

# 柱塞式生物质环模成型机环模凹模磨损预测

德雪红<sup>1</sup> 俞国胜<sup>2</sup> 陈忠加<sup>2</sup> 郭文斌<sup>1</sup>

(1 内蒙古农业大学机电工程学院 2 北京林业大学工学院)

**摘要:**为研究柱塞式生物质环模成型机的磨损特性及预测磨损程度,利用分形理论及磨损机理,建立了环模凹模的磨损预测模型,并对凹模进行磨损预测和分析,用试验验证模型的正确性。结果表明:新型柱塞式环模的主要磨损部位在环模凹模模孔内壁处,其表面磨损量由表面形貌及材料属性决定;考虑了物料及环模凹模物理特性的环模凹模磨损预测模型的预测结果是正确的;探讨了几种典型参数与平均磨损率的关系,得知随着分形参数、成型压力、当量成型速度的增大,其平均磨损率也增大。试验用2种典型材质的环模凹模和2种成型物料形成的4组摩擦副中,42CrMo-秸秆的平均磨损率最慢,45钢-木屑的磨损率最快。

**关键词:**柱塞式;成型机;磨损;分形

中图分类号:S226.7; TH117.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)06-0112-08

DE Xue-hong<sup>1</sup>; YU Guo-sheng<sup>2</sup>; CHEN Zhong-jia<sup>2</sup>; GUO Wen-bin<sup>1</sup>. **Prediction of wear about ring die of plunger biomass briquetting machine.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)37(6) 112-119 [Ch, 26 ref.]

1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia, 010018, P. R. China;

2 College of Mechanical Engineering, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

This study was designed to explore wear characteristics and to predict the wear degree of biomass ring plunger molding machine. Fractal theory and wear mechanism were applied to establish model predicting ring mold die wear. Model-based die wear prediction and analysis were verified experimentally. The results showed that the main wear part of ring mold took place at the inner die wall of the latest designed ring mold plunger. Critical asperity contact surface area  $a_c$  was dependent on the surface topography and material properties. We validated the established die wear prediction equation taking into account the material and the physical characteristics of the ring mold, and examined the relationship between the average wear rate and several typical parameters. The average wear rate increased with the increase of fractal parameters, molding pressure and equivalent forming speed. Among the two typical ring mold materials and two typical biomass materials, 42CrMo/straw had the lowest average wear rate while 45 steel/wood had the highest average wear rate.

**Key words** plunger; briquetting machine; wear; fractal

机械设备的使用寿命,与各运动部件摩擦副的表面摩擦及磨损状况有关<sup>[1-5]</sup>。摩擦是能耗的主要原因之一,有关统计显示,工业能耗约1/3~1/2是由摩擦引起的;且磨损会影响设备的可靠性及寿命,60%~80%设备因此报废。故降低设备磨损,将带来巨大

经济效益。在研发具有摩擦副的产品前,计算并预测其摩擦磨损情况是必要的。

国内环模制粒设备有堵模现象,且模具寿命短,成型产品质量差,能耗高。与国外同类机型相比<sup>[6-8]</sup>,存在较大技术差距,主要体现在模具寿命短

收稿日期:2014-11-06 修回日期:2014-12-09

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD30B0205)、国家自然科学基金项目(61265011)。

第一作者:德雪红,博士。主要研究方向:机械设计及理论。Email:dexuehong@126.com 地址:010018 内蒙古呼和浩特市内蒙古农业大学机电工程学院。

责任作者:俞国胜,教授,博士生导师。主要研究方向:林业与园林机械。Email:dexuehong@126.com 地址:100083 北京市清华东路35号北京林业大学工学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

及生产率低。据实践及试验表明<sup>[9-10]</sup>, 环模寿命缩短的主因是磨损导致的力学失效, 而磨料及黏着磨损是环模磨损的主要形式。故减少环模磨损、延长寿命, 降低成本, 是当前研究重点。

国内外学者用理论及建模仿真相结合的方法进行环模的失效机理研究的工作不多, 从理论上分析环模磨损特性方面的研究很少<sup>[11-12]</sup>。本研究从新型生物质柱塞式环模成型设备的关键部件出发, 分析实际环模受力状态, 利用分形理论对其环模凹模磨损进行预测, 并与实际磨损试验进行对比, 验证磨损程度预测模型的正确性, 为优化设备参数提供理论支持。

## 1 环模凹模磨损预测模型的推导

环模凹模与成型物料磨擦时磨损机理主要是黏着和磨粒磨损<sup>[13-15]</sup>。研究表明<sup>[16-17]</sup>, 磨损总量  $W$  正比于滑移距离  $S$  及载荷  $P$ , 反比于较软材料屈服强度  $\sigma_y$  (或材料硬度  $H$ ) :

$$W = k \frac{P}{\sigma_y} S \quad (1)$$

式中:  $k$  为磨损系数,  $W$  为磨损总量 (mm),  $S$  为滑移距离 (mm),  $P$  为载荷 (N),  $\sigma_y$  为 2 摩擦副中较软材料的屈服强度 (Pa)。

