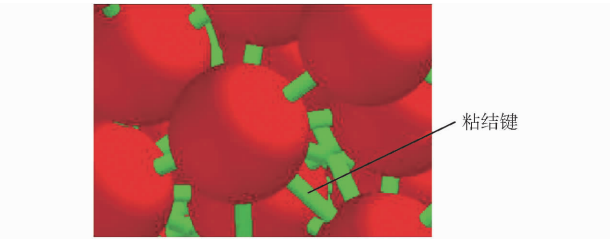


图 6　颗粒间圆柱形粘结键

Fig. 6　Cylindrical bonds between particles

2.3　土壤模型参数

在 EDEM 软件中，模型参数主要包括材料参数和接触参数。材料参数主要包括土壤和深松铲(65Mn)的密度、泊松比和剪切模量，其中 65Mn 的密度和剪切模量及土壤的剪切模量参考文献[16,28]的数据，耕作层和犁底层土壤密度通过实际测量获取，耕作层和犁底层土壤的泊松比计算式为[29]

$$\mu = \frac{K_o}{1 + K_o} \tag{4}$$

其中

$$K_o = 1 - \sin\phi \tag{5}$$

式中　K_o——土壤侧压力系数

μ——泊松比

ϕ——土壤内摩擦角，耕作层和犁底层土壤内摩擦角分别为 19.80°和 16.75°(通过直剪试验得到)

接触参数主要包括材料间的恢复系数、摩擦因数。其中耕作层土壤与耕作层土壤、犁底层土壤与犁底层土壤、耕作层土壤与 65Mn、犁底层土壤与 65Mn 间的动摩擦因数分别利用休止角试验和斜板试验获取；通过文献[21,26,28]得到土壤间的恢复系数及土壤与 65Mn 间的恢复系数均为 0.6，土壤间的静摩擦因数为 0.4，土壤与 65Mn 间的静摩擦因数为 0.5。

Hertz - Mindlin with Bonding 模型中的微观参数包括粘结键法向刚度、粘结键切向刚度、粘结键法向临界应力、粘结键切向临界应力和粘结键半径。参照文献[22,30]减少参数标定个数的方法，使法向刚度等于切向刚度，法向临界应力等于切向临界应力。另外，有研究表明[28]，Hertz - Mindlin with Bonding 模型下的颗粒运动行为对粘结刚度参数不敏感，取粘结刚度(法向和切向)为 5×10^7 N/m^3。粘结键半径反映了土壤含水率的高低，其大小根据含水率和土壤颗粒半径确定[28,31]，粘结键法向、切向临界应力由单轴压缩试验获取。

离散元仿真模型的基本参数如表 2 所示。

表 2 离散元模型基本参数

Tab. 2 Basic parameters of discrete element model

参数	数值	参数	数值
土槽尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 000×1 200×400	耕速/(m·s^{-1})	0.83
耕深/mm	300	重力加速度/(m·s^{-2})	9.81
65Mn 密度/(kg·m^{-3})	7 830	土壤颗粒总数	119 991
65Mn 泊松比	0.35	65Mn 剪切模量/Pa	7.27×10^{10}
耕作层土壤密度/(kg·m^{-3})	1 404	犁底层土壤密度/(kg·m^{-3})	1 833
耕作层土壤泊松比	0.40	犁底层土壤泊松比	0.42
耕作层土壤含水率/%	17.02	犁底层土壤含水率/%	22.10
耕作层土壤粘结半径/mm	8.54	犁底层土壤粘结半径/mm	8.83
耕作层土壤粘结刚度/(N·m^{-3})	5×10^{7}	犁底层土壤粘结刚度/(N·m^{-3})	5×10^{7}
耕作层土壤粘结临界应力/Pa	3×10^{4}	犁底层土壤粘结临界应力/Pa	4×10^{4}
耕作层土壤剪切模量/Pa	6×10^{7}	犁底层土壤剪切模量/Pa	1×10^{8}
耕作层土壤间动摩擦因数	0.58	犁底层土壤间动摩擦因数	0.25
耕作层土壤与 65Mn 间动摩擦因数	0.34	犁底层土壤与 65Mn 间动摩擦因数	0.14

2.4 EDEM 耕作模型

为满足深松作业要求,根据耕深和带翼深松铲宽度,在模型中建立尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×1 200 mm×400 mm 的虚拟土槽,其中地表以下 0~170 mm 为耕作层,地表以下 170~300 mm 为犁底层,地表以下 300~400 mm 为心土层;参数设定完成后,通过颗粒工厂动态生成、堆积颗粒的方式生成土槽,颗粒生成完成后进行沉降、粘结,然后将深松铲 3D 模型导入 EDEM 软件中(图 7);最后深松铲以 0.83 m/s 的耕速运行,仿真过程共历时 6.0 s。

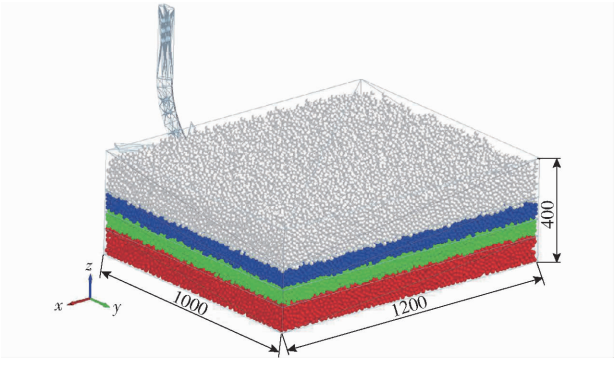


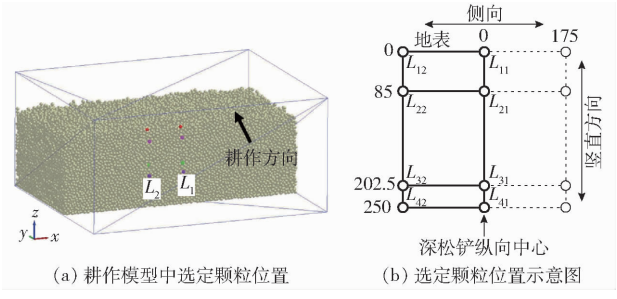
图 7 EDEM 耕作模型

Fig. 7 Simulation model of EDEM

2.5 仿真分析

为了解翼铲安装高度对地表下不同位置土壤的扰动状态的影响,利用 EDEM 的 Clipping 模块对土壤模型沿耕作方向和垂直耕作方向进行剖视。

为进一步明晰翼铲安装高度对不同位置土壤微观运动的影响,根据深松铲分段情况(图 2),在深松铲纵向中心位置(L_1)和翼铲边缘位置(L_2)选定代表性颗粒(图 8a),分别距地表 0、85、202.5、250 mm 深度处(即地表、耕作层中间位置、犁底层圆弧段中间位置和铲尖位置),并分别标记为 L_{11}、L_{21}、L_{31}、L_{41}、L_{12}、L_{22}、L_{32}、L_{42}(图 8b),重点考察深松铲纵向中心位置和翼铲边缘位置土壤颗粒在铲柄、铲尖和翼铲作用下的扰动情况。通过统计选定颗粒在耕作过程中的不同时刻坐标,计算选定颗粒在耕作过程中的实时位移,进而筛选出耕作过程中选定颗粒在 x、y 和 z 方向的最大位移。



