

文章编号 1000-5013(2000) 03-0302-05

熔融挤压堆积成形中材料丝的 熔 融 过 程 分 析

江 开 勇

(华侨大学机电工程系, 泉州 362011)

摘要 应用传热学理论, 建立材料丝在液化管中的熔融模型. 采用数值解方法, 求出该模型的解. 研究结果对于合理选择液化管加热温度, 具有重要的指导意义, 同时为进一步研究送丝速度与加热温度的匹配问题, 奠定良好的理论基础.

关键词 快速成形, 熔融挤压堆积, 熔融模型, 加热温度

中图分类号 TK 124

文献标识码 A

在熔融挤压堆积成形工艺中, 成形材料是一种直径约为 1.8 mm 的丝材. 材料丝在喷头液化管内的送进过程中, 不断被加热, 沿径向由外向里逐渐熔融. 在此过程中, 材料丝除了受热熔融外, 同时起着活塞推进作用. 随着材料丝对摩擦轮的驱动, 把液化管下段的熔料连续地挤出喷嘴. 因此, 材料丝在液化管中的熔融状态对成形过程的成败, 具有决定性的作用. 合理的加热温度, 应保证液化管下部的材料处于完全熔融态, 并具有适当的粘度, 以避免喷嘴堵塞. 同时, 应确保液化管上部的材料丝具有一定长度的固液共存段, 保持足够的抗弯模量, 以传递轴向力.

1 材料丝熔融过程理论建模

液化管结构, 如图 1 所示. 发热体为加热电阻丝, 加热电阻丝沿轴向均匀包扎在内径为 2 mm 的铜管外部. 材料丝在液化管中的送进过程中, 铜管内壁以热传导的形式传递热量, 使其沿径向由外向里逐渐熔融.

按照传热学理论^[1], 对于传热过程伴随着熔化或凝固现象的瞬态传热问题, 通常属“相变”或“移动边界”问题. 材料丝在液化管中的熔融过程便属于这类问题. 分析这类问题的关键, 在于固-液界面的处理方法. 为了便于分析, 这里把问题集

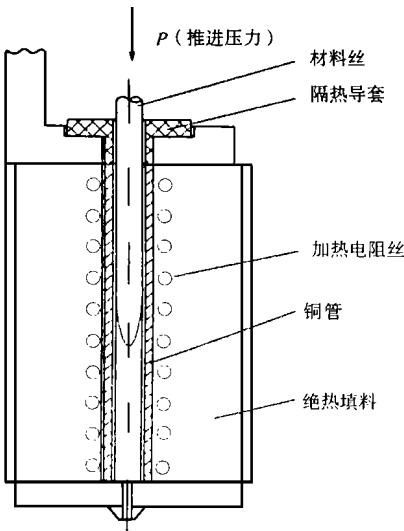


图 1 液化管结构示意图

收稿日期 1999-11-14 作者简介 江开勇(1961-), 男, 副教授

基金项目 福建省自然科学基金资助项目

中在熔融只发生在某一熔点温度的情形. 在这一界面上所需满足的基本关系可表示为如下两点. (1) 相邻两相在界面处的温度相同, 均为材料的熔点温度 T_m . (2) 界面上必须满足能量平衡方程. 据此, 参照图 2, 可写出分界面上的基本关系式(其中 T_w 为液化管管壁温度). 由固-液界面 $[x = s(t)]$ 处温度连续的要求, 有

$$T_s(x, t) = T_l(x, t) = T_m, \quad x = s(t), \quad (1)$$

其中 $T_s(x, t)$ 为固相温度, $T_l(x, t)$ 为液相温度. 由固-液界面上的能量平衡方程, 可得

$$q_l - q_s = \rho_s \lambda \frac{ds(t)}{dt}, \quad (2)$$

式中 q_l 为界面处液相的导入热流密度, q_s 为界面处固相的导出热流密度, λ 为熔化潜热, ρ_s 为材料固相密度, $\frac{ds(t)}{dt}$ 为界面移动速度. 进一步可将式(2)写成

$$K_l \frac{\partial T_l}{\partial x} - K_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \rho_s \lambda \frac{ds(t)}{dt}, \quad (3)$$

其中 K_s, K_l 分别为固相和液相的导热系数. 式(1), (3) 构成了固-液界面的边界条件方程.

