doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.017

基于DEM-BPM-CFD的饲草揉碎机功耗预测模型研究

高 波 翟之平 兰月政 裴 刚 赵立翔
(内蒙古工业大学机械工程学院，呼和浩特 010051)

摘要：饲草揉碎机工作时存在功耗大、生产率低等问题，制约着该类设备向低能耗、绿色化方向发展。为了准确预测饲草揉碎机的功耗情况，进而进行低能耗优化设计，本文基于饲草揉碎机的工作原理与DEM-BPM-CFD耦合方法，将揉碎机消耗能量分为物料与物料、气流、机械结构（铡刀、锤片以及齿板）之间相互作用所消耗的能量、使揉碎机内空气具有一定静压和流速所消耗能量、轴承摩擦所消耗能量以及整机振动所消耗能量4部分，并分别建立了各部分能耗以及生产率的数学模型。采用DEM-BPM-CFD耦合方法对饲草揉碎机破碎物料的耗能情况进行数值模拟，并结合功耗试验对所建立的功耗预测模型进行验证。研究结果表明：揉碎机功耗预测模型的理论计算值与功耗实测值相对误差为6.94%，可见饲草揉碎机功耗预测模型基本准确。饲草揉碎机揉碎物料过程中主要能耗为物料与物料、气流、机械结构（铡刀、锤片以及齿板）之间相互作用所消耗的能量，占总能耗3/5以上；其次为使揉碎机内空气具有一定静压和流速所消耗的能量，占总能耗1/4以上；再次为机体振动所消耗的能量，占比接近1/10；占比最小为转子与轴承摩擦所消耗的能量。研究结果可为饲草揉碎机低功耗设计提供基础依据。

关键词：饲草揉碎机；DEM-BPM-CFD耦合；功耗预测模型
中图分类号：S817.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1298(2024)S2-0168-09

Power Consumption Prediction Model of Forage Crusher Based on DEM-BPM-CFD Coupling Method

GAO Bo ZHAI Zhiping LAN Yuezheng PEI Gang ZHAO Lixiang
(*School of Mechanical Engineering*, *Inner Mongolia University of Technology*, *Hohhot* 010051, *China*)

Abstract: The forage crushers have the problems of high-power consumption, low productivity and so on, which restricts the development of this kind of equipment to the direction of low energy consumption and greening. To accurately predict the power consumption of the forage crusher and then optimize the design of low energy consumption, the power consumed by the forage crusher was divided into four parts based on the working principle of the forage crusher and the DEM-BPM-CFD coupling method: the power consumed by the interaction between materials and materials, air flow, and the mechanical structure (cutters, hammers and tooth plate), power consumption for endowing the air in the forage crusher with static pressure and flow velocity, the power consumed by bearing friction and the power consumption of the whole machine vibration. At the same time, the mathematical models of power consumption and productivity per kW·h of each part were established respectively. The DEM-BPM-CFD coupling method was used to simulate the power consumption of the crushed materials of forage crusher, and the power consumption prediction model was verified by the power consumption test. Results indicated that the relative error between the theoretical calculation value of the power consumption prediction model and the measured value of the power consumption was 6.94 %, which showed that the power consumption prediction model of the forage crusher was basically accurate. The predominant power consumed by the interaction between the materials and the materials, the air flow, and the mechanical structure (cutters, hammers and tooth plate), constituting more than three-fifths of the total power consumption. The subsequent significant the power consumption for endowing the air in the forage crusher with static pressure and flow velocity, representing over a quarter of the total energy usage. The power consumption of the whole

收稿日期：2024-08-22 修回日期：2024-09-23
基金项目：国家自然科学基金项目(52165034)
作者简介：高波(1999—)，男，硕士生，主要从事农业机械设计与气动噪声分析研究，E-mail: 2667994001@qq.com
通信作者：翟之平(1966—)，女，教授，博士，主要从事农业机械设计与振动噪声测试分析研究，E-mail: ngdzhaizhiping@163.com

machine vibration accounted for nearly one-tenth of the total power usage, respectively. The smallest proportion was the power consumed by bearing friction. The research result provided a foundation for the design of low-power forage crushers.

Key words: forage crusher; DEM-BPM-CFD coupling; power consumption prediction model

0　引言

饲草揉碎机可将农作物秸秆加工成丝状段物料，以便牲畜采食与消化，促进了秸秆资源化利用，同时缓减了增畜与缺草的矛盾。目前，饲草揉碎/丝机主要存在功耗大、生产率低等问题[1]，严重制约该类设备向高质量、低能耗方向发展。随着各行业对能源利用和节能减排的要求不断提高，准确预测饲草加工机械的能耗并进行低能耗设计具有非常重要的研究意义。

为了探究饲草揉碎机的功耗，国内外学者进行了广泛的研究。刘刚等[2]通过正交试验分析了主轴转速、喂入辊转速与锤片形状对揉碎机性能的影响。赵振国等[3]通过正交试验的方法对9R-40型揉碎机的生产率进行了研究，得出锤片数量、锤齿间隙、主轴转速、锤片厚度4个指标的最优组合。侯泽华等[1]通过单因素试验的方法对9RS-60型揉碎机主轴转速、喂入量、喂入速度对功耗的影响进行了研究。张涛等[4]通过正交试验探究了冲击角度变化对断裂过程能量消耗的影响。

由于试验方法存在耗时长、效率低等问题，故越来越多的学者致力于通过离散元技术来预测并降低该类机械功耗。MONCADA等[5]通过离散元法对旋回式破碎机的扭矩进行分析并对其功率进行了预测。HONG等[6]采用离散元法模拟了锤片式破碎机中物料与锤片之间的碰撞破碎过程，并获得其碰撞能量的变化规律。BWALY等[7]通过离散元法对单转子和双转子冲击式破碎机的破碎过程进行数值模拟，对比发现双叶轮冲击式破碎机在低转速情况下的性能更为出色。BARRIOS等[8]使用离散元技术对鄂式破碎机破碎物料过程中的力学行为进行数值模拟，并通过实测能耗等指标来验证该方法的准确性。WU等[9]对立轴冲击破碎机中颗粒在冲击破碎中吸收和耗散碰撞能量分布情况采用DEM-BPM-CFD耦合方法进行研究。国内外学者相关研究为本文在预测物料破碎过程及其耗能方面的探索提供了方法参考。