(a) 耕作模型中选定颗粒位置 (b) 选定颗粒位置示意图

图 8 选定颗粒位置

Fig. 8 Locations of selected particles

以土壤是否具有运动速度为条件,将绘制的土壤颗粒的运动速度临界曲线作为土壤扰动的坑形轮廓,将土壤在地表的堆积轮廓作为土壤扰动的垄形轮廓[16]。利用 EDEM 的 Protractor 功能量取不同翼铲安装高度下的土壤纵向堆积角。通过 EDEM 的 Selection 模块获取深松铲不同部位(图 2)耕作阻力。

3 结果与讨论

3.1 土壤扰动状态对比分析

为探究翼铲安装高度对不同位置土壤扰动状态的影响,对 5.12 s 时(深松铲位于耕作行程中间)土壤模型进行了纵向和侧向剖视;剖视的 0 mm 处为深松铲的纵向和侧向中心,根据翼铲长度及深松铲对土壤的纵向扰动情况,选择垂直耕作方向的剖面间距为 90 mm,耕作方向的剖面间距为 88 mm,不同翼铲安装高度下垂直耕作方向和耕作方向的剖面分别如图 9 和图 10 所示。

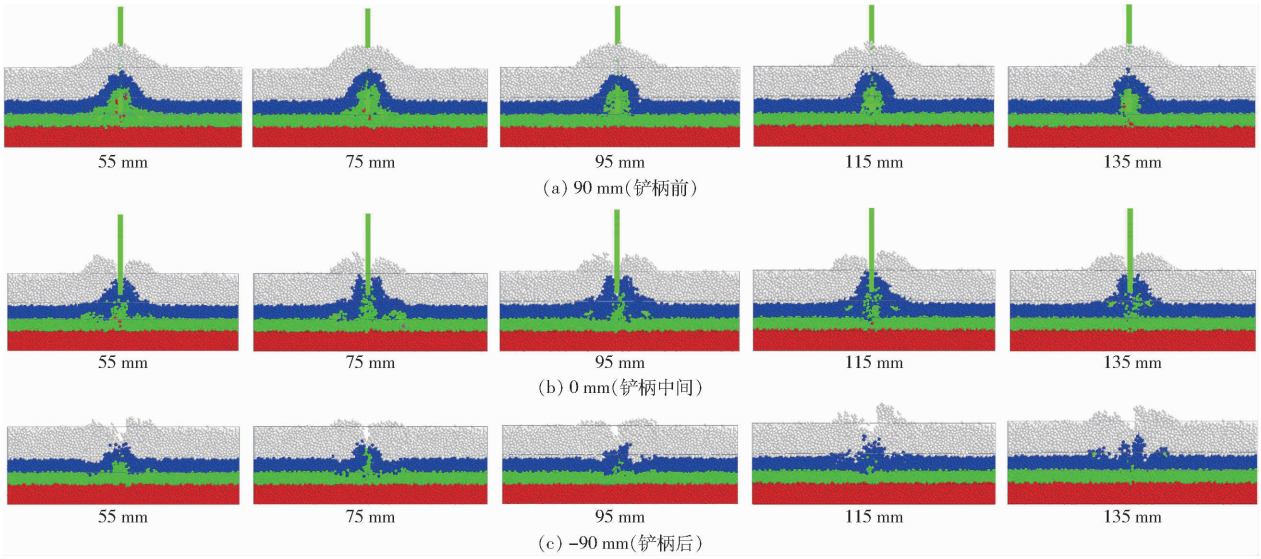


图 9　翼铲安装高度(H)对各层土壤侧向扰动状态的影响

Fig. 9　Effect of mounting height of wing(H) on transverse disturbance quality of soil in different layers

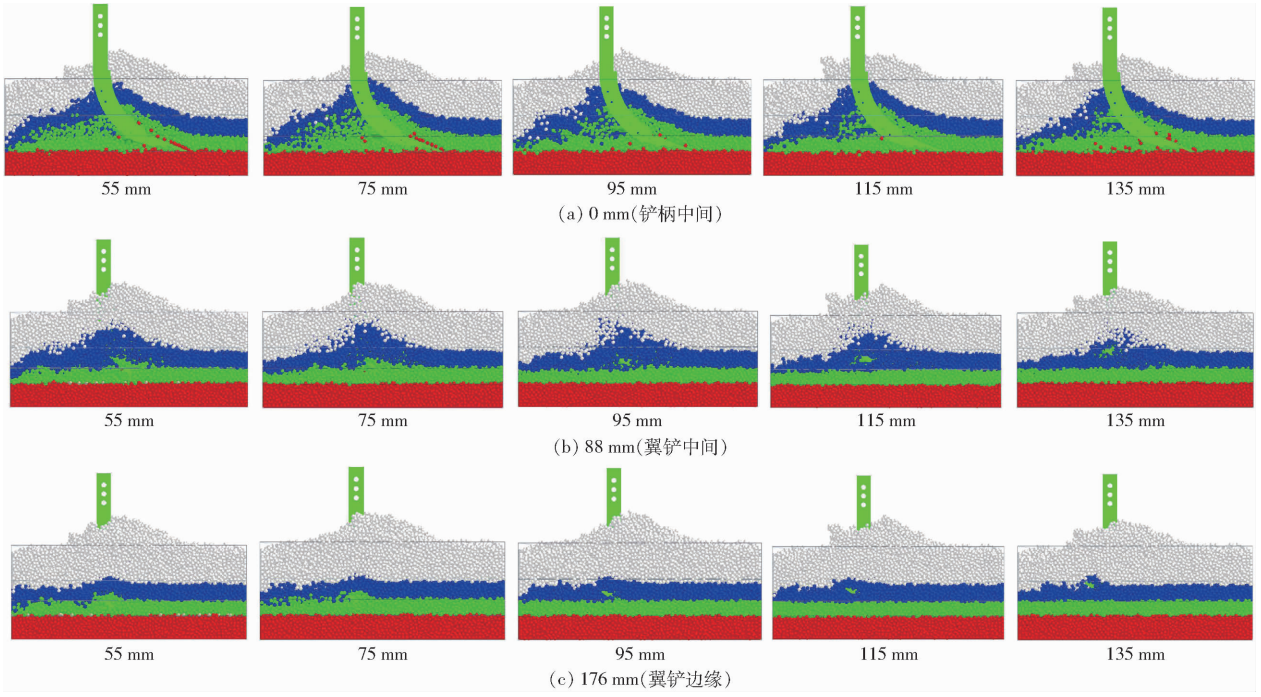


图 10　翼铲安装高度对各层土壤纵向扰动状态的影响

Fig. 10　Effect of mounting height of wing on portrait disturbance quality of soil in different layers

