

挤出机螺杆计量段的优化设计

梁基照

(华南理工大学 工业装备与控制工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 讨论了挤出机螺杆计量段的优化设计问题。应用粘性流体动力学基本方程, 分析了聚合物物料在螺槽中的流动。以单位产量能耗最小为优化目标, 建立简化的挤出机计量段螺杆优化设计的数学模型, 应用约束随机方向法求解。结果表明, 螺槽深度、螺纹棱顶宽度、螺纹棱顶与机筒间隙和螺纹升角均位于或接近于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)12-0743-05

计量段是普通单螺杆挤出机中重要的功能段之一。聚合物物料经熔融段塑化混炼后, 基本上呈粘流状态。进入计量段后, 物料将进一步被塑化和均匀化, 并定压、定量和定温地从机头挤出。因此, 若忽略熔料弹性行为的影响, 则物料于计量段的流动可近似地视为等温粘性流动。由于物料经计量段直接进入机头, 因此该段几何结构设计合理与否直接关系到制品的质量和和生产稳定性。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] 以及螺杆优化设计方法^[7]。前文^[8] 曾用解析法和实验结果分析方法讨论了计量段螺杆主要几何结构参数的优化。本工作中, 应用计算机技术对计量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

(1) 生产能力

图 1 为普通挤出机螺杆的结构简图。从图 1 可以看出, 计量段的螺槽等深且相对较浅, 这主要是因为聚合物物料经熔融段强化的剪切塑化作用后, 物料在螺槽中的运动为熔融剪切流动。换言之, 计量段的主要作用是进一步的剪切混合和定

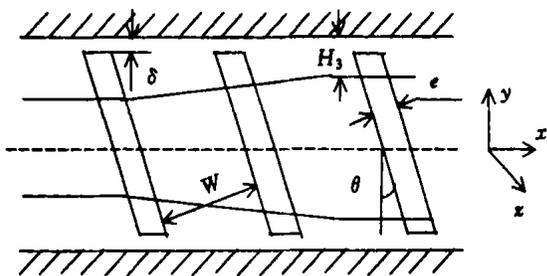


图 1 挤出机螺杆结构示意图

量挤出。因此, 若假定物料流体在螺杆与机筒间的流动为两平板之间的等温粘性流动, 则其生产能力(体积流率)可由下式确定:

$$Q = i \int_0^{H_3} \int_0^W V_z dy dx \quad (1)$$

式中 H_3 ——计量段螺槽的深度;

W ——螺槽宽度;

i ——螺纹头数;

V_z ——物料 z 向流速。

积分式(1), 得

$$Q = i \frac{V_{bz} WH_3}{2} F_d - i \frac{WH_3^3}{12 \eta} \frac{\partial P}{\partial z} F_p \quad (2)$$

式中, F_d 和 F_p 分别为拖曳流和压力流的形状系数, 均为螺槽深宽比 H_3/W 的函数。当螺槽较浅时, 两者的值趋于 1。若考虑螺棱与机筒间的间隙对流率的影响, 则式(2)可简化成

$$Q = \frac{\pi^2 D_b^2 H_3 n}{2} \sin \theta \cos \theta - \frac{\pi D_b H_3^3}{12} \sin^2 \theta \frac{\Delta P}{\eta L_3} - \frac{\pi^2 D_b^2 \delta^3 \tan \theta \Delta P}{12 e \eta L_3} \quad (3)$$

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。

式中 θ ——螺纹升角;
 D_b ——机筒内直径;
 L_3 ——计量段长度;
 δ ——螺棱与机筒内壁之间的间隙;
 e ——螺棱棱顶宽度;
 ΔP ——压力降;
 n ——螺杆转速;
 η ——螺槽中物料的粘度;
 η_f ——螺棱与机筒间隙中物料的平均粘度。

