

模具

基于离散元-有限元耦合生物质成型模具寿命分析

李 震, 李金达, 沙潜毅, 于 跃, 于 今, 高耀东

(内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 以沙柳细枝颗粒为生产原料, 对环模成型机进行综合分析, 并根据环模成型机的实际攫取物料工况, 建立环模成型机的动力学仿真模型和物料离散元模型, 利用 ADAMS 与 EDEM 对沙柳细枝颗粒的攫取过程进行 DEM-MBD 联合仿真, 解决单一软件 EDEM 仿真压辊不能依靠摩擦力转动的问题, 使仿真结果更加接近实际情况, 并对仿真结果进行分析。结果表明: 当环模转速为 $3\sim 5\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 颗粒所受最大压力随着环模转速的增加而增加, 而当环模转速增大至 $5\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, 颗粒所受最大压力随着环模转速的增加而减小。将离散元与有限元进行耦合, 对环模成型机的应力和变形进行分析, 结果表明: 环模和压辊的最大变形量分别为 0.550760 和 0.42516 mm , 最大等效应力分别为 79.0710 和 32.6810 MPa , 均发生在环模与压辊的最小间隙处。使用 Ncode Designlife 疲劳分析软件分析环模和压辊的疲劳寿命云图, 结果表明环模较压辊更容易发生疲劳破坏。

关键词: 环模成型机; 疲劳寿命; 沙柳细枝颗粒; 离散元; 有限元

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.026

中图分类号: TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 08-0171-07

Life analysis on biomass forming mold based on discrete element and finite element coupling

Li Zhen, Li Jinda, Sha Qianyi, Yu Yue, Yu Jin, Gao Yaodong

(College of Machine Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Taking the salix twig granules as the production raw material, the ring molding machine was analyzed comprehensively, and according to the actual material grabbing situation of the ring molding machine, the dynamic simulation model and material discrete element model of the ring molding machine were established. Then, the grasping process of salix twig granules was DEM-MBD joint simulated by ADAMS and EDEM, which solved the problem that the pressure roller could not rely on friction to rotate by the single software EDEM simulation so that the simulation results were closer to the actual situation, and the simulation results were analyzed. The results show that the maximum pressure on the granules increases with the increasing of rotate speed for ring mold when the rotate speed of ring mold is $3\sim 5\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$, and when the rotate speed of ring mold increases to $5\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$, the maximum pressure on the granules decreases with the increasing of rotate speed of ring mold. Furthermore, the stress and deformation of the ring molding machine were analyzed by coupling between discrete element and finite element. The results show that the maximum deformation amount of ring mold and pressure roller is 0.550760 and 0.42516 mm respectively, and the maximum equivalent stress is 79.0710 and 32.6810 MPa respectively, which all occur at the minimum gap between ring mold and pressure roller. The fatigue life nephograms of ring mold and pressure roller were analyzed by fatigue analysis software Ncode Designlife. The results show that the ring mold is more prone to fatigue damage than the pressure roller.

Key words: ring molding machine; fatigue life; salix twig granules; discrete element; finite element

生物质能源是一种新型、无污染的可再生能源^[1]。我国作为一个农业大国, 生物质能源非常丰

富, 但因其松散和密度小等特性, 很难运输和保存, 而生物质成型技术可以提高运输和储存能力^[2-3]。目前, 已有国内外专家和学者针对环模成型机在工作时所受的应力、磨损与疲劳寿命进行了研究。Celik H K 等^[4]运用有限元软件, 改变长径比和压力之间的关系, 使环模成型在性能上得到了提高。Holm J K 等^[5]对生物质环模造粒过程中模孔内物料的受力进行了理论分析。蒋清华等^[6]发现环模的主要磨损机理为抛光磨损、磨粒磨损和疲劳磨损, 不

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-10-10

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: 李金达 (1995-), 男, 硕士

E-mail: 1005025847@qq.com

同部位的主要磨损机制不同。李震等^[7]将流体域和固体域结果进行耦合分析,发现环模比压辊更容易受到疲劳破坏。武凯等^[8]研究了环模成型机扭矩模型。周亮等^[9]通过设计优化环模结构,使环模的耐磨性得到了提高。目前,环模成型机仍存在许多问题,例如易磨损、寿命短和成本高等。

