

基于 Polyflow 的密炼机六棱同步转子流场的三维动态模拟研究

汪传生, 张 萌*

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:建立密炼机六棱同步转子的物理、数学和有限元模型,运用有限元分析软件 Polyflow 对其混炼流场进行三维动态模拟,分析混炼过程胶料压力场、速度场、剪切速率场、粘度场和混合指数分布。结果表明:在六棱同步转子推进面存在一个高压区域,而在棱的背面存在一个低压区域,对胶料的分散有利;在胶料流动过程中,在转子之间主要是剪切和拉伸流动行为,而在其他区域则以剪切流动为主。

关键词:密炼机;六棱同步转子;流场;有限元分析

中图分类号:TQ330.4+4;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2014)04-0236-05

密炼机胶料混炼是一个相当复杂的过程,在试验中对密炼机转子流场内的物料流动和混炼特点进行描述和定量分析几乎是无法实现的,因此需要运用模拟分析软件进行研究,从而了解密炼机复杂的混料过程。本研究运用有限元分析软件 Polyflow 对密炼机六棱同步转子的流场进行三维动态模拟,并分析其混炼过程中胶料的压力场、速度场、剪切速率场、粘度场和混合指数分布,以期对密炼机设计和混炼生产提供参考。

1 模型构建

1.1 物理模型

密炼机内的流场由密炼室内壁和转子外表面之间的空隙组成,六棱同步转子以一定的速度在密炼室内相对回转,胶料首先被压砣压入密炼室,最后被转子推出密炼室。混炼过程中,胶料在密炼室内壁和转子表面形成的狭小空隙内流动,由于转子的几何形状非常复杂,因此由密炼室内壁与转子表面形成的混炼区流场形状更为复杂。

利用 Pro/E 软件构建密炼机六棱同步转子的三维实体造型,其物理模型的结构尺寸与试验

用 1.7 L 密炼机实际尺寸完全一样,如图 1 所示。六棱同步转子由 3 条长棱和 3 条短棱组成,与二棱和四棱转子相比,棱数多,提高了转子的吃料能力,而且胶料在相同时间内通过转子棱顶与密炼室内壁间隙的次数增多,胶料受到的剪切次数增加,相当于增大了剪切应力和剪切速率,有利于提高转子对胶料的剪切和分散效果。

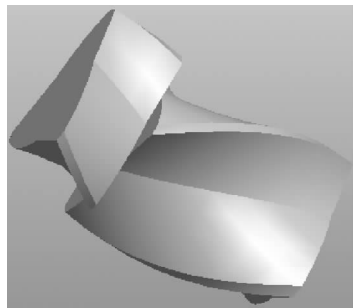


图 1 六棱同步转子的实体造型

1.2 数学模型

考虑到流场几何形状、物料性质、流动状态和加工条件等因素造成的流场复杂性,为便于研究,做以下假设^[1]:①胶料为幂律流体;②胶料雷诺数较小,可认为流体流动为层流;③惯性力和重力等远小于粘滞力,忽略不计;④胶料为不可压缩流体;⑤胶料在流场壁面上无滑移;⑥胶料在流场内是完全充满的;⑦流场为等温流场,且胶料物性参数不随温度变化而变化。

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学研究工作。

* 通信联系人

为了既描述在高剪切速率下的假塑性流体的流变性质,又描述在低剪切速率下牛顿流体的流变性质,采用 Carreau 模型:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}$$

式中 η 、 η_{∞} 和 η_0 ——剪切粘度、无穷剪切粘度和初始粘度(零剪切速率时的粘度);

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率;

λ ——胶料的粘弹性特征时间;

n ——非牛顿指数。

本研究在 110 °C 下测量混炼胶得到下述参数: $\eta_0 = 1 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 10 \text{ s}$, $\eta_{\infty} = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $n = -0.385$, 胶料密度(ρ)为 $1.066 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.3 有限元模型

