

部分充满密炼机胶料流动的数值模拟研究

宋建欣^{1,2}, 杨海波^{1,2*}, 苏江^{1,2}, 郝英哲^{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:采用软件 FLUENT 建立密炼机部分充满胶料流动的二维等温有限元模型, 通过对胶料自由界面的数值模拟追踪, 分析流体的流动状态, 借助于混合指数和剪切应力分析评估转子的分散混合效率, 并将部分充满密炼机流场与全充满密炼机流场进行对比。结果表明: 相对于全充满密炼机的稳定流场, 部分充满密炼机流场流动非常复杂; 全充满密炼机的分散混合能力优于部分充满密炼机, 但是所需的扭矩输入更大。

关键词:密炼机; 流场; 数值模拟; 部分充满

中图分类号: TQ330.1⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2015)02-0069-06

混炼是橡胶加工中的一个重要环节。混炼质量直接关系到胶料的加工工艺性能和制品的使用寿命。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。在实际生产中, 密炼机不是全部充满的, 而是有一个填充因数, 即混炼容量。当前对于密炼机流场的数值模拟研究^[1-5]大多假设全充满条件, 而对实际部分充满条件鲜少涉及, V. Nassehi 等^[6]通过求解自由表面流动方程以追踪部分充满状态下存在的流动自由表面, 但数值模拟得到的自由表面不光滑, 存在较大误差。国内对密炼机部分充满胶料的研究^[7]都集中于实验研究。本工作利用流体分析软件 FLUENT 对部分充满状态下的密炼机流场进行详细研究, 并与全充满状态下密炼机流场对比。

1 模型建立

1.1 VOF 方法

VOF 模型^[8]是一种在固定的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。若 $\alpha_q = 1$, 表示单元内全部为第 q 相流体; $\alpha_q = 0$, 说明单元内没有第 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

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

式中, $\mathbf{v}$ 为单元平均速度矢量, μ 为动力粘度。

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

在 VOF 方法中, 物性参数由控制体积内各相流体的物性参数以及各相的体积分数函数所决定, 亦即某控制体积内的物性参数 ϕ 由下式计算得到:

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

1.2 控制方程

描述多相流运动的连续方程和动量方程如下所示:

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

第一相体积分数由方程(2)确定。

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

式中, ∇ 为哈密顿算子, $\mathbf{v}_q$ 为第 q 相速度矢量, ρ 为体积分数平均密度, p 为单元平均压力, $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量, $\mathbf{F}$ 为单元体上的外力矢量, t 为时间。

橡胶为假塑性流体, 本文采用 Cross 本构方

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

程来阐述其流变性能。

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

式中, η_0 为胶料的零切粘度, λ 为特征时间, n 为幂律指数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

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。假定胶料与空气的流动状态为层流,忽略重力、惯性力,流体不可压缩,壁面无滑移。空气为第一相,胶料为第二相,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,控制两转子都以 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速顺时针旋转,如图 1 所示。整个模型的节点数为 18 670,单元数为 35 834。

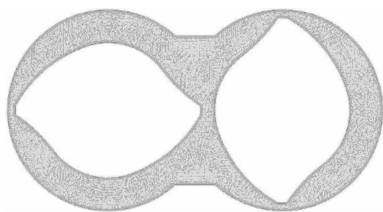


图 1 部分充满密炼机有限元模型

2 混合指数

根据分散混合理论,分散混合是通过剪切和拉伸作用使分散相粒度减小的过程。通过对简单剪切和拉伸流动中颗粒破碎过程的实验研究, J. J. Elmendorp^[9] 发现拉伸流动对于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。研究人员^[4-5]为了使拉伸流动和旋转流动量化引入了混合指数(λ_{MZ})。混合指数是对物料在混炼室内被拉伸和剪切的程度进行综合衡量的一个参数,是表征分散混合能力的一个指标。

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

式中, $\mathbf{D}$ 为形变速率张量, $\boldsymbol{\omega}$ 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 密炼机流场结果分析

