

# 橡胶护舷挤出机头流场有限元分析

曾宪奎, 边慧光, 王峰业, 宗殿瑞, 汪传生

(青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 运用 Adina 软件对 D 型橡胶护舷的挤出法生产过程进行有限元模拟分析。为了实现从机头增压段到定型段的过渡, 特地设计了急剧扩张的几何结构, 对胶料进行二次增压, 使胶料在进入定型段时流动速度均匀, 从而可保证护舷的生产质量。

**关键词:** 橡胶护舷; 挤出; 机头; 流场; 有限元分析

中图分类号: T Q336. 1+ 1; U 463. 341+ . 6 文献标识码: A 文章编号: 1000-890X(2010)02-0110-05

橡胶护舷又称橡胶护木, 因具有弹性好、吸能高、维护方便、使用寿命长等特点而得到广泛应用<sup>[1]</sup>。橡胶护舷不仅可以保护船舶和码头, 而且可以减小作用于码头的水平载荷, 提高码头的停泊能力, 使新建码头轻型化并降低造价<sup>[2]</sup>。

橡胶护舷根据受力情况不同可以分为剪切型、转动型、压缩型、充气型和水压型; 根据形状可分为圆筒形、D 型、V 型、H 型、鼓型和矩形等<sup>[3,4]</sup>。

目前, 生产橡胶护舷的主要方法是模压法。模压法成型有很大的局限性, 除了对模具本身的结构和工艺要求外, 一种规格产品需要一种特定的模具。由于橡胶护舷品种繁多, 结构各异, 因此需要大量的模具, 给护舷生产造成极大的困难。

采用增压流道机头挤出法生产橡胶护舷可以实现橡胶护舷无模具生产, 形成无限量连续成型, 可连续生产同截面各种长度的产品, 大大提高了生产效率, 降低了生产成本。这种方法适用于无骨架、截面形状固定、长度要求不一的压缩型橡胶护舷。

在国内首次采用挤出法生产橡胶护舷的新工艺, 设备研发的关键在于有增压流道的挤出机机头的设计。本研究利用 Adina 有限元分析软件分析 D 型橡胶护舷挤出法生产过程物料的流动, 直接由机头流道的实体形状转化为有限元模型, 并进行分析计算和结果处理。

**作者简介:** 曾宪奎(1967), 男, 山东青州人, 青岛科技大学在读博士研究生, 副教授, 从事橡塑机械教学、设计及研发工作。

## 1 理论模型

为了模拟流体在机头流道中的流动过程, 首先建立有限元流场分析模型, 包括几何模型、数学模型和有限元实体模型三部分。

### 1.1 几何模型

本研究机头流道三维造型如图 1 所示。

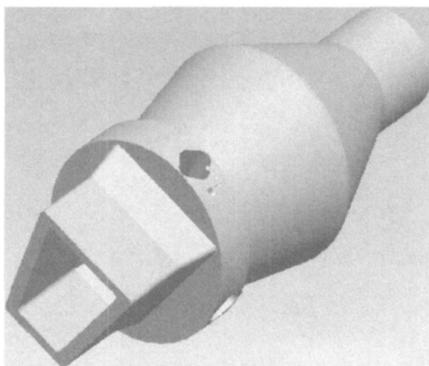


图 1 机头流道三维造型

### 1.2 数学模型

根据熔体输送的具体条件及高聚物的特性, 为模拟机头流道流场做下述假设<sup>[5]</sup>: ①熔体为不可压缩幂律流体; ②流场为稳定、等温的; ③惯性和重力等体积力远小于粘滞力, 可忽略不计; ④熔体充满机头流道; ⑤熔体相对流道壁面无滑移。

#### (1) 连续性方程

在挤出成型过程中, 机头内流动的熔体可视为不可压缩流体, 即体积单元内的密度不随时间产生局部变化, 故流体的连续性方程可简化为

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $v$  为速度。

### (2) 运动方程

对聚合物而言, 重力和惯性力可以忽略, 因此运动方程可以表达如下:

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_i}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial i} + \frac{\partial \tau_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yi}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zi}}{\partial z} \quad (2)$$

$(i = x, y, z)$

式中,  $t$  为时间,  $p$  为压力,  $\tau$  为剪切应力。

### (3) 能量方程

根据能量守恒原理, 列出能量方程:

$$\rho C_v \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} + v_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \tau_{xy} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \tau_{zx} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + \rho g \quad (3)$$

