

不同转子构型的部分充满密炼机胶料流场数值模拟

宋建欣^{1,2}, 杨海波^{1,2*}, 郝英哲^{1,2}, 苏江^{1,2}, 张立群^{1,2}

(1. 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; 2. 北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029)

摘要:使用软件 Fluent 对 Banbury 和 Roller 转子部分充满状态下的密炼机胶料流场进行二维等温数值模拟。研究表明: Roller 密炼机流场更加频繁地经历最大剪切应力, 两转子间的交换更加剧烈, 胶料流动更复杂; Banbury 密炼机流场的平均混合指数略大于 Roller 密炼机, 但所需要的扭矩输入较大。

关键词: Banbury 密炼机; Roller 密炼机; 部分充满; 流场; 数值模拟

中图分类号: TQ330.6⁺3; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8171(2015)03-0171-06

混炼是橡胶加工过程中的一个重要环节。密炼机作为一种具有高混炼质量的混炼设备, 在橡胶工业中被广泛使用。转子是密炼机的核心部件, 转子构型直接影响密炼机的混炼质量。Banbury 转子和 Roller 转子是密炼机常用的两种转子, 由于两者转子棱数不同, 密炼室内的两相分布以及胶料与添加剂的混合情况也不同。对于密炼机转子的研究很多^[1-4], 但都是以密炼机全部充满为基础的, 而这显然与实际不符。本工作使用流体分析软件 Fluent 数值模拟部分充满状态下的密炼机流场, 并对两种转子的分散、分布混合能力进行评估。

1 模型建立

1.1 流体体积(VOF)方法

使用 VOF 方法^[5]来追踪自由界面的流动。VOF 模型是一种在固定欧拉网格下的表面追踪方法, 通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟 2 种或 3 种不能混合的流体。VOF 模型对每一相引入体积分数变量, 通过求解每一控制单元内体积分数确定相界面。 α_q 为第 q 相流体所占体积与该单元总体积之比。 $\alpha_q = 1$, 表示单元内全部为第 q 相流体; $\alpha_q =$

0, 表示单元内没有第 q 相流体; $0 < \alpha_q < 1$, 则称该单元为交界面单元。 α_q 满足方程

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial (u \alpha_q)}{\partial x} + \frac{\partial (v \alpha_q)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \quad (2)$$

式中, u 和 v 为速度场分量, t 为时间。

在 VOF 方法中, 物理性能参数(ϕ)由控制体积内各相流体的物理性能参数以及各相的体积分数(α)所决定, 亦即某控制体积内流体的物理性能参数由下式计算得到:

$$\phi = \phi_1 \alpha_1 + \phi_2 \alpha_2 \quad (3)$$

1.2 控制方程

假设胶料与空气的流动状态为层流, 忽略重力和惯性力, 流体不可压缩, 壁面无滑移。则描述多相流体运动的连续方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{v}_q \cdot \nabla \alpha_q = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] \quad (5)$$

式中 ∇ ——哈密顿算子;

$\mathbf{v}_q$ ——第 q 相速度矢量;

ρ ——体积分数平均密度;

p ——单元平均压力;

μ ——动力粘度。

橡胶为假塑性流体, 本研究采用 Cross 本构方程来阐述其流变性能。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51173016)

作者简介: 宋建欣(1987—), 男, 山东寿光人, 北京化工大学在读硕士研究生, 主要从事密炼机胶料流动的数值模拟研究。

* 通信联系人

$$\eta(\gamma) = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda\gamma)^{1-n}} \quad (6)$$

式中 η ——胶料粘度;
 γ ——剪切速率;
 η_0 ——胶料的零切粘度;
 λ ——特征时间;
 n ——幂律指数。

在 100 °C 下测量的混炼胶参数如下: η_0 为 21 730 Pa·s, λ 为 0.118 s, n 为 0.086。

1.3 有限元模型

考虑到流动自由界面研究的复杂性和计算规模,建立密炼机部分充满二维等温模型。假设胶料与空气的流动状态为层流,忽略重力和惯性力,流体不可压缩,壁面无滑移。空气为第 1 相,胶料为第 2 相,研究胶料在部分充满状态下的流动。采用转子旋转、密炼室内壁静止的真实边界条件,通过在两转子上施加速度边界条件,控制两转子以 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速顺时针旋转,如图 1 所示。Banbury 密炼机模型节点数为 18 670,单元数为 35 834;Roller 密炼机模型节点数为 26 241,单元数为 50 926。

