

单螺杆膨化机的物料输送机理研究

黄灿军

(广东水利电力职业技术学院, 广东广州 510635)

摘要: 为了建立一种有效的单螺杆膨化机内物料输送计算模型, 首先从分析螺槽中物料密度变化及物料微元体的受力入手, 建立单螺杆膨化机内物料输送的连续方程与运动方程, 进一步推导出单螺杆膨化机内的沿程压力和速度分布公式, 以及物料质量流率计算公式, 以期单螺杆膨化机的设计和应用提供理论上的支持。

关键词: 秸秆; 膨化机; 单螺杆

文章编号: 1673-9078(2012)11-1437-1440

The Principle of Materials Conveying in the Single Screw Extruder

HUANG Can-jun

(Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: A mathematic model of materials conveying in the single-screw extruder was establish based on the analysis of density fluctuation and forces acting differential element in the schraubenbahn. The calculation formula about the distribution of on-way pressure and velocity in the single-screw extruder was inferred from this mode. It provided a computational model in the design and use of single-screw extruder.

Key words: straw; extruder; single screw

挤压膨化加工技术的应用已有一百多年的历史, 如今在饲料加工领域的应用越来越广泛^[1]。农作物秸秆资源在我国十分丰富, 利用秸秆部分替代饲料粮食具有很好的经济和社会效益。但农作物秸秆质地粗硬、适口性差、消化率低、营养价值不高, 直接饲喂动物效果不佳。通过膨化机加工后农作物秸秆可变成芳香可口、营养丰富的优质颗粒饲料, 实现了秸秆养畜、过腹还田的低成本养殖, 节约大量粮食, 为养殖业发展带来巨大的经济效益。因此进行秸秆膨化机的相关设计开发和理论研究非常有必要。

1 单螺杆秸秆膨化机

单螺杆膨化机通常分为干法原料膨化机和湿法原料膨化机^[2]。干法原料膨化机依靠螺杆的旋转输送物料, 物料与螺杆及料筒表面之间的摩擦产生热能, 作为对物料进行熟化和脱水的唯一热源, 因此干法原料膨化机的能耗高、磨损较大^[3]。

物料进入膨化机内被螺杆作用, 向前输送, 在此过程中不断被压缩, 同时与螺杆表面及机筒内壁摩擦, 产生热量, 物料被加热, 物料中的水分转变为水蒸汽, 当高温高压的物料在口模处被挤出, 由于压力的突然

收稿日期: 2012-06-29

作者简介: 黄灿军 (1975-), 男, 讲师, 硕士研究生, 专业: 机械设计及理论

释放产生膨化效果。

物料在单螺杆膨化机内的输送及建压效果关系到膨化效果及生产率大小等问题。因此, 研究秸秆在单螺杆膨化机内的输送过程, 对提高单螺杆膨化机的膨化效果、提高整机的生产能力和降低功率消耗有很重要的意义。

图1是单螺杆干法膨化机螺杆示意图:

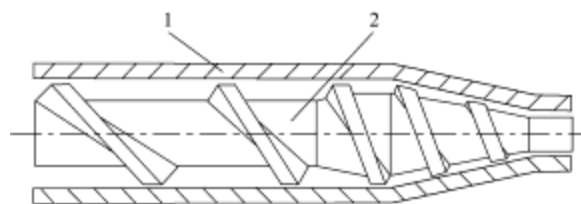


图1 料筒、螺杆结构示意图

Fig.1 Structure of barrel and screw

注: 1: 料筒, 2: 螺杆。

2 单螺杆膨化机物料输运过程简化模型

秸秆材料自料斗进入螺杆, 沿着螺槽方向从进料口开始不断被压实, 其密度不断增加, 经历了由松到密的过程。其主要目的就是为有效地建立膨化所需的压力。因此, 假定螺槽中运动的物料为可压缩的连续运动固体物质。传统的塑料挤出机内的固体输送理论已有深入而广泛的研究^[4,5], 其中经典的塞流理论认为物料是密实、无间隙的整块固体, 这显然与秸秆材