为了准确预测饲草揉碎机破碎物料过程中的功耗，本文基于揉碎机的工作原理与DEM-BPM-CFD耦合方法建立功耗数学模型，通过对物料破碎过程及其耗能进行数值模拟来计算揉碎机的功耗，并结合功耗试验验证数学模型的准确性。

1　功耗模型与方法

1.1　饲草揉碎机结构和工作原理

使用内蒙古工业大学研制的9R-50A型饲草揉碎机作为研究对象，结构如图1所示。主要由进料槽、圆柱形机壳、齿板、机架、转子、定刀以及出料管等组成，其中转子由铡刀、锤架板、锤片以及抛扔叶板组成。机器工作时，整株秸秆由进料槽喂入，经转子上的铡刀与进料口处的定刀切断后进入揉碎室内，经高速旋转锤的打击作用以及机壳内壁上齿板的揉搓作用将切断后的秸秆物料反复揉碎成丝状段，揉碎后的丝状段物料在气流与抛扔叶板的共同作用下经出料管被抛出机外。

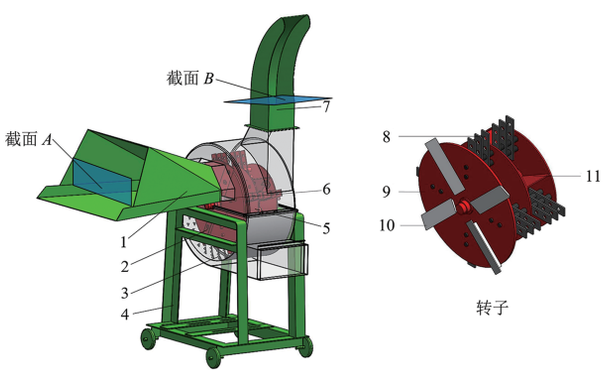


图1　饲草揉碎机结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of forage crusher

1. 进料槽　2. 圆柱形机壳　3. 齿板　4. 机架　5. 转子　6. 定刀　7. 出料管　8. 锤片　9. 锤架板　10. 铡刀　11. 抛扔叶板

9R-50A型饲草揉碎机额定功率为5.5 kW，转子最大工作直径为500 mm，揉碎机内腔宽度为300 mm，转子转速为240 0 r/min。锤片总数为24个，锤架板数量为3个，所有锤片被中间的锤架板分为2组。每组沿轴线方向的锤片个数为3，沿圆周方向的锤片个数为4，锤片厚度为4 mm，出料管高度为860 mm。揉碎机壳体材料为Q235钢，转子材料为45号钢，锤片和铡刀材料为65 Mn钢。

设备拟揉碎物料为2023年秋内蒙古地区收获的先玉509品种黄玉米秸秆。

1.2　饲草揉碎机功耗模型建立

为了建立饲草揉碎机工作过程中的功耗数学模型，基于揉碎机工作原理与DEM-BPM-CFD耦合方法，将所消耗的总能量分为物料与物料、气流、机械结构(铡刀、锤片以及齿板)之间相互作用所消耗能量，使揉碎机内空气具有一定静压和流速所消耗能量，轴承摩擦消耗的能量，以及整机振动所消耗能量4部分。

1.2.1　物料与物料、气流、机械结构(铡刀、锤片以及齿板)之间相互作用所消耗能量

饲草揉碎机工作时，高速旋转的转子锤片击打与齿板揉搓由进料口处铡刀切段后的秸秆物料使其破碎，其

破碎过程十分复杂。为了计算物料破碎过程中揉碎室内秸秆颗粒受到气流、其他秸秆颗粒、揉碎机锤片以及外壳内壁齿板等多重作用下的能耗，采用DEM-BPM-CFD耦合方法在流体相和固体相间进行质量、动量和能量等的传递与交换。秸秆颗粒之间、秸秆颗粒与锤片以及外壳内齿壁之间采用Hertz-Mindlin非线性接触模型，且考虑气流对颗粒破碎过程的影响。由于考虑了切段后秸秆颗粒的形状、材料属性以及破碎过程等因素，故可以获得较准确的能耗模型。

在饲草揉碎机内物料与物料、气流、机械结构（铡刀、锤片以及齿板）之间相互作用的过程中，其能量E_c主要分为两部分：一部分是秸秆颗粒在运动过程中，颗粒间以及颗粒与铡刀、锤片、齿板之间相互作用产生摩擦力和粘滞力使其破碎所消耗的能量（破碎秸秆过程的能量耗散损失能量）E_{dis}；一部分是使破碎后的秸秆颗粒具有一定动能与势能所消耗的能量E_m。能耗E_c可以采用DEM-BPM-CFD方法数值模拟饲草揉碎机内物料破碎过程中，通过计算转子扭矩、转速、破碎时间获得，即

$$E_c = E_m + E_{dis} = 10^3 \frac{\overline{T}_c n}{9550} \Delta T \tag{1}$$

式中 $\overline{T}_c$——DEM-BPM-CFD耦合仿真过程中获得的转子扭矩，N·m

n——揉碎机转子转速，r/min

ΔT——秸秆破碎过程仿真时间，s

E_c——破碎物料消耗总能量（可通过DEM-BPM-CFD耦合仿真过程中EDEM后处理获得），J

E_m——秸秆颗粒获得动能与势能所消耗能量，J

E_{dis}——颗粒间以及颗粒与铡刀、锤片、齿板之间相互作用产生摩擦力和粘滞力使其破碎所消耗能量（破碎秸秆过程的能量耗散损失能量），J

选取进料槽初始所在平面为零势能面，则使秸秆颗粒获得动能与势能所消耗的能量E_m为

$$E_m = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(m_i {v_i}^2 + I_i {\omega_i}^2 - m_i {v_{ini}}^2 - I_i {\omega_{ini}}^2\right) + \sum_{i=1}^{N} m_i g h_i + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{i=1}^{3} k_i \Delta R_i \tag{2}$$