(2) 能量消耗

在聚合物物料挤出过程中, 计量段的功率消耗主要为熔融剪切流动的粘性能量耗散、机械能与热能的转换以及流体压力的增大。如图 1 所示, 沿螺槽 z 方向取一微分单元体 WH_3dz , 则输入微元体的能量为

$$de_m = de_{sc} + de_{sb} \quad (4)$$

$$de_{sc} = \Delta e_{sc} + \Delta e_p = i\pi^2 \eta D_b^2 \frac{W}{H_3} (\cos^2 \theta_b + 4\sin^2 \theta_b - 3\cos^2 \theta_b \frac{Q_p}{Q_d}) dz \quad (5)$$

$$de_{sb} = i\eta_f (\pi^2 n^2 D_b^2 e / \delta) dz \quad (6)$$

式中 de_{sc} ——螺槽中粘性耗散所需输入的功;
 Δe_{sc} ——螺槽中拖曳流的功耗;
 Δe_p ——螺槽中横向流的功耗;
 de_{sb} ——螺棱与机筒间隙中粘性耗散所需输入的功;
 de_{sp} ——螺槽中流体压力升高所需输入的功;
 Q_p ——物料正流体积流率;
 Q_d ——物料倒流体积流率。

式(4)~(6)为基于二维流场分析而导出的计算计量段能量消耗的基本方程。若采用简化的一维流动分析, 则可导出计量段功耗的简化表达式, 为

$$N = \frac{\pi^2 D_b^2 n^2 \eta L_3}{H_3^3} + \frac{Q_d \Delta P}{\cos^2 \theta_b} + \frac{\pi^2 D_b^2 n^2 e \eta_f L_3}{\delta \tan \theta_b} \quad (7)$$

式(7)等号右边第 2 项为压力升高所消耗的能量, 通常约占总能耗的 10%。因此式(7)可以

进一步简化为

$$N = 1.1 \times \left(\frac{\pi^2 D_b^2 n^2 \eta L_3}{H_3^3} + \frac{\pi^2 D_b^2 n^2 e \eta_f L_3}{\delta \tan \theta_b} \right) \quad (8)$$

1.2 目标函数

根据高产、优质和低能耗的设计原则, 选择以单位产量的能耗最小为螺杆计量段几何结构参数设计的优化目标, 即

$$f(x) = N/Q \quad (9)$$

将式(3)和(8)代入式(9), 可得挤出机螺杆计量段几何结构参数优化设计的目标函数。

1.3 设计变量

根据前述的聚合物物料在螺杆计量段内熔融剪切流动机理及目标函数可知, 该段的几何参数中, 螺槽深度 H_3 、螺棱棱顶宽度 e 、螺棱与机筒内壁之间的间隙 δ 以及螺棱处螺纹升角 θ_b 对聚合物物料熔融剪切流动过程的影响很大。因此, 取 H_3 、 θ_b 、 e 和 δ 为设计变量, 得

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

1.4 约束条件

(1) 强度约束条件

由受力分析可知, 螺杆在工作时受弯、扭和压的作用, 相应的应力为弯应力、剪应力和压应力。根据螺杆所用材料(38CrMoAlA 氮化), 应用第三强度理论, 其强度约束条件为

$$g_1(x) = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + 4\tau}{[\sigma]^2} - 1 \leq 0 \quad (11)$$

$$\sigma_1 = \frac{1.2 \Delta P d_b^2}{d_s^2 (1 - c^2)} \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \frac{L^2 (d_b + d_s)^2 \gamma}{d_s^3 (1 - c^4)} \quad (13)$$

式中 $[\sigma]$ ——许用应力, 取 $[\sigma] = 277.9 \text{ MPa}$;

σ_1 ——由轴向力引起的压应力;

σ_2 ——由螺杆自重引起的弯应力;

d_b ——螺杆外径;

d_s ——螺杆根径;

L ——螺杆有效螺纹长度;

c ——螺杆冷却孔径与 d_s 之比;

γ ——螺杆材料密度, 取 $7.85 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$;