料在单螺杆膨化机机内的输送过程不符合，秸秆材料在单螺杆膨化机机内是一个逐渐被压实的过程。

2.1 输运过程中的假如

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：

- (1) 假定螺槽中运动的物料为可压缩的连续运动体，密度仅沿螺槽方向有变化；
- (2) 螺杆中的物料与螺槽底面、两个侧面和机筒内表面同时紧密地接触，物料和螺槽平板之间的摩擦力只取决于法向应力而与物料的位置和运动无关；
- (3) 忽略螺杆曲率的影响，可将螺槽展开为直槽，而料筒展开为平板；
- (4) 假设螺杆静止不动，料筒在圆周方向上作匀速旋转运动，物料在具有运动平板的直槽内输送，运动平板的运动方向与物料的运动方向成 ϕ 角（如图 2 所示）；
- (5) 运动平板作用在物料运动固体粒子上的力的方向与运动平板的运动方向之间的夹角为 θ ，且忽略该夹角沿着物料运动方向的变化；
- (6) 物料的法向应力与轴向（运动方向）应力之比为常数 K ，与位置无关，且忽略物料内应力分布的变化和温度变化的影响；
- (7) 轴向应力（压力）和法向应力只沿物料运动方向变化。

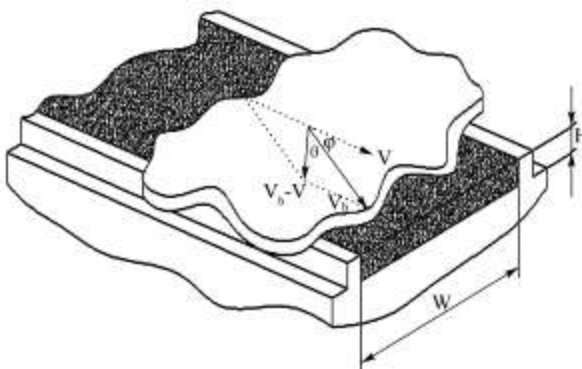


图2 膨化机物料输送简化模型

Fig.2 Schematic diagram of solid conveying model

基于上述的基本假设和分析，从而可以将膨化机中复杂的物料输运过程简化图 2 所示的物理模型。根据该物理模型，运用流体力学、物理学和数学等知识就可以建立相应的物料输运过程的数学模型。

2.2 数学模型的建立

由基本假设(1)可知：在螺槽中运动的物料为一连续运动介质，故也遵守质量守恒定律；当膨化机工作稳定以后，螺槽中运动物料从力学观点来说可以得到平衡。据此就可以建立螺槽中运动物料连续方程

和运动方程，进一步推导出螺槽中所建立的压力和物料的运动速度在螺槽中的变化规律，即压力分布函数和速度分布函数。

2.2.1 连续方程

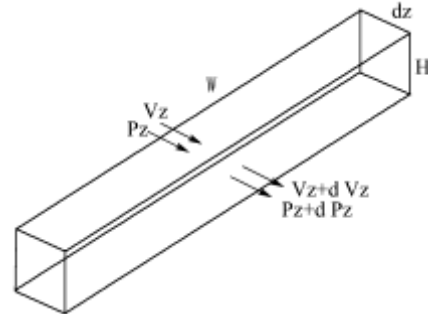


图3 运动分析示意图

Fig.3 Sketch of the movement analysis

如图 3 所示，在螺槽中任意位置 z 处取一微元体：则单位时间内在沿着 z 方向上：进入的物料质量为 $\rho v H W$ ，流出的物料质量可表示为 $(\rho + d\rho)(v + dv) H W$ ，当蒸汽爆破机工作稳定时，单位时间内进入微元体的物料质量等于流出的物料质量：

$\rho v H W - (\rho + d\rho)(v + dv) H W = 0$ (1)

将式 (1) 展开后略去其中的高阶项，化简可得：

$\rho \cdot dv + v \cdot d\rho = 0$ (2)

则式 (2) 即为所求连续方程。

2.2.2 运动方程

对微元体的受力分析见图 4。

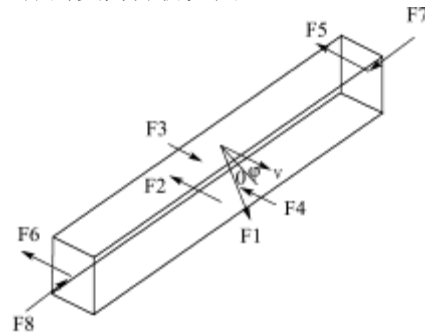


图4 微元体受力分析示意图

Fig.4 Forces acting differential element

微元体在螺槽中运动时，所受的力可以分为八个力来考虑。其中 F_1 为料筒对物料的摩擦力， F_2 、 F_5 、 F_6 分别为螺槽底部和侧面对物料的摩擦力， F_3 、 F_4 为微元体物料在前进方向所受的推力与阻力， F_7 、 F_8 为物料受到螺槽两个侧面的正压力。

F_1 为料筒对物料微元体的摩擦力，其方向与绝对速度 V_s 相反，其大小为：

$F_1 = f_1 P W \cdot dz$ (3)

