

# 玉米秸秆粉料单模孔致密成型过程离散元模拟

李永奎, 孙月铄, 白雪卫<sup>※</sup>

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

**摘 要:** 为模拟粉碎后的玉米秸秆在单向受压状态下的力学行为, 参照实际单模孔致密成型实验, 建立了基于软球模型的秸秆粉料颗粒体系三维离散元模型, 其约束边界条件与成型实验几何边界形态及尺寸一致。进行模拟分析时, 颗粒接触模型的力学特性参数, 如颗粒间法向刚度系数  $k_n$ , 切向刚度系数  $k_s$  及摩擦系数  $\mu$ , 利用离散元模拟程序调试得出参数取值范围。将模拟得到的结果与实验测试数据进行比对与假设检验验证, 结果显示数据一致性较好。得出离散元模拟时颗粒间力学特性参数最佳取值范围, 分别为法向刚度系数  $(1.2 \sim 1.8) \times 10^4$  N/m, 切向刚度系数  $(0.8 \sim 1.3) \times 10^4$  N/m, 摩擦系数  $0.10 \sim 0.12$ 。通过分析不同压缩位移、不同孔径以及不同锥角下的压缩与应力松弛曲线, 建议成型模具孔径  $\Phi d=8$  mm, 锥角  $\theta=45^\circ$ , 且应尽量增大压缩位移以防止秸秆成型块发生松散。离散单元法为研究玉米秸秆粉料致密过程力学行为提供了一种有效的分析手段。

**关键词:** 作物; 离散单元法; 模型; 玉米秸秆粉料; 压缩成型; 软球模型; 成型模具

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.030

中图分类号: S216.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-20-0212-06

李永奎, 孙月铄, 白雪卫. 玉米秸秆粉料单模孔致密成型过程离散元模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 212—217.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.030 http://www.tcsae.org

Li Yongkui, Sun Yuezhu, Bai Xuewei. Extrusion process of corn stalk powder in single orifice die processing based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 212—217. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.030 http://www.tcsae.org

## 0 引言

我国玉米秸秆资源丰富, 在对其利用过程中, 为节省存储空间及降低运输费用, 通常需对其进行致密压缩处理。玉米秸秆粉料等生物质物料与金属等工业材料不同, 其力学行为存在着非线性、各向异性<sup>[1]</sup>, 其在致密成型前粉粒呈离散状态, 很难采用现有的基于连续体的分析方法进行研究。而且玉米秸秆粉料成型力学特性还与成型模具几何参数等有关, 如成型模具的孔径、长径比、锥角等尺寸参数都会对秸秆粉料的挤压过程产生影响。在对这些因素进行分析时, 由于成本和时间的限制, 不可能生产出大批成型模具来进行试验, 因此有必要通过计算机模拟手段来对玉米秸秆粉料的致密成型过程进行研究。

Cundall 在 1971 年提出了基于牛顿力学的离散单元法 (discrete element method, DEM), 可以实现颗粒物料的细观力学特性的数值模拟<sup>[2-4]</sup>, 弥补了连续固体力学方法在处理离散颗粒方面的缺陷。该方法在岩石工程、土力学, 散体物料的筛分, 颗粒物料的卸料、成拱等方面应用较多<sup>[5-12]</sup>。玉米秸秆粉料等生物质能源在压制成型过程中颗粒体系逐渐由松散转变至固化粘结, 因而该成型

过程可以利用离散单元法进行模拟。本文采用基于软球接触模型的离散单元法, 来建立玉米秸秆粉料的致密成型过程的离散元分析模型。

## 1 成型装置基本参数

为使物料易于填入成型腔内, 成型模具的入料口直径大于模孔直径<sup>[13]</sup>, 间接导致成型模具入料口锥角的存在; 当成型模具的锥角  $\theta=60^\circ$  时, 应力较为集中的模孔锥面所受应力较小<sup>[14]</sup>。在建立玉米秸秆粉料的离散元分析模型时, 初步选用带  $60^\circ$  锥角的成型模具来进行建模, 成型腔直径  $\Phi d=8$  mm, 成型腔长径比经过研究文献<sup>[15-16]</sup>选为 5:1, 即成型腔长度为 40 mm。

玉米秸秆经粉碎处理后, 经由锥度为  $60^\circ$  的锥面被压杆挤压进入成型腔内。成型腔底部由顶杆来封闭, 实验时成型腔内温度达到  $80^\circ\text{C}$  以上, 玉米秸秆粉料中的木质素和纤维素在高温下发生软化, 在压杆挤压力及温度作用下, 松散的秸秆粉料在成型腔内固化黏结成致密成型块。