式中 m_i——秸秆颗粒i质量，kg

v_i——秸秆颗粒i速度，m/s

I_i——秸秆颗粒i转动惯量，kg·m^2

ω_i——秸秆颗粒i旋转角速度，rad/s

v_{ini}——秸秆颗粒i喂入时初始速度，m/s

ω_{ini}——秸秆颗粒i喂入时初始旋转角速度，rad/s

h_i——秸秆颗粒i相对于零势能的高度，m

N——秸秆颗粒总数

g——重力加速度，m/s^2

k_i——图2中法向、切向以及滚动时颗粒弹性系数，分别为k_n、k_t与k_r

ΔR_i——两秸秆颗粒相互作用引起的法向、切向以及滚动的形变量，m

颗粒之间，颗粒与铡刀、锤片、齿板间的非弹性碰撞主要产生粘滞力（包括法向与切向粘滞力）、滑动摩擦力以及滚动摩擦力，碰撞中的能耗是随时间累积的过程。分别使用弹簧、粘壶、耦合器、选择器、滑动器以及滚动器来表示颗粒间的碰撞或接触[10]，如图2所示。粘滞力、滑动摩擦力以及滚动摩擦所消耗能量为

$$E_{dis} = E_{vn} + E_{vt} + E_f + E_r \tag{3}$$

式中 E_{vn}——法向粘滞力消耗能量，J

E_{vt}——切向粘滞力消耗能量，J

E_f——滑动摩擦消耗能量，J

E_r——滚动摩擦消耗能量，J

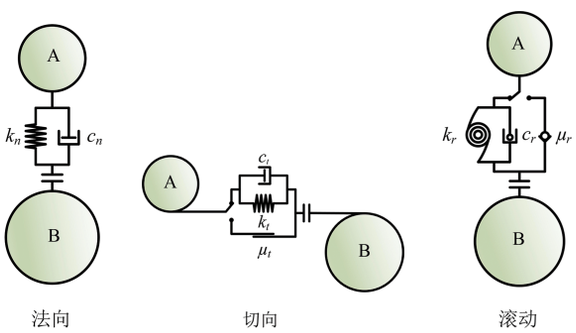


图2 颗粒接触模型

Fig. 2 Particle contact model

其中，秸秆颗粒受法向粘滞力所消耗的能量E_{vn}为

$$E_{vn} = \sum_{i=1}^{M} F_{n,i} \Delta r_{n,i} = \sum_{i=1}^{M}\left[-\frac{1}{2} c_n (v_{Ai,n} - v_{Bi,n})(v_{Ai,n} - v_{Bi,n})\Delta T\right] \tag{4}$$

式中 M——发生滑动摩擦接触点数量

$F_{n,i}$——第i个颗粒受到的法向粘滞力，N

$\Delta r_{n,i}$——该段时间内第i个粘结颗粒对的法向相对位移，m

c_n——法向粘滞阻尼系数[11]，其与两颗粒接触时的法向刚度及恢复系数有关

$v_{Ai,n}$——颗粒A速度v_{Ai}法线方向投影，m/s

$v_{Bi,n}$——颗粒B速度v_{Bi}法线方向投影，m/s

在颗粒接触的切线方向，由于需要满足Mohr-Coulomb摩擦定律[12]，其耗能分为两种情况考虑：

若秸秆颗粒所受的切向摩擦力f_t小于法向力带来的摩擦力$\mu_t F_{n,i}$，即$\left|f_t < \mu_t \right| F_{n,i}\left|\right.$，则秸秆颗粒受切向粘滞力消耗的能量$E_{tv}$为

$$E_{tv} = \sum_{i=1}^{S}\left[-\frac{1}{2} c_t (v_{ACi,t} - v_{BCi,t})(v_{ACi,t} - v_{BCi,t})\Delta T\right] \tag{5}$$

式中 S——$\left|f_t\right| < \mu_t \left| F_{n,i}\right|$的接触点数量

$v_{ACi,t}$——在t时刻两颗粒接触点处颗粒A的速度在切向的投影，m/s

$v_{BCi,t}$——在t时刻两颗粒接触点处颗粒B的速度在切向的投影，m/s

c_t——两颗粒接触时切向粘滞阻尼系数

若秸秆颗粒所受的切向摩擦力f_t大于等于法向力带来的摩擦力$\mu_t F_{n,t}$，即$|f_t| \geqslant \mu_t |F_{n,i}|$，则秸秆颗粒受切向摩擦力消耗的能量$E_{ts}$为

$$E_{ts} = \sum_{i=1}^{Z}\left[-\mu_t |F_{n,i}|\,|(v_{ACi,t} - v_{BCi,t})|\Delta T\right] \tag{6}$$

式中　Z——$|f_t| \geqslant \mu_t |F_{n,i}|$的接触点数量

μ_t——两颗粒接触时静滑动摩擦因数

则系统切向总耗能为

$$E_{vt} = E_{tv} + E_{ts} \tag{7}$$

秸秆颗粒受滑动摩擦力所消耗的能量E_f为

$$E_f = \sum_{t=0}^{\Delta T}\sum_{c=1}^{H} F_s x_s^{(slide)} \tag{8}$$

式中　H——时间ΔT内发生滑动摩擦接触点数量

F_s——滑动摩擦力，N

$x_s^{(slide)}$——在ΔT时间内由滑动摩擦力产生的位移，m

颗粒接触的滚动方向也要满足Coulomb定律，故其滚动摩擦力消耗能量E_r也分为两种情况。若秸秆颗粒所受的滚动力偶矩M_r小于滚动摩擦阻力矩$\mu_r R_A |F_{n,i}|$，即$|M_r| < \mu_r R_A |F_{n,i}|$，则系统滚动粘滞力偶矩耗能$E_{rv}$为

$$E_{rv} = \sum_{i=1}^{K}\left[-\frac{1}{2} c_r(\omega_{Ai,t} - \omega_{Bi,t})(\omega_{Ai,t} - \omega_{Bi,t})\Delta T\right] \tag{9}$$

式中　K——$|M_r| < \mu_r R_A |F_{n,i}|$的接触点数量

c_r——两颗粒接触的滚动粘滞阻尼系数[13]

$\omega_{Ai,t}$——在t时刻颗粒A旋转角速度，rad/s

$\omega_{Bi,t}$——在t时刻颗粒B旋转角速度，rad/s

若秸秆颗粒所受的滚动力偶矩M_r大于等于滚动摩擦阻力矩$\mu_r R_A |F_{n,i}|$，即$|M_r \geqslant \mu_r R_A |F_{n,i}|$，则系统滚动摩阻耗能$E_{rf}$为

$$E_{rf} = \sum_{i=1}^{O}\left[-\mu_r R_A |F_{n,i}|\,|\omega_{Ai,t} - \omega_{Bi,t}|\Delta T\right] \tag{10}$$

