

密炼机转子构型与混炼性能的关系

李利¹, 王显林², 王振鲁¹, 孙书华¹

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 青岛华东工程机械有限公司, 山东 青岛 266109)

摘要:转子的几何形状和工作表面尺寸在很大程度上决定了密炼机的生产能力和混炼胶质量。通过对胶料在转子上的受力分析, 研究决定转子构型的转子横截面楔入角、转子凸棱的螺旋角和转子凸棱长度 3 种结构参数对混炼性能的影响, 从理论上获得转子结构设计中相关尺寸参数的合理区间。

关键词:转子构型; 混炼; 受力分析; 螺旋角; 楔入角

中图分类号: TQ330.4⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2013)11-0688-05

橡胶密炼机的混炼理论大多以转子为载体, 研究混炼过程的机理, 建立和完善分析混炼过程的模型, 并探索出新的有效的混炼方法, 以达到优化混炼的目的。研究混炼机理, 就必须对转子的构型、转子在混炼过程中对胶料的作用以及胶料本身的性能进行研究。对于橡胶混炼过程中的密炼机或密炼机的衍生设备——混炼成型一体机而言, 影响混炼性能的主要因素有以下 3 个方面: 原材料性能、作业变量和转子构型^[1-2]。其中原材料性能是固有的, 由配方决定; 作业变量主要指转子速度、压砣压力、混炼室的填充因数和配合剂添加顺序等^[3-5], 一般也会根据具体的实验要求人为设定。为使混炼过程达到最佳效果, 使转子在混炼过程中产生高效混合和剪切作用, 转子构型的改变成为影响混炼效果的一个重要的可变因素。本文以密炼室内转子上胶料受力分析为基础, 研究转子构型与胶料混炼性能之间的内在关系。

1 胶料在转子上的受力分析

无论何种类型转子, 其对胶料的剪切作用、拉伸作用、撕裂作用以及胶料在轴上往复推进和折

卷作用, 归根结底都是由胶料和转子相互间的力和反作用力产生。因此, 分析密炼机转子的混炼机理, 应首先对胶料进行受力分析^[6]。

为分析胶料的流动特性, 本工作以转子棱上的胶料为研究对象进行受力分析, 如图 1(a)所示。转子棱对于胶料的作用力为空间法向力 f_n , 可分解成 3 个方向具有不同作用的分力: 圆周力 f_t 、径向力 f_r 和轴向推进力 f_a 。其中 β 为转子棱棱顶部位的螺旋角, θ 为转子工作面的楔入角, 可见总作用力的 3 个分力大小与 β 和 θ 相关。在转子轴向投影图 1(b)上, f_n 可分解为胶料所受到的轴向力 f_a 和转子对胶料的端面法向力 f_n' 。则有

$$f_a = f_n \sin \beta = f_n' \tan \beta \quad (1)$$

在转子的截面图 1(c)上, 端面法向力 f_n' 又可分解为径向力 f_r 和圆周力 f_t , 圆周力由转子的驱动功率和转速决定, 可实时测量。则

$$f_n' = f_t / \sin \theta \quad (2)$$

$$f_r = f_t / \tan \theta \quad (3)$$

由转子截面受力图可知, 在 $\triangle oo'o''$ 中, 已知 3 条边的边长, 可推导出

$$\theta = \arccos \left[\frac{(r_1 - r_2)^2 - r^2 - r_1^2}{2rr_1} \right] \quad (4)$$

其中 r ——转子的最大回转半径, m;

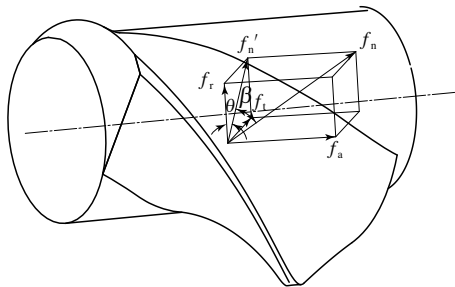
r_1 ——转子基圆与转子棱峰前面的过渡圆半径, m;

r_2 ——转子的基圆半径, m。

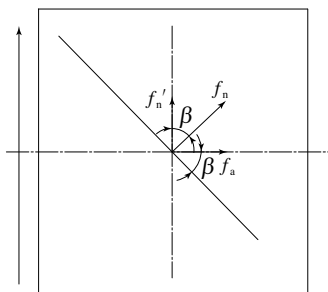
可见 θ 的大小直接决定于转子的截面形状。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175274); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20123719120004); 山东省高等学校科技计划项目(J09LD10); 山东省博士基金资助项目(BS2011ZZ005); 青岛市科技计划基础研究项目[11-2-4-3-(11)-jch]

