

异向/同向转子密炼机中物料流动和炭黑分布情况的数值模拟与试验研究

汪传生, 杨洪于*, 田晓龙, 朱琳, 刘营

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:对异向/同向转子密炼机中物料流动及炭黑分布情况进行数值模拟和试验研究。结果表明,转子的旋向对炭黑在胶料中的分布有显著的影响,与异向旋转相比,同向转子密炼机初期的分布能力较低,但最终分布效果略优。数值模拟可对胶料在密炼机中的流动分布情况进行可视化研究,为转子性能的模拟测试提供了新方法。

关键词:密炼机;异向/同向转子;炭黑分布;物料流动;数值模拟

中图分类号:TQ330.4⁺3;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2018)00-0000-05

作为橡胶材料的一种重要补强剂和填充剂,炭黑的分布情况对胶料性能有重要影响^[1-2]。本研究以离散元为基础,运用颗粒仿真软件EDEM,通过对同一对转子、相同密炼室构型、相同设定条件而不同转子旋向的设定,对异向/同向转子密炼机的炭黑分布情况进行模拟,通过对模拟结果进行后处理,比较了异向/同向旋转转子密炼机的分布混合性能。为了验证模拟的可靠性,采用实验室哈克密炼机进行试验。模拟采用的三维构型尺寸、形状与试验机台的尺寸、形状完全相同,保证模拟数据和试验验证结果的可靠性^[3-6]。

1 EDEM分析橡胶与炭黑混炼的理论基础

橡胶与炭黑混合物的物理模型是橡胶与固体配合剂的物理模型的代表,在将粉状或液态物料混入橡胶中形成粘结块的过程中,要使配合剂混入,首先必须使块状橡胶变形,以形成与填充剂接触的新界面,此界面从理论上分析有两种形成方式:一是橡胶在低速下拉伸时,可像液体一样流动,在被充分拉伸后,填充剂就会粘着在新生的界面上,然后橡胶收缩将粘着的填充剂包围起来,并形

成一个整体^[7];二是橡胶在高速下发生变形时,呈现固体性质,即发生脆性破坏而成粒状。这些新的胶粒表面上就布满了填充剂,它们在压力作用下结合成一整体,成为块状胶料^[8]。

第二种理论与粘弹性固体理论相似,认为橡胶在混炼时并不是处于流体状态,而是处于固体状态,表现出弹性体的行为,并建立了较为简单的模型。本研究正是基于第二种混入方式进行数值模拟。

2 模型建立及EDEM分析求解

2.1 物理模型的建立和导入

采用专业三维造型软件Pro/E对密炼机的转子和混合室进行三维建模,如图1所示。尺寸参数分别为:混合室内直径 65 mm,轴长 93 mm;转子基圆直径 30 mm,螺旋角 35°,外直径 62 mm,中心距 64 mm。

2.2 仿真条件和约束条件的设定

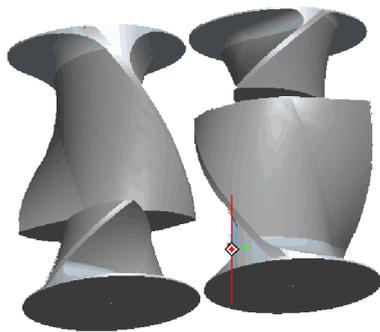
由于丁腈橡胶(NBR)的玻璃化温度较高,在混炼过程中可以视为小块固体,因此选用NBR的物理性能进行定义,胶料密度选为 $1 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。炭黑的聚集体模型选用Medalia的椭球模型。根据比图法,炭黑的形态主要分为球形、椭球形和纤维形,炭黑各类聚集体的分布频率如表1所示。

对颗粒和几何体的材料属性进行设置。考虑到炭黑N990中球形的比例占85.5%,因此本模拟

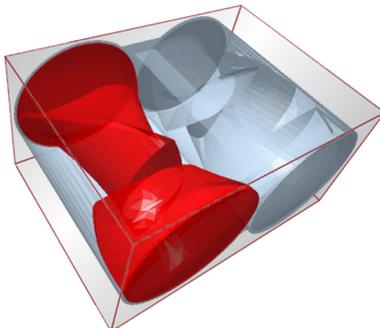
基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2016XJ003);短纤维增强复合胎面轮胎翻新关键技术及装备项目(2014CGZH0405)

作者简介:汪传生(1960—),男,安徽安庆人,青岛科技大学教授,博士,主要从事高分子材料加工机械的教学和科研工作。

*通信联系人(1479381930@qq.com)



