

L 型挤出机头中物料温度分布的研究

张冰, 江波, 许澍华
(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 对挤出机 L 型机头中流动物料的温度场分布进行了研究, 提出了计算 L 型机头内物料温度分布的数学模型, 并据此编制了 CAE 软件包。利用此软件包对两种不同的挤出物料进行了计算分析。通过分析计算结果, 讨论了物料性能和机头温度对 L 型机头内物料温度分布的影响。

关键词: 挤出机; L 型机头; CAE; 温度分布

中图分类号: TQ330.1⁺2; TQ330.4⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-890X(2002)07-0415-05

挤出机头流道形状和尺寸的优化设计一直是提高橡胶挤出制品质量研究中的重点。随着计算科学的发展和计算机硬件条件的突飞猛进, 对高分子物料进行流动模拟和 CAE 研究越来越引起人们的重视。

温度对高分子材料流动性能的影响是相当大的。在实际挤出, 特别是宽幅片材挤出过程中, 要对机头温度进行严格的分段和分区控制才能保证良好的挤出物料温度均匀性和制品物性。但目前的机头流动分布研究常对物料的流动进行等温假设, 即假设机头中物料温度处处相等, 并在此基础上进行计算。如此忽略温度分布不均匀性的影响而进行机头流动模拟计算, 其结果必然会与工程实际存在较大的偏差。

本工作对机头内温度场分布进行了研究, 并对机头内物料温度场分布进行了模拟计算, 还在此基础上开发了专用的 CAE 软件模块。

1 基本理论^[1~3]

影响机头内物料温度分布的因素很多, 其中有些因素的影响相对于其它因素来说略小些, 可以忽略或简化。本研究中对机头内物料流动的特点作如下假设:

(1)物料在机头流道内做剪切层流流动, 物料在垂直于物料流动方向上的流动忽略不计;

(2)聚合物在本研究的加工温度和剪切速率范围内均满足指数定律(Power-Law Equation);

(3)物料在流道内处于流动的充分发展阶段, 热边界层的流动也处于充分发展阶段;

(4)机头流道壁面温度一致且保持恒定;

(5)不计重力场, 考虑粘性耗散, 无其它内热源。

由机头内物料流动的实际情况可知, 物料在挤出过程中的温度变化属于内部流动中的传热问题。壁面与流体之间的热传导遵循牛顿冷却定律, 热流密度 q_w 为:

$$q_w = h_c(T_w - T_f) \tag{1}$$

式中 h_c ——局部对流传热系数;

T_w ——壁面温度;

T_f ——截面上物料的平均温度。

截面平均温度是根据截面上的热流量来定义的, 定义某截面上的平均温度 $\langle T \rangle$ 为:

$$\langle T \rangle = \frac{\iint_A \rho c_p u T dA}{\rho c_p \bar{u} A} \tag{2}$$

式中 ρ ——截面微元料流的密度;

c_p ——截面微元的定压比热容;

u ——截面微元的流速;

T ——截面微元的温度;

$\bar{\rho}$ ——截面平均料流密度;

$\bar{c}_p$ ——截面平均定压比热容;

$\bar{u}$ ——截面平均流速;

A ——截面积。

作者简介: 张冰(1974-), 男, 北京人, 北京化工大学博士研究生, 主要从事聚合物加工过程与装备的研究。

在内流问题中,通常用壁温和截面平均温度 $\langle T \rangle$ 定义料流的无量纲温度 θ :

$$\theta = \frac{T_w - T}{T_w - \langle T \rangle} \quad (3)$$

在内流中,当热边界充分发展时,无量纲温度不再随流体的流动而变化,同时在壁面处沿法向的无量纲温度梯度也不再变化。当壁面温度为常数时,得到

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{(T_w - T)d\langle T \rangle}{(T_w - \langle T \rangle)dx} \quad (4)$$

$$\frac{dT_w}{dx} = 0$$

式(4)中的两个公式可通过图1所示曲线直观地表示出来。

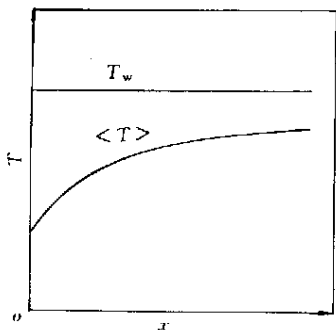


图1 恒壁温条件下流体平均温度沿管长的变化

图1定性表示了恒壁温条件下传热的结果是流体温度趋向于与壁温相同,此时传热便终止了。如果考虑粘性耗散,那么要待粘性耗散所产生的热量与经壁面向外的散热达到平衡时,流体的温度才会稳定。

