

几种有限元分析方法在机头流道分析中的应用研究

秦晓南, 江波

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 研究了3种有限元分析方法——流函数法、侧壁因子修正法和全高三棱柱单元法在挤出机平板机头流道分析中的应用情况。结果表明, 流函数法只适合分析流道高度不变化或变化极小的情况; 侧壁因子修正法误差较小; 全高三棱柱单元法比较精确, 但分析方法复杂。

关键词: 有限元分析方法; 挤出机; 流道

中图分类号: TQ330.4⁺4; O241.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-890X(2002)09-0542-07

有限元方法(FEM)作为挤出机机头流道研究的重要工具, 已经被越来越多的人认识, 也有越来越多的人提出了计算机辅助设计机头的设想并进行了研究。随着计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助工程(CAE)的日益推广, 可以预见, 机头的计算机设计和流动模拟与经验设计相结合, 必将使机头的研究设计达到一个新的高度。

有限元分析方法有很多种, 能够用三维方法(3D)进行模拟计算当然是最理想的, 但对于挤出机机头来说, 应用最多的是二维分析方法(2D), 主要原因在于挤出机机头中的流动是相当复杂的, 它涉及到流体力学、传热学、高分子物理学以及流变学等许多学科领域, 三维有限元分析的方程和计算太复杂。采用适当的方法将机头中的三维流动简化为二维问题进行求解, 实践证明是可行的。本文介绍3种在机头流道分析中具有实用价值的二维有限元分析方法——流函数法、侧壁因子修正法和全高三棱柱单元法的原理及实际应用, 并分析比较了3种方法的优劣。

1 胶料流动的动力学基本方程

平板机头是一种典型的挤出机机头, 以图1所示的平板机头流道为例进行分析。整个机头流

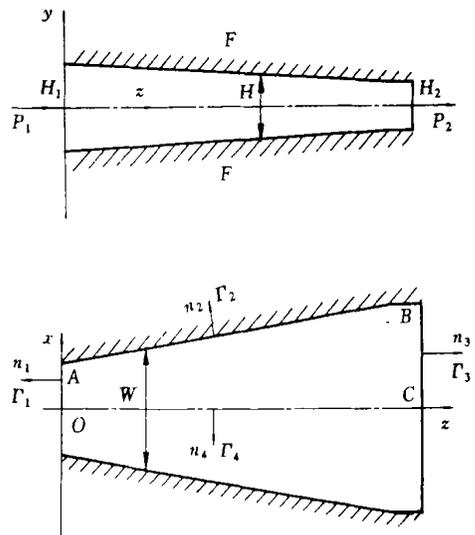


图1 平板机头流道平面图

道在上下和左右方向都是对称的, 因此仅取 $OABC$ 作为研究区域即可。

物料在机头内的流动做如下假设:

- ①流体不可压缩;
- ②流体的粘度很大, 流体的惯性力和重力与粘性力相比可忽略;
- ③流动为速度充分发展的等温层流;
- ④胶料为非牛顿型幂律流体。

因此

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \quad (1a)$$

作者简介: 秦晓南(1970-), 女, 北京人, 北京化工大学讲师, 在职博士研究生, 主要从事高分子材料加工机械方面的研究和教学工作。

$$\mu = \mu_0 e^{-b(\theta - \theta_0)} I_2^{\frac{N-1}{2}} \quad (1b)$$

式中 τ ——剪切应力;
 γ ——平均剪切速率;
 μ ——物料的粘度;
 N ——幂律指数;
 b ——温粘系数;
 θ ——加工温度;
 θ_0 ——参考温度;
 I_2 ——应变速率张量第二不变量, 可表示为:

$$I_2 = \frac{1}{2} \Delta : \Delta \quad (1c)$$

式中, Δ 为应变速率张量。

忽略惯性力和重力后, 经整理得到胶料流动的动力学基本方程:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (2a)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2b)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2c)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2d)$$

