新型4:1转子与传统剪切型转子混合效率对比研究

刘金朋,杨海波*,李凡珠,张立群

(北京化工大学北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室,北京 100029)

摘要:利用POLYFLOW软件分别对传统2:1剪切型转子和新型4:1剪切转子密炼机的速度场进行有限元模拟。通 过将速度矢量对时间进行积分获得流场内大量材料质点的运动轨迹,对胶料的动态分布混合过程进行可视化分析。在 获得大量粒子轨迹的基础上,利用POLYSTAT模块进行流场的统计分析,采用分离尺度、拉伸长度、瞬时效率、时间平均 效率和混合指数对两种转子的混合效率进行评价分析。统计结果表明,新型4:1转子在保持传统转子强分散混合能力 的基础上,分布混合能力大幅度提高。

关键词:4:1剪切转子;有限元方法;粒子追踪;混合效率

中图分类号:TQ330.4⁺3 文献标志码:A 文章编号:1000-890X(2016)01-0041-06

混合是橡胶混炼过程中不可或缺的环节,混 合形式主要分为分布混合和分散混合。分散混合 即加入到密炼机中的大块物料不断破碎、逐渐细 化的过程;分布混合为混合物中各组分发生位置 重排而达到各组分均匀分布状态的过程。密炼机 转子分为啮合型和剪切型,对于剪切型转子密炼 机,分散混炼主要发生在转子棱顶端与混炼室壁 之间的高剪切区,而分布混炼主要靠轴向循环流 动和左右密炼室物料交换。剪切型转子的优势是 可以提供优异的分散混炼性能,但在温度和混炼 胶组分均匀性方面存在不足。要改进剪切型转子 结构设计,须在保持强分散混炼能力和高生产率 基础上,提高分布混炼能力。

大连橡胶塑料机械股份有限公司设计的新型 4:1转子^[1]将长短棱轴向长度比增加为4:1,且短 棱的螺旋角由40°减小到30°。这一设计改善了传 统转子密炼机中物料在中间堆积的现象,扩大了 轴向通道^[2],使胶料轴向运动距离增大,在轴向上 实现充分物料交换。

本工作采用有限元软件POLYFLOW对传统和 新型4:1转子密炼机流场进行了数值模拟,通过 模拟不同时刻的拟稳态速度场,并对时间进行积

*通信联系人

作者简介:刘金朋(1988一),男,山东潍坊人,北京化工大学在 读硕士研究生,主要从事密炼机胶料流动数值模拟的研究。

1 模型描述

1.1 计算模型

本研究采用专业建模软件Pro/E分别对两种 转子和混炼室进行三维实体造型,建模完成后导 入前处理器GAMBIT进行网格划分并对边界及区 域进行设置,两种转子的几何构型如图1所示。

由于密炼机混炼过程中转子始终处于旋转状态,导致不同时刻混炼流场具有不同的形状,因此若想计算材料点的运动迹线,分析胶料在整个混炼过程中的流动情况,需要在不同时刻对流场重新划分网格,工作量非常巨大且难以保证计算精度。为克服这一难题,本工作采取网格重叠技术^[3]避免网格的重新划分及提高网格质量,该技术的最大优点为计算域不必随转子的旋转而重新划分网格。其基本原理是,分别对转子和胶料流经区域进行网格划分,按一定的准则把它们组合在一起,采用一定的条件判断有限单元属于转子还是属于流体区域,从而真实模拟运动部件在流道内的运动情况。使用网格叠加技术对转子进行有限元网格划分如图2所示。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51173016)

分,得到大量粒子的运动轨迹,利用统计学分析模 块POLYSTAT对大量粒子的运动轨迹进行统计分 析,分别采用拉伸长度、瞬时混合效率、时间平均 混合效率和分离尺度等参数对两种转子密炼机的 混合性能进行定量分析与对比。



(a) 传统2:1转子



(b)新型4:1转子图1 传统转子和新型转子三维构型



图2 使用网格叠加技术进行的有限元网格划分

橡胶流体在低剪切速率下表现为牛顿流体的流变性质。而在高剪切速率下具有假塑性流体的流变性质。本研究采用被广泛使用的Bird-Carreau模型作为橡胶流体的本构方程:

 $\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + \lambda^2 \dot{\gamma})^{\frac{n-1}{2}}$ (1) 在100℃下, 测得丁苯橡胶混炼胶的物性参 数:密度(ρ) 1.1 Mg・m⁻³; 零剪切粘度(η₀)

0.217 262 4×10⁵ Pa • s; 无穷剪切粘度(η_∞)

