

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.030

锤片式揉碎机气流场数值模拟与试验

刘飞 王伟 张涛 麻乾 赵满全

(内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为研究揉碎机锤片结构参数与揉碎效率之间的关系,实现高效能揉碎,从空气动力学角度出发,分析在T型结构锤片的激励下,揉碎机内腔气流场结构与物料运动之间的关系。运用计算流体动力学(CFD)技术,分析揉碎机内腔气流场的压力场分布形态和速度场分布形态。模拟结果表明:揉碎机内腔气流轴向速度梯度较大,环流层的悬浮输送特性有利于物料充分揉搓和输送,整个揉碎室内从入料口到出料口轴向气流速度逐渐变大,流场速度梯度明显。设计验证试验,对模拟所得的风速与试验测得的值相比较,结果表明,仿真值与试验值变化趋势基本一致,二者最大相对误差为8%。

关键词: 揉碎机; 锤片; 数值模拟; 气流场

中图分类号: S817; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0227-06

Air Flow Field Numerical Simulation and Test of Hammer Rubbing Machine

LIU Fei WANG Wei ZHANG Tao MA Qian ZHAO Manquan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: Straw rubbing machine has many problems such as high energy consumption, low efficiency and high production cost, which seriously restrict the promotion and development of rubbing machine. In order to achieve efficient rubbing, the relationship between the hammer of rubbing machine structure parameters and rubbing efficiency was studied. From the perspective of aerodynamics, the relationship between rubbing machine cavity flow field structure and material movement in T type structure of hammer excitation was analyzed. And then the T type hammer excitation rubbing machine cavity flow field pressure distribution and velocity field distribution were obtained by using computational fluid dynamics (CFD) technology. The simulation results showed that the rubbing machine cavity air axial velocity gradient was large, and the transport characteristics of suspension circulation layer were high. The axial air velocity was increased gradually, and the flow field velocity gradient was obvious. Validation test was designed, and the simulation results of wind speed and test values were compared. Results showed that the simulation results were in agreement with the experimental values, and the maximum relative error of the two was about 8%. The results also showed that the numerical simulation of the flow field in the type 9R-40 straw rubbing machine was reasonable which can correctly indicate the distribution of flow field when the machine was no-load. The flow structure inside the machine can provide a new direction to optimize the rubbing, and also provide a theoretical basis for the optimization design of mechanical rubbing.

Key words: rubbing machine; hammer; numerical simulation; flow field

0 引言

随着我国畜牧产业的发展,秸秆类饲料总需求量在不断增加。秸秆揉碎机可将秸秆加工成有利于

牲畜消化的丝状物料,极大地促进了秸秆资源转化与利用。但由于揉碎机能耗较大,生产成本较高,制约了该机具的推广使用^[1]。因此,设计一种高效节能的秸秆揉碎机对降低秸秆利用成本、提高秸秆利

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51665047)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2016BS0516)

作者简介: 刘飞(1984—),男,副教授,主要从事高寒干旱区农业机械化研究,E-mail: afei2208@imau.edu.cn

通信作者: 赵满全(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事高寒干旱区农业机械化研究,E-mail: nmgzhaomq@163.com

