

双转子混炼机中固体粉末与聚合物共混的数值模拟

马 昆, 丁玉梅, 邵剑波, 刘苗苗, 杨卫民, 安 璞*

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要:利用聚合物加工分析软件 POLYFLOW 模拟双转子连续混炼机中固体粉末在聚合物中的混合过程, 并对不同转子转速下的三维等温非牛顿流场进行了流场和动态混合计算及统计学后处理。采用累积停留时间分布表征混合物的轴向混合性能, 用团聚体累积粒径分布表征固体粉末团聚体在聚合物基体中的分散状态, 并以分离尺度分布表征混合物的分布混合性能。结果表明: 在一定范围内提高转子转速有利于提高固体粉末与聚合物的分散、分布混合性能, 确定合理的转速范围对于获得高性能聚合物复合材料至关重要。

关键词: 固体粉末; 聚合物; 双转子连续混炼机; 混合性能; 数值模拟

中图分类号: TQ330.4⁺92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2015)09-0527-04

在聚合物材料加工过程中, 常常需要加入一些添加剂或改性剂, 以获得高性能聚合物复合材料。制备聚合物复合材料的过程本质上是固体粉末添加剂与聚合物基体共混的过程^[1]。在制备过程中, 要求以团聚体形态加入的固体粉末添加剂在聚合物基体中能够破碎分散并分布均匀, 这对混炼设备提出了较高的要求。

聚合物材料加工行业通常使用密炼机、单螺杆挤出机、双螺杆挤出机和双转子连续混炼机等作为主要加工设备。其中, 双转子连续混炼机是一种将密炼机和双螺杆挤出机相结合而设计的混炼设备, 不仅可以连续工作, 而且具有优异的分散、分布混合性能以及较高的掺混能力, 广泛应用于橡塑共混、聚合物填充改性、造粒等领域^[2-3]。利用双转子连续混炼机实现固体粉末与聚合物的良好混合, 需要了解设备的混合机理, 并可通过实验研究工艺条件对混合效果的影响, 但这种方法成本较高, 耗时长并且提供的信息量有限。数值模拟是一种非常有效的方法, 能够获取混炼机中任意位置的局部信息, 为认识双转子连续混炼机的混合机理和物料的混合过程提供了方便。

近年来, 针对双转子连续混炼机的模拟研究越来越多^[4-8], 然而大多数研究只是针对单一聚合

物的流场进行数值计算, 而针对固体粉末添加剂与聚合物共混的研究却很少^[9-10]。本工作借助聚合物加工专业分析软件 POLYFLOW, 模拟双转子连续混炼机中固体粉末和聚合物的共混过程。采用累积停留时间分布表征混合物的轴向混合性能, 用团聚体累积粒径分布表征固体粉末团聚体在聚合物基体中的分散状态, 直观反映团聚体在聚物流场中粒径的变化情况, 并用分离尺度分布表征混合物的分布混合性能。本研究采用多个指标综合评价工艺条件对固体粉末和聚合物混合性能的影响, 以期获得高性能聚合物复合材料提供一定的理论指导。

1 模型建立

1.1 几何模型和有限元模型

本研究根据实验室现有的 S 型双转子连续混炼机, 建立混炼机转子混炼段和流道的物理模型, 转子和机筒的断面形状如图 1 所示。其中, 转子顶径为 50 mm, 转子根径为 32 mm; 混炼段长度为 122.5 mm, 导程为 225 mm, 顶峰位置为 75 mm; 两转子中心距为 52 mm, 相位角为 0°; 机筒内径为 53 mm, 长度为 122.5 mm。在 Gambit 软件中进行网格划分, 得到转子混炼段和流道的有限元模型, 如图 2 所示。

