

密炼机转子的优化设计

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: 以单位体积胶料的能耗最小及强化胶料在密炼室内轴向循环流动为优化目标, 对本伯里型密炼机转子的主要几何结构参数进行了优化设计。转子的优化设计属于多维有约束的非线性规划问题。根据数学模型的特点, 选择复合形法进行寻优。结果表明, 与同类型机台相比, 优化效果明显, 几何参数的最佳取值合理。

关键词: 密炼机; 转子; 优化设计

中图分类号: T Q330.4⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-890X(2000)05-0278-05

密炼机是聚合物加工的主要设备之一, 在橡胶工业中尤显重要。转子是密炼机的关键工作部件, 其结构及形状设计合理与否直接影响机台的能耗、生产能力和胶料的质量(配合剂在橡胶中的分散和均匀程度)。因此, 加强对转子构型设计的开发研究, 以期设计制造出结构合理和先进的转子, 一直是聚合物加工行业努力的目标之一。但是由于转子几何结构复杂, 影响因素多, 且涉及聚合物材料复杂的粘弹特性, 导致其开发研究进展缓慢, 设计多采用基于实验观察的类比和放大方法。

随着聚合物加工理论和生产技术的发展, 新材料和新工艺对加工设备提出了更高的要求。转子造型的更新换代周期日益缩短, 要求加快设计过程, 缩短设计周期; 同时, 设计的完善和制造的精确与否对转子的使用性能、使用价值和制造成本都有决定性的影响, 并关系到制品生产厂家的经济效益。在这种形势下, 传统的转子设计方法已日渐不适应生产发展的需要。

机械优化设计是在 60 年代迅速发展起来的一种现代化设计方法。它建立在近代数学规划理论和计算机技术的基础上, 已成为解决复杂和大型机械设计问题的有效工具。在本工作

中, 应用机械优化设计的基本原理和方法, 对本伯里型密炼机转子的主要几何结构参数进行优化设计。

1 理论分析

1.1 混炼过程及机理

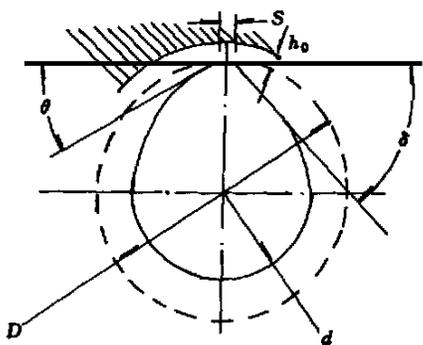
橡胶胶料的混炼过程大致上可分为 3 个阶段: ①胶块的伸展变形与填料或添加剂的混入; ②填料或添加剂与胶块组成的聚集体均匀分布; ③聚集体的破碎及其在橡胶中的分散。其中, 混入和分散效果的优劣主要取决于物料能否顺利进入转子凸棱前沿与密炼室壁构成的月牙形区并通过间隙, 使物料受到强烈的挤压、拉伸和剪切作用, 并产生较大的形变。而要达到均匀分布, 关键在于胶料能否在密炼室内形成有效的轴向循环运动。

在密炼过程中, 胶料在两转子和密炼室壁的作用下的流动主要由三部分组成: ①沿凸棱作轴向移动; ②进入两转子之间和凸棱与室壁之间构成的高剪切区(间隙区)形成剪切和拉伸流动; ③被凸棱驱赶沿室壁作圆周运动。显然, 要强化密炼机的分散和分布混炼效能, 应在保证第 2 种流动的前提下, 尽量削弱第 3 种流动而增强第 1 种流动。换言之, 应尽可能使间隙区以外的胶料参与轴向循环运动。

