

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.028

基于 CFD - DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验

刘鹏 何进 章志强 卢彩云 张振国 林涵

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为明确玉米碎秆在粉碎室内运动机理, 基于 CFD - DEM 耦合分析不同粉碎刀轴转速碎秆运动过程和受力变化规律。仿真结果表明, 当转速为 1 900、2 000 r/min 时, 碎秆-粉碎室壁面平均相互作用力波动较为剧烈, 2 300 r/min 时稳定在 (175.228 ± 19.08) N, 且碎秆平均能量大幅增加。当转速为 1 900、2 000、2 300 r/min 时, 碎秆间平均作用力最大分别为 10.61、7.78、18.76 N, 碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力分别稳定在 (112.36 ± 8.32) N、 (101.15 ± 8.02) N 和 (107.25 ± 4.97) N, 碎秆抛撒均匀度分别为 $(85.40 \pm 4.77)\%$ 、 $(78.52 \pm 5.56)\%$ 和 $(75.17 \pm 5.32)\%$ 。粉碎刀轴转速增大, 使得碎秆-碎秆及碎秆-粉碎室壁面平均相互作用力增大, 导致碎秆间及碎秆与粉碎室壁面的碰撞次数增多, 加剧了碎秆能量的损耗, 过大转速不利于碎秆抛撒均匀度提升。为验证仿真结果, 进行田间试验验证。结果表明, 当转速为 1 900、2 000、2 300 r/min 时碎秆抛撒均匀度分别为 $(82.35 \pm 6.57)\%$ 、 $(76.14 \pm 7.18)\%$ 和 $(74.22 \pm 5.65)\%$ 。田间试验和仿真结果表明在碎秆长度达标后, 增大粉碎刀轴转速不利于抛撒均匀度提升, 且作业功耗上升较大, 同时验证了仿真的准确性。该研究可为玉米秸秆还田机设计和优化提供支撑。

关键词: 玉米秸秆; 计算流体力学; 离散元法; 耦合; 流场分析; 运动特性

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0244-10

Kinematic Characteristic Analysis and Field Test of Chopped Stalk in Straw Retention Machine Based on CFD - DEM Coupling Simulation Method

LIU Peng HE Jin ZHANG Zhiqiang LU Caiyun ZHANG Zhenguo LIN Han

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Corn straw retention of which need chopped quality and spreading uniformity to fit performance standard, is an important method to overcome waste and open burning of corn straw. However, because of lacking mechanical and motion characters of chopped straw in chopped charmer, which lead to difficultly know the kinematic and dynamic characters of chopped straw in chopped charmer, the development of straw spreading uniformity device was constraint. The computational fluid dynamics technology (CFD)-discrete element method (DEM) coupling simulation was used to conduct motion and force analysis of chopped corn straw at different chopped shaft rotation velocities (1 900 r/min, 2 100 r/min and 2 300 r/min). The simulation results conducted that most chopped straws flowed out from the top of the chopped charmer after multiple collisions, and small part of chopped straw flowed out from the bottom of the chopped charmer and rotates around the chopping knife shaft. In the chopped charmer, the air flow velocity in the area of the chopping knife shaft and the exit of the chopped charmer was larger than the surroundings. Simultaneously, vortex region was generated near chopped knife shaft area and the front wall of chopped charmer. The average interaction force between air and chopped straw was small, and the maximum average interaction force was 0.000 763 N. Fluctuation range of average interaction force between air and chopped straw and average interaction force between chopped straw were increased with the increase of rotation velocity of chopped knife shaft. This was the reason of collision increasing between chopped straw. Consequently, the energy of chopped straw in the motion was decreased. The maximum average interaction force between chopped straw was 10.61 N, 7.78 N and 18.76 N at 1 900 r/min, 2 100 r/min and 2 300 r/min, respectively. After 0.2 s, the violent fluctuation of average interaction

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971803)

作者简介: 刘鹏(1994—), 男, 博士生, 主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究, E-mail: liupeng_ctr@cau.edu.cn

通信作者: 何进(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究, E-mail: hejin@cau.edu.cn

force between chopped straw and chopped knife shaft wall was occurred, especially at the rotation velocity of chopped knife shaft of 1 900 r/min or 2 100 r/min. The maximum average interaction force between chopped straw and chopped knife shaft wall was 123.73 N and 184.88 N, respectively. The average interaction force at 2 300 r/min after 0.5 s was fluctuated within (175.228 ± 19.08) N, and its fluctuation intensity was less than 1 900 r/min and 2 000 r/min. After 0.8 s, the average interaction force between chopped straw and chopped knife shaft wall was fluctuated within (112.36 ± 8.32) N, (101.15 ± 8.02) N and (107.25 ± 4.97) N at 1 900 r/min, 2 100 r/min and 2 300 r/min, respectively. The average energy of chopped straw in chopped charmer showed a trend of increasing fluctuations. Increasing the speed of chopped knife shaft from 1 900 r/min to 2 100 r/min, the average energy of chopped straw was not obvious. However, when it was increased to 2 300 r/min, the average energy of chopped straw was increased significantly, with the maximum increase rate of 68.26% and 63.92%, compared with 1 900 r/min and 2 100 r/min, respectively. In addition, average pitch angle of chopped straw was fluctuated within 89°. Importantly, the change of air flow field and chopped straw motion charmer would directly impact the chopped straw uniform distribution. The simulation results based on CFD-DEM coupling simulation conducted that chopped straw uniform distribution at 1 900 r/min, 2 100 r/min and 2 300 r/min was (85.40 ± 4.77)%, (78.52 ± 5.56)% and (75.17 ± 5.32)%, respectively. The field test results conducted that chopped straw uniform distribution at 1 900 r/min, 2 100 r/min and 2 300 r/min was (82.35 ± 6.57)%, (76.14 ± 7.18)% and (74.22 ± 5.65)%, respectively. Furthermore, the working power at 1 900 r/min, 2 100 r/min and 2 300 r/min was 8.83 kW, 9.51 kW and 13.16 kW, respectively. The field test and simulation results all conducted that when the length of chopped straw met the requirement, increasing rotation velocity of chopped shaft was not conducive to improving the uniformity distribution and correctness of CFD-DEM simulation results were confirmed. Importantly, the working power dissipation would be sharply increased with the increase of rotation velocity of chopped knife shaft when corn straw chopping qualified rate satisfied with the standard. The research would provide the reference to design and optimization of corn straw chopped and spread machine.

