

销钉机筒挤出机内物料流动与混合效果的数值模拟

魏新利, 李成清, 王定标

(郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450002)

摘要:在单螺杆挤出简化模型的基础上, 采用滑移网格技术, 考虑销钉与螺杆相对运动的条件, 分别研究销钉数量、销钉排间距、螺槽宽度、拖曳速度对螺杆圆周展开面内物料流动与混合效果的影响。结果表明: 销钉及螺棱切槽对物料具有明显的强化混合作用, 减小销钉排间距及螺槽宽度、增大销钉数量和提高拖曳速度都会改善混合效果。对于 $\Phi 90$ 销钉挤出机, 每排 6~8 枚销钉、销钉排间距为 60~72 mm、螺槽宽度为 54 mm 左右、转速为 25~50 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时可达较好的混合效果。

关键词:销钉机筒挤出机; 流场; 混合

中图分类号: TQ330.1⁺1; TQ330.4⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-890X(2004)12-0746-04

物料在销钉机筒挤出机中的流动十分复杂, 求解复杂流道内流场的解析解几乎不可能, 目前, 只能通过数值计算获得数值解。前文^[1]采用螺杆圆周展开面简化模型对胶料的流场进行了分析; 前文^[2,3]采用同样的简化模型分别研究了螺槽横截面和螺杆圆周展开面的流体流动与混合行为。上述研究均采用销钉固定在螺杆上的简化模型, 但实际上销钉与螺杆存在相对运动。本研究在单螺杆挤出简化分析模型的基础上, 采用滑移网格技术, 在考虑销钉与螺杆相对运动的条件下, 分别考察了销钉数量、销钉排间距、螺槽宽度、拖曳速度对螺杆圆周展开面内物料流动与混合效果的影响, 为研究销钉机筒挤出机内物料流动与混合性能及销钉机筒挤出机的结构设计提供参考。

1 流场的数值模拟

1.1 结构模型与边界条件

将螺杆沿圆周展开为平面, 将机筒内表面也展开为平面, 假设由该平面拖曳物料流动^[3]。由于销钉机筒挤出机大多采用双头螺杆, 因此本研究也采用双头螺杆, 简化结构模型如图 1 所示, 螺杆圆周展开面内销钉所在的区域为动态区域, 其它区域为静态区域。

几何参数(以 $\Phi 90$ 销钉机筒挤出机为参考):

作者简介: 魏新利(1956-), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 硕士, 主要从事化工过程机械的教学与研究开发工作。

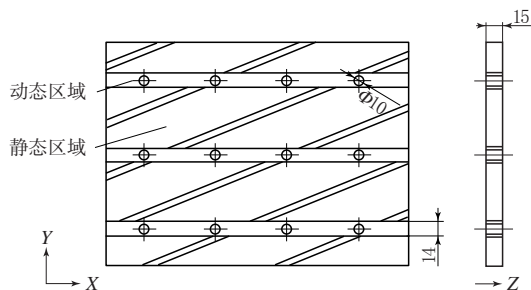


图 1 螺杆圆周展开模型

模型高度取 4 个螺旋长度, 模型宽度为 283 mm, 螺棱高度(螺槽深度)为 15 mm, 螺棱宽度为 6 mm, 销钉长度 15 mm, 销钉直径 10 mm, 螺棱倾角为 20° , 螺棱切槽宽 14 mm; 每排销钉数量分别取 4, 6, 8 和 10 枚, 每排销钉的间距分别取 48, 60, 72 和 84 mm, 螺槽的宽度分别取 39, 54, 69 和 84 mm。

物料参数: $\mu = 27.58 \text{ kPa} \cdot \text{s}$, $\rho = 0.92 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