由图 9 可知，深松铲在不同翼铲安装高度下的松土机理类似。首先，铲尖、翼铲和铲柄圆弧段在牵引力的作用下对铲尖段土壤（绿色颗粒）和圆弧段犁底层土壤（蓝色颗粒）进行剪切和挤压，使其向上抬升并产生失效破碎，同时对耕作层土壤（白色颗粒）产生扰动作用，使其在地表产生一定的土垄（图 9a），接着地表土垄在铲柄的直柄段的剪切作用下发生失效破碎（图 9b），最后在自身重力作用下沿铲柄直柄段刃口向后下方运动，回填至松后沟槽（图 9c）。

翼铲安装高度对耕作层土壤的侧向扰动范围影响不明显，对犁底层土壤（绿色和蓝色颗粒）的侧向扰动范围影响较大；随着翼铲安装高度增加，圆弧段犁底层土壤在翼铲安装高度为 135 mm 时的侧向扰动范围明显小于其他翼铲安装高度；当翼铲安装高度为 55、75 mm 时，铲尖段土壤在铲柄附近和距铲柄较远位置均产生了扰动；当翼铲安装高度为 95 mm 或以上时，铲尖段土壤仅在铲柄附近小范围内产生扰动，要使翼铲扩大对犁底层土壤的侧向扰动范围，应适当降低翼铲安装高度、保证该深度土壤在翼铲的扰动范围以内。

由图 10 可知，随着土壤与深松铲侧向间距的增

加,深松铲对土壤的竖直抬升程度和纵向扰动范围都逐渐减小。当翼铲安装高度较大时,圆弧段犁底层土壤和铲尖段土壤的减小程度更明显,主要原因是随着翼铲安装高度的增加,翼铲对其下方的圆弧段犁底层土壤和铲尖段土壤的剪切和挤压程度逐渐减弱,对其上方的土壤以一定角度向翼铲两侧上方延伸松动,且延伸到地表位置的土壤扰动宽度与铲柄对地表土壤的扰动宽度相近,致使圆弧段犁底层土壤和铲尖段土壤被竖直抬升和纵向扰动的程度对翼铲安装高度更敏感。当翼铲安装高度大于 75 mm 时,距离深松铲纵向中心较远位置(剖视距离为 88 mm 或以上)的铲尖段土壤基本不产生扰动(图 10b、10c),这是由于翼铲对铲尖段土壤的作用力随翼铲安装高度的增加而减小。

图 9 和图 10 的分析结果表明,对于圆弧形铲柄,铲翼安装高度的变化会引起铲翼与铲尖距离的变化,造成翼铲进入土壤的时间和位置有所不同,进而产生不同的土壤扰动状态。随着翼铲安装高度增加,耕作层土壤的侧向扰动范围无明显差异,犁底层土壤的侧向扰动范围整体呈现减小的趋势,因此适当降低翼铲安装高度有利于增加深松铲对犁底层土壤的扰动范围。

3.2 土壤微观运动对比分析

现有基于离散元法的示踪块试验常根据耕后土壤位移来判断土壤的实际扰动效果和耕作能耗等。为进一步定量分析翼铲安装高度对不同位置土壤扰动的影响,本研究通过离散元分析软件 EDEM 的后处理功能,得到深松铲纵向中心位置和翼铲边缘位置选定的土壤颗粒在耕作过程中的侧向(x)、耕作方向(y)和竖直方向(z)的不同时刻的位移,通过统计选定的不同位置颗粒在 x、y、z 方向的最大位移 X_{max}、Y_{max} 和 Z_{max},以揭示翼铲安装高度变化对耕作过程中关键位置土壤在各方向实际临界运动状态的影响。

3.2.1 翼铲安装高度对土壤侧向(x)运动的影响

由图 11 可知,随着翼铲安装高度的增加,表层土壤的侧向扰动范围呈现先减小再增大、后减小的趋势,且翼铲边缘位置的表层土壤(L_{12})x 负方向的最大位移在翼铲安装高度为 95 mm 时最小,为 27.04 mm,其次为翼铲安装高度为 75 mm 时,为 29.65 mm。

在不同翼铲安装高度下,耕作层土壤的侧向扰动范围均无明显差异,这是由于深松铲翼铲边缘位置的耕作层土壤(L_{22})在不同翼铲安装高度下均向 x 负方向移动($X_{max}<0$),且各侧向最大位移无明显差异;圆弧段犁底层土壤在翼铲安装高度为 55、75、95、115 mm 时的侧向扰动范围均远大于翼铲安装高度为 135 mm,这是由于深松铲翼铲边缘位置的圆弧段犁底层土壤(L_{32})在翼铲安装高度为 55、75、95、115 mm 时都向 x 正方向移动,且各侧向最大位移无明显差异,深松铲翼铲边缘位置的圆弧段犁底层土壤(L_{32})在翼铲安装高度为 135 mm 时未产生侧向位移。铲尖段土壤的侧向扰动范围呈现先增大后减小的趋势,在翼铲安装高度为 75 mm 时侧向扰动范围最大;这是由于深松铲翼铲边缘位置的铲尖段土壤(L_{42})在翼铲安装高度为 75 mm 时向 x 负方向移动,在翼铲安装高度为 55 mm 时向 x 正方向移动,在翼铲安装高度大于 75 mm 时未产生侧向扰动。

