

工艺·设备

# 电磁动态密炼机四棱异步剪切型转子的设计及模拟分析

林广义<sup>1,2</sup>, 吕宁宁<sup>1,2</sup>, 艾冲冲<sup>1,2</sup>

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 山东省高分子材料先进制造重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:**设计电磁动态密炼机四棱异步剪切型转子, 建立在电磁振动条件下转子的三维数学模型, 并运用专业流体软件Polyflow动态模拟分析转子流场的压力场、速度场、剪切速率分布、粘度分布、混合指数分布和浓度场。结果表明: 在电磁振动条件下, 转子流场出现最高压力、最大速度、最大剪切速率和最大质量浓度的时间缩短, 转子突棱处的粘度很小, 转子平滑处的粘度较大, 混合指数较小, 从而使胶料快速完成混炼, 提高混炼效率, 降低混炼能耗。

**关键词:**电磁动态密炼机; 四棱异步剪切型转子; 电磁振动; 流场; 动态模拟; 混炼

**中图分类号:** TQ330.4<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-890X (2021) 04-0302-07

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.04.0302



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

在 高 分 子 材 料 加 工 行 业 中, 密 炼 机 是 应 用 最 为 广 泛 的 间 歇 式 混 炼 设 备。由 于 传 统 密 炼 机 存 在 功 率 消 耗 高 和 体 积 庞 大 等 缺 陷, 因 此 需 要 改 进 密 炼 机 的 结 构, 以 减 小 体 积 和 降 低 能 耗, 而 电 磁 动 态 技 术 在 密 炼 机 上 的 应 用 为 解 决 此 问 题 提 供 了 新 途 径<sup>[1-3]</sup>。电 磁 动 态 技 术 利 用 能 量 转 化 的 原 理 将 电 磁 场 引 起 的 振 动 场 引 入 聚 合 物 加 工 成 型 的 全 过 程, 引 起 高 分 子 材 料 相 变、填 料 聚 集 态 变 化、高 分 子 产 生 自 补 强 等 一 系 列 新 的 物 理 化 学 作 用, 从 而 增 强 胶 料 混 炼 效 果 并 降 低 混 炼 能 耗<sup>[4-5]</sup>。

转 子 是 密 炼 机 的 核 心 部 件, 其 结 构 领 域 的 研 究 不 断 扩 展 和 深 入<sup>[6-9]</sup>。本 工 作 设 计 密 炼 机 四 棱 异 步 剪 切 型 转 子, 建 立 在 电 磁 振 动 条 件 下 转 子 的 三 维 数 学 模 型, 并 运 用 专 业 流 体 软 件 Polyflow 动 态 模 拟 转 子 流 场, 分 析 在 电 磁 振 动 条 件 下 转 子 流 场 各 参 数 的 变 化 规 律。

## 1 模型设计

### 1.1 转子设计

本 次 设 计 的 密 炼 机 容 量 为 3 L, 四 棱 异 步 剪 切 型 转 子 速 比 为 3 : 2, 转 子 一 端 加 上 周 期 性 的 轴 向 振 动 (通 过 电 磁 激 振 器 实 现), 振 动 频 率 在 0~10.8 Hz 之 间。该 转 子 由 电 磁 绕 组 装 置、转 动 和 振 动 部 件、运 动 部 件 的 轴 向 电 磁 支 承 以 及 与 运 动 部 件 构 成 物 料 工 作 容 积 的 固 定 部 件 组 成, 具 有 吃 料 能 力 和 适 应 性 强、排 胶 速 度 快、破 胶 性 能 好、填 料 分 散 和 胶 料 混 炼 均 匀 等 特 点<sup>[10-12]</sup>。

转 子 结 构 如 图 1 所 示。

### 1.2 电磁振动的驱动方式

电 磁 动 态 密 炼 机 的 创 新 点 是 将 电 磁 振 动 引 入 胶 料 的 混 炼 过 程, 在 转 子 轴 端 加 上 电 磁 激 振 器, 使 其 能 够 在 轴 向 进 行 微 小 的 来 回 转 动。振 动 在 工 程 学 科 领 域 有 两 个 重 要 的 分 支: 振 动 抑 制 和 振 动 利 用<sup>[13-15]</sup>。

