

文章编号: 2095—0411 (2011) 04—0032—05

双转子连续混炼机混炼段的剪切应力^{*}

缪国斌¹, 田 华¹, 谢林生²

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016; 2. 华东理工大学, 上海 200237)

摘要: 运用数值模拟法, 对双转子连续混炼机混炼段的剪切应力进行模拟计算和分析。结果表明: 沿转子轴向和垂直于轴向截面上的剪切应力分布合理, 剪切应力体积分数分布合理。转速增加, 剪切应力随之增大, 单位产量平均剪切应力增大。轴向压差增加, 剪切应力层状分布形态明显改变, 单位产量平均剪切应力增大。加料量增加, 剪切应力大小和分布形态不变, 但单位产量平均剪切应力随之减小。利用这 3 种可调工艺参数的不同作用特点, 针对不同的混合需要, 可计算和选择不同的工艺参数组合。

关键词: 双转子连续混炼机; 数值模拟; 剪切应力; 混合

中图分类号: TQ 320.5

文献标识码: A

Study of Shear Stress of Double Rotor Continuous Mixer in Mixing Process

MIAO Guo—bin¹, TIAN Hua¹, XIE Lin—sheng²

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The shear stress in the mixing process of the double rotor continuous mixer is analyzed and calculated by means of numerical simulation. The result indicates that the shear stress at axial section and vertical section of the rotor and its volume fraction distribution have the proper distribution. The shear stress and the average value of the shear stress of production per unit increase as the rotor speed increases. The form of the layered distribution of the shear stress changes distinctly and the average value of the shear stress of production per unit increases as the pressure difference in axial direction increases. The increase of the feeding capacity has no influence on the value of shear stress and its form of the layered distribution, but the average value of the shear stress of production per unit decreases. Different combination of technologic data can be calculated and chosen according to different mixing requirement and the special operational characteristic of the above three adjustable technologic data.

Key words: double rotor continuous mixer; numerical simulation; shear stress; mixing

混炼过程中, 物料受到的剪切作用是决定混合效果好差的重要因素之一。因此, 在研究混炼工艺以及设计或选择混炼设备时, 人们通常要研究混合过程中的剪切应力。双转子连续混炼机是一种混炼

能力很强的高分子材料混合机械^[1-4]。本文运用数值模拟的方法, 对双转子连续混炼机混炼段流场中的剪切应力进行计算和分析。希望通过这种研究, 深入了解该混炼机的混合性能, 也为不同物料混合

* 收稿日期: 2011—10—15

作者简介: 缪国斌 (1963—), 男, 江苏如东人, 副研究员。

时混炼转子的设计和选择, 以及相关混炼工艺参数设定提供参考。

1 剪切应力计算

1.1 计算方法

本文利用 Pro/E 建立双转子连续混炼机转子混炼段的模型, 然后导入到 Gambit 中划分网格, 利用 POLYFLOW 软件对流域进行了 3 维等温数值模拟, 对流场内的剪切应力进行计算分析。

1.2 计算条件和基本假设

设定双转子连续混炼机的两个转子为异向向内旋转, 每根转子混炼段有两对螺棱, 每对螺棱为螺旋方向相反的两根螺棱组成^[5,6]。模拟采用的物料为聚乙烯。假定熔体为不可压缩流体, 流场为稳定的等温流场, 流动过程为稳定的层流, 熔体在流道内完全充满, 熔体与流道壁面无滑移, 忽略重力和惯性力的影响。

1.3 计算算式^[7]

剪切应力的计算公式为:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$
$$\dot{\gamma} = \left[2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中: p 为压力, u_x 、 u_y 、 u_z 为速度分量。利用以上方程和算式组合, 完成流场内的剪切应力计算, 计算过程略。

2 恒定工艺条件下剪切应力模拟分析

模拟工艺变量为: 加料量 20kg/h, 转速 600r/min, 轴向压差 0MPa。

2.1 垂直于轴向截面上的剪切应力分布

图 1 为距离入口处为 32mm 的横截面上剪切应力分布情况。剪切应力的等值线围绕着转子呈近似同心圆的层状分布, 越远离转子中心, 剪切应力越大, 螺棱顶部区域剪切应力最大。这样的剪切应力分布合理, 符合设计思路。物料通过螺棱顶部区域狭窄流道时, 在高剪切速率下, 接受强剪切而被分散。在其他剪切应力小些的区域剪切与拉伸并存^[8]。

表观粘度 η 由 Carreau 模型给出:

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

式中: $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, $\eta_0 = 1\,520 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 0.08$, $n = 0.5$ 。

流场内体积平均剪应力算式为:

$$\bar{\tau} = \frac{\iiint_{\Omega} \vec{\tau}^{(e)} d\Omega}{\iiint_{\Omega} d\Omega}$$

