

文章编号:1671-6833(2006)02-0056-06

销钉机筒橡胶挤出机内胶料三维剪切效果模拟

孟祥睿, 马新灵, 张宏选, 王定标, 魏新利

(郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 利用 CFD(计算流体力学)软件 FLUENT, 以单螺杆销钉机筒橡胶挤出机内熔融段和计量段的非牛顿流体为对象, 对其三维剪切效果进行模拟. 通过对比有销钉和无销钉情况下螺槽横截面上和不同半径圆柱截面上的剪切效果, 发现销钉能加强对挤出机内的胶料的剪切作用, 有利于减少螺槽根部的停滞区, 并且每排销钉个数越多, 对胶料的剪切作用越大; 通过对整个流体区域内流场的体积加权平均剪切率对比发现, 销钉能有效提高其平均剪切率 14%~28%, 并大幅减小剪切的不均匀性.

关键词: 数值模拟; 销钉机筒; 剪切率; FLUENT

中图分类号: TQ 330.44 **文献标识码:** A

0 引言

由于销钉机筒冷喂料橡胶挤出机具有挤出量大、塑化效果好的优点, 所以销钉机筒冷喂料橡胶挤出机在我国橡胶工业中得到了广泛的应用. 例如在子午胎生产中, 胎面挤出、复合胎面挤出、三角胶及各种型胶的挤出几乎全部使用了销钉机筒冷喂料橡胶挤出机.

挤出制品的质量与胶料在挤出过程所受到的剪切作用大小有关, 并且希望所受到的剪切作用比较均匀. 局部高剪切可能导致胶料烧焦, 局部的低剪切可能导致胶料塑化不好. 因而希望挤出过程产生一个比较均匀的剪切效果. 为考察挤出机内的剪切混合效果, 前人主要依靠试验手段^[1,2], 但做试验周期长、费用高. 后随着计算机软、硬件发展迅速, 又有魏新利等^[3~6]使用软件对挤出机内流场进行数值模拟以克服前述问题, 但由于他们把挤出机内的流体黏度按固定值考虑以及只对局部结构进行了模拟, 与实际状况相差较大.

笔者针对这些问题进行了相应的改进: 将流体黏度与所受剪切率相关联, 不仅模拟流场流动而且重点研究销钉个数对挤出机流场中的剪切率分布的影响, 为设计优良的挤出机结构提供参考依据.

1 计算模型

1.1 螺杆结构

以作者所设计的 $\Phi 90$ 销钉机筒挤出机为算例, 计算处于熔融段和输送段的流体. 熔融段和输送段的螺杆的几何形状如图 1 所示. 熔融段螺槽宽为 54 mm(螺旋升角为 20°), 在输送段螺槽宽为 45 mm, 螺槽深均为 15 mm, 销钉的排间距为 72 mm, 每排销钉的个数为 4, 6, 8, 10 个, 销钉直径 9 mm, 插入深度为 13.5 mm, 螺杆根部直径为 60 mm, 螺杆外圆为 90 mm, 螺楞的横截面为梯形, 其顶部宽度为 6 mm, 底部宽度为 15 mm, 螺楞底部的圆角半径为 5 mm, 螺楞上开槽宽度为 14 mm.



图 1 $\Phi 90$ 螺杆三维图

Fig.1 3D drawing of $\Phi 90$ screw

1.2 网格划分

由于挤出机内流体几何结构复杂, 无法使用六面体结构化网格划分, 因此, 在本算例中采用四面体非结构化网格. 建模、网划分及边界的分组在 GAMBIT 模块下完成. 网格为 TGrid(非结构化四面体)网格, 总的网格数为 120 万个.

1.3 计算方法

收稿日期:2006-02-08; 修订日期:2006-03-20

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(004031500); 国家“211工程”重点学科建设资助项目.