Key words: corn straw; computational fluid mechanics; discrete element method; coupling; analysis of airflow field; motion characteristic

0 引言

玉米秸秆含有丰富的营养物质,可以作为饲料、基料、燃料、肥料等^[1-5]。秸秆还田是最为简单经济的方法,能有效增加土壤有机质,降低土壤容重,改善土壤结构,增加作物产量^[6-10]。但是,秸秆不均匀的抛撒将会影响下茬作物的出苗和生长,进而影响下茬作物产量。

为了增加秸秆的抛撒均匀度,国内外研究学者从增加粉碎刀轴转速、改善粉碎刀结构、改善粉碎室内空气流动特性、改进粉碎室形状、安装抛撒调节装置等方面进行了研究^[11-17]。虽然这些研究提高了秸秆抛撒均匀度,但只是基于田间试验结果,验证机具结构设计的合理性,但是缺乏碎秆在粉碎室内运动特性研究。

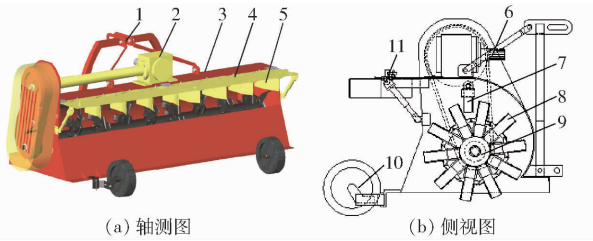
秸秆抛撒过程中粉碎刀轴高速旋转,碎秆处在空气流场、物料场、重力场等多场并存的复杂环境中,导致无法明确粉碎室内碎秆的运动和受力过程。这使得单纯采用传统的计算流体力学(CFD)模拟或离散元单元法(DEM)模拟难以精确模拟碎秆在粉碎室内的运动特性。目前,CFD-DEM 耦合

已经广泛应用于气力输送、精量排种排肥、流化床等方面研究^[18-22],但是应用于秸秆抛撒过程上鲜有报道。基于前期研究^[11],本文利用 CFD-DEM 耦合的方法模拟碎秆在粉碎室内的运动受力过程,阐明秸秆在气流场作用下的运动姿态,从而为秸秆粉碎抛撒装置的设计与优化提供理论基础和支撑。

1 材料与方法

1.1 秸秆粉碎抛撒还田机结构

秸秆粉碎抛撒还田机主要由粉碎室、粉碎装置(粉碎刀轴、粉碎刀、定刀)、抛撒装置(导向叶片、导流板、导向叶片调节装置)、悬挂装置、传动装置和行走装置等组成,如图 1 所示^[11]。粉碎刀呈双螺旋排布安装在粉碎刀轴上,相邻粉碎刀之间安装有一把定刀;导流板铰接在粉碎室排草口处,导向叶片调节装置安装在导流板上下两面,控制曲面粉碎室出口处抛出碎秆的幅宽、均匀度和距离等;传动装置安装在曲面粉碎室左侧和上部,为秸秆粉碎抛撒还田机提供动力;悬挂装置把秸秆粉碎抛撒还田机挂接于拖拉机上,行走装置支撑机器行走和调节粉碎刀刀尖离地间隙。



(a) 轴测图 (b) 侧视图

图1 秸秆粉碎抛撒还田机结构图

Fig.1 Structure diagrams of corn chopped and spreading machine

1. 悬挂装置 2. 传动装置 3. 粉碎室 4. 导流板 5. 导向叶片
6. 动力输入轴 7. 定刀 8. 粉碎刀 9. 粉碎刀轴 10. 行走装置
11. 导向叶片调节装置

1.2 碎秆仿真模型

玉米碎秆粉碎作业后,碎秆形状多样(条状、丝状、块状等)。为提高运算效率,将碎秆视为由刚性体小球组合成的圆柱^[23-24]。在 CFD-DEM 耦合模拟中,球形颗粒体积应小于流体网格的最小体积^[25]。因此采用 90 个直径为 2 mm 的球形颗粒近似直径为 5.6 mm 和长度为 18.2 mm 的细碎玉米碎秆(图 2),碎秆长径比为 3.25,球形度为 0.77。

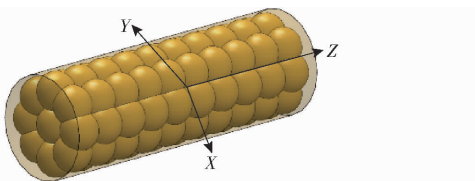


图2 玉米碎秆离散元模型

Fig.2 Corn chopped straw discrete element model

1.3 秸秆粉碎抛撒还田机仿真模型

在 SolidWorks 中建立秸秆粉碎抛撒还田机三维模型,保存为 step 格式导入到 EDEM 中,并开始生成颗粒(图 3)。流体域通过 ICEM-CFD 定义流体入口和出口,利用多面体网格对机壳、粉碎刀轴和流体域划分网格,共划分 873 186 个多面体网格。秸秆粉碎抛撒还田机其他参数如表 1 所示。

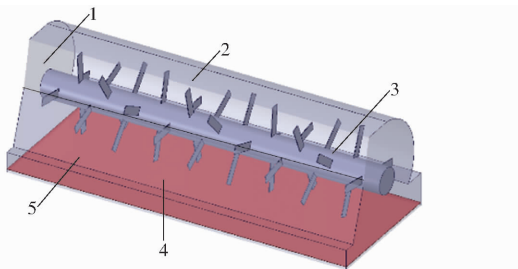


图3 秸秆粉碎抛撒还田机 CFD-DEM 模型

Fig.3 CFD-DEM simplified model of straw chopped and spread machine

1. 流体出口 2. 机壳 3. 粉碎刀轴 4. 流体入口 5. 颗粒工厂平面

1.4 CFD-DEM 耦合分析参数设置

将粉碎室网格文件导入 EDEM 软件中进行固

表1 秸秆粉碎抛撒还田机相关参数

Tab.1 Parameters of straw chopped and spread machine

参数	数值/形式
粉碎室外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 260×863×622
粉碎刀轴转速/(r·min ⁻¹)	1 900, 2 100, 2 300
粉碎刀轴直径/mm	170
粉碎刀轴旋转半径/mm	276
粉碎刀数量	40
粉碎刀排列方式	对称双螺旋线排列

相模拟参数设置,如表 2 所示,并启动耦合模块实现与 Fluent 软件的耦合。接触包括碎秆与碎秆的接触和碎秆与壁面的接触,碎秆与碎秆以及碎秆与壁面之间的接触模型为 Hertz-Minglin (no slip) 模型。粉碎刀轴转速在 EDEM 与 Fluent 保持一致,分别设置为 1 900、2 100、2 300 r/min。碎秆在粉碎室内随机生成,碎秆生成的速度呈正态分布。EDEM 软件中迭代时间步长为 4×10^{-5} s,其他参数如表 2 所示^[26-30]。