边界条件: 拖曳表面的速度 v_x 分别取 0.09, 0.135, 0.180 和 $0.225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相当于螺杆转速分别为 19, 28, 38 和 $48 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 其它两个方向的速度为零。动态区域销钉移动的速度与表面拖曳速度相等。除左右两端面外, 设流体与边界之间无滑移, 即零速边界。不作特殊说明的边界, 默认其法向速度为零。在本模型分析中, 不考虑耗散热, 不求解温度场, 假设流体流动定常。

采用 GAMBIT 软件进行前处理, 网格的类

型为 TGrid。将销钉所在的区域定义为动态区域,其它区域定义成静态区域,将动静区域的网格合并,动态区域与静态区域之间定义为分界面。

1.2 流场数值计算与分析

前处理后,应用 FLUENT 软件导入 GAMBIT 的前处理结果,使用层流模型,采用滑移网格技术进行数值计算,得到各种结构模型的流场。本研究分别计算了以下流场:(1)无销钉结构模型在不同螺槽宽度和不同拖曳速度下的流场;(2)每排 6 枚销钉、螺槽宽度 54 mm 时不同销钉排间距和不同拖曳速度时的流场;(3)销钉排间距 72 mm、螺槽宽度 54 mm 时每排不同销钉数量和不同拖曳速度时的流场;(4)每排 6 枚销钉、销钉排间距 72 mm 时不同螺槽宽度和不同拖曳速度时的流场。

图 2~4 为每排 6 枚销钉、螺槽宽度 54 mm、销钉排间距 72 mm、拖曳速度 $0.135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的局部流场矢量图。由图 2 可见,在模型上表面,由于有移动销钉,销钉前方部分流体向右上和右下方流动,销钉后方部分流体向左上和左下方方向销钉流动,两销钉之间及其它区域的流体主要沿拖曳方向流动。由图 3 可见,在模型中间面上,由于销钉的运动导致流体在销钉上下侧分别形成方向相反的涡流,同时在销钉运动及螺棱约束的作用下,使其它区域的流体流动受到较大扰动,这种涡流对促进流体混合是十分有利的。由图 4 可见,在模型底平面上,含有销钉的动态区域流速约等于拖曳速度,静态区域流速很小,同时在销钉上下侧可见微弱的涡流,与将销钉固定在螺杆上的流场有明显的不同^[1,4],这说明在对流场进行分析时,将销钉固定在螺杆上的模型与实际销钉机筒挤出机存在一定的偏差。

2 混合效果的计算与分析

前文^[2,3]在假设物料为层流分布混合的条件

$$e_{i,j,k} = \frac{|v_{i,j,k}^{(x)} - v_{i-1,j,k}^{(x)}|}{\Delta x} (N_{i,j,k}^{(x)})^2 + \left(\frac{|v_{i,j,k}^{(x)} - v_{i,j-1,k}^{(x)}|}{\Delta y} + \frac{|v_{i,j,k}^{(y)} - v_{i-1,j,k}^{(y)}|}{\Delta x} \right) |N_{i,j,k}^{(x)} N_{i,j,k}^{(y)}| + \frac{|v_{i,j,k}^{(y)} - v_{i,j-1,k}^{(y)}|}{\Delta y} (N_{i,j,k}^{(y)})^2 + \left(\frac{|v_{i,j,k}^{(y)} - v_{i,j-1,k}^{(y)}|}{\Delta z} + \frac{|v_{i,j,k}^{(z)} - v_{i-1,j,k}^{(z)}|}{\Delta y} \right) |N_{i,j,k}^{(y)} N_{i,j,k}^{(z)}| + \frac{|v_{i,j,k}^{(z)} - v_{i,j-1,k}^{(z)}|}{\Delta z} (N_{i,j,k}^{(z)})^2 + \left(\frac{|v_{i,j,k}^{(z)} - v_{i,j-1,k}^{(z)}|}{\Delta x} + \frac{|v_{i,j,k}^{(x)} - v_{i,j-1,k}^{(x)}|}{\Delta z} \right) |N_{i,j,k}^{(z)} N_{i,j,k}^{(x)}| \quad (1)$$

