

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.01.018

转子相对旋转方向对双转子混合器混合性能的影响^{*}

郭少龙,杨静,毕超

(北京化工大学机电工程学院,北京 100029)

摘要:在双转子混合器内将聚丙烯/红色色母粒进行共混,并利用数字图像处理方法计算共混物中红色度分布的均匀性,用以表征混合器的混合性能。分析了不同转子相对旋转方向下混合器内示踪粒子运动轨迹和物料的速度场分布。从示踪粒子轨迹角度揭示了粒子在混炼腔内不同的运动形式;从速度场分布角度揭示了不同转子相对旋转方向下混合器的混炼机理。研究发现两转子同向旋转模式下,由速度场分布引起的持续沿混炼腔轮廓交换形“∞”运动更有利于促进混合器左右两腔中物料的相互交换,提高混合器的混合性能。

关键词:双转子混合器;混合性能;示踪粒子轨迹;速度场分布

中图分类号: TQ330.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)01-0081-04

Effect of Rotor Rotation Direction on Mixing Performance of Internal Batch Mixer

Guo Shaolong, Yang Jing, Bi Chao

(Mechanical and Electrical Engineering Department, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : The effect of the rotor rotation direction on the mixing performance of internal batch mixer was studied. PP/ red master batch system was mixed in experiments. The distribution uniformity of red color intensity in mixtures was used to evaluate the mixing performance of this mixer by a digital image processing method. In addition, the tracer particle trajectory and velocity distribution of the material were analyzed under the situations with different rotor rotation directions. In terms of the tracer particle trajectory, the moving behaviors of particles were revealed in the mixer. Furthermore, according to the velocity distribution, the mixing mechanism of this mixer was explained under different rotor rotation directions. The trajectory “∞” during which the tracer particle moves continuously along the outline of the mixing chamber has direct relationship with the velocity distribution in the co-rotating situation. This is the reason why it is helpful to enhance the exchange of material between left chamber and right chamber, and promotes the mixing performance of this kind of mixer.

Keywords : internal batch mixer ; mixing performance ; tracer particle trajectory ; velocity distribution

随着高分子材料的发展,研究人员对高分子材料共混装备提出了越来越多的要求。间歇式混合器是实验室中应用较多的混炼设备之一,越来越多的研究者开始致力于这类设备混炼性能的研究。2001年, Li Huxi等^[1]应用内部间歇式双转子混合器进行实验,发现聚丙烯(PP)/尼龙6的混炼效率与经历高剪切、高温区域次数和时间成正比。2004年, Bin Lin等^[2]通过在双转子混合器的前端安装石英玻璃的方法来观察物料的混合过程。2011年, S. A. Salahuddeen等^[3]借助异向旋转的非啮合型间歇式双转子混合器设备,比较分析了 Cam, Banbury 和 Roller 三种转子结构的混炼性能,发现 Roller 转子结构更有利于提高混炼性能。2013年, S. A. Salahuddeen等^[4]在先前研究的基础上,以拉伸作用、效率以及黏性耗散为参考标准对间歇式

混合器进行了研究,发现拉伸作用、黏性耗散与转速呈正比,而瞬时效率、时间平均效率与转速呈反比。此外,有些研究者应用数值模拟方法对混合器的混炼性能进行了分析研究。2000年, T. Jongen等^[5]采用数值模拟的方法对 Do-corder, Plastograph 和 Planetary 三种内部间歇式混合器进行了分析研究,发现在 Do-corder 混合器中多发生拉伸作用,而在另外两种混合器中多发生剪切作用。2007年, R. K. Connelly等^[6]基于二维 FEM 模型比较了双桨混合器和单桨混合器的混炼性能,指出双桨混合器更有利于改善混合性能。2011年, M. Robinson

^{*} 北京高等学校青年英才计划项目

联系人: 毕超, 博士, 副教授, 主要研究方向为聚合物加工混炼工艺与装备、材料加工工程

收稿日期: 2015-11-22

等^[7]应用数值模拟分析方法研究了改变 Cam 转子几何形状对双转子混合器混炼性能的影响,指出由于几何形状的改变产生了一系列不同的混合行为。

虽然有关间歇式混合器的研究相对较多,但是从转子相对旋转方向角度来分析该类混合器混炼性能的研究相对较少。为此,笔者在自制的双驱动非啮合双转子混合器实验平台上,对转子相对旋转方向的影响进行了研究。将 PP 与红色色母粒进行共混,利用数字图像处理方法计算共混物中红色度分布的均匀性,用以表征混合器的混合性能。利用有限元数值模拟方法分析了不同转子相对旋转方向下混合器内典型示踪粒子运动轨迹和物料的速度场分布。从示踪粒子轨迹角度揭示了粒子在混合腔内不同的运动形式;从速度场分布角度揭示了不同运行模式下混合器的混炼机理。