经实验确定, 玉米秸秆粉料致密成型过程的压缩力数量级为  $10^3$ , 因此在离散元模拟秸秆粉料成型过程中, 在设定好颗粒体系约束边界条件以及各项初始物料参数之后, 首先要调试程序, 使模拟得到的压缩力的大小在几千牛。之后逐渐调试程序中的关键力学特性参数, 使模拟结果更为精确。

## 2 离散元软球模型与模型创建

### 2.1 离散元软球模型

基于球形颗粒接触理论的计算过程较为繁琐, 在不

收稿日期: 2015-07-15 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51405311)

作者简介: 李永奎, 男, 辽宁营口人, 博士, 教授, 主要从事计算机辅助分析与设计方面研究。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110866。

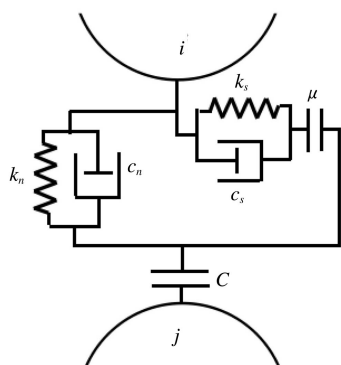
Email: sauyklee@163.com

※通信作者: 白雪卫, 男, 内蒙古通辽人, 博士, 讲师, 主要从事生物质物料特性及加工技术方面研究。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110866。

Email: baixueweicn@163.com

产生显著误差的条件下,有必要对其进行简化处理,常用的简化模型有软球模型和硬球模型。其中,硬球模型忽略了颗粒的表面变形和颗粒接触力大小,主要应用于稀疏颗粒间的快速碰撞运动时的数值模拟。而软球模型由 Cundall 和 Strack 于 1979 年首次提出,其计算过程不考虑颗粒表面变形,依据颗粒间的法向重叠量和切向位移来计算接触力的大小,并不断更新每个颗粒的速度和位置,计算强度较小,适用于工程问题的数值计算。随着 30 年来的不断改进,软球模型已成为提取颗粒体系内部力学信息的有效工具<sup>[17]</sup>。

玉米秸秆粉料力学本构模型具有黏弹特性,其颗粒间接触适宜选用软球模型描述。如图 1 所示,该模型把颗粒间法向力简化为弹簧( $k_n$ )、阻尼器( $c_n$ ),切向力简化为弹簧( $k_s$ )、阻尼器( $c_s$ )和滑动摩擦器( $\mu$ ),耦合器用来确定发生接触的颗粒( $i, j$ )之间的配对关系。在建立玉米秸秆粉料的离散元模拟模型时,秸秆粉料颗粒需要人为给定并调试颗粒间的法向、切向刚度系数和法向、切向阻尼系数以及颗粒间的摩擦系数等颗粒力学特性参数<sup>[18]</sup>,来确定参数取值的初始范围。



注:  $i$  和  $j$  是相接触的两个颗粒。 $k_n$ 、 $k_s$  是法向和切向刚度系数,单位是 N/m,表示单位长度内受力大小。 $c_n$  和  $c_s$  是法向和切向阻尼系数, $\mu$  是颗粒间的摩擦系数。 $C$  是法向与切向接触的耦合,即配对关系。

Note:  $k_n$  and  $k_s$  are normal and shear stiffness between two particles, representing the force of per unit length(N/m).  $c_n$  and  $c_s$  are the normal and shear damping.  $C$  is the coupling relation.

图 1 软球接触模型

Fig.1 Soft-sphere contact model

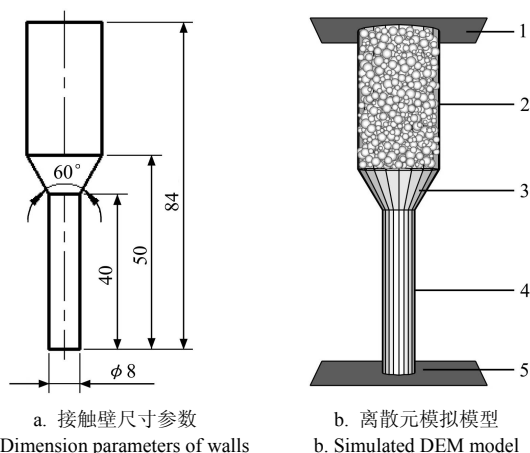
## 2.2 离散元模拟模型创建

### 2.2.1 离散元模拟几何模型创建

对玉米秸秆粉料的致密成型过程进行离散元模拟,首先需要将单模孔成型模具与秸秆粉料的直接作用面进行建模。创建的每个壁面一侧为有效作用侧面,其与颗粒体系直接接触,对模拟颗粒的运动有限制作用,两者之间存在力学相互作用;另一侧则对颗粒没有任何力学相互作用且不能限制颗粒的运动。所以在建模过程中,必须尤其注意所建立的壁面是否能够有效起到限制模拟颗粒生成范围及运动的作用。

