

特种成形

## 香菇菌渣致密成型过程中颗粒黏结和断裂研究

李震<sup>1</sup>, 张冬会<sup>1</sup>, 张鑫宇<sup>1</sup>, 王少锋<sup>1</sup>, 许胜<sup>2</sup>

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 为研究香菇菌渣颗粒致密成型过程中的颗粒接触黏结和断裂特性, 进行了单轴压缩力学实验及声发射信号的检测, 同时使用离散元软件 PFC 进行模拟分析, 探究了香菇菌渣颗粒的接触黏结断裂、力链网络特性和不同孔隙率下的应力-应变曲线、颗粒组构变化等。结果表明: 声发射计数随应力的增加而增加, 至少有 88.28% 的声发射计数是由张拉型黏结断裂所贡献的; 在应变为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 时, 力链数量分别递增至 6304、7076、8080 和 9258, 持续的压力作用增强了颗粒之间的胶结; 在孔隙率为 0.36、0.38 和 0.40 时, 接触数目分别增加了 64.78%、66.55% 和 70.39%; 张拉型黏结断裂数目分别占总数目的 85.67%、90.20% 和 88.28%, 远大于剪切型黏结断裂数目, 颗粒更倾向于在垂直 90° 左右的方向上发生断裂。

**关键词:** 香菇菌渣颗粒; 颗粒黏结; 单轴压缩; 声发射; 力链; 黏结断裂

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.027

**中图分类号:** TK6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0188-08

## Study on particle bonding and fracture during dense forming process of mushroom residue

Li Zhen<sup>1</sup>, Zhang Donghui<sup>1</sup>, Zhang Xinyu<sup>1</sup>, Wang Shaofeng<sup>1</sup>, Xu Sheng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In order to study the contact bonding and fracture characteristics of particles during the dense forming process of mushroom residue, the uniaxial compression mechanical experiment and the detection of acoustic emission signals were carried out. Then, the simulation analysis was conducted by using the discrete element software PFC, and the contact bonding fracture of the mushroom residue particles, the characteristics of force chain network, the stress-strain curves under different porosities, and the changes of particle structure were investigated. The results show that the acoustic emission counts increase with the increasing of stress, and at least 88.28% of the acoustic emission counts is contributed by tensile bonding fracture. When the strains are 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5, the number of force chains increases to 6304, 7076, 8080 and 9258, respectively, and the continuous pressure enhances the bonding between particles. When the porosities are 0.36, 0.38 and 0.40, the number of contacts increases by 64.78%, 66.55% and 70.39%, respectively. The number of tensile fractures accounts for the total number of 85.67%, 90.20% and 88.28% respectively, which are much larger than the number of shear bonding fractures, and the particles are more inclined to fracture in the vertical direction of about 90°.

**Key words:** mushroom residue particles; particle bonding; uniaxial compression; acoustic emission; force chain; bonding fracture

生物质燃料是一种清洁可再生能源<sup>[1-2]</sup>。随着环境污染的日益严重, 在化石能源资源短缺的社会中发挥着越来越重要的作用<sup>[3]</sup>。我国生物质资源丰富, 将其转变为生物质能源进行有效的利用,

对改善国家环境、缓解能源危机有着至关重要的意义。

近些年来, 国内外学者们对生物质方面的研究取得了丰富的成果。在生物质成型的宏观研究上主要集中在生物质模具的参数方面(模具孔径、长径比等)和原料性质方面(含水率、粒径等)。Guo L 等<sup>[4]</sup>研究了生物质原料(大麦、燕麦、油菜和小麦秸秆)压缩成型的压缩和松弛特性, 确定了压缩压力、颗粒粒度和含水率的关系。王明峰等<sup>[5]</sup>研究表明, 在温度约为 100℃、含水率在 4%~12% 之间、粒径在  $\Phi 0 \sim \Phi 0.25$  mm 之间时, 桉木屑颗粒的成型

收稿日期: 2023-04-13; 修订日期: 2023-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52366018); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY23074)

作者简介: 李震(1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: lizhen\_730106@126.com

通信作者: 张鑫宇(1979-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: zxy\_lhb@163.com

效果最好。李永奎等<sup>[6]</sup>通过 DEM 软件模拟了玉米秸秆颗粒单轴成型过程，与实验结果进行对比，验证了模拟的可行性。对于成型过程中细观上的研究主要是颗粒在成型中的速度、位移和能量变化等。李震等<sup>[7]</sup>运用离散元颗粒流软件 PFC 研究了沙柳细枝单轴成型中颗粒的力学特性，按照应力-应变曲线的特点，细致分析了单个颗粒的速度变化、位移变化和能量变化等。杜海君等<sup>[8]</sup>通过离散元法研究了苜蓿致密成型中振动压缩对应力的传递、力链的分布以及演化过程的影响。

上述研究主要侧重于材料受力宏观力学行为，对颗粒的接触黏结和断裂的研究还鲜有报道，本文将通过声发射技术对香菇菌渣致密成型过程中颗粒之间的接触黏结和断裂进行细致的探究。