3.1 密炼机的两相分布

图 2 是通过 VOF 方法模拟的填充因数为 0.70 的密炼室内的橡胶-空气两相分布,其中黑色区域代表橡胶,白色区域代表空气。

实际生产中使用的密炼机都有一个最佳填充因数,一般为 0.60~0.70。从图 2 可以看出,自由界面在密炼室内的运动形态是非常剧烈的。转子和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。旋转过程中胶料受到很明显的剪切、捏炼和撕扯作用,这些作用对于橡胶的混炼和添加剂在橡胶基体内的分散、分布混合十分有利。受到胶料的挤压,空气相也会被迫随着转子运动。初始阶段,自由表面的变化非常大,当流场稳定后,除两转子交汇区自由面变化剧烈之外,其余区域自由界面的变化较弱,绝大多数的空气相位于右密炼室内。旋转 3 圈后,橡胶-空气两相的分布基本确定。

3.2 速度矢量场及流线分析

图 3 和 4 是初始流场及流场稳定后的速度矢量分布及流线。从图 3 和 4 可以看出,流场内最主要的运动是流体在转子的带动下做周向流动和两转子间的交换运动,全充满流场两转子间的交换较弱,不如部分充满流场剧烈。最大速度值出现在转子棱顶部,而在密炼室壁附近速度为零,壁面与转子棱顶部的速度衰减产生明显的剪切和拉伸作用。从图中还可以看到涡流的产生,尤其是在转子棱顶处以及压砣和卸料门平台附近。对比两图发现,部分充满密炼机流场流线更加曲折,流动更加复杂,尤其是两转子交汇区,流速也更大,而全充满条件下胶料主要做规则的周向流动。不论密炼室是否充满,压砣和卸料门附近速度都较小且有大量涡流产生,证明是混炼的死角区域。

3.3 压力场分析

不同时刻两种密炼机的压力分布如图 5 和 6 所示。从图 5 和 6 可以看出,转子棱顶与密炼室壁之间的间隙处存在很大的压力降,转子的楔入区为高压区,而背压区为低压区。这是由转子的特殊构型所决定的,胶料在由楔入区进入间隙的过程中,流道的缩小会使其受到很大的剪切力作用,而当胶料通过后,随着流道的突然增大,这种