图 2a 为成型过程中与秸秆粉料接触的模具壁面的尺寸参数。图 2b 为根据图 2a 中的壁面的尺寸参数所创建的离散元模拟模型。其中,平面 1 为加载面,有效作用面为下侧面,在模拟过程中以给定速度匀速下压;圆柱面 2 对应初始喂入物料的填料斗,其内侧面为有效作用侧面,

将会在圆柱面 2 所限制的范围内生成玉米秸秆粉料的模拟颗粒;圆锥面 3 是喂料锥面,模拟颗粒从锥面开始慢慢被压缩至成型腔;成型腔为圆柱面 4,其有效作用侧为回转面内侧面;平面 5 为顶杆端面模拟面,其有效作用侧面为上侧面,相当于实验时的顶杆。



a. 接触壁尺寸参数  
a. Dimension parameters of walls  
b. 离散元模拟模型  
b. Simulated DEM model  
1. 加载面 2. 填料斗 3. 喂料锥面 4. 成型腔 5. 顶杆端面  
1. Plane of loading 2. Hopper 3. Stuffing cone 4. Mold cavity 5. End face of mandril

图 2 接触壁尺寸参数及离散元模拟模型

Fig.2 Dimension parameters of walls and simulated model

### 2.2.2 接触壁及接触颗粒参数设置

玉米秸秆粉料压缩成型过程的离散元模型创建过程中,参照实际物理实验给定离散元模拟参数并调试离散元程序,接触壁的刚度系数及其与生成颗粒间的摩擦系数以及模拟颗粒的初始参数设置如表 1 所示。其中壁面与模拟颗粒之间的摩擦系数与玉米秸秆粉料的密度参考文献<sup>[19]</sup>得出,玉米秸秆粉料与金属的摩擦系数为 0.45~0.55,秸秆粉料的自然堆积密度为 37.43~140 kg/m<sup>3</sup>,经离散元模拟分析后选择摩擦系数的值为 0.5,秸秆粉料的初始喂入密度为 80 kg/m<sup>3</sup>。

实际致密成型实验时玉米秸秆粉料的粒径范围经测定在 0.2~1.6 mm。但是在用离散单元法模拟颗粒时,颗粒的大小与数量均会对离散元模型的计算精度与计算量产生影响,颗粒粒径太大会使模拟时的压缩力波动较大,而粒径过小则生成的颗粒数量会较多,平衡所需时间太长且会造成计算量过大<sup>[20]</sup>。通过反复计算,选取球形颗粒来模拟玉米秸秆粉料,颗粒粒径范围为 0.4~1.0 mm,认为在这个范围内颗粒粒径随机均匀分布,同时选取模拟颗粒放大系数为 1.1。

离散元分析模型中模拟秸秆粉料的初始颗粒体系的形态与实际秸秆粉料的形态存在一定差异,为了减小颗粒形状带来的误差,一方面尽量减小模拟颗粒粒径,另一方面在颗粒间的所有真实接触以及两颗粒之间间距小于平均半径的 10<sup>-6</sup> 的虚拟接触上,设置接触粘结,其法向、切向的接触粘结力如表 1 所示。经计算,模拟模型的计算精度与速度均可以接受,且模拟得到的压缩与应力松弛曲线比较符合实际物理实验测得的应力松弛曲线的趋势。

表 1 离散元模型初始参数设置  
Table 1 Initial parameter settings in DEM model

接触壁属性参数 Parameters of contact wall					颗粒属性参数 Parameters of particles				
法向刚度系数 Normal stiffness/ (N·m <sup>-1</sup> )	切向刚度系数 Shear stiffness/ (N·m <sup>-1</sup> )	摩擦系数 Friction coefficient	初始密度 Initial density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	初始孔隙比 Initial porosity	粒径范围 Particle size/mm	颗粒放 大系数 Multiply	局部阻尼系数 Local damping	法向接触 粘结力 N-bond/N	切向接触 粘结力 S-bond/N
1×10 <sup>8</sup>	1×10 <sup>8</sup>	0.5	80	0.6	0.4~1.0	1.1	0.5	5×10 <sup>4</sup>	5×10 <sup>4</sup>

2.2.3 模拟模型初始条件设置

图 2b 所建立的该离散元模拟模型中, 根据成型腔的体积、颗粒粒径范围以及初始孔隙比, 通过粒径随机均匀分布生成的颗粒充满成型腔内, 相当于物理实验中喂料完成进入待压缩的初始状态, 当加载面开始向下移动后, 型腔内物料开始被压缩。

