

NR/SBR 混炼胶挤出流动中自然收敛角的计算

梁基照

(华南理工大学 510641)

摘要 考察了NR/SBR共混胎面胶在毛细管挤出流动中的末端效应。基于以前的工作^[1]提出了粘性流体自然收敛半角方程,并估算了试样在挤出条件下的入口自然收敛角($2\alpha_0$)。结果表明, $2\alpha_0$ 值随着温度的升高而有所增大,随着剪切速率的增加而减小。

关键词 混炼胶,收敛流动,口型,挤出

当聚合物流体从大截面流道进入小截面流道时,由于流道截面的突然收缩,使得流体的流线不平行而形成一个锥状边界,此即为入口收敛流动。边界流线在入口处的切线与流道中心线所形成的夹角 α_0 ,称为流体入口自然收敛半角,它不一定等于流道入口半角 θ 。当 $\alpha_0 < \theta$ 时,流体在流道入口前区会形成一个环流区,并在区内作涡旋运动。

收敛流动是聚合物加工成型过程中常见的流型,如口型挤出和喷嘴注射等。流体的环流容易诱发不稳定流动现象,并导致额外的能耗,因而一直成为聚合物加工流变学的研究热点之一。Ma等人^[2]采用示踪技术,观察了弹性体及其炭黑填充胶料在口型挤出中的入口流型,发现在入口角为 180° 的口型流动中,显示出收敛流线流动。 α_0 定量地描述了流体在流道入口前区的流动形态,但有关对其定量估算的研究报道则相对较少,尤其是对于橡胶及其共混物。本文拟就这方面作初步的探讨。

1 理论分析

设入口收敛流动的边界流线构成如图1所示的曲边锥体。由于轴对称,这种锥状体的母线可用含有变量 z 和 r 的方程表示。设

$$r = f(z) \quad (1)$$

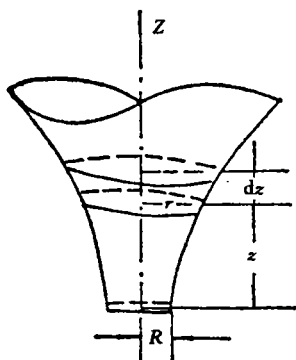


图1 入口收敛边界流线

满足边界条件:当 $z=0$ 时, $r=R$ 。并设流体的入口流动服从幂定律。考虑到聚合物流体流动中的粘弹行为和可能发生的粘-滑运动,根据力的平衡关系和最小能原理,可导出如下的人口收敛流动边界流线的微分方程^[1]:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{1}{e} \left(\frac{R}{r} \right)^{3(n-1)/2} \left\{ \frac{4}{3(n+1)} \left[1 - \left(\frac{R}{R_p} \right)^{3(n+1)/2} \right] + \frac{2\xi}{3(n-1)} \left[\left(\frac{R_p}{R} \right)^{3(n-1)/2} - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

式中, n 是流动行为指数, e 为入口校正因子(表征流体弹性的重要参数), R 和 R_p 分别为口型及料筒的半径, ξ 是与流体的粘附性能有关的系数。一般 ξ 约为0.8。

微商 dr/dz 实质上是流体入口收敛边界流线上任意点处切线对流道轴线的斜率。于

是,由导数的几何意义,式(2)可改写成

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

此即为粘弹性流体自然收敛半角方程。当 $r=R$ 时,即得 α_0 的表达式为

$$\alpha_0 = \operatorname{tg}^{-1}\left\{\frac{4}{3e(n+1)}\left[1-\left(\frac{R}{R_p}\right)^{3(n+1)/2}\right]+\frac{2\xi}{3e(n-1)}\left[\left(\frac{R_p}{R}\right)^{3(n-1)/2}-1\right]\right\} \quad (4)$$

若 $R_p \gg R$,则式(4)可近似写为

$$\alpha_0 = \operatorname{tg}^{-1}\left[\frac{2}{3e}\left(\frac{2}{n+1}+\frac{\xi}{1-n}\right)\right] \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 试验测量数据

引用文献 3 和 4 发表的 NR/SBR 共混胎面胶毛细管挤出试验测量数据,考察其流变行为。表 1 列出了试样在挤出条件下的总压力降(ΔP)的实测值。表 1 中, V 是柱塞下降速率。

表 1 试样的总压力降 ΔP						MPa
口型长径比 L/D ($D=2\text{mm}$)	$V, \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$					
	10	15	20	25	30	
温度为 100°C						
2.5	0.732	0.972	1.143	1.280	1.372	
5.0	1.006	1.154	1.349	1.463	1.623	
10.0	1.554	1.646	1.989	2.137	2.217	
温度为 110°C						
2.5	0.743	0.914	1.017	1.097	—	
7.5	1.475	1.600	1.817	1.875	1.966	
10.0	1.600	1.737	1.966	2.012	2.080	

2.2 末端压力损失

一般来说,聚物流体的入口收敛流动包括拉伸流和剪切流,产生相应的弹性能量贮存和粘性耗散,导致明显的入口压力损失(ΔP_{en});在口型的出口流动中,残余应力存在及速度重整,造成一定的出口压力损失(ΔP_{ex})。所以,流体在口型流动中的末端压力

