

深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验

黄玉祥^{1,2} 杭程光¹ 苑梦婵¹ 汪博涛¹ 朱瑞祥^{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: 分析深松土壤的扰动行为是深入研究深松铲-土壤互作用规律的基础。采用离散元方法建立深松工作模型, 结合高速摄影技术及室内土槽试验, 对比分析了不同位置深松土壤的微观运动及宏观扰动行为。结果表明, 土壤的扰动范围随土壤与深松铲之间距离的增大而减小; 不同位置土壤的扰动范围由大到小依次为: 浅层、中层、深层; 在深松范围内, 土壤的运动速度随土壤与深松铲之间距离的增大而逐渐减小, 等速度土壤颗粒的分布曲线与深松铲的铲柄弧线基本吻合; 不同深度土层土壤颗粒在不同方向上的平均运动速度为: 在 x 方向上由大到小依次为浅层、中层、深层, 在 y 方向上由大到小依次为中层、浅层、深层, 在 z 方向上由大到小依次为深层、中层、浅层; 离散元仿真能够较准确模拟深松土壤的扰动行为, 仿真与试验获取的土壤扰动截面轮廓形状基本吻合, 土壤膨松度、土壤扰动系数的仿真值与试验值的相对误差分别为 13.21%、17.38%; 地表土壤纵向堆积角的仿真值与试验值的相对误差为 9.42%。

关键词: 深松; 土壤扰动; 离散元; 高速摄影; 试验

中图分类号: S222.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0080-09

Discrete Element Simulation and Experiment on Disturbance Behavior of Subsoiling

Huang Yuxiang^{1,2} Hang Chengguang¹ Yuan Mengchan¹ Wang Botao¹ Zhu Ruixiang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The study on disturbance behavior of subsoiling is the basis to understand the subsoiler – soil interaction law deeply. A working model of subsoiling was established by using discrete element method. In addition, with the aid of high-speed photography technique and the indoor soil-bin test, the micro movement and the macro disturbance behavior of the soil at different positions were compared and analyzed. The results showed that, the disturbance range of soil was decreased with the increasing distance between the soil and the subsoiler, and at different locations, the disturbance range from large to small was the shallow layer, the middle layer and the deep layer. In the subsoiling range, the movement speed of the soil was decreased with the increase of the distance between the soil and the subsoiler. The distribution curves of the same-speed soil particles were basically consistent with the curves of the subsoiler. The average velocities of soil particles in different depths and different directions were measured from large to small as follows: the shallow layer, the middle layer, the deep layer in x direction; the middle layer, the shallow layer, the deep layer in y direction; and the deep layer, the middle layer, the shallow layer in z direction. The discrete element simulation could accurately simulate the disturbance behavior of subsoiling, and the shape of soil disturbance section of simulation and obtained from experiment were basically matched. The relative error of the soil bulkiness and soil disturbance coefficient between simulation and experiment were 13.21% and 17.38%, respectively. The

收稿日期: 2016-04-12 修回日期: 2016-04-29

基金项目: 陕西省科技攻关项目(2013K02-11)、杨凌示范区科技计划项目(2014NY-29)和2015年西北农林科技大学重点项目(Z101021501)

作者简介: 黄玉祥(1980—),男,副教授,博士,主要从事土壤-机器系统研究, E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

relative error between the simulated longitudinal accumulation angle of the surface soil and that of experiment was 9.42% .

Key words: subsoiling; soil disturbance; discrete element; high-speed photography; experiment

引言

识别深松土壤的扰动行为有助于理解深松部件与土壤的互作用规律,从而为设计和优化深松机具奠定基础。深松土壤的扰动过程是一个复杂的系统工程,受到土壤空间分布差异、耕作机械动力学、土壤破碎及运动过程复杂性等诸多因素的影响^[1-2],采用传统的试验方法难以准确描述微观土壤的扰动行为。

随着现代科学技术的发展,国内外学者陆续将有限元方法应用于深松过程的研究中,取得了良好的效果^[3-6]。然而,有限元方法主要用于均匀、单一材料的连续体问题研究,难以准确描述耕作过程中土壤颗粒的扰动行为及机器-土壤系统的互作用过程^[7-8]。近年来,离散元方法被广泛应用于耕作过程研究^[9-10]。该方法允许颗粒材料间存在接触的形成和破坏,能够有效模拟颗粒材料和研究材料间的微观、宏观变形,国内外学者也对其模拟耕作过程的准确性进行了验证^[11-12]。例如,LI 等^[13-14]应用 PFC 3D 软件,分析了深松过程中机具速度、深松深度对土壤受力变化的影响;KORNEL 等^[15]采用离散元方法研究了速度对翼形铲耕作阻力及扰动效果的影响;LI 等^[16]以棕熊趾爪为原型,研究了仿生深松部件入土角、耕作深度等因素对耕作阻力及土壤扰动效果的影响。现有研究侧重于从宏观方面分析深松土壤的整体扰动行为,缺乏对不同位置土壤扰动行为的微观研究。

为此,本文以箭形深松铲为对象,综合利用离散元方法、高速摄影技术及土槽试验对深松土壤的扰动行为进行研究,重点探究不同位置深松土壤的微观运动及宏观扰动,深入理解深松土壤扰动行为,为深松机具的设计与优化提供决策依据。

1 室内土槽及高速摄影试验

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数字化土槽试验台内开展。土壤为壤土,粒状结构,母质为次生黄土,壤质粘土,属于黄土母质上发育的农业土壤^[17]。耕层土壤干容重为 1.346 g/cm³^[18]。