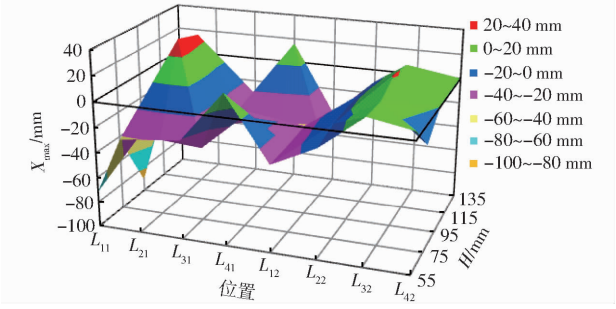


图 11 土壤侧向最大位移曲面图

Fig. 11 Maximal lateral displacement of soil

以上分析表明,随着翼铲安装高度的增加,耕作层土壤侧向扰动范围变化不明显,犁底层土壤的侧向扰动范围呈现先增大后减小的趋势,且当翼铲安装高度为 75 mm 时犁底层土壤的侧向扰动范围最大,有利于保护土壤墒情[16,32]。

3.2.2 翼铲安装高度对土壤耕作方向(y)运动的影响

由图 12 可知,在不同翼铲安装高度下,深松铲纵向中心位置的土壤(L_{11} ~ L_{41})在耕作方向的最大位移(Y_{max})明显大于距离深松铲较远位置土壤(L_{12} ~ L_{42}),这主要是由于深松铲纵向中心位置土壤受到深松铲的直接作用。在深松铲纵向中心位置,随着翼铲安装高度增加,其表层土壤(L_{11})在耕作方向的最大位移无明显变化,而耕作层土壤(L_{21})在耕作方向的最大位移呈现先减小再增大、后减小的趋势,且当翼铲安装高度为 135 mm 时耕作层土壤在耕作方向的最大位移最小,为 191.68 mm,其次为翼铲安装高度为 75 mm 时,为 209.93 mm;圆弧段犁底层土壤(L_{31})在耕作方向的最大位移呈现先减小后增大的趋势,且当翼铲安装高度为 95 mm 时圆弧段犁底层土壤在耕作方向的最大位移最小,为 93.43 mm,其次为翼铲安装高度为 75 mm 时,为 122.46 mm;铲尖段土壤(L_{41})在耕作方向的最大位移呈现先增大再减小、后增大的趋势,且当翼铲安装

高度为 55 mm 时铲尖段土壤在耕作方向的最大位移最小，为 128.62 mm，其次为翼铲安装高度为 75 mm 时，为 191.05 mm。

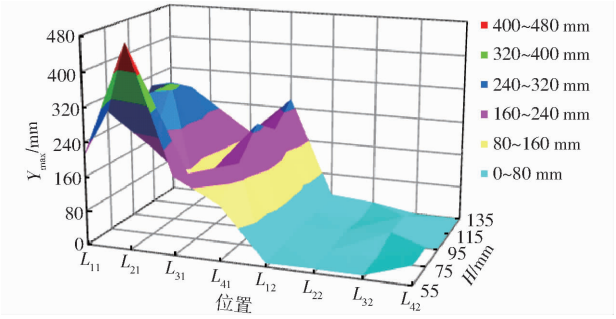


图 12　土壤耕作方向最大位移曲面图

Fig. 12　Maximal forward displacement of soil

在深松铲翼铲边缘位置，随着翼铲安装高度增加，其表层土壤（L_{12}）和耕作层土壤（L_{22}）在不同翼铲安装高度下的耕作方向最大位移无明显变化；圆弧段犁底层土壤的耕作方向最大位移在翼铲安装高度为 95、115 mm 时较大，分别为 30.91、29.3 mm，其次为翼铲安装高度为 55、75 mm 时，分别为 9.52、9.38 mm，当翼铲安装高度为 135 mm 时圆弧段犁底层土壤在耕作方向未产生位移；铲尖段土壤仅当翼铲安装高度为 55、75 mm 时在耕作方向具有一定的位移。

上述分析表明，不同翼铲安装高度下深松铲纵向中心位置的土壤在耕作方向的最大位移明显大于距离深松铲较远位置土壤。当翼铲安装高度为 75 mm 时，深松铲纵向中心位置的各层土壤在耕作方向的最大位移相对较小，根据能量守恒原理，翼铲安装高度为 75 mm 时由拖拉机牵引的深松铲传递给土壤的动能较少，有利于降低拖拉机耕作能耗[33-34]。

3.2.3　翼铲安装高度对土壤竖直方向（z）运动的影响

由图 13 可知，在深松铲纵向中心位置，随着翼铲安装高度增加，其表层土壤（L_{11}）在竖直方向的最大位移呈现先增大后减小的趋势，且当翼铲安装高度为 55 mm 时表层土壤在竖直方向的最大位移最小，为 122.85 mm，其次为翼铲安装高度 75 mm 时，为 135.64 mm；耕作层土壤（L_{21}）在竖直方向最大位移呈现先减小再增大、后减小的趋势，且当翼铲安装高度为 135 mm 时耕作层土壤在竖直方向最大位移最小，为 133.70 mm，其次为翼铲安装高度 75 mm 时，为 139.93 mm；圆弧段犁底层土壤（L_{31}）在竖直方向的最大位移呈现先增大后减小的趋势，且当翼铲安装高度为 75 mm 时圆弧段犁底层土壤（L_{31}）在竖直方向的最大位移最大，为 170.32 mm，当翼铲安装高度 135 mm 时圆弧段犁底层土壤（L_{31}）在竖直方向的最大位移最小，为 121.34 mm；铲尖段土壤（L_{41}）竖直方向最大位移呈现双驼峰变化趋势，且当翼铲安装高度为 75 mm 时铲尖段土壤在竖直方向最大位移最大，为 160.06 mm，当翼铲安装高度 135 mm 时铲尖段土壤在竖直方向最大位移最小，为 114.47 mm。在深松铲翼铲边缘位置，各层土壤在竖直方向的位移均无明显差异。

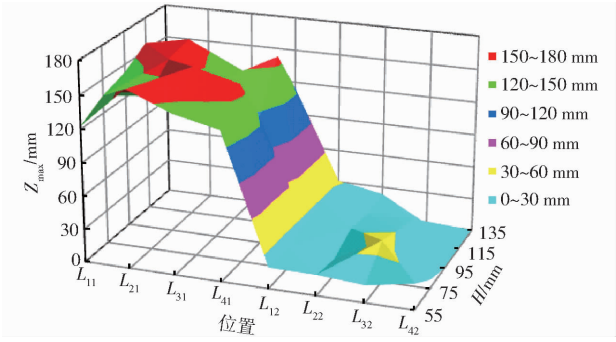


图 13　土壤竖直方向最大位移曲面图

Fig. 13　Maximal vertical displacement of soil

在深松作业过程中，圆弧形深松铲通过对土壤进行抬升和剪切作用使之产生失效破碎。然而，深松时犁底层土壤被抬升较高，不利于降低耕作层和养分含量较低的犁底层的混合量、达到不乱土层的效果[26]。以上分析表明，当翼铲安装高度为 75 mm 时，深松铲纵向中心位置犁底层土壤（圆弧段犁底层和铲尖段土壤）在竖直方向最大位移相对较大，深松作业时耕层间混合程度较高，但是此时深松铲纵向中心位置的表层土壤和耕作层土壤在竖直方向的最大位移相对较小，有利于减轻深松铲耕作时铲前土壤堆积。