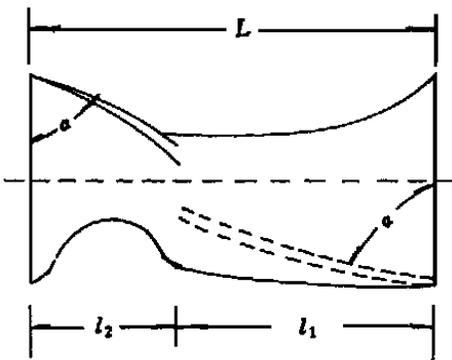
1.2 主要几何参数及其作用

转子设计的基本几何参数如图 1 所示。表 1 列出了每个参数对混炼过程的影响。

作者简介: 梁基照(1953-)男, 广东顺德人, 华南理工大学副教授, 博士, 主要从事高分子材料加工机械方面的研究和教学工作。



(a) 转子横断面示意图



(b) 转子结构示意图

图 1 密炼机转子几何结构示意图

表 1 转子设计的基本参数及其作用

几何参数	混炼过程中的作用及影响
棱顶宽度 S	影响分散、剪切作用和混炼温度
棱顶间隙 h_0	影响分散、剪切作用和混炼温度
楔入角 θ	影响堆积胶量和棱顶处的吃料效果
拖曳角 δ	调节分布混炼, 对胶料流动导向
转子根直径 d	影响混炼强度、填充因数和胶料流动
螺旋升角 α	影响分布混炼和胶料轴向环流
棱长(轴向) l	支配内部流动的分散混炼, 使胶料从炼室一端传送到另一端
重迭因数 λ	控制内部胶料流型(分布), 使胶料沿转子轴向移动
长径比 L/D	影响容量(递增)

1.3 转子优化设计准则

根据混炼工艺的要求, 密炼机转子构型优化设计的准则为:

- (1) 机器利用率。转子体积小, 装填因数要大, 装填范围要广。
- (2) 混炼作用。胶料层更换频繁, 无流动差的区域。

- (3) 操作。装料迅速, 卸料简便, 加料量大。
- (4) 混炼效果。分散度高, 塑炼充分、迅速, 混炼顺序适应性好。
- (5) 能量转换。输入功率高, 混炼温度低。

2 数学模型的建立

2.1 目标函数

本设计以单位体积胶料的能耗最小为转子构型优化的目标。能耗的大小通常用功率来表征。由于转子结构和胶料流变行为的复杂性, 迄今尚未有理想的密炼机功率消耗的计算公式。尽管 Funt^[1] 应用简化的密炼机模型分别导出牛顿流体和幂律流体的混炼过程功率计算式, 但是由于与实际混炼过程的偏差和应用上的不便而未能推广。在实际设计中, 大多采用基于实验而建立的经验或半经验公式来估算密炼机的混炼功率。其中较为熟知的有 Mohr^[2], Guber^[3] 和 Stupachenko^[4] 等提出的经验公式或数学模型。

若假定胶料是在粘度 η 不变和等温的条件下进行捏炼, 则转子单位长度上的功率消耗 N' 表示为^[2]:

$$N' = 4\eta u^2 S / h_0 \quad (1)$$

式中 u 为转子棱顶的回转线速度。

当 u 一定时, N' 与 S 成正比而与 h_0 成反比。

Guber^[3] 考虑转子几何形状对功率消耗的影响, 提出一个关于幂律流体的功率计算公式:

$$N = 2k \left(\frac{\pi n}{60}\right)^{m+1} \{ [l_1(0.5^{m+1} + 0.865^{m+1}) + 2l_2 \cdot 0.75^{m+1}] F + \left(\frac{D_K}{h_0}\right)^{m+1} h_0 S_1 (l_1 + l_2) \} \quad (2)$$

式中 k, m —— 幂律常数;

l_1 —— 长棱的长度;

l_2 —— 短棱的长度;

D_K —— 密炼室内直径;

S_1 —— 凸棱侧边宽度;

n —— 转子转速;

F —— 转子凸棱与室壁之间月牙形空间的有效截面面积, 可由下式确定。

$$F = \sum_{i=1}^m \left(\frac{D_K}{h_i} - 2 \right)^{m+1} f_i \quad (3)$$

式中 h_m ——最大间距;

h_i ——月牙形区第 i 个单元的间距;

f_i ——月牙形区第 i 个单元的截面面积。

Mohr^[2] 根据材料的流变性能, 提出了密炼机功率计算公式:

$$N = k\gamma^{m+1} V' \quad (4)$$

式中 γ ——剪切速率;

