

引用格式:费腾,尹龙,信春玲,等.冷却单螺杆内聚合物熔体传热模型[J].北京化工大学学报(自然科学版),2021,48(5):50-58.

FEI Teng, YIN Long, XIN ChunLing, et al. Heat transfer model of a polymer melt in a single cooling screw[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2021, 48(5): 50-58.

冷却单螺杆内聚合物熔体传热模型

费腾¹ 尹龙¹ 信春玲¹ 何亚东^{1,2*}

(北京化工大学 1. 机电工程学院; 2. 教育部高分子材料加工装备工程研究中心, 北京 100029)

摘要: 基于聚合物熔体在冷却单螺杆内传热,引入平均温度表征螺槽深度方向的熔体温度变化,将黏性生热简化为内热源,建立聚合物熔体传热理论分析模型;基于模型分析了冷却单螺杆的结构参数与工艺参数对聚合物熔体冷却过程的影响规律,并通过计算流体动力学(CFD)模拟验证模型的准确性。结果表明,当螺槽深度为5~9 mm、螺纹升角为30°~50°时,通过增大螺槽深度和螺纹升角,同时降低螺杆转速和减少产量,能够有效增强冷却单螺杆内聚合物熔体的冷却效果,此时模型能够满足冷却单螺杆内聚合物熔体的降温需求。数值模拟值与模型计算值的最大相对误差为1.21%,表明聚合物熔体传热模型能够预测冷却单螺杆内聚合物熔体的冷却过程,可以为串联挤出发泡系统中冷却单螺杆的设计提供一定的理论参考。

关键词: 冷却单螺杆; 传热; 理论计算; 模拟验证

中图分类号: TQ328.4 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2021.05.007

引言

冷却单螺杆通常用在串联挤出发泡生产线中,主要用于冷却聚合物熔体,以优化熔体的强度和应变硬化性能,从而得到高质量的发泡产品。随着串联挤出生产线生产优质发泡材料的趋势不断扩大,人们对于冷却效果更好的冷却螺杆的需求也与日俱增。因此,如何提高螺杆的冷却效果已经成为聚合物发泡过程中十分重要的环节。

冷却单螺杆挤出机的螺杆几何形状对于生产线的经济运行和泡沫产品的质量至关重要,可以通过改变螺杆几何形状和熔体流动形式来提高螺杆的冷却效果。传统冷却单螺杆通常采用多头开槽螺杆,相对于传统螺杆,人们开发了不同类型的高性能冷却螺杆。例如,Rauwendaal^[1]发明了一种高性能热传递(HHT)螺杆,该螺杆通过多头螺棱

的相互交错改变熔体的流动形式,从而提高二阶挤出机的冷却能力。Fogarty^[2]开发的Turbo螺杆在大导程多头螺杆的螺棱上开设矩形窗口,使各螺槽连通并形成循环通道,提高了螺杆的冷却能力。Barr^[3]开发了能量传递提升的螺杆,该螺杆通过不同高度的螺棱来改变熔体流动形式,降低了熔体的温度梯度,使得熔体的温度分布更加均匀。但是,冷却单螺杆一直是由挤出机制造商根据与泡沫制造商签订的保密协议而开发的,关于冷却单螺杆的设计信息很少。

数值计算方法已经广泛应用在模拟聚合物加工的各种设备中,对于冷却单螺杆内聚合物熔体的传热研究也多集中在数值模拟方面。例如,Han^[4]通过数值模拟方法分析了广泛用于热塑性泡沫挤出的冷却单螺杆挤出机的性能,结果表明,黏性剪切生热是导致熔体温度升高的主要原因之一。Wang等^[5]通过伽辽金数值模拟的方法研究了多头螺纹螺杆构型对聚合物熔体均质化和冷却效果的影响,发现熔体在多头螺杆中的剪切应力较高,同时较长的停留时间促进了混合和冷却。范涛等^[6]运用polyflow软件研究了螺棱断面形状对单螺杆挤出机熔融输送段熔体温度分布的影响,结果显示梯形断面的螺杆相

收稿日期: 2021-05-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0302203)

第一作者: 男,1991年生,硕士生

* 通信联系人

E-mail: Heyd@mail.buct.edu.cn

对于矩形、锯齿形断面的螺杆更有利于热量传递。陈佳兴等^[7]运用 polyflow 软件研究了橡胶在单螺杆挤出机内的三维非等温流动问题,结果表明,由于胶料自身的剪切变稀特性和温度依赖性,压力与温度上升的趋势会随着转速的升高而减缓。以上这些数值模拟方法需要建立模型、划分网格和迭代求解,整个过程较为复杂。本文基于聚合物熔体在冷却单螺杆内传热提出一种简便的数学模型,通过引入平均温度来表征螺槽深度方向的温度变化,利用平均剪切速率简化黏性生热的计算,将冷却单螺杆内聚合物熔体的三维流动与传热问题转化成二维平面问题,建立了冷却单螺杆内聚合物熔体传热模型;基于该模型分析了螺杆结构参数及工艺参数对聚合物熔体传热过程的影响;通过计算流体动力学(CFD)数值模拟的方法验证了传热模型的准确性。