作者简介:孟祥睿(1974-), 男, 河南巩义人, 郑州大学在读博士研究生, 主要从事过程装备优化及数值模拟.
万方数据

考虑到胶料的黏度很大,同时流速比较小,采用层流模型。

计算在 FLUENT 软件下完成.采用旋转参考坐标系,坐标的 Z 轴与螺杆的旋转轴重合,方向指向螺杆头部.令 \vec{U} 代表绝对速度, \vec{U}' 代表相对速度,两种速度之间的关系如下:

$$\vec{U}'_r = \vec{U} - (\vec{\Omega} \times \vec{r}). \quad (1)$$

其中: $\vec{\Omega}$ 为坐标系旋转角速度, \vec{r} 为位置向量.则连续性方程为

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U}'_r) = 0. \quad (2)$$

运动方程为

$$\nabla (\rho \vec{U}'_r \times \vec{U}'_r) = -\nabla p + \nabla(\epsilon) + \rho \vec{g}. \quad (3)$$

胶料的物性参数:胶料为非牛顿流体,其表观粘度和其所受剪切速率有关^[7-9], p 为静压; ∇ 为哈密尔顿算子; $\rho \vec{g}$ 为质量力; ϵ 为应力张量.根据高分子物理学中的经验公式,有: $\mu_a = \mu_0 \dot{\gamma}^{n-1}$, 其中 μ_a 为表观黏度, n 为非牛顿指数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; μ_0 为粘度系数,我们暂不考虑温度对黏度的影响.本文以天然橡胶为模拟对象,其非牛顿指数 $n = 0.1$, 黏度系数 $\mu_0 = 115 \text{ kPa}\cdot\text{s}$, 密度 ρ 为 925 kg/m^3 , 分子量为 $17\ 000$ ^[9].

1.4 边界条件

机筒内表面、销钉表面设为绝对静止壁面,壁面条件为无滑移,即与这几个壁面接触的物料相对于壁面的速度为零。

螺杆表面设为相对静止壁面,即相对于坐标系的旋转速度为 0,坐标系的转速分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60 r/min;

进口设为压力进口,出口设为压力出口,反向压差(计算模型的出口压力 - 入口压力)取 2 MPa,为计算方便,入口压力设为零。

2 结果与讨论

在橡胶挤出过程中,黏性热的产生、热量的传递、功耗等均与挤出机胶料所受的剪切作用有关.在本文中剪切率的计算公式为

$$\dot{\gamma}^2 = 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 \quad (4)$$

2.1 螺槽横截面上的剪切率分布

为考察销钉对螺槽中胶料的剪切作用,作者在无销钉挤出机挤出段螺槽处和销钉机筒挤出机同一排某个销钉前后以及销钉处各取一个螺槽横截面,对比各截面上的剪切率分布状况.横截面位置如图 2 所示,图中大写字母 N, A, B, C 指明的位置是要考察的截面.图 3 是在反向压差为 2 MPa、螺杆转速分别为 10, 30, 50 r·min⁻¹ 时各截面上剪切率云图对比。

(1) 无销钉结构的螺槽横截面上靠近截面中心存在剪切作用比较小的核心区域,靠近机筒壁区域的剪切率极高;在螺槽底部中间部分存在一个剪切作用相对比较高的区域;在横截面上靠近螺楞根部处的剪切作用很小;低转速时机筒壁对胶料的剪切作用在无销钉插入时比有销钉插入时大许多。

(2) 当有销钉插入时,能有效地打破剪切作用较低的核心区域,这与文献[10]描述一致,同时还能有效地增加螺楞根部的剪切作用;但在销钉前后的截面上依然存在低剪切率的核心。

(3) 在低转速时销钉头部的附近胶料所受剪切率比其它地方高,但随着转速的增加,机筒壁对胶料的剪切作用迅速增加,在 30 r/min 时已经超过销钉对胶料的剪切作用。

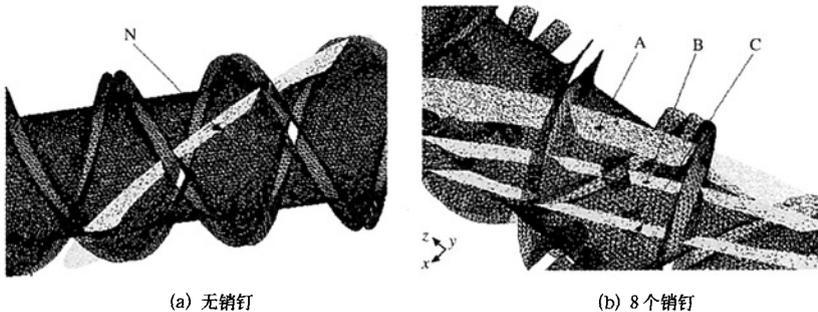


图 2 横截面位置示意图
Fig.2 Cross - section site non pin (left) and 8 pin (right)