2 数学模型

L型机头流道的形状可以分解为圆形流道和平板流道两种类型的区域,如图2所示。入口段和歧管可视为圆形流道(异型歧管按当量圆考虑),狭缝、阻尼区和定型段可视为平板流道。

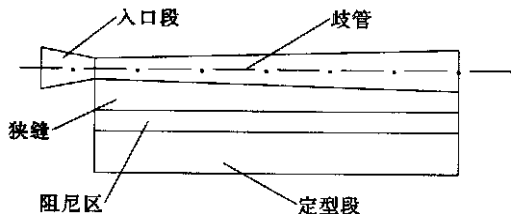


图2 L型机头流道示意

2.1 圆形流道传热分析

L型机头入口段和歧管的半径是沿轴向逐渐变化的。将这一类型的流道沿轴向离散为 N 个微元,每个微元均可视作等径圆管。

流体在管内流动时的热量来源有2个:一是粘性耗散产生的热;另一个是壁面的加热或冷却。令

$$T' = \frac{T - T_0}{T_w - T_0}$$

$$Br' = \frac{MR^2}{K(T_w - T_0)} \left[\frac{1+3n}{n} \cdot \frac{\bar{u}}{R} \right]^{1+n}$$

式中 T' ——温度,量纲为1;

T_0 ——流道入口处的物料温度;

Br' ——圆形流道布里克曼数,是反映粘性耗散与导热能力之比的准数;

n ——幂律指数;

M ——粘性耗散系数;

R ——圆管半径;

K ——导热系数。

定义无量纲因数:

$$\xi = \frac{r}{R}$$

$$\zeta = \frac{(1+n)KZ}{(1+3n)\rho c_p \bar{u} R^2}$$

式中 Z 为圆管微元的长度。

可以将 T' 分解为流体单独受壁面加热(冷却)引起的温度变化 T_1 和粘性耗散引起的流体温度变化 T_2 。对于每一段微元,均存在

$$\left(1 - \xi^{1+\frac{1}{n}}\right) \frac{\partial T_1}{\partial \zeta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\xi \frac{\partial T_1}{\partial \xi} \right]$$

$$\left(1 - \xi^{1+\frac{1}{n}}\right) \frac{\partial T_2}{\partial \zeta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\xi \frac{\partial T_2}{\partial \xi} \right] + Br' \xi^{1+\frac{1}{n}} \quad (5)$$

式(5)的边界条件为:

$$\text{当 } \zeta=0 \text{ 时, } T_1 = T_2 = 0 \quad (5a)$$

$$\text{当 } \xi=1 \text{ 时, } T_1 = T_2 = 1 \quad (5b)$$

$$\text{当 } \xi=0 \text{ 时, } \frac{\partial T_1}{\partial \xi} = \frac{\partial T_2}{\partial \xi} = 0 \quad (5c)$$

根据 Graetz 解的条件,得到

$$T_1 = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} A_i e^{-\alpha_i \zeta} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{\pi(1+n)\alpha L}{(1+3n)Q_i} \quad (7)$$

式中 Q_i ——第 i 个微元内的流量;
 α ——导温系数。
当 $\xi > 0.01$ 时, 此无穷级数只需前 3 项即可。 A_i 和 α_i 的前 3 项列于表 1^[4]。

表 1 A_i 和 α_i 的取值

项 目	i 值		
	1	2	3
α_i			
$n=1$	7.3	44.6	114
$n=0.5$	6.58	39.1	99.5
$n=0.33$	6.26	36.4	92.3
$n=0$	5.78	30.5	74.9
A_i			
$n=1$	0.82	0.10	0.032
$n=0.5$	0.81	0.11	0.039
$n=0.33$	0.81	0.11	0.046
$n=0$	0.69	0.13	0.048

设定:

$$Br' = \frac{MR^2}{KT_0} \left(\frac{1+3n}{n} \frac{\bar{u}}{R} \right)^{1+n}$$

则 $T_2 = Br' \left(\frac{n}{1+3n} \right)^2 \left(1 - \xi^{3+\frac{1}{n}} \right)$ (8)

