

## 沙柳和香菇菌渣混配成型过程中的力链演变

李震, 赵召才, 陶鑫, 岳强  
(内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 为了分析沙柳和香菇菌渣混配成型过程中的力链演变过程, 在实际压缩试验的基础上, 建立沙柳颗粒和混配料颗粒的离散元仿真模型。结果表明: 沙柳颗粒和混配料颗粒在压缩过程中, 轴向各层颗粒的最大平均压缩力差值分别为 17.21 和 6.61 N, 轴向上的强力链分布均经历了先由下向上再由上向下的传递过程。在压缩完成时刻, 沙柳颗粒成型块内强接触分布从上至下逐渐减小, 强接触占比为 34.52%; 混配料颗粒成型块内强接触分布均匀, 强接触占比为 36.14%; 沙柳颗粒成型块和混配料颗粒成型块的轴向各层颗粒最大孔隙率差值分别为 14.1% 和 6.36%。研究表明, 沙柳和香菇菌渣混配成型改善了成型块内压力的传递, 增加了颗粒与颗粒之间的接触面积, 提高了成型块的强度和稳定性。

**关键词:** 沙柳颗粒; 香菇菌渣颗粒; 混配料; 力链; 孔隙率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.022

**中图分类号:** TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 04-0161-08

## Evolution on force chain in mixing and forming process of Salix and mushroom residue

Li Zhen, Zhao Zhaocai, Tao Xin, Yue Qiang

(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In order to analyze the evolution process of force chain in the mixing and forming process for Salix and mushroom residue, a discrete element simulation model of Salix particles and mixed ingredient particles was established on the basis of actual compression test. The results show that during the compression process of Salix particles and mixed ingredient particles, the maximum average compressive force difference values of particles on each layer in the axial direction are 17.21 and 6.61 N, respectively. And the distribution of strength force chain in the axial direction experiences the transfer process from bottom to top and then from top to bottom. At the time of compression completion, the strong contact distribution in the formed block of Salix particles gradually decreases from top to bottom, the proportion of strong contact is 34.52%, while the strong contact distribution in the formed block of mixed ingredients particles is uniform, the proportion of strong contact is 36.14%. The maximum difference values of particles on each layer in the axial direction for the Salix particle formed block and the mixed ingredient particle formed block are 14.1% and 6.36%, respectively. The research shows that the mixing and forming of Salix and mushroom residue improves the pressure transfer in the formed block, increases the contact area between particles, and improves the strength and stability of the formed block.

**Key words:** Salix particles; mushroom residue particles; mixed ingredients; force chain; porosity

沙柳是一种沙生灌木, 广泛生长于内蒙古的沙漠地区, 因其热值较高, 是一种非常好的生物质燃料。但是由于其储存和运输成本较高, 在实际生产与应用当中受到了很大的限制<sup>[1-2]</sup>。

在致密成型过程中颗粒体系内的力学行为直接影响产品的成型品质<sup>[3-7]</sup>。近年来, 许多学者对颗粒体系在不同工况下的力链结构进行了分析。孙其诚等<sup>[8]</sup>从不同的角度出发, 提出了强力链的两种判断依据, 即力判据和角度判据, 指出本质上强弱力链是存在于颗粒体系当中的两种不同结构, 并且强力链决定了颗粒体系的宏观性质。Meng F J 等<sup>[9]</sup>采用离散元法研究了平行板颗粒流摩擦系统中致密颗粒的力链特性, 并考虑了压力载荷和剪切速度的影响。Xu Z Y 等<sup>[10]</sup>基于离散元法建立了单轴压缩作用下金属粉末的二维离散元模型, 研究了颗粒的流

收稿日期: 2023-09-05; 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52366018); 内蒙古自治区鄂尔多斯科技局项目 (YF20232302)

作者简介: 李震 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: lizhen\_730106@126.com

通信作者: 赵召才 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 3232656062@qq.com

动状态、力链分布和影响力链的主要模型参数。张炜等<sup>[11]</sup>基于离散元理论从力链的空间结构、数目及方向等不同的维度出发,阐明了铁粉压制过程中粒径分布对其颗粒体系内部力链演化的影响机理。

近些年,许多学者开始以生物质材料为研究对象,对其致密成型过程中的力链演变进行了研究。李震等<sup>[12]</sup>基于离散元法在单轴压缩试验的基础上建立了离散元仿真模型并进行了压缩仿真试验,分析了沙柳颗粒在压缩过程中其成型块内的力链分布规律以及演化过程。杜海君等<sup>[13]</sup>基于离散元法分析了在苜蓿致密成型过程中振动对成型块内部力链的分布和演化过程的影响,得出了振动能够提高颗粒的压缩效果的结论。以上研究仅针对单一物料在压缩过程中的力链演化进行研究,并未对两种及以上的混配料颗粒的力链演化进行分析。本文以沙柳颗粒单一物料的压缩过程作为对比,分析了沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒进行混合压缩过程中的力链演化过程。