## 1 压缩实验

### 1.1 实验原料

实验原料来自山西吕梁的香菇菌渣。将生物质原料放置于自然环境中干燥，并使用木材水分仪检测，当原料的含水率为 0% 时即判定为完全干燥。为了确保颗粒压缩的致密性，使用网筛将颗粒筛分为粒径为  $\Phi 0 \sim \Phi 1$  mm 的原料。随后，在室温条件下，取 50 g 原料将含水率控制在 15% 左右。然后，将其封装并存放于阴凉干燥处。香菇菌渣颗粒原料如图 1 所示。

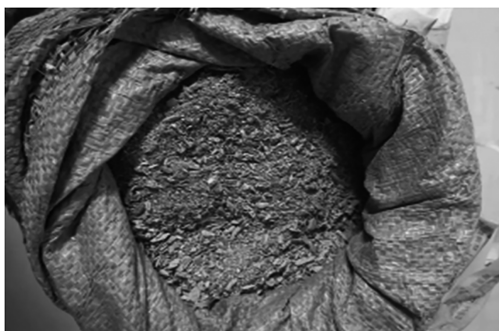
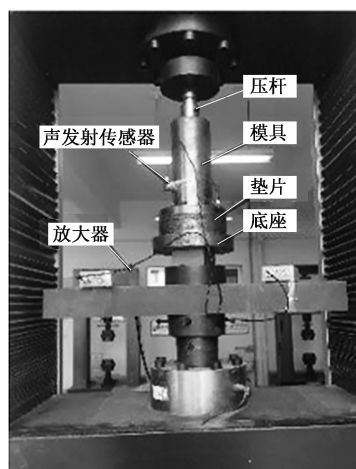


图 1 香菇菌渣颗粒

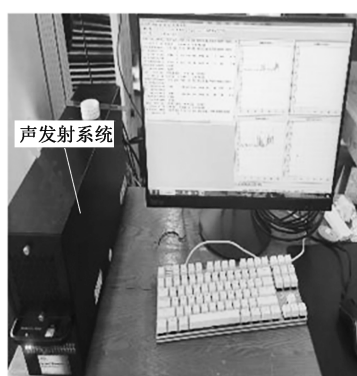
Fig. 1 Mushroom residue particles

### 1.2 实验设备

将力学压力实验机（济南实验机厂）和声发射采集设备（美国物理声学公司）相互搭配使用，如图 2 所示。实验设备能够在工作过程中自动实时记录并存储实验所需的压力、位移、声发射信号和时间等数据，后续可通过计算得到所需的数据。



(a)



(b)

图 2 力学压力实验机 (a) 和声发射采集设备 (b)

Fig. 2 Mechanical pressure test machine (a) and acoustic emission acquisition equipment (b)

### 1.3 实验方法

在实验过程中，通过电脑程序控制压力机压盘上下移动以完成实验。将实验原料放入成型腔内进行初步预压，然后调用压缩程序将香菇菌渣颗粒进行压缩成型，使用声发射采集设备，记录并存储传感器采集到的声发射信号。压缩速度设置为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，当到达设定压缩力并保持 80 s 后开始卸载。实验结束后，从模具的下方取出压缩成型的香菇菌渣燃料块，如图 3 所示。



图 3 香菇菌渣燃料实物图

Fig. 3 Physical picture of mushroom residue fuel

## 2 PFC 颗粒流模拟

颗粒流软件 PFC 利用细观力学参数来描述颗粒之间的力学性质。如图 4 所示, 结合颗粒流模拟中其他相关生物物质颗粒的参数<sup>[9]</sup>, 通过不断的调整模拟, 使其与实验结果相符, 使用此组参数数据作为香菇菌渣颗粒的模型参数, 具体参数如表 1 所示。

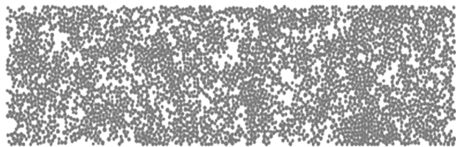


图 4 PFC 单轴压缩试样模型  
Fig. 4 Model for PFC uniaxial compression specimen

## 3 单轴压缩结果及分析

### 3.1 实验与模拟结果分析

采用表 1 所示参数进行模拟计算, 建立了香菇菌渣颗粒单轴压缩 (有侧限单向压缩成型) 数值模拟的力学实验模型。通过对模型的应力-应变曲线

表 1 模型参数设置 Table 1 Setting of model parameters	
参数	数值
试样尺寸/(mm×mm)	50×200
墙体法向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	1×10 <sup>9</sup>
颗粒半径/mm	0.6~0.9
摩擦因数	0.577
刚度比	1.5
平行黏结法向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	3×10 <sup>7</sup>
平行黏结切向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	2×10 <sup>7</sup>

和声发射曲线进行实验和模拟结果的对比 (图 5), 对颗粒流模拟结果进行了深入分析。

可以发现, 模拟得到的香菇菌渣颗粒的峰值应力和应变等力学参数以及声发射规律与单轴压缩实验结果基本保持一致, 这表明采用的颗粒流理论和 PFC 软件在研究香菇菌渣颗粒单轴压缩成型过程中的力学特性及声发射特性方面是合理的。此外, 在模型加载前期, 声发射计数几乎没有或很少, 而在模型平缓期之后开始变得相对活跃并且不断增加, 声发射计数在上升期达到最大且最为强烈, 这与实验结果的变化趋势相似。

