

数值模拟硬质聚氯乙烯双螺杆模具挤出过程

陈晋南, 胡敏, 彭炯

北京理工大学化工与环境学院, 北京 100081

摘要 数字设计了双螺杆挤出扁口和圆口模具, 使用有限元方法数值计算了两种模具内硬质聚氯乙烯熔体的非等温流场, 分析比较了模具结构对熔体各物理量的影响。研究结果表明, 与圆口模具相比, 扁口模具过渡段压力小, 熔体各物理量沿轴向变化较剧烈。在出口截面上, 扁口模具内熔体速度和黏性热梯度小, 速度均匀性高于圆口模具。但扁口模具内熔体压力、剪切应力、剪切速率和黏度梯度大。大的剪切应力引起大的离模膨胀。设计模具时应根据物料特性, 综合考虑各方面因素来决定模具结构。

关键词 硬质聚氯乙烯; 数值模拟; 扁口模具; 圆口模具

中图分类号 TQ320.4

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)13-0054-06

Simulation of Extrusion of Rigid Polyvinyl Chloride in Twin-screw Dies

CHEN Jinnan, HU Min, PENG Jiong

School of Chemical Engineering and Environment, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Flat and round dies are numerically designed in this paper. The non-isothermal flow fields of rigid polyvinyl chloride melts in the dies are obtained by using the finite element method. The effects of die structure on polymer flow fields are studied to provide a theoretical and technical support for the die design. It is shown that the pressure in the transition zone is greater for the flat die than for the round die. The parameters along the axial direction have a greater variation for the flat die than for the round die. On the exit plane, the gradients of velocity and viscous heating are smaller for the flat die than for the round die. The velocity of the melts on the exit plane is more uniformly distributed for the flat die than that for the round die. However, the gradients of pressure, shear stress, shear rate and viscosity of the melts are greater in the flat die than in the round die. Higher stress leads to bigger die swell. In the die design, the die structure should be determined by considering all factors discussed and the characteristics of the polymer.

Keywords rigid polyvinyl chloride; simulation; flat die; round die

近年来聚合物成型工艺的发展十分迅速, 高效率、自动化、高精度成为模具设计的主要发展方向。模具设计直接关系到制品的质量和生产工艺的效率。2002年, N. Sombatsompop 等^[1]研究了双螺杆挤出模具结构对聚丙烯熔体温度和压力分布的影响; 2006年, 张敏等^[2]数值研究了共挤出模具过渡段收敛角和稳流段长度对非牛顿熔体挤出胀大率的影响; 秦贞明^[3]数值研究了模具过渡段锥角和工艺条件对模具内非牛顿熔体流场各物理量的影响; 2007年, Mu Yue 等^[4]采用有限元罚函数法, 数值研究了模具过渡段收缩角对黏弹性流体流场的影响; 2008年, Xu Xiang 等^[5]设计了3组可互换的细丝状口模, 研究了模具结构对CO₂载气挤出聚苯乙烯泡沫离模膨胀率和压力降的影响; 麻向军等^[6]数字优化设计了异型材模具过渡段截面形状, 研究了模具过渡段结构对低密度聚乙烯熔体出口速度均匀性的影响; 戴元坎等^[7]使用 Polyflow 软件, 数值比较了挤出口型摆放形式对三元乙丙橡胶熔体挤出速度均匀性的影响。

本研究利用数字设计了双螺杆挤出扁口和圆口两种模具, 使用有限元方法数值模拟了硬质聚氯乙烯(RPVC)双螺杆模具的挤出过程, 采用非等温本构方程分别计算了两种模具内 RPVC 熔体的流场, 比较模具结构对 RPVC 熔体流场各物理量的影响, 以期模具的设计提供技术支持和理论依据。

1 几何和数学模型

数值研究 Reifenhäuser 公司异向旋转双螺杆挤出机 (BT65-16) 的螺杆直径为 65 mm, 机筒长 49 mm。按照工程的要求, 数字设计双螺杆挤出扁口和圆口两种模具。为了消除

收稿日期: 2009-04-27

基金项目: 科研协作项目 (15500408010001)