据黏着摩擦机理, 实际接触面积远远小于名义接触面积, 在法向载荷下, 真实接触点  $P$  很大, 以致出现塑变, 成小平面接触状态, 直至其面积增大到能支撑全部载荷为止。理想弹-塑性材料的真实接触面积  $A_r$  (mm<sup>2</sup>) 与载荷关系可表示:  $A_r = P/\sigma_y$ 。但真实接触时, 滑动摩擦的正应力及剪应力并存, 其摩擦是法向与切向载荷的共同结果,  $\sigma_y$  与原法向载荷引起的屈服强度  $\sigma_s$  和由切向载荷引起的剪切强度  $\tau_s$  有关。据修正黏着理论:

$$\sigma_s^2 + \lambda \tau_s^2 = \sigma_y^2$$

式中:  $\lambda$  为材料硬度、润滑、犁削作用等有关的常数, 且  $\lambda = (\sigma_y/\tau_b)^2$  (其中  $\tau_b$  为较软材料剪切强度极限, Pa)。据研究<sup>[18-19]</sup>, 多数金属取  $\lambda = 9$ 。因  $\tau_s = f\sigma_s$ , 则  $\sigma_s = \frac{\sigma_y}{\sqrt{1 + \lambda f^2}}$ , 即当仅有切向力时, 正应力仅达  $\sigma_s$ , 较软材料即屈服。故据式(1)得磨损修正公式:

$$W = k (1 + \lambda f^2)^{1/2} \frac{P}{\sigma_y} S = k (1 + \lambda f^2)^{1/2} A_r S \quad (2)$$

式中:  $f$  为摩擦系数。

研究发现<sup>[20-21]</sup>, 实际磨损过程中, 接触表面同时存在塑变和弹变, 且各自所占比例是变化的, 即  $k$  非常数, 与接触表面形貌、真实接触面积  $A_r$  有关。故  $k$  可分解为  $k_p$  (塑性接触磨损系数) 和  $k_e$  (弹性接

触磨损系数); 其中  $k_p$  和  $k_e$  独立于接触表面几何形貌。故把式(2)表示为:

$$W = (1 + \lambda f^2)^{1/2} (k_e A_{re} + k_p A_{rp}) S = (1 + \lambda f^2)^{1/2} [k_e A_r + (k_p - k_e) A_{rp}] S \quad (3)$$

式中:  $A_{re}$  为弹性接触面积 (mm<sup>2</sup>),  $A_{rp}$  为塑性接触面积 (mm<sup>2</sup>)。并有

$$A_{rp} = \left( \frac{D}{2 - D} \right)^{\frac{2-D}{2}} \psi^{\frac{(2-D)^2}{4}} A_r^{\frac{D}{2}} a_c^{\frac{2-D}{2}} \quad (4)$$

式中:  $D$  为分形维数,  $\psi$  为与接触面积有关的参数,  $a_c$  为微凸体临界接触点接触面积 (mm<sup>2</sup>)。同时有

$$A_r = A_{rp} + A_{re} = \frac{D}{2 - D} \psi^{\frac{2-D}{2}} a_l \quad (5)$$

式中:  $a_l$  为给定微凸体接触间距  $h$  趋近量时最大接触面积 (mm<sup>2</sup>)。将式(4)、(5)一并带入式(3), 得磨损预测模型最终公式

$$W = (1 + \lambda f^2)^{1/2} A_r v t \cdot \left[ k_e - (k_e - k_p) \left( \frac{D a_c}{(2 - D) A_r} \right)^{\frac{2-D}{2}} \psi^{\frac{(D-2)^2}{4}} \right] \quad (6)$$

式中:  $v$  为当量成型速度 (m/s),  $t$  为成型时间 (s)。推导出平均磨损深度  $h$ :

$$h = W / A_a = (1 + \lambda f^2)^{1/2} \frac{A_r}{A_a} \left[ k_e - (k_e - k_p) \left( \frac{D a_c}{(2 - D) A_r} \right)^{\frac{2-D}{2}} \psi^{\frac{(D-2)^2}{4}} \right] v t \quad (7)$$

式中:  $A_a$  为名义接触面积 (mm<sup>2</sup>),  $A_a = 2\pi D_2 l$ 。此时设  $G^* = \frac{G}{\sqrt{A_a}}$ ,  $P_a = \frac{P}{A_a}$ ,  $A_r^* = A_r / A_a$ ,  $a_c^* = \frac{a_c}{A_a}$  及  $a_c = G^2 \left( \frac{\pi E_{AB}^2}{225 \sigma_y^2} \right)^{\frac{1}{D-1}}$  代入, 可最终得环模凹模平均磨损率  $h^*$  ( $h^* = dh/dt$ , mm), 则有分形模型:

$$h^* = v (1 + \lambda f^2)^{1/2} A_r^* \left\{ k_e - (k_e - k_p) \left[ \frac{D G^{*2}}{(2 - D) A_r^*} \left( \frac{\pi E_{AB}^2}{225 \sigma_y^2} \right)^{\frac{1}{D-1}} \right]^{\frac{2-D}{2}} \psi^{\frac{(D-2)^2}{4}} \right\} \quad (8)$$

式中:  $l$  为滑动距离 (mm),  $E_{AB}$  为复合弹性模量 (GPa),  $G$  为分形尺度系数,  $D_2$  为环模凹模直径 (mm)。