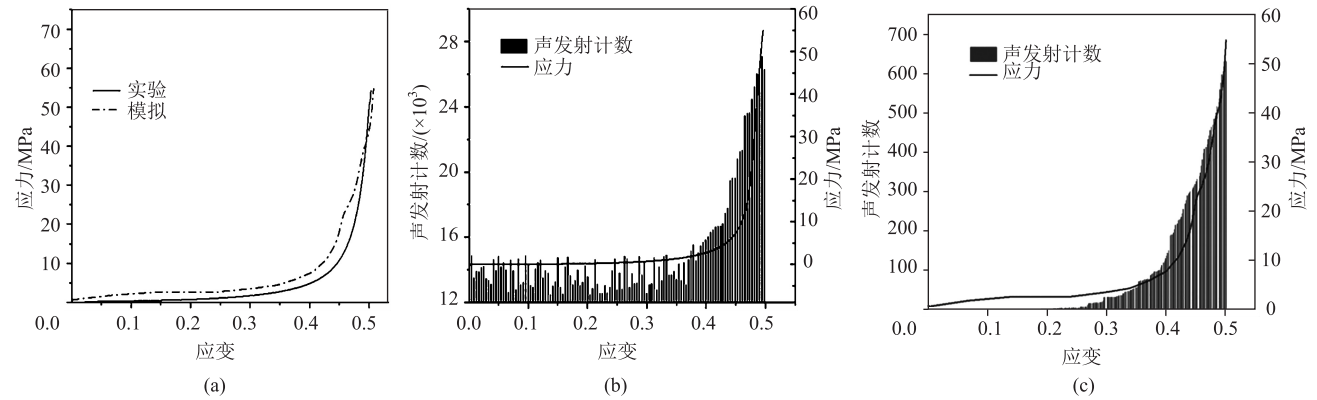


图 5 香菇菌渣颗粒单轴压缩过程中实验与模拟的应力-应变曲线及声发射曲线对比  
(a) 应力-应变曲线 (b) 实验的声发射曲线 (c) 模拟的声发射曲线  
Fig. 5 Comparison of experimental and simulated stress-strain curves and acoustic emission curves during uniaxial compression process for mushroom residue particles

需要注意的是, 数值模拟结果的声发射计数与实验结果之间存在一定的差异, 主要原因是因为数值模型中颗粒的接触单元数目不同。尽管存在一定的数值差异, 但是他们得到的声发射计数的变化趋势大致相同。

通过图 5 所示单轴压缩力学曲线和声发射曲线并参考文献 [10] 和文献 [11], 将香菇菌渣颗粒致密成型划分为平缓压缩段 (应变为 0.0~0.4) 和

上升压缩段 (应变为 0.4~0.5) 两个阶段。

(1) 平缓压缩段: 由于压缩速度较缓慢, 压力上升得比较小, 原料间有较大的空隙, 颗粒之间相互填充, 空隙开始慢慢减小, 颗粒间的接触逐渐增多, 此时开始出现颗粒间的黏结断裂, 并产生以弹性变形为主的弹塑性共存状态。

(2) 上升压缩段: 颗粒受到较大的压缩力会发生破裂或变形, 从而黏结到一起。颗粒间的接触面



积逐渐增大,接触变得更加紧密,此时即使很小的变形也需要较大的作用力。在这个阶段,主要发生以塑性变形为主的弹粘塑性共存状态。随后经过一段时间的保压,燃料基本成型。

### 3.2 颗粒位移和断裂分析

从细观角度来看,声发射在生物质成型过程中主要是来自于颗粒之间的破碎、黏结和断裂。在采用颗粒流方法进行模拟时,虽然颗粒本身不会真实地发生破碎,但是允许颗粒之间有一定的重叠量,

通过颗粒之间的平行黏结模型接触键的断裂进行模拟,进而引发声发射的产生。

在模型加载过程中,颗粒的位移状态能够更加清晰地反映压缩时黏结断裂的产生情况。4 种不同的应变情况下,颗粒的位移和黏结断裂的分布情况如图 6 所示。在图 6 中,左侧展示了模型加载时颗粒位移的状态分布图,颗粒位移由中间向两侧逐渐增大;而右侧展示了颗粒的接触黏结断裂的演变图,其中黑色的点代表颗粒的接触黏结断裂。