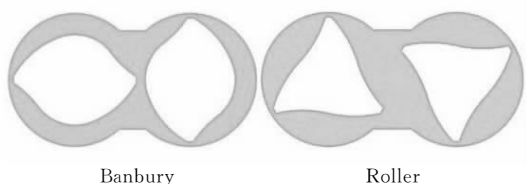


图 1 两种密炼机的有限元模型

2 混合指数

物料的分散是通过施加的剪切作用和拉伸作用实现的。通过对颗粒破碎过程的试验研究, J. J. Elmendorp^[6]发现拉伸流动对颗粒的破碎更加有效,尤其是对于高粘度比和低界面张力的聚合物共混。H. F. Cheng 等^[7]为了使拉伸流动和旋转流动量化引入混合指数(λ_{MZ})如下:

$$\lambda_{MZ} = \frac{|D|}{|D| + |\omega|} \quad (7)$$

式中, D 为形变速率张量, ω 为旋度张量。

λ_{MZ} 的变化范围为 0~1。对于纯旋转运动, $\lambda_{MZ}=0$; 对于简单剪切运动, $\lambda_{MZ}=0.5$; 对于纯拉伸流动, $\lambda_{MZ}=1$ 。

3 密炼机流场分析

3.1 密炼机的两相分布

使用 VOF 方法模拟的填充系数为 0.70 的两种密炼机内橡胶-空气两相分布分别如图 2 和 3 所示。

由图 2 和 3 可以看出,转子与密炼室壁的无滑移假设、胶料层与层之间的内摩擦使得胶料主要做顺时针运动。空气相由于受到胶料的挤压,也被迫一起运动。在运动过程中,胶料受到不断地剪切、拉伸和撕裂作用。初始阶段两种密炼机内自由界面变化都非常剧烈,流场稳定后,除两转子交汇区外,其余区域的自由界面变化较小。混

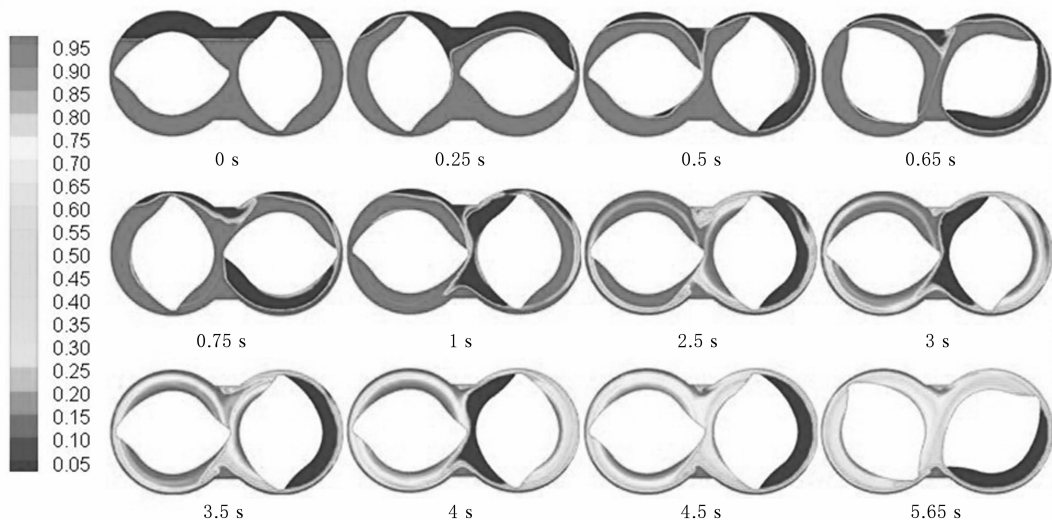


图 2 Banbury 密炼机内的两相分布(流体体积分数分布)