式中,  $C_v$  为比热容,  $\theta$  为温度,  $q$  为热通量,  $g$  为重力加速度。

### (4) 本构方程

根据聚合物熔体流变学原理, 聚合物熔体的粘度由两方面的因素决定, 即在聚合物熔体内自由体积和大分子长链之间的缠结。而这些因素与温度、压力、聚合物相对分子质量及其分布和分子结构相关。在聚合物流体动力学中, 幂律模型是最广泛使用的模型之一。幂律本构方程为

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = m |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma} \quad (4)$$

式中,  $\eta$  为粘度,  $m$  为粘度系数,  $\dot{\gamma}$  为剪切速度,  $n$  为幂率指数。

本研究聚合物熔体参数为:  $\rho = 1.066 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $m = 59572 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $n = 0.23$ 。这些参数是在  $110^\circ\text{C}$  条件下实测得到的。由  $n = 0.23$  可以得知, 本研究假设胶料的流体为假塑性流体。

## 1.3 有限元模型

### 1.3.1 边界条件的确定

#### (1) 压力边界条件

压力边界条件为机头入口和出口的压力差 ( $\Delta p$ ):

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (5)$$

式中,  $p_1$  和  $p_2$  分别为机头流道入口和出口压力。

#### (2) 速度边界条件

根据流道壁面无滑移的假设, 与机头壁面接触的熔体流速 ( $v_w$ ) 为零, 即熔体粘附于壁上, 故有:

$$v_w = 0 \quad (6)$$

### 1.3.2 机头流道有限元实体模型的建立

Adina 软件的前处理阶段是创建实体模型和有限元模型, 包括创建实体模型、定义单元属性、划分网格和模型修正等。Adina 软件以数学方式表达结构的几何形状, 用于在模型内部划分节点和单元, 还可以在几何模型边界上施加载荷, 但是实体模型并不参与有限元分析。所有施加在几何边界上的载荷或约束必须最终传递到有限元模型 (节点或单元) 上进行求解。在 Adina 软件中形成的实体模型如图 2 所示。

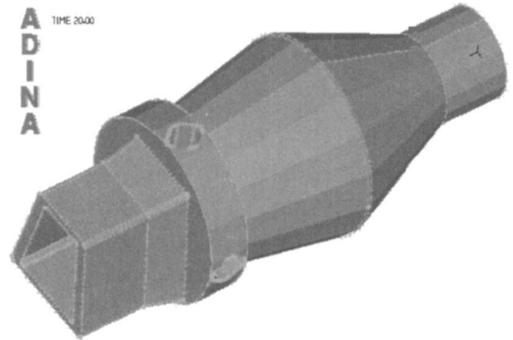


图 2 机头流道实体模型

与设计情况相结合, 为了保证计算结果的正确性, 采用国际单位制, 即长度单位为 mm, 时间单位为 s, 质量单位为 kg, 温度单位为  $^\circ\text{C}$ 。

该机头为非轴对称结构, 在 Adina 软件中建立有限元分析模型模拟分析流体在流道中的速度场和压力场的变化情况。网格划分如图 3 所示。然后, 根据实际加工工艺参数设定有限元模型的边界条件: ①定义边界点组件; ②由于壁面无滑移, 内外壁面速度为零; ③施加机头入口压力; ④无热传递。同时把作用在边界面上的载荷加到有限元模型的节点上, 有限元模型加载情况如图 4 所示。