密炼室内的空间减去两转子的体积形成胶料的流场,为更好地进行对比研究,对六棱同步转子采用较高的疏密质量进行有限元网格划分。图 2 所示为胶料流场的三维网格模型。

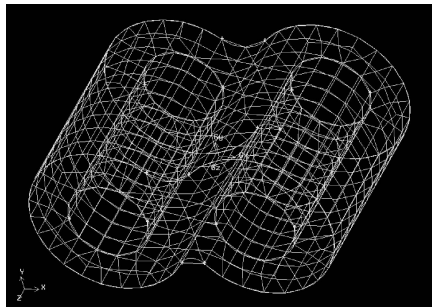


图 2 六棱同步转子流场网格模型

1.4 边界条件

本研究主要根据流动时壁面无滑移效应设定边界条件:①设定流道各点的压力值相等;②转子外表面无滑移,胶料的速度与转子边界的线速度相同;③密炼室内壁面无滑移,即流体外表面的速度为零;④转子表面的速度随着转子转速的变化而变化;⑤转子转速比为 1:1。

2 结果与分析

为了更好地了解六棱同步转子的混炼过程,本研究主要模拟其混炼胶料的压力场、速度场、剪切速率场、粘度场和混合指数分布。由于螺棱交汇点附近的流场是密炼机转子混炼特性最具有代表性的部分,因此重点选取转子轴向 +0.053 和

-0.053 m 以及转子中间平面 3 个区域,分析六棱同步转子的混炼特性。选取平面 1-1, 2-2 和 3-3 分别对应截面 +0.053, 0 和 -0.053 m, 如图 3 所示。

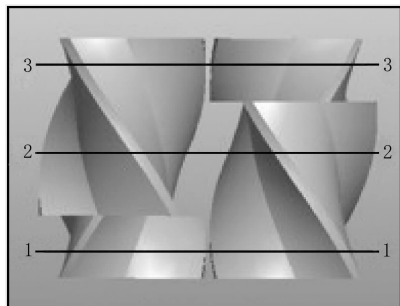


图 3 轴向截面选取示意

2.1 压力场

在研究六棱同步转子流场的压力场时,选取转子分别转 0.4 和 0.7 s 时的压力分布研究流场的压力分布规律,如图 4 和 5 所示。

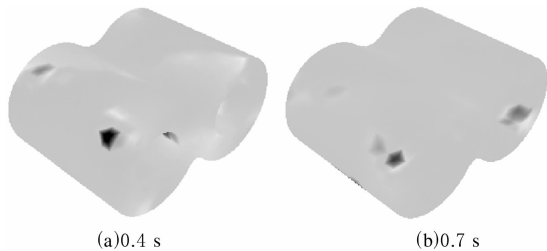


图 4 六棱同步转子流场的整体压力分布

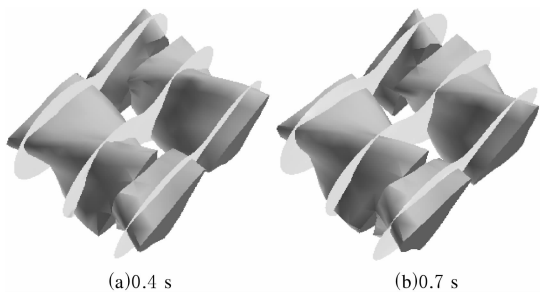


图 5 轴向 3 个截面的压力分布

从图 4 和 5 可以看出,在六棱同步转子流场中,转子棱推进面存在一个高压区域,其最高压力出现在转子棱峰顶部,与之相反的是在棱的背面存在一个低压区域,因此棱的两面存在高压差。高压差所致压力流会产生较大的拉伸应变速率,这对胶料的断裂和破碎非常有利,也就是对胶料和小料的分散混合有很好的作用。

2.2 速度场

在研究六棱同步转子流场的速度分布时,选取转子分别转 0.4 和 0.7 s 时的速度矢量分布研究流场的速度分布规律,如图 6 和 7 所示。

从图 6 可以看出,在密炼机混炼时,随着转子

的转动,内部流体有 3 种流动状态:混炼腔内随转子转动的轴向运动、两转子交汇区的交换运动以及沿转子的轴向运动。其中,每个混炼腔体中随着转子转动产生的轴向运动是胶料的主要运动形式。