作者简介: 陈晋南, 教授, 研究方向为化学工艺, 电子信箱: jnchen@bit.edu.cn

停料死角,使熔体进入口模时有比较均匀的流速^[8],两种模具过渡段锥角选为 28°,总长度相等。扁口模具过渡段长 63 mm,平直段长 70 mm,矩形截面长 49 mm,宽 9 mm。为保证模具出口截面处熔体流速相等,两种模具出口截面积相等。圆口模具过渡段长 87 mm,平直段长 46 mm,圆截面直径 24 mm。采用六面体和四面体单元混合网格划分两种模具流道和螺杆头网格,利用网格叠加法^[9-10]组合模具和螺杆头的网格,网格数分别为 559 046 个和 68 478 个。计算域的几何模型和网格划分如图 1 所示。

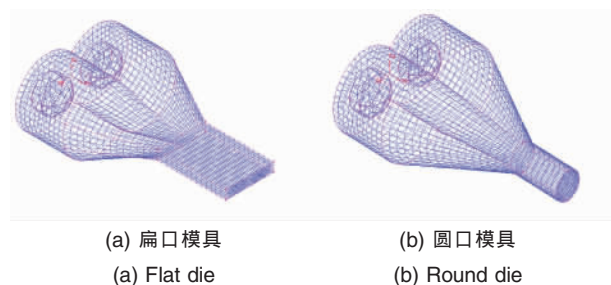


图 1 几何模型和网格划分

Fig. 1 Geometry model and meshing

根据硬质聚氯乙烯双螺杆模具挤出工况,RPVC 熔体为不可压缩纯黏性非等温流动,假设该稳态流动中熔体流道全充满,流道壁面无滑移。由于 RPVC 熔体是高黏度流体,挤出流动过程中黏性力远大于惯性力和质量力,后者可忽略。描述 RPVC 双螺杆挤出过程和模具内熔体非等温流动的控制方程为

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

运动方程

$$-\nabla p \mathbf{I} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

应力张量

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta(\dot{\gamma}, T)\mathbf{D} \quad (3)$$

变形速率张量

$$\mathbf{D} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)/2 \quad (4)$$

能量方程

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \phi \quad (5)$$

黏性热

$$\phi = \eta \dot{\gamma}^2 \quad (6)$$

本构方程

$$\eta = \eta_0 [(1 + \lambda \dot{\gamma})^n] \exp[-\beta(T - T_0)] \quad (7)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度, m/s; p 为压力, Pa; $\mathbf{I}$ 为单位张量; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量, Pa; $\mathbf{D}$ 为变形速率张量, s^{-1} ; T 为温度, K; T_0 为参考温度, 448 K; ϕ 为黏性热, $W \cdot m^{-3}$; η 为表观黏度, Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; 其中 RPVC 物性参数^[11]有: ρ 为密度, $1450 \text{ kg} \cdot m^{-3}$, k 为热导率, $0.188 \text{ J}/(m \cdot K)$, C_p 为比热容, $1257 \text{ J}/(kg \cdot K)$ 。

本构方程式 (7) 为 Cross 模型和近似 Arrhenius 式的乘

积。由 RPVC 的流变曲线^[12]拟合得到,自然时间 λ 为 0.259 6 s,零剪切黏度 η_0 为 $4.7 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot s$,非牛顿指数 n 为 0.65, Arrhenius 指数 β 为 0.01 K^{-1} 。拟合得到的非牛顿指数与文献^[13]中的指数 2/3 接近。

2 数值计算及讨论

数值模拟计算的工艺条件为螺杆转速 7.5 r/min,模具入口流速 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/s$,温度 448 K^[12]。使用有限单元法,流速采用 Mini-element 插值,压力采用线性函数,能量方程采用上风法插值,黏度采用皮卡迭代。引入罚函数项修正动量方程(2)和能量方程(5),将连续性方程(1)作为求解动量方程的约束条件,速度压力与温度采用解耦的算法,用隐式欧拉法联立数值求解离散化非线性耦合的控制方程式(1)~式(7),分别数值模拟 RPVC 熔体扁口和圆口模具挤出过程,分析模具结构对 RPVC 熔体流场各物理量的影响。在 HPXW6000 工作站使用 Polyflow 软件完成计算,计算的收敛精度为 10^{-3} ,最长一次运算机时为 10 h。

