

仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证*

佟金 张清珠 常原 李默 张磊磊 刘昕
(吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 利用 ABAQUS 软件建立了传统镇压辊和仿生镇压辊与土壤相互作用的三维有限元模型。模拟结果中伪应变能约占内能的 0.1%, 传统镇压辊和仿生镇压辊的牵引阻力的模拟值和试验值相对误差分别为 11.47% 和 2.38%, 模拟值和试验值吻合较好, 验证了模型的可靠性。从 Mises 应力云图、镇压辊与土壤接触面积和位移云图 3 方面对 2 种镇压辊的模拟结果进行了对比。结果表明: 仿生镇压辊与土壤的接触应力显著大于传统镇压辊, 更利于将土壤表层的土块压碎; 仿生镇压辊与土壤的接触面积比传统镇压辊降低了 79.05%, 有利于降低土壤与仿生镇压辊表面的粘附力, 且土槽试验结果得到仿生镇压辊的粘附土壤量比传统镇压辊降低 52.78%; 仿生镇压辊表面的肋条结构能在一定程度上约束土壤流动, 避免了壅土现象的产生; 2 种镇压辊的下陷量相差很小, 压实阻力基本相同, 但仿生镇压辊更利于压实表层土壤; 传统镇压辊造成土壤沿镇压辊宽度方向的位移扰动量大于仿生镇压辊, 需要消耗更多的功。土槽试验结果表明: 与传统镇压辊相比, 仿生镇压辊的阻力降低了 28.66%。

关键词: 仿生镇压辊 减粘降阻 有限元分析

中图分类号: S222.23; O242.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0085-08

引言

镇压辊主要用于压实播种后的土壤^[1]。无论是传统耕作还是保护性耕作, 农田土壤的压实都是影响作物产量的重要因素之一。适当的土壤压实能够提高作物产量^[2-9]。理想的镇压辊应在保证所需压实作用前提下具有较低的牵引阻力, 减少土壤粘附现象^[1]。但是传统的镇压辊材料多为石材或钢铁材料, 其触土表面在宏观上为普通光滑表面, 作业时很容易因粘附土壤而增加对土壤的扰动和破坏, 使土壤失墒严重, 影响种子的位置和种子发芽, 而且增加能耗, 降低作业效率。为了解决镇压辊粘附的问题, 基于臭蛱螂腹侧面的几何结构, 设计了肋条型仿生镇压辊, 并通过正交试验优化得到了减粘降阻效果最佳的仿生镇压辊^[1]。

目前有限元方法已被成功地应用于土壤耕作部件与土壤相互作用的研究中^[10-15]。为了进一步探索仿生镇压辊减粘降阻的机理, 本文在前期工作的基础上, 以传统镇压辊和优化后的仿生镇压辊为研究对象, 采用 ABAQUS 有限元软件建立镇压辊与土壤相互作用的三维模型, 通过计算模拟结果中伪应变能与内能的比值, 以及对比牵引阻力的模拟值和试验值来验证模型的可靠性。同时从 Mises 应力云图、镇压辊与土壤的接触面积和位移云图 3 方面分

析仿生镇压辊减粘降阻的机理。

1 镇压辊压实土壤过程中的阻力分析

当镇压辊在土壤上滚动前进时, 主要从以下 3 方面消耗能量^[16]:

(1) 压实阻力 R_c : 压实阻力所消耗的功等于镇压辊在运动过程中对土壤形成沟辙或齿孔所消耗的功, R_c 直接与镇压辊下陷有关, 计算公式为

$$R_c = KB \frac{z^{n+1}}{n+1} \tag{1}$$

其中

$$K = \frac{k_c}{B} + k_\varphi$$

$$z = \left[\frac{3W}{(3-n)KB\sqrt{D}} \right]^{\frac{2}{2n+1}}$$

式中 K ——非弹性变形模量

k_c ——与土壤内聚力有关的特性参数

k_φ ——与土壤摩擦力有关的特性参数

B ——镇压辊的宽度 n ——沉陷指数

z ——镇压辊下陷量

W ——镇压辊的载荷(包括镇压辊的重量)

D ——镇压辊的直径

(2) 推土阻力 R_b : 当镇压辊滚动时, 镇压辊前方会形成波浪状凸起(弓波形), 即“壅土”现象, 如图 1 所示。 R_b 为用于推移隆起土壤所消耗的阻力,

收稿日期: 2014-03-04 修回日期: 2014-03-24

* 国家自然科学基金资助项目(51075185)和国家农业科技成果转化资金资助项目(2013GB23600661)

作者简介: 佟金, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程仿生理论与技术和仿生摩擦学研究, E-mail: jtong@jlu.edu.cn

计算公式为

$$R_b = \frac{B \sin(\alpha + \varphi)}{2 \sin \alpha \cos \varphi} (2 z c K_c + \gamma z^2 K_\gamma) + \frac{\pi l^3 \gamma (90^\circ - \varphi)}{540} + \frac{c \pi l^2}{180} + c l^2 \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