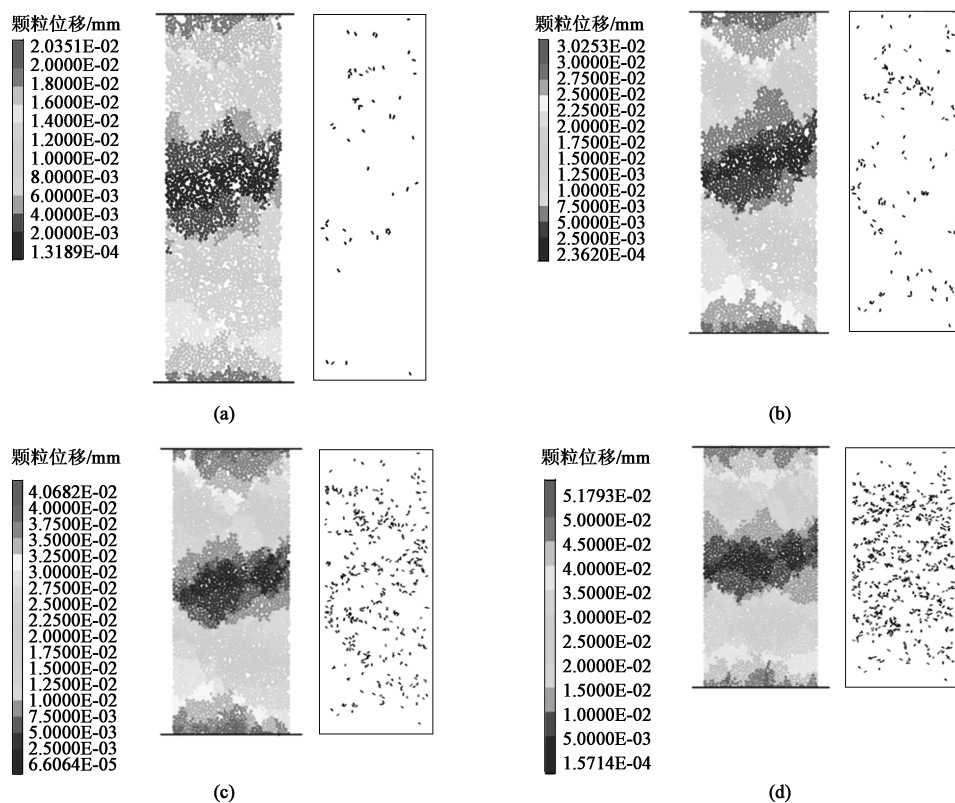


图 6 典型应变下颗粒位移及黏结断裂形态演化

(a) 应变为 0.2 (b) 应变为 0.3 (c) 应变为 0.4 (d) 应变为 0.5

Fig. 6 Evolution of particle displacements and bonding fracture morphologies under typical strains

(a) Strain of 0.2 (b) Strain of 0.3 (c) Strain of 0.4 (d) Strain of 0.5

通过图 6 分析可知,颗粒位移大多沿竖直方向发生,加载墙两端的位移分量最大,黏结断裂最初出现在加载墙两端,然后在试样内部随机产生,颗粒呈现向两侧移动的趋势。原有的黏结断裂会不断地产生新的黏结,如此反复,从而导致大部分的断裂呈现张拉型断裂,而只有少部分呈现剪切型断裂。具体而言,应变为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 时,张拉型断裂的数量分别为 50、147、384 和 633,而剪切型断裂的数量分别为 2、4、34 和 84。在整个压缩过程中,从试样加载开始到结束,至少有 88.28% 的声发射计数归因于张拉型黏结断裂的贡献。这表

明在颗粒之间的黏结断裂过程中,张拉型断裂在声发射计数中占据主导地位。

### 3.3 颗粒力链网络分析

在单轴压缩过程中,相邻颗粒之间会形成力链网络,这是由于颗粒间的接触和黏结行为所导致的。在图 7 中,可以看到 4 组不同的应变情况下力链网络的演变。从左往右观察,4 组不同应变状态下,力链网络颜色的深浅与紧密程度反映了颗粒间作用力的大小。随着应变的增加,力链数量逐渐增多,直至占据整个接触网络。这说明随着压缩应变的增加,力链在模型中的分布和密集程度发生了显著变