表2 EDEM 模拟参数

Tab.2 Simulation parameters of EDEM

参数	数值/形式
碎秆泊松比	0.4
碎秆剪切模量/Pa	1.37×10^8
碎秆密度/(kg·m ⁻³)	900
材料属性	
钢铁泊松比	0.25
钢铁剪切模量/Pa	8×10^{10}
钢铁密度/(kg·m ⁻³)	7 900
碎秆-碎秆恢复系数	0.182
碎秆-碎秆静摩擦因数	0.237
接触参数	
碎秆-碎秆动摩擦因数	0.078 2
碎秆-钢铁恢复系数	0.729
碎秆-钢铁静摩擦因数	0.342
颗粒数量	无限制
颗粒工厂	
颗粒生成速率/(个·s ⁻¹)	10 000
颗粒直径/mm	1.6~2.0
颗粒生成位置及方向	随机

将相同的粉碎室网格文件导入 Fluent 软件中进行流体模拟参数设置,湍流模型为 Reliable $k-\varepsilon$,采用 Phase Coupled SIMPLE 算法进行求解。Fluent 迭代计算的时间步长为 2.0×10^{-3} (为 EDEM 的 50 倍),迭代步数为 1 000 步,总仿真时间为 2 s。

2 结果与讨论

2.1 粉碎室内碎秆颗粒群数量变化

粉碎刀轴转速对粉碎室内碎秆数量的影响如图 4 所示,粉碎刀轴转速对不同时刻粉碎室内碎秆数量影响较小,不同粉碎刀轴转速下的碎秆数量随时间变化曲线相似。0~0.42 s 内粉碎室内碎秆数量呈

线性急剧增加,说明碎秆产生的数量远远大于碎秆流出的数量。0.52 s 时碎秆数量达到最大值,0.52~0.66 s 内碎秆数量稍微减少。0.8 s 后碎秆数量在小范围内波动,说明碎秆产生的数量和碎秆流出的数量达到动态平衡,秸秆粉碎抛撒还田机进入稳定工作状态。

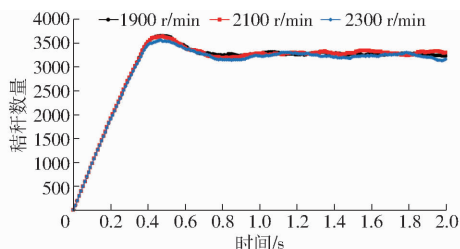


图4 粉碎刀轴转速对粉碎室内碎秆数量的影响
Fig. 4 Effect of rotation velocity on number of chopped straw in chopper charmer

2.2 碎秆颗粒群运动取向和轨迹分析

通过分析圆柱碎秆主轴 OO' 与平面 XOZ 的俯仰角 θ 来研究碎秆在三维空间中的取向,并限定俯仰角 θ 取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ (图5)。 0° 表示 Z 轴或 X 轴的正方向,随后角度沿逆时针方向增大到 180° 。

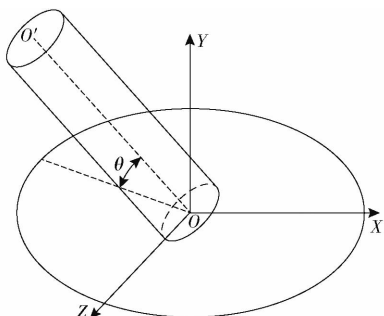


图5 碎秆俯仰角 θ

Fig. 5 Pitch angle of chopped straw (θ)

粉碎刀轴转速对碎秆平均俯仰角的影响如图6所示,秸秆粉碎抛撒还田机处于稳定工作状态时,不同粉碎刀轴转速下的碎秆平均俯仰角随时间变化表现出相似的变化规律。0.4 s 前,粉碎刀轴转速为 1 900、2 100 r/min 的碎秆平均俯仰角随时间逐渐减小,而转速为 2 300 r/min 的碎秆平均俯仰角随时间逐渐增大。0.4 s 后,3 种粉碎刀轴转速下碎秆平均俯仰角分别为 $89^\circ \pm 0.86^\circ$ (1 900 r/min)、 $89^\circ \pm 0.77^\circ$ (2 100 r/min) 和 $89^\circ \pm 1.34^\circ$ (2 300 r/min),表

明碎秆主轴 OO' 与平面 XOZ 基本处于垂直关系。这是因为 0.4 s 后粉碎室内碎秆的产生、碎秆与碎秆之间的碰撞以及气流场分布逐渐趋于稳定。

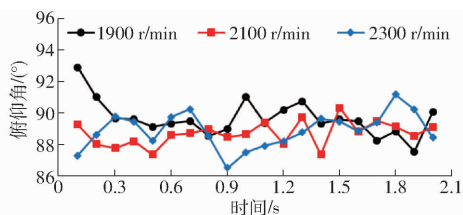


图6 粉碎刀轴转速对碎秆平均俯仰角的影响
Fig. 6 Effect of straw chopping knife shaft rotation velocity on average pitch angle of chopped straw

在 EDEM 软件中选取部分碎秆颗粒,分析碎秆在粉碎室内的运动轨迹(图7)。碎秆随机进入粉碎室后的运动非常复杂,碎秆复杂的运动是粉碎室内气流、碎秆间的碰撞以及碎秆与粉碎室壁面碰撞共同作用的结果(图7a)。碎秆除了有 Y 方向的上、下运动外,还有 X 方向的侧向运动以及 Z 方向的抛出运动。大量碎秆与粉碎室发生碰撞,其中部分碎秆与粉碎室碰撞多次。部分碎秆与粉碎室碰撞后从粉碎室底部流出(图7b),且碰撞部位集中在粉碎室底部;大部分与粉碎室碰撞的碎秆从顶部粉碎室出口处流出,完成碎秆的抛撒过程(图7c),且碰撞部位集中在粉碎室中上部。最后还有部分碎秆留在粉碎室内围绕粉碎刀轴旋转(图7d),因为粉碎刀轴周围存在少量空气绕粉碎刀轴旋转,在这部分空气的带动下,部分碎秆围绕粉碎刀轴旋转,但这部分碎秆在受到扰动时可流出粉碎室。

2.3 粉碎刀轴转速对空气流动的影响

在粉碎室内取 3 个具有代表性的截面 P1~P3 (图8),分析每个截面上的流体流动特性。截面 P1 穿过左侧扇形叶片并与 $Y-Z$ 平面平行,截面 P2 为粉碎室对称面,截面 P3 经过粉碎刀轴中心线并与 $X-Y$ 平面平行。

不同粉碎刀轴转速下的粉碎室截面压力云图如图9所示,秸秆粉碎抛撒还田机进入稳定状态后,粉碎室内空气压力沿轴向分布比较均匀,P3 截面上除粉碎刀轴区域外各处压力基本相同,粉碎刀轴转速对轴向压力分布影响较小(图9a)。粉碎室出口处压力比附近区域压力小,粉碎刀刀尖出现高压区,粉