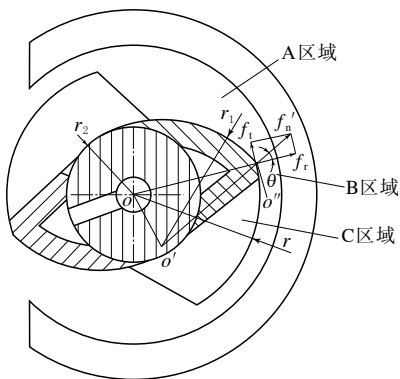
作者简介:李利(1972—), 女, 安徽寿县人, 青岛科技大学副教授, 博士, 主要从事高分子材料成型加工技术研究。



(a) 转子棱表面胶料受力分析



(b) 转子轴向投影面胶料受力分析



(c) 转子截面胶料受力分析

图 1 转子棱顶部胶料受力分析

转子对胶料的圆周力 f_t 的大小取决于密炼机在混炼过程中所消耗的功率 $N(\text{kW})$, 当功率一定时, 圆周力不变。即

$$f_t = \frac{M_n}{\bar{r}} = 4\,750 \frac{Nk\eta}{\bar{r}n_z} \quad (5)$$

式中 M_n ——单转子扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

k ——传动系数;

η ——传动效率;

$\bar{r}$ —— $\bar{r} = \frac{r_2 + r}{2}$, 转子平均半径, m ;

n_z ——转子转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

在密炼机实际工作中, 驱动功率是随着时间变化的, 因此 f_t 也是变化的。

若胶料沿着转子轴向移动, 则受到转子轴向移动方向的摩擦阻力为

$$f_i = f_n' \tan \varphi = \frac{f_t}{\sin \theta} \tan \varphi \quad (6)$$

其中, φ 为胶料与转子间的摩擦角。

若 f_t 已知, 则胶料在转子上所受的各力总结如下:

$$\begin{cases} f_a = f_n' \tan \beta = \frac{f_t \tan \beta}{\sin \theta} \\ f_r = \frac{f_t}{\tan \theta} \\ f_n = \frac{f_t}{\sin \theta \cos \beta} \\ f_n' = \frac{f_t}{\sin \theta} \\ f_i = \frac{f_t}{\sin \theta} \tan \varphi \end{cases} \quad (7)$$

在以上各力中, 每种分力对于胶料的混炼都会产生不同的作用。圆周力作用在转子的棱顶, 对胶料产生强烈剪切、拉伸和圆周推动作用, 其剪切机理为: 胶料在转子棱顶与密炼室壁间隙中的粘性流体的层流流动。 f_t 过小, 则剪切作用弱, 层流流动不明显, 分散混炼性能会受影响; f_t 过大, 则橡胶、塑料等大分子链断裂显著, 会降低胶料的各项物理性能。轴向力主要对胶料产生轴向推动、折卷和拉伸作用, 使胶料在转子上能够充分地往复流动、搅拌混合, 主要对胶料进行分布混炼。由式(7)可见, 当轴向力小到不足以克服转子与胶料之间的摩擦力时, 则胶料轴向运动很难进行, 而轴向力过大则转子的剪切作用削弱。径向力作用在转子与密炼室壁的间隙之处, 主要对胶料产生径向的挤压作用, 从而使炭黑等补强剂或填料的附聚体或颗粒在经历剪切的同时产生破碎, 使胶料产生压力流、涡流或紊流流动。整个混炼过程是这 3 种力的共同作用下复杂的胶料复合流动过程, 包括剪切流动、周向拉伸流动、湍流、紊流、径向挤压、轴向折卷和轴向拉伸推进等, 胶料复合流动的状态越多、越均衡, 则混炼效果越好。

2 转子构型对胶料混炼性能的影响

通过转子上胶料的受力分析, 单纯从转子构

型来说,有3个影响胶料混炼性能的因素:转子横截面形状、螺旋角度和凸棱长度。

2.1 转子横截面形状

本工作分析的转子采用常用的剪切型S形截面结构,由图1可知,其非工作面轮廓为棱顶到基圆的一条切线,因此,转子的横截面形状参数主要包括转子的推进面圆弧半径 r_1 、转子基圆半径 r_2 和转子的最大回转半径 r ,这3个参数共同决定了转子的楔入角 θ ,因此转子横截面形状对混炼的影响最终归结为楔入角对混炼的影响,即楔入角对胶料的各种分力大小的影响。转子设计时可把楔入角作为设计参数。

