

# 胎面胶入口流动中涡流区长度的估算

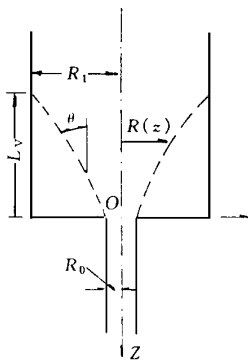
梁基照

(华南理工大学, 广州 510641)

**摘要** 讨论粘弹性流体流经突然收缩的流道时入口前区的环流问题. 在先前工作的基础上, 提出一预测涡流区长度  $L_V$  的简单表达式. 应用此式估算了胎面胶于毛细管挤出条件下的  $L_V$  值, 发现  $L_V$  与料筒直径之比约为 0.14~0.32, 且随着温度的升高而减小. 随着剪切速率的增高而增大.

**关键词** 胎面胶, 收敛流动, 入口区环流, 涡流区长度

当粘弹性流体流经突然收缩的流道时, 会使入口前区的流体流线不平行而形成一个锥状边界, 此即为入口收敛流动. 边界流线的切线与流道中心线所形成的夹角  $\theta$ , 称为流体自然收敛半角, 它不一定等于流道入口半角  $U$ . 当  $\theta < U$  时, 流体于流道入口前区将形成一涡(环)流区, 如附图所示.



附图 入口收敛流动

收敛流动是聚合物加工成型(如挤出和注塑等)过程中的流型. 涡流运动容易诱发不稳定流动现象, 并导致额外的能耗和影响制品质量, 因而一直成为聚合物加工流变学的研究热点之一. 涡流区长度 ( $L_V$ ) 和  $\theta$  是表征入口前区流动形态的重要参数, 但有关它们的定量描述则相对较少. Cable 和 Boger<sup>[1]</sup> 应用条纹摄影技术 (Streak Photography) 观察了水溶聚合物液体在闭环流动系统中的入口

流型, 并测量了入口涡流区的长径比  $\frac{L_V}{2R_1}$ , 发

现  $\frac{L_V}{2R_1}$  与 Weissenberg 数成线性函数关系.

Binding<sup>[2]</sup> 应用能量原理将入口压力降与流动速率和基本流变参数联系起来, 并提出关于  $L_V$  的表达式:

$$\frac{L_V}{2R_1} = \frac{1+t}{2(n+1)(2t-3n-1)} \times \left[ \frac{l(3n+1) \dot{\gamma}^t I_m}{k} \right]^{1/(1+t)} \times \dot{\gamma}^{(2t-n)/(1+t)} \times [1 - T^{2t-3n-1)/(1+t)}] T \quad (1)$$

式中,  $T = \frac{R_0}{R_1}$ ,  $t$  和  $n$  是幂律常数,  $k$  是稠度.  $I_m$  由下式确定:

$$I_m = \int_0^1 \left\{ \text{abs} \left[ 2 - \left( \frac{3n+1}{n} \right) O^{1/n} \right] \right\}^{1/n} O dO \quad (2)$$

显然, 公式(1)不适合于当  $2t = 3n + 1$  时的情况. 此外, 式中所含参数较多, 计算繁杂. 本文中, 笔者将在先前工作的基础上, 提出一个便于工程上应用的  $L_V$  表达式.

## 1 基本方程

若假定流体于入口前区内的剪切流动和拉伸流动均服从幂定律, 则根据流动中力的平衡关系和最小能原理, 可导出如下的粘弹性流体入口收敛边界流线方程<sup>[3]</sup>:

$$r = R_0 \left\{ \left[ \frac{2(3n-1)}{3(n+1)} (1 - T^{3(n-1)/2}) + \frac{(3n-1)^a}{3(n-1)} \left( \left( \frac{1}{T} \right)^{3(n-1)/2} - 1 \right) \right] \times \frac{z}{e R_0} + 1 \right\}^{2/(3n-1)} \quad (3)$$