## 1 离散元仿真与模型验证

### 1.1 接触模型

离散单元法 (Discrete Element Method, DEM) 是一种以牛顿第二运动定律为基础,于 1971 年所提出来的解决颗粒之间微观力学分析的一种方法<sup>[14]</sup>。离散元中的接触模型可以用来描述颗粒物料之间的接触力学行为。根据沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒的力学特性,颗粒之间的离散元接触模型均设置为 Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion (EEPA),物料与模具之间的接触模型设置为 Hertz-Mindlin (No slip)<sup>[15]</sup>。

### 1.2 试验设计与离散元仿真模型

本试验采用课题组自行设计的模具,使用济南

斯尔诺机械设备有限公司制造的电子万能材料试验机对其进行压缩试验。试验系统如图 1 所示。

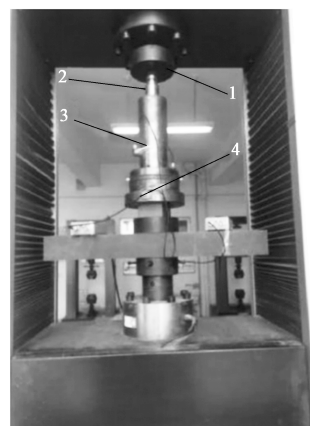


图 1 单柱塞成型试验机构

1. 上夹头 2. 柱塞 3. 成型腔 4. 下底座

Fig. 1 Single plunger forming test mechanism

试验原材料为自行购买的沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒,如图 2 所示。在对沙柳颗粒进行单一物质压缩时,取 30 g 干燥的沙柳颗粒,在其表面洒水并使用干草水分测定仪测量,使其含水率约为 16%,将其放入模具内部,启动试验机对其进行压缩试验,柱塞以  $240 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度匀速挤压沙柳颗粒。对沙柳和香菇菌渣颗粒混配料进行压缩时,取 30 g 干燥的混配料颗粒,其质量比为 1:3,对其表面喷水使其含水率为 10%,将其放入模具内部,启动试验机使柱塞以  $240 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度匀速对物料进行压缩。压缩完成后对成型块的密度进行测量,沙柳的成型密度为  $0.626 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,混配料的成型密度为  $1.06 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。压缩完成后的沙柳成型块和混配料成型块如图 3 所示。

随机选取多组沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒,并对

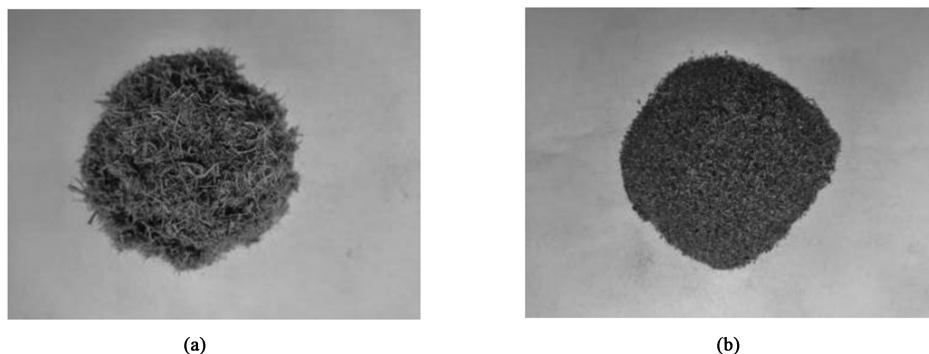


图 2 试验原材料

(a) 沙柳颗粒 (b) 混配料颗粒

Fig. 2 Test raw materials

(a) Salix particles (b) Mixed ingredient particles

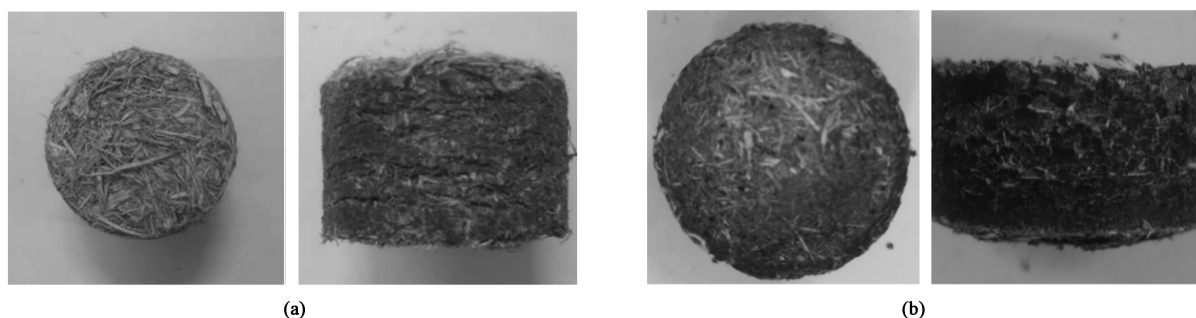


图3 压缩完成后成型块的横纵截面  
(a) 沙柳成型块 (b) 混配料成型块

Fig. 3 Horizontal and vertical cross sections of formed block after compression  
(a) Salix formed block (b) Mixed ingredient formed block

颗粒的直径和长度进行测量, 沙柳颗粒的直径取值范围为  $\Phi 1.20 \sim \Phi 1.56$  mm, 长度取值范围为  $4.50 \sim 5.85$  mm, 香菇菌渣颗粒直径的取值范围为  $\Phi 1.1 \sim \Phi 3.2$  mm。建立的沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒的离散元仿真模型如图4所示。