## 2 环模凹模磨损预测模型参数建立

### 2.1 柱塞式环模成型机的基本结构及工作原理

生物质柱塞式环模成型机用于对锯末、秸秆等生物质物料进行压缩成型, 主要由压缩室及输送结构组成<sup>[14]</sup>。其主机结构(如图 1)由箱体、环模、环模齿轮、电动机传动惰齿轮、传动惰轮部件、柱塞式压辊部件、压辊齿轮组成。环模装在一固定箱体上。环模柱塞式成型机的关键部件是环模及压辊凸模,

结构如图2所示<sup>[14]</sup>,环模的周围钻有成型孔——凹模模孔,环模内侧装有一镶凸模的压辊,环模与压辊内壁保持一定间隙。

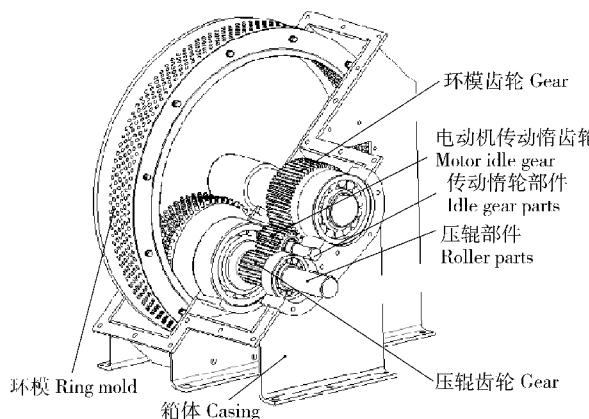
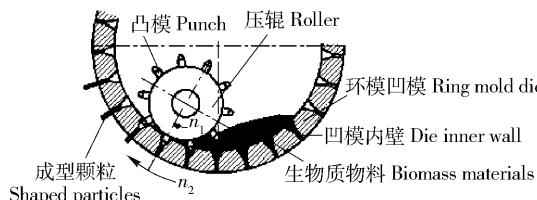


图1 柱塞式环模成型机的主机结构图

Fig. 1 Sketch map for structure of plunger briquetting machine

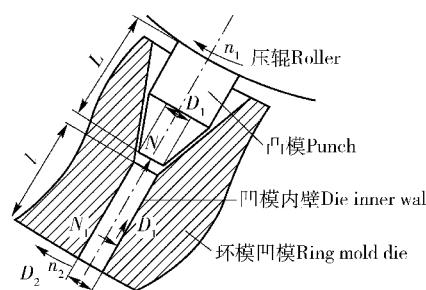


$n_1$  为压辊转速 (r/min),  $n_2$  为环模转速 (r/min)。 $n_1$  means ring roller speed (r/min), and  $n_2$  means mold speed (r/min)。

图2 柱塞式环模成型机的结构示意图

Fig. 2 Sketch map of inner gearing ring briquetting molding

柱塞式环模成型机压辊凸模在挤压生物质物料成型过程中,成型物料受到压辊凸模成型压力  $N$ ,成型物料在此力作用下滑过环模凹模表面,对环模凹模表面形成  $N_1 = N$  的正压力,进而形成摩擦力  $F_1$  (如图3)。



$L$  为凸模深入长度,  $l$  为物料滑移距离,  $D_1$  为凸模直径,  $D_2$  为环模凹模直径,  $N$  为成型压力,  $N_1$  为物料成型压力,  $F_1$  为摩擦力。 $L$  means punch reaching depth,  $l$  means material slippage distance,  $D_1$  means punch diameter,  $D_2$  means ring mold die diameter,  $N$  means molding pressure,  $N_1$  means material molding pressure, and  $F_1$  means friction。

图3 柱塞式环模凸、凹模啮合分析

Fig. 3 Briquetting molding convex and concave die meshing analysis

## 2.2 关键参数确定

### 2.2.1 当量成型速度

凸、凹模相互间运动类似于仿齿轮运动,这使得单个凸模与物料相对挤压运动不连续,但因凸模转速高,上述过程可近似认为是连续的,这就将物料成型过程转化为连续过程,所以引入当量成型速度  $v$  概念。这里假定物料被压入凹模孔后即得最大密度  $\rho$ ,则有:

$$v = \frac{L\epsilon}{t} = \frac{L\epsilon}{1/n_1 Z_1} = \epsilon n_1 L Z_1 \quad (9)$$

式中:  $\epsilon$  为压缩比 ( $\epsilon = \rho_1/\rho$ ,  $\rho_1$ 、 $\rho$  为物料压缩前、后密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $L$  为凸模深入凹模长度 (mm),  $Z_1$  为压辊上每排凸模个数,  $n_1$  为压辊转速 (r/min)。由式 (9) 知, 压缩比与凸模深入凹模尺寸确定条件下,  $v$  的影响因素主要  $n_1$ 、 $Z_1$ 。 $n_1$  正比于  $v$ , 但是  $v$  需有合适值才能保证成型质量并保证生产效率<sup>[5-7,14]</sup>。

根据上述成型及力学分析可知,压辊不是摩擦最严重的部位,其上凸模也只承受间歇性摩擦作用,凸模所受磨损明显小于始终受物料挤压作用的环模凹模,故在磨损模型的建立过程中可只考虑环模凹模的磨损,图4所示为单个环模凹模数学模型结构示意。