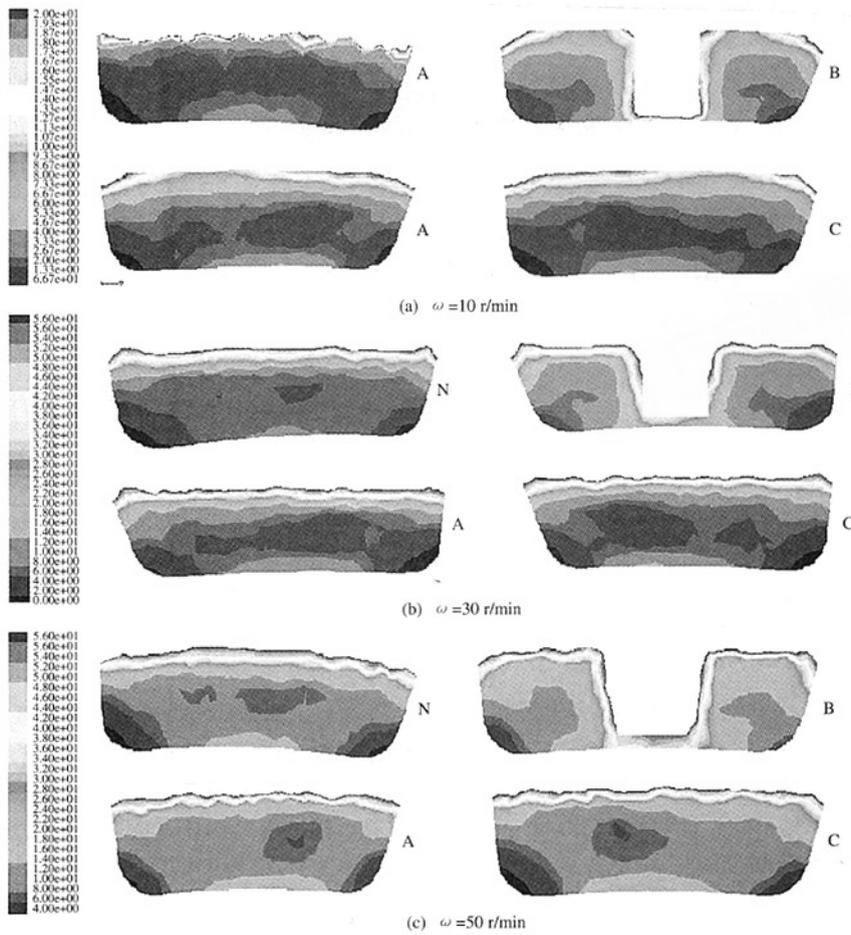


图3 无销钉和每排8个销钉的螺槽横截面剪切效果对比

Fig.3 Contours of shear effect of non pin & 8 pins in different cross-section

2.2 不同半径的圆柱截面上的剪切率分布

在螺槽横截面上只能观察单个销钉的剪切作用,多个销钉的联合剪切作用可以从不同半径的圆柱截面上观察.图4、图5分别是在反向压差2 MPa、螺杆转速为10 r/min时,半径为35 mm和40 mm的圆柱截面上,不同销钉个数对胶料的剪切作用的对比.

(1) 销钉能够有效的增加圆柱面上有销钉区域的剪切作用,并且随着每排销钉个数的增加其共同影响的范围也增加.

(2) 随着半径的增加同一半径的圆柱面上的剪切效果趋于均匀,这是由于半径增加,机筒的剪切作用得到加强,并且逐渐成为主要影响因素.

(3) 在螺楞上开槽位置的剪切作用低于没有开槽区,并且当销钉位于开槽附近时,销钉的影响也仅限于这个销钉附近,而不能与其相邻的销钉共同发挥作用.

2.2.1 剪切率的数值分析

由螺槽横截面和圆柱截面上的剪切率分布云图可见,销钉的存在能有效地增加对胶料的剪切作用,但是销钉对胶料的剪切作用的分布是不均匀的,如销钉周围的剪切作用明显高于其它地方.