对比不同位置土壤在各个方向的最大位移及其变化幅度可知，翼铲安装高度对土壤不同方向最大位移的影响程度由大到小依次为：侧向、耕作方向、竖直方向；翼铲安装高度变化对不同深度土壤的竖直方向最大位移的影响程度相似，对侧向和耕作方向最大位移的影响程度存在较大差异，对侧向由大到小为：铲尖段土壤、耕作层、圆弧段犁底层、表层，对耕作方向由大到小为：耕作层、铲尖段土壤、圆弧段犁底层、表层。

3.3　土壤扰动效果分析

3.3.1　土壤膨松度和扰动系数

深松后土壤扰动的坑形和垄形截面轮廓如图 14 所示。根据深松作业质量评定指标，深松作业后的土壤膨松度应在 10% ~40% 之间，土壤扰动系数应不小于 50%[19]。由式（1）、（2）计算出土壤膨松度和土壤扰动系数的仿真值和试验值及其相对误差，如表 3 所示。

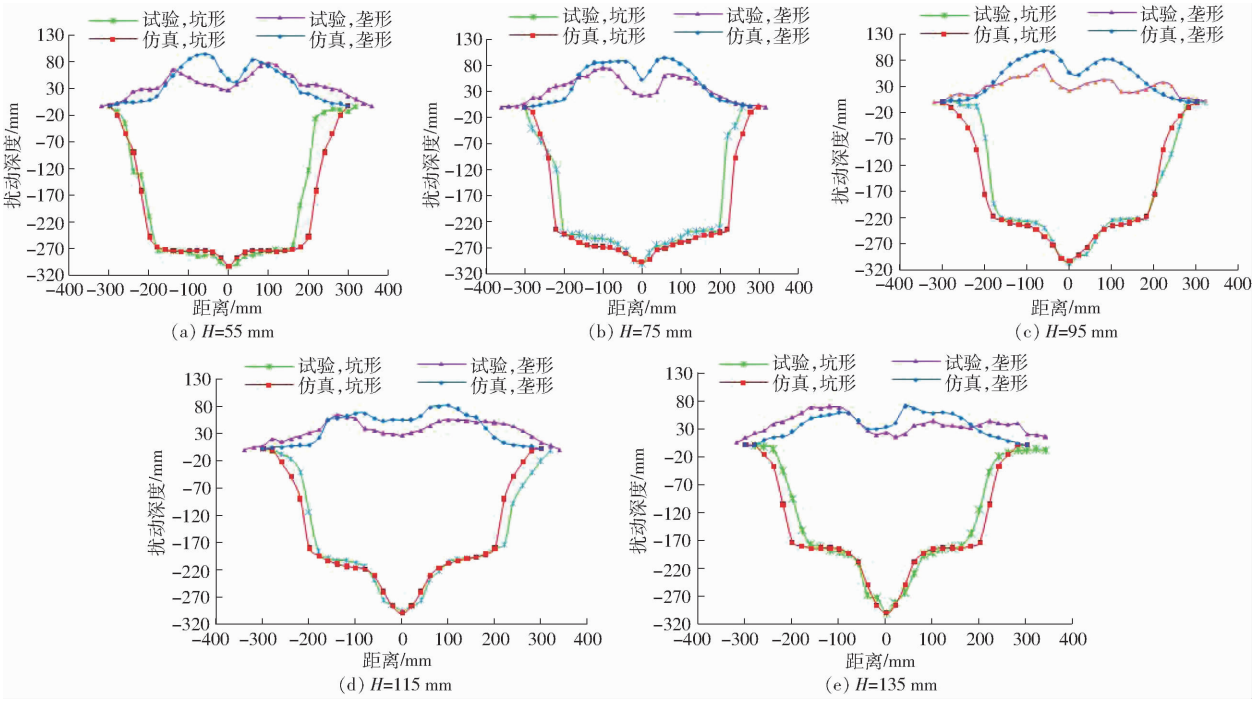


图 14 翼铲安装高度对深松扰动轮廓的影响

Fig. 14 Effects of mounting heights of wing on soil disturbance profiles

表 3 土壤膨松度和土壤扰动系数仿真与试验结果

Tab. 3 Simulated and experimental soil looseness and disturbance coefficient %

H/mm	土壤膨松度			土壤扰动系数		
	仿真值	试验值	相对误差	仿真值	试验值	相对误差
55	16.40	14.22	15.34	72.57	62.92	15.34
75	16.62	14.38	15.58	73.92	69.74	5.98
95	16.04	13.92	15.25	62.49	61.64	13.62
115	14.27	13.33	7.07	59.03	59.71	11.52
135	14.43	13.72	5.17	56.52	50.81	11.25

由表 3 可知,随着翼铲安装高度增加,土壤膨松度呈现先增大再减小、后增大的趋势,在翼铲安装高度较大时(115、135 mm)土壤膨松度相对较小。土壤扰动系数呈现先增大后减小的变化趋势,在翼铲安装高度为 75 mm 时土壤扰动系数最大。另外,不同翼铲安装高度下土壤膨松度和土壤扰动系数的试验值和仿真值的平均误差分别为 11.69% 和 11.54%,表明仿真模型能够准确地反映深松过程中土壤的扰动行为。

3.3.2 耕作层和犁底层土壤扰动分析

现有研究表明,减小耕作层、增大犁底层土壤的扰动范围,不仅能够提高土壤的蓄水保墒能力,还能为密植作物提供良好种床[2,21]。为此根据土壤扰动轮廓(图 14)计算了不同翼铲安装高度下耕作层和犁底层土壤扰动面积的试验值、仿真值及其相对误差。由图 15 可知,随着翼铲安装高度增加,耕作层扰动面积变化不大,犁底层扰动面积呈现先增大后减小的趋势,且在翼铲安装高度为 75 mm 时取得最大值,这与 3.2.1 节的结果一致,也说明仿真模型中土壤在耕作过程中的侧向最大位移有助于预测深松铲对不同深度土壤的侧向扰动范围。仿真环境下耕作层土壤及犁底层土壤扰动面积的变化趋势与土槽试验结果高度吻合,各翼铲安装高度下耕作层土壤和犁底层土壤的扰动面积试验值和仿真值的平均误差分别为 5.51% 和 5.45%。