1 聚合物熔体传热模型

1.1 几何模型

如图1所示,将螺槽和机筒展开在两个平面上,沿螺槽方向为 z 方向,垂直于螺槽方向为 y 方向,建立相应的直角坐标系。螺槽深度为 H ,螺槽宽度为 W ,螺纹升角为 φ ,沿螺槽方向的速度分量为 V_{bz} ,垂直于螺槽的速度分量为 V_{by} 。

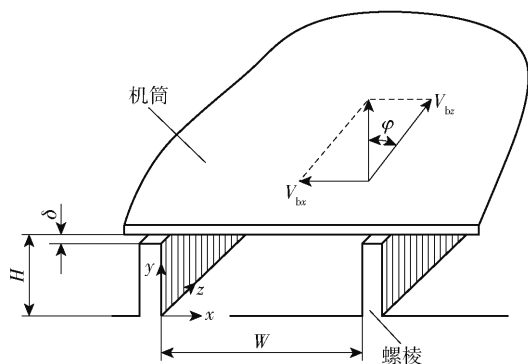


图1 螺槽和机筒展开后的几何结构

Fig.1 The geometry of the screw channel and barrel after unfolding

1.2 数学模型

基于聚合物熔体在冷却单螺杆内的流动,做出以下基本假设:

- 1) 熔体为不可压缩流体,流动定常;
- 2) 熔体不受重力作用,不考虑熔体的体积力与惯性力的作用;
- 3) 不考虑间隙漏流,忽略螺棱与机筒内表面的

间隙的影响;

4) 压力只是 x, z 方向的函数;

5) 熔体在壁面不会产生滑移;

6) 在 x 和 z 方向上的热传导可忽略不计,取 y 方向上的平均温度表征该方向的温度变化;

7) 螺槽的曲率忽略不计。

基于以上基本假设,聚合物熔体在冷却单螺杆内满足如下能量方程。

$$\rho c_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{q} \quad (1)$$

式中, ρ 为聚合物熔体的密度, kg/m^3 ; c_p 为聚合物熔体的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; v_z 为沿螺槽方向的速度分布, m/s ; k 为聚合物熔体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为熔体温度, $^{\circ}\text{C}$; \dot{q} 为黏性生热内热源, W/m^3 。

其中, \dot{q} 的表达式为

$$\dot{q} = \eta \dot{\gamma}^2$$

式中, η 为聚合物熔体的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\dot{\gamma}$ 为平均剪切速率,其计算公式为

$$\dot{\gamma} = \frac{V_{bz}}{H} = \frac{\pi D N \cos \varphi}{60 H}$$

式中, D 为螺杆直径, m ; N 为螺杆转速, r/min 。

以幂律流体作为聚合物熔体的本构方程,则冷却单螺杆内聚合物熔体黏性生热的计算公式如下所示。

$$\dot{q} = K \dot{\gamma}^{n+1} = K \left(\frac{\pi D N \cos \varphi}{60 H} \right)^{n+1}$$

式中, K 为聚合物熔体的稠度, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; n 为非牛顿指数。

结合能量方程(1)给出各位置的边界条件如下。

在螺槽底部 $y=0$ 位置的运动边界条件为

$$\begin{cases} v_x|_{y=0} = 0 \\ v_z|_{y=0} = 0 \end{cases}$$

在机筒表面 $y=H$ 位置的运动边界条件为

$$\begin{cases} v_x|_{y=H} = V_{bz} = \pi D N \sin \varphi \\ v_z|_{y=H} = V_{bz} = \pi D N \cos \varphi \end{cases}$$

在螺槽底部 $y=0$ 和在机筒表面 $y=H$ 位置的热边界条件为

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_s (T - T_s) \\ k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = \alpha_b (T_b - T) \end{cases} \quad (2)$$

式中, α_s 为螺杆表面的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; α_b 为机筒表面的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_s 为螺杆表面温度, $^{\circ}C$; T_b 为机筒表面温度, $^{\circ}C$ 。

入口边界条件为

$$T|_{z=0} = T_0 \quad (3)$$

式中, T_0 为聚合物熔体的入口温度, $^{\circ}C$ 。

对能量方程(1)沿螺槽深度方向进行积分, 得到冷却单螺杆内熔体温度变化。

$$\rho c_p \int_0^H v_z \frac{\partial T}{\partial z} dy = k \int_0^H \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dy + \int_0^H \dot{q} dy \quad (4)$$

基于假设 v_z 只是 x, y 的函数, 与 z 无关, 式(4)左侧可以表示为

$$\rho c_p \int_0^H v_z \frac{\partial T}{\partial z} dy = \rho c_p \int_0^H \frac{\partial(v_z T)}{\partial z} dy = \rho c_p \frac{\partial}{\partial z} \int_0^H v_z T dy \quad (5)$$

