

# 胶管挤出模熔体流动行为的数值研究

闫普选, 卢江荣, 赵贤淑, 王玉峰, 丁倩, 韩飞雪\*

(桂林电子科技大学 材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:**基于待修正的直角胶管挤出模, 根据流体力学定律建立虚拟熔体挤出系统。采用 ANSYS 有限元分析软件模拟在挤出预成型系统中橡胶熔体的流动行为, 考察流道主要结构参数(分流锥宽度、阻流锥前端到入口距离及流道底部半径)对挤出模关键指标(速率相对平均偏差)的影响。结果表明, 根据流体力学定律调节主要结构参数能够降低直角挤出模出口熔体的速率相对平均偏差。修正挤出模试验进一步验证模具结构设计的准确性, 对优化挤出模设计有指导意义。

**关键词:**胶管; 挤出模; 流道; 流动行为; 数值分析

**中图分类号:** TQ320.66; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2013)12-0746-05

随着航空航天、汽车零部件及医疗器械等领域的发展, 对橡胶制品在苛刻环境中精密性和尺寸稳定性的要求也越来越高。采用传统的试凑(Trail and Error)模具设计方法能够满足低端产品的要求, 但设计周期长且开发成本高<sup>[1]</sup>。采用数值分析辅助模具设计的方法可以提高设计质量, 但其存在结构设计经验性及仿真分析盲目性的缺点<sup>[2-5]</sup>; 同时, 在数值分析过程中可能过多地简化问题边界条件而难以得到趋近实际的结果, 从而存在设计误导。因此, 本研究提出从模具结构设计初期引入流体力学理论, 将流变和能耗相互结合的思想融入到成型模具设计思路中, 从流变机理上辅助挤出模具设计。

本工作以直角挤出模为分析对象, 研究其流道中橡胶熔体复杂的流动行为。采用 ANSYS 数值分析软件, 分析挤出模主要流道结构参数对其关键指标(速率相对平均偏差)的影响。同时, 结合流体力学中能量守恒定律和能量损失理论, 从机理上深入分析其关键结构参数对流道内熔体速率的影响。

## 1 问题分析

直角挤出模剖面如图 1 所示。从图 1 可以看

**作者简介:**闫普选(1979—), 男, 广西桂林人, 桂林电子科技大学工程师, 硕士, 主要从事高分子材料成型研究工作。

\* 通信联系人

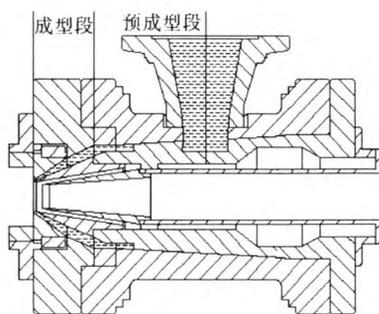


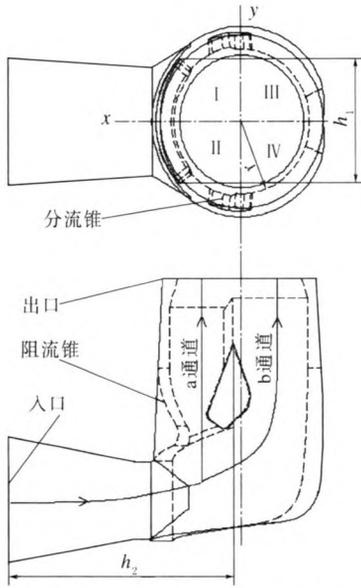
图 1 挤出模剖面

出, 为使挤出胶管制品沿轴向具有相同断面质量和尺寸精度, 熔体挤入成型段之前, 其挤出速率相对平均偏差应尽量小, 因此挤出模流道中橡胶熔体的流动行为分析应选预成型段。

直角挤出模预成型段流道结构如图 2 所示。将环形挤出流道截面沿垂直于出口方向分为 4 个象限, 象限中心为其出口圆环中心,  $x$  轴垂直于入口平面。因流道结构对称于经  $x$  轴平行于出口方向的平面, 仅需将 I 和 III 象限作为分析对象。I 和 III 象限分别对应 a 和 b 通道。

