

## 生物质环模成型机致密成型过程振动分析

李 震, 郭新宇, 李金达, 沙潜毅, 岳 强

(内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 环模成型机作为生物质致密成型的主要设备, 成型过程中的剧烈振动问题会影响其工作的稳定性, 降低生物质的成型质量。针对环模成型机成型过程中的振动问题, 根据实际工况在 RecurDyn 和 EDEM 中分别建立环模成型机的动力学仿真模型和离散元模型, 通过联合仿真来模拟环模成型机的攫取过程。根据联合仿真结果, 得到不同主轴转速下环模所受的挤压力情况, 在有限元软件中得到环模的等效应力云图, 结果表明: 环模所受的最大等效应力为 95.930 MPa, 发生在环模模孔入口处。以环模所受最大挤压力作为载荷进行环模成型机预应力模态分析及谐响应分析。根据预应力模态分析得知, 环模成型机变形主要表现为摆动及扭转。根据谐响应分析得到环模成型机在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  方向的振幅-频率曲线, 结果表明, 在第 1 阶、第 3 阶和第 5 阶固有频率处环模成型机容易产生共振, 应避免其在该激励频率附近工作。

**关键词:** 环模成型机; 振动; 多体动力学; 离散元; 预应力模态分析; 谐响应分析

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.025

**中图分类号:** TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0179-08

## Vibration analysis on dense forming process for biomass ring molding machine

Li Zhen, Guo Xinyu, Li Jinda, Sha Qianyi, Yue Qiang

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

**Abstract:** The ring molding machine is the main equipment for dense forming of biomass, and its working stability is affected by severe vibration problem during the forming process, which reduces the forming quality of biomass. Therefore, aiming at the vibration problem of the ring molding machine during the forming process, the dynamic simulation model and the discrete element model of the ring molding machine were established by RecurDyn and EDEM respectively according to the actual working conditions, and the snapping process of the ring molding machine was simulated by co-simulation. Then, according to the co-simulation results, the extrusion force conditions of the ring die under different spindle rotation speeds were obtained, and the equivalent stress cloud diagram of ring die was obtained by the finite element software. The results show that the maximum equivalent stress on the ring die is 95.930 MPa, which occurs at the entrance of die hole for the ring die. Taking the maximum extrusion force on the ring die as the load, the prestressed modal analysis and the harmonic response analysis of the ring molding machine were conducted. According to the prestressed modal analysis, the deformation of the ring molding machine was mainly manifested as swing and torsion, and based on the harmonic response analysis, the amplitude-frequency curves of the ring molding machine in the  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions were obtained. The results show that the resonance in the ring molding machine is easy to occur at the first order, third order and the fifth order natural frequencies, and the operation near these excitation frequencies should be avoided.

**Key words:** ring molding machine; vibration; multibody dynamics; discrete element; prestressed mode analysis; harmonic response analysis

环模成型机因具有高效、低能耗、高成型质量等优点被广泛应用于生物质致密成型领域, 是生物质成型的主要设备。但环模成型机仍存在关键部件磨损严重、寿命较短、成型过程中振动剧烈等问题。

成型机的振动问题会影响生物质的成型质量, 缩短其使用寿命, 因此, 对于环模成型机的振动研究很有必要。Kashaninejad M 等<sup>[1]</sup>的研究表明, 秸秆的成型密度与压缩力的大小成正比, 压缩力越大, 成型密度随之增大; 李鑫<sup>[2]</sup>通过粒子群优化算法对环模制粒机的传动系统进行优化, 提高了传动系统的稳定性; 武凯等<sup>[3]</sup>建立了挤压过程的力学模型, 考虑了物料特性和结构参数对环模扭矩的影响; 蒋清海等<sup>[4]</sup>分析了旋转挤压过程, 确定了物料攫取条件; 李震等<sup>[5]</sup>建立了流固耦合模型, 得到成型过程中环模、压辊的受力和变形情况, 对比无耦合状态,

收稿日期: 2022-04-06; 修订日期: 2022-07-18

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2020LH05020);

国家自然科学基金资助项目 (51666016)

作者简介: 李 震 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: lizhen\_730106@126.com

通信作者: 郭新宇 (1998-), 男, 硕士

E-mail: 1620795130@qq.com

验证了流固耦合模型的准确性。在粉体致密成型方面,李震等<sup>[6]</sup>应用离散元的方法,研究成型过程中沙柳颗粒的运动规律及其能量变化规律。关于离散元与多体动力学耦合的研究,王少杰等<sup>[7]</sup>研究了装载机工作过程中物料对铲斗作业阻力的变化规律;杨望等<sup>[8]</sup>通过 DEM-MBD 耦合方法实现了水稻芽种种群连续排种,结果表明其仿真精度比单独使用离散元法更高;赵丽娟等<sup>[9]</sup>利用 EDEM 与 Adams 双向耦合实现了对采煤机截割部的振动研究,结果更符合工程实际。