参照实际物理实验, 设置重力加速度为沿 z 轴方向向下, 取 9.81 m/s<sup>2</sup>; 设置壁面 1 以每步长 1.0×10<sup>-5</sup> m 的移动速度沿 z 轴向下进行加载 3 400 个时间步, 之后处于静止状态 5 000 个时间步, 每个时间步对应时间为 0.01 s。模拟开始后, 壁面 1 下移 34 mm, 即加载阶段, 物料颗粒进入成型腔被慢慢压缩成型。每隔 10 步记录一次压缩力等数据。

3 结果与分析

3.1 确定颗粒力学特性参数取值范围

离散单元方法模拟过程中需要人为给定一些现有实验不易测量的颗粒内部力学特性参数, 如颗粒间法向刚度系数  $k_n$ , 切向刚度系数  $k_s$  以及摩擦系数  $\mu$ 。为了使模拟结果接近实际成型实验, 建立离散元初始模型后, 参照成型实验结果进行了多次调试, 初步确定颗粒力学特性参数的取值范围, 如表 2 所示。在表 2 的取值范围内任意选定参数值, 都会得出和实验时所测得的压缩与应力松弛曲线趋势相似的结果。根据表 2 的特性参数取值范围, 利用随机函数生成 3 组力学特性参数值如表 3 所示。

表 2 离散元模拟颗粒力学特性参数取值范围

Table 2 Numerical range of particle's mechanical parameters

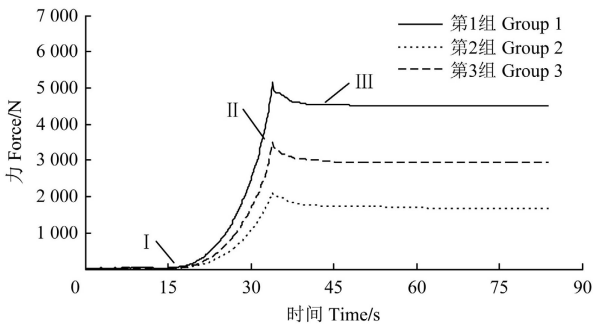
颗粒力学特性参数 Particle mechanical parameters	法向刚度系数 Normal stiffness/ (10 <sup>4</sup> N·m <sup>-1</sup> )	切向刚度系数 Shear stiffness/ (10 <sup>4</sup> N·m <sup>-1</sup> )	摩擦系数 $\mu$ Friction coefficient
参数取值范围 Numerical range	0~10	0~10	0.1~0.2

表 3 离散元模拟颗粒力学特性参数值

Table 3 Mechanical characteristic parameters of particles

组别 Group	法向刚度系数 Normal stiffness/ (10 <sup>4</sup> N·m <sup>-1</sup> )	切向刚度系数 Shear stiffness/ (10 <sup>4</sup> N·m <sup>-1</sup> )	摩擦系数 Friction coefficient
1	5.05	2.32	0.1349
2	2.28	0.84	0.1120
3	3.53	1.35	0.1194

利用表 3 中的颗粒特性参数值模拟得到的图 2b 中的颗粒体系, 该颗粒体系在受压时的压缩与应力松弛曲线如图 3 所示。该曲线与实际致密成型实验所测得的压缩与应力松弛曲线趋势相一致, 而且压缩力的数值在同一个数量级内。



注: I 为压缩加载的初始阶段; II 为加载阶段后期, 压缩力急剧增大; III 为应力松弛阶段, 压缩力缓慢减小至趋于平衡。

Note: I is the initial stage of comprehensive process, II is the later stage, and the compressive force is growing rapidly in this stage, III is the stage of stress relaxation, the compressive force is decreasing slowly and becoming flat in this stage.

图 3 离散元模拟的物料压缩与应力松弛曲线

Fig.3 Force-time curve of material simulated by DEM

图 3 中标示为 I 段的曲线段为对颗粒物料刚刚加载开始时, 压缩力缓慢增长的阶段; II 段为加载阶段后期, 压缩力出现突然急剧增大变化的阶段; III 段为应力松弛开始后压缩力缓慢减小的松弛阶段。

3.2 实验验证与讨论

利用图 4 所示的单模孔致密成型模具来进行验证实验。在该成型模具中, 基本尺寸参数均与离散元模拟模型的几何尺寸约束条件相一致, 其中锥角 60°, 孔径  $\Phi d=8$  mm, 成型腔长度 40 mm。以粉碎处理后含水率为 18% 的玉米秸秆粉料为原材料, 在实验进行前将粉料填充于填料斗。压杆位于填料斗之上, 由微机控制式万能材料试验机 (WDW-200, 山东济南试金集团有限公司) 夹头夹持, 通过试验机自带测力系统实时显示并存储粉料挤压力数据, 压缩力及变形数据采样率为 50 S/s。