试验以箭形深松铲为研究对象,铲尖侧翼张角为 115°,铲柄为圆弧形(仿制 JB/T 9788—1999《深松铲和深松铲柄》所规定的圆弧形深松铲柄),铲柄切土刃角为 60°,铲柄厚度为 30 mm,深松结构简图

如图 1 所示。图中,铲柄高度 $h = 770$ mm,铲柄长度 $b = 80$ mm,铲尖长度 $S = 170$ mm,铲柄曲率半径 $R = 305$ mm,入土角 $\alpha = 23^\circ$ 。

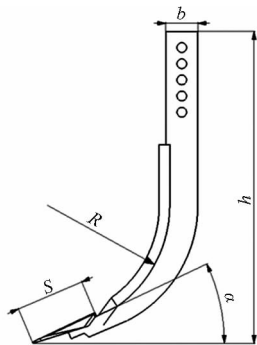


图 1 深松铲纵剖面结构参数示意图
Fig. 1 Schematic diagram of subsoiler profile and its structural parameters

1.2 试验过程

土槽试验时,根据大田土壤环境参数,采用分层处理的方法制备土槽土壤,以保证土槽内的土壤条件符合大田土壤环境。首先,取出距土槽表面 20 cm 土层的土壤,使用 1GQN-125 型旋耕机(中国一拖集团公司,耕深 12~16 cm)将剩余土壤旋耕 3 遍,再采用 HCD80 型振动冲击夯(济宁欧科工矿设备有限公司,冲击频率:420~650 次/min)对其进行压实;其次,在压实的土层表面喷洒适量自来水,随后均匀回填挖出的部分表层土壤(约 10 cm),渗透 2 d 后用旋耕机将表层土壤全面松碎、打匀,并用滚子压实;最后,对处理后的表土再度喷洒适量自来水,均匀回填剩余土壤,并用辊子压实。土槽土壤平均含水率为 15.7%,内摩擦角为 17.04°,内聚力为 11.75 kPa;20 cm 以内土层深度内的土壤硬度为 5~10 kg/cm²,20 cm 以下土层深度内的土壤硬度为 10~20 kg/cm²。土槽土壤制备过程如图 2 所示。

试验在耕深为 300 mm、速度为 3 km/h 条件下

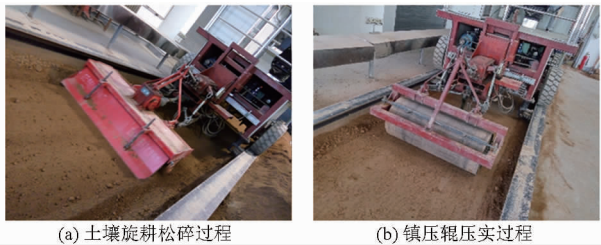


图 2 土槽土壤旋耕松碎与镇压辊压实过程图
Fig. 2 Crushing soil with rotary cultivator and compacting soil with compaction roller in soil bin

进行,为保证试验过程的一致性,取前 3 m 为土槽车加速区,后 3 m 为减速区,中间 20 m 为有效试验距离。试验过程中,采用 I - SPEED TR 型高速摄影机,以 750 帧/s 的时间分辨率对深松过程进行记录,高速摄影机垂直于深松铲前进方向,镜头与水平面之间的垂直距离为 400 mm,夹角为 35°,与深松铲工作点的水平距离为 1 750 mm,其布置方位如图 3 所示。



图 3 高速摄影机机位布置图
Fig. 3 Position of high-speed camera
1. 高速摄影机 2. 补光设备 3. 控制器

深松结束后,以深松带横向中心与未深松地表的交点为坐标原点,以未深松地表以及坐标原点的垂线分别作为水平轴与垂直轴,并沿水平轴两侧间隔 2 cm 测量地表土垄高度坐标;然后去除深松带虚土^[3,18],间隔 2 cm 测量深松带坑形深度坐标。为保证试验结果的准确性,垄形、坑形坐标各取样 3 组(间距 2 m),以各坐标的平均值绘制土壤垄形、坑形截面轮廓曲线。使用 i - SPEED Suite 软件对高速摄影记录过程进行重现,获取特定位置的静态图像,分析深松铲工作对土壤扰动过程的影响。

2 EDEM 仿真分析

2.1 深松铲建模

为保证仿真分析的准确性,按照 1:1 的比例,采用 Pro/E 4.0 建立试验用深松铲(图 1)的三维结构模型,并保存为 *.step 格式。

2.2 土壤颗粒建模

建立准确的土壤颗粒模型是保证仿真结果有效性的基础。现有研究表明,土壤颗粒的基本结构主要包括球形块状颗粒、核状颗粒、柱状颗粒^[19]。由于 EDEM 自带的颗粒单元为球形结构,不能满足建立土壤模型的需求,因此采用 SoildWorks 建立块状、核状、柱状土壤结构模型,如图 4 所示。为保证仿真与实际土壤的一致性,设置 EDEM 球形填充单元的半径为 3 mm。

2.3 EDEM 建模

将构建好的土壤颗粒结构模型及深松铲模型导

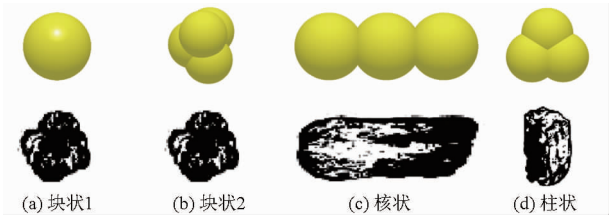


图 4 土壤颗粒模型
Fig. 4 Model of soil particles

入 EDEM 软件中,采用 EDEM 中的球形单元对土壤颗粒模型进行填充;为满足深松作业要求,在 EDEM 中建立土槽模型,设置其基本尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×1 000 mm×400 mm;将深松铲模型导入 EDEM 中,设定深松深度为 300 mm,前进速度为 0.83 m/s(3 km/h)。仿真开始前,深松铲位于土槽的一端。EDEM 仿真模型如图 5 所示。为提高仿真土壤与实际土壤的一致程度,设置土壤颗粒大小呈正态分布。EDEM 模型中,颗粒 1、颗粒 2、颗粒 3、颗粒 4 的数量分别为 42 000、24 000、32 000、26 000 个。

