

橡胶护舷挤出过程中机头内的流场分析

汪传生, 李真, 阙璐璐, 张德伟

(青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 在橡胶护舷挤出过程中, 机头结构影响胶料的流动, 而胶料的流动对胶料所产生的剪切和拉伸作用是影响护舷成型的重要因素。利用 ADINA 对橡胶护舷挤出机头内的流场进行模拟分析, 对判断机头结构的合理性, 并优化机头结构, 缩短机头的研发周期, 具有重要的意义。模拟分析主要包括压力场、速度场、黏度场等。

关键词: 机头结构; ADINA; 流场分析

中图分类号: TQ330.41

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2009)07-0001-06

DOI: 10.3969/J.ISSN.1009-797X.2009.07.001

0 前言

随着计算机技术和数学计算方法的发展, 使得人们能够利用计算机对挤出机机头内胶料的流场进行模拟计算。利用 ADINA 有限元分析软件对橡胶护舷挤出机头内的流场进行分析, 由于通过计算可以获得相关的数据, 不需进行大量的实验, 从而缩短了机头的开发周期, 节约了大量的资金和能源; 还可以通过计算去模拟实际生产中很难达到的条件, 可以避免实验过程中的各种干扰和不稳定因素。

多年来, ADINA 在计算理论和求解问题的广泛性方面处于全球领先的地位^[1], 尤其针对结构非线性、流体、流固耦合等复杂工程问题已开发出了强大功能, 被广泛应用于各个行业的工程仿真分析, 包括机械制造、材料加工、航空航天、汽车、土木建筑、电子电器、国防军工、船舶、铁道、石化、能源等各个领域^[1]。

1 模型的建立

用有限元方法对机头内的流场进行分析, 需要建立相应流场的物理模型、数学模型和有限元模型。只有将这 3 种模型有机地结合在一起,

才能进行有限元求解。同时, 上述模型的建立必须依赖于相应的实体模型。在本文中建立的机头实体模型如图 1 所示。

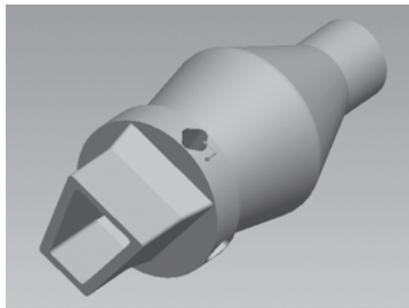


图 1 机头实体模型

1.1 物理模型

依赖于实体模型, 在 ADINA 中建立的物理模型如图 2 所示。

1.2 数学模型

考虑到流场的几何形状、物料性质、流动

作者简介: 汪传生 (1960 -), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事高分子材料加工技术、装备及机电一体化的教学和科研工作, 获国家、省、部、市级科技奖励 10 余项, 发表学术论文 50 余篇, 部分被 SCI、EI、CA 收录。

收稿日期: 2009-03-13

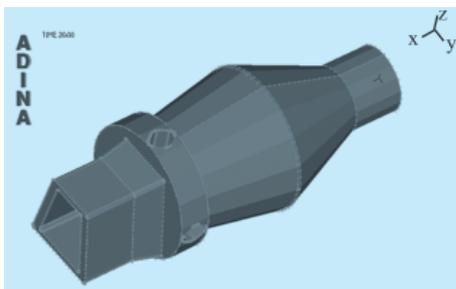


图2 ADINA 中形成的物理模型

状态、加工条件等因素造成的流场复杂性，为便于研究，做以下假设：

- (1) 流体为幂律流体；
- (2) 流场为稳定流场，即各加载物理量不随时间变化；
- (3) 雷诺数较小，可认为流体流动为层流；
- (4) 惯性力、重力等远小于黏滞力，忽略不计；
- (5) 流体为不可压缩流体；
- (6) 流体在流场壁面上无滑移；
- (7) 流体在流场内是完全充满的；
- (8) 流场为等温流场，即流场中各点温度相等，各种物性参数不随温度变化而变化。