流场边界条件为:

$$P = C_1 \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (2e)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial n} + \frac{\partial V_y}{\partial n} + \frac{\partial V_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (2f)$$

$$V_x = V_y = V_z = 0 \quad \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上} \quad (2g)$$

$$P = C_2 \quad \text{在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (2h)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial n} + \frac{\partial V_y}{\partial n} + \frac{\partial V_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (2i)$$

$$V_x = 0 \quad \text{在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (2j)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial n} + \frac{\partial V_y}{\partial n} + \frac{\partial V_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (2k)$$

式中 C_1, C_2 ——流道进、出口胶料压力;
 Γ_i ——流场边界 ($i=1, 2, 3, 4$), 如图 1 所示;
 V_x, V_y, V_z ——坐标轴 x, y, z 方向的速度分量;
 P ——胶料压力;
 n ——流场边界的法线方向。

从图 1 可以看出, 机头流道段是厚度方向

(y) 收敛、宽度方向 (x) 扩展的, 实际上这是一个三维流动问题。用三维流动的有限元方法计算即使处理牛顿流体也是很复杂的, 要分析这样的流场难度很大。因此, 在下面的 3 种分析方法中, 对这种流道进行了不同程度的简化和假设。

2 3 种二维有限元分析方法简介

2.1 流函数法

如果机头流道内尺寸的变化满足 $\partial H / \partial z < 0.2$, 就可以使用润滑近似方法分析窄缝流道中的流动, 其中 $H(z)$ 为缝高, 即把流道的局部看成平行平板。

图 2 示出了窄缝流道的一小部分, 流动平面为 xOz , 设其上任一点 $M(x, z)$ 的间隙为 $H(x, z)$, 合成速度为 V_s , 单位宽度的体积流率为 q_s , 则在 s 方向上的压力梯度为:

$$\frac{\partial p}{\partial s} = \frac{\pi P^* q_s}{H^3} \quad (3)$$

式中, πP^* 为无量纲压力梯度, 它仅是流变参数 n 的函数, 因此在给定的流场中是常数; P^* 是局部平均剪切速率 q_s / H^2 下的平均粘度, 即

$$P^* = \mu_0 (q_s / H^2)^{n-1} \quad (4)$$

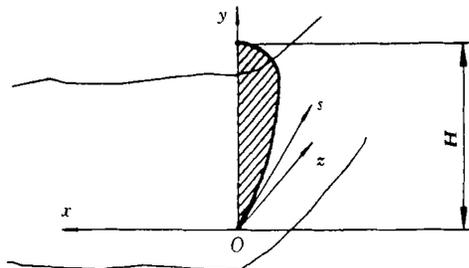


图 2 窄缝流道中的坐标系

在整个流场内, 因为各点的间隙 H 不同, 会引起速度变化, 即 $V = V(y, H)$, 将连续性方程对 y 从 $-\frac{H}{2} \sim \frac{H}{2}$ 积分, 得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} V_x dy + \frac{\partial}{\partial z} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} V_z dy$$

即

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (5)$$

因此连续性方程由原来用速度表示变换到用

单位宽度的流率来表示,存在下述关系:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Psi}{\partial z} &= q_x \\ \frac{\partial \Psi}{\partial x} &= q_z\end{aligned}\quad (6)$$

式中, $\Psi(x, z)$ 为流函数, q_x 和 q_z 是按平行平板流动分析得到的结果, 它们分别为

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\pi \mu q_x}{H^3} \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{\pi \mu q_z}{H^3}\end{aligned}\quad (7)$$

将式(7)代入下面的压力梯度恒等式

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (8)$$

得到

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{H^3} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{H^3} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

式中, μ 由式(4)用 q_s 给定, 而流函数 Ψ 与 q_s 有如下关系:

$$q_s^2 = q_x^2 + q_z^2 = \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)^2 \quad (10)$$

因此, μ 是待求函数 Ψ 的函数, 这使得式(9)

无法用解析法求解, 必须用数值方法求解。

对于图1所示的流道状况, 边界条件(2e)~(2k)可以写成如下形式:

$$\Psi \text{ 为常数, 可取 } \Psi = 0 \text{ 在 } \Gamma_2 \text{ 上} \quad (11a)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0 \text{ 在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (11b)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0 \text{ 在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (11c)$$

$$\Psi = -Q/2 \text{ 在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (11d)$$