(a) 转子几何造型



(b) 流场区域几何构型

图1 密炼机转子和三维仿真模型

表1 5种炭黑各类聚集体的分布频率

炭黑品种	球形	椭球形			纤维形			
		1	2	3	1	2	3	4
N347	1.4	1.6	14.2	11.3	5.5	33.4	12.8	19.8
N330	8.6	5.8	23.4	8.4	5.3	26.5	7.5	14.5
N327	15.4	7.5	40.7	11.1	8.2	14.5	0.7	1.9
N472	2.5	1.5	15.1	3.4	30.7	21.2	4.9	19.7
N990	85.5	10.3	3.8	0.2	0.2	0	0	0

炭黑颗粒形状定义为椭球形体。根据试验配方的质量和粒子直径的大小,最终确定橡胶颗粒为30 000个,炭黑颗粒为20 000个。转子和密炼室壁都采用铸钢材料。定义材料之间的相互作用,包括橡胶颗粒和炭黑颗粒与几何体材料铸钢以及两种颗粒各自相互作用的接触恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数。模拟材料的物理参数如表2所示。

表2 材料物理参数

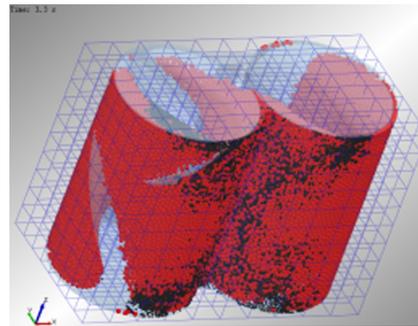
项 目	钢	橡胶	炭黑
泊松比	0.3	0.49	0.425
剪切模量/MPa	78	1	13
密度/(Mg·m ⁻³)	7.8	1.0	1.84

3 结果与讨论

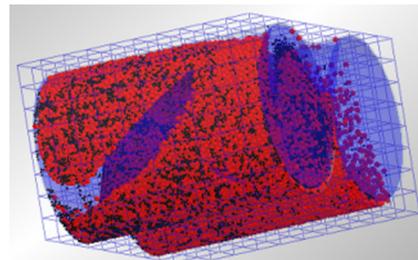
3.1 不同时刻炭黑在胶料中的分布情况

模拟过程中,橡胶颗粒设置为红色,炭黑颗粒设置为黑色。将不同状态下的炭黑分布图像进行对比分析,通过颜色可观察炭黑的大体分布情况。

(1) 胶料混炼初始阶段炭黑在橡胶中的分布情况对比如图2所示。



(a) 异向转子



(b) 同向转子

图2 密炼机混炼初始阶段炭黑分布情况

由图2可知,在异向转子密炼机中,密炼室中炭黑在左右两侧的分布较为均匀,且在转子轴向上分布也较为均匀。同样,在同向转子密炼机中,密炼室中炭黑在上下两侧分布较为均匀,在轴向上,同向转子密炼机的分布效果相对异向转子密炼机更好。

(2) 不同时刻炭黑在胶料中的分布情况对比如图3和4所示。

通过对比异向/同向转子密炼机各时刻炭黑分布情况可以发现,在5 s时刻,异向转子密炼机的分布情况远优于同向转子密炼机;在10 s时刻,异向转子密炼机的分布情况依旧优于同向转子密炼机,但两者炭黑分布情况的差距正在缩小,而随着混炼的进行,两者炭黑分布情况都在优化,且两者

