

密炼机混炼橡胶的三维流场瞬态模拟

滕 薇,许自成,田 明,杨海波

(北京化工大学 材料科学与工程学院,北京 100029)

摘要:采用密炼室真实几何形状,假设胶料全部充满,建立密炼机内非等温、非牛顿橡胶流体的三维有限元模型,数值模拟分析胶料的压力、速度、温度和剪切速率等流场参数分布。分析结果表明,转子棱顶间隙处存在着一个很大的压力梯度,楔入区胶料流向密炼室轴向中间位置,而背压区和棱顶处胶料流向相反,除了密炼室内壁附近胶料温度较高外,两个转子之间区域的胶料温度也较高。

关键词:密炼机;橡胶;流场;有限元分析

中图分类号:TQ330.4⁺3;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2012)10-0619-07

混炼是橡胶加工过程中决定橡胶制品性能的第 1 个也是极其重要的一个加工环节。密炼机作为加工橡胶广泛应用的混炼设备,其混炼性能的优劣直接影响胶料的使用性能。密炼机加工橡胶时的混炼机理极为复杂,但是橡胶仅在混炼初期以粘弹性固体形态存在,在其余阶段均以粘弹性流体形态存在^[1],在研究混炼后期橡胶的流场变化时,便可借助流体的流变理论对橡胶流体的流动机理进行研究。

近几年关于密炼机内橡胶流场的分析不多,一些学者^[2-4]仅对不同类型的密炼机的稳态流场进行了模拟,其结果显然难以准确说明真实的混炼情况。

本研究对密炼机转子初始相位角为 90°时的橡胶流体(混炼中后期)进行三维瞬态有限元模拟,分析转子在转速为 60 r·min⁻¹时旋转 180°相位角过程中胶料的压力场、速度场、轴向速度场以及温度场的分布变化,同时进行了 90 和 120 r·min⁻¹转速下的数值模拟计算,以期进一步完善当前的模拟分析结果。

1 模型的建立

1.1 物理模型

以本校的 SHR-10DY 型橡胶密炼机为原型

作者简介:滕薇(1985—),女,浙江绍兴人,北京化工大学在读硕士研究生,主要从事密炼机内橡胶材料的数值模拟计算研究。

建立左右转子模型(转子外部为胶料流体,内部为冷却水道),如图 1 所示。

两短棱和两长棱分别在转子一侧,通过有限元分析软件 ANSYS 中的 CFX 模块对模型进行数值计算,可得转子转动 180°过程中不同时刻橡胶流场的变化,进而通过分析流体在周向平面内沿不同轴向变化的流场分布,得到流体在混炼过程中的流动特性。

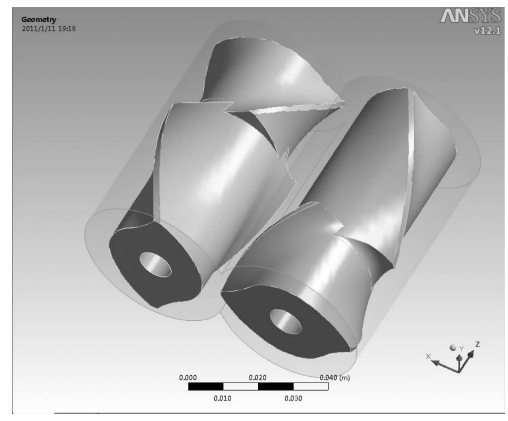


图 1 转子物理模型

1.2 有限元模型

根据物理模型建立有限元模型如图 2 所示。密炼机与转子间混炼区域比较复杂,在模拟过程中忽略一些复杂的边界条件设置,有针对性地研究流体的速度、压力和温度流场。具体简化如下:密炼室内流体和转子内圆柱形简易冷却水管内的冷却水流动状态假设为不可压缩层流,流体在密

