余伟军,孙步功,胡耀辉,等.沙漠草方格铺压一体机压草碾轮压草仿真试验与分析[J].江西农业大学学报,2024,46(5):1356-1372.
YU W J,SUN B G,HU Y H,et al.Simulation test and analysis of grinding wheel of desert grass square-lattice paving integrated machine[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(5):1356-1372.

沙漠草方格铺压一体机压草碾轮压草仿真试验与分析

余伟军[1],孙步功[1*],胡耀辉[1],徐先英[2],马新兵[2],祁　渊[1],张　鹏[1]

(1.甘肃农业大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】草方格沙障是一种稻草秸秆压制到沙漠里起减缓风速的机械固沙手段,为减轻劳作强度提高效率,采用机械化作业。旨在研究沙漠草方格铺压一体机压草碾轮压制过程中沙土和稻草秸秆动力学微观机理变化不明晰、压草过程易推草带草、均匀性不稳定和压草碾轮易磨损等问题。【方法】利用有限元仿真和理论分析结合对压草碾轮的结构校核分析,基于离散元(EDEM)仿真软件建立沙土-稻草秸秆-压草碾轮三者互作系统模型,基于模拟仿真的变化规律,研究其微观动力学相互作用机理和压草碾轮磨损情况。【结果】仿真结果表明,压草碾轮结构设计满足要求,有效解决了推草和带草的问题;易磨损区域在外缘锯齿尖和加强筋,且因滑移产生的滑动摩擦会加剧碾轮磨损;锯齿形压草碾轮作业质量优于圆盘形压草碾轮,可有效提高压草合格率11.4%;压草过程产生的沙土扰动轮廓接近压草碾轮触土部分呈V字形,且速度越大沙土扰动越大,压草碾轮磨损越大,铺设越不稳定。【结论】仿真模型呈现了微观作业过程中秸秆、沙土颗粒和压草碾轮的运动特性,同时应用离散元法进行压草过程的仿真模拟与实际作业效果对比,仿真结果与沙漠实地试验工况基本一致,验证压草碾轮设计的可行性和合理性以及仿真模型的准确性,为压沙治沙机械提供了新的方法和参考。

关键词:压草碾轮;离散元法;稻草秸秆;沙土扰动;数值分析;柔性;固沙机械
中图分类号:S288　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2024)05-1356-17

Simulation test and analysis of grinding wheel of desert grass square-lattice paving integrated machine

YU Weijun[1],SUN Bugong[1*],HU Yaohui[1],XU Xianying[2],
MA Xinbing[2],QI Yuan[1],ZHANG Peng[1]

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering,Gansu Agricultural University,Lanzhou 730070,China;2.Gansu Institute of Desertification Control,Lanzhou 730070,China)

Abstract: [**Objective**] Grass square-lattice sand barriers is is a mechanical sand-fixing method for

收稿日期:2024-02-16　　**修回日期:**2024-04-10
基金项目:甘肃省重大科技计划项目(21ZD4FA010)和甘肃省重点研发计划项目(20YF8NA134)
Project supported by the Key Science and Technology Project of Gansu Province(21ZD4FA010) and Key Research and Development Project of Gansu Province(20YF8NA134)

作者简介:余伟军,硕士生,orcid.org/0009-0007-5171-7625,ywj11401120@163.com;孙步功,教授,博士,博士生导师,主要从事旱作农业全程机械化研究,orcid.org/0000-0002-3507-4312,sunbg@gsau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

suppressing the wind speed by pressing rice straw into the desert. In order to reduce labor intensity and improve efficiency, mechanized operation is adopted. However, the straw dynamics of micro-mechanism changes during the paving process are not clear, it is easy to push the grass during the grass pressing process, the uniformity is not stable and the grass roller is easy to wear out. [**Method**] Using finite element simulation and theoretical analysis combined with the structural check analysis of the grass roller, the sand-straw-grass roller interaction system model was established based on the discrete element (EDEM) simulation software. Based on the variation law of simulation, the micro-dynamic interaction mechanism and the wear of the grass roller were studied. [**Result**] The simulation results showed that the structure design of the grass roller met the requirements and effectively solves the problems of pushing grass; the wearable area was in the serrated tip of the outer edge and the reinforcing rib, and the sliding friction generated by the slip exacerbated the wear of the roller; the operation quality of the serrated grass roller was better than that of the disc shaped grass roller, and the pass rate of the grass roller can be effectively increased by 11.4%; the sand and soil disturbance profile generated by the grass roller process was close to the V-shape of the soil touching portion of the grass roller. The sand disturbance profile generated during the grass compaction process was close to the V shape of the grass compaction wheel. The higher the speed caused the higher sand disturbance and the higher wear of the grass compaction wheel, which maded the qualit of paving more unstable. [**Conclusion**] The simulation model presents the motion characteristics of straw, sand particles and grass roller in the microscopic operation process, the discrete element method is applied to compare the simulation of the grass roller process with the actual operation effect, and the simulation results are basically consistent with the field test conditions in the desert, which verifies the feasibility and reasonableness of the design of the grass roller as well as the accuracy of the simulation model, and it provides a new method and a new reference for the sand control and compaction machinery.

Keywords: compacted straw mill wheel; discrete element method; straw; sandy soil disturbance; numerical analysis; flexibility; sand fixing machinery

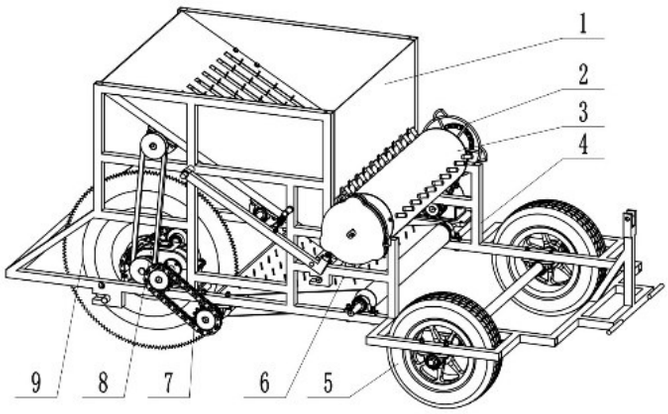
【研究意义】我国沙漠化土地分布范围广,面积占比高,防沙治沙所面临的依然形势严峻。草方格沙障具有良好的减缓风速和阻止流沙迁徙的作用而被我国广泛应用。草方格沙障是机械固沙中最主要的措施之一,铺设时将长散稻草秸秆平铺在沙地上,然后用铁锹压入沙面 15~20 cm[1-3],露出高度为 30~35 cm,形成 1 m×1 m 或 2 m×2 m 的方格,实践证明 1 m×1 m 的草方格沙障固沙效果最好。压草碾轮作为机械化草方格铺设装备中的关键工作部件,对压制质量起关键作用[4-6]。但沙漠作业机械的设计思路和基础大都来源于工程实践和实践经验,科学清晰的数据分析较为匮乏,压草碾轮与稻草之间数值模拟分析极少,且大部分以试验和传统机械设计计算为主。【前人研究进展】鲜傲寒[7]对纵向喂供式复合插草机构进行研究分析,建立回归模型,但测试速度非常小,且并未进行沙漠实地试验。已有研究[8-10]明晰了在插草过程中稻草秸秆运动规律和圆盘前进速度的定量关系,草杆铺设密度对插草阻力的影响规律。

【本研究切入点】压草碾轮结构优化研究缺乏,压制过程中推草和勾草问题未得到解决。压草过程中压草碾轮-秸秆-沙土三者互作系统复杂作用分析不全面,三者运动过程中对铺设质量和沙土扰动机理不明晰,实地试验验证与分析相结合的方法采用较少。【拟解决的关键问题】本研究旨在通过离散元法建立压草碾轮-稻草秸秆-沙土三者互作模型,分析锯齿形压草碾轮的设计优势并从微观角度剖析稻草秸秆和沙土扰动,压草碾轮的磨损对铺设质量的影响,揭示考虑草杆粘结时,前进速度和阻力之间的定量关系,以期为进一步提升压沙治沙机械的仿真优化和压制质量提供理论研究依据。

1　压草碾轮压草系统结构和工作原理

1.1　压草系统结构

草方格铺压一体机压草系统主要由压草碾轮、传动系统、支撑轴和机架等组成(图 1)。

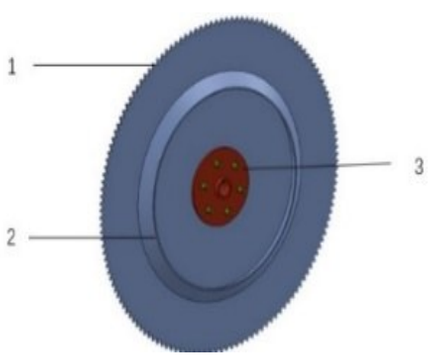


1:入料箱;2:拨草凸轮调节机构;3:拨草滚筒;4:机架;5:轮胎;6:输草带;7:传送机构;8:减速机构;9:压草碾轮。
1:Feed box;2:Mowing CAM adjustment mechanism;3:Mowing roller;4:Frame;5:Tire;6:Grass conveyor;
7:Transmission mechanism;8:Deceleration mechanism;9:Grass roller.

