

研究简报

# 非牛顿流体自然收敛半角方程的实验验证

梁基照

(华南理工大学化工机械系, 广州 510641)

关键词 非牛顿流体 聚乙烯 挤出流动 入口收敛 模型验证

## 引言

非牛顿流体从大截面流道进入小截面流道时形成的收敛流动, 是工业过程中常见的流型, 如石油输运、聚合物加工过程等. 流体的自然收敛角定量地描述了流体在流道入口前区的流动形态. 在先前的工作中, 作者<sup>[1]</sup>应用最小能原理, 导出非牛顿流体自然收敛半角方程

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left\{ \frac{1}{e} \left( \frac{R}{r} \right)^{\frac{3(n-1)}{2}} \left[ \frac{4}{3(n+1)} \left[ 1 - \left( \frac{R}{R_p} \right)^{\frac{3(n+1)}{2}} \right] + \frac{2\zeta}{3(n-1)} \left[ \left( \frac{R_p}{R} \right)^{\frac{3(n-1)}{2}} - 1 \right] \right] \right\} \quad (1)$$

当  $r = R$ , 且  $R_p \gg R$  时, 可得流体于流道入口处自然收敛半角的简化表达式为

$$\alpha_0 = \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{2}{3e} \left( \frac{2}{n+1} + \frac{\zeta}{1-n} \right) \right] \quad (2)$$

式中,  $e$  是 Bagley 校正因子,  $n$  是非牛顿指数,  $\zeta$  是与流体的粘附性能有关的系数.

聚合物熔体属于典型的非牛顿流体. 本工作中, 拟在考察聚乙烯熔体于毛细管挤出过程中流变行为的基础上, 对方程(2)作初步验证.

## 1 实验

### 1.1 原材料

选用高密度聚乙烯(HDPE)和低密度聚乙烯(LDPE)作为试样材料, 前者属注塑级塑料, 后者为吹膜级塑料. 原材料均为原色粒料, 其部分物性列于表 1. 表中,  $MI$  代表标准测试条件(2.16kg, 190℃)下的熔融流动指数,  $\rho$  是固态下的密度.

表 1 原材料的部分物性

Table 1 The part properties of the raw materials

| 材料   | 树脂牌号      | 生产厂家       | $MI^*$ | $\rho/g \cdot cm^{-3}$ |
|------|-----------|------------|--------|------------------------|
| HDPE | HMN-55180 | Daelim Co. | 18     | 0.955                  |
| LDPE | LD160AS   | Exxon Co.  | 4      | 0.921                  |

\* 以 10 分钟 1 克为基准

### 1.2 仪器及方法

主要实验仪器为意大利 Ceast 公司制造的 Rheovis 2100 型毛细管流变仪. 料筒直径  $D_p$  为 9.5mm, 工作长度为 280mm. 压力传感器置于柱塞顶部, 测量挤出过程中毛细管总压力降.

1995-11-07 收到初稿, 1996-04-22 收到修改稿.

联系人及第一作者: 梁基照, 男, 43 岁, 硕士, 副教授.

选择一组直径  $D$  为 1mm, 长径比  $(L/D)$  分别为 10、20、30、40 的毛细管口型, 入口角均为  $180^\circ$ 。

取料筒温度范围为  $180\sim 260^\circ\text{C}$ , 柱塞下降速度  $v$  为  $4\sim 75\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  (相应的表观剪切速率  $\dot{\gamma}_a$  约为  $50\sim 1000\text{s}^{-1}$ )。在此挤出条件下测量试样熔体的流变特性参数如压力损失、粘度和  $n$  等, 应用 Bagley 作图法确定  $e$  值<sup>[2]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实测数据

两试样熔体于实验条件下的流变特性参数  $e$  和  $n$  实测值列于表 2。由表可看出, 随着  $\dot{\gamma}_a$  的增加, LDPE 熔体的  $e$  和  $n$  值随之增大而 HDPE 则相反。这表明, LDPE 熔体的弹性特性在一定范围内随着  $\dot{\gamma}_a$  的增加而增加。这里,  $\dot{\gamma}_a$  可由下式定义

$$\dot{\gamma}_a = \frac{2\beta^2 v}{15D} \quad (3)$$

式中,  $\beta = D_f/D$ , 称为流道收缩比。本实验中,  $\beta = 9.5$ 。

表 2 180℃ 时  $n$ 、 $e$  的实测值及  $2\alpha_0$  的计算

Table 2 The measured values of  $n$ ,  $e$  and calculation of  $2\alpha_0$  at  $180^\circ\text{C}$

| LDPE                           |     |       |                     | HDPE                           |     |       |                     |
|--------------------------------|-----|-------|---------------------|--------------------------------|-----|-------|---------------------|
| $\dot{\gamma}_a/\text{s}^{-1}$ | $e$ | $n$   | $2\alpha_0/(\cdot)$ | $\dot{\gamma}_a/\text{s}^{-1}$ | $e$ | $n$   | $2\alpha_0/(\cdot)$ |
| 72.9                           | 2.6 | 0.268 | 68.8                | 101.4                          | 1.6 | 0.725 | 118.9               |
| 97.3                           | 3.5 | 0.331 | 54.4                | 317.7                          | 1.4 | 0.688 | 121.4               |
| 121.4                          | 4.0 | 0.380 | 49.0                | 519.8                          | 1.0 | 0.632 | 132.4               |
| 181.2                          | 4.9 | 0.465 | 42.6                | 718.4                          | 0.9 | 0.600 | 134.8               |
| 259.9                          | 5.2 | 0.543 | 42.6                | 920.5                          | 0.6 | 0.572 | 148.0               |