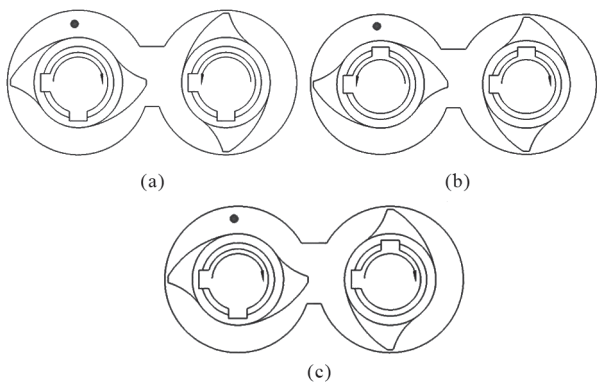
1 实验部分

1.1 设备与物料

实验设备为自制的双驱动非啮合双转子混合器,如图 1 所示。混合器的两个转子分别由两个独立的电机驱动。转子为双头 S 型结构,外径 46 mm,轴向长度 30 mm,混炼腔内孔直径 48 mm。实验中转速恒定为 20 r/min,不同运行模式对应的转子相对旋转方向如图 2 所示。



图 1 双转子混合器实物设备



a—异向向内旋转;b—异向外向旋转;c—同向旋转

图 2 转子相对旋转方向示意图

实验中采用的 PP 粉料牌号为 PPH-XD-045,大庆华科股份有限公司生产;红色色母粒为自制。

1.2 实验流程

首先将温度加热至 180℃,并保温 5 min 使整个混合器温度均匀,然后将 PP 加入混炼腔体内,使其填充度达到 95% 以上。待其完全熔融后,将红色色母粒放入指定位置,如图 2 小圆点位置所示。对驱动电机转向和转速进行设定后,启动混合器进行混合。混炼结束后,将共混物进行压片并扫描成图片。

1.3 混炼效果表征数据提取方法

将得到的共混物料图片导入 MATLAB 程序中,将图片的 RGB 色彩空间转换为 Lab 色彩空间,并提取红色度数值。基于式 (1) 计算图片中红色度的无量纲标准差 DSD,即红色度分布均匀性:

$$DSD = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - X_{ave}}{X_{ave}} \right)^2}{N} \quad (1)$$

式中: X_i ——共混物图片中第 i 个像素的红色度值;

X_{ave} ——整个共混物图片中红色度的平均值;

N ——整个共混物图片中像素总数。

DSD 数值越小表示红色度分布均匀性越好,即混合效果越好,否则混合效果较差。

2 数值模拟

利用 Polyflow 软件对物料在混合器内的流场特征进行分析。转子每旋转 2° 提取一次流场结果。在流场结果的基础上对速度场分布进行分析,并利用 Polystat 模块计算示踪粒子的运动轨迹。其中示踪粒子的初始位置与图 2 中小圆点所示位置一致。

2.1 基本假设条件

忽略了物料在转子轴向的运动,采用二维模型。流动与时间有关,但在每个时间点流动充分发展。速度场计算中忽略物体力及惯性项影响。物料在流动过程中与外界不发生热交换。物料的流动满足 Navier-Stokes 方程^[6]。

假定流体为黏性不可压缩流体,流变特性由 Bird-Carraeu 模型描述:

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

式中: η ——流体的黏度, Pa·s;

η_{∞} ——无穷剪切黏度, 100 Pa·s;

η_0 ——零剪切黏度, 5 000 Pa·s;

λ ——松弛时间, 0.5 s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, 1/s;

n ——幂律指数, 0.4。

2.2 几何模型、网格划分与边界条件

网格重叠技术较大程度地减小了计算模型的网格划分难度。流体区域采用四边形网格进行离散,与流体区域重叠的转子区域采用三角形网格进行离散。流体区域的网格计算中,还采用了适应性网格技术,沿着转子轮廓对流体区域局部网格进行细化,更精确地描绘了转子和流体之间的边界。

流场边界条件设定如图3所示(适应性网格处理前)。图中边界1为流体区域内边界,给定滑移边界条件,即法向速度 $v_n=0$,切向力 $f_s=0$;边界2为流体区域外边界,给定壁面无滑移条件,即法向速度和切线速度 $v_n=v_s=0$ 。