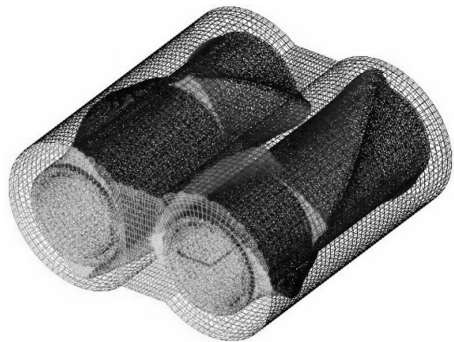


图2 转子有限元模型

炼室内为全充满状态,胶料在转子表面和密炼室壁表面均无滑移。

1.3 数学模型

数学模型由动量方程、能量方程、连续性方程和本构方程组成,对于前面的基本方程这里不再赘述,仅阐述建模过程中使用的本构模型。橡胶为假塑性流体,本研究采用 Bird-Carreau 模型描述其流变性能。

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{1-n}{2}}}$$

式中, μ 、 μ_0 和 μ_{∞} 分别为胶料的粘度、零切粘度和无穷剪切粘度(设为 4 500 Pa·s)和无穷剪切粘度(设为 10 800 Pa·s); $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; λ 为粘弹性特征时间(设为 10 s); n 为幂律指数(设为 0.23)。

本模型中材料参数设定如下:天然橡胶胶料密度为 0.913 Mg·m⁻³,摩尔质量为 250 kg·mol⁻¹,比热容为 1 903 J·(kg·°C)⁻¹。

1.4 边界条件

对于胶料在密炼室内全充满的简化模型,由于流体中不存在表面,胶料在转子表面是否产生滑移对计算结果影响不大,因此本模型假定胶料在转子表面是无滑移的。混炼室内压力场复杂,在压力条件设定中不设压力零点,模拟所得的压力场大小不反映真实压力场,仅通过比较压力大小分析流场压力变化规律。

采用 Dittus-Boelter 公式和换热系数公式进行计算。胶料的对流换热系数为 4 026.1 W·(m²·°C)⁻¹;冷却水初始温度为 20 °C,对流换热系数为 7 373.518 W·(m²·°C)⁻¹;转子材料为钢,热导率为 47 W·(m·°C)⁻¹,比热容为 420 J·(kg·°C)⁻¹。

2 数值计算结果与分析

为降低计算成本,设定模型的大小为实际密炼机尺寸的 1/2,转子长为 76 mm,取 z 轴方向 $z_1 \sim z_5$ 五个平面(见图 3,其中 z_3 位于转子中心处, z_1 与 z_5 、 z_2 与 z_4 分别关于 z_3 对称,分别距密炼室端壁 18,28,38,48 和 50 mm),在转速为 60 r·min⁻¹ 的条件下,对转子初始相位角为 90° 的胶料流动的速度场、压力场和温度场随转子 7 个相位角(1.8°,30°,60°,90°,120°,150°和 180°)的变化作系统分析(各流场分布图中深色区代表高值区,浅色区代表低值区)。另外,还对 3 种不同转速下胶料流动的速度场和轴向速度场进行模拟分析。

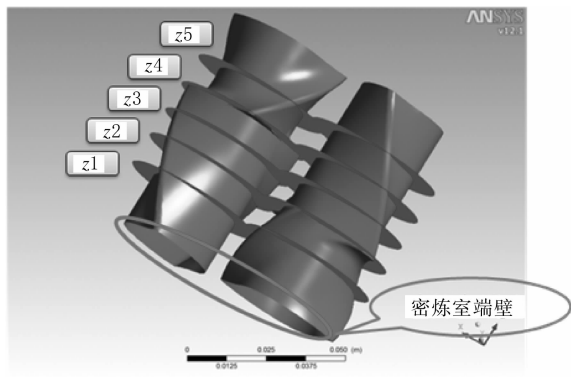


图3 转子流场分析示意

2.1 压力场

z_4 平面在 1.8°~180°七个相位角(从左到右、从上到下排序,下同)所对应的压力场如图 4 所示。

从图 4 可以看到存在低负压,这是前面提及的不设置压力边界条件带来的不真实压力值,可通过压力差进行分析。转子相位角为 1.8°时,密炼室内压力偏高,虽然模拟的是混炼后期粘弹性流体的流场,但在计算的初始阶段,流场需要一个建压过程。相位角增大到 90°时,压力降到最低,相位角在增大到 180°的过程中,压力回升,不过已比初始压力小得多,压力趋于稳定。