采用传统方法对环模所受应力及疲劳寿命进行的分析主要分为两种:(1)通过对环模和压辊施加均布载荷,但物料在成型过程中,随着物料经过送料区、变形压紧区、挤压成型区这3个阶段,物料从弹性变形转变为弹塑性变形,此时物料与环模和压辊之间的挤压力也不断发生变化,所以导致了物料在环模和压辊之间的作用力分布不均,最后所得到的结果与实际过程存在误差;(2)将物料看作为流体,通过流固耦合对环模成型机进行综合分析,此方法忽略了颗粒孔隙率对环模所造成的影响,所以最后所得到的仿真结果与实际过程存在误差。为了减小误差,本文采用离散元 EDEM 与多体动力学 ADAMS 联合仿真实验,并对仿真结果进行了分析;将离散元与有限元进行耦合,对环模成型机进行了应力和变形分析;使用 Ncode Designlife 疲劳分析软件对环模成型机进行了疲劳寿命预测,得到了疲劳寿命分布云图。

1 环模成型机结构尺寸与工作原理

1.1 结构尺寸

当环模成型机中物料处于工作区域时,通过环模和压辊的挤压来实现对物料的成型,所以多排模孔物料之间的影响可以忽略。因此,采用单排环模进行计算和分析,可提高运算效率,减少仿真时间。生物质原料采用沙柳细枝颗粒,环模成型机模型分为环模和压辊,采用 Solidworks 建立三维模型,如图 1 所示。

1.2 工作原理

环模成型机的关键工作部件——环模,在电机的驱动下做顺时针转动,将调制好的物料通过导料机构导入制粒室中,物料逐渐被攫入环模与压辊的工作区域。随着环模的顺时针驱动,带动物料前行,推动压辊与环模同向转动,随着物料前进的速度加快,挤压力和密度随之增加,当物料受到的挤压力大到足以克服其与模孔内壁的摩擦力时,物料被挤压进模孔,并随着模辊不断旋转而被不断地从模孔挤出^[10-11],挤出的成型材料由切刀切断,形成颗粒状的生物质燃料,如图 2 所示。



图 1 环模和压辊几何模型

Fig. 1 Geometric model of ring mold and pressure roller

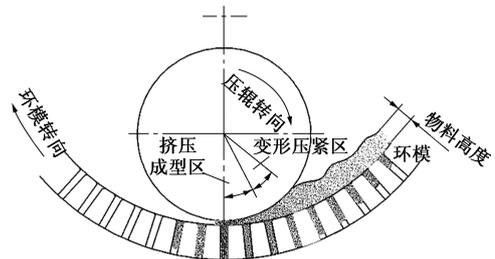


图 2 生物质环模成型机原理图

Fig. 2 Principle diagram of biomass ring molding machine

2 离散元 EDEM-多体动力学 ADAMS 联合仿真

2.1 多体动力学 ADAMS 参数确定

由于环模成型机中的压辊是通过沙柳细枝颗粒与压辊之间的摩擦力而驱动的,这一工况在 EDEM 环境中无法驱动压辊,所以引入多体动力学软件 ADAMS 来驱动压辊,如图 3 所示。