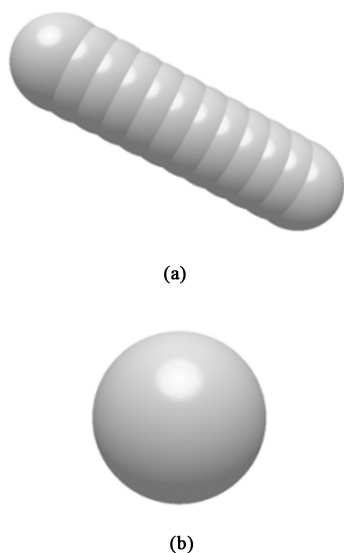


图4 沙柳颗粒 (a) 和香菇菌渣颗粒 (b) 的仿真模型  
Fig. 4 Simulation models of Salix particles (a) and mushroom residue particles (b)

在实际试验的基础上, 根据模具的实际尺寸以及约束条件, 建立模具内径为  $\Phi 40$  mm、高度为  $120$  mm 的离散元模型, 如图5所示。

仿真参数主要包括沙柳和香菇菌渣的物理参数, 以及颗粒与颗粒、颗粒与模具之间的接触参数, 沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒的参数设置如表1所示。在相同条件下, 沙柳颗粒在压缩成型时其成型压力远远大于香菇菌渣压缩成型时的压力, 所以将沙柳颗粒之间的接触参数近似当作沙柳颗粒与香菇菌渣颗

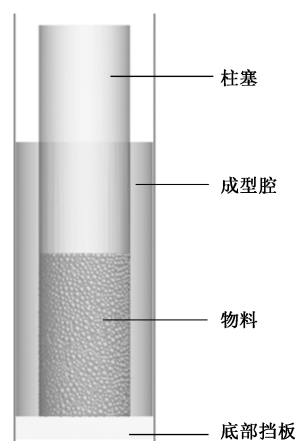


图5 离散元仿真模型

Fig. 5 Discrete element simulation model

粒之间的接触参数。

### 1.3 模型验证结果

将模拟得到的压缩力变化曲线与实际压缩试验所得到的压缩力变化曲线进行对比, 通过绝对误差来验证模型的有效性, 绝对误差为试验数据与模拟数据之间的差值, 如图6所示。

在显著性水平  $\alpha=0.05$  情况下, 假设  $M_0$  表示离散元模拟和试验测得的压缩力数值方差相等,  $M_1$  表示方差不相等。经假设检验, 得到在  $\alpha=0.05$  水平下接受  $M_0$ , 认为沙柳颗粒和混配料颗粒在进行压缩时其模拟数据和试验数据无显著性差异。本文利用上述离散元模型来模拟沙柳颗粒和混配料在压缩过程中的力链演变。

## 2 力链演变机制

为了更好地研究压力在颗粒内部的传递规律, 沿轴向将成型腔内部颗粒沿轴向均匀地分为6层,

表 1 材料接触参数设置  
Table 1 Setting of material contact parameters

参数	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切模量/ Pa	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数	表面能/ J	接触塑性 比	粘接力黏附 指数	切向力 刚度	刚度系数/ MPa
沙柳	0.40	1100.00	$4 \times 10^8$	0.9 (颗粒与颗粒), 0.7 (颗粒与模具)	0.9 (颗粒与颗粒), 0.7 (颗粒与模具)	0.01 (颗粒与颗粒), 0.03 (颗粒与模具)	20	0.01	4	0.67	1.0
香菇菌渣	0.35	1184.73	$5 \times 10^7$	0.500 (颗粒与颗粒), 0.466 (颗粒与模具)	0.8 (颗粒与颗粒), 0.6 (颗粒与模具)	0.010 (颗粒与颗粒), 0.085 (颗粒与模具)	9	0.20	3	0.80	1.5
模具	0.28	7800.00	$7 \times 10^{10}$	—	—	—	—	—	—	—	—