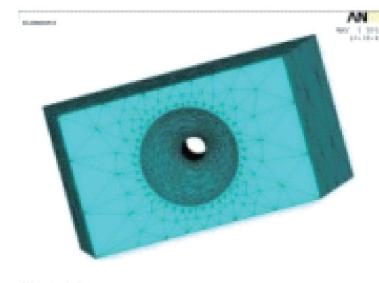


图4 单个环模凹模数学模型结构

Fig. 4 Mathematical model diagram of single ring mold die

### 2.2.2 模型结构尺寸参数确定

柱塞式环模成型机模具结构示意如图3所示<sup>[14]</sup>,其工作参数有:  $D_2 = D_1 = 8 \text{ mm}$ ,  $L = 40 \text{ mm}$ ,  $f_1 = f_2 = 0.3$ ,  $l = 46.4 \text{ mm}$ 。成型过程中设最大压强 120 MPa, 推入阶段压强 80 MPa, 取平均推移压强 100 MPa<sup>[17-21]</sup>。具体材料属性如表1所示<sup>[22-26]</sup>。

表1 42CrMo及木屑材料属性

Tab. 1 Material properties of 42CrMo and wood chips

名称 Parameter	凹模 Die	物料 Materials
材料 Stuff	42CrMo	木屑 Wood
屈服强度 Yield strength $\sigma_s/\text{MPa}$	930	70
密度 Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	1 100
剪切强度 Shear strength $\sigma_b/\text{MPa}$	1 080	120
弹性模量 Elastic modulus $E/\text{GPa}$	212	8.1
泊松比 Poisson's ratio $\nu$	0.28	0.39

## 2.3 环模表面轮廓粗糙表面样本

为准确表达环模凹模和成型物料间的接触,用表面形貌测量仪器 TA620 粗糙度测量平台对环模凹模内壁表面形貌进行测量,获得真实表面形貌数据。

这里设表面轮廓特征参数  $R_a = 1.605 \mu\text{m}$ ,并对环模凹模内壁的轴向二维轮廓进行采样,其参数设置:采样长度取 0.25 mm,采样间隔取 0.1  $\mu\text{m}$ 。测得的环模凹模的二维轮廓曲线数据如图 5 所示。

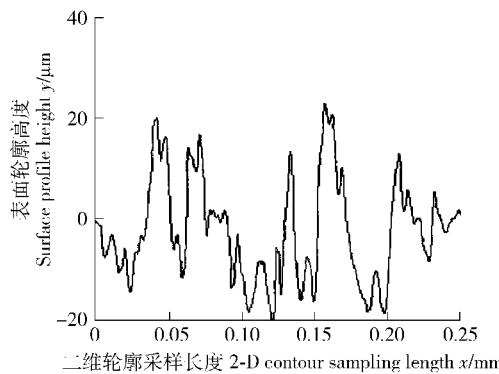


图 5 环模凹模二维轮廓曲线试验数据

Fig. 5 Experimental data of ring die cavity 2-D contour curve

## 2.4 环模表面轮廓分形维数确定

机械加工表面分形维数  $D$  与传统  $R_a$  有关,通常  $R_a$  增大时,  $D$  减小。本文环模凹模孔根据生物质成型机理及摩擦特性设计为经过粗磨表面粗糙度要求达到  $R_a = 1.6$ ,  $D$  与  $R_a$ <sup>[20]</sup> 的近似换算式为:

$$D = \frac{1.528}{R_a^{0.042}} \quad (10)$$

根据式(10)求出  $D = 1.498$ 。又由于  $R_a$  与粗糙度系数  $G$  满足关系式  $R_a \propto G^{D-1}$ <sup>[20]</sup>, 求得分形表征另一重要参数粗糙度系数  $G = 2.6 \times 10^{-9}$ 。加工表面的形貌对摩擦磨损性能有直接影响,因此不同分形维数表面的磨损性能是不一样的。

## 3 环模凹模磨损预测的数值分析

### 3.1 表面轮廓分形参数对平均磨损率的影响

磨损实质作为表面的一种现象,表面形貌对其影响极大。从式(8)不难看出,平均磨损率  $h^*$  随粗糙度系数  $G$  的减小而下降。为进一步研究环模凹模表面形貌对平均磨损率的影响程度,分别取  $\lambda = 9$ ,  $k_e = 10^{-7}$ ,  $k_p = 2 \times 10^{-6}$ ,  $\sigma_y = 930 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,  $P = 100 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,  $v = 10 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ;  $D_2 = 8 \text{ mm}$ , 环模凹模弹性模量  $E_A = 2.12 \times 10^{11} \text{ Pa}$ , 成型物料弹性模量  $E_B = 8.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ , 环模凹模泊松比  $\nu_A = 0.28$ , 成型物料泊松比  $\nu_B = 0.39$ ,  $\psi = 2.001$ , 部分数值分析结果如

图 7~8 所示。

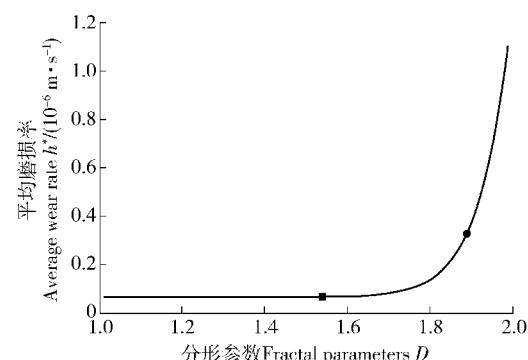


图 7 分形参数对平均磨损率的影响 ( $G = 2.6 \times 10^{-9}$ )