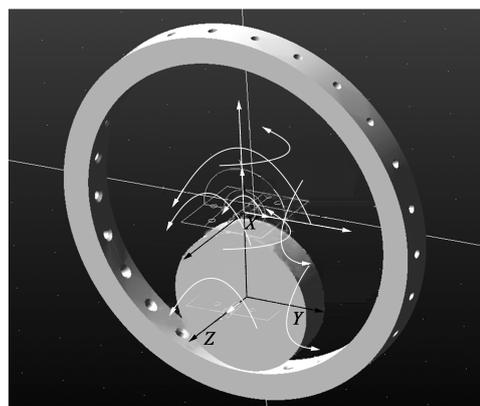


图 3 ADAMS 模型

Fig. 3 ADAMS model

在环模和压辊的各个质心设置添加转动副,并在环模的中心添加旋转驱动,在环模和压辊质心处

各添加 GFORCE 来定义联合部件与物料间的相互作用力。在 GFORCE 里切换子程序，设置程序名称为 ACSI_ADAMS。

通过生成 Adm 模型语言文件，编写 Acf 命令控制文件，配置耦合仿真文件 Cosim 及环境变量，在 Co-simulation 中加载耦合仿真文件后即可实现 EDEM-ADAMS 的双向实时数据传递。

2.2 离散元接触模型及 EDEM 参数确定

2.2.1 离散元接触模型

本离散元模型主要采用沙柳细枝颗粒，力学性能与金属不同，存在各向异性，采用连续体理论很难深入分析研究，因此采用离散元法来进行研究^[12]。Hysteretic Spring 模型与生物质成型过程中颗粒体的接触和变形及其受力情况极为相似，所以生物质成型过程中的接触模型以 Hysteretic Spring 模型为理论基础进行建立^[13]。

2.2.2 离散元 EDEM 参数确定

EDEM 中设置的材料参数主要包括环模、压辊、沙柳细枝颗粒 3 部分，相关参数设置如表 1 和表 2 所示。

表 1 材料参数设置

Table 1 Setting of material parameters

材料	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)	剪切模量/MPa
颗粒	0.40	720	2.00×10 ²
模具	0.25	7800	8.28×10 ⁴

导入由 SolidWorks 软件建立的仿真模型，设定模型零件的材料参数，设置动力加速度为沿 Y 轴负

表 2 接触参数设置

Table 2 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	0.42	0.02	0.46
颗粒与模具	0.56	0.03	0.65

方向，大小为 9.81 m · s⁻²，采用动态生成方式，模拟时间步长设置为 20%，数据储存率设置为 0.01，以距离模辊最小间隙 33°处为基准位置进行颗粒生成仿真，生成颗粒数量为 6000 个，颗粒落在环模内壁，待其完全稳定后进入待攫取状态，如图 4 所示。

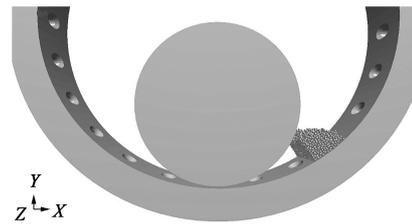


图 4 环模成型机待攫取状态

Fig. 4 State of being picked up for ring molding machine

2.3 EDEM-ADAMS 联合仿真

基于 DEM-MBD 联合仿真方法，本文使用多体动力学 ADAMS 与离散元 EDEM 软件来模拟计算环模成型机的工作过程。在模拟的过程中，DEM 与 MBD 数据通过 ACSI 工具传输交互，使用 DEM-MBD 联合仿真，可以解决单一软件 EDEM 仿真压辊不能依靠摩擦力转动的问题^[14]。具体流程如图 5 所示。