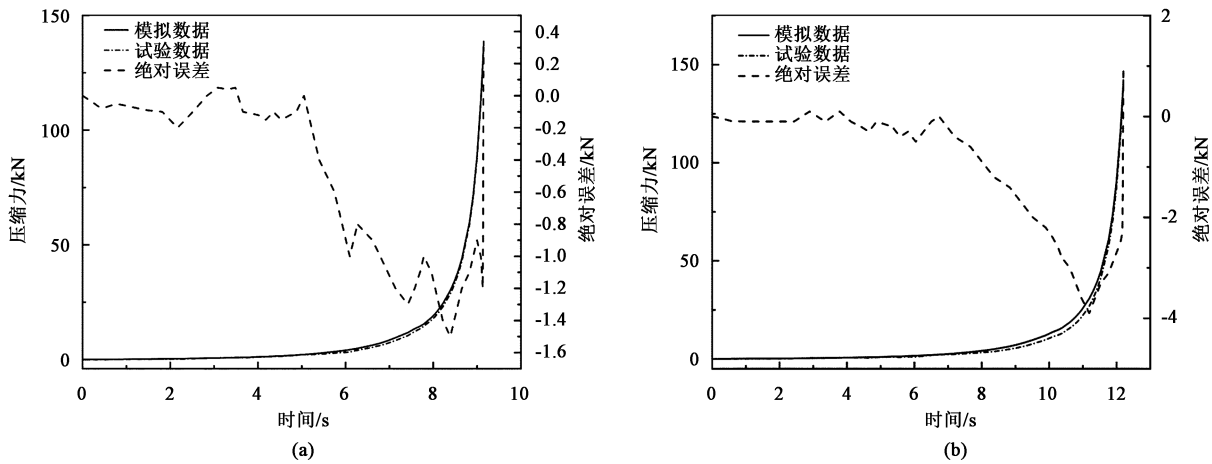


图 6 沙柳颗粒 (a) 和混配料 (b) 在压缩过程中压缩力模拟结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparison of compression force between simulation and experiment results for Salix particles (a) and mixed ingredients (b) during compression process

在每层内部设置一个压力传感器，用于测量该层内颗粒的平均压缩力。从上至下依次为压力传感器 1、压力传感器 2、压力传感器 3、压力传感器 4、压力传感器 5、压力传感器 6，如图 7 所示。

图 8 为沙柳颗粒和混配料在压缩过程中压力传感器 1~压力传感器 6 测得的轴向各层内颗粒的平均压缩力随时间的变化规律。在 0 s 时刻，由于此时压杆并未运动，颗粒此时仅受到自身重力的作用，所以，此时处于底部的颗粒受力较大。颗粒的平均压缩力从上至下逐渐增加。

随着压杆的运动，颗粒开始受到压缩，随着颗粒的孔隙率逐渐减小，此时压杆对颗粒的挤压力起主导的作用，顶层靠近压杆的颗粒的平均压缩力逐渐增加并超过其下层颗粒的平均压缩力。由于沙柳颗粒粒径大于香菇菌渣颗粒的粒径，在压缩初期，沙柳颗粒的孔隙率要大于混配料颗粒的孔隙率，所

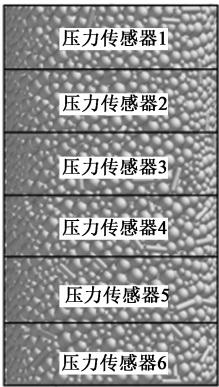


图 7 轴向压力传感器位置示意图

Fig. 7 Position schematic diagram of axial pressure sensors

以在相同的压缩速度下，沙柳颗粒的平均压缩力出现急剧上升的时间要晚于混配料颗粒。

当压杆运动到达其最大行程时，其轴向各层内颗粒的平均压缩力如表 2 所示。由表 2 可知，在压



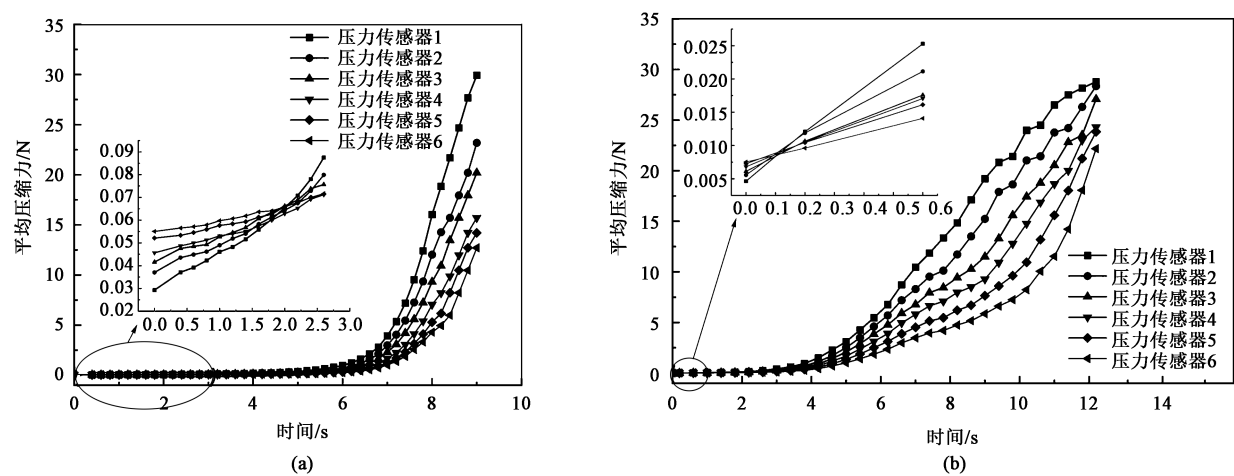


图 8 沙柳颗粒 (a) 和混配料颗粒 (b) 压缩过程中轴向各层颗粒平均压缩力随时间变化曲线

Fig. 8 Changing curves of average compression force for particles on each layer in axial direction with time during compression process of Salix particles (a) and mixed ingredient particles (b)

表 2 各压力传感器内平均压缩力 (N)

Table 2 Average compression force in each pressure sensor(N)

