

9P-150 型膨化机膨化螺杆载荷及磨损仿真研究*

MODEL 9P-150 EXPANSION SCREW LOAD AND
WEAR SIMULATION RESEARCH

谢苗** 贾凯 王书举 刘治翔 毛君

(辽宁工程技术大学机械工程学院, 阜新 123000)

XIE Miao JIA Kai WANG ShuJu LIU ZhiXiang MAO Jun

(College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

摘要 针对 9P-150 型单螺杆秸秆膨化机膨化螺杆因磨损严重而导致的寿命较短问题,研究螺杆在磨料属性确定条件下的受力分析及磨损机理,通过分析秸秆磨料与螺杆摩擦与磨损的行为机理,建立螺杆磨损的数学模型。利用 Edem 软件对螺杆受力及磨损情况进行模拟,模拟结果与实际情况一致。所得结论将为研究螺杆受力及磨损状况的优化打下理论基础。

关键词 秸秆 膨化机 螺杆磨损 数学模型 EDEM

中图分类号 S226

Abstract In view of the short life of the straw extruder with 9P-150 single screw due to serious wear, the mechanical analysis and wear mechanism of the straw extruder under the condition of determining abrasive properties were studied. EDEM software was used to simulate the stress and wear of the screw. The conclusions obtained in this paper will lay a theoretical foundation for the optimization of screw stress and wear condition.

Key words Straw; Extruder; Screw wear; Prediction model; EDEM

Corresponding author: JIA Kai, E-mail: kai311@foxmail.com, Tel: +86-418-3350507, Fax: +86-418-3350507

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51874158), and the Liaoning Natural Science Foundation Project (No.20180550738).

Manuscript received 20190822, in revised form 20191014.

引言

我国农作物秸秆储量相当可观,在畜牧业领域具有巨大的利用市场。挤压膨化技术是近几年来发展最为迅速的一种农作物秸秆加工处理技术,因为秸秆膨化机质量稳定、膨化率高、生产能耗低的优点被广泛应用。秸秆膨化机核心的挤压膨化部件是由变直径、变螺距的锥形螺杆和有内螺槽的螺套组成的膨化腔,秸秆膨化机物料在螺杆的推动力作用下向前挤压,并在混合、搅拌、摩擦和高剪切力作用下解体。由于在整个膨化过程中,物料对螺杆的摩擦和磨损行为属于非金属材料对金属材料的磨损,这种摩擦和磨损行为机理较为复杂并受到诸多因素的影响,有关专家进行了一定的理论和试验研究。孙春一等^[1]分析了螺杆和锥形机筒的磨损形式并建立了磨损计算模型;张炜等^[2]研究了土壤对 45 号钢不同阶段磨损率随含水率的变

化趋势;张克平等^[3]通过研究小麦对磨辊磨损性能的影响,得到磨损量随磨料变化趋势;张永清等^[4]通过试验不同含水量对塑料和钢的磨损的影响,得到在磨料磨损过程中含水量是个敏感因素,并分析了在磨料磨损中的三个主要作用;甘肃农业大学吴劲锋、黄晓鹏等^[5]在植物磨料对金属材料磨损方面取得一定的研究进展。但是针对某一特定型号膨化机出现的螺杆磨损问题并无相关文章,本文主要针对 9P-150 型膨化机膨化螺杆挤压输送段磨损严重情况进行理论研究,分析其磨损机理,为企业进行优化改进提供理论依据。

1 膨化螺杆结构、材料及磨损机理

1.1 膨化螺杆结构

膨化机挤压装置中的膨化螺杆分为两部分:一部分外包络线呈圆柱形,其功能主要为输送物料,如图 1a 所示;另一部分外包络线呈锥台形,挤压秸秆碎屑

* 20190822 收到初稿, 20191014 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (51874158), 辽宁省自然科学基金项目 (20180550738) 资助。

** 谢苗, 1980 年生, 女, 辽宁大连人, 辽宁工程技术大学教授, 博士, 主要从事综采、综掘成套装备与关键技术方面的研究。

使其膨化的功能由其完成,如图 1b 所示。

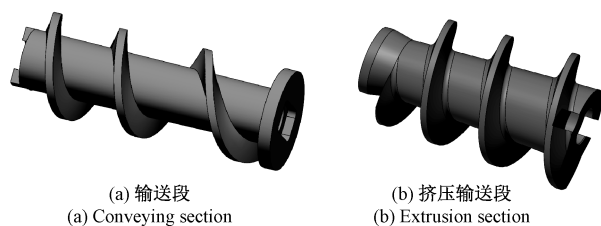


图 1 膨化螺杆
Fig.1 Extruder screw

生产中出现的膨化螺杆磨损失效主要发生在挤压输送段,又因为靠近出料口处空间最小、挤压应力达到最高,挤压输送段末节螺旋为整个螺杆中受力最大位置,相应的也是磨损最严重的,如图 2 所示,末节螺旋几乎被磨平。因此,本文主要针对膨化螺杆的挤压输送段进行研究。