z_4 平面在 30°相位角长棱间隙处压力分布的局部放大如图 5 所示。

从图 5 可以看到,与以往稳态分析有所不同的是,本计算所得的压力场最高值仅出现在转子楔入区前端靠近棱顶间隙处的位置,最低值区出

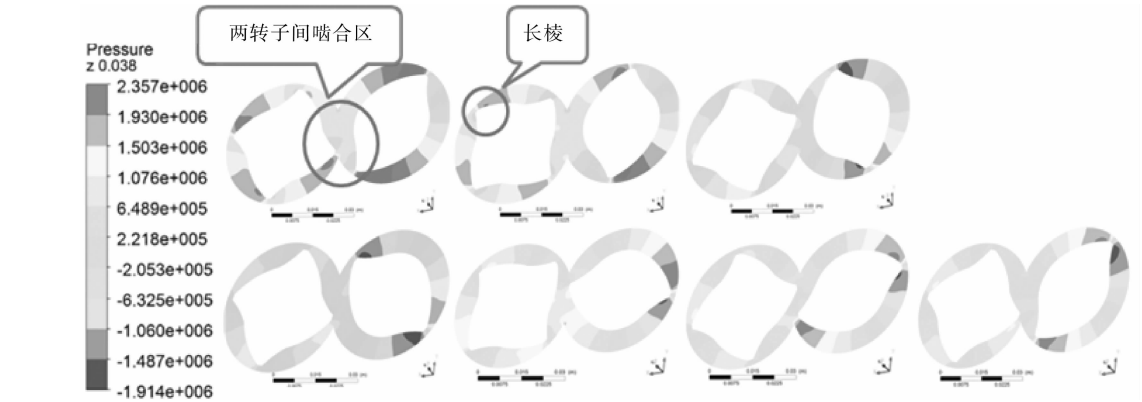


图 4 z_4 平面 7 个不同相位角对应的压力场

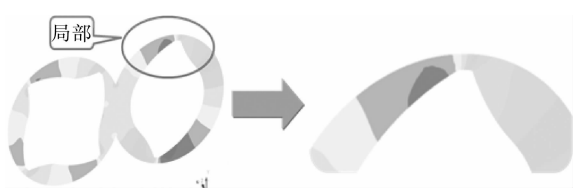


图 5 30°相位角时 z_4 平面长棱间隙处
压力分布的局部放大

现在背压区,连接前后两侧的 2 mm 间隙内的压力梯度很大,使压力呈现出由高到低的过渡,不至于突变。

人们最关注的是两转子间啮合区的压力场变化情况,相位角为 120°时,右转子的长棱转入此剪切区形成高压,左转子啮合区产生低压,这一显著的高低压差引起的压力流会驱使胶料在右转子的剪切推动下从右密炼室转入左密炼室从而发生混合。推测 z_2 平面在此相位角时胶料也会在两密炼室内转移,只不过移动方向相反。120°相位角时 z_2 和 z_4 平面压力场对比如图 6 所示。

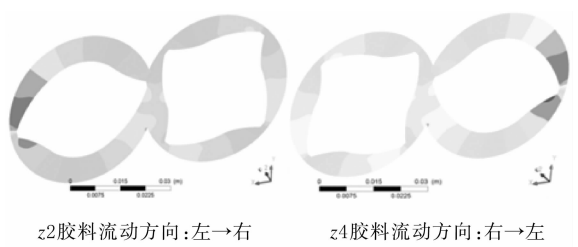


图 6 120°相位角时 z_2 与 z_4 平面压力场对比

从图 6 可以看出,所得结果与预测相同,由此便可推测,在 120°和 300°相位角附近,胶料易在长棱推动下转入另一密炼室的啮合面处,即每转一圈,两密炼室长短棱啮合处发生两次胶料交换。