熔体在螺槽中引用平均温度表征 y 方向的温度变化, 即考虑整个螺槽深度上的平均温度 \bar{T} 。

$$\bar{T} = \frac{\int_0^H v_z T dy}{\int_0^H v_z dy}$$

于是有

$$\int_0^H v_z T dy = \bar{T} \int_0^H v_z dy \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 得到

$$\rho c_p \int_0^H v_z \frac{\partial T}{\partial z} dy = \rho c_p \frac{\partial \left(\bar{T} \int_0^H v_z dy \right)}{\partial z} = \rho c_p \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \int_0^H v_z dy$$

由润滑近似和冷却单螺杆内聚合物熔体质量守恒^[8]可以得到

$$\int_0^H v_z dy = \frac{G_m}{\rho W}$$

式中, G_m 为聚合物熔体的产量, kg/h ; W 为螺槽宽度, mm 。

于是有

$$\rho c_p \int_0^H v_z \frac{\partial T}{\partial z} dy = c_p \cdot \frac{G_m}{W} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \quad (7)$$

当引用平均温度表示熔体在螺槽中的温度变化时, 结合热边界条件式(2), 方程(4)右侧第一项可表示为

$$k \int_0^H \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dy = k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} - k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_b (T_b - \bar{T}) -$$

$$\alpha_s (\bar{T} - T_s) \quad (8)$$

方程(4)右侧第二项可以表示为

$$\int_0^H \dot{q} dy = \int_0^H K \left(\frac{\pi D N \cos \varphi}{60 H} \right)^{n+1} dy = KH \left(\frac{\pi D N \cos \varphi}{60 H} \right)^{n+1} \quad (9)$$

将式(7)、(8)、(9)代入式(4), 可得

$$c_p \frac{G_m}{W} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \alpha_b (T_b - \bar{T}) - \alpha_s (\bar{T} - T_s) + KH \left(\frac{\pi D N \cos \varphi}{60 H} \right)^{n+1} \quad (10)$$

对能量方程(10)进行截面积分, 得到周向截面平均, 即

$$c_p G_m \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \alpha_b W (T_b - \bar{T}) - \alpha_s W (\bar{T} - T_s) + KWH \left(\frac{\pi D N \cos \varphi}{60 H} \right)^{n+1} \quad (11)$$

通常大直径螺杆能够进行螺杆内部冷却, 小直径一般无法设置螺杆冷却, 即 $\alpha_s = 0$, 螺杆为绝热边界, 则方程(11)简化成如下形式。

$$c_p G_m \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \alpha_b W (T_b - \bar{T}) + KWH \left(\frac{\pi D N \cos \varphi}{60 H} \right)^{n+1} \quad (12)$$

Keum^[9]给出了幂律流体在机筒表面的对流换热系数和修正系数 $C(n)$ 。

幂律流体在机筒表面的对流换热系数计算如下所示。

$$\frac{\alpha_b D}{k} = 0.807 \cdot \left(\frac{\rho c_p D^2 N}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\pi D^2 \cos \varphi}{LH} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + C(n) \cdot \frac{H^2}{2\pi D N \cos \varphi} \cdot \left(\frac{H}{2K} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

式中, L 为螺杆长度, m ; P 为聚合物熔体受到的压力, Pa 。

其中, 修正系数 $C(n)$ 为

$$C(n) = \left[\left(\frac{H}{C_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \frac{(n-1) \left(\frac{H}{C_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} H}{nC_1} + \frac{(n-1)(2n-1) \left(\frac{H}{C_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} H}{(nC_1)^2} + \dots \right]$$

将式(13)和入口边界条件(3)代入方程(12)中, 并对方程(12)进行求解, 可得到冷却单螺杆内聚合物熔体沿着螺槽通道的平均温度分布, 即聚合

物熔体的传热理论分析模型为

$$\begin{aligned} \bar{T} = & \left\{ \frac{KW(\pi DN \cos \varphi)^{n+1}}{3600^{n+1} H^n c_p G_m} - \exp \left\{ 0.807 \cdot \frac{Wk}{Dc_p G_m} \cdot \right. \right. \\ & \left. \left(\frac{\rho c_p D^2 N}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\pi D^2 \cos \varphi}{LH} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + C(n) \cdot \frac{H^2}{2\pi DN \cos \varphi} \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{H}{2K} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot z \right\} \left[\frac{KW(\pi DN \cos \varphi)^{n+1}}{3600^{n+1} H^n c_p G_m} + 0.807 \cdot \right. \\ & \frac{Wk}{Dc_p G_m} \cdot \left(\frac{\rho c_p D^2 N}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\pi D^2 \cos \varphi}{LH} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + C(n) \cdot \right. \\ & \left. \frac{H^2}{2\pi DN \cos \varphi} \cdot \left(\frac{H}{2K} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (T_0 - T_b) \left. \right] + 0.807 \cdot \\ & \frac{Wk}{Dc_p G_m} \cdot \left(\frac{\rho c_p D^2 N}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\pi D^2 \cos \varphi}{LH} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + C(n) \cdot \right. \\ & \left. \frac{H^2}{2\pi DN \cos \varphi} \cdot \left(\frac{H}{2K} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{3}} \left. \right\} / \left\{ 0.807 \cdot \frac{Wk}{Dc_p G_m} \cdot \right. \\ & \left. \left(\frac{\rho c_p D^2 N}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\pi D^2 \cos \varphi}{LH} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + C(n) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{H^2}{2\pi DN \cos \varphi} \cdot \left(\frac{H}{2K} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \end{aligned}$$