为深入分析 RPVC 熔体压力、速度、剪切应力、剪切速率、黏度、黏性热和温度的平均值沿轴向的变化,沿 z 轴每间隔 10 mm 截取模具横截面。截面上各物理量的平均值定义为

$$\bar{x} = \int_S x dS / \int_S dS \quad (8)$$

式中, x 分别代表流场中的各物理量。

图 2(a)~(g)分别给出了熔体压力、速度、剪切应力、剪切速率、黏度、黏性热和温度的平均值沿轴向的变化。其中, die1 表示扁口模具, die2 表示圆口模具。

由图 2(a)~(g)可知,两种模具内熔体速度、剪切应力和剪切速率沿轴向降低,黏度升高。圆口模具的机筒内熔体的压差比扁口模具小 60%,其余各物理量相差不大。在两种模具过渡段内熔体的压差沿轴向变化不大,流速、剪切应力、剪切速率、黏性热和温度沿轴向增大,而黏度减小。扁口模具内熔体流场各物理量变化快。由于两种模具过渡段锥角相同,截面积不同,扁口模具结构给熔体流动造成阻力,圆口模具内熔体速度、剪切应力、剪切速率、黏性热和温度的平均值比扁口模具小,黏度比扁口模具大。在 $z=0.12 \text{ m}$ 截面,两种模具内熔体速度、剪切应力、剪切速率、黏度和黏性热平均值差异最大,圆口模具内熔体平均速度比扁口模具小 55%,平均剪切应力小 54%,平均剪切速率小 75%,平均黏性热小 91%,平均黏度大 40%。在两种模具稳流段内熔体速率、剪切应力、剪切速率、黏度和黏性热沿轴向变化不大,压差沿轴向降低,温度升高。扁口模具内熔体的压差下降较快,温升较快。在出口截面上,圆口模具内熔体平均速度比扁口模具小 2%,剪切应力小 13%,剪切速率小 35%,黏度大 7%,黏性热小 52%,温度低 0.33 K。

为进一步分析两种模具内熔体流场沿轴向的变化情况,取 xOz 截面作为研究对象,图 3(a)和(b)分别为扁口和圆口模具 xOz 截面上熔体的速度场,图 4(a)和(b)分别为扁口和

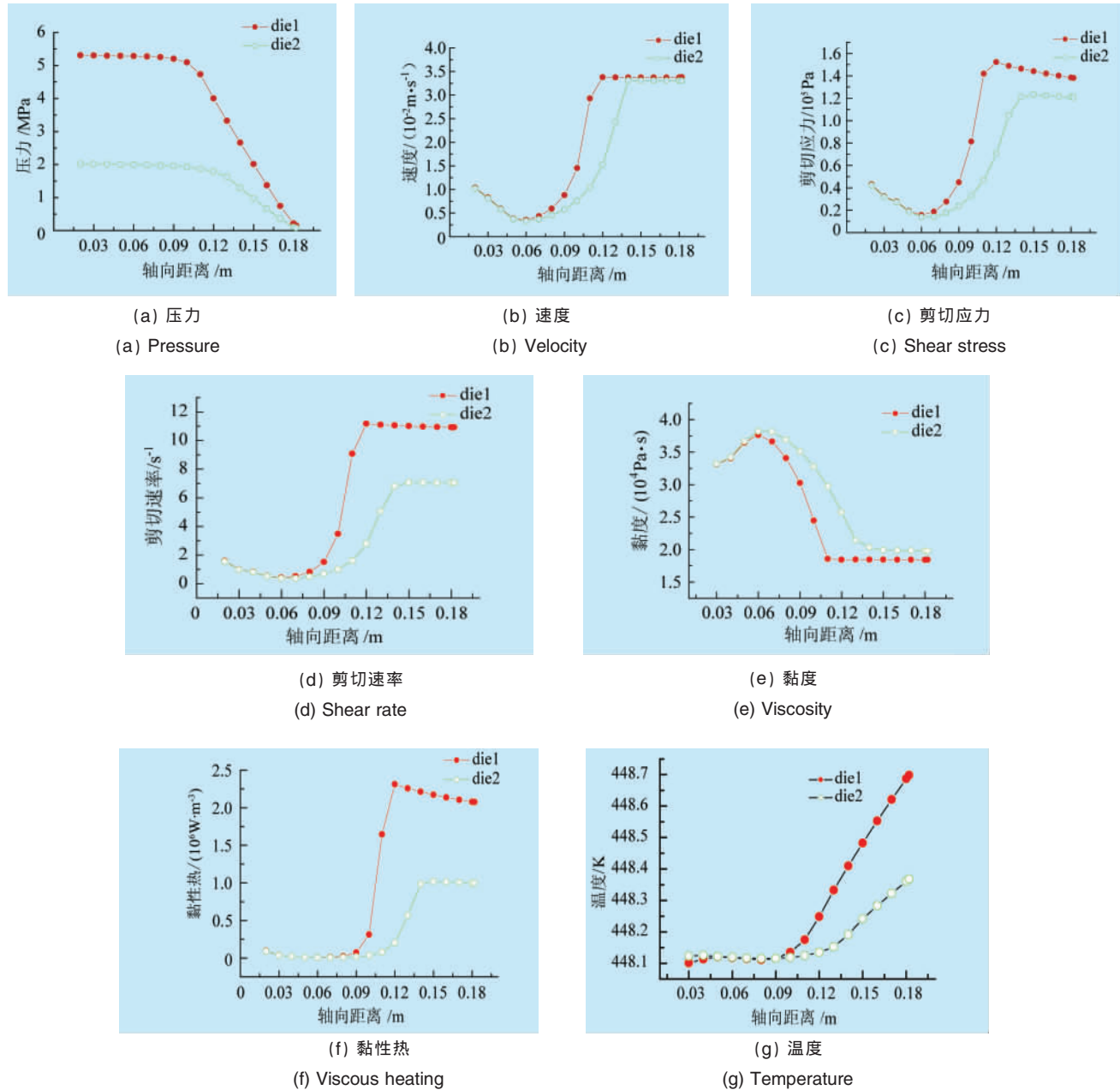
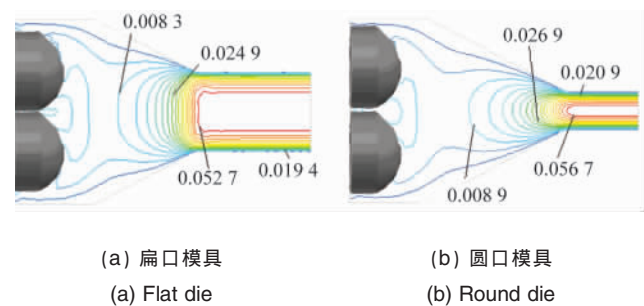