图 1 草方格铺压一体机压草系统装置结构

Fig.1 Structure diagram of the grass pressing system of the grid laying and pressing machine

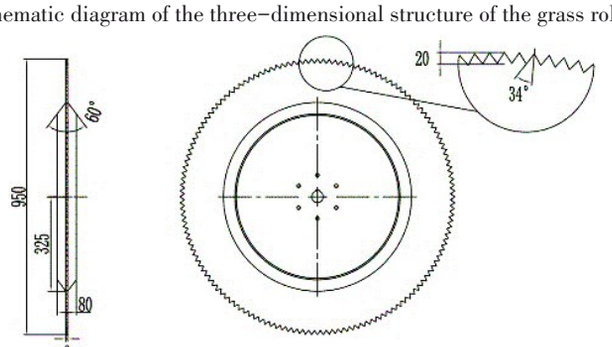
本研究设计了一种如图 1 中的 9 所示的锯齿形压草碾轮,具体结构参数如图 2 所示,其直径为 950 mm,外缘锯齿长为 20 mm,厚度 S=6 mm。压草碾轮由安装法兰和空心凸台形的加强限深装置构成,后者主要起限制压入深度和提升强度的作用。但当外缘是圆盘时,稻草秸秆和松软沙土的接触面积是为 895 mm^2,设计外缘齿后与沙土颗粒和秸秆的接触面积增加到 31 104 mm^2,与深处紧实沙土啮合面积增大,地面推力增加;因较深处的沙土的剪滑面面积增大,推力较大,其可通过性增大。



1:20 mm 碾轮齿;2:加强筋;3:安装法兰。
1:20 mm grinding wheel teeth;2:Stiffener;3:Install flange.

a.压草碾轮三维结构示意

a.Schematic diagram of the three-dimensional structure of the grass roller



b.压草碾轮结构设计参数

b.Structural design parameters of grass roller

图 2 压草碾轮设计参数

Fig.2 Design parameter diagram of grass roller

1.2　压草碾轮作业原理

如图3所示,长散稻草秸秆经输送带传输,在重力作用下被平铺在松软沙土上,压草碾轮外缘锯齿承接辅助并摆正长散稻草秸秆,可防止稻草粘结偏斜被推到两侧。压草碾轮前进,与沙土和秸秆的摩擦力给输草系统提供输草动力,长散稻草秸秆经打散机构梳分均匀被连续输送,秸秆受重力作用被平铺在沙面上,压草碾轮将稻草秸秆压入沙面,秸秆直立形成草方格沙障[11]。

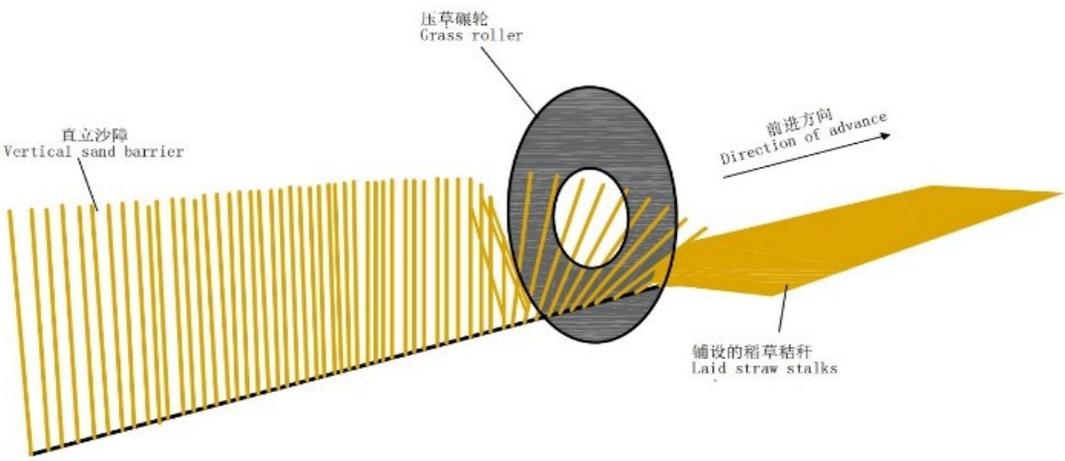
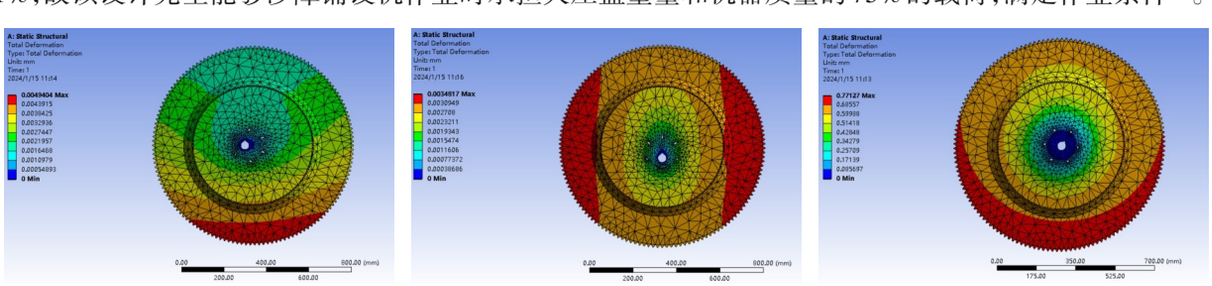


图3　压草碾轮作业原理

Fig.3　Schematic diagram of grass roller operation

1.3　压草碾轮受力分析

对压草碾轮的疲劳强度和刚度等静力学特征进行仿真分析,在ANSYS软件中的Workbench模块选择Q235普通碳素结构钢,添加固定约束,施加载荷为机器总质量的75%,得到最大变形云图。因钢板的弹性变形范围一般不超过其屈曲临界应变的一半,一般来说,在1%~2%为安全。仿真结果如图4所示,在X、Y和Z 3个方向上的总变形量分别为0.004 9,0.003 4,0.771 3 mm,X、Y和Z方向的变形量远远小于1%,故该设计完全能够沙障铺设机作业时承担大压盘重量和机器质量的75%的载荷,满足作业条件[12]。



a.X方向最大总变形量　b.Y方向最大总变形量　c.Z方向最大总变形量

a.maximum total deformation in X direction　b.maximum total deformation in Y direction　c.maximum total deformation in Z direction

图4　压草碾轮静力学仿真分析

Fig.4　Static simulation analysis of grass roller

以压草碾轮的质心为原点构建平面直角坐标系,对压草碾轮进行受力分析,如图5所示。

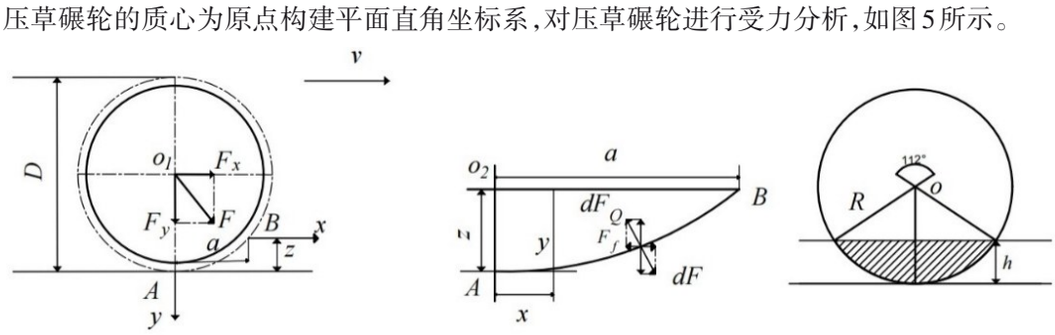


图5　压草碾轮的受力分析

Fig.5　Stress analysis of grass roller

在压草碾轮接触稻草秸秆瞬间，受到碾轮自身重量和机器施加的载荷 W，下陷量为 z，在接触瞬间受到稻草秸秆和松软沙土的单位面积内的反作用力 F_1，故在下陷弧长 dS、厚度为 b 的碾轮外缘面积上的反作用力为 F_Q 满足式(1)。当刚性压草碾轮在松软的沙面上匀速运动前进时，压草碾轮受到机器前进时的牵引力 F_x、稻草秸秆和松软沙土的摩擦力 F_f 满足式(2)，同时受到车轴对于压草碾轮的垂直载荷和水平载荷 F，稻草秸秆和松软沙面对碾轮的垂直作用力 F_{Qy} 和水平作用力 F_{Qx}。通过理论分析压沙碾轮在将稻草秸秆压入沙地最大深度 200 mm 时，碾轮处在沙面以下的圆心角为 112°，对应的弧长为 879 mm。图 5 中的几何关系满足公式(3)。

$$dF_Q = F_1 b dS \tag{1}$$

$$F_f = \int_0^z dF_Q \sin\alpha = \int_0^z F_1 b dy \tag{2}$$

$$\begin{cases} \dfrac{a}{D - Z} = \dfrac{Z}{a} \\ y = Z - \dfrac{x^2}{D} \end{cases} \tag{3}$$