传统研究方法将生物质原料当作可压缩的连续性介质,采用连续体塑性理论,通过对环模施加均布载荷得到其应力和应变情况;但实际上生物质原料因其内部细胞构造及排列方式的原因,在力学特性上表现为各向异性<sup>[10]</sup>,经破碎后原料呈离散状态,具有离散性和非连续性,致密成型过程将松散的物料固化为棒状燃料,采用连续体力学分析法研究成型过程与实际有所偏差,而离散元法可以模拟仿真物料间及物料与成型模具间的相互作用,通过添加颗粒还可以模拟实际过程中由于物料不平顺引起的核心部件受力波动及整机的振动问题。本文首先建立生物质环模成型机虚拟样机模型,将多体动力学 RecurDyn 与离散元 EDEM 进行耦合,模拟环模成型机的致密挤压成型过程,并将环模所受的载荷曲线导入 Workbench 中得到环模的等效应力云图,以环模最大挤压力作为载荷条件,对环模成型机整机进行预应力模态分析与谐响应分析,得到成型机振幅和易发生共振的频率区域,为提高环模成型机的工作稳定性提供了参考。工作流程图如图 1 所示。

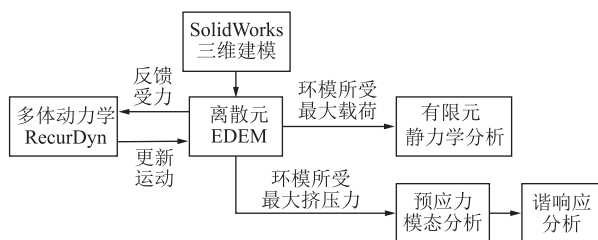


图 1 工作流程图

Fig. 1 Work flow chart

## 1 整机 RecurDyn-EDEM 联合仿真

### 1.1 模型建立及 RecurDyn 参数设定

图 2 为水平环模成型机的几何模型,表 1 为环模成型机的主要结构参数。利用三维软件 SolidWorks

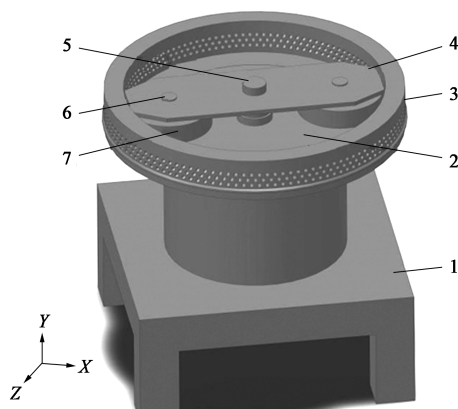


图 2 环模成型机几何模型

1. 支撑架 2. 磨盘 3. 环模 4. 上连接板 5. 主轴  
6. 压辊轴 7. 压辊

Fig. 2 Geometric model of ring molding machine

表 1 环模成型机结构参数

Table 1 Structural parameters of ring molding machine

参数	数值
环模外径/mm	$\Phi 380$
环模内径/mm	$\Phi 330$
环模模孔半径/mm	4
环模与压辊间隙/mm	2
压辊半径/mm	108
主轴转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	360、420、480、540、600

建立环模成型机的整机模型,成型机的振动问题主要发生在成型过程中,对成型机进行适当简化,保留成型部件及支撑架,不考虑动力系统、传动系统及辅助系统对成型过程的影响。将 SolidWorks 模型以 Step 的格式导入 RecurDyn 中,依据环模成型机的实际工况对模型添加运动连接关系。支撑架与环模、地面间相互固连,为主轴添加旋转驱动;压辊对称分布在主轴两侧,主轴通过上连接板与压辊轴相连,主轴、磨盘、上连接板和压辊轴之间采用固定副连接,进而带动两个压辊进行公转运动,压辊自身未驱动;随着楔形区域物料密度的增加,物料与成型模具间的挤压力和摩擦力增大,压辊同时进行自转,在环模和压辊挤压力的共同作用下,当物料克服模孔内壁的摩擦力时,其从模孔中挤出并成型。

### 1.2 刚柔耦合模型建立

生物质致密成型过程中,环模会承受较大的应力,如果将环模设置为刚性体,所受应力的大小与实际有偏差,因此将其设置为柔性体。本文采用 RecurDyn 自带的 FFlex 法进行柔性体的建立,利用

RecurDyn/Mesher 模块对需要柔性化的刚性体模型进行有限元处理，仍然保留原模型中的约束关系，并在设置接触的位置生成创建柔性接触时需要的片集，从而建立环模成型机刚柔耦合多体动力学模型。External SPI 模块中利用 Walls 选取成型机的部件，Export 模块生成 Wall 文件后导入 EDEM 中进行离散元的参数设置。