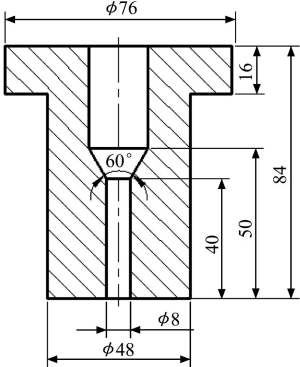


图 4 成型实验用成型模具简图

Fig.4 Sketch of single orifice die in contrast tests

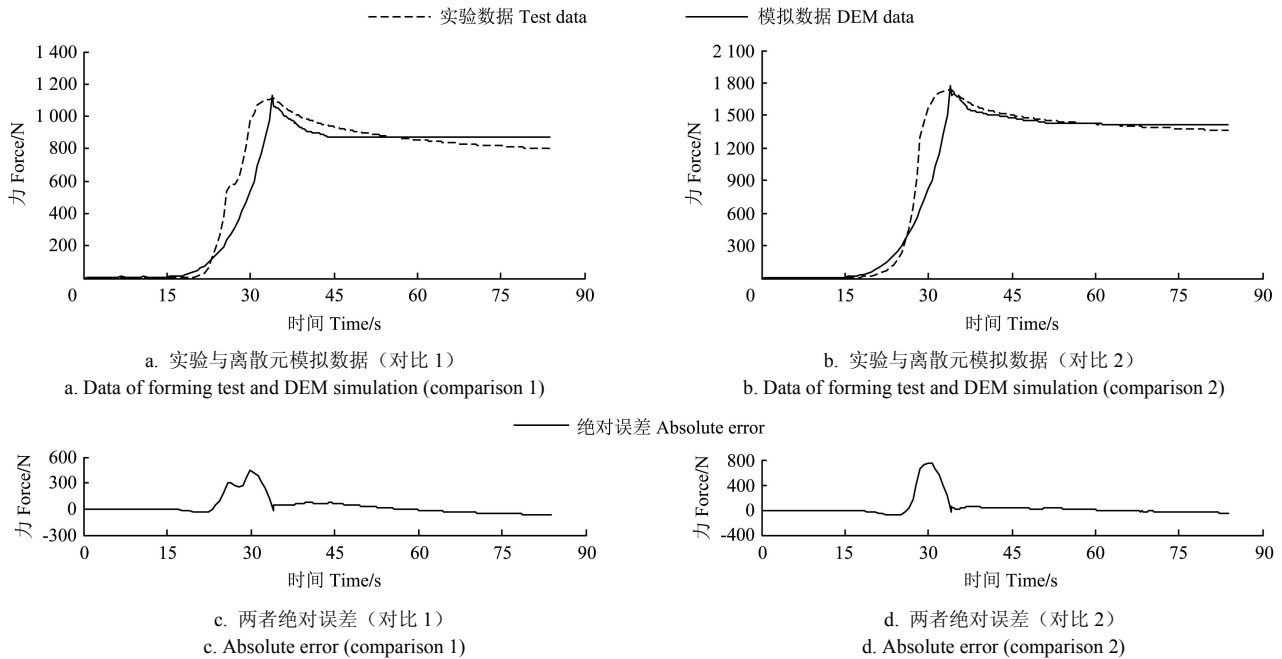
进行玉米秸秆粉料应力松弛实验, 将实验测得的压缩与应力松弛数据与离散单元法模拟得到的数据进行比

对与相对误差计算来验证所建立的离散元模型的有效性,进而确定模拟颗粒力学特性参数最佳取值范围。图 5 为实验数据与离散元模拟数据的比对图。图 5a 和图 5b 中实线由离散元模拟数据绘制生成,虚线由实际应力松弛实验测试数据生成,图 5c 和图 5d 则为实际测试数据与离散元模拟数据的绝对误差值绘制生成。

由比对结果可以得出,在离散元模拟时设定的玉米秸秆粉料颗粒力学特性参数最佳取值范围,分别是颗粒间法向刚度系数  $k_n=(1.2\sim 1.8)\times 10^4$  N/m,切向刚度系数  $k_s=(0.8\sim 1.3)\times 10^4$  N/m,摩擦系数  $\mu=0.10\sim 0.12$ 。颗粒力

学特性参数在这个范围取值,模拟结果与实验结果更吻合。

图 5 的比对结果显示,在玉米秸秆粉料致密成型过程的离散元方法模拟时,离散元模拟结果与实际压缩实验结果的绝对误差值在压缩过程的初始阶段接近于零,但是在压缩过程的后半段以及转化为应力松弛过程的过度阶段,该误差相对较大。当逐渐进入应力松弛阶段后,该误差显著减小,且松弛应力均不会减小到零而是会逐渐趋于稳定,即存在着平衡应力。离散元模拟结果在压缩过程的后半段及过渡阶段与实验误差较大,与模拟颗粒的形状和大小与实际玉米秸秆粉料有一定差异有关。