根据 Bekker 模型，压草碾轮在沙土上的单位压力可用式(4)计算。

$$F_1 = Kz^n \tag{4}$$

式(4)中，K 为土壤变形模量；n 为土壤变形指数；F_1 为压草碾轮下法向平均单位压力；z 为压草碾轮的下陷量。

K 可用式(5)计算

$$K = \frac{k_c}{b} + k_\varnothing \tag{5}$$

式(5)中，b 为压草碾轮的宽度。

联立上式(3)(4)(5)得压草碾轮上载荷与入沙深度间的关系

$$W = \frac{3D - nD + nz}{3D} Kbz^n \sqrt{Dz - z^2} \tag{6}$$

机器前进需要的牵引力为：

$$F_f = Kb\frac{z^{n+1}}{1+n} = \left(k_c + bk_\varnothing\right)\frac{z^{n+1}}{1+n} \tag{7}$$

联立上式可求得 W，F_f。

在压草深度与 F_1 之间的力的关系已知的情况下，可求得机器前进需要的牵引力，判断出压草碾轮满足抓地力的条件。以上理论计算只宏观分析了压草碾轮在作业过程中受力情况，但缺乏稻草秸秆和松软沙土在压草碾轮作用下三者互作过程中的微观运动状态分析，需建立数值模型进行进一步研究。

2 压草碾轮压草过程的数值模型建立

压草碾轮的宏观作业流程简单，但作业过程涉及的系统和运动状态极为复杂，涉及金属材料、松软沙土和柔性稻草秸秆之间的变形与粘结，仅对系统进行宏观的理论力学的分析计算，并不能准确反映各部件之间的运动规律和受力情况，需建立离散元数值模型进行仿真分析研究。为了简化模型，提高仿真速度并减少运行时间，在保证不影响压草碾轮正常作业的基础上，对压草过程的离散元系统做出如下假设：

(1)忽略外部环境风速天气等因素，潮湿锈蚀，稻草秸秆和沙土的含水率引起的摩擦阻力的变化。

(2)模拟稳定作业时间内短距离直线作业，简化建模计算量和难度，减少计算时间。

2.1 沙土离散元模型建立

模型中不考虑稻草秸秆粘结，法向力采用 Hertz 理论进行计算，切向力采用 Mindlin-Deresiewicz 理论进行计算，Hertz 理论是颗粒曲面弹性接触问题的理论基础[13]。因沙土颗粒极为细小且数量巨大，考虑到计算量和仿真效率，所以采用局部放大研究的方法建立离散元模型并用沙土槽代替作业区域，EDEM 中填充单元球形颗粒半径为 4 mm，填充沙土颗粒数量为 53 051，三球形颗粒来模拟沙土颗粒，并设置相应

的属性参数,离散元仿真参数如表1,图6为实际工况沙土,图7为沙土槽离散元模型。

表1　离散元模型的基本参数

Tab.1　Basic parameters of the discrete element model

参数 Parameter	数值 Numerical value	参数 Parameter	数值 Numerical value
沙土槽尺寸(长×宽×高)(mm×mm×mm) Size of sand tank	600×600×500[14]	压草碾轮剪切模量/MPa Shear modulus of grass roller	102
前进速度/(m·s^{-1}) Speed of advance	1.5	稻草秸秆密度/(kg·m^{-3}) Straw density	227
压草深度/mm Depth of compaction	150~200	稻草秸秆泊松比 Poisson's ratio of straw to straw	0.4
沙土颗粒密度/(kg·m^{-3}) Sand particle density	2 650[15]	稻草秸秆剪切模量/MPa Shear modulus of straw	1.65
沙土颗粒泊松比 Poisson's ratio of sand particles	0.3[15]	稻草秸秆之间静摩擦系数 Static friction coefficient between straw and straw	0.43
沙土颗粒剪切模量/MPa Shear modulus of sand particles	100[15]	稻草秸秆之间动摩擦系数 Dynamic friction coefficient between straw and straw	0.24
沙土之间的静摩擦因数 Static friction factor between sand and soil	0.23[15]	稻草秸秆之间碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient between straw and straw	0.28
沙土之间的动摩擦因数 Dynamic friction factor between sand and soil	0.1[15]	秸秆-钢板之间静摩擦系数 Static friction coefficient between straw and steel plate	0.20
沙土之间的摩擦恢复系数 Coefficient of friction recovery between sand and soil	0.25[15]	秸秆-钢板之间动摩擦系数 Dynamic friction coefficient between straw and steel plate	0.15
压草碾轮密度/(kg·m^{-3}) Density of grass roller	7850	秸秆-钢板之间碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient between straw and steel plate	0.30
压草碾轮泊松比 Grass roller Poisson's ratio	0.25	土壤颗粒数量 Soil particle quantity	53 051



图6　沙土的实际物理结构

Fig.6　Actual physical structure of sand

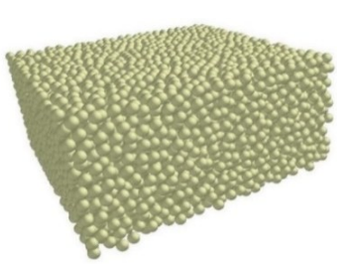


图7　沙土槽离散元模型

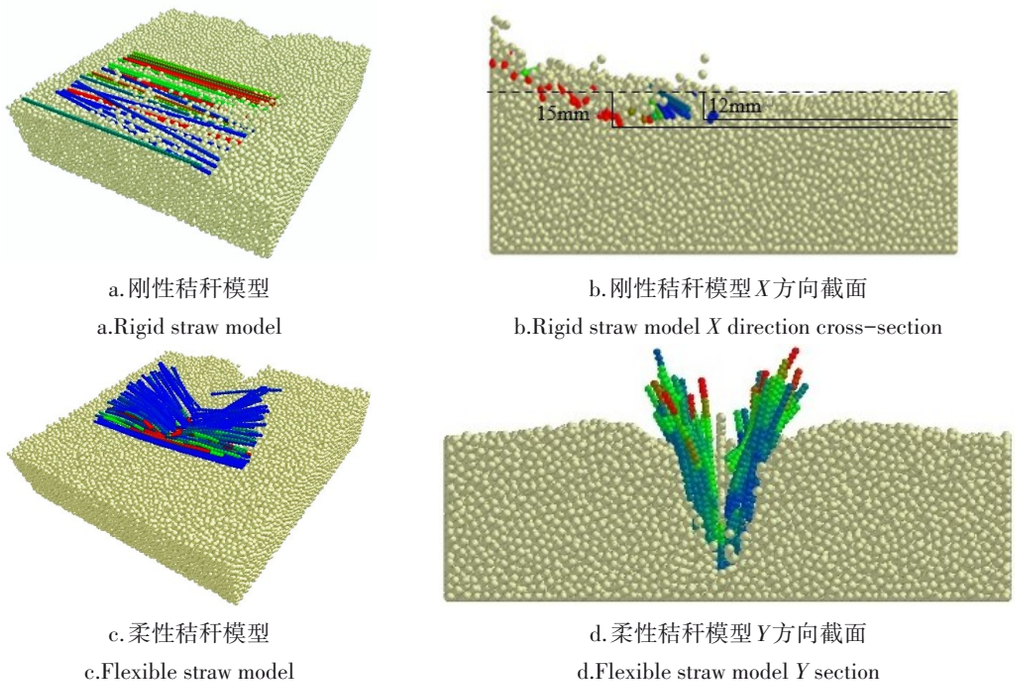
Fig.7　discrete element model of sand tank