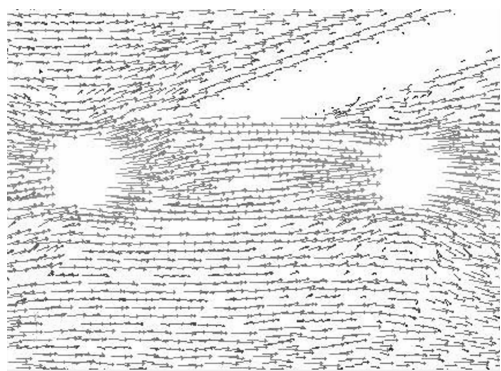


图 2 模型上表面的局部流场矢量分布 ($z=14.5 \text{ mm}$)

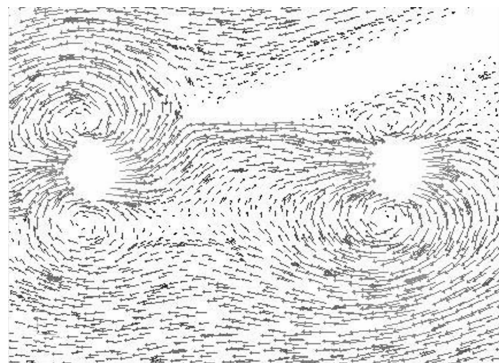


图 3 模型中间面的局部流场矢量分布 ($z=7.5 \text{ mm}$)

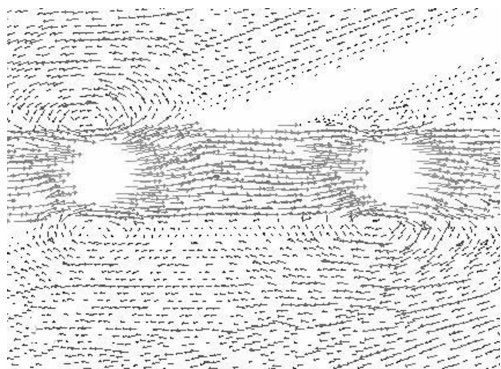


图 4 模型底平面的局部流场矢量分布 ($z=0.5 \text{ mm}$)

下,给出了二维流场某点的混合效果评价计算公式。将其扩展为三维流场某点混合效果的评价计算,具体计算公式如下。

式中, $e_{i,j,k}$ 表示某点(单元)的混合效果; $v_{i,j,k}^{(x)}, v_{i,j,k}^{(y)}$ 和 $v_{i,j,k}^{(z)}$ 分别表示某点(单元) x, y 和 z 方向的速度分量; $N_{i,j,k}^{(x)}, N_{i,j,k}^{(y)}$ 和 $N_{i,j,k}^{(z)}$ 分别表示某点(单元)速度方向的分量; $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 分别表示某点(单元) x, y 和 z 方向的尺寸。