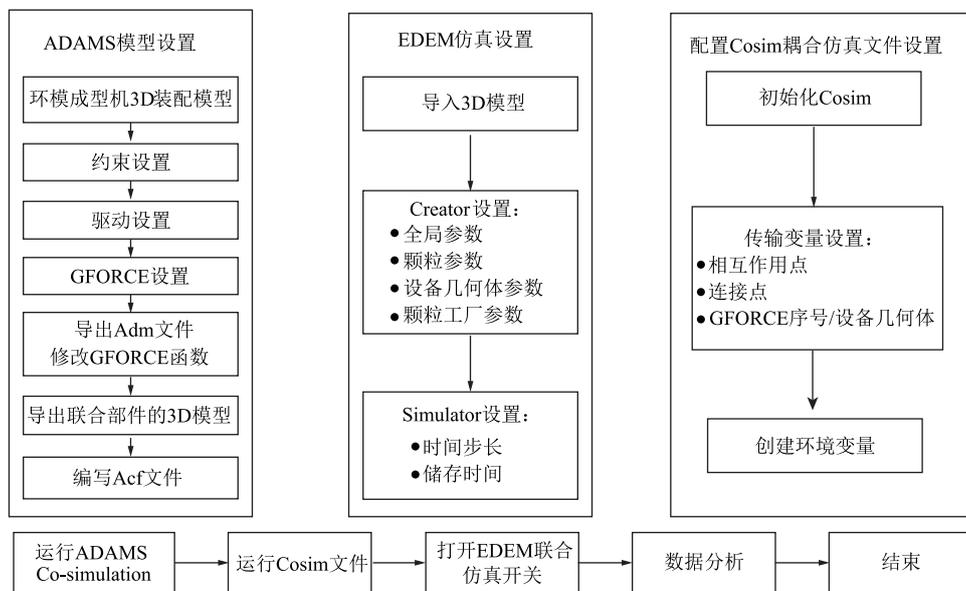


图 5 ADAMS-EDEM 联合仿真流程图

Fig. 5 Flow chart of ADAMS-EDEM co-simulation

本文仿真设定粒径为 2.2 mm 的球形颗粒来代替粉碎后的沙柳细枝颗粒,并在模辊最小间隙为 2.1 mm 时,分别仿真计算环模转速为 3、4、5、6、7、8 $r \cdot s^{-1}$ 时,颗粒所受到的压力-时间曲线如图 6 所示。

仿真得到颗粒所受的最大压力值、压力峰值

时间,如表 3 所示。当环模转速为 3~5 $r \cdot s^{-1}$ 时,沙柳细枝颗粒所受最大压力随着环模转速的增加而增加,而当环模转速增大至 5 $r \cdot s^{-1}$ 后,沙柳细枝颗粒所受最大压力随着环模转速的增加而减小,如图 7 所示。考虑环模成型机对沙柳细枝颗粒压力的影响,选取环模转速为 5 $r \cdot s^{-1}$ 。