其中 $K_c = (N_c - \tan \varphi) \cos^2 \varphi$

$$K_\gamma = \left(\frac{2 N_\gamma}{\tan \varphi} + 1 \right) \cos^2 \varphi$$

$$l = z \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{2z}{D} \right)$$

式中 $N_c、N_\gamma$ ——太沙基承载能力系数
 φ ——土壤内摩擦角
 c ——土壤内聚力 γ ——土壤密度

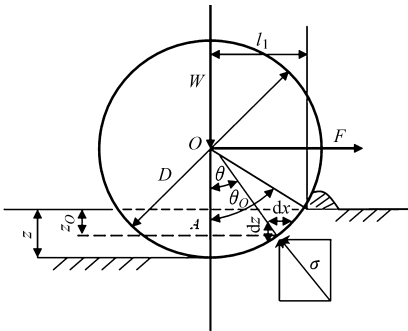


图 1 镇压辊行走过程中的壅土现象

Fig. 1 Schematic diagram showing hilling phenomenon in the process of press roller moving

(3) 粘着阻力 R_a : 表现为土壤粘附在镇压辊上, 形成粘着阻力。由于影响粘附的因素多而复杂, 目前还没有适当的数学公式表达。

镇压辊在压实土壤过程中所受阻力的计算式为

$$F = R_c + R_b + R_a \quad (3)$$

2 材料与方法

2.1 仿生镇压辊的设计

研究表明,臭蛭螂腹侧面的几何结构(图 2)是其在黏湿土壤环境中活动自如而不粘土的主要原因之一^[15]。基于以上研究,设计出与臭蛭螂腹侧面相似的肋条型仿生结构,尺寸如图 3 所示,且肋条结构在镇压辊柱面上的投影面积之和占柱面面积的 50%^[11]。

2.2 有限元模型的建立

2.2.1 镇压辊模型的建立

传统镇压辊和仿生镇压辊的直径为 300 mm,宽为 200 mm。三维模型如图 4 所示。

由于镇压辊的刚度远大于土壤,变形远小于土壤,故可将模型中的镇压辊视为离散刚体部件。给镇压辊设置参考点(RP)来控制整个镇压辊的运动,

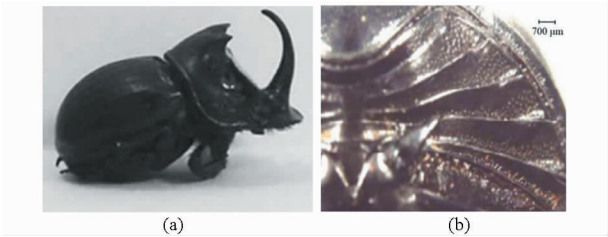


图 2 臭蛭螂及其腹侧面的几何结构
Fig. 2 Dung beetle *Copris ochus* Motschulsky and its geometrical structure on the ventral surface
(a) 雄性臭蛭螂 (b) 臭蛭螂腹侧面的几何结构

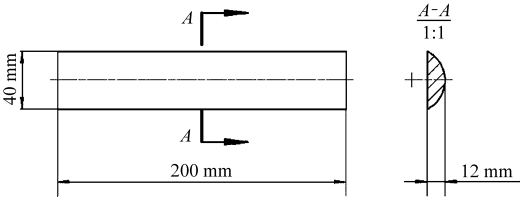


图 3 肋条结构尺寸
Fig. 3 Dimensions of ridge structure

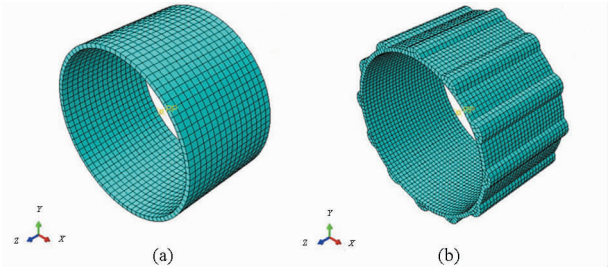


图 4 镇压辊三维模型
Fig. 4 Three-dimensional model of press rollers
(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

RP 位于镇压辊中心位置。由于刚体部件不会发生变形,所以无需对镇压辊定义材料属性,但需对 RP 定义点质量(0.1 t)和转动惯量(2 153.825 t·mm²),刚体的质量需要和可变形体土壤的质量在一个数量级上^[17-18]。

选择自由网格划分技术,对镇压辊进行六面体网格划分,网格大小为 12 mm,网格单元采用四节点三维四边形双线性刚体单元(R3D4)。传统镇压辊的节点总数为 2 940,单元总数为 2 940;仿生镇压辊的节点总数为 7 059,单元总数为 7 076。

2.2.2 土壤模型的建立

土壤模型采用修正 Drucker - Prager 盖帽模型,该模型能反映土体压缩导致的屈服,同时也能控制材料在剪切作用下的无限制剪胀现象^[19]。土壤模型的参数通过三轴压缩试验和各向同性固结试验获得。土壤密度 ρ 为 $1.08 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$,弹性模量 E 为 1.12 MPa,泊松比 ν 为 0.3,土壤粘聚力 d 为 0.078 3 MPa,摩擦角 β 为 12.14°,偏心率 R 为 0.2,初始屈服面位置 $\varepsilon_{vol}^i|_0$ 为 0.002,应力比 k 为 1,过渡面半径 α 为零,土壤盖帽硬化曲线如图 5 所示。