图 2 失效的膨化螺杆挤压输送段
Fig.2 Failed extrusion conveying section

1.2 膨化螺杆材料

制造膨化螺杆的材料为高铬铸铁。高铬铸铁是一种性能优异且成本较低的抗磨材料,全称为高铬白口抗磨铸铁,其铬含量约在 11%~30% 之间,硬度达到 $HRC \geq 46$ 。高铬铸铁由于其自身组织的特性,具有较普通铸铁更加突出的耐磨性、耐热性及高温特性^[6],加之其生产简单,因此被广泛应用于农业、矿山等工况较差的环境中。在膨化机中使用高铬铸铁制造膨化螺杆,能有效节约农户及饲料加工厂的生产成本。

1.3 膨化螺杆的磨损机理

膨化机螺杆的磨损主要是膨化腔内的螺杆在等径输送段和变径挤压段的磨损,但是在膨化输送段的磨损量很小,且对物料膨化产品的性能没有影响,相对于膨化腔内的变直径挤压膨化螺杆而言,输送段的等径螺杆磨损量远小于挤压膨化段的锥形螺杆,之前有关学者的研究一般认为,螺杆在各个阶段的磨损均为同一类型的磨损,即在整个膨化过程中的磨损机理相同^[7]。在本课题中认为,在膨化腔内螺杆的等径输送段,螺杆磨损可以认为是磨损量极小的研磨,相对于膨化腔内的变径锥形螺杆,受到很大的作用力,物料状态属于不可压缩的密实单元,该过程的磨损可以认为是磨粒磨损、疲劳磨损相结合的组合磨损机理,从而导致

螺杆失效。

膨化机螺杆结构特征是螺距从进料口到出料口(螺杆尾部到螺杆梢部)逐渐缩小,而螺杆直径由大变小,秸秆物料进入膨化机桶内后,在螺杆转动下向前推进,主要是在膨化腔内受到螺杆和螺套的剪切、摩擦和挤压作用下,膨化机膨化腔内物料密度不断增大,同时内部的压力和温度显著升高。当受挤压后的物料到达出料口时,物料的密度、压力和温度为最高。尤其是膨化物料在靠近出料口的位置,使得螺杆螺旋部位受到很大的作用力(径向力和轴向力),并直接参与磨损螺杆的根部和外缘表面。经过前期的调研和有关专家对玉米秸秆磨料对金属螺杆材料的磨损规律和磨损表面形貌模型的研究可知^[8],玉米秸秆物料对膨化机的螺杆的摩擦与磨损行为是由若干种磨损机制综合作用的一种结果,可以认为是一种复合磨损机理,针对本课题研究的膨化机螺杆的磨损机制,可以总结归纳为机械抛光、显微切削、疲劳脱落三种磨损形式^[9-10]。

1.4 螺杆磨损数学模型建立

螺杆的磨损分为机械抛光、显微切削、疲劳接触三个阶段(如图 3 所示),三个阶段的物料状态不同,螺杆受到的摩擦与磨损行为也不同,就针对螺杆的不同摩擦与磨损行为,分别建立三个阶段的磨损数学模型。

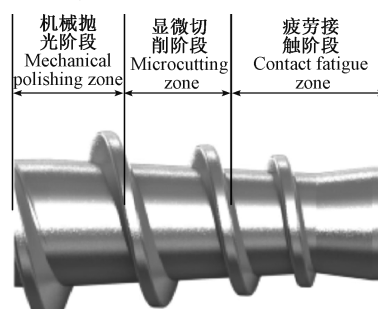


图 3 锥形螺杆不同磨损机理示意图
Fig.3 Schematic diagrams of different wear mechanisms of conical screw

(1) 机械抛光阶段数学模型

在机械抛光阶段,秸秆磨料在膨化腔内部处于游离状态,螺杆的磨损处于软磨料微粒磨损,对膨化机螺杆切削(磨损)作用并非连续稳定的摩擦磨损行为,切削或者磨削深度处于极小的状态,从而通过机械抛光的作用机理使膨化机螺杆表面的材料迁移损失。在此阶段的螺杆表面材料损失造成螺杆磨损的数学模型可以借鉴显微切削阶段显微切削过程的数学模型,差别仅在与机械抛光的切削深度与显微切削阶段切削深度相比小很多,但是作用机理相似。

