

# 棉籽粉流变特性的研究

马榴强<sup>1</sup>, 王洪武<sup>2</sup>, 周建国<sup>2</sup>, 林炳鉴<sup>2</sup>

(1. 北京联合大学; 2 北京化工大学)

摘要: 用毛细管流变仪研究了棉籽粉的流变特性。实验结果表明: 棉籽粉呈现很强的非牛顿性, 剪切速率、温度和含水率对表观粘度影响显著; 表观粘度随剪切速率的增大而减小, 随温度的升高而减小, 随含水率的增大而减小。文中还提出了棉籽粉的粘度模型和半经验公式。

关键词: 棉籽粉; 流变性能; 粘度模型

中图分类号: O 414 13

文献标识码: A

文章编号: 100226819(2002)0420120203

棉籽粉是一种优良的蛋白质资源, 通常含有 30% ~ 50% 的蛋白质, 10% ~ 15% 的纤维素和其它一些营养成分, 其营养价值甚至高于谷类蛋白质。但经一般榨油处理后, 通常还含有较多有毒的棉酚, 因而不宜大量作饲料。我国是产棉大国, 每年都有成千上万吨的棉籽粉返田作肥料, 显然开发这一宝贵的蛋白质资源有着重要的意义。

挤压法具有高温、高压、短时强烈挤压的功能, 从而使物料的营养成分很少甚至不被破坏。因此, 挤压法可以有效地脱除棉籽粉棉酚、提高消化率<sup>[1]</sup>。棉籽粉流变性能的测试和粘度模型的建立, 是控制挤压过程和挤压产品性质、设计新的挤压工艺和对挤压过程进行模拟的基础。但国内外相关的研究工作很少。本文着重对实际加工条件下的棉籽粉的流变性能进行研究。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验仪器

孟山都流变仪(北京化工大学测试中心)。将试样装入毛细管流变仪的料筒中, 上加柱塞, 试样恒温后, 柱塞以恒速下降施加荷重于试样, 使试样在毛细管中挤压。 $D_c$ : 毛细管直径,  $L_c$ : 毛细管长度(模孔长度)。毛细管壁上的剪切应力( $S_w$ )与沿毛细管的压力降( $P_c$ )的关系, 以下列方程表示

$$S_w = \frac{P D_c}{4 L_c} \quad (1)$$

压力降可用活塞荷重  $F_p$  和活塞直径  $D_p$  表示

$$P_c = \frac{F_p}{D_p^2} \quad (2)$$

毛细管壁上的表观剪切速率 $\dot{\gamma}_{av}$ , 可以通过毛细管的

流率 $Q_v$  来确定

$$\dot{\gamma}_{av} = \frac{32 Q_v}{D_c^3} \quad (3)$$

流率由活塞面积与活塞速度  $v_p$  来确定

$$Q_v = \frac{P}{4} v_p D_p^2 \quad (4)$$

则表观粘度可由剪切应力除以表观剪切速率确定

$$G = \frac{S_w}{\dot{\gamma}_{av}} \quad (5)$$

### 1.2 实验原料

棉籽粉, 山东高青第四油料厂生产。

### 1.3 实验方法

用孟山都流变仪, 在不同温度和不同含水率下, 测试棉籽粉的流变性能, 测试条件如表 1 所示。在已恒温的料筒中加入棉籽粉压实, 恒温 15 min, 记录不同载荷下的形变曲线, 处理数据。

表 1 棉籽粉流变实验的测试条件

Table 1 Rheological experimental conditions of cottonseed meal

含水率(湿基)	温度 $\theta$	60	80	100	120	140
0.35						
0.45						
0.55						

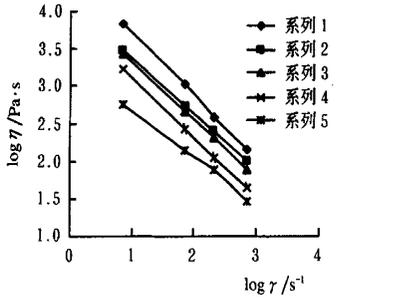
## 2 结果与讨论

### 2.1 剪切速率对表观粘度的影响

一般情况下, 聚合物在挤压加工过程中的剪切速率在  $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  之间, 测试中的剪切速率在  $7.19 \sim 719 \text{ s}^{-1}$  之间, 与实际加工的工艺条件一致。由测试结果可知: 棉籽粉(含水率在 35% ~ 55% 之间)的非牛顿指数  $n$  在 0.1 ~ 0.4 之间, 是典型的非牛顿流体。

收稿日期: 2002201215

作者简介: 马榴强(1963-), 男, 副教授, 北京市 北京联合大学化工学院, 100023



1—60 2—80 3—100 4—120 5—140

图 1 棉籽粉(含水率为 35%)的流变曲线

Fig 1 Rheological curves of cottonseed meal (35% moisture)