损失(ΔP_{end})应为二者之和,即

$$\Delta P_{\text{end}} = \Delta P_{\text{en}} + \Delta P_{\text{ex}} \quad (6)$$

本工作中,应用 Bagley 作图法^[5]求取试样实验条件下的 ΔP_{end} 。图 2 展示了试样在 100°C 时 ΔP 与口型长径比(L/D)的关系。由图中可以看出, ΔP 随着柱塞下降速率(V)的增大而增大,两者之间大致呈线性关系,直线在纵坐标上的截距即为 ΔP_{end} 。挤出条件下试样的 ΔP_{end} 值示于图 2。

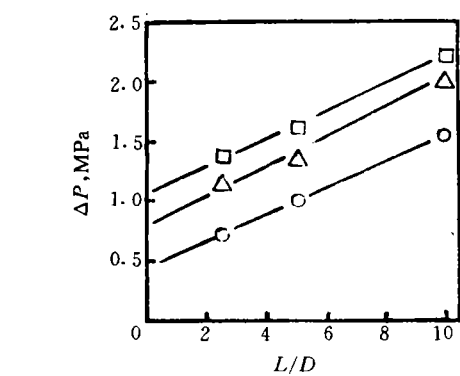


图 2 ΔP 与 L/D 的关系(100°C)
($\circ$)— $V=10\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; ($\triangle$)— $V=20\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$;
($\square$)— $V=30\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$

2.3 α_0 的估算

由图 2 可知,试样在口型流动中的末端效应相当显著,因而在求取壁面剪切应力(τ_w)时,应作末端修正。即

$$\tau_w = \frac{(\Delta P - \Delta P_{\text{end}})D}{4L} \quad (7)$$

定义表观剪切速率($\dot{\gamma}_a$)为

$$\dot{\gamma}_a = \frac{VR_p^2}{15R^3} \quad (8)$$

式中, R_p 和 R 单位为 mm , V 单位为 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $\dot{\gamma}_a$ 单位为 s^{-1} 。

流动行为指数 n 可由下式确定

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

若定义 $e = \Delta P_{\text{en}}/4\tau_w$,则可导出如下表达式

$$e = \frac{KL/D}{\beta - 1} \quad (10)$$

式中, $K = \Delta P_{en} / \Delta P_{end}$, $\beta = \Delta P / \Delta P_{end}$ 。参照文献 6 和 7 报道的研究结果, 本文中, 取 $K = 0.8$ 。

至此, 将实验测量数据分别代入式(9)和(10), 可求取试样在挤出条件下的 n 和 e 值。然后, 应用式(5), 可估算出试样的入口自然收敛角, 结果如表 2 所示。这里, $R_p = 11.8\text{mm}$, $2\theta = 180^\circ$ 。

表 2 试样的 ΔP_{end} , n , e 和 $2\alpha_0$ 值

$\dot{\gamma}_a, \text{s}^{-1}$	$\Delta P_{end}, \text{MPa}$	n	e	$2\alpha_0, (^\circ)$
温度为 100 C				
92.83	0.458	0.216	3.35	52.88
139.24	0.667	0.265	4.38	45.21
185.65	0.790	0.380	4.48	44.36
232.07	0.910	0.392	4.91	40.98
温度为 110 C				
92.83	0.458	0.233	2.70	66.83
139.24	0.618	0.286	3.78	50.49
185.65	0.708	0.394	4.06	48.71
232.07	0.796	0.407	4.42	45.33

2.4 讨论

从表 2 中可以看出, 在一定的温度条件下, ΔP_{end} 和 e 的值随着 $\dot{\gamma}_a$ 的增加而提高, 而 $2\alpha_0$ 值却随之下降。这是因为, 挤出速率的提高, 使得流体的入口收敛流动加剧, 流体在拉伸流动中所贮存的弹性应变能相应地增加, 末端效应增强, 表现为 e 值在一定范围内增大; 另一方面, 入口流动中的粘性耗散也随着 $\dot{\gamma}_a$ 的增加而有所增大(n 值增大), 尽管它可

令式(5)中的 $\frac{2}{n+1}$ 项的值减小, 但同时又使得 $\frac{\xi}{1-n}$ 项值提高, 此消彼长, 因而 n 值的改变对 $2\alpha_0$ 的影响明显地小于 e 。这表明, 粘弹性流体的入口收敛流动存在环流区域($2\alpha_0 \ll 2\theta$), 且在一定范围内随着挤出速率的提高而有所扩大($2\alpha_0$ 值减小)。在相同的挤出速率下, ΔP_{end} 和 e 值随着温度的升高而有所下降, 而 n 值却随之增大。在入口收敛流动中, 聚合物流体的大分子沿流动方向伸直取向, 随着温度的升高, 取向分子链的松弛加快, 流