从式(4)可以看出,在转子最大回转半径和基圆直径确定的情况下, θ 主要取决于转子基圆与转子棱峰(前工作面)的过渡圆半径。 r_1 减小时,可以适当减小 θ ,在转子圆周力一定的条件下,可以增大转子对胶料的法向力和径向力,使剪切区压力增大,有利于炭黑等附聚体颗粒的破碎。 θ 应存在最佳值,从式(2)和(3)及图2可以看出,当 θ 增大到 40° 后,径向力明显变小,转子对胶料的挤压破碎作用降低,分散效果下降;当 θ 小于 15° 时,法向力迅速上升,圆周力相对减小,转子对胶料的压力和密炼室壁对胶料的反压力接近相等,胶料呈环流流动,不利于转子对胶料的剪切作用。在 β 为 35° 时,各力与圆周力的比值随 θ 变化的曲线如图2所示。

根据实验研究和计算, θ 在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 时较为理想,径向力为圆周力的2~3倍,同时轴向力也处于比较合适的范围,此时,胶料中的剪切应力、挤压应力及拉伸作用能使炭黑在聚合物中实

现最佳分散。当 θ 太大时,径向力相对减小,圆周力相对变大,容易在间隙入口处形成非常大的循环料流,而经过剪切挤压区的料流却很少,出现胶料流动的滞流区,流动状态单一,不利于混炼; θ 太小时,径向力相对急剧增大,圆周力相对变小,在间隙入口处,经过剪切区的料流大大超过了循环的料流,进料线几乎不改变自己前进的方向,胶料在间隙入口处受到的剪切力很小,因此形成的剪切作用也很小。本工作采用的二棱功能转子的 θ 约为 18° 。在转子凸棱前部,会形成一个渐变的弯月镰刀状(新月牙形)区间,从而较大地增加了转子对胶料的作用和胶料与转子及密炼室壁之间的摩擦力,强化了剪切效果,有利于提高混炼效果。同时,由于凸棱前部圆弧的半径减小,曲率增大,也使得胶料易进入转子棱峰和密炼室壁之间逐渐变小的间隙中(高剪切区),在径向力的作用下,会产生胶料的反向流动。这种反向流动的实质是由压力流动、牵引流动以及韦森堡效应(包轴现象)引起的,可迭加为层流。胶料进入高剪切区的过程实际上是一个“拉伸→挤压→剪切”的过程。转子凸棱前部曲率的改变使转子凸棱棱峰与密炼室壁之间的间隙成为渐变的新月牙形区间,实际上就使转子凸棱前部和室壁间的区域体积逐渐减小,粘流性胶料实际的运动轨迹为大口进小口出,根据流体动压产生原理,在一定的相对运动条件下,使胶料受到内部的强烈的挤压剪切作用。同时由于橡胶的泊松比与液体非常接近,可以把橡胶看作不可压缩的流体,在同样的转速作用下,相当于胶料产生了较高的形变速率,再加上橡胶的粘度很大,即使胶料在高剪切速率下粘度大大下降,但其值仍然可达 $10^2 \sim 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,转子凸棱前面的一部分胶料来不及流动,被拉伸展长,随后在挤压力的作用下,较容易地进入高剪切区,减少和避免了胶料回流现象。

从转子的横截面图上看,物料在转子上经过3个区域,经历3种不同的流动过程,实现分散混炼。A区域为月牙形区域,此区域在圆周力和径向力共同作用下产生强烈的剪切和挤压流动;B区域的棱顶和密炼室壁间的相对运动相当于两平行平板间的相对运动,因此胶料在此区域内的流动为层流流动,主要产生剪切作用;C区域为胶料

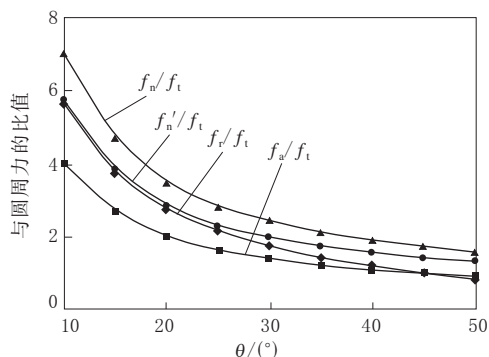


图2 各力与圆周力的比值随 θ 变化曲线

的松弛区,经历强烈的剪切和挤压作用后,胶料在此区域充分松弛和融合,恢复弹性形变,等待下一次剪切混炼。

2.2 转子的螺旋角

由受力分析可见,转子螺旋角 β 对圆周力和径向力的关系并无影响,主要决定轴向力的大小。当 θ 为 18° 时, f_r/f_t 为定值,约为 3.1,而轴向力和圆周力的比值随 β 的变化如图 3 所示。