180°相位角时 $z_1 \sim z_5$ 平面压力场如图 7 所示。

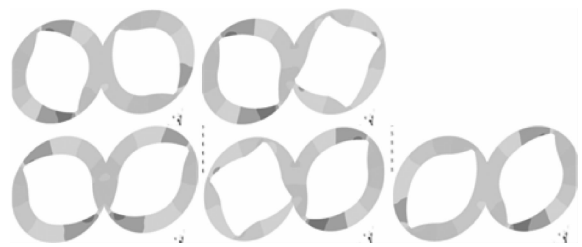


图 7 180°相位角时 $z_1 \sim z_5$ 平面压力场

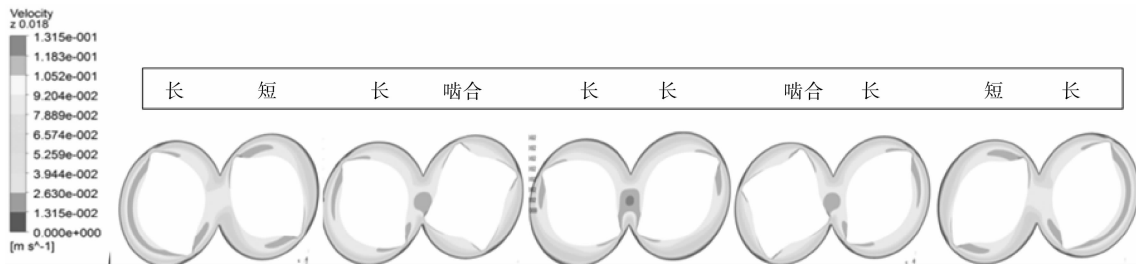
从图 7 可以看出,沿轴向方向, z_1 和 z_5 平面中心啮合区压力最高,越远离密炼室端壁,压力越低。

2.2 速度场

1.8°相位角时 $z_1 \sim z_5$ 平面速度场如图 8 所示。

从图 8 可以观察到速度场的分布规律,沿轴向越靠近长短棱啮合面处的流体(除啮合区外)速度越低,这与图 7 所示流体内压力场规律相一致, z_2 和 z_4 平面处压差较小,不易产生压力流。长棱附近的胶料速度比短棱附近的要高,通过对转子形状进行力学分析也可以推断出这一结果:长短棱螺旋角分别为 30°和 45°,旋转时长棱所带给胶料的周向剪切速度(水平方向和垂直方向)比短棱的高,提供的轴向剪切速度比短棱的低,然而胶料运动过程中的轴向速度比周向速度低得多,周向速度占优的结果致使长棱附近的速​​度高。

在转子侵入区和背压区都有同样高的速度区。这一现象可由流变理论解析,侵入区胶料主要受剪切力作用,胶料因剪切力产生拖曳流,此区

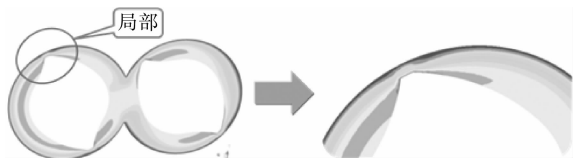
图8 1.8°相位角时 $z_1 \sim z_5$ 平面速度场

拖曳流为主导,背压区压力通常为流场内最小,这部分胶料的流动以压力流为主导,不同区域内不同的主导流动方式使胶料无论在楔入区还是背压区都有较高速度。

还注意到,速度最大区域的位置为转子回转半径最大处,可考虑改进转子构型,增大该高速区有利于混炼优化。

在两转子啮合区中心处空间大,压力易平衡,当转子棱顶不转入此区时胶料难以有较大速度。

1.8°相位角时 z_1 平面速度场棱顶处局部放大如图9所示。

图9 1.8°相位角时 z_1 平面速度场棱顶处局部放大

从图9可以看出,与转子棱根径处的流场不同,转子棱顶与密炼室壁间的2 mm间隙处仅有约1/3部分有流体流动,这与实际情况有较大差异,原因在于建模初期室壁处的壁面边界条件简化对该处流体的速度分布影响过大,无法完全真实反映实际情况,这是简化模型带来的影响。