表 1 结构参数、工艺参数和物性参数

Table 1 Structural parameters ,processing parameters and physical parameters

结构参数		工艺参数		黏度模型(幂律流体)		其他结构参数	
螺槽深度	螺纹升角	产量 $G_m/$	螺杆转速	稠度 $K/$	非牛顿指数	螺棱宽度	螺纹头数
H/mm	$\varphi/(^{\circ})$	$(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	$N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n	e/mm	m
3	30	15	10	8 694	0.47	3.5	4
5	40	20	20				
7	50	25	30				
9	60	30	40				

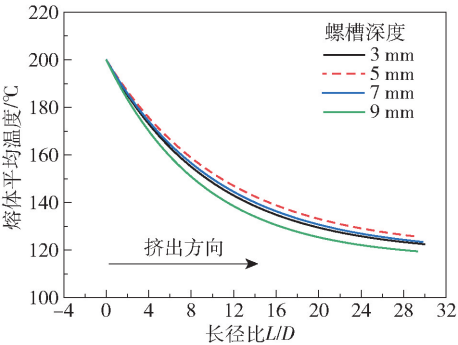


图 2 不同螺槽深度下熔体沿挤出方向的降温曲线

Fig.2 Variation in average temperature of the melt with channel depth

螺槽深度的变化。

从图 2 可以看出,熔体平均温度沿着挤出方向逐渐降低。随着螺杆长度增加,熔体的降温速率逐

2 传热理论模型参数分析

聚合物熔体在冷却单螺杆中传热过程相当复杂,熔体温度变化也受到多种因素影响。影响熔体传热的因素主要可以归纳为被加工材料的物性参数、加工过程中的操作工艺参数和螺杆结构参数三大类^[10],本文基于聚合物熔体传热理论分析模型,选取螺杆结构参数与操作工艺参数作为研究对象,探究它们对聚合物熔体冷却过程的影响。

选取直径 45 mm 的螺杆,螺棱宽度按照 0.8% D 的原则选取,螺棱法向宽度为 3.5 mm,选择四头螺纹,采用聚苯乙烯熔体作为物料,机筒温度设置为 100 ℃,熔体入口温度为 200 ℃。研究螺槽深度、螺纹升角、螺杆转速和产量这 4 个参数对熔体降温过程的影响,具体参数值见表 1。

2.1 螺槽深度对熔体平均温度的影响

图 2 为螺槽深度为 3、5、7、9 mm 的螺杆内聚合物熔体的平均温度沿挤出方向的降温曲线,图 3 为螺杆长度为 30 D 的螺杆内熔体的出口平均温度随

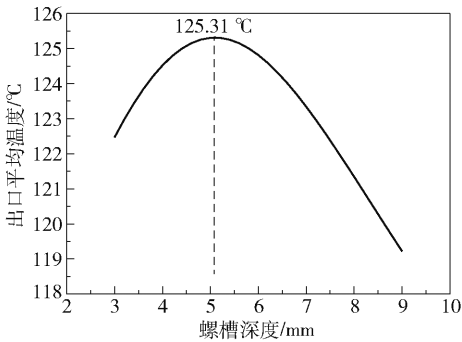


图 3 出口平均温度随螺槽深度的变化

Fig.3 Variation in average outlet temperature with channel depth

渐减小,温度变化趋于平稳。从图 3 可以看出,随着螺槽深度增大,熔体的出口平均温度先升高后降低。在螺槽深度为 5.1 mm 时熔体的出口平均温度达到

最高,为 125.31 ℃;当螺槽深度大于 5.1 mm 时,熔体的出口平均温度下降明显,在螺槽深度为 9 mm 时,出口平均温度降到最低,为 119.22 ℃。由于聚合物的导热性差,且螺杆绝热,当螺槽深度加深后,熔体沿着螺槽深度方向的热量传递效率变低,熔体受到的剪切作用减弱,产生的黏性生热量减少。由熔体在螺槽内的平均停留时间 \bar{t} 的计算公式(14)可知,随着螺槽深度增加,螺槽容积变大,熔体在螺槽内的平均停留时间变长,使得熔体与机筒壁面的热交换效率提高。

$$\bar{t} = \frac{V}{Q} \quad (14)$$

式中, V 为螺槽容积, m^3 ; Q 为聚合物熔体的体积流量, m^3/s 。

螺槽深度方向的传热效率降低抑制了熔体冷却,而黏性生热量减少和停留时间增长促进了熔体冷却,随着螺槽深度增加,黏性生热和停留时间对熔体冷却的促进作用大于沿螺槽深度方向传热效率降低的抑制作用,因此,随着螺槽深度增加,出口平均温度出现先升高后降低的趋势。考虑到螺槽深度还会影响冷却单螺杆的输送能力,即螺槽深度越深,聚合物熔体的产量越大,在冷却单螺杆的设计过程中,应尽可能选择螺槽深度较深的螺杆来增强冷却单螺杆对熔体的冷却能力。