根据连续性方程、物料运动方程、流体本构方程以及 Carreau 模型即可进行流场有限元模拟分析。

1.2.1 连续性方程

根据质量守恒原理，密闭系统的质量保持恒定。考虑流体通过一微元体的界面所引起的微元体内质量的变化。由散度的定义可知，矢量 $\rho\bar{u}$ 的散度 $\text{div}(\rho\bar{u})$ 等于单位体积通过微元体界面流出的质量流量。根据质量守恒定律，它应等于微元体内单位时间单位所减少的质量 $-\frac{\partial\rho}{\partial t}$ ，因此得出：

$$\text{div}(\rho\bar{u}) = -\frac{\partial\rho}{\partial t} \text{ 或 } \frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}) = 0 \quad (1)$$

式(1)中 ρ 和 \bar{u} 分别为流体的密度和速度。

在挤出成型过程中，熔体在机头内的流动可认为流体不可压缩^[2]，则 $\text{div}=0$ ，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（在直角坐标系下）：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (2)$$

1.2.2 运动方程

流体的运动方程是动量守恒定律对于流体运动规律的数学表达，它可由牛顿第二定律推出。根据流体动量增加的速率等于作用在单元流体上力的总合，可以得到动量增加的速率方程为：

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\text{grad}\bar{p} + \text{div}\bar{\tau} + \rho\bar{g} \quad (3)$$

其中等号右边第一项为基本流动方向上的压差，第二项为应力张量，第三项为重力。

对于聚合物而言，重力和惯性力可以忽略，所以运动方程可以表达如下（直角坐标系）：

X 方向分量：

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (4)$$

Y 方向分量：

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (5)$$

Z 方向分量：

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (6)$$

1.2.3 本构方程

在聚物流体动力学中，幂律模型是最广泛使用的模型之一^[3]。幂律本构方程为：

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad \tau = \eta\dot{\gamma} \quad (7)$$

式中：

- η ——黏度 (Pa·s)；
- n ——幂律指数；
- m ——稠度 (N·sn/m²)；
- τ ——剪应力 (Pa)；
- $\dot{\gamma}$ ——剪切速率 (1/s)。

式中的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 是一个二阶张量，其表达式如下：

$$\dot{\gamma} = (\nabla\mathbf{v} + \nabla\mathbf{v}^T) = \begin{bmatrix} \frac{2\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{2\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} & \frac{2\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.2.4 Carreau 模型

为了既描述在高剪切速率下的假塑性流体的流变性质,又描述在低剪切速率下牛顿流体的流变性质,本文采用 Carreau 模型:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + \lambda\dot{\gamma})^{2(n-1)/2} \quad (9)$$

式中:

η_0 ——初始黏度,也就是零剪切速率时的黏度;

λ ——黏弹性的特征时间;

η_{∞} ——无穷剪切黏度,通常对聚合物熔体可取为零;

n ——幂律指数;

ρ ——混炼胶密度。

1.3 有限元模型

机头内流场选用笛卡儿坐标系。坐标原点设在整个流场模型的正中心位置。为了保证计算结果的合理性和准确性,采用国际单位制,即压力单位为 Pa,长度单位为 m,时间单位为 s,质量单位为 kg。

网格是有限元的基本单位,是有限元计算得以进行的基础,网格质量的好坏直接关系到结果的正确性。通过对每一个部分划分单元组,独立地生成各部分流场的节点,可以灵活控制生成单元的数量及网格密度,从而提高求解精度。对图 2 所示的流场物理模型进行有限元网格划分,得到如图 3 所示的有限元模型。

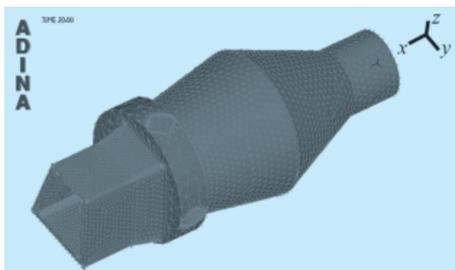


图 3 有限元模型

2 边界条件的确定

2.1 压力边界条件

压力边界条件为机头进口和出口的压力差:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (10)$$

式中: P_1 为机头流道入口的相对于大气压力; P_2 为机头流道出口的相对于大气压力。

2.2 速度边界条件

流体在这里假定是不可压缩的,并假定流动为稳态流动;对于片材挤出机头来说,其速度边界条件比较简单,除了进口面、出口面 and 对称面外,其余所有壁面都为固定壁面,其各向速度都为零。由于橡胶熔体的黏性较大,根据流道壁面无滑移的假设,所有与机头壁面边界接触的面上流速为零,即熔体黏附于壁上,故有:

$$V_w = 0 \quad (11)$$

式中 V_w 为壁上熔体流速。

本机头是规则流道,可假设其流道对称或中心面上的速度梯度为零,则:

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

式中 y 为对称中心面上的坐标。

2.3 流场的边界条件

流场的各种边界条件见表 1。

表 1 机头流场分析中的物性参数及边界条件

物性参数	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 066
	幂律指数 n	-0.385
	熔体稠度 $\mu_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	106
	熔体稠度 $\mu_{\infty} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	10
	常数 A	100
边界条件	机头两端压力差 / MPa	1
	机头内壁表面速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0

根据实际加工条件下的工艺参数,设定有限元模型的边界条件,具体包括: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施加机头入口端压力;④无热传递,同时把作用在边界面上的载荷化到有限元模型中的节点上,有限元模型的加载情况如图 4 所示。

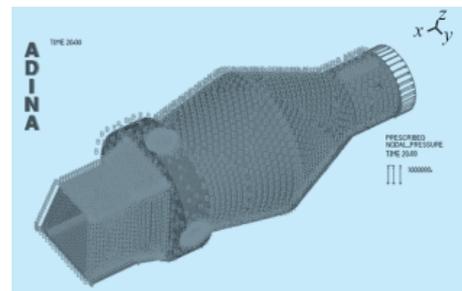


图 4 加载与施加边界条件模型

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及流场分析。

3 分析结果与讨论

3.1 压力场

根据 ADINA 分析的结果，可以得到整个流道的压力分布图机头流道整体压力降分布云图，如图 5 为三维压力分布等值云图，表示机头流道压力分布趋势。图中淡色代表低压力值，深色代表高压力值，颜色由深色到淡色，对应数值由小到大，单位为 MPa。

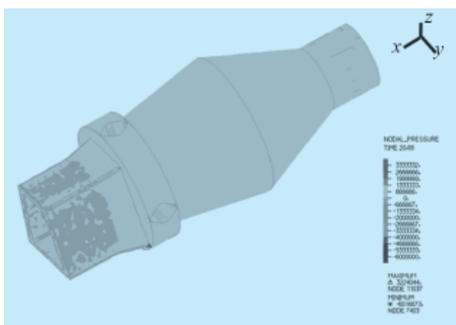


图 5 机头流道三维压力分布云图

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 功能在机头的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，图中淡色代表低压力值，深色代表高压力值，颜色由深色到淡色对应数值由大到小，单位为 MPa。

机头压力分布云图如图 5~7 所示，在整个流道上，压力变化呈现一定梯度。结合各部分区域的压力分布云图情况来看，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，压力变化也随之发生突变，尤其是在流道的成

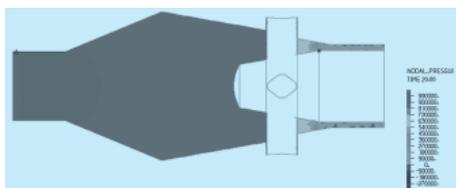


图 6 机头流道中心截面压力场分布云图

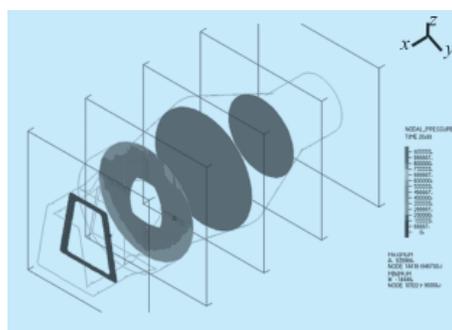


图 7 机头压力场等值切片图

型段，可以看到由于流道的厚度急剧缩小，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，这也正是流道设计所需要的最终目标之一。