1.2 数学模型

在进行三维流场计算时, 考虑到熔体输送的

作者简介: 马昆(1988—), 女, 河南安阳人, 硕士, 现在中国核工业中原建设有限公司工作。

* 通信联系人

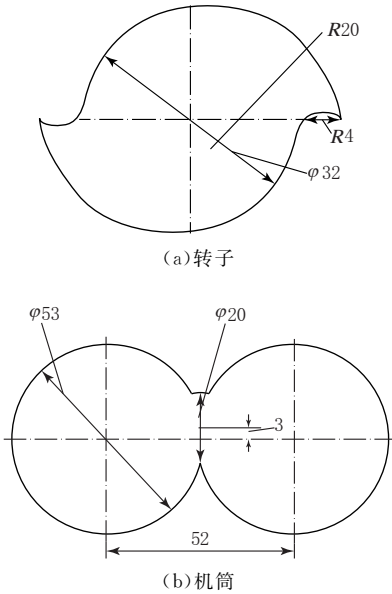


图1 转子和机筒的断面形状

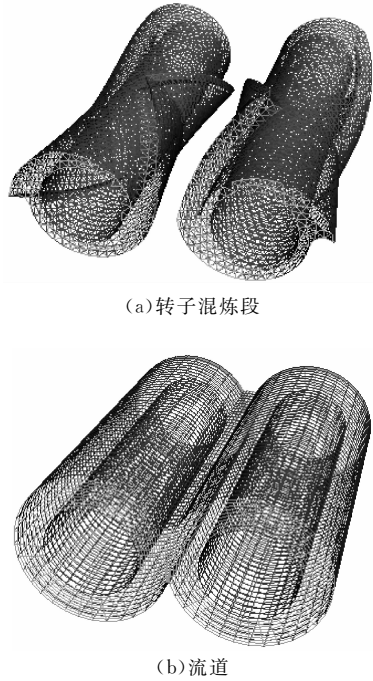


图2 转子混炼段和流道的有限元模型

具体条件和聚合物的特性,做出以下假设:①熔体为非牛顿流体;②流场为稳定等温流场;③流动为层流流动;④重力和惯性远小于粘滞力,可忽略不计;⑤流体为粘性不可压缩流体;⑦流道壁面无滑移。根据以上假设,流道内熔体流动的连续性方程、动量方程、本构方程可以简化为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta \dot{\boldsymbol{\gamma}} \boldsymbol{D} \tag{3}$$

式中, $\boldsymbol{u}$ 为速度向量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; p 为压力,Pa; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量,Pa; η 为表观粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ 为剪切速率, s^{-1} ; $\boldsymbol{D}$ 为变形速率张量, s^{-1} 。

本研究选用的聚合物材料为天然橡胶,模拟采用 Carreau 模型,其材料性能符合下式:

$$\eta \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + \lambda^2 \dot{\boldsymbol{\gamma}}^2)^{\frac{n-1}{2}} \tag{4}$$

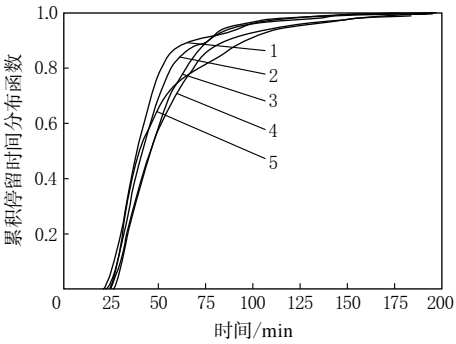
式中, η_{∞} 为无穷剪切粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η_0 为零剪切速率粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ 为松弛时间,s; n 为非牛顿指数。模拟计算时,物性参数为: $\eta_0 = 1 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta_{\infty} = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 10 \text{ s}$, $n = 0.23$ 。

2 计算结果及讨论

为比较工艺条件对固体粉末和聚合物混合性能的影响,计算时采用不同的转子转速,分别为 60,120,180,240 和 300 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,其他工艺参数相同,入口流量为 $6 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,出口压力为零。

2.1 累积停留时间分布

使用累积停留时间表征固体粉末与聚合物基体在混炼机中所经历的加工时间,可以反映固体粉末和聚合物的轴向混合性能。图3所示为不同转子转速下聚物流场中固体粉末团聚体的累积停留时间分布。



转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$):1—300;2—240;3—180;4—120;5—60。