图2 模具内熔体各物理量的平均值沿轴向的变化

Fig. 2 Average values of parameters of melts in the die along the axial direction of the die

圆口模具 xOz 截面上熔体的黏性热场。由图 3 可知, 在该截面上, 扁口模具内熔体最大速度为 0.0527 m/s , 圆口模具内最大速度为 0.0567 m/s , 扁口模具内熔体速度梯度小。由图 4 知, 扁口模具内熔体最大黏性热为 $3.21 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, 圆口模具内最大黏性热为 $3.63 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, 扁口模具内黏性热梯度小。

由图 2 可知, 在 $z=0.12 \text{ m}$ 截面处两种模具内熔体流场的差异达到最大, 此处两种模具内熔体走过相同的轴向距离, 但是由于圆口模具过渡段长, $z=0.12 \text{ m}$ 截面熔体在扁口模具的平直段, 而圆口模具内熔体仍停留在过渡段, 两个截面上熔体受力不同, 流场出现差异, 因此讨论该处熔体流场各物理量的变化。计算得到的温度变化不大, 故不予讨论。图 5(a)

图3 模具 $y=0$ 纵截面上熔体速度场 (m/s)Fig. 3 Velocity fields of melts in the section of $y=0$ (m/s)

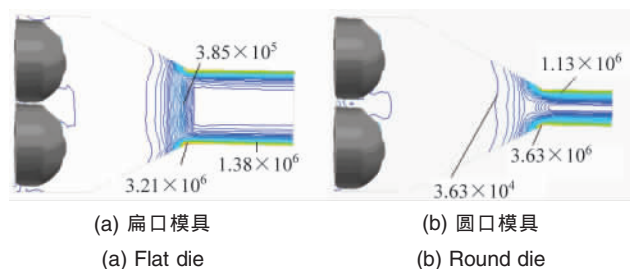


图 4 模具 $y=0$ 纵截面上熔体黏性热场 ($W \cdot m^{-3}$)
Fig. 4 Fields of the viscous heating of melts in the section of $y=0$ ($W \cdot m^{-3}$)

