

轮胎胶料共挤出成型过程的数值分析

王国林¹, 王磊¹, 刘高君¹, 张铃欣²

(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)

摘要:利用有限元方法对轮胎胶料(TWD40/FS10)共挤出成型过程进行三维数值模拟,分析入口体积流量比和牵引速度对口型出口处速度分布、界面偏移以及挤出胀大比的影响。结果表明:两熔体共挤出时,入口流量比对口型出口处速度分布、界面偏移影响较大,对挤出总胀大比影响较小;入口流量比接近于口型入口面积之比时,口型出口处速度分布较均匀,界面偏移量较小,且宽度方向界面总体偏向粘度较小的一侧;口型出口处垂直于挤出方向速度较大值出现在界面较小区域会引起界面局部尖角;牵引速度提高,沿挤出方向界面末端平直段逐渐增加,同时两熔体挤出胀大比迅速变小,口型出口处速度分布和沿宽度方向界面偏移量变化很小。

关键词:轮胎;胶料共挤出;入口流量比;牵引速度;数值模拟

中图分类号:TQ336.1+1;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2014)09-0560-05

轮胎胶料共挤出技术通过组合两种或多种不同胶料熔体,能经济地生产出双层或多层复合轮胎制品^[1]。影响轮胎胶料共挤出成型的因素有很多,如流道结构、口型形状、胶料种类和工艺参数等,其中工艺参数主要靠经验设置,效率低下。随着计算机技术以及数值方法的发展,运用数值方法模拟共挤出过程已逐渐成为趋势^[2-7]。由于共挤出过程中自由胀大表面以及两流体间界面的存在使求解更复杂,目前国内外研究主要针对二维模型以及三维矩形口模模型,而很少对实际生产中轮胎胶料共挤出成型等复杂模型的研究。

为了掌握入口流量比和牵引速度等工艺参数对复杂口模内外胶料熔体共挤出界面和流动情况的影响规律,本研究采用有限元方法对某结构复杂的双复合胎面的共挤出成型过程进行三维数值模拟,并分析模拟结果。

1 数值模拟方法

1.1 几何模型

以两种胎面胶料 TWD40 和 FS10 共挤出成型的预口型、口型和自由挤出 3 个区域为建模对

象,同时考虑模型的对称性以及计算效率,以完整模型的一半建立几何模型,如图 1 所示。

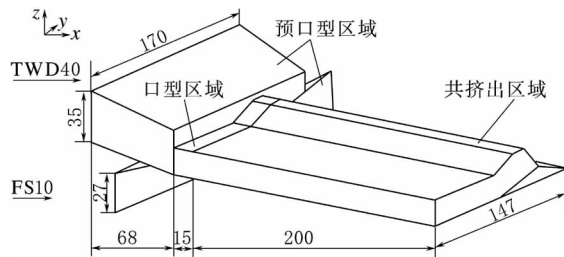


图 1 几何模型

1.2 控制方程

假定两种胶料熔体均不可压缩,熔体间互不相容,流动为三维等温稳态层流。由于胶料熔体的高粘性,惯性力和重力相对于粘性力很小,忽略不计。在以上假设条件下,流场的控制方程和本构方程可以表示如下。

连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{v}^i = 0 \quad (i = \text{I}, \text{II}) \quad (1)$$

动量方程:

$$-\nabla p^i + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}^i = 0 \quad (i = \text{I}, \text{II}) \quad (2)$$

本构方程:

$$\boldsymbol{\tau}_i = 2\eta_i \dot{\gamma} \mathbf{D}_i = 0 \quad (i = \text{I}, \text{II}) \quad (3)$$

式中, ∇ 为哈密顿算子; $\mathbf{v}$ 为速度矢量; I 和 II 分别表示 TWD40 和 FS10 两种熔体; p 为流体压力且各向同性; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量的动力分量或偏分量;

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)

作者简介:王国林(1965—),男,吉林伊通人,江苏大学教授,博士,主要从事载运工具运行安全控制和现代轮胎技术研究工作。

η 为剪切粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; $\mathbf{D}$ 为形变速率张量。

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T]$$

流体的本构模型采用 Bird-Carreau 方程:

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

式中, η_0 为零剪切粘度; λ 为松弛时间; n 为非牛顿指数。

根据 TWD40 和 FS10 胶料的流变试验结果, 拟合得到两种胶料模型参数分别为: $\eta_0 = 119\,475 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 6.3 \text{ s}$, $n = 0.21$; $\eta_0 = 47\,818 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 3.6 \text{ s}$, $n = 0.24$ 。