材料	压力传感器					
	1	2	3	4	5	6
沙柳	29.92	23.19	20.19	15.71	14.21	12.71
混配料	28.78	28.36	27.07	24.31	23.85	22.17

缩沙柳颗粒时，压力传感器 1 和压力传感器 6 之间的压缩力差值为 17.21 N，在压缩混配料时，压力

传感器 1 和压力传感器 6 之间的差值为 6.61 N。这说明在沙柳颗粒里添加香菇菌渣颗粒能够均化颗粒之间的压力，有利于压力的向下传递。

力链的演变过程能够从侧面反映颗粒在压缩过程中所受压缩力的变化规律。力链是由于颗粒受到外力和自身重力的作用在颗粒体系内相互接触而形成的大小不一的接触力传递路径。图 9 为在压缩过程中不同时刻的轴向的力链图。

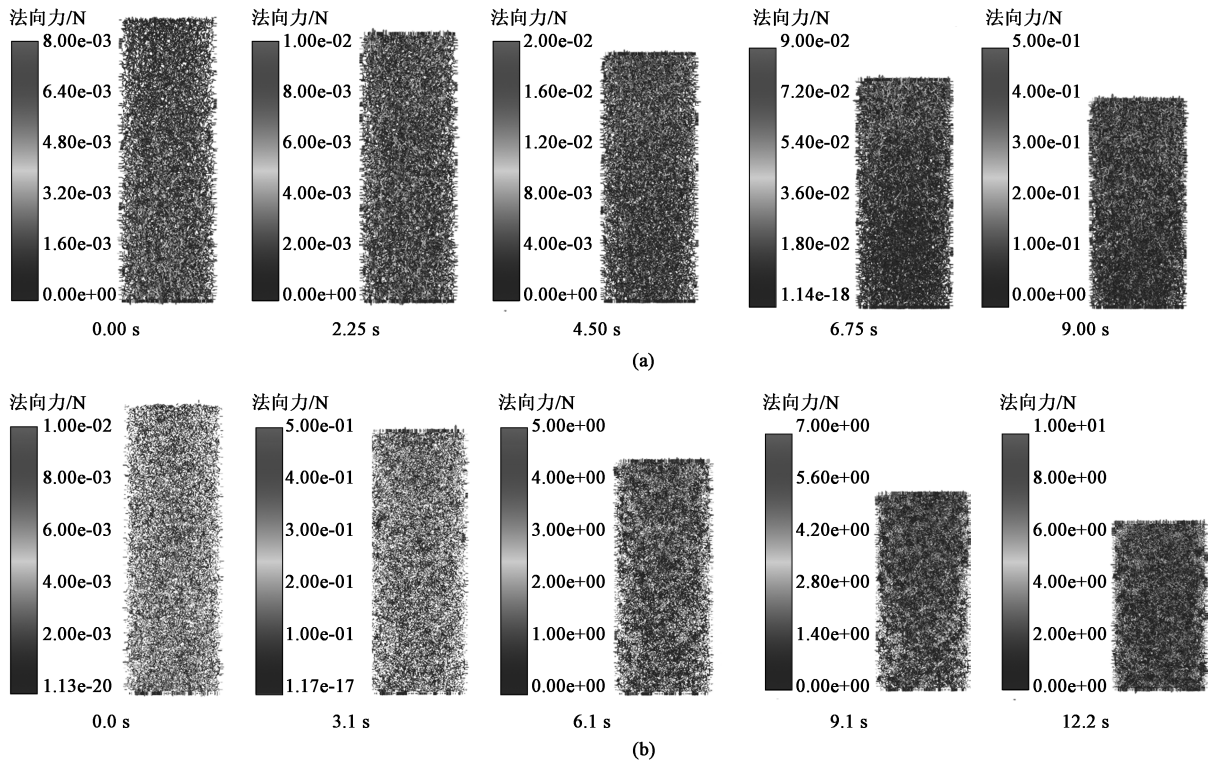


图 9 沙柳颗粒 (a) 和混配料颗粒 (b) 压缩过程轴向力链演变过程

Fig. 9 Evolution process of axial force chain for Salix particles (a) and mixed ingredient particles (b) during compression process

在对沙柳颗粒进行压缩时, 0 s 时刻, 在重力的作用下, 底层颗粒受力较大, 较强的力链出现在底部, 随着压杆的运动, 处于顶部的颗粒受到挤压, 其强力链出现的位置逐渐从底部向顶部移动。在顶部出现较强力链之后, 随着压缩行程的继续增加, 强力链开始从顶部向下传递。在压缩完成时刻, 其强力链的分布整体上呈现从顶部至底部逐渐稀疏的趋势, 如图 9a 所示。

如图 9b 所示, 与沙柳颗粒压缩过程中力链的变化规律对比, 在对混配料颗粒进行压缩时, 其强力链也经历了开始时出现在底部, 随着压杆的下行, 强力链的位置逐渐移动至顶部, 又从顶部逐渐向下延伸的过程。但是与沙柳颗粒压缩过程所不同的是, 在压缩完成时刻, 其强力链在整个成型块内的分布更加均匀。

