

# 轮胎胎面胶料共挤出成型的有限元仿真研究

The Finite Element Simulation of  
Tread Rubber Coextrusion

王国林<sup>1</sup>, 刘高君<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 张铃欣<sup>2</sup>

(1 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013;

2 风神轮胎股份有限公司, 河南 焦作 454000)

WANG Guo-lin<sup>1</sup>, LIU Gao-jun<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Ling-xin<sup>2</sup>

(1 School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu

University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2 Aeolus

Tyre Co., Ltd., Jiaozuo 454000, Henan, China)

**摘要:** 以胎面胶料复合挤出过程为研究对象, 采用 Phan-Thien and Tanner(PTT)本构模型和 Navier 滑移模型对胎面胶/下胎面胶(TWS/FB)的共挤出过程做了三维数值模拟, 分析了流道长度对胶料共挤出质量的影响。结果表明: 当两熔体的入口体积流率一致时, 黏度差异是导致两种熔体的熔体界面向高黏度熔体偏转的主要原因之一。适当增加流道的长度, 可以减小胶料出口处的速度场、剪切速率场的集中程度并使之趋于均匀, 能够有效降低挤出胀大和模外熔体偏转流动现象。

**关键词:** 共挤出成型; PTT; 三维数值模拟; Navier 滑移模型

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.02.010

**中图分类号:** U465.4<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)02-0051-04

**Abstract:** Based on coextrusion process of tire tread rubber, Phan-Thien and Tanner(PTT) constitutive equation and Navier slip equation were used to simulate the three-dimensional flow of the viscoelastic melt (TWS/FB) at the exit in tread rubber coextrusion process. The effects of different slip length was analyzed, the results show that viscosity difference is one of the main factors that cause the interface deflecting to the higher viscosity, when the inflow rates of two rubber melts are the same. The velocity field and shear rate distribution are reduced and uniform along with the proper increase of slip length. The die swell and the interface deflexion phenomenon will be reduced effectively.

**Key words:** coextrusion process; PTT; three-dimensional numerical simulation; Navier slip model

挤出胀大是黏弹流体在挤出过程中的固有特性, 挤出胀大现象给胶料挤出机头和口型的设计造成很大困难。目前国内共挤出型设计普遍依靠经验和试错法, 存在试模、修模周期长、适用性差等缺点。而挤出数值模拟可为口型设计和对挤出工艺的控制提供重要的理论依据。

针对共聚合物挤出的数值模拟前人已经做了大量的研究。吕静等<sup>[1]</sup>对两种熔体的二维等温共挤出进行了数值模拟, 重点讨论了流率比和牵引速度对共挤出质量的影响; 张敏等<sup>[2]</sup>模拟了非牛顿流体在共挤出过程中的挤出胀大现象并讨论了入口收敛角对共挤出质量的影响; 黄益宾等<sup>[3,4]</sup>建立矩形截面共挤口模内外两

种聚合物熔体流动的三维黏弹数值模型, 研究了黏度差异对熔体界面的影响。这些研究大多都是针对于纯黏性流体或者简单模具的黏弹性流体的数值模拟<sup>[1-5]</sup>, 对于具有高黏弹特性的橡胶制品共挤出的三维数值模拟还不多见。本研究对风神轮胎股份有限公司的 TWS/FB 两种胶料的共挤出进行数值模拟, 分析共挤时的挤出胀大率、出口面各个方向的速度场及剪切速率分布, 讨论了不同流道长度对共挤出胀大质量的影响。

## 1 模型建立

### 1.1 几何模型和网格的划分

模型分为预口型区域, 流道区域和自由表面区域。

考虑口模平面的对称性,按完整计算域的 1/2 建立几何模型,如图 1 所示。为分析流道长度对挤出质量的影响,分析时,流道的长度  $L$  分别设为 20 (原方案), 30,40,50mm 和 100mm。预口型区域的网格划分为四节点四面体非结构网格;流道与自由面区域的网格划分为六节点五面体/八节点六面体结构网格,如图 2 所示。