1.3 离散元颗粒接触模型及参数设置

1.3.1 接触模型

粉碎过后的沙柳颗粒具有各向异性，物理特性复杂，适合采用离散元方法研究成型过程<sup>[11]</sup>，选取的颗粒模型对仿真的准确性有很大影响。球形颗粒接触的理论计算过程复杂，通常简化为软球模型和硬球模型。成型时颗粒经挤压、碰撞后会发生明显的塑性变形，颗粒间及颗粒与成型模具间的接触力远大于颗粒表面的作用力，因此采用软球模型进行模拟。其中，Hysteretic Spring 模型适用于受到较大压力后产生大塑性变形的情况，选取 Hysteretic Spring 模型作为颗粒接触模型。

1.3.2 颗粒模型及参数设置

生物质原料经破碎机粉碎后呈细小颗粒状，主要表现为 3 种形状，即圆柱体、类锥体和椭球体，

为提高仿真效率，采用粒径为  $\Phi 2.5\text{ mm}$  的球形颗粒代替粉碎后的沙柳物料。环模与压辊间的最小间隙为 2 mm，对环模成型机和沙柳颗粒设置材料参数和接触参数，见表 2 和表 3。设置重力加速度沿 Y 轴负方向，为  $9.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。在磨盘上沿环模内壁均匀添加若干虚拟圆柱颗粒工厂，在每个颗粒工厂中均采用动态生成的方式添加 20000 个颗粒，生成速率为每秒 20000 个，设置瑞利时间步长为 20%，网格尺寸设置为最小颗粒半径的 3 倍，即  $3R_{\min}$ 。待颗粒稳定生成后，打开 Coupling Server 接口进行 RecurDyn 与 EDEM 双向耦合，如图 3 所示。

表 2 材料参数设置  
Table 2 Setting of material parameters

材料	泊松比	剪切模量/ $(\times 10^4\text{ MPa})$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
颗粒	0.5	2.00	693.5
模具	0.3	8.28	7850.0

表 3 接触参数设置  
Table 3 Setting of contact parameters

接触类型	静摩擦因数	动摩擦因数	恢复系数
颗粒与颗粒	0.70	0.15	0.50
颗粒与模具	0.56	0.03	0.65

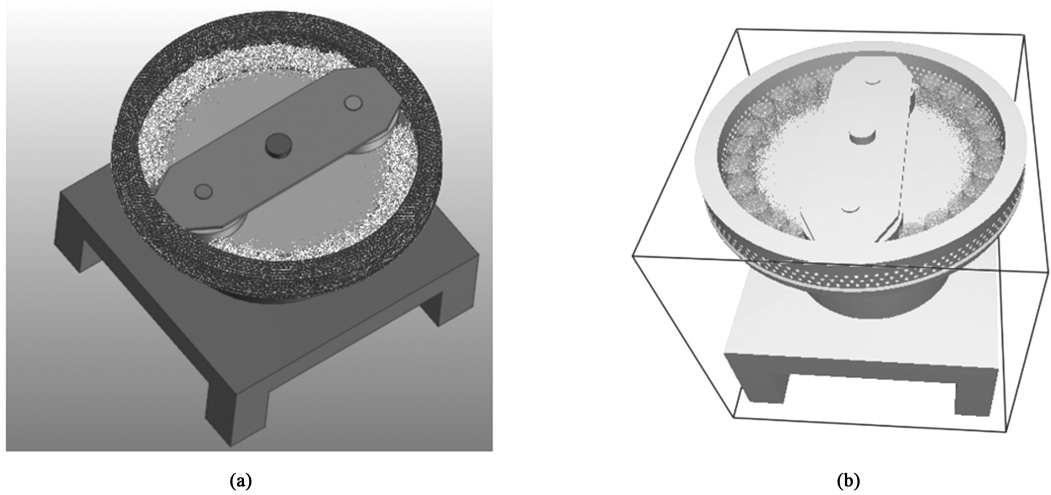


图 3 RecurDyn-EDEM 耦合状态  
(a) RecurDyn 耦合界面 (b) EDEM 耦合界面  
Fig. 3 RecurDyn-EDEM coupling state  
(a) RecurDyn coupling interface (b) EDEM coupling interface

2 EDEM-Workbench 联合仿真

RecurDyn-EDEM 联合仿真后，在 EDEM 数据分析 (Analyst) 模块中可以对成型模具和颗粒进行后

处理，图 4 为主轴转速分别为 360、420、480、540 和  $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  下环模在成型过程中所受的挤压力随时间的变化曲线。工作过程中环模受到的挤压力并不稳定，第 1 阶段中环模不受到物料的挤压力，供料区的沙柳物料与环模接触但不发生挤压，随着