式中, Q 为体积流率。

式(10)可以从 Galerkin 积分表达式出发, 利用 Green-Gauss 公式进行积分, 以流函数 Ψ 为变量建立有限元方程:

$$\iint_{\Omega} \frac{\mu}{H^3} \left[\frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial (\delta \Psi)}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \cdot \frac{\partial (\delta \Psi)}{\partial z} \right] d\Omega = 0 \quad (12)$$

式中, Ω 表示整个流动区域, δ 表示积分域。

在一个离散单元节点 (i, j) 上的 Galerkin 积分分为:

$$\frac{\mu}{H^3} \Psi_j^e \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \Psi_i^e}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Psi_j^e}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_i^e}{\partial z} \cdot \frac{\partial \Psi_j^e}{\partial z} \right) dx dz = 0 \quad (13)$$

式中, Ω^e 为离散单域。

利用式(13)可以计算出离散区域各个节点的流量。

2.2 侧壁因子修正法^[1]

流函数法仅对连续性方程积分, 而侧壁因子修正法则是将式(2)所描述的整个边值流动问题同时对 y 积分, 这是对流函数法的发展。

式(2)积分后变成:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (14a)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_x}{\partial z^2} \right) \quad (14b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 q_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_z}{\partial z^2} \right) \quad (14c)$$

$$P = C_1 \text{ 在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (14d)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial n} = \frac{\partial q_z}{\partial n} = 0 \text{ 在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (14e)$$

$$q_x = q_z = 0 \text{ 在 } \Gamma_2 \text{ 上} \quad (14f)$$

$$P = C_2 \text{ 在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (14g)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial n} = \frac{\partial q_z}{\partial n} = 0 \text{ 在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (14h)$$

$$q_x = 0 \text{ 在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (14i)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial n} = \frac{\partial q_z}{\partial n} = 0 \text{ 在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (14j)$$

式中, P 为沿流道高度上的单位宽总压力, q_x 和 q_z 为沿流道高度上的单位宽流率。 q_x , q_z , C_1 和 C_2 分别为:

$$P = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} P dy$$

$$q_x = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} V_x dy$$

$$q_z = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} V_z dy$$

$$C_1 = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} c_1 dy$$

$$C_2 = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} c_2 dy$$

式中, c_1 和 c_2 分别为流道进、出口胶料压力。

由于 $q_y = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} V_y dy \equiv 0$, 因此连续性方程

与运动方程中的未知量从3个速度分量变成2个流量分量。仔细观察式(14)可发现, q_x 和 q_z 与流道上、下壁面的边界状态无关, 这显然是不对的, 因为 V_x 和 V_z 受上、下壁面运动状态的影响, q_x 和 q_z 也会受影响, 而这种影响在式(14)中却不能体现出来。在流函数法中, 引入流函数边界条件时便计入了流道上、下壁面对流动的影响, 在变换中所利用的式(3)实际上也引入了流道上、下壁面对流动的影响, 因此不存在这一问题。

取边界 Γ_4 上的胶料流动来分析, 对平板机头流道来说, Γ_4 距两侧壁较远, 受侧壁的影响很小, 可以忽略其影响。根据平板机头的流量公式得到:

$$Q_0 = \left(\frac{P_1 - P_2}{\mu_0 L}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{H^{\frac{1}{n}+2}\beta}{2^{\frac{1}{n}+1} \cdot \left(\frac{1}{n} + 2\right)}$$

式中, L 为整个机头的长度, β 则为

$$\beta = \left[\frac{2(H_1 - H_2)}{H_2 \cdot (1/n)}\right]^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{H_1^2}{(H_1^{2n} - H_2^{2n})^{1/n}}$$

即

$$Q_z = Q_0 \quad \text{在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (15)$$

