

基于离散元法的玉米秸秆球磨预处理放大仿真研究

肖卫华 刘烙阳 谭玉凤 林昊 张慧 贾惜文

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了更好地推动秸秆球磨预处理技术应用, 评估球磨预处理工艺实现放大生产的可行性, 通过离散元法仿真模拟预测规模放大的秸秆球磨预处理中的能耗, 并验证球磨规模放大后的预处理效果。将实验室规模的 CJM-SY-B 型振动球磨机筒体尺寸按容积放大 24 倍后建立三维几何模型, 导入 EDEM 软件, 通过输入玉米秸秆初始和球磨后的物理属性参数仿真模拟得到球磨机内部的碰撞能量耗散情况, 来估算放大后的球磨能耗; 同时, 对比了两种规模下仅球磨预处理的玉米秸秆粒径及酶解产糖浓度, 验证了秸秆球磨工艺放大后的预处理效果。结果表明仿真预测能耗为 $1.48 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$, 实际能耗为 $1.65 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$, 预测相对误差为 10.3%, 实验室规模与规模放大后的球磨玉米秸秆粒径跨度仅相差 0.8%, 酶解产生的总单糖质量浓度分别为 $85.5 \text{ g}/\text{L}$ 和 $88.5 \text{ g}/\text{L}$, 表明玉米秸秆的酶解效果未因球磨规模放大而发生明显变化。本研究证明利用离散元法对玉米秸秆球磨进行放大仿真是可行的, 为实现秸秆球磨工艺放大应用提供一定的理论参考和技术支持。

关键词: 玉米秸秆; 球磨; 离散元法

中图分类号: S226.3; S216.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)01-0378-08

OSID:



Investigation of Scale-up Simulation for Corn Straw Ball Milling Pretreatment Utilizing Discrete Element Method

XIAO Weihua LIU Luoyang TAN Yufeng LIN Hao ZHANG Hui JIA Xiwen

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

Abstract: Aiming to enhance the promotion of straw ball milling pretreatment technology and assess the feasibility of scaling up the ball milling pretreatment process, the energy consumption during straw ball milling pretreatment was predicted at a larger scale by using discrete element simulation, followed by verification of the pretreatment efficacy post-scaling. After increasing the cylinder size of the CJM-SY-B vibrating ball mill in laboratory conditions to 24 times its original volume, a three-dimensional geometric model was constructed. The EDEM software was employed to simulate impact energy dissipation within the ball mill by inputting physical property parameters for corn stalks both at initial stages and after milling, thereby estimating energy consumption for scaled-up operations. Concurrently, particle size distribution and sugar production concentration from corn straw subjected to ball milling were compared across two different scales, validating the effectiveness of straw ball milling treatment. Results indicated that predicted energy consumption was $1.48 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ of straw while actual consumption measured at $1.65 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ with a relative prediction error of 10.3%. The difference in particle size span between laboratory-scale and scaled-up corn stalks was merely 0.8%, with total monosaccharide concentrations resulting from enzymatic hydrolysis recorded as $85.5 \text{ g}/\text{L}$ and $88.5 \text{ g}/\text{L}$ respectively; these findings suggested that enzymatic hydrolysis efficiency for corn straw remained largely unchanged despite scale enlargement in milling processes. This research substantiated the viability of utilizing discrete element methods for scaling up corn stalk processing and offered theoretical insights along with technical support for broader applications in stalk milling.

Key words: corn straw; ball milling; discrete element method

收稿日期: 2024-09-25 修回日期: 2024-10-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区教育厅普通高等学校现代农业工程重点实验室开放课题(TDNG2023103)

作者简介: 肖卫华(1977—), 女, 教授, 博士, 主要从事生物质资源转化利用研究, E-mail: xwhddd@163.com

0 引言

木质纤维素生物质是世界上最丰富的碳资源^[1],它被认为是生产燃料、化学品和材料等化石资源的替代品。玉米秸秆作为我国最常见的木质纤维原料之一^[2],其综合利用需要通过一定强度的预处理来打乱纤维素的结晶结构、分离脱除木质素、增加纤维素的可及性,从而更高效地将碳水化合物聚合物转化为可发酵糖^[3]。球磨作为一种机械超微粉碎预处理方式,能够通过显著减小秸秆颗粒尺寸、破坏秸秆细胞壁、降低纤维素结晶度等形式来提高纤维素的可及性,从而提高玉米秸秆的酶解效率。LU 等^[4]研究发现球磨后的玉米秸秆能够显著降低高固体酶解时浆体粘度,这表明球磨还可以通过改变秸秆颗粒的流变特性使高固体酶解成为可能^[5]。