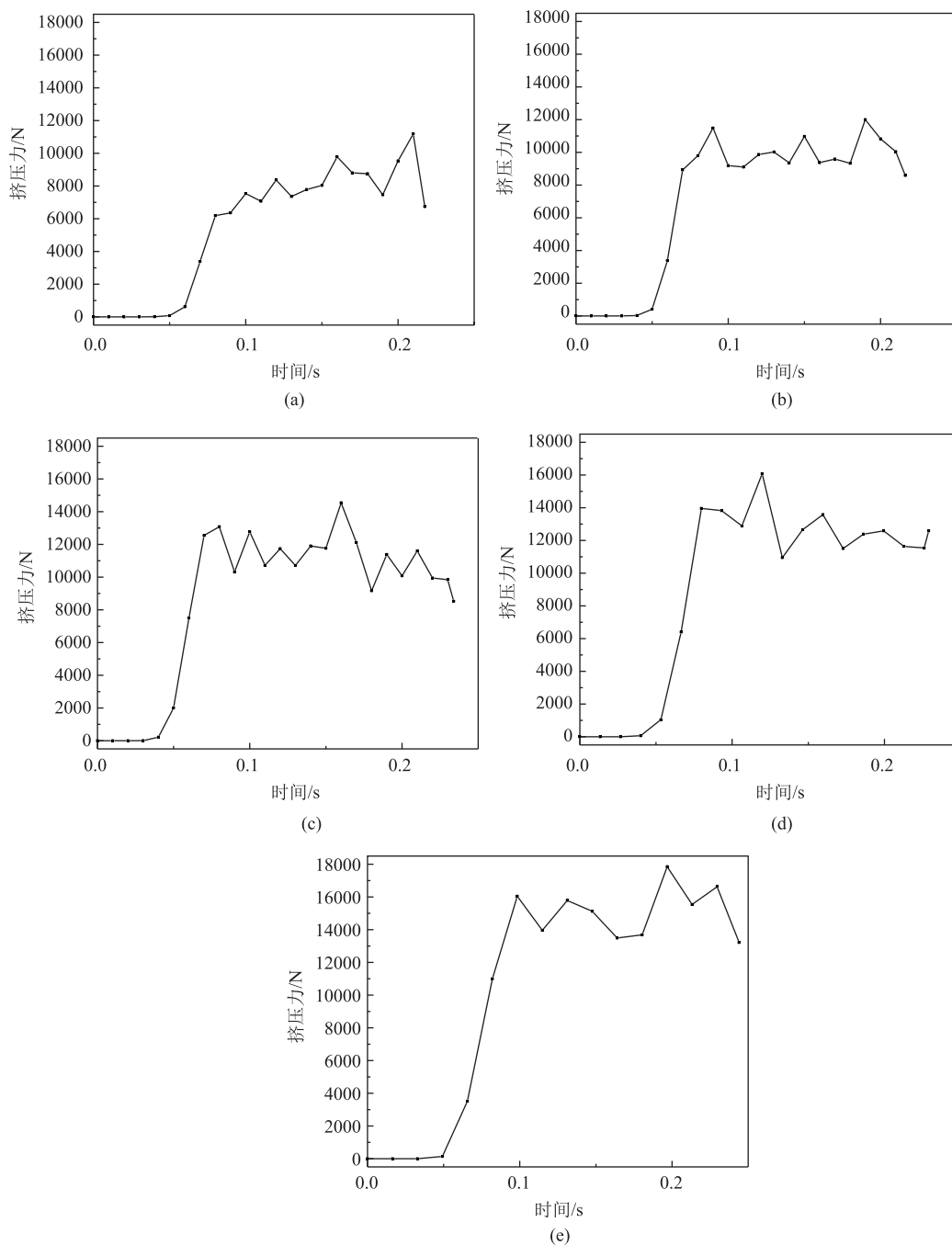


图 4 不同主轴转速下的环模挤压力-时间曲线

(a)  $360 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (b)  $420 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (c)  $480 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (d)  $540 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (e)  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 

Fig.4 Extrusion force-time curves of ring die at different spindle rotation speeds

主轴的旋转, 进入变形压紧区后, 楔形区体积减小, 沙柳物料数量增加, 环模受到物料挤压力的作用并不断增加, 进入挤压成型区后, 致密成型主要发生在这一阶段, 环模所受的挤压力相对稳定, 但是由于添加物料的不平顺性使得挤压力仍会产生不同幅度的波动。由图 5 可以看出, 随着主轴转速的增加, 最大挤压力随之变大。当主轴转速为  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 0.19 s 时的挤压力峰值为 17392.4 N, 将这个力

作为后续预应力模态分析的载荷条件作用到环模上。

环模作为成型机的核心部件, 是工作过程中承受应力最大的部位, 需要对其进行静力学强度分析。从 EDEM 中将环模所受应力以 .axdt 文件类型导出, 利用 EDEM 和 Workbench 间的耦合接口实现数据的传递。将  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时 0.19 s 处的环模挤压力作为输入载荷加载至静力学模块上, 划分网格并求解得到环模的等效应力云图, 如图 6 所示。随着成型