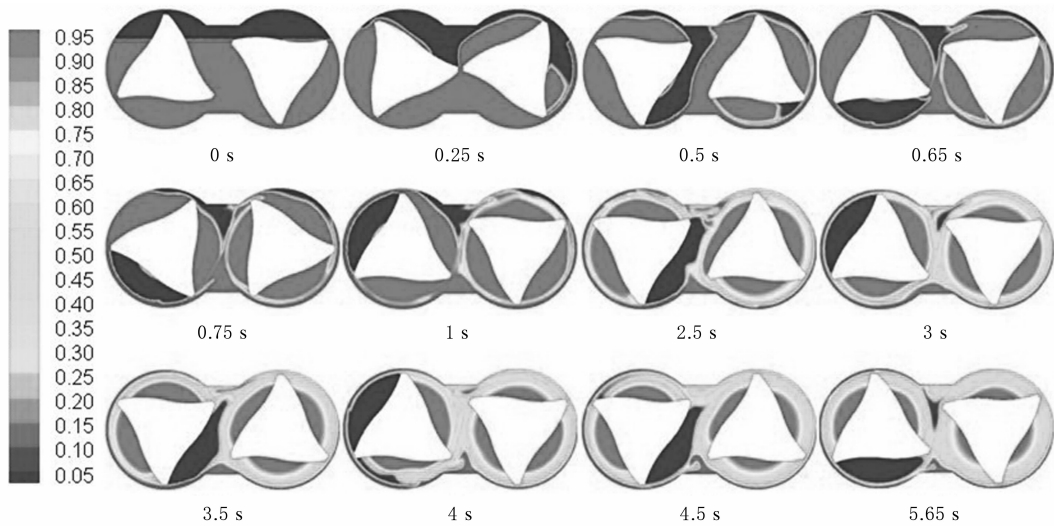


图 3 Roller 密炼机内的两相分布(流体体积分数分布)

炼过程最后,空气相主要位于 Banbury 密炼机的右密炼室,Roller 密炼机的左密炼室。旋转 3,4 圈后,密炼机内的橡胶-空气两相分布基本确定。

3.2 速度矢量场及流线分析

流体在两种密炼机内的流动情况分别如图 4 和 5 所示。由图 4 和 5 可见,胶料在两种转子作用下的最主要运动都是周向流动及两转子间的交

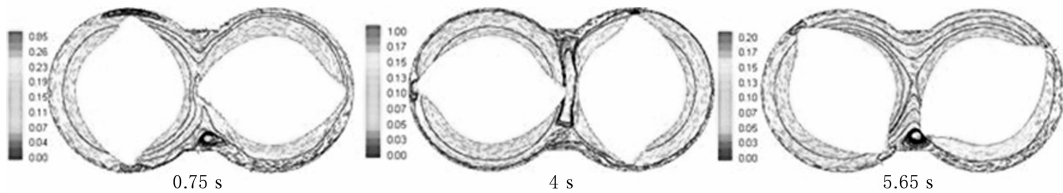


图 4 Banbury 密炼机内的速度矢量及流线分布

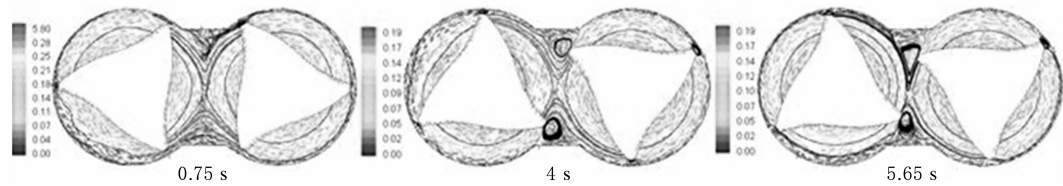


图 5 Roller 密炼机内的速度矢量及流线分布

换运动。由于 Roller 转子相比 Banbury 转子多一个棱,因此 Roller 转子间的交换更加频繁,分散混合效率更高。转子棱附近速度最大,密炼室壁附近速度为零,速度衰减产生的剪切、拉伸作用对胶料的混炼是十分有利的。由于 Roller 转子多一个棱,因此其速度衰减更加频繁。压砟和卸料门区域及转子棱是涡流产生的主要区域。压砟和卸料门附近区域流速很小且有涡流产生,是混炼的死角区域。此外,Roller 密炼机中胶料的流动速度大于 Banbury 密炼机。

3.3 压力场分布

两种密炼机内的压力分布分别如图 6 和 7 所示。由图 6 和 7 可见,由于密炼室是部分充满,压力场变化都较大。转子推进面一侧大多数情况下为高压区,而另一侧为低压区。胶料经过转子推进面进入间隙的过程中,流道的逐渐缩小使其受到很大的剪切力作用,当通过间隙后,这种作用突然减弱,形成涡流。间隙前后巨大的压差对于胶料的塑炼、拉伸和重排是十分有利的。相比 Banbury 密炼机,由于 Roller 转子的棱数更多,其机内高压