式中微元剪应力 $\vec{\tau}^{(e)} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}$, Ω 指流域。

运用上面的假设, 可将粘性流体力学中的连续性方程和动量方程简化为:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$
$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$$
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)$$
$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)$$

$\dot{\gamma}$ 的算式可简化为:

2.2 轴向剪切应力分布

沿轴向设定 3 条参考直线。直线 1 是在通过两转子的轴线所在平面上与两轴线等距离的直线; 直线 2 是在通过两转子的轴线所在平面上, 位于转子侧面与料筒壁之间的轴向直线; 直线 3 是位于转子的最底侧与料筒壁之间的轴向直线。

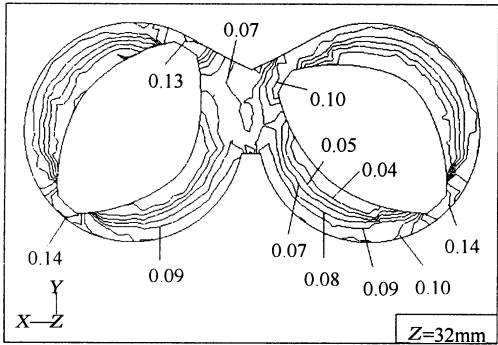


图 1 垂直于轴向截面上剪切应力分布

Fig. 1 Shear stress profiles at cross sections along the axial

图 2 为沿着 3 条参考线的剪切应力分布情况。

从图中可以看出, 在直线 2 上有两个峰值, 正是对应螺棱交汇的位置。在出口处由于出口效应, 数值有较大的变化。直线 2 上的其余地方以及直线 1、3 上峰值不明显, 剪切应力波动相对较小。这样的剪切应力分布是合理的, 有利于提高转子的转速, 从而提高整个流场的剪切作用, 改善混合效果。只要控制好螺棱交汇的剪切力, 就不会出现局部剪切强度过大而导致的聚合物降解现象。

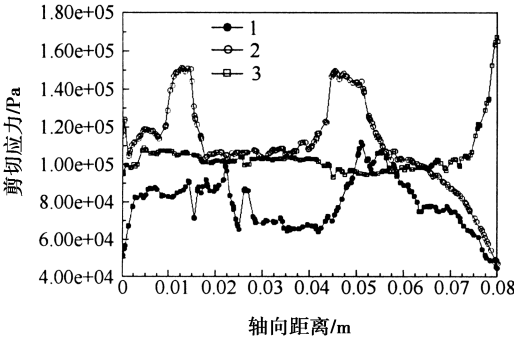


图 2 沿着 3 条参考线的剪切应力分布

Fig. 2 Distribution of shear stress along the three reference lines

2.3 剪切应力的体积分数分布

从混合角度看, 转子必须提供足够强大的剪切力场, 以保证聚合物熔体产生足够的形变和流动, 使分散相物料颗粒及团聚体破碎和分散。但是过强的剪切力会使得物料的温度升高, 导致聚合物的粘度下降并可能降解。

图 3 是剪切应力的体积分数分布情况。从图中可以看出, 剪切应力大于 0.1MPa 的约占 38% 左右, 其主要集中在螺棱顶部和料筒的壁面。颗粒经过这些区域时即发生破裂和磨蚀, 使粒径减小。剪切应力小于 0.04MPa 的约占 6%, 主要集中在紧贴转子侧面的一层, 其混合能力较差, 不过其区域较小。剪切应力在 0.04—0.1MPa 之间的约占 56%。可以看出大部分的剪切应力维持在这样一个中等的水平, 使得在螺棱顶部被破碎的颗粒不会再团聚在一起, 同时也不会造成因物料局部温度太高而降解。这与上面的分析一致。在混炼段这样的剪切应力体积分数分布是合理的。

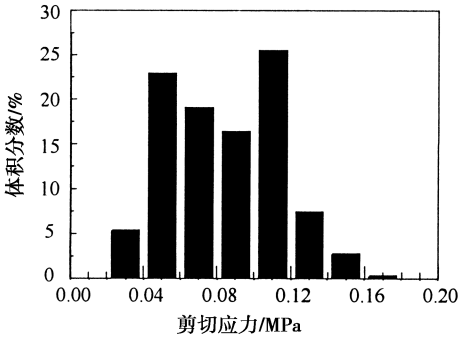


图 3 剪切应力的体积分数分布

Fig. 3 Volumetric distribution of the shear stress

3 变工艺条件下的剪切应力模拟分析

3.1 不同转速下的剪切应力

加料量为 20kg/h, 轴向压差为 0MPa 的条件下, 改变转子的转速, 进行流场分析, 得到不同转速下流场内剪切应力的分布。图 4 为两个不同转速下相同截面处的剪切应力的分布。由图中可以看出, 随着转子转速的增加, 截面内的剪切速率分布没有改变, 但是各处的剪切应力随之增加。转子转速由 400r/min 增加到 1 400r/min, 料筒壁面的剪切应力由 0.08MPa 增加到 0.15MPa, 螺棱顶部由 0.12MPa 增加到 0.23MPa。转速加快, 剪切应力明显增加。