然而球磨过程的能耗以及球磨破碎的复杂机制一直是阻碍其产业放大的主要原因^[6]。通过实验室规模球磨机无法对大规模球磨机进行预测,而试验探究大规模球磨机的能耗规律及性能会浪费大量人力物力。针对这个问题,许多研究人员开始致力于利用建模法进行球磨机的规模放大研究^[7],其中,基于离散元法(DEM)的球磨规模放大模拟被认为是分析和研究粒子运动过程的强有力工具^[8],由于 DEM 是基于牛顿方程计算单个粒子的行为,因此其算法通俗易懂、较为容易实现,被广泛应用于各种颗粒相互作用的过程,例如粒子破碎、混合和分离^[8]。众多的研究人员针对球磨机的功率和能量分布等方面进行了广泛的模拟仿真研究,并在此基础上获得了大量的研究成果^[9-10]。例如 MIO 等^[11]以三水铝石粉为原料,基于离散元分析法将球磨机规模从 170 mL 放大到 16 650 mL 进行了试验,研究表明当行星磨机按几何相似放大时,球的冲击能量与放大比的 4.87 次方成正比;IWASAKI 等^[12]同样运用了离散元分析法,以氢氧化铝粉末为原料,将球磨机的规模从 115 mL 放大到了 4 710 mL,证明了球磨机能耗随着规模的放大有所减小;林哲生等^[13]对三七药粉干式球磨进行离散元仿真,通过建立三七破碎球磨体系的 EDEM 模型,分析在不同球磨条件,例如不同转速、球料比和填充率下磨筒内部磨介球和三七颗粒的运动规律和冲击能量分布特点。

目前 DEM 在对农业散体颗粒物料的传送、筛分和堆积等方面已经有了成熟的研究并取得了大量与试验研究相符的研究成果,但在基于 DEM 球磨放大的模拟研究中,大多是以矿石类硬质材料为主,对于以木质纤维素生物质为原料进行粉碎模拟放大研究

则以试验探究为主^[14-17]。根据研究^[18]可知,农业散体物料颗粒在其超微粉碎过程中很多基于微观方面的受力情况等都可以使用 DEM 来进行分析。因此本文以实验室现有的 CJM-SY-B 型振动球磨机为原型,对其进行规模放大后分析颗粒在球磨机内部的运动情况及能量分布,并验证酶解效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验物料为 2021 年 9 月采自山东省滨州市的玉米秸秆,待其自然晾干再用铡刀切至 3~5 cm,置于 60℃ 真空干燥机烘至质量恒定,用 RT-34 型锤片式粉碎机(香港荣聪精密科技有限公司)初步粉碎并过 40 目筛网,称取 60 g 后放入振动式球磨机(型号 CJM-SY-B,秦皇岛太极环纳米制品有限公司,球磨机磨仓总体积为 2 L),球磨条件为:填充率 30%、球料体积比 2:1、球磨时间 60 min。球磨后的样品放入自封袋,置于干燥器中常温保存,样品初始尺寸为 0.425 mm。

实验室规模球磨机为秦皇岛太极环有限公司的 CJM-SY-B 型振动球磨机,磨仓总体积为 2 L,中试规模球磨机为秦皇岛太极环有限公司的 CJM-SC-B2 型振动球磨机,磨仓总体积为 48 L,几何模型建模软件为 Solidworks 2020,离散元仿真所用软件为 EDEM 2021。

1.2 试验样品本征参数

对于玉米秸秆粉末这类颗粒数量庞大的材料体系,其宏观体系中的本构关系极难确定,多数研究人员的仿真均以文献和试验相结合的方式来确定^[19-20]。

本文中关于秸秆粉料的可测量特性参数(如密度、剪切模量、粒径范围等)的确定,是利用电子万能材料试验机(图 1 所示)和 MASTERSIZER 3000 型激光粒度仪(Malvern Panalytical 公司,英国)进行多次单因素试验来实现;对于无法准确测定的参数(如颗粒间的摩擦因数、刚度和阻尼系数等)及试验

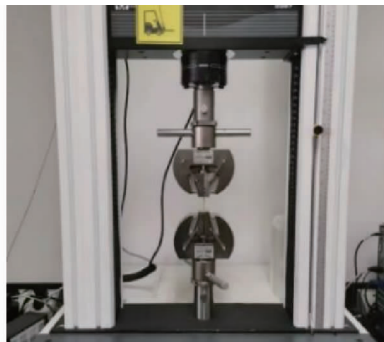


图 1 电子万能材料试验机

Fig. 1 Electronic universal material testing machine

参数与离散元模型参数连接的问题,通过查阅与本文的物料种类、粒度、密度等相似的文献[21-22]来确定。具体参数如表1所示。

表1 EDEM 中材料本征参数设置

Tab.1 Material intrinsic parameters setting in EDEM

材料	参数	数值
玉米秸秆粉料	泊松比	0.3
	剪切模量/MPa	25
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	200
	初始粒度/mm	0.425
氧化铝珠	出料粒度/mm	0.058
	泊松比	0.3
	杨氏弹性模量/GPa	200
玉米秸秆-玉米秸秆	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	6100
	恢复系数	0.23
	静摩擦因数	0.6
	滚动摩擦因数	0.05