从图片上只能定性地观察局部的剪切效果,从整体上定量地分析挤出机内胶料所受剪切作用对挤出机的设计有着十分重要的意义.

由于考察区域内当销钉个数不同时流体区域的体积不同,因此定义平均剪切率为

$$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{\int_V \dot{\gamma} dV}{\int_V dV} \quad (5)$$

也称其为体积加权平均剪切率. $\dot{\gamma}$ 是流场中任意微元 dV 处的剪切率.同时考虑到不同结构的挤出机的挤出量(质量流量)也不一样,为更准确的考察销钉的作用,以平均剪切率 $\bar{\dot{\gamma}}$ 除以质量流量来表示挤出机对挤出的单位质量的胶料所施加的

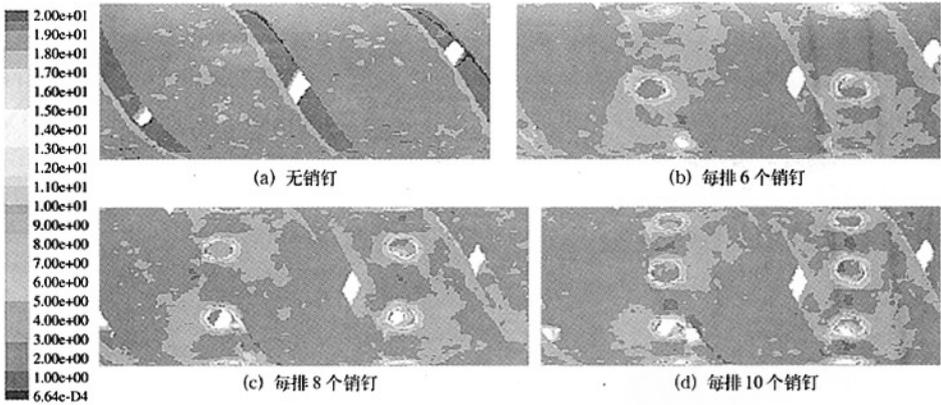


图 4 $R = 35 \text{ mm}$ 圆柱形截面上剪切效果对比

Fig.4 Contours of shear effect in column cross - section of $R = 35 \text{ mm}$

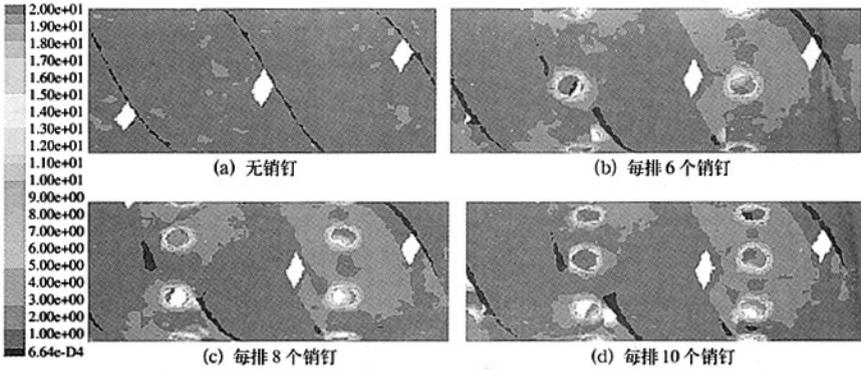


图 5 $R = 40 \text{ mm}$ 圆柱形截面上的剪切效果对比

Fig.5 Contours of shear effect in column cross - section of $R = 40 \text{ mm}$

剪切率,本文称之为单位质量流量平均剪切率,以符号 ψ 表示,不考虑其单位.

图 6 为体积加权平均剪切率,图 7 为其与质量流量的比值随销钉数和转速的变化.

