

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.04.017

适应性网格技术在异向双螺杆挤出机中的仿真

Simulation in counter-rotating twin screw extruder by adaptive grid technology

安琪^{1,2} 黄志刚^{1,2} 胡淑珍³ 米国强^{1,2} 李贺^{1,2}AN Qi^{1,2} HUANG Zhi-gang^{1,2} HU Shu-zhen³ MI Guo-qiang^{1,2} LI He^{1,2}

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 塑料卫生与安全质量评价技术北京市重点实验室, 北京 100048; 3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100048)

(1. School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Plastic Beijing Municipal Key Laboratory of Health and Safety Quality Evaluation Technology, Beijing 100048, China; 3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100048, China)

摘要:将现有的适应性网络技术应用到异向双螺杆挤出机中,利用 AutoCAD 软件绘制异向螺纹元件的端面型线,并在 Solidworks 软件上建立相应的三维模型,将几何模型导入 Gambit 软件进行网格划分,在 Polyflow 软件中采用适用性网格技术,根据 Maxdiv 值对流体流道的网格进行局部加密,设计异向双螺杆等温瞬态流动问题的有限元求解任务,研究 Maxdiv 值对流道的剪切速率场、黏度场和压力场等方面的影响情况,还对比适应性网格技术中网格细化次数对计算资源的影响,并说明该方法在双螺杆挤出过程仿真过程中的应用潜力。

关键词:适应性网格技术;异向双螺杆;Maxdiv;数值分析

Abstract: Applied the existing adaptive grid technology to the counter-rotating twin-screw extruder, used Autocad software to draw the end profile of the counter-rotating thread element, and established the corresponding 3D model on the Solidworks software. Then imported the geometric model Gambit software for mesh generation. Selecting the adaptable mesh technology of Polyflow software, the mesh of the fluid channel is locally densified according to the Maxdiv value. The finite element solution task of isothermal transient flow problem of counter-rotating twin-screw was designed, and the Maxdiv value was also studied. The effects of the value were studied, on the shear rate field, viscosity field, and pressure field of the flow channel. And compared

the effects of the number of mesh refinements in the adaptive grid technology on the computing resources. It is showed that Application potential of the method in the twin-screw extrusion process during the simulation.

Keywords: adaptive grid technology; counter-rotating twin-screw; Maxdiv; numerical analysis

随着电脑技术和计算方法的飞速发展,电脑和有限元法相结合的模拟仿真方法被广泛应用在双螺杆挤出机上^[1]。吴小娟等^[2]为详细了解螺旋挤压工艺对聚合物物料性能的影响,利用网格重叠技术,借助于 Polyflow 软件数值模拟单螺杆均化段挤压过程。王晓瑾等^[3]对螺杆头、过渡段的平直段和锥形段以及定型段采用八点六面体网格,计算时利用网格重叠技术,按实际情况组合后进行仿真。网格重叠技术能够有效降低流体区域网格划分的复杂程度,但存在运动部件附近计算结果不准确的缺陷^[4]。面对更加复杂的流道时,网格重叠技术更凸显了计算不准确的缺点,邓霖^[5]在对三螺杆挤出机中流场静态进行网格划分时,先用区块将螺杆与螺棱间隙处、啮合区同流场的其余部分分开,再单独加大间隙区、啮合区的网格密度,最后通过停留时间的实验验证,确定了合适的网格划分原则及网格精度。

目前在使用网格重叠技术的仿真中,多数^[6-7]会凭借经验单独加大间隙区、啮合区的网格密度,即边界层网格加密技术,用以提高计算的精度。但该方法不适用于齿形元件^[8]、非啮合波形元件^[9]、楔形推力面非常规螺纹元件^[10]等非常规、不规律的复杂元件。为了解决螺杆元件复杂表面的边界网格划分问题,Hetu 等^[11]提出了一种浸入边界方法,但由于该方法对螺杆元件边界网格的位置

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(编号:2016YFD0400305,2018YFD0400800);北京市自然科学基金—市教委联合资助项目(编号:KZ20180011017)