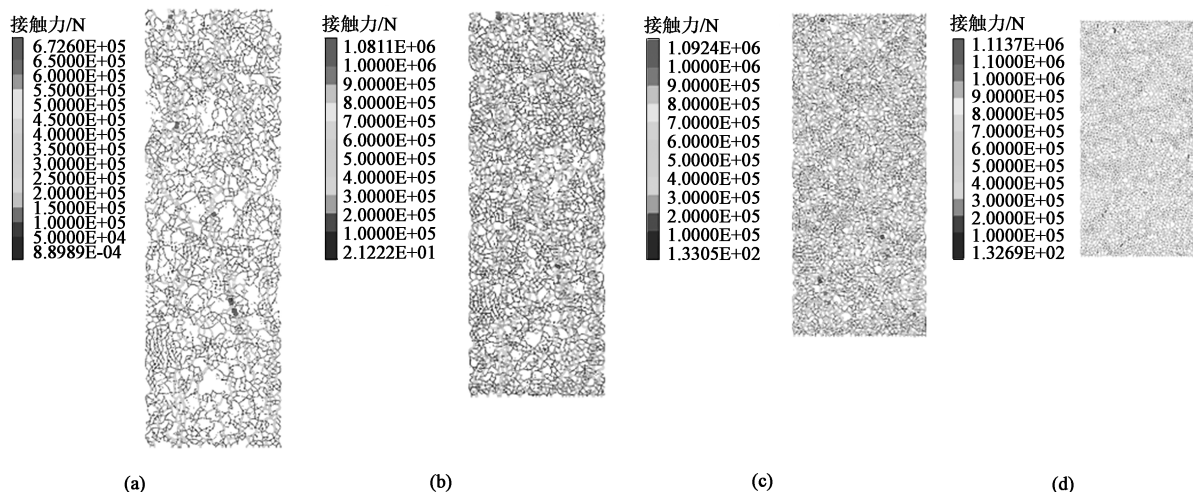


图 7 典型应变下颗粒力链演化图

(a) 应变为 0.2 (b) 应变为 0.3 (c) 应变为 0.4 (d) 应变为 0.5

Fig. 7 Evolution diagrams of particle force chains under typical strains

(a) Strain of 0.2 (b) Strain of 0.3 (c) Strain of 0.4 (d) Strain of 0.5

化。在压缩过程中,颗粒受到墙体加载的压力,从两端向中心部位传递。随着应变的增加,接触强度较弱的力链容易发生断裂,并重新组成更强的力链,从而使得模型的力链强度增强并且数量变多。在应变为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 时,力链的数量分别为 6304、7076、8080 和 9258,显示了力链数量随应变增加而增加的趋势。此外,颗粒之间的最大接触力也会随着力链的演变而增加。在应变为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 时,颗粒之间最大接触力分别为  $6.726 \times 10^5$ 、 $1.081 \times 10^6$ 、 $1.092 \times 10^6$  和  $1.114 \times 10^6$  N。这说明随着力链的形成和重新组合,颗粒间的接触强度增强,颗粒之间的黏结也变得更强,有助于颗粒的成型过程。

综上,在单轴压缩过程中,颗粒间力链网络的复杂动力学响应对应模型的宏观力学性能起着关键作用<sup>[12-13]</sup>。随着应变的增加,力链数量增多并且强度增强,从而影响了模型的变形特征和力学性能。这对于深入理解生物质成型过程中颗粒间的相互作用和力链网络的演变规律具有重要意义。

## 4 不同初始密集程度下的模拟分析

### 4.1 应力-应变分析

在进行参数设置和颗粒模型生成后,可以通过给墙体施加向下的速度,从而使颗粒受到挤压。在模拟单轴压缩实验时,为了更好地说明,以孔隙率划分不同的组别,例如当孔隙率为 0.36 时为 A 组,

当孔隙率为 0.38 时为 B 组,当孔隙率为 0.40 时为 C 组。对应的单轴压缩模拟应力-应变曲线如图 8 所示。

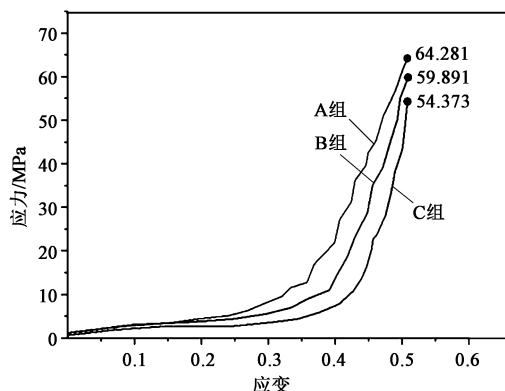


图 8 单轴压缩下的应力-应变模拟曲线

Fig. 8 Stress-strain simulation curves under uniaxial compression

在图 8 中的平缓压缩段,3 组单轴压缩模拟的应力-应变曲线在应变为 0.2 之前基本重合,表明颗粒间的应力-应变曲线的变化几乎一致。然而,当应变超过 0.2 后,3 组曲线发生明显分离。在上升压缩段, A 组曲线先到达峰值,随后是 B 组和 C 组。在应变为 0.5 时, A 组的峰值应力为 64.281 MPa, B 组的峰值应力为 59.891 MPa, C 组的峰值应力为 54.373 MPa。可以看出, A 组颗粒间的应力最大,即较小的孔隙率对应着较大的峰值应力。在生物质成型过程中,压力是一个关键因素,它直接影响生物质燃料的成型效果。较大的压力可以获得更好的成型效果,但也会伴随能量消耗和机器磨损等成本

的增加。另外,初始颗粒的密集程度也对压力需求和成型效果有影响。较大的初始颗粒密集程度通常需要较大的压力来实现所需的成型效果。因此,在生物质成型过程中,需要综合考虑初始颗粒的密集程度和所需的压力条件,以优化成型效果和能量消耗等关系。

#### 4.2 颗粒接触组构分析

颗粒组构分析是散体力学中一种重要的分析手段,用于描述颗粒材料内部组成结构的各向异性。其中,配位数和颗粒接触方向分布图是常用的表示方法<sup>[14]</sup>。

配位数反映了颗粒之间的连通性和结构性。通过对 A、B、C 3 组进行模拟,得到初始颗粒数目分别为 3561、3452 和 3339 个,可以从图 9 中计算得到初始配位数分别为 1.738、1.617 和 1.608。在加载后,配位数分别变为 2.864、2.784 和 2.740。研究表明,随着孔隙率的增加,颗粒的配位数呈现减小的趋势。同时,在加载过程中 3 组配位数的增长速度基本一致,但初始孔隙率较小的 A 组的最终配位数较大,单个颗粒的平均接触数量也较多,这说明颗粒间的接触更加紧密,更有助于颗粒成型。

对区间内的颗粒接触数目和接触角度进行统计,并通过 Origin 软件绘制颗粒接触力分布图,如图 10 所示。从图 10 中可以观察到颗粒接触数目在不同方向上存在差异。在到达最大应变 0.5 时,颗粒间的接触明显增大,这是因为加载过程中颗粒之间的相