用率有很好的促进作用。

物料在喂入揉碎机后,除了受锤片的击打、揉搓和物料颗粒之间的相互作用外,还受到揉碎机内部气流作用的影响,在气流的带动下,物料在揉碎室内呈螺旋轴向运动,并被抛送出揉碎机外^[2]。刘承俊等^[3]对锤片式粉碎机气固两相环流层的特征进行研究,得到具有悬浮输送特征的气固两相环流层的特征参数,为进一步优化环流层结构提供理论依据。王娟等^[4]利用 CFD 技术对 9R-40 型揉碎机的空气扰动噪声的产生机理进行研究,发现气流产生的旋转噪声和涡流噪声是引起揉碎机噪声过大的主要因素,并对揉碎机结构参数提出改进意见。王学农等^[5]对秸秆粉碎还田机的风场进行三维数值模拟,分析影响气流场因素,探究机具内部结构参数对气流场分布的影响。尚坦等^[6]基于计算流体力学软件 Fluent,运用多重参考系坐标模型对揉搓机内流场进行模拟,得到了内流场速度和压力分布特征,并与试验值相比较,验证了数值模拟的准确性。曹媛等^[7]利用 Fluent 动网格技术,得到了饲料粉碎机内部的速度场分布,设计出了一款新型粉碎机结构,并验证该结构的可靠性,提高了饲料粉碎机的粉碎效率。前人对揉碎机结构参数与内流场分布规律已经做了较深入的研究,发现优化揉碎机内部结构参数,可改善内流场分布,提高其工作效率^[8-9]。为进一步揭示内流场对揉碎机性能影响规律,准确获取揉碎机内流场结构信息,本文选取 9R-40 型揉碎机为研究对象,利用 CFD 技术对揉碎机内流场进行三维数值模拟,获取在 T 型结构锤片下流场结构信息;探究秸秆物料的运动规律,分析锤片结构参数与揉碎机生产效率之间的关系,以达到优化结构、降低能耗的目的。

1 物料颗粒气力输送作用

1.1 工作原理

9R-40 型揉碎机结构简图如图 1 所示。物料在喂入过程中与高速旋转的锤片接触,在锤片顶端摩擦带动下被抓入揉碎室内。由于物料与锤片之间存在明显的速度差,垂直喂入的物料被锤片击打成短段状,在离心惯性作用下甩到机壳内壁。物料在机壳内壁的齿条和锤片的搓擦下被揉成细丝状,并受到轴向气流和导流板的共同作用,最后被抛送叶片抛送出机外。

1.2 气力输送作用分析

在环流层高速气流的作用下,秸秆物料呈悬浮状态运动。径向平面上,物料受切向气流速度 v_a 和径向气流速度 v_b 作用,它们的合速度为 v_s 。 v_k 是秸

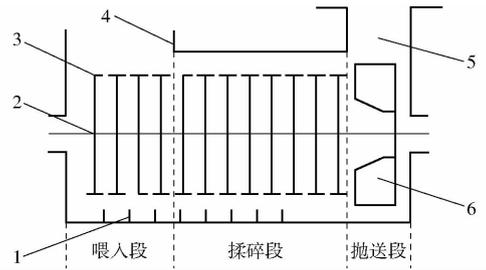


图 1 揉碎机内部结构简图

Fig. 1 Inside structure diagram of machine

1. 齿条 2. 主轴 3. 锤片 4. 喂入口 5. 抛送口 6. 抛送叶板

秆物料受锤片击打的运动速度,与 v_s 在同一水平面内,如图 2 所示。忽略重力作用的影响,秸秆物料在径向平面上受到的气流作用力 F_s 为^[10-11]

$$F_s = C_0 a \frac{K_a (v_k - v_s)^2}{2g} \quad (1)$$

式中 C_0 ——物料阻力系数 g ——重力加速度
 a ——物料在运动方向上的投影面积
 K_a ——揉碎室内空气密度

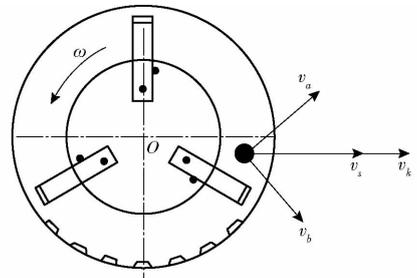


图 2 径向平面物料所受气流作用简图

Fig. 2 Diagram of radial position of material by air

由式(1)可知,在径向平面上,秸秆物料所受气流作用力受以下几个因素影响:物料阻力系数、物料的运动速度和气流速度的差值等。其中,物料阻力系数和投影面积受物料本身大小的影响,揉碎室内空气速度、空气密度则与转子转速、锤片排列方式等因素有关。由刘承俊等^[3]研究可知,一定的内流场环流层能够减小锤片与秸秆的能量转化效率。因此,改变锤片结构加大对环流层结构的激励作用,可以使秸秆物料在径向平面内受力情况改变。