体的弹性减弱, 导致 ΔP_{end} 和 e 值下降, $2\alpha_0$ 值也随之增大, 环流区缩小。

Ma 等人^[2]采用示踪技术, 观察了 SBR 及其炭黑填充胶料在具有不同入口角口型挤出过程中的入口流型, 也获得类似于上述结论的结果。图 3 是当温度为 100 C, $\dot{\gamma}_a = 136\text{s}^{-1}$, $2\theta = 180^\circ$ 时, SBR 胶料(含炭黑 10%) 在口型入口前区的流型。由图中可度量出, 试样的 $2\alpha_0$ 值约为 45° , 这与表 2 中相应挤出条件下的 $2\alpha_0$ 值相当接近。在一定挤出条件下, $2\alpha_0$ 值主要地取决于试样材料的内部结构(如支链长度及支化度)和配方。Ma 等人^[2]发现, 当 $2\theta = 180^\circ$, $T = 100\text{C}$, $\dot{\gamma}_a = 13.6\text{s}^{-1}$ 时, NR 的 $2\alpha_0$ 值最小, BR 次之, SBR 最大, 但三者间差距不太大。对于共混胶料, 情况较为复杂, 除上述影响因素外, 还与组分之间的配比及相容性、分散和分布程度以及界面的形态结构等密切相关。

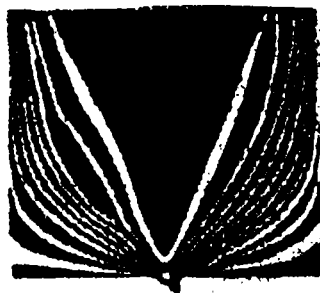


图 3 SBR 胶料的入口流型^[2]

3 结语

在先前工作的基础上, 提出了粘弹性流体自然收敛半角方程(3)以及简化的入口自然收敛半角方程(5)。式(5)中所含参变量容易测定, 便于工程中实际应用。

考察了 NR/SBR 共混胎面胶在毛细管挤出流动中的末端效应。发现: 试样的末端压力损失和入口校正因子随着 $\dot{\gamma}_a$ 的增加而增大, 随着温度的升高而明显下降。

应用式(5)估算了试样在挤出条件下的入口自然收敛角。随着温度的升高和 $\dot{\gamma}_a$ 的提

高, $2\alpha_0$ 值相应地增大或减小, 这主要取决于流体内弹性能贮存量的多寡。在类似的操作条件下, 估算的 $2\alpha_0$ 值与文献报道的观测结果相当接近。

参考文献

- 1 梁基照. 非牛顿流体入口收敛流动分析. 力学学报, 1990;22(1):79
- 2 Ma C Y *et al.* Flow patterns in elastomers and their carbon black compounds during extrusion through dies. Rubb. Chem. and Technol. 1985;58:815
- 3 郑融. 毛细管进出口流动中聚合物熔体粘弹行为的唯

象研究. 华南工学院, 1984

- 4 谭志明. 毛细管挤出过程中参变量与橡胶流变性能的相关性研究. 华南工学院, 1984
- 5 Bagley E B. End corrections in the capillary flow of polyethylene. J. Appl. Phys. , 1957;28:624
- 6 Kamal M R and Hyun H. Capillary viscometry: A complete analysis including pressure and viscous heating effects. Polym. Eng. Sci. , 1980;20:109
- 7 Santamaria A and Guzman G M. Melt rheology of high impact polystyrenes at high shear stress. Polym. Eng. Sci. , 1982;22:365

收稿日期 1996-01-15

Calculation of Natural Convergent Angle of NR/SBR Compound Flow during Extrusion

Liang Jizhao

(South China University of Science and Technology 510641)

Abstract The end effect of NR/SBR tread compound flow during capillary extrusion was investigated. Based on the previous work^[1], an equation for calculating the natural convergent semiangle of viscoelastic fluid was proposed and the natural convergent angle ($2\alpha_0$) of the sample at the inlet during extrusion was estimated. The results showed that $2\alpha_0$ increased with the rise of the temperature and decreased with the increase of the shear rate.

Keywords compound, convergent flow, die, extrusion

特种混炼胶出售

一. **硅橡胶**: A. 耐 350℃ 高温硅橡胶。B. 阻燃硅橡胶。C. 耐 250℃ 水蒸汽硅橡胶。D. 透明硅橡胶。E. 印刷传热胶辊专用硅橡胶。F. 导电硅橡胶($\rho_v = 3.5\Omega \cdot \text{cm}$)。G. 耐油硅橡胶。H. 游泳帽硅橡胶。I. 奶咀及医用硅橡胶。J. 高抗撕硅橡胶。K. 挤出电线硅橡胶。L. 常压静态使用耐温 200℃ 硅橡胶, 每吨 37000 元。M. 各种颜色、硬度可按用户要求。

二. **氟橡胶**: A. 耐油耐腐蚀 250℃ 使用, 短时间达 300℃。B. 硬度: 65, 70, 75, 80 (各±5)。

三. **其它混炼胶**: A. 减震器油封往复运动专用胶。B. 纺织行业专用胶。C. 其它专用胶或提供技术服务。

宁波昌泰橡胶技贸有限公司

地址: 浙江省宁波市江北区四横街 17 号

邮编: 315020

联系人: 欧世渊

电话、传真: (0574) 7675711

呼机: 0-1395749155