式(15)即为计入流道上、下壁面影响的 Γ_4 上的边界条件。

(1) 流道壁面对胶料流动的影响

机头流道截面如图3所示。在流道中取出一小单元 $ABCD$, 其 $\Delta x = 1$, H_i 为其内一点流道高, 若以 q 表示无上、下壁面时流过单元 $ABCD$ 的流率, 以 Q 表示有上、下壁面时流过单元 $ABCD$ 的流率, 则有

$$Q = qF_P \quad (16)$$

其中

$$F_P = 1 - \frac{192 W_i}{\pi^5 H_i} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{i^5} \tanh\left(\frac{i\pi H_i}{2 W_i}\right)$$

式中, h 为流道的高宽比。

设 p 为胶料沿 oy 方向上的平均压力, 则

$$P = pH \quad (17)$$

当单元 $ABCD$ 分得足够小时, 可用平均高度 H 表示 H , F_P 在小单元内也可以看作是在平均高度 H 下的形状因子, 经整理, 式(14)成为

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} = 0 \quad (18a)$$

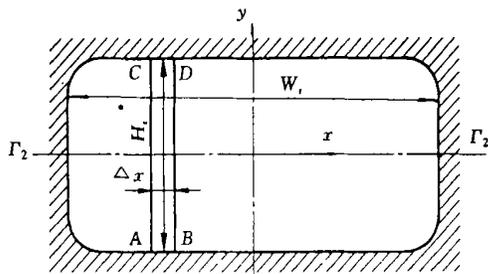


图3 机头流道横截面

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial z^2} \right) \quad (18b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial^2 Q_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_z}{\partial z^2} \right) \quad (18c)$$

$$p = c_1 \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (18d)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial n} = \frac{\partial Q_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (18e)$$

$$Q_x = Q_z = 0 \quad \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上} \quad (18f)$$

$$p = c_2 \quad \text{在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (18g)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial n} = \frac{\partial Q_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (18h)$$

$$Q_x = 0 \quad \text{在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (18i)$$

$$Q_z = Q_0 \quad \text{在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (18j)$$

式中, η 为当量粘度

$$\eta = \mu / (F_P H) \quad (18k)$$

式(18)是以沿流道高度方向上的流量 Q_x , Q_z 和平均压力 p 为未知变量的二维方程。

(2) 建立有限元方程

本研究采用流量(速度)二次插值函数逼近, 压力线性插值逼近。

$N_i^Q (i=1, 2, \dots, 6)$ 和 $N_j^P (j=1, 2, 3)$ 为本研究所采用的插值函数, N_i^Q 为单元的节点平均压力插值函数, 其具体表达式见文献[2]。

采用 Galerkin 方法, 以流率 Q_x , Q_z 和平均压力 p 为场变量建立有限元方程, 在一个离散单元节点上的 Galerkin 运算过程如下:

$$\int_{\Omega^e} H_j \left(\frac{\partial Q_x^e}{\partial x} + \frac{\partial Q_z^e}{\partial z} \right) dx dz = 0 \quad (19a)$$

$$\int_{\Omega^e} W_i \left[\left(\frac{\partial^2 Q_x^e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_x^e}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p^e}{\partial x} \right] dx dz = 0 \quad (19b)$$

$$\int_{\Omega^e} W_i \left[\eta \left(\frac{\partial^2 Q_z^e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_z^e}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p^e}{\partial z} \right] dx dz = 0 \quad (19c)$$

式中, H_j 和 W_i 分别为连续性方程和动量方程的加权函数, 一般取

$$\begin{aligned} H_j &= N_j^P \\ W_i &= N_i^Q \end{aligned} \quad (20)$$

利用式(19)可以计算出离散域内各个节点的流量。

2.3 全高三棱柱单元法^[3]