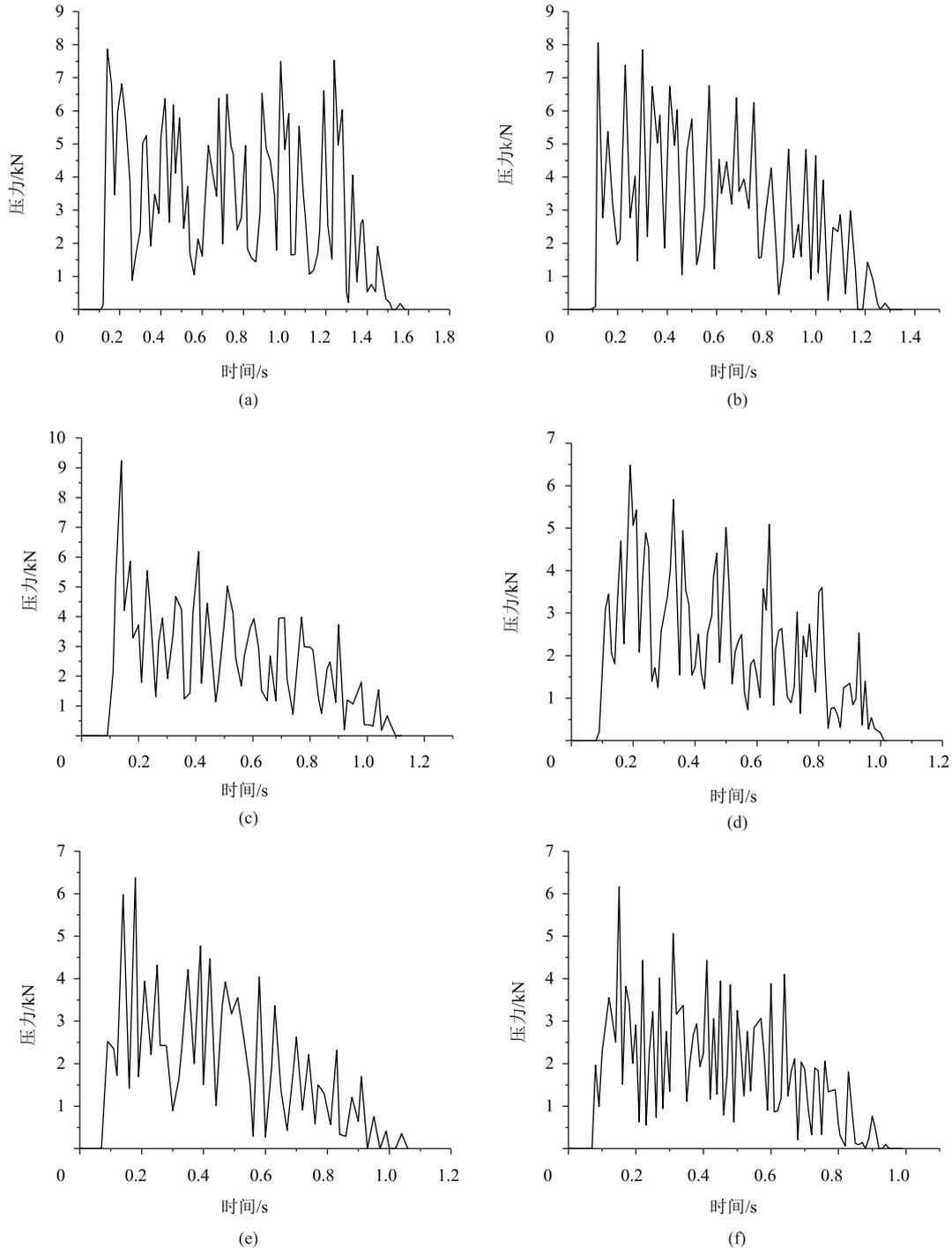


图 6 不同环模转速下压力-时间曲线

(a) $3 r \cdot s^{-1}$ (b) $4 r \cdot s^{-1}$ (c) $5 r \cdot s^{-1}$ (d) $6 r \cdot s^{-1}$ (e) $7 r \cdot s^{-1}$ (f) $8 r \cdot s^{-1}$

Fig. 6 Compressive force-time curves under different rotate speeds of ring mold

表 3 不同环模转速时各影响因素数据

Table 3 Data of various influencing factor under different rotate speeds of ring mold

因素	环模转速/(r·s ⁻¹)					
	3	4	5	6	7	8
最大压力/N	7869.8	8059.2	9235.1	6480.1	6378.9	6163.3
峰值时间/s	0.14	0.12	0.14	0.19	0.18	0.15

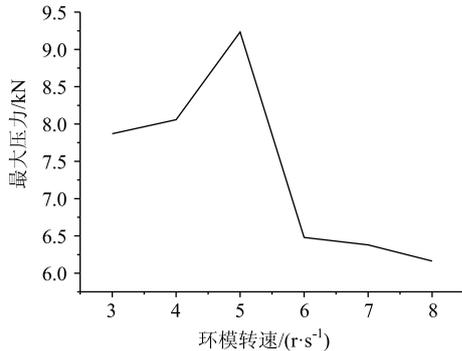


图 7 最大压力随环模转速的变化曲线

Fig. 7 Changing curve of maximum compressive force with rotate speed of ring mold

3 EDEM 与 Workbench 耦合仿真

通过模拟沙柳细枝颗粒在环模成型机内攫取时沙柳细枝颗粒对环模与压辊所产生的力，将离散元模拟数据与有限元进行结合，EDEM-Workbench 接口进行连接，起到传递数据的作用。从图 6c 可以看出，0.14 s 时沙柳细枝颗粒所受到的压力最大，因此，选取 0.14 s 来进行环模和压辊的等效力与变形的分析，从 EDEM 中导出此时刻沙柳细枝颗粒对环模和压辊的作用力数据并导入 Results 中，将 EDEM 计算出的作用力信息输入至静力学模块中，加载作用力并进行网格划分后求解计算，得到压辊和环模的变形云图和等效力云图（图 8 和图 9）。随着环模成型机不断地挤压，使得楔形区域的物料高度逐渐减小，所受压力增大。从图 8 中可以看出，颗粒经过最小间隙时，压辊的最大变形量为 0.42516 mm，压辊受到的最大等效力为 32.6810 MPa，而最小间隙左端，压辊和环模的间隙逐渐增大，压辊的挤压力也随之减小。在图 8 中也可以看出，