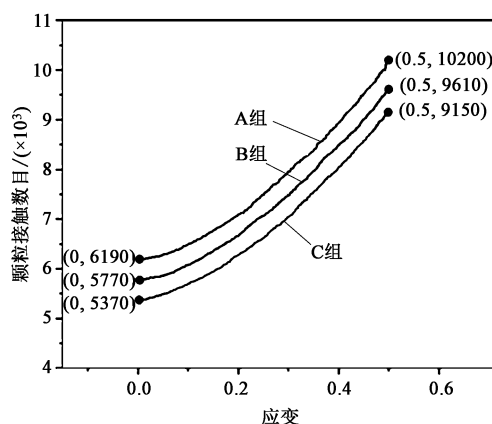


图 9 颗粒接触数目趋势图

Fig. 9 Trend diagram of particle contact numbers

对位移导致了更多的颗粒产生接触。而在水平方向上,随着孔隙率的增加,颗粒间的接触数目增加,表明颗粒间的黏结作用在水平方向上逐渐增强。从图 9 中可以看到,在 3 种不同初始密集程度(孔隙率  $\alpha$  分别为 0.36、0.38 和 0.40)下,颗粒的初始接触数目不同,到达最大应变 0.5 时,随着孔隙率的增加,接触数目分别增加了 64.78%、66.55% 和 70.39%;而颗粒黏结断裂的总数目占总接触数目的比例分别为 9.24%、8.28% 和 7.84%。这些结果表明,初始密集程度越大,颗粒的黏结断裂占比越多,同时新接触数目的增加越慢,这可能与初始密集程度较大的颗粒在加载过程中更加紧密地结合在一起,形成更为稳定的颗粒网络结构有关。

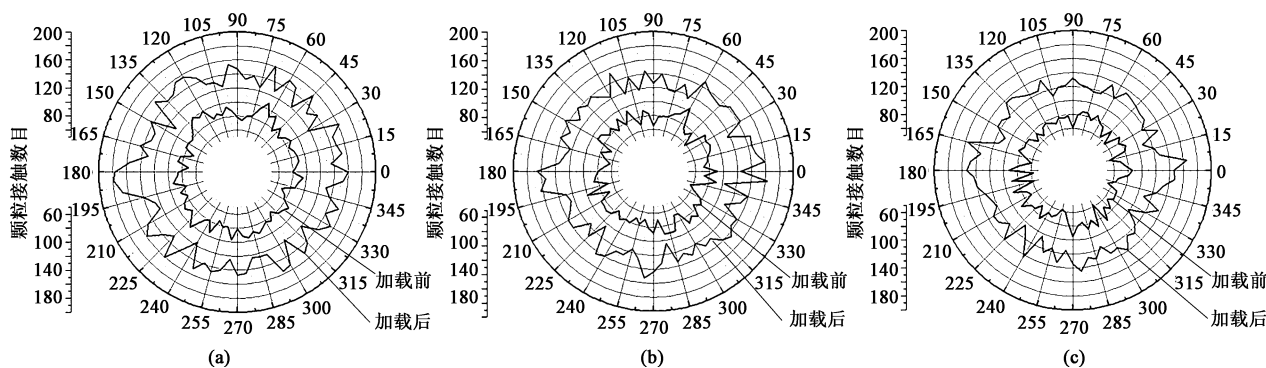


图 10 颗粒接触分布图

(a) 孔隙率为 0.36 (b) 孔隙率为 0.38 (c) 孔隙率为 0.40

Fig. 10 Particle contact distribution diagrams

(a) Porosity of 0.36 (b) Porosity of 0.38 (c) Porosity of 0.40

#### 4.3 颗粒黏结断裂分析

在香菇菌渣颗粒成型过程中,模型加载时会通过实时监测颗粒间的接触断裂情况,自动记录断裂位置并进行标识<sup>[15-16]</sup>。为了更加深入地了解不同初始密集程度对黏结断裂的影响,进行了 3 组模拟实

验,并记录和输出了相关信息,同时运用第 4.1 节的统计方法进行作图,图 11 和图 12 所示。

通过对模拟结果进行分析,发现在不同初始密集程度下,随着孔隙率的增大,总的黏结断裂数量呈现出减少的趋势。这可能是因为较大的孔隙率导

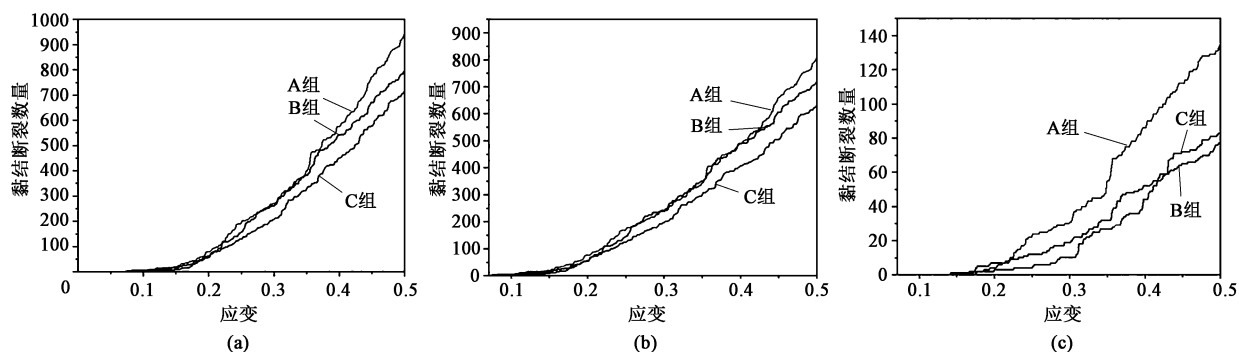


图 11 不同孔隙率下的黏结断裂数量

(a) 总黏结断裂 (b) 张拉型黏结断裂 (c) 剪切型黏结断裂

Fig. 11 Number of bonding fracture under different porosities

(a) Total bonding fracture (b) Tensile bonding fracture (c) Shear bonding fracture