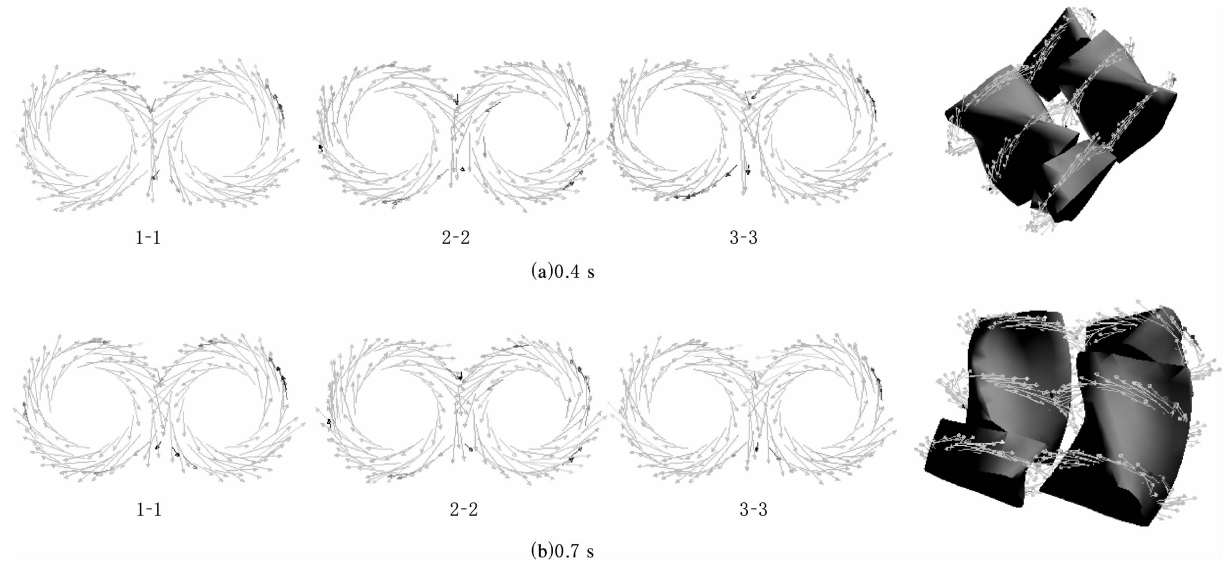


图 6 轴向截面速度矢量

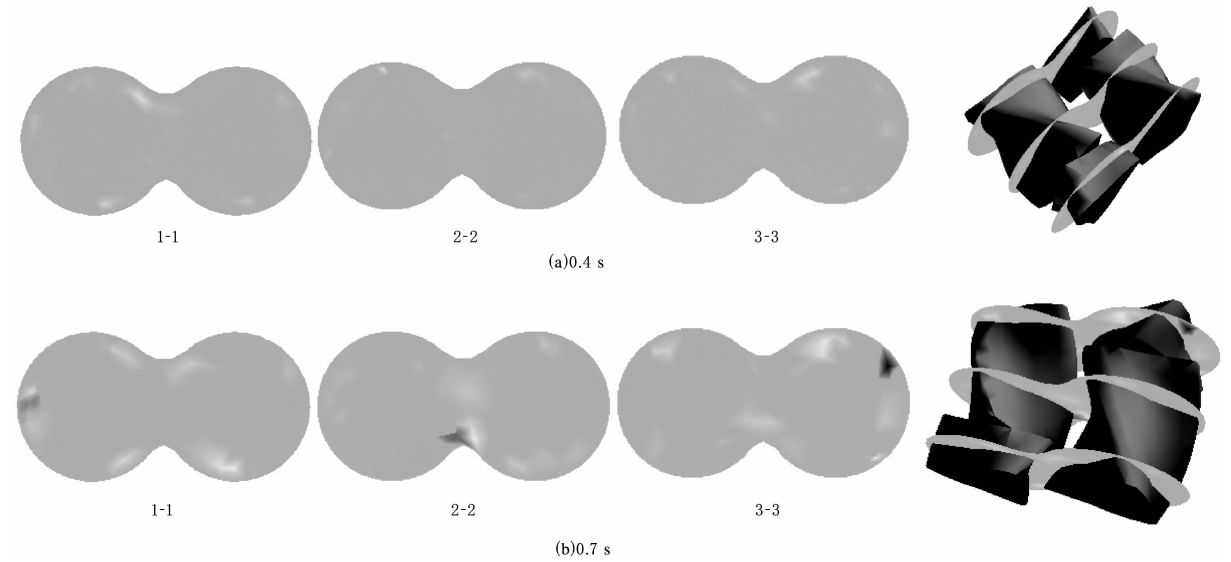


图 7 轴向截面 z 向速度分布

从图 7 可以看出,轴向运动的速度最大值仍然出现在转子的棱峰位置,而存在的正负值则表示轴向运动方向的不同,这也说明该区域内胶料存在返混作用,有利于提高密炼机的分散混合效果和轴向混合特性。