Fig. 7 Effect of  $D$  on the average wear rate

由图 7 可知:存在临界  $D_0$ (1.6 左右位置处)可使平均磨损率急剧增大,在此临界分形维数范围内,随着分形维数增大,平均磨损率变化极小;但粗糙表面变光滑 ( $D > D_0$ ) 时,随  $D$  变化,  $h^*$  会猛然升高。此现象与通常观察结果基本一致,也可解释为:在合适的某一粗糙度表面范围内,环模生产生物质成型物料有利于塑性、弹性接触面积比例分配,使磨损率稳定在一定范围内;但当表面轮廓变得过于光滑 ( $D > D_0$ ) 时,接触表面间作用加强,黏着趋势加大,磨损反而急剧提高。故环模凹模初始表面加工不是越光滑越好。

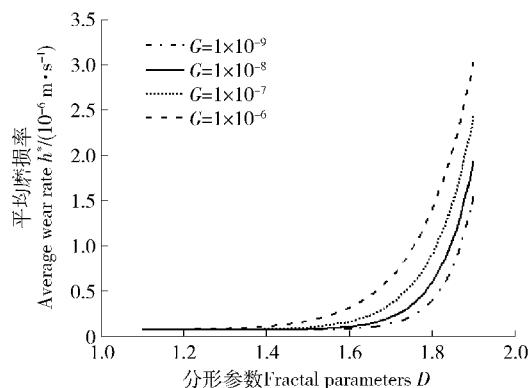


图 8  $D$ 、 $G$  对平均磨损率的影响

Fig. 8 Effect of  $D$  and  $G$  on the average wear rate

由图 8 可知:随表面轮廓  $G$  增大,平均磨损率相应提高;尤其  $D < D_0$  时,  $G$  对  $h^*$  影响很大,而随  $D$  上升,其影响变得不再明显。这主要是由于大  $G$  致大塑变,并导致大  $h^*$ ;但当  $D$  变较大时,表面变光滑后,摩擦分子间作用变为磨损主因,相比之下,  $G$  对磨损影响较弱。

### 3.2 成型压力对平均磨损率的影响

在允许范围内,适当增大物料成型压力  $P$  将会大大提高物料成型致密性并提高产品质量,但成型压力增大的同时也会影响环模凹模的寿命。据式

(1)、(8)知,  $v$  与  $h^*$  呈正比关系, 即随着当量成型速度  $v$  的提高,  $h^*$  也加大。

由图 9 可知: 随成型压力  $P$  增大, 磨损率呈直线上升趋势, 即成型压力  $P$  的变化对磨损率影响很大。这主要是由于大的  $P$  会导致大的塑变, 从而导致大的磨损率, 摩擦的分子作用是磨损主因; 但注意  $P$  不能超过某个范围, 因为这会导致摩擦增大, 摩擦力超过凸模对物料挤压力时, 有可能使成型机卡死, 堵住凹模口而不能实现连续挤压。

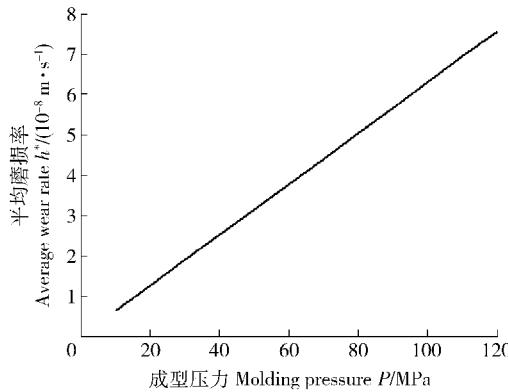


图 9 成型压力对平均磨损率的影响

Fig. 9 Effect of molding pressure on the average wear rate

### 3.3 当量成型速度对平均磨损率的影响

根据环模成型设备的产量要求, 我们可以推导出当量成型速度  $v$  的求解公式:

$$v = \frac{C/t}{Z_2 I \rho \frac{\pi d^2}{4}} \quad (11)$$

式中:  $Z_2$  为环模凹模单排个数,  $\rho$  为成型物料密度 ( $kg/m^3$ ),  $C$  为产量 ( $t$ ),  $I$  为凹模排数。

据式(11)可看出,  $v$  与每小时产量呈正比关系, 即对于生产效率影响较大。当量成型速度越大, 物料挤压速度越快, 成型也越快, 产量自然就高; 但据式(8)知,  $v$  与  $h^*$  也呈正比关系, 即随当量成型速度  $v$  提高, 单位时间内磨损量也加大。

由图 10 可知: 随当量成型速度  $v$  增大, 磨损率呈直线上升趋势。大的  $v$  会导致单位时间里摩擦量加大, 进而导致大的塑性变形, 加大磨损率, 影响凹模寿命, 故不能用一味增加  $v$  的方法来提高生产率。

### 3.4 磨损时间对平均磨损率的影响

将式(8)对磨损时间  $t_m$  求导:  $dh^*/dt_m = 0$ , 即

$$(1 + \lambda f^2)^{\frac{1}{2}} \frac{d}{dt_m} \left( A_r^* v \left( K_e - (K_e - K_p) \left( \frac{DG^{*2}}{(2-D)A_r^*} \left( \frac{\pi E_{AB}^2}{225\sigma_y} \right)^{\frac{1}{D-1}} \right)^{\frac{1-D}{2}} \psi^{\frac{(D-2)2}{4}} \right) \right) = 0$$