注: 离散元模拟时, a、c 中法向刚度系数  $k_n=1.23\times 10^4$  N/m, 切向刚度系数  $k_s=0.89\times 10^4$  N/m, 摩擦系数  $\mu=0.1004$ ; b、d 中法向刚度系数  $k_n=1.74\times 10^4$  N/m, 切向刚度系数  $k_s=1.22\times 10^4$  N/m, 摩擦系数  $\mu=0.1187$ 。其中, 绝对误差=实验数据-模拟数据。

Note: the normal stiffness is  $1.23\times 10^4$  N/m, shear stiffness is  $0.89\times 10^4$  N/m and frictional coefficient is 0.1004 in figure a and c, and the normal stiffness is  $1.74\times 10^4$  N/m, shear stiffness is  $1.22\times 10^4$  N/m and frictional coefficient is 0.1187 in figure b and d. Absolute error is the test data minus the simulated data.

图 5 离散单元法模拟与实验测试数据对比

Fig.5 Comparison of DEM simulation with test value

在显著性水平  $\alpha=0.05$  下, 假设  $H_0$  为离散元模拟和实验测得的数据方差相等,  $H_1$  为方差不相等。经假设检验, 得到在  $\alpha=0.05$  下接受  $H_0$ , 认为 a 组和 b 组的实验数据与离散元模拟数据均无显著性差异。所以认为该离散元模拟模型可以用来模拟物料致密成型过程的力学行为。

### 3.3 离散元模拟成型过程的应用与讨论

图 6 是离散元模拟得到的不同压缩位移、不同孔径、不同锥角下的压缩与应力松弛曲线。以此来分析各项因素对最大压缩力、应力松弛以及成型块品质的影响。

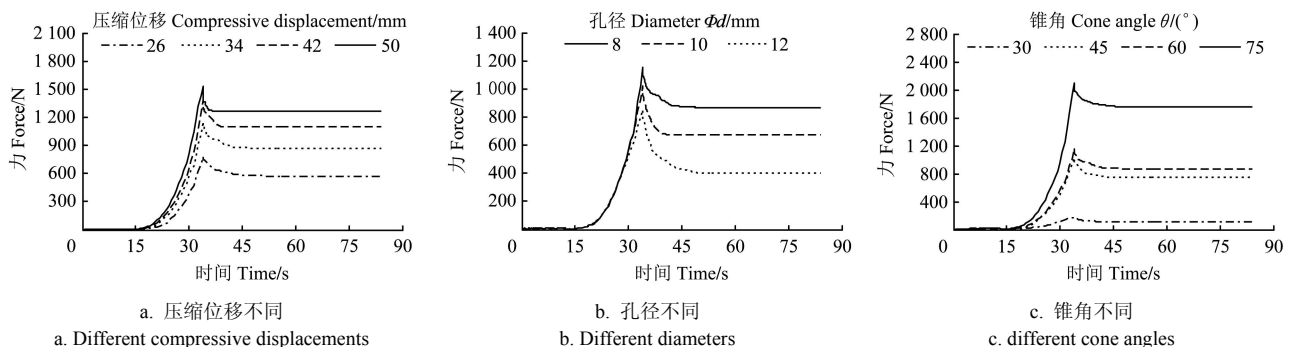


图 6 不同压缩位移、孔径和锥角下的压缩与应力松弛曲线

Fig.6 Compression stress relaxation at different compressive displacements, diameters and cone angles

图 6a 为模拟得到的不同压缩位移下的压缩与应力松弛曲线。结果显示在压缩位移增大时, 应力松弛过程达

到平衡应力的松弛时间缩短, 且平衡应力与最大压缩应力的比值减小, 发生松散的可能性越小。所以, 为了使

压制的成型块更加密实、品质更好,应该尽可能加大压缩位移。

图 6b 是成型腔孔径不同时的压缩与应力松弛曲线。其他条件均一致时,孔径对于最大压缩力的影响比较小,但是对松弛时间和松弛力的影响较大。孔径  $\Phi d=8\text{ mm}$  的曲线压缩应力最大且松弛时间最短,而随着孔径的增大,松弛过程的松弛时间增大。为使玉米秸秆粉料在压制成型后更不易松散变形,应该在满足要求的条件下选用孔径较小的模具来进行成型燃料的压制。

图 6c 是不同锥角  $\theta$  的离散元分析模型模拟得到的压缩与应力松弛曲线。该模拟结果显示,锥角  $\theta$  对于压缩力大小的影响是非常大的。在锥角为  $30^\circ$  时,压缩位移一致的情况下,压制的成型块非常容易松散;而在锥角为  $75^\circ$  时,由于锥角处开口较大,压缩时锥面受力明显增大,使锥面易于磨损。在  $\theta=45^\circ$  和  $\theta=60^\circ$  时,模拟结果非常相近,但是锥角的大小影响了环模模孔的数量,为了使环模上模孔增多,应该选用  $45^\circ$  锥角来制作模具。