1.3 边界条件

(1) 两胶料熔体入口边界: 假设入口处熔体流动充分发展, 且总流量 (Q) 不变, 即 $Q = Q_I + Q_{II} = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 对称边界: 切向应力 $f_s = 0$, 法向速度 $v_n = 0$ 。

(3) 壁面边界: 在实际生产挤出过程中胶料熔体与壁面一般会存在不同程度的滑移^[8], 本研究采用 Navier 滑移定律计算滑移阻力 (f):

$$f(v) = -k(v - v_w)^e \quad (5)$$

式中, k 和 e 为滑移材料参数, v 为壁面附近流体的切向速率, v_w 为壁面流体速率。

本研究取 $v_w = 0$, $k = 1 \times 10^5$, $e = 1$ 。

(4) 自由面边界: 自由胀大表面上必须满足的动力学和运动学边界条件为 $f_n = 0$, $f_s = 0$, $v_n = 0$, 其中 f_n 为法向应力。

(5) 两胶料熔体间界面: 假设两熔体间不产生相对滑移, 忽略两熔体的表面张力且熔体流动没有穿透界面, 两熔体间界面应分别满足动力学条件[式(6)和(7)]和运动学条件[式(8)], 即两熔体界面两侧应力张量保持平衡; 切向速度相等, 法向速度为零。

$$f_s^I = f_s^{II} \quad (6)$$

$$-p^I + f_n^I = -p^{II} + f_n^{II} \quad (7)$$

$$v_s^I = v_s^{II}, v_n = 0 \quad (8)$$

(6) 出口边界: 为分析牵引速度对共挤出的影响, 设置了两种熔体出口边界条件。

① 牵引速度为零时, 出口熔体的 $f_n = 0$, $v_s = 0$ 。

② 牵引速度不为零时, 牵引速度为 v_x , 并假

设 $v_y = v_z = 0$ 。

1.4 数值算法

在数值模拟时采用八节点六面体单元离散几何模型, 如图 2 所示, 单元 2 961 个, 节点 4 281 个。计算时采用二次等参元法求解速度场、线性等参元法求解压力场, 并用 Newton-Raphson 迭代法进行迭代, 采用参数渐进法解决模拟过程中的非线性问题, 同时采用优化网格法重置共挤出区域的网格。

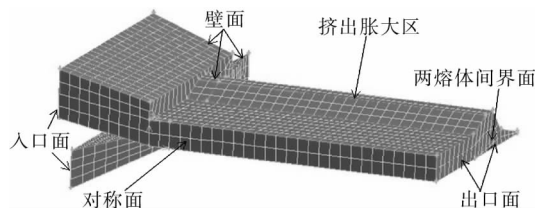


图 2 有限元模型

2 结果与讨论

2.1 入口流量比

图 3(a)~(e) 分别为入口流量比 $Q_1/Q_2 = 2, 4, 5, 9, 14$ 时口模出口处的总速度分布云图。由图 3 可以看出, 入口流量比的变化对速度梯度影响较大。当流量比为 5 (约为两熔体口型入口处面积之比) 时, 速度梯度较小, 分布比较均匀; 而当入口流量比不等于 5 时, 速度梯度较大, 在入口流量比小于 5 和大于 5 时, 速度最大值分别位于熔体 FS10 和 TWD40 一侧。

图 4 示出了口型出口处界面偏移量的变化。可见, 随着入口流量比的增大, 界面偏移量先逐渐减小, 再往负向增大, 在入口流量比为 5 时变化最小, 且此时沿 y 方向界面总体偏向粘度较小的 FS10 一侧。从图 4(a) 可以看出, 在入口流量比小于 5 时, 沿 y 方向界面在局部均出现往 z 向凸起的尖角; 而在大于 5 时, 沿 y 方向界面偏移量负向增大, 且呈规则下凸。

图 5(a)~(e) 示出了相应的口型出口处 z 向速度分布云图。如图 5 所示, 各流量比下的速度最大值几乎均出现在熔体界面附近, 在流量比从 2 增大到 5 时最大值均为正向且集中在界面局部较小区域, 从而导致了界面局部出现尖角; 而当流量比继续增大时, 界面附近 z 向速度变为负值且