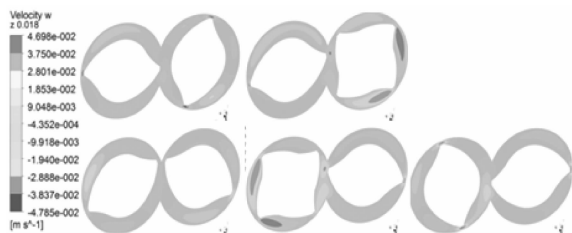
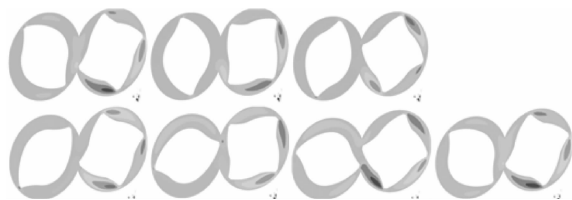
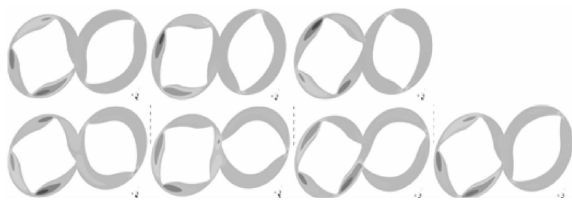
2.3 轴向速度场

120°相位角时 $z_1 \sim z_5$ 平面轴向速度场如图10所示(深色区代表正向轴向流动,浅色区代表逆向轴向流动)。

从图10可以看出,流体的轴向速度方向受转子螺旋线方向影响,转子棱楔入区和背压区处的轴向速度显著不同,转子棱顶间隙处的轴向速度方向与背压区相同。

z_2 和 z_4 平面7个不同相位角对应的轴向速度场分别如图11和12所示。

从图11和12可以看出, z_2 平面当左转子长

图10 120°相位角时 $z_1 \sim z_5$ 平面轴向速度场图11 z_2 平面7个不同相位角对应的轴向速度场图12 z_4 平面7个不同相位角对应的轴向速度场

棱转入甚至靠近此剪切区时能造成强烈的轴向流动,剪切区的正向流动居多,而 z_4 平面两转子间剪切区产生逆向流动为多。综合看,中心剪切区胶料流动是有效的。流体的流动趋势如图13所示。理想流体流动如图14所示。

分析图13所示轴向速度场分布形成的原因,已知楔入区轴向流动由转子棱对胶料推力方向决定,至于为何棱顶间隙处和背压区的轴向流动方向与楔入区是相反的,未有人讨论过。通过前面的压力场分析可知棱顶处的压力梯度变化大,这一变化沿着棱顶处是大致相同的,压力场在棱顶处建立了多个等压面,使胶料沿垂直于等压面的棱线方向流动,流动速度分量造成了棱顶轴向速

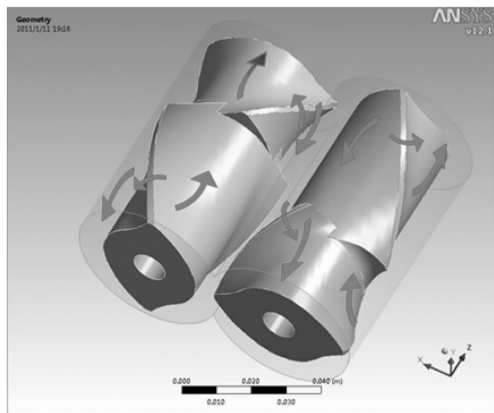


图 13 转子棱顶间隙及棱两端胶料流体的流动方向

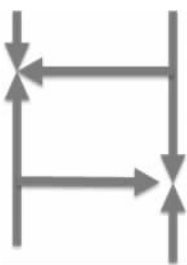


图 14 理想流体流动示意

度与楔入区轴向速度相反。从楔入区到背压区,胶料流动的主导作用从拖曳流向压力流转化。通过轴向速度场分布可以看出,中心剪切区的轴向流动更易在长短棱转子啮合面处发生,啮合面处任意转子棱一侧的流动方向与相邻棱一侧的流动方向相同,增强了胶料在此类截面附近流动方向的统一性,此处的正逆轴向流动尤为显著。然而,本模型中转子棱间隙和背压处胶料流动的方向与图 14 所示理想的流动方向相异,易向密炼室壁两端移动,说明本密炼机转子构型存在不足。