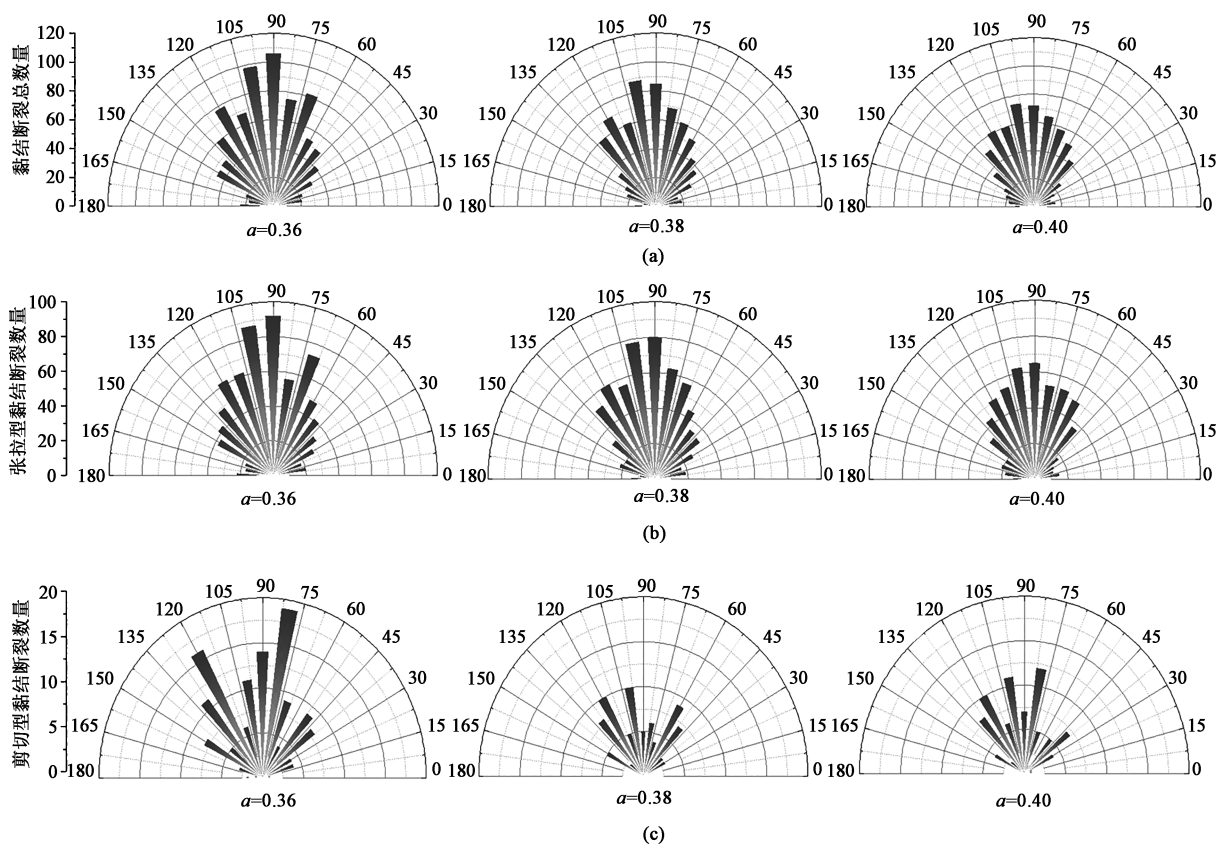


图 12 黏结断裂分布玫瑰图

(a) 总黏结断裂 (b) 张拉型黏结断裂 (c) 剪切型黏结断裂

Fig. 12 Rose plots of bonding fracture distribution

(a) Total bonding fracture (b) Tensile bonding fracture (c) Shear bonding fracture

致颗粒之间的接触点减少,从而减少了断裂的机会。同时,由图 11c 可知,在应变达到 0.426 (B 组和 C 组曲线交点)之前,B 组的剪切型黏结断裂数量多于 C 组;而在应变超过 0.426 后,C 组的剪切型黏结断裂数量开始多于 B 组,这表明在不同初始密集程度条件下,剪切型黏结断裂的发生规律可能存在变化,如图 12 所示。

通过进一步的分析还发现,黏结断裂在成型过程中呈现出不均匀分布且具有明显的各向异性。较大的孔隙率使得断裂数目在各个方向上的分布更加均匀。此外,在压缩过程中,颗粒更倾向于在垂直于 90°左右的方向上发生断裂,而颗粒的张拉断裂数量远远大于剪切断裂数量。3 组模拟中,张拉断裂分别占总断裂数目的 85.67%、90.20% 和