2.2 螺纹升角对熔体平均温度的影响

图 4 为螺纹升角为 30°、40°、50°、60° 的螺杆内聚合物熔体的平均温度沿挤出方向的降温曲线,图 5 为螺杆长度为 30D 的螺杆内熔体的出口平均温度随螺纹升角的变化。

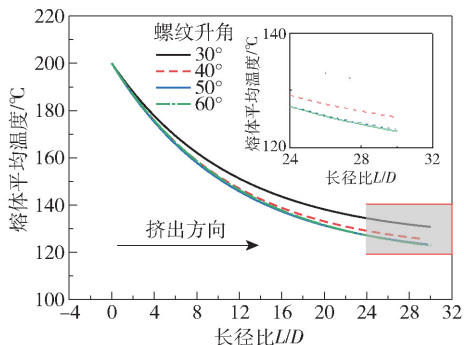


图 4 不同螺纹升角下熔体沿挤出方向的降温曲线

Fig. 4 Variation in average temperature of the melt with the helix angle

从图 4 可以看出,熔体平均温度沿着挤出方向逐渐降低。随着螺杆长度增加,熔体的降温速率逐

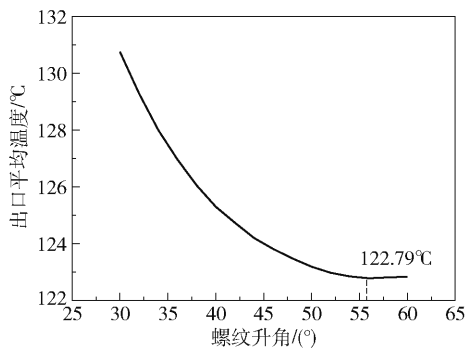


图 5 出口平均温度随螺纹升角的变化

Fig. 5 Variation in average outlet temperature with the helix angle

渐减小,温度变化趋于平稳;随着螺纹升角增加,螺纹升角对熔体降温曲线的影响越来越不明显。从图 5 可以看出,随着螺纹升角增大,熔体的出口平均温度先降低后略微升高,且随着螺纹升角增大,螺纹升角对于熔体出口平均温度的影响越来越小。螺纹升角在 30°~50°之间,出口平均温度下降曲线的斜率较大,说明此时螺纹升角对熔体降温的影响作用较大。当螺纹升角为 56°时,出口平均温度最低,为 122.79 ℃。当螺纹升角大于 56°时,出口平均温度开始缓慢上升,螺纹升角为 60°时,出口平均温度升至 122.84 ℃。螺纹升角从 56°增大到 60°,出口平均温度仅上升了 0.05 ℃,表明当螺纹升角大于 56°时其对出口平均温度的影响很小。

熔体的出口平均温度随着螺纹升角增大出现先降低后略微升高的趋势是因为螺槽升角增大,熔体流动行程变短,熔体在螺槽内的停留时间变短。螺纹升角增大,熔体受到螺棱的剪切作用减小,熔体产生的黏性生热量减少。停留时间变短抑制了熔体冷却,黏性生热量减少促进了熔体冷却,两者共同作用使聚合物熔体的出口平均温度先降低后略微升高。

2.3 螺杆转速对熔体平均温度的影响

图 6 为螺杆转速为 10、20、30、40 r/min 的聚合物熔体的平均温度沿挤出方向的降温曲线,图 7 为螺杆长度为 30D 的螺杆内熔体的出口平均温度随螺杆转速的变化。

从图 6 可以看出,熔体平均温度沿着挤出方向逐渐降低。随着螺杆长度增加,熔体的降温速率逐渐减小,温度变化趋于平稳;随着螺杆转速增大,聚合物熔体降温曲线的曲率越来越小,聚合物熔体的降温速率越来越小。从图 7 可以看出,随着螺杆转速增大,熔体的出口平均温度升高,螺杆转速越大,

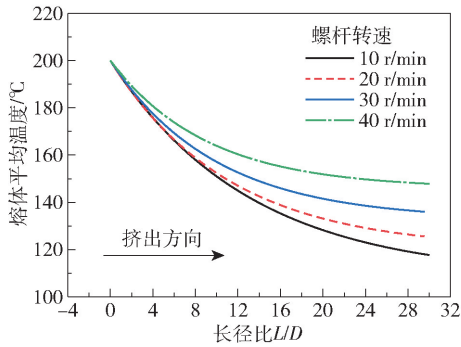


图 6 不同螺杆转速下熔体沿挤出方向的降温曲线
Fig. 6 Variation in average temperature of the melt along the extrusion direction under different screw speeds

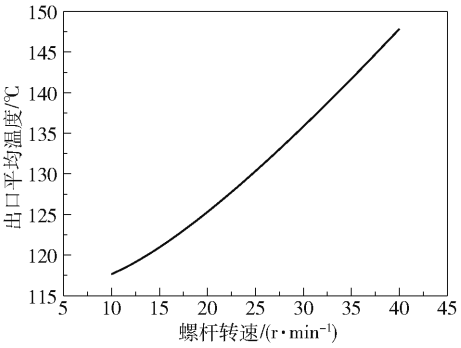


图 7 出口平均温度随螺杆转速的变化
Fig. 7 Variation in average outlet temperature with the screw speed