2 仿真模型建立

2.1 离散元几何约束模型创建

以秦皇岛太极环有限公司的 CJM-SC-B2 型振动球磨机为原型建立几何约束模型,这是一款可以根据筒内球磨温度进行自动循环水冷的振动式球磨机,由于仅需要研究球磨机筒体内物料和球介质的运动状态以及能量耗散等因素,因此机械模型仅建立筒体,如图2所示,筒体的具体参数如表2所示。

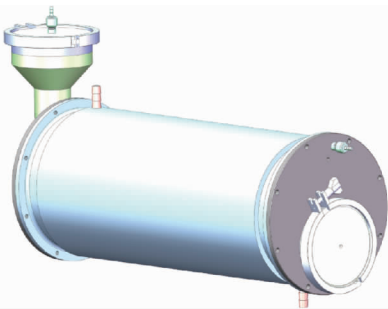


图2 球磨机筒体几何模型

Fig.2 Ball mill cylinder geometry model

表2 球磨机机械模型的结构参数

Tab.2 Structural parameters of mechanical model of ball mill

参数	数值/型式
筒体有效直径/cm	34
轴向长度/cm	50
筒体衬板材料	氧化铝
衬板形状	围绕内壁形成的圆环
衬板厚度/cm	1
振幅/mm	24 ^[23]
振动频率/($\text{次}\cdot\text{min}^{-1}$)	850 ^[23]

由于每个颗粒在 DEM 假设中都是一个独立的单元,因此为了方便后续的仿真计算与分析,做了以下几点假设:假设氧化铝球和玉米秸秆颗粒均为刚性体;氧化铝球和玉米秸秆颗粒的相互作用力和力矩由相互之间的接触情况和重力决定;颗粒间接触的性质为软接触,即在碰撞时会发生重叠。

颗粒单元的基本属性包括几何属性和物理属性,其中几何属性主要有颗粒的形状、尺寸以及初始排列方式等,物理属性则包括剪切模量、刚度、弹性模量、密度等^[19]。此外,由于球磨前的筛分粒度为40目,球磨1h玉米秸秆的筛分粒度为500~600目,数以万计的粒子数量会使仿真难度增加,现有的计算机无法支撑起如此庞大的仿真计算量,因此在不影响仿真结果的基础上将模型做了一定程度的简化,将粉碎的粒子初始粒径和最终破碎后的粒径进行了适当的放大后再进行颗粒的生成,其中初始粉体平均粒径为 $(285.80 \pm 0.82) \mu\text{m}$,球磨后秸秆粉体平均粒径为 $(18.80 \pm 0.90) \mu\text{m}$ 。

图3所示为利用 EDEM 软件生成的玉米秸秆颗粒的近似模拟颗粒。

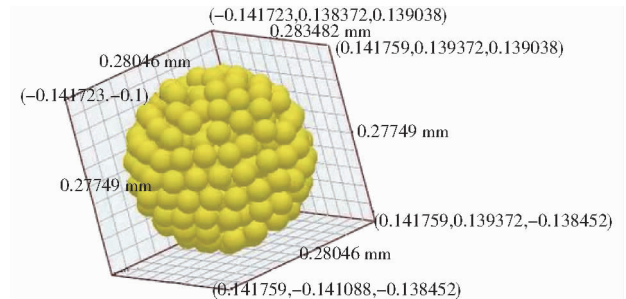


图3 EDEM 生成的秸秆模拟颗粒

Fig.3 Straw simulation particles generated by EDEM

2.2 离散元接触模型选定

颗粒的接触模型通常可以简化为软颗粒接触和硬颗粒接触,对于玉米秸秆的破碎模拟,通常采用软球接触模型,即颗粒之间允许重叠。如图4所示,虚线位置表示颗粒之间刚发生接触,接触点为A,当从点A移动到点B时,两个颗粒之间的法向重叠量和切向重叠量分别表示为 σ_n 和 σ_t 。本文在进行粉碎之前已经对玉米秸秆粉末进行烘干,默认为干磨状态,所含水分不会导致物料的粘连,同时由于模拟的是玉米秸秆粉末颗粒的破碎,而不是单纯的颗粒与颗粒之间的接触,因此选用 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型对玉米秸秆粉料破碎进行 DEM 仿真。