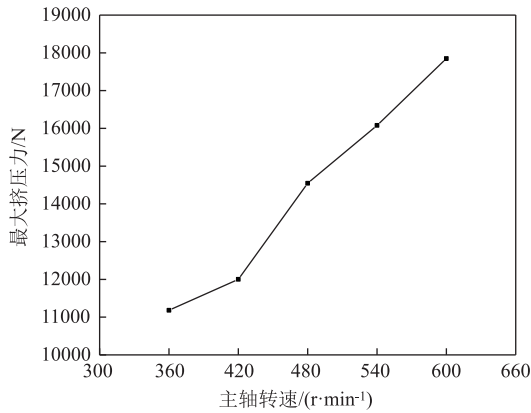


图 5 最大挤压力随主轴转速的变化图

Fig. 5 Changing diagram of maximum extrusion force with spindle rotation speed

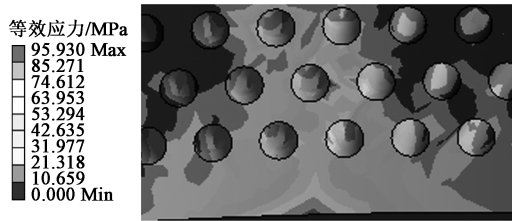


图 6 环模的等效应力云图

Fig. 6 Equivalent stress nephogram of ring die

过程的进行, 楔形区的物料逐渐增加, 受到环模和压辊的共同挤压, 当物料克服模孔处的最大摩擦力后, 被从模孔中挤出成型, 环模所受的最大等效应力发生在模孔的入口处, 大小为 95.930 MPa, 环模材料的许用应力为 253 MPa, 最大等效应力低于许用应力, 符合强度要求。

### 3 预应力模态分析与谐响应分析

#### 3.1 预应力模态分析

以环模模孔所受的最大挤压力作为载荷条件, 对环模成型机进行预应力模态分析。模型结构在外力作用下, 其刚度和固有频率会发生改变, 相比于仅考虑自由模态或者约束模态的分析, 预应力模态分析考虑到环模成型机工作过程中的受力问题, 结果更符合实际工况。动力学通用方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中:  $[M]$  为质量矩阵;  $[C]$  为阻尼矩阵;  $[K]$  为刚度矩阵;  $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$  和  $\{x\}$  分别为加速度矢量、速度矢量和位移矢量;  $\{F(t)\}$  为外界激励;  $t$  为时间。

模态只与机械系统自身的属性有关, 是其固有振动特性, 模态分析时  $\{F(t)\}$  为零, 阻尼矩阵

$[C]$  通常忽略, 则式 (1) 简化为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (2)$$

当系统发生简谐振动时, 即:

$$x = U \sin(\omega t) \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 中, 可得:

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\phi_i\} = 0 \quad (4)$$

式中:  $U$  为特征向量;  $\omega$  为固有频率;  $\omega_i$  为第  $i$  阶固有频率;  $\{\phi_i\}$  为第  $i$  阶振型。

环模导入的 Workbench 中的材料属性与 EDEM 中相同, 采用六面体单元对其进行离散化处理。成型机的固有频率和振型与其材料属性、尺寸大小及约束条件有关, 为了得到环模成型机的模态特征, 需要对其施加约束条件。环模成型机在承受最大压力时振幅最大, 容易发生振动破坏, 因此, 将最大挤压力作为预应力模态分析的加载条件。由图 4 可知, 转速为  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时的最大挤压力为 17392.4 N, 根据在此挤压力作用下环模的等效应力结果 (图 6), 应将挤压力施加至环模模孔处。根据文献 [12], 挤压力主要用于推动物料, 将其从模孔中挤出, 因此, 挤压力方向选取沿  $X$  轴正方向的中间环模内壁模孔处。在结构振动中, 低阶模态的振幅较大, 90% 以上的能量处于前 6 阶模态, 高阶模态对系统的振动的影响较小, 能量占比小 [13], 因此, 通常只考虑前 6 阶的模态频率及振型, 如图 7 所示, 表 4 为前 6 阶固有频率及其振型描述。

外界激励与环模成型机的固有频率接近时会产生共振, 根据图 7 和表 4 可知, 环模成型机的变形以摆动为主, 同时伴随着扭转和俯仰。当发生以上变形时, 环模除了受到物料的挤压力外, 还会受到压辊的碰撞作用, 加快环模疲劳破坏, 扭转振动时主轴扭矩变大, 这些问题会减少成型机的使用寿命, 影响物料的成型质量。

#### 3.2 谐响应分析

谐响应分析用于分析线性结构受到已知正弦 (简谐) 规律变化的载荷时的稳态响应, 用来计算结构的稳态受迫振动, 帮助设计人员预测结构的持续性动力特性, 验证结构的设计能否成功地克服共振、疲劳等受迫振动引起的危害。谐响应分析时式 (1) 中的右侧变为:

$$\{F(t)\} = \{F(t) \sin(\theta t)\} \quad (5)$$

式中:  $\theta$  为激振力的频率。

则式 (1) 变换为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t) \sin(\theta t)\} \quad (6)$$