式中,  $a$ 是与流体粘附性有关的系数,对于聚合物熔体,取  $a \approx 0.8$ ;  $e$ 是 Bagley 校正因子。

由附图可知,当  $z = L_V$  时,  $r = R_1$  于是由式 (3) 可导出涡流区长径比的表达式为

$$\frac{L_V}{2R_1} = \frac{1}{2} e T \left[ \left( \frac{1}{T} \right)^{3(n-1)/2} - 1 \right] / \left\{ \frac{2(3n-1)}{3(n+1)} (1 - T^{3(n-1)/2}) + \frac{(3n-1)^a}{3(n-1)} \left[ \left( \frac{1}{T} \right)^{3(n-1)/2} - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

上式表明,  $L_V$  是流体流变参数和流道收缩比的函数。对于假塑性流体,非牛顿指数  $n$  大于 0 而小于 1。这样,当  $n = \frac{1}{3}$  时,式 (3) 中的指数项以及式 (4) 出现分母为 0 的情况。根据极限法则,当  $n \rightarrow \frac{1}{3}$  时,式 (3) 收敛于

$$r = R_0 \exp \left\{ \left[ 1 - T + a(1 - T) \right] \frac{z}{e R_0} \right\} \quad (5)$$

类似地,可导出当  $n = \frac{1}{3}$  时涡流区长径比的表达式为

$$\frac{L_V}{2R_1} = \frac{\frac{1}{2} e T \ln \frac{1}{T}}{1 + T + a(1 - T)} \quad (6)$$

当  $T \ll 1$  时,上式可简写成

$$\frac{L_V}{2R_1} = \frac{e T \ln \frac{1}{T}}{2(1 + a)} \quad (7)$$

同理,若  $T \ll 1$ ,则式 (4) 亦可近似表示为

$$\frac{L_V}{2R_1} = \frac{\frac{1}{2} e T \left[ \left( \frac{1}{T} \right)^{\frac{3n-1}{2}} - 1 \right]}{\frac{2(3n-1)}{3(n+1)} + \frac{(3n-1)^a}{3(n-1)} \left[ \left( \frac{1}{T} \right)^{\frac{3(n-1)}{2}} - 1 \right]} \quad (8)$$

至此,根据待研究物料的粘弹性和流道

的几何形状(流道收缩比),可从上述公式中选择合适者来估算挤出条件下的涡流区长度。对于聚合物熔体,  $n$  通常介于 0.2~0.4 这样,从式 (7) 可以看出,  $L_V$  主要是  $e$  的函数,而  $e$  是表征流体弹性特性的重要参数。

## 2 实验

### 2.1 试验材料

试验材料为工业用胎面胶料,主要组分包括 NR, SBR 中超耐磨炭黑和机油等,经密炼机配炼而成<sup>[4]</sup>。

### 2.2 仪器及方法

采用柱塞式毛细管流变仪,于料筒温度为 100~110°C 下考察试样的流变性质。料筒内径  $2R_1 = 23.6 \text{ mm}$ ; 毛细管直径  $2R_0 = 2 \text{ mm}$ ,长径比  $\frac{L}{2R_0}$  分别为 1.25, 2.5, 5.0, 7.5, 10, 入口角均为 180°。应用 Bagley 作图法确定实验条件下的  $e$  值,非牛顿指数则由下式计算:

$$n = \frac{d \log \dot{\gamma}_w}{d \log \dot{\gamma}_a} \quad (9)$$

式中,壁面剪切应力  $\dot{\gamma}_w$  和表观剪切速率  $\dot{\gamma}_a$  可分别由下列公式定义

$$\dot{\gamma}_w = \frac{\Delta P}{4 \left[ \left( \frac{L}{2R_0} \right) + e \right]} \quad (10)$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{V R_1^2}{15 R_0^3} \quad (11)$$

