

挤出机喂料段动态流场分析

吕炜帅, 刘红彬

(天津赛象科技股份有限公司, 天津 300384)

摘要:运用专业粘弹性动态流体模拟软件 Polyflow 对 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆挤出过程中喂料段混炼 1 s 内的瞬态流场进行模拟和分析。结果表明:喂料段采用双层螺旋结构的螺杆,剪切速率分布更广,能够增强螺杆对胶料的作用,提高螺杆的塑化和混炼能力;混炼过程中胶料被反复拉伸并存在返混现象,可获得良好的混合效果。

关键词:挤出机;喂料段;动态流场;动态模拟

中图分类号: TQ330.6+4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8171(2015)01-0050-07

在聚合物加工领域中,挤出成型是一种非常重要的加工手段,挤出机又是其中的关键设备。螺杆是挤出机的核心零件,能够完成聚合物的塑化、混炼和输送^[1]。聚合物在成型加工过程中会表现出较为复杂的粘弹性,同时伴有热效应。而熔体的流动非常复杂,传统的研究方法为数学解析和实验研究,但都具有一定的局限性和经验性,而且设计周期长,成本高,而数值模拟技术具有明显的优势^[2]。近年来,针对单螺杆和双螺杆挤出机已经有了广泛的实验和数值模拟研究^[3-5]。伴随着计算机技术和数值分析求解技术的不断发展,在 20 世纪 70 年代出现了聚合物成型加工数值模拟技术,80 年代就实现了商业化使用,到现在已得到了广泛的应用和发展。当前,我国聚合物成型加工工艺还比较落后,尤其是成型设备的设计制造与国际先进水平有较大的差距。

Polyflow 软件是基于有限元法的计算流体动力学(CFD)软件,专门用于粘弹性材料的流动仿真^[6]。Polyflow 软件在成型设备和成型模具的研发、设计以及成型工艺参数优化中的广泛应用,能有效缩短研发、设计、生产周期,提高产品质量,降低生产成本,从而有助于推动我国聚合物工业的快速发展。

本研究运用专业粘弹性动态流体模拟软件 Polyflow 对 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆挤出过程中

喂料段混炼 1 s 得到的瞬态流场模型模拟结果进行分析,以期对螺杆结构的优化设计提供理论依据。

1 模型的建立

$\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆如图 1 所示,对其转动 1 s 的流场进行动态模拟,并从中选取 4 个时间点,探讨喂料段流场变化情况。在模拟前,首先建立相应的有限元模型,即相应的物理模型和数学模型。



图 1 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆

1.1 物理模型的建立

本研究采用 Solidworks 软件对螺杆及流场进行结构设计。选取 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆,喂料段由两部分组成(见图 2),总长为 783 mm,内径为 124 mm,第 1 段长度为 350 mm,主螺纹外径变小,螺棱变宽,导程为 340 mm,在主螺纹上增加 6 对对称分布的翻胶螺纹,导程为 660 mm;第 2 段长度为 433 mm,导程为 280 mm。螺杆喂料段装配体模型如图 3 所示,螺杆喂料段以及流场的网格实体模型如图 4 所示。

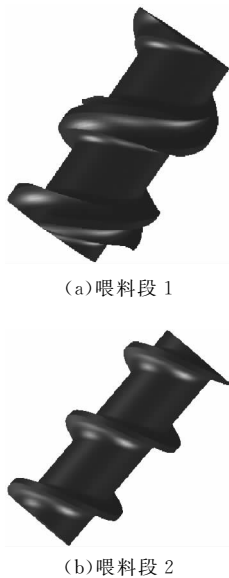
图 2 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆喂料段结构示意图

图 3 螺杆喂料段装配体模型

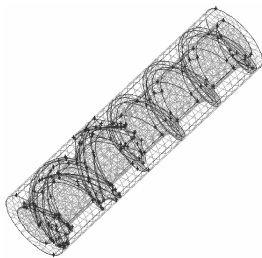


图 4 螺杆喂料段以及流场的网格实体模型

1.2 数学模型的建立

在进行三维计算时,考虑到流场的几何形状、物料性质、流动状态、加工条件等因素造成的流场复杂性,同时流动过程能满足工程的近似要求,做以下基本假设^[7]:

- (1)物料完全充满整个流道;
- (2)流体为稳定流动,即流动过程与时间无关;
- (3)流体为等温流动,即流场中各点温度相同,各物性参数不变;