2.4 温度场

z_4 平面 7 个不同相位角对应的温度场如图 15 所示。

从图 15 可以看出,在转子相位角改变过程中,温度最多只升高了约 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,这半圈所花费的时间约为 0.5 s 。图 15 所示右转子根径处温度最低,说明转子内部的冷却水管能对根径附近的胶料进行降温,随着转子旋转,转子根径附近的胶料温度始终是最低的,而远离冷却水管道结构的密炼室壁处胶料由于既无制冷设施又受转子的高剪切作用而温度最高,说明在密炼室壁外加上冷却水套是极其必要的,控制温度缓慢升高有利于胶

料在密炼室内传热,避免胶料焦烧。

180° 相位角时, $z_1 \sim z_5$ 平面温度场如图 16 所示。

从图 16 可以看出,位于密炼室两端的 z_1 和 z_5 两平面处的温度最高,这与前面轴向速度场分析的结果相一致,胶料倾向于向室壁两端移动,造成堆积,温度易于升高成了必然趋势(也与 180° 相位角时的压力场分布相一致,如前所述,两端附近的压差比中心要大,更易形成压力流)。

2.5 3 种不同转速下胶料流动的速度场和轴向速度场

轴向速度高于某值的流体体积及速度高于某值的流体体积与轴向速度的关系曲线分别如图 17 和 18 所示。

从图 17 可以看出,无论转速多大,流场内拥有一定轴向速度的流体体积是等量的,并不因转速提高而增大,说明流体能否获得轴向速度的关键因素在于转子螺棱,棱的构型若不改变,就无法改变胶料的轴向流动。

另外,转速为 60 和 $90\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,流场内拥有高于某一轴向速度的流体体积基本不随转子相位角的变化而改变,而对于 $120\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速,不同旋转相位角下,轴向速度高于 $0.05\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流体体积在两相位角下是近乎相等的,轴向速度在 $0 \sim 0.05\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的流体体积随着相位角的增大而增大,说明相位角的变化对高轴向速度流体的影响不大,但是对低轴向速度流体有显著影响,会使低速流体部分的轴向速度有较大提高。

图 18 所示曲线趋势与图 17 相似,对于 $120\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速,相位角增大时,流体流动速度是不断提高的,而对于转速为 60 和 $90\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转子流场,速度是基本不变的。这说明胶料在转子 $120\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的高速剪切作用下更易在转子表面发生漏流,使流体流动滞后。