(2) 显微切削阶段数学模型

在显微切削阶段,膨化机螺杆属于磨粒磨损,磨粒磨损是物料膨化的过程中秸秆或者秸秆中高硬度的结晶物作用在螺杆表面产生的塑性变形或因为组织断裂

引起表面损伤。在秸秆揉搓、挤压过程中,秸秆中的木质素、纤维素以及硅元素沉积的结晶物,在速度场和压力场的复合作用下,形成硬质结点磨粒的形式对螺杆的接触表面以非连续的不均匀接触造成磨损。属于磨粒磨损中的三体磨粒磨损^[11],其磨损情况示意图如图4、图5所示。

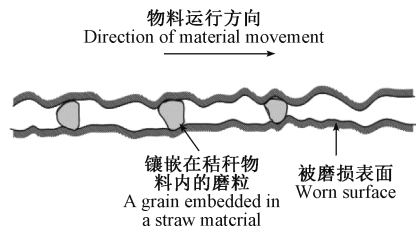


图4 硅酸类晶体滑动磨损示意图

Fig.4 Sliding wear diagram of silicate crystals

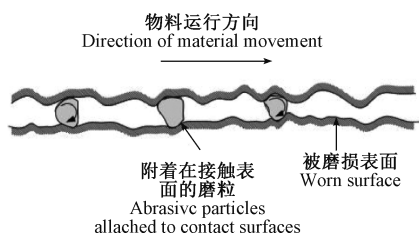


图5 硅酸类晶体滚动磨损示意图

Fig.5 Schematic diagram of rolling wear of silicate crystals

在显微切削阶段,随着摩擦和磨损行为作用在螺杆表面可以分为两个过程,显微切削的过程和塑性断裂的过程,这两个过程的磨损机理不尽相同,以下就这两个过程分别研究并建立相关数学模型。

1) 显微切削过程

在这一过程中,螺杆表面的材料迁移表现为犁削、堆积以及切削的形式,如图6所示。由于螺杆表面产生的犁沟使得螺杆表面的材料像两侧转移或者像前进方向迁移,但未剥离螺杆表面。

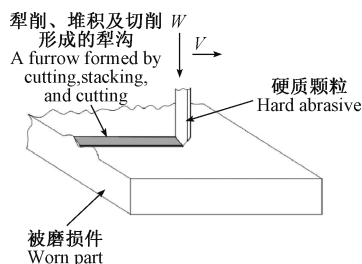


图6 显微切削过程示意图

Fig.6 Microcutting process diagram

根据微观切削原理的计算方法对磨粒磨损的显微切削过程做类比计算,其计算模型简化为如图7所示,假设磨粒形状为相同结构参数的微圆锥体,压入螺杆材料的半角为 β ,压入深度为 d ,则压入部分宽度为 $2a$ 。如图所示在载荷为 dW 作用下,螺杆表面材料处

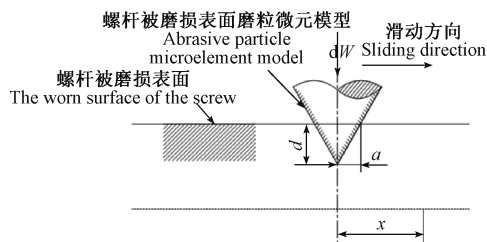


图7 磨粒磨损微元计算模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of micro-element calculation model for abrasive wear

于屈服状态,便有

$$dW = \frac{1}{2} \pi a^2 H_R \quad (1)$$

式中, H_R 表示螺杆表面硬度。

在螺杆正常转动的情况下,磨粒滑动 x 距离所移除的材料体积为

$$dv = a^2 x \tan \beta \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可以得到

$$dv = \frac{2dWx \tan \beta}{\pi H} \quad (3)$$

所有磨粒微元颗粒移除材料的总体积为

$$v = \frac{2Wx \tan \beta}{\pi H} \quad (4)$$

式中, $\overline{\tan \beta}$ 是所有磨粒微元颗粒 $\tan \beta$ 的加权平均值, H 被称为粗糙度系数。

假设磨粒磨损的显微切削阶段的行程为 L_0 至 L_1 ,并且材料的磨损率为常数,对于锥形螺杆在该行程内起始和终止的直径分别为 R_0 、 R_1 ,在显微切削阶段整个螺杆的材料磨损量可以表示为

$$M = \int_{L_0}^{L_1} \int_{R_0}^{R_1} \frac{2Wx \tan \beta}{\pi H} dR dx \quad (5)$$