2.3 离散元仿真模型破碎能耗研究

2.3.1 介质运动状态分析

球磨机中秸秆颗粒的粉碎依靠的是球磨罐体内

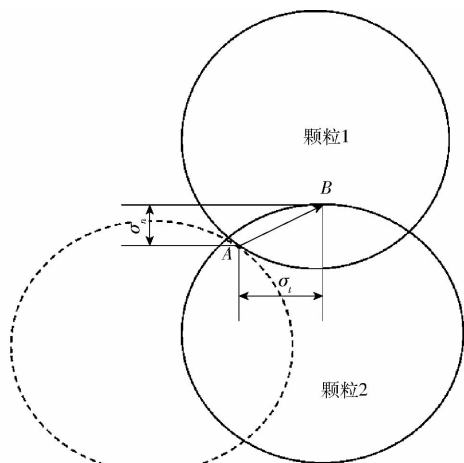


图 4 软球接触模型

Fig. 4 Soft ball contact model

运动的磨介球对玉米秸秆颗粒的相互作用,而球的运动会影响碰撞能分布,从而会对球磨机的粉碎性能产生影响,振动式球磨机与普通的仅靠自身的高速旋转进行球磨的磨机不同,其是通过在垂直方向上的多维振动来实现破碎的,因此想要估算球磨机内的能量耗散,了解筒体内介质的运动规律是有必要的。此外,球磨介质以及筒体内衬的选择也会影响粉碎能耗,氧化铝球表面光滑,对研磨机的磨损小,能耗就会降低,因此本文选择氧化铝作为研磨介质和磨筒内衬。以实验室规模的 CJM-SY-B 型振动球磨机为建模基础,将其磨筒的有效体积放大 24 倍后运用 Solidworks 进行三维建模,并导入 EDEM 软件进行破碎仿真。

磨筒内介质运动情况如图 5 所示,图中的颜色表示磨筒内氧化铝球与玉米秸秆物料颗粒的速度,红色、绿色和蓝色 3 种颜色分别代表颗粒速度为大、中、小。在振动式球磨机的磨筒内,当磨筒内的颗粒群受到振动后,会在下落时与筒壁分离,整个介质群之间以及介质群与筒壁之间会发生碰撞,因此可以推测出振动式球磨机筒体振动产生的作用力会使颗粒群做上下抛落运动,使得颗粒与颗粒之间、颗粒与介质之间相互挤压和碰撞,粉碎作用明显增强。通过对振动球磨机破碎玉米秸秆仿真模拟后可以直观地观察到,氧化铝球介质在磨筒内的运动可以分为 3 种:筒内球介质随着磨筒的振动而产生的上下振动、球介质绕磨筒转轴的自转运动以及球介质群绕着某一不确定中心进行的公转运动。通过分析介质在桶内的运动状态可知,物料在介质的无规则运动下主要受到挤压应力、剪切应力研磨和冲击力,对应的 4 种破碎形式分别为挤压粉碎、剪切粉碎、研磨粉碎和冲击粉碎。

2.3.2 能量耗散分布

在球磨过程中,氧化铝球作为能量传递的媒介,

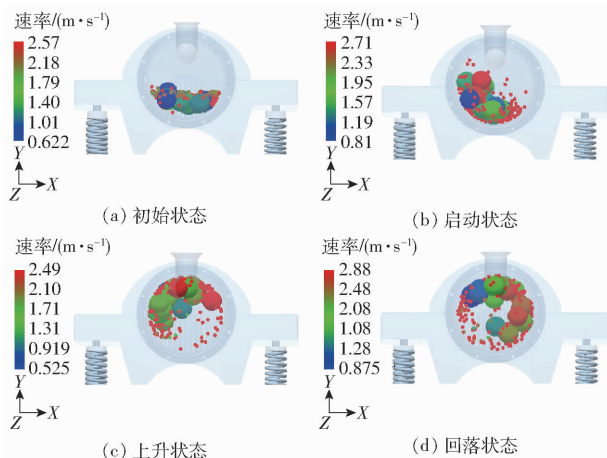


图 5 磨筒内介质运动情况

Fig. 5 Motion of medium in cylinder

通过挤压、冲击和研磨作用使得物料发生破碎,然而在此过程中,磨介球本身所携带的能量并没有完全转化为玉米秸秆颗粒破碎所需要的能量,其中很大一部分是通过声能、热能等无用的能量耗散。因此,对总碰撞能在振动式球磨机中的分布情况进行分析有助于了解磨筒内的能量利用情况。具体操作即通过 EDEM 的处理器模块对振动式球磨机破碎玉米秸秆颗粒过程中的介质着不同的颜色。