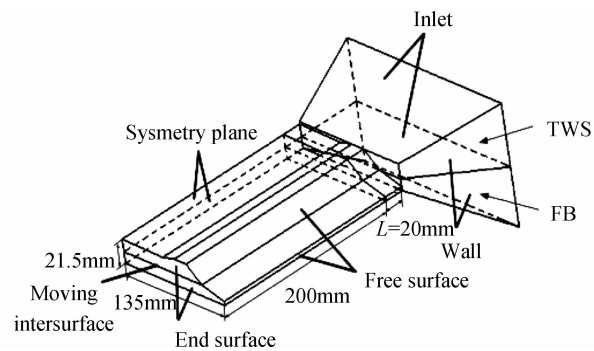


图 1 数值模拟的几何模型

Fig. 1 Geometry model for numerical simulation

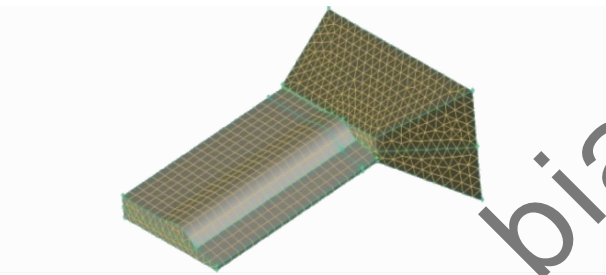


图 2 数值模拟的网格模型

Fig. 2 Mesh model for numerical simulation

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

假定两种聚合物熔体均不可压缩,熔体间互不相溶,流动为等温稳态层流,由于聚合物的高黏弹性,忽略惯性力和质量力对流动的影响。控制方程如下:连续性方程:

$$\nabla \cdot V_k = 0, k = I, II \tag{1}$$

动量方程:

$$\rho_k V_k \cdot \nabla V_k = -\nabla p_k + \nabla \cdot \tau_k, k = I, II \tag{2}$$

式中: $V_k$  是速度矢量; $\nabla$  是哈密顿算子; $\rho_k$  是熔体密度; $p_k$  是流体静压力; $\tau_k$  是偏应力张量; $k = I, II$  分别代表了两种不同的胶料熔体。

1.2.2 胶料熔体本构方程

采用反映胶料流体黏弹特性的 Phan-Thien and Tanner(PTT)本构模型<sup>[6]</sup>来描述共挤出成型中胶料的力学行为:PTT 模型作为网络推导而来的黏弹性

本构方程能够很好地反映胶料的黏弹特性,具体方程如下:

$$\tau = 2\eta_0 s D + E \tag{3}$$

$$\exp\left[\frac{\epsilon \lambda}{\eta_0} tr(E)\right] E + \lambda \left[ \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \overset{\nabla}{E} + \frac{\xi}{2} \overset{\Delta}{E} \right] = 2\eta_0 (1-s) D \tag{4}$$

式中: $\eta_0$  是零切黏度; $s$  是零切黏度中纯黏性分量的占比; $D$  是形变速率张量; $\lambda$  是松弛时间; $\xi$  是和第二法向应力差性能相关的参数; $\epsilon$  是和拉伸黏度性能有关的参数;偏应力张量上的符号  $\Delta$  表示下随体时间导数,  $\nabla$  表示上随体时间导数,  $E$  是黏弹性附加应力张量。

1.3 物理参数

以 TWS 和 FS 两种胶料为研究对象,并拟合相关实验数据<sup>[7,8]</sup>,对两种胶料的 PTT 本构参数设置如表 1 所示。

表 1 物理参数

Table 1 Physical parameters

	$\eta_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\lambda / \text{s}$	$\xi$	$\epsilon$	$s$
TWS	110572	10.27	0.6	1.8	0.3
FB	51586	4.99	0.52	1.2	0.29

1.4 边界条件

边界条件的设定参见图 1,用  $f_n, f_s, v_n$  和  $v_s$  分别表示边界面的法向应力、切向应力、法向速度和切向速度。

(1)入口面(Inlet): 假定入口处熔体流动为全展流,为控制两熔体的入口体积流率相等,根据生产实际分别设定为  $0.000146\text{m}^3/\text{s}$  和  $0.000151\text{m}^3/\text{s}$ 。