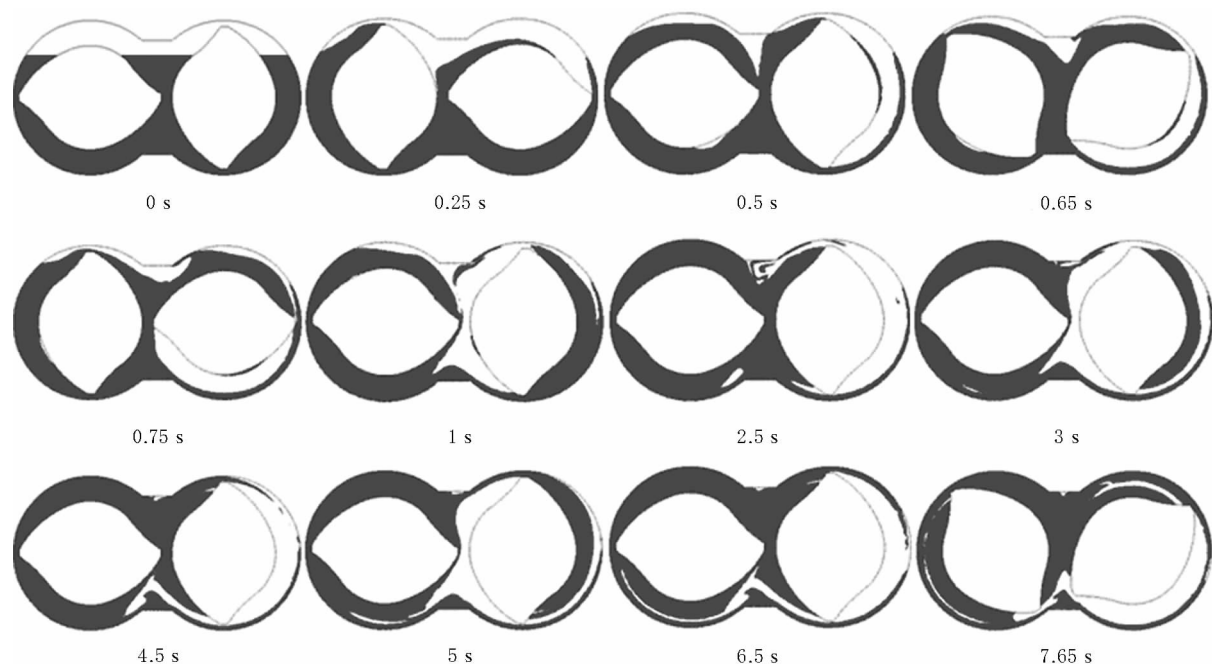


图 2 不同时刻密炼机内的两相分布

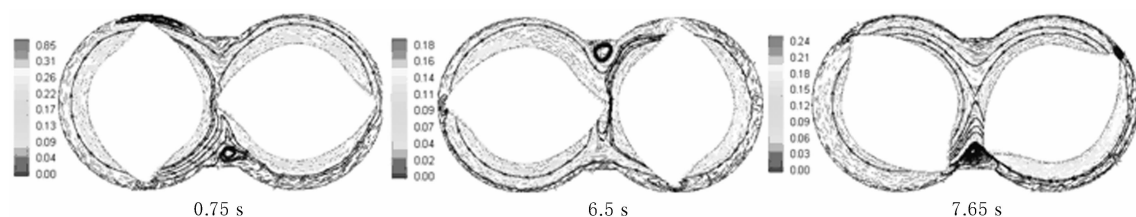


图 3 部分充满密炼机内的速度矢量及流线分布

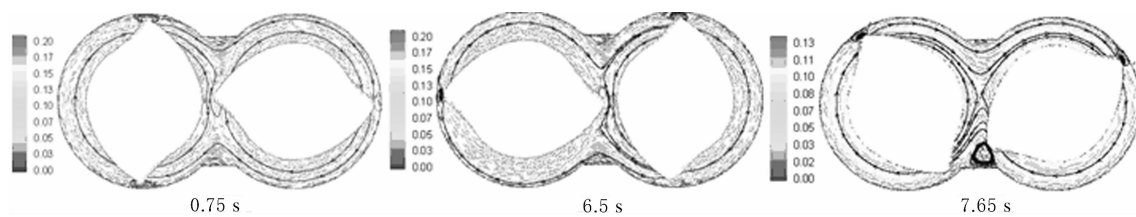


图 4 全充满密炼机内的速度矢量及流线分布

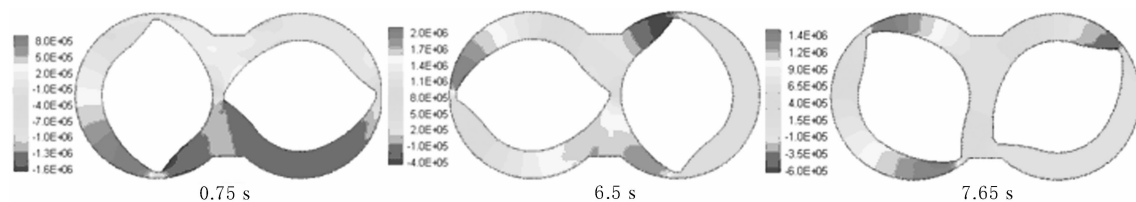


图 5 部分充满密炼机内的压力分布

作用瞬间减弱,形成涡流(如图 3 和 4 所示)。间隙前后巨大的压差对于胶料的塑炼、拉伸、重排是十分有利的。对比两图可以看到,全充满密炼机的流场是稳定的,而部分充满密炼机的压力场变

化较大,转子的楔入区并不一定是高压区。

3.4 混合指数分布及分析

混合指数是表征拉伸和剪切对流场作用大小的参数。不同时刻两种密炼机的混合指数分布如

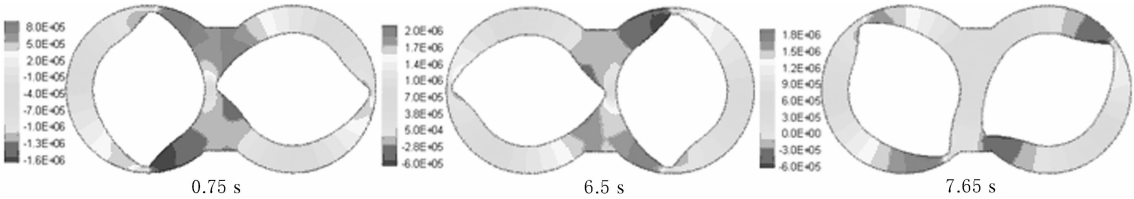


图 6 全充满密炼机内的压力分布

图 7 和 8 所示。

从图 7 和 8 可以看出,全充满密炼机流场的指数分布是稳定的,而部分充满密炼机流场在经过初期的复杂分布后最终稳定。转子楔入区及背压区经过区域混合指数达到 0.8 以上,以拉伸流动为主,而压砣和卸料门区及转子根部混合指数