式中　O——$|M_r| \geqslant \mu_r R_A |F_{n,i}|$的接触点数量

R_A——两颗粒法向作用力之间的力臂，m

μ_r——两颗粒接触时静滚动摩擦因数[13]

则滚动摩擦总耗能E_r为

$$E_r = E_{rv} + E_{rf} \tag{11}$$

1.2.2　使揉碎机内空气具有一定静压和流速所消耗能量

揉碎机转子转动扰动空气使其具有一定静压和流速也会消耗一定能量。其通过测量气流的质量流量，图1中截面B处的气流静压、气流密度，以及截面B处的气流流速对扰动空气消耗的能量进行计算，记为E_{air}。有

$$E_{air} = Q_a\left(\frac{P_a}{\rho} + \frac{1}{2}{V_a}^2\right)\Delta T \tag{12}$$

式中　Q_a——气流质量流量，kg/s

P_a——图1截面B处气流的静压（可通过实测得到），Pa

ρ——气流密度，kg/m^3

V_a——图1截面B处气流流速（可通过实测得到），m/s

1.2.3　轴承摩擦消耗的能量

饲草揉碎机转子系统中采用的轴承为角接触球轴承。功耗主要为润滑剂流体动力摩擦功耗以及轴承载荷引起的摩擦功耗。采用PALMGREN[14]提出轴承功耗计算公式，并根据角接触球轴承特性，整理为

$$\begin{cases} E_b = (E_1 + E_2 + E_3)\Delta T \\ E_1 = \begin{cases} 10^{-10}\int_d^D f_1(vn)^{2/3}\omega_b r^3 \mathrm{d}r \\ \quad (vn_b \geqslant 33.33\ \mathrm{m\cdot r/s^2}) \\ \int_d^D 160 f_1 \omega_b r^3 \mathrm{d}r \times 10^{-10} \\ \quad (vn_b < 33.33\ \mathrm{mm^2/s}) \end{cases} \\ E_2 = 10^{-3}\int_d^D f_2 w_\beta(r)\omega_b r \mathrm{d}r \\ E_3 = 10^{-3}\int_d^D f_3 w_a(r)\omega_b r \mathrm{d}r \end{cases} \tag{13}$$

式中　E_b——揉碎机在运行时间ΔT内轴承摩擦消耗总能量，J

E_1——润滑油流体粘性摩擦1 s内消耗能量，J/s

E_2——轴承载荷引起的摩擦1 s内消耗能量，J/s

E_3——轴承受到径向力、轴向力时1 s内消耗能量，J/s

ω_b——轴承角速度，rad/s

f_1——与轴承结构以及润滑方式相关的摩擦因数

f_2——轴承摩擦因数

f_3——与轴承类型以及载荷相关的摩擦因数

r——轴承滚动体半径，mm

$w_\beta(r)$——摩擦能耗E_1决定的单位轴向轴承载荷，N/mm

$w_a(r)$——轴承承受轴向单位载荷，N/mm

d、D——轴承内、外径，mm

n_b——轴承转速，r/min

v——润滑剂运动粘度，mm^2/s

1.2.4　揉碎机机体振动消耗的能量

在揉碎机工作时，机壳产生振动也将会消耗一定能量，设运行ΔT时间时机壳振动消耗能量为E_v。由于揉碎机空载运行情况下，只存在使揉碎机内空气具有一定静压和流速所消耗的能量、机壳振动损失能量与轴承摩擦消耗能量，所以揉碎机在ΔT时，整机振动消耗能量E_v为

$$E_v = (\Delta E_{no-load} - \Delta E_{air} - \Delta E_b)\Delta T \tag{14}$$

式中 $\Delta E_{no-load}$——单位时间内揉碎机空载消耗的能量,J

ΔE_{air}——单位时间内使揉碎机内空气具有一定静压和流速所消耗的能量,J

ΔE_b——单位时间内轴承摩擦消耗能量,J

1.2.5 饲草揉碎机功耗预测模型

揉碎机稳定工作ΔT时所消耗的能量E为

$$E = E_c + E_{air} + E_b + E_v \tag{15}$$

揉碎机生产率ΔQ为

$$\Delta Q = \frac{Q_{in}}{E} \tag{16}$$

式中 Q_{in}——揉碎机稳定工作ΔT时间内秸秆总喂入量,kg

2 饲草揉碎机功耗与生产率计算

为利用公式(15)、(16)计算饲草揉碎机的功耗与生产率,需首先确定功耗数学模型(式(1)、(12)~(14))中的未知参数。

2.1 物料与物料、气流、机械结构(铡刀、锤片及齿板)之间相互作用所消耗的能量计算

为利用DEM-BPM-CFD耦合方法计算物料与物料、气流、机械结构(铡刀、锤片以及齿板)之间相互作用所消耗的能量,需对玉米秸秆本征参数与粘结键参数进行测试,并建立可破碎的玉米秸秆根部段、中间段与末梢段的离散元模型,然后对其破碎过程进行耦合仿真。

2.1.1 玉米秸秆本征参数测试

玉米秸秆本征参数包括密度、泊松比、弹性模量、碰撞恢复系数、静摩擦因数以及滚动摩擦因数等参数。由于玉米秸秆根部、中间段与末梢段,秸秆外皮与内穰之间的本征参数差异较大,破碎特性也不同,为了更准确地模拟其破碎特性,选取中等粗细的玉米秸秆对其根部、中间段以及末梢段的外皮与内穰参数分别进行测试与标定。其中测试密度时,由于玉米秸秆形状不规则,密度测量一般采用液浸法[15]。测量弹性模量时,采用济南天辰试验机制造有限公司生产的WDW-T100型微机控制电子万能试验机,试验流程文献[16-17]。试验现场如图3a所示。测量泊松比时,采用电测法,方法参见文献[18],试验现场如图3b所示。测量恢复系数时,采用i-SPEED TR型高速摄影机、铁架台与PC机等。试验时,分别将秸秆外皮与内穰制成颗粒状,将其从50 mm处垂直释放,并与65Mn板材、玉米外皮以及内穰进行碰撞并记录其反弹高度。将测试结果接近的3次重复试验值取平均值,并计算其碰撞恢复系数,计算式为