式中,  $V$  是柱塞下降速度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 试样的流变性质

表 1 列出了试样在挤出条件下流变特性参数的实测值。其中,  $\Delta P_{\text{end}}$  称为末端压力损失,它与  $e$  的关系可由下式定义:

$$e = \frac{\Delta P_{\text{end}}}{4 \dot{\gamma}_w} \quad (12)$$

从表 1 可以看出,在一定的温度条件下,  $\Delta P_{\text{end}}$ ,  $n$  和  $e$  的值均随着  $\dot{\gamma}_a$  的增加而提高。

这是因为,挤出速率的提高使得流体于入口处的收敛流动加剧,流体内贮存的弹性应变能相应地增加,导致末端效应增强,表现为  $\Delta P_{\text{end}}$  和  $e$  的值在一定范围内增大;而  $n$  值随  $\dot{V}_a$  的增加而提高,意味着流体的非牛顿性随着挤出速率的增加而有所削弱

表 1 试样的  $\Delta P_{\text{end}}$  和  $n$  及  $e$  的实测值<sup>[4]</sup>

$\dot{V}_a$ $\text{s}^{-1}$	$\Delta P_{\text{end}}$ MPa	$n$	$e$
温度为 100°C			
92.83	0.458	0.216	3.35
139.24	0.667	0.265	4.38
185.65	0.790	0.380	4.48
232.07	0.910	0.392	4.91
温度为 110°C			
92.83	0.458	0.233	2.70
139.24	0.618	0.286	3.78
185.65	0.708	0.394	4.06
232.07	0.796	0.407	4.42

### 3.2 $L_V$ 值的估算

由上述的仪器几何参数可知,  $T=0.085$ , 远小于 1,故可选用式 (8) 来估算试样挤出条件下的  $L_V$  值。将表 1 中列出的  $n$  和  $e$  的测量数据代入式 (8), 计算结果列于表 2。从表 2 中可以看出,当温度一定时,  $\frac{L_V}{2R_1}$  值随着  $\dot{V}_a$  的增加而提高;而在固定的  $\dot{V}_a$  下,  $\frac{L_V}{2R_1}$  值随着温度的升高而有所减小。

表 2 挤出条件下  $\frac{L_V}{2R_1}$  的估算值

$\dot{V}_a$ $\text{s}^{-1}$	$\frac{L_V}{2R_1}$	
	100°C	110°C
92.83	0.164	0.138
139.24	0.232	0.227
185.65	0.296	0.276
232.07	0.329	0.305

如前所述,当其它条件一定时,挤出速度的提高使得流体的入口收敛流动加剧,贮存的弹性能相应增加,从而导致末端效应增强,表现为  $e$  值在一定范围内增大(见表 1),  $\frac{L_V}{2R_1}$

值也随之提高〔见式 (8)〕;另一方面,非牛顿指数  $n$  也随着  $\dot{V}_a$  的增加而增大,也会令  $\frac{L_V}{2R_1}$  值有所增大。而随着温度的升高,材料的弹性特性将被削弱,导致末端效应减弱,表现为  $e$  值有所减小,  $\frac{L_V}{2R_1}$  值亦随之减小。

### 3.3 分析与比较

公式 (4) 和 (8) 表明,对于给定的流道几何形状 ( $T$  值一定), 口型入口前涡流区长度  $L_V$  主要取决于流体的粘弹性特性 (如  $n$  和  $e$ ), 后者在一定程度上依赖于操作条件 (如流动速率和温度)。上述计算结果表明,试样在挤出流动中涡流区随着流动速率的增加而扩大,而随着温度的升高有所缩小。一般说来,流体的入口自然收敛角  $\vartheta_0$  随着  $L_V$  的增加而减小。在先前的工作中,笔者<sup>[4]</sup>考察了试样在试验条件下的  $\vartheta_0$  值的变化,发现  $\vartheta_0$  随着  $\dot{V}_a$  的增加而减小,而随着温度的升高有所增大。