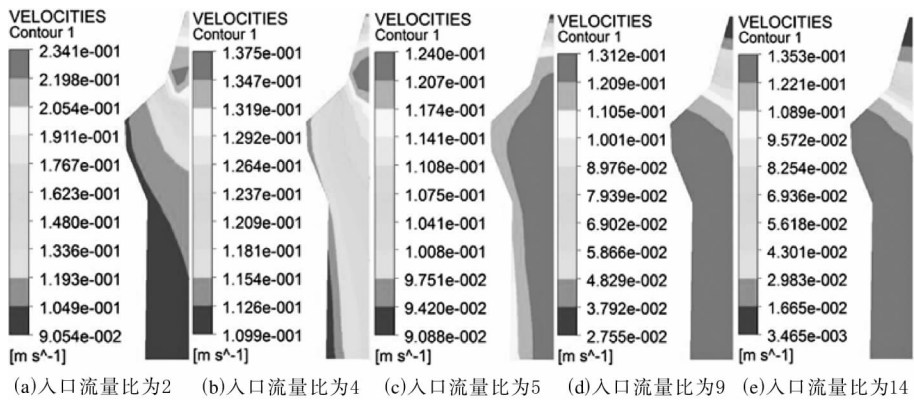
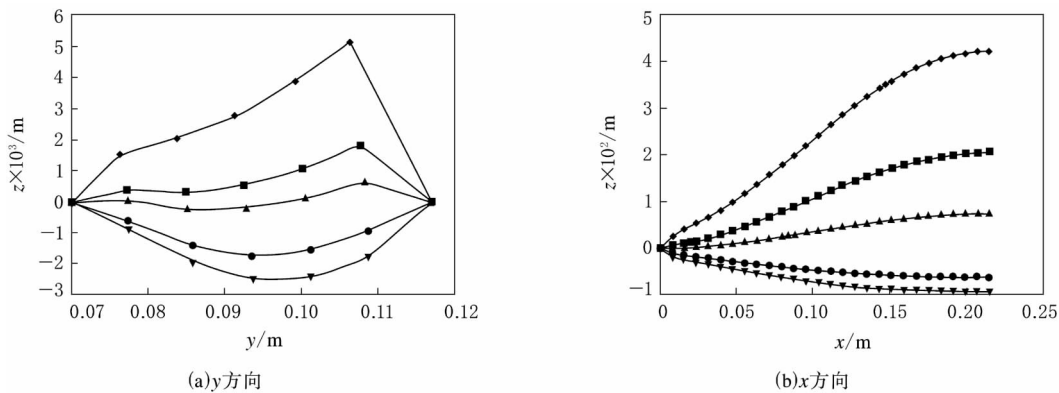


图 3 口型出口处总速度分布



入口流量比: ◆—2; ■—4; ▲—5; ●—9; ▼—14。
图 4 入口流量比对出口界面偏移量的影响

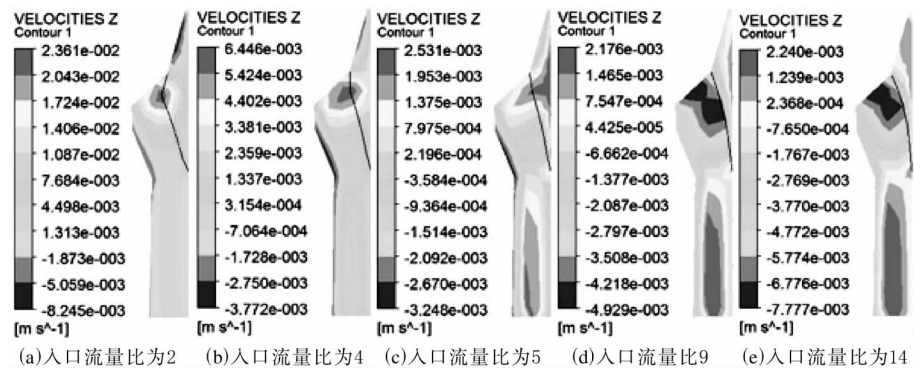


图 5 口型出口处 z 向速度分布

较均匀,因此沿 y 方向界面偏移量呈规则下凸。

图 6 示出了两种胶料挤出胀大比与入口流量比的关系曲线。随着入口流量比的增大,熔体 TWD40 的流量增大,而 FS10 的流量减小,因此 TWD40 的挤出胀大比随着入口流量比的增大而变大,而 FS10 的挤出胀大比随之减小,但前者增加幅度小于后者减小幅度,因此总挤出胀大比随入口流量比增加而减小,但变化幅度不大。

2.2 牵引速度

图 7(a)~(c)示出了入口流量比为 5、牵引速度分别为 $0.10, 0.12$ 和 $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时口型出口处的总速度分布。可见,随着牵引速度的提高,速度分布改变不大。