$$e = \sqrt{\frac{H_r}{H_p}} \tag{17}$$

式中 e——碰撞恢复系数

H_r——颗粒反弹高度,m

H_p——颗粒释放高度,m

测试现场与示意图如图3c、3d所示。测量静摩擦因数与滚动摩擦因数时,采用斜面仪进行测试[19],试验现场如图3e所示。测试结果如表1、2所示。

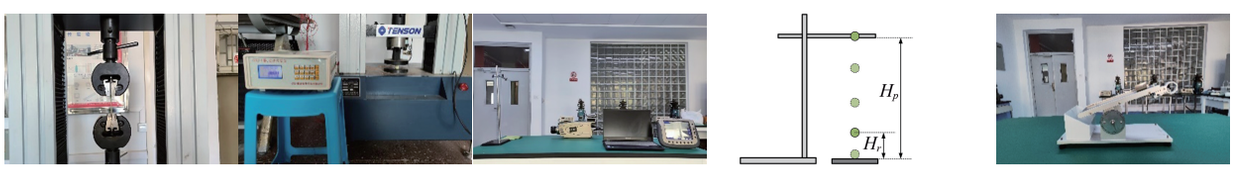
2.1.2 玉米秸秆离散元模型建立与参数标定

实测可知,由进料口处定、动刀切段后进入揉碎室内的玉米秸秆平均长度为100 mm。为简化离散元模型,分别将根部段、中间段以及末梢段外皮直径简化为25、20、15 mm,内穰直径简化为20、17、12.5 mm。按照揉碎机揉碎秸秆质量要求,揉碎后的散碎物料几何当量直径应不大于5 mm。为了表征秸秆外皮和内穰不同的力学特性,同时兼顾计算机仿真时间,设置秸秆内穰颗粒最大直径为0.8 mm,颗粒粒径分布设置为正态分布,均值为0.8 mm,标准差为0.1 mm;外皮颗粒直径为0.5 mm,颗粒粒径分布设置为固定值1 mm。分别建立根部段、中间段以及末梢段可破碎BPM模型如图4所示。

可破碎BPM模型除了需要确定玉米秸秆的密度、弹性模量、泊松比、恢复系数、静摩擦因数以及滚动摩擦因数之外,还需确定粘结键参数,包括弹性粘结键单位面积的法向刚度和切向刚度、临界法向应力和切向应力以及粘结键截面半径等。由于不同地区不同品种玉米秸秆的力学性能差异较大,目前没有通用的理论公式能计算得到精确的粘结参数,一般参考文献[20]初步计算出一组粘结参数,再由试验标定方法进行修正。本文通过轴向压缩和径向压缩试验对玉米秸秆粘结参数进行标定。方法见文献[21],最终得到粘结键各项参数如表3所示。

2.1.3 基于DEM-BPM-CFD的秸秆破碎过程中饲草揉碎机内耦合流场数值模拟

为了确定或验证功耗数学模型中的参数,需对秸秆破碎过程中揉碎机内部耦合流场进行数值模拟。数值模拟时,在已建立的秸秆根部、中间以及末梢段可破碎BPM模型(图4)基础上,采用离散元DEM方法计算秸秆颗粒在锤片、齿板以及其他颗粒的接触力、气流流场作



(a) 秸秆拉伸试验 (b) 秸秆泊松比试验 (c) 秸秆恢复系数试验 (d) 秸秆恢复系数试验示意图 (e) 颗粒静摩擦因数与滚动摩擦因数试验

图3 本征参数测试场景

Fig. 3 Intrinsic parameter test site

表1　玉米秸秆本征参数测试结果

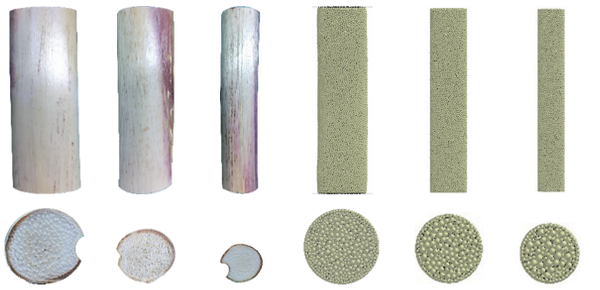
Tab. 1　Test results of intrinsic parameters of straw

秸秆位置	秸秆类型	直径/mm	密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比
根部段	内穰	20.08	0.792	161.82	0.38
	外皮	25.35	0.915	743.71	0.32
中间段	内穰	17.16	0.595	114.52	0.38
	外皮	20.26	1.003	579.32	0.34
末梢段	内穰	12.43	0.619	60.53	0.38
	外皮	14.76	0.998	292.17	0.35

表2　玉米秸秆接触参数测试结果

Tab. 2　Test results of contact parameters of straw

接触形式	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
外皮与外皮	0.254	0.295	0.087
外皮与内穰	0.222	0.739	0.366
内穰与内穰	0.231	0.973	0.515
内穰与锤片材料	0.375	0.784	0.396
外皮与锤片材料	0.320	0.404	0.252



(a) 根部段实体模型　(b) 中间段实体模型　(c) 末梢段实体模型　(d) 根部段离散元模型　(e) 中间段离散元模型　(f) 末梢段离散元模型

图4　玉米秸秆模型

Fig. 4　Corn straw models

用力、惯性力作用下的运动；当秸秆段所受最大拉应力与剪应力超过其材料的抗拉与剪切强度时，黏结键断裂即BPM秸秆颗粒破碎；秸秆颗粒在受力破碎并运动的过程中与揉碎机内的气流流场耦合，通过CFD方法计算在质量、动量以及湍流方程控制下的气流流场直至计算收敛。