在实际的工程应用问题中,式(4)的推导只是适用于磨粒磨损的简化模型,准确的说只是适用于磨粒磨损的显微切削阶段,并且对于磨粒的大小、形状分布和磨粒的前进方向上螺杆材料的表面粗糙度等情况等因素均未考虑在内。有关学者在研究磨粒磨损过程中,通过粘着磨损计算模型等效代替再修正方法^[12],可以应用于磨粒磨损范围较大的情况,其表达式可以简化为

$$M = \int_{L_0}^{L_1} \int_{R_0}^{R_1} \frac{k_a Wx}{H} dR dx \quad (6)$$

式中, k_a 表示量纲为1的磨粒磨损常数,其具体数值是根据磨粒硬度、形状和起切削作用的磨粒数量等因素决定的。

2) 塑性断裂过程

当膨化机螺杆表面受到多次材料迁移作用之后,

在反复的疲劳作用下使螺杆表面的材料剥离。材料迁移划痕沿上述形成的犁沟或随着螺杆的转动形成脊缘,在间歇接触载荷的反复作用下,类似脊缘被碾平直到最终发生断裂,如图 8 所示。这种材料的迁移过程也引起亚表面组织的塑性变形,变形表面和亚表面的裂纹生长产生新的扩展核,在后续的低循环高应力的载荷作用下,导致这些裂纹在表层内扩展并与临近裂纹相连,最终导致这些裂纹进一步扩展就形成磨损薄碎片,如图 9 所示。

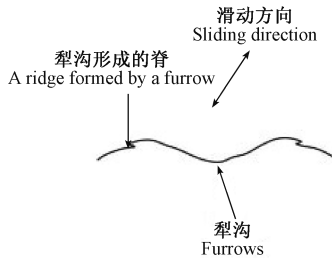


图 8 犁沟形成和表面裂纹示意图

Fig.8 Schematic diagram of furrow formation Figure and surface cracks

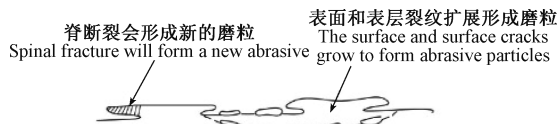


图 9 犁沟、表面扩展裂纹形成磨粒示意图

Fig.9 Schematic diagram of furrow and surface spreading crack forming abrasive grain

硬度高、韧性低的被磨损材料在高压强下与硬质颗粒接触时,产生裂纹并向内部扩展,当裂纹扩大到临界长度时被磨材料就会发生微观脆性断裂。微观断裂取决于断裂初性起、硬度、硬质磨粒的数量、形状和大小、外界压强等因素。压强一定时,被磨材料产生的压痕裂纹长度和数量与断裂初性 K_c 成反比。基于断裂力学的相关理论,S S Mirjavadi 和 W James D 等学者经过大量的研究推导出在断裂磨损情况下在显微切削阶段的线磨损率计算公式^[13-14]

$$\dot{M}_d = K_1 P^{\frac{5}{4}} (2a)^{\frac{1}{2}} K_c^{\frac{3}{4}} H^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中, $\dot{M}_d$ 为单位滑动距离的线磨损量, mm/m; K_1 为磨粒形状和分布系数, 一般情况下 K_1 取 2; $2a$ 表示磨粒实际作用的平均直径, mm; P 为螺杆材料所受真实接触压力, MPa; K_c 为断裂韧性, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; H 为硬度, 计算时需要将单位换算成 Pa。滑动距离 L_1 至 L_2 时, 直径变化范围为 R_1 到 R_2 , 在这一过程中螺杆材料脆性磨损量可以表示为

$$M = \int_{L_1}^{L_2} \int_{R_1}^{R_2} 2\pi 2ax \dot{M}_d dR dx \quad (8)$$

3) 疲劳接触阶段数学模型

同时在疲劳接触阶段, 秸秆物料单元被压实, 被认为形成不可压缩的刚体与螺杆表面相对转动, 螺杆的接触表面即会出现疲劳。因为重复载荷的作用, 在挤压膨化疲劳接触阶段(膨化腔内)属于疲劳磨损, 这个阶段的磨损受到材料、载荷、相对运动速度等各个因素的综合影响, 但是不具备一般规律, 因为物料在最后几节受到的压力最大, 磨损最为严重, Bayer 等认为材料的疲劳磨损是最不可忽略因素。因此当螺杆材料承受循环应力时, 不可避免的会产生疲劳磨损, 疲劳寿命一般用零部件的应力-循环次数 $P-N$ 曲线表示。在 Archard 磨损计算模型当中, 对于疲劳磨损的磨损率定义为磨损量与接触面积的比值, 疲劳磨损的磨损率表达式表示为