初始设计挤出模试验结果如图 3 所示, 其关键结构参数  $h_1$ ,  $h_2$  和  $r$  分别为 0.103, 0.199 和 0.062 5 m, 挤出速率相对平均偏差( $e_v$ )为 17%,  $e_v$  的计算公式如下:

$$e_v = \frac{\sum_{i=1}^m |v_i - \bar{v}|}{\sum_{i=1}^m v_i} \quad (1)$$



$h_1$ —阻流锥宽度; $h_2$ —分流锥前端口到入口距离; $r$ —渠道底部半径。

图 2 挤出模预成型段渠道结构

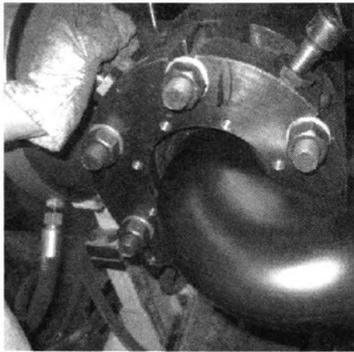


图 3 初始设计挤出模试验效果

式中,  $v_i$  为渠道出口某位置熔体速率,  $\bar{v}$  为平均速率。

该胶管挤出模初始结构设计未采用数值分析和流体力学相关理论, 其  $e_v$  值过高, 不能满足实际生产需求。

挤出模中熔体流动行为遵循流体力学理论中能量守恒定律和能量损失理论。假设橡胶流体为不可压缩流体, 其流动为等温稳态流动, 渠道全充满; 由于流体粘度大, 惯性力和重力相对于粘性力很小, 忽略不计; 假设渠道内壁无滑移<sup>[6]</sup>。描述流体力学中流场的基本能量方程和能量损失方程如下<sup>[7]</sup>。

伯努利方程简化为

$$H_{f1} + H_{f2} = \frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{g} \quad (2)$$

$H_{f1}$  和  $H_{f2}$  可简化表示为

$$H_{f1} = \frac{32Lv^2}{Redg} \quad (3)$$

$$H_{f2} = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中,  $H_{f1}$  和  $H_{f2}$  分别为沿程和局部能量损失,  $p$  为压力,  $\rho$  为流体密度,  $g$  为重力加速度,  $v_1$  和  $v_2$  分别为入口和出口速率,  $L$  为渠道长度;  $Re$  为雷诺数,  $d$  为渠道等截面圆管直径,  $\zeta$  为局部损失系数。

由式(2)~(4)可知, 调整渠道结构能够调节物料流动的能量损失。在渠道入口流体速率及出口与入口压力差恒定的情况下, 随着能量损失的增大, 渠道出口流体速率会减小, 反之, 将会增大。根据能量损失方程, 对于 a 通道,  $h_1$  增大和  $h_2$  减小能够增加通道的局部能量损失; 对于 b 通道,  $h_2$  减小能够降低通道的局部能量损失, 而  $r$  减小能够降低沿程能量损失。因此, 可以通过调节渠道结构, 使 a 和 b 通道的两种能量损失之和相等, 从而能够使挤出模出口处的  $e_v$  值尽量小。

## 2 数值分析

### 2.1 边界条件

直角挤出模预成型段渠道有限元网格划分如图 4 所示。橡胶熔体采用四面体单元进行网格离散, 挤出模渠道求解域的边界条件如下: 熔体入口和出口均采用压力边界条件, 入口压力为 10 MPa, 出口压力为常压; 壁面采用非滑移边界条件。



图 4 直角挤出模预成型段渠道有限元网格划分

## 2.2 材料参数

混炼胶参数采用日本岛津公司 CFT-500D 型毛细管流变仪测试,毛细管直径为 1.0 mm,长度为 10.0 mm,预热时间为 30 s,温度为 100 °C。

采用 Cross 流体本构方程:

$$\eta = \eta_0 / (1 + \lambda \dot{\gamma})^{1-n} \quad (5)$$

式中,  $\eta$  和  $\eta_0$  分别为粘度和零剪切粘度,  $\lambda$  为松弛时间,  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $n$  为非牛顿指数。

橡胶材料模型参数为:  $\eta_0$  106 320 Pa·s,  $n$  0.23;  $\lambda$  0.52 s。

## 2.3 橡胶熔体矢量图及流道出口速率曲线

$h_1$ ,  $h_2$  和  $r$  分别为 0.103, 0.199 和 0.062 5 m 时的橡胶熔体速率分布如图 5 所示,橡胶熔体出口速率曲线如图 6 所示。