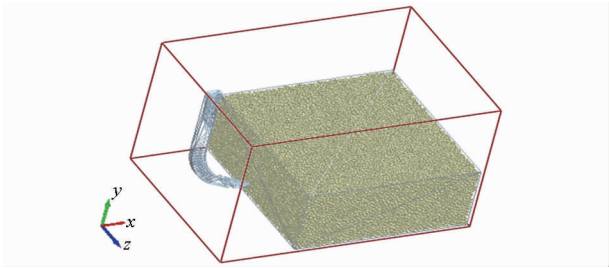


图 5 EDEM 仿真模型
Fig. 5 Simulation model of EDEM

离散元仿真参数主要包括材料参数与接触参数^[1]。材料参数包括土壤、深松铲(65Mn)的密度、泊松比以及剪切模量等,其中土壤密度通过实际测量获取,65Mn 的密度、泊松比以及土壤的泊松比、剪切模量等参数参照文献[4, 20]的数据,65Mn 的剪切强度计算式为

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$
 (1)

式中 G——材料剪切模量,Pa
E——材料弹性模量,Pa,65Mn 的弹性模量为 196.2 GPa(参考《机械设计手册》)
 ν ——材料泊松比

接触参数主要包括土壤-土壤、土壤-65Mn 间的恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数,其中土壤-土壤、土壤-65Mn 间的恢复因数、静摩擦因数主要参照文献[20];土壤-65Mn、土壤-土壤间的动摩擦因数分别通过斜板试验、休止角试验获取。仿真参数如表 1 所示。

基于深松铲建模与仿真建模的差异,以仿真过程中的坐标系为基础,对颗粒的三维运动方向作如

表 1 离散元模型的基本参数

Tab.1 Basic parameters of discrete element model

参数	数值
土槽尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 000×1 000×400
深松铲速度 $v/(m\cdot s^{-1})$	0.83
耕深 h/mm	300
土壤颗粒密度 $\rho_1/(kg\cdot m^{-3})$	1 346
土壤颗粒泊松比 ν_1	0.4
土壤颗粒剪切模量 G_1/Pa	1×10^6
65Mn 密度 $\rho_2/(kg\cdot m^{-3})$	7 830
65Mn 泊松比 ν_2	0.35
65Mn 剪切模量 G_2/Pa	7.27×10^{10}
土壤-土壤间恢复系数 e_1	0.2
土壤-土壤间动摩擦因数 e_2	0.3
土壤-土壤间静摩擦因数 e_3	0.4
土壤-65Mn 间恢复系数 f_1	0.3
土壤-65Mn 间动摩擦因数 f_2	0.05
土壤-65Mn 间静摩擦因数 f_3	0.5
填充单元半径 r/mm	3
土壤颗粒数目 n	124 000
重力加速度 $g/(m\cdot s^{-2})$	9.81
仿真时间 t/s	10

下说明:确定水平运动发生在 x 轴方向,垂直运动发生在 y 轴方向,侧向运动发生在 z 轴方向,深松铲沿 x 轴正方向运动。

2.4 土壤分布状态

为分析不同深度土层土壤的运动及扰动差异,将土壤设置为浅层、中层、深层以及深松铲下层 4 层结构,每层深度为 100 mm,并在不同深度土层设置特定的土壤颗粒,如图 6a 所示。为了解地表下土壤的扰动行为,对土壤模型沿铲前进方向与垂直铲前进方向进行剖视,其中图 6b 为土壤分布纵向截面,主要用于分析沿铲前进方向土壤的扰动行为;图 6c 为土壤分布横向截面,主要用于研究垂直于深松铲前进方向上土壤的扰动行为。

3 结果与讨论

3.1 土壤扰动状态分析

3.1.1 土壤扰动机理分析

传统试验方法难以明确深层土壤的扰动过程,为明确不同深度土壤扰动状态随深松过程的变化情

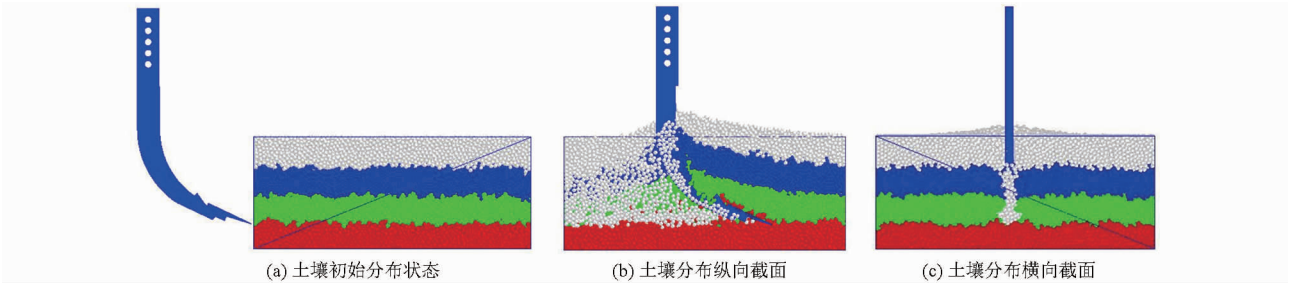


图 6 土壤分布状态

Fig.6 Distributions of soil

况,利用离散元方法,从土壤的纵向、横向剖面对不同深度土层土壤的扰动状态进行分析,并采用高速摄影试验对浅层土壤的扰动过程与仿真结果进行了对比。当深松铲位于不同位置时,土壤的扰动状态如图 7 所示,其中 0.2 s 时深松铲铲尖完全进入土壤,0.5 s 时深松铲完全进入土壤,0.8 s 与 1.1 s 时深松铲位于深松行程的中间段。