由于流道的中心截面的压力要高于其流道壁面的压力，由图 6 与图 7 反映出来的结果是，在机头的同一区域，机头流道三维压力分布异于其中心截面压力分布。

3.2 速度场

机头中心截面速度场分布云图如图 8 所示，图中深色代表低速度值，浅色代表高速度值，颜色由深到浅对应数值由小到大，单位为 m/s。从图中可以看出，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，且机头中间层速度明显高于其他位置的速度。胶料刚进入流道时，在入口段速度变化很小。当胶料进入过渡流道段时，由于流道的截面积急剧变小且流道截面形状由圆形过渡到矩形，此时速度值发生较大变化，速度迅速升高。胶料通过过渡流道段进入定型段时，由于流道的厚度剧烈变窄，流道的截面积变小，此时速度在中间层达到最大值，这与实际生产中情况相符。由于胶料从过渡流道段进入机头定型段流动比较复杂，所以这一段的设计一定要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是否均匀是决定胶片制品厚度是否均匀、挤出工艺是否合理的重要因素。从图中可以看出，胶料从流道的增压段进入定型段后，由于流道的截面积的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。从图9可以看出,在三维纵深切面上的速度分布情况,大体关于中心轴对称,由于挤出护舷制品结构的非对称性,所以相应的增压段到成型段压力的不对称性,通过等值切面云图(图10)可以方便、直观地观察到相应的分布情况。

3.3 黏度场

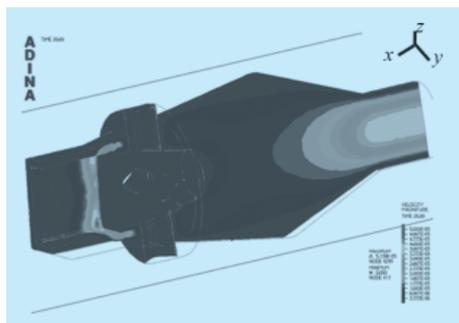


图8 机头中心截面速度场分布云图

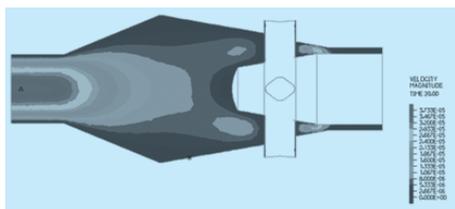


图9 机头流道中心截面速度场分布云图

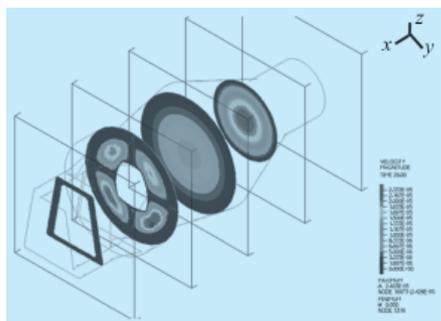


图10 机头速度场等值切片图

众所周知,橡胶材料具有高黏性,有剪切变稀行为特性,所以在剪切速率大的区域,胶料的黏度应该急剧下降,如图11所示,入口处的剪切变稀现象明显,深色的区域表示黏度较大的区域,由于比较圆滑,剪切速率太小,所以黏度维持居高不下的情况,在入口处速度梯