0.819 708 7×10⁻⁵ Pa•s; 松弛时间(λ) 0.118 227 s;幂律指数(n) 0.085 980 57。

1.2 混合性能表征参数

为评价两种转子密炼机的分布混合性能,初 始时刻将两种互不相容的流体置于两个相邻但不 重叠的区域,令*c*(*X*,*t*)表示流体质点的浓度,*c*只能 为0或1,且沿质点的轨迹保持不变。然后利用质 点在任何时刻的坐标来计算分离尺度*S*(*t*)^[4-5]:

$$S(t) = \int_0^{\zeta} R(r, t) dr$$

$$\sum_{k=0}^{M} (c' - \bar{c}) (c'' - \bar{c})$$
(2)

$$R(r,t) = \frac{\sum_{j=1}^{r} (C_j - C) (C_j - C)}{Ms^2}$$
(3)

式中,R(r,t)为t时刻流场中相距为r的一对质点的 浓度相关系数,R(r=0) = 1说明所有质点浓度相 关系数相同, $R(r=\xi) = 0$ 时无相关性; c_j '和 c_j "分别 表示第j对质点所对应的两个浓度;c表示所有质 点的平均浓度; s^2 表示浓度的标准偏差。对于含有 N个材料质点的体系,质点对数M = N(N-1)/2。

分离尺度是浓度均匀化区域尺寸大小的一种 度量,随着混合程度的提高而减小,当两种粒子达 到随机分布时,分离尺度出现最小值。*S*(*t*)不仅受 流场大小的影响,还依赖于浓度的初始分布和追 踪粒子的数目。如果流场中存在死区,材料质点 无法到达该区域,则分离尺度不能减到最小值,然 而该参数是整个区域的平均值,无法确定局部流 动缺陷的确切位置、大小和数量。

对无限小材料线元定义运动函数 $x = \chi(X, t)$,初始位置 $X = \chi(X, 0)$,t时刻材料线元的dx = $F \cdot dX$,形变梯度张量 $F = \nabla \chi$,材料线元的拉伸 长度 $\lambda = |dx|/|dX|$ 。拉伸长度间接量化了流体变形 和界面生成的能力^[6-7],数值越大,说明流体变形越 大,两流体界面增加越多。拉伸长度是一个局部 值,流场不同区域的拉伸长度不同,因此可以发现 混合能力弱的区域,为以后的结构优化设计提供 依据。无限小材料线元的拉伸长度随时间的指数 增长是高效混合的必要条件。定义层流混合中局 部或瞬时混合效率 e_{λ} 为

$$e_{\lambda} = \frac{\dot{\lambda}/\lambda}{(\boldsymbol{D}:\boldsymbol{D})^{1/2}} = \frac{\boldsymbol{D}\ln\lambda/\boldsymbol{D}t}{(\boldsymbol{D}:\boldsymbol{D})^{1/2}}$$
(4)

式中,**D**为形变速率张量。混合效率可以看作是用 于拉伸流体单元所消耗的能量占总能耗的比率, 其数值范围为[-1,1],比率等于-1时,说明全部 能耗用于缩短材料线元;等于1时,说明全部能耗 均用于延长材料线元。瞬时混合效率是表征混合 的重要指标,表明在哪一区域、哪一时间点发生最 有效的混合。瞬时混合效率在时间上的平均值为

$$\langle e_{\lambda} \rangle = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} e_{\lambda} dt$$
 (5)

时间平均混合效率用于描述混合器在整个混

合时间内的净效率,标准差较小,说明大部分流体 经历了混合。

2 结果与讨论

2.1 分布可视化及分离尺度

为分析两种密炼机的分布混合能力,初始时 刻在整个混炼流场释放随机分布的10 000个材料 粒子进行轨迹追踪。此处所定义的材料粒子是没 有体积和质量的的流体质点,且相互之间没有作 用力。此外,须定义每一材料点的浓度为1(红)或 者为0(蓝)。首先考虑两种浓度粒子分别处于两 侧密炼室的情况,沿时间方向对每一个质点运动 轨迹进行追踪,粒子初始分布、转子旋转10和20圈 的质点分布状态如图3所示。对比两种构型密炼 机的质点分布情形可以发现,左右密炼室质点交 换均比较明显,混合分布状态相差不大。由图3还 可以看出,处于此处的材料质点所受到的作用力 较小,只是随着转子做旋转运动而没有在转子交 汇区发生掺混,因此转子根部区域浓度分布变化 较小。分布混合在将物料反复从一侧混炼室推送 到另一侧混炼室的连续不断分割及合并作用下得 到进一步加强。



