

基于鼯鼠爪趾的仿生锤片耐磨性研究

兰月政¹ 屈子超¹ 翟之平¹ 翟改霞² 卢梦圆¹

(1. 内蒙古工业大学机械工程学院, 呼和浩特 010051;
2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 锤片是饲草揉碎机的关键部件和易损件,锤片磨损钝化不仅影响揉碎机的工作效率使功耗增大,还会降低饲草的加工质量,且锤片的不均匀磨损会影响揉碎机转子平衡及振动,进而影响整机使用寿命。本文以鼯鼠爪趾为仿生原型,设计了一种仿生锤片,旨在不降低物料破碎效果的前提下提高锤片耐磨性。根据鼯鼠爪趾第三趾尖轮廓方程拟合出轮廓曲线,基于几何相似性原理建立鼯鼠爪趾仿生锤片,建立物料破碎 BPM 模型,基于 CFD-DEM 耦合方法模拟物料破碎过程揉碎室内气流与物料运动规律的同时,引入 Archard 磨损模型计算锤片磨损量。仿真结果表明,相同时间内原普通矩形锤片最大磨损量为 1.02×10^{-5} mm,鼯鼠爪趾仿生锤片最大磨损量为 9.51×10^{-6} mm,相较原型锤片最大磨损量降低 6.76%;经鼯鼠爪趾仿生锤片破碎后物料的黏结键破坏个数较矩形锤片增加 11.43%。研究结果表明鼯鼠爪趾仿生锤片的耐磨性与破碎能力都得到提升,为锤片式饲草加工机械设计性能提升提供方法参考。

关键词: 饲草揉碎机; 仿生锤片; CFD-DEM 耦合方法; Archard 磨损模型; BPM 模型

中图分类号: S817.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)10-0143-09 **OSID:** 

Wear Resistance of Bionic Hammer Mill Blades Based on Mole Claw Toe Structure

LAN Yuezheng¹ QU Zichao¹ ZHAI Zhiping¹ ZHAI Gaixia² LU Mengyuan¹
(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China
2. Hohhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: The hammer is a key component and vulnerable part of the forage crusher. Wear and blunting of the hammer not only reduce the operational efficiency of the crusher, increasing power consumption, but also degrade the processing quality of the forage. Moreover, uneven wear of the hammer can affect the balance and vibration of the crusher rotor, thereby impacting the service life of the entire machine. The mole claw toe was selected as the bionic prototype to design a novel bionic hammer aimed at improving wear resistance without compromising material crushing performance. Based on the contour equation of the third toe tip of the mole claw toe, the contour curve was fitted, and the bionic hammer was designed using the principle of geometric similarity. A bonded particle model (BPM) was established for material crushing, and the CFD-DEM coupling method was employed to simulate the motion patterns of airflow and material in the crushing chamber during the crushing process. Meanwhile, the Archard wear model was introduced to calculate the wear amount of the hammer. The results showed that within the same duration, the maximum wear amount of the original rectangular hammer was 1.02×10^{-5} mm, while that of the mole claw toe bionic hammer was 9.51×10^{-6} mm, representing a 6.76% reduction in maximum wear compared with the prototype hammer. Additionally, the number of bond breakages in the material after crushing by the bionic hammer was increased by 11.43% compared with that of the rectangular hammer. The results demonstrated that the mole claw toe bionic hammer exhibited improvements in both

收稿日期: 2025-11-16 修回日期: 2026-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52165034)、内蒙古自然联合科学基金项目(2023LHMS05023)和自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20240019、JY20230077)

作者简介: 兰月政(1985—),男,高级实验师,主要从事机械设计及机电系统研究,E-mail: lanzhengs@163.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

wear resistance and crushing performance. The research result can provide a methodological reference for the design and performance enhancement of hammer-type forage processing machinery.

Key words: forage crusher; bionic hammer; CFD – DEM coupling method; Archard wear model; BPM model

0 引言

饲草揉碎机是一种用于加工处理农作物秸秆的机械设备,主要功能是将秸秆加工后转化为可供牲畜食用的饲料,从而提高秸秆资源的利用率。转子上锤片是饲草揉碎机的关键部件和易损件,主要失效形式为磨损。锤片磨损钝化不仅降低揉碎机的工作效率、使运行功耗增大,同时影响饲草的加工质量;此外,锤片不均匀磨损会使揉碎机转子产生不平衡,从而引发整机振动加剧、噪声增大以及寿命缩短等问题,制约着饲草揉碎机向高品质方向发展^[1-3],所以在不降低锤片破碎能力前提下,提高其耐磨性具有重要的研究意义。

目前,仿生设计在农业机械领域已广泛应用,但在锤片式饲草加工机械中应用较少。王少伟等^[4]以鼯鼠前爪第3趾为仿生对象,分析了仿生开沟刀耐磨性。王春华等^[5]设计了一种带有凹坑形非光滑表面的截齿齿体结构,并通过正交试验分析了凹坑形仿生非光滑结构各参数对耐磨性的影响。李庆达等^[6]将栉孔扇贝壳棱纹几何结构特征应用于犁铧设计,发现合理改变表面仿生棱纹方向与间距可显著提高犁铧耐磨性。REN 等^[7]设计了几种具有不同仿生粗糙表面特性的弯曲推土机叶片,发现合理设计叶片表面有利于减少土壤粘附和摩擦。GUAN 等^[8]提出了一种受獾爪趾启发的仿生刀齿,有效提高了刀齿耐磨性,优化了综合性能。不少学者结合仿生学探究了农业机械在作业过程的破碎性能。陈燚^[9]将家鸽羽翼特征用于筛片结构设计,提高了物料颗粒粉碎率。王金栋等^[10]根据河狸门齿设计了一种新型仿生锤片,提高了锤片式粉碎机粉碎效率并降低了能耗。郑嘉鑫等^[11]依据切叶蚁上颚结构,设计了2种不同的仿生切割刀片,试验结果表明可有效提升三七采收机作业性能。上述国内外相关研究为本文在锤片仿生设计方面的探索提供了方法参考。