由于颗粒的粒径和位置的不同, 所以会出现颗粒之间的接触力大小各异的现象。而颗粒间的平均压缩力  $F_0$  即会被当作判断强弱力链的依据。当颗粒

间的接触力大于平均接触力  $F_0$  时, 称之为强接触, 强接触连接形成的力链称之为强力链; 当颗粒间的接触力小于平均接触力  $F_0$  时, 称之为弱接触, 弱接触连接形成的力链称之为弱力链。通过 EDEM2021.2 离散元分析软件对两组仿真实验结束所得到的成型颗粒之间所形成的强接触数目进行提取分析, 图 10a 为沙柳颗粒压缩结束时刻成型块内强接触的轴向分布图, 强接触从上至下逐渐减小, 其接触总数目为 66674, 强接触数目为 23014, 占比为 34.52%。图 10b 为混配料颗粒压缩结束时刻成型块内强接触的轴向分布图, 强接触从中间向顶部和底部逐渐减小, 与沙柳颗粒成型块相比, 其内部的强接触分布较为均匀, 其接触总数目为 68241, 强接触数目为 24664, 占比为 36.14%。从成型块内强接触的比例和分布可以得知, 通过向沙柳颗粒内添加香菇菌渣颗粒可以提高成型块内强接触的比例, 使颗粒与颗粒之间的接触更加紧密, 强接触的分布更加均匀, 提高了成型块的稳定性。

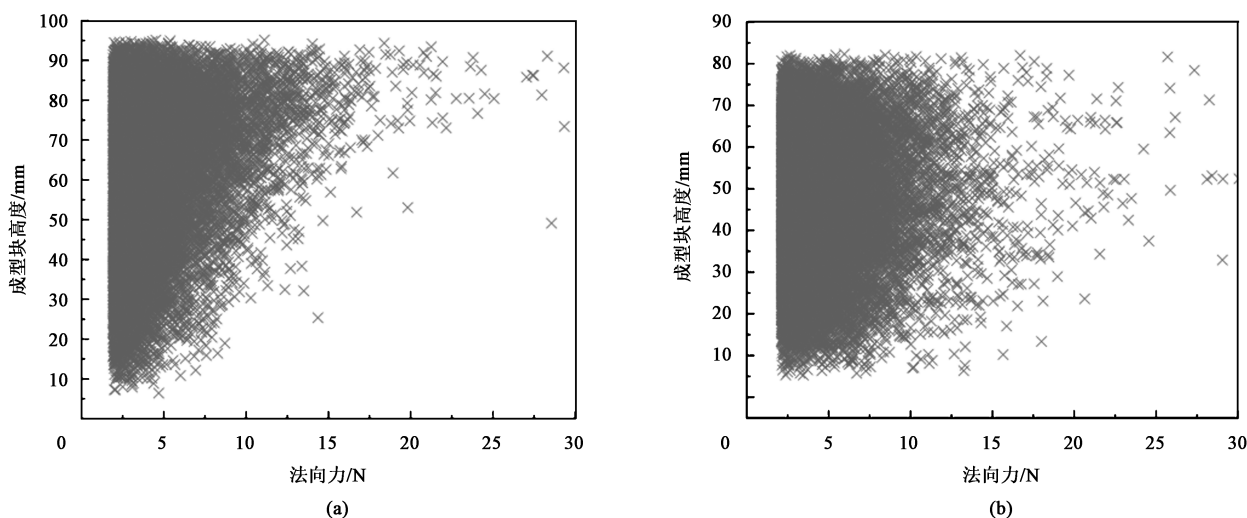


图 10 沙柳颗粒 (a) 和混配料颗粒 (b) 压缩结束时成型块内的强接触沿轴向分布

Fig. 10 Axial distributions of strong contact in formed block at end of compression for Salix particles (a) and mixed ingredient particles (b)

### 3 孔隙率

孔隙率是指生物质颗粒成型块之中空隙体积的占比, 其直接影响了成型块整体的强度和稳定性。

依照图 7 所示压力传感器的设置位置, 从上至下设置 6 个测量块, 依次为测量块 1、测量块 2、测量块 3、测量块 4、测量块 5、测量块 6。利用离散元软件 EDEM2021.2 软件测得其压缩过程中轴向孔隙率随时间的变化, 如图 11 所示。

沙柳颗粒在压缩过程中, 在开始时刻由于物料处于自然堆积状态, 顶层物料的孔隙率最大, 并从上至下逐渐减小。随着压杆的移动, 模具内的物料开始受到挤压, 顶层物料的孔隙率开始急剧减小, 各层物料孔隙率的减小速率从上至下依次减小。在压缩完成时刻, 轴向各层物料的孔隙率从上至下逐渐增大。