为进一步研究时间对环模磨损率的影响, 综合上述, 分别取  $\lambda = 9, l = 0.0464 \text{ m}, f = 0.3, k_e = 10^{-7}$ ,

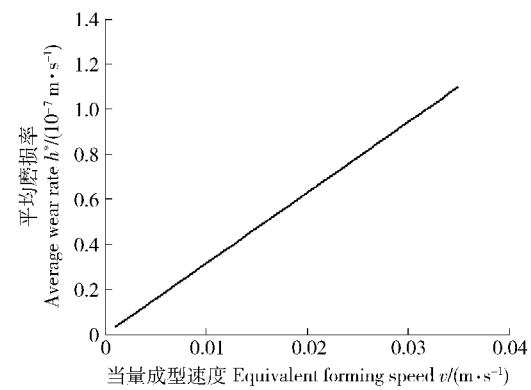


图 10 当量成型速度对平均磨损率的影响

Fig. 10 Effect of equivalent molding rate on the average wear rate

$k_p = 2 \times 10^{-6}, \sigma_y = 930 \times 10^6 \text{ Pa}, P = 100 \times 10^6 \text{ Pa}, v = 10 \times 10^{-3} \text{ m/s}, D_2 = 8 \text{ mm}, E_A = 2.12 \times 10^{11} \text{ Pa}, E_B = 8.1 \times 10^9 \text{ Pa}, \nu_A = 0.28, \nu_B = 0.39, \psi = 2.001$ , 对式(8)进行数值分析, 部分计算结果如图 11 所示。

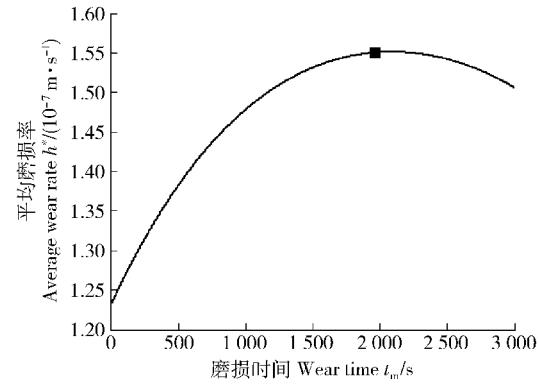


图 11 磨损时间对平均磨损率的影响

Fig. 11 Effect of wear time on the average wear rate

由图 11 可知: 随着磨损时间加长,  $h^*$  以较大速率增长, 在 1 000 s 左右开始  $h^*$  增长变缓,  $h^*$  增长到一定值 (2 000 s 左右时刻达到最大值) 而后缓慢回落。这主要是由于表面粗糙度随着磨损的变化而变化, 环模凹模表面粗糙度随磨损时间加长先是快速降低, 而后粗糙度缓慢降低, 逐渐趋于稳定, 这符合表面粗糙度在达到摩擦副磨合后保持稳定的特  
点, 符合摩擦副磨损规律。

由图 12 可知: 不同摩擦副配合时, 环模凹模平均磨损率变化规律略有不同, 除了 45 钢-木屑摩擦副外都是随着磨损时间增长呈现及其缓慢的增长趋势, 其磨损率保持各自的幅值大致不变。这主要是因为环模凹模与成型物料材质差异较大, 环模有足够的能力保证物料成型的缘故。而唯有 45 钢-木屑摩擦副平均磨损率呈现一路下抛物线态势, 平均磨损率随磨损时间增长逐渐小幅减小, 并随后趋于稳定。这主要是因为 45 钢-木屑材料性能差异相

对较小,故开始磨损是初始剧烈磨损阶段,随磨损时间增加,环模凹模达到与成型物料磨合磨损,符合摩擦副磨损规律。不同材质环模凹模挤压不同成型物料时平均磨损率是不同的,45钢-木屑配副的 $h^*$ 最大,而42CrMo-秸秆配副的 $h^*$ 值最小。这一现象可解释为主要对 $a_c$ 依赖, $E_{AB}/(KH_{AB})$ 增大, $a_c$ 也增大,微凸体塑性量变多,磨损剧烈。

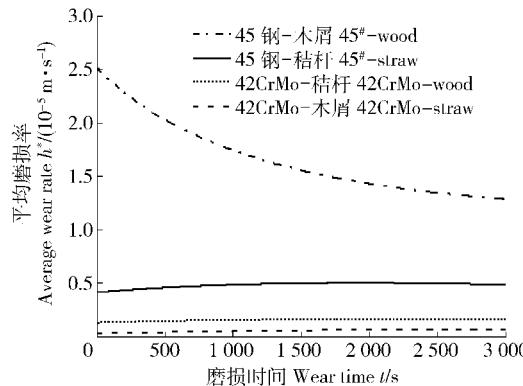


图 12 磨损时间对不同材质环模磨损率的影响

Fig. 12 Effect of wear time on the average wear rate of different materials

## 4 试验验证

为验证环模凹模磨损程度预测模型的正确性,对本课题最新设计并投入试验的生物质柱塞式环模试验机的环模凹模工作过程中的磨损量进行测量,与预测模型计算的环模凹模内壁磨损量进行对比。