本文基于相似性原理建立鼯鼠爪趾仿生锤片模型,采用 CFD – DEM 与 Archard 耦合方法研究仿生锤片磨损量,并对秸秆物料破碎效果进行分析。以期为提高锤片耐磨性能提供方法参考,同时为锤片式饲草加工机械相关研究提供思路。

1 锤片磨损与物料破碎理论基础

1.1 基于 Archard 的锤片磨损模型

饲草揉碎机锤片产生磨损一般为软磨粒磨损,且用 Archard 磨损模型研究锤片磨损量是可行的^[12-14],模型一般表达式为

$$\frac{dw}{dt} = K \frac{Pv}{H} \tag{1}$$

- 式中 w ——锤片磨损体积, m^3
 dw/dt ——锤片磨损体积率, m^3/s
 v ——锤片与秸秆颗粒间相对滑动速度, m/s
 P ——锤片受到物料的总压力, N
 H ——锤片材料硬度, Pa
 K ——磨损系数, m^2/N

通常情况下,揉碎机锤片材质为 65Mn 钢,在确定材料类型后,硬度 H 可被视为固定值,因此式(1)可简化为

$$\frac{dw}{dt} = K_H Pv \tag{2}$$

- 式中 K_H ——磨损系数,为 K 与 H 比值,可通过试验或实际经验进行估算, m^2/N

对式(2)两侧同时除以锤片与秸秆颗粒之间实际接触面积 s_a ,即可得锤片磨损深度速率为

$$\frac{dh}{dt} = K_H \sigma_n v \tag{3}$$

- 式中 h ——磨损深度, m
 σ_n ——单位面积锤片与秸秆颗粒接触压力, Pa

1.2 基于 BPM 的物料破碎模型

切段处理后的秸秆在破碎过程采用颗粒黏结模型(BPM)进行描述,通过将特定数量与尺寸的原始粒子进行结合,形成具有可破碎特性的较大颗粒,进而利用黏结键的破坏表征颗粒破裂过程。

在 BPM 模型中,关键影响参数涵盖基础颗粒的几何尺度及连接区域的力学属性。连接区域的力学响应可通过 5 个特征参数进行表征^[15]:单位面积法向刚度 k_{bn} 与剪切刚度 k_{bt} 、材料抗拉强度 σ_b 、抗剪强度 τ_b 以及连接半径比例系数 λ_b 。颗粒黏结有效半径 R_b 可由比例系数与基础颗粒半径的乘积确定,计算式为

$$R_b = \lambda_b \min(r_A, r_B) \tag{4}$$

- 式中 r_A ——元粒子 A 半径, mm

r_B ——元粒子 B 半径, mm

颗粒 A 与颗粒 B 通过黏结键相连, 构成基础颗粒聚集体结构, 颗粒间力学作用模型如图 1 所示。

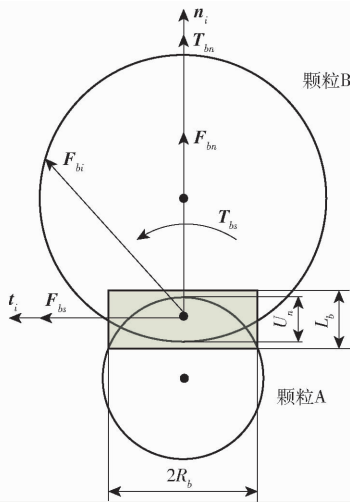


图 1 颗粒间力学作用模型

Fig. 1 Model of mechanical interaction between particles

图 1 中, L_b 为黏结键长度, 即颗粒 A 与颗粒 B 黏结时的重叠区域 U_n , F_{bi} 为黏结颗粒所受力, F_{bn} 为法向作用力, F_{bs} 为剪切方向作用力, T_{bi} 为黏结颗粒所受转矩, T_{bn} 、 T_{bs} 分别表示法向与切向转矩分量, n_i 和 t_i 分别为接触面法向与切向单位矢量。 F_{bi} 与 T_{bi} 表达式为

$$\begin{cases} F_{bi} = F_{bn} n_i + F_{bs} t_i \\ T_{bi} = T_{bn} + T_{bs} \end{cases} \quad (5)$$

在 Hertz - Mindlin 接触理论框架下, 当颗粒间黏结键形成后, 元粒子 A 与 B 之间将出现法向及切向方向的位移变化量 ΔU_n 、 ΔU_t , 同时伴随法向与切向旋转角度变化 $\Delta \varphi_n$ 、 $\Delta \varphi_t$, 进而产生法向及切向弹性力, 以及相应的法向与切向弹性转矩, 将被引入当前的受力体系, 对作用力与转矩调整。法向弹性力 δF_{bn} 、切向弹性力 δF_{bt} 、法向弹性转矩 δT_{bn} 、切向弹性转矩 δT_{bt} 的变化量计算式为

$$\begin{cases} \delta F_{bn} = k_{bn} A \Delta U_n \\ \delta F_{bt} = -k_{bt} A \Delta U_t \\ \delta T_{bn} = -k_{bn} J \Delta \varphi_n \\ \delta T_{bt} = -k_{bt} \frac{J}{2} \Delta \varphi_t \end{cases} \quad (6)$$

其中 $A = \pi R_b^2$ $J = \pi R_b^4 / 2$

式中 A ——平行键截面面积, mm^2

J ——平行键截面极惯性矩, mm^4

k_{bn} ——单位面积法向刚度, Pa

k_{bt} ——单位面积切向刚度, Pa

黏结键在结构模型中可被抽象为梁单元, 依据梁的力学原理, 其承受的最大拉伸应力 σ_{bmax} 与剪切

应力 τ_{bmax} 计算式为

$$\begin{cases} \sigma_{bmax} = \frac{-F_{bn}}{A} + 2 \frac{|T_{bt}|}{J} R_b \\ \tau_{bmax} = \frac{|F_{bt}|}{A} + \frac{|T_{bn}|}{J} R_b \end{cases} \quad (7)$$