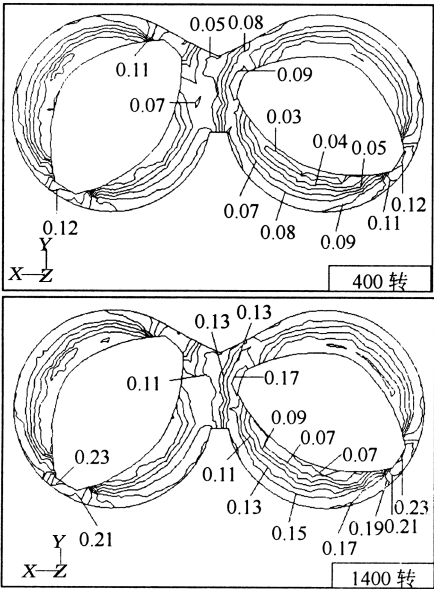


图 4 不同转速下相同截面处的剪切应力分布

Fig. 4 Shear stress profiles at same cross section along the axial for various rotation speed

图 5 为转速与单位产量平均剪切应力的关系。从图中可以看出, 单位产量平均剪切应力随着转速

的提高而增加。因此可以根据破碎不同的团聚体所要求的剪切应力而调整转速。可以在很宽的范围内调整转速正是双转子连续混炼机一个很大的优点。

3.2 不同轴向压差下的剪切应力

转速为 600r/min，加料量为 20kg/h 的条件下，改变轴向压差，进行流场分析，得到不同压差时的剪切应力分布。图 6 为两个不同轴向压差下相同截面处的剪切应力的分布。从图中可以看出，随着轴向压差的增加，这一截面上，螺棱顶部和转子相互作用窗的剪切应力并没有多大变化，但是随着轴向压差的增加，紧贴转子两侧的剪切应力分布有了明显的变化，轴向压差为 2.0MPa 时，虽然在靠近料筒壁面仍是呈现层状的分布，但是在靠近转子的壁面分布已经没有规律了。这种无规律的区域面积是随着轴向压差的增加而增加的。

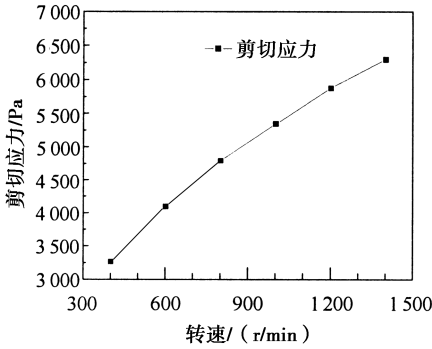


图 5 转速与单位产量平均剪切应力的关系

Fig. 5 The influence of rotation speed on the average values of shear stress per weight

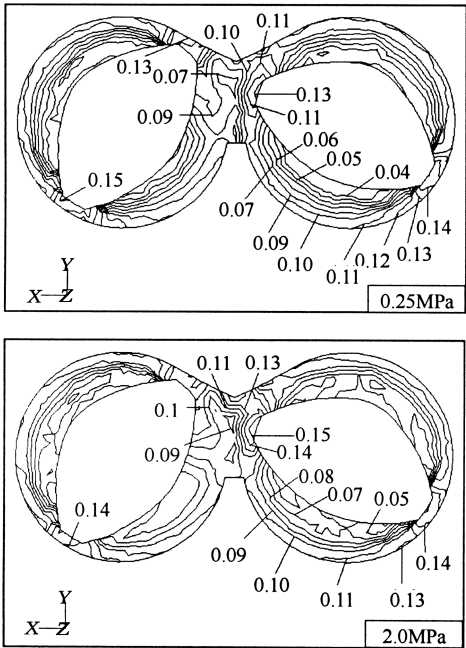


图 6 不同轴向压差下相同截面处的剪切应力分布

Fig. 6 Shear stress profiles at same cross section along the axial for various pressure gradient

熔体的流动，以及随后聚合物的固化与材料微观结构的形成与剪切应力的分布有着密切的关系^[9,10]。混合后的物料呈现明显的层状分布，是由于物料随剪切应力的取向而得到的。在一些材料的共混中，基于对材料性能的要求，而提出了对材料微观结构的要求。双转子连续混炼机就可以满足这样的要求，以轴向压差的增减来改变剪切应力层状分布的形态，从而改变材料微观结构的形成。