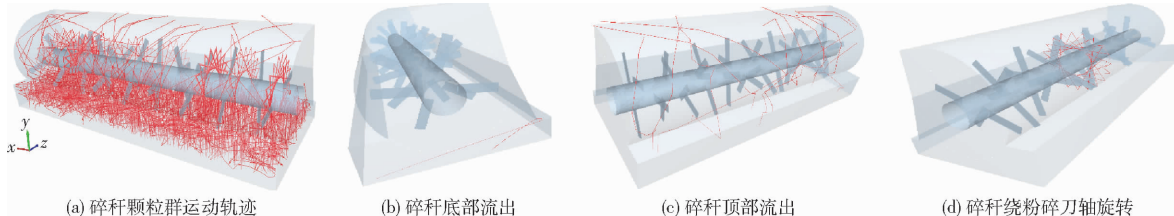


图7 粉碎室内碎秆颗粒运动轨迹

Fig. 7 Motion path of chopped straw in chopped charmer

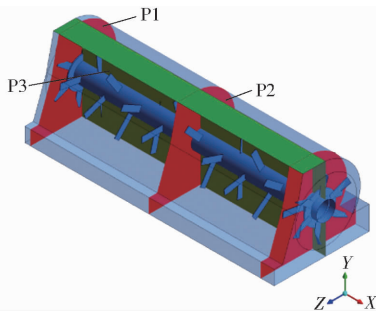


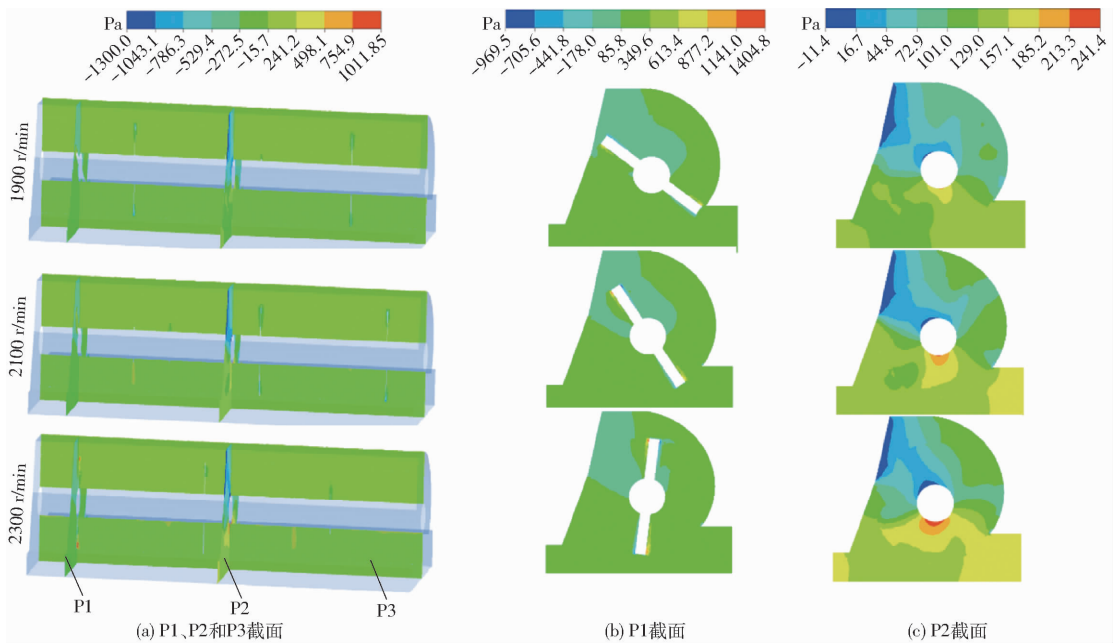
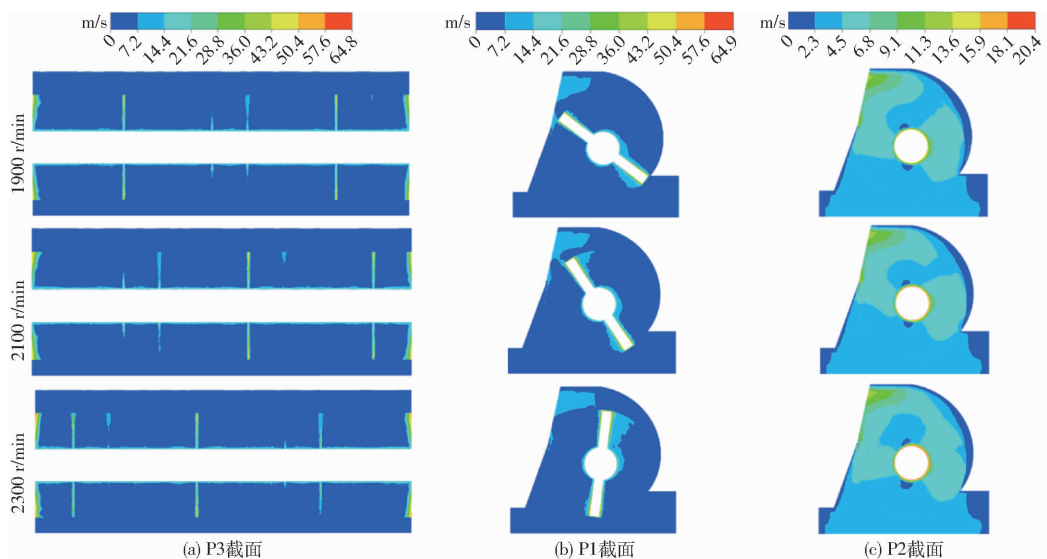
图8 粉碎室截面 P1 ~ P3 及其位置

Fig. 8 Section position of P1 ~ P3 in chopped charm

碎刀轴转速对粉碎室出口处低压区域范围影响较大(图9b)。粉碎室下部的压力比上部的压力高,且在粉碎室出口附近出现负压区(图9c)。粉碎室入口处到出口处的压降说明了能量的消耗,这与碎秆-空

气、碎秆-碎秆、碎秆-粉碎刀轴壁面和碎秆-粉碎室壁面之间的相互作用有关。粉碎刀轴转速对径向压力分布影响较小,且随着粉碎刀轴转速的增加粉碎室出口处的负压区面积随之增大,说明刀轴转速增加的同时碎秆-空气、碎秆-碎秆、碎秆-粉碎刀轴壁面和碎秆-粉碎室壁面之间的相互作用力增加,从而增加了碎秆在气流场中的能量损耗,进而对碎秆抛撒均匀性上升产生负面影响。3种粉碎刀轴转速下的平均压力分别为 104.20 (1 900 r/min)、113.08 (2 100 r/min)、123.59 Pa (2 300 r/min),表明粉碎室内体积平均压力随粉碎刀轴转速的增加而增大。