图3 两侧密炼室间的分布混合

两种转子密炼机的分离尺度随时间变化曲线 如图4所示,分离尺度的大小反映了左右密炼室物 料交换能力的大小。当红色粒子进入到蓝色粒子 群中,红色粒子与最近的蓝色粒子间的平均距离



图4 两侧密炼室间分布混合的分离尺度随时间变化曲线

迅速减小。起始时刻分离尺度数值相等,传统转 子密炼机的分离尺度迅速减小并逐渐趋于平衡, 大部分分布混合发生于模拟的前期。而新型转子 密炼机的分离尺度下降比较平缓。虽然前者的分 离尺度前期小于后者,但18 s后后者的分离尺度始 终小于前者,说明混合一段时间后,新型4:1转子 密炼机的左右密炼室胶料得到更好的掺混,分布 混合效果加强。

为比较两种转子的轴向分布混合能力,将两 种不同浓度质点分别置于流场的前半部分和后半 部分。为描述两种流体的分布情况,给出了两种 流体在初始状态、旋转5,10和20圈时的分布状态, 如图5所示。对于传统转子密炼机,随着混合的进 行,仅观察到较小的轴向混合,即使转子旋转20 圈,两种材料质点掺混程度亦不高。对比发现,新



图5 轴向分布混合

型4:1转子的轴向分布混合能力明显优于传统转 子。对胶料的轴向分布而言,传统转子短棱较长, 物料有向中部聚集的趋势,物料之间的相互挤压 影响了物料的翻滚与前进,导致轴向分布效果并 不理想。新型4:1转子长棱较长,轴向运动主要 发生在长棱上,物料在长棱的作用下从转子的一 端流向另一端,轴向移动距离相对于传统转子有 所增大。

图6所示为两种转子密炼机的轴向分布分离 尺度随时间的变化曲线,数值越小,表示轴向分布 混合能力越强。可以看出,新型转子的分离尺度 大幅度降低,且在较短的时间内降低到一个较低 的稳态值,说明新型转子的轴向分布混合能力相 对于传统转子有很大提高。对剪切型转子密炼机



图6 轴向分布混合的分离尺度随时间变化曲线

而言,胶料的主要流动形式是环向剪切运动和轴 向运动,环向剪切作用主导分散混合,而物料的分 布混合和均化程度主要靠轴向往复切割作用。分 布混合在将物料从一个转子凸棱输送到另一个凸 棱的连续轴向往复切割作用中得到进一步加强, 如此循环,使胶料各层频繁更新,最后得到橡胶和 粉料均匀分布的体系。通过分析可知,新型4:1 转子极大地加强了密炼机的分布混合能力,初步 达到优化传统剪切型转子构型的目的。

2.2 混合效率

所有材料质点所经受的拉伸长度的自然对 数平均值随时间的变化曲线如图7所示。由图7可 知,几圈过后,拉伸长度的自然对数随时间延长基 本呈线性增加,也就是说,拉伸长度随时间延长呈



指数增长,拉伸长度的指数增长是发生有效层流 混合的必要条件^[8]。一开始两种转子所对应的 材料拉伸长度有所重叠,但转子转过3圈后,传统 2:1转子表现出较高的拉伸长度,即平均而言,微 小材料线元所受到的拉伸程度较高。

图8所示为瞬时混合效率随时间的变化曲线, 对两种构型转子而言,转子施加于流体的分割和 折叠作用使微小线元在混合区域重新取向和被拉 伸,这一重复过程使材料点受到的瞬时混合效率 的平均值总是大于零。对比而言,新型4:1转子 总是能够产生较高的瞬时混合效率,说明其具有 较好的混合能力。

图9所示为时间平均混合效率随时间的变化 曲线,两种转子密炼机的时间平均混合效率都大 于零,说明微小材料线元经历了较强的再取向。 当质点开始运动时,时间平均混合效率迅速上升, 紧接着迅速下降,然后曲线缓慢下降直到一个大 于零的平衡值,时间平均混合效率大于零是有效 混合的必要条件。相对而言,新型4:1转子的时



图9 时间平均混合效率随时间的变化曲线

间平均混合效率有所提高。

2.3 混合指数

采用混合指数 λ_{MZ} 表征两种转子密炼机的分散 混合性能。混合指数 λ_{MZ} 由I. Manas-Zloczower等^[9]提出,其表达式为

$$\lambda_{\rm MZ} = \frac{|D|}{|\Omega| + |D|} \tag{6}$$

式中,|D|为形变速率张量的模, $|\Omega|$ 为旋转速率张 量的模。对于纯固体旋转,没有形变发生,混合指 数 λ_{MZ} =0。对于简单剪切流动,形变速率张量和旋 转速率张量的模相等,混合指数 λ_{MZ} =0.5。对于拉 伸流动,没有旋转发生,其混合指数 λ_{MZ} =1。由于 混合指数可代表流体流动类型,因此可以间接表 征密炼机的分散混合程度。