V rentas 和 Duda<sup>[5]</sup>研究了牛顿流体通过突然收缩流道的流动,提出如下的表达式:

$$\frac{L_V}{2R_1} = \frac{1}{2} (0.49 + 0.11 N_R) \quad (13)$$

式中,  $N_R$  是 Reynolds 数, 定义为

$$N_R = \frac{u \cdot d}{\mu} \quad (14)$$

式中,  $d$  是流体密度,  $u$  是口型内平均流速,  $\mu$  是牛顿流体粘度。

由式 (13) 可知,牛顿流体的涡流区长度  $L_V$  仅是  $N_R$  的函数。这表明,对于一定的流体及流道,  $L_V$  与流速成线性关系 ( $d, \mu$  和  $R_0$  为常数), 这与本文中提出的关于  $L_V$  的表达式差异甚大。公式 (4) 和 (8) 描述了  $L_V$  与流体粘弹特性参数和流道几何参数的相互关系,因而较好地揭示出聚合物流体流动过程中涡流现象的本质。此外,较之公式 (1), 式 (4) 和 (8) 中的参数易于测定,适合于实际应用。

#### 4 结语

入口涡流现象是非牛顿流体粘弹性特性行为的重要表征。对于聚合物加工而言,预测并控制其发生具有理论和实际意义。公式(4)和(8)描述了入口涡流区长度  $L_V$  与流体流变特性参数和流道几何参数的相互关系。式中参数易于测定,故便于工程上应用。

考察了 NR/SBR共混胎面胶毛细管挤出过程中的入口区流动。应用式(8)估算了试样于实验条件下的涡流区长度,发现  $L_V$  与料筒直径之比约为 0.14~0.32,且随着剪切速率的增加而增大,而随着温度的升高有所减小。

#### 参考文献

- 1 Cable P J and Boger D V. A comprehensive experimental investigation of tubular entry flow of viscoelastic fluids. Part I. Vortex characteristics in stable flow. *AIChE J.* 1978; 24(5): 869~879
- 2 Binding D M. An approximate analysis for contraction and converging flow. *J. Non-Newton Fluid Mech.* 1988; 27: 173~189
- 3 梁基照. 非牛顿流体入口收敛流动分析. *力学学报*, 1990; 22(1): 79~84
- 4 梁基照. NR/SBR混炼胶挤出流动中自然收敛角的计算. *橡胶工业*, 1996; 43(8): 458~461
- 5 Vrentas J S and Duda J L. Flow of a Newtonian fluid through a sudden contraction. *Appl. Sci. Res.*, 1973; 28: 241~259

收稿日期 1996-07-02

## Estimation of Vortex Region Length of Tread Compound in Front Zone of Extruder Entrance

Liang Jizhao

(South China University of Science and Technology 510641)

**Abstract** The circle flow of viscoelastic fluid in the front zone of extruder entrance before running through a sharply contracted runner was investigated. Based on the earlier work, an equation for predicting the vortex region length  $L_V$  was proposed. The value of  $L_V$  during capillary extrusion of tread compound was estimated using the said equation. It was found that the  $L_V$ /reservoir diameter ratio was about 0.14~0.32, and decreased with the rise of temperature and increased with the rise of shear rate.

**Keywords** tread compound, convergent flow, circle flow, extruder entrance, vortex region length

### 台湾合成橡胶公司去年盈利

由于橡胶价格强劲反弹以及韩国橡胶行业 BR和 SBR质量不佳,竞争威胁减弱,台湾橡胶公司去年第 4季度单月盈利可达 1亿元新台币,全年盈利可达 18.3亿元新台币。

台湾橡胶公司去年第 1和 2季度 BR和 SBR等产品销售情况很好,盈利达 10亿元

新台币。第 3季度受橡胶跌价影响,盈利下滑。但从 9月份起,橡胶价格回升至每吨 1100美元。

因制鞋厂接单形势好,橡胶需求有增无减,台橡的生产利润目前已回升至每吨 300美元以上。

(摘自《中国化工报》,1997,1,6)