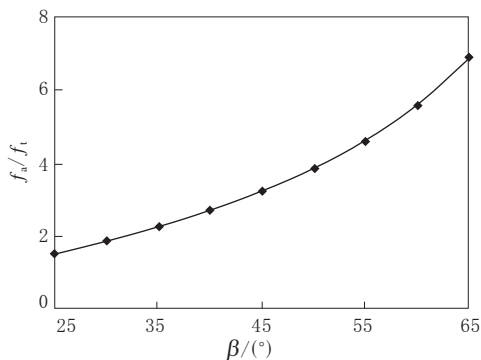


图 3 轴向力和圆周力的比值随 β 的变化曲线

由 3 图可见,随着 β 增大,轴向力也随之近似于线性增大,同时胶料所受摩擦力保持不变(通常为橡胶与金属面摩擦角 $\varphi = 38^\circ \sim 40^\circ$),胶料轴向流动的条件为

$$f_a - f_f = \frac{f_t}{\sin\theta}(\tan\beta - \tan\varphi) > 0 \quad (8)$$

在混炼初期,胶料主要呈现粘弹性固体性质,若凸棱的螺旋角小于摩擦角,则胶料没有轴向流动,只有环形流动、剪切流动和挤压流动,此时转子凸棱的分散混炼效果较好,而分布混炼效果较差;反之,当螺旋角大于摩擦角时,胶料所受到的轴向推动力就会大于摩擦力,同时圆周力和径向力相对减小,胶料就会沿转子轴向产生推进作用、拉伸作用和轴向折卷作用,从而有效发挥分布混炼的功能,而分散混炼效果较差。

事实上,胶料的混炼过程是一个复杂的、多相、多种运动的合成过程。在混炼初期,胶料主要呈现粘弹性固体性质,其在转子上的轴向运动符合固体输送理论。但在混炼过程的中后期,特别是在胶料的温度超过 100°C 以后,基本上呈现粘性流体的特征。橡胶等高分子材料属于假塑性非牛顿流体,其剪切应力与剪切速率的关系为

$$\tau = \eta_a \dot{\gamma} \quad (9)$$

其中, τ 为剪切应力, η_a 为表观粘度 $\eta_a = k\dot{\gamma}^{n-1}$, k 为胶料的稠度, n 为牛顿指数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

随着温度的上升, k 值减小;同时随着剪切速率增加,表观粘度也会下降,呈现剪切变稀的现象。伴随着粘度的降低,转子金属表面与胶料之间的摩擦角会不断变小,在实际混炼过程中,无论转子凸棱的螺旋角多大,都会对胶料产生轴向输送作用。但螺旋角大小还是直接反映了转子凸棱对胶料轴向推进的作用程度。对于螺旋角大的凸棱,以对胶料的轴向推进作用为主,剪切作用为辅;反之,则以剪切作用为主,轴向推进作用为辅。

与此同时,由于胶料表观粘度的下降,凸棱金属表面与胶料的吸附作用也会增强,金属表面的胶料会随着转子一起转动,两者间的相对运动性能会相对下降。由于胶料呈现粘性流体流动的性质,一部分胶料的轴向流动和折卷作用也会呈现层流流动的特征。因此,在转子的轴线方向上,既有拉伸流动,也有层流流动。

可见,混炼过程中胶料的流动是个非常复杂的过程,密炼机混炼性能和混炼胶最终质量的优劣是各种物料流动状态综合作用的结果。为保证胶料的混炼性能,可以使同一转子上的不同凸棱具有不同的螺旋角,从而使转子上的凸棱各自功能化,对于螺旋角大的凸棱,当 $40^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$ 时,对物料主要产生轴向推进作用,有效促进分布混炼作用;对于螺旋角小的凸棱, $30^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$ 时,对物料主要产生剪切和挤压作用,使分散混炼得以强化。