不同粉碎刀轴转速下的粉碎室截面速度云图如图10所示,秸秆粉碎抛撒还田机进入稳定状态后,

图9 不同粉碎刀轴转速下的粉碎室截面压力云图($t = 2$ s)Fig. 9 Pressure cloud diagrams of cross section of chopped chamber at different rotation velocities ($t = 2$ s)图10 不同粉碎刀轴转速下的粉碎室截面速度云图($t = 2$ s)Fig. 10 Velocity cloud diagrams of cross section of chopped chamber at different rotation velocities ($t = 2$ s)

粉碎刀轴周围气流速度较大,其他区域气流速度基本相同,粉碎刀轴转速对轴向气流速度的分布影响较小(图 10a)。粉碎刀轴区域和粉碎室出口处气流速度比周围气流速度大(图 10b、10c)。因为粉碎刀轴高速旋转对周围气流做功,使得粉碎刀轴区域气流速度增大。另外,由于粉碎室出口的存在,使得粉碎室出口两侧出现较大的压力变化,从而使得粉碎室出口处气流速度增大。粉碎室壁面附近气流速度较低,因为无滑移条件要求流体在壁面处速度为零。粉碎刀轴转速对粉碎室内气流速度的影响主要集中在粉碎室上部。3 种粉碎刀轴转速下体积平均气流速度分别为 4.20(1 900 r/min)、4.24(2 100 r/min)、4.29 m/s(2 300 r/min)。虽然粉碎刀轴转速增大,使得粉碎室内气流体积平均速度增大,但是影响较小。将粉碎室内密度假设为空气密度(1.293 kg/m^3),根据伯努利方程可得,3 种粉碎刀轴转速下的粉碎室内体积总压力分别为 115.60(1 900 r/min)、124.68(2 100 r/min)、135.39 Pa(2 300 r/min),表明粉碎刀轴转速增大使得整个粉碎室内气流场和碎秆

的总能量增大,但增幅较小。

不同粉碎刀轴转速下的 P2 截面上流线和局部速度矢量图如图 11 所示,秸秆粉碎抛撒还田机进入稳定状态后,粉碎室内流线分布比较均匀,空气进入粉碎室内后,大部分经粉碎室前方从粉碎室顶部出口处流出,部分经粉碎室后方从粉碎室顶部出口处流出,还有少量空气绕粉碎刀轴旋转(图 11a),从而易造成碎秆绕粉碎刀轴转动。粉碎刀轴的高速旋转在粉碎室前方壁面附近产生了小范围的涡流区,且粉碎刀轴转速的增加使涡流区域的面积减小。壁面处的涡流与壁面接触的流体速度突然减小为零有关,而壁面下方很小距离处流体仍保持原有的速度向粉碎室顶部流动,于是垂直于壁面方向有很高的速度梯度,紧贴壁面的流体受到粘性力偶的作用开始旋转^[26]。同时,粉碎刀轴的高速旋转除了在粉碎室壁面区域产生自由涡外,还在粉碎刀轴周围产生了强迫涡(图 11b),强迫涡的存在将对绕粉碎刀轴转动的碎秆产生扰动,从而打破碎秆的运动平衡,从而使得碎秆随气流抛离粉碎室。

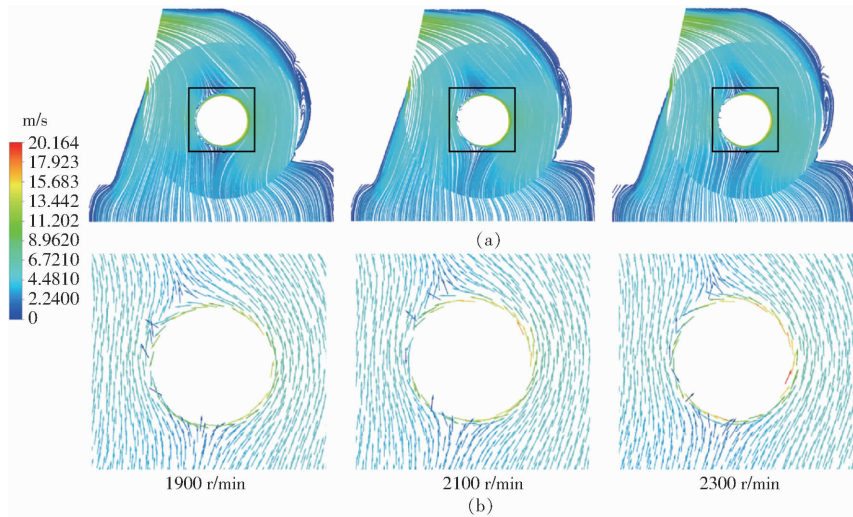


图 11 不同粉碎刀轴转速下的 P2 截面上流线和局部速度矢量图($t = 2 \text{ s}$)

Fig. 11 Streamline and local velocity vector diagram on P2 section at different rotation velocities ($t = 2 \text{ s}$)

2.4 碎秆颗粒群力学分析

2.4.1 碎秆能量变化分析

碎秆能量包括碎秆动能和势能,粉碎刀轴转速对碎秆平均能量的影响如图 12 所示。粉碎室内碎秆平均能量表现出波动增加的趋势。粉碎刀轴转速从 1 900 r/min 增加到 2 100 r/min,碎秆平均能量的增幅不明显,而粉碎刀轴转速从 2 100 r/min 增加到 2 300 r/min 时,碎秆平均能量显著增大。转速为 2 300 r/min 时碎秆的平均能量与转速为 1 900、2 100 r/min 时的碎秆平均能量的差异随时间增大。相对于 1 900、2 100 r/min,2 300 r/min 的碎秆平均能量最大增幅分别可达 68.26% 和 63.92%。

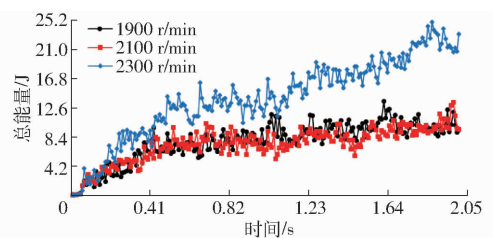


图 12 粉碎刀轴转速对碎秆平均能量的影响

Fig. 12 Effect of straw chopping knife shaft rotation velocity on average energy of chopped straw