### 2.2 $2\alpha_0$ 的估算及比较

将表 2 中  $n$ 、 $e$  的实测数据代入方程(2), 可计算出两试样熔体于挤出条件下的  $2\alpha_0$  值, 结果如表 2 所示。这里, 取  $\zeta = 0.8$ 。从表 2 中可以看出, 当  $\dot{\gamma}_a$  小于  $180\text{s}^{-1}$  时, LDPE 熔体的  $2\alpha_0$  值随着  $\dot{\gamma}_a$  的增加而减小 (与  $n$  和  $e$  的变化恰好相反); 当  $\dot{\gamma}_a$  大于  $180\text{s}^{-1}$  后,  $2\alpha_0$  保持定值。对于 HDPE 熔体,  $2\alpha_0$  值随着  $\dot{\gamma}_a$  的增加而提高。

文献[3]中, 报道了几种聚合物材料在挤出条件下熔体的  $2\alpha_0$  值。其中, HDPE 和 LDPE 的情形列示于表 3。比较两表中的数据可知, 在相同的挤出条件下,  $2\alpha_0$  的理论计算值与文献[3]中报道的数值相当接近。从而初步验证了方程(2)的可行性。

表 3 文献[3]报道的  $2\alpha_0$  值

Table 3 The values of  $2\alpha_0$  reported in Ref. [3]

| 材料   | $T/^\circ\text{C}$ | $\beta$ | $2\alpha_0/(\cdot)$ | $\dot{\gamma}_a/\text{s}^{-1}$ |
|------|--------------------|---------|---------------------|--------------------------------|
| LDPE | 180                | 7.2     | 30~50               | 133                            |
| HDPE | 180                | 7.2     | 130                 | 133                            |
| LDPE | 183                | 5.3     | 30~40               | 133                            |

### 2.3 讨论

应用流动可视化技术, 可观察到挤出过程中 HDPE 熔体于口型入口前还以收敛流线充满有效空间, 而 LDPE 熔体的收敛流线则形成一杯状曲边体, 并存在环流区, 随着  $\dot{\gamma}_a$  的增加, 环流区扩大, 即  $2\alpha_0$  随之减小<sup>[4]</sup>。这种入口流型的差异主要归因于熔体的分子链结构的

不同。一般认为,当相对分子质量及其分布相同时,链支化度越高的熔体,其弹性越显著。从表 2 中可以看出,支链型的 LDPE,  $e$  值随着  $\dot{\gamma}_a$  的增加而增大,这意味着熔体在入口区流动中贮存的弹性能在一定的范围内随着挤出速率的提高而增加,收敛流动加剧,环流区扩大,导致  $2\alpha_0$  值减小。对于直链型(线型)的 HDPE,熔体在入口区流动中因链段间的缠结而相互牵扯,其收敛流动效应不太明显,且随着挤出速率的提高,剪切稀化效应增强( $n$  值下降),贮存的弹性能减少( $e$  值减小),导致环流区缩小而  $2\alpha_0$  值相应增大(参见表 2)。

### 3 结论

非牛顿流体的入口收敛流动是其粘弹行为的重要表现。在一定的流动条件下,入口前区流型主要取决于流体的内部结构,可用流体自然收敛角定量表示。

在考察毛细管挤出过程中聚乙烯熔体流变性的基础上,对前文[1]中导出的非牛顿流体自然收敛半角方程进行了验证。结果表明,应用该方程估算的 LDPE 和 HDPE 熔体的  $2\alpha_0$  值与文献中报道的相应条件下的数值相当接近。

### 符 号 说 明

|                               |                                                |
|-------------------------------|------------------------------------------------|
| $D$ ——口型直径, m                 | $r$ ——径向变量, m                                  |
| $D_p$ ——料筒直径, m               | $v$ ——柱塞速度, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$  |
| $e$ ——Bagley 校正因子             | $\alpha$ ——流体自然收敛半角, ( $^\circ$ )              |
| $L$ ——口型长度, m                 | $\alpha_0$ ——入口处流体自然收敛半角, ( $^\circ$ )         |
| $MI$ ——熔融流动指数(以 10 分钟 1 克为基准) | $\beta$ ——流道收缩比                                |
| $n$ ——非牛顿指数                   | $\rho$ ——材料密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ |
| $R$ ——口型半径, m                 | $\zeta$ ——流体粘附系数                               |
| $R_p$ ——料筒半径, m               | $\dot{\gamma}_a$ ——表观剪切速率, $\text{s}^{-1}$     |

### 参 考 文 献

- 1 梁基照. 力学学报, 1990, 22(1): 79~85
- 2 Bagley E B. J Appl Phys. 1957, 28(5): 624~627
- 3 丁浩. 塑料加工基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 165
- 4 Ballenger T F, Chen I J, Crowder J W, et al. Trans Soc Rheol. 1971, 15(2): 195~215

## EXPERIMENTAL VERIFICATION FOR HALF NATURAL CONVERGING ANGLE EQUATION OF NON-NEWTONIAN FLUIDS

Liang Jizhao

(Department of Chemical Machinery, South China University of Science and Technology, 510641)

**Abstract** The rheological properties of high and low density polyethylene (HDPE and LDPE) melts were investigated by using capillary rheometer, and preliminary verification for the half natural converging angle equation of non-Newtonian fluids which was derived in a previous work was made. The results showed that the natural convergent angles of the sample melts calculated by using the equation were in correspondence with the values reported in the literature under the relevant conditions.

**Keywords** non-Newtonian fluids, polyethylene, extrusion flow, entry convergence, model test