**基金项目:** 山东省重点研发计划项目 (2017GSF17127); 青岛市科技发展计划项目 (17-6-3-16-gx)

**作者简介:** 林广义 (1975—), 男, 山东青岛人, 青岛科技大学教授, 博士, 主要从事高分子材料成型技术研究工作。

**E-mail:** 1492127180@qq.com

**引用本文:** 林广义, 吕宁宁, 艾冲冲. 电磁动态密炼机四棱异步剪切型转子的设计及模拟分析[J]. 橡胶工业, 2021, 68 (4) : 302-308.

**Citation:** LIN Guangyi, LYU Ningning, AI Chongchong. Design and simulation analysis of four edge asynchronous shear rotor of electromagnetic dynamic mixer[J]. China Rubber Industry, 2021, 68 (4) : 302-308.



图1 转子结构示意图  
Fig.1 Rotor structure

### 1.3 转子模型

转子的三维模型如图2所示,其特点是长棱在一侧,短棱在另一侧。前后转子在旋转时有一定的速比,即转速不相同,使得工作时转子对胶料的剪切作用增大。



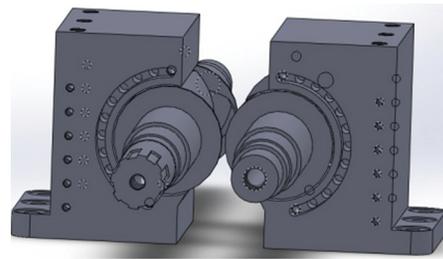
图2 转子的三维模型  
Fig.2 Three dimensional model of rotor

密炼室和转子的几何形状及转子的长短棱沿基圆展开如图3所示。转子的基本几何参数为:中心距 140 mm,内径 85 mm,外径 136 mm,长度 210 mm(长棱长度为168 mm,短棱长度为42 mm)。

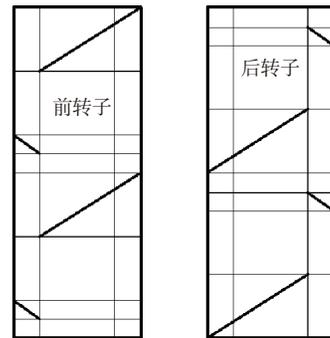
在混炼过程中胶料充满整个密炼室,因此以转子基圆和密炼室尺寸(转子突棱与密炼室内壁的间隙为2 mm)确定转子流场的三维网格模型,如图4所示。

转子混炼模型流场的物理参数为:密度( $\rho$ )  $1\ 066\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,牛顿指数( $n$ ) 0.385,零剪切粘度( $\eta_0$ )  $1\ 000\ 000\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ ,无穷剪切粘度( $\eta_\infty$ )  $10\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ ,粘弹性特征时间( $\lambda$ ) 10 s;边界条件的设定为:转子速比 60:40(3:2),流体内壁表面速度为  $0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

本研究针对前转子转动1周的流场进行动态



(a) 密炼室和转子的几何形状



(b) 前后转子展开示意

图3 密炼室和转子的几何形状及前后转子展开示意  
Fig.3 Geometry of mixer chamber and rotor and deployment of front and rear rotors



图4 四棱异步转子流场网格模型  
Fig.4 Grid model of four edge asynchronous rotor flow field

数值模拟,设置前转子的转速为  $60\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,转子每旋转  $9^\circ$  就输出1个结果,可以得到40个模拟结果。为简化模拟数据,选取0.1,0.4,0.7和1.0 s(分别对应  $36^\circ, 144^\circ, 252^\circ, 360^\circ$ )时的流场模拟结果进行分析。在其他条件不变的情况下,根据电磁振动频率在  $0 \sim 10.8\ \text{Hz}$  间,本次设计选择在  $10\ \text{Hz}$  振动频率下进行模拟分析。在研究转子三维流场的动态数值模拟时,最能说明密炼机转子混炼特性的区域是转子螺棱混合区域的流场,因此选取两转子螺棱汇合的截面来作为模拟结果的轴向截面,这3个平面依次对应1-1,2-2和3-3轴向截面,