(2)壁面(Wall): 在实际挤出过程中,熔体和壁面一般均存在不同程度的滑移,采用下式(5)所示的简化 Navier 滑移模型<sup>[9]</sup>作为壁面的动力学边界条件。

$$f_s = F_{\text{slip}}(v_{\text{wall}} - v_s) \tag{5}$$

式中: $v_{\text{wall}}$  是壁面切向速度,取零值; $F_{\text{slip}}$  是滑移系数,越大表示滑移程度越小,本文取  $F_{\text{slip}} = 10^6$  表示壁面存在的滑移情况。

(3)对称面(Symmetry plane):  $f_s = 0, v_n = 0$ 。

(4)自由表面(Free surface): 胀大表面上边界条件为:  $f_n = 0, f_s = 0, v_n = 0$ 。

(5)自由表面末端出口面(End surface): 在无外力牵引的情况下,此面上熔体的法向力  $f_n = 0$ ,切向速度  $v_s = 0$ 。

(6)熔体间界面(Moving intersurface): 忽略两熔体的表面张力,不考虑熔体间相对滑移,界面应满足运动学条件:  $v_s^I = v_s^{II}, v_n = 0$ ; 动力学条件:  $f_s^I = f_s^{II}$ 。

2 结果分析与讨论

2.1 共挤出胀大模拟分析

熔体间界面的不稳定一般有两种模式:交界面黏性切应力梯度主导的不稳定和界面弯曲造成的不稳定<sup>[10]</sup>。对于聚合物多相分层流动成型过程,一般是前者驱动作用下的不稳定,这种不稳定特征较为复杂,所以一般采用数值模拟方法进行研究。图 3 示出了胶料共挤出胀大的三维图,两种熔体从共挤口模挤出后,胶料分界面向黏度大的 TWS 一侧有较为明显的偏移,与生产中观察到的现象一致。图 4 为对称面 Z 方向的速度场,随着流动的推进,两种熔体的速度分布逐渐产生差异,在预口型收敛区域下方黏度小的 FB 的速度明显大于 TWS 一侧,熔体间界面明显偏向于黏度大的 TWS 一侧,此结论与黄益宾等的结论基本一致<sup>[4]</sup>。可见,黏度差异是导致两种熔体在口模内的 Z 方向(顺流方向)速度差异的主要原因之一,低黏度熔体在流动过程中所受摩擦阻力小于高黏度熔体,因而低黏度熔体在挤出方向上的速度必然大于高黏熔体。

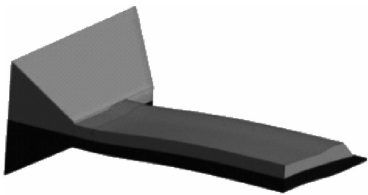


图 3 共挤出胀大模拟结果  
Fig. 3 Simulated result of co-extrudate swell

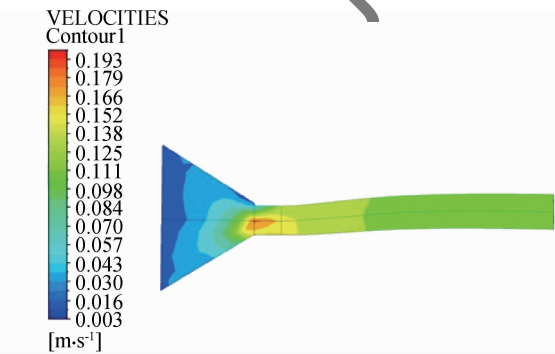


图 4 对称面上 Z 向速度分布云图  
Fig. 4 Z velocity distribution on the symmetry

2.2 流道长度对挤出胀大的影响

为分析流道长度对挤出胀大的影响,在其他条件不变的条件下选择不同的流道长度(见表 2)进行分析,并利用共挤出口模中各方向速度场、压力场、剪切

速率场分析流道长度对挤出胀大的影响。

表 2 流道(滑移段)长度 L 分析方案

Table 2 The analysis program of the slip length L					
Program	a	b	c	d	e
(the original program)					
L/mm	20	30	40	50	100