轴向平面上,物料所受气流推力为 F_c ,则

$$F_c = C_0 a \frac{K_a (v_j - v_m)^2}{2g} \quad (2)$$

其中

$$v_m = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_h^2) \eta_v} \quad (3)$$

式中 v_j ——锤片对物料的轴向推进速度

v_m ——气流速度

q_v ——揉碎室输送的气体体积

D_2 ——锤片外径 D_h ——锤片盘直径

η_v ——叶栅系数

由式(2)可知,在轴向平面上,气流速度影响秸秆物料受力情况,改变抛送风扇和锤片结构分布、提高转子转速能够提高揉碎机内流场轴向速度梯度。目前提高揉碎机内流场轴向速度的主要方法是提高转子转速,加大进、出口压差,但是当转子转速超过 2 800 r/min 时机器单位电产量明显下降^[12]。通过改变锤片结构和排列方式调节气流场结构,使气流速度大于秸秆物料悬浮速度,从而保证对物料的轴向输送能力,实现高能效的冲击破碎。

T 型结构锤片加大了顶端厚度,按螺旋轴向方式安装在锤架板上,加大锤片与物料的有效接触面积,提高其对物料的正面冲击率和揉搓效果。同时,加大锤片顶端厚度能够促进对气流的激励作用,加大揉碎室径向和轴向速度梯度,利于物料快速通过揉碎室,避免堵塞,达到降低能耗的目的。

2 数值模拟

2.1 三维模型建立

9R-40 型揉碎机揉碎室模型包括转子和机壳两部分,在 Solidworks 中建立揉碎室三维模型,并按照拓扑结构对其进行装配。揉碎机转子上安装有 12 排锤片架板和 1 排抛送架板,每个锤架板上安装 3 个锤片,抛送架板上安装 3 片抛送叶片。在第 1、3、5 排锤片架板按螺旋排列方式各安装一个槽型锤片,从第 7~12 排锤架板上采用螺旋排列方式各安装一个 T 型锤片,其余位置安装直板锤片,转子装配图如图 3 所示。因装配体的挡销和锤架板等部分对仿真结果影响较小且结构复杂,对装配好的转子作简化处理。

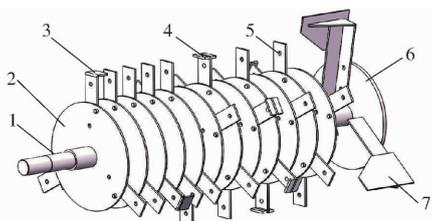


图 3 转子装配图

Fig. 3 Diagram of assembly rotor

1. 主轴 2. 锤架板 3. 槽型锤片 4. T 型锤片 5. 直板锤片
6. 抛送架板 7. 抛送叶片

2.2 计算区域和网格生成

本次数值模拟选取计算区域为揉碎室入料口到出料口之间,即气流在揉碎腔内部的实际流动空间。运行 GAMBIT 软件进行网格划分和操作。

首先设置坐标系,以转子轴心右端为原点, X 轴方向与物料喂入方向相反, Y 轴方向竖直向上, Z 轴方向由出料端指向进料端。在进行网格划分时,针对揉碎机整体结构复杂的特点,将整个揉碎室划分

为入料部分、中间通道部分、出料部分^[13]。其中,入料口和出料口形状相对规则,结构差异不大,采用的是四边形结构网格划分技术;转子计算区域通道形状不规则,采用非结构化的网格划分^[14]。划分完成后进行网格装配,整个揉碎机总体计算域划分的网格个数为 5 200 810,划分结果如图 4 所示,将划分好的网格文件导入 Fluent 中进行计算。