如图5所示。

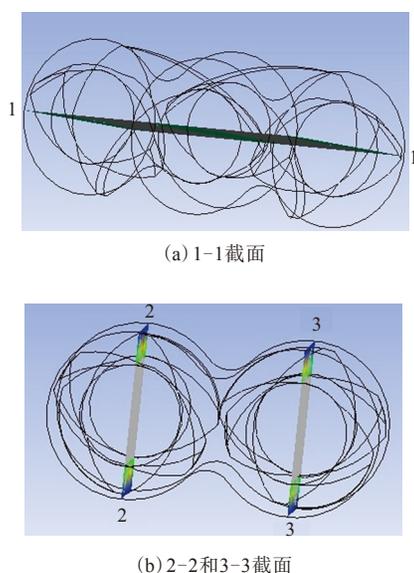


图5 1-1,2-2和3-3轴向截面  
Fig.5 The 1-1,2-2 and 3-3 axial sections

## 2 结果与分析

对电磁动态密炼机转子在振动条件下的三维转子流场进行了模拟分析,关于传统密炼机的研究报道已经较多,限于篇幅,本文只列出电磁动态密炼机的模拟分析结果。

### 2.1 压力场

在研究电磁振动条件下转子流场的压力场时,选取转子分别在0.4和0.7 s时流场的整体压力分布(见图6)及1-1,2-2和3-3轴向截面的压力分布(见图7),探讨转子流场的压力分布的规律。

由图6和7可以看出,与传统密炼机(相应转子

流场图略,下同)相比,电磁动态密炼机转子流场的压力场出现最高压力的时间缩短,即电磁振动可以缩短炼胶时间。同时,加入电磁振动的转子流场的最高压力比没加电磁振动的转子流场的最高压力大,电磁动态密炼机的工作效率提高,能耗降低。

### 2.2 速度场

选取转子在0.4和0.7 s时的速度矢量和速度分布,分别如图8和9所示,研究在电磁振动条件下转子流场的速度分布情况。

从图8和9可以看出,与传统密炼机相比,电磁动态密炼机使转子流场的最大速度较早地出现,更快地完成胶料的混炼过程。

### 2.3 剪切速率分布

选取转子在0.4和0.7 s时的剪切速率分布,如图10所示,研究电磁振动条件下转子流场的剪切速率分布情况。

由图10可以看出,在电磁振动条件下,转子流场的最大剪切速率会较早地出现。与传统密炼机相比,电磁动态密炼机转子转动过程中胶料更早地经历最大剪切速率。

### 2.4 粘度分布

在电磁振动条件下,研究转子流场的粘度分布规律时选取了转子在0.4和1.0 s时的粘度分布,如图11所示。

由图11可以看出,在转子突棱处的粘度很小而在转子平滑处的粘度较大。这是因为转子在振动条件下,胶料更容易向平滑区域流动,这说明电磁振动对于胶料的混炼非常有利,并且能够加快