图3 不同转子转速下聚物流场中固体粉末团聚体的累积停留时间分布

从图3可以看出,90%的混合物流出流场所用的时间由短到长所对应的转子转速依次为 300,240,180,120 和 60 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,即随着转子转速的提高,固体粉末与聚合物在混炼机中的停留时间变短,这说明固体粉末与聚合物混合物的轴

向混合性能变差。这是由于当入口流量相同时，转子转速越低，固体粉末与聚物流出混炼机的速度越慢，固体粉末与聚合物在混炼机中的停留时间越长，固体粉末团聚体有更多的时间和机会在聚物流场中经受剪切应力作用并反复进行折叠和位置交换，从而分布均匀。因此当转子转速较低时，固体粉末在聚合物基体中的轴向混合性能较好。

2.2 团聚体累积粒径分布

团聚体累积粒径分布能够直观反映固体粉末团聚体在聚物流场中的粒径变化,用以表征混合物的分散混合性能。本研究中,假设固体粉末团聚体初始粒径按标准正态分布在 $15\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 的区间内,求取不同转子转速下出口处聚物流场内固体粉末团聚体的累积粒径尺度分布函数,并进行比较,如图 4 所示。

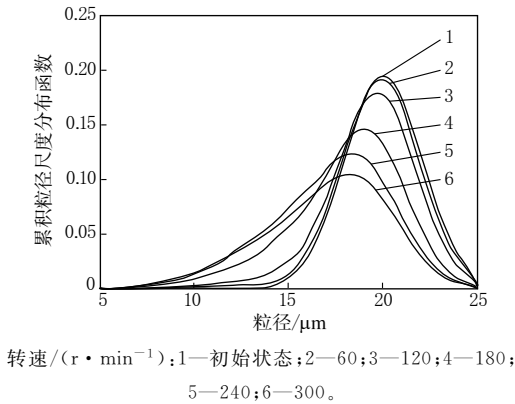


图 4 不同转子转速下聚物流场中固体粉末团聚体的累积粒径分布函数

从图 4 可以看出,当转子转速为 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,固体粉末团聚体的粒径分布相对于初始状态几乎没有变化,这是因为转子转速过低,聚物流场所提供的剪切应力不足以克服固体粉末团聚体的内聚力,团聚体不发生破裂破碎,因而其粒径无明显变化,只有少数固体粉末团聚体发生侵蚀破碎。当转子转速从 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 提高到 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,固体粉末团聚体的粒径减小最为明显,这是由于随着转子转速的提高,聚物流场提供的剪切应力不断增大,当固体粉末团聚体所经受的剪切应力大于其内部的团聚力时,团聚体发生破碎,分散为粒径更小的团聚体。当转子转速从 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 提高至 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,固体粉

末团聚体粒径减小的程度越来越不明显,这是由于较小粒径的团聚体需要更大的剪切应力才能发生破碎,随着转子转速的提高,团聚体在流场中的停留时间缩短,且流场所能提供的剪切应力由于受到物料特性和剪切生热的影响而无法进一步提高,使得团聚体的粒径无法进一步减小。因此不能单纯依靠提高转子转速无限提高固体粉末团聚体在聚合物基体中的分散性。

2.3 分离尺度分布

分离尺度用来表征混合物的分布混合性能。对于固体粉末,分离尺度指其团聚体在聚合物基体中分布的均匀程度。分离尺度越小,说明固体粉末在聚合物中分布越均匀。图 5 所示为不同转子转速下聚物流场中固体粉末团聚体的分离尺度分布。

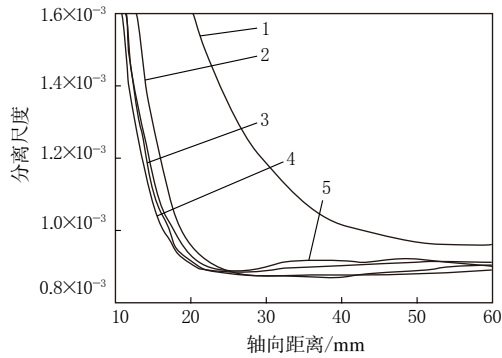


图 5 不同转子转速下聚物流场中固体粉末团聚体的分离尺度分布

从图 5 可以看出,混合物的分布混合效率由低到高所对应的转子转速依次为 $60, 120, 300, 180$ 和 $240\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;分离尺度从小到大所对应的转子转速依次为 $180, 120, 240, 300$ 和 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,说明转子转速为 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,固体粉末团聚体在聚合物基体中分布最均匀,固体粉末与聚合物的分布混合性能最好。这说明混合物的分布混合效率和分布混合性能并不是完全随转子转速的提高而提高。在一定范围内提高转子转速,有利于提高混合物的分布混合效率和分布混合性能。