与沙柳颗粒压缩相比, 混配料颗粒在压缩过程中, 由于香菇菌渣颗粒的粒径较小, 在开始时刻时, 混配料颗粒的孔隙率要小于沙柳颗粒的孔隙率。在

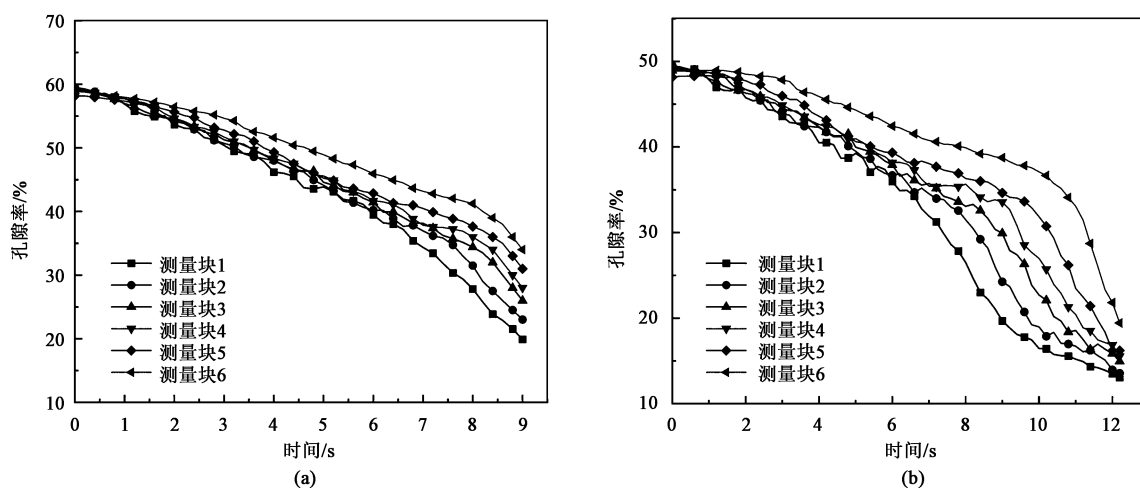


图 11 沙柳颗粒 (a) 和混配料颗粒 (b) 在压缩过程中成型块内轴向各层孔隙率的变化曲线

Fig. 11 Variation curves for porosity of each layer in axial direction for formed block during compression process of Salix particles (a) and mixed ingredient particles (b)

压缩完成时刻,沙柳颗粒成型块内测量块 1 和测量块 6 之间的孔隙率差值为 14.1%,混配料颗粒成型块内测量块 1 和测量块 6 之间的孔隙率差值为 6.36%。这说明在沙柳颗粒之中添加香菇菌渣颗粒能够减小成型块内部的空隙,增加颗粒与颗粒之间的接触面积,使成型块压缩得更为紧实,增强了成型块的稳定性。

## 4 结论

(1) 通过对沙柳颗粒和混配料颗粒进行单轴压缩试验,得到混配料成型块的密度大于沙柳颗粒成型块的密度。说明香菇菌渣颗粒和沙柳颗粒混配成型能够提高成型密度,增强成型块的稳定性。

(2) 对沙柳颗粒和混配料颗粒压缩过程中轴向上的压力传递进行了分析,在压缩完成时刻,沙柳颗粒成型块内轴向各层压缩力差值大于混配料颗粒成型块内轴向各层压缩力的差值,说明沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒混配成型有利于压缩过程中的压力传递。

(3) 沙柳颗粒和混配料颗粒在压缩过程中,其强力链开始时分布在底部,随着颗粒被压缩,其位置逐渐从底部过渡到顶部,并逐渐向下传递。在压缩完成时刻,沙柳颗粒成型块内强接触分布从上至下逐渐减小,混配料颗粒成型块内强接触分布较为均匀,并且其内部强接触数占比大于沙柳颗粒成型块。说明沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒混配成型可以改善强力链在成型块内分布的均匀性,提高强力链的

比例,提高成型块的强度和稳定性。

(4) 沙柳颗粒在和混配料颗粒在压缩过程中,轴向各层孔隙率从上至下逐渐减小。在压缩完成时刻,沙柳成型块轴向各层孔隙率的差值大于混配料成型块轴向各层孔隙率的差值。说明在沙柳颗粒和香菇菌渣颗粒混配成型能够减小成型块内部的空隙,增加颗粒与颗粒之间的接触面积,增强了成型块的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 李震,沙潜毅,李金达,等.沙柳颗粒在不同破碎程度下致密成型的热效应[J].锻压技术,2023,48(2):111-117.  
Li Z, Sha Q Y, Li J D, et al. Arch effect for Salix granules dense forming under different breakage degrees [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 111-117.
- [2] 沈鸿翔.饲草嵌套式环模压机模套的优化设计与试验研究[D].北京:中国农业大学,2018.  
Shen H X. Optimization Design and Experiment Study on the Die Sleeves of the Nested Ring-die Structure of Forage Briquetting Machine [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [3] 于世伟,周剑,张炜,等.粉末高速压制成形件密度影响因素分析[J].中国机械工程,2018,29(9):1120-1126.  
Yu S W, Zhou J, Zhang W, et al. Analysis of influence factors for density of compressed powder products during high velocity compaction [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (9): 1120-1126.
- [4] 孟凡净,刘华博,花少震,等.金属粉末单轴压制过程中的摩擦机制及力学特性分析[J].应用力学学报,2021,38(3):1286-1292.  
Meng F J, Liu H B, Hua S Z, et al. Analysis of frictional mechanism and mechanical characteristics of metal powder in the process of uniaxial pressing [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38 (3): 1286-1292.