球磨机中不同类型的碰撞所损失的能量详情如表 3 所示。从表中可以看出,氧化铝球介质与筒壁和氧化铝球之间的碰撞所消耗的能量占总碰撞能量耗散的 24.35%,物料与氧化铝球、物料与筒壁之间以及物料与物料之间的碰撞占总碰撞能量的 75.65%,其中氧化铝球之间的碰撞以及氧化铝球与筒壁的碰撞时产生的能量耗散不仅不会使物料破碎,还会造成筒壁和磨介球的磨损。其中 EDEM 输出的总碰撞能量的结果为 23.74 J。

表 3 磨筒中的能量耗散分布

Tab. 3 Energy dissipation distribution in cylinder

碰撞类型	不同碰撞能量占总碰撞能量的比例/%
氧化铝球-氧化铝球	19.23
玉米秸秆粉料-玉米秸秆粉料	30.15
氧化铝球-筒壁	5.12
氧化铝球-玉米秸秆	42.18
玉米秸秆粉料-筒壁	3.32

2.3.3 破碎功率预测

研究颗粒粉碎理论的目的是为了研究物料的粉碎机理和粉碎时的能耗。关于粉碎能耗,到目前为止已经提出了多种理论假说,其中最经典且适用于粉磨破碎的便是 Bond 裂纹假说^[24],这也是在球磨破碎仿真中使用最广泛的一种破碎模型,与实际粉磨过程较吻合,其表达式为

$$E = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{X_2}} - \frac{1}{\sqrt{X_1}} \right) \quad (1)$$

式中 C_B ——功指数,表示球磨机的粉碎性能, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$
 X_1, X_2 ——破碎前、后的物料平均粒径, μm

在 Bond 假说中 E 代表的是对于某一给定的物料,在标准情况下用试验测定后运用经验公式进行修正的能耗,它的物理意义是在使用给定磨筒直径的球磨机内,物料被粉碎到 80% 小于 $100 \mu\text{m}$ 的出料粒度时所需要的比能耗。Charlesr 在 1975 年提出了一个总结以往的 Rittinger 表面积假说、Kick 体积假说与 Bond 裂纹扩展假说的新公式^[25],为粉碎过程中粒径与功耗的通式

$$dE = \int_D^d -cx^{-n} dx \quad (2)$$

式中 dE ——物料的粒度减小量为 dx 时的粉碎能耗

D, d ——物料粉碎前、后的粒径

x ——颗粒粒度 c, n ——常数

基于 Bond 模型更适用于粉磨过程,因此本文在 EDEM 模拟中选择了 Bond 破碎模型。

图 6 所示为 EDEM 输出的仿真时间 1 s 内的破碎功率动态变化预测图,为一条波动曲线,求能耗平均值为 $2.13 \text{ kW} \cdot \text{h}$,除以粉碎的秸秆的总质量 1440 g ,得到了球磨机功耗为 $1.48 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 。

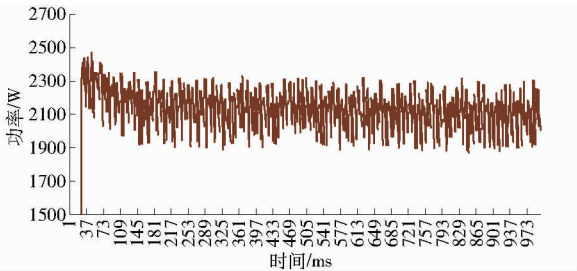


图 6 破碎功率动态变化预测图

Fig. 6 Prediction of dynamic change of crushing power

3 模型有效性验证

为了验证根据实验室规模的 CJM-SY-B 型振动球磨机所做的放大仿真模型是否可以有效预测其放大后的能耗,于秦皇岛太极环有限公司进行测试,测试条件保持一致,监测规模放大球磨过程中的能耗。此外球磨规模放大后的一个必要要求就是放大前后玉米秸秆物料的酶解效果不变,因此,按照仿真模拟的球磨条件进行放大球磨,并将放大后球磨完成的玉米秸秆物料寄回后,对样品进行了粒径的测量以及酶解效果的验证。

3.1 球磨机能耗的监测与计算

球磨机能耗的测量参考纪冠亚^[26]的研究,运用功率变送器将球磨机电路中的电流和电压信号转化

为功率。所采用的功率变送器为 YW33 型三相有功功率变送器(上海亚都有限公司),功率变送器能将球磨过程中每秒的电压和电流转化为实时功率,通过记录的功率除以球磨时间的积分计算球磨能耗,公式为

$$E_{BM} = \frac{\int_0^t P_i dt}{m} \quad (3)$$

式中 E_{BM} ——粉碎玉米秸秆颗粒所消耗的能量, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$

P_i ——球磨机在 t 时刻的功率, kW

m ——玉米秸秆的质量, kg

图 7 所示为功率记录仪导出的 CJM-SC-B2 型球磨机连续球磨玉米秸秆 1 h 内的功率数据,用数据分析软件 Origin 对其进行时间的积分后,最终计算得到其球磨粒度为 40 目的秸秆 1 h 能耗为 $1.65 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$,与仿真得到的破碎能耗结果相对误差为 10.3%。