图 13 所示为本课题采用压辊柱塞凸模结构设计的生物质柱塞式环模试验机,其环模材料选用 45 钢,环模直径 435 mm,环模宽度 80 mm,环模凹模孔数量共计 24 个。随机选取环模 3 个凹模孔并标记(a、b、c),分别进行磨损分析。其中环模凹模直径

$D_2 = 8$  mm,环模凹模长径比为 5.8:1。当环模凹模长径比为 5.5:1 时挤压木屑物料不能成型(或成块后易散掉不易运输),即认定此时环模失效,磨损达到环模最终寿命。

环模机械性能: $\sigma_s \geq 355 \times 10^6$  Pa,  $\sigma_b \geq 600 \times 10^6$  Pa,  $E_A = 2.1 \times 10^{11}$  Pa,  $\nu_A = 0.27$ , 环模密度  $\rho_A = 7.89 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 经过热处理硬度达 45HRC。成型生物质材料为各种树枝(主要为杨树枝)的混合木屑。当量成型速度  $v = 4.26 \times 10^{-3}$  m/s, 物料成型压力  $P = 85.531$  MPa。物料成型颗粒的颗粒度为 3 mm、含水率 11%, 物料成型率 75%~85%, 成型木屑  $E_B = 8.1 \times 10^9$  Pa,  $\nu_B = 0.39$ 、成型物料密度  $\rho_B = 0.914 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。



图 13 新式生物质柱塞式环模试验机

Fig. 13 New biomass plunger ring molding machine

用 335-02-920 型电子三点内径千分尺测量试验机工作 0、1、2、4、6、8、10、12 h 时刻环模凹模 3 标记处环模凹模内壁直径,并计算出 3 处环模凹模的工作磨损量;同时利用环模凹模磨损预测模型计算环模凹模内壁直径磨损量,具体数据如表 2 所示。

表 2 生物质柱塞式环模成型机环模凹模的试验磨损量与预测磨损量

Tab. 2 Amount of test wear and prediction of biomass plunger ring molding machine  $10^{-6}$  m

工作时间 Time/h	a		b		c		磨损预测值 Wear prediction
	直径 Diameter	累计磨损 Cumulative wear	直径 Diameter	累计磨损 Cumulative wear	直径 Diameter	累计磨损 Cumulative wear	
0	8 008	0	8 014	0	7 997	0	0
1	8 022	14	8 031	17	8 011	14	4.5
2	8 031	23	8 046	32	8 025	28	9.1
4	8 045	37	8 061	47	8 039	42	21.8
6	8 057	49	8 073	59	8 055	58	36.3
8	8 071	63	8 089	75	8 071	74	52.0
10	8 086	78	8 101	87	8 084	87	69.3
12	8 104	96	8 127	113	8 092	95	87.8

由表 2、图 15 可知:环模凹模(a、b、c)磨损量随时间增大而增大,趋势与预测结果基本吻合,实际磨损量稍微高于预测值。这主要是因为磨损过程中有

很多不确定因素,如温度升高、物料中含有硬质杂质、环模加工工艺、环模热处理工艺问题等。总体来说模型预测效果较好。

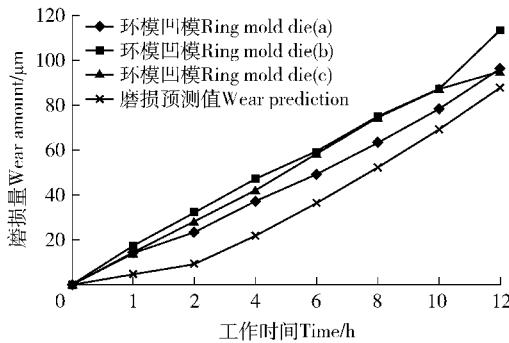


图 14 总磨损量随工作时间变化曲线

Fig. 14 Change of total amount of wear over working hours

综上可知,环模凹模磨损预测模型是正确的,可以用来作为磨损机理研究的依据,并指导新型柱塞式生物质成型机的设计。

## 5 结论与讨论

本文利用分形理论及摩擦磨损原理,对柱塞式环模工作中环模凹模摩擦进行分析,以环模力学研究为基础,克服了经验公式需要依靠实测数据并统计的不足,建立了环模凹模磨损预测模型,并做了仿真分析及试验验证。

1)针对最新设计的柱塞式环模进行了受力分析,主要磨损部位在环模凹模模孔处,此处的磨损影响环模寿命。其表面临界微凸体接触面积  $a_e$  由表面形貌及材料属性决定。 $E_{AB}/(KH_{AB})$  或表面粗糙程度越大,  $a_e$  越大,在塑性状态微凸体越多,磨损越严重。

2)建立了考虑物料及环模凹模物理特性的环模凹模磨损预测模型,通过试验证明了模型的正确性。针对环模凹模磨损率的影响因素进行了分析,探讨了环模凹模磨损预测模型的典型参数与平均磨损率的关系;得出分形参数、成型力、当量成型速度对磨损率的影响规律,及环模凹模磨损率随时间变化的规律。

3)就2种典型的环模凹模材料和2种成型物料形成的4个组合,进行对应的环模凹模磨损量分析对比,提出了基于材料角度对凹模防磨、减磨的设计思路,这有待进一步探讨。

## 参 考 文 献

- [1] 张百良,王吉庆,徐桂转,等.中国生物能源利用的思考[J].农业工程学报,2009,25(9):226-231.  
ZHANG B L, WANG J Q, XU G Z, et al. Thinking about bio-energy utilization in China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9):226-231.
- [2] 闫文刚,俞国胜,张海鹰,等.含水率对草坪草常温开模成型的影响[J].农业工程学报,2011,27(增刊1):162-165.  
YAN W G, YU G S, ZHANG H Y, et al. Effects of moisture content on turfgrass forming at room-temperature [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27 (Suppl.1):162-165.