88.28%。这可能是因为是在压缩过程中,颗粒主要受到与墙体运动方向一致的正向挤压力的作用,从而导致颗粒在张拉方向上更容易发生断裂。

## 5 结论

(1) 根据香菇菌渣颗粒致密成型过程中应力-应变曲线特征,将其成型过程分为平缓压缩段和上升压缩段。通过模拟与实验结果对比,可以得出使用PFC软件进行模拟研究的方法是合理的。

(2) 在模型加载中,颗粒的位移主要沿竖向,黏结断裂在试样内部随机产生,大部分是张拉型断裂,并且数目随着应变的增加而增加,占据了至少88.28%的声发射计数统计结果。

(3) 随着应变的增加,颗粒之间的最大接触力增加,弱的力链容易断裂,并重新组成更强的力链,使得力链强度增强、数量增多。

(4) 在平缓压缩段,3组单轴压缩模拟的应力-应变曲线在应变为0.2之前基本重合。在上升压缩段,模型中初始密集程度越大,颗粒间的应力也越大。

(5) 孔隙率对颗粒成型也有着重要影响,初始密集程度越大,黏结断裂占比越多,新接触数目占比越少。

(6) 随着孔隙率增大,颗粒黏结断裂数量减少,且呈现各向异性,同时断裂分布也更均匀。颗粒更容易在垂直90°左右方向上发生张拉型黏结断裂。

### 参考文献:

- [1] Batista Ranielly M, Converti Attilio, Pappalardo Julianio, et al. Tools for optimization of biomass-to-energy conversion processes [J]. *Processes*, 2023, 11 (3): 854-854.
- [2] 李震, 高雨航, 刘彭. 沙柳细枝颗粒致密成型过程中的压缩方式 [J]. *林业工程学报*, 2018, 3 (4): 102-106.  
Li Z, Gao Y H, Liu P. Compression mode in the dense molding process of salix twigs granule [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2018, 3 (4): 102-106.
- [3] Huang Y M, Kuldaseva Zebo, Bobojanov Shakhruket, et al. Exploring the links between fossil fuel energy consumption, industrial value added, and carbon emissions in G20 countries [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 30 (4): 10854-10866.
- [4] Guo L, Wang D C, Tabil Lope G, et al. Compression and relaxation properties of selected biomass for briquetting [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 148: 101-110.
- [5] 王明峰, 戚日莹, 徐建宇, 等. 桉树木屑成型颗粒成分变化和燃烧特性的研究 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42 (7): 463-468.  
Wang M F, Qi R Y, Xu J Y, et al. Study on composition and combustion properties of eucalyptus sawdust pellets [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42 (7): 463-468.
- [6] 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.  
Li Y K, Sun Y Z, Bai X W. 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*, 2015, 31 (20): 212-217.
- [7] 李震, 于今, 于跃, 等. 沙柳颗粒致密成型过程中的颗粒运动及能量分析 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (5): 135-143.  
Li Z, Yu J, Yu Y, et al. Analysis on particle movement and energy in dense molding process of salix particles [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (5): 135-143.
- [8] 杜海君, 雷霆, 张永安, 等. 苜蓿振动压缩成型过程中的力链演变 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38 (2): 33-40.  
Du H J, Lei T, Zhang Y A, et al. Evolution of force chain in vibration compression of alfalfa [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (2): 33-40.
- [9] 那日苏, 李帅, 李鑫, 等. 玉米秸秆复合颗粒饲料致密成型特性的离散元仿真 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (4): 162-169.  
Na R S, Li S, Li X, et al. Discrete element simulation on dense forming characteristics for corn straw mixture pellet feed [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (4): 162-169.
- [10] 李震. 齿辊式生物质环模成型机结构与单位能耗研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.  
Li Z. Research on Structure and Unit Energy Consumption of Toothed Roll Biomass Ring Mold Forming Machine [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [11] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, (S2): 3673-3678.  
Zhao X D, Tang C A, Li Y H, et al. Study on acoustic emission characteristics in the whole process of granite fracture [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, (S2): 3673-3678.
- [12] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络 [J]. *岩土力学*, 2009, 30 (S1): 83-87.  
Sun Q C, Xin H L, Liu J G, et al. Skeleton and force chain network in static granular material [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (S1): 83-87.
- [13] Yuan A Y, Hou J L, Yin Z Q. The force chain and acoustic emission response law for the uniaxial compression of rock [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, (3): 4479-4499.
- [14] 周小文, 许衍彬, 赵仕威, 等. 偏心率对颗粒介质次生各向异性的影响 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2022, 50 (11): 141-154.  
Zhou X W, Xu Y B, Zhao S W, et al. Influence of eccentricity on induced anisotropy of granular media [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2022, 50 (11): 141-154.
- [15] Zhou H, He C D. Propagation law of stress wave and cracks in non-penetrating jointed rock mass: A numerical study based on particle flow code [J]. *Geotechnical and Geological Engineering: An International Journal*, 2020, 38 (4): 3967-3981.
- [16] Wang Z C, Bi L P, Sangki Kwon, et al. The effects of hydro-mechanical coupling in fractured rock mass on groundwater inflow into underground openings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 103: 103489.