~(f)分别给出了扁口模具 $z=0.12$ m 截面上熔体的压力场、速度场、剪切应力场、剪切速率场、黏度场和黏性热场。图 6(a)~

(f)分别给出了圆口模具 $z=0.12$ m 截面上熔体的压力场、速度场、剪切应力场、剪切速率场、黏度场和黏性热场。

由图 5 可知,扁口模具 $z=0.12$ m 截面在壁面处熔体最大压力为 4.01 MPa,在中心处最小压力为 3.98 MPa。速度等值线呈椭圆形分布,在中心处速度最大为 0.054 7 m/s。速度的变化带来剪切速率的变化,剪切速率等值线呈椭圆形分布,在上下壁面处最大剪切速率为 $36.151 s^{-1}$,在中心处最小剪切速率为 $0.534 s^{-1}$ 。剪切应力随着剪切速率和黏度的变化而变化,在壁面处最大剪切应力为 0.291 MPa,在中心处最小剪切应力为 0.019 MPa。黏度最大值集中在矩形中心区域,最大为 $37 107 Pa \cdot s$,在壁面处最小黏度为 $8 016 Pa \cdot s$ 。在矩形截面的上下壁面处最大黏性热为 $1.04 \times 10^7 W \cdot m^{-3}$,在中心处最小黏性热为 $1.13 \times 10^4 W \cdot m^{-3}$ 。

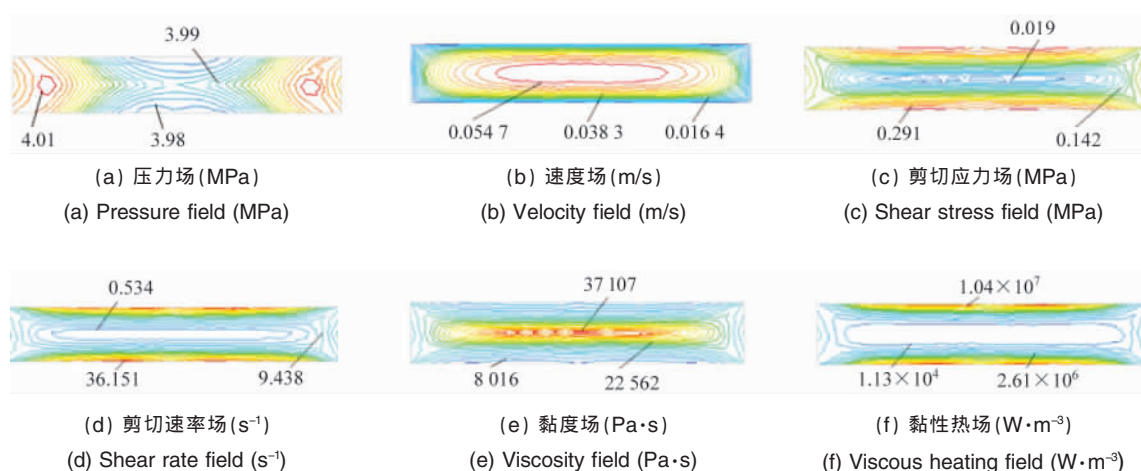


图 5 扁口模具 $z=0.12$ m 截面上熔体的流场
Fig. 5 Flow fields of melts in the section of $z=0.12$ m for the flat die