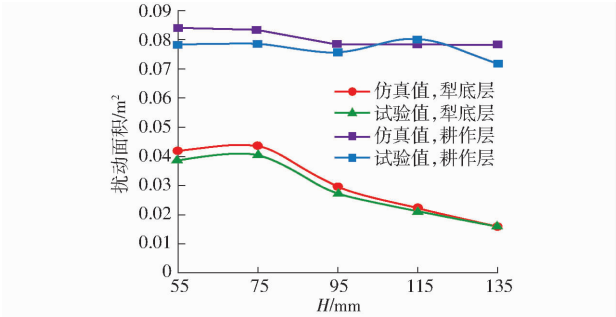


图 15 翼铲安装高度对不同耕层扰动面积的影响

Fig. 15 Effects of mounting heights of wing on soil disturbance area of different layers

3.3.3 土壤纵向堆积角

为反映深松后土壤地表的纵向堆积状态,对试验和仿真的土壤纵向堆积角进行了测量,结果如图 16 所示。

由图 16 可知,不同翼铲安装高度下土壤纵向堆积角仿真值和试验值平均误差为 9.64%,即仿真结果能够准确地反映深松后地表土壤的扰动状态。

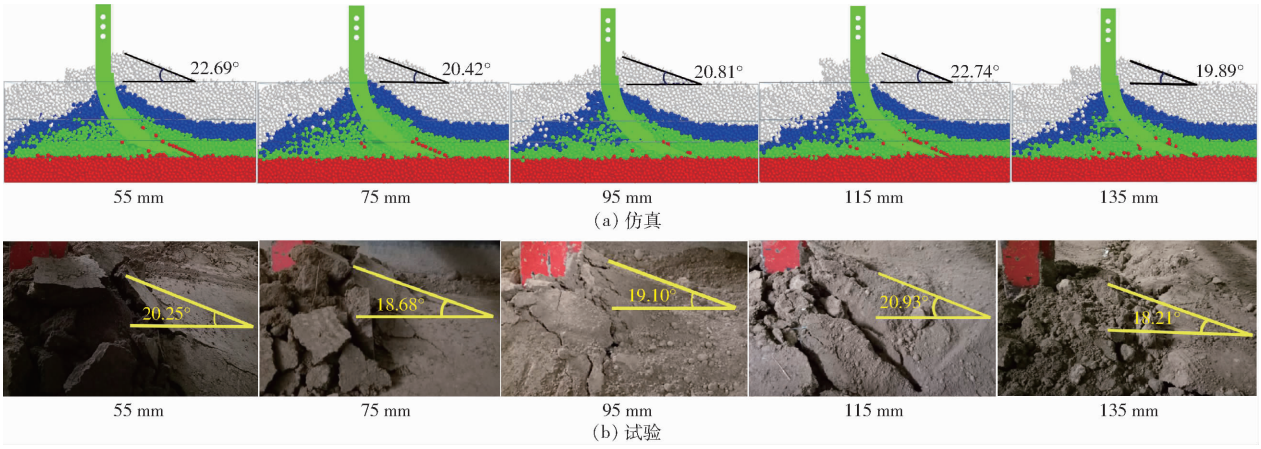


图 16　土壤纵向堆积角

Fig. 16　Accumulation angle of surface soil

3.3.4　土壤破碎程度对比分析

碎土系数、粘结键断裂系数分别反映了耕后和深松铲触土过程中土壤的破碎程度[7,28,35]，采用碎土系数和断裂系数作为土壤破裂程度的定量评价指标。断裂系数 I 的计算公式为[28]

$$I = \frac{N_b}{N_b + N_i} \times 100\% \tag{6}$$

式中　I——断裂系数，%

N_b——扰动区域内土壤粘结键断裂数

N_i——扰动区域内土壤粘结键未断裂数

不同翼铲安装高度下扰动区域内土壤颗粒粘结键断裂情况如表 4 所示。

表 4　扰动区域土壤粘结键断裂情况

Tab. 4　Bond broken data in disturbed zone

翼铲安装高度 H/mm	粘结键断裂数 N_b	完整粘结键数 N_i	断裂系数 I/%
55	11 794	3 864	75.32
75	11 956	3 834	75.72
95	10 205	5 271	65.94
115	9 710	5 540	63.67
135	8 155	7 067	53.57

由图 17 可知，随着翼铲安装高度增加，仿真下的断裂系数和土槽实测碎土系数均呈现先增加后减小的趋势，且断裂系数和碎土系数均在翼铲安装高度为 75 mm 时取得最大值，分别为 75.72% 和 69.49%，表明翼铲安装高度为 75 mm 时土壤的破碎程度最高。其主要原因在于，当翼铲安装高度为 75 mm 或以上时，翼铲对其边缘以外土壤以一定倾角向两侧上方延伸松动；当翼铲安装高度降至 55 mm 时，翼铲对其边缘以外土壤主要产生侧向挤压，而不是有效松土。不同翼铲安装高度下断裂系数和碎土系数的平均误差为 14.20%，说明仿真环境下土壤颗粒的粘结键断裂系数可以从微观角度反映土壤的破碎程度。

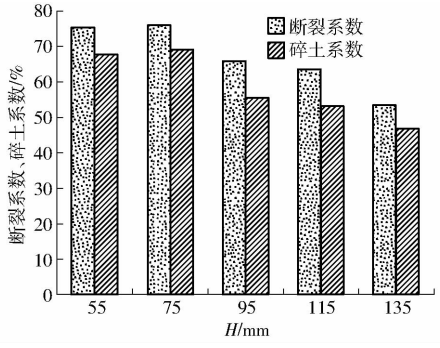


图 17　土壤破碎程度定量对比

Fig. 17　Comparison of measured and simulated soil crushing degrees

3.4　翼铲安装高度对耕作阻力的影响

由图 18 可知，不同翼铲安装高度下水平耕作阻力在 2 012.60 ~ 3 079.61 N 之间变化。随着翼铲安装高度增加，深松铲的水平耕作阻力逐渐减小，当翼铲安装高度从 55 mm 增至 75 mm 时，水平耕作阻力急剧减小。5 个不同翼铲安装高度的深松铲水平耕作阻力的仿真值与试验值的平均误差为 3.87%。