(4)流体为层流流动,雷诺数较小;

(5)流体的惯性力、重力等体积力远小于粘滞力,可忽略不计;

(6)由于物料为橡胶,所以假定熔体为不可压缩流体;

(7)流体的壁面无滑移;

(8)流体为非牛顿流体,其本构粘度方程为 Bird-Carreau 模型。

根据以上假设可得描述流场的连续性方程、运动方程以及广义本构方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{p} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta(\dot{\gamma})\mathbf{D} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{v}$ 为速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\mathbf{p}$ 为压力, Pa ; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量, Pa ; $\eta(\dot{\gamma})$ 为剪切速率作用粘度值, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\mathbf{D}$ 为形变速率张量, s^{-1} 。

为了既能描述在高剪切速率下的假塑性流体的流变性质,又可描述在低剪切速率下牛顿流体的流变性质,Bird-Carreau 模型为

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (4)$$

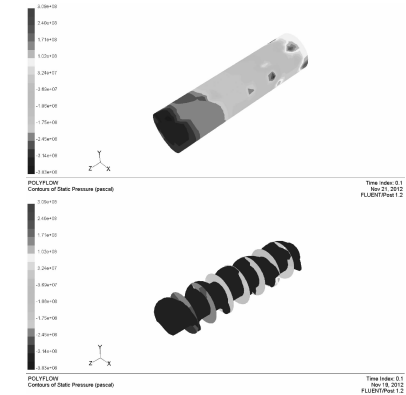
式中, η_{∞} 为无穷剪切粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η_0 为零剪切速率时的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ 为胶料的粘弹性特征时间, s ; n 为非牛顿指数。本次模拟采用胶料的参数为: $\eta_0 = 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta_{\infty} = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 3.02$, $n = 0.385$ 。

1.3 边界条件的确定

采用螺杆旋转、机筒静止的真实速度边界条件和壁面无滑移假设;螺杆表面无滑移,表面流体速度等于螺杆边界的线性速度。螺杆表面的速度随螺杆转速的变化而变化,本工作假定螺杆转速为 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

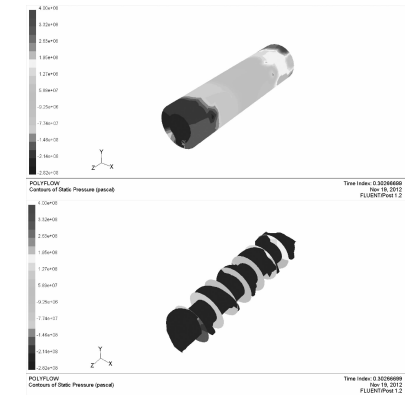
2 模拟结果分析

图 5~8 为 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼过程喂料段的压力场分布。由图可见,在螺杆的推动作用,胶料开始流动,在螺槽等分流元件的作用下出现不同的压力分布,在混炼过程中,胶料在螺杆的剪切与挤压下由塑化进入到粘流状态,图 5~8 中不同时间下最大压力值的变化显现了这一趋势变化。同时可见,在喂料段 1 区域始终保



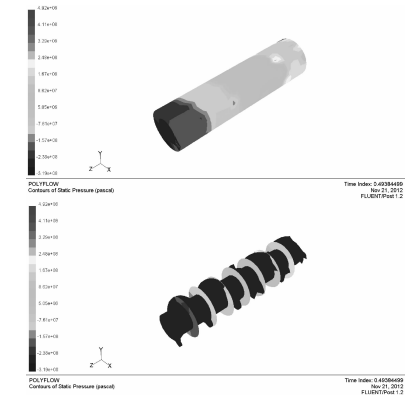
上一喂料段 1;下一喂料段 2。

图 5 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.1 s 喂料段的压力场分布



注同图 5。

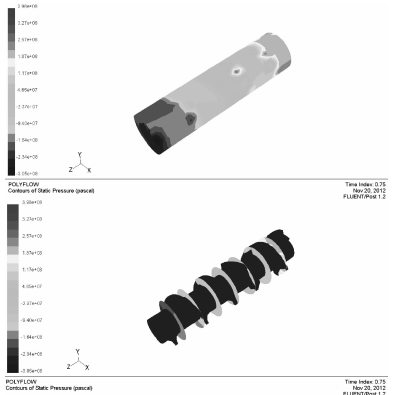
图 6 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.3 s 喂料段的压力场分布