ΔP ——机头最大压力降, 取 $\Delta P =$

$$\frac{6\pi \eta L_3 d_b n}{H_3^3 t \tan \theta}.$$

此外, 螺杆还应满足扭转强度条件:

$$g_2(x) = \frac{496\,000 N_{\max} \mu}{n_{\max} d_s^3 (1 - c^4) [\tau]} - 1 \leq 0 \quad (14)$$

式中 μ ——机械效率, 一般取 0.8;

$[\tau]$ ——许用剪切应力, 取 3 400 MPa;

n_{\max} ——螺杆最高转速, 取 $78 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$;

N_{\max} ——电机的最大额定功率, 取 $N_{\max} =$

$$0.7457 v_{\max} \left(\frac{d_b}{4.2}\right)^2, \text{ 其中 } v_{\max} \text{ 是}$$

螺杆最大圆周速度, $v_{\max} =$

$$\frac{\pi d_s n_{\max}}{60 \times 1\,000}.$$

(2) 压缩比约束条件

为了使物料得到足够的压缩, 以便排气和致密性好, 应满足如下的压缩比条件:

$$g_3(x) = 1 - \frac{L}{d_s \epsilon_1} \leq 0 \quad (15)$$

$$g_4(x) = \frac{L}{d_s \epsilon_2} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

式中, ϵ_1, ϵ_2 ——压缩比的上、下限, 分别取 5 和 3.

(3) 设计变量上下限几何约束条件

几何结构参数有一定的取值范围. 根据文献^[9, 10]建议的上述设计变量的上下限值, 可确定如下的边界约束条件:

$$g_5(x) = 1 - \frac{x_1}{2.2} \leq 0 \quad (17)$$

$$g_6(x) = \frac{x_1}{3.2} - 1 \leq 0 \quad (18)$$

$$g_7(x) = 1 - \frac{x_2}{20} \leq 0 \quad (19)$$

$$g_8(x) = \frac{x_2}{34} - 1 \leq 0 \quad (20)$$

$$g_9(x) = \frac{5.2}{x_3} - 1 \leq 0 \quad (21)$$

$$g_{10}(x) = \frac{x_3}{7.8} - 1 \leq 0 \quad (22)$$

$$g_{11}(x) = 1 - \frac{x_4}{0.17} \leq 0 \quad (23)$$

$$g_{12}(x) = \frac{x_4}{0.35} - 1 \leq 0 \quad (24)$$

1.5 数学模型

综上所述, 可得挤出机螺杆计量段优化设计的数学模型:

$$\begin{cases} \min f(x) = N/Q \\ X \subset R^4 \\ \text{s. t. } g_i(X) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \end{cases} \quad (25)$$

式(25)表明, 本优化设计属于四维($X \subset R^4$)受约束于(s. t.)12个约束条件的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, 选择约束随机方向法进行寻优. 这是一种简单的直接解法, 首先在可行域内选择一个初始点, 利用随机数的概率特性, 产生若干个随机方向, 并从中选择一个能使目标函数值下降最快的随机方向作为搜索方向. 迭代程序采用 True-BASIC 语言编写, 其优化设计流程如图 2 所示. 设计示例为 $\Phi 65 \text{ mm}$ 单螺杆挤出机. 螺杆材料用 38CrMoAlA 氮化钢, 取 $[\tau] = 3\,400 \text{ MPa}$. 挤出机技术参数为: $n_{\max} = 78 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $i = 1$, $L/d_b = 20$, $L_3 = 0.22L$, $\epsilon_1 = 5$, $\epsilon_2 = 3$. 拟加工物料为高密度聚乙烯(HDPE), 挤出操作温度为 $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

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: $H_3^* = 2.72 \text{ mm}$; $\theta_b^* = 30.22^\circ$; $e^* = 6.58 \text{ mm}$; $\delta = 0.35 \text{ mm}$. 圆整后得: $H_3^* = 3 \text{ mm}$; $\theta^* = 30^\circ$; $e^* = 7 \text{ mm}$; $\delta = 0.35 \text{ mm}$.