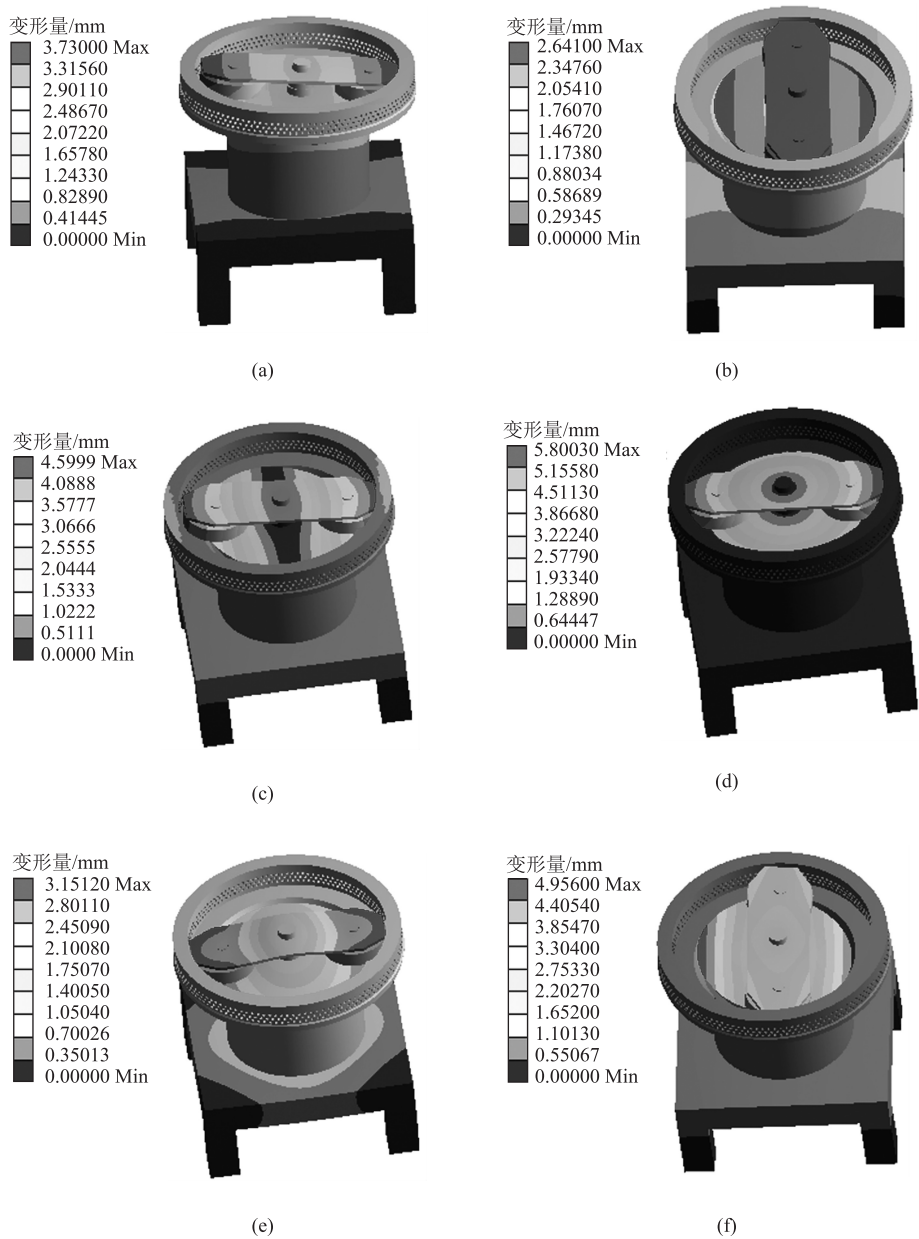


图 7 环模成型机前 6 阶振型图

(a) 第 1 阶 (b) 第 2 阶 (c) 第 3 阶 (d) 第 4 阶 (e) 第 5 阶 (f) 第 6 阶  
Fig. 7 The first six orders of vibration mode diagrams for ring molding machine  
(a) The first order (b) The second order (c) The third order (d) The fourth order  
(e) The fifth order (f) The sixth order

表 4 环模成型机预应力模态分析的频率及振型

Table 4 Frequencies and vibration modes for prestressed mode analysis of ring molding machine

阶数	固有频率/Hz	振型描述
第 1 阶	225. 90	环模成型机在 XOY 平面内整体摆动
第 2 阶	234. 79	环模成型机在 YOZ 平面内整体摆动
第 3 阶	309. 74	压辊、磨盘、上连接板在 XOY 平面内摆动
第 4 阶	343. 66	压辊、磨盘、上连接板在 XOZ 平面内扭转
第 5 阶	366. 95	环模成型机上下俯仰振动
第 6 阶	370. 59	压辊、磨盘、上连接板在 YOZ 平面内摆动

谐响应分析通常采用 3 种方法，即完全法、缩减法和模态叠加法，相比于其他方法，模态叠加法的计算速度较快，因此采用此方法进行谐响应分析。简谐力施加的位置与预应力模态分析相同，方向沿 X 轴正向，幅值为 17392.4 N，频率范围为 200 ~ 400 Hz，求解间隔为 150。求解得到 X、Y 和 Z 方向的振幅-频率响应曲线，如图 8 所示。