对有限元模型加载完成后, 需要设定各工艺操作参数, 然后利用 Adina 程序对机头流道有限元模型进行求解和分析。

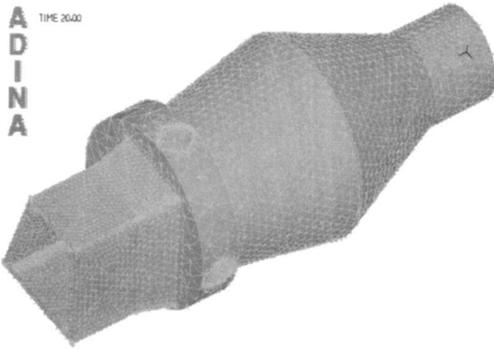


图3 通道模型有限元网格划分

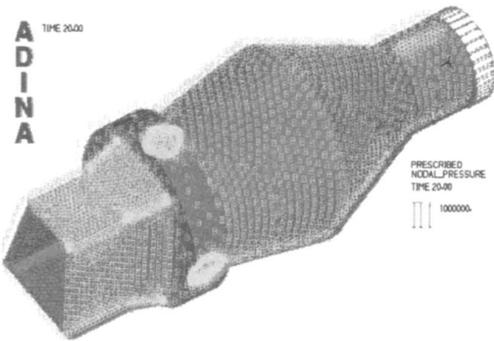


图4 加载与施加边界条件模型

## 2 计算结果与讨论

### 2.1 压力场分布

根据 Adina 软件的计算结果,可以得到机头流道整体压力降分布。机头流道三维压力分布等值云图如图 5 所示。

为了准确了解机头的内部压力分布情况,可利用 Adina 软件的 Cut Surface 功能从机头三维压力分布云图上获得机头中心截面压力分布云图,如图 6 所示。机头压力场等值切片图如图 7 所示。

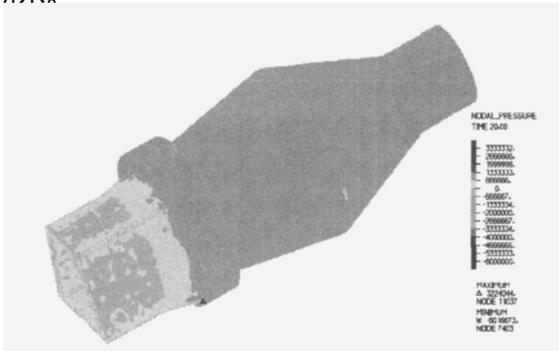


图5 机头流道三维压力分布等值云图

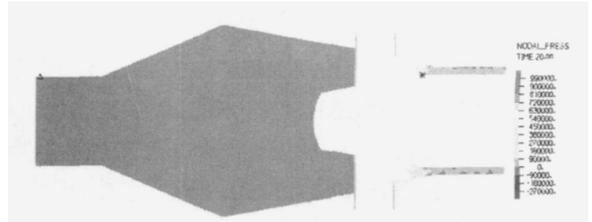


图6 机头流道中心截面压力场分布

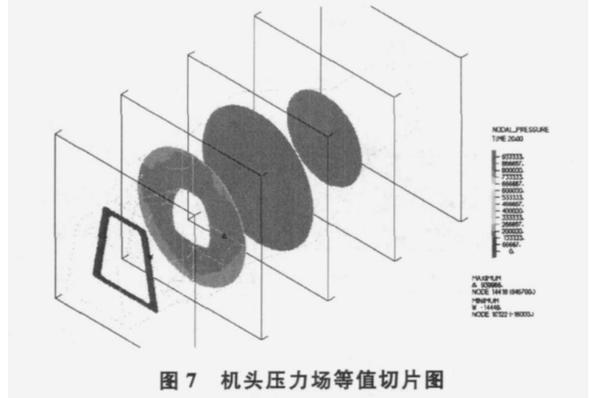


图7 机头压力场等值切片图

由图 5~7 可以看出,在整个流道上,压力变化呈现一定梯度,压力沿挤出方向递减。在几何形状突变区,压力变化也随之发生突变,尤其是在流道的成型段。由于流道厚度急剧减小,出现了明显的压力损失。但对流道整体来说,压力损失并不是很大,这与实际情况是相符的。当胶料进入定型段后,压力基本趋于稳定,这也正是流道设计的目标之一。

由于流道中心截面的压力高于壁面压力,在机头同一区域,机头流道三维压力分布异于中心截面压力分布,如图 5 和 6 所示。

### 2.2 速度场分布

在橡胶护舷挤出过程中,流动对胶料产生的剪切和拉伸作用是影响护舷规则成型的重要因素,因此,对胶料在挤出过程中的流动方式和流动特点进行研究是非常重要的。

机头流道中心截面速度场分布云图如图 8 所示。从图 8 可以看出,从机头入口处开始,沿着轴向挤出方向,速度值整体呈上升趋势,且机头中心层速度明显高于其它位置。胶料刚进入流道时,即在入口段速度变化很小;胶料进入流道过渡段时,由于流道截面积急剧变小且流道截面形状由圆形过渡到矩形,速度发生较大变化,迅速升高;胶料通过过渡段进入定型段时,由于流道剧烈变