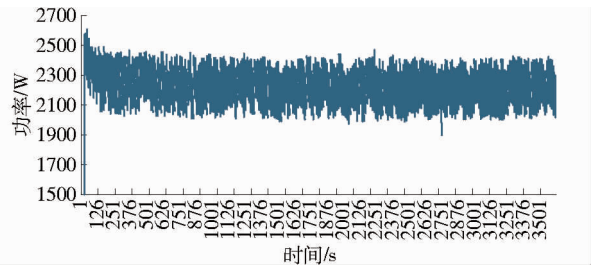


图 7 CJM-SC-B2 型球磨机功率记录仪输出

Fig. 7 Output of CJM-SC-B2 ball mill power recorder

3.2 球磨后玉米秸秆粉末粒径测量

根据 KIM 等^[27]的研究可知,秸秆颗粒粉末粒径与其结晶度和酶解后的葡萄糖产量显著相关,因此要判定放大后的秸秆是否与实验室规模的球磨机球磨后的秸秆具有相同酶解效果,粒径的测量是必不可少的。

采用 MASTERSIZER 3000 型激光粒度仪 (Malvern Panalytical 公司,英国)对预处理前后的秸秆样品进行粒径测量,取 0.2 g 预处理前后的秸秆并加入 40 mL 的水,稀释后添加至样品分散池中,以水为分散剂进行测量。以中值粒径 D_{50} 作为平均粒径,粒径跨度 (Relative span) 通常是评估颗粒均匀程度的指标,每个样品测试 1 组,每组 5 个平行值,公式为

$$R_s = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (4)$$

式中 D_{90} ——累计分布 90% 的粒径

D_{10} ——累计分布 10% 的粒径

对放大前后的球磨样品进行粒径分析,表 4 和图 8 所示为测试结果,从图表中可以看出放大前后粒径的尺寸相差不大,粒径跨度之间的偏差仅有 0.8%。

表 4 放大前后球磨样品粒径对比

Tab.4 Particle size comparison of ball milling samples before and after magnification

项目	粒径尺寸/ μm			粒径 跨度/%
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	
CJM-SY-B 型球磨机	7.71 ± 0.04	28.53 ± 0.21	82.97 ± 1.45	2.83
CJM-SC-B2 型球磨机	9.64 ± 0.01	30.13 ± 0.37	92.8 ± 1.44	3.63

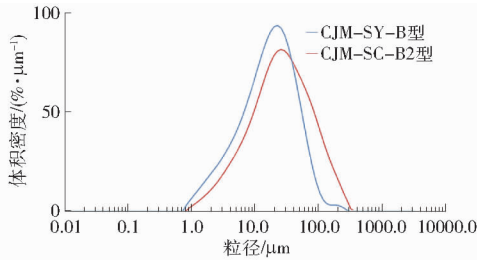


图 8 球磨玉米秸秆粒径分布图

Fig. 8 Grainsize distribution of corn stalk in ball milling

3.3 球磨后玉米秸秆粉末酶解试验

因为通过放大仿真球磨破碎的最终目的是将高效预处理方式的玉米秸秆高固体酶解产糖工艺进行放大,而放大后不能忽视的一个重要条件就是酶解效果不能降低。酶解效果验证对比了实验室规模和中试规模球磨条件下仅球磨与先球磨后碱处理两种预处理方式的玉米秸秆高固体酶解。

对照组:实验室规模和中试规模 BM60 样品;试验组:将 BM60 样品进行碱处理,称取 60 g BM60 样品置于 1 000 mL 的蓝盖瓶中,分别加入配制好的不同浓度 NaOH 溶液,NaOH 的添加量为 0.1、0.3、0.5 g/g。秸秆干物质与 NaOH 溶液的体积比例为 1:10,然后放入 80℃ 的水浴锅中处理 2 h。待其反应 2 h 后迅速拿出置于冷水池中冷却,避免进一步反应,充分冷却后的浆体过 800 目滤网,并进行多次水洗,待滤液澄清后(此时的 pH 值为 8.5~9.5)加入适量 10% 的稀盐酸调至中性。将中性浆体离心,固体部分置于冷冻干燥机中干燥 48 h,干燥后的样品标记为 BM-NaOH_y,y 表示 NaOH 添加量,样品放入自封袋中常温下于干燥器中保存。

选用纤维素酶 Cellic Ctec3 对预处理后的 BM-NaOH_y 样品及 BM60 样品进行酶解,酶加载量为 20 FPU/g,固体加载量为 20%,酶解体系中包含 pH 值为 4.8 的柠檬酸钠缓冲液和 0.04 g/L 的四环素盐酸,置于 50℃、200 r/min 的恒温摇床中,酶解