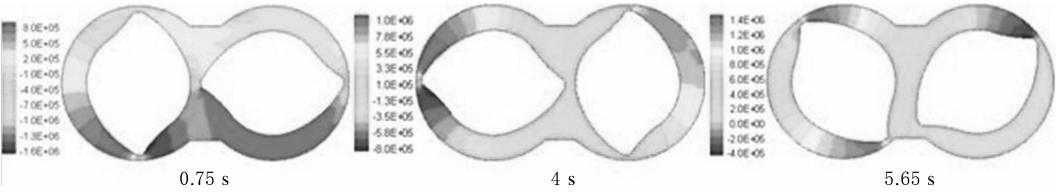


图6 Banbury密炼机内的压力场分布

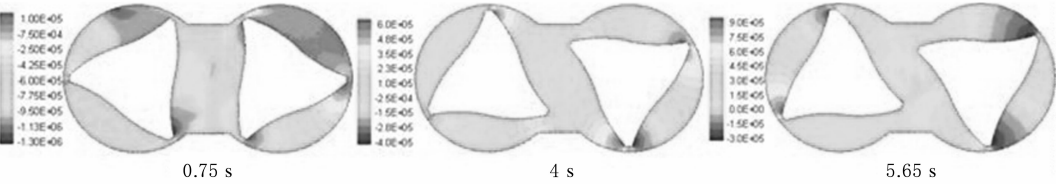


图7 Roller密炼机内的压力场分布

区更大,胶料受到的拉伸和剪切更频繁。

3.4 混合指数分布

混合指数是表征拉伸和剪切对流场作用大小

的参数。两种密炼机内的混合指数分布分别如图8和9所示。由图8和9可见,转子根部及压砣和卸料门区域混合指数在0.2以下,以旋转流动

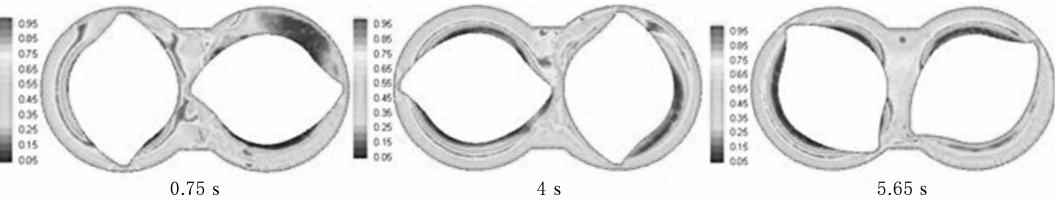


图8 Banbury密炼机内的混合指数分布

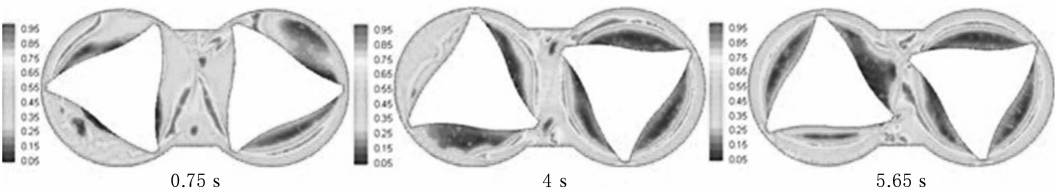
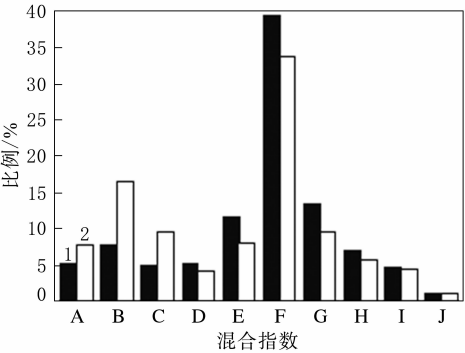


图9 Roller密炼机内的混合指数分布

为主。转子棱经过区域混合指数在0.8以上,以拉伸流动为主。两种密炼机大部分区域混合指数在0.5附近,以简单剪切为主,而在转子交汇区混合指数较大,以优于简单剪切的剪切或拉伸流动为主。