注同图 5。

图 7 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.5 s 喂料段的压力场分布

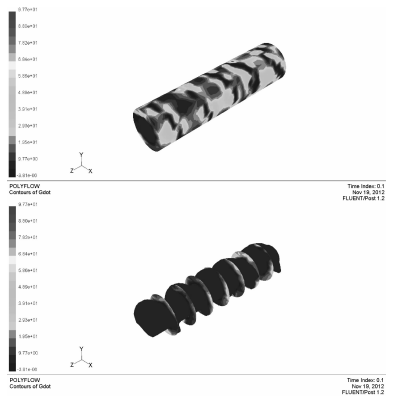
持高压,这与其复杂的特殊结构直接相关,从而说明,这一结构特点能够增强对胶料的混炼作用,有助于提高螺杆的塑化和混炼胶料的能力。



注同图 5。

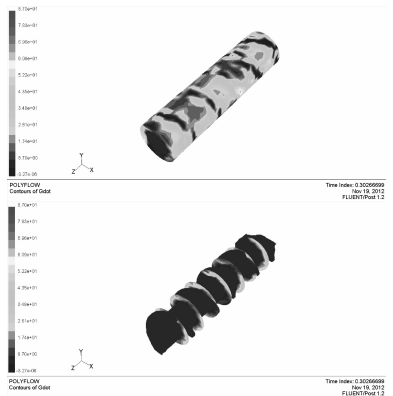
图 8 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.75 s 喂料段的压力场分布

图 9~12 为 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼过程喂料段的剪切应力场分布。可以看出,螺杆棱角与机筒内壁间隙处剪切速率较大,由于螺杆棱