2.2 平行平板流道传热分析

图 3 为平行平板间物料流动示意。

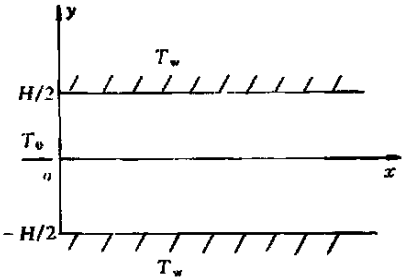


图 3 物料在平行平板间流动

物料在如图 3 所示的平行平板间流动时, 由于 T_0 和 T_w 不同, 因此物料在流动中温度必会发生变化; 由于物料在流道中的流动充分发展, 即流速 u 不随 x 的变化而变化, 因此张量双点积运算符 $\Delta_{xy} = \Delta_{yx} = \frac{du}{dy}$ 。在考虑剪切应力 τ 时, 只考虑 τ_{xy} 项。由此得到粘性耗散项 $\tau : \nabla V$ 为:

$$\tau : \nabla V = M \left| \frac{du}{dy} \right|^{n+1}$$
 (9)

设定以下无量纲变量:

$$T = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}$$
$$\bar{x} = \frac{4Kx}{\rho c_p \bar{u} H^2} \frac{1+n}{1+2n}$$
$$\bar{y}_i = \frac{2y_i}{H}$$
$$u = \frac{1+2n}{1+n} \left(1 - |\bar{y}_i|^{1+\frac{1}{n}} \right)$$

得到物料在平行平板间流动的无量纲能量方程为:

$$\left(1 - |\bar{y}_i|^{1+\frac{1}{n}} \right) \frac{\partial T}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial^2 T}{\partial \bar{y}_i^2} + Br |\bar{y}_i|^{1+\frac{1}{n}}$$
 (10)

式中 Br 为平板流道的布里克曼数。

$$Br = \left(\frac{1+2n}{n} \right)^{1+n} \frac{MH^{1-n} \bar{u}^{1+n}}{2^{1-n} K (T_0 - T_w)}$$

式(10)的边界条件为:

$$\bar{x} = 0, T = 1$$
 (10a)

$$\bar{y}_i = \pm 1, T = 0$$
 (10b)

求解式(10)便可以得到 T 。

2.3 物料流动的数学模型^[5]

图 4 为物料在 L 型机头中流动情况示意。

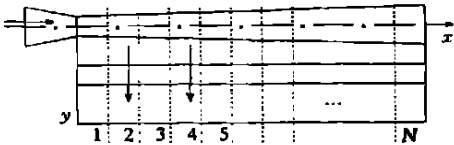


图 4 物料在 L 型机头中的流动示意

如图 4 所示将机头沿 x 方向分为 N 个微元。对每一微元来说, 歧管流道均可视为等径圆管, 可以采用圆管流动的温度公式进行分析。设流入机头的物料流量为 Q , 则第 i 个歧管微元的流量 Q_i 为:

$$Q_i = \frac{(N-i+1)Q}{N}$$

可得 $\bar{u} = \frac{Q_i}{\pi R_i^2}$ (11)

将式(11)代入式(5)可求得物料在歧管流道中的温度分布。

狭缝、阻尼区和定型段的每一段微元均按平行平板流动进行温度分析。第 i 个微元的流量 Q_i 为 Q/N ,

可得
$$\bar{u} = \frac{NQ_i}{HW} \quad (12)$$

式中 H ——平板流道的高度;

W ——机头的宽度。

将式(12)代入式(10),通过数值解便可得到狭缝、阻尼区和定型段的温度场分布。

3 计算实例与分析

现有 L 型挤出机头的结构和尺寸如图 5 所示,机头总宽度为 1 700 mm,挤出端的宽度 W 为 1 400 mm,入口直径 D_0 为 102 mm,中间段直径 D_1 为 58 mm,末端直径 D_2 为 80 mm。狭缝、阻尼区和定型段长度 y_1 , y_2 和 y_3 分别为 36, 32 和 57 mm,狭缝区高度为 15.5 mm,阻尼区高度为 10.5 mm,定型段的高度是渐变的,从 7.5 mm 渐变到 2.5 mm。

将 L 型机头按图 5 所示进行离散,将机头沿宽度方向划分为 80 个单元。

物料在机头入口处的温度为 130 °C,机头温

度按 90 °C 的恒温进行计算。

A 物料挤出速率 Q 为 $1.75 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,幂律指数 n 为 0.67,其导热系数 K 为 $0.4184 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,粘性耗散系数 M 为 $3.45 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^{2/3} \cdot \text{m}^{-2}$,导温系数 α 为 $2.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

试验时在挤出机出口处设置温度传感器,测得熔体温度约为 130 °C。实测机头出口处物料温度约为 110 °C。

按照上述数学模型进行计算机模拟,得到机头内物料温度场的分布如图 6 所示。

由图 6 可见,物料进入机头后开始降温,但进入歧管和狭缝接触区(图 6 中的 A 区),由于物料流速发生较大变化,开始产生明显的粘性耗散,同时,由于狭缝、阻尼区和定型段 3 段的高度均不同,在每段的入口处物料均会产生较大的内摩擦,从而导致物料温度升高。算得出口处料温约为 100 °C。