在 0.2 以下,以旋转流动为主。两种密炼机大部分区域混合指数都在 0.5 附近,以简单剪切为主。另外还要注意,在初始时刻,当胶料位于部分充满密炼机转子上方时,混合指数较小,这是由于胶料没有全充满密炼室,转子上方的胶料受到的压力较小,在拖曳力的作用下随转子旋转。

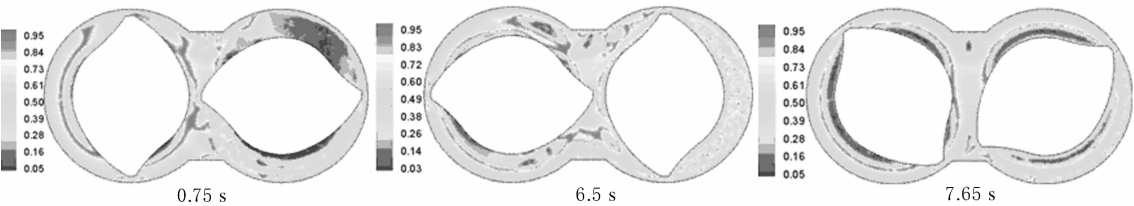


图 7 部分充满密炼机内的混合指数分布

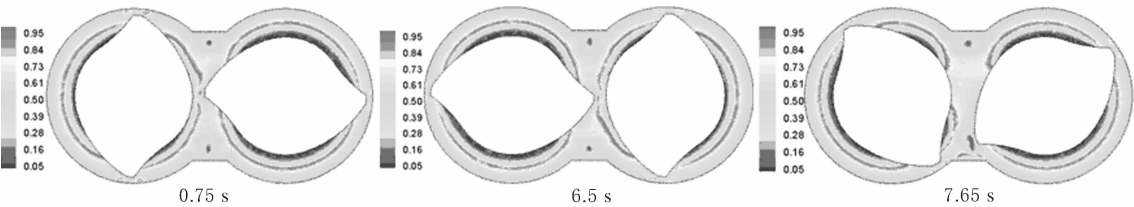


图 8 全充满密炼机内的混合指数分布

两种密炼机流场混合指数的比例分布如图 9 所示。从图 9 可以看出,部分充满密炼机流场中有 63.3% 的区域承受着优于简单剪切的剪切或

拉伸流动,而在全充满流场中,这个值达到 70.5%。部分充满密炼机流场的平均混合指数为 0.5 左右,而全充满流场的为 0.53。

不同时刻两种密炼机的扭矩输入对比如图 10 所示。从图 10 可以看出,全充满密炼机的扭

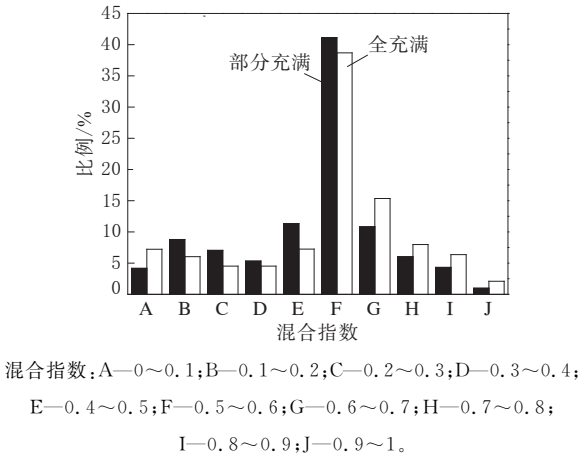


图 9 7.65 s 时两种密炼机流场混合指数的比例分布

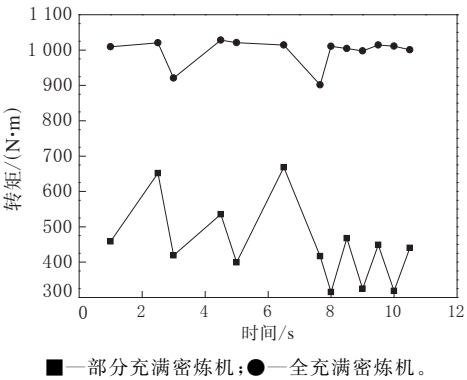


图 10 不同时刻两种密炼机的扭矩输入对比

矩输入远远大于部分充满密炼机,全充满密炼机的平均扭矩输入为 $996\text{ N}\cdot\text{m}$,而部分充满密炼机仅为全充满一半,约为 $451\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