- 2021, 38 (3): 1286–1292.
- [5] Xin X F, Wang X F, Lei Z W, et al. Simulation study of single-channel closed cold compression molding for straw biomass [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2019, 13 (3): 329–337.
- [6] 孙启新, 陈书法, 董玉平. 秸秆类生物质成型热黏塑性本构模型构建 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (8): 221–226.
- Sun Q X, Chen S F, Dong Y P. Establishment of thermo viscoplastic constitutive model for straw biomass briquetting [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (8): 221–226.
- [7] Yin Y T, Wang L Y, Cai J J. Study on influence factors to the biomass compression process [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 71–78: 2939–2943.
- [8] 孙其诚, 金峰, 王光谦, 等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构 [J]. 物理学报, 2010, 59 (1): 30–37.
- Sun Q C, Jin F, Wang G Q, et al. Force chains in a uniaxially compressed static granular matter in 2D [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59 (1): 30–37.
- [9] Meng F J, Liu H B, Hua S E, et al. Force chain characteristics of dense particles sheared between parallel-plate friction system [J]. Results in Physics, 2021, 25: 104328–104339.
- [10] Xu Z Y, Meng F J. Investigation of the flow and force chain characteristics of metal powder in high-velocity compaction based on a discrete element method [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2021, 79 (5): 455–467.
- [11] 张炜, 萧伟健, 袁传牛, 等. 离散元法铁粉末压制中粒径分布对力链演化机制的影响 [J]. 力学学报, 2022, 54 (9): 2489–2500.
- Zhang W, Xiao W J, Yuan C N, et al. Effect of particle size distribution on force chain evolution mechanism in iron powder compaction by discrete element method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54 (9): 2489–2500.
- [12] 李震, 高雨航, 刘彭, 等. 沙柳细枝颗粒致密成型过程中力链演变的离散元研究 [J]. 太阳能学报, 2019, 40 (11): 3186–3195.
- Li Z, Gao Y H, Liu P, et al. Discrete element study on evolution of force-chain during Salix grains dense molding [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40 (11): 3186–3195.
- [13] 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 during vibration compression molding of alfalfa [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (2): 33–40.
- [14] 冯启飞. 基于离散元理论的旋回破碎机性能分析及腔型优化 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- Feng Q F. The Crushing Performance Analysis and Chamber Optimization of Qyratory Crusher Based on the Discrete Element Method [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [15] Thakur S C, Morrissey J P, Sun J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model [J]. Granular Matter, 2014, 16 (3): 383–400.

# AFDEX

INTELLIGENT METAL FORMING SIMULATOR

智能化金属成形模拟软件

◆**易用**: 简单、友好, 且在不断优化的操作界面, 大量的学习向导以及应用实例, 使工程师不但上手轻松, 更不会在使用中气馁, AFDEX 可以帮助您轻松分析锻造工艺。

◆**准确**: 超过 500 个实际生产应用案例, 包含复杂的冷温热多工位锻造、闭塞锻造、径向锻造、辊锻、辗环等几乎所有锻压成形工艺的模拟。AFDEX 的准确性和能力, 已经在全球百余家制造企业的生产中得到了验证。

◆**各种结果同时展示**: AFDEX 的后处理平台, 可以在运算的同时, 实时显示各种结果: 变形形状、节点的速度、应变、应变率、应力、金属流线、某点流动、边界节点应力、界面应力、温度分布、损伤、磨损、体积变化、载荷等。

◆**自动分析多步工艺, 轻松进行模具分析**: AFDEX 可以自动对多工位的锻造工艺进行模拟, 无需用户的干预。模具分析与优化是工程师的重要工作, 在 AFDEX 中, 您只需要点击两下鼠标, 即可以对模具进行模拟分析, 结果实时展示给用户。

◆**丰富的材料库与设备模型**: AFDEX 中提供了丰富的开放式材料数据库, 包括美日德标的各种黑色金属、轻合金以及模具钢等两百余种材料数据。用户也可根据自己的需要定制材料库。另外, AFDEX 集成了实际生产中常用的设备模型, 包括液压机、机械压

力机、螺旋压力机、锻锤等。可以满足用户各种成形条件下模拟的需要。

◆**适合多种人群使用**: AFDEX 不强迫锻造工程师了解软件执行的相关理论和有限元方法, 在 AFDEX 的开发理念中, 即使是新手也能轻松的学习和使用它。同时 AFDEX 提供了多国语言界面的支持。

◆**卓越的成本效益**: AFDEX 更了解中国, 专为中国用户而制定的低成本运作政策, 显著降低了用户的采购及使用成本, 具有卓越的成本效益。

◆**我们能够提供的不仅是软件**: AFDEX 一直坚持的开发商与服务商一体化, 可以提供更好的本土化服务与定制服务。中韩技术团队, 为您提供终身的维护服务。在软件之外, 我们更可以为您提供工艺技术开发与制造服务, 协助您进行工艺开发、优化设计、学术研究、装备与生产线建设。

**BRIMET 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号 2 层 邮编: 100083

电话: 010-82415037, 82415024

传真: 010-62943911

E-mail: info@afdex.com.cn, afdexcn@gmail.com

HTTP://WWW.AFDEX.COM.CN

(以上数据和资料由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司提供)