72 h。每个样品设置两组平行。

图 9 所示为球磨放大前后的球磨预处理和先球磨后碱处理的玉米秸秆高固体酶解的糖质量浓度对比,从图中可以看出球磨规模放大前后的玉米秸秆在仅球磨条件下高固体酶解产生的总单糖质量浓度分别为 85.5 g/L 和 88.5 g/L;经过先球磨后碱处理的预处理之后高固体酶解产生的葡萄糖和木糖质量浓度差异并不显著,当 NaOH 添加量为 0.5 g/g 时,两者的高固体酶解产糖质量浓度最高,分别为 177.6 g/L 和 172.4 g/L,当 NaOH 添加量为 0.3 g/g 时,糖质量浓度分别为 172.3 g/L 和 176.8 g/L。因此球磨放大到中试规模时的玉米秸秆在经过与实验室规模相同的预处理后,其高固体酶解产糖量与实验室规模的相比没有明显改变,即放大后的秸秆样品可以保持与实验室规模的秸秆样品相同的酶解效果。

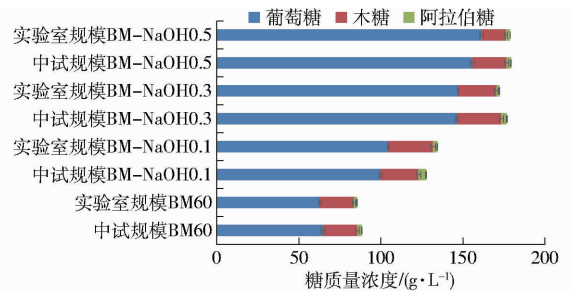


图 9 放大前后不同预处理玉米秸秆高固体酶解糖浓度对比

Fig. 9 Comparison of high solid enzymolysis sugar concentration of different pretreatment corn stalks before and after magnification

4 结论

(1)将实验室规模的振动式球磨机的磨筒容积放大 24 倍后建立机械模型,并对放大后的球磨机破碎玉米秸秆进行离散元仿真,通过分析磨筒内的介质运动规律以及碰撞能量的分布来预测放大后球磨机的破碎功率,结果表明仿真预测能耗为 1.48 kW·h/kg,实际能耗为 1.65 kW·h/kg,预测相对误差为 10.3%。

(2)粒径分析和高固体酶解试验结果表明,放大后的玉米秸秆能够达到与实验室规模相同的酶解效果,粒径跨度仅相差 0.8%,两种规模下的球磨预处理和先球磨后碱处理的玉米秸秆在高固体酶解后的糖浓度没有明显的差别。证明 DEM 法模拟玉米秸秆球磨预处理规模放大仿真可行的。

参 考 文 献

- [1] NIE J M, ZHANG R J, LIU X Y, et al. Technologies for lignocellulose pretreatment to produce fuel ethanol [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 237(4): 42034.