2.3 剪切速率场

在研究六棱同步转子流场的剪切速率分布时,选取转子分别转 0.4 和 0.7 s 时的剪切速率分布研究流场的剪切速率分布规律,如图 8 和 9 所示。

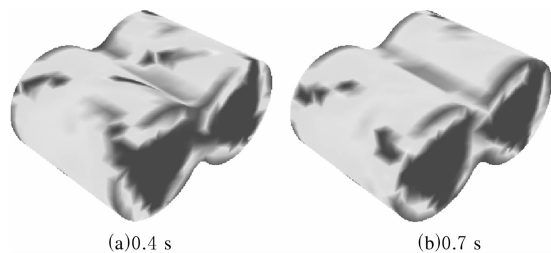


图 8 六棱同步转子流场的剪切速率分布

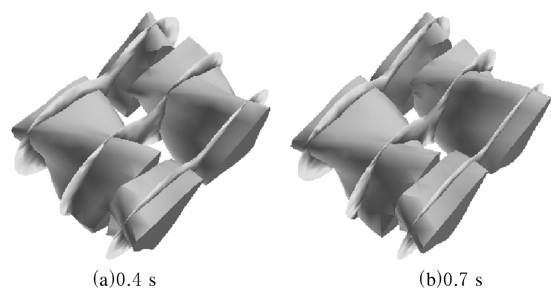


图 9 轴向截面的剪切速率分布

从图 8 和 9 可以看出,转子棱峰与密炼室内壁的缝隙很小,棱角处产生的剪切速率很大,而在转子基圆附近速度梯度小,因而剪切速率很小。

由不同时刻、不同截面上的剪切速率分布可知,剪切速率的分布以转子轴心为圆心,近似为同心圆分布,转子棱峰位置的剪切速率最大;越靠近转子基圆,剪切速率越小;粘附在转子表面的胶料的剪切速率最小,这是由转子的拖曳作用造成的。在棱峰附近的剪切速率最大,但是其位置会随着转子的转动不断改变,使最大剪切应力作用在轴向不同胶料上。密炼机的这种轴向混合能力有利于物料在密炼室的分散与分布。

2.4 粘度场

在研究六棱同步转子流场的粘度分布时,选取转子分别转 0.4 和 0.7 s 时的粘度分布研究流场的粘度分布规律,如图 10 和 11 所示。

从图 10 和 11 可以看出,在转子棱峰处的粘

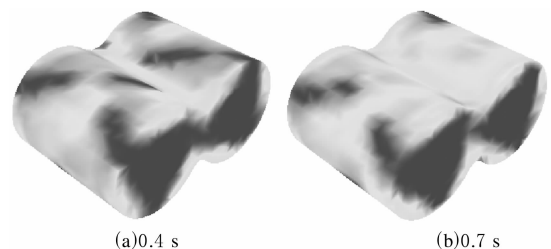


图 10 六棱同步转子流场的粘度分布

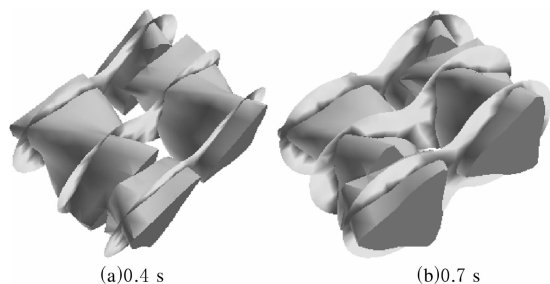


图 11 轴向截面的粘度分布

度几乎为零,而在转子比较平缓的区域粘度变大,也就是以转子棱峰为中心粘度逐渐增大。

由不同时刻、不同截面上的粘度分布可知,粘度的等值线分布以转子的棱峰为起点,向四周呈梯度减小。在转子棱的中心对称面附近粘度值最大,这是由于棱峰处剪切速率大,剪切应力较高,使胶料由于剪切而变稀,而在转子棱的中心对称面区域面积大,胶料流动速度慢;粘度最大的区域并没有出现在基圆表面则是由转子的拖曳作用造成的。

2.5 混合指数分布

在研究六棱同步转子流场的混合指数分布时,只选取转子转过不同时刻(0.1~0.6 s)在轴向截面 2-2 上的混合指数分布研究流场的混合指数分布规律,如图 12 所示。