2.4.2 碎秆-空气平均相互作用力

碎秆-空气的平均相互作用力主要包括曳力、Saffman 力和 Magnus 力。粉碎刀轴转速下对碎秆-

空气平均作用力的影响如图 13 所示,粉碎室内碎秆-空气平均作用力较小,碎秆-空气平均作用力短时间内(0.04 s)从零急剧增大后在一定范围内波动。碎秆-空气最大平均相互作用力分别为 0.000 409 (1 900 r/min)、0.000 407(2 100 r/min)、0.000 763 N (2 300 r/min)。碎秆-空气平均作用力很小是因为碎秆表面积较小。碎秆-空气平均作用力的波动与粉碎刀轴持续旋转引起的粉碎室内气流周期性变化有关,且 1 900、2 000 r/min 时的波动幅度相似。粉碎刀轴转速增加,导致空气流速增加,以及秸秆-秸秆、秸秆-粉碎室和秸秆-粉碎刀轴之间的碰撞增加,从而粉碎刀轴转速的增加使碎秆-空气平均作用力的波动更剧烈。

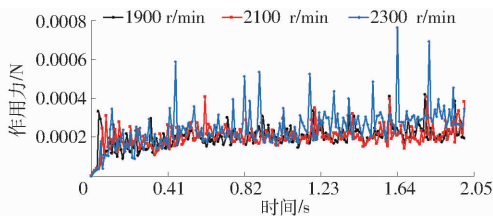


图 13 粉碎刀轴转速对碎秆-空气平均作用力的影响

Fig. 13 Effect of straw chopping knife shaft rotation velocity on average interaction force between chopped straw and air

2.4.3 碎秆-碎秆间平均相互作用力

粉碎刀轴转速对碎秆间平均作用力的影响见图 14,碎秆-碎秆间平均相互作用力呈现剧烈波动,波动幅度随粉碎刀轴转速增大而增大。碎秆-碎秆间平均作用力最大分别达 10.61 (1 900 r/min)、7.78 (2 100 r/min)、18.76 N(2 300 r/min)。碎秆-碎秆平均相互作用力的波动与粉碎室内大量碎秆的无规则运动有关。与图 13 对比发现,碎秆-碎秆平均相互作用力比碎秆-空气相互作用力大得多,说明碎秆之间的相互碰撞对碎秆在粉碎室内的运动影响较大。粉碎刀轴转速的增加使碎秆-碎秆间平均作用力的波动变得更剧烈。另一方面,粉碎刀轴转速的增加使得碎秆能量增加,导致碎秆与碎秆之间的碰撞加剧,从而加速碎秆自身能量的损耗,不利于碎秆的抛出。

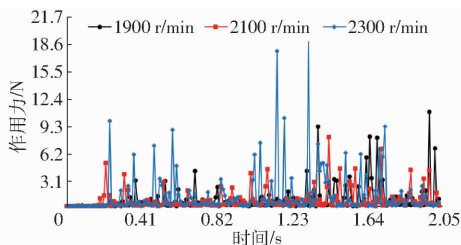


图 14 粉碎刀轴转速对碎秆间平均作用力的影响

Fig. 14 Effect of straw chopping knife shaft rotation velocity on average interaction force between chopped straw

2.4.4 碎秆-壁面平均相互作用力

碎秆-壁面平均相互作用力主要包括碎秆-粉碎

室壁面平均相互作用力和碎秆-粉碎刀轴壁面平均相互作用力。粉碎刀轴转速对碎秆-粉碎室壁面平均作用力的影响如图 15 所示,不同粉碎刀轴转速下碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力都表现出从零急剧增大后,呈波动状态。在 1 900、2 000 r/min 时,碎秆-粉碎室壁面平均相互作用力较为剧烈,其最大平均相互作用力分别可达 123.73、184.88 N;2 300 r/min 时平均相互作用力的波动强度小于 1 900、2 000 r/min 时的波动强度,0.5 s 后稳定在 (175.228 ± 19.08) N 范围波动。碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力的波动与粉碎刀轴周期性转动有关。另外,由于 1 900、2 100 r/min 时,碎秆平均能量、碎秆-空气的相互作用力、碎秆-碎秆法向平均作用力和碎秆-碎秆切向平均作用力相近,导致在 1 900、2 100 r/min 时碎秆-粉碎室壁面平均相互作用力的波动具有相似性。此外,粉碎刀轴转速的增加加剧了碎秆与粉碎室壁面的碰撞,使得碎秆能量在碰撞中产生大量损失,因此在满足粉碎质量的前提下,粉碎刀轴转速不易过大。

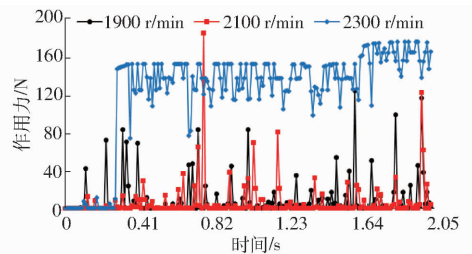


图 15 粉碎刀轴转速对碎秆-粉碎室壁面平均作用力的影响

Fig. 15 Effect of straw chopping knife shaft rotation velocity on average interaction force between chopped straw and chopped charmer wall

粉碎刀轴转速对碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力的影响如图 16 所示,不同粉碎刀轴转速下碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力都表现出从零急剧增大后,呈现波动状态,但波动状态较为稳定。0.8 s 后,碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力分别在 (112.36 ± 8.32) N (1 900 r/min)、 (101.15 ± 8.02) N (2 100 r/min)、 (107.25 ± 4.97) N (2 300 r/min) 附近波动。这是因为粉碎刀轴区域气流速度比周围气流速度大,导致粉碎刀轴区域气流有向离开粉碎刀轴方向流动的趋势。当秸秆粉碎抛撒还田机进入稳定工作状态后(0.8 s 后),粉碎室内及粉碎刀轴附近的气流场处于稳定状态,使得碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力处于稳定波动状态。另外,由于在不同粉碎刀轴转速下粉碎室内体积平均压力和体积平均气流速度差别较小,使得不同粉碎刀轴转速下碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力的差异较小。

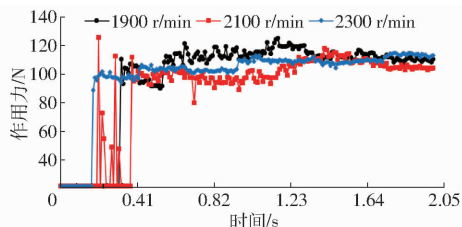


图 16 粉碎刀轴转速对碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力的影响

Fig. 16 Effect of straw chopping knife shaft rotation velocity on average interaction force between chopped straw and chopped knife shaft wall