3.5 剪切应力分布

两种密炼机流场的剪切应力分布如图 11 和 12 所示。从图 11 和 12 可以看出,剪切应力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是十分有利的。部分充满密炼机空气相的剪切应力较小,而且正如混合指数分布那样(如图 7 所示, 0.75 s),初始时刻转子上方的胶料所受剪切应力也较小。

两种密炼机不同剪切应力所占比例如图 13 所示。从图 13 可以看出,部分充满密炼机剪切应力大于 0.16 MPa 的区域约为 0.61% ,而全充满

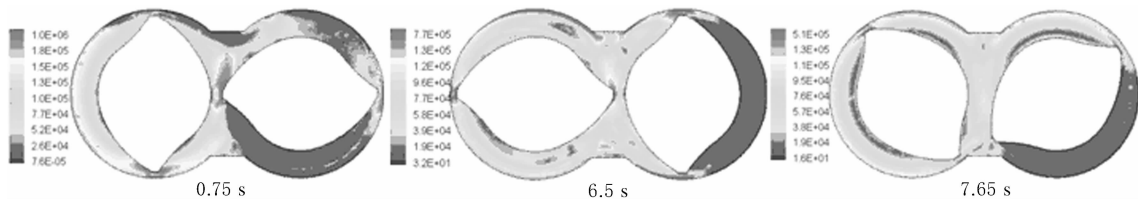


图 11 部分充满密炼机内的剪切应力分布

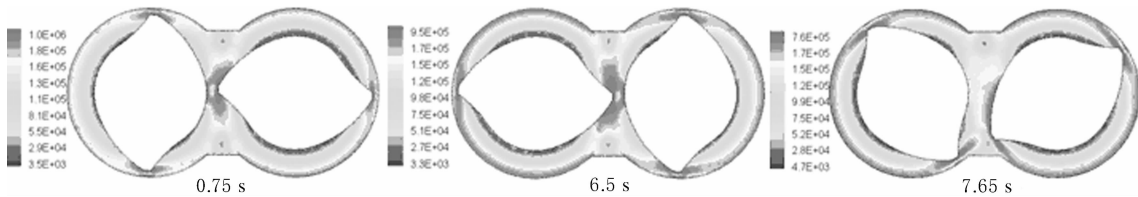
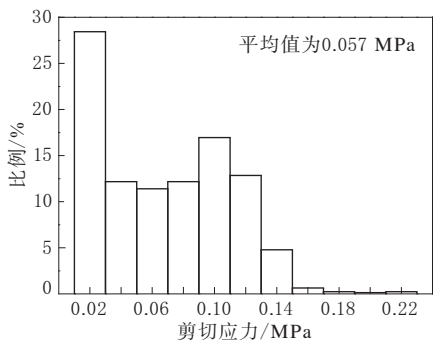
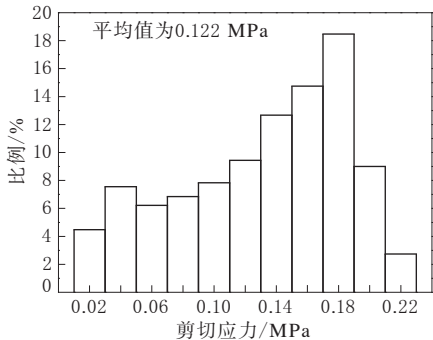


图 12 全充满密炼机内的剪切应力分布



(a)部分充满密炼机



(b)全充满密炼机

图 13 两种密炼机不同剪切应力所占比例

密炼机为 30.2% ,都主要作用在棱顶和壁面。两种密炼机大部分区域剪切应力为 $0.04\sim0.16\text{ MPa}$,部分充满的占 58.8% ,全充满密炼机占 57.8% 。可以看出,全充满密炼机整体的剪切应力比部分充满的大,过大的剪切应力虽然有利于添加剂在橡胶基体中的分散,但是也会使混合物的温度升高,导致一些易降解聚合物降解,而且图 10 也说明全充满密炼机需要更高的扭矩输入。