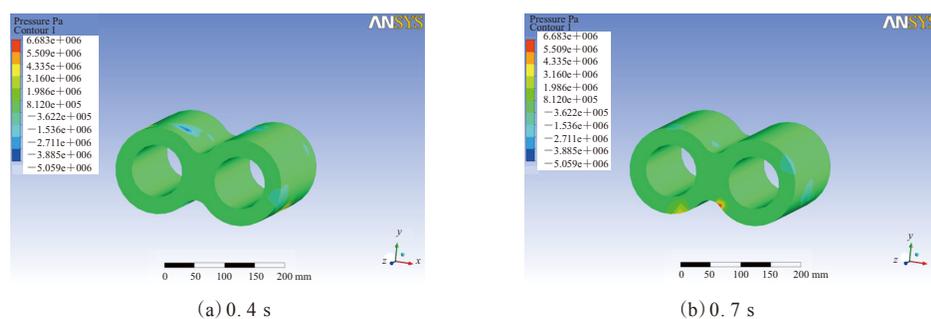


图6 转子流场的整体压力分布  
Fig.6 Overall pressure distributions of rotor flow field

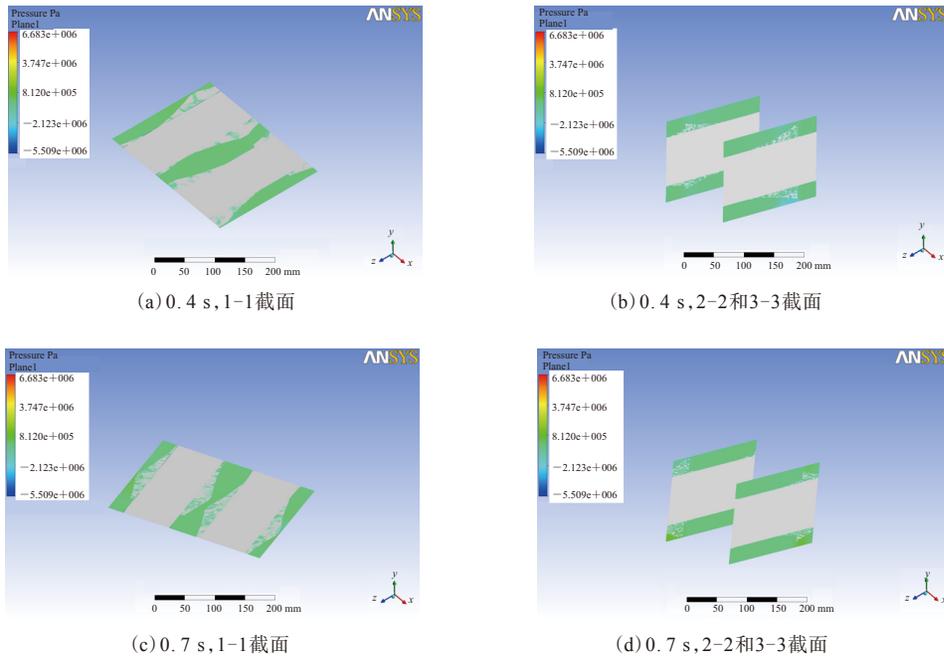


图7 1-1, 2-2和3-3轴向截面的压力分布  
 Fig. 7 Pressure distributions of 1-1, 2-2 and 3-3 axial sections