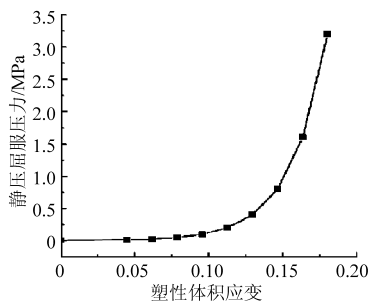


图 5 土壤盖帽硬化曲线
Fig. 5 Cap hardening curve of soil

土壤模型长 3 000 mm、宽 400 mm、高 400 mm，如图 6 所示。模型中 X 轴负方向为镇压辊的前进方向， Y 轴负方向为镇压辊的下陷方向， Z 轴为镇压辊宽度方向。在 ABAQUS 软件中，默认直角坐标系自由度 1、2、3 分别对应于 X 、 Y 、 Z 。

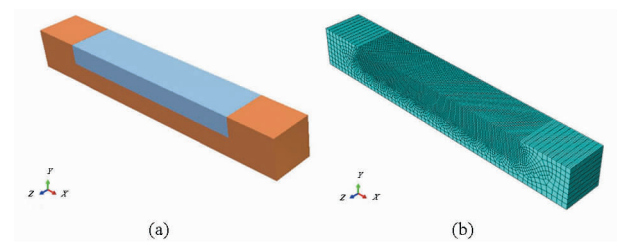


图 6 土壤三维模型
Fig. 6 Three-dimensional model of soil
(a) 三维实体模型 (b) 网格划分

为节省运算时间，将土壤模型分割成两部分，并赋予不同的网格密度。其中，蓝色区域是与镇压辊接触的区域，其网格尺寸对计算精度影响显著，故需要对网格细分，网格单元大小设为 15 mm；橙色区域远离辊-土作用区，网格可以较为粗糙，设为 50 mm。土壤网格单元均采用八节点六面体减缩积分实体单元 (C3D8R)。整个土壤模型的节点总数为 85 176，单元总数为 79 002。

2.2.3 边界条件与加载方式

本文采用 ABAQUS/Explicit 显示动态分析模块进行求解，其优点在于可以高效地求解复杂的非线性问题^[17]。

计算机模拟过程中，除系统自动创建的初始分析步外，还需创建 2 个后续分析步来施加载荷和边界条件。第 1 个后续分析步时间为 0.12 s，给 RP 施加 300 N 载荷，定义光滑幅值曲线，使载荷沿着幅值曲线的路径加载，以避免载荷的突变，便于建立稳定的接触关系。第 2 个后续分析步时间为 0.8 s，对 RP 同时施加前进速度 (900 mm/s) 和旋转角速度 (5.54 rad/s)。

从初始分析步至第 2 个后续分析步，约束土壤底面的所有自由度，土壤的其余面不作任何约束。

镇压辊与土壤的接触算法选择显示求解器中

的面对面接触算法，主面为镇压辊的外表面，从面为土壤蓝色区域的上表面。接触属性中接触面之间的法向作用采用“硬接触”，接触面之间的切向作用采用罚函数法和库伦摩擦模型，指定镇压辊和土壤之间的摩擦因数为 0.42^[15]。镇压辊与土壤相互作用三维模型的边界条件和加载方式如图 7 所示。

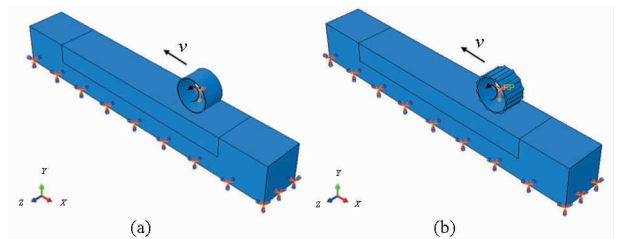


图 7 镇压辊与土壤相互作用三维模型的边界条件和加载方式

Fig. 7 Boundary conditions and loading mode of three-dimensional model of press roller interaction with soil

(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

2.3 土槽试验

试验在吉林大学工程仿生教育部重点实验室室内土槽进行，土槽土壤为东北地区的黄粘土，土壤塑限 W_p 为 20.14%，液限 W_L 为 36.17%。取土槽中间的 18 m 长度为试验区，其中间 10 m 为阻力测试区，试验区前、后各留 4 m 作为过渡区。试验前，0 ~ 100 mm 层土壤容积密度为 1.08 g/cm³，100 ~ 200 mm 层土壤容积密度为 1.20 g/cm³。人工调整土壤干基含水率为 20%。土槽台车的前进速度为 0.9 m/s，镇压辊载荷为 300 N。

镇压辊通过自制的轮架与 RSS03 型拉压传感器连接，传感器再通过自制的连接装置与土槽台车相连，将镇压辊受到的牵引阻力转换成电信号，由 DH5923 型动静态应变仪采集信号并通过 1394 接口与计算机相连，将采集的信号传输到计算机。每次试验完成后，用硬毛刷将粘在镇压辊上的土刷下进行称量，以考察镇压辊的粘附土壤量^[1]。土槽台车测试系统如图 8 所示。