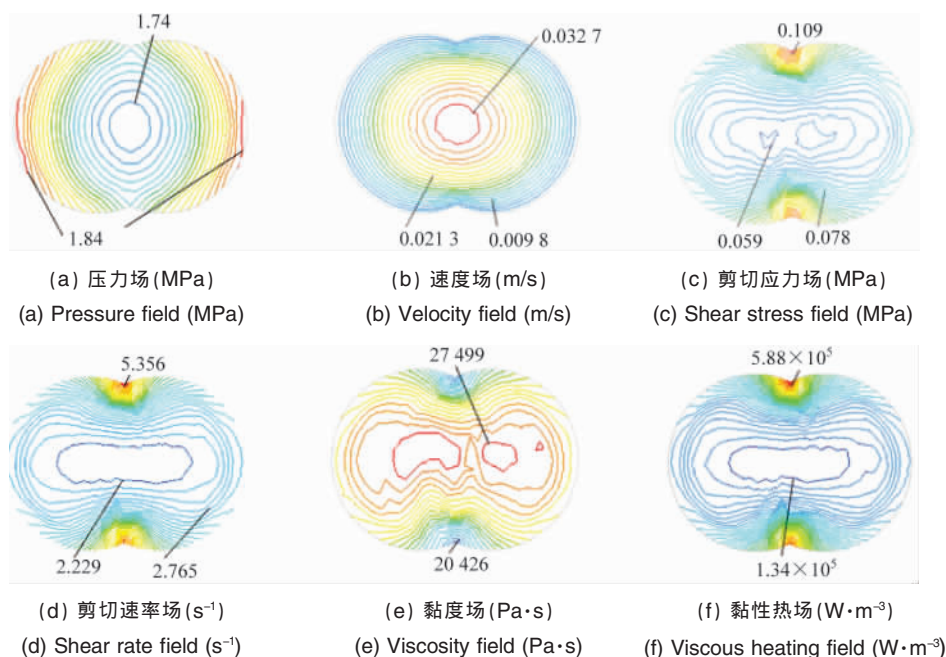


图 6 圆口模具 $z=0.12$ m 截面上熔体的流场
Fig. 6 Flow fields of melts in the section of $z=0.12$ m for the round die

由图6可知,圆口模具 $z=0.12\text{ m}$ 截面上熔体最大压力在壁面处为 1.84 MPa ,在中心处最小压力为 1.74 MPa 。在中心处最大速度为 0.0327 m/s 。剪切应力等值线呈椭圆形分布,在圆口模具 $z=0.12\text{ m}$ 截面 ∞ 字形截面凹处最大剪切应力为 0.109 MPa ,在中心处最小剪切应力为 0.059 MPa 。剪切速率分布与剪切应力等值线分布规律类似,在 ∞ 字形截面凹处最大剪切速率为 5.356 s^{-1} ,在中心处最小剪切速率为 2.229 s^{-1} 。在 ∞ 字形截面中心区域最大黏度为 $27499\text{ Pa}\cdot\text{s}$,在壁面处最小黏度为 $20426\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。在矩形截面的上下壁面处最大黏性热为 $5.88\times 10^5\text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$,在中心处最小黏性热为 $1.34\times 10^5\text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

分别比较图5和图6中熔体流场的各物理量,在 $z=0.12\text{ m}$ 截面上,扁口模具内熔体流场与圆口模具内流场相比,最大压力为圆口模具的2.17倍,最大速度为1.67倍,最大

剪切应力为2.67倍,最大剪切速率为6.75倍,最大黏度值为1.35倍,最大黏性热为17.68倍。扁口模具内熔体压力梯度小,圆口模具内熔体速度、剪切应力、剪切速率、黏度和黏性热梯度小。

RPVC熔体在模具出口截面上熔体流率达到平衡,各物理场分布均匀是保证挤出制品质量的关键。因此,讨论两种模具出口横截面熔体的流场。图7为扁口模具出口截面上熔体的流场。图8为圆口模具出口截面上熔体的流场。分析图7和图8可知,两种模具内熔体的压力分布规律不同,扁口模具内熔体压力在截面左右壁面处最大,而圆口模具则在中心处压力最大。扁口模具内熔体压力、剪切应力、剪切速率和黏度梯度大,速度和黏性热梯度小。