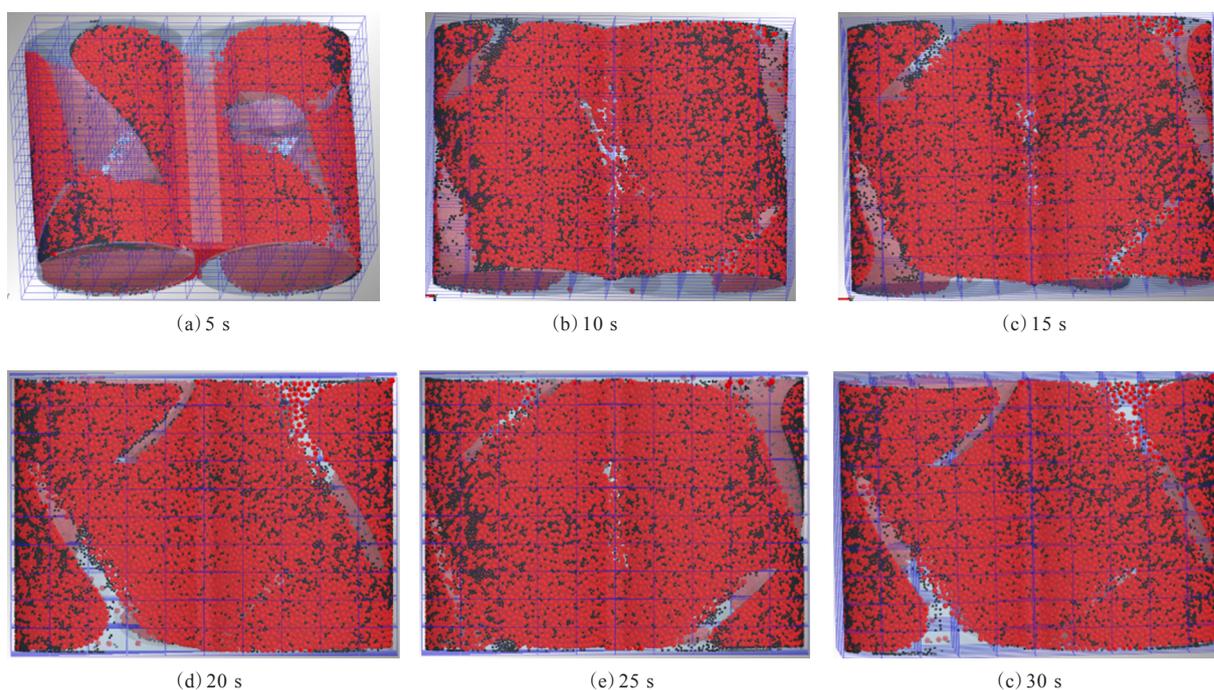


图3 异向转子密炼机混炼各时刻炭黑分布情况

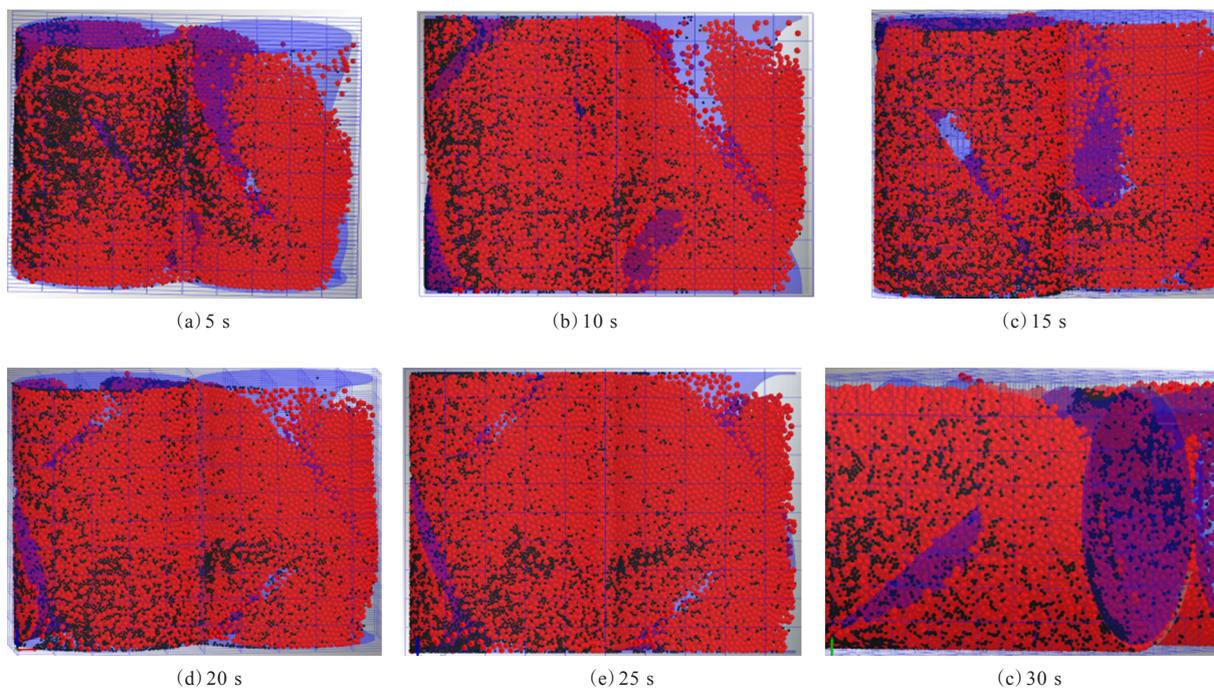


图4 同向转子密炼机混炼各时刻炭黑分布情况

的差异正在不断缩小。

3.2 炭黑在橡胶中分布情况的表征

运用EDEM后处理器中的Section功能,可以对炭黑在橡胶中的分布情况进行定量描述。首先对整个密炼机仿真部分进行区分,按空间分成块,

然后逐块进行研究。网格需要根据实际情况进行合理划分,一般来讲,一个网格中包含几十个颗粒才具有统计学的意义。本研究中,具有统计意义上的网格选为至少包含50个颗粒。将仿真区域进行网格划分后,再进行数据分析。

$$\beta_i = \frac{N_{1i}}{N_{1i} + N_{2i}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\sum N_i}{\sum (N_{1i} + N_{2i})} \quad (2)$$

$$A_i = \frac{\beta_i}{\beta} \quad (3)$$

式中, β_i 为第 i 个具有统计意义的网格中炭黑的混合度; N_{1i} 和 N_{2i} 分别为第 i 个具有统计意义的网格中炭黑和橡胶颗粒的个数; β 为炭黑的最佳混合度; A_i 为第 i 个具有统计意义的网格中炭黑混合度与最佳混合度的偏离率。

当 A_i 的值为 1 时, 说明炭黑的分布情况达到理想的最优值, 若 A_i 的值偏离 1 较大, 说明炭黑的分布较差。为了便于直观分析, 用 A_i 的标准差来表征炭黑在橡胶中的分布情况, 如图 5 所示。当标准差为零或较小时, 炭黑在橡胶中的分布较为均匀, 分布较好; 反之则相反。

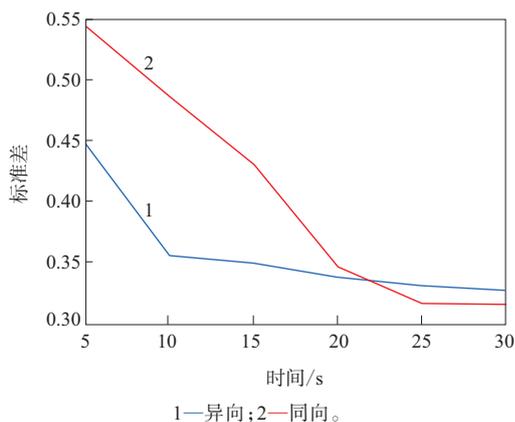