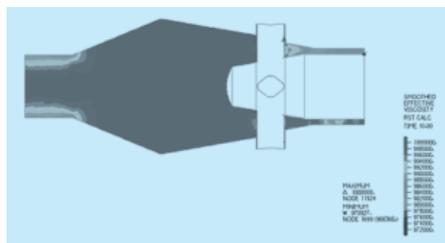


图11 黏度场云图

度较大,剪切变稀行为明显,此外,在出口处定型段,液体速度急剧减小,黏度变成较小的浅色,上半部分比下半部分严重,这和护舷的几何形状有很大的关系。

3.4 速度矢量

速度本身是矢量,具有大小和方向。图12为机头中心截面流场的速度矢量分布图。

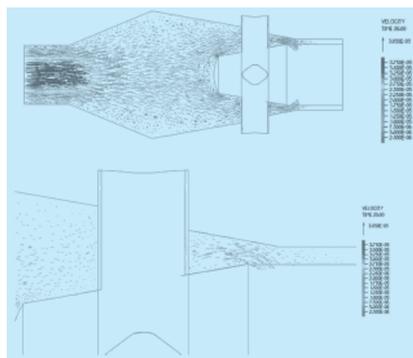


图12 机头流场的速度矢量分布及放大图表示

从图12可以看出,胶料通过增压段时的中心层面的速度最大,进入定型段后,由于流道截面积急剧缩小,胶料在机头定型段沿扩张方向流动,靠近流道内壁的胶料沿径向方向运动,而流道中间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到其流动产生的剪切和拉伸作用下产生明显的速度梯度。图13可以看出整个机头宏观的胶料流动情况,通过中间支撑筋的时候胶料被剪切、分流然后急剧发生向轴线的流动趋势。

4 结论

(1) ADINA能很准确地计算出机头内流场的压力分布,速度分布,功能强大。

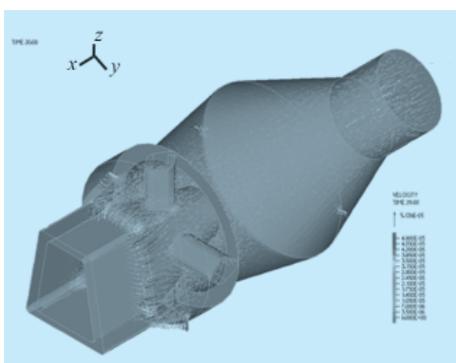


图 13 机头三维透视速度矢量图

(2) 对橡胶护舷成型的稳定性和均一性的影响因素(如机头的压力、速度分布)做了比较性模拟,为优化护舷机头的机构设计提供了理论基础。

(3) 机头设计合理,能够保证橡胶护舷挤出的规则成型及成型质量。

参考文献:

[1] 边慧光. 密炼机混炼过程中内部流场和温度场的模拟研究: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2006.

Flow field analysis of die in the extruding process for rubber fenders

Wang Chuansheng, Li Zhen, Kan Lulu, Zhang Dewei

(Mechanical and electrical engineering college of Qingdao scientific and technical university, Qingdao 266061, China)

Abstract: In the extruding process of rubber fenders, the structure of die has influence to the compound flow, by which produced shear and tensile impact which is an important factor of fenders moulding. The simulation analysis of die flow field for rubber fenders by using ADINA has great significance for determining the reasonableness of die structure, optimizing the structure and shortening the R & D period. Simulation analysis mainly includes pressure field, velocity, viscosity and so on.

Key words: die structure; ADINA; flow field analysis

(XS-06)

阿科玛计划商业化 自愈合橡胶产品

据悉,法国化工巨头阿科玛公司日前表示,公司已经决定商业化一种基于超分子化学概念的自愈合橡胶产品。公司计划开始工业化生产这种超分子材料和添加剂,这些产品将以Reverlink的品牌推向市场。据阿科玛公司称,这种自愈合橡胶材料中含有至少60%的来自于植物油的脂肪酸低聚物。该项目是阿科玛公司增加使用可再生原材料战略的组成部分。

阿科玛公司早在2008年初时就宣布与巴黎市立高等工业物理化学学院(ESPCI)软物质和化学系合作开发这种橡胶产品。公司已经花费了12个月的时间用于调试试验装置来生产这种基于超分子化学的材料,同时正在研究这

种材料可能的应用领域。该试验装置位于法国Feuchy,设计产能为100 t/年。

这种神奇的自愈合橡胶材料在一分为二后能够重新接合起来,而且仍然具有良好的弹性。这一神奇的性质无疑为新的材料开辟了广阔的应用前景。传统的橡胶都是由单一连续的弹性分子构成,彼此间以较强的共价键连接。当材料断裂时,共价键也被切断,并且无法重新恢复。而这种新的橡胶是利用较小的脂肪酸分子团来代替。通过将脂肪酸分子与尿素进行两步化学反应,一些含氮化学基团(如氨基和咪唑烷酮)就会“粘”到脂肪酸分子的两端,这样脂肪酸彼此之间就以氢键(氢原子和其他原子间的吸引力)相连。

庞晓华供稿

(XS-02)