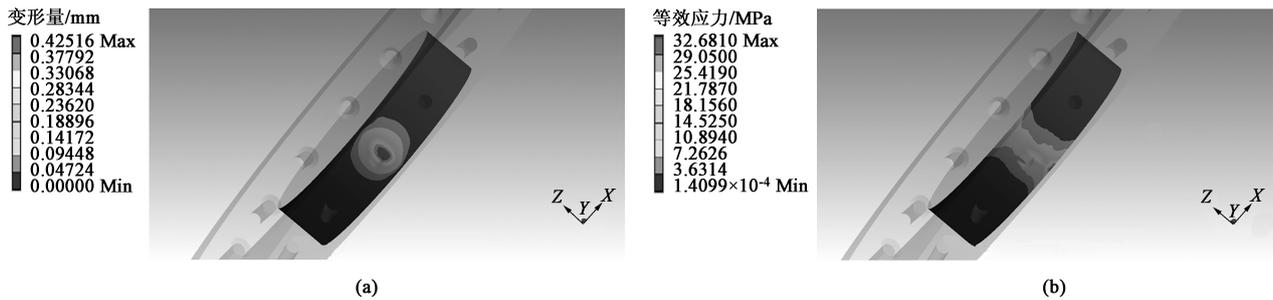


图 8 压辊变形量 (a) 与等效力 (b) 云图

Fig. 8 Cloud diagrams of deformation amount (a) and equivalent stress (b) for pressure roller

物料的致密主要是来源于环模和压辊的挤压^[15]。

环模内壁上的颗粒经过最小间隙处，一部分被挤压进模孔，一部分继续绕着环模内壁继续旋转，

如图 9 所示，环模内壁颗粒经过最小间隙时，环模的最大变形量为 0.550760 mm，环模受到的最大等效力为 79.0710 MPa。

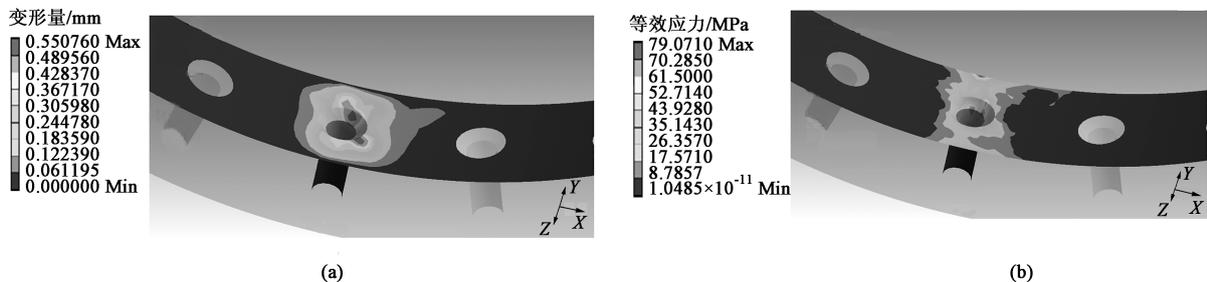


图 9 环模变形量 (a) 与等效力 (b) 云图

Fig. 9 Cloud diagrams of deformation amount (a) and equivalent stress (b) for ring mold

4 环模、压辊疲劳寿命分析

环模成型机在工作过程中,不断受到压辊与物料的摩擦挤压力,使环模和压辊容易受到周期性的疲劳弯曲应力和疲劳接触压应力,使得环模和压辊发生疲劳破坏^[16]。根据环模成型机的实际工作情况,环模成型机属于高周疲劳,故采用应力疲劳分析方法^[17]。