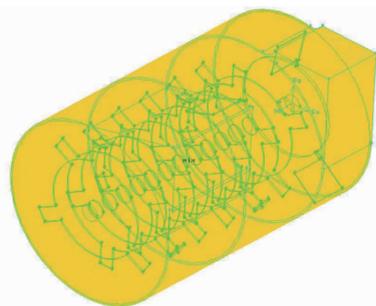


图 4 网格划分图

Fig. 4 Meshing map

2.3 Fluent 参数设定和控制方程

2.3.1 Fluent 参数设定

为利于在 CFD 仿真中求解收敛,防止气流在入料口处的回流,本次模拟在入料口前端加装一个矩形模块,尺寸参数与入料口相同^[15]。定义入料口处的矩形模块为系统的入口,出料口为系统的出口;转子端面、入料口和出料口、壳体内表面为 wall;入料部分和中间通道部分、中间通道部分和出料部分的两个接触面为 interface 面,用于连接 3 个通道;揉碎室的中间通道 mix 部分为旋转区域,其他两个区域为静止区域;湍流模型选取标准 $k-\epsilon$ 模型,采用 SIMPLE 格式对速度和压力耦合;考虑到实际工况中转子在高速转动,采用多重参考系模型 (Moving reference frame) 求解转子在转动过程中某一瞬时的流场结构信息^[16]。具体设置参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟参数

Tab. 1 Numerical simulation parameters

参数	数值
转子转速/($r \cdot \min^{-1}$)	2 400
进口风速/($m \cdot s^{-1}$)	8
入口激流强度/%	5
入口水力直径/mm	227
出口风压/Pa	101 325
出口激流强度/%	4
出口水力直径/mm	117
壁面粗糙厚度/mm	0
壁面粗糙度	0.5
运算方程收敛精度	10^{-4}
松弛因子动量	0.7
松弛因子湍流动能	0.5
松弛因子湍流耗散量	0.3

2.3.2 控制方程

采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模式湍流模型求解问题时,控制方程主要包括连续性方程、湍流能量输运方程、湍流能量耗散输运方程,具体表达式为^[17-18]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

式中 G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能

G_b ——浮力引起的生成项

Y_M ——过度的扩散产生的波动

S_k, S_ε ——用户定义的源项

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——模型系数

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —— k 和 ε 方程的湍流 Prandtl 数

x_i, x_j ——坐标张量 ρ ——密度

t ——时间 μ_i, μ ——黏性系数

式(4)为湍流能输运方程,式(5)为湍流耗散输运方程。右端项分别为生成项、耗散项和壁面项。

2.4 模拟结果及分析

2.4.1 揉碎室速度场分析

为便于观察,截取3个揉碎室横截面($Z=100$ 、 300 、 500 mm)的模拟结果云图(图5),其中 Z 越小越靠近出料口^[19]。分析揉碎室径向速度场:风速最大处出现在抛送叶片末端,为 67.5 m/s,风速最小处出现在出料口机壳与转子中心附近,为 8.3 m/s,数值变化与实际工况相符。揉碎机转子高速旋转,使锤片架连同锤片不断打击和推动空气介质,产生稳定的空气环流层,形成从机壳指向转子轴心的流速梯降。由于T型锤片顶端厚度加大,推动空气流动的能力增强,形成流速更快的环流层,有利于物料充分揉搓和输送,提高揉碎效率,降低能耗。

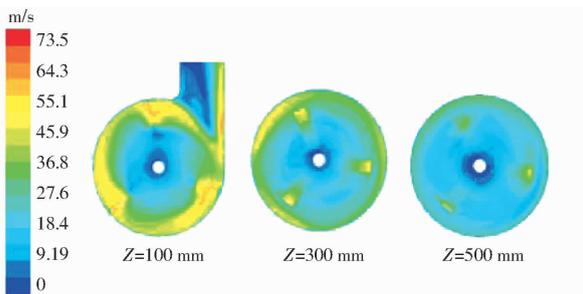


图5 速度场分布云图

Fig. 5 Velocity distribution map of direction

从图5不同位置的速度场看出,整个揉碎室内从入料口到出料口轴向气流速度逐渐变大,流场速度梯度明显。在实际工况中,较大的速度梯度可以

增强物料的轴向通过性,避免了物料堆积,减小了机具能耗;出料口处回流和涡流现象较小,流场较为稳定,避免了动能转化为湍动能的能耗损耗,降低了机具能耗。

2.4.2 揉碎室压力场分析

分别截取揉碎室俯视纵截面($Y=0$)和正视纵截面($X=0$)的压力场分布云图(图6)观察:整个揉碎室机壳受力不均匀,入料区域上机壳与抛送区域下机壳处受到较大压力,为 103 kPa,抛送中心区域压力较小,为 101 kPa,机壳受压不均易导致整机振动,产生噪声且影响揉碎质量。抛送叶片的半径大于T型锤片半径,引起揉碎室指向抛送室的低压区域扩散,当物料被揉搓充分且被气流带到抛送室时,能够被迅速通过,增强了物料的轴向通过性。另外,由于锤片之间静压较小,导致锤片不能有效地击打揉搓物料,增大锤片顶端厚度能加大物料与齿条的搓擦效果,从而弥补这一缺陷。