下面从工程应用的角度出发, 对所要解决的问题作必要的简化. (1) 考虑到加热过程主要是来自加热管内

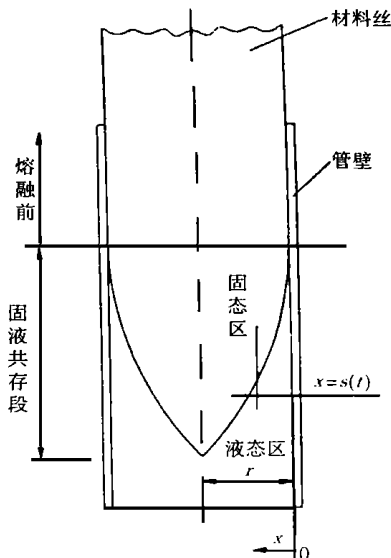


图2 熔融过程的物理模型

壁向材料丝的热传导. 所以, 这里仅考虑材料丝沿径向方向的导热, 忽略了轴向热传导, 从而把问题简化为一维导热过程. (2) 由于采用了改进型的送丝机构, 也是本文所采用的新喷头装置, 成形过程中材料丝始终以恒定的速度送进. 因此, 可以把坐标系建立在材料丝上, 由此省去沿进给方向的位置变量. (3) 分析材料丝的熔融行为的目的, 是为了考察材料由固态到液态的相变过程. 因此, 这里把所要解决的问题集中在求解材料丝的熔融阶段的固-液分界线的形状, 即温度等于熔点 ($T = T_m$) 的等温线.

根据以上的分析和假设, 可建立材料熔融过程的传热控制方程. (1) 材料丝被熔融前(完全固态段), 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_s}{\partial \tau} &= a_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} & 0 < x < r, & t > 0, \\ T_s &= T_w & x = 0, & t > 0, \\ \frac{\partial T_s}{\partial x} &= 0 & x = r, & t > 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其初始条件为 $\tau = 0, T = T$ (T 为环境温度). (2) 材料在固-液共存段的固态区, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_s}{\partial \tau} &= a_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} & s < x < r, & t > 0, \\ K_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} + \rho_s \lambda \frac{ds}{d\tau} &= K_l \frac{\partial T_l}{\partial x} & x = s, & t > 0, \\ T_s &= T_m & x = s, & t > 0, \\ \frac{\partial T_s}{\partial x} &= 0 & x = 0, & t > 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当式(5)的初始条件为 $T|_{x=s} = T_m, \tau = \tau$ 时, 温度分布 $T = f(x, \tau)$. (3) 材料在固-液共存段的液态区, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} &= a_1 \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} & 0 < x < s, & t > 0, \\ K_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \rho_s \lambda \frac{ds}{d\tau} &= K_l \frac{\partial T_1}{\partial x} & x = s, & t > 0, \\ T_1 &= T_w & x = 0, & t > 0, \\ T_1 &= T_m & x = s, & t > 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其初始条件同(2). 在式(4)~(6)中, $a = \frac{K}{C_p \rho}$ 为导温系数, C_p 为比热, ρ 为密度, λ 为熔化潜热; 下标 s, l 分别表示材料处于固相和液相时的各项物性参数. 当 $x = 0$ 时, 采用第一类边界条件; 当 $x = r$ 时, 采用第二类齐次边界条件; 当 $x = s$ 时, 采用相变引起的移动边界条件.

2 模型的数值解

求解这类“移动边界”的传热学问题, 有其固有的困难. 这是由于, 当固相与液相在界面处吸收或释放潜热时, 这个界面是移动的. 因此, 固-液界面的位置预先不知道, 它是作为解的一部分在求得解以后才能得到的. 这类问题的基本特点是, 边界未知且移动. 于是, 抛物线热传导方程的求解, 只能在尚待确定的区域内进行. 采用解析法求这类问题的精确解, 将是非常困难的. 本文采用有限差分法对模型作近似求解^[1].

