

挤出机螺杆熔融段的优化设计

梁基照

(华南理工大学 工业装备与控制工程系, 广东 广州 510641)

摘要: 讨论了挤出机螺杆熔融段的优化设计问题。以单位产量能耗最小为优化目标, 建立简化的挤出机熔融段螺杆优化设计的数学模型, 应用复合形法求解。结果表明, 计算所得熔融段起、末端的螺槽深度、螺顶宽度和螺线升角均位于或接近文献中所建议的最佳取值范围。

关键词: 挤出机; 螺杆; 优化设计

中图分类号: TQ330.4⁺4 文献标识码: B 文章编号: 1000-890X(2002)10-0603-04

熔融段是普通单螺杆挤出机中重要的功能段之一。聚合物物料在通过该段时, 受到机筒和螺杆强烈的剪切和挤压, 完成物料混合和塑化过程。由于物料发生从固态(固体床)到液态(熔池)的相变, 因此需消耗大量的热能和机械能, 尤其是粘弹性较高的无定形聚合物。通常, 熔融段螺杆长度占螺杆总长度的 50%~60%。由此可见, 该段几何结构设计合理与否, 直接关系到制品的质量和生产成本。近 30 年来, 不少研究者探讨过挤出机的熔融混合和塑化机理, 提出了一些理论模型^[1-6]。前文^[7]曾用解析法和实验结果分析方法讨论了熔融段螺杆主要几何结构参数的优化。本研究应用计算机技术对熔融段螺杆主要的几何结构参数进行优化设计。

1 数学模型的建立

1.1 理论分析

普通挤出机螺杆的结构示意如图 1 所示。从图 1 可以看出, 熔融段的螺槽深度逐渐变浅, 这主要是为了强化剪切塑化的功能。由于机筒与螺杆之间的相对运动, 聚合物物料在机筒内受到强烈的挤压和剪切运动, 由固体床的柱塞运动逐渐形成熔料的剪切流动。机筒相对螺杆的速度 V_b 可由下式确定:

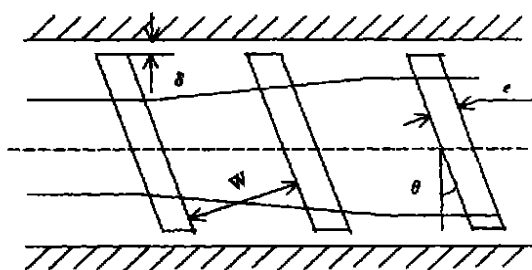


图 1 挤出机螺杆结构示意图

$$V_b = \frac{\pi D_b \omega}{60} \quad (1)$$

则机筒壁面处的剪切速率 γ_b 可由下式表示:

$$\gamma_b = \frac{\pi D_b \omega}{60 H} \quad (2)$$

式中 D_b ——机筒内径;

ω ——机筒相对于螺杆的角速度;

H ——熔融段螺槽的平均深度。

H 的计算公式为

$$H = \frac{H_1 + H_3}{2}$$

式中, H_1 和 H_3 分别为加料段螺槽深度和计量段螺槽深度。

熔融理论主要是基于热力学和流变学而建立的。聚合物挤出过程中典型的熔融模型如图 2 所示。首先, 与热机筒接触的固体床表面逐渐形成一层薄的熔膜。当熔膜厚度超过螺杆与机筒间隙 δ 时, 螺棱把熔膜从机筒内壁径向地刮下, 并汇聚于螺纹推进面而形成环流区(熔池)。随着螺槽逐

作者简介: 梁基照(1953-), 男, 广东顺德人, 华南理工大学教授, 博士, 主要从事高分子材料加工工程理论及其成型机械设计与优化方面的研究和教学工作。

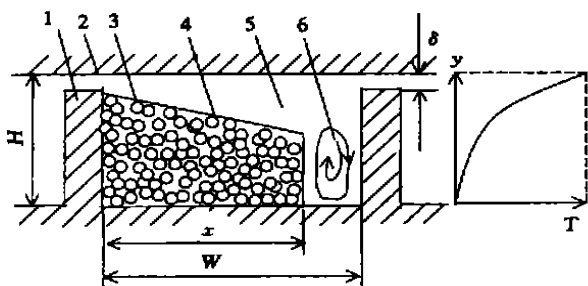


图2 熔融模型

1—螺杆;2—机筒;3—固体床;4—分界面;5—熔膜;6—熔池

渐变浅以及螺槽与机筒间的剪切作用,熔池逐渐扩大,而固体床则相应地缩小直至消失,熔料进入螺杆的计量段。在一般的挤出过程中,聚合物熔体的剪切流动大致上服从幂律,其于机筒壁面处的剪切粘度 η_b 与剪切速度和温度的关系可以表述为