聚合物熔体升温越明显。随着螺杆转速增大,聚合物熔体受到的剪切作用越明显,聚合物内部产生的黏性生热量越大。随着螺杆长度增大,聚合物内产生的热量无法及时被机筒带走,只能沿着挤出方向传递给挤出机下游,导致聚合物的降温速率随着转速增大而降低,因此,出口平均温度会随着转速增大而升高。

2.4 产量对熔体平均温度的影响

图 8 为产量为 15、20、25、30 kg/h 的聚合物熔体的平均温度沿着挤出方向的降温曲线,图 9 为螺杆长度为 30D 的螺杆内熔体的出口平均温度随产量的变化。

从图 8 可以看出,熔体平均温度沿着挤出方向逐渐降低。随着螺杆长度增大,熔体的降温速率逐渐降低;产量越大,曲线曲率越小,熔体平均温度沿着挤出方向的降温速率越小。从图 9 可以看出,随着产量增大,熔体的出口平均温度增大。随着产量增大,熔体在螺槽内的平均停留时间变短,熔体受到的剪切作用增大,产生的黏性生热量大,导致熔体的

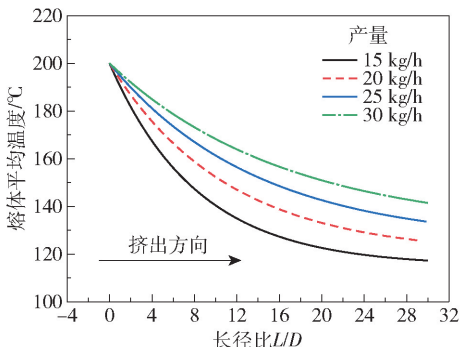


图 8 不同产量下熔体沿挤出方向的降温曲线
Fig. 8 Variation in average temperature of the melt along the extrusion direction under different outputs

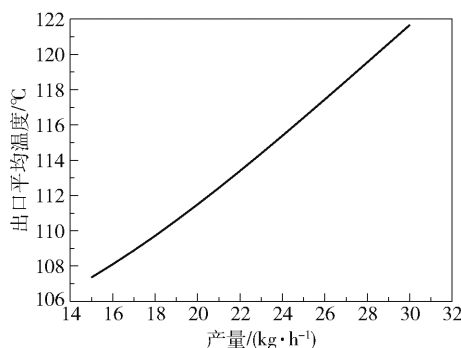


图 9 出口平均温度随产量的变化
Fig. 9 Variation in average outlet temperature with the output
出口平均温度升高。增加螺杆长度有利于聚合物熔体冷却,增大产量不利于聚合物熔体冷却。因此,在设计冷却单螺杆过程中需要综合考虑各因素之间的相互作用。

3 模拟验证

为了验证聚合物熔体传热理论分析模型的准确性,采用 CFD 模拟分析软件 Fluent 对该模型以及影响聚合物传热性能的结构参数与工艺参数进行验证。选择螺杆长度为 2D (90 mm) 的熔体模型作为研究对象,通过 Fluent 模拟计算出口截面的平均温度,并与聚合物熔体传热理论分析模型的计算结果进行对比。

3.1 物理模型与网格划分

以 45 mm 冷却单螺杆为研究对象,建立聚合物熔体流道的三维计算模型,根据不同结构参数分别对聚合物熔体模型进行三维建模和网格划分,对聚合物熔体流道采用正六面体结构化网格,这样有利于计算的收敛并减小计算量。图 10 为螺槽深度 5 mm、螺纹升角 40°的物理模型与网格划分模型。

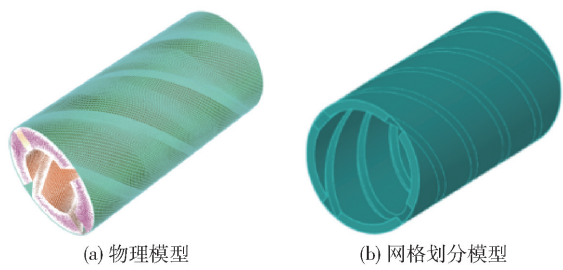


图 10 聚物流体的物理模型和网格划分模型
Fig. 10 Physical model and mesh generation model
of polymer fluid

3.2 控制方程

聚合物熔体是一种非牛顿流体,其在螺杆内的流动特性较为复杂,为了简化螺杆内熔体的流动行为,做如下假设:

- 1) 流体为不可压缩流体,在螺杆中稳定流动,且充满流道;
 - 2) 流体与螺杆和机筒壁面间无滑移,且忽略惯性力作用;
 - 3) 熔体的密度、比热容、导热系数均为恒定值,不随温度改变;
 - 4) 流体与机筒表面间传热良好,与螺杆表面间不存在热交换,即螺杆表面绝热。
- 基于上述假设,聚合物熔体流场的连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