图5 不同时刻炭黑分布的统计情况

从图5可以发现, 异向/同向旋转转子的分布混合性能在初期差异明显, 异向转子的分布能力远优于同向转子, 但随着混炼过程的进行, 两者炭黑分布情况的差距逐渐缩小, 在最终 30 s 时, 同向转子密炼机的分布能力略优于异向转子密炼机。

4 试验验证

本实验室的哈克密炼机采用双电机驱动, 可以带动转子实现同向与异向旋转。为了克服目前同向转子密炼机吃料困难的劣势, 采用先异向吃料而后同向混炼的方式进行试验。同向和异向混炼分别混炼 3 车料, 采用炭黑分散度仪检测炭黑分散度。为了排除人为因素干扰, 每组测试 6 个试

样, 测试结果如表 3 所示。异向/同向混炼炭黑分散图像如图 6 所示。

表3 异向/同向炭黑分散度测试结果

项 目	炭黑用量/份		
	40	50	60
同向转子混炼			
1 [#]	7.6	7.5	8.1
2 [#]	7.1	7.9	7.6
3 [#]	7.8	7.6	7.5
4 [#]	8.0	7.2	7.8
5 [#]	7.4	7.0	7.4
6 [#]	8.7	7.6	7.6
平均值	7.766 7	7.466 7	7.666 7
异向转子混炼			
1 [#]	7.2	6.4	7.7
2 [#]	7.5	7.7	7.3
3 [#]	7.3	6.8	6.9
4 [#]	7.7	7.1	7.1
5 [#]	6.9	7.3	7.0
6 [#]	7.2	6.9	7.9
平均值	7.300 0	7.033 3	7.316 7

试验结果与 EDEM 模拟结果相似, 证明用 EDEM 软件模拟分析炭黑在橡胶中的分布情况在一定程度上是可行的。

5 结论

对异向/同向转子密炼机中物料流动及炭黑分布分别进行了对比性数值模拟和试验验证, 根据试验结果, 运用统计学方法, 对炭黑在橡胶中的分布进行了对比性研究, 得出如下结论。