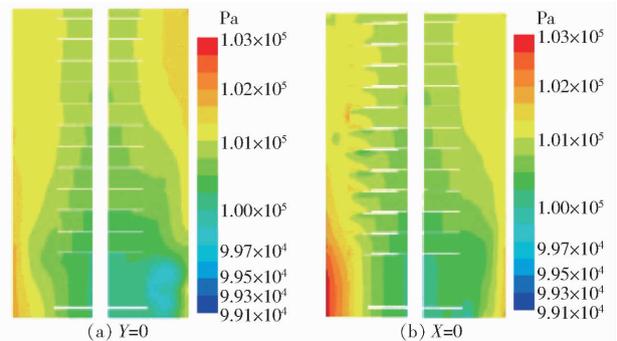


图6 压力场分布云图

Fig. 6 Pressure distribution maps of direction

因抛送叶片后倾 10° ,叶片迎风面受到的压力比背风面大,导致迎风面磨损。抛送叶片的作用下,气流在整个揉碎室内形成指向出料口的压力梯降,有利于气流和物料的轴向运动,不易造成物料堆积。抛送中心区域是低压区,易产生物料回流现象,造成物料堵塞,从而影响整机效率。

3 试验验证与分析

3.1 试验内容与方法

为了验证模拟结果的可靠性,本试验选择9R-40型揉碎机为对象,测试其在空载状态时流场分布情况。为减小外界因素干扰,试验环境为室内^[20]。转子转速调节采用日本三菱VARISPEED-616G5型变频器,转子转速测量采用UT372型非接触式数字转速仪,测速范围为 $0 \sim 9\,999$ r/min,精度为 1 r/min。测试采用DT-8880型热线风速仪,测试范围 $0.1 \sim 25$ m/s,精度为读数值 5% 。试验时调节变频器频率至主轴转速为 $2\,400$ r/min,先后测定进、出口平面的气流流速和流量。

对锤片式揉碎机出料口处的速度测试,以在 GAMBIT 中网格划分时所建立的坐标系为基准,测试 $Y = 60$ cm 时,与 XZ 平面平行的出料口矩形截面 A,试验采取等面积法,将该矩形区域等面积划分成 9 个面积相等的小矩形,在各个小矩形的中心位置处测定风速。从 A 截面 X 坐标轴上取 3 个点, Y 坐标轴上取 3 个点,如图 7 所示。同理,对揉碎机入料口测点标记,测量风速。每个测点重复测试 3 次,并记录测试结果的平均值。

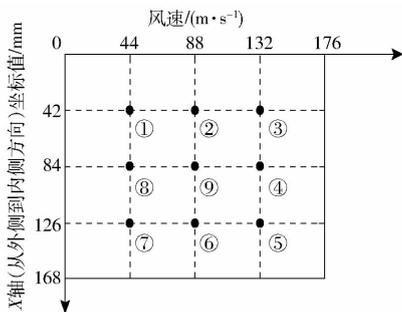


图 7 气流速度测量位置点

Fig. 7 Measurement positions for fluent velocities in plane

3.2 试验结果与分析

由于数值模拟的结果是以分布范围的形式给出,但试验测试的是某一点的风速,为了对模拟结果和试验结果更加准确地进行比较分析,运用 Tecplot 软件对仿真结果中各个测试点的数据提取后,出料口和入料口各个测点风速值的实测值和模拟值如图 8 所示。