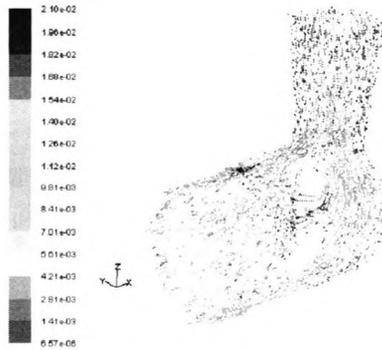


图 5 橡胶熔体速率分布

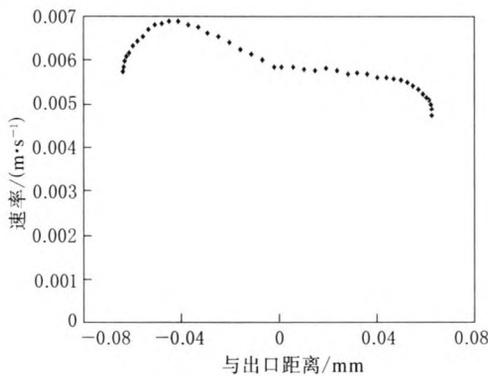
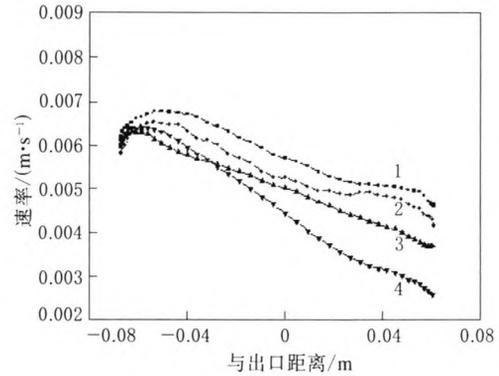


图 6 挤出模流道出口熔体速率曲线

## 2.4 流道主要结构参数对出口速率的影响

(1)流道其他结构相同、不同  $h_1$  对应的流道出口速率曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出,随着  $h_1$  的增大,流道出口 I 象限速率曲线下降,而 III 象限速率曲线基本不变。分析认为,随着  $h_1$  增大,胶料流过 a 通道的

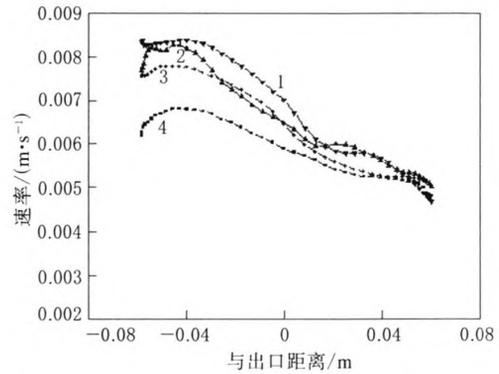


$h_1/m$ : 1—0.103; 2—0.109; 3—0.119; 4—0.128。

图 7  $h_1$  对挤出模流道出口熔体速率曲线的影响

宽度减小,局部阻力增大,造成局部能量损失增加,根据能量守恒定律, I 象限出口流率曲线下降;而 III 象限对应内部结构没有改变,因此 III 象限出口速率曲线无变化。

(2)流道其他结构相同、不同  $r$  对应的流道出口速率曲线如图 8 所示。



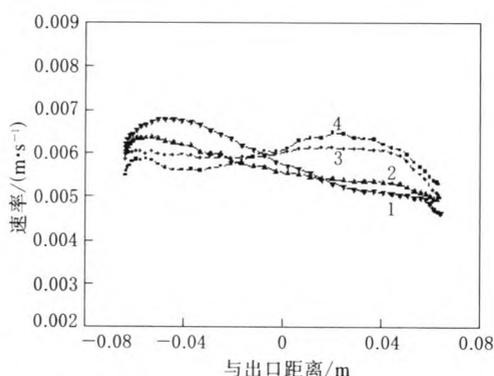
$r/m$ : 1—0.060 0; 2—0.060 5; 3—0.062 0; 4—0.062 5。