2.5 碎秆抛撒均匀性分析

从上文分析可知,随着粉碎刀轴转速增大,碎秆平均能量的增大,使得碎秆-碎秆和碎秆-粉碎室壁面平均相互作用力增大,则导致碎秆在碰撞中的能量损耗增大,从而导致粉碎刀轴转速增大,对碎秆抛撒均匀度增益变小,甚至产生负面影响。粉碎室内碎秆力学和运动特性的变化直接体现在碎秆抛撒均匀性上,因此进行碎秆抛撒均匀性仿真试验,以验证上述分析的准确性。

在 EDEM 软件中,将粉碎室上方碎秆出口区域沿粉碎室宽度方向等分为 6 个区间(①、②、③、④、⑤和⑥),记录流过每个区间的碎秆总质量(图 17),并计算各个时刻的抛撒均匀度。每个区域内碎秆的总质量为秸秆粉碎抛撒还田机开始工作到记录时刻累计的碎秆质量。抛撒均匀度计算公式为

$$d = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{k=1}^6 (M_k - \bar{M})^2} \times 100\% \quad (1)$$

$$\bar{M} = \frac{\sum_{k=1}^6 M_k}{6} \quad (2)$$

其中

式中 \bar{M} ——测试点内秸秆平均质量, kg/m^2
 M_k ——第 k 个测试点秸秆质量, kg/m^2
 d ——抛撒均匀度, %

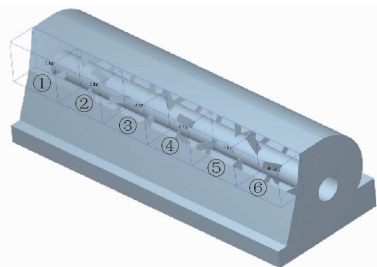


图 17 碎秆质量监测区域

Fig. 17 Mass monitoring area of chopped straw

粉碎刀轴转速对抛撒均匀度的影响如图 18 所示,仿真试验结果表明,3 种粉碎刀轴转速下的抛撒均匀度都表现为先急剧增大之后逐渐趋于稳定,随

着粉碎刀轴转速的增加,转速对抛撒均匀度的影响也逐渐减小并趋于稳定,碎秆抛撒均匀度分别为 $(85.40 \pm 4.77)\%$ (1900 r/min)、 $(78.52 \pm 5.56)\%$ (2100 r/min) 和 $(75.17 \pm 5.32)\%$ (2300 r/min),均满足行业标准。粉碎刀轴转速增大,抛撒均匀度有下降趋势,这是因为在碎秆粉碎长度均匀且符合粉碎质量要求时,随着粉碎刀轴转速增大,虽然碎秆的平均能量逐渐增大,但是由于碎秆与碎秆之间以及碎秆-粉碎室壁面之间的碰撞加剧,导致碎秆在粉碎室内运动过程的能量损耗加剧,而不利于碎秆抛撒均匀性的提高。同时,也说明了上文分析的准确性。

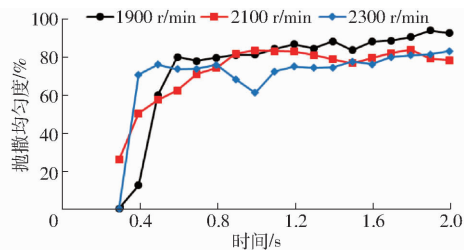


图 18 粉碎刀轴转速对抛撒均匀度的影响

Fig. 18 Effect of straw chopping knife shaft rotation velocity on uniform distribution

随着粉碎刀轴转速增大,碎秆能量增大,但碎秆-碎秆及碎秆-粉碎室壁面平均相互作用力增大,导致碎秆-碎秆和碎秆-粉碎室壁面的碰撞次数和能量损耗增多,所以过大转速不利于碎秆抛撒均匀度提升。

3 田间试验

3.1 试验条件

为验证仿真分析结果,于 2019 年 11 月在中国农业大学保护性耕作研究中心试验田中进行田间试验(图 19)。



图 19 田间试验

Fig. 19 Field test

1. 拖拉机 2. 扭矩传感器 3. 十字万向节

玉米品种为五谷 631,玉米秸秆量为 $1.31 \text{ kg}/\text{m}^2$,秸秆直径分布在 $11.2 \sim 24.8 \text{ mm}$ 之间,秸秆平均高度为 2210 mm ,秸秆平均含水率为 32.6% 。根据 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》对秸秆粉碎抛撒还田机进行田间试验,秸秆粉碎抛撒还田机作业速度为 $1.8 \text{ m}/\text{s}$,进行 2 个行程的试验,每次行程为 20 m 。在每个试验行程中,随

机选取3个测试点(1 m × 1 m)进行测试,收集测试点中的所有秸秆进行称量,根据式(1)、(2)计算碎秆抛撒均匀度,秸秆粉碎合格率和还田作业消耗功率计算公式为

$$N = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{m_{zi} - m_{bi}}{m_{zi}}}{6} \quad (3)$$

$$P = \frac{Tn}{9550} \quad (4)$$

式中 N ——粉碎长度合格率, %

m_{zi} ——第 i 个测试点秸秆总质量, g

m_{bi} ——第 i 个测试点长度不符合秸秆质量, g

P ——机具消耗功率, kW

T ——粉碎刀轴转速下动力输入轴扭矩, N·m

n ——粉碎刀轴转速, r/min

3.2 试验结果与分析

田间试验结果表明, 1 900、2 100、2 300 r/min 时, 玉米秸秆粉碎长度合格率分别为 (88.17 ± 7.32)%、(90.24 ± 5.49)% 和 (93.62 ± 8.87)%, 碎秆抛撒均匀度分别为 (82.35 ± 6.57)%、(76.14 ± 7.18)% 和 (74.22 ± 5.65)%。田间试验结果表明, 在满足秸秆粉碎长度合格率下, 粉碎刀轴转速增大, 碎秆抛撒均匀度呈下降趋势, 与仿真分析结果一致, 证明了分析的准确性。同时, 1 900、2 100、2 300 r/min 时, 作业消耗功率分别为 8.83、9.51、13.16 kW, 作业功耗随转速增加而增大, 2 100、2 300 r/min 较

1 900 r/min 作业功耗分别增加 7.70% 和 49.04%, 而碎秆抛撒均匀性分别降低 7.54% 和 9.87%, 说明在秸秆粉碎合格率和碎秆抛撒均匀度达标后, 不宜增大粉碎刀轴转速, 以减少作业功耗。

4 结论

(1) 粉碎室内存在压力梯度, 粉碎室出口存在负压区; 碎秆大部分与壁面多次碰撞后从粉碎室顶部流出; 碎秆-空气平均作用力较小, 最大值为 0.000 763 N (2 300 r/min)。