表3　粘结键参数

Tab. 3　Bonding key parameter

参数	根部段			中间段			末梢段		
	内穰和内穰	外皮与外皮	外皮与内穰	内穰和内穰	外皮与外皮	外皮与内穰	内穰和内穰	外皮与外皮	外皮与内穰
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	8.121 5×10^{7}	1.041 3×10^{9}	1.714 8×10^{8}	3.238 6×10^{8}	8.406 1×10^{8}	5.668 0×10^{8}	3.036 8×10^{7}	3.300 9×10^{8}	4.804 4×10^{7}
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	4.873 0×10^{7}	6.247 7×10^{8}	7.609 6×10^{7}	1.931 6×10^{8}	5.043 6×10^{8}	3.400 8×10^{8}	1.822 1×10^{7}	1.980 5×10^{8}	2.882 6×10^{7}
法向临界应力/Pa	5×10^{6}	5×10^{7}	1×10^{7}	1×10^{7}	8.121 5×10^{7}	5×10^{6}	1.2×10^{5}	1×10^{6}	5×10^{5}
切向临界应力/Pa	3×10^{6}	3×10^{7}	8×10^{6}	8×10^{6}	8.121 5×10^{7}	3×10^{6}	1×10^{5}	8×10^{5}	3×10^{5}
粘结键半径/mm	2	1.5	1.8	2	1.5	1.8	2	1.5	1.8

在三维建模软件Solidworks中建立饲草揉碎机三维模型，在保证计算精度及网格质量前提下对模型进行适当简化，将处理后的揉碎机内流道模型分成旋转和非旋转区域两部分导入到ICEM中进行网格划分，并通过了网格独立性检验[22]。其网格划分如图5所示。流场瞬态计算时，将揉碎室内流道网格文件导入CFD软件FLUENT中进行流体模拟参数设置，求解选项为瞬态计算，湍流模型采用Reliable k-ε 湍流模型。流体区域的材料为空气，旋转区域采用滑移网格模型，转动区域的转速为2 400 r/min。实测进料口气流速度均值作为速度入口边界条件，为1.567 m/s；出料口给定标准大气条件作为压力边界值。FLUENT瞬态迭代计算的时间步长为6.95×10^{-5} s，迭代步数为216 000步，总仿真时间为15 s。气流场稳态计算时湍流模型采用standard k-ε 模型，多重耦合流场计算时采用大涡模拟模型(LES)。

基于DEM-BPM-CFD方法耦合计算时，将揉碎机内流道网格文件导入离散元软件EDEM中进行固相模拟参数设置。固相模拟材料包括秸秆材料和机械机构材料，其中秸秆材料参数见表1，机体材料属性参数参照文献[23]。接触包括秸秆颗粒之间以及秸秆颗粒与锤片、机壳壁面间的接触，接触模型均选取Hertz-Mindlin (no slip)接触模型，在此基础上添加Bonding模型用于粘结

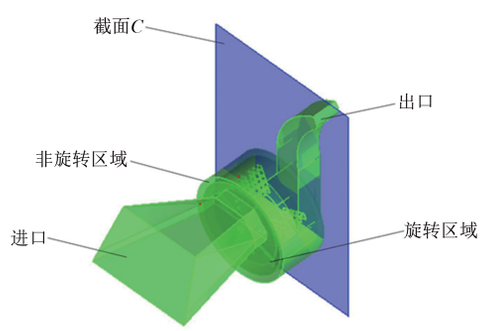
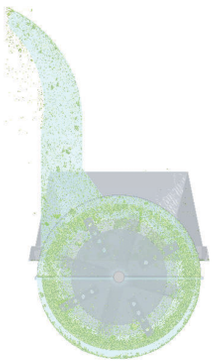


图5　耦合流场网格划分

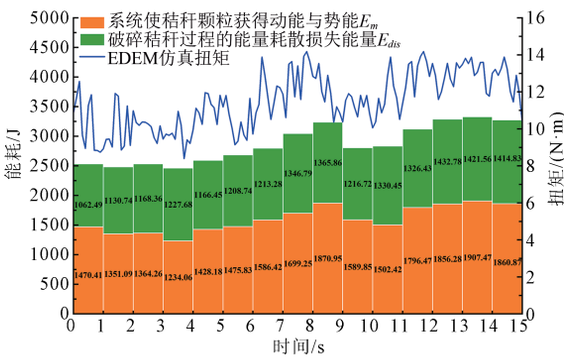
Fig. 5　Grid division of coupled flow field

软球颗粒。设置转子转速同CFD计算一致，在铡刀内表面建立末梢段、中间段以及根部颗粒工厂，秸秆段生成速率与生成方向按实际喂入量与实际方向(即生成速度为0.3 kg/s和垂直于转子系统)进行设置。其颗粒工厂的位置如图1中截面A所示。参数设置完成后，采用DEM-BPM-CFD耦合方法实现物料破碎过程中物料、气流与机械结构的耦合计算，数值模拟过程(截面C)如图6a所示。同时，物料颗粒破碎过程中所需的能量按照公式(1)~(11)进行计算，其中能量耗散E_{dis}的统计结果、使秸秆颗粒获得的动能与势能E_m统计结果以及转子扭矩随时间变化规律如图6b所示。

由图6b可知，物料与物料、气流、机械结构(铡刀、锤



(a) CFD-DEM-BPM耦合模拟过程



(b) EDEM后处理导出结果

图6 物料与物料、气流、机械结构(铡刀、锤片以及齿板)之间相互作用过程与结果

Fig. 6 Interaction process and result analysis diagram between material and material, air flow and mechanical structure (cutters, hammers and tooth plate)

片以及齿板)之间相互作用时转子的扭矩呈现出明显的锯齿形状,主要是由于物料与物料、气流、铡刀、锤片、齿板、抛扔叶板之间的碰撞角度与方式均具有随机性的缘故。通过仿真计算所得的平均扭矩为11.414 1 N·m,代入公式(1)可得机器稳定工作ΔT为15 s时所消耗能量E_c为43 026.973 8 J,单位时间(1 s)消耗能量ΔE_c为2 868.464 9 J。

2.2 使揉碎机内空气具有一定静压和流速所消耗能量计算

饲草揉碎机空载运转时,机内流场为气流流场,其中气流密度ρ为1.225 kg/m^3,转子转速为2 400 r/min,由2.1.3节气流场仿真计算可得单位时间内截面A的平均气流质量流量Q_a为0.301 5 kg/s。饲草揉碎机出料口截面B处(图1)的气流流速V_a与静压P_a可通过实测获得。试验设备采用德国Testo405it无线式热线风速仪,试验方法与流程参见文献[24]。测试结果为截面B的平均流速V_a为9.04 m/s、平均静压为5 262.86 Pa。将上述参数代入式(12)可计算15 s内使空气具有一定静压和流速所消耗能量E_{air}为19 614.412 5 J,单位时间(1 s)消耗能量ΔE_{air}为1 307.627 5 J。