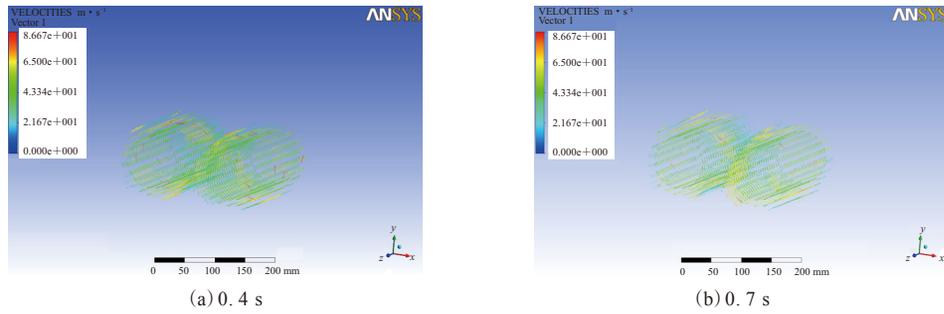


图8 转子流场的速度矢量  
 Fig. 8 Velocity vectors of rotor flow field

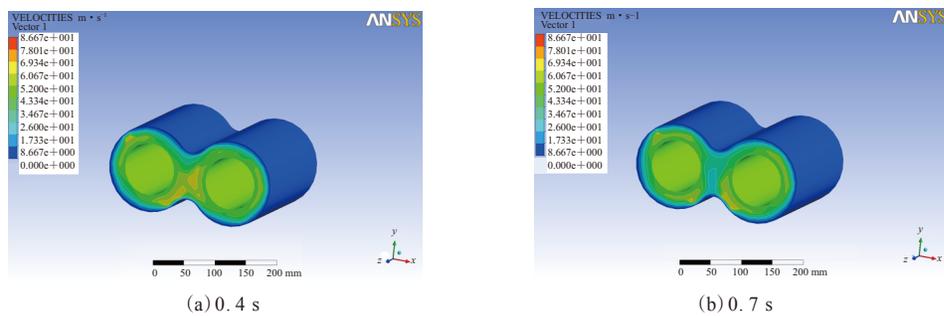


图9 转子流场的速度分布  
 Fig. 9 Velocity distributions of rotor flow field

这一过程。

### 2.5 混合指数分布

在电磁振动条件下, 选取1-1轴向截面的

转子流场的混合指数分布, 如图12所示, 分析在0.1, 0.4, 0.7和1 s时转子流场的混合指数的分布规律。

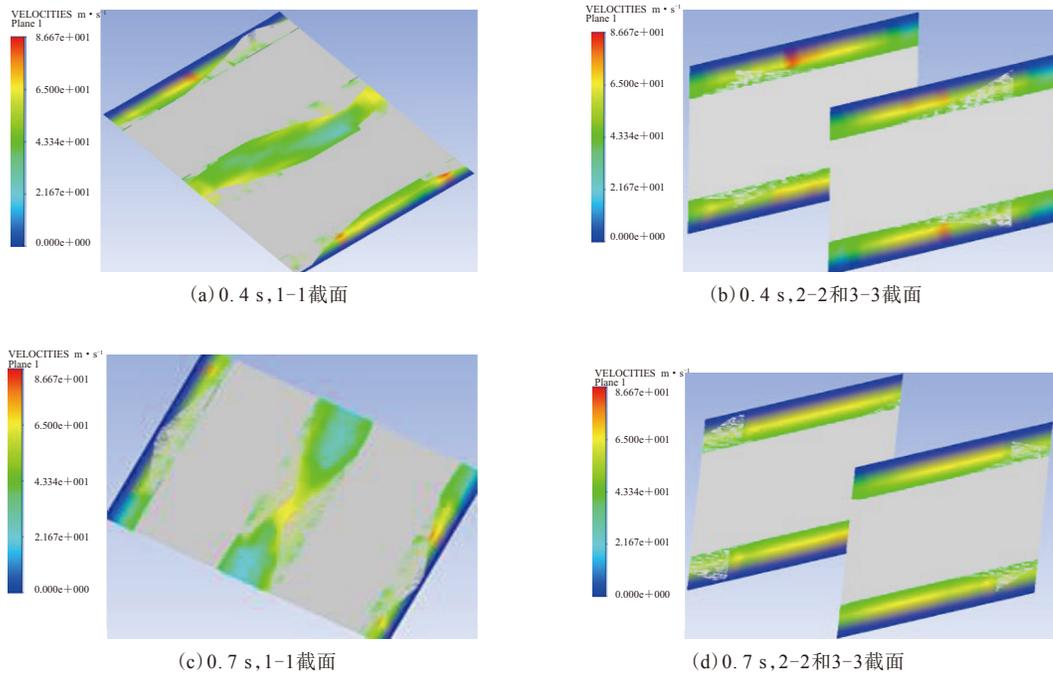


图10 轴向截面的剪切速率分布  
Fig. 10 Shear rate distributions of axial sections

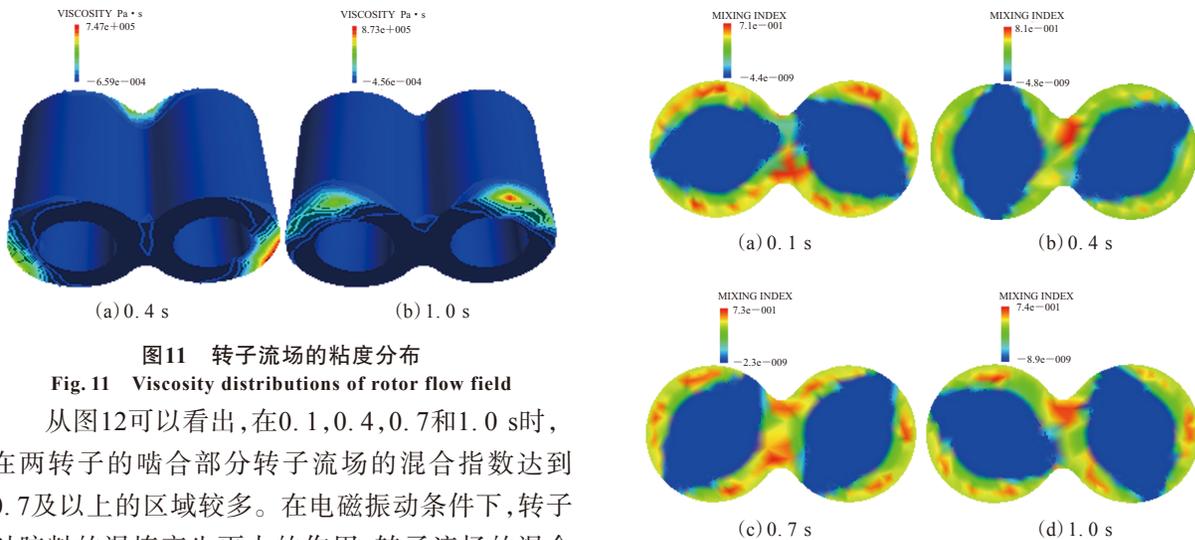


图11 转子流场的粘度分布

Fig. 11 Viscosity distributions of rotor flow field

图12 1-1轴向截面的混合指数分布

Fig. 12 Mixing index distributions of 1-1 axial section