图 8 示出不同牵引速度下的出口界面偏移

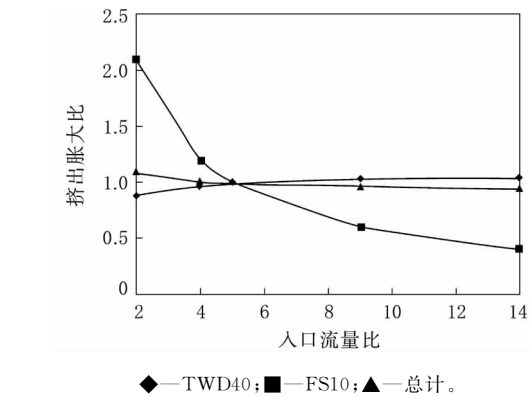


图6 挤出胀大比与入口流量比的关系曲线

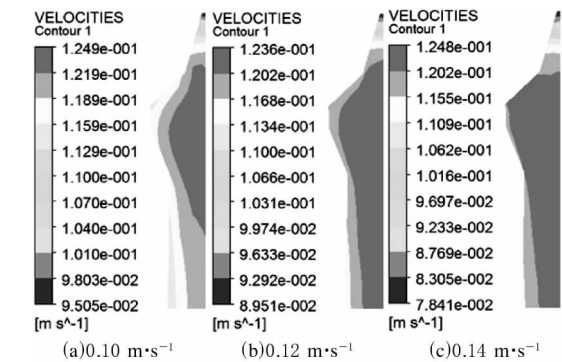


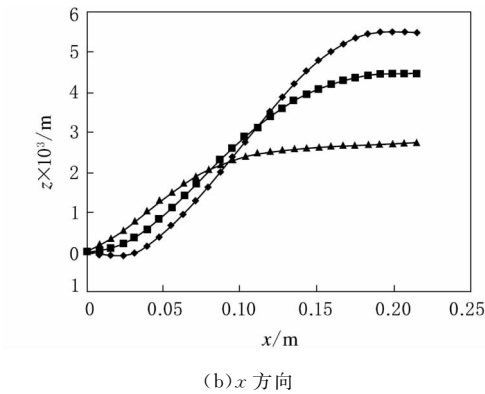
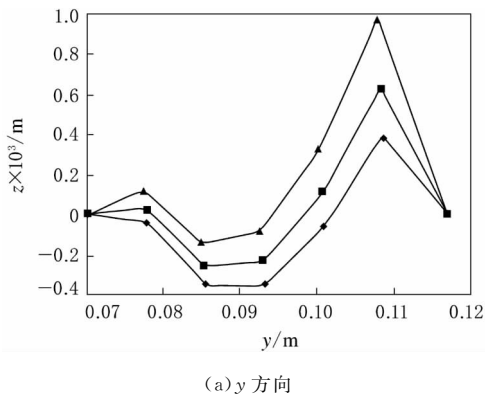
图7 不同牵引速度下口型出口处总速度分布

量,图9示出牵引速度对两种流体挤出胀大比的影响。由图8和9可以看出,随着牵引速度的提高,沿y方向界面整体逐渐向正向偏移,但幅度不大,沿x方向界面偏移量迅速减小,且在末端平直段逐渐增加,同时两熔体挤出胀大比迅速由大变小。

3 结论

运用有限元方法模拟了某规格复杂的双复合胎面的三维等温共挤出成型过程,并分析了入口流量比和牵引速度对共挤出的影响,结果表明:

- (1)两熔体共挤出时,入口流量比接近于口型入口面积之比时,口型出口处速度分布较均匀,界面偏移量较小,且宽度方向界面总体偏向粘度的较小一侧;
- (2)口型出口处垂直于挤出方向速度较大值出现在界面较小区域会引起界面局部尖角;
- (3)牵引速度提高,沿挤出方向界面末端平直段逐渐增加,同时两熔体挤出胀大比迅速变小,口型出口处速度分布和沿宽度方向界面偏移量变化