V' ——胶料的有效体积。

比较上述各式可以看出, 公式(2)中所含的几何参数最多, 相对比较全面, 但计算也复杂; 公式(4)则过于简单, 且不直接显示 N 与转子几何参数的关系, 常用于密炼机放大设计; 公式(1)介于两者之间, 应用较为方便。根据粘度的定义, 由公式(1)可推导出密炼机的功率计算公式:

$$N = 8\tau_w uSL \quad (5)$$

式中 τ_w 为混炼过程中转子棱顶与室壁间最大剪切应力。

因此, 若设 V 为密炼室的有效容积, β 为填充因数, 则按前述的优化目标, 可得出转子优化的目标函数:

$$f(x) = N / V_1' \quad (6)$$

式中 V_1' 为胶料有效填充体积, $V_1' = \beta V$ 。

2.2 设计变量

综合公式(1)~(6)可知, 当胶料和工艺条件(温度和转子转速等)一定时, $f(x)$ 主要是转子几何形状及结构的函数。根据有效容积的定义, V 等于密炼室容积减去转子的体积。对于由生产要求所确定规格的密炼机(密炼室容积一定), 转子体积主要取决于外直径 D 、工作长度 L 、棱高 H 、棱长 l 以及凸棱的楔入角 θ 等几何结构参数。若想提高胶料的混合和分散效果, 则可考虑棱顶宽度 S 、棱顶与室壁的间隙 h_0 、凸棱的螺旋角 α 、棱的重迭系数 λ 和两棱的交错率等参数。因此, 转子优化设计的变量可表示为

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, \dots]^T$$

$$= [D, L, H, S, h_0, \theta, l_i, \alpha_i, \dots]^T \quad (7)$$

对于二棱转子, $i=1, 2$ 。

2.3 约束条件

根据设计规范及实际应用情况, 上述设计变量应限制在一定的取值范围内, 即

$$A_j \leq X_j \leq B_j \quad (j=1, 2, \dots, p) \quad (8)$$

式中 A_j 和 B_j 分别为变量取值的下限和上限。

为提高密炼机的混炼效能, 强化胶料的轴向流动, 消除滞流点, 上述几何参数还应满足一些约束条件^[5]。因此, 转子优化设计的约束条件可简化为:

$$g_u(x) \geq 0 \quad (u=1, 2, \dots, q, q \geq p) \quad (9)$$

2.4 数学模型

综上所述, 可建立密炼机转子优化设计的数学模型:

$$\begin{cases} \min f(x) = N / (\beta V) \\ X \in \mathcal{D} \subset E^p \\ \mathcal{A} g_u(x) \geq 0 \quad (u=1, 2, \dots, q, q \geq p) \\ A_j \leq X_j \leq B_j \quad (j=1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (10)$$

显然, 转子的优化设计属于多维(E^p)有约束的非线性规划问题。

3 优化设计过程及方法

3.1 优化方法

根据本设计数学模型的特点, 选择复合形法进行寻优。复合形法的基本原理是: 先在可行域 \mathcal{D} 内随机产生一个以 K 个初始点为顶点的多面体的复合形(一般取 $p+1 \leq K \leq 2p$), 对其各顶点函数值进行比较, 不断舍弃最差点(函数值最大者), 以既能使目标函数值有所改进又能满足约束条件的新点取代, 逐步逼近最优点, 即满足收敛准则。

3.2 优化设计过程

首先, 根据设计要求, 确定允许误差 ϵ_1 和 ϵ_2 , 输入初始参数, 例如 p, K, A_j 和 B_j 等。然后应用复合形法求解优化设计数学模型(10)。最后检验是否满足收敛条件: 若满足, 则输出结果, 否则重新产生起始点或改变反射因数, 形成新的顶点。重复上述步骤, 直至满足预定的收敛条件为止。