YAN W G, YU G S, ZHANG H Y, et al. Effects of moisture content on turfgrass forming at room-temperature [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27 (Suppl.1):162-165.

- [3] JIANG Y. Study on the formation conditions of biomass pellet[J]. Renewable Energy, 2006, 5:16-18.
- [4] YUMAK H, UCAR T, SEYIDBEKIROGLU N. Briquetting soda weed (*Salsola tragus*) to be used as a rural fuel source [J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(5):630-636.
- [5] KALIYAN N, MOREY R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products [J]. Biosystems Engineering, 2009, 33(3):337-359.
- [6] 周中仁,吴文良.生物质能研究现状及展望[J].农业工程学报,2005,21(12):12-15.  
ZHOU Z R, WU W L. Status quo and prospects of biomass energy [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12):12-15.
- [7] 盛奎川,吴杰.生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J].农业工程学报,2004,20(2):242-245.  
SHENG K C, WU J. Review on physical properties and forming mechanisms of biomass briquettes [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2):242-245.
- [8] YANG Y B, SHARIFI V N, SWITHENBANK J, et al. Combustion of a single particle of biomass [J]. Energy & Fuels, 2008, 22:306-316.
- [9] MANI S, TABI L G, SOKHANSANJ S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(7): 648-654.
- [10] 俞国胜,侯孟.生物质成型燃料加工装备发展现状及趋势[J].林业机械与木工设备,2009(2):4-8.  
YU G S, HOU M. Development status and trend of biomass briquettes processing equipment [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009 (2):4-8.
- [11] 宋晓文,俞国胜,姜晨龙,等.生物质常温开模压缩成型直筒参数的研究[J].黑龙江农业科学,2011(11):36-38.  
SONG X W, YU G S, JIANG C L, et al. Parameter research of biomass shaping with open lineal mold in natural temperature [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2011(11):36-38.
- [12] 杜红光,董玉平,王慧,等.生物质冷压成型模具摩擦热分析[J].农业工程学报,2011,27(9):58-62.  
DU H G, DONG Y P, WANG H, et al. Analysis of friction heat formed in biomass cold briquetting mold [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27 (9):58-62.
- [13] 孔雪辉.生物质固化成型环模磨损实验研究及数值模拟[D].哈尔滨:东北林业大学,2010: 15-17.  
KONG X H. Experimental study and numerical simulation on circular mould wear of biomass briquetting [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010: 15-17.
- [14] 德雪红,俞国胜,翟晓敏,等.内啮合式生物质环模成型模具的关键技术[J].北京林业大学学报,2013,35(5):128-132.  
DE X H, YU G S, ZHAI X M, et al. Key technology of briquetting molding for inner gearing biomass ring [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35( 5) 128-132.
- [15] 霍丽丽,田宜水,孟海波,等.生物质颗粒燃料微观成型机理

- [J]. 农业工程学报,2011,27(增刊1):21-25.
- HUO L L, TIAN Y S, MENG H B, et al. Mechanism study on surface morphology of biomass pellet [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27 (Suppl. 1):21-25.
- [16] MEAKIN P. Fractal, scaling and growth far from equilibrium [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [17] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- WEN S Z. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 296.
- [18] LUDEMA K C. Mechanism-based modeling of friction and wear [J]. Wear, 1996, 200:1-7.
- [19] 葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- GE S R, ZHU H. Tribology of fractal [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [20] ZHOU G Y, LEU M C, BLACKMORE D. Fractal geometry model for wear prediction [J]. Wear, 1993, 170:1-14.
- [21] HUTCHINGS I M. Tribology: friction and wear of engineering materials [M]. London: Edward Arnold, 1992:82-84,142-144.
- [22] 卓金武, 魏永生, 秦健, 等. MATLAB 在数学建模中的应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
- ZHUO J W, WEI Y S, QIN J, et al. The application of MATLAB in mathematical modeling [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2013.
- [23] 机械工程手册组委会编. 机械设计: 基础卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- The organizing committee of handbook of mechanical engineering. Mechanical design: basic volume [M]. Beijing: China Machine Press, 1996.
- [24] 易维明, 郭超, 姚宝刚. 生物质导热系数的测定方法 [J]. 农业工程学报, 1996, 12(3):38-41.
- YI W M, GUO C, YAO B G. Measurement methods of heat conduct coefficient of biomass [J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(3): 38-41.
- [25] 周美香. 木材径向导温系数的理论推导 [J]. 干燥技术与设备, 2010, 8(6):271-276.
- ZHOU M X. Theoretical derivation on wood thermal diffusivity in radial direction [J]. Drying Technology and Equipment, 2010, 8 (6): 271-276.
- [26] 赵昌盛. 实用模具材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005:1-150.
- ZHAO C S. Manual of application of practical mold materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2005:1-150.

(责任编辑 李文军  
责任编委 李文彬)