由图 7 可知,深松过程中,浅层土壤在不同时刻的扰动范围最大,中层土壤次之,深层土壤最小;土壤在纵向与横向截面的扰动范围随深松铲运动逐渐增大。当深松铲铲尖完全进入土壤时(0.2 s),深层土壤受到铲尖的剪切力与挤压力向上抬升,并对中层与浅层土壤产生扰动作用,使浅层、中层土壤产生较小位移,在地表形成轻微隆起。当深松铲完全进入土壤时(0.5 s),在深松铲的切削作用下,土壤向前上方运动,增加了土壤的纵向扰动范围(图 7a、7b);在铲尖侧翼与铲柄切土刃口的挤压作用下,土壤沿深松铲前进方向向两侧移动,增大了土壤的横

向扰动范围,其中浅层土壤扰动范围的增大量最大,中层次之(图 7c)。随着深松过程的持续(0.8 s 与 1.1 s),当土壤某一断面的剪切力达到抗剪强度极限时,形成土堡裂纹,土壤发生剪切破坏,在地表形成扇形的土壤破碎轮廓(图 7a),且该轮廓随深松铲的前进沿垂直于深松铲侧翼表面的方向向两侧逐渐扩大(图 7c),破碎的土壤在铲柄切土刃的剪切作用、直铲柄段的挤压作用以及土壤之间的相互扰动作用下,进一步破裂、松碎(图 7a)。此时,地表土壤的运动较为复杂,一部分土壤在深松铲的作用下继续向前、向两侧运动,另一部分受到土壤与铲尖之间摩擦力的作用,沿铲尖侧翼、铲柄切土刃口方向向后运动,并在重力的作用下向下运动,回填深松形成的垄沟(图 7a、7b)。

3.1.2 不同位置土壤扰动状态分析

为探究深松铲对不同深度、不同位置土壤的扰动情况,在图 7 的基础上,对 1.1 s(深松铲位于深松行程中间)位置的土壤进行了纵向与横向的剖视,

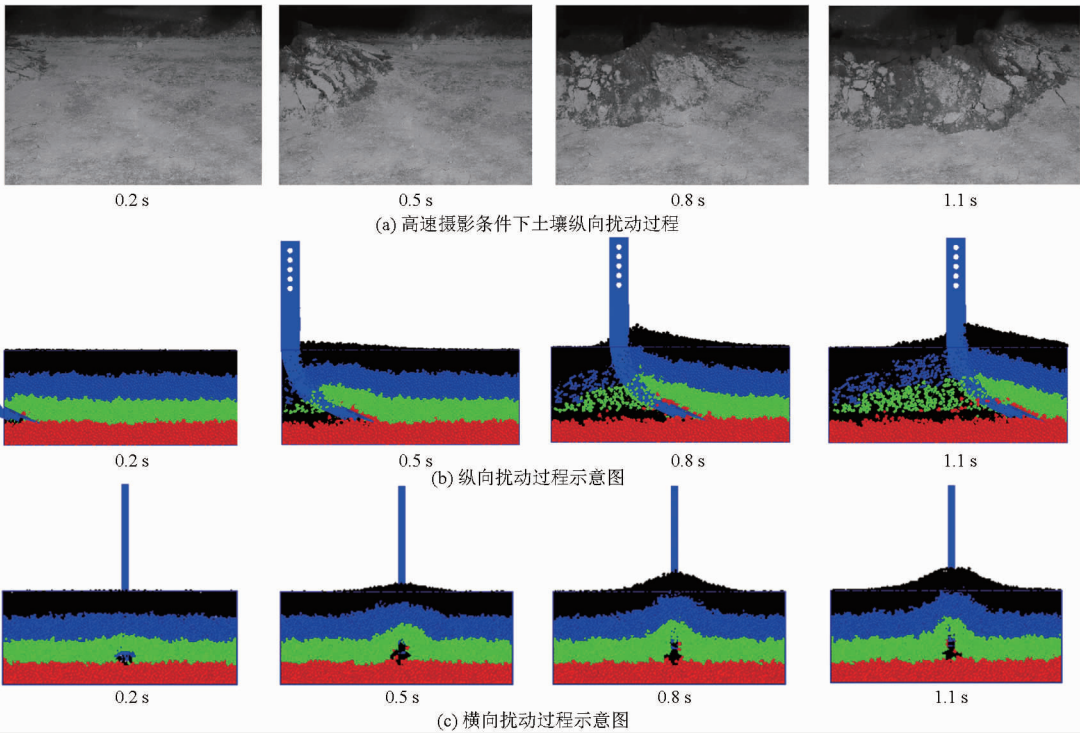


图 7 土壤扰动过程分析

Fig. 7 Analysis of soil disturbance process

剖视的 0 mm 位置为深松铲柄的横向与纵向中心, 根据深松铲对纵向、横向土壤的扰动情况, 选择纵向剖视间隔为 50 mm、横向剖视间隔为 100 mm, 不同位置、不同深度土壤的扰动状态如图 8 所示。