每组试验重复 3 次取平均值作为结果。为保证试验的可重复性，每次试验后对土槽内土壤进行翻整处理，用自制刮平装置将土壤刮平，再由 SZ-3 型土壤硬度计检测，保证每次试验前的土壤硬度误差在 10% 以内。

3 结果与分析

3.1 有限元模型验证

3.1.1 关于沙漏模式问题

线性单元本身的积分点数目就比较少，减缩积



图8 土槽台车测试系统

Fig. 8 Measuring system used for drag resistance and soil adhesion of press roller in an indoor soil bin

分单元在每个方向上的积分点数目又减少一个,因此可能出现没有刚度的零能模式,即“沙漏模式”。ABAQUS 中的伪应变能或“沙漏刚度”主要用来控制沙漏变形能量。当伪应变能约占内能的 1% 时,表明沙漏模式对计算结果的影响不大;当伪应变能超过总内能的 10% 时,分析结果无效^[17]。

图 9 为 2 种镇压辊与土壤相互作用模型结果输出的伪应变能与内能比值的历史曲线。由于在 0 s 时刻模型的伪应变能与内能比值是一个微量被另一个微量所除的结果,所以这个时刻的瞬时值可以忽略掉。从图中可以看出这 2 种三维模型结果中的伪应变能与内能的比值均在 0.2 s 之后趋于平稳,且数值在 0.1% 左右,说明沙漏模式对计算结果的影响不大,所建三维模型合理。

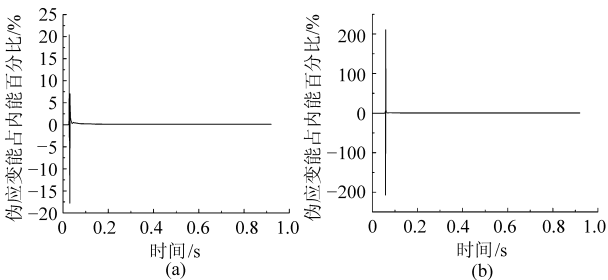


图9 伪应变能与内能百分比的历史曲线

Fig. 9 History curve of the ratio of artificial strain energy to internal energy
(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

3.1.2 牵引阻力

图 10 为前进速度为 900 mm/s,载荷为 300 N 时,模拟得到的 2 种镇压辊的牵引阻力-时间曲线。

由图 10 可知,初始时刻 2 个镇压辊的牵引阻力为 0 N,这是因为建模时镇压辊模型和土壤模型之间有很小的间隙,此时镇压辊还未接触到土壤。随着载荷沿着幅值曲线加载,镇压辊开始与土壤接触,牵引阻力从 0 N 迅速增大,在 0.12 s 附近时牵引阻

力达到一个峰值,此时镇压辊的载荷也已加载至 300 N。随后牵引阻力开始下降,最终约在 0.3 s 时牵引阻力趋于稳定。这是因为 0.12 s 为第 1 个后续分析步结束的时刻,之后镇压辊开始沿 X 轴负方向滚动,此时阻力由静摩擦力转为动摩擦力,所以阻力开始下降。最终,随着镇压辊在土壤上稳定滚动,牵引阻力保持在一个稳定的范围内。由于仿生镇压辊表面的肋条几何结构是按一定的间距布置的,所以 0.3 s 后仿生镇压辊的牵引阻力在一定范围内产生了周期性的波动。

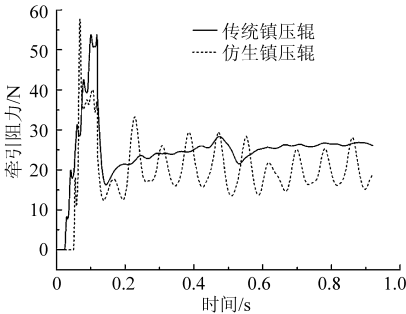


图 10 牵引阻力-时间曲线

Fig. 10 Curves of traction resistance vs time

取 0.3 s 后平稳的牵引阻力平均值作为有限元模拟得到的阻力。2 种镇压辊牵引阻力的模拟值和试验值如表 1 所示。由表 1 可知,仿生镇压辊牵引阻力的模拟值和试验值均低于传统镇压辊,分别降低了 21.33% 和 28.66%,而且 2 种镇压辊的模拟值均接近于试验值,传统镇压辊牵引阻力的模拟值与试验值的相对误差为 11.47%,仿生镇压辊为 2.38%,模拟值与试验值吻合较好,因此认为所建立的有限元模型是合理的。

表 1 2 种镇压辊牵引阻力的模拟值与试验值

Tab.1 Traction resistance results of simulation and tests of bionic press roller and conventional press roller

类型	牵引阻力/N	
	模拟值	试验值
传统镇压辊	25.55	28.86
仿生镇压辊	20.10	20.59

3.2 模拟结果分析

3.2.1 Mises 应力云图

图 11 为 2 种镇压辊与土壤相互作用模型第 2 个分析步结束时刻($t = 0.8$ s)的 Mises 应力云图的 X-Y 剖面图。

由图 11 可知,2 种镇压辊与土壤的接触应力均随着土壤深度的增加而变小,接触应力分布范围均随土壤深度的增加而变大。传统镇压辊对土壤造成的接触应力扰动范围略大于仿生镇压辊,但是仿生镇压辊与土壤的接触应力显著大于传统镇压辊,仿