由谐响应分析结果可知，环模成型机在 X 和 Z 方向的振幅在 226 Hz 处达到峰值后急剧下降，Y 方

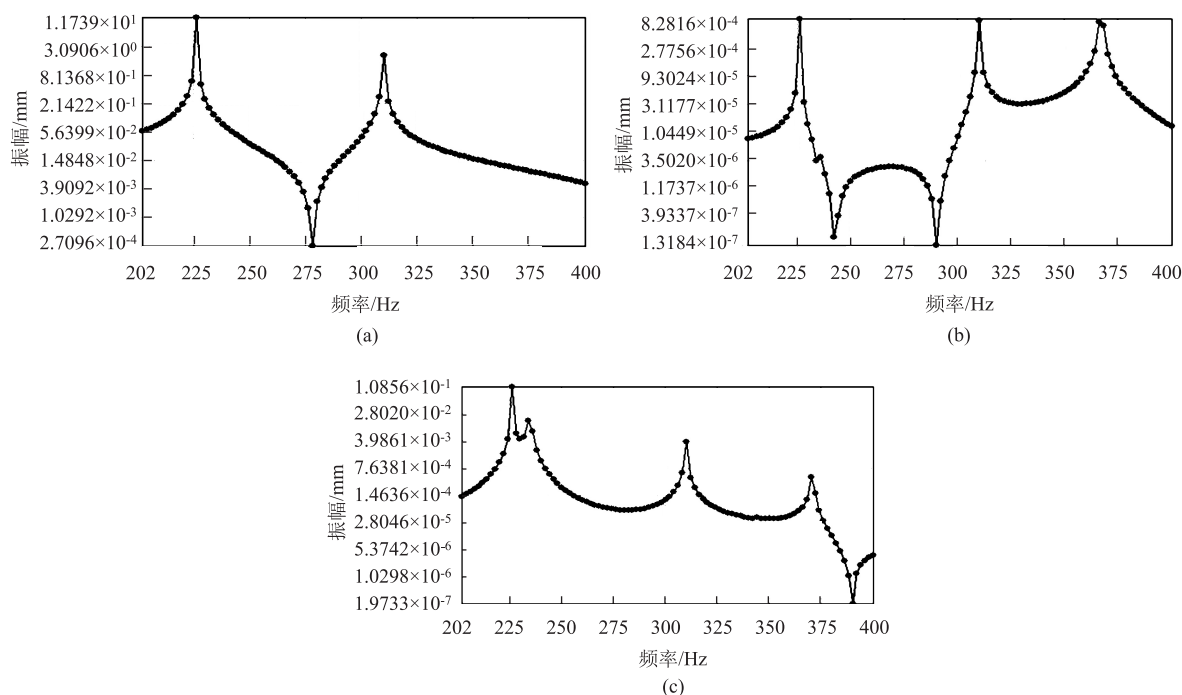


图8 环模成型机谐波响应分析结果图

(a) X方向的振幅-频率响应曲线 (b) Y方向的振幅-频率响应曲线 (c) Z方向的振幅-频率响应曲线

Fig. 8 Result diagrams of harmonic response analysis for ring molding machine

(a) Amplitude-frequency response curve in X direction (b) Amplitude-frequency response curve in Y direction

(c) Amplitude-frequency response curve in Z direction

向的振幅在 226、310 和 366 Hz 处最大, 对比模态分析的第 1 阶、第 3 阶、第 5 阶模态, 可以判断出环模成型机在频率为 226、310 和 366 Hz 处容易发生共振。为提高环模成型机的工作稳定性, 工作时应该避免该激励频率。

## 4 结论

(1) 建立环模成型机虚拟样机模型, 利用 RecurDyn-EDEM 联合仿真模拟环模成型机致密成型过程, 得到 5 种主轴转速下环模所受的挤压力曲线及等效应力云图, 结果表明, 挤压力随主轴转速的增加而增大, 主轴转速为  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时的最大挤压力为 17392.4 N, 对应环模所受最大等效应力为 95.93 MPa, 远低于其许用应力, 满足强度要求。

(2) 以  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的主轴转速下环模所受最大挤压力 17392.4 N 作为载荷加载条件进行预应力模态分析及谐波响应分析。预应力模态分析表明, 环模成型机前 6 阶固有频率在 225.90~370.59 Hz 之间, 振型主要表现为摆动和扭转振动。根据谐波响应分析得知, 环模成型机在 226、310 和 366 Hz 处的