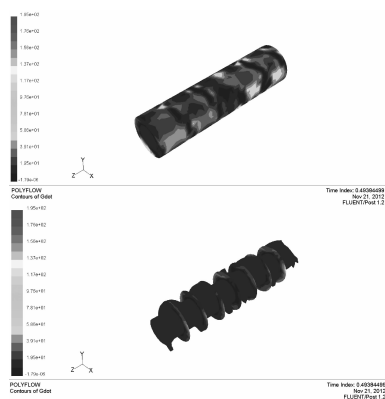
注同图 5。

图 9 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.1 s 喂料段的剪切应力场分布



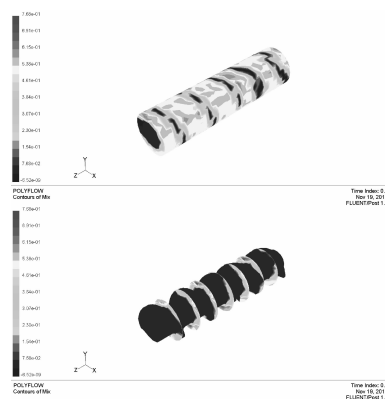
注同图 5。

图 10 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.3 s 喂料段的剪切应力场分布



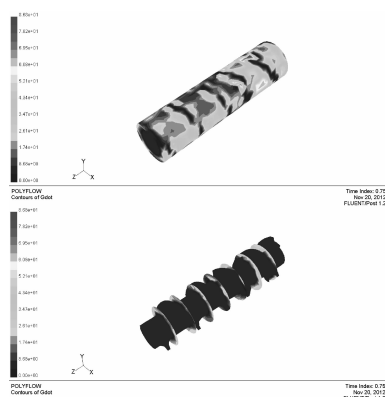
注同图 5。

图 11 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.5 s
喂料段的剪切应力场分布



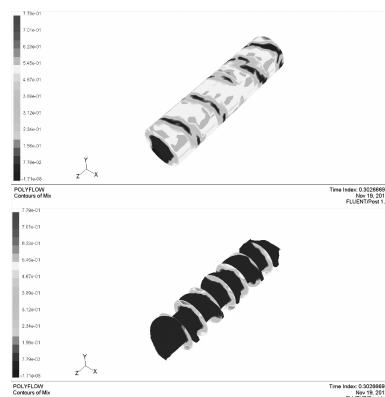
注同图 5。

图 13 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.1 s
喂料段的混合指数分布



注同图 5。

图 12 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.75 s
喂料段的剪切应力场分布

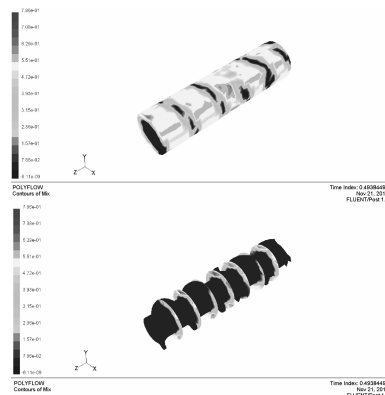


注同图 5。

图 14 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.3 s
喂料段的混合指数分布

凹槽处速度梯度小,因而剪切速率小。由图中还可发现,相比喂料段 2 区域,喂料段 1 区域的剪切速率分布更广,而且最大剪切速率也都在这一区域出现,这说明喂料段 1 结构更有助于胶料的分散与分布。单螺杆挤出机的混合与分散性能及挤出能力因螺纹沟深度不同而各异^[8],而喂料段 1 区域螺纹槽深度比喂料段 2 区域小,由分析结果可知,这与深度减小,剪切速率增加的理论研究相一致,因而更有利于提高胶料的塑化和混炼效果。

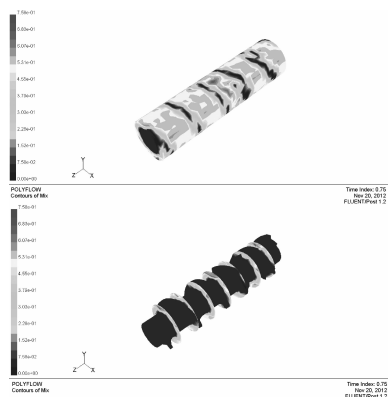
物料的分散混合是通过流场施加的剪切作用与拉伸作用实现的。为了能够使拉伸流动和旋转流动实现定量化,从而定义流场特征,Cheng Hongfei 等引入混合指数^[7]。图 13~16 为 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼过程喂料段的混合指数分布。由图可见,混合指数值小于 0.5 的区域主要出现在螺杆螺棱处,这是由于螺杆螺棱与机筒的



注同图 5。

图 15 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.5 s
喂料段的混合指数分布

间隙较小,从而促进了螺杆对胶料的剪切作用,而且由图 13~16 可见,在喂料段 1 区域比喂料段 2 区域表现出更强的剪切作用,这与螺棱的特殊结



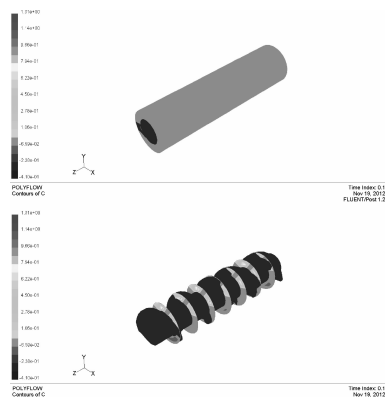
注图 5。

图 16 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.75 s
喂料段的混合指数分布

构有着直接联系。混合指数大于 0.5 的区域基本分布在螺杆的相邻螺棱之间,这是由于随着螺杆的转动,螺棱中间空隙的体积产生了一个从小到大再从大到小的过程,而胶料熔体为不可压缩流体,故胶料被迫运动到空隙较大的地方,而这个流动的过程为拉伸流动。混炼过程中,螺棱之间的胶料体积在变化,从而促进了胶料的反复拉伸,这对于胶料的分散混合非常有利。另外,从螺杆混炼过程混合指数可见,胶料混炼过程中,剪切作用表现为主要作用。

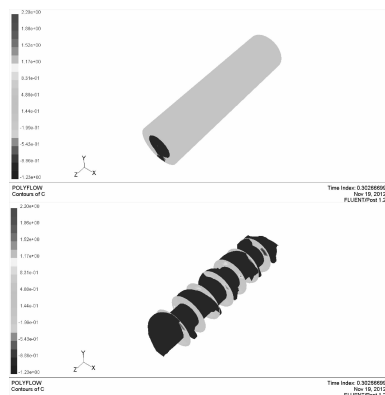
图 17~20 为 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼过程喂料段的浓度场分布。从图中可直观发现,随着混炼的进行,浓度不断增加。从截面图中可以更好地看出,随着混炼的进行,螺杆与壁面机筒区域形成高浓度连续层,并且随着螺杆的作用,高浓度与低浓度熔体交互混合,而随着各连续层之间不断的物质交换,浓度差也在不断减小,这说明随着时间的增加,胶料能够在较短时间内实现连续的相互混合,从而使胶料混炼越来越均匀。