当材料内部最大拉应力超出其抗拉强度 σ_{bc} , 或最大剪切应力达到剪切强度 τ_{bc} 极限时, 黏结键将发生断裂, 判定条件为

$$\begin{cases} \sigma_{bmax} \geq \sigma_{bc} \\ \tau_{bmax} \geq \tau_{bc} \end{cases} \quad (8)$$

2 仿生锤片设计与建模

2.1 饲草揉碎机结构和工作原理

9R - 50A 型饲草揉碎机如图 2 所示, 主要由进料槽、齿板、机架、出料管、转子和揉碎室机壳等组成, 其中转子主要由锤片、铡刀、双销轴、锤架板、套筒以及抛扔叶板组成。在揉碎机运行过程中, 待处理的秸秆通过进料槽进入设备, 经铡刀初步截断后进入揉碎室, 然后物料被高速运转的锤片持续打击, 同时在齿板的齿状结构不断揉搓作用下, 使其被分解为丝状形态, 最终在气流影响及抛扔叶板协同推动下, 物料经由出料管被排至设备外。

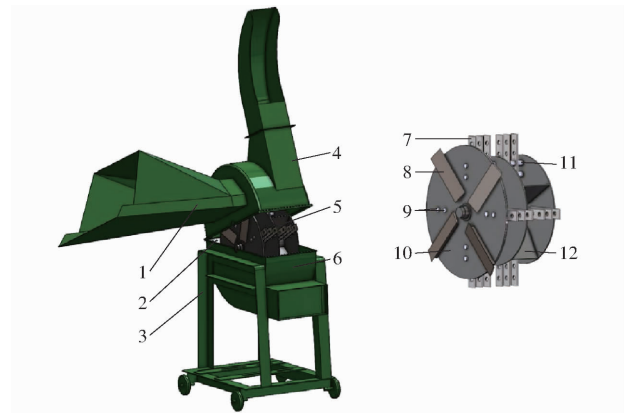


图 2 9R - 50A 型饲草揉碎机结构

Fig. 2 Structure of 9R - 50A forage crusher

1. 进料槽 2. 齿板 3. 机架 4. 出料管 5. 转子 6. 揉碎室机壳 7. 锤片 8. 铡刀 9. 双销轴 10. 锤架板 11. 套筒 12. 抛扔叶板

2.2 仿生锤片设计与模型建立

鼯鼠爪趾(图 3a)尤其是第 3 爪趾在长期的自然选择与进化中, 具备长期高效的磨损抵抗能力, 这种结构功能优势使鼯鼠能够仅在夜间完成近百米洞道的挖掘^[16-17]。为了将此结构特征用于提升锤片的耐磨性能, 采用逆向工程等方法^[18]构建锤片结构仿生数学模型。使用 3D 扫描仪对处理后的鼯鼠爪趾进行 360°扫描, 将获取的点云数据进行去噪、滤波后, 通过曲面重构方法即可得到准确的鼯鼠爪趾模

型;采用 Solidworks 软件对鼯鼠爪趾模型中第 3 趾趾尖轮廓进行特征提取(图 3b),同时利用 Matlab 软件中 Curve Fitting Tool 工具对轮廓曲线进行坐标提取与多项式拟合^[19],兼顾可加工性与拟合精度确定优化后的趾尖曲线函数为 6 次多项式,趾尖有效特征曲线如图 3c 所示。

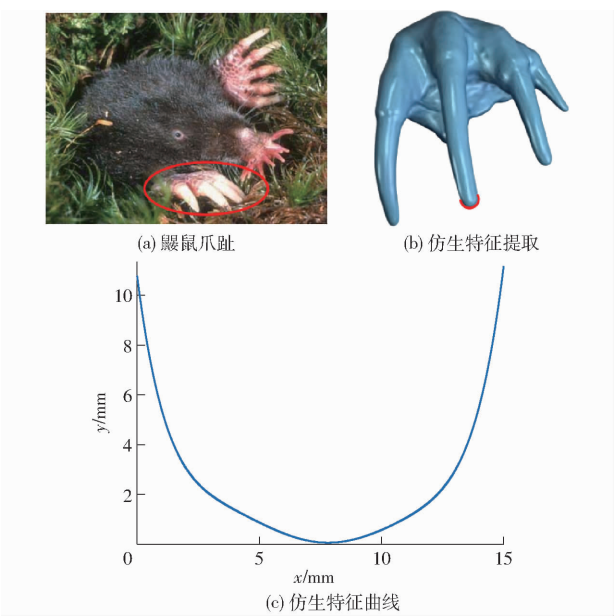


图 3 鼯鼠爪趾仿生特征获取

Fig. 3 Acquisition of bionic features from mole claw toes

趾尖拟合方程为

$$y = -8.062 \times 10^{-5} x^6 + 3.642 \times 10^{-3} x^5 - 6.531 \times 10^{-2} x^4 + 0.588 3 x^3 - 2.854 x^2 + 7.682 x + 0.322 3$$

(9)

如图 4 所示,当鼯鼠爪趾仿生锤片切入物料时,在接触点 A 处物料对其法向力 p_n 为

$$p_n = P \cos \theta$$

(10)

式中 P ——仿生锤片受到物料的总压力,N

θ ——仿生锤片所受法向压力与总压力间夹角, (°)