3 结语

本研究对不同转子转速下固体粉末与聚合物

基体的共混过程进行了数值模拟,并对混合物的轴向混合性能、分散混合性能和分布混合性能分别进行了表征。结果表明:当转子转速从低速提高时,聚合物流场所提供的剪切应力增大,固体粉末团聚体粒径减小,分布混合效率提高,团聚体的分离尺度减小,分布更加均匀;但当转子转速进一步提高时,聚合物流场所提供的剪切应力不足以使团聚体进一步破碎,同时由于团聚体在流场中的停留时间缩短,抵消了剪切应力的增大,进而使团聚体粒径减小的程度变小,且分布混合效率下降,团聚体的分离尺度增大,分布均匀性变差。因此,在实际操作中,转子转速不能过高也不能过低,加工时找到合理的转速范围对于获得高性能聚合物复合材料具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 耿孝正,张沛.塑料混合及连续混合设备[M].北京:中国轻工业出版社,2008.
- [2] 刘同帅.动态交联热塑性弹性体连续混炼机理的研究[D].北

京:北京化工大学,2003.

- [3] 谢林生,马玉录,李培宁.一种表征连续混炼机分散混合能力的方法[J].塑料,2011,40(5):90-92.
- [4] 曹文凤,谢林生,缪国兵.双转子连续混炼机非等温混合过程的数值模拟研究[J].机械设计与制造,2008(1):1-3.
- [5] 景军涛,谢林生,马玉录.双转子连续混炼机混合过程的统计学分析[J].中国塑料,2009,23(2):93-97.
- [6] 张霞,谢林生,马玉录.双转子连续混炼机混炼段拉伸作用的研究[J].中国塑料,2010,24(3):108-113.
- [7] An Y, Yang W M, Ding Y M. Numerical Investigation of the Effect of Rotors' Geometric Structure on Mixing Properties of Continuous Mixer[J]. Key Engineering Materials, 2012, 501(1):70-75.
- [8] An Y, Ma K, Wang J Q, et al. Numerical Investigation of Mixing Properties of Continuous Mixer with New-type Rotors[J]. Key Engineering Materials, 2013, 561(7):313-318.
- [9] 安瑛.连续混炼机混合性能及制备碳纳米管/环氧树脂复合材料的研究[D].北京:北京化工大学,2011.
- [10] 马昆,丁玉梅,邵剑波,等.固体粉末与聚合物在不同混炼设备中的混合性能[J].塑料,2013,42(4):21-23.

收稿日期:2015-03-10

Numerical Simulation on Mixing of Solid Powder and Polymer in Double-rotor Continuous Mixer

MA Kun, DING Yu-mei, SHAO Jian-bo, LIU Miao-miao, YANG Wei-min, AN Ying

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The mixing process of solid powder and polymer matrix in a double-rotor continuous mixer was simulated by using polymer processing analysis software POLYFLOW. The 3D isothermal non-Newtonian flow fields and dynamic mixing under different rotor speeds were calculated and statistics post-processing was conducted. Axial mixing performance of the compound was evaluated by using cumulative residence time distribution. Dispersive mixing state of solid powder agglomerates in polymer matrix was evaluated by using accumulative size distribution function of solid powder agglomerates. Distribution mixing performance of the compound was evaluated by using segregation scale distribution. The results showed that, through increasing the rotor speed within a certain range, dispersion and distribution mixing performance of solid powder and polymer could be improved, and it was full of significance to determine a reasonable rotor speed range to obtain high performance polymer composites.

Key words: solid powder; polymer; double-rotor continuous mixer; mixing performance; numerical simulation