从图12可以看出,在0.1,0.4,0.7和1.0 s时,在两转子的啮合部分转子流场的混合指数达到0.7及以上的区域较多。在电磁振动条件下,转子对胶料的混炼产生更大的作用,转子流场的混合指数比不加振动条件的要小一些,这说明更多的胶料在转子转动过程中受到了剪切作用。

### 2.6 质量浓度场

在电磁振动条件下,转子流场的质量浓度场分布如图13所示。

从图13可以看出,随着时间的延长,不同质量浓度的流体不断地互相混合。与传统密炼机转子流场的质量浓度场相比,电磁动态密炼机转子流

场出现最大质量浓度的时间缩短,这是因为电磁振动使转子形成的轴向振动,提高胶料相互交换速度,使胶料更快地完成混炼过程。

### 3 结论

设计电磁动态密炼机四棱异步剪切型转子,用流体分析软件对密炼机混炼过程中的流场进行

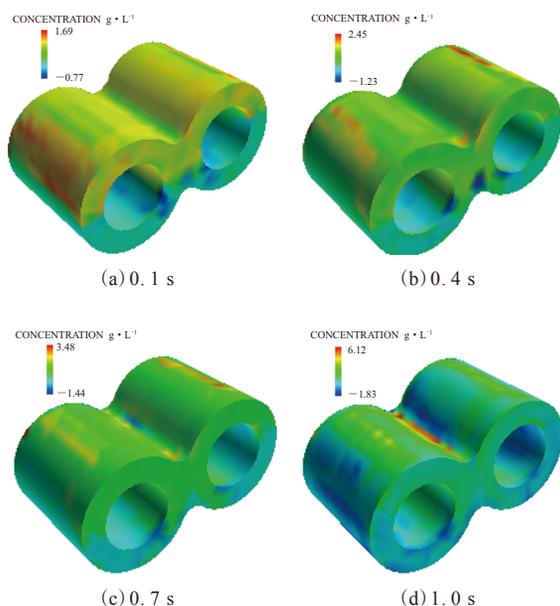


图13 转子流场的质量浓度分布

Fig. 13 Mass concentration distributions of rotor flow field

了动态模拟,并研究了在电磁振动条件下流场的变化规律。在电磁振动条件下,转子流场出现最高压力、最大速度、最大剪切速率和最大质量浓度的时间缩短,转子突棱处的粘度很小,转子平滑处的粘度较大,混合指数较小,从而使胶料快速完成混炼,提高混炼效率,降低混炼能耗。