其中 f_1 为物料与料筒间的摩擦系数。

F_2 为螺槽底部对物料微元体的摩擦力，其大小

为:

$$F_2=f_2PW \cdot dz \quad (4)$$

其中 f_2 为物料与螺杆间的摩擦系数。

F_3 为微元体物料在前进方向所受的推力, 其大小

为:

$$F_3=PHW \quad (5)$$

F_4 为微元体物料在前进方向所受的阻力, 其大小

为:

$$F_4=(P+dP)HW \quad (6)$$

F_5 、 F_6 分别为螺槽侧面对物料的摩擦力, 其大小

为:

$$F_5=F_7 \cdot f_2$$

(7)

$$F_6=F_8 \cdot f_2$$

(8)

F_7 、 F_8 分别为物料受到螺槽两个侧面的正压力, 其大小为:

$$F_7=KPH \cdot dz \quad (9)$$

$$F_8=KPH \cdot dz + F_d$$

(10)

$$F_d=F_8-F_7 \quad (11)$$

其中的 F_d 实际上是推进面作用在微元体上的一个正推力。

所取微元体在 z 方向上加速度为 dv/dt , 因此可知在 z 方向上的合力可表示为:

$$F_z = \rho HW dz \cdot \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

对 z 向进行受力分析, 可得:

$$F_1 \cos(\theta + \varphi) - F_2 + F_3 - F_4 - F_5 - F_6 = \rho HW dz \cdot \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

对 x 向进行受力分析, 可得:

$$F_1 \cdot \sin(\theta + \varphi) + F_7 + F_8 = 0 \quad (14)$$

将式 (3)、(9)、(10)、(11) 代入式 (14), 整理后

可得:

$$F_d = f_1 \cdot PW dz \cdot \sin(\theta + \varphi) \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (10), 可得:

$$F_8 = KPH dz + f_1 \cdot PW dz \cdot \sin(\theta + \varphi) \quad (16)$$

将 F_1 - F_8 表达式代入式 (13) 并进一步整理可得:

$$\begin{aligned} & [f_1 \cos(\theta + \varphi) - f_2 - Kf_1 f_2 \sin(\theta + \varphi)] W \cdot P - 2Kf_2 H \cdot P - HW \frac{dP}{dz} \\ & = \rho HW \cdot \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

令:

$$k_1 = f_1 \cos(\theta + \varphi) - f_2 - Kf_1 f_2 \sin(\theta + \varphi) \quad (18)$$

式中: k_1 表示一个与摩擦系数、输送角、螺纹升角相关的物理量。

则式 (17) 可化简为:

$$k_1 WP - 2Kf_2 HP - HW \frac{dP}{dz} = \rho HW \cdot \frac{dv}{dt} \quad (19)$$

则式 (19) 即为所求运动方程。

2.2.3 边界条件

在入口处, 我们认为物料所受到的压力等于大气压, 因此, 可写出其它的边界条件为:

$$P(z)|_{z=0} = p_0 \quad (20)$$

$$v(z)|_{z=0} = n\pi D \frac{\sin \varphi}{\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi} \quad (21)$$

式中: n 表示螺杆的平均转速; D 表示螺杆直径。

2.2.4 无量纲化及线性处理

从上面建立的方程来看, 两个式子中含有三个未知量 P 、 ρ 、 v , 显然不能直接求解。

对于生物质 P 与 ρ 之间的关系, 借鉴文献^[6]中的表达式:

$$\rho = \rho_m - (\rho_m - \rho_a) \cdot e^{-C_0 P} \quad (22)$$

式中: ρ_m 表示极限压力下的密度; ρ_a 表示松密度; P 表示压力; C_0 为一与物料性质有关的数, 随物料的不同而不同。

对 (22) 式两端对 z 求导, 可得:

$$\frac{d\rho}{dz} = (\rho_m - \rho_a) \cdot C_0 e^{-C_0 P} \frac{dP}{dz} \quad (23)$$

又根据速度、位移、时间三者之间的关系有:

$$v = \frac{dz}{dt} \quad (24)$$

将式 (22)、(23)、(24) 代入式 (2)、(19) 有:

$$[\rho_m - (\rho_m - \rho_a) e^{-C_0 P}] \cdot \frac{dv}{dz} + v(\rho_m - \rho_a) C_0 \cdot e^{-C_0 P} \cdot \frac{dP}{dz} = 0 \quad (25)$$

$$k_1 WP - 2Kf_2 HP - HW \frac{dP}{dz} = [\rho_m - (\rho_m - \rho_a) \cdot e^{-C_0 P}] \cdot HW \cdot v \frac{dv}{dz} \quad (26)$$