(1) 转子的旋向对炭黑在胶料中的分布有显著的影响, 与异向旋转相比, 同向转子密炼机初期的分散能力较低, 但随着混炼的进行, 由于同向转子密炼机在两转子间隙处存在速度梯度, 具有较强的剪切拉伸作用, 其最终分布情况略优。

(2) 通过数值模拟的过程分析可以看出, 四棱同步转子的旋向对物料的流动形式有显著的影响, 虽然两者在最终的分布性能上差异不大, 但是两者对胶料的混炼作用却不同, 通过优化同向转子密炼机的构型, 可以进一步发挥同向转子密炼机优异的混炼性能。

数值模拟可对胶料在密炼机中的流动分布情况进行可视化研究, 为转子性能的模拟及测试提供了新方法。

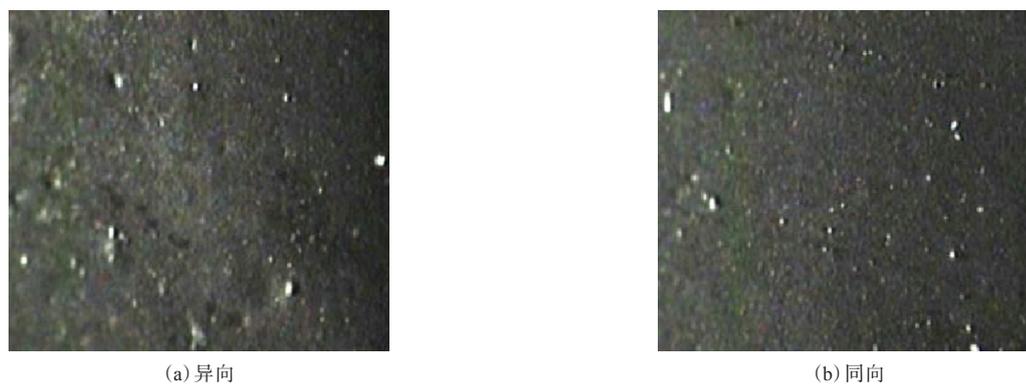


图6 异向/同向炭黑分散度图像

参考文献:

- [1] 汪传生, 李真, 阚璐璐, 等. 炭黑分散度对混炼胶物理机械性能的影响[J]. 橡塑技术与装备[J], 2010, 36(3): 1-5.
- [2] Donze F V, Richefeu V, Magnier S A. Advances in Discrete Element Method Applied to Soil, Rock and Concrete Mechanics[J], Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 44(8): 1-44.
- [3] Breuer O, Chen H, Lin B, et al. Simulation and Visualization of Flow in a New Miniature Mixer for Multiphase Polymer Systems[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 97(1): 136-142.
- [4] 刘金朋, 李凡珠, 杨海波, 等. 相向/同向转子密炼机混合效率的数值模拟[J]. 橡胶工业, 2015, 62(12): 741-747.
- [5] 宋建欣, 杨海波, 郝英哲, 等. 填充因数对密炼机混炼性能影响的数值模拟研究[J]. 橡胶工业, 2015, 62(5): 304-308.
- [6] 汪传生, 张萌. 基于Polyflow的密炼机六棱同步转子流场的三维动态模拟研究[J]. 橡胶工业, 2014, 61(4): 236-240.
- [7] 边慧光, 杨文超, 汪传生. 密炼机的三维流场模拟[J]. 橡胶工业, 2007, 54(12): 750-753.
- [8] 纪冰, 胡海明. 同速同向转子密炼机的研究[J]. 合成橡胶工业, 1997, 20(4): 207-209.

收稿日期: 2016-04-15

Numerical Simulation and Experimental Study on Compound Flow and Carbon Black Distribution in Counter-/Co-rotating Twin Rotor Mixer

WANG Chuansheng, YANG Hongyu, TIAN Xiaolong, ZHU Lin, LIU Ying

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The compound flow and carbon black distribution in counter-/co-rotating twin rotor mixer were numerically simulated and experimentally investigated. The results showed that, the rotating direction of the rotors had significantly effect on carbon black distribution in the compound. Compared with counter-rotation, the distribution capacity of co-rotating twin rotor mixer was lower in the early stage, but slightly better at the end. Numerical simulation could conducted a visual study on the flow and distribution of compound in mixer, which provided a new solution for analog test of rotor performance.

Key words: mixer; counter-/co-rotating twin rotor; carbon black distribution; compound flow; numerical flow