$$\eta_b = \eta_r \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_r} \right)^{n-1} \exp[-\xi(T - T_r)] \quad (3)$$

式中 η_r ——聚合物的参考粘度;

γ_r ——参考剪切速率;

ξ ——幂常数;

n ——聚合物流动行为指数;

T ——操作绝对温度;

T_r ——参考绝对温度。

$$S_b = \frac{\pi W L_2}{W + e} (D_b - 2H - 2\delta) + \frac{H p L_2}{l} \left[\sqrt{l^2 + \pi^2 (D_b - 2H - 2\delta)^2} + \sqrt{l^2 + \pi^2 (D_b - 2\delta)^2} \right] \quad (7)$$

式中 L_2 ——螺杆熔融段长度;

l ——螺纹升程, $l = \pi (D_b - 2\delta) \tan \theta$;

δ ——螺纹顶与机筒内壁的间隙。

式(6)中,机筒速度方向与物料流动方向的夹角 φ 可定义为

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{V_z \sin \theta}{V_{bz}} \quad (8)$$

式中 V_{bz} ——物料沿流动方向上的速度;

V_z ——物料沿流道方向上的速度。

V_{bz} 和 V_z 的计算公式为

$$V_{bz} = \sqrt{V_b^2 + V_z^2 - 2 V_b V_z \cos \theta}$$

$$V_z = \frac{V_b}{\sin \theta}$$

根据高产、优质和低能耗的设计原则,选择以

1.2 目标函数

按质量守恒定律,普通单螺杆挤出机中各段的质量流率 Q_s 是相同的。对于加料段, Q_s 可表述为^[3]

$$Q_s = \rho_s H_1 p W V_b \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \theta)} \quad (4)$$

式中 ρ_s ——固体物料的密度;

p ——螺纹头数;

W ——螺槽的法向宽度, $W = \frac{l \cos \theta}{p} e$;

n ——螺杆转速;

φ ——固体输送角,通常取 $10 \sim 25^\circ$ 。

Lai 和 Yu^[8] 新近提出的单螺杆挤出机熔融塑化模型为:

$$E = \frac{\pi D_b F_{by} \omega}{60} \quad (5)$$

$$F_{by} = S_b \gamma_b \mu_b \cos \varphi \quad (6)$$

式中 F_{by} ——机筒施加给物料的力;

μ_b ——机筒壁面处聚合物的粘度;

S_b ——聚合物与机筒的接触面积。

S_b 可由下式确定:

单位产量的能耗最小为螺杆熔融段几何结构参数设计的优化目标。即

$$f(x) = E / Q_s \quad (9)$$

1.3 设计变量

根据前述的聚合物物料塑化熔融机理及目标函数可知,该段的几何参数中,起始端槽深 H_1 和末端槽深 H_3 、棱顶宽度 e 以及螺纹升角 θ 对聚合物物料塑化熔融过程影响甚大。因此,取 H_1 , H_3 , e 和 θ 为设计变量,于是

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\theta, e, H_1, H_3]^T \quad (10)$$

1.4 约束条件

由受力分析可知,螺杆在工作时受弯、扭和压的作用,其中以扭转作用最大。由此得强度约束条件:

$$g_1(x) = [\tau] - \frac{496\,000 \mu N_{\max}}{n_{\max} (D_b - 2x^3)^3 \left[1 - \left(\frac{3.15}{D_b - 3x_3} \right)^4 \right]} \geq 0 \quad (11)$$