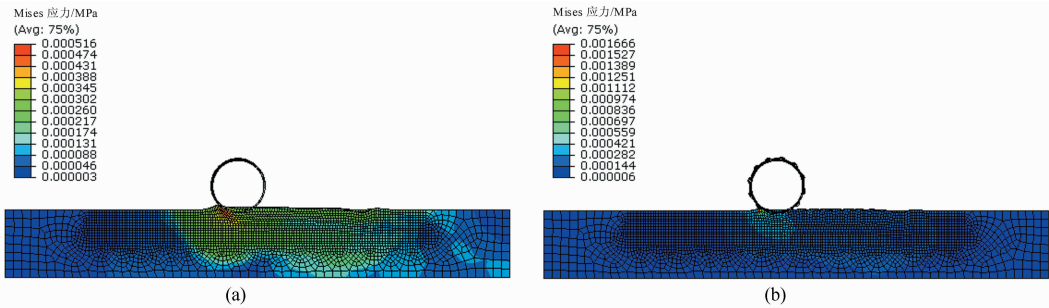


图 11 Mises 应力云图的 X-Y 剖面图
Fig. 11 X-Y profile of Mises stress nephogram
(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

生镇压辊与土壤接触应力最大值为 1.666×10^{-3} MPa，而传统镇压辊的仅为 5.164×10^{-4} MPa。这表明，在相同载荷下，仿生镇压辊更容易将土壤表层的土块压碎，利于种子与土壤紧密接触。

3.2.2 接触面积

图 12 为 2 种镇压辊与土壤的接触面积的对比结果。从图 12 可以看出，仿生镇压辊与土壤的接触面积要明显小于传统镇压辊。这是因为仿生镇压辊在土壤上运动时，其表面的肋条结构先接触土壤，土壤未与仿生镇压辊的凹处表面接触，从而减小了两者间的接触面积。

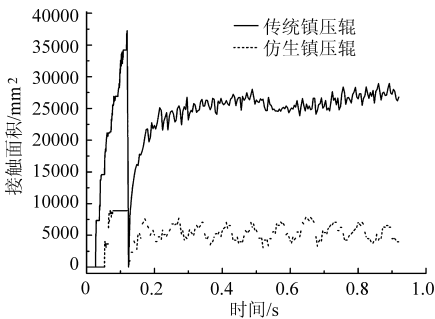


图 12 镇压辊与土壤的接触面积变化曲线
Fig. 12 Contact area between soil and press roller

土壤粘附主要源于土壤与固体表面之间界面水膜的粘滞阻力和毛细引力^[20]，二者都与接触面积成正比。传统镇压辊与土壤的接触面积为 26 047.46 mm²，而仿生镇压辊的为 5 457.60 mm²，

比传统镇压辊降低了 79.05%。因此，相对于传统镇压辊来说，仿生镇压辊能起到减粘的效果，而且土槽试验也证实了这一结论，土槽试验得到传统镇压辊和仿生镇压辊的粘附土壤量分别为 141.68 g 和 66.90 g，与传统镇压辊相比，仿生镇压辊的粘附土壤量降低了 52.78%。

3.2.3 位移云图

(1) X 方向位移云图

图 13 为 2 种镇压辊与土壤相互作用模型第 2 个分析步结束时刻 ($t = 0.8$ s)，土壤模型 X 方向位移云图的 X-Y 剖面图。土壤在 X 方向的位移是作业过程中应尽量避免的，因为它会将一部分土壤推到镇压辊前方而引起“壅土”现象，使得镇压辊需要多消耗一部分功来推移隆起的土壤。而且，在不断推移前方隆起土壤的过程中，会导致种子纵向间距的分布不均，影响播种质量。

由图 13 可以发现，传统镇压辊前方隆起的土壤高度明显高于仿生镇压辊。传统镇压辊前方土壤模型中编号为 2 375 的节点在 X 方向的位移为 -49.062 7 mm，而仿生镇压辊相互作用的土壤对应节点的位移只有 -18.534 5 mm。仿生镇压辊作业时壅土现象之所以较轻，是因为在前进过程中，仿生镇压辊表面分布的几何结构能够在一定程度上约束土壤的流动，从而将前方土壤固定在两肋条结构之间，如图 14b 所示。而传统镇压辊表面光滑，很难限