$$\dot{M}_p = \frac{1}{N} \frac{P}{H} \quad (9)$$

式中, N 表示循环作用的次数。

研究螺杆疲劳磨损阶段的磨损量大小, 可以先建立三维空间坐标系, 假设在质点运动的起始点作为原点(0,0,0), 在空间坐标系内研究单个质点在螺杆表面的运动情况, 将质点的运动分解为在笛卡尔($X-Y$)坐标系内的运动和在螺杆轴向(Z 轴方向)上的推进运动, 在笛卡尔坐标系中质点在螺杆圆周上匀速运动, 在 Z 轴方向上随螺旋升角前进做直线运动。在时间 t 内运动至点(X, Y, Z), 则此时质点的位置可以表示为

$$X = \int_{R_2}^{R_3} R(x) (\theta_1 - \sin \theta_1) dR \quad (10)$$

$$Y = \int_{R_2}^{R_3} R(x) (1 - \cos \theta_1) dR \quad (11)$$

$$Z = \int_{R_2}^{R_3} 2\pi R(x) n' \tan \varphi dR \quad (12)$$

式中, θ_1 表示螺杆在时间 t 内转过的角度, n' 表示螺杆转速(单位为 r/s), 因此在时间 t 内螺杆表面的质点划过的弧长可以表示为

$$s = \int_s \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} dt = \int_0^{\theta_1} \sqrt{X_t^2 + Y_t^2 + Z_t^2} d\theta_1 \quad (13)$$

将质点划过的弧长与螺杆疲劳磨损的磨损率做乘积, 则得到在该弧线上的磨损量, 因此以螺杆中心为圆心, 以该弧线为外切线所形成的包络面就是在时间 t 内螺杆材料的磨损表面, 因此螺杆的磨损量可以表示为

$$M_p = \int_0^{R_2-R_3} \int_0^{\theta_1} \dot{M}_p \sqrt{X_t^2 + Y_t^2 + Z_t^2} d\theta_1 dR \quad (14)$$

通过式(14)可以看出磨损量随转过的角度(即疲劳磨损的作用次数)和螺杆直径的相对减小量有关, 因此螺杆受磨损最为严重的就是疲劳接触阶段, 在这

一阶段摩擦和磨损行为的主要形式为典型的接触式疲劳磨损,具体体现在膨化腔内螺杆的梢部的疲劳磨损,尤其是螺杆的最后 1 至 2 节,螺旋叶片和螺杆基圆表面的磨损都造成严重的磨损,随着磨损的进行导致其表面压力状态和膨化腔内的温度状态是不稳定的,再者由螺杆在铸造以及机械加工时的工艺缺陷,导致气穴、沙眼以及机加工过程中的表面质量因素,螺杆的接触表面的疲劳磨损计算与理想的工况条件下有一定的差异。

2 螺杆摩擦力分析及其力学模型的建立

秸秆材料在膨化机内的输送及建压是一个相当复杂的过程,为了能够进行理论分析,需要做出以下几点基本假设^[15-16]:

(1)螺槽内压缩的物料为可压缩的连续性物质,其密度沿着螺槽方向变化;

(2)物料与螺槽的底部、侧面及螺旋锥桶内壁表面均紧密的接触,秸秆物料与这些接触面之间的摩擦力仅与法向应力有关,与物料的运动状态和所处位置无关;

(3)假设螺杆静止不动,玉米秸秆物料在螺杆圆周方向上作匀速旋转运动。

根据以上假设,可以将物料单元在膨化机螺槽内的运动模型简化为如图 10。

假设在螺槽中的任意位置有一微元体,所取微元体在螺槽中运动时一共受到如下几个力, F_1 表示螺杆对物料的摩擦阻力, F_3 、 F_4 、 F_5 表示螺槽的侧面和底面对物料的摩擦力, F_2 、 F_6 表示膨化物料在前进方向上受到的阻力, F_7 、 F_8 表示螺槽的侧面对物料的正压力。物料受力状态简图如图 11 所示。