仍用 A 物料,将挤出速率增大至 $3.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。得到机头内温度分布如图 7 所示。

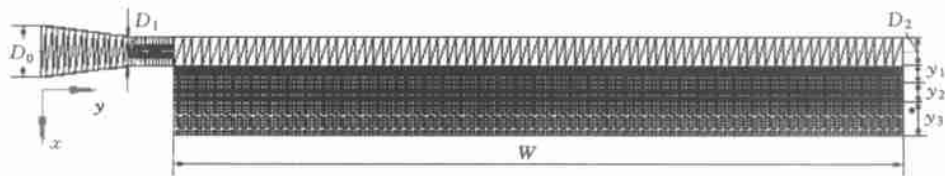


图 5 L 型机头尺寸和离散示意



图 6 A 物料在机头流道内的温度分布 ($Q = 1.75 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

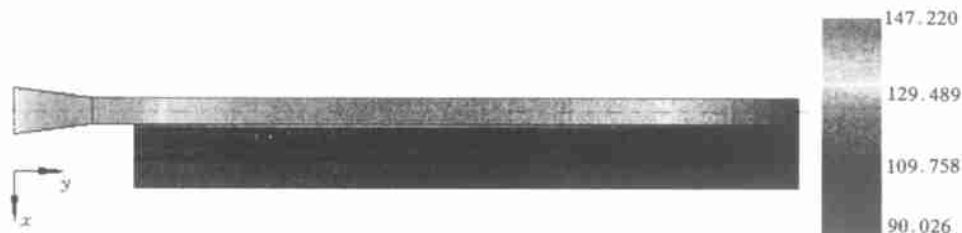


图 7 A 物料在机头流道内的温度分布 ($Q = 3.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

由图 6 和 7 比较可知,当挤出速率增大后,物料的粘性耗散明显增大,但物料出口温度仍基本保持在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

换用 B 物料进行计算,挤出速率为 $1.75 \times$

$10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 幂律指数 n 为 0.5, 导热系数 K 为 $0.48 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$, 粘性耗散系数 M 为 $6.9 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^{2/3} \cdot \text{m}^{-2}$, 导温系数 α 为 $1.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。机头内温度分布如图 8 所示。



图 8 B 物料在机头流道内的温度分布 ($Q = 1.75 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

由于 B 物料的导热能力较强,粘性耗散产生的热可以非常迅速地传走。从整体温度分布来看,从 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐降至 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,只是由于定型段的高度从 7.5 mm 降至 2.5 mm ,导致物料在流经此段时产生较大的粘性耗散,从而温度又回升到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

4 结论

不同物料对于机头温度的敏感程度是不同的,导热系数较小或粘性耗散系数较大的物料,由于传热效果较差,粘性耗散产生的热量不易传走,很容易导致物料温度的升高。

挤出速率对机头内物料温度分布也有很大影响。同样情况下,挤出速率越大,粘性耗散生热越大。同时发现,除了在狭缝、阻尼区和定型区的结合处因流速变化而产生明显的粘性耗散外,最主

要的粘性耗散发生在歧管到狭缝的过渡区域。

通过对 L 型机头温度场的分析,建立了机头温度场分析的数学模型,并编制了专用的 CAE 软件包,这对于机头流道设计和加热冷却区段的配置及温度控制有一定帮助。

参考文献:

- [1] 周昆颖. 高聚物加工传热学基础[M]. 北京: 北京化工大学, 1998. 153-187.
- [2] 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张 政译. 北京: 科学出版社, 1984. 47-93.
- [3] Hensen F. Plastics Extrusion Technology[M]. Munich Viwnna: Habser Publishers, 1988. 90-125.
- [4] 伊藤公正. プラスチック成型加工加熱と冷却[M]. 东京: 工业调查会, 1971. 117-263.
- [5] 吴崇峰. 实用注塑模 CAD/CAE/CAM 技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000. 26-44.

收稿日期: 2002-01-23

Temperature distribution in L-die of extruder

ZHANG Bing, JIANG Bo, XU Shu-hua

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The temperature distribution of the flowing material in L-die of extruder was investigated. A mathematical model for calculating the temperature distribution of the flowing material in L-die of extruder was established. Based on this, a CAE software package was worked out. A calculation analysis of two different materials was made with the software package. The results showed the effect of the properties of materials and the temperature of L-die on the temperature distribution of the flowing material in L-die.

Keywords: extruder; L-die; CAE; temperature distribution