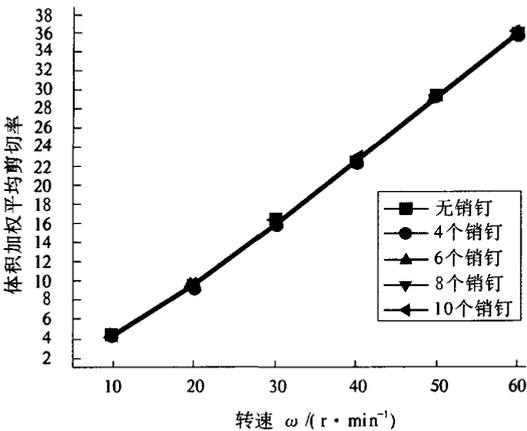


图 6 体积加权平均剪切率

Fig.6 Volume - weighted strain rate

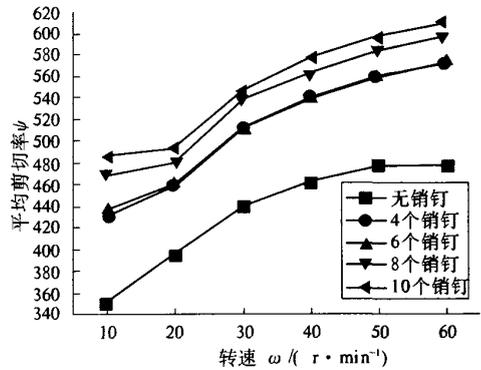


图 7 单位质量流量平均剪切率

Fig.7 The ratio of Volume - weighted strain rate and mass flux

由图 6 可见,单从体积加权平均剪切率考虑,销钉的影响并不明显,但由图 7 发现,综合考虑质量流量时销钉的对胶料的剪切作用十分明显.由图 7 可见,在同样转速下,插入销钉后能有效地提高对单位质量的胶料的剪切率,并且随着销钉个数的增加而增加 14% ~ 28%;还可以发现,对

Φ90 挤出机而言,单位质量流量的体积加权平均剪切率在插入 4 个销钉和 6 个销钉的差别不大,插入 10 个销钉的 ψ 值则比插入 8 个销钉时稍微增大(增幅小于 5%),但插入 8 或 10 个销钉时, ψ 值比插入 4 或 6 个销钉时增加很多;并且,随着转速的增加,单位质量流量的平均剪切率的增加幅度逐渐变小,尤其是对无销钉挤出机而言,其单位质量流量的体积加权平均剪切率在 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时达到最大值。

局部的高剪切作用,会使胶料温度升高致使胶料烧焦.因此整体对剪切率的分布均匀性进行考察有重要意义,定义剪切率均方差为

$$s^2 = \frac{\int_V (\dot{\gamma} - \bar{\dot{\gamma}})^2 dV}{\int_V dV} \quad (6)$$

均方差越大说明剪切率分布越不均匀。

图 8,9 是体积加权平均剪切率的均方差与螺杆转速、销钉个数的关系。

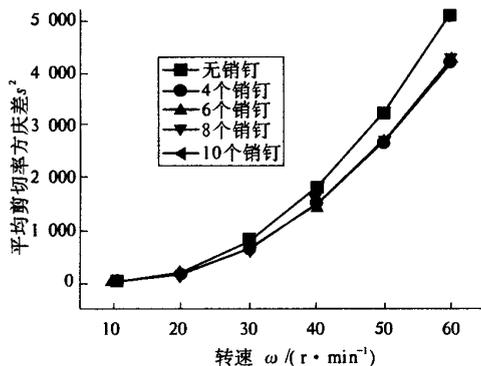


图 8 体积加权平均剪切率均方差与销钉个数和转速的关系

Fig.8 Mean square deviation of volume-weighted strain rate at different rotate speed

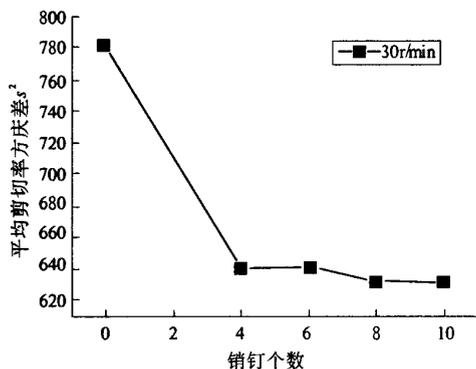


图 9 30 r/min 下体积加权平均剪切率均方差与销钉个数的关系

Fig.9 Mean square deviation of volume-weighted strain rate at $\omega = 30 \text{ r/min}$

万方数据

由图 8,9 可见,体积加权平均剪切率均方差随着转速的增加而增加;无销钉时的均方差最大,当插入销钉后,剪切率均方差与无销钉相比大幅减小,在 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时减小幅度约为 20%,即插入销钉后剪切率分布更均匀.剪切率均方差随销钉个数的增加而小幅度减小,但在同一转速下销钉的个数对其影响相对不大。