由图 19 可知，不同翼铲安装高度下深松铲不同部位受到的水平耕作阻力有较大差异。深松铲直柄段受到的水平耕作阻力较小，且随翼铲安装高度增加变化不大。铲尖段所受水平耕作阻力随翼铲安装高度增加而减小，其在不同翼铲安装高度下均占深松铲水平耕作阻力的 40% 以上，因此有必要对深松铲的铲尖进行强度校核。深松铲圆弧段（耕作层圆弧段和犁底层圆弧段）所受水平耕作阻力随翼铲安装高度增加先增大后减小，且在翼铲安装高度为 95 mm 时取最大值。不同翼铲安装高度下铲尖段和犁底层圆弧段受到的水平耕作阻力占深松铲的 90% 以上；同时，随着翼铲安装高度增加，铲尖段和犁底层圆弧段受到的水平耕作阻力逐渐减小，一方面，由于翼铲安装高度越大，耕作过程中翼铲切削和

抬升的犁底层土量越少,则受到的水平耕作阻力越小;另一方面,由于翼铲安装在铲尖和铲柄之后,翼铲安装高度越大,在铲尖松动范围内需要翼铲进行二次疏松的土壤越多,松土范围扩大得越小[7],从而受到的水平耕作阻力越小。因此,优化铲尖、铲柄和翼铲的几何结构,加强翼铲与铲柄及铲尖安装位置的适应性研究是圆弧形带翼深松铲减阻降耗的关键。

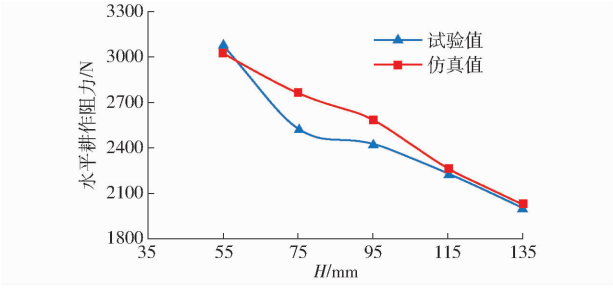


图 18 翼铲安装高度对水平耕作阻力的影响

Fig. 18 Effect of mounting heights of wing on resistance

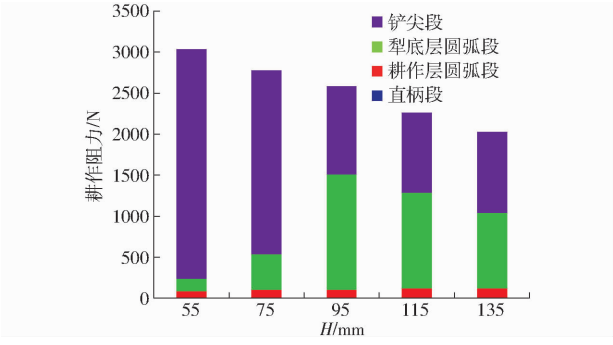


图 19 翼铲安装高度对深松铲各段水平阻力的影响

Fig. 19 Effect of mounting heights of wing on resistance of different sections of subsoiler

4 结论

(1)翼铲安装高度的变化对耕作层土壤的侧向扰动范围影响不明显。随着翼铲安装高度的增加,犁底层土壤的扰动面积呈现先增大后减小的趋势,当翼铲安装高度为 75 mm 时,犁底层土壤的扰动面积最大。适当降低翼铲安装高度有利于增大犁底层土壤的扰动面积,从而提高土壤的蓄水保墒能力。

(2)翼铲安装高度变化直接影响耕作时不同深度土壤在不同方向的位移,进而影响不同深度土壤的侧向扰动范围、实际竖直抬升程度和深松铲用于扰动土壤的实际功耗。翼铲安装高度对土壤在不同方向最大位移的影响程度由大到小依次为:侧向、耕作方向、竖直方向,对不同深度土壤竖直方向最大位移的影响程度相似,对侧向和耕作方向最大位移的影响程度存在较大差异,对侧向的影响由大到小依次为:铲尖段土壤、耕作层、圆弧段犁底层、表层,对耕作方向的影响由大到小依次为:耕作层、铲尖段土壤、圆弧段犁底层、表层。

(3)离散元仿真能够准确模拟深松土壤的扰动过程。仿真与试验获取的土壤扰动截面轮廓形状基本吻合。随着翼铲安装高度的增加,土壤膨松度呈现先增大再减小、后增大的趋势,土壤扰动系数呈现先增大后减小的趋势;土壤断裂系数和碎土系数呈现先增加后减小的趋势,且均在翼铲安装高度为 75 mm 时最大,分别为 75.72% 和 69.49%。5 个不同翼铲安装高度下土壤膨松度、土壤扰动系数、土壤纵向堆积角、碎土系数的仿真值和试验值的平均误差分别为 11.69%、11.54%、9.64%、14.20%。

(4)翼铲安装高度对水平耕作阻力具有重要影响。随着翼铲安装高度增加,水平耕作阻力逐渐减小,翼铲安装高度从 55 mm 增加到 75 mm 时水平耕作阻力急剧减小;不同翼铲安装高度下深松铲铲尖和犁底层圆弧段所受水平耕作阻力为深松铲水平耕作阻力的主要来源(90% 以上),其随翼铲安装高度增大而减小;优化铲尖、铲柄和翼铲的几何结构,加强翼铲与铲柄及铲尖安装位置的适应性研究,是圆弧形带翼深松铲减阻降耗的关键。

在本试验条件下,综合考虑翼铲深松土壤的侧向扰动范围、土壤膨松度、土壤扰动系数、土壤纵向堆积角、土壤破碎程度和耕作阻力等,建议圆弧形深松铲翼铲安装高度为 75 mm。

参 考 文 献

1 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180401&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001.
HE Jin,LI Hongwen,CHEN Haitao,et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):1 - 19. (in Chinese)

2 HANG C,GAO X,WANG B,et al. Optimization of the wing parameters for a winged subsoiler [J]. Applied Engineering in Agriculture,2017,33(3):313 - 319.

3 LI B,LIU F,MU J,et al. Distinct element method analysis and field experiment of soil resistance applied on the subsoiler [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2014,7(1):54 - 59.