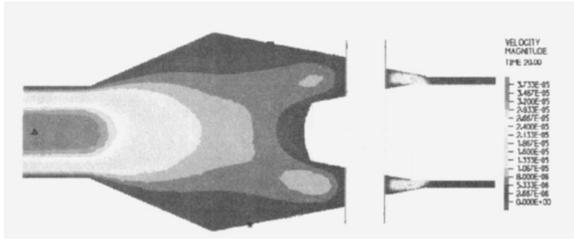


图 8 机头流道中心截面速度场分布云图

窄, 流道截面积减小, 速度在中心层达到最大值, 这与实际生产情况相符。由于胶料从过渡段到定型段的流动比较复杂, 因此该段必须有特殊的增压过渡区域。机头定型段沿挤出方向的速度分布均匀是决定半成品厚度均匀和挤出工艺合理的重要因素。

从图 8 还可以看出, 胶料从流道的增压段进入定型段后, 由于流道截面积急剧扩张使胶料速度开始下降并最终趋于平缓, 实现胶料以平稳的速度挤出。机头流道速度场等值切片图如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 三维纵深切面上的速度分布大体上关于中心轴对称。挤出护舷制品结构非对称性对应的增压段到成型段压力的不对称性可通过等值切片云图方便、直观地显示出来。

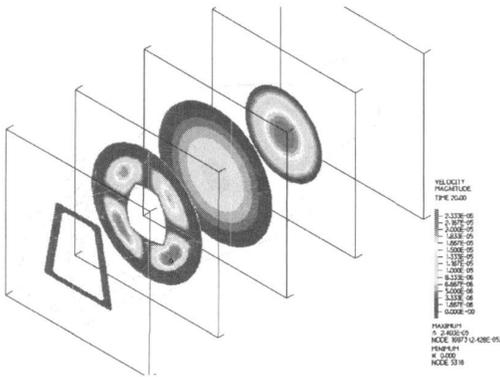


图 9 机头流道速度场等值切片图

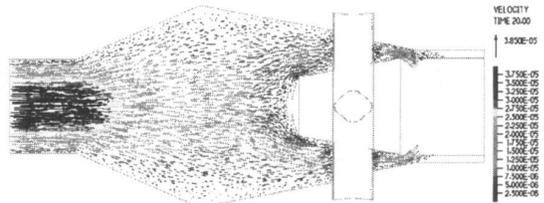
从图 9 还可以看出, 为了实现从增压段到定型段的过渡, 特意设计了急剧扩张的几何结构, 从而实现对胶料的二次增压。由于粘流态胶料在壁面上无滑移速度, 因此保证其在进入定型段时速度均匀尤为重要, 因为速度均匀性决定了挤出护舷胀大的均匀性, 从而可以保证护舷的生产质量。

由于本设计机头流道结构特殊, 流道内壁表面无滑移, 而胶料在挤出过程中受到其流动产生

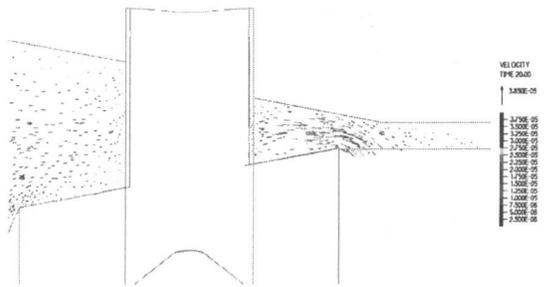
的剪切和拉伸作用, 因此从图 8 可以看出定型段存在明显的速度梯度, 有利于胶料挤出过程中产生剪切混合。

### 2.3 速度矢量分布

速度是矢量, 具有大小和方向。为研究胶料流动的方向性, 给出机头流道中心截面流场的速度矢量分布和机头流道流场三维透视速度矢量分布, 分别如图 10 和 11 所示。



(a) 矢量分布



(b) 矢量分布局部放大

图 10 机头流道流场的速度矢量分布

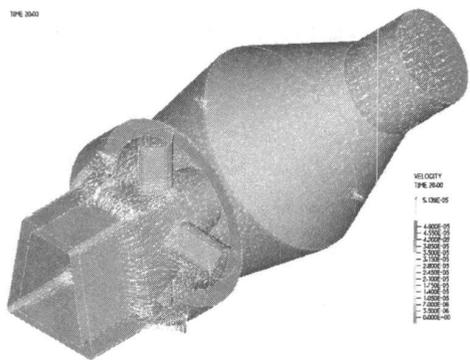


图 11 机头流道流场的三维透视速度矢量图

从图 10 可以看出, 胶料通过增压段时中心层的速度最大; 进入定型段后, 由于流道截面积急剧减小, 胶料沿扩张方向流动, 靠近流道内壁的胶料沿径向方向流动, 而流道中心层附近的胶料沿挤出方向流动, 其速度逐渐减小并趋于平缓, 胶料在挤出过程中受流动产生的剪切和拉伸作用而产生