式(10)中, θ 为锐角,因此 p_n 小于 P ,即仿生锤片相较于普通锤片在与物料颗粒接触时所受的正压力减小,锤片所受摩擦力减小,故磨损减少;此外,相

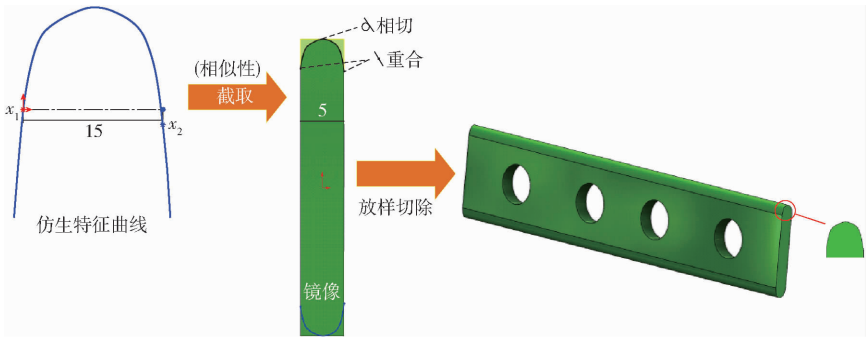


图 5 鼯鼠爪趾仿生锤片建模过程示意图

Fig. 5 Schematic of modeling process of bionic hammer plate imitating mole's claw toes

较于普通矩形锤片的直线形打击面,圆弧状仿生锤片的打击面可以引导物料颗粒产生滚动而非滑动,使得锤片与物料间的相对滑动速度减小,由式(2)可知,锤片的磨损深度速率减小,耐磨性提高。综上所述,选择鼯鼠爪趾作为饲草揉碎机仿生锤片设计原型是合理的。

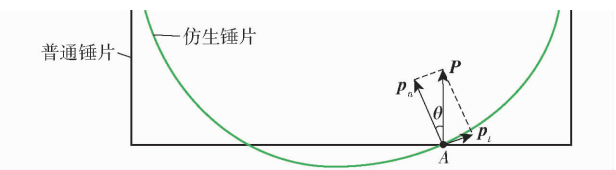


图 4 锤片受力示意图

Fig. 4 Schematic of force on hammer plate

在 Solidworks 软件中建立饲草揉碎机三维模型,其中普通锤片的长宽厚分别为 170、35、5 mm,为构建仿生曲线,采用方程式驱动曲线功能,输入式(9)并截取横坐标 0 ~ 15 mm 的曲线段作为特征曲线,高宽比为 1:1.31。为实现对锤片刃口高磨损区域的保护,并兼顾加工可行性,将仿生特征曲线按比例系数 $k = 1/3$ 进行几何相似性转换,使其宽度与锤片厚度一致,转换后的曲线完整保留原仿生曲线多段圆弧拓扑结构及曲率梯度分布,以期通过优化刃口轮廓分散切削过程的阻力,从而抑制锤片棱边集中磨损。采用 Solidworks 软件中相切、重合、放样等功能,建立鼯鼠爪趾仿生锤片模型,建模过程示意图如图 5 所示。

3 仿生锤片磨损量与破碎性能

CFD-DEM 与 Archard 耦合的数值模拟方法为目前关于锤片磨损研究的核心方法,在多相流耦合过程中实时更新颗粒轨迹与流体压力场,能够精准捕捉颗粒冲击角度和速度对磨损的影响,仿真结果与试验验证结果一致性较高^[13-14,20],因此采用该方法进行仿真分析。

3.1 仿生锤片磨损量与破碎性能计算

3.1.1 饲草揉碎机内气流场数值模拟

为准确计算饲草揉碎机内物料破碎过程仿生锤

片的磨损量,需先对揉碎机内的气流流场进行数值计算。

建立简化后饲草揉碎机三维模型,并采用体积抽取方法创建揉碎室内流体域,并按照是否随转子转动分为旋转域与非旋转域,处理后流体模型如图 6 所示。

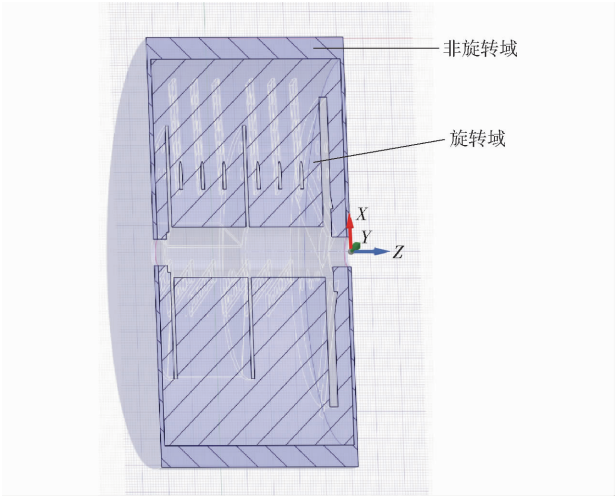


图 6 流体域划分
Fig.6 Fluid domain division

在 Fluent Meshing 中划分网格,网格类型为多面体网格,最大网格尺寸为 25 mm,生成体网格后改进网格质量。划分后旋转区域网格数量为 1 145 417,非旋转区域的网格数量为 343 673,总网格数量为 1 489 090,为满足 CFD 求解需求,体网格单元质量最低限制为 0.25,流体网格如图 7 所示。

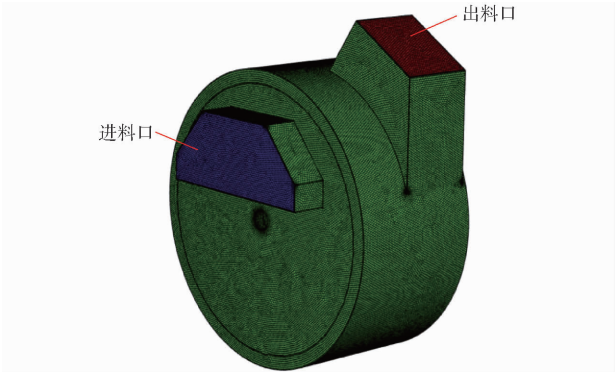


图 7 饲草揉碎机流体网格
Fig.7 Fluid mesh of forage crusher

为检验网格尺寸的合理性,对饲草揉碎机内流场进行 GCI 网格无关性分析^[21-23]。划分网格最大尺寸分别设为 30、25、20、15 mm。GCI 网格无关性计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知,当网格尺寸为 30、25、20、15 mm 时,对应 GCI 依次为 4.86%、1.58%、0.75% 和 0.4%。其中,后 3 种情况 GCI 均低于 3%,符合网格收敛性评估标准。考虑实际计算耗时与整体效率,最终确定最大网格尺寸为 25 mm。