图 8  $r$  对挤出模流道出口熔体速率曲线的影响

从图 8 可以看出,随着 b 通道中  $r$  的增大, III 象限出口速率曲线下降,而 I 象限出口速率基本不变。分析认为,随着 b 通道中  $r$  的增大,通道等截面圆管直径减小,流体的沿程能量损失增大,从而使得 III 象限出口速率分布曲线下降。

(3)流道其他结构相同、不同  $h_2$  对应的流道出口速率曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出,随着  $h_2$  的减小,流道上部出口速率曲线分布下降,而下部速率曲线分布上升。分析认为,随着  $h_2$  的减小, b 通道的局部宽度增大,而 a 通道的局部宽度减小,从而使得 b 通道的局部能量损失减小,而 a 通道的局部能量损失增大,表现为流道出口胶料 I 象限出口速率曲



$h_2/m$ : 1—0.199; 2—0.204; 3—0.214; 4—0.225。

图 9  $h_2$  对挤出模流道出口熔体速率曲线的影响  
线下降,而Ⅲ象限出口速率曲线上升。

### 3 试验验证

根据数值优化分析,选择  $h_1$ ,  $h_2$  和  $r$  分别为 0.109, 0.214 和 0.062 0 m,修正设计挤出模试验效果如图 10 所示。挤出模预成型段出口处熔体的  $e_v$  值由 17% 降低到 3.4%,能够满足工业应用要求。

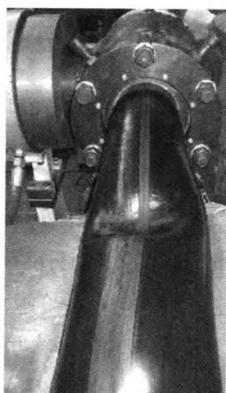


图 10 修正设计挤出模试验效果

从图 10 可以看出,修正设计后,挤出胶管是平直的,能够满足直角挤出模对流动结构的性能要求。

### 4 结语

根据流体力学中能量守恒定律和能量损失理论,定性分析了挤出模流道结构、能量损失类型与橡胶熔体速率之间的关系,为挤出模结构设计提供理论依据。

采用 ANSYS 有限元软件定量分析了流道主要结构参数对熔体挤出速率相对平均偏差的影响,经数值分析优选参数后,设计精度提高。通过修正挤出模试验,进一步验证了这种定性和定量设计的准确性。

### 参考文献:

- [1] 柳和生,涂志刚,孙燕萍,等. 聚合物口模挤出流动分析方法[J]. 高分子通报,2001(4):43-44.
- [2] 赵国群,秦升学,栾贻国,等. 异型材挤出口模内流动的数值模拟[J]. 塑性工程学报,2003,12(12):75-78.
- [3] 郝春燕,董传涛,张振扬. 直角模流道结构参数对流动平衡的影响[J]. 橡塑技术与装备,2009,35(1):1-7.
- [4] 孟祥睿,马新灵,张宏选,等. 销钉机筒橡胶挤出机内胶料三维剪切效果模拟[J]. 郑州大学学报,2006,27(2):56-61.
- [5] 戴元坎,李向阳,周持兴. 橡胶密封条挤出流道的计算机模拟优化设计[J]. 合成橡胶工业,2008,31(2):92-95.
- [6] 柳和生,涂志刚,熊洪槐. L型异型材挤出口模内聚合物熔体三维等温幂律流动的数值模拟[J]. 机械设计与制造,2004,10(5):57-60.
- [7] 韩占忠,王敬,兰小平. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:6-8.

收稿日期:2013-06-25

## Numerical Study on Melt Flow Behavior of Rubber Hose Extrusion Molding

YAN Pu-xuan, LU Jiang-rong, ZHAO Xian-shu, WANG Yu-feng, DING qian, HAN Fei-xue  
(Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Based on T-shape rubber hose extrusion mold, a virtual melt extrusion system was established according to fluid mechanics theories. By using ANSYS finite element software, the flow behavior of rubber melt was simulated in pre-shaping stage of the extrusion system, and the effect of main structural parameters of the channel (the width of split cone, the distance from drag cone front end to channel inlet, and the radius of bottom part of the channel) on the key performance of extrusion mold, the relative deviation of velocity, was analyzed. The results indicated that adjustment of the

main structural parameters according to the law of fluid mechanics could reduce the average deviation. The simulated results were confirmed by experimental test of modified extrusion mold. It was demonstrated that the numerical simulation method was a valuable guide to optimization of the extrusion mold structural design.