2.3 转子凸棱长度

增加转子凸棱的轴向长度能够有效增加转子旋转一周时所消耗的功率,也就是说,可以增加转子对混炼胶所做的功。因此在转子结构设计时,要尽可能使凸棱的有效长度增大。两棱异步转子设计时,一般选取长短棱总和 $(l_1 + l_2)$ 小于转子工作部分长度 l (即 $l_1 + l_2 < 1.15l$) 的 1.15 倍。为增强同步转子的剪切作用,又不致于使其消耗功率太大、混炼温度升高太快,一般认为,同步转子的长短棱与转子工作部分长度的最佳关系范围为 $1.2 \leq (l_1 + l_2)/l \leq 1.8$ 。

3 结语

胶料在密炼室内混炼过程中所经历的各种运

动,归根结底都与胶料在转子上的受力有关。产生不同运动形式的各个分力的大小及相互关系决定于转子的结构形状,其中包括转子的截面形状、转子的螺旋角和转子凸棱长度等。合理的结构参数的取值范围为: $15^{\circ} \leq \theta \leq 25^{\circ}$;当 $40^{\circ} \leq \beta \leq 55^{\circ}$ 时,能有效促进分布混炼作用,当 $30^{\circ} \leq \beta \leq 40^{\circ}$ 时,使胶料的分散混炼得以强化;同步转子的长短棱与转子工作部分长度的最佳关系范围为 $1.2 \leq (l_1 + l_2)/l \leq 1.8$ 。

参考文献:

[1] 付向东,林仕栋.提高密炼机炼胶能量吸收的方法[J].橡胶

工业,2011,58(11):691-693.

[2] 刘彩军,汪传生.采用新型变间隙转子混炼短纤维/橡胶复合材料[J].轮胎工业,2011,31(11):692-696.

[3] 汪传生,张德伟,刘彩军.转子棱顶与密炼室的宽间隙对短纤维混炼胶性能的影响[J].合成橡胶工业,2011,34(1):16-21.

[4] Huxi Li. A Two-zone Melting Model for Polymer Blends in a Batch Mixer[J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(5):763-770.

[5] 杨顺根.从密炼机液压压料装置的应用说起[J].中国橡胶,2003,19(18):10.

[6] 李利.共混聚合物混炼成型机理的研究[D].北京:北京化工大学机电工程学院.2008:42-50.

收稿日期:2013-05-27

Relationship between Rotor Configuration of Internal Mixer and Mixing Characteristics

LI Li¹, WANG Xian-lin², WANG Zhen-lu¹, SUN Shu-hua¹

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Qingdao Huadong Engineering Machinery Co., Ltd, Qingdao 266109, China)

Abstract: The production capacity and mix quality of internal mixer were determined by the geometrical shape and the working surface size of the rotor largely. Based on the force analysis of the rubber compounds which attached to the rotor's working surface, there were three structure factors about rotor effecting the mixing process, such as the wedge angle of the rotor's cross-section, the helix angle of the rotor's wing and the length of the wings. The reasonable value of each structure factor could be obtained from theoretical analysis.

Key words: rotor configuration; mixing; force analysis; helix angle; wedge angle

中国海油环保橡胶油品牌揭牌仪式暨客户座谈会在山东滨州举行

中图分类号:TQ330.38⁺4;F27 文献标志码:D

2013年7月11日,中国海洋石油总公司(简称中国海油)环保橡胶油品牌揭牌仪式暨客户座谈会在山东滨州举行,来自国内外的20余家知名轮胎企业、合成橡胶企业的知名专家以及滨州市政府、媒体的相关领导人士参加。通过本次会议,中国海油正式对外发布了环保橡胶油的品牌——海疆,并将海疆的logo正式推向市场,推向社会。

海疆牌环保橡胶油是中国海油利用海洋原特性自主研发生产的,其年产能达10万t。自2009

年投产以来,总销售量已达近6万t,占据国内环保橡胶油市场份额的15%左右。随着海疆品牌的发布,中国海油已拥有多种系列环保橡胶油产品的生产技术,2013年已进行了工艺改进,并配套了加氢装置,后续还将根据市场情况陆续投放不同系列的环保橡胶油产品。中国海油致力于打造世界一流的环保橡胶油生产商和供应商,还在江苏泰州投资102亿元,建设60万t·a⁻¹高压加氢润滑油装置,到“十二五”末,中国海油的环保橡胶油产能将超过20万t·a⁻¹。

(中海油气开发利用公司 王玉海
北京橡胶工业研究设计院 陈宏)