图 1 是棉籽粉(含水率为 35%)的流变曲线。从图 1 可以看出,棉籽粉的表现粘度随剪切速率的增大而减小,呈现典型的非牛顿性。在通常可以达到的剪切速率范围内,在不同温度下,表现粘度与剪切速率的对数关系都成较好的直线关系,因此棉籽粉的剪切流动可以用幂律方程来描述<sup>[2]</sup>

$$S = m \cdot \dot{\gamma}^n \text{ 或 } G = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

式中  $m$  —— 棉籽粉的稠度,  $N \cdot s^n \cdot \dot{\gamma}^{-n}$ ;  $n$  —— 非牛顿指数。

表现粘度与剪切速率的关系可表示为<sup>[3,5]</sup>

$$G(\dot{\gamma}) = \left[ \left( \frac{S_0}{\dot{\gamma}} \right)^n + L^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

式中  $S_0$  —— 棉籽粉的屈服应力, Pa;  $L$  —— 棉籽粉的高剪切极限粘度,  $Pa \cdot s$ 。

### 2.2 温度对表现粘度的影响

从图 1 可见,温度对棉籽粉表现粘度的影响非常显著。表现粘度随温度的升高而减小。

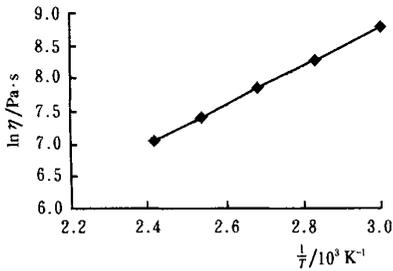


图 2 lnG与 10³/T 的关系

Fig 2 Relationship between lnG and 10³/T

图 2 是棉籽粉(含水率为 35%)在  $\dot{\gamma} = 7.19 \text{ s}^{-1}$  时的  $\ln G$  与  $10^3/T$  的关系。从图 2 可以看出,在恒定的剪切速率下,棉籽粉的  $\ln G$  对  $10^3/T$  的直线关系非常好,说明此时的粘—温关系可以用阿伦尼乌斯方程表示<sup>[3]</sup>

$$G = A e^{k^1 \frac{1}{T}} \quad (8)$$

式中  $R$  —— 气体常数,  $8.32 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $E$  ——

粘流活化能,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 在一定温度范围内可视为常量;  $T$  —— 绝对温度, K。

对式(8)两边取对数,得

$$\ln G = \ln A + \left( \frac{E}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (9)$$

从图 2 中的直线斜率可以求出粘流活化能  $E$ ,  $E = 3.0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 则表现粘度与温度的关系可以用下式表示

$$G(T) = A e^{\left( \frac{E}{R} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \quad (10)$$

式中  $A$  —— 在一定剪切速率下为常量,  $Pa \cdot s$ ,  $A = \left[ \left( \frac{S_0}{\dot{\gamma}} \right)^n + L^n \right]^{\frac{1}{n}}$ ;  $T_r$  —— 参考温度, K;  $E$  —— 粘流活化能,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $E = 3.0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

### 2.3 含水率对表现粘度的影响

食品、饲料的挤压蒸煮是在水介环境中进行的,水既是食品、饲料原料的组成部分,又是物化反应的介质环境。棉籽粉因含水率的不同,其物料性能(如密度、粘度、比热等)也不同。因此,水不仅影响物料体系的相容性,而且也影响其流变性能。

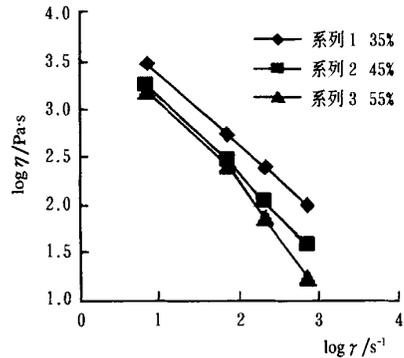


图 3 含水率对棉籽粉流变性能的影响

Fig 3 Effect of moisture content on rheological property of cottonseed meal

图 3 是含水率不同的棉籽粉在  $80 \text{ s}^{-1}$  时的流变曲线。从图 3 可以看出,含水率对棉籽粉的表现粘度有着显著的影响,粘度随着含水率的增大而减小。这一变化关系对实际挤压加工具有重要的意义。