图 7 为轴向压差与单位产量平均剪切应力的关系。从图中可以看出，随着轴向压差的增加，流域内单位产量平均剪切应力有大幅度的增加。因此，将卸料门开启度减小时，轴向压差增加，使物料的混炼强度明显增加。

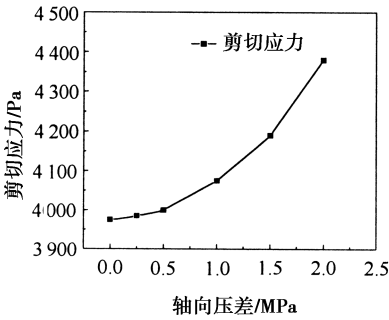


图 7 轴向压差与单位产量平均剪切应力的关系

Fig. 7 The influence of pressure gradient on the average values of shear stress per weight

3.3 不同加料量下的剪切应力

转速为 600r/min，轴向压差为 0MPa 条件下，改变加料量，进行流场分析得知，加料量的增加，不改变同一截面上剪切应力的大小和剪切应力的分布形态，但单位产量平均剪切应力有变化。图 8 为加料量与单位产量平均剪切应力的关系。从图中可以看出，随着加料量的增加，剪切应力呈减小的趋势。双转子连续混炼机的产量只与加料量有关，所以不改变其它操作工艺的同时，增加产量会减小流场内的单位产量平均剪切应力。随着加料量的增加，物料在双转子连续混炼机中的停留时间减小，停留时间分布范围变窄^[5]。所以，随着产量的增加，单位物料所经历的剪切次数减少，将直接导致混合强度的下降。

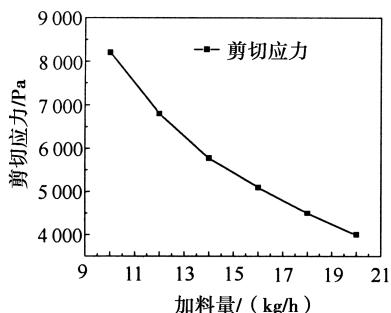


图 8 加料量与单位产量平均剪切应力的关系

Fig. 8 The influence of feeding on the average values of shear stress per weight

4 结 论

模拟分析结果表明：在混炼段，沿转子轴向和垂直于轴向截面上的剪切应力分布合理，剪切应力体积分数分布合理。说明双转子连续混炼机是一种混合能力强、混炼性能优异的共混设备^[11]。

通过模拟分析，对转速、轴向压差、加料量在混炼过程中的作用特性有了比较深刻的认识。转速增加，剪切应力随之增大。轴向压差增加，剪切应力层状分布形态明显改变。加料量增加，剪切应力的大小和层状分布形态均不改变。而单位产量平均剪切应力随转速和轴向压差增加而增大，随加料量增加而减小。物料混合时，为了获得最佳的剪切效果，可以根据物料的特性和混合操作的特殊需要，利用各工艺条件的作用特点，通过模拟分析的办法，确定合适的工艺条件组合，作为实验参考。

参考文献：

- [1] David B Todd. 塑料混合工艺及设备 [M]. 北京：化学工业出版社，2002.
- [2] 谢林生，缪国斌. 一种双转子连续混炼机转子：中国，ZL02100766.7 [P]. 2002-01-25.
- [3] 周持兴，俞炜. 聚合物加工理论 [M]. 北京：科学出版社，2004.
- [4] Dae-suk Bang, James L White. New model of flow in a farrel continuous mixer [J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37 (7): 210-216.
- [5] 谢林生，李培宁，黄宇新. 双转子连续混炼机停留时间的测定 [J]. 塑料工业，2003, 31 (12): 22-27.
- [6] 缪国斌，谢林生. 双转子连续混炼机新型多棱棒状转子结构与混炼工艺特性研究 [J]. 工程塑料与应用，2007, 35 (3): 59-62.
- [7] 杨卫民，牟涵，丁玉梅. S形转子连续混炼机混炼段流场的有限元分析 [J]. 北京化工大学学报，2004, 31 (1): 83-86.
- [8] Alsteens B, Legat V, Avalosse T. Parametric study of the mixing efficiency in a kneading block section of a twin screw extruder [J]. International Polymer Processing, 2004, 19 (3): 207-217.
- [9] Takeshi Ishikawa, Shin-ichi Kihara, Kazumori Funatsu. 3-D Non-isothermal flow field analysis and mixing performance evaluation of kneading blocks in a co-rotating twin screw extruder [J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41 (5): 840-849.
- [10] Avalosse Th, Rubin Y, Fondin L. Non-isothermal modeling of co-rotating and contra-rotating twin screw extruders [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21 (5): 419-429.
- [11] 缪国斌，田华，谢林生. 双转子连续混炼实验平台开发与应用 [J]. 实验技术与管理，2010, 27 (11): 79-81.