从图 12 可以看出,由于胶料的不可压缩性,当受到转子棱的挤压时,胶料被迫从空隙小的地方往空隙大的地方流动,这个挤压流动的过程也是剪切和拉伸的过程。研究表明,拉伸变形对分散混合是非常有利的,特别是对具有高粘度比的分散混合。也就是说,在整个胶料的混合过程中,由于转子啮合区域体积在不断变化,胶料在其中不断被挤压、拉伸和剪切,对胶料的分散混合尤为有利。

3 结论

通过对六棱同步转子流场模拟分析,可以得出以下结论。

(1)六棱同步转子流场中,在转子长棱推进面存在一个高压区域,而在棱的背面存在一个低压区域。在高压区的挤压完成对胶料的剪切与拉伸,实现胶料的分散与塑炼;在低压区的紊乱流动实现对物料的分布混合。

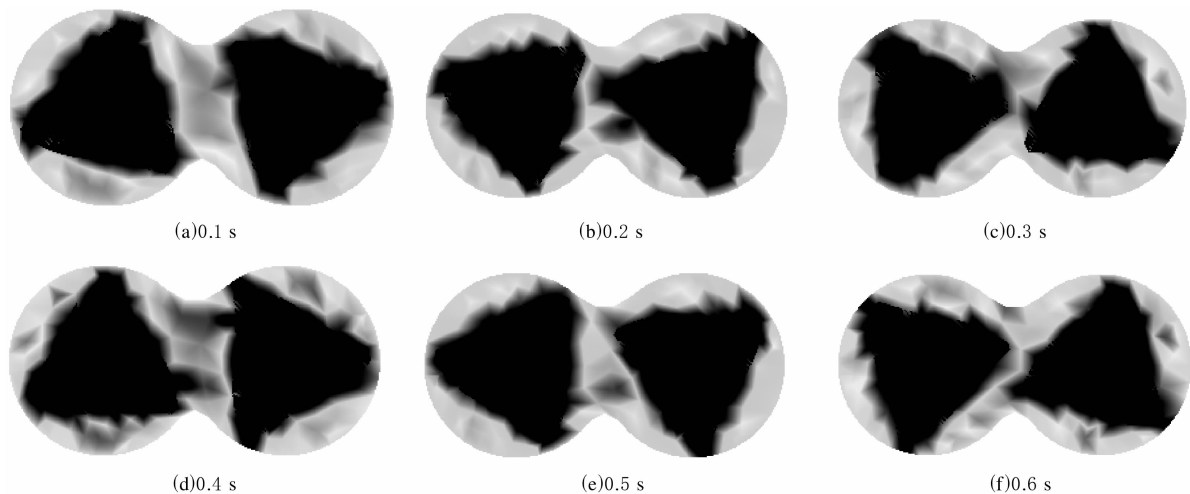


图 12 轴向截面 2-2 的混合指数分布

(2) 转子棱峰与密炼室狭小的缝隙形成高压，促进胶料的轴向运动，对胶料的分布有利。

(3) 在转子棱峰与密炼室内壁之间的区域对胶料既有剪切行为又有拉伸作用。

(4) 粘度与转子剪切速率之间呈反比关系，剪切速率越高，粘度越低，这是由于剪切变稀的行为有利于胶料流动，而在剪切速率越低的位置粘度越高，不利于胶料流动。

(5) 通过对混合指数的分析发现，胶料在转子的啮合区域不断地被挤压、拉伸和剪切，对胶料的分散混合尤为有利。

参考文献：

- [1] 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.

收稿日期: 2013-10-17

Dynamic Simulation of 3D Fluid Field Based on Polyflow for Six-wing Synchronous Mixer Rotor

WANG Chuan-sheng, ZHANG Meng

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

Abstract: The physical, mathematical and finite element analysis (FEA) models for the six-wing synchronous rotors in internal mixer were established, and the pressure field, velocity field, shear rate field, viscosity field and the mixed exponential distribution on its 3D fluid field dynamic simulation were computed by FEA software Polyflow. The results showed that there was a high-pressure area on the front surface of six-wing synchronous rotors, and there was a low-pressure area on the back surface, which were beneficial to the distribution of compound. Shear flow and extension flow were main processes between the rotors, while shear flow was main process in other areas.

Key words: mixer; six-wing synchronous rotors; fluid field; finite element analysis

欢迎订阅 2014 年《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》杂志