利用式(1)求出各点(单元)的混合效果后,通过式(2)可求出各种结构模型的体积平均混合效果 $\bar{e}$ 。

$$\bar{e} = \int_V e_{i,j,k} dV / \int_V dV \quad (2)$$

图 5~8 分别示出了不同模型结构的体积平均混合效果。

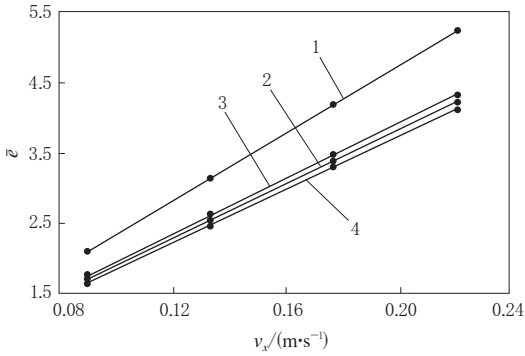


图 5 无销钉时不同螺槽宽度和不同拖曳速度下的体积平均混合效果

螺槽宽度(mm): 1—39; 2—54; 3—69; 4—84。

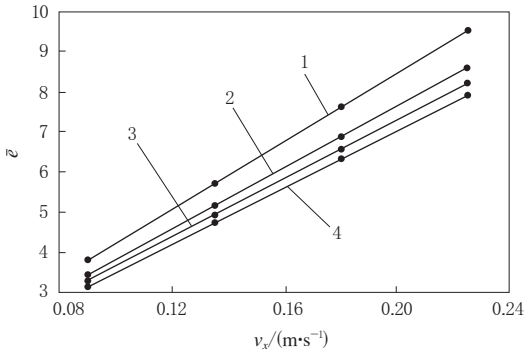


图 6 每排 6 枚销钉及排间距为 72 mm 时不同螺槽宽度和不同拖曳速度下的体积平均混合效果

注同图 5。

对比图 5 和 6, 可以得出以下结论。

(1) 在同样拖曳速度与螺槽宽度的情况下, 有销钉(6 枚)结构的体积平均混合效果较无销钉结构提高 65%~88%。

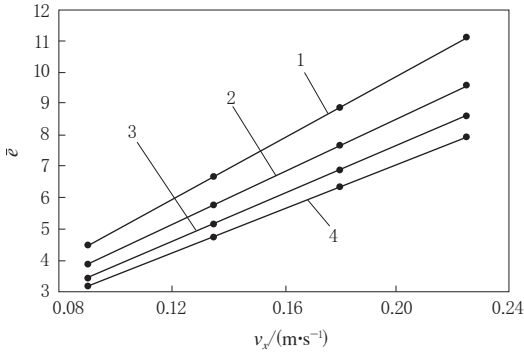


图 7 每排 6 枚销钉及螺槽宽度为 54 mm 时不同销钉排间距和不同拖曳速度下的体积平均混合效果

销钉排间距(mm): 1—48; 2—60; 3—72; 4—84。

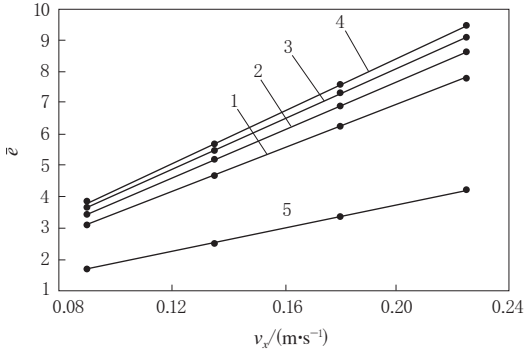


图 8 螺槽宽度 54 mm 及销钉排间距 72 mm 时不同销钉数量和不同拖曳速度下的体积平均混合效果

销钉数量(枚): 1—4; 2—6; 3—8; 4—10; 5—0。

(2) 无论有销钉结构还是无销钉结构, 拖曳速度越高, 混合效果越好: 当螺槽宽度为 54 mm、销钉排间距为 72 mm、每排 6 枚销钉时, 拖曳速度从 $0.090 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $0.135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 体积平均混合效果提高约 50%; 拖曳速度从 $0.135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $0.180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 体积平均混合效果提高约 33%; 拖曳速度从 $0.180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $0.225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 体积平均混合效果提高约 25%; 随着拖曳速度的进一步提高, 混合效果的提高程度逐渐减缓。考虑到拖曳速度越高, 功耗将越大, 因此拖曳速度以控制在 $0.135 \sim 0.225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 较为合适(相当于螺杆转速为 $25 \sim 50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

(3) 当拖曳速度、销钉排间距与销钉数量不变

时,螺槽宽度越小,混合效果越好;当销钉数量为 6、排间距为 72 mm、拖曳速度为 $0.135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,螺槽宽度从 84 mm 减小到 69 mm,体积平均混合效果提高了约 3.78%;螺槽宽度从 69 mm 减小到 54 mm,体积平均混合效果提高了约 4.87%;螺槽宽度从 54 mm 减小到 39 mm,体积平均混合效果提高了约 10.5%。考虑到螺槽宽度越小,流动阻力越大、功耗越高,因此 $\Phi 90$ 销钉挤出机螺槽宽度以 54 mm 左右为宜。