振幅最大, 容易发生共振, 工作时避免该激励频率能够提高环模成型机的稳定性。

## 参考文献:

- [1] Kashaninejad M, Tabil L G, Knox R. Effect of compressive load and particle size on compression characteristics of selected varieties of wheat straw grinds [J]. Biomass & Bioenergy, 2014, 60: 1-7.
- [2] 李鑫. 环模制粒机振动与优化研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.  
Li X. Vibration and Optimization Research of Ring Die Pellet Mill [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2021.
- [3] 武凯, 施水娟, 彭斌彬, 等. 环模制粒挤压过程力学建模及影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (12): 142-147.  
Wu K, Shi S J, Peng B B, et al. Modeling and analysis on extruding force in pelleting process [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26 (12): 142-147.
- [4] 蒋清海, 孙宇, 肖宏儒, 等. 旋转挤压成型机理分析与建模 [J]. 中国农机化学报, 2018, 39 (6): 11-16.  
Jiang Q H, Sun Y, Xiao H R, et al. Mechanism analysis and modeling on pelletization process [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39 (6): 11-16.
- [5] 李震, 王鹏, 刘彭, 等. 基于流固耦合的环模成型机关键部件疲劳寿命分析 [J]. 林业工程学报, 2020, 5 (1): 122-

- 128.
- Li Z, Wang P, Liu P, et al. Fatigue life analysis of key components of ring molding machine based on fluid-solid coupling [J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5 (1): 122-128.
- [6] 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.
- [7] 王少杰, 殷月, 余圣峰, 等. 基于 RecurDyn-EDEM 的装载机耦合动力学仿真分析 [J]. 机械设计, 2021, 38 (11): 1-6.
- Wang S J, Yin Y, Yu S F, et al. Dynamic analysis on loader coupling based on RecurDyn-EDEM [J]. Journal of Machine Design, 2021, 38 (11): 1-6.
- [8] 李凤姣, 杨望, 杨坚, 等. 基于 DEM-MBD 的水稻电磁振动排种仿真模型研究 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (12): 192-197.
- Li F J, Yang W, Yang J, et al. Simulation model of rice electromagnetic vibrated seeding based on DEM-MBD [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43 (12): 192-197.
- [9] 赵丽娟, 孙国强. 基于双向耦合的采煤机截割部振动特性研究 [J]. 机械设计, 2021, 38 (2): 29-34.
- Zhao L J, Sun G Q. Research on the vibration characteristics of the shearer's cutting section based on two-way coupling [J]. Journal of Machine Design, 2021, 38 (2): 29-34.
- [10] 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 Q X, Zhang R J, Dong Y P. 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.
- [11] 李玉迪, 许宏光, 荆成虎. 闭式生物质热压成型传热模拟 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50 (7): 30-37.
- Li Y D, Xu H G, Jing C H. Simulation of heat transfer model of closed biomass thermo-compression formation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50 (7): 30-37.
- [12] 沈柳柳. 水稻秸秆压块立式环模成型机理及挤压力试验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- Shen L L. Forming Mechanism and Extrusion Pressure Experiment Study on Rice Straw Briquetting Machine with Vertical Ring Die [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [13] 袁余星, 郑松林, 李应军, 等. 某商用车仪表板横梁模态和静刚度分析 [J]. 机械设计与制造, 2016, 303 (5): 75-78.
- Yuan Y X, Zheng S L, Li Y J, et al. Modal and static stiffness analysis for commercial vehicle's CCB [J]. Machinery Design and Manufacture, 2016, 303 (5): 75-78.

## 欢迎订阅《塑性工程学报》杂志



欢迎关注微信公众号

《塑性工程学报》(Journal of Plasticity Engineering)创刊于1994年,是由中国科学技术协会主管、中国机械工程学会主办的学术刊物。《塑性工程学报》为全国中文核心期刊,被众多知名数据库收录:中文核心期刊要目总览(北大)、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊(核心库)、中国科技期刊引证报告统计源核心期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、中国学术期刊文摘数据库(核心版,CSAD-C)、中国学术期刊综合评价数据库、美国化学文摘CA、美国剑桥科学文摘材料信息(CSA:MI)、Scopus数据库、日本科学技术振兴机构中国文献数据库等。本刊主要报道与塑性成形领域及其交叉学科相关的前沿性、创新性的基础理论研究及工程技术应用等优秀科研成果。

### 办刊宗旨:

活跃本专业学术思想,提高本专业学术理论,强化本专业学术交流,为不断提高我国塑性工程基础水平,确立我国塑性工程界在世界科技阵容中的地位而服务。

### 读者对象:

本刊适用于从事与材料塑性成形理论研究、科研、生产、设计等相关的高校师生、科研人员及专业技术人员阅读。

### 本刊订阅方式

1. 全国各地邮局均可直接订阅  
本刊为月刊,大16开本,每月末出版  
邮发代号: 80-353  
国际标准刊号: ISSN 1007-2012  
国内统一刊号: CN 11-3449/TG  
国内定价: 40.00元/册
2. 逾期未定上者,可与编辑部联系订阅  
汇款地址: 北京市海淀区学清路18号  
收款人: 《塑性工程学报》编辑部  
联系人: 薛老师  
联系电话/传真: 010-62912592  
电子邮箱: sxgxcb@263.net

欢迎投稿, 网址: <http://sxgc.cbpt.cnki.net/>