这一点同时也说明转子表面的胶料是会发生滑移的。

3 结论

密炼机转子棱附近高压区出现在楔入区前端,棱顶间隙处压力有一最大至最小的过渡,每转

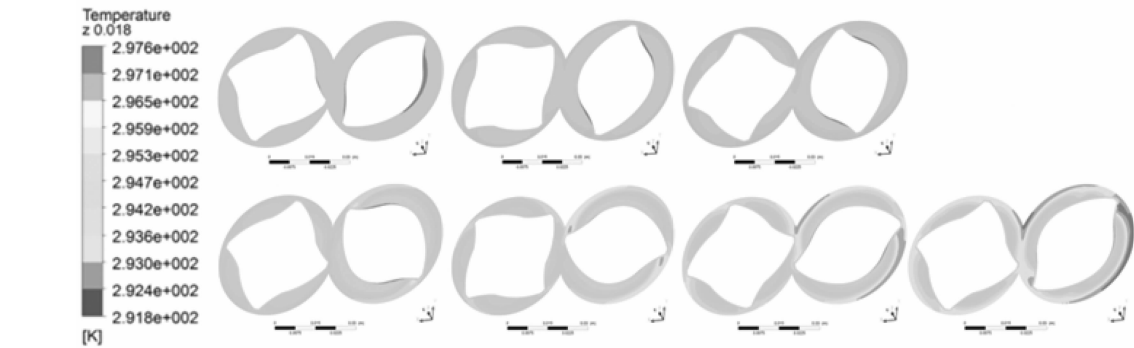


图 15 z4 平面 7 个不同相位角对应的温度场

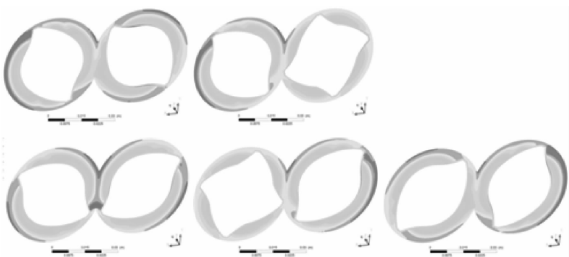
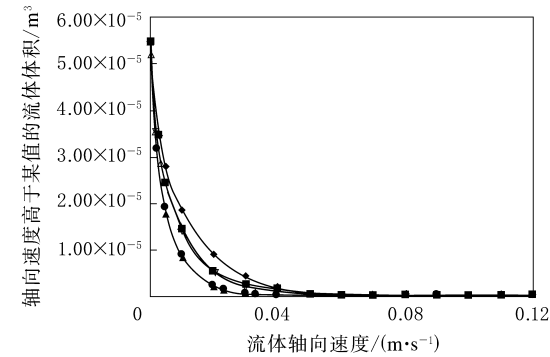


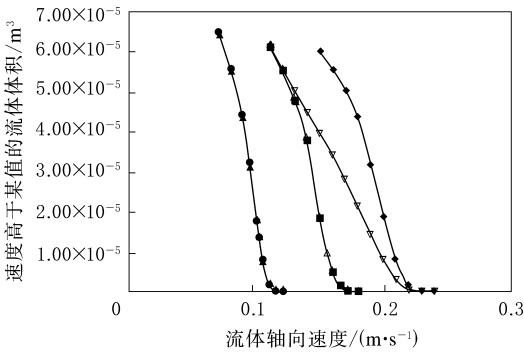
图 16 180°相位角时 z1~z5 平面温度场



转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)/相位角/($^\circ$): $\blacktriangle$ —60/30; $\blacksquare$ —90/30;
 $\blacklozenge$ —120/30; $\bullet$ —60/5; ∇ —90/5; $\triangle$ —120/5。

图 17 轴向速度高于某值的流体体积与轴向速度的关系曲线

一圈,胶料会在长短棱啮合处附近发生左右密炼室间的胶料交换混合。长棱附近胶料速度高于短棱附近,密炼室内转子回转半径最大处易产生均一速度区。本模型转子棱楔入区处轴向速度方向与背压区及棱顶间隙处相反,中心剪切处胶料轴向流动性好,但转子易造成胶料在室壁端堆积。



注同图 17。

图 18 速度高于某值的流体体积与轴向速度的关系曲线
转子棱顶及密炼室壁处易升温,因此在转子内和密炼室壁外添加强制冷却系统是有必要的,可以防止温度过高引起胶料焦烧。在模拟过程中,当转子转速设为 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上时,流场内拥有一定轴向速度的流体体积是等量的,转速提高到 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,转子表面的胶料发生漏流。

参考文献:

[1] 张海,麦均洪,贺德化,等. 密炼机中橡胶混炼的流变理论及应用[J]. 橡胶工业,2001,48(5):292-299.
[2] 汪传生,田浩,边慧光. 密炼机四棱同步转子三维温度场分析[J]. 橡胶工业,2008,55(8):495-498.
[3] 汪传生,张德伟. 剪切啮合型转子混炼区域流场分析[J]. 橡胶工业,2009,56(11):689-692.
[4] 汪传生,侯垣圻,李真. 密炼机同步转子流场和异步转子流场的分析[J]. 橡塑技术与装备,2010,36(1):10-13.