由图 8a 可知, 深松铲对土壤的纵向扰动程度随土壤与深松铲间横向距离的增加逐渐减小。在深松铲范围的横向中心位置(0 mm), 直接与深松铲作用的土壤被深松铲抬升的幅度较大。距深松铲 50 mm 位置, 土壤受到深松铲的作用逐渐减小, 土壤被抬升的高度也随之降低, 其中深层土壤扰动范围的减小程度最大, 中层次之。随着土壤与深松铲间距的增大(100 ~ 200 mm), 深层、中层土壤被抬升的幅度相比

0、50 mm 位置明显降低, 这主要是由于该位置土壤受到深松铲的作用力随土壤与深松铲间距离的增大而减小。

由图 8b 可知, 深松铲对土壤的横向扰动程度随土壤与深松铲间横向距离的增加逐渐减小。深松铲两侧的土壤在铲尖侧翼、铲柄切土刀的剪切与挤压作用下, 沿深松铲前进方向向两侧抬升, 扩大了土壤的横向扰动范围。在铲尖与铲柄接合位置(100 mm), 由于该位置铲尖宽度最大, 土壤受到铲尖的作用力最强, 因此该位置土壤被抬升的幅度最大。随着土壤与深松铲间距的增大(200、300、400 mm), 深松铲将土壤向两侧抬升的幅度随土壤与深松铲之间距离的增

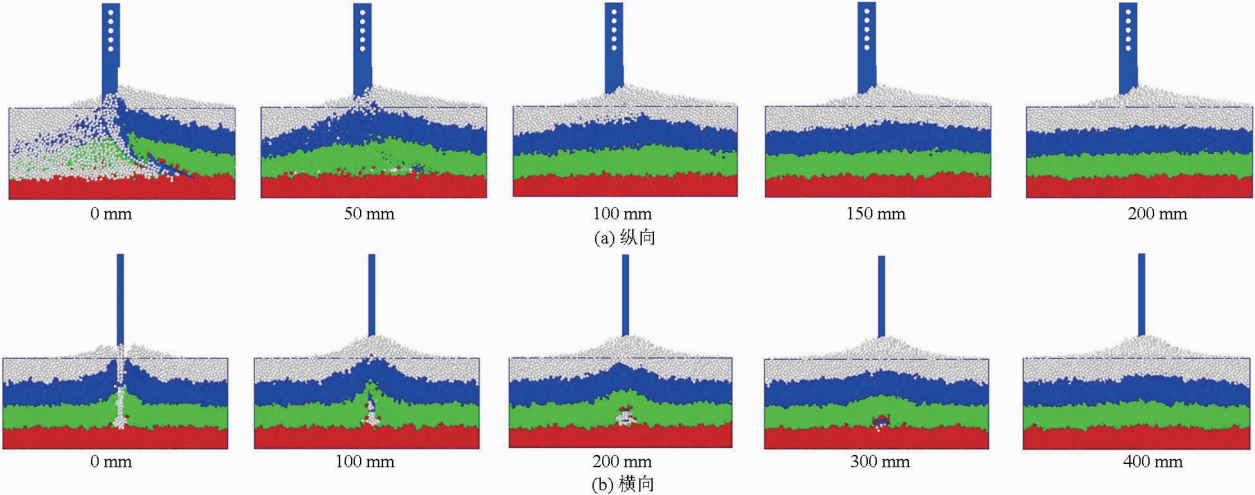


图 8 不同位置土壤扰动状态

Fig. 8 State of soil disturbance at different positions

大逐渐减小,这主要是由于深松铲对土壤的挤压、切削作用以及深层土壤对中层、浅层土壤的挤压作用均随土壤与深松铲间距离的增大而减小,其中深层、中层土壤受到的影响最大。现有研究表明,深松铲的布局方式对土壤的扰动范围及效果具有重要影响^[18],因此确定合理的深松铲布局方式对改善深松土壤的扰动效果具有重要意义。

对比图 8a、8b 可知,浅层、中层、深层土壤的扰动范围随土壤与深松铲之间距离的增大而减小,深松范围内,不同位置土壤的扰动范围由大到小为:浅层、中层、深层。在实际深松过程中,深松铲对表层土壤的过度扰动易增加土壤水分的蒸发量,不利于

保护土壤的墒情,因此需要通过优化现有深松铲的结构参数,降低深松铲对浅层土壤的扰动,增加对中、深层土壤的扰动,使不同深度土壤的扰动范围由大到小为:中层、浅层、深层,从而提高深松土壤的蓄水保墒能力,减少土壤水分的过度蒸发。

3.2 土壤运动状态分析

3.2.1 深松铲位置对土壤整体运动状态的影响

为考察深松范围内,深松铲位置对土壤整体运动状态的影响,选取铲尖入土(0.2 s)、深松铲入土(0.5 s)、深松铲位于深松行程中段(0.8 s)3 个位置,对不同时刻土壤运动速度大小(图 9a)及方向(图 9b)的分布状态进行了对比。