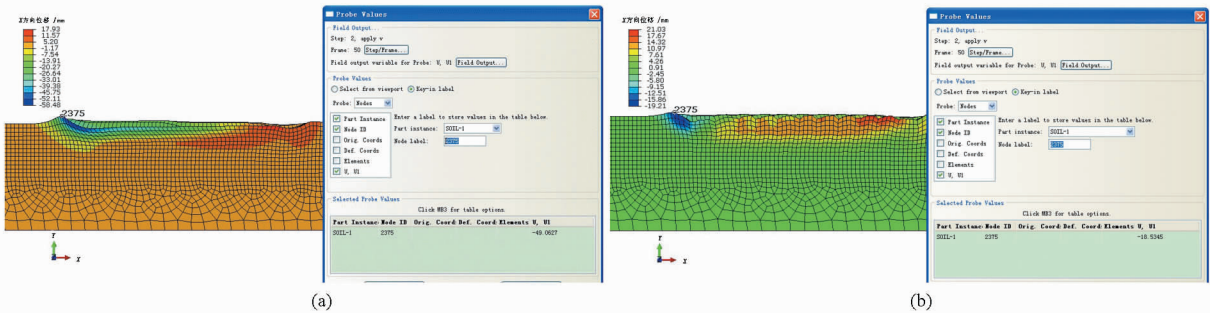


图 13 土壤模型 X 方向位移云图的 X-Y 剖面图
Fig. 13 X-Y profile of X displacement nephogram of soil model
(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

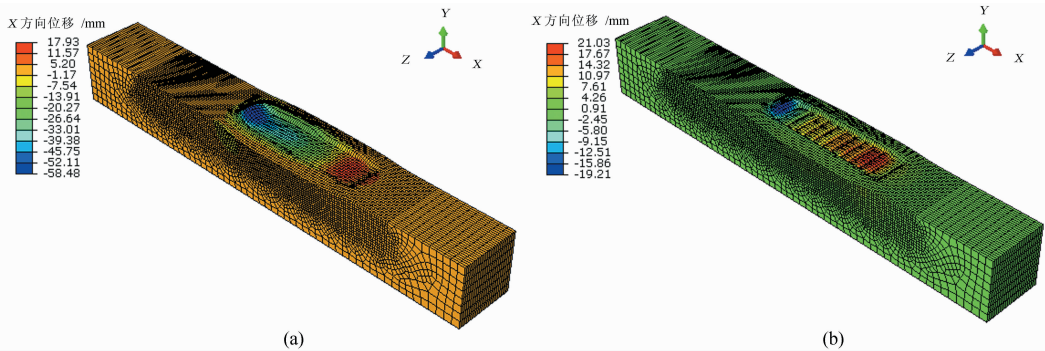


图 14 土壤模型 X 方向位移云图
Fig. 14 X displacement nephogram of soil model
(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

制土壤的流动,容易导致壅土现象的产生,如图 14a 所示。因此仿生镇压辊的推土阻力要低于传统镇压辊。

(2) Y 方向位移云图

图 15 为 2 种镇压辊与土壤相互作用模型第 2 个分析步结束时刻 ($t = 0.8\text{ s}$), 土壤模型的 Y 方向位移云图。由图 15 可以发现,经传统镇压辊镇压后的土壤在 Y 方向的扰动范围及位移变化量明显大

于仿生镇压辊,这表明传统镇压辊更容易造成土壤深层处的压实,而仿生镇压辊更利于压实表层土壤。在前面提到,压实阻力 R_c 直接与镇压辊下陷有关,由图 16 可以看到,传统镇压辊刚性参考点的下陷量为 18.7529 mm ,仿生镇压辊对应点的下陷量为 18.8298 mm ,2 个镇压辊的下陷量相差很小,因此两者的压实阻力基本相同。

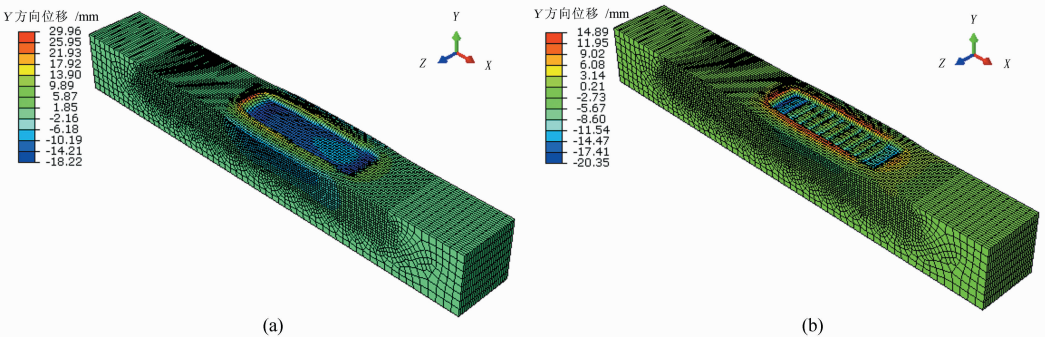


图 15 土壤模型 Y 方向位移云图
Fig. 15 Y displacement nephogram of soil model
(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