3.2　稻草秸秆模型建立

3.2.1　柔性秸秆模型验证

因秸秆在压制沙障时会产生形变和断裂等情况,故建立刚性和柔性秸秆进行初步选择,如图8所示,

a,b为刚性秸秆模型验证,c,d为柔性秸秆模型验证。



a.刚性秸秆模型
a.Rigid straw model

b.刚性秸秆模型*X*方向截面
b.Rigid straw model *X* direction cross-section

c.柔性秸秆模型
c.Flexible straw model

d.柔性秸秆模型*Y*方向截面
d.Flexible straw model *Y* section

图8 刚性和柔性秸秆模型仿真效果验证

Fig.8 Simulation effect verification of rigid and flexible straw models

当设置压草碾轮压入深度为150 mm,前进速度1.5 m/s作业时,如图8a和图8b所示,刚性秸秆发生较大的水平位移,压入沙面以下深度达12~15 mm,整个草杆被全部压入沙土,引起严重沙土扰动,且刚性秸秆会对到碾轮边缘锯齿产生较大的冲击载荷,无法仿真,导致模拟精度不符合预期效果。如图8c和图8d所示,柔性秸秆中间被竖直下压,两端逐渐直立,高效连续的被压入到沙土形成草方格沙障,能呈现真实的推草和秸秆断裂状态,符合实际作业情况。仿真结果表明:柔性秸秆的仿真更加符合实际作业条件,验证出建立的柔性秸秆模型准确合理,故本研究采用柔性秸秆模型。

2.2.2 稻草秸秆建立

稻草秸秆的实物图如图9所示,稻草秸秆离散元模型如图10所示。通过离散元软件创建柔性稻草秸秆模型,利用EDEM中的Meta-particles元颗粒轴向粘接构建稻草秸秆的离散元模型[16],并在元颗粒之间添加BondingV2键连接构造柔性体,根据已有研究[14]设置颗粒之间的本征参数和接触参数,具体参数见表1。有效Bonding键的模型有柔性特征,更加接近真实情况和试验结果。因为稻草秸秆之间存在粘结和交叉缠绕情况,按照实际情况建模存在着极大困难,故建模时忽略整根稻草秸秆之间粘结力,只有内摩擦角。考虑到离散元仿真软件对计算机硬件性能要求高,将稻草秸秆简化为400 mm长的bondingV2键连接的柔性茎秆模型进行仿真分析。



图9 稻草秸秆

Fig.9 Physical picture of straw

2.3 数值模型实验验证

为保证仿真的准确性,按1∶1的比例,采用三维软件SolidWorks建立压草碾轮三维模型,调整空间位置,添加约束,设置仿真参数。为了使数值模拟结果尽可能接近实际,压草碾轮、稻草秸秆和沙土的属性参数的设置贴合实际。压草仿真数值模型与实物压草装置相结合进行验证,实物装置的主要工作部件有压草碾轮、安装法兰和碾轮支撑轴。图11为数值模拟装置,图12为压草碾轮实物装置。



图 10　秸秆离散元模型

Fig.10　Discrete element model of straw

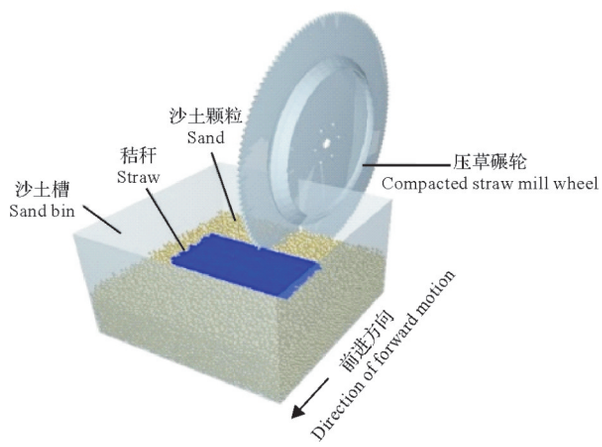


图 11　数值模拟装置

Fig.11　Numerical simulation device



图 12　压草碾轮实物装置

Fig.12　Physical device of grass roller

3　压草碾轮压草仿真模拟分析

3.1　稻草断裂与压草碾轮滑移分析

目前水稻秸秆是最适合压制草方格沙障的原料,具有可持续、节能环保和廉价的特点。根据文献[17],农田完全风干的稻草秸秆含水率在 6% 左右,据研究[18],稻草秸秆含水率对于其力学性能有明显影响,含水率越高越容易破坏,而优质秸秆含水率一般在 15% 左右,沙漠试验含水率会进一步降低,故选含水率为 10%~12%,剪切模量 1.65 MPa,长度为 1~1.2 m 的成捆稻草秸秆作为试验材料。因秸秆内部具有丰富的纤维,建模时选择柔性秸秆,但当挤压形变程度超过 Bond 键的剪切应力时,秸秆会表现为断裂破坏[19]。如果在压入过程中有大量秸秆断裂且无法被沙土固定时,会严重影响铺设质量。断裂秸秆的露出沙面长度不够,不满足草方格沙障的技术要求,无法达到防风治沙效果。因此实际作业中对压入沙土的秸秆深度和露出的长度需进行长度检验。因压入沙土内部的秸秆断裂数量庞大且不明显难以进行记录分析研究,故取 6 种仿真模拟速度对 50 根稻草秸秆的断裂率进行研究,仿真稻草秸秆情况断裂如图 13 所示。

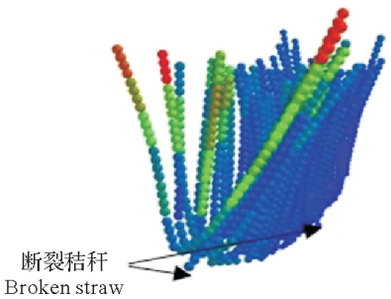


图 13　仿真柔性秸秆断裂分析

Fig.13　Fracture diagram of simulated flexible straw



图 14　滑移产生推草现象

Fig.14　Phenomenon of pushing grass caused by slip

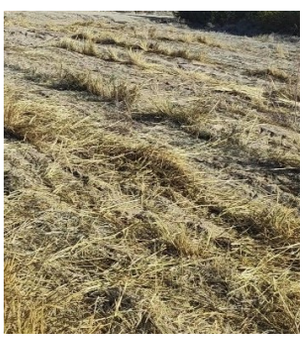


图 15　滑移导致断草沙障

Fig.15　sand barrier caused by slip

当速度为 0.20 m/s，仿真稻草秸秆断裂 2 根，占比为 4%；当速度为 0.25 m/s，仿真稻草秸秆断裂 1 根，占比为 2%；当速度为 0.30 m/s，仿真稻草秸秆断裂 2 根，占比 4%；当速度为 0.35 m/s，仿真稻草秸秆断裂为 4 根，占比 8%；当速度为 0.40 m/s，仿真稻草秸秆断裂 6 根，占比 12%；当速度为 0.45 m/s，仿真稻草秸秆断裂 3 根，占比 6%；当速度为 0.50 m/s，仿真稻草秸秆断裂 6 根，占比 12%。由上述不同速度下秸秆断裂情况，平均占比为 8%，断裂数量较少，证明仿真模型建立精度较为准确，满足预期作业要求。在实际试验中，稻草秸秆断裂情况还与稻草秸秆的陈旧、品种、含水率、柔韧性和纤维含量等因素有关，较为复杂。通过仿真和试验分析得出秸秆断裂数量越少，作业质量更好，对压制铺设沙障质量影响越小。

滑移是指地面附着力发生变化部件开始滑动的现象。沙土紧实度会影响摩擦力的变化，故压草碾轮在实际作业中会产生滑移，滑移导致大量推草和断草现象，导致压制的草方格沙障不合格，如图 14、图 15 所示为推草现象和断草不合格的沙障。

滑移率 s 是评价车辆通过性能的一个指标，计算公式[20]为：

$$s = \frac{u - u_w}{u} \times 100\% = \frac{u - r\omega}{u} \times 100\% \tag{8}$$

式(8)中：u 为车速；u_w 为车轮速度；ω 为车轮滚动角速度；r 为车轮半径。

沙面以下地质结构复杂，沙土紧实度不一致。压草碾轮外缘锯齿减小入土阻力，降低能耗，增大与深层沙土的啮合能力提高通过性能。在紧实的地方作业时，压草碾轮边缘齿能更好啮合，近似达到纯滚动，即滑移率为 s 为 0，作业质量最优；在松软干沙较厚时，沙土内部摩擦力不够，压草碾轮抱死，发生纯滑动并对沙土进行剪切，滑移率 s 为 100%，无法压制草方格沙障；当压草碾轮边滚边滑时，滑移率为 $0<s<100\%$，会产生较大的推草现象。除此之外，压草碾轮的滑移还与速度大小有关，当速度增加，相对滑动现象会变的更加明显。

4.2 压草碾轮磨损研究分析

压草碾轮在固沙机械中作为关键触土部件，在长期作业过程中易磨损失效，机械零件磨损失效导致牵引阻力和能耗增加，作业质量和效率降低，尤其是对作业质量的影响更为明显[21]。本研究通过离散元软件的仿真，呈现压草碾轮的磨损位置，定性分析压草碾轮表面与沙土颗粒相互作用时的磨损机理和磨损特性，对固沙机械触土部件的结构优化和合理选择材料和处理工艺极为必要。图 16 为仿真过程中压草碾轮压制过程中受力和颗粒速度变化。