#### 参考文献:

- [1] 刘同帅,丁玉梅. 混炼设备的发展[J]. 弹性体,2002,12(6):64-66.  
LIU T S, DING Y M. Development of mixing facilities[J]. China Elastomers,2002,12(6):64-66.
- [2] 汪传生,张磊,翟天剑,等. 密炼机混炼流场特性与转子参数的灰色关联研究[J].橡胶工业,2019,66(9):696-698.  
WANG C S, ZHANG L, ZHAI T J, et al. Grey relation between mixing flow field characteristics and rotor parameters of mixer[J]. China Rubber Industry,2019,66(9):696-698.
- [3] FRUNGIERI G, BOCCARDO G, BUFFO A, et al. A CFD-DEM approach to study the breakup of fractal agglomerates in an internal mixer[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2020, 98(9):1880-1892.
- [4] 刘跃军,瞿金平. 聚合物电磁动态塑化注射成型新技术的发展及应用[J]. 机械制造,2002,40(3):24-26.  
LIU Y J, QU J P. Development and application of electromagnetic dynamic plastic injection molding technology[J]. Machinery,2002,40(3):24-26.
- [5] 纪冰,胡海明,汪传生,等. 啮合式密炼机转子的三维造型[J]. 橡胶技术与装备,1996,22(5):26-28.  
JI B, HU H M, WANG C S, et al. Three-dimensional construction of

the rotor of an intermeshing internal mixer[J]. China Rubber/Plastic Technology and Equipment, 1996,22(5):26-28.

- [6] LAURENT B F C, BRIDGWATER J. Performance of single and six-bladed powder mixers[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(10):1695-1709.
- [7] 李纪新,谢小红. 密炼机转子的发展及最新技术[J]. 橡塑技术与装备,2004,30(11):17-24.  
LI J X, XIE X H. The development and latest technology of mixer rotor[J]. China Rubber/Plastic Technology and Equipment, 2004, 30(11):17-24.
- [8] 汪传生,张磊,翟天剑,等. 不同初始相位角同步转子密炼机混炼流场的有限元模拟分析[J]. 橡胶工业,2019,66(6):471-474.  
WANG C S, ZHANG L, ZHAI T J, et al. Finite element simulation analysis on mixing flow field of mixer with synchronous rotor and different initial phase angle[J]. China Rubber Industry, 2019, 66(6):471-474.
- [9] 周英志,周毅. 橡塑密炼机的技术进展[J]. 橡塑技术与装备,2016,42(17):20-25.  
ZHOU Y Z, ZHOU Y. Technical progress of the rubber/plastic internal mixer[J]. China Rubber/Plastic Technology and Equipment, 2016,42(17):20-25.
- [10] 于清溪. 密闭式橡胶混炼机的技术现状及最近发展[J]. 橡塑技术与装备,2010,36(9):4-17.  
YU Q X. Current status and development of the technology of internal mixer [J]. China Rubber/Plastic Technology and Equipment, 2010,36(9):4-17.
- [11] 张海燕. 双转子连续混炼机转子结构的优化及混炼机理的研究[D]. 北京:北京化工大学,2009.  
ZHANG H Y. Optimization of rotor structure of twin-rotors continuous mixer and study of its mixing mechanism[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [12] 吴宗泽. 机械零件设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003:213-392.  
WU Z Z. Mechanical parts design manual[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2003:213-392.
- [13] 田会娜,金哲明. 四棱转子棱体设计及其结构特点评述[J]. 橡胶技术与装备,2004,30(4):48-53.  
TIAN H N, JIN Z M. Comment of 4-wing rotor design and its structure feature[J]. China Rubber/Plastic Technology and Equipment, 2004,30(4):48-53.
- [14] 刘会,陈泽中,张梦梦. 基于Moldflow分析的手套箱注塑模具设计[J]. 中国塑料,2013,27(12):98-102.  
LIU H, CHEN Z Z, ZHANG M M. Injection mold design of glove boxes based on moldflow analysis[J]. China Plastics, 2013, 27(12):98-102.
- [15] BRAVO V L, HRYMAK A N, WRIGHT J D. Study of particle trajectories, residence times and flow behavior in kneading discs of intermeshing co-rotating twin-screw extruders[J]. Polymer and Engineering Science, 2004, 40(4):779-793.