建立差分格式时, 首先是把定解问题(4)~(6)所讨论的区域离散化. 由于液化管是轴对称的, 因此这里只考虑一个半径长度区域. 用节点 i ($i = 1, 2, \dots$) 将区域离散化, $\Delta x = x_i - x_{i-1}$ 为距离步长. 同样地, 用 n ($n = 0, 1, 2, \dots, N$) 将时间区域($\tau > 0$) 离散化, $\Delta \tau = \tau_n - \tau_{n-1}$ 为时间步长. 由此建立定解问题(4)~(6)的差分方程, 分别为以下3种情况. (1) 对完全固态区(熔融前), 有

$$\left. \begin{aligned} T_i^{n+1} &= F_s T_{i+1}^n + (1 - 2F_s) T_i^n + F_s T_{i-1}^n \\ n &= 0, 1, 2, 3, \dots; \quad i = 2, 3, \dots, N-1, \\ T_1^n &= T_w \quad n = 1, 2, 3, \dots, \\ T_N^{n+1} &= 2F_s T_{N-1}^n + (1 - 2F_s) T_N^n \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, \\ T_i^0 &= (T + T_w)/2, \quad T_i^0 = T \quad i = 2, 3, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在式(7)中, $F_s = \frac{a_s \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2}$, T 为环境温度, T_w 为加热管壁温. (2) 对固-液共存段固态区, 当离散化处理后, 界面 $x = s(t)$ 表示为第 j 个节点. 即

$$\left. \begin{aligned} T_i^{n+1} &= F_s T_{i+1}^n + (1 - 2F_s) T_i^n + F_s T_{i-1}^n \\ n &= \tau/\Delta \tau, \quad \tau/\Delta \tau + 1, \quad \tau/\Delta \tau + 2, \dots, \quad i = j, j+1, j+2, \dots, \\ T_i^{n+1} &= F_s T_{i+1}^n + (1 - 2F_s) T_i^n + F_s T_{i-1}^n \\ n &= \tau/\Delta \tau, \quad \tau/\Delta \tau + 1, \quad \tau/\Delta \tau + 2, \dots, \quad i = j, j+1, j+2, \dots, \\ T_j &= T_m \quad j = \text{int}[s(n \cdot \Delta \tau / \Delta x)] + 1, \\ T_N^{n+1} &= 2F_s T_{N-1}^n + (1 - 2F_s) T_N^n. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(3) 对固-液共存段液态区, 有

$$\left. \begin{aligned} T_i^{n+1} &= F_1 T_{i+1}^n + (1 - 2F_1) T_i^n + F_1 T_{i-1}^n \\ n &= \tau / \Delta \tau, \quad \tau / \Delta \tau + 1, \quad \tau / \Delta \tau + 2, \dots, \quad i = 1, 2, \dots, j - 1, \\ T_j &= T_m \quad j = \text{int}[s(n \cdot \Delta \tau) / \Delta x] + 1, \\ T_1^n &= T_m. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)中, $F_1 = \alpha_l \cdot \Delta \tau / \Delta x^2$, 收敛条件为 $1 - 2F_1 \geq 0, 1 - 2F_1 \geq 0$.

考察式(7)~(9)不难看出, 式(7)是一个固定边界问题, 而且已经给定了初始条件. 材料从完全固态到最外层开始熔融的整个计算过程, 为求解一般的二维非稳定传热问题. 式(8), (9)是一个移动边界问题, 在差分式中, j 是一个变化的量, 与固-液界面的移动速度(即材料的熔融速度)有关. 因此, 必须通过界面能量平衡方程(3)计算后确定. 另外, 界面沿 x 方向的移动距离 $s(t)$, 不可能正好等于为完全固态区划分的距离步长的整数倍. 在进入固-液共存段的差分计算时, 必须重新划分网格. 这种重新划分网格的工作, 在整个固-液共存段的差分计算过程中将重复多次. 重新划分网格所带来的问题是, 前一时刻的结点位置一般不会是当前时刻的结点位置. 因此, 本文采用内插法, 计算出前一时刻对应于当前计算节点位置的温度. 图3, 4分别为尼龙、聚丙烯在液化管中的熔融线计算结果. 图中曲线1, 2, 3的 T_w 分别为245, 240 和