表 1 GCI 网格无关性计算结果				
Tab.1 GCI grid independence calculation results				
参数	网格尺寸/mm			
	30	25	20	15
内流场压力/Pa	1 601	1 568	1 559	1 549
网格收敛误差	0.210 0	0.005 8	0.003 9	0.002 6
网格细化比	1.54	1.46	1.65	1.82
GCI/%	4.86	1.58	0.75	0.40

在 Fluent 中设置全局重力加速度为 9.81 m/s^2 ,方向为 Y 轴负方向,系统采用旋转坐标系,旋转轴为 Z 轴,转速为 2 400 r/min,进料速度为 1.567 m/s,出料口与大气相通,转子设为旋转壁面。选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型,并采用具有较高稳定性的标准算法,压力场的插值方式遵循标准格式,同时为提高计算准确性,动量方程、湍流动能以及湍流耗散率的离散化格式均采用二阶迎风,对揉碎机内的三维定常气流流场进行求解。

3.1.2 可破碎秸秆 BPM 模型

饲草揉碎机工作时整株玉米秸秆进入喂料口后经铡刀铡切成段,再由锤片旋转打击破碎为饲草颗粒。兼顾玉米秸秆的实际情况与计算机仿真时效性,选取靠近根部无节节的光滑部分,建立可破碎秸秆 BPM 模型为铡刀铡切后的段状秸秆,并将其简化为规则圆柱体^[24]。

(1) 软球颗粒(元粒子)模型

在离散元软件 EDEM 中分别设置内穗元粒子与外皮元粒子模拟玉米秸秆物料内部与外部的不同材料属性。在颗粒材料创建时,将秸秆内穗元粒子最大直径设定为 2 mm,其粒径分布采用正态分布模型,均值设定为 1 mm,标准差为 0.1 mm;秸秆外皮元粒子直径则固定为 1 mm,元粒子模型如图 8 所示。

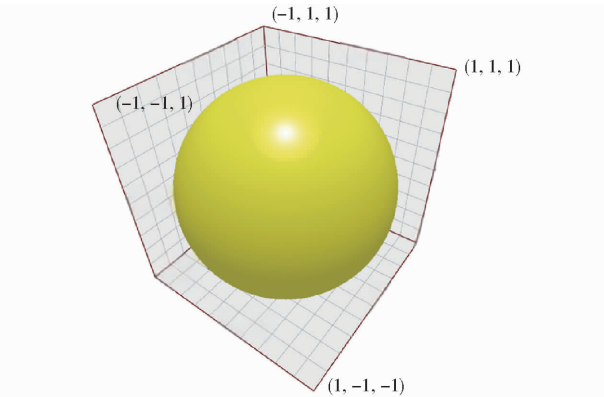


图 8 元粒子模型
Fig.8 Elementary particle model

(2) 秸秆离散元模型建立

在模型创建页面建立 3 个圆柱体模型。其中 3 个圆柱体高度分别为 200、100、100 mm,直径分别为

25、16、20 mm;将 3 个圆柱体分别命名为 Totality、Inside 和 Outside;边界类型初次分别设定为实体、虚拟和虚拟;Totality 主要用于生成物料元粒子,Inside 主要用于存储秸秆内稃元粒子,Outside 主要用于存储全部外皮及内稃元粒子。

在 Totality 模型中建立动态颗粒工厂用于生成秸秆内稃元粒子,设置颗粒生成总时间为 1 s,固定时间步长为瑞丽时间步(Rayleigh time step)的 20%,即 3.495×10^{-6} s,待所有元粒子下落至填满 Totality 后,将 Inside 和 Totality 边界类型分别调整为实体与虚拟,保持上述仿真页面中的参数设置继续进行仿真,在重力作用下,待 Inside 外侧超出模型区域的内稃元粒子脱落,即可得到秸秆芯部离散元模型。在创建页面中,将 Totality 边界类型重新选为实体,调整仿真时长为 2 s 后,开始填充秸秆外皮元粒子,待外皮元粒子填满 Totality,将 Totality、Inside 和 Outside 边界类型分别改为虚拟、虚拟和实体,继续仿真直至 Outside 模型外的元粒子全部脱落,得到玉米秸秆的离散元模型,如图 9 所示。

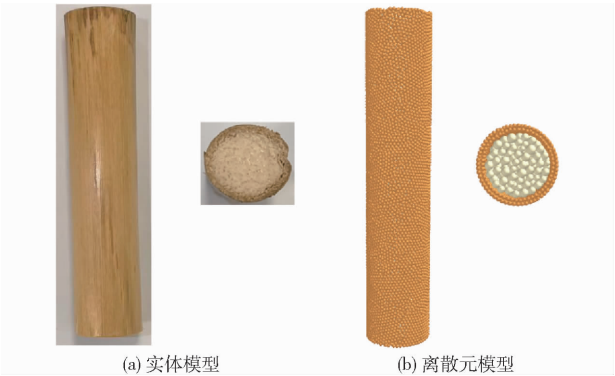


图 9 玉米秸秆模型
Fig. 9 Corn stalk models

BPM 秸秆模型需确定玉米秸秆泊松比、密度、剪切模量等,为添加 Bonding 模型用于黏结元粒子,需进一步明确黏结参数设置,涵盖单位面积内法向与切向刚度、临界法向及切向应力,以及黏结区域截面半径等关键指标,各参数^[24]如表 2 所示。

表 2 元粒子黏结参数					
Tab.2 Elementary particle bonding parameters					
项目	法向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	切向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	临界法 向应力/ Pa	临界切向 应力/ Pa	黏结 半径/ mm
内稃与内稃	4.59×10^7	2.66×10^6	3.00×10^6	1.00×10^6	1.5
内稃与外皮	2.94×10^8	5.00×10^7	5.00×10^6	5.00×10^6	2.0
外皮与外皮	3.69×10^8	7.72×10^7	5.20×10^6	3.84×10^6	2.0