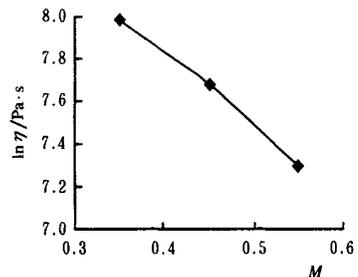


图 4 lnG与 M\_c 的关系

Fig 4 Relationship between lnG and M\_c

图 4 是棉籽粉在  $\dot{\gamma}$  为  $7.19 \text{ s}^{-1}$  时的  $\ln G$  与  $M_c$ 。

(含水率,湿基)的关系。从图 4 可以看出,在一定温度下,棉籽粉的  $\ln G$  对  $M_c$  有较好的直线关系,说明此时的粘度—水分关系可以用下式表示<sup>[4]</sup>

$$G = B e^{b M_c} \quad (11)$$

式中  $b$ ——无量纲水分系数;  $M_c$ ——含水率,湿基

对式(11)两边取对数,得

$$\ln G = \ln B + B M_c \quad (12)$$

从图 4 中的直线斜率可以求出无量纲水分系数  $b$ ,  $b = -3.4$ , 则表观粘度与含水率的关系可用下式表示

$$G(M_c) = B e^{b(M_c - M_{cr})} \quad (13)$$

式中  $B$ ——在一定剪切速率和一定温度下为常量, Pa $\cdot$ s;  $B = \left[ \left( \frac{S}{R} \right)^n + L_r \right]^{-1} e^{\left( \frac{S}{R} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) + b(M_c - M_{cr})}$ ;  $M_{cr}$ ——参考水分含量。

#### 2.4 棉籽粉的粘度模型

综合考虑剪切速率、温度、含水率对棉籽粉表观粘度的影响,可以得到以下公式

$$G = \left[ \left( \frac{S}{R} \right)^n + L_r \right]^{-1} e^{\left( \frac{S}{R} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) + b(M_c - M_{cr})} \quad (14)$$

式中  $T_r$ ——参考温度, K;  $M_{cr}$ ——参考水分含量(无量纲);  $S$ ——屈服应力, Pa;  $L_r$ ——高剪切极限粘度, Pa $\cdot$ s;  $R$ ——气体常数, 8.32 J $\cdot$ mol $^{-1}$  K $^{-1}$ ;  $E$ ——粘流活化能, kJ $\cdot$ mol $^{-1}$ ;  $b$ ——无量纲水分系数;  $n$ ——非牛顿指数。

这个粘度模型适用于通常加工条件下的棉籽粉的挤压加工,可以较准确地预测挤出机和机头内物料的表现粘度,从而有效地指导工艺条件的设置和

挤出过程的控制。

为了便于应用,可以取  $T_r = 393$  K,  $M_{cr} = 0.35$ ,  $S = 32.8$  kPa<sup>[5]</sup>,  $L_r = 21.0$  Pa $\cdot$ s<sup>[5]</sup>,  $b = -3.4$ ,  $n = 0.2$ ,  $E = 3.0$  kJ $\cdot$ mol $^{-1}$  代入式(14),可以得到以下半经验公式

$$G = \left( \frac{8}{1.02} + 1.84 \right)^5 e^{\left( \frac{3.0}{T} - 3.4 M_c + 0.27 \right)} \quad (15)$$

### 3 结论

1) 棉籽粉是典型的非牛顿流体,其非牛顿指数在 0.1~0.4 之间。

2) 棉籽粉的表现粘度随剪切速率的增大而减小,随温度的升高而减小,随含水率的增大而减小。

3) 剪切速率、温度和含水率对棉籽粉表现粘度的综合影响可以用公式(14)来描述,由此得出的半经验公式(15)则可以较准确、较方便地预测表现粘度。

#### [参考文献]

- [1] 周建国,王洪武 棉籽粕双螺杆挤压脱毒中几个工艺参数的研究[J] 农业工程学报, 2000, 16(6): 110~113
- [2] 金日光 高聚物流变学及其在加工中的应用[M] 北京: 中国化工出版社, 1986 31~42
- [3] 阎琦等 高聚物成型原理[M] 北京: 北京化工学院出版社, 1989 47~58
- [4] Harper J M, et al Viscosity model for cooked cereal doughs [J] Chemical Engineering Progress Symposium Series, 1971, 67(108): 40~43
- [5] Morgan R G, et al A generalized viscosity model for extrusion of protein doughs [J] J Food Process Engineering 1989, 11: 55~78

## Rheological Properties of Cottonseed Meal

Ma Liuqiang<sup>1</sup>, Wang Hongwu<sup>2</sup>, Zhou Jianguo<sup>2</sup>, Lin Bingjian<sup>2</sup>

(1. Chemical Engineering College, Beijing Union University, Beijing 100023, China;

2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The rheological properties of cottonseed meal were investigated using a capillary rheometry. The experimental results showed that the cottonseed meal was a typical pseudoplastic fluid in the normal processing ranges, and the apparent viscosity decreased with increasing shear rate, decreased with increasing temperature and decreased with increasing meal moisture. A model based on these results to predict the apparent viscosity of cottonseed meal was also presented.

**Key words:** cottonseed meal; rheological property; viscosity model