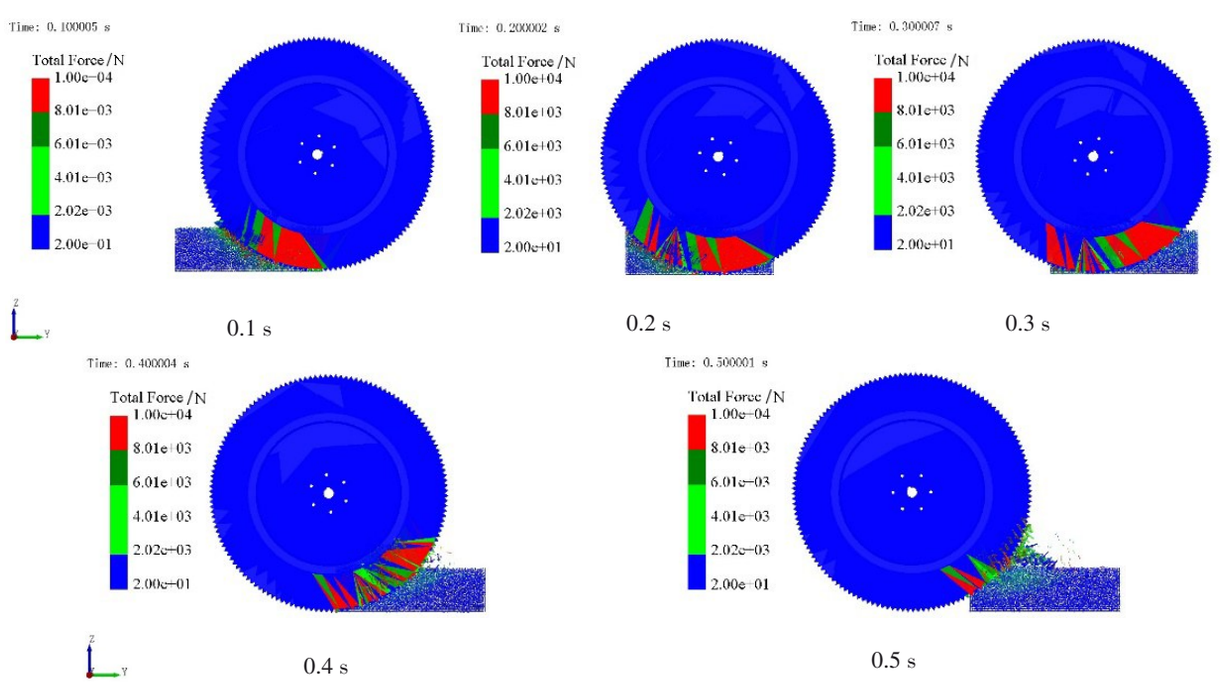


图 16 压草碾轮 0.5 s 内各时刻受力云分析

Fig.16 Stress cloud picture of grass roller at every moment within 0.5 s

如图16所示,齿尖到限深装置之间的触土部分的两侧易发生磨粒磨损。在压制沙障过程中,压草碾轮外缘齿尖与深层硬实沙土和稻草秸秆相啮合,冲击载荷较大且接触应力集中,长时间工作后会产生严重磨损,20 mm齿随摩擦增加而降低,能耗增加,啮合能力变低;当外缘齿被磨损到齿根位置,近似于圆盘,会产生推草,铺设质量严重下降。由于外缘齿受到的磨损不均匀,在机器运行时会产生较大的振动而减少机器使用寿命。根据已有研究,随着驱动轮轮刺高度的增大,轮刺穿过沙土表层,接触面积增大,地面推力增加,牵引功率变大[22]。所以外缘齿磨损,齿高降低,与沙土啮合面积发生变化,影响抓地力和通过性能,进而影响作业质量。拟采用现有的耐磨焊条对边缘锯齿和加强筋部位加工焊接处理,并定期检查维修。

如图17所示,是压制完成后沙土扰动截面图。严重沙土扰动会破坏沙面形成的结皮,影响压草碾轮的通过性,进而影响铺设质量,因此扰动越小越稳定,铺设质量越好。机器不断前进,稻草秸秆不断被压入沙土,沙土颗粒被挤向两侧,形成沙土扰动轮廓。出现了V形沙土扰动区域,越靠近V形区域红色颗粒能量越大。每个颗粒的重量是6.08e−05 kg,当实际作业时,颗粒以1.5 m/s的速度被压草碾轮挤向两侧,n个颗粒的累计动能为$E=\sum_{i=1}^{n}0.5m_{ni}v^2$。周围被挤压的沙粒与压草碾轮的接触面积变大,受到挤压摩擦面积增大,动能增大,使得工作部件磨损加剧[23]。

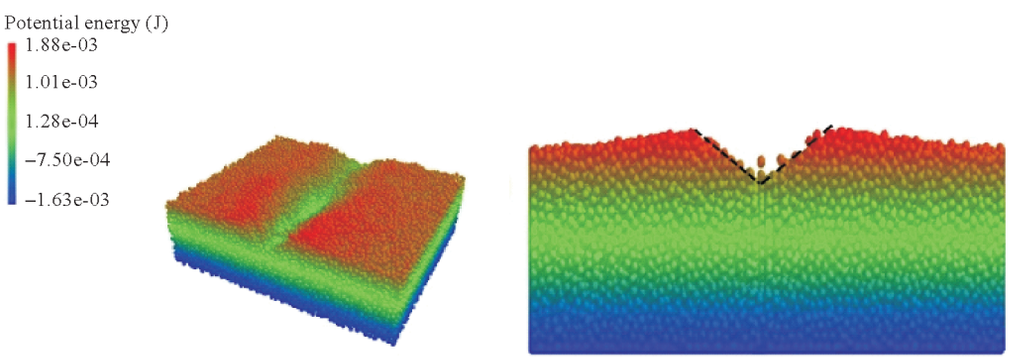
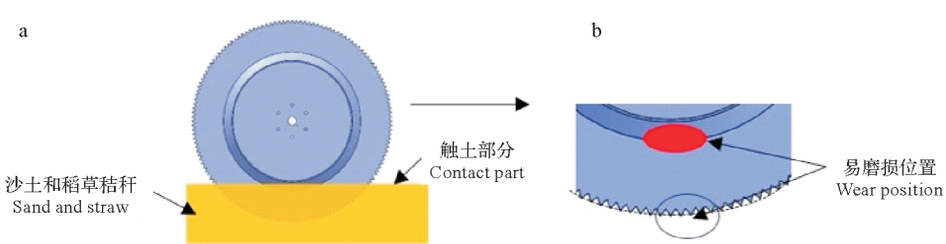


图17　沙土颗粒扰动能量分布

Fig.17　Disturbance energy distribution of sand particles

当外缘齿完全磨损到齿根时,在限深装置作用下,导致外缘齿尖无法与深处沙土很好啮合抱死,加强筋位置因滑移产生严重的磨粒磨损失效,如图18为理论磨损位置示意图。压草碾轮因厚度减小导致强度不够,并且切断稻草秸秆;当凸台位置被磨损到与压草碾轮平面的夹角小于30°时,无法限深,整个压草碾轮会全部陷入沙土,机器无法正常作业。明晰了压草碾轮磨损原因和位置,为后续优化材料选择和结构优化提供新的思路。



a.触土部分示意　　b.磨损位置理论分析示意

a.Schematic diagram of the contact part　　b.Schematic diagram of the theoretical analysis of the wear position

图18　磨损位置分析示意

Fig.18　Schematic diagram of wear position analysis

3.3　前进速度对铺设质量的影响

前进速度影响沙土扰动,沙土扰动进而影响铺设质量。本研究设计的20 mm锯齿在增大摩擦力的同时解决了压草过程中的推草和勾草,分析过程如图19所示。当在机器低速作业情况下,碾轮外缘齿与

深层沙土啮合，将铺设好的秸秆挤压到齿槽中间，随着压草碾轮转过一定角度时从齿间落下，顺利压制成沙障，有效解决了推草现象。但压草碾轮在速度超过合理范围时，易产生偏载和作业误差，且稻草秸秆没有下落反应时间，会产生带草，秸秆被高速转动的锯齿从沙土中甩出。

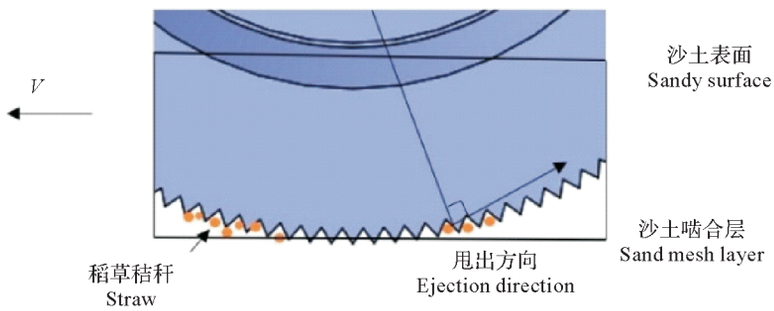


图 19 “推草”和“带草”分析示意图

Fig.19 Schematic diagram of “push grass” and “carry grass” analysis

前进速度影响稻草秸秆的变形和沙土扰动，采用仿真和试验分析相结合的方法，进一步研究分析压草碾轮在作业过程中的运动状态和受力情况，着重对前进速度与水平方向关系作定量分析研究[24]。