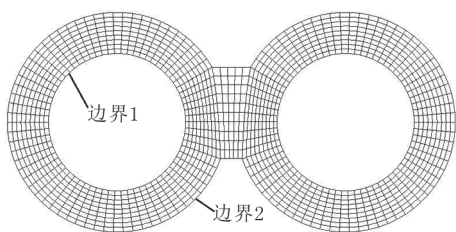
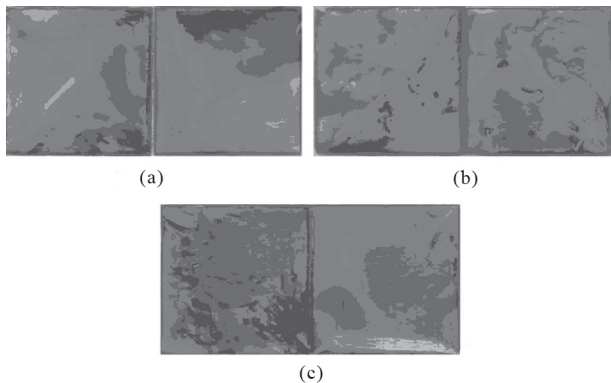


图3 流体区域网格划分及边界条件

3 结果与分析

3.1 实验结果

图4为不同转子相对旋转方向运行模式下混炼得到的共混物图片。软件中可以直接看出红色(黑白照片显示的是灰色)分散于整个共混物图片中,但红色深浅程度不同,可通过量化红色度分布均匀性来表征混合的效果。在两种异向旋转模式下,共混物图片中均出现了红色度分布不均匀的现象。相比较而言,同向旋转模式下共混物图片中红色度差别相对较小些。



a—为异向向内旋转;b—为异向向外旋转;c—为同向旋转

图4 不同转子相对旋转方向运行模式下的共混物料体系

图5示出不同转子相对旋转方向运行模式下DSD实验数据。比较图5数据可推论出混炼效果

为同向旋转模式>异向向内旋转模式>异向向外旋转模式,但两种异向旋转模式下获得的混合效果较为接近。

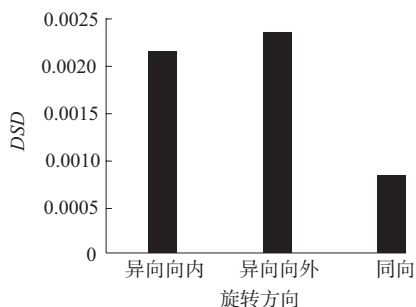
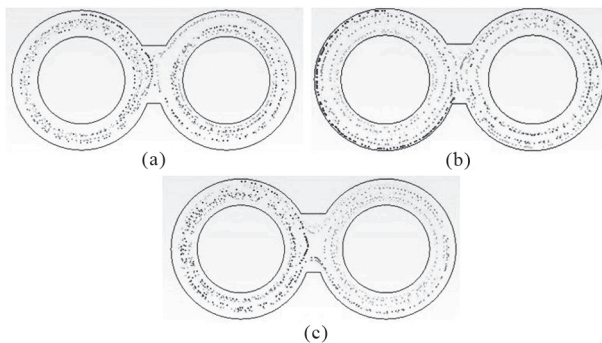


图5 不同转子相对旋转方向运行模式下DSD实验数据

3.2 典型示踪粒子运动轨迹

图6给出了流场内典型示踪粒子的运动轨迹。随着时间发展,粒子轨迹颜色发生变化。分析发现,示踪粒子轨迹主要有阿基米德渐开(收)形“⊙”、交叉交换形“∞”和沿混炼腔轮廓交换形“∞”。粒子的“⊙”运动有利于物料在独立混炼腔室内的均匀分散。粒子的“∞”和“∞”运动促进了物料在左右两腔内的交换,有利于物料在整个混炼腔内的均匀分散。同向旋转模式下,物料在左右两腔内的交换多由“∞”运动完成;异向旋转模式下,物料在左右两腔内的交换多由“∞”运动完成。