密炼机转子优化设计过程如图2所示。

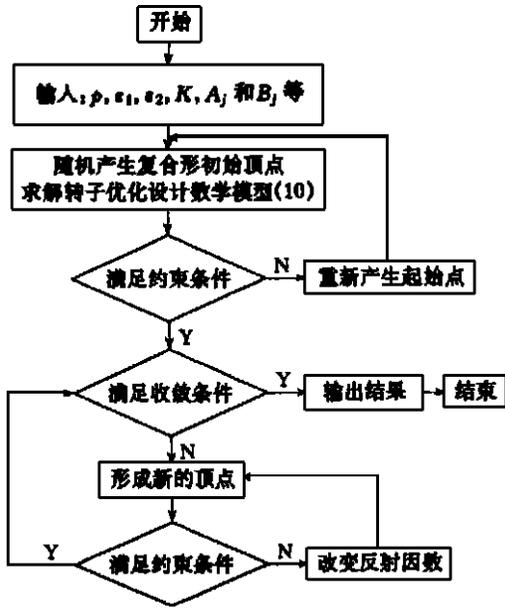


图2 密炼机转子优化设计流程图

4 设计示例

选择美国法勒公司制造的11D橡胶密炼机转子作为优化设计对象。在确保其强度和刚度足够的前提下,比较优化前后密炼室的有效容积,因此, D 和 L 采用原设计值。

4.1 已知条件

由文献[6]可知: $D=0.56$ m, $L=0.81$ m, $V=0.237$ m³, $h_0=0.008$ m, $\tau_w=0.2697$ MPa, $u=2.3$ m·s⁻¹。按公式(7)得到转子优化设计的变量为

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T \\ = [H, \theta, l_1, l_2, \alpha, \lambda, S]^T \quad (11)$$

4.2 输入数据

根据图2所示的转子优化设计流程图,应用BASIC语言编制计算程序,并在386型电子计算机上通过。

将上述已知数据及下列参数值输入: $p=7$, $K=10$, $\varepsilon_1=0.01$, $\varepsilon_2=0.01$, $R=1$ 和 $G=8$ 。其中 R 为反射因数, G 为约束条件数, p 和 K 分别为维数和顶点数。

4.3 输出结果

计算输出结果如下:

$$H^* = 0.1249618 \text{ m}, \quad \theta^* = 38.76735^\circ, \\ l_1^* = 0.6541606 \text{ m}, \quad l_2^* = 0.3824511 \text{ m}, \\ \alpha^* = 41.39747^\circ, \quad \lambda^* = 0.6079793, \\ S^* = 0.0182439 \text{ m}, \quad V^* = 0.240401 \text{ m}^3, \\ \text{当 } \beta=0.6 \text{ 时, } f_1^* = 508.40984 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}; \\ \text{当 } \beta=0.7 \text{ 时, } f_2^* = 435.77987 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}; \\ \text{当 } \beta=0.8 \text{ 时, } f_3^* = 381.30738 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}.$$

将上述参数的最优值圆整,可得

$$H^* = 0.125 \text{ m}, \quad \theta^* = 38.77^\circ, \quad l_1^* = 0.654 \text{ m}, \\ l_2^* = 0.382 \text{ m}, \quad \alpha^* = 41.40^\circ, \quad \lambda^* = 0.608, \\ S^* = 0.018 \text{ m}, \quad V^* = 0.2404 \text{ m}^3, \quad f_1^* = \\ 508.410 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}, \quad f_2^* = 435.780 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}, \\ f_3^* = 381.307 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}.$$

4.4 比较与分析

在本设计中,转子的外直径、工作长度和棱顶宽度给定,由公式(1)可知,当胶料、转速和间隙一定时,混炼功率为定值。在此情况下,要使单位体积胶料的能耗量最小,应尽可能增大密炼室的有效容积。换言之,应设计合理的转子结构形状,使之所占的空间最小。由文献[6]可知,原设计中 $V=0.237$ m³,而本设计中 $V^*=0.2404$ m³,密炼室有效容积增幅达1.44%,优化效果是明显的。