3.3.1 前进速度对沙土扰动的影响

在仿真建模阶段，为减少计算量并提升计算效率，故放大沙土颗粒，选择模拟工况下的速度不宜过快，产生较大的扰动从而影响模型精度。如图 20 所示，选择仿真稳定工作阶段沙土扰动截面，取模拟工况下较小的 6 个速度为 0.25，0.30，0.35，0.40，0.45，0.50 m/s，时间步长都为 8%，分析不同速度对沙土扰动情况和铺设质量的影响。

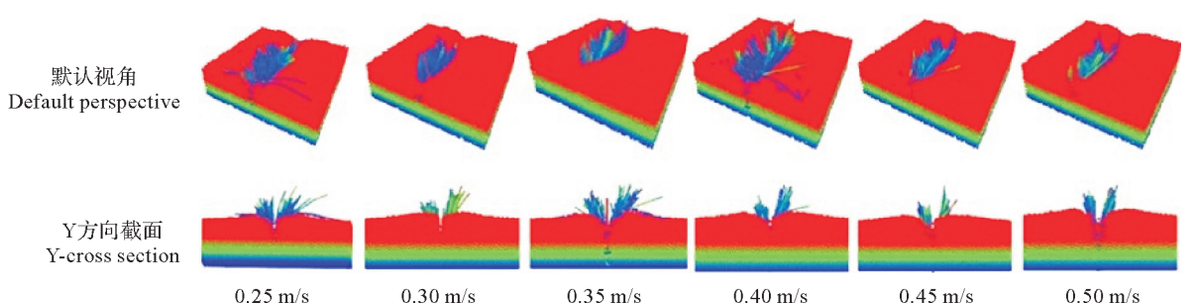


图 20 6 种不同速度下沙土的扰动和铺设质量

Fig.20 Sand disturbance and laying quality at six different speeds

表 2 6 种速度下秸秆变化试验数据

Tab.2 Experimental data on straw changes at six speeds

速度/(m·s^{-1}) Speed	秸秆位移大小/mm Straw displacement size	秸秆位移数量 Straw displacement quantity	秸秆破损率/% Straw breakage rate
0.25	12	13	4
0.30	7	3	10
0.35	5	15	2
0.40	15	20	16
0.45	5	8	6
0.50	4	5	4

压草质量是压制后的稻草秸秆沿机器前进方向的位移，秸秆发生位移的数量和秸秆折断破损率体现。位移越小，数量越少，破损率越低代表质量越好。

对比分析图 20 效果和表 2 数据得出，当模拟速度为 0.4 m/s 时，压草质量最差，压制的沙障损坏秸秆最大；压草速度为 0.35 m/s 时，秸秆沿机器前进方向的位移最小；模拟速度为 0.50 m/s 时，压草质量最好。

沙土的扰动轮廓为V形,沿着V形轮廓的颗粒速度较大,土槽的边缘颗粒和底部的沙土能量最低,几乎没有发生扰动行为。从离散元仿真结果得出:机器的前进速度越快,草杆下压速度越快,沙粒的速度越大,扰动越大,沙土内部结构变化导致摩擦力变化时,作业质量随之下降导致。

3.3.2　前进速度与水平阻力的关系

已有研究将单根柔性稻草秸秆简化3段刚体研究压草规律,草杆的运动状态将直接影响仿真结果的准确性[25]。压草碾轮行走时将草杆高效连续压入沙地,草杆会在压草碾轮和沙土接触的瞬间开始进行弯折,由垂直于沙面向下的平动速度和绕着接触点的一个旋转速度构成的复合运动。前进速度与圆盘水平方向阻力的定量关系需后续继续深入研究。长散稻草秸秆之间互相粘结,简化后的刚体仿真模型不能准确反映出压草碾轮在压草过程中的水平受力,故在研究前进速度和水平方向的阻力关系时,需要考虑到草杆之间的粘附力,因此将草杆之间的粘附力考虑在内,传统粘附力的计算公式如下:

$$F = \gamma \times (2 \times \cos\theta \div r) \tag{9}$$

式(9)中,F表示粘附力,γ表示表面张力系数,θ表示接触角,r表示接触半径。

上述公式的推导可以通过应用牛顿第三定律和平衡条件来得到。根据上式建立机器在匀速前进下,稻草秸秆存在粘附力情况下的定量关系式:

$$F_{水} = F_{粘} + f_1 + f_2 \tag{10}$$

$$F_{水} = \gamma \times (2 \times \cos\theta \div r) + +\mu_1 Mg + \mu_2 \Sigma_{i=1}^{N} m_{ni} g \tag{11}$$

式(10)(11)中:M表示压草碾轮中心轴沿竖直方向所受重力;m_{ni}表示每根稻草秸秆的质量,μ_1表示稻草秸秆与压草碾轮之间的摩擦系数,μ_2表示稻草秸秆与沙土之间的摩擦系数,$F_{水}$表示压草碾轮沿前进方向的水平合力,$F_{粘}$表示稻草秸秆之间的粘附力。已有研究表明竖直方向上插草阻力为[25]:

$$F_{竖} = \Sigma_{i=1}^{N} F_{ni} \cdot \cos\theta_i \tag{12}$$

式(12)中:F为插草圆盘竖直方向阻力;F_{ni}为每根草秆给圆盘的法向压力;N为插草圆盘在稳定插草过程中所接触的草秆数量;θ_i为每根草秆给圆盘的法向压力与竖直方向的夹角。

由式(11)(12)得出,考虑草杆之间的存在均匀粘附力,在机器匀速作业行进时,水平方向阻力与机器自身重量和单位时间内接触草杆数量和草杆粘附力有关,且都成正相关。因沙土内部差异不同导致压草深度发生变化,压制草方格沙障的效果也会受到影响。

3.4　压草碾轮外缘锯齿对铺设质量的影响

为对比分析锯齿形压草碾轮和压草圆盘对铺设质量的影响,基于柔性秸秆模型对圆盘型和加装锯齿2种形状的部件进行仿真分析,在建立沙土-稻草秸秆-压草碾轮三者互作离散元模型中,压草碾轮的压入深度为150 mm时,前进速度1.5 m/s条件作业时,以秸秆位移为单一影响因素[26],基于不同齿形的仿真和试验的秸秆位移参数如图21、图22所示。

试验设置压盘前进速度均为1.5 m/s时,0.5 s时间仿真内,沙障位移参数图如图21所示,铺设后的秸秆位移圆盘型和锯齿形分别为109.6 mm,27.2 mm。实验中秸秆参数位移如图22所示,实验中秸秆位移圆盘型和锯齿型分别为140 mm,23.5 mm。从以上两组试验中得到压草碾轮边缘设计锯齿之后铺设质量有明显提升。

压草合格率是铺设后草方格沙障满足《GB/T 21141—2007 防沙治沙技术规范》的要求沙障在铺设草方格沙障总数量的百分占比,草方格沙障合格率在70%以上即为合格。实地测量并记录相关数据(图23,表3)。

在实际试验过程中,随机对10 m范围内的压制完成的沙障测量,得到圆盘对柔性秸秆沿前进方向的位移变化为2.58 m,压草累计合格率为74.2%;锯齿形压草碾轮对柔性秸秆沿前进方向的位移变化为1.44 m,在10 m测量范围内,压草累计合格率为85.6%。对比以上试验结果分析得出:不同齿形的压草碾轮对稻草秸秆的铺设质量有直接影响,圆盘与柔性秸秆接触作用时,将原本铺设均匀的稻草秸秆堆积,压制形成沙障断续不满足要求的现象,锯齿形压草碾轮有效提高铺设合格率11.4%。