2.3 讨论

传统的挤出机螺杆的螺纹升角 θ 大多取 17.66° . 前文^[8]中对计量段熔融剪切流动过程进行了理论分析, 建议 θ 的最佳取值范围为 $20 \sim 34^\circ$. 本工作中, 取 $\theta^* = 30^\circ$, 位于最佳取值范围内. 螺槽深度直接关系到挤出机的生产能力和功耗. 对于非牛顿流体, 文献^[8]建议的最佳取值范围为 $2.2 \sim 3.2 \text{ mm}$, 本工作中, 取 $H_3^* = 3 \text{ mm}$, 位于最佳取值范围内. 螺杆螺纹棱顶宽度的增大可增强对物料的剪切作用, 有利于熔融塑化, 但同时

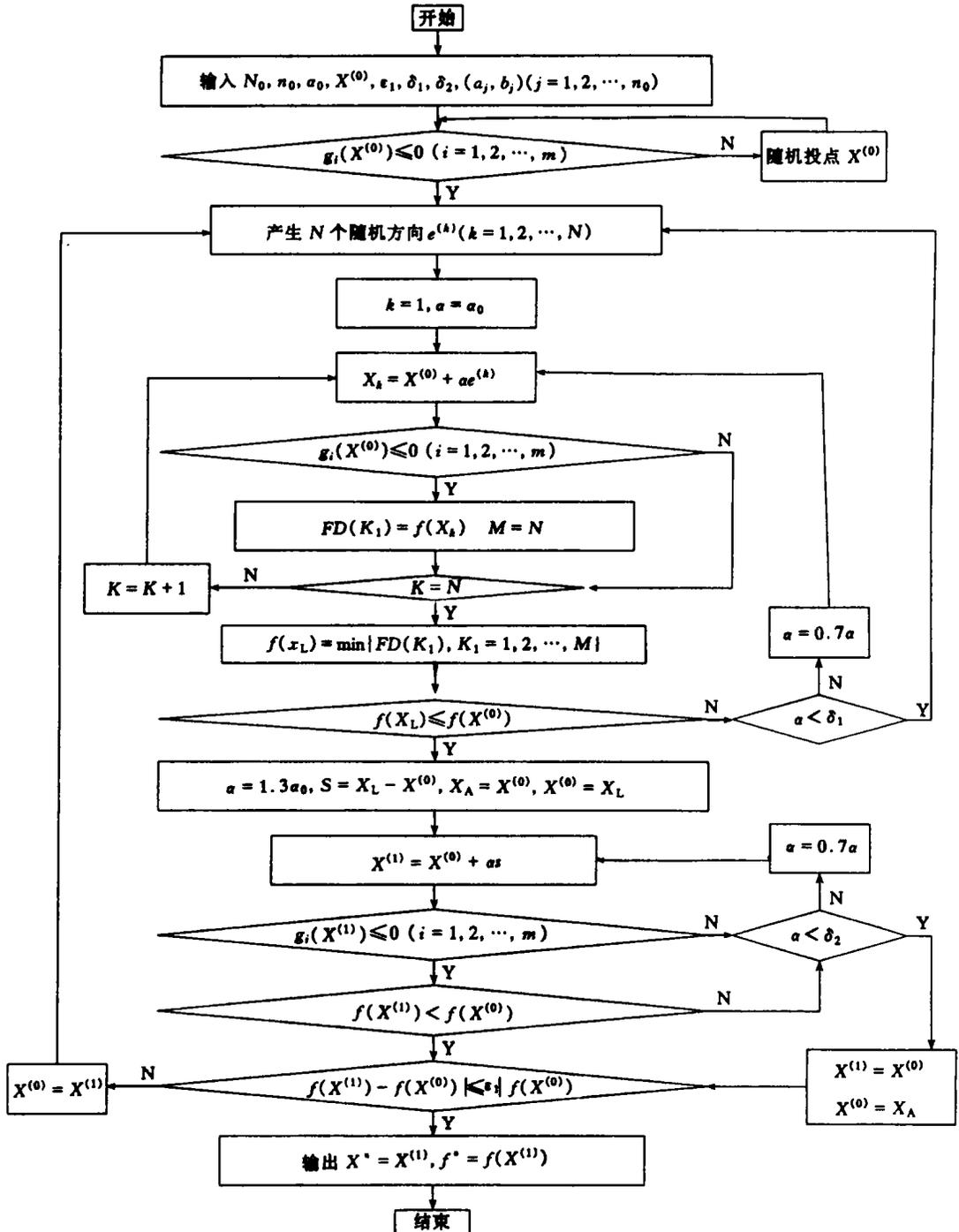


图2 挤出机计量段螺杆优化设计流程

又增大能量消耗。由前述的设计参数的取值范围知 $e = (0.08 \sim 0.12)D_s$, 本文中, $D_s = 60$ mm, $e = 4.8 \sim 7.2$ mm, 即 e^* 值接近上限值。

3 结语

螺槽深度、螺纹棱顶宽度、螺纹棱顶与机筒之

间的间隙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计量段螺杆优化设计的数学模型。应用约束随机方向法求解。结果表明, 螺杆计量段螺槽深度、螺纹棱顶宽度、螺纹棱顶与机筒之间

的间隙和螺纹升角的最佳值分别为 3 mm, 7 mm, 0.35 mm 和 30°, 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 级本科生罗峰参与了本课题的部分工作, 谨表谢意。

参考文献

- [1] Tadmor Z, Duvdevani I I, Klein J. Melting in plasticating extruders; Theory and experiments[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] Potent H, Hanhart W. Design and processing optimization of extruder screw [J]. Polym. Eng. Sci., 1994, 34(11): 934.
- [5] Rauwendaal C. Comparison of two melting models [J]. Adv. Polym. Tech., 1996, 15(2): 135.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 梁基照. 挤出机螺杆计量段几何参数的优化设计[J]. 轻工机械, 1995(2): 42.
- [9] 唐国俊, 李健铨. 橡胶机械设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984. 288-301.
- [10] 北京化工学院, 华南工学院. 塑料机械设计[M]. 北京: 轻工业出版社, 1986. 72-78.