图 21~24 为 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼过程喂料段的速度矢量分布。由图可见,胶料在螺杆的转动作用下,通过螺棱的剪切与挤压,以周向运动为主,并且随着混炼的进行,最大速度不断提高,主要出现在螺棱处,而机筒壁面无滑移,因此壁面与螺棱顶部的速度衰减产生了剪切和拉伸作用力。由速度分布(混炼过程中通过有限元得出的速度矢量分布情况,指 x, y, z 3 个方向上的空间分布情况)和 z 向速度分布(速度矢量分布只显示 z 向坐标情况下流场分布)可见,胶料在一定



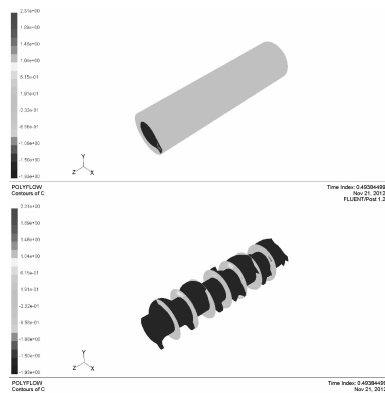
注图 5。

图 17 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.1 s
喂料段的浓度场分布



注图 5。

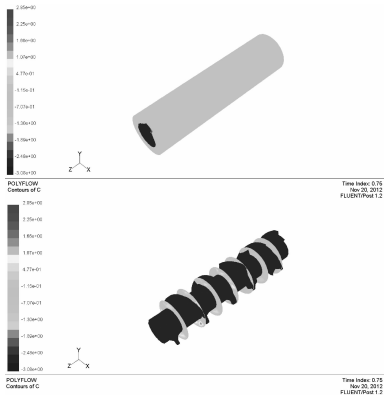
图 18 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.3 s
喂料段的浓度场分布



注图 5。

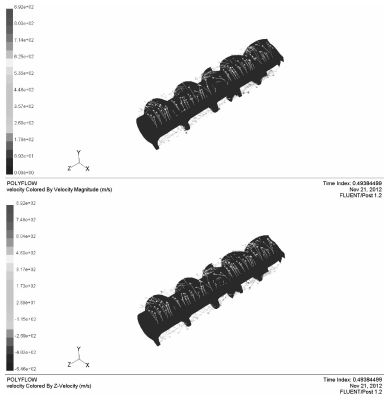
图 19 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.5 s
喂料段的浓度场分布