这是由于销钉的插入能够打破螺槽中的低剪切率核心,使胶料所受的剪切作用更加均匀,但由图 3 可见,在销钉前后的螺槽横截面上仍然存在低剪切率核心,当销钉数增多后,相邻两个销钉之间的低剪切率核心区域减小。

3 结论

(1) 插入销钉能够有效的增加对销钉附近的胶料的剪切作用,减小迟滞区,打破螺槽中部存在的低剪切率的核心,从而加强对胶料的剪切作用;销钉可以减小但无法消除靠近螺楞根部区域的低剪切率区。

(2) 机筒对胶料有相当大的剪切作用,尤其是在螺杆转速较高时。

(3) 插入销钉能提高单位质量胶料的平均剪切率,同时显著减小剪切率的均方差,使胶料所受剪切作用更加均匀。

(4) 平均剪切率随每排销钉个数增加而增加.在考虑到挤出量及功耗及设备强度的情况下,就 Φ90 挤出机而言,销钉个数以每排 8 个比较适宜。

由于在螺槽根部胶料所受剪切作用比较差,以后还应研究销钉和螺楞之间是否有交互影响以及如何加强此处剪切作用。

另外在模拟当中没有考虑温度对粘度的影响,同时胶料的粘度从入口处到出口处连续的由大变小,在模拟中没有体现,因而模拟的结果与实际有一定的差异.而且在对结果评价时未考虑挤出量和功耗问题,这些都需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] BIGIO D I, BOYD J D. Mixing studies in the single screw extruder[J]. *Plym Eng Sci*, 1985, 25(5): 35 ~ 37.
- [2] LAAKE H J, RABIGER N. Temperature development in a rubber processing pin barrel extruder [J]. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 1988, 78(9): 833 ~ 837.
- [3] KIM S J, KWON T H. Enhancement of minxing performance of single - screw extrusion processes via chaotic flows(part II): numerical study[J]. *Advances in Polymer*

- Tehnology, 1996, 15(1):55 ~ 69.
- [4] 魏新利,董卫刚.胶料在单螺杆橡胶挤出机中的三维流场分析[J].橡胶工业,2003,50(6):366 ~ 369.
- [5] 魏新利,李成清,王定标.销钉机筒挤出机内胶料流动与混合效果的数值模拟研究[J].橡胶工业,2004, 51(12):746 ~ 749.
- [6] 李成清,王定标,魏新利.销钉式挤出机的机筒三维有限元分析[J].郑州大学学报(工学版),2003,24 (3):83 ~ 86.
- [7] 吴大诚,古大治,陈扬中.高分子加工流变学 I——流变学基础[J].合成树脂及塑料,1989,(1):64 ~ 68.
- [8] 吴大诚,古大治,陈扬中.高分子加工流变学 III——高分子熔体流变性质[J].合成树脂及塑料,1989, (4):57 ~ 62.
- [9] 梁星宇,周木英.橡胶工业手册(第三分册)——配方与基本工艺[M].北京:化学工业出版社,1992.
- [10] 杨顺根,白仲元.橡胶工业手册(第九分册)——橡胶机械[M].北京:化学工业出版社,1992.

3D Simulation of Shear Effect on the Sizing in Pin Barrel Extruder

MENG Xiang - rui, MA Xin - ling, ZHANG Hong - xuan, WANG Ding - biao, WEI Xin - li

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: With the software FLUENT, a CFD(Computational Fluid Dynamics) software, the three - dimensional flow field of the sizing which is treated as Non - Newtonian fluid and locates in the melt part and measure part of screw of pin barrel extruder, is simulated. By the analysis of strain rate, it can be concluded that the pin can effectively intensify the strain rate of sizing and reduce the low strain rate area near the root of crew thread. When the number of the pins per tier increases, the shear effect on sizing is intensified. After contrast of volume weighted average strain rate in the flow field, with the pin or not, it can be found that the average strain rate will be intensified about 14% ~ 28% and the strain effect on sizing will be more uniformly in the flow field.

Key words: numerical simulation; pin barrel; strain rate; FLUENT