4 张强,张璐,于海业,等. 复合形态深松铲耕作阻力有限元分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):61 - 65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120812&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.

issn. 1000-1298. 2012. 08. 012.
ZHANG Qiang, ZHANG Lu, YU Haiye, et al. Finite element analysis and experiment of soil resistance of multiplex-modality subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 61 – 65. (in Chinese)
5 崔涛, 史智栋, 杨丽, 等. 弹簧预紧力可调式振动深松机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 96 – 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016s015&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.015.
CUI Tao, SHI Zhidong, YANG Li, et al. Design and experiment of vibration subsoiler with adjustable spring pre-tightening force[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 96 – 102. (in Chinese)
6 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1 – 13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170701&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.001.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1 – 13. (in Chinese)
7 杭程光, 黄玉祥, 高喜杰, 等. 深松铲铲尖对土壤扰动过程及效果的试验与分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 285 – 291.
HANG Chengguang, HUANG Yuxiang, GAO Xijie, et al. Experiment and analysis of the subsoiler tine shape to the soil disturbance process and effect[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 285 – 291. (in Chinese)
8 SPOOR G, GODWIN R J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1978, 23(3): 243 – 258.
9 李洪文, 高焕文, 王兴文. 可调翼铲式深松机的试验研究[J]. 北京农业工程大学学报, 1995, 15(2): 33 – 39.
LI Hongwen, GAO Huanwen, WANG Xingwen. Experiment study on subsoiler with adjustable wine[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1995, 15(2): 33 – 39. (in Chinese)
10 高焕文, 李洪文, 王兴文. 旱地深松试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(4): 126 – 133.
GAO Huanwen, LI Hongwen, WANG Xingwen. A testing study of dryland subsoiling[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1995, 13(4): 126 – 133. (in Chinese)
11 GODWIN R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(2): 331 – 340.
12 夏雷. 基于离散元法的深松铲铲翼优化设计及试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
13 郭志军, 周德义, 周志立. 几种不同触土曲面耕作部件的力学性能仿真研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 71 – 75.
GUO Zhijun, ZHOU Deyi, ZHOU Zhili. Simulation research on mechanical performances of several kinds of cultivating components with different soil-engaging surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 71 – 75. (in Chinese)
14 陈坤, 胡晓丽, 赵新子, 等. 国内外深松铲研究现状与展望[J]. 农业与技术, 2010, 30(3): 30 – 34.
CHEN Kun, HU Xiaoli, ZHAO Xinzi, et al. Research status and prospect of international subsoiler[J]. Agriculture & Technology, 2010, 30(3): 30 – 34. (in Chinese)
15 郭志军, 周志立, 张毅, 等. 土壤耕作部件仿生优化设计研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2009, 39(4): 720 – 728.
GUO Zhijun, ZHOU Zhili, ZHANG Yi, et al. Study on soil-engaging components optimization[J]. Science in China: Technical Science, 2009, 39(4): 720 – 728. (in Chinese)
16 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80 – 88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80 – 88. (in Chinese)
17 HANG C, YAO Y, HUANG Y, et al. High-speed photographic analysis of the soil disturbance affected by subsoiler rake angle[J]. CIGR Journal, 2017, 19(2): 42 – 50.
18 杭程光, 黄玉祥, 李伟, 等. 深松耕作阻力的影响因素分析与减阻策略[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 202 – 208.
HANG Chengguang, HUANG Yuxiang, LI Wei, et al. Influence factors and reduction strategies of subsoiling tillage resistance[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(11): 202 – 208. (in Chinese)
19 张军昌, 闫小丽, 林泽坤, 等. 自激式振动深松整地机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 44 – 49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160907&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.007.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, LIN Zekun, et al. Design and experiment of self-exciting vibration deep-loosening and sub-soiling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 44 – 49. (in Chinese)
20 杭程光. 基于离散元方法的深松土壤扰动行为研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
21 HANG C, GAO X, YUAN M, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168: 73 – 82.
22 CHEN Y, MUNKHOLM L J, NYORD T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 34 – 41.
23 COETZEE C J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape[J]. Powder Technology, 2016, 297: 50 – 70.
24 CHEN Z, YU J, XUE D, et al. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element

method[J]. Powder Technology,2018,328:167 - 183.
25 方会敏,姬长英,CHANDIO F A,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):22 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004.
FANG Huimin,JI Changying,CHANDIO F A,et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):22 - 28. (in Chinese)
26 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):62 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
ZHENG Kan,HE Jin,LI Hongwen,et al. Research on polyline poil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):62 - 72. (in Chinese)
27 UCGUL M,SAUNDERS C,MILTON F J. Discrete element modelling of top soil burial usinga full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering,2017,160:140 - 153.
28 丁启朔,任骏,ADAM B E,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005.
DING Qishuo,REN Jun,ADAM B E,et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):38 - 48. (in Chinese)
29 曹秀振. 基于离散元法的免耕播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
30 ASAF Z,RUBINSTEIN D,SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research,2007,92(2):227 - 242.
31 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2012.
32 ZENG Z,CHEN Y,ZHANG X. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2017,143:130 - 138.
33 GURSOY S,CHEN Y,LI B. Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths[J]. Biosystems Engineering,2017,161:1 - 13.
34 SOLHJOU A,FIELKE J M,JMA D. Soil translocation by narrow openers with various rake angles [J]. Biosystems Engineering,2012,112(1):65 - 73.
35 杨有刚,张宏,冯涛,等. 土壤浅深松联合松耕机设计和浅松土试验[J]. 机械工程学报,2012,48(19):163 - 168.
YANG Yougang,ZHANG Hong,FENG Tao,et al. Topsoil and subsoil combined cultivator and top-soiling experiment[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(19):163 - 168. (in Chinese)

(上接第 102 页)

15 LAWINSKA K, REMIGIUSZ M. Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing,2017, 53(2):812 - 828.
16 IVANOV N M, FEDORENKO I Y,ZAKHAROV S E,et al. Holesevaluating grain feed at separation by planetary cylindrical sieve with round holes[J]. Siberian Bulletin of Agricultural Science,2017,47(5):72 - 79.
17 周学建,袁华杰,闫卫红,等. 联合收获机吸杂口偏置型旋风分离清选装置试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):80 - 85,159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.013.
ZHOU Xuejian,YUAN Huajie,YAN Weihong, et al. Performance experiment on cyclone separating device based on off-centered inlet scoop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):80 - 85,159. (in Chinese)
18 师清翔,马萌,闫卫红,等. 双扬谷器旋风分离清选系统试验与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):124 - 128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20141119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.019.
SHI Qingxiang,MA Meng,YAN Weihong,et al. Two-stage winnower cyclone separating cleaning system performance testing and optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(11):124 - 128. (in Chinese)
19 杨作梅,孙静鑫,郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(23):253 - 260.
YANG Zuomei, SUN Jingxin, GUO Yuming. Effect of moisture content on compression mechanical properties and frictional characteristics of millet grain [J] . Transactions of the CSAE,2015,31(23):253 - 260. (in Chinese)
20 薛然. 花生荚果圆筒筛筛分特性研究与参数优化[D]. 北京:中国农业科学院,2015.
21 尹健,黄年月,吴兵,等. 微型水稻联合收割机新型圆筒筛设计研究[J]. 现代机械,2011(3):62 - 64,72.