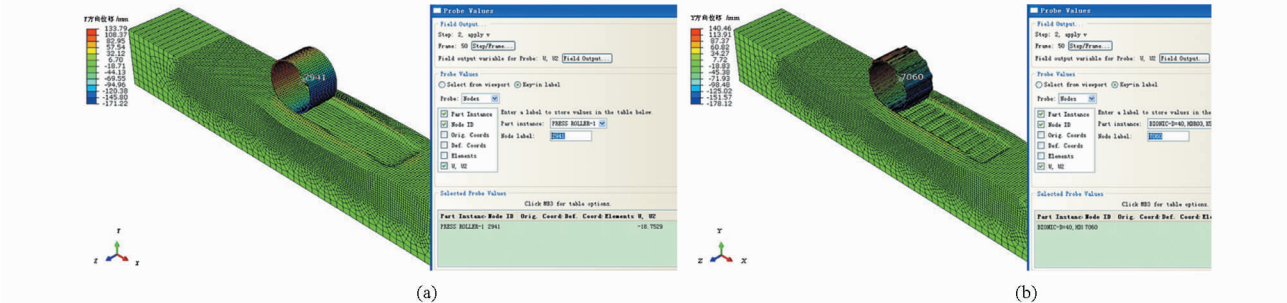


图 16 刚性参考点的下陷量
Fig. 16 Sinkage of rigid reference point
(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

(3) Z 方向位移云图

图 17 为 2 种镇压辊与土壤相互作用模型第 2 个分析步结束时刻 ($t = 0.8\text{ s}$), 土壤模型的 Z 方向位移云图。镇压辊对土壤造成的 Z 方向位移扰动为无用功。由图 17 可以发现,传统镇压辊对土壤造成的 Z 方向位移扰动范围与仿生镇压辊基本一

致,但是传统镇压辊造成土壤 Z 方向位移变化的最大值为 46.26 mm ,而仿生镇压辊造成的位移变化最大值仅为 30.04 mm ,这意味着传统镇压辊要比仿生镇压辊多耗费一部分功,表现在土槽试验中的结果就是传统镇压辊的阻力要高于仿生镇压辊。

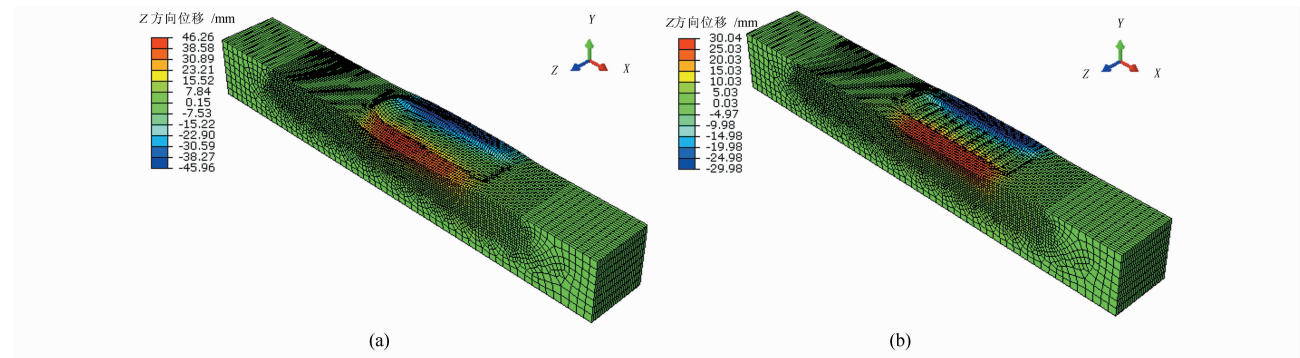


图 17 土壤模型 Z 方向位移云图

Fig. 17 Z displacement nephogram of soil model

(a) 传统镇压辊 (b) 仿生镇压辊

4 结论

(1)在有限元软件 ABAQUS 中建立了传统镇压辊和仿生镇压辊与土壤相互作用的三维模型。模拟结果中伪应变能约占内能的 0.1%，证明沙漏模式对计算结果影响不大；传统镇压辊和仿生镇压辊牵引阻力的模拟值和试验值的相对误差分别为 11.47% 和 2.38%，模拟值与试验值吻合较好，验证了模型的可靠性。

(2)传统镇压辊对土壤造成的接触应力扰动范围略大于仿生镇压辊，但仿生镇压辊与土壤的接触应力显著大于传统镇压辊。与传统镇压辊相比，仿生镇压辊更容易将土壤表层的土块压碎，利于种子与土壤的紧密接触。

(3)传统镇压辊与土壤接触面积 26 047.46 mm²，仿生镇压辊与土壤的接触面积为 5 457.60 mm²，比传统镇压辊降低了 79.05%。接触面积的减少可以降低土壤与固体表面的粘附力，因此仿生镇压辊能起到减粘的效果，而且土槽试验的结果证实了这一结论。试验结果表明，与传统镇压辊相比，仿生镇压

辊的粘附土壤量降低了 52.78%。

(4)作业过程中，传统镇压辊会使土壤沿前进方向移动，形成波浪状凸起，造成壅土现象，需要多消耗一部分功来推移隆起的土壤。而仿生镇压辊表面分布的几何结构能够在一定程度上约束土壤流动，将前方的土壤固定在两肋条结构之间，因此仿生镇压辊的推土阻力要低于传统镇压辊。

(5)传统镇压辊刚性参考点 RP 的下陷量为 18.752 9 mm，仿生镇压辊对应值为 18.829 8 mm，两者接近，因此两者的压实阻力基本相同。但传统镇压辊更容易造成土壤深层处的压实，而仿生镇压辊更利于压实表层土壤。