运动方程为

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

能量方程为

$$\rho c_p v \nabla T = k \nabla^2 T + \tau : \nabla v$$

式中,τ 为应力张量。

3.3 边界条件

通过螺杆壁面的旋转代替螺杆旋转,设置不同转速。边界条件具体设置如下:

- 1) 动力学边界条件 质量流量入口,压力出口,熔体与机筒间的壁面无滑移,螺杆壁面旋转。
- 2) 热力学边界条件 聚合物熔体入口温度为 200 ℃,熔体与机筒贴合壁面的温度为 100 ℃。

3.4 本构方程与物性参数

选择幂律流体作为本构方程,熔体稠度 K 为 8 694 Pa·sⁿ,非牛顿指数 n 为 0.47。采用聚苯乙烯作为物料,具体物性参数为:密度 978 kg/m³,比热容 2 086 J/(kg·K),导热系数 0.261 W/(m·K)。

3.5 网格无关性验证

为了检验网格尺寸对数值模拟结果的影响,保证计算精度和结果准确性,避免网格大小及数量对计算结果产生较大影响,需要对计算模型进行网格无关性验证。使用螺槽深度为 5 mm、螺纹升角为 40° 的螺杆,在聚合物产量为 20 kg/h、转速为 20 r/min 的工艺条件下进行数值模拟,以出口平均温度作为评价指标来验证熔体模型网格大小和网格单元数对计算结果的影响。网格单元数和模拟结果如表 2 所示。

表 2 熔体网格无关性验证
Table 2 Verification of melt grid independence

网格尺寸/ mm	网格单元数/ 10 ⁴	出口平均温度/ ℃	出口平均温度的 相对变化率 ^{a)} /%
4.0	22.54	183.64	1.68
3.0	30.26	185.21	0.84
2.0	45.38	186.36	0.23
1.0	56.72	186.79	—

a—相对于网格尺寸为 1 mm 的出口平均温度的变化率。

由表 2 可以看出,随着网格尺寸减小、网格单元数增加,出口平均温度升高。当网格尺寸从 2 mm 减小到 1 mm 时,网格单元数从 45.38 万增加到 56.72 万,出口平均温度的相对变化率小于 0.5%,表明此时网格尺寸与网格单元数对计算结果的影响很小,可以满足网格无关性的要求,故本文采用 1 mm 的网格尺寸进行模拟计算。

图 11 为不同的结构参数与工艺参数条件下聚合物熔体的出口平均温度的计算值与模拟值对比图。从图中可以看出,随着螺槽深度的增大,出口平均温度出现先升高后降低的趋势;随着螺纹升角的增大,出口平均温度先降低后增大;当螺杆转速大于 15 r/min 时,随着螺杆转速的增大,出口平均温度增大;随着产量的增加,出口平均温度增大。模拟值与理论值基本吻合,最大相对误差为 1.21%。但是随着螺杆直径增大,误差范围会增大,当螺杆直径大于 90 mm 时,螺杆绝热条件已经无法满足冷却要求,需要进行螺杆内部冷却。数值模拟过程说明聚合物熔

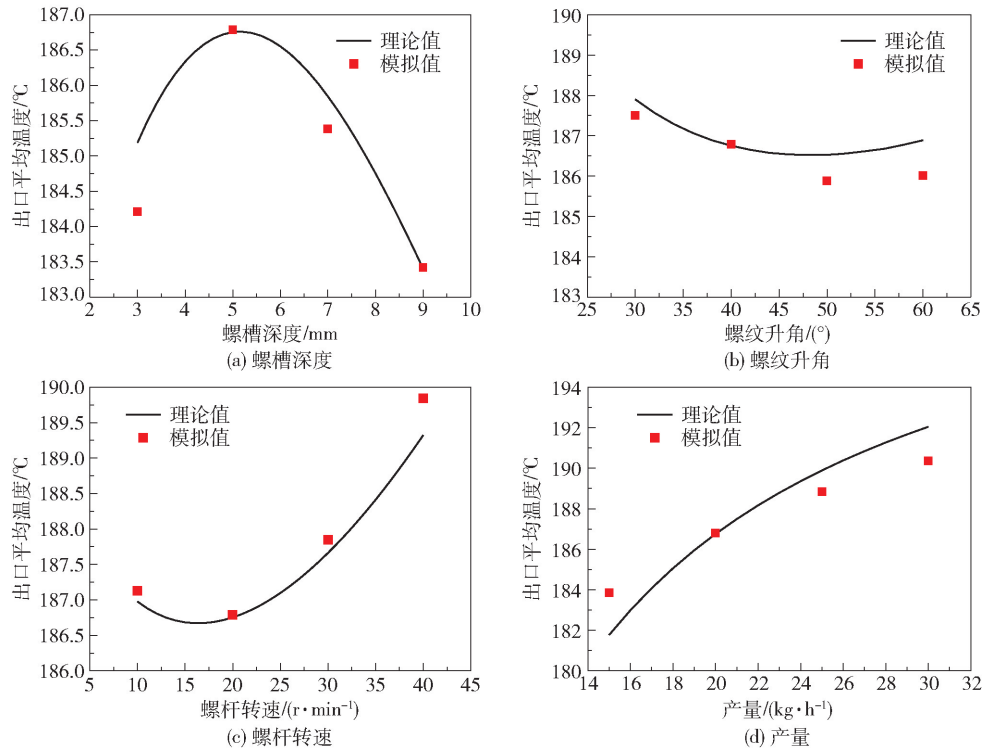


图 11 出口平均温度随结构参数和工艺参数的变化

Fig. 11 Variation in average outlet temperature with the structure parameters and process parameters