2.3 轴承摩擦所消耗能量计算

通过式(13)计算轴承摩擦消耗的能量,其中,由于7006C角接触球轴承为脂润滑,f_1取2;f_2参考文献[25]取0.001 1;v_b取3.0×10^{-5} mm/s;由于轴承在轴向方向的载荷几乎可以忽略不计,则$w_a(r)$为0,通过计算$w_\beta(r)$得16.182 4 N/mm,最终经计算得:E_1为0.018 1 J、E_2为4.753 4 J。由于轴承的个数为2,则通过计算15 s内揉碎机轴承摩擦消耗能量E_b为143.145 0 J,单位时间消耗的能量ΔE_b为9.543 0 J。

2.4 机壳振动所消耗能量计算

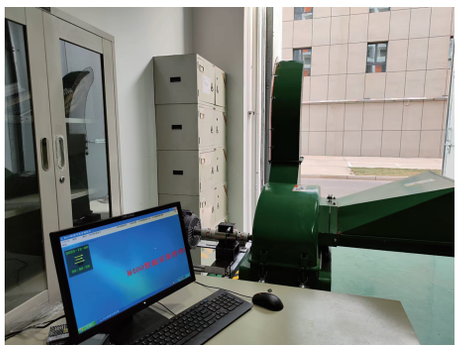
空载工况下揉碎机单位时间消耗的能量$E_{no-loud}$采用扭矩转速测量法测得。试验设备采用北京天宇恒创科技有限公司生产的量程为0-100 N/m的CYT-302型动态扭矩传感器,M400数据采集管理软件,扭矩信号转换模块以及PC机。试验现场如图7a所示。将揉碎机转子转速调整为2 400 r/min,待机器稳定工作后,采集15 s的扭矩数据,重复多次试验,选择结果接近的3次实测值中的一组计算其平均扭矩为7.033 3 N·m;空载工况下揉碎机单位时间(1 s)消耗能量$\Delta E_{no-load}$为1 767.530 9 J。

通过式(14)计算15 s内揉碎机振动消耗的能量E_v为6 755.406 0 J,单位时间(1 s)消耗能量ΔE_v为450.360 4 J。

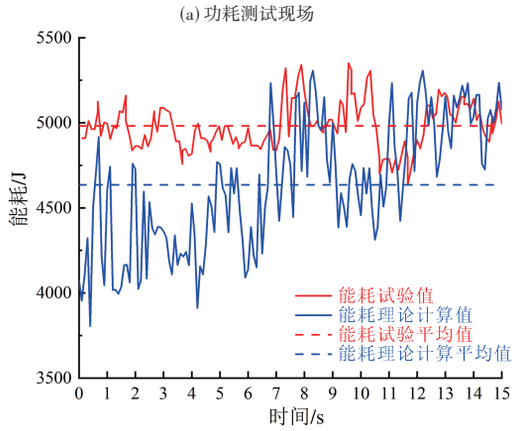
2.5 总功耗计算与试验验证

在数据采集15 s内,将上述计算结果代入式(15)、(16),可得揉碎机在15 s时消耗能量E为69 539.937 0 J,单位时间消耗能量ΔE为4 635.995 8 J,生产率ΔQ为232.959 6 kg/(kW·h)。其中E_c与ΔE_c为43 026.973 5 J与2 868.464 9 J,占总能量的比值为61.87%;E_{air}与ΔE_{air}为19 614.412 5 J与1 307.627 5 J,占总能量比值为28.21%;E_b与ΔE_b为143.145 0 J与9.543 0 J,占总能量比值为0.21%;E_v与ΔE_v为6 755.406 0 J与450.360 4 J,占总能量比值为9.71%。可见,秸秆揉碎机在揉碎物料过程中主要能耗为E_c,占总能耗的3/5以上;其次为E_{air},占总能耗1/4以上,这是由于在出料管处的空气具有一定静压和流速可以协助输送物料,并使物料具有一定的抛扔高度与抛扔距离;机体振动所消耗能量E_v占比接近1/10;占比最小为轴承摩擦消耗能量E_b。

为验证功耗数学模型准确性,采用实测功耗方法对功耗计算结果进行比较。采用扭矩转速测量法测试负载工况下秸秆揉碎机所消耗能量。测试仪器、方法与空载相同。负载时秸秆喂入量m_{in}为0.3 kg/s,喂入速度v_{in}为2 m/s。重复多次试验,选择结果接近的3次实测值中的一组作为实测结果,如图7b所示。由图可以看出,在数据采集15 s内,实测功耗数据呈现出离散峰值与叠加的驼峰形态,主要是由物料喂入的不均匀性与秸秆力学性能差异造成的,与此同时,秸秆与锤片、齿板、抛扔叶板以及机壳和秸秆间的碰撞具有随机性加剧了功耗的离散程度。为了与理论计算结果进行比较,由实测结果可得实测功耗为4 981.875 3 J,理论计算单位时间揉碎机平均功耗为4 635.995 8 J,两者相差为345.879 5 J,相



(a) 功耗测试现场



(b) 能耗

图7　饲草揉碎机功耗测试与数据处理结果

Fig. 7　Forage crusher power consumption test and data processing results

对误差为6.94%。主要是由于在理论计算时，对玉米秸秆模型进行了简化，同时空载与负载的振动与流场特性存在差异也是造成误差的主要原因之一。其中，理论计算值较试验值偏小的原因主要是在计算使空气具有一定静压和流速所消耗能量E_{air}中，忽略了内流场气流与转子和机壳相互作用所消耗的能量，以及气流湍流具有的湍动能消耗的能量；与此同时，在计算机体振动所消耗的能量E_v中，采用测量空载的间接方法与负载情况下的振动相比所具有的能量较小。最终，考虑到其流变学特性的不均匀性以及物料的各向异性，一般相对误差在10%以内就认为模型是精确的[26]，因此模型的计算结果是可信的。

3　结论

（1）通过所建数学模型计算得饲草揉碎机单位时间所消耗能量为4 635.995 8 J，生产率为232.959 6 kg/(kW·h)。

（2）饲草揉碎机揉碎物料过程中主要能耗为物料与物料、气流、机械结构（铡刀、锤片、齿板）之间相互作用所消耗的能量，占总能耗3/5以上；其次为使空气具有一定静压和流速所消耗能量，占总能耗1/4以上，再次为机体振动所消耗能量占比接近1/10；占比最小为转子与轴承摩擦消耗的能量。