**Key words:** rubber hose; extrusion mold; channel; flow behavior; numerical analysis

## 丁基橡胶节能提质卤化三管齐下

中图分类号:TQ333.6 文献标志码:D

丁基橡胶(IIR)具有优良的气密性,其70%以上用于制造内胎、硫化胶囊以及密封胶带、汽车车身支座、屋顶防水卷材、贮罐衬里等,卤化IIR则主要用于生产子午线轮胎的气密层和医用胶塞。IIR的生产方法主要有淤浆法和溶液法两种,长期以来淤浆法技术由美国埃克森美孚公司和德国朗盛公司垄断,溶液法由俄罗斯陶里亚蒂合成橡胶公司与意大利Pressindustria公司合作开发。我国近年来在IIR合成技术上获得重大突破,拥有了自主技术。

**产业现状:**需求大引发项目热。目前,世界上只有美国、德国、俄罗斯、意大利、中国5个国家拥有IIR生产技术。在国际市场上,美国埃克森美孚公司和德国朗盛公司的IIR产品处于垄断地位,生产能力约占世界总生产能力的80%,但这两大公司不对外转让技术。

目前国内IIR生产企业主要有中国石化北京燕山分公司(简称燕山石化)、浙江信汇合成新材料有限公司(简称浙江信汇)、盘锦和运新材料有限公司(简称盘锦和运)和杭州龙山化工有限公司(简称杭州龙山)。燕山石化 $4.5 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 装置主要生产IIR1751, IIR1751F和IIR0745三个牌号产品。浙江信汇 $5 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 装置采用清华大学技术,生产532, 552和752三个牌号产品;盘锦和运 $6 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 装置采用石油液化气路线,将民用廉价液化气转化为高附加值的IIR。

近年来,由于下游轮胎、汽车行业的蓬勃发展,国内IIR的需求与日俱增,价格高位徘徊,投资收益相当可观,有多家企业新建或扩建生产装置,如燕山石化 $9 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的IIR扩建项目、中国海洋石油总公司 $5 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 液化石油气(LPG)IIR装置、天津陆港石油橡胶有限公司 $6 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的IIR装置等。预计到2015年,我国IIR的总生

产能力将有可能超过40万t,成为世界重要的IIR生产国之一;IIR国内总产能将超过25万t,总需求量达35万t,其中卤化IIR需求量为28万~30万t。

**研发热点:**节能、提质、卤化。IIR的技术研发主要方向为节能、增加牌号和卤化。

IIR节能降耗技术研发一直比较活跃。提高聚合温度可显著降低装置能耗,埃克森美孚的日本关联公司埃克森美孚株式会社在川崎IIR装置重大扩能改造项目中,采用的新专有技术可使IIR聚合反应在 $-75 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行,而常规技术在 $-95 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行。减小蒸汽用量是降能耗的另一举措,位于新加坡裕廊岛的朗盛IIR工厂采用的升级IIR生产新工艺显著降低了装置的蒸汽用量。

我国IIR高端产品少,远不能满足实际生产需求,特别是卤化IIR在产量、质量、品种方面急需提升。因此在保证现有IIR生产装置稳定运行的前提下,应积极开发IIR新产品,如星型支化IIR、全饱和IIR、磺化IIR、马来酸酐改性IIR、交联IIR、长链支化轻度交联IIR、液体IIR、高阻尼IIR以及聚氧化乙烯接枝卤化IIR等的研制和开发,以增加国产IIR的牌号品种,更好地满足市场需求。

卤化IIR既保留了IIR的性能,还具备与天然橡胶和丁苯橡胶快速共硫化性能,是生产子午线轮胎不可替代的高端合成新材料。国内市场对卤化IIR的需求与日俱增,并在很多应用领域正逐步替代普通IIR,因此卤化IIR将成为发展重点。目前国内生产卤化IIR的企业主要有燕山石化、盘锦和运和杭州龙山等。燕山石化采用自主技术建成国内首套 $3 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 溴化IIR装置,近日投运的盘锦和运 $3 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 卤化IIR项目则突破了传统乙烯裂解法制异丁烯的原料瓶颈,成为国内首家轮胎级卤化IIR的生产企业。

(摘自《中国化工报》,2013-10-21)