牵引速度/(m·s⁻¹): ◆—0.10; ■—0.12; ▲—0.14。

图8 牵引速度对出口界面偏移量的影响

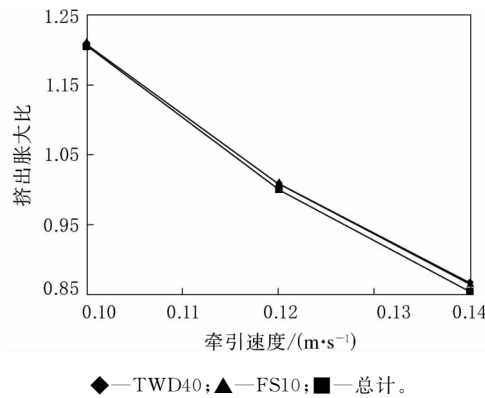


图9 牵引速度对挤出胀大比的影响

很小。

参考文献:

[1] 谢德伦. 橡胶挤出成型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 160-162.
[2] HAN C D. A Study of Bicomponent Coextrusion of Molten Polymers[J]. J. Appl. Polym. Sci., 1973, 17(4): 1289-1303.
[3] Gifford W A. A Three-Dimensional Analysis of Coextrusion [J]. Polym. Eng. Sci., 1997, 37(2): 315-320.
[4] 吕静, 陈晋南, 胡冬冬. 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.
- [5] 武停启, 江波, 毕超, 等. 复合共挤出熔体中界面位置三维模拟[J]. 塑料, 2006, 35(3): 82-86.
- [6] 张敏, 孙胜, 贾玉玺. 基于有限元方法的聚合物共挤出界面形成过程数值研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(5): 712-718.
- [7] 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.
- [8] 梁基照, 唐国俊, 黄泽成. 挤出过程中 NR/SBR 胶料壁滑移行为的研究. I. 压力波动现象[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1994, 22(1): 120-123.

收稿日期: 2014-03-15

Numerical Simulation on Co-extrusion Molding Process for Tire Compounds

WANG Guo-lin¹, WANG Lei¹, LIU Gao-jun¹, ZHANG Ling-xin²

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Aeolus Tyre Co., Ltd, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: A finite element method was used to simulate the three-dimensional co-extrusion molding process for tire compounds (TWD40/FS10). Simulated results such as the velocity distribution, interface excursion and die swell were obtained. The results indicated that the inflow flux ratio of TWD40 to FS10 had a great influence on the velocity distribution and interface excursion, and had a little influence on the die swell. When the inflow flux ratio was close to the area ratio of the inlet of the die, the velocity was well distributed, and the interface excursion was low, with the interface curve in width direction deflecting toward the lower viscosity side. The high velocity in the direction perpendicular to the extrusion direction resulted in local interface salient. With the increase of drawing velocity, the flat part length of the interface increased, and the die swell ratio decreased rapidly, while the velocity distribution and interface excursion at co-extrusion die exit changed little.

Key words: tire; compounds co-extrusion; inflow flux ratio; drawing velocity; numerical simulation

一种亚临界水挤出法应力诱导硫化 橡胶粉脱硫化反应的方法

中图分类号: TQ335⁺.2; X783.3 文献标志码: D

由南京工业大学和南京强韧塑胶有限责任公司申请的专利(公开号 CN 103073741A, 公开日期 2013-05-01)“一种亚临界水挤出法应力诱导硫化橡胶粉脱硫化反应的方法”, 提供了一种亚临界水挤出和高剪切应力复合诱导硫化橡胶粉脱硫化反应技术, 即: 将占反应物总质量 0~30% 的线形高分子材料、占反应物总质量 65%~97% 的废旧橡胶粉与占反应物总质量 0.2%~5% 的脱硫助剂相混合, 混合物在具有亚临界水挤出反应条件下于较高螺杆转速的双螺杆挤出机中进行熔融挤出脱硫反应; 反应产物经水冷、成条、干燥或经辊筒压延冷却、成片, 即获得经脱硫反应的再生胶。该发明进一步提高了脱硫反应的效率, 产率

高、能耗低、易于大型化、规模化, 对环境污染小, 脱硫产物再硫化材料的物理性能高。

(本刊编辑部 赵敏)

一种汽车密封用丁基橡胶及其制备方法

中图分类号: TQ336.4⁺2 文献标志码: D

由龙门多泰工业有限公司申请的专利(公开号 CN 103102603A, 公开日期 2013-05-15)“一种汽车密封用丁基橡胶及其制备方法”, 涉及的汽车密封用丁基橡胶(IIR)胶料配方为: IIR 100, 氧化锌 80~85, 防老剂 RD 20~25, 硫黄 20~23, 促进剂 TMTD 8~10, 促进剂 M 7~9。该 IIR 胶料具有弹性、拉伸性能和密封性能好以及耐老化性能优异的优点, 用于汽车密封时具有很好的密封效果。

(本刊编辑部 赵敏)