4 结论

(1)利用 VOF 方法可以较真实地模拟密炼室内自由界面的动态变化,得到橡胶-空气两相的瞬时分布及其流场分布。

(2)全充满密炼机流场是稳定的,而部分充满密炼机流场相对于全充满密炼机,流速更大,流线更曲折,流动更加复杂;转子的楔入区为高压区,背压区为低压区,但对于部分充满密炼机不是绝对的;转子棱与密炼壁间的间隙是胶料受到剪切、塑炼的主要区域。

(3)两种密炼机流场的平均混合指数都在

0.5左右,全充满流场略大,都以剪切为主;转子楔入区及背压区经过区域以拉伸流动为主,而压砣和卸料门区及转子根部以旋转流动为主。

(4)剪切应力在两种密炼机内都近似呈层状分布,转子棱顶最大,根部最小。全充满流场的剪切应力大于部分充满流场。

(5)全充满密炼机流场的混合指数和剪切应力都大于部分充满流场,但是扭矩输入却是部分充满密炼机的2倍。

参考文献:

- [1] 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(1): 956-969.
- [2] Connelly R K, Kokini J L. 2D Numerical Simulation of Differential Viscoelastic Fluids in a Single-screw Continuous Mixer: Application of Viscoelastic Finite Element Methods[J]. Advance in Polymer Technology, 2003, 22(1): 22-41.
- [3] Zhou J, Yu W, Zhou C X. Numerical Study on Mixing

Process of Immiscible Polymer Melts in Internal Batch Mixer Using Two-dimensional Model[J]. Journal of Polymer Engineering, 2008, 28(6-7): 385-404.

- [4] Cheng H F, Manas-Zloczower I. Study of Mixing Efficiency in Kneading Discs of Co-rotating Twin-screw Extruders[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(6): 1082-1090.
- [5] Yao C H, Manas-Zloczower I. Influence of Design on Dispersive Mixing Performance in an Axial Discharge Continuous Mixer-LCMAX 40[J]. Polymer Engineering and Science, 1998, 38(6): 936-946.
- [6] Nassehi V, Ghoreishy M H R. Modeling of Mixing in Internal Mixers with Long Blade Tips[J]. Advances in Polymer Technology, 2001, 20(2): 132-145.
- [7] 陈国栋, 汪传生, 满敬国. 填充系数对同步转子密炼机混炼性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2009, 30(1): 51-54.
- [8] 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.
- [9] Elmendorf J J. A Study on Polymer Blending Microrheology[J]. Polymer Engineering and Science, 1986, 6(26): 418-426.

收稿日期: 2014-08-01

Numerical Simulation of Rubber Flow in Partially Filled Internal Mixer

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

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

Abstract: The 2D finite element model of flow field in partially filled and full-filled internal mixer at constant temperature by using the package FLUENT was investigated. By numerical simulating the free interface of compound, the flow state of fluid was analyzed, and the mixing efficiency of rotors was quantified in terms of shear stresses and mixing index generated in the flow field. The results showed that, compared with the full-filled internal mixer, the flow field became more complicated in partially filled internal mixer. The full-filled internal mixer seemed to provide better flow field characteristics for mixing, but the torque input to operate the machine was higher than that of the partially filled internal mixer.

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

汽车制动气室橡胶隔膜循环成型装置

中图分类号: TQ330.4⁺6 文献标志码: D

由宁国市海天力工业发展有限公司申请的专利(公开号 CN 103231476A, 公开日期 2013-08-07)“汽车制动气室橡胶隔膜循环成型装置”, 涉及的汽车制动气室橡胶隔膜循环成型装置包括真空硫化机、注射硫化机、脱模机构和橡胶隔膜成型模具。其中注射硫化机上设置有注射机, 真空

硫化机用于一次硫化处理, 注射硫化机用于二次硫化处理, 真空硫化机和注射硫化机沿左右方向并排设置, 脱模机构用于橡胶隔膜成型模具中压环与下模的分离操作。该发明突破了传统的二次硫化成型工艺方法, 由注射硫化机向模腔内注入胶料, 在进料的同时进行硫化处理, 自动化程度高, 生产效率高、产品质量稳定, 生产成本降低。

(本刊编辑部 赵敏)