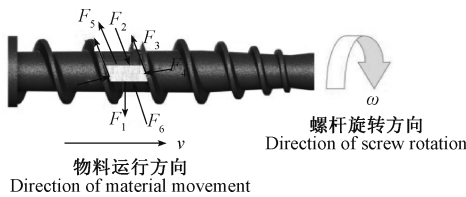


图 10 物料单元体受力状况示意图

Fig.10 Schematic diagram of the force status of the material unit

膨化机内物料单元受到的摩擦阻力 F_1 的方向与膨化物料的运动速度相反,因此 F_1 可表示为

$$F_1 = f_1 PLdz \quad (15)$$

式中, f_1 表示物料单元与膨化腔之间的摩擦因数。

F_2 为物料单元在前进方向上所受到的推力,其大小为

$$F_2 = PLH \quad (16)$$

F_3 、 F_4 分别表示膨化腔两侧面对膨化物料的摩擦

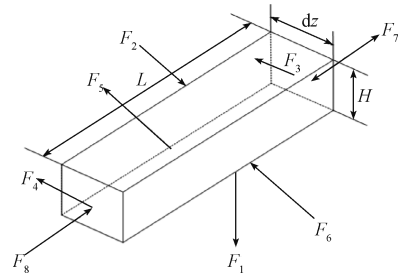


图 11 物料微元体受力状态图

Fig.11 Material micro-body force state diagram

阻力,其大小可以表示为

$$F_3 = F_7 f_2 \quad (17)$$

$$F_4 = F_8 f_2 \quad (18)$$

其中, f_2 表示物料与膨化机螺杆之间的摩擦因数。

F_5 为膨化腔螺杆对物料的摩擦阻力,其大小可以表示为

$$F_5 = f_2 PLdz \quad (19)$$

F_6 为物料单元体在膨化腔内沿前进方向上受的摩擦阻力,其大小可以表示为

$$F_6 = (P + dP) LH \quad (20)$$

F_7 、 F_8 分别表示膨化物料受到膨化腔侧面的正压力,其大小可以表示为

$$F_7 = K_y PLdz + F_d \quad (21)$$

式中, F_d 表示在运动方向上后一个物料单元作用在前一个物料单元体上的一个正推力

$$F_8 = K_y PLdz \quad (22)$$

3 螺杆表面载荷确定及磨损仿真

3.1 螺杆表面载荷确定

本文中根据现场实际使用情况,设置膨化机螺杆转速定值(实际工作过程中转速会有一定变化),将速度作为不变因素考虑获得螺杆(主要是挤压输送段)的载荷情况。因为秸秆物料对螺杆是非连续载荷作用,利用离散元单元法,通过 Edem 仿真软件实现秸秆的物料在整体运动过程中对膨化机螺杆受力情况的更加直观的描述。

由仿真图像图 12 可以看出,1 s~2 s 内螺杆表面载荷相对稳定,没有出现剧烈的载荷波动,主要原因是在这个过程秸秆物料在膨化腔内与螺杆的摩擦与磨损行为处于机械抛光阶段,作用机理主要是磨削或者显微切削。在图 2 中,秸秆物料的含水率为 10% 时,膨化腔内的压力在 3 s~8 s 内逐渐出现波动,第一次达到波动峰值是由于秸秆的密度迅速增加,体积减小,螺杆表面的摩擦热升高,随之达到最大,其中最大压力载荷为 4.77 MPa。

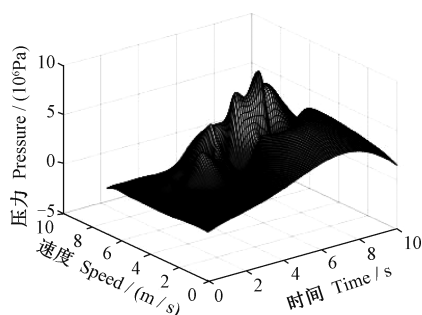


图 12 秸秆对锥形螺杆的载荷状况

Fig.12 Load diagram of tapered screw on straw with different moisture content

3.2 Edem 颗粒模型的建立

根据膨化机内物料颗粒的实际形状,由于膨化腔内的物料颗粒形状本文中以类似的模型颗粒代替秸秆物料颗粒进行仿真计算,根据秸秆颗粒的实际物理参数设置颗粒模型的基本参数。在设置颗粒与膨化机螺杆之间的接触模型时可以将该接触形式设置为 Hertz-Mindlin (no-slip) 模型。在颗粒设置过程中,以重力竖直向下的方向为正方向^[17-18]。针对不同形状的颗粒模型,采用不同的颗粒直径进行定义,其颗粒的直径为 3 mm~5 mm 之间,为了使得仿真计算与实际工程问题更加接近,避免因颗粒模型单一而造成的仿真误差,所以颗粒尺寸、形状的分布方式应选择正态分布。仿真颗粒模型如图 13 所示。

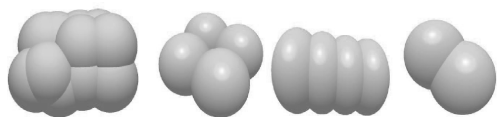


图 13 仿真颗粒模型

Fig.13 Simulation Particle Model

3.3 秸秆颗粒磨损螺杆仿真

Edem 可以分析秸秆膨化机膨化腔内部分物料颗粒膨化过程中的运动情况^[19-20],仿真得到颗粒的运动路径。同时还可以分析颗粒的运动速度和运动轨迹。通过对颗粒的路径和颗粒的分布规律进行追踪研究分析,可以更好帮助理解确定螺杆磨损机理以及磨损区域的发生位置如图 14 所示。现在以含水率 10%,秸秆组合比例为有节/无节含量 20%、80%时秸秆物料的分布规律进行研究。