收稿日期:2020-11-13

## Design and Simulation Analysis of Four Edge Asynchronous Shear Rotor of Electromagnetic Dynamic Mixer

LIN Guangyi<sup>1,2</sup>, LYU Ningning<sup>1,2</sup>, AI Chongchong<sup>1,2</sup>

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Key Laboratory of Advanced Polymer Materials Manufacturing, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** The four edged asynchronous shear rotor of electromagnetic dynamic mixer was designed, and the three-dimensional mathematical model of the rotor under the condition of electromagnetic vibration was established. The flow field of the rotor was dynamically simulated and analyzed by using professional fluid software Polyflow, including pressure field, velocity field, shear rate distribution, viscosity distribution, mixing index distribution and concentration field. The results showed that, under the condition of electromagnetic vibration, the time to reach the maximum pressure, maximum velocity, maximum shear rate and maximum mass concentration in the rotor flow field was shortened, the viscosity at the convex edge of the rotor was very small, the viscosity at the smooth part of the rotor was large, and the mixing index was small. Thus, the rubber compound could be mixed quickly, the mixing efficiency was improved, and the mixing energy consumption was reduced.

**Key words:** electromagnetic dynamic mixer; four edge asynchronous shear rotor; electromagnetic vibration; flow field; dynamic simulation; mixing

### 专利3则

一种高强度橡胶材料及加工工艺 由安徽睿驰精密部件有限公司申请的专利(公布号 CN 111995804A, 公布日期 2020-11-27)“一种高强度橡胶材料及加工工艺”,涉及的橡胶材料配方为:丁苯橡胶 90~110,高耐磨炉黑 25~35,陶土 30~40,氧化锌 4~7,硬脂酸 0.5~1.5,环烷油 20~30,防老剂4010NA 1~3,石蜡 3~5,活性剂有机胺 0.15~0.2,硫黄 1.5~2,促进剂MBTS 1~1.5,促进剂TMTD 0.1~0.2。该橡胶材料具有优良的拉伸性能,并且耐高温,在高温下不易形变。

一种低硬度双组分加成型液体氟硅橡胶及其制备方法 由威海新元新材料有限公司和威海新元化工有限公司申请的专利(公布号 CN 111944319A, 公布日期 2020-11-17)“一种低硬度双组分加成型液体氟硅橡胶及其制备方法”,涉

及的液体氟硅橡胶由A和B两种组分按照质量比1:1混合而成。A组分配方为:氟硅橡胶 85~90,气相法白炭黑 15~25,铂金催化剂 0.5~1.5,耐热添加剂 0.5~1.5。B组分配方为:氟硅橡胶 70~75,气相法白炭黑 15~20,氟硅交联剂 15~20,抑制剂 0.1~0.5,耐热添加剂 0.5~1.5。该氟硅橡胶乙烯基的交联活性得到保证,耐油性能不受损害,流动性好,收缩率小,拉伸强度高,制备方法简单,成本低,可规模化生产。

一种自修复橡胶 由浙江工业大学申请的专利(公布号 CN 111875891A, 公布日期 2020-11-03)“一种自修复橡胶”,涉及的自修复橡胶配方为:丁基橡胶 60~120,聚异丁烯 140~160,添加剂 5~15,硫黄 0.1~0.5,促进剂 0.1~0.2。该自修复橡胶的自修复效率高,能够在若干秒内实现对破损部位的修复,且抗穿刺能力强;其制备简洁高效,能耗较低。

(本刊编辑部 赵 敏)