程度上存在往复运动,从而增加了胶料的交换混炼,由 z 向速度可见,其存在正值与负值,说明此区域胶料存在回流现象(即返混作用),而此作



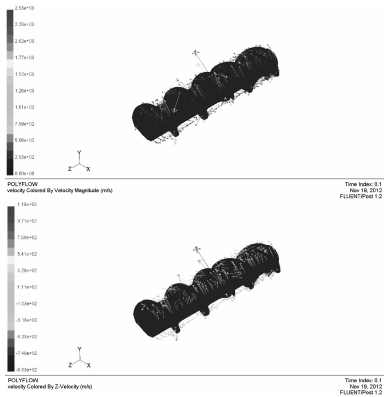
注同图 5。

图 20 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.75 s
喂料段的浓度场分布



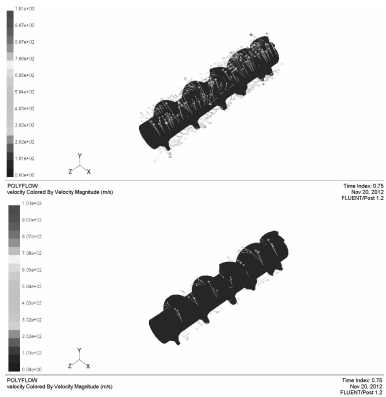
注同图 5。

图 23 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.5 s
喂料段的速度矢量分布



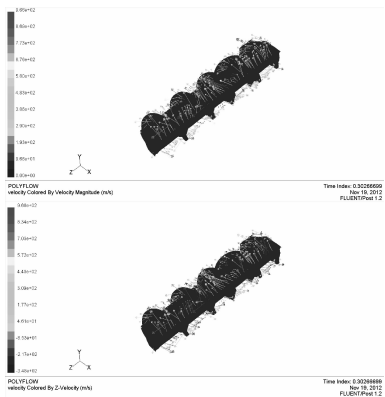
注同图 5。

图 21 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.1 s
喂料段的速度矢量分布



注同图 5。

图 24 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.75 s
喂料段的速度矢量分布



注同图 5。

图 22 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼 0.3 s
喂料段的速度矢量分布

用有助于获得更好的分散混合与轴向混合,抵消物料轴向组分的不均匀性。喂料段 1 区域速度矢量分布相对更加规则,说明其特殊结构对胶料的

吃入更加有利,而且随着混炼的进行,速度矢量的分布也更加有序,还存在一定的轴向速度,说明胶料在机筒内很好地实现了分散混合。

3 结论

由 $\Phi 200$ 单螺杆挤出机螺杆混炼过程喂料段的流场分析可以得出如下结论。

(1)喂料段采用双层螺旋结构,增加翻胶胶纹对称头能够使其在混炼过程中始终保持高压,剪切速率分布更广,而且最大剪切速率也都分布在这一区域,能够增强螺杆对胶料的作用,提高螺杆的塑化和混炼能力。

(2)混炼过程中,胶料被反复拉伸并存在返混现象,对于胶料的分散混合非常有利,有助于获得更好的分散混合与轴向混合,抵消物料的轴向组分的不均匀性。胶料混炼过程中,剪切作用为主

要作用方式。

(3) 胶料能够在较短时间内实现不间断的相互混合,而且速度分布有序,轴向速度产生的拉伸作用促进了胶料在机筒内分散混合,胶料混炼更均匀。

参考文献:

- [1] 邱方军,黄虹,李能文,等. POLYFLOW 软件在聚合物加工中的应用进展[J]. 塑料制造,2009(9):60-63.
- [2] 林武,江波,毕超. 挤出机计量段螺杆的优化设计[J]. 橡塑技术与装备,2008,34(5):34-38.
- [3] Robin K Connelly, Jozef L Kokini. 2-D Numerical Simulation of Differential Viscoelastic Fluids in A Single-screw Continuous Mixer: Application of Viscoelastic Finite Element Methods[J]. Advances in Polymer Technology,2003,22(1):

22-41.

- [4] 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 Engineering & Science,2004,44(4):779-793.
- [5] Takeshi Ishikawa, Shin-Ichi Kihara, Kazumori Funatsu, et al. Numerical Simulation and Experimental Verification of Non-isothermal Flow in Counter-rotating Nonintermeshing Continuous Mixers[J]. Polymer Engineering & Science,2000,40(2):365-375.
- [6] 韦小雄,王学生,林珩. Polyflow 软件在聚合物成型中的应用进展[J]. 上海塑料,2008(4):1-5.
- [7] 钱欣,许王定,金杨福. POLYFLOW 基础及其在塑料加工中的应用[M]. 北京:化学工业出版社,2010:311-318.
- [8] 井上公雄. 挤出成型的高新技术动向[J]. 李小雪,孟小玲,摘译,刘登祥,校. 橡胶工业,1998,45(10):616-619.

收稿日期:2014-07-23

Analysis of Dynamic Flow Field in Feeding Zone of Extruder

LÜ Wei-shuai, LIU Hong-bin

(Tianjin Saixiang Technology Co., Ltd, Tianjin 300384, China)

Abstract: The transient flow field in the feeding zone of $\Phi 200$ single screw extruder mixing for 1 s was simulated and analyzed by using professional viscoelastic fluid software Polyflow. The results showed that, by using double helix structure in feeding zone, the distribution of shear rate was a broader, the force of the screw on the compound was enhanced, the performance of plasticizing and mixing was improved. In the mixing process, the compound was stretched repeatedly and backmixed, so that good mixing result was obtained.

Key words: extruder; feeding zone; dynamic flow field; dynamic simulation

双钱轮胎获 SmartWay 认证

中图分类号:TQ336.1;U463.341 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2014年11月21日报道:

双钱 RT600 和 RR202(见图1)载重轮胎通过美国环境保护署 SmartWay 认证。这两款轮胎均满足认证程序的低滚动阻力性能标准。

双钱公司致力于轮胎产品降低排放和改善燃油经济性。SmartWay 认证是我们未来正确发展的积极步骤,双钱员工为双钱产品出现在认证名单上而感到骄傲。

低断面全轮位 RT600 轮胎具有5条条形花



图1 RR202 轮胎

纹设计,可提高操纵精准性、横向稳定性和牵引性。超高性能高速公路 RR202 轮胎具有标准和低断面规格,适用范围包括长途巴士和卡车等。

(肖大玲摘译 吴淑华校)