(6)由传统镇压辊造成的土壤沿镇压辊宽度方向的位移扰动范围与仿生镇压辊基本一致，但传统镇压辊对土壤造成的位移变化大于仿生镇压辊，表明传统镇压辊作业过程中所消耗功要大于仿生镇压辊，故仿生镇压辊可起到降阻的作用。土槽试验结果表明，与传统镇压辊相比，仿生镇压辊的牵引阻力降低 28.66%。

参 考 文 献

1 佟金,张清珠,常原,等.肋条型仿生镇压辊减粘降阻试验[J].农业机械学报,2014,45(5):135-140.
Tong Jin, Zhang Qingzhu, Chang Yuan, et al. Reduction of soil adhesion and traction resistance of ridged bionic press rollers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 135-140. (in Chinese)

2 Altikat S, Celik A. The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(1): 1-8.

3 Taser O F, Kara O. Silage maize (*Zea mays* L.) seedlings emergence as influenced by soil compaction treatments and contact pressures[J]. Plant, Soil and Environment, 2005, 51(7): 289-295.

4 于希臣,孙占祥,郑家明,等.不同镇压方式对玉米生长发育及产量的影响[J].杂粮作物,2002,22(5):271-273.

5 Triplett G B, Tesar M B. Effects of compaction, depth of planting, and soil moisture tension on seedling emergence of alfalfa[J]. Agronomy Journal, 1960, 52(12): 678-684.

6 Berti M T, Johnson B L, Henson R A. Seeding depth and soil packing affect pure live seed emergence of cuphea[J]. Industrial Crops and Products, 2008, 27(3): 272-278.

7 Johnston A M, Lafond G P, May W E, et al. Opener, packer wheel and packing force effects on crop emergence and yield of direct seeded wheat, canola and field peas[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2003, 83(1): 129-139.

8 刘万代,郭天财,韩建芬,等.镇压对高产田冬小麦生长发育的影响[J].耕作与栽培,2001(6):33-35.

- 9 郭颖杰,李云飞,袁月明,等.春播镇压对淡黑钙土含水率影响的试验研究[J].吉林农业大学学报,1999,21(2):66-69.
- 10 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)
- 11 Chiroux R C, Foster W A, Johnson C E, et al. Three-dimensional finite element analysis of soil interaction with a rigid wheel [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 162(2): 707-722.
- 12 王旭峰,张学军,马少辉,等.清田整地机碎土辊耙齿有限元分析[J].农业机械学报,2011,42(4):58-61.
Wang Xufeng, Zhang Xuejun, Ma Shaohui, et al. Finite element analysis of clod crushing rake tooth in field cleaning machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 58-61. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 Li M, Chen D H, Zhang S J, et al. Biomimetic design of a stubble-cutting disc using finite element analysis[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(1): 118-127.
- 15 Tong J, Moayad B Z, Ma Y H, et al. Effects of biomimetic surface designs on furrow opener performance[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(3): 280-289.
- 16 张克健.车辆地面力学[M].北京:国防工业出版社,2002.
- 17 曹金凤,石亦平.ABAQUS有限元分析常见问题解答[M].北京:机械工业出版社,2009.
- 18 赵腾伦.ABAQUS 6.6在机械工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- 19 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- 20 Tong J, Ren L Q, Chen B C, et al. Characteristics of adhesion between soil and solid surfaces[J]. Journal of Terramechanics, 1994, 31(2): 93-105.

Finite Element Analysis and Experimental Verification of Bionic Press Roller in Reducing Adhesion and Resistance

Tong Jin Zhang Qingzhu Chang Yuan Li Mo Zhang Leilei Liu Xin

(Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: A finite element code ABAQUS/Explicit was used to model three-dimensional soil compaction process. Drucker-Prager Cap (DPC) model was used as soil constitutive model. The behavior of the soil-bionic press roller interface was investigated and compared with a conventional roller. Simulation results show that the artificial strain energy is approximately 0.1% of the internal energy, indicating that hourglassing exerted very little influence on the simulation results. For the conventional press roller and bionic press roller, the relative error of traction resistance between the simulation and soil bin test results are 11.47% and 2.38%, respectively. The simulation results agree well with the experimental results. It proves that the finite element model is reliable. The Mises stress nephogram, the contact area between soil and press roller and the displacement nephogram are adopted to compare the simulation results of the two press rollers. The simulation results show that contact stress between the bionic roller and soil is significantly higher than that of conventional roller, which is beneficial for crushing clods. The contact area between bionic roller and soil is 79.05% lower than that of conventional roller, which is helpful to reduce soil adhesion. Also this result is proved by the soil bin test results, which shows that the bionic roller can reduce 52.78% of soil adhesion. Adjacent ridge structures of the bionic roller can properly constrain the flow of soil, thus avoiding the hilling phenomenon in compaction process. The two press rollers show little variance in vertical displacement and have similar compaction resistance, but bionic roller is more conducive to compact topsoil. The soil displacement in the direction of roller width caused by the conventional roller is greater than that of the bionic roller, which makes the conventional roller consume more power. The soil bin test results show that the bionic roller lowers the resistance by 28.66% as compared with conventional roller.

Key words: Bionic press roller Reducing adhesion and resistance Finite element analysis