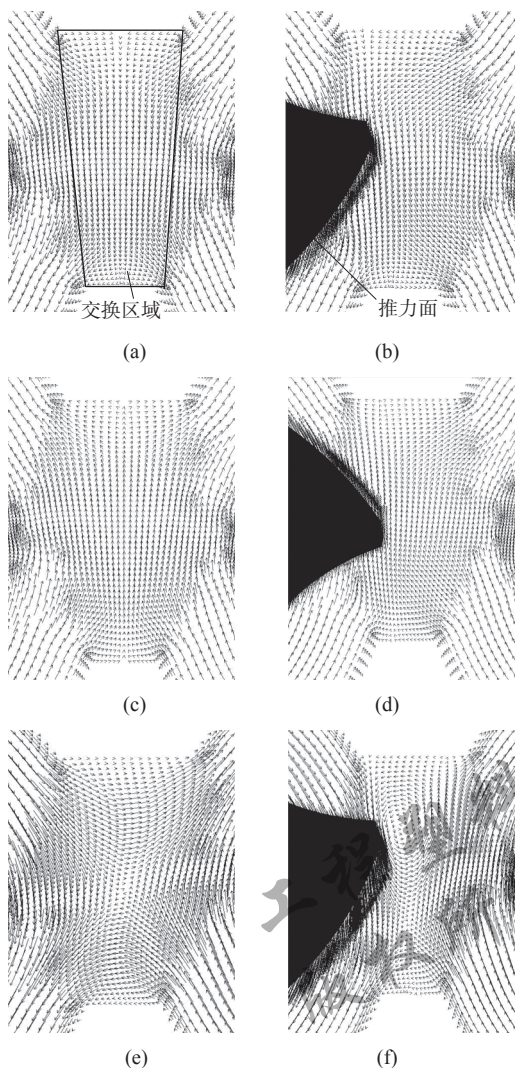


a—异向向内旋转;b—异向向外旋转;c—同向旋转

图6 不同转子相对旋转方向下粒子在流场内的运动轨迹

3.3 混炼机理对比分析

图7示出不同转子相对旋转方向运行模式下的速度场分布。对于异向旋转模式来说,由于流场的对称性和物料的黏性作用,物料在交换区的上下内壁面上均出现滞留现象(见图7a和7c)。由于交换区上内壁面长度大于下内壁面长度,所以上内壁面附近的滞留区面积大于下内壁面附近滞留区。转子螺棱经过交换区时,转子推力面的推动作用打破对应滞留区的主要动力。在异向向内旋转模式下,



a—异向向内旋转螺棱未经交换区;b—异向向内旋转螺棱经历交换区;
c—异向向外旋转螺棱未经交换区;d—异向向外旋转螺棱经历交换区;
e—同向旋转螺棱未经交换区;f—同向旋转螺棱经历交换区

图7 不同转子相对旋转方向运行模式下的速度场分布

转子螺棱将推动下内壁面附近滞留区内物料流动,而在异向向外旋转模式下,转子螺棱将推动上内壁面附近滞留区内物料流动。在转子转速相同的情况下,滞留区面积越小,转子对滞留区的打破效果越显著,越有利于促进物料在两腔内的交换。由此可以推论,异向向内旋转模式下该混合器的混炼效果较好。这与实验得到的结果是一致的。此外,由图7还可以看出,异向旋转模式下,当转子螺棱没有进入交换区时,交换区内速度场分布表现为左右对称的形式(图7a和7c),粒子轨迹主要以“ $\odot$ ”为主,而当转子螺棱进入交换区后,转子螺棱推动物料由一侧型腔向另一侧型腔运动(图7b和7d),从而粒子出现“ ∞ ”类型运动轨迹。而对于同向旋转模

式来说,无论是否有转子螺棱经过交换区,都可持续保持两腔内的物料交换(图7e和7f),形成“ ∞ ”类型运动轨迹。由此可以推断,在同向旋转模式下,物料在混合器左右两腔内交换流动的频率更高。与异向旋转模式相比,同向旋转模式更有利于增强左右两混炼腔内物料的交换,从而获得较好的混合效果。这在一定程度上解释了实验结果中同向旋转模式下混合器混合性能最好的原因。

4 结论

(1) 在异向旋转模式下,混合器内示踪粒子的轨迹为“ $\odot$ ”和“ ∞ ”两种类型;而在同向旋转模式下,混合器内示踪粒子的轨迹以“ ∞ ”类型为主。

(2) 由于可持续保持“ ∞ ”类型的流动形态,同向旋转模式的双转子混合器的混合性能要优于异向旋转模式的双转子混合器。

(3) 两种异向旋转模式下混合器混合性能的差异说明在设计混合器时混炼腔的几何形状与转子相对旋转方向之间存在一定的关系。

参考文献

- [1] Li Huxi, Hu Guohua. A two-zone melting model for polymer blends in a batch mixer[J]. Polymer Engineering & Science, 2001, 41(5):763-770.
- [2] Bin Lin, Sundararaj U. Visualization of poly(ether imide) and polycarbonate blending in an internal mixer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(2):1 165-1 175.
- [3] Salahudeen S A, Elleithy R H, AlOthman O, 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):2 502-2 511.
- [4] Salahudeen S A, AlOthman O, Elleithy R H, et al. Optimization of rotor speed based on stretching, efficiency, and viscous heating in nonintermeshing internal batch mixer: simulation and experimental verification[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 127(4):2 739-2 748.
- [5] Jongen T. Characterization of batch mixers using numerical flow simulations[J]. AIChE Journal, 2000, 46(11):2 140-2 150.
- [6] Connelly R K, Kokini J L. Examination of the mixing ability of single and twin screw mixers using 2D finite element method simulation with particle tracking[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3):956-969.
- [7] Robinson M, Cleary P W. The influence of cam geometry and operating conditions on chaotic mixing of viscous fluids in a twin cam mixer[J]. AIChE Journal, 2011, 57(3):581-598.