## 4 结 论

1) 建立的基于软球模型的玉米秸秆粉料离散元模型模拟得到的压缩与应力松弛曲线变化趋势与物理实验相一致,该结果经假设检验后认为与实验数据在显著性水平  $\alpha=0.05$  下不存在显著性差异。

2) 得到离散元模拟秸秆粉料颗粒时的颗粒间力学特性参数最佳取值范围,分别为法向刚度系数  $k_n=(1.2\sim 1.8)\times 10^4\text{ N/m}$ ,切向刚度系数  $k_s=(0.8\sim 1.3)\times 10^4\text{ N/m}$ ,摩擦系数  $\mu=0.10\sim 0.12$ 。颗粒力学特性参数在这个范围取值时与实验结果吻合的较好。

3) 通过分析不同压缩位移、不同孔径以及不同锥角下的压缩与应力松弛曲线,建议选用孔径  $\Phi d=8\text{ mm}$ ,锥角  $\theta=45^\circ$  的模具,且应尽量增大压缩位移来防止成型块发生松散。

4) 确定基于软球模型的离散单元法可以用来模拟玉米秸秆粉料的致密成型过程,该方法为秸秆粉料等生物质成型过程的研究提供了一种新的分析手段。

## 【参 考 文 献】

[1] 孙启新,张仁俭,董玉平. 基于 ANSYS 的秸秆类生物质冷成型仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 130—134.  
Sun Qixin, Zhang Renjian, Dong Yuping. Simulation analysis of compressing molding under general condition for straw biomass based on ANSYS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 130—134. (in Chinese with English abstract)

[2] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]. Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. Nancy, France: [s.n.], 1971: 11—18.

[3] Cundall P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part I: a scheme to detect and represent contacts in system composed of many polyhedral blocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geo-mechanics Abstracts, 1988, 25(3): 107—

116.

[4] Cundall P A. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47—65.

[5] 鲁军,张楚汉,王光伦,等. 岩体动静力稳定分析的三维离散元数值模型[J]. 清华大学学报, 1996, 36(10): 98—104.  
Lu Jun, Zhang Chuhan, Wang Guanglun, et al. Three dimensional distinct element numerical model for static and dynamic analysis of rock bodies[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1996, 36(10): 98—104. (in Chinese with English abstract)

[6] Ting J M, Corkum B T, Kaufman C R, et al. Discrete numerical model for soil mechanics[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 115(3): 379—398.

[7] Thornton C, Barnes D J. Computer simulated deformation of compact granular assemblies[J]. Acta Mechanica, 1986, 64: 45—61.

[8] Kuhn M R, Mitchell J R. Modeling of soil creep with the discrete element method[J]. Engineering Computations, 1992, 9(2): 277—287.

[9] 焦红光,赵跃民. 用颗粒离散元法模拟筛分过程[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(2): 232—236.  
Jiao Hongguang, Zhao Yuemin. Screen simulation using a particle discrete element method[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(2): 232—236. (in Chinese with English abstract)

[10] 赵拉拉,刘初升,闫俊霞,等. 振动筛面颗粒流三维离散元法模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 414—418.  
Zhao Lala, Liu Chusheng, Yan Junxia, et al. Numerical simulation of particles flow on the vibrating screen plate using a 3D discrete element method[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(3): 414—418. (in Chinese with English abstract)

[11] 徐泳, Kafui K D, Thornton C. 用颗粒离散元法模拟料仓卸料过程[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 65—69.  
Xu Yong, Kafui K D, Thornton C. Silo Discharge Simulations With Different Particulate Properties by Using the Distinct Element Method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(3): 65—69. (in Chinese with English abstract)

[12] 周德义,马成林,左春桢,等. 散粒农业物料孔口出流成拱的离散单元仿真[J]. 农业工程学报, 1996, 12(2): 186—189.  
Zhou Deyi, Ma Chenglin, Zuo Chuncheng, et al. Discrete element simulation for arch flowing of agricultural particle material in outlet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1996, 12(2): 186—189. (in Chinese with English abstract)

[13] 施水娟. 环模制粒机挤压成型机理分析与结构参数优化[D]. 南京: 南京理工大学. 2010, 37—41.  
Shi Shuijuan. The extrusion mechanism analysis and optimization of structural parameters of ring die pelletizer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology. 2010, 37—41. (in Chinese with English abstract)

[14] 李震,薛冰,俞国胜. 环模模孔锥角及进料腔长度对模孔强度影响研究[J]. 饲料工业, 2014, 35(1): 23—27.  
Li Zhen, Xue Bing, Yu Guosheng. Study on the effect of ring die hole cone angle and feed chamber length on the die hole strength[J]. Feed Industry, 2014, 35(1): 23—27. (in Chinese