式中 $[\tau]$ ——许用剪切应力；

N_{max} ——电机最大额定功率；

μ ——机械效率，一般取 0.8；

n_{max} ——螺杆最高转速。

为了使物料得到足够的压缩作用，以便排气和致密性好，应满足如下的压缩比条件：

$$g_2(x) = \frac{(D_s - H_1)H_1}{(D_s - H_3)H_3\epsilon_1} - 1 \geq 0 \quad (12)$$

$$g_3(x) = 1 - \frac{(D_s - H_1)H_1}{(D_s - H_3)H_3\epsilon_2} \geq 0 \quad (13)$$

式中 D_s ——螺杆外径；

ϵ_1, ϵ_2 ——压缩比的上、下限。

此外，几何结构参数有一定的取值范围。若取 X_{iH} 和 X_{iL} 分别为设计变量的上、下限值，则有如下的边界约束条件：

$$g_4(x) = \frac{X_i}{X_{iL}} - 1 \geq 0 \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (14)$$

$$g_5(x) = \frac{X_{iH}}{X_i} - 1 \geq 0 \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (15)$$

1.5 数学模型

根据上述讨论，可得挤出机熔融段螺杆优化设计的数学模型：

$$\begin{cases} \min f(x) = \frac{\pi D_b F_{by} \omega}{60 \rho H_1 p W V_b} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \theta)} \\ X \subset R^4 \\ \text{s.t. } g_i(X) \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, 11) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)表明，本优化设计属于四维非线性数学规划问题。

2 结果与讨论

2.1 优化方法

根据本优化设计数学模型的特点，应选择约束复合法进行寻优，程序采用 C++ 语言编写，其优化设计流程如图 3 所示。其中， n_1 为设计变量， k 为复合形顶点数， ϵ 为迭代精度， α 为反射系数， δ_1 为容差。设计示例为 $\Phi 70$ mm 单螺杆挤出机。螺杆材料用 38CrMoAlA 氮化钢，取 $[\tau] = 784$ MPa。挤出机技术参数为： $n_{max} = 120$ r·min⁻¹， $N_{max} = 30$ kW， $p = 1$ ， $L/D_s = 20$ ， $\epsilon_1 = 4$ ， $\epsilon_2 = 3$ ， $\delta = 0.1H_3$ 。拟加工物料为高密度聚乙

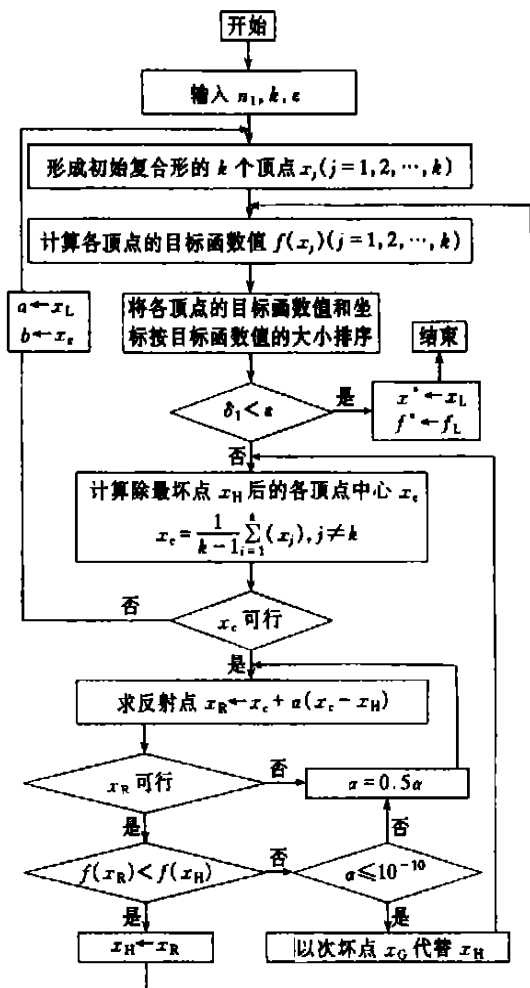


图 3 挤出机熔融段螺杆优化设计流程

烯(HDPE)，取 $\varphi = 17.7^\circ$ ，挤出操作温度为 180°C 。

设计参数的取值范围为： $e = (0.08 \sim 0.12)$

D_s ； $H_3 = (0.025 \sim 0.07)D_b$ ； $\theta = 17 \sim 30^\circ$ 。

2.2 优化结果

把上述已知数据输入计算机，并取计算精度 $\epsilon' = 0.001$ ，计算机运算后，输出最优解： $\theta^* = 22.226\ 407^\circ$ ； $e^* = 6.876\ 456$ mm； $H_1 = 15.235\ 448$ mm； $H_3 = 3.877\ 796$ mm。圆整后得： $\theta^* = 22^\circ$ ； $e^* = 7$ mm； $H_1^* = 15$ mm； $H_3^* = 4$ mm。