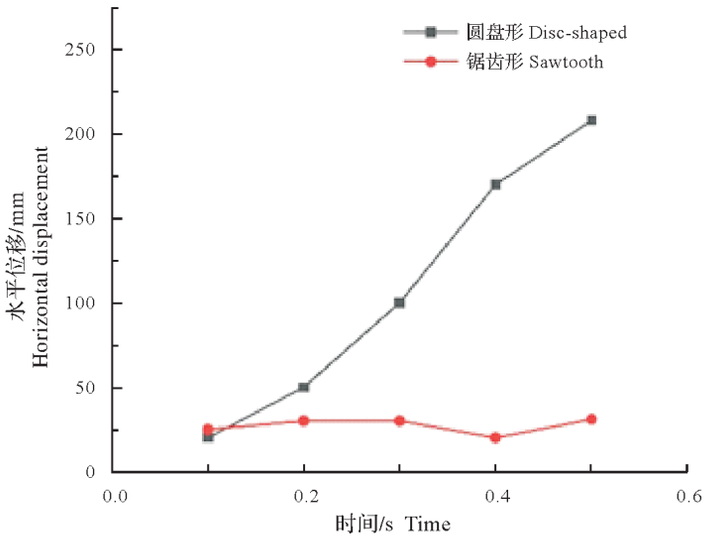
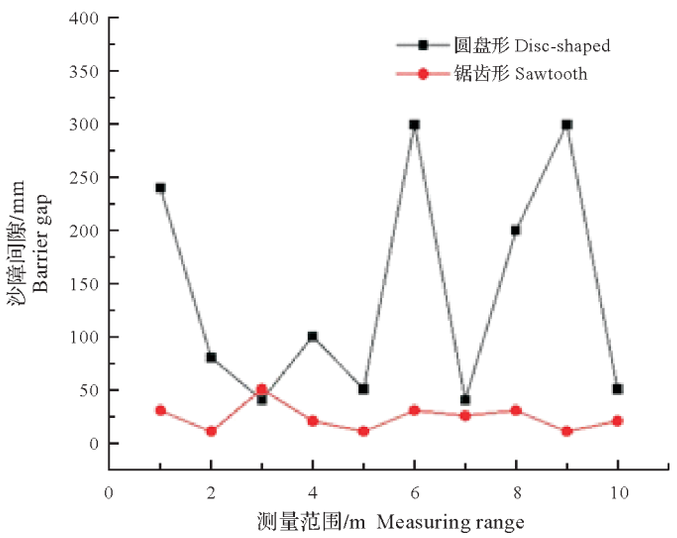


图 21 仿真秸秆位移参数结果

Fig.21 Simulation straw displacement parameter results



沙障间隙表示沙障断草空缺所占百分比，是衡量沙障铺设均匀性的指标。

Sand barrier gaps indicate the percentage of grass-break vacancies in the sand barriers and are an indicator of the uniformity of sand barrier placement.

图 22 实验秸秆参数位移结果

Fig.22 experimental straw parameter displacement results



图 23 实地测量压草合格率

Fig 23 Field measurement of grass-crushing compliance

表 3　实地测量压草时秸秆位移数据和合格率

Tab.3　Straw displacement data and pass rate during field measurement of grass compaction

位移/m Displacement	圆盘形/m Disc-shaped	锯齿形/m Sawtooth
0~2	1.6	1.7
2~4	1.55	1.75
4~6	1.3	1.73
6~8	1.57	1.64
8~10	1.4	1.74
10 m范围内累计合格率/%	74.2	85.6

4　试验验证

4.1　试验设备与参数

2023年11月在甘肃省民勤县沙漠深处利用试制的小型草方格铺压一体机进行压草试验验证。试验材料选择人工铺设采用的成捆长散稻草秸秆,考虑到沙漠实地的复杂情况对试验验证的准确性的影响,忽略风速对于表面沙土的扰动和稻草秸秆铺设质量的影响。采用实物装置进行验证,如图24所示,设置试验参数与仿真参数一致,前进的速度为v为1.5 m/s,压草碾轮试验后作业效果如图25所示。



图24　沙漠实地试验

Fig.24　Field test in desert



图25　压制沙障效果

Fig.25　Effect of compressed sand barrier

5.2　试验过程与分析

如图25所示为压制后的草方格沙障,压制质量符合作业要求,并未出现大量推草和带草现象。在试验区随机抽取20组铺设完成的稻草秸秆,如图26所示为测量所得的压草碾轮压入沙土的秸秆长度,进行测量并记录数据,如图27所示为数据散点图,求得压入深度的平均值为17.25 cm。根据《GB/T 21141—2007防沙治沙技术规范》,处在沙面以下10~15 cm,压草碾轮试验验证结果符合技术标准。



图26　测量压入沙面以下稻草秸秆长度

Fig.26　Measuring straw length below the sand surface

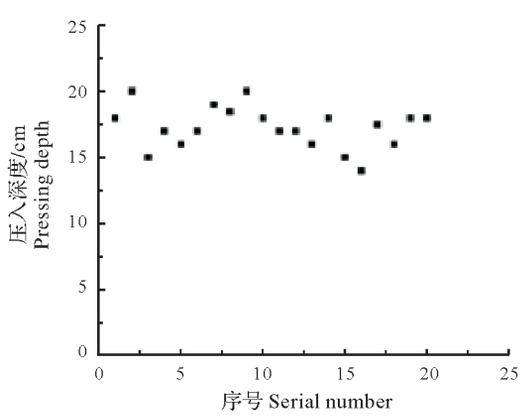


图27　压入深度分析

Fig.27　Analysis of pressing depth

设置不同的前进速度进行试验，发现秸秆的断裂变形情况并无明显增加，但速度过快会导致作业质量不稳定。沙漠环境复杂，沙土中的结构差异导致阻力不同，过快的速度产生的冲击载荷会对压草碾轮在沙面以下部分造成失效甚至严重破坏。压草碾轮垂直方向受力面积小，易造成偏载不稳定。结合实际作业要求，保证效率和稳定性的要求下，将机器的合理作业速度限制在1.5~2 m/s的范围内。

为验证仿真模型微观机理的变化，选取数值仿真结果中稳定压制沙障的土槽截面，如图28所示，图中V形虚线表示压草碾轮的轮廓。在机器匀速前进作业中，选取3组数据点记录来测量沟形轮廓，用平滑曲线将数据点连起来，将测量的轮廓数据点的拟合曲线与仿真扰动截面对比，如图29所示。

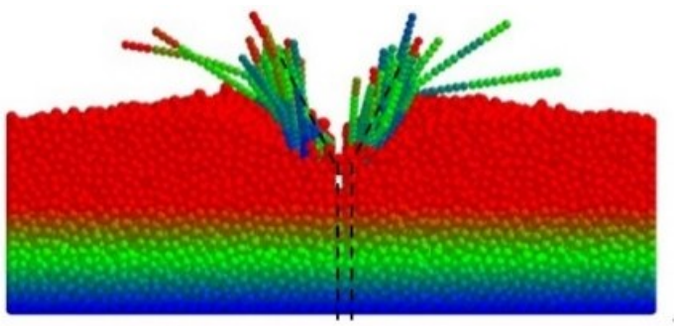


图28 离散元仿真沙土扰动截面

Fig.28 Cross section of sand disturbance simulated by discrete element

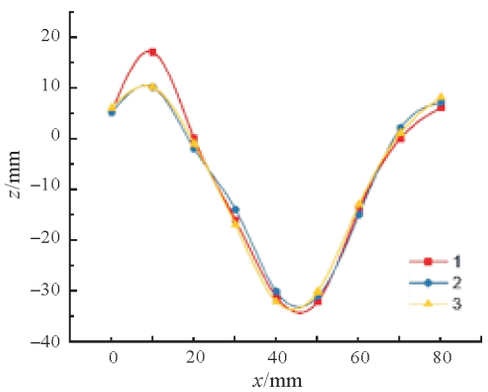


图29 实地试验沙土扰动截面

Fig.29 Sand disturbance cross section of field test

根据上图仿真结果与试验数据曲线的对比得出，沙土表面轮廓呈V形分布，与压草碾轮触土部分结构一致，表面V形轮廓也较为整齐，秸秆被压入过程中的能量扰动较大，沙土槽边缘和深处几乎没有发生土壤扰动。离压制沙障区域越远扰动范围越小，沙土扰动范围与速度和单位距离内铺草厚度有关，与仿真与试验仿真分析结果趋势基本一致，仿真模型能够准确的反映压草过程的沙土扰动变化。但沙土结构复杂不一，要求刚性碾轮的固定安装位置和方式需要调整，例如加装液压升降系统和地面仿形装置[27]，以适应复杂工况，提高机器稳定性能并降低驾驶操作难度。

5 结 论

（1）压草碾轮结构优化设计，加装20 mm锯齿和边缘限深装置，可解决推草甩草和提高稳定性，并对强度进行仿真分析，所设计结构满足要求。设计锯齿形和圆盘形压盘进行仿真和试验分析，通过秸秆位移参数分析得出锯齿形压草碾轮压草质量优于圆盘形，有效提高压草合格率11.4%。

（2）利用离散元仿真软件进行数值模拟分析，建立了沙土-秸秆-压草碾轮三者互作模型，验证了柔性秸秆离散元模型合理性，并对稻草秸秆的断裂变形对铺设的影响分析研究。在考虑秸秆粘结的情况下，对压草碾轮所受水平阻力做定量分析研究。压草碾轮因滑动摩擦产生磨粒磨损进行作用规律分析，得出磨损加剧会导致均匀下降和作业质量不稳定，拟采用耐磨材料对特定区域加强处理。

（3）对压草过程中的沙土扰动进行仿真与试验效果进行对比，轮廓基本吻合，验证出模型能够准确仿真压草过程。确定合理作业速度为1.5~2 m/s时，压制而成的草方格沙障的效果最好，沙土扰动轮廓与压草碾轮结构轮廓基本一致。秸秆-沙土-压草碾轮三者的离散元互作模型对秸秆压入过程的微观运动行为研究是可行且合理的，离散元模型的应用有利于对草方格固沙设备的设计与优化提供理论依据。

参考文献 References：

[1] 李小东，牟瑞，戴敏，等.基于机械化的防沙治沙新模式[J].温带林业研究，2018，1(4)：58-62.
LI X D，MOU R，DAI M，et al.A new desert control model based on mechanization[J].Journal of temperate forestry research，2018，1(4)：58-62.