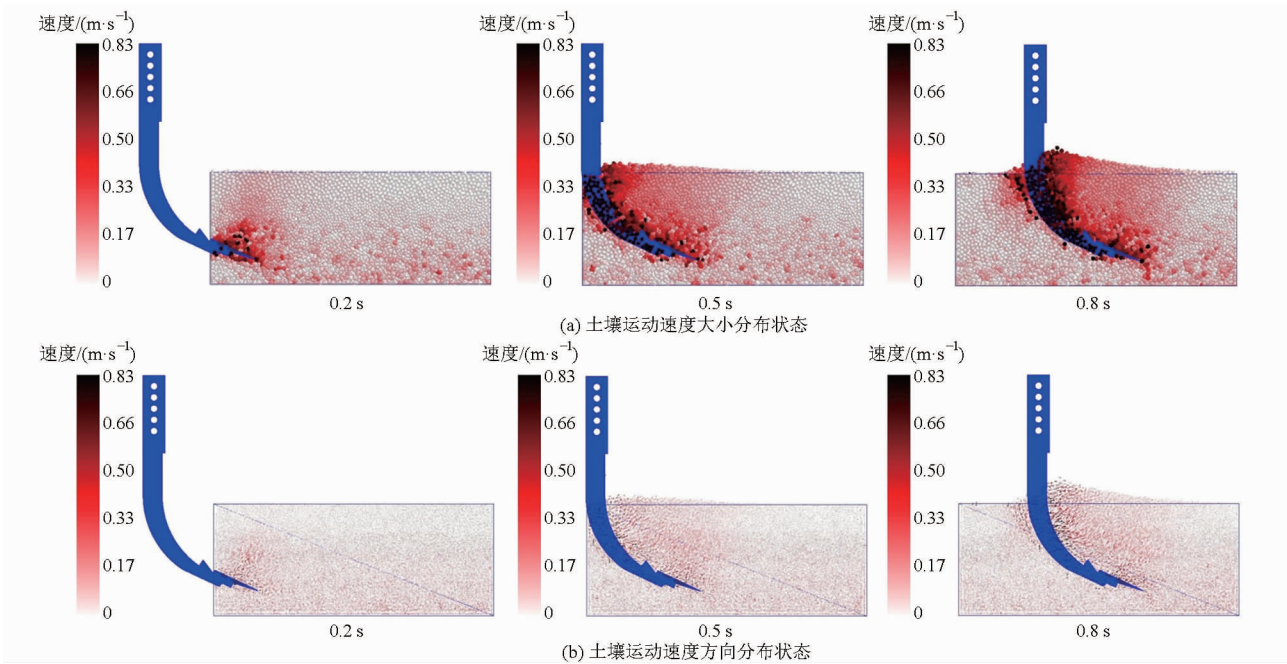


图 9 不同时刻土壤整体运动状态分析

Fig. 9 Analysis of total movement state of soil at different time

由图 9 可知,当深松铲铲尖进入土壤时(0.2 s),深层土壤在铲尖作用下沿垂直于铲尖表面方向向上方及两侧运动,中层土壤在深层土壤的作用下向上抬升;此时,深层土壤的运动速度最大,中层次之,浅层土壤基本不发生运动。当深松铲完全进入土壤时(0.5 s),由图 9a 颜色分布可知,浅层具有运动速度的土壤颗粒最多,中层次之,深层最少;靠近深松铲的土壤,其运动速度最大,等速度土壤颗粒的分布曲线接近深松铲铲柄弧线;此时,深层、中层土壤主要沿垂直于铲尖及铲柄圆弧段方向上方及两侧抬升;浅层土壤在铲柄垂直段的挤压、切削作用以及中、深层土壤的扰动作用下,在向前、向上运动的同时,沿深松铲前进方向向两侧运动。当深松铲处于深松行程中段时(0.8 s),深松铲前方土壤的运动速度大小与方向的分布状态与 0.5 s 差异不大,但由于深松过的土壤形成了较深的垄沟,浅层、中层的部分土壤

以及深松铲后方的土壤在重力的作用下,随着深松铲的前进下落,回填垄沟。对比不同时刻土壤的运动速度大小及其方向分布状态可知,土壤的运动速度随其与深松铲之间距离的增大而逐渐减小,等速度土壤颗粒的分布曲线与深松铲柄的弧线基本吻合。

3.2.2 不同位置土壤运动速度

为进一步说明不同深度土层土壤在不同方向上的运动速度随深松过程的变化情况,获取了浅层、中层、深层 3 层土壤的水平(x 方向)、垂直(y 方向)、侧向(z 方向)的平均运动速度与瞬时最大运动速度,如图 10 所示。

由图 10 可知,不同深度土层土壤的平均运动速度随着深松铲的前进有较大差异。在 x 方向上(图 10a),浅层、中层、深层土壤的平均运动速度分别为 0.012、0.010 5、0.008 6 m/s,不同时刻土壤的