4.1 疲劳特性确定

首先建立环模、压辊材料的正应力幅值力与应力循环次数曲线(S-N曲线),环模压辊的主要材料为20CrMnTi钢。假设环模和压辊所受到的载荷为恒幅载荷,在Ncode Designlife软件中,根据材料参数,建立材料理论的S-N曲线,最后经过抗拉极限修正得到S-N曲线,如图10所示。

4.2 疲劳寿命分析

在Ncode Designlife软件中进行环模、压辊疲劳寿命分析。将材料、循环载荷、应力参数设置完成后,分析得到的环模及压辊疲劳寿命云图如图11所示。

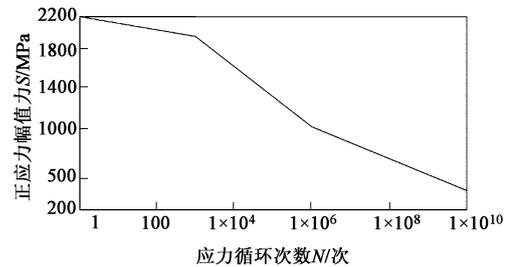


图 10 环模成型机修正后的 S-N 曲线

Fig. 10 S-N curve of ring mdding machine after correction

示。从图11a中可以看出,压辊疲劳破坏主要发生在环模与压辊的最小间隙处,且压辊中间的疲劳寿命较短,靠近压辊的两个壁面的疲劳寿命较长,压辊的最小寿命为 6.428×10^6 次。环模内壁磨损主要是由沙柳细枝颗粒的微切削性磨粒与疲劳磨损相互作用造成的。从图11b中可以看出,环模内壁的疲劳破坏主要发生在环模与压辊靠近模孔的最小间隙处,其主要原因是由于压辊不断地将沙柳细枝颗粒压入环模的模孔内,容易产生应力集中,环模的最小寿命为 4.075×10^6 次。通过环模和压辊的疲劳寿命分析,可以看出环模比压辊更容易发生疲劳破坏。

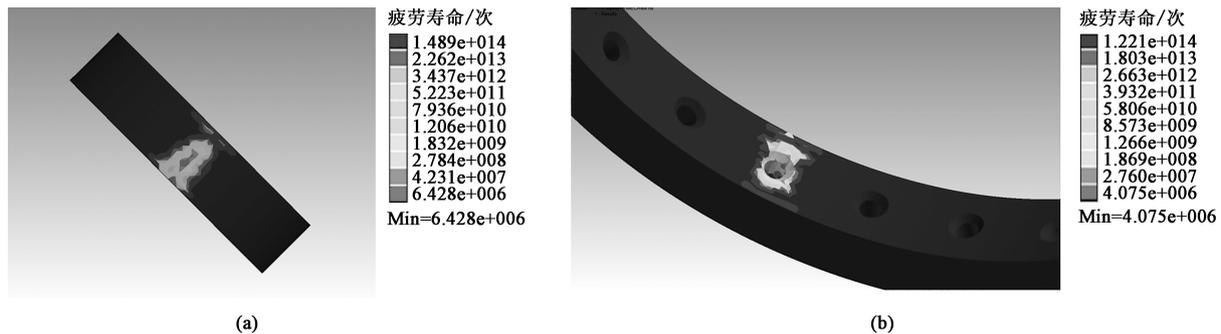


图 11 压辊 (a) 与环模 (b) 疲劳寿命云图

Fig. 11 Cloud diagrams of fatigue life for pressure roller (a) and ring mold (b)

5 结论

(1) 应用 EDEM-ADAMS 联合仿真建立环模成型机的工况模型,解决单一软件 EDEM 仿真压辊不能依靠摩擦力转动的问题,使结果更加接近实际情况。

(2) 分析了环模成型机在工作时 6 种不同的环模转速在挤压过程中的压力变化情况。结果表明:沙柳细枝颗粒所受到的最大压力并不随着环模转速的增加而一直增加,而是当环模转速增大至 $5 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$

后,沙柳细枝颗粒所受到的最大压力随着环模转速的增大而减小。

(3) 通过 EDEM-Workbench 耦合仿真得到了环模和压辊的等效力和变形云图。利用 Ncode Designlife 软件建立 20CrMnTi 钢材料的 S-N 曲线,得到了压辊和环模的疲劳寿命云图,结果表明:与压辊相比,环模更容易发生疲劳破坏。

参考文献:

- [1] 简相坤,刘石彩. 生物质固体成型燃料研究现状及发展前景[J]. 生物质化学工程, 2013, 47 (2): 54-58.