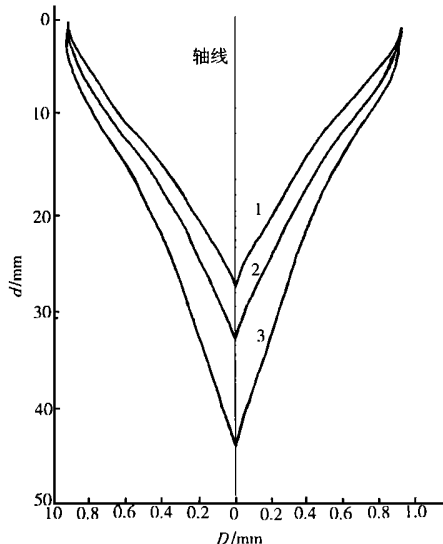


图3 尼龙熔融等温线计算结果

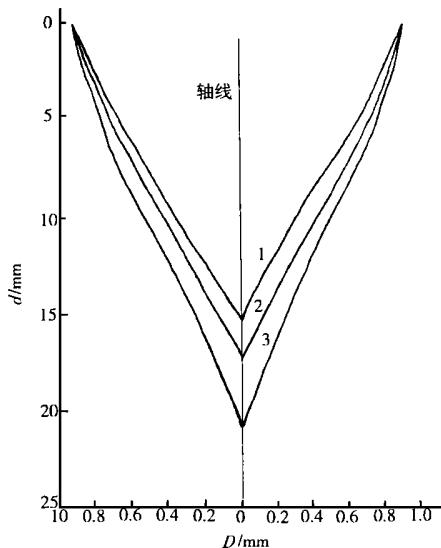


图4 聚丙烯熔融等温线计算结果

235, d, D 分别为轴向位置和径向位置. 两种材料的送丝速度 V_f 为 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 物性参数 ρ_s 分别为 $1.23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}, 0.95 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, ρ_c 分别为 $1.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}, 0.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, c_p^s 分别为 $1.470 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}, 1.595 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$, c_p^l 均为 $2.139 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$, λ 分别为 $82.98 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}, 79.70 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, K 分别为 $0.24 \text{ J} \cdot (\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})^{-1}, 0.172 \text{ J} \cdot (\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, T_m 分别为 230, 169.

实验结果表明^[8], 当固-液共存段在液化管中的长度为液化管总长度的一半左右时, 容易保证喷嘴出的丝均匀. 本文采用的成形设备, 其液化管总长度为 60 mm. 对照图3, 4不难看出, 在成形尼龙零件时, 液化管壁温宜控制在 230 左右; 而成形聚丙烯零件时, 壁温可控制在 200 左右.

3 结束语

建立材料丝在液化管中的熔融模型,并通过数值解,可以直观地显示材料丝在液化管中的熔融状态.此结果可直接用于确定合理的液化管加热温度,达到既保证材料丝在液化管入口处不出现失稳,又能避免喷嘴堵塞的控制目标,从而避免了在设定加热温度时的盲目性.

参 考 文 献

- 1 霍尔曼 J P 著.传热学[M].马庆芳译.北京:人民教育出版社,1985.33~42
- 2 俞昌铭.热传导极值数值解[M].北京:清华大学出版社,1981.77~96
- 3 肖 棋,江开勇.熔融沉积快速成形工艺控制研究[J].华侨大学学报(自然科学版),1999,20(1):76~79

Analysing Melting Process of Material Filaments during Forming by Melting Extrusion Modeling

Jiang Kaiyong

(Dept. of Electromech. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract By applying theory of heat transfer, a melting model of material filament in liquefied pipeline is built and solved by numerical method. The results are of important significance for reasonable choice of heating temperature of liquefied pipeline and they have laid a good theoretical basis for further studying the matching of feed speed of filament and heating temperature.

Keywords model of melting, temperature of heating