由仿真图像图 15 可以看出,在磨料含水率 10% 时,螺杆最大磨损位置发生在锥形螺杆螺旋的外缘,在仿真时间内的最大磨损量为 0.010 4 mm;在进料口位置螺旋的外缘有明显磨损作用,因为 10% 含水率属于较低情况,秸秆的硬度较高,在进料口位置的切削作用越显著。

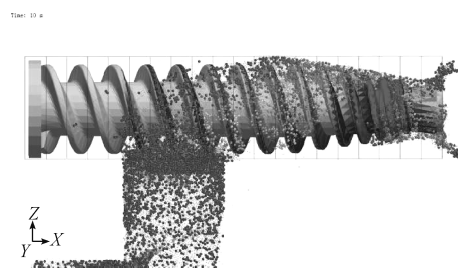


图 14 秸秆颗粒运动模型图

Fig.14 Straw particle motion model diagram

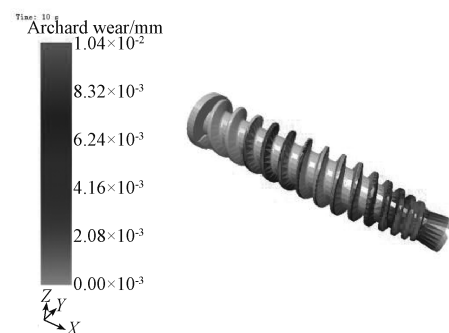


图 15 10% 含水率条件下螺杆的磨损仿真图像

Fig.15 Simulation image of screw wear under 10% moisture content

4 结论

本文通过对 9P-150 型秸秆膨化机膨化螺杆在磨料特性确定条件下进行受力分析及磨损机理研究,得到关于以下结论:

1) 膨化机螺杆的磨损以膨化腔内的锥形螺杆磨损为主,锥形螺杆的磨损机理是一种组合磨损,有三个阶段:机械抛光阶段、显微切削阶段、疲劳脱落阶段;各个阶段的磨损量有所不同,最大磨损量位置发生在疲劳接触阶段,即挤压输送段,此时螺杆表面以及螺旋的外缘磨损最为严重,这与实际生产情况完全一致;

2) 本文只针对秸秆含水率 10% 的情况进行模拟仿真,主要考虑含水率较低情况下秸秆碎屑硬度较大,尤其在挤压输送段处受到最大挤压时,秸秆基本达到不可压缩态,此时秸秆压块硬度较大,近似硬磨料磨损,适用于 Archard 法进行模拟;

3) 如果秸秆含水率较大,例如夏季收割的青秸秆,含水率可达 50% 甚至更大,此种情况下将如何对挤压输送段进行磨损模拟、是否还适用 Archard 法将是进一步研究的方向。

参考文献 (References)

- [1] 孙春一, 石 彬. 单螺杆膨化机磨损计算模型建立及分析[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 78-80.
SUN ChunYi, SHI Bin. Establishment and analysis of the wear-calculating model for single screw extruder[J]. Food & Machinery,