3.1.3 基于 CFD-DEM-Archard 耦合的仿生锤片
磨损量与物料破碎

在 EDEM 中设置 9R-50A 饲草揉碎机材料特

性,机壳材料为 Q235,铡刀与锤片材料均为 65Mn,其余材料为 45Steel,物料黄玉米秸秆含水率为 9.45%,各材料特性^[24-25]见表 3。

表 3 材料特性			
Tab.3 Material characteristics			
材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	剪切模量 G/Pa	泊松比 μ
Q235	7 865	7.90×10^{10}	0.30
65Mn	8 864	7.90×10^{10}	0.35
45Steel	7 850	7.94×10^{10}	0.31
玉米秸秆颗粒	130.1	2.00×10^7	0.40

按照实际情况,设置物料与物料、锤片、机壳内壁碰撞时接触模型为 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型,各材料间交互作用参数^[26]如表 4 所示。在模型创建界面中创建颗粒工厂,颗粒生产速率为 0.29 kg/s。

表 4 材料交互作用参数			
Tab.4 Material interaction parameters			
接触类型	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
物料之间	0.43	0.18	0.09
物料与锤片	0.54	0.29	0.10
物料与机壳	0.663	0.229	0.226

将已收敛的揉碎机内气流流场中 $k-\varepsilon$ 模型改为大涡模拟模型,旋转域改为滑移网格类型,离散方案选择二阶迎风格式。兼顾 Fluent 和 EDEM 耦合时计算准确性和时效性,Fluent 时间步长一般为 EDEM 时间步长 1~100 之间的整数倍,设置 Fluent 迭代时间步长为 2×10^{-4} s,是 EDEM 的 50 倍,迭代步数为 5 000,最大迭代次数为 20,总仿真时间为 1 s。设置完成后,进行揉碎机内物料-气流-机械结构耦合仿真计算,从而获得基于鼯鼠爪趾仿生锤片的磨损量以及对物料的破碎能力。

3.2 仿生锤片磨损量与破碎性能计算结果
3.2.1 锤片磨损量

图 10 为揉碎机进入稳定磨损阶段后 2 min 内锤片磨损量随时间变化规律,将磨损量数据分别与直线、指数拟合曲线比较可以看出,锤片累积磨损量更符合线性变化,这种变化趋势也被文献[26]所证实。为节约仿真时间,提高计算效率,以下耦合计算时间均设置为转子进入稳定磨损后 1 s 的时间。

耦合计算仿生转子进入稳定磨损后 1 s 时间内磨损量云图如图 11 所示。由图 11 可知,锤片在轴向与径向分别产生了不均匀磨损。从轴向来看,物料颗粒在破碎过程的运动轨迹近似一条螺旋线(图 12a),颗粒沿轨迹线运动的同时,颗粒群由分散变得聚集并逐渐远离进料槽一侧,且在颗粒与机壳

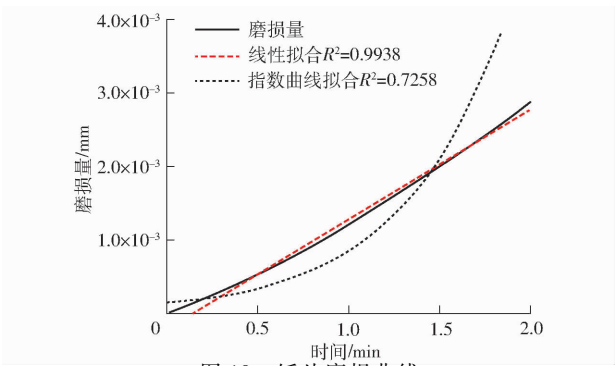


图 10 锤片磨损曲线
Fig. 10 Hammer wear line chart

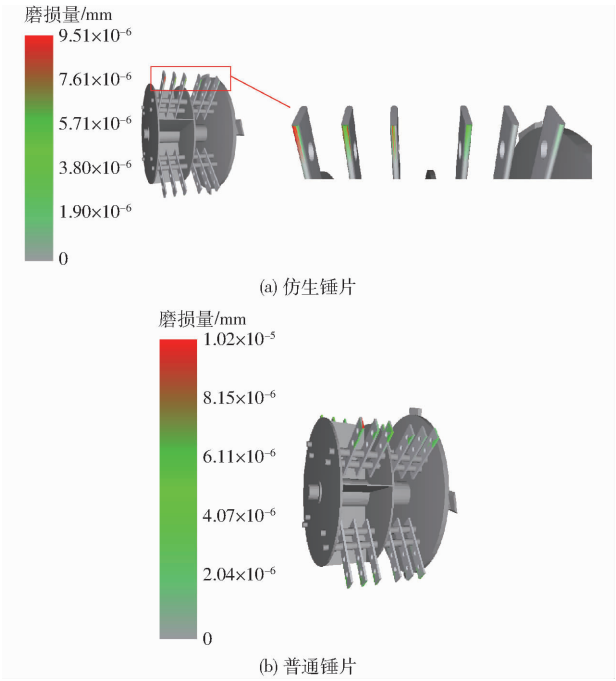


图 11 锤片磨损量云图
Fig. 11 Cloud maps of wear amount of hammer plates

反复碰撞、回弹作用下,进料槽远端的锤片与物料接触更密集,锤片产生的磨损量更大。从径向来看,物料颗粒在揉碎室中主要做旋转运动(图 12b),在流体力与离心力的共同作用下,颗粒群在转子外圆处聚集并整体呈现环状,因此锤片外端磨损更严重。