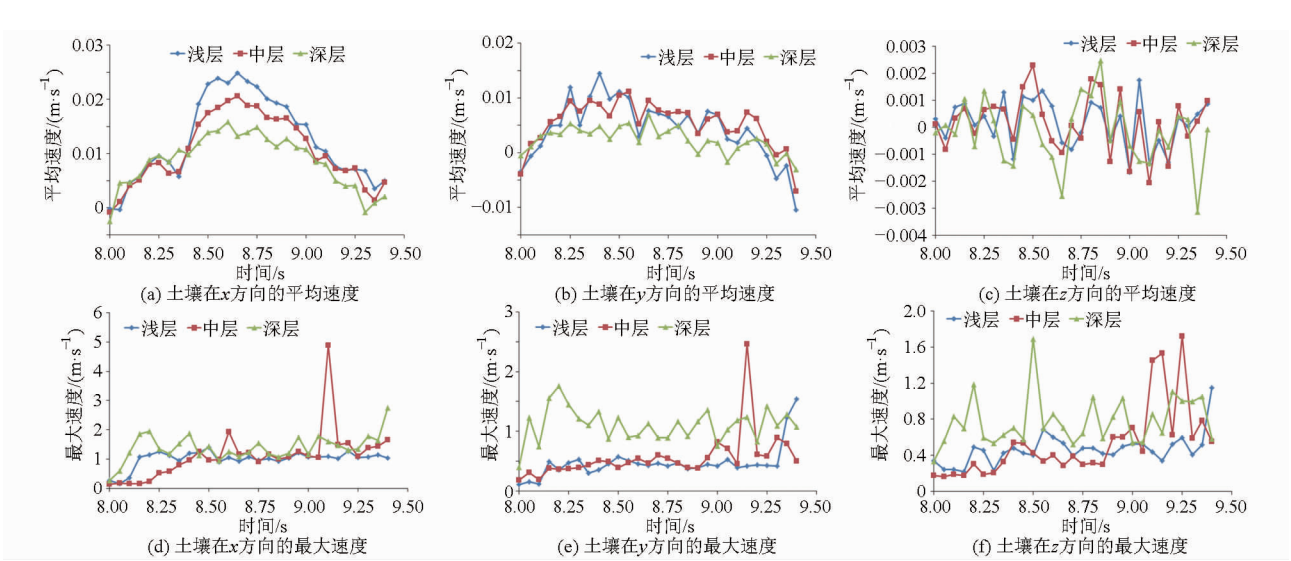


图 10 不同深度土壤的运动速度

Fig. 10 Velocities of soil at different depths

平均运动速度由大到小为:浅层、中层、深层;在 y 方向上(图 10b),浅层、中层、深层土壤的平均运动速度为 0.005 9、0.006 0、0.002 9 m/s,浅层与中层土壤的平均运动速度基本相同,深层土壤的运动速度最小;在 z 方向上(图 10c),浅层、中层、深层土壤的平均运动速度分别为 0.000 78、0.000 87、0.000 93 m/s,深层土壤向两侧运动的平均速度最大、中层次之、浅层最小。不同位置土壤运动速度的变化主要受深松铲剪切、挤压及土壤之间扰动作用差异的影响,试验结果表明,浅层土壤在 x 方向上的受力最大,中层在 y 方向上的受力最大,深层在 z 方向上的受力最大。根据作用力与反作用力关系可知,深松铲直铲柄段在 x 方向、圆弧段在 y 方向、铲尖侧翼在 z 方向上的受力最大,而深松铲各部分的受力与耕作阻力的变化密切相关,因此通过优化深松铲直铲柄段的迎面面积、弧柄形体、铲尖侧翼张角等,能够在一定程度上改善土壤的运动情况,降低深松耕作阻力。

从不同时刻、不同深度土壤的最大运动速度来看(图 10d ~ 10f),深层土壤的最大运动速度在 3 个方向上均大于浅层与中层土壤,而浅层与中层土壤的最大运动速度差异较小,即深松铲运动过程中,深层局部土壤受到深松铲与土壤间的相互作用力大于浅层与中层。中层土壤最大速度在 9.1 ~ 9.2 s 时产生突变,这主要是由于该时段靠近土槽壁 的土壤受到深松铲与土槽壁的挤压作用增大,从而引起土壤运动速度发生突变。

3.3 土壤扰动效果分析

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^[3]。试验结束后,以土壤垄形、坑形坐标拟合出深松土壤扰动截面轮廓曲线(图 11),土壤膨松度与土壤扰动系数计算式分别为

$$p = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\% \tag{2}$$

$$y = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \tag{3}$$

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,mm²
 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,mm²

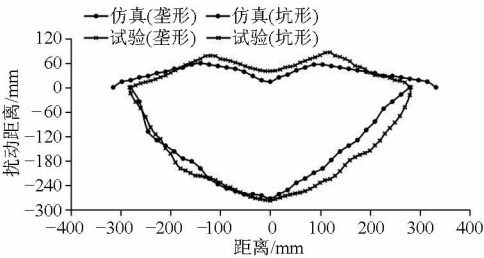


图 11 土壤扰动截面轮廓曲线

Fig. 11 Soil disturbance profile curves

仿真结束后,以土壤是否具有运动速度为条件,绘制土壤颗粒的运动速度临界曲线作为土壤扰动的坑形截面轮廓,以土壤在地表的堆积轮廓作为土壤扰动垄形截面轮廓(图 11),按式(2)、(3)计算出土壤膨松度与土壤扰动系数,并计算仿真结果与试验结果之间的相对误差(定义仿真结果与试验结果的绝对差值与试验值的百分比为相对误差),如表 2 所示。

由表 2 可知,土壤扰动截面的理论与实际面积、土壤膨松度、土壤扰动系数的仿真值均小于试验值。其中,土壤扰动系数的相对误差最大,为 17.38%,耕前地表至理论深松沟底的横断面面积相对误差最

表 2 土壤扰动效果分析

Tab. 2 Analysis of soil disturbance effect

指标	仿真值	试验值	相对误差/%
A_s/mm^2	102 380. 91	108 730. 16	5. 84
A_q/mm^2	155 268. 75	156 978. 12	1. 09
A_h/mm^2	178 928. 09	184 544. 85	3. 04
$p/\%$	15. 24	17. 56	13. 21
$y/\%$	57. 22	69. 26	17. 38

小,为 1.09%,本文的仿真与试验结果的相对误差与国外相关研究基本吻合^[21-23]。

另外,为反映深松后土壤地表的纵向堆积状态,对试验与仿真的土壤纵向堆积角进行了测量,结果如图 12 所示。

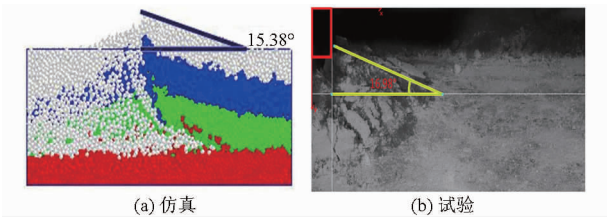


图 12 地表土壤纵向堆积角示意图

Fig. 12 Accumulation angle of surface soil after subsoiling

由图 12 可知,纵向截面内土壤堆积角的仿真值与试验值分别为 15.38°与 16.98°,相对误差为 9.42%,即仿真结果能够较为准确地反映深松后地表土壤的扰动状态。