收稿日期:2012-04-01

3D Transient Flow Field Simulation of Rubber Melt in Internal Mixer

TENG Wei, XU Zi-cheng, TIAN Ming, YANG Hai-bo
(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A 3D finite element model of the non-isothermal non-Newton rubber melt in internal

mixer was built, using the real geometry of mixing chamber and assuming the chamber was completely filled. From the finite element simulation results the distribution of flow field parameters such as pressure, velocity, temperature, shear rate and so on was analyzed. It could be concluded that, large pressure gradient existed in the gap region between the rotor tip and internal wall of the mixing chamber; rubber melt in the wedging region flew into the middle area between the rotors; the flow direction of the rubber melt in the back pressure region was opposite to that in the gap region; and the temperature of the rubber melt in the gap region and in the area between the rotors was higher.

Key words: internal mixer; rubber; flow field; finite element analysis

国内最大顺丁橡胶生产基地诞生

中图分类号: TQ333.2 文献标志码: D

截至 2012 年 8 月 20 日, 大庆石油化工集团有限公司(以下简称大庆石化)年产 120 万 t 乙烯改扩建工程的主体生产装置之一的年产 8 万 t 顺丁橡胶装置已投运 17 天, 累计生产正品顺丁橡胶 1 564 t。至此, 大庆石化顺丁橡胶年产能已达到 16 万 t, 成为国内最大的顺丁橡胶生产基地。

溶液聚合技术是大庆石化在镍系溶液聚合技术的基础上改造形成的自有技术, 在催化剂组成和陈化以及溶剂和溶剂回收方面都优于日本工艺。该技术以 1,3-丁二烯为单体, 以炼油厂重整抽余油的 60~90 ℃馏分为溶剂, 以环烷镍酸、三异丁基铝和三氟化硼乙醚络合物为催化剂进行溶液聚合。生产过程主要由原料储存、化学药剂配制、连续聚合、凝聚、干燥、成型、溶剂及丁二烯回收等组成。

经过多次技术改进, 目前大庆石化镍系溶液聚合技术已形成了自己的技术特色, 引起了国外同行的关注。在配制聚合单元, 增加了催化剂预混生产新工艺, 改变了催化剂的陈化和进料方式, 提高了催化剂的利用效率、活性和稳定性。在凝聚单元, 增加了热泵系统和碱洗塔, 以回收凝聚釜顶汽提气热能, 降低蒸汽消耗, 减少溶剂对后路系统的腐蚀; 将凝聚方式由溢流差压式操作改为泵送差压式操作, 有利于回收溶剂油, 节能降耗; 增设预凝聚设备, 减少溶剂油和蒸汽消耗。在溶剂回收单元, 优化了操作流

程, 并增加了氮气回收系统, 进一步节省了能耗和物耗。此外还采用高效塔盘, 提高了回收系统的处理能力和分离效率。

目前世界顺丁橡胶装置大部分采用溶液聚合法, 采用的溶剂有抽余油、苯、甲苯、庚烷、正己烷和环己烷等, 采用的催化剂有钴、钛、锂、镍和稀土钨系。我国顺丁橡胶以抽余油为溶剂, 环烷酸镍、三氟化硼乙醚络合物和三异丁基铝为催化剂, 后又实现了钨系稀土顺丁橡胶的工业化生产。

(摘自《中国化工报》, 2012-08-23)

濮阳 5 000 t 异戊橡胶生产线投运

中图分类号: TQ333.3 文献标志码: D

濮阳林氏化学新材料股份有限公司建设的年产能为 5 000 t 的聚异戊二烯橡胶生产线日前顺利投产。该生产线是承担的河南省重大科技专项医用异戊橡胶材料及制品关键技术研究项目的组成部分。

据介绍, 该项目取得 4 项有关聚异戊二烯发明专利, 启动了国内首条锂系催化体系医用异戊橡胶生产线及首条聚异戊二烯胶乳及手术手套生产线建设工作, 可年产 5 000 t 异戊橡胶、8 000 t 聚异戊二烯胶乳、1.5 亿副手术手套。

目前, 产能为 5 000 t 的异戊橡胶生产线已经投入生产, 年产 1.5 亿副手套生产线已投产 1 条, 第 2 条生产线正在调试中, 不久也可投入生产。

(摘自《中国化工报》, 2012-08-14)