- [2] 丛宏斌, 姚宗路, 赵立欣, 等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 132-140.
CONG Hongbin, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 132-140. (in Chinese)
- [3] 王艳婷. 植物细胞壁果胶结构特性与木质纤维素高效酶解产糖分子机理的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
WANG Yanting. Characterization of pectin features that distinctively affect lignocellulose enzymatic saccharification in plants [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [4] LU M S, LI J B, HAN L J, et al. High-solids enzymatic hydrolysis of ball-milled corn stover with reduced slurry viscosity and improved sugar yields[J]. Biotechnology for Biofuels, 2020, 13(1): 45-50.
- [5] CHEN B L, XU G Z, CHANG C, et al. Efficient one-pot production of biofuel 5-ethoxymethylfurfural from corn stover: optimization and kinetics[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(5): 4310-4321.
- [6] LUO L, VANDERVOET E, HUPPES G. An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock—corn stover[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8): 2003-2011.
- [7] LEE K. Analysis of grinding kinetics in a laboratory ball mill using population-balance-model and discrete-element-method[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(11): 2517-2526.
- [8] YUTARO T, XIAO Y Y, YUKI T, et al. Mechanochemical degradation treatment of TBBPA: a kinetic approach for predicting the degradation rate constant[J]. Advanced Power Technology, 2022, 33(3): 103469.
- [9] BIAN X L, WANG G Q, WANG H G, et al. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: experimental study and DEM simulation[J]. Minerals Engineering, 2017, 105: 22-35.
- [10] 李腾飞, 林蜀勇, 张博, 等. 不同转速率下球磨机内钢球的碰撞研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 251-256.
LI Tengfei, LIN Shuyong, ZHANG Bo, et al. Study on collisions of steel balls in grinding mill at different rotation speeds[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 251-256. (in Chinese)
- [11] MIO H, KANO J, SAITO F. Scale-up method of planetary ball mill[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(24): 5909-5916.
- [12] IWASAKI T, YAMANOUCI H. Ball-impact energy analysis of wet tumbling mill using a modified discrete element method considering the velocity dependence of friction coefficient[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2020, 163: 241-247.
- [13] 林哲生, 陈彩玲, 周玉梅, 等. 基于离散元三七干式球磨超微粉碎的仿真[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2016, 29(2): 36-41.
LIN Zhesheng, CHEN Cailing, ZHOU Yumei, et al. Simulation on ball milling dry superfine pulverization for panax pseudoginseng powder based on discrete element[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2016, 29(2): 36-41. (in Chinese)
- [14] CLEARY P W. Charge behaviour and power consumption in ball mills: sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 63(2): 79-114.
- [15] ZHANG T, ZHAO M, LIU F, et al. A discrete element method model of corn stalk and its mechanical characteristic parameters[J]. Bioresources, 2020, 15(4): 9337-9350.
- [16] REN B, ZHONG W Q, CHEN Y, et al. CFD-DEM simulation of spouting of corn-shaped particles[J]. Particuology, 2012, 10(5): 562-572.
- [17] 孙月铤. 基于离散元方法的玉米秸秆粉料压缩成型机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
SUN Yuezh. Research on briquetting mechanism of extruding corn stalk powder based on discrete element method [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [18] 韩伟, 王绍宗, 张倩, 等. 基于JKR接触模型的微米级颗粒离散元参数标定[J]. 中国粉体技术, 2021, 27(6): 60-69.
HAN Wei, WANG Shaozong, ZHANG Qian, et al. Discrete element parameter calibration of micron sized powder particles based on JKR contact model[J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(6): 60-69. (in Chinese)
- [19] ZHENG M, LI Y, XU L. Discrete-element method simulation of agricultural particles' motion in variable-amplitude screen box [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 92-99.
- [20] TIJSKENS E, RAMON H, BAERDEMAEKER J D. Discrete element modelling for process simulation in agriculture [J]. Journal of Sound & Vibration, 2003, 266(3): 493-514.
- [21] 王伟伟, 蔡丹艳, 谢进杰, 等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 127-134.
WANG Weiwei, CAI Danyan, XIE Jinjie, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 127-134. (in Chinese)
- [22] COETAEE C. Calibration of the discrete element method: strategies for spherical and non-spherical particles [J]. Powder Technology, 2020, 364: 851-878.

- [23] 张娜, 曾琴, 杨小兰, 等. 振动磨机磨介球的离散元法仿真与比较分析[J]. 南京工程学院学报: 自然科学版, 2017, 15(1): 23 - 28.
ZHANG Na, ZENG Qin, YANG Xiaolan, et al. Discrete element simulation and comparative analysis of grinding medium in a vibration mill[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2017, 15(1): 23 - 28. (in Chinese)
- [24] BOND F C. Confirmation of the third theory[M]. Sem. A., 1960: 13 - 153.
- [25] 郭杰. 自循环超细粉碎机理论及试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.
GUO Jie. A study of theory and experiment on auto inner cycling fine crusher[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
- [26] 纪冠亚. 不同尺度机械粉碎对秸秆物性及酶解效率的影响和机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
JI Guanya. Multi-scales mechanical fragmentation of crop residues: impacts on properties and enzymatic hydrolysis and related mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [27] KIM S M, DIEN B S, SINGH V. Promise of combined hydrothermal/chemical and mechanical refining for pretreatment of woody and herbaceous biomass[J]. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 2016, 9: 97.
-

(上接第 357 页)

- [22] CHAMARA N, BAI G, GE Y. AICropCAM: deploying classification, segmentation, detection, and counting deep-learning models for crop monitoring on the edge[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108420.
- [23] LI D, DONG C, LI B, et al. Hybrid rice row detection at the pollination stage based on vanishing point and line-scanning method[J]. Precision Agriculture, 2023, 24(3): 921 - 947.
- [24] 江庆, 安东, 韩华宇, 等. 基于激光雷达与 RGB 相机融合的玉米作物行检测算法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 263 - 274.
JIANG Qing, AN Dong, HAN Huayu, et al. Maize crop row detection algorithm based on fusion of LiDAR and RGB camera [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 263 - 274. (in Chinese)
- [25] 潘宇镭, 吴雨铎, 李成龙, 等. 杂交水稻制种父本倒播差插秧视觉导航线实时提取方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 41 - 50.
PAN Yulei, WU Yuhua, LI Chenglong, et al. Real-time guideline extraction method for male parent transplanting in hybrid rice seed production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 41 - 50. (in Chinese)