明显的速度梯度。

从图 11 可以看出整个机头流道宏观的胶料流动情况, 通过中间支撑筋时胶料被剪切、分流, 然后出现急剧向轴线流动的趋势。

#### 2.4 粘度场分布

橡胶材料具有高粘性, 有剪切变稀行为特性, 因此在剪切速率大的区域, 胶料粘度急剧下降。机头流道中心截面的粘度场分布如图 12 所示。从图 12 可以看出, 入口处的剪切变稀现象明显。由于流道比较圆滑, 剪切速率太小, 因此粘度维持居高不下的状态, 但在入口处速度梯度较大, 剪切变稀行为明显。另外, 在出口定型段, 流体速度急剧减小, 且上半部分比下半部分严重, 这与护舷的几何形状有很大关系。

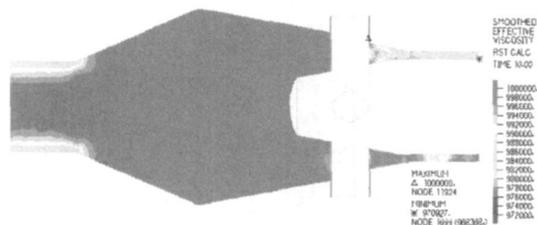


图 12 机头流道中心截面的粘度场分布

### 3 结论

利用 Adina 有限元分析软件在流场分析方面的强大功能, 对胶料在机头流道的挤出流动状况进行分析, 以验证护舷机头流道设计的合理性, 并且为了研究压力和速度对护舷挤出成型稳定性和

均一性的影响, 做了比较性模拟, 从而为优化护舷机头流道提供了理论基础。

(1) 从机头流道的压力场分布可以看出, 在整个流道上, 压力沿挤出方向递减, 在几何形状发生突变区, 压力也随之发生突变, 尤其是在成型段, 由于流道厚度急剧减小, 出现明显的压力损失, 但对流道整体来说压力损失并不是很大; 胶料进入定型段后, 压力基本趋于稳定。

(2) 从机头流道的速度场分布图可以看出, 为了实现从增压段到定型段的过渡, 特意设计了急剧扩张的几何结构, 从而实现对胶料的二次增压。由于粘流态的胶料在壁面上无滑移速度, 因此保证其在进入定型段时速度均匀尤为重要, 因为速度的均匀性决定了挤出护舷胀大的均匀性, 从而可以保证护舷的生产质量。由此可见, 在用相对小规格挤出机挤出较大规格断面直径的制品时, 设计增压流道是非常必要的。

#### 参考文献:

- [1] 刘玉田. 橡胶护舷[J]. 世界橡胶工业, 2003, 31(3): 19-24.
- [2] 谭俊波, 刘 慧. 码头防冲设备新材料的应用及其发展前景[J]. 水运工程, 2004, 25(8): 25-27.
- [3] 张 琪, 唐玲风, 张光胜, 等. 大型橡胶护舷制造装备系统的开发设计[J]. 中国化工装备, 2006, 8(2): 41-44.
- [4] 张海涛, 张 琪, 李万富. 大型橡胶护舷的研制[J]. 橡胶工业, 2004, 51(5): 290-292.
- [5] Z. 塔德莫尔, C. G. 高戈斯. 聚合物成型加工原理[M]. 2 版. 任冬云译. 北京: 化学工业出版社, 2009: 40-115.

收稿日期: 2009-08-09

## FEA on flow field in extruder die for rubber fender

ZENG Xian-kui, BIAN Hui-guang, WANG Feng-ye, ZONG Dian-rui, WANG Chuan-sheng

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

**Abstract:** D-type rubber fender extrusion process was simulated and analyzed by use of Adina software. The rapidly expanding transition geometry of extruder die from the pressurizing section to stereotyping section was especially designed to repressurize compounds, so as to make the flow rate of compounds into stereotyping section uniform, which could ensure the production quality of rubber fender.

**Keywords:** rubber fender; extrusion; die; flow field; finite element analysis