体的传热分析模型是可靠的,可以预测聚合物熔体在冷却单螺杆内的降温过程。

4 结论

本文建立了冷却单螺杆内聚合物熔体的传热理论分析模型,得到聚合物熔体在冷却单螺杆内传热平均温度的解析解。探究了结构参数与工艺参数对冷却单螺杆内聚合物熔体冷却过程的影响,结果表明,当螺槽深度为 5 ~ 9 mm、螺纹升角为 30° ~ 50° 时,通过增大螺槽深度和螺纹升角,同时降低螺杆转速和减少产量,能够有效增强冷却单螺杆内聚合物熔体的冷却,此时该模型能够满足冷却单螺杆内聚合物熔体的降温需求。最终通过 CFD 数值模拟验证了聚合物熔体传热理论分析模型的准确性,模拟值与理论值基本吻合,最大相对误差为 1.21%。以上结果表明,该模型能够预测冷却单螺杆内聚合物熔体的降温过程,可以为聚合物熔体降温过程提供一定的理论参考,用于指导冷却单螺杆的结构设计和工艺参数选择。

参考文献:

[1] RAUWENDAAL C. New screw design for cooling extrud-

ers [J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2004, 33(9-10): 397-399.

[2] FOGARTY J. Thermoplastic foam extrusion screw with circulation channels; US 6609818 B1 [P]. 2003-08-26.

[3] BARR R A. Extruder screw with improved energy efficient melting; US 6599004 B2 [P]. 2003-07-29.

[4] HAN C D. Analysis of the performance of cooling extruders in thermoplastic foam extrusion [J]. *Polymer Engineering and Science*, 1988, 28(19): 1227-1239.

[5] WANG C, BUSSMANN M, PARK C B. Numerical investigation of the effect of screw geometry on the mixing of a viscous polymer melt [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 117(2): 775-784.

[6] 范涛,陈作炳,汤帅,等. 螺棱断面形状对单螺杆挤出机熔融输送段的影响 [J]. *北京理工大学学报*, 2017, 37(1): 24-29.

FAN T, CHEN Z B, TANG S, et al. Effects of screw aris cross section shapes on the melt conveying section of single-screw extruder [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(1): 24-29. (in Chinese)

[7] 陈佳兴,李子然. 单螺杆橡胶挤出机三维非等温流动数值模拟 [J]. *材料科学与工艺*, 2018, 26(1): 62-68.

CHEN J X, LI Z R. Simulation of non-isothermal three-

- dimensional flow in the channel of a single-screw extruder for rubber material[J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 26(1): 62–68. (in Chinese)
- [8] 戴干策. 聚合物加工中的传递现象[M]. 北京: 中国石化出版社, 1999.
- DAI G C. Transmission phenomenon in polymer processing[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1999. (in Chinese)
- [9] KEUM J. Engineering analysis of devolatilization and reactive processing in intermeshing co-rotating twin screw extruders[D]. Akron: The University of Akron, 2004.
- [10] CAMPBELL G A. Analyzing troubleshooting single screw extrusion campbell [M]. Cincinnati: Hanser Publications, 2013.

Heat transfer model of a polymer melt in a single cooling screw

FEI Teng¹ YIN Long¹ XIN ChunLing¹ HE YaDong^{1, 2*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering;

2. Polymer Processing Equipment Engineering Research Center, Ministry of Education,
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In the light of the heat transfer of a polymer melt in a single cooling screw, the average temperature has been employed as a parameter to characterize the melt temperature change in the direction of the screw channel depth. The viscous heat generation process was simplified as an internal heat source, and a theoretical model of the heat transfer in the polymer melt was established. Based on the model, the influence of structural parameters and process parameters of the single cooling screw on the cooling process of polymer melt was analyzed. Finally, the accuracy of the model was verified by computational fluid dynamics (CFD) simulations. The results show that cooling of the polymer melt in a cooling single screw can be effectively enhanced by: (i) increasing the depth of the screw channel and the helix angle of the screw, when the depth of screw channel is 5–9 mm and the helix angle of the screw is 30°–50°; (ii) decreasing the screw speed and output. The model can meet the cooling demands of a polymer melt in a cooling single screw. The maximum relative error between the numerical simulations and model calculations was 1.21%, indicating that the heat transfer model of a polymer melt can predict the cooling process of the polymer melt in a cooling single screw, and can provide a theoretical reference for the design of cooling single screws in series extrusion foaming systems.

Key words: single cooling screw; heat transfer; theoretical calculation; simulation verification

(责任编辑: 于少云)