(1)从试验结果来看:出料口区域左上部分的风速较小,右下部分风速较大,这是因为出料口下半区域处于转子末端上部,风速较大。从第 1 测点到第 9 测点,各测点对应的流域风速呈增大趋势,变化平稳。第 5 测点风速最大,为 20.1 m/s,第 1 测点风速最小,为 15.7 m/s;入料口区域的气流相互交汇,分布均匀,第 4 测点风速最大,为 10.4 m/s,第 5 测点风速最小,为 7.6 m/s。

(2)总体上仿真值与实测值变化趋势一致,但仿真值略大。引起误差主要有 3 个因素:揉碎机振动等因素的干扰会引起测量值的不准确性;制作、装

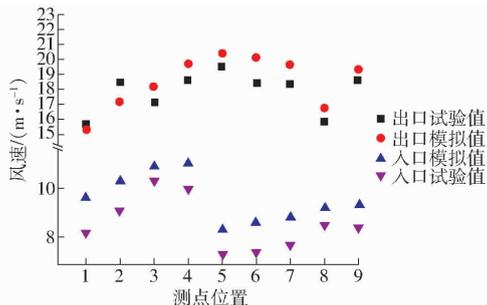


图 8 速度测试结果对比

Fig. 8 Comparison between simulated and experiment values of velocity

配的精度不够导致揉碎机壳体的密封性达不到要求,存在漏气现象;在数值模拟时,模型的创建建立在简化光滑的基础上,忽略了部分实际工况和流场能量损失,造成了仿真值偏大。

(3)各测点处仿真数值与试验数值误差在 $2\% \sim 8\%$ 之间,总体变化趋势一致。说明本次对 9R-40 型揉碎机内流场的数值模拟是合理的,能正确反映揉碎机空载时内流场的分布情况。

4 结论

(1)通过对秸秆物料在揉碎室内受到的气流作用力进行分析,得出 T 型锤片具有以下优点:能增大秸秆的搓擦效果,使加工出来的物料更符合生产要求;加快揉碎机内腔环流层气流速度,增大物料的轴向通过性,避免物料堆积,减小机具能耗。

(2)利用 CFD 技术对揉碎机内流场进行三维数值模拟,并对仿真结果进行分析得出,内流场的湍流和回流是引起物料积聚的主要因素,证明 T 型锤片能够有效减少回流和涡流的产生,满足揉碎需求,提高整机效率。

(3)对 9R-40 型揉碎机进行气流测试并与模拟值对比分析,结果表明,仿真值与试验值变化范围总体趋势一致,且两者之间误差最大值为 8% ,误差在合理范围之内,能够真实反映揉碎机气流场分布情况。

参 考 文 献

- 霍丽丽,赵立欣,孟海波,等. 秸秆类生物质气炭联产全生命周期评价[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊1):261-266. HUO Lili, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Life cycle assessment analysis for cogeneration of fuel gas and biochar[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp.1):261-266. (in Chinese)
- 裴耀武. 新型饲料粉碎机粉碎室流场仿真及分析[D]. 包头:内蒙古科技大学,2014. PEI Yaowu. Simulation and analyzation on flow field in crashing cavity of new-type feed hammer mill[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 刘承俊,赵欣. 锤片式粉碎机气固两相环流的特征及对粉碎筛理过程影响的机制[J]. 农业机械学报,1991,22(3):36-43. LIU Chengjun, ZHAO Xin. Characteristics of gaseous solid phase circulation layer of hammer mill and the mechanism of its influence on crushing screening process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991,22(3):36-43. (in Chinese)
- 王娟,王春光,王芳. 基于 Fluent 的 9R-40 型揉碎机三维流场数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(2):165-169.