根据挤出机流道的特点, 提出一种三维立体单元——全高三棱柱单元(见图4), 并对单元中的插值函数作了特殊规定。

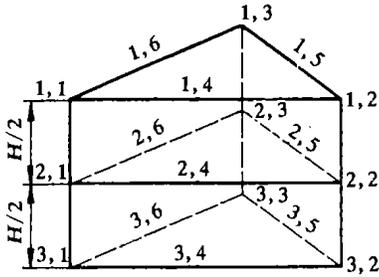


图4 全高三棱柱单元

将式(2)对高度 y 积分, 得

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} = 0 \quad (21a)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial z^2} \right) \quad (21b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 Q_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q_z}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (21c)$$

$$P = C_1 \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (21d)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial n} = \frac{\partial Q_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (21e)$$

$$Q_x = Q_z = 0 \quad \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上} \quad (21f)$$

$$P = C_2 \quad \text{在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (21g)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial n} + \frac{\partial Q_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (21h)$$

$$Q_x = 0 \quad \text{在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (21i)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial n} + \frac{\partial Q_z}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } \Gamma_4 \text{ 上} \quad (21j)$$

式中, P , Q_x , Q_z , C_1 和 C_2 与式(14)相同。

由于 $Q_y = \int_{-H/2}^{H/2} V_y dy \equiv 0$, 因此连续性方程

与运动方程中的未知量便从3个速度分量变成2个流量分量。图4示出全高三棱柱单元模型, 单

元的高度为单元所在流场区域的全高度, 单元的上下两个三角形平面是流场的边界, 中间平面为流场的中平面, 坐标系原点在中平面上。在实际的流场中, 流场的高度并非处处一致, 但本研究选择的 xoz 平面上的三角形单元被认为足够小, 可以将单元中的高度看作是处处一致的, 这个高度就是单元区域的平均高度。

单元上的节点编码采用双码制, 第1个号码 i ($i=1, 2, 3$) 表示 xoz 三角形平面的号码, 第2个号码 j ($j=1, 2, \dots, 6$) 表示第 i 个三角形平面上的第 j 个节点。

(1) 全高三棱柱单元法的插值函数

本研究采用流量(速度)二次插值函数逼近、压力线性插值逼近。

N_{ij}^Q 和 N_{ij}^P 为插值函数, N_{ij}^Q 为全高三棱柱单元的节点流量插值函数, N_{ij}^P 为全高三棱柱单元的节点平均压力插值函数:

$$N_{ij}^Q = N_{yi}^Q N_j^Q \quad i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6 \quad (22a)$$

$$N_{ij}^P = N_{yi}^P N_j^P \quad i, j=1, 2, 3 \quad (22b)$$

式中, N_{yi}^Q 和 N_j^P 分别为 xoz 平面上节点流量和平均压力的二维插值函数, 经过推导得出:

$$N_{yi}^P = 1 \quad (23)$$

$$N_{y1}^Q = \frac{2^{s-1}}{H^s} |y|^s + \frac{y}{H} \quad (24a)$$

$$N_{y2}^Q = \frac{2^s}{H^s} |y|^s + 1 \quad (24b)$$

$$N_{y3}^Q = \frac{2^{s-1}}{H^s} |y|^s - \frac{y}{H} \quad (24c)$$

至此已经求出了流量(速度)和平均压力的插值函数。单元中任一点的流量[速度(Q_x^e , Q_z^e)]和压力(P^e)的近似函数可以采用离散变量和插值函数表示为:

$$\begin{aligned} Q_x^e &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 N_{yi} N_j^Q Q_{xij} = \sum_{i=1}^3 N_{yi} [N^Q] \{Q_x\}_i \\ &= [N_y] [N^Q] \{Q_x\} \end{aligned} \quad (25a)$$

$$\begin{aligned} Q_z^e &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 N_{yi} N_j^Q Q_{zij} = \sum_{i=1}^3 N_{yi} [N^Q] \{Q_z\}_i \\ &= [N_y] [N^Q] \{Q_z\} \end{aligned} \quad (25b)$$

$$P^e = [N^P] \{P\} \quad (25c)$$

(2) 建立有限元方程

采用 Galerkin 方法, 以流量 Q_x , Q_z 和平均压力 p 为场变量建立有限元方程, 在一个离散单

元节点(i, j)上的 Galerkin 运算如下:

$$\int_{\Omega} H_{ij} \left(\frac{\partial Q_x^e}{\partial x} + \frac{\partial Q_z^e}{\partial z} \right) dx dy dz = 0 \quad (26a)$$

$$\int_{\Omega} W_{ij} \left[\mu \left(\frac{\partial^2 Q_x^e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_x^e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q_x^e}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p^e}{\partial x} \right] dx dy dz = 0 \quad (26b)$$

$$\int_{\Omega} W_{ij} \left[\mu \left(\frac{\partial^2 Q_z^e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_z^e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q_z^e}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p^e}{\partial z} \right] dx dy dz = 0 \quad (26c)$$

式中, Ω^e 为图 4 所示的全高三棱柱单域; H_{ij} 和 W_{ij} 分别为连续性方程和动量方程的加权函数, 一般取

$$\begin{aligned} H_{ij} &= N_j^Q \\ W_{ij} &= N_{ij}^Q = N_{yi} N_j^Q \end{aligned} \quad (27)$$

利用式(26)可算出离散区域各节点的流率。

3 平板机头的计算结果^[4]

以 $\Phi 90$ 冷喂料橡胶挤出机所配用的平板机头进行计算, 其内腔流道如图 1 所示, 机头压力为 6.0 MPa, 物料为胎面胶。

胶料参数为: $\mu = 1.23 \times 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $n = 0.20$, $\theta_0 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $b = 0.015$ 。挤出胶料温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

将挤出条件、流道形状和单元划分等已知条件输入程序中即可得到流场中各节点的流率, 计算结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 3 个理论计算的曲线基本吻合。流函数法的曲线比较平直, 与实验相差最大, 它只适合分析流道高度不变化或变化极小的情况, 因为在分析中它将边界都看作流线, 无法反映流道高度的变化。侧壁因子修正法的曲线比流函数法的曲线更接近实际情况, 但仍然没有完全反映出实际情况, 在其公式中引入 F_P 是正确的, 但侧壁 Γ_2 对靠近 Γ_1 的单元影响最大, 而对

流场中心的单元应没有影响, 但无法知道这一函数关系, 在计算中只能使用同一个 F_P 。全高三棱柱单元法的曲线与实际最接近, 尤其是在靠近侧壁 Γ_2 的地方, 因为在分析过程中简化和假设相对较少, 考虑了 $\partial V_x / \partial y$ 和 $\partial V_z / \partial y$ 项, 即流道高度对流量的影响, 比引入侧壁因子 F_P 准确, 也更接近实际情况, 应用范围更广泛, 尤其适合分析板类机头流道和螺槽中的胶料流动。

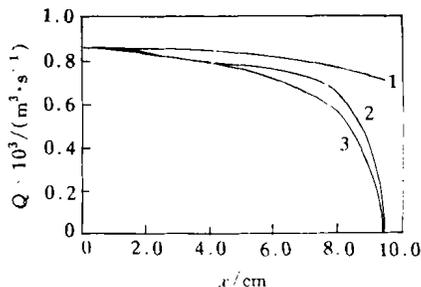


图 5 机头出口流率分布

1—流函数法; 2—侧壁因子修正法; 3—全高三棱柱单元法

总之, 3 种分析方法均可用于分析板类机头流道中的胶料流动, 其中流函数法比较粗略, 侧壁因子修正法误差较小, 全高三棱柱单元法比较准确, 但分析方法复杂。3 种方法各有优劣之处, 适用不同的场合, 可以根据实际情况和计算精度要求选用。

参考文献:

- [1] 孙均锁, 陈伦纪. 板型机头流道的有限元计算辅助设计[J]. 中国塑料, 1988(9): 23-28.
- [2] 王瑁成. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 58-83.
- [3] 郭建新. 销钉机筒挤出机销钉段的理论与实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 1987.
- [4] 秦晓南. 高聚物复合共挤出流动的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 1995.