- with English abstract)
- [15] 何晓峰, 雷廷宙, 李在峰, 等. 生物质颗粒燃料冷成型技术试验研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 937—941.  
He Xiaofeng, Lei Tingzhou, Li Zaifeng, et al. Research of biomass fuel cold compression molding technic[J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2006, 27(9): 937—941. (in Chinese with English abstract)
- [16] 申树云, 董玉平. 生物质颗粒成型机的环模特性研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(1): 132—136.  
Shen Shuyun, Dong Yuping. The study on the loop die characteristics of biomass pelletizing[J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2010, 31(1): 132—136. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] 孙其诚, 王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展, 2008, 38(1): 87—100.
- Sun Qicheng, Wang Guangqian. Review on granular flow dynamics and its discrete element method[J]. Advances in Mechanics. 2008, 38(1): 87—100. (in Chinese with English abstract)
- [19] 霍丽丽, 孟海波, 田宜水, 等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 189—195.  
Huo Lili, Men Haibo, Tian Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 189—195. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈长冰, 梁醒培. 筒仓卸料过程的离散元模拟分析[J]. 粮油食品科技, 2008, 16(1): 11—13.  
Chen Changbing, Liang Xingpei. Analysis on discrete element simulation of discharging in silos[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2008, 16(1): 11—13. (in Chinese with English abstract)

## Extrusion process of corn stalk powder in single orifice die processing based on discrete element method

Li Yongkui, Sun Yuezhu, Bai Xuewei<sup>✉</sup>

(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** Mechanical behavior in the densification of biomass material is closely related to pellet quality. In order to explore the forming mechanism of typical biomass material from loose state to consolidation, the discrete element method (DEM) was introduced to investigate the movement and interaction of the milled corn stalk particles in the compacting process, and the verification experiments were carried out to test the effectiveness of the DEM simulation in this study. Firstly, the three-dimensional (3D) particle contact model of corn stalk powder based on the soft-sphere model of DEM was established, and the constraining walls in DEM model were completely consistent with the compressing cavity boundary conditions in geometric shape and dimension of experimental tests conducted in December, 2014; the loading speed in simulation was also set as the same value as the DEM model. Secondly, the diameter range of simulated particles was configured to 0.4-1.0 mm in accordance to the particle size distribution acquired through the screening experiment and calculation, and the generated particles were fully filled into the whole cavity at the original state before the compressing force was loaded. The mechanical parameters of the particles, such as normal stiffness, shear stiffness and friction coefficient between the 2 contact particles, were set to the values generated at random in specific range which was determined according to compacting experimental data. Thirdly, the comparison of compression stress relaxation data between tests and simulation was carried out and the validity of the simulation was verified by the hypothesis test. It was found that the force data with time from the hypothesis tests and DEM simulation followed the similar tendency, and the absolute error was not higher than 100 N in both initial loading stage and 20 seconds after stress relaxation. In the first 20 seconds of stress relaxation course, the values of absolute error were obviously higher than other time quantum. The consistency of the experimental and simulated data was fairly good on the whole, because there was little statistical significance between 2 group of data at 5% level in the significant difference analysis. The optimal numerical ranges of the mechanical parameters of the simulated particles in DEM model were also obtained. Namely, the normal stiffness was  $1.2 \times 10^4$ - $1.8 \times 10^4$  N/m, the shear stiffness was  $0.8 \times 10^4$ - $1.3 \times 10^4$  N/m and the friction coefficient was 0.10-0.12. Then, the compressive force was analyzed in DEM model at different compressive displacements, diameters and cone angles using the optimal mechanical parameters of particles. The result showed that the residual forces in stress relaxation were about 600 and 1 300 N respectively when the compressive displacements were set to 26 and 50 mm, which indicated that the compressive displacement had a great influence on pellet morphological stability while other parameters kept constant. When the diameter of single-hole die varied from 8 to 12 mm in DEM model, all the compression forces peaked near 1 100 N as compressing time went on, but the residual stress with 8 mm diameter was much higher than that with 12 mm, and in consideration of the consolidation degree, the recommended diameter was 8 mm compared with the mechanical behaviors of the diameter of 10 and 12 mm. The cone angle had a remarkable effect on the compression force, and the cone angle of  $45^\circ$  was suggested to get a reasonable balance between compression force and pellet density. The study indicates that the discrete element method provides an efficient and effective tool to address some engineering problems in biomass densification, and the soft-sphere model is appropriate to describe the mechanical behavior in the compression process of corn stalk powder.

**Key words:** crop; discrete element method; model; corn stalk powder; extrusion molding; soft-sphere model; forming die