图10所示为两种转子密炼机的平均混合指数 随时间的变化曲线。由图10可知,两者混合指数 数值相差不大,说明转子构型的改变对密炼机的 分散性能影响较小。新型4:1转子保持了传统剪 切型转子分散能力强的特点,同样能够对胶料实 施有效的剪切和拉伸,使炭黑等填料破碎分散并 阻止聚集。



图10 平均混合指数随时间的变化曲线

3 结论

本文利用POLYFLOW软件的网格叠加技术分 别对传统转子和新型4:1转子密炼机的速度流场 进行了数值模拟,通过将速度矢量对时间进行积 分获得流场内初始时刻任意分布的10 000个质点 的运动轨迹。将混合结果文件输入POLYSTAT进 行统计分析,采用分离尺度、拉伸长度、瞬时效率、 时间平均效率和混合指数对胶料在两种转子密炼 机中的分布混合和分散混合能力进行了定量描述 与比较,得出以下结论:

(1)新型4:1转子构型设计使得胶料轴向运动主要发生在长棱上,并且使胶料轴向运动距离加长,表现出比传统转子更优异的轴向分布能力。同时左右密炼室之间的物料交换能力也有所改善。

(2)新型4:1转子的瞬时混合效率和时间平均混合效率均较高,从而进一步说明了新型转子 在混合性能方面优于传统剪切型转子。

(3)综合表征分散混合与分布混合的各种参数,可知新型4:1转子在保持强分散混合能力的基础上大幅度提高了分布混合能力,达到了优化转子构型的目的。

参考文献:

- [1] 贺平,张燕,朱永军,等.新型4:1转子在270L、370L密炼机上的 同步应用[J].橡塑技术与装备,2007,33(9):5-12.
- [2] 田会娜,金民哲.四棱转子棱体设计及其结构特点评述[J]. 橡塑技 术与装备, 2004, 30(4):48-53.

- [3] Avalosse T. Numerical Simulation of Distributive Mixing in 3–D Flows[J]. Macromolecular Symposia, 1996, 112(1):91–98.
- [4] Robin K Connelly, Jozef L Kokini. Mixing Simulation of a Viscous Newtonian Liquid in a Twin Sigma Blade Mixer[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2006, 52 (10) :3383–3393.
- [5] Robin Kay Connelly, James Valenti–Jordan. Mixing Analysis of a Newtonian Fluid in a 3D Planetary Pin Mixer[J]. Chemical Engineering Research and Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Part A, 2008, 86 (12) : 1434–1440.
- [6] Muzzio F J, Alvarez M M, Cerbelli S, et al. The Intermaterial Area Density Generated by Time and Spatially-periodic 2D Chaotic Flows[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55 (8) :1497–1508.
- [7] Zalc J M, Szalai E S, Alvarez M M, et al. Using CFD to Understand Chaotic Mixing in Laminar Stirred Tanks[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2002, 48 (10) :2124–2134.
- [8] Shafaat A S, Rabeh H, et al. Comparative Study of Internal Batch Mixer Such as Cam, Banbury and Roller : Numerical Simulation and Experimental Verification[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66 (12) :2502–2511.
- [9] Manas-Zloczower I, Cheng H F. Analysis of Efficiency in Polymer Processing Equipment[J]. Macromolecular Symposia, 1996, 112(1): 77–84.

收稿日期:2015-07-16

Comparative Investigation on Mixing Efficiency of Traditional Rotor and New 4 : 1 Rotor

LIU Jinpeng, YANG Haibo, LI Fanzhu, ZHANG Liqun (Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The velocity fields of traditional 2 : 1 rotor and new 4 : 1 rotor of internal mixer were simulated using finite element POLYFLOW software. The resulted velocity profiles were used to calculate the paths of material points in order to analyze the distributive mixing and overall efficiency of the mixer over time. Visual inspection of the material points distribution, scale of segregation, mean length of stretch and mixing efficiency were used to evaluate the mixing effectiveness of these two rotors. Statistical results showed that, the new shearing-type 4 : 1 rotor was more effective and efficient than traditional 2 : 1 rotor in distributive mixing while keeping high efficiency of the dispersive mixing.

Key words: shearing-type 4 : 1 rotor; finite element analysis method; particle tracking; mixing efficiency

欢迎在《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》杂志上刊登广告