2.2.1 胀大比的分析比较

图 5 示出了流道长度与挤出胀大关系的分析结果,由图 5 可知,随着流道长度的增加,胀大比明显减小,然而流道增加到一定长度以后,胀大比的降低趋势变缓,这是因为增加流道的长度,由于“剪切变稀”效应,口模出口处熔体的速度逐渐变大,从而减缓了胀大比的降低。

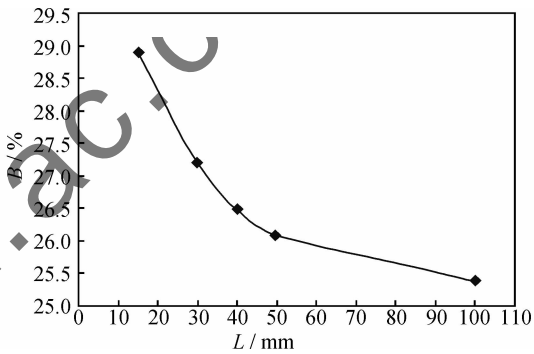


图 5 胀大比 B 与流道(滑移段)长度 L 的关系  
Fig. 5 The relationship between the extrudate swell ratio B and the slip length L

2.2.2 Z 方向速率场的分析比较

图 6 中 a~e 分别为不同流道长度的 Z 方向速度分布云图。由图 6 可以看出方案 a 的出口面速度等值线梯度较大,速度的分布很不均匀,随着流道长度的增加,口模出口面的 Z 方向速度等值线梯度明显减小,速度场趋于均匀;且口模出口处的速度逐渐增加(如图 6(e)),从而减缓了胀大比的降低速度。可见,适当增加流道长度可减小口模出口面的顺流方向速度等值线梯度,从而降低胀大比,缓解挤出物的不规则运动。

2.2.3 剪切速率场的分析比较

图 7 中 a~e 分别给出了不同流道长度口模出口处的剪切速率场分布云图。两种熔体剪切速率的最大值均出现在口模出口处,在中心区域两熔体的剪切速率均较小,越靠近壁面,剪切速率值越大。由于正应力效应,挤出胀大随剪切速率的增大而增大<sup>[11]</sup>,所以出口面上剪切速率的分布情况决定了两种熔体的挤出胀大程度的不同。另外,随着流道长度的增加,出口面上的剪切速率逐渐减小,当长度增加到一定程度时,剪切

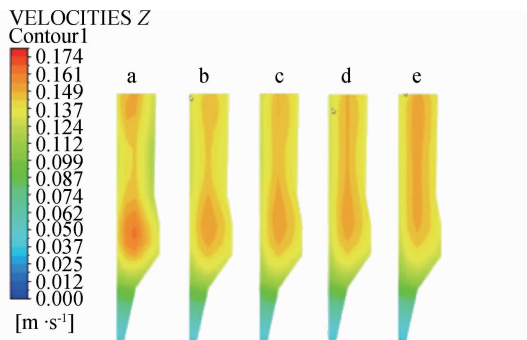


图 6 不同流道长度口模出口面 Z 向速度分布云图

Fig. 6 Z velocity distribution of different slip length at die exit

速率降低的速度变小,这与胀大比的降低趋势可以很好的吻合。在实际生产过程中,口模出口处的两熔体剪切速率尽量小并且分布均匀,模内的内应力就会小而分布均匀,这样可以减小胀大并使产品胀大均匀,从而提高产品的挤出质量。