显然要直接对上式求解, 存在很大困难, 因此为方便分析, 先考虑无量纲化, 再作线性处理, 再求解。

设: \bar{P} 、 $\bar{\rho}$ 、 \bar{v} 作为压力、密度、速度的特征量;

另设: t_0 为特征时间, L 为特征长度; \bar{P} 取稳态下物

料输送段压力的平均值, L 取螺杆压缩段的结构参数, 即物料输送段的长度。

假设

$$\begin{cases} P = \bar{P}(1 + P^*) \\ \rho = \bar{\rho}(1 + \rho^*) \\ v = \bar{v}(1 + v^*) \\ z = L \cdot z^* \\ t = t_0 t^* \end{cases} \quad (27)$$

则式 (25)、(26) 可进一步化简为:

$$A_h \cdot \frac{dv^*}{dz^*} + \bar{P} \frac{dP^*}{dz^*} = 0 \quad (28)$$

$$B_h \cdot \frac{dv^*}{dz^*} + \bar{W} \bar{P} \cdot \frac{dP^*}{dz^*} = (k_2 \frac{W}{H} - 2f_2) L \bar{P} (1 + P^*) \quad (29)$$

其中:

$$A_h = \frac{\bar{\rho} e^{C_0 \bar{P}}}{C_0 (\rho_m - \rho_a)} \quad (30)$$

$$B_h = \rho_m \bar{v}^2 W \quad (31)$$

$$\bar{\rho} = \rho_m - (\rho_m - \rho_a) e^{-C_0 \bar{P}} \quad (32)$$

2.3.5 模型求解

对 (28)、(29) 两式求解可得:

$$P^* = e^{-D_h z^* + D_h C_1} - 1 \quad (33)$$

$$v^* = -\frac{\bar{P}}{A_h} \cdot e^{-D_h z^* + D_h C_1} + C_2 \quad (34)$$

其中:

$$D_h = -\frac{LA_h(k_1 W - 2f_2 H)}{H(B_h - WA_h)} \quad (35)$$

$$C_1 = \frac{\ln(P_0 + 1)}{D_h} \quad (36)$$

$$C_2 = n\pi D \frac{\sin \varphi}{\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi} + \frac{\bar{P}}{A_h} \cdot e^{D_h C_1} \quad (37)$$

对以上各式中的无量纲化作归并处理, 根据 (27) 式的假设, 有下面两式成立:

$$\int_0^1 P^* dz^* = 0 \quad (38)$$

$$\int_0^1 v^* dz^* = 0 \quad (39)$$

可求得:

$$\bar{P} = \frac{-(E_h + P_0) + \sqrt{(E_h + P_0)^2 - 2E_h[E_h - \frac{n\pi D \sin \varphi}{C_0(\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi)]}}{E_h} \quad (40)$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{A_h}{\rho_m} - \frac{LA_h(k_1 W - 2f_2 H)}{2H\rho_m W \cdot \ln(P_0 + 1)}} \quad (41)$$

其中:

$$E_h = \frac{n\pi D \sin \varphi \cdot \rho_m}{C_0(\rho_m - \rho_a)(\sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi)} \quad (42)$$

再根据 (27) 式即可求得单螺杆秸秆膨化机的轴向压力 P 和速度 v , 则可进一步求出物料沿螺槽的质量流量:

$$Q_s = \rho v W H \quad (43)$$

3 结论

单螺杆秸秆膨化机内物料的性质与传统的塑料挤出机内的塑料颗粒性质有较大区别, 因此单螺杆秸秆膨化机内的物料输送理论就不能完全采用传统的塑料挤出机的固体输送理论。秸秆在单螺杆膨化机内是一个逐渐被压缩, 逐渐建立压力和升温的过程。依据密度变化建立的物料输送数学模型, 计算出压力和速度计算公式, 再推算出单螺杆秸秆膨化机的物料质量流量计算公式, 对单螺杆秸秆膨化机的设计和应用有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 吴锦圃. 国外在挤压膨化机方面的创新[J]. 粮食与饲料工业, 2008, 8: 30-32
- [2] 王会然, 李宗军. 螺杆挤压机及其应用研究现状[J]. 食品工业, 2011, 10: 99-102
- [3] 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
- [4] 冯彦洪, 瞿金平. 单螺杆挤出机固体输送机理研究的发展趋势[J]. 中国塑料, 2000, 14(11): 1-9
- [5] 朱复华. 挤出理论及应用[M]. 中国轻工业出版社, 2001
- [6] 石宝山. 固体输送理论研究振动力场作用下的单螺杆挤出机[D]. 华南理工大学博士论文, 2006