两种密炼机混合指数的比例分布如图10所示。由图10可见,两种密炼机都主要经历剪切流动,纯旋转和纯拉伸流动较少。Banbury密炼机流场中有65.8%的区域为对分散混合更有效的剪切或拉伸流动,而Roller密炼机流场该比例为54.2%。Banbury和Roller密炼机流场的平均混合指数分别为0.51和0.44。就混合指数而言,Banbury转子的分散混合能力略优于Roller转



1—Banbury;2—Roller。混合指数:A—0~0.1;B—0.1~0.2;C—0.2~0.3;D—0.3~0.4;E—0.4~0.5;F—0.5~0.6;G—0.6~0.7;H—0.7~0.8;I—0.8~0.9;J—0.9~1。

图10 两种密炼机混合指数的比例分布

子,但是混炼和分散发生的主要区域——转子棱附近及两转子交汇区,Roller 密炼机的混合指数大于 Banbury 密炼机。

不同时刻两种密炼机的扭矩输入对比如图 11 所示。由图 11 可见,在混炼过程中两种密炼机的扭矩输入是瞬时变化的,并逐渐减小,这是橡胶剪切变稀导致的。Banbury 和 Roller 密炼机的平均扭矩输入分别为 511 和 455 N·m,Roller 转子所需的扭矩略小于 Banbury 转子。

3.5 剪切应力分布

两种密炼机内流场的剪切应力分布分别如图 12 和 13 所示。由图 12 和 13 可见,剪切应力都围绕着转子根部近似呈同心圆的层状分布,在间隙处最大,越靠近转子越小。最大剪切应力随着转子旋转出现在不同区域,作用在不同的胶料上,这对添加剂的分散和分布十分有利。空气相的剪切应力都较小。

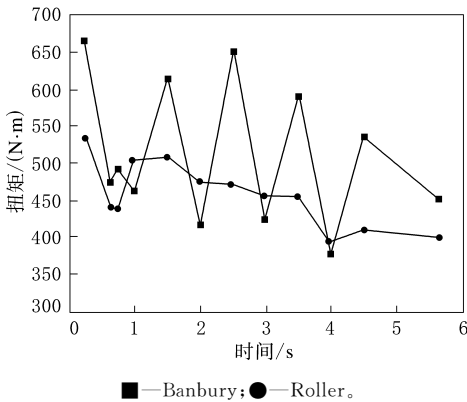


图 11 不同时刻两种密炼机的扭矩输入对比

两种密炼机剪切应力的比例分布如图 14 所示。由图 14 可知,Banbury 密炼机有 51%的区域承受 0.04~0.012 MPa 的剪切应力,而 Roller 密炼机有 53%,略高于 Banbury 密炼机。由于 Roller 转子的棱数多于 Banbury 转子,胶料受到的最大剪切更频繁,添加剂在胶料中的分散更充

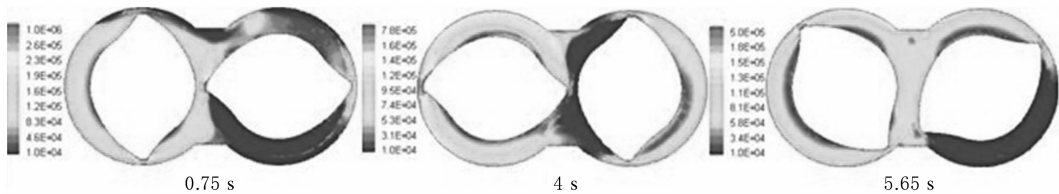


图 12 Banbury 密炼机内的剪切应力分布

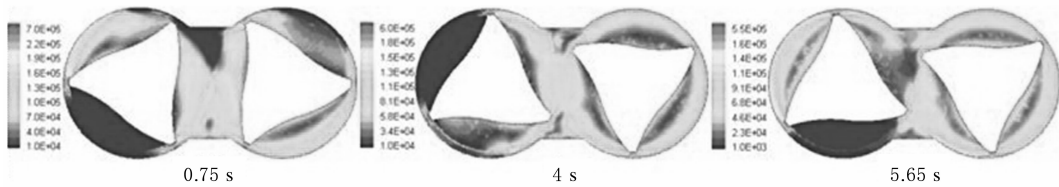
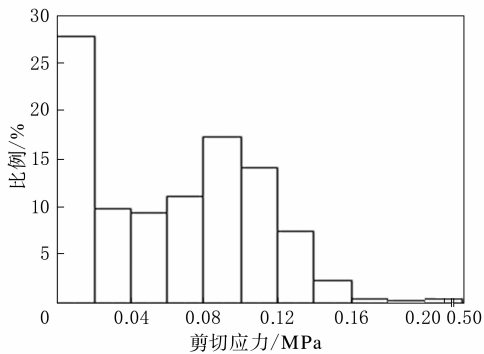
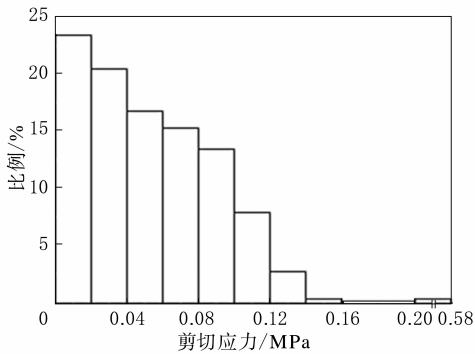