聚合物在挤出加工过程中,成形时残余应力、剪切应力、

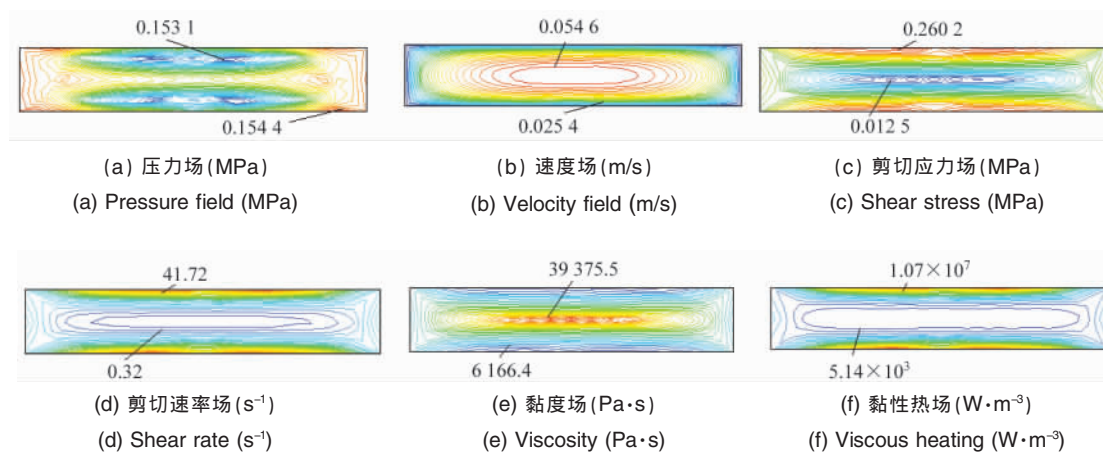


图7 扁口模具出口截面上熔体的流场

Fig. 7 Flow fields of melts on the exit plane of the flat die

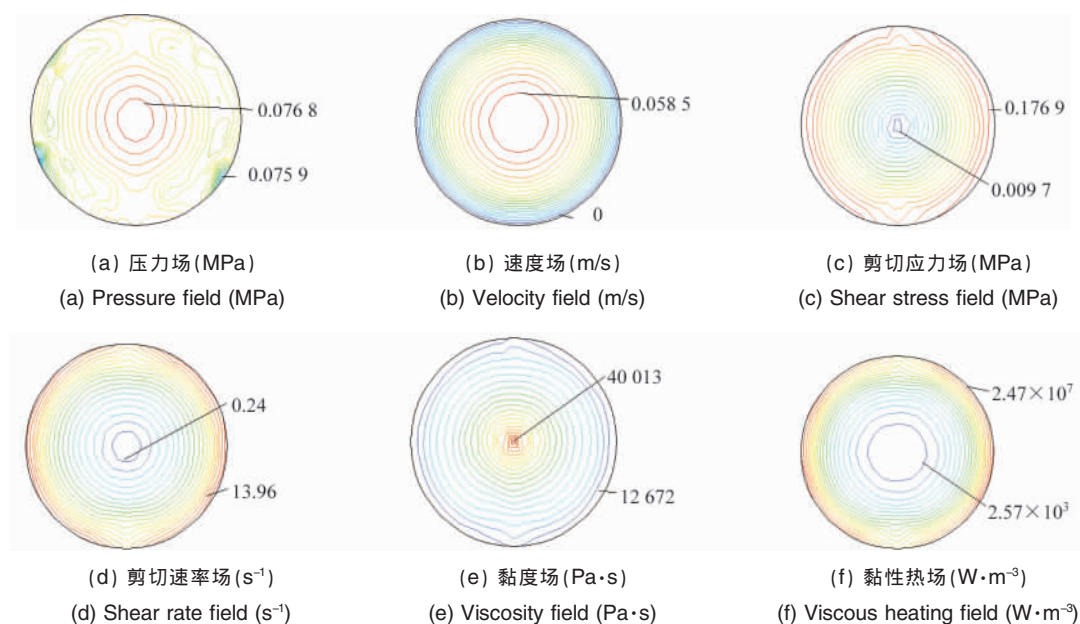


图8 圆口模具出口截面上熔体的流场

Fig. 8 Flow fields of melts on the exit plane of the round die

冷却应力及收缩不均等易造成聚合物制品发生形状畸变,如制品翘曲不平、壁厚不匀和鲨鱼皮等现象^[6]。其中,口模对物料分配不均匀是造成挤出制品弯曲变形的重要原因。因此,口模出口速度均匀性成为衡量模具设计质量的重要因素,使用 Polyflow 软件中提供的口模平衡系数 b_d , 计算口模出口速度的均匀性

$$b_d = \int_S \left(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} - \frac{q_v}{S} \right)^2 dS \quad (9)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为熔体流动的速度, m/s; q_v 为穿过口模出口的熔体的流量; S 为口模出口横截面面积; $\mathbf{n}$ 为沿口模出口的外法线方向。从式(9)可看出, b_d 越小, 模具出口速度均匀性越好, 模具对物料的分配越均匀。计算两种模具出口的口模平衡系数。扁口和圆口模具的口模平衡系数分别为 $0.112\ 75 \times 10^{-6}$, $0.129\ 93 \times 10^{-6}$, 说明扁口模具出口速度均匀性高于圆口模具。