(2) 1 900、2 100、2 300 r/min 时碎秆-碎秆最大平均作用力分别为 10.61、7.78、18.76 N。1 900、2 000 r/min 时的碎秆-粉碎室壁面最大平均相互作用力分别为 123.73、184.88 N, 2 300 r/min 时稳定在 (175.228 ± 19.08) N。1 900、2 100、2 300 r/min 时的碎秆-粉碎刀轴壁面平均作用力分别稳定在 (112.36 ± 8.32) N、(101.15 ± 8.02) N 和 (107.25 ± 4.97) N。

(3) 仿真分析和田间试验中, 1 900、2 000、2 300 r/min 时碎秆抛撒均匀度分别为 (85.40 ± 4.77)% 和 (82.35 ± 6.57)%、(78.52 ± 5.56)% 和 (76.14 ± 7.18)%、(75.17 ± 5.32)% 和 (74.22 ± 5.65)%; 田间试验与仿真分析结果均表明, 在满足秸秆粉碎长度合格率下, 粉碎刀轴转速增大, 碎秆抛撒均匀度呈下降趋势, 且作业功耗上升较大。

参 考 文 献

- [1] GLITHERO N J, PAUL W, RAMSDEN S J. Straw use and availability for second generation biofuels in England[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 55: 311 - 321.
- [2] SOAM S, BORJESSON P, SHARMA P K, et al. Life cycle assessment of rice straw utilization practices in India[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 228: 89 - 98.
- [3] MONTERO G, CORONADO M A, TORRES R, et al. Higher heating value determination of wheat straw from Baja California, Mexico[J]. *Energy*, 2016, 109(15): 612 - 619.
- [4] KEESSTRA S D, JESÚS R C, NOVARA A, et al. Straw mulch as a sustainable solution to decrease runoff and erosion in glyphosate-treated clementine plantations in Eastern Spain. An assessment using rainfall simulation experiments[J]. *Catena*, 2019, 174: 95 - 103.
- [5] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 87 - 91. HAN Lujia, YAN Qiaojuan, LIU Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(3): 87 - 91. (in Chinese)
- [6] LIU P, HE J, LI H, et al. Effect of straw retention on crop yield, soil properties, water use efficiency and greenhouse gas emission in China: a meta-analysis[J]. *International Journal of Plant Production*, 2019, 13: 347 - 367.
- [7] KONG D, LIU N, WANG W, et al. Soil respiration from fields under three crop rotation treatments and three straw retention treatments[J]. *PLoS ONE*, 2019, 14(9): e0219253.
- [9] ZHAGN Lin, LIU Huihui, SUN Jianqiang, et al. Seedling characteristics and grain yield of maize grown under straw retention affected by sowing irrigation and splitting nitrogen use[J]. *Field Crops Research*, 2018, 225: 22 - 31.
- [10] YIN Wen, YU Aizhong, GUO Yao, et al. Straw retention and plastic mulching enhance water use via synergistic regulation of water competition and compensation in wheat-maize intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2018, 229: 78 - 94.
- [11] 章志强, 何进, 李洪文, 等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 76 - 87. ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 76 - 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170910&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010. (in Chinese)
- [12] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 等. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 267 - 276.

- SUN Nina, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22):267-276. (in Chinese)
- [13] WANG W, LI J, CHEN L, et al. Effects of key parameters of straw chopping device on qualified rate, non-uniformity and power consumption[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1):122-128.
- [14] 王昕. 纵轴流稻麦联合收获机后切碎抛撒装置设计与试验[D]. 北京:中国农业科学院, 2018.
WANG Xin. Design and test of shredding and scattering machine for longitudinal axial flow rice and wheat combine harvester [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [15] WILLIAM F S, TIMOTHY A S, HARRY L S. Chaff and straw spreader for a plot combine[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(2):398-399.
- [16] 陈黎卿, 王莉, 张家启, 等. 适用于全喂入联合收割机的 1JHSX-34 型秸秆粉碎机设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):28-32.
CHEN Liqing, WANG Li, ZHANG Jiaqi, et al. Design of 1JHSX-34 straw crusher for whole-feeding combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9):28-32. (in Chinese)
- [17] 陈玉仑, 丁为民, 方志超, 等. 全喂入式联合收割机碎草脱粒装置的改进设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24):11-16.
CHEN Yulun, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Improved design of straw-cutting type threshing mechanism of full-feeding combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24):11-16. (in Chinese)
- [18] HAN D, ZHANG D, JING H, et al. DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150:426-438.
- [19] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD-DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8):81-89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):81-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
- [20] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充气吸式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5):54-66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):54-66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.006. (in Chinese)
- [21] 王帅, 于文浩, 陈巨辉, 等. 鼓泡流化床中流动特性的多尺度数值模拟[J]. 力学学报, 2016, 48(3):585-592.
WANG Shuai, YU Wenhao, CHEN Juhui, et al. Multi-scale simulation on hydrodynamic characteristics in bubbling fluidized bed[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(3):585-592. (in Chinese)
- [22] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11):43-51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):43-51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006. (in Chinese)
- [23] FAVIER J F, ABBASPOUR-FARD M H, KREMMER M, et al. Shape representation of axisymmetrical, non-spherical particles in discrete element simulation using multi-element model particles[J]. Engineering Computations, 1999, 16(4):467-480.
- [24] 陶贺, 钟文琪, 金保昇. 采用多元颗粒模型对圆柱形颗粒在移动床中流动的离散单元法直接数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17):13-19.
TAO He, ZHONG Wenqi, JIN Baosheng. Discrete element modeling of cylindrical particle flowing in the moving bed by multi-element particle model [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(17):13-19. (in Chinese)
- [25] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 DEM-CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):50-60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):50-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.006. (in Chinese)
- [26] 张李娴. 玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
ZHANG Lixian. Research on the discrete element modeling method of corn stalk's mechanical characteristics [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [27] CHRISTOPHER J S, SUN W H, DOUGLAS D C. Measuring the transverse Young's modulus of maize rind and pith tissues [J]. Journal of Biomechanics, 2019, 84:113-120.
- [28] AL-ZUBE L, SUN W, ROBERTSON D, et al. The elastic modulus for maize stems[J]. Plant Methods, 2018, 14(1):11.
- [29] 陈争光. 玉米秸秆皮糠分离机构的试验研究及机理分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2014.
CHEN Zhengguang. Experimental study and mechanism analysis on rind-pith separation for corn stalk [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [30] 何勋, 王德福. 基于纤维形态特征分析的玉米秸秆皮拉伸特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10):92-98.
HE Xun, WANG Defu. Tensile property of corn stalk rind based on analysis of fiber morphology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):92-98. (in Chinese)
- [31] 张鸣远, 景思睿, 李果君. 高等工程流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2012.