（3）单位时间内，揉碎机功耗预测模型理论计算值与试验值相差为345.879 5 J，相对误差为6.94%，可见考虑物料破碎过程的功耗预测模型基本准确，计算结果可信。相应的功耗模型与预测方法为后续饲草揉碎机低功耗优化设计提供了基础。

参　考　文　献

[1] 侯泽华，崔红梅，闫鹏，等. 9RS-60型揉碎机工作性能试验研究[J]. 农机化研究，2020，42(1)：141－146.
HOU Zehua，CUI Hongmei，YAN Peng，et al. The orthogonal test study on working performance of 9RS-60 crushed mill[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(1)：141－146.(in Chinese)

[2] 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1)：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. 1)：110－116.(in Chinese)

[3] 赵振国，李林. 9R-40型揉碎机度电产量的性能分析与试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2011，32(1)：197－200.
ZHAO Zhenguo，LI Lin. Study and analysla on kilowatt-hour yield of the type 9R-40 tearing chopper[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Edition)，2011，32(1)：197－200.(in Chinese)

[4] 张涛，刘飞，赵满全，等. 冲击角度及茎节高度对玉米秸秆断裂能耗影响的试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2021，42(4)：65－69.
ZHANG Tao，LIU Fei ，ZHAO Manquan，et al. Experimental study on the influence of impact angle and stem node height change on the energy consumption of corn stalk fracture[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Edition)，2021，42(4)：65－69.(in Chinese)

[5] MONCADA M，TOLEDO P，BETANCOURT F，et al. Torque analysis of a gyratory crusher with the discrete element method[J]. Minerals，2021，11(8)：878.

[6] HONG S，HAN U，KIM G，et al. Numerical simulation of the collision breakage process between the agglomerate and hammer in a hammer crusher using DEM[J]. Shock and Vibration，2023，2023(1)：2838179.14.

[7] BWALY A M，CHIMWANI N. Numerical simulation of a single and double-rotor impact crusher using discrete element method[J]. Minerals，2022，12(2)：143.

[8] BARRIOS G，JIMENEZ-HERRERA N，FUENTES-TORRES S，et al. DEM simulation of laboratory-scale jaw crushing of a gold-bearing ore using a particle replacement model[J]. Minerals，2020，10(8)：1－16.

[9] WU C，ZHAO L，CAO Z. Collision energy analysis within the vertical shaft impact crusher based on the computational fluid dynamics-discrete element method[J]. ACS omega，2024，9(7)：7967－7975.

[10] 肖望强,陈辉,许展豪,等.基于颗粒阻尼的内燃动车组动力包构架多工况减振研究[J].机械工程学报,2022,58(4):250-257.
XIAO Wangqiang, CHEN Hui, XU Zhaohao, et al. Study on the vibration reduction of internal combustion emu powerpack frame under multiple loading conditions based on particle damping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 250-257. (in Chinese)

[11] KAČIANAUSKAS R, KRUGGEL-EMDEN H, ZDANCEVIČIUS E, et al. Comparative evaluation of normal viscoelastic contact force models in low velocity impact situations[J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(4): 1367-1379.

[12] XU Y. Shear strength of granular materials based on fractal fragmentation of particles[J]. Powder Technology, 2018, 333: 1-8.

[13] JI S, HANES D, SHEN H. Comparisons of physical experiment and discrete element simulations of sheared granular materials in an annular shear cell[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(6): 764-776.

[14] PALMGREN A. Ball and roller bearing engineering(3rd ed)[M]. Philadelphia: Burbank, 1959.

[15] LEI J, WANG S, LEI D, et al. Measurement and calibration of discrete element simulation parameters of crushed sugarcane tail leaves [J]. Bioresources, 2022, 17(4): 5984-5998.

[16] 全国木材标准化技术标准委员会. 木材物理力学试材锯解及试样截取方法. GB/T 1929-2009 [S].北京:中国标准出版社,2009.

[17] ASTM Committee D20 on Plastics. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM. D638-14 [S]. United States.: ASTM International, 2014.

[18] 罗菊川,文晟,李涵光,等.甘蔗尾茎泊松比的试验分析[J].华南农业大学学报,2017,38(6):118-124.
LUO Juchuan, WEN Sheng, LI Hanguang, et al. Experimental study on Poisson's ratio of sugarcane tail stalk[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(6): 118-124. (in Chinese)

[19] ZHOU L, YU J, LIANG L, et al. DEM parameter calibration of maize seeds and the effect of rolling friction [J]. Processes, 2021, 9(6): 914.

[20] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等.玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J].农业工程学报,2019,35(9):58-65.
ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 58-65. (in Chinese)

[21] ZHAO Y, ZHAI Z, GAO B, et al. Numerical prediction and optimization of aerodynamic noise of straw crushers by considering the straw-crushing process[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(4) 043330.

[22] 雷基林,于跃,辛千凡,等.柴油机燃烧室的系统设计方法研究与应用[J].农业工程学报,2020,36(6):36-46.
LEI Jilin, YU Yue, XIN Qianfan, et al. Investigation and application of systematic design method for combustion chamber of diesel engine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 36-46. (in Chinese)

[23] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等.基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J].东北农业大学学报,2022,53(1):45-54.
LIU Yuchen, ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(1): 45-54. (in Chinese)

[24] 刘飞,王伟,张涛,等.锤片式揉碎机气流场数值模拟与试验[J].农业机械学报,2018,49(增刊):227-232.
LIU Fei, WANG Wei, ZHANG Tao, et al. Air flow field numerical simulation and test of hammer rubbing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 227-232.(in Chinese)

[25] 李佩鸿.汽车差速器能耗特性理论研究与仿真分析[D].淮南:安徽理工大学,2015.
LI Peihong. Theory and simulation of energy consumption characteristics of differential transmission[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[26] 穆桂脂,吕皓玉,张婷婷,等.甘薯秧回收机抛送装置气固耦合模拟与试验优化[J].农业机械学报,2021,52(10):213-222.
MU Guizhi, LÜ Haoyu, ZHANG Tingting, et al. Gas-solid coupling simulation and experimental optimization of throwing device of sweet potato seedling recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 213-222.(in Chinese)