收稿日期: 2002-06-06

Optimal design for metering section of extruder screw

LIANG Ji-zhao

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The optimal design for metering section of extruder screw was investigated. The flow of rubber compound in the screw channel was analyzed with the basic equation of the viscous fluid kinetics. A simplified mathematic model for the optimal design of the metering section on extruder screw was established and solved by the restrained random direction method to obtain the minimum specific energy consumption. The results showed that the depth of screw channel, the width of flight top, the clearance between flight top and barrel, and the helix angle of flight in the optimized design were in or close to the range recommended in the literatures.

Keywords: extruder; screw; optimal design

双星信息化工程建设见成效

中图分类号: F270.7 文献标识码: D

双星集团多年来积极推进信息化工程建设, 现已初步实现了生产、办公、人财物、产品开发和产供销等的一体化管理。最近, 集团被青岛市科学技术局认定为青岛市制造业信息化工程首批示范单位。

集团从原材料采购、生产计划编制、成本控制到生产进度实施均采用计算机进行统计和监控。集团实施了集团办公自动化, 利用互联网加快信息沟通, 实行集中式、现代化管理。集团宏观资金管理由资金收入付出控制系统和资金计划系统进

行控制, 与银行联网, 实行“内部银行管理”, 还可实现“内部贷款”。集团的国家级技术开发中心及各生产厂采用了计算机辅助制鞋系统和制鞋排料系统。集团为各生产单位配备了计算机, 并采用了行之有效的仓库管理软件以实现仓库的整合管理。集团经营信息中心通过计算机系统实现了对全国各地销售子公司信息的收集和对它进行及时的调控和指导。双星集团将在今后继续应用信息技术加快推进企业的现代化管理, 以实现定性管理向定量管理、静态管理向动态管理、事后管理向超前控制的彻底转变。

(青岛双星集团宣传处 王开良 供稿)