由图 7 可见,当拖曳速度、销钉数量与螺槽宽度不变时,销钉排间距越小,混合效果越好;销钉排间距从 84 mm 减小到 72 mm 时,体积平均混合效果提高了约 8.17%;销钉排间距从 72 mm 减小到 60 mm 时,体积平均混合效果提高了约 11.43%;销钉排间距从 60 mm 减小到 48 mm 时,体积平均混合效果提高了约 15.65%,但考虑到销钉排间距越小,功耗将越大,因此 $\Phi 90$ 销钉挤出机销钉排间距以 60~72 mm 为宜。

由图 8 可见,当拖曳速度、螺槽宽度与销钉排间距不变时,每排销钉的数量越多,混合效果越好;当销钉数量由 4 枚增大到 6 枚时,体积平均混合效果提高了约 10.6%;销钉数量由 6 枚增大到 8 枚时,体积平均混合效果提高了约 5.76%;销钉数量由 8 枚增大到 10 枚时,体积平均混合效果提高了约 2.74%;随着销钉数量的增大混合效果的增大不太明显。考虑到销钉越多,功耗也将越大,

因此 $\Phi 90$ 销钉机筒挤出机每排以 6~8 枚销钉为宜。

3 结论

(1)通过数值计算,获得了不同结构模型(不同销钉数量、不同螺槽宽度、不同销钉排间距)在不同拖曳速度下螺杆圆周展开面内的流场。

(2)对不同结构的螺杆圆周展开面内的混合效果进行计算与评价,结果发现:减小销钉排间距、增加销钉、减小螺槽宽度、提高拖曳速度都会改善混合效果。综合考虑各种因素, $\Phi 90$ 销钉机筒挤出机每排以 6~8 枚销钉、螺槽宽度以 54 mm 左右、销钉排间距以 60~72 mm、转速以 $25 \sim 50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 为宜。

参考文献:

- [1] 魏新利,董卫刚. 销钉机筒挤出机中胶料流动状态的研究[J]. 橡胶工业,2003,50(2):104-108.
- [2] 魏新利,董卫刚,李培宁,等. 销钉机筒挤出机螺槽横截面内流体流动与混合的数值与实验研究[J]. 高校化学工程学报,2003,17(3):254-260.
- [3] 魏新利,董卫刚,李培宁,等. 销钉机筒挤出机螺杆圆周展开面内物料流动与分布混合的数值与实验研究[J]. 化工学报,2003,54(11):1 619-1 626.
- [4] Brzoskowski R, White J W, Szydlowski W, *et al.* Modeling flow in pin-barrel screw extruders[J]. Int. Polym. Proc., 1988,3(3):134-140.

收稿日期:2004-06-20

Numerical simulation of flow and distributive mixing in pin-barrel extruder

WEI Xin-li, LI Cheng-qing, WANG Ding-biao

(Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the reasonably simplified model of single-screw extrusion process, the influence of the number and row distance of pins, the width of helical groove and the dragging velocity on the flow and distributive mixing around the unfolded surface of screw in pin-barrel extruder was investigated by the sliding mesh technology and taking the movement between pins and screw into account. The results showed that the cuts in the pins and flights intensified the distributive mixing significantly; and the mixing efficiency could be improved by reducing the row distance of pins and the width of helical groove, and increasing the pin number and dragging velocity. For $\Phi 90$ pin-barrel extruder, the better distributive mixing could be obtained by using 6~8 pins in a row, 60~72 mm row distance of pins, 54 mm width of groove and $25 \sim 50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ screw speed.

Keywords: pin-barrel extruder; flow field; distributive mixing