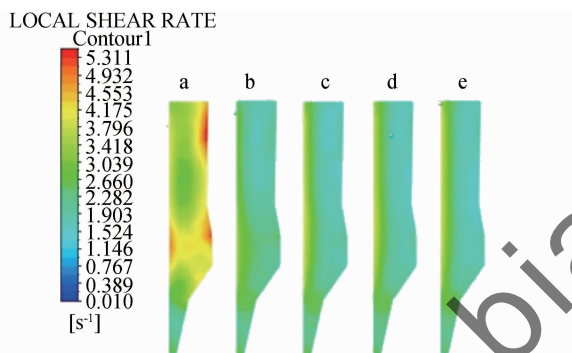


图 7 不同流道长度口模出口面剪切速率分布云图

Fig. 7 Shear rate distribution of different slip length at die exit

### 3 结论

(1)在口模体积流量大体一致的情况下,TWS/FB 两种胶料熔体由复杂截面共挤口模挤出后,在垂直方向上会产生由黏度较低的 FB 向黏度较高的 TWS 一侧的偏转,截面呈不对称变形。

(2)适当增加流道的长度,可以有效降低挤出胀大。

(3)随着流道长度的增加,口模出口面 Z 方向速度场的梯度逐渐变小;剪切速率逐渐变小并趋于均匀,从而降低了挤出胀大比。当流道长度取 50mm 左右时,挤出效果相对较好。

#### 参考文献

[1] 吕静,陈晋南,胡冬冬,等. 流率和牵引速度对两种聚合物熔体共挤出影响的数值研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(6): 781—784.

LV Jing, CHEN Jin-nan, HU Dong-dong. Numerical study of the effects of flow rate and drawing velocity on bicomponent coextrusion [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(6): 781—784.

- [2] 张敏,孙胜,贾玉玺,等. 聚合物共挤出过程的挤出胀大有限元分析[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(5): 36—40.  
ZHANG Min, SUN Sheng, JIA Yu-xi, et al. Numerical simulation of die swell in double-layer polymer coextrusion processes [J]. Polymer Material Science & Engineering, 2006, 22(5): 36—40.
- [3] 黄益宾,柳和生,黄兴元,等. 聚合物双组份复合共挤成型的挤出胀大研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(4): 657—665.  
HUANG Yi-bin, LIU He-sheng, HUANG Xing-yuan. Study on extrudate swell in polymer bicomponent coextrusion process [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4): 657—665.
- [4] 黄益宾,柳和生,黄兴元,等. 复合共挤成型中挤出胀大的三维粘弹数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(3): 160—163.  
HUANG Yi-bin, LIU He-sheng, HUANG Xing-yuan. Three-dimensional viscoelastic simulation of the die swell in coextrusion process [J]. Polymer Material Science & Engineering, 2010, 26(3): 160—163.
- [5] KARAGIANNIS A, HRYMAK A N, VLACHOPOULOS J. Three-dimensional studies on bicomponent extrusion [J]. Rheologica Acta, 1990, 29(1): 71—87.
- [6] PHAN-THIEN N, TANNER R I. A new constitutive equation derived from network theory [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mech, 1977, 2(4): 353—365.
- [7] TAKASE M, KIHARA S, FUNATSU K. Three-dimensional viscoelastic numerical analysis of the encapsulation phenomena in coextrusion [J]. Rheol Acta, 1998, 37(6): 624—634.
- [8] SUNWOO K B, PARK, SEONG S J, LEE S J, et al. Numerical simulation of three-dimensional viscoelastic flow using the open boundary condition method in coextrusion process [J]. Non-Newtonian Fluid Mesh, 2001, 99(2): 125—144.
- [9] Fluent Inc. Polyflow 3.10 User's Guide [M]. Belgium: Fluent Inc, 2003.
- [10] ZHOU Guo-fa. Theoretical study and numerical simulation of polymer multiphase-multilayer flow molding [D]. Nanchang: Nanchang University, 2002.
- [11] 周彦豪. 聚合物加工流变学基础 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070299006); 江苏省六大人才高峰资助项目(07D019)

收稿日期: 2012-03-28; 修订日期: 2013-03-20

作者简介: 王国林(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 车辆工程和载运工程技术研究, 联系地址: 江苏省镇江市京口区学府路 301 号江苏大学汽车与交通工程学院(212013), E-mail: glwang@ujs.edu.cn