- Jian X K, Liu S C. Research status and development prospect of densified biofuel [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2013, 47 (2): 54-58.
- [2] 施水娟, 武凯, 蒋爱军. 制粒过程中环模力学模型的建立及有限元分析 [J]. *机械设计与制造*, 2011, (1): 38-40.
- Shi S J, Wu K, Jiang A J. Mechanical model establishment and finite element analysis of ring die in pelletizing [J]. *Mechanical Design & Manufacture*, 2011, (1): 38-40.
- [3] Peter Daugbjerg Jensen, Michäel Temmerman, Susanne Westborg. Internal particle size distribution of biofuel pellets [J]. *Fuel*, 2011, 90 (3): 980-986.
- [4] Celik H K, Yilmaz H, Rennie A E W, et al. Determination of the failure susceptibility of a flat die used in biomass pelletizing machines by means of FEA-based design exploration [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2018, 18 (5): 1099-1110.
- [5] Holm J K, Stelte W, Posselt D, et al. Optimization of a multiparameter model for biomass pelletization to investigate temperature dependence and to facilitate fast testing on pelletization behavior [J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25 (8): 3706-3711.
- [6] 蒋清海, 武凯, 孙宇, 等. 生物质制粒机环模的磨损机理分析 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (22): 42-49.
- Jiang Q H, Wu K, Sun Y, et al. Wear mechanism analysis of ring die of pellet mill [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (22): 42-49.
- [7] 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.
- [8] 武凯, 孙宇, 彭斌彬, 等. 环模制粒粉体旋转挤压成型扭矩模型构建及试验 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (24): 33-39.
- Wu K, Sun Y, Peng B B, et al. Modeling and experiment on rotary extrusion torque in ring-die pelleting process [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (24): 33-39.
- [9] 周亮, 孙宇, 武凯, 等. 环模式秸秆压块机模具有限元分析及锥角优化 [J]. *农机化研究*, 2014, 36 (6): 224-227, 232.
- Zhou L, Sun Y, Wu K, et al. Finite element analysis and cone angle optimization of ring die on circular mold briquetting machine [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36 (6): 224-227, 232.
- [10] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (12): 142-147.
- [11] 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 of Agricultural Machinery*, 2009, 40 (12): 130-134.
- [12] 李永奎, 孙月姝, 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.
- [13] 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.
- [14] 毕秋实, 王国强, 陈立军, 等. 基于离散元-多体动力学联合仿真的机械式挖掘机挖掘阻力仿真与试验 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2019, 49 (1): 106-116.
- Bi Q S, Wang G Q, Chen L J, et al. Numerical simulation and experiment on excavation resistance of mechanical excavator based on DEM-MBD co-simulation [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2019, 49 (1): 106-116.
- [15] 姚宗路, 张妍, 赵立欣, 等. 立式双层孔环模生物质压块机设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (S1): 8-12.
- Yao Z L, Zhang Y, Zhao L X, et al. Design and experiment of biomass briquetting machine with vertical double circular mould [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (S1): 8-12.
- [16] 薛冰. 生物质成型机环模结构参数对其寿命和成型质量影响研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- Xue B. Biomass Briquetting Machine Ring Die Structure Parameters on Life and Forming Quality Impact Research [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014.
- [17] 王露. 轮毂轴承多工况疲劳寿命建模与数值仿真 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- Wang L. Modeling and Numerical Simulation of Fatigue Life of Hub Bearing Based on Multi-bench Test Load [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.