4 结论

(1)采用离散元仿真与高速摄影技术、土槽试

验相结合的方法,对深松土壤的微观扰动机理与宏观扰动状态进行了分析。土壤的扰动范围随土壤与深松铲之间距离的增加而减小,确定合理的深松铲布局方式有利于提高深松土壤的扰动效果。不同位置土壤的扰动范围由大到小为:浅层、中层、深层,这种土层扰动结构会增加土壤水分的蒸发量,不利于保护土壤墒情,因此通过优化深松铲结构参数,增加深松铲对中、深层土壤的扰动,使土壤的扰动范围由大到小为:中层、浅层、深层,从而提高土壤的蓄水保墒能力,减少土壤水分的蒸发量。

(2)土壤的运动速度随土壤与深松铲之间距离的增大逐渐减小,等速度土壤颗粒的分布曲线与深松铲的铲柄弧线基本吻合。土壤在不同方向上的平均运动速度存在较大差异,在 x 方向上由大到小依次为:浅层、中层、深层,在 y 方向上由大到小依次为:中层、浅层、深层,在 z 方向上由大到小依次为:深层、中层、浅层。通过优化深松铲直铲柄段的迎面面积、弧柄形体、铲尖侧翼张角等,能够在一定程度上改善土壤的运动状态,降低深松耕作阻力。

(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,土壤膨松度、土壤扰动系数的仿真值与试验值的相对误差分别为 13.21%、17.38%;地表土壤纵向堆积角的仿真值与试验值分别为 15.38°与 16.98°,相对误差为 9.42%。

参 考 文 献

1 方会敏,姬长英, AHMED A T, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. (in Chinese)

2 方会敏,姬长英, FARMAN A C, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22-28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22-28. (in Chinese)

3 李霞,张东兴,王维新,等. 受迫振动深松机参数优化设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 17-24.
LI Xia, ZHANG Dongxing, WANG Weixin, et al. Optimization and experiment on performance parameters of forced-vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 17-24. (in Chinese)

4 蒋建东,高洁,赵颖娣,等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 33-38.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Numerical simulation on resistance reduction of soil vibratory tillage using ALE equation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 33-38. (in Chinese)

5 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]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 61-65.
ZHANG Qiang, ZHANG Lu, YU Haiye, et al. Finite element analysis and experiment of soil resistance of multiplex-modality subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 61-65. (in Chinese)

6 张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141-145.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141-145. (in Chinese)

7 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁面前部土体表层位移场分布有限元分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 45-50.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Analysis of distribution of displacement on soil surface in front of plow with FEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 45-50. (in Chinese)

- 8 蒋建东, 高洁, 赵颖娣, 等. 土壤旋切振动减阻的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 58–62.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Finite element simulation and analysis on soil rotary tillage with external vibration excitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 58–62. (in Chinese)
- 9 张锐, 李建桥, 周长海, 等. 推土板表面形态对土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 13–19.
ZHANG Rui, LI Jianqiao, ZHOU Changhai, et al. Simulation of dynamic behavior of soil ahead of the bulldozing plates with different surface configurations by discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 13–19. (in Chinese)
- 10 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(1): 34–41.
- 11 李艳洁, 吴腾, 林剑辉, 等. 基于离散元法的贯入圆锥对沙土颗粒运动特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 55–61.
LI Yanjie, WU Teng, LIN Jianhui, et al. Influence of penetrating cone on motion characteristics of sandy soil particle using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 55–61. (in Chinese)
- 12 张锐, 罗刚, 薛书亮, 等. 沙地刚性轮构型仿生设计及牵引性能数值分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 122–128.
ZHANG Rui, LUO Gang, XUE Shuliang, et al. Bionic design of configuration of rigid wheel moving on sand and numerical analysis on its traction performance [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 122–128. (in Chinese)
- 13 LI B, LIU F Y, MU J Y, et al. Distinct element method analysis and field experiment of soil resistance applied on the subsoiler [J]. International Journal Agricultural & Biological Engineering, 2014, 7(1): 54–59.
- 14 李博, 刘凡一, 陈军, 等. 深松铲耕作阻力影响因素的离散元法仿真分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(2): 71–74.
LI Bo, LIU Fanyi, CHEN Jun, et al. DEM simulation on analyzing affecting factors of the soil resistance applied on the subsoiler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(2): 71–74. (in Chinese)
- 15 KORNEL T, ISTVAN J J, MOUAZEN A M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134: 223–231.
- 16 LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM) [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 158: 177–185.
- 17 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 163–168. (in Chinese)
- 18 黄玉祥, 杭程光, 李伟, 等. 深松作业效果试验及评价方法研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(11): 228–234.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, LI Wei, et al. Subsoiling test and evaluation methodology study of tillage quality[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(11): 228–234. (in Chinese)
- 19 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.
- 20 邓佳玉. 基于离散元法的深松铲耕作阻力的仿真与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- 21 UCGUL M, JOHN M F, CHRIS S. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operation in a cohesionless soil[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144(4): 220–227.
- 22 COETZEE C J, ELSN J. Calibration of granular material parameters for DEM modeling and numerical verification by blade-granular material interaction[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(1): 15–26.
- 23 COETZEE C J, ELSN J. The numerical modelling of excavator bucket filling using DEM[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(5): 217–227.