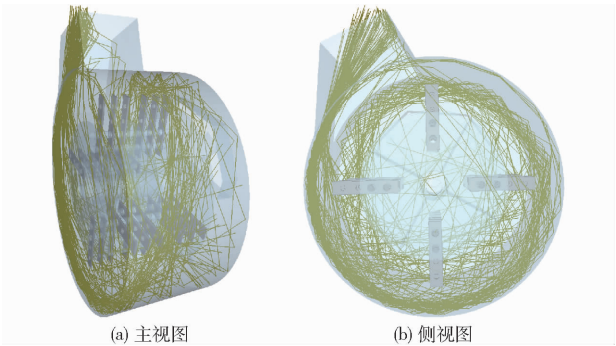


图 12 物料颗粒运动迹线
Fig. 12 Particle trajectory of forage material

由图 11 可以看出,1 s 内普通矩形锤片最大磨损量为 1.02×10^{-5} mm,鼯鼠爪趾仿生锤片最大磨

损量为 9.51×10^{-6} mm,相较矩形锤片最大磨损量降低 6.76%。

锤片最大磨损量与使用寿命紧密相关,以最大磨损量作为锤片耐磨性评价指标^[26]可知,鼯鼠爪趾仿生锤片相较普通锤片的耐磨性有所提高。

3.2.2 物料破碎效果

饲料黏结键充分破坏能使牲畜瘤胃中微生物更易接触纤维素,提升反刍动物对饲料的降解率;同时,提升物料破碎效果可使有机肥中氮、磷等养分分布更为均匀,避免田间施用时发生“局部肥效失衡”。提升物料破碎效果对实际生产具有重要意义^[27]。

为清晰地观察物料破碎效果,采用单秸秆破碎方式进行仿真模拟,仿真结果如图 13 所示。

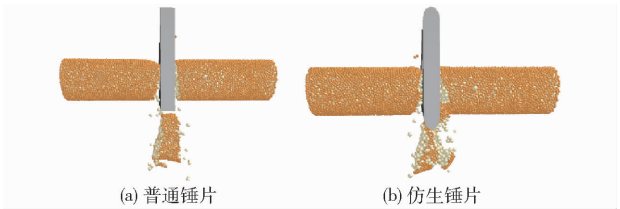


图 13 破碎效果
Fig. 13 Crushing result

由图 13 可知,普通矩形锤片破碎效果呈对称性破碎,这是因为普通锤片打击侧棱为直角,在破碎物料时锤片两侧对物料有切割作用,但中间对物料打击力度较小;鼯鼠爪趾仿生锤片打击物料时,凸型区域中部对物料集中施压,局部应力集中效应更明显,尤其是锤片中间的动态冲击强度更高。故经普通矩形锤片打击破碎的物料断口处相对整齐,形成表层剥离式破碎;而经鼯鼠爪趾仿生锤片打击破碎的物料更为散碎,底部碎屑呈现放射状散落。

物料破碎后黏结键破坏数量增多,通常意味着更多内部结构被破坏,可间接反映破碎效果的提升,且通过定量试验验证了采用离散元法对玉米秸秆破碎效果的研究是可行的^[28-29]。故选择黏结键破坏个数作为仿真结果量化指标衡量秸秆物料的破碎效果,统计仿真计算结果可知,经普通矩形锤片破碎后物料黏结键破坏个数为 4 776 个,而经鼯鼠爪趾仿生锤片破碎后物料黏结键破坏个数为 5 322 个,黏结键破坏数量增加 11.43%,由此间接表明鼯鼠爪趾仿生锤片较普通矩形锤片对物料破碎效果有所提升。

4 结论

(1)以鼯鼠爪趾第三趾趾尖轮廓为仿生原型,提取仿生特征曲线,对饲草揉碎机的锤片进行仿生设计。分析仿生特征曲线的几何特征与力学性能发

现,圆弧状仿生曲线对物料颗粒有导向作用,进而减小磨损。将完整的特征曲线覆盖于锤片刃口高磨损区域,基于几何相似性原理构建饲草揉碎机仿生锤片模型。

(2)建立饲草揉碎机流体模型及可破碎玉米秸秆 BPM 模型,基于 CFD - DEM - Archard 耦合的方法计算仿生锤片与普通锤片磨损量,结果表明,锤片累积磨损量随时间基本符合线性变化;同时,锤片在气流、物料、机械结构的共同影响下产生了径向与轴向不均匀磨损。相同时间内,普通矩形锤片最大磨

损量为 1.02×10^{-5} mm,鼯鼠爪趾仿生锤片最大磨损量为 9.51×10^{-6} mm,磨损量降低 6.76%,表明鼯鼠爪趾仿生锤片较原锤片有更好的耐磨性。

(3)采用单秸秆破碎方式对仿生锤片与普通锤片破碎能力进行仿真,结果发现仿生锤片相较原锤片打击破碎后的物料更为散碎,碎屑呈现放射状散落。相同条件下,使用鼯鼠爪趾仿生锤片破碎后物料的结键破坏个数增加,相较普通锤片增加 11.43%,可见鼯鼠爪趾仿生锤片对物料破碎效果更好。

参 考 文 献

[1] 王金博. 饲草揉碎机转子动态特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
WANG Jinbo. Research on dynamic characteristic of a forage rubbing machine's rotor[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018. (in Chinese)

[2] 高波, 翟之平, 兰月政, 等. 基于 DEM - BPM - CFD 的饲草揉碎机功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 168 - 176.
GAO Bo, ZHAI Zhiping, LAN Yuezheng, et al. Power consumption prediction model of forage crusher based on DEM - BPM - CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 168 - 176. (in Chinese)

[3] 赵立翔, 翟之平, 翟小艺, 等. 新型饲草揉碎机可靠性预测与分配的研究[J]. 饲料研究, 2024, 47(1): 120 - 125.
ZHAO Lixiang, ZHAI Zhiping, ZHAI Xiaoyi, et al. Study on reliability prediction and distribution of new forage crusher[J]. Feed Research, 2024, 47(1): 120 - 125. (in Chinese)

[4] 王少伟, 李善军, 张衍林, 等. 鼯鼠趾仿生及表面热处理提高齿形开沟刀减阻耐磨性能[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 10 - 20.
WANG Shaowei, LI Shanjun, ZHANG Yanlin, et al. Mole toe bionics and surface heat treatment improving resistance reduction and abrasion resistance performance of toothed ditching blade[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 10 - 20. (in Chinese)