- 2011, 27(1): 78-80 (In Chinese).
- [2] 张 炜, 黄晓鹏, 吴劲锋, 等. 土壤含水率对 45 号钢磨损性能的影响[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(3): 142-145.
ZHANG Wei, HUANG XiaoPeng, WU JinFeng, et al. Effect of soil moisture on wear resistance of 45 steel [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(3): 142-145 (In Chinese).
- [3] 张克平, 吴劲锋, 黄晓鹏, 等. 含水率对小麦磨料磨损性能影响的试验[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(5): 52-54.
ZHANG KePing, WU JinFeng, HUANG XiaoPeng, et al. Experiment of abrasive wear for wheat grain powder of different moisture content [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(5): 52-54 (In Chinese).
- [4] 张永清, 陈强业. 含水量对磨料磨损的影响[J]. 上海交通大学学报, 1985(2): 34-47.
ZHANG YongQing, CHEN QiangYe. Influence of moistening on abrasive wear [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1985 (2): 34-47 (In Chinese).
- [5] 黄晓鹏, 万芳新, 吴劲锋, 等. 热处理工艺对 45# 钢抗苜蓿草粉磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2016, 41(12): 57-61.
HUANG XiaoPeng, WAN XinFang, WU JinFeng, et al. Friction and wear behavior of 45 steel at different heat treatment process with alfalfa powder [J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(12): 57-61 (In Chinese).
- [6] 李永力, 唐秀丽. 变质处理及热处理对低合金白口铸铁组织和韧性的影响[J]. 机械强度, 2017, 39(3): 545-550.
LI YongLi, TANG XiuLi. Influence of modification and heat treatment on microstructure and impact toughness of low alloy white cast iron [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(3): 545-550 (In Chinese).
- [7] 陈仪先. 膨化机螺杆磨损失效机理分析及制造材料研究[J]. 武汉食品工业学院报, 1994(4): 44-48.
CHEN YiXian. An analysis for the mechanism of the effect loss for the screw of the food expander and the study of the screw material [J]. Journal of Wuhan Food Industry College, 1994 (4): 44-48 (In Chinese).
- [8] 吴明清, 吴劲锋, 黄晓鹏. 金属材料抗植物磨料磨损表面轮廓分形维数计算[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(5): 137-140.
WU MingQing, WU JinFeng, HUANG XiaoPeng. Fractal dimension calculation on wear surface profile of metal materials against plant abrasive [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(5): 137-140 (In Chinese).
- [9] 金红杰, 吴恒安, 曹 刚, 等. 螺杆泵系统漏失和磨损机理研究[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 179-184.
JIN HongJie, WU HengAn, CAO Gang, et al. Slippage and abrasion mechanism of progressive cavity pump [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4): 179-184 (In Chinese).
- [10] 操建平, 孟庆昆, 高圣平, 等. 螺杆泵转子磨损机理研究及解决方案[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(10): 15-19.
CAO JianPing, MENG QingKun, GAO ShengPing, et al. Abrasion mechanism and solutions of rotor for progressing cavity pump [J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(10): 15-19 (In Chinese).
- [11] B. 布尚. 摩擦学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 326-330.
B. Bhushan. Introduction to tribology [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 326-330.
- [12] 陈 奇, 王亚东, 李 浩, 等. 考虑摩擦的球面法向接触阻尼计算修正模型[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(6): 257-263.
CHEN Qi, WANG YaDong, LI Hao, et al. A modified model for spherical normal contact damping calculation considering friction [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(6): 257-263 (In Chinese).
- [13] S S Mirjavadi, Mohammad Alipour, Hamouda A M S, et al. Effect of multi-pass friction stir processing on the microstructure, mechanical and wear properties of AA5083/ZrO2 nanocomposites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017(726): 1262-1273.
- [14] W James D, Mimnaugh Kimberly D, Rufner Alicia S, et al. Grafted vitamin-euhmwpe may increase the durability of posterior stabilized and constrained condylar total knee replacements [J]. Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials, 2017, 105(7): 1789-1792.
- [15] 张艳明, 娜日娜. 单螺杆式挤压膨化机的使用特性解析[J]. 江西饲料, 2019(1): 5-6.
ZHANG YanMing, NA RiNa. Analysis of operating characteristics of single screw extruder [J]. Jiangxi Feed, 2019 (1): 5-6 (In Chinese).
- [16] 焦学健, 李丽君, 董抒华, 等. 聚丙烯/麦秸秆木塑复合材料的力学性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12): 25-28.
JIAO XueJian, LI LiJun, DONG ShuHua, et al. Mechanical properties of wheat straw reinforced polypropylene wood-plastic composite [J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12): 25-28 (In Chinese).
- [17] 王美美, 王万章, 杨立权, 等. 基于 Edem 的玉米子粒建模方法的研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(1): 80-84.
WANG MeiMei, WANG WanZhang, YANG LiQuan, et al. Research of discrete element modeling method of maize kernel based on EDEM [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(1): 80-84 (In Chinese).
- [18] 顿国强, 杨永振, 陈海涛, 等. 基于 Edem 的控位分层施肥开沟器作业过程的仿真与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(1): 95-100.
DUN GuoQiang, YANG YongZhen, CHEN HaiTao, et al. Simulation and experiment of the operation process of controller-position stratified fertilization trencher based on EDEM. [J] Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 2018, 44(1): 95-100 (In Chinese).
- [19] Wang T, Hebert D N. EDEM an ER quality control receptor [J]. Nature Structural Biology, 2003, 7910(5): 319.
- [20] 曹文广, 华 亮, 张高山. 粗粉分离器内颗粒运动分析[J]. 资源节约与环保, 2017(10): 83-85.
CAO WenGuang, HUA Liang, ZHANG GaoShan. Analysis of particle motion in coarse powder separator [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2017(10): 83-85 (In Chinese).