[2] 徐先英，赵鹏，唐进年，等.我国治沙机械研发现状与展望[J].林业和草原机械，2020，1(2)：21-25.

XU X Y,ZHAO P,TANG J N,et al.Review on the present status and prospects of research for the machinery in the filed of sand-fixing afforestation in China[J].Forestry and grassland machinery,2020,1(2):21-25.

[3] 刘大为.草方格治沙的奥秘[J].力学与实践,2013,35(2):102-105.
LIU D W.Mystery of grass grid control of sand[J].Mechanicsin engineering,2013,35(2):102-105.

[4] HUANG N,XIA X,P,TONG D.Numerical simulation of wind sand movement in straw checkerboard barriers[J].European physical journal E,2013,36(9):1-7.

[5] BO T L,MA P,ZHENG X J.Numerical study on the effect of semi-buried straw checkerboard sand barriers belt on the wind speed[J].Aeolian research,2015,16:101-107.

[6] 常桥墩.小型草方格固沙机的设计[D].银川:宁夏大学,2021.
CHANG Q D.Design of a small-scale grass square lattice sand fixer[D].Yinchuan:Ningxia University,2021.

[7] 鲜傲寒.纵向喂供式复合插草机构的研究与设计[D].北京:北京林业大学,2019.
XIAN A H.Research and design of longitudinal feeding compound grass inserting mechanism[D].Beijing:Beijing Forestry University,2019.

[8] 李艳洁,寇英涛,张恒宇,等.固沙装备插草圆盘前进速度与阻力关系分析[J].中国农业大学学报,2020,25(10):137-146.
LI Y J,KOU Y T,ZHANG H Y,et al.Analysis on the relationship between the blade velocity and resistance of the sand fixing equipment[J].Journal of China agricultural university,2020,25(10):137-146.

[9] 张恒宇.沙地插草阻力影响因素的试验研究与DEM模拟[D].北京:北京林业大学,2019.
ZHANG H Y.DEM Simulation and experimental study on resistance of the sand fixing equipment inserting straws[D].Beijing:Beijing Forestry University,2019.

[10] 易跃,刘扬九,张恒宇,等.插草刀盘将柔性草杆植入沙土阻力的影响因素[J].水土保持通报,2017,37(6):157-161.
YI Y,LIU Y J,ZHANG H Y,et al.Influence factors of resistance on disk inserting soft straws into sandy soil[J].Bulletin of soil and water conservation,2017,37(6):157-161.

[11] 周炎广,李红悦,武子丰,等.毛乌素沙地沙障固沙机制与效益评估[J].科学通报,2023,68(11):1312-1329.
ZHOU Y G,LI H Y,WU Z F,et al.Sand fixation mechanism and effect evaluation of sand barriers in Mu Us sandy land,China[J].Chinese science bulletin,2023,68(11):1312-1329.

[12] 徐冬冬,王元清,刘晓玲,等.纵向变厚度(LP)矩形钢板弹性屈曲系数的理论分析[J].工程力学,2020,37(9):173-183.
XU D D,WANG Y Q,LIU X L,et al.Theoretical analysis of elastic buckling coefficient of rectangular longitudinally profiled steel plates[J].Engineering mechanics,2020,37(9):173-183.

[13] 龚凤,胡嫚,鲍安红,等.基于Hertz-Mindlin模型的稻草秸秆参数标定及显著性分析[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(12):186-196.
GONG F,HU M,BAO A H,et al.Parameter calibration and significance analysis of rice straw based on hertz-mindlin model[J].Journal of southwest university(natural science edition),2022,44(12):186-196.

[14] 李村,刘晋浩,唐伟国.一种沙障插入试验装置设计与仿真[J].农业工程,2016,6(5):109-112.
LI C,LIU J H,TANG W G.Design and simulation of a sand barrier insertion test device[J].Journal of agricultural engineering,2016,6(5):109-112.

[15] 杨摄,郑明军,吴文江,等.基于离散元的风沙沙粒物理特性参数标定[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(1):49-57.
YANG S,ZHENG M J,WU W J,et al.Calibration of physical characteristics of wind sand particles based on discrete element method[J].Journal of Shijiazhuang tiedao university(natural science edition),2021,34(1):49-57.

[16] 侯杰,谢方平,王修善,等.水稻茎秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J].江西农业大学学报,2022,44(3):747-758.
HOU J,XIE F P,WANG X S,et al.Measurement of contact physical parameters of flexible rice straw and discrete element simulation calibration[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(3):747-758.

[17] 毕于运,高春雨,王亚静,等.中国秸秆资源数量估算[J].农业工程学报,2009,25(12):211-217.
BI Y Y,GAO C Y,WANG Y J,et al.Estimation of straw resources in China[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2009,25(12):211-217.

[18] 孙占峰,蒋恩臣.稻草秸秆力学特性研究[J].东北农业大学学报,2007,153(5):660-664.
SUN Z F,JIANG E C.Study on mechanical properties of rice straw[J].Journal of northeast agricultural university,2007,153(5):660-664.

[19] 郝志豪,郑恩来,李勋,等.免耕播种机旋耕刀耕作性能分析与结构优化[J].农业工程学报,2023,39(2):1-13.
HAO Z H,ZHENG E L,LI X,et al.Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2023,39(2):1-13.

[20] 王志波,李军,宋海军,等.基于滑移条件下的履带车辆剪切位移特性试验研究[J].兵器装备工程学报,2021,42(3):231-234.
WANG Z B,LI J,SONG H J,et al.Experimental study on shear displacement characteristics of tracked vehicle under slip condition[J].Journal of ordnance equipment engineering,2021,42(3):231-234.

[21] 吴志立,赵建杰,吴明亮,等.农机土壤工作部件耐磨强化研究进展[J].中国农机化学报,2016,37(8):256-264.
WU Z L,ZHAO J J,WU M L,et al.Progress in wear resistance and surface modification of soil cultivating components for agricultural machinery[J].Chinese journal of agricultural mechanization,2016,37(8):256-264.

[22] 王玉杰.基于离散元法的车轮与松软地面相互作用分析[D].长春:吉林大学,2012.
WANG Y J.The analysis of the interaction between wheel and soft ground based on DEM[D].Changchun:Jilin University,2012.

[23] 张智泓,陈朝阳,赖庆辉,等.仿生布利冈结构农机耐磨触土部件设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(1):28-37.
ZHANG Z H,CHEN Z Y,LAI Q H,et al.Design and experiments of the Bouligand structure inspired bionic wear resistant soil-engaging component for the agricultural machinery[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2023,39(1):28-37.

[24] 董向前,苏辰,郑慧娜,等.基于DEM-MBD耦合算法的振动深松土壤扰动过程分析[J].农业工程学报,2022,38(1):34-43.
DONG X Q,SU C,ZHENG H N,et al.Analysis of soil disturbance process by vibrating subsoiling based on DEM-MBD coupling algorithm[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2022,38(1):34-43.

[25] 张恒宇,李艳洁.固沙圆盘刀滚动插草的草杆运动分析[C]//北京力学会.北京力学会第二十五届学术年会会议论文集,2019:1146-1147.
ZHANG H Y,LI Y J.Motion analysis of straw rod for rolling insert of sand fixation disc cutter[C]//Beijing Mechanics Society.Proceedings of the 25th Annual Conference of the Beijing Mechanics Society,2019:1146-1147.

[26] 孙萌萌,宋明翰,何瑞银,等.齿盘式秸秆移位装置设计与试验[J].中国农机化学报,2021,42(12):30-36.
SUN M M,SONG M H,HE R Y,et al.D Design and test of a toothed tray-type straw shifting device[J].Chinese journal of agricultural mechanization,2021,42(12):30-36.

[27] 刘平义,王春燕,李海涛,等.丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(2):74-81.
LIU P Y,WANG C Y,LI H T,et al.Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2018,49(2):74-81.