收稿日期: 2002-03-04

Application of different finite element methods to analyzing flow channel in extruder die

QIN Xiao-nan, JIANG Bo

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The flow channel in extruder sheeting-die is analyzed with 3 finite element methods, i. e.

flow function method, sidewall factor correcting method and total height triangular column element method. The results show that the flow function method is only suitable for the flow channel with constant height or least-variable height; the smaller error is obtained with the sidewall factor correcting method; and the total height triangular column element method is more accurate, but the operation is complex.

Keywords: finite element analysis; extruder; flow channel

山东玲珑机电设备有限公司 兼并带来新气象

中图分类号: F27 文献标识码: D

1997年4月,招远国营机电设备总厂被市属集体企业山东玲珑橡胶有限公司兼并。原机电设备总厂是由烟台水泵厂、招远市变压器厂合并而成的国营企业,1997年拥有职工800多人,而其中生产工人只有200多人,管理人员高达200多人,其它占总人数一半的400多人大都为挂空档或挂空户人员,企业总资产只有4000万元,亏损达450万元,拖欠工人工资150万元,面临破产和倒闭。

山东玲珑橡胶有限公司经过一番深刻的讨论酝酿,兼并机电设备总厂的方案形成了:原企业领导干部全部就地免职,愿意接着干的写申请重新任命,不愿意干的可以调离。原企业在岗生产的职工全部留用在原岗位,补发拖欠的工资和养老保险,其它挂空档的人员可以安排到轮胎厂车间劳动,不服从安排的一律清理。此举一出,机电总厂在岗工人欢欣鼓舞,认为自己有盼头了,企业有盼头了。

首先解决的是人的问题。先从领导和管理人员抓起,组建了新的机电设备总厂的领导班子,精减了管理人员,安置了一批下岗职工,补发了原厂拖欠的工人工资和养老保险。由于措施得力,兼并工作顺利完成,技术骨干和技术工人以及肯吃苦的人自愿留下了。第二步是企业的发展问题。建造一个新的现代化的机电设备生产企业的方案很快形成并付诸实行了。投入资金、引进人才、扩大项目,山东玲珑橡胶有限公司以每年1000万元的投入规模改造机电设备总厂。在被兼并的原招远市锻压机械厂厂址的基础上重新建造了现代化生产厂房,用了不到4年时间,全部将原机电设

备总厂搬迁改造完毕。从国外引进的各种先进的生产设备陆续到货并投入安装生产。

如今机电设备有限公司已成为一个以橡胶机械为龙头,轮胎硫化机(包括斜交轮胎、半钢和全钢子午线轮胎)为主要产品,水泵、变压器、农业机械和轮辋为辅助产品的多品种、跨行业的机械生产企业,工人的工资比1997年翻了3番,企业的固定资产由1997年的1100万元增加到3500万元,产值、利润呈几何倍数增长,一跃成为胶东最大的机械加工生产企业。

(山东玲珑橡胶有限公司 刘纯宝供稿)

2002年中国沈阳国际鞋类、皮革制品及 制鞋设备博览会暨全国胶鞋行业 产品出口工作会议在沈阳召开

中图分类号: TQ336.7 文献标识码: D

2002年7月1~3日,由沈阳市人民政府和中国橡胶工业协会胶鞋分会联合主办的2002年中国沈阳国际鞋类、皮革制品、制鞋设备博览会在辽宁工业博览馆隆重举行。参展的双星集团在此次“沈博会”上备受行业内外瞩目。

博览会期间,胶鞋分会召开了全国胶鞋行业产品出口工作会议,共有34个出口生产厂家参会。此次会议旨在探讨我们如何应对当前我国已加入WTO的新形势,抓住机遇,发展行业,壮大自己的品牌,使中国的品牌走向世界,更好地参与国际竞争。胶鞋分会秘书长陈宾华就当前行业形势和产品出口状况作了“抓住机遇,发挥优势,开创出口工作新局面”的报告。双星集团、沈阳胶鞋总厂等出口有特色的企业作了经验介绍。会上还对2001年度全国胶鞋行业产品出口十佳企业进行了表彰,双星集团位居“十佳”榜首。

(双星集团宣传处 王开良供稿)