- WANG Juan, WANG Chunguang, WANG Fang. Numerical simulation on three-dimensional turbulence air flow of 9R-40 rubbing and breaking machine based on Fluent software[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 165-169. (in Chinese)
- 5 王学农, 李从权, 史建新, 等. 抛送式秸秆粉碎还田机风场模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 67-69.
WANG Xuenong, LI Congquan, SHI Jianxin, et al. Research on simulating the wind field of the field straw chopper with throwing cotton stalk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 67-69. (in Chinese)
- 6 尚坦, 郭贵生. 秸秆揉丝机揉搓机构内流场仿真与分析[J]. 农机化研究, 2014, 36(8): 32-35.
SHANG Tan, GUO Guisheng. The simulation and analysis of the crop rubbing filament machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(8): 32-35. (in Chinese)
- 7 曹媛, 汪建新, 曹丽英. 基于 Fluent 新型饲料粉碎机结构优化分析[J]. 饲料工业, 2015, 36(3): 5-8.
CAO Yuan, WANG Jianxin, CAO Liying. Optimization analysis of a new feed mill structure based on Fluent [J]. Feed Industry, 2015, 36(3): 5-8. (in Chinese)
- 8 麻乾, 刘飞, 赵满全. 基于滑移网格技术的揉碎机内流场研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(12): 1-6, 11
MA Qian, LIU Fei, ZHAO Manquan. Kinematics analysis and simulation for a five-DOF harvesting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(12): 1-6, 11. (in Chinese)
- 9 麻乾, 刘飞, 赵满全. 揉碎机揉碎机理分析及锤片结构优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 7-15.
MA Qian, LIU Fei, ZHAO Manquan. Working mechanism and structure optimization of hammer of rubbing machine [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 7-15. (in Chinese)
- 10 陈艳军, 吴科斌, 张俊雄, 等. 玉米秸秆力学参数与抗倒伏性能关系研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 89-92.
CHEN Yanjun, WU Kebin, ZHANG Junxiong, et al. Relationship between corn lodging resistance and mechanical parameters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 89-92. (in Chinese)
- 11 刘宝, 宗力, 张东兴. 锤片式粉碎机空载运行中锤片的受力及运动状态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 123-128
LIU Bao, ZONG Li, ZHANG Dongxing. Force and motion states of hammer mill at unloaded running [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 123-128. (in Chinese)
- 12 刘刚, 赵满全, 王文明, 等. 带有径向喂入装置的揉碎机性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 110-116
LIU Gang, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Experiment on straw rubber with radial feeding device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 110-116. (in Chinese)
- 13 沈培玉, 赵浩, 张裕中. 农产品物料高速切割粉碎流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 60-65
SHEN Peiyu, ZHAO Hao, ZHANG Yuzhong. Numerical simulation of fluid field for high-speed cutting grinding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 60-65. (in Chinese)
- 14 王超越, 王福军. 离心泵瞬态模拟中滑移界面形状和位置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 81-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170111&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.011.
WANG Chaoyue, WANG Fujun. Shape and position of sliding interface for transient flow simulation of centrifugal pump [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 81-88. (in Chinese)
- 15 HIROHISA T, HIDEYA N, TOMOHIRO I, et al. Numerical modeling of fluid and particle behaviors in impact pulverizer [J]. Powder Technology, 2012, 217(2): 148-156.
- 16 ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N. A new integrated CFD modeling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 77(1): 128-136.
- 17 江伟, 李挺, 王玉川, 等. 导叶式离心泵内部流场数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 121-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20170915&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.015.
JIANG Wei, LI Ting, WANG Yuchuan, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in centrifugal pump with vane diffuser [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 121-128. (in Chinese)
- 18 李莉, 刘永前, 杨勇平, 等. 基于 CFD 流场预计算的短期风速预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 27-32, 22.
LI Li, LIU Yongqian, YANG Yongping, et al. Short-term wind speed forecasting based on CFD pre-calculated flow fields [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 27-32, 22. (in Chinese)
- 19 宋学锋, 戴飞, 张雪坤, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的揉丝机排料装置内物料运动模拟与试验[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(5): 99-107.
SONG Xuefeng, DAI Fei, ZHANG Xuekun, et al. Numerical simulation and experiment of materials movement based on CFD-DEM coupling method in the discharging device of kneading machine [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(5): 99-107. (in Chinese)
- 20 翟之平, 王春光. 叶片式抛送装置气流流场数值模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 84-87
ZHAI Zhiping, WANG Chunguang. Numerical simulation and optimization for air flow in an impeller blower [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 84-87. (in Chinese)