2.3 讨论

传统的挤出机螺杆，其螺纹升角 θ 大多取 17.66° 。前文^[7]中对熔融过程进行了理论分析，

建议 θ 的最佳取值范围为 $17.66 \sim 34^\circ$ 。本研究中, θ^* 取 22° , 位于最佳取值范围内。文献[8]曾研究过槽深对固体输送率的影响, 发现最佳槽深随着螺杆直径的增大而增大。例如, 螺杆直径为 30 mm 时, $H_1^*/D_b = 0.15$; 而当螺杆直径为 65 mm 时, $H_1^*/D_b = 0.185$ 。本研究中, 螺杆直径为 70 mm, 取 $H_1^* = 14$ mm, 即 $H_1^*/D_b = 0.20$, 符合最佳槽深随着螺杆直径而增大的变化趋势。螺杆螺纹顶宽度的增大可增强对物料的剪切作用, 有利于物料熔融塑化, 但同时又增大功率消耗。由前述的设计参数的取值范围知 $e = (0.08 \sim 0.12) D_s$, 本研究中, $D_s = 60$ mm。这样, $e = 4.8 \sim 7.2$ mm, 即 e^* 值接近上限值。

3 讨论

螺槽深度、螺棱顶宽度和螺纹升角直接关系到挤出机的生产能力、塑化质量和能耗。因此, 取这些几何参数为设计变量, 以单位产量能耗最小为优化目标, 建立了简化的挤出机熔融段螺杆优化设计的数学模型。应用约束复合形法求解。结果表明, 螺杆熔融段起、末端的螺槽深度、螺棱顶宽度和螺纹升角的最佳值分别为 15 mm, 4 mm, 7 mm 和 22° , 均位于或接近文献中所建议的最佳取

值范围。

致谢: 华南理工大学工控系 1997 级本科生陈竹和 2000 级研究生李峰华参与了本课题的部分工作, 谨表谢意。

参考文献:

- [1] Tadnor Z, Duvdevani I I, Klein J. Melting in plasticating extruders: Theory and experiment[J]. Polym. Eng. Sci., 1967, 7(3): 198.
- [2] Kuhnle H. Calculation and optimization of melt extruders[J]. J. Polym. Eng., 1986, 6(1-4): 51.
- [3] Rauwendaal C. Melting theory for temperature dependent fluids: exact analytical solution for power law fluids[J]. Adv. Polym. Tech., 1991/1992, 11(1): 19.
- [4] Rauwendaal C. Conveying and melting screw extruders with axial screw movement[J]. Int. Polym. Process, 1992, 11(1): 26.
- [5] Potent H, Hanhart W. Design and processing optimization of extruder screw[J]. Polym. Eng. Sci., 1994, 34(11): 937.
- [6] 梁基照. 轻工机械优化设计[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1995. 150.
- [7] 梁基照. 挤出机螺杆熔融段几何参数的优化设计[J]. 轻工机械, 1994(4): 34.
- [8] Lai E, Yu D W. Modeling of the plasticating process in a single screw extruder: A first-track approach[J]. Polym. Eng. Sci., 2000, 40(5): 1 074.

收稿日期: 2002-04-09

Optimized design of melting zone for extruder screw

LIANG Ji-zhao

(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The design of the melting zone for extruder screw was optimized. A simplified mathematic model of the melting zone for extruder screw was established and solved by the complex method to minimize the specific energy consumption. The results showed that the calculated depth of base, top width and spiral angle of flight at the start and end of the melting zone for extruder screw were in or close to the ranges recommended in literatures.

Keywords: extruder; screw; optimized design

启事 第十二届全国轮胎技术研讨会论文集尚有部分剩余, 每本售价 100 元。如有需要者, 请与本刊编辑部张川联系。电话: (010)68156717。