图 13 Roller 密炼机内的剪切应力分布



(a)Banbury 密炼机(平均剪切应力为 0.06 MPa)



(b)Roller 密炼机(平均剪切应力为 0.05 MPa)

图 14 两种密炼机剪切应力的比例分布

分。Banbury 密炼机剪切应力大于 0.16 MPa 的区域为 0.85%，而 Roller 密炼机为 0.4%。过大的剪切应力容易使胶料局部温度过高，导致一些易降解聚合物降解，应适当避免。

4 结论

使用 VOF 方法准确模拟了 Banbury 和 Roller 密炼机部分充满状态下自由界面的运动形态，并对两种密炼机的流场性能进行对比。通过分析得到以下结论。

(1) 由于 Roller 转子的转子棱更多，流场内高压区更大，胶料受到最大剪切应力的作用更加频繁，两转子间的交换速度更快，有利于添加剂的分散。

(2) 混合指数的对比表明，Banbury 密炼机承受更多优于简单剪切的剪切和拉伸流动，但需要更大的扭矩输入。

(3) 综合评价，Roller 转子对添加剂的分散和分布优于 Banbury 转子。

参考文献：

- [1] Shafaat A S, Rabeh H E, Othman A, 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.
- [2] 孙大鹏, 朱向哲, 程志飞, 等. 同步转子密炼机混合效率的数值模拟研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(10): 33-37.
- [3] Connelly R K, Kokini J K. 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(1): 956-969.
- [4] 耿新亭, 山田则文, 李大为. 密炼机转子形状对胶料混炼性能的影响[J]. 轮胎工业, 2005, 25(9): 552-555.
- [5] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [6] Elmendorf J J. A Study on Polymer Blending Microrheology [J]. Polymer Engineering and Science, 1986, 6(26): 418-426.
- [7] Cheng H F, Manas Z I. Study of Mixing Efficiency in Kneading Discs of Co-rotating Twin-screw Extruders [J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(6): 1082-1090.

收稿日期: 2014-09-19

Numerical Simulation of Compound Flow Field in Partially Filled Internal Mixer with Different Rotor Configuration

SONG Jian-xin, YANG Hai-bo, HAO Ying-zhe, SU Jiang, ZHANG Li-qun

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

Abstract: The 2D compound flow field in partially filled Banbury and Roller internal mixer at constant temperature was simulated by using the package Fluent. The results showed that, the melt in the Roller internal mixer experienced maximum shear stress more frequently, the exchange between the two rotors was more intense, and the flow field became more complicated. The average mixing index of the Banbury internal mixer was slightly larger, but the torque input to operate the machine was higher.

Key words: Banbury internal mixer; Roller internal mixer; partially filled; flow field; numerical simulation

含纳米填料的充气轮胎气密层组合物

中图分类号: TQ330.38⁺3; TQ336.1 文献标志码: D

由特拓(青岛)轮胎技术有限公司申请的专利(公开号 CN 104262701A, 公开日期 2015-01-07)“含纳米填料的充气轮胎气密层组合物”, 涉及的含纳米填料的气密层胶料配方为: 生胶 100,

炭黑 30~60, 纳米粘土 5~30, 环烷油 5~15, 氧化锌 1~4, 硬脂酸 1~2, 增粘树脂 3~8, 硫黄 1~2, 噻唑类促进剂 1~2。本发明在基本不影响胶料物理性能的前提下, 提高了充气轮胎气密层的气密性, 同时降低了胶料成本。

(本刊编辑部 马 晓)