[5] 王春华, 王琛. 仿蜣螂虫凹坑形镐形截齿的设计与研究[J]. 机械强度, 2020, 42(2): 325 - 330.
WANG Chunhua, WANG Chen. Design and research of onical picks with bionic concave of dung-beetle surface[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(2): 325 - 330. (in Chinese)

[6] 李庆达, 刘明辉, 汪昊, 等. 仿生犁铧耐磨性能仿真分析与试验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(19): 107 - 116.
LI Qingda, LIU Minghui, WANG Hao, et al. Simulation analysis and experimental research on wear resistance of bionic plowshare[J]. Surface Technology, 2024, 53(19): 107 - 116. (in Chinese)

[7] REN L Q, HAN Z W, LI J Q, et al. Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction[J]. Soil & Tillage Research, 2004, 85(1): 1 - 12.

[8] GUAN C S, FU J J, XU L, et al. Study on the reduction of soil adhesion and tillage force of bionic cutter teeth in secondary soil crushing[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 133 - 147.

[9] 陈燚. 锤片式粉碎机关键功能部件仿生设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
CHEN Yi. Research on bionic design for key components of hammer mill[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)

[10] 王金栋, 谢宇鸿, 陈燚, 等. 基于河狸门齿的锤片式粉碎机锤片仿生设计[J]. 工程设计学报, 2023, 30(4): 476 - 484.
WANG Jindong, XIE Yuhong, CHEN Yi, et al. Biomimetic design of hammer pieces for hammer mill based on beaver incisors[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(4): 476 - 484. (in Chinese)

[11] 郑嘉鑫, 王世顺, 马龙, 等. 三七茎叶采收机仿生切割刀片设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 117 - 126.
ZHENG Jiaxin, WANG Shishun, MA Long, et al. Design and experiment of bionic cutting blades for *Panax notoginseng* stem and leaf harvesting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 117 - 126. (in Chinese)

[12] VERA-CARDENAS E E, LEWIS R, SLATTER T, et al. Sliding wear study on the valve-seat insert contact[J]. Open Journal of Applied Sciences, 2017, 7(2): 42 - 49.

[13] 周强, 翟之平, 张宝元, 等. 采用新磨损模型耦合方法研究饲草揉碎机磨损规律[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(6): 177 - 184.
ZHOU Qiang, ZHAI Zhiping, ZHANG Baoyuan, et al. A new wear model coupling method was used to study the wear law of

- forage crusher[J]. Machine Design & Research, 2023, 39(6): 177 – 184. (in Chinese)
- [14] 袁东海, 赵海旭, 翟之平, 等. 基于 CFD – DEM 与 Archard 模型耦合的锤片磨损规律与磨损失效可靠性分析[J]. 工程设计学报, 2023, 30(6): 746 – 752.
YUAN Donghai, ZHAO Haixu, ZHAI Zhiping, et al. Analysis on hammer wear law and wear failure reliability based on CFD – DEM and Archard model coupling[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(6): 746 – 752. (in Chinese)
- [15] SCHRAMM M, TEKESTE M Z. Wheat straw direct shear simulation using discrete element method of fibrous bonded model [J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 1 – 12.
- [16] 汲文峰. 旋耕-碎茬仿生刀片[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
JI Wenfeng. Biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [17] 郭俊, 张庆怡, MUHAMMAD S M, 等. 仿鼯鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 43 – 50.
GUO Jun, ZHANG Qingyi, MUHAMMAD S M, et al. Design and experiment of rotary cultivator-straw chopping sawtooth blades arranged like mole's toe[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 43 – 50. (in Chinese)
- [18] 杨玉婉. 鼯鼠前足多趾组合结构切土性能研究与仿生旋耕刀设计[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
YANG Yuwan. Study on the soil-cutting performance of multi-claw combination of mole rats and design of biomimetic rotary tillage blade[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [19] 姜嘉胤. 基于离散元法的茶园仿生耕作刀具设计[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
JIANG Jiayin. Design of bionic tillage tools for tea plantation based on discrete element method[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2023. (in Chinese)
- [20] HUANG S, TANG Z R, HUANG J X, et al. Investigation of influencing factors of wear in a sandblasting machine by CFD – DEM coupling[J]. Particulate Science and Technology, 2022, 40(7): 838 – 847.
- [21] OLIVEIRA R A F, JUSTI G H, LOPES G C. Grid convergence study of a cyclone separator using different mesh structures [J]. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 2017, 23(3): 311 – 320.
- [22] RESSEGUIER V, LI L, JOUAN G, et al. New trends in ensemble forecast strategy: uncertainty quantification for coarse-grid computational fluid dynamics[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 28(1): 1 – 47.
- [23] BAKER N, KELLY G, O'SULLIVAN P D. A grid convergence index study of mesh style effect on the accuracy of the numerical results for an indoor airflow profile[J]. International Journal of Ventilation, 2020, 19(4): 300 – 314.
- [24] 赵宇. 新型饲草揉碎机内流场特性与气动噪声分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2023.
ZHAO Yu. Analysis of flow field characteristics and aerodynamic noise of a new forage crusher[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 袁东海. 多失效模式下多功能秸秆揉丝机时变可靠性分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2024.
YUAN Donghai. Time-variant reliability analysis of multifunctional straw kneading machine under multiple failure modes[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [27] 耿端阳, 牟孝栋, 孙延成, 等. 青贮玉米螺旋缺口锯齿型揉丝破碎辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 134 – 141.
GENG Duanyang, MOU Xiaodong, SUN Yancheng, et al. Simulation and test of silage corn screw notched sawtooth type crushing roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 134 – 141. (in Chinese)
- [28] 叶涛, 刘付志标. 基于 EDEM 的反击式破碎机仿真研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(2): 62 – 65.
YE Tao, LIUFU Zhibiao. Simulation study on impact crusher based on EDEM[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(2): 62 – 65. (in Chinese)
- [29] 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)