传统本伯里型密炼机长、短凸棱的螺旋角分别为30°和45°,而本设计着重强化胶料的轴向流动,均取 $\alpha^*=41.40^\circ$ 。这既能在投料初期有效驱动胶料沿凸棱运动(金属与固态胶料之间的摩擦角约为38°),也可在混炼后期使粘流态的胶料运动,因为本设计的凸棱长度较传统设计增加达12%以上。

适当地增大两棱的横向重叠区有利于密炼室内部胶料流型(分布)的控制,使胶料沿转子轴向流动。由优化结果可知,两棱重叠率达60.8%。浅井等^[5]对改变长、短棱长度与分散度的关系进行了研究。结果表明,短棱与长棱长度的比值(l_2/l_1)越小,所得的分散度越高。当 l_2/l_1 大于0.6后,分散效果相当差,如图3所示。在本设计中, l_2^*/l_1^* 为0.584,处于高分散度区域内。

转子凸棱的楔入角 θ 与凸棱前沿堆积胶

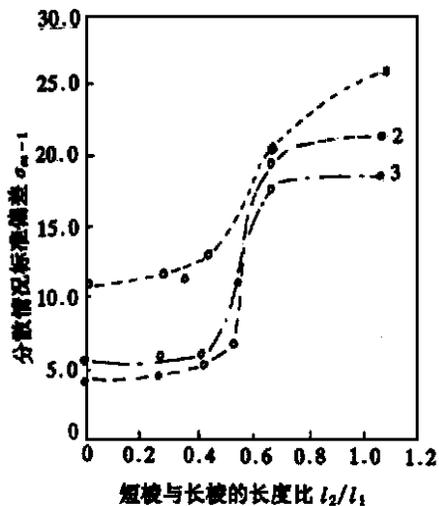


图3 短棱与长棱的长度比对分散度的影响

1—20 s; 2—10 s; 3—60 s

量及其吃料效果有关。对于粘流态的胶料,当 θ 接近胶料的自然收敛半角 α_0 时,能耗最小。由挤出试验结果可知,混炼胶的 $2\alpha_0$ 约为 75° ^[7]。本设计中, θ^* 为 38.77° ,与 α_0 的值较为接近。

5 结语

以单位体积胶料能耗最小及强化胶料在密

炼室内轴向流动为优化目标,对密炼机转子主要几何结构参数进行了优化设计。结果显示,对于同类型机台,优化效果是明显的,参数的优化值是合理的。

由于密炼机转子几何形状复杂,影响其混炼效能的因素众多,其优化设计属于多维有约束非线性规划问题,难度颇高。本工作在这方面的尝试可望提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] Funt J M. Mixing of Rubbers[M]. Shawbury, U. K.: RAPRA, 1977. 15.
- [2] Mohr W D. Processing of thermoplastics materials[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1959. 46.
- [3] Guber F B. Calcn. of power input for a closed rubber mixer [J]. Sov. Rub. Tech., 1966, 25(9): 30.
- [4] Stupachenko O G, Pukhov A P, Bebris K D. Construction of a mathematical model for the continuous preparation of rubber mixes [J]. Sov. Rub. Tech., 1971, 30(7): 17.
- [5] 梁基照. 密炼机转子设计制造新进展[J]. 机械开发 1989 (9): 4.
- [6] 唐国俊, 李健镇. 橡胶机械设计(上册)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984. 196.
- [7] Liang J Z, Huang Y Q, Tang G J, *et al.* A study of the flow behaviour of rubber compound melt through extrusion dies with different entry angles [J]. Plast. Rubber Comp. Appl., 1992, 18(5): 311.

收稿日期: 1999-11-29

Optimal design of internal mixer rotors

LIANG Ji-zhao

(South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract: The optimal design of the major geometrical parameters for Banbury mixer rotors was conducted taking the aim at minimizing the specific energy consumption of rubber compound and increasing the axial circulating flow of rubber compound in mixer chamber. The results showed that the optimized design was remarkably superior to the conventional design, and the acceptance of geometrical parameters was reasonable.

Keywords: internal mixer; rotor; optimal design