3 结论

按照工程需求, 数字设计了双螺杆挤出扁口和圆口两种模具, 使用有限元方法数值模拟了 RPVC 双螺杆模具挤出过程, 分别计算了扁口和圆口模具流道内熔体的流场, 比较模具结构对模具内 RPVC 熔体流场各物理量的影响。

研究结果表明, 扁口模具的机头压力较大。两种模具过渡段内熔体流场差异较大, 在 $z=0.12\ \text{m}$ 截面该差异最明显, 圆口模具内熔体平均流速、剪切速率、剪切应力和黏性热比扁口模具分别小 55%, 75%, 54%, 91%, 平均黏度大 40%。由于扁口模具截面变化大, 扁口模具内熔体各物理量轴向变化较大。在两种模具出口截面上, 熔体压力分布规律不同, 扁口模具内熔体压力、剪切速率、剪切应力和黏度的梯度大, 速度和黏性热的梯度小, 出口速度均匀性高于圆口模具。但是, 大的剪切应力引起大的离模膨胀, 影响制品质量。在模具设计过程中, 要根据物料的特性, 综合考虑各方面因素的影响决定模具的结构。

参考文献 (References)

- [1] Sombatsompop N, Panaploy M. Die geometry effects on the temperature profile measurements of flowing PP melt in a twin-screw extruder[J]. *Polymer Testing*, 2002, 21: 17-25.
- [2] 张敏, 孙胜, 贾玉玺, 等. 聚合物共挤出过程的挤出胀大有限元分析[J]. *高分子材料科学与工程*, 2006, 22(5): 36-40.
Zhang Min, Sun Sheng, Jia Yuxi, et al. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2006, 22(5): 36-40.
- [3] 秦贞明. 双螺杆挤出机模具过渡段和稳流段流场的三维数值模拟[D]. 北京: 北京理工大学化工与环境学院, 2006.
Qin Zhenming. 3-D numerical simulation of flow in the transition zone and steady flow zone in die of twin screw extruder[D]. Beijing: Chemical Engineering and Environment, Beijing Institute of Technology, 2006.
- [4] Mu Yue, Zhao Guoqun, Qin Shengxue, et al. Numerical simulation of three-dimensional polymer extrusion flow with differential viscoelastic

model[J]. *Polymer for Advanced Technologies*, 2007, 18: 1004-1014.

- [5] Xu Xiang, Park C B. Effects of the die geometry on the expansion of polystyrene foams blown with carbon dioxide [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 109: 3329-3336.
- [6] 麻向军, 黄明瑜. 基于数值模拟的异型材口模优化设计 [J]. *塑料工业*, 2008, 30(3): 30-32.
Ma Xiangjun, Huang Mingyu. *China Plastic Industry*, 2008, 30(3): 30-32.
- [7] 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.
Dai Yuankan, Li Xiangyang, Zhou Chixing. *China Synthetic Rubber Industry*, 2008, 31(2): 92-95.
- [8] 申开智. 塑料成型模具[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002.
Shen Kaizhi. *Plastic forming mold* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2002.
- [9] Avalosse T, Rubin Y, Fondin L. Non-isothermal modeling of co-rotation and counter-rotating twin screw extruders [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2002, 21(5): 419-429.
- [10] Ishikawa T, Kihara S I, Funatsu K. 3-D numerical simulation of non-isothermal flow in co-rotating twin screw extruders [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2000, 40(2): 357-364.
- [11] 聚氯乙烯加工手册编写组. 聚氯乙烯手册 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1990: 24-25.
PVC Processing Handbook Editorial Board. *PVC handbook*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1990: 24-25.
- [12] 林咏兰. 硬聚氯乙烯塑料成型加工 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
Lin Yonglan. *Rigid PVC forming and processing* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1983.
- [13] 查尔斯 E. 威尔克斯, 詹姆斯 W. 萨默斯, 查尔斯 A. 丹尼尔斯. 聚氯乙烯手册 [M]. 乔辉, 丁筠, 盛平厚, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2008.
Wilkes C E, Summers J W, Daniels C W. *PVC handbook*[M]. Qiao Hui, Ding Yun, Sheng Pinghou, et al. trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 108.

(责任编辑 陈广仁)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

《科技导报》以发表国内外科学技术各学科专业原创性学术论文为主, 同时刊登阶段性最新科研成果报告, 以及国内外重大科技新闻, 快速、全方位、高密度、大容量提供科技信息。“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文, 要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性, 同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰, 并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。