作者简介:安琪,男,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:黄志刚(1966—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: huangzg@btbu.edu.cn

收稿日期:2020-10-11

非常敏感且准确性取决于单元网格的大小,即该方法需大量的计算资源和计算时间才可保证结果的精确,所以该方法缺乏实用性。

适应性网格技术依托网格重叠技术,根据单元内 inside 场变量的变化梯度自动划分网格,并通过改变 Maxdiv 值来调节网格的密度,该技术既能节省选择合适网格加密区域的时间,又可选择网格的密度以保证计算精度。Bertrand 等^[12]曾运用适应性网格技术模拟了双螺杆挤出机二维模型的旋转过程,并验证了该方法能够精确计算出细小间隙的剪切速率值,但是由于验证场景的片面以及验证参数的单一,该技术在计算结果的验证上缺乏准确性。

文章拟讨论适应性网格在异向双螺杆挤出机中仿真应用状况,并与边界层网格加密技术的仿真结果作对比,以期证明该方法的实用性和准确性。

1 适应性网格技术

1.1 inside 场

在 Polyflow 软件中,inside 是构建流体区域网格运动部件轮廓的场边量,能够描述流体区域是否被运动部件重叠。某一节点的 inside 值为 0 说明该节点属于流体区域;某一节点的 inside 值为 1 则说明该节点属于运动部件区域。

适应性网格技术基于单元内 inside 场变量的变化梯度能确定该单元是否需要被细化。若某一单元的变化梯度大于给定值,这种单元在计算中需要细化网格,以获得更加精确的运动部件轮廓形状。若某一单元的变化梯度小于给定值,则该单元不需要细化。

1.2 相关参数

1.2.1 网格细化频率参数(Nstep) Nstep 参数表示每隔 Nstep 个时间步长使用一次适应性网格技术。

1.2.2 网格细化次数(Maxdiv) Maxdiv 定义为使用适应性网格技术的次数。

1.3 细化方案

以文中使用的规则六面体网格为例,当细化次数 Maxdiv 为 1 时,一个网格最多可以被分为 8 个子网格;当 Maxdiv 为 2 时,一个网格最多可以被分为 64 个子网格。

在仿真过程中,随着运动部件的旋转,流道内所有单元都会与运动部件接触,因此它们都会被细化。当运动部件离开了细化位置,这些细化位置的细化次数将减少,用以节约计算时间和计算资源^[13]。

2 数值模拟

2.1 几何模型的建立

2.1.1 绘制端面型线 双螺杆螺纹元件的端面型线本质上决定了挤出机的剪切、塑化、混合、输送等性能,端面型线的合理设计对提升双螺杆挤出机的整体性能具有重要

意义^[14]。在 AutoCAD 软件中,根据表 1 的螺纹元件的几何参数绘制如图 1 的异向双螺杆螺纹元件的端面型线,并严格保证螺旋啮合时不干涉^[15]。

2.1.2 建立三维模型 根据图 1 绘制异向螺纹元件的端面型线,利用 Solidworks 软件建立如图 2 的三维模型,模拟双螺杆转动过程,验证双螺杆间是否存在物理干涉,并保证建立的几何模型不存在构造重叠。

2.2 数学模型的建立

2.2.1 基本假设^[16-17]

- (1) 熔体充满整个流道且不可压缩。
- (2) 流场中熔体处处有相同温度。
- (3) 不计重力、惯性力等远小于黏性力的体积力。
- (4) 机筒壁面的转子表面无滑移。
- (5) 熔体为雷诺系数较小的层流流动。

2.2.2 数学控制方程 根据上述基本假设条件,基于等温假设,不考虑能量方程,给出相应流体控制方程^[18]:

连续性方程:

$$\nabla \cdot \nu = 0, \tag{1}$$

表 1 螺纹元件的几何参数

Table 1 Geometric parameters of threaded components mm

螺纹元 件外径	螺纹元件 间的距离	螺纹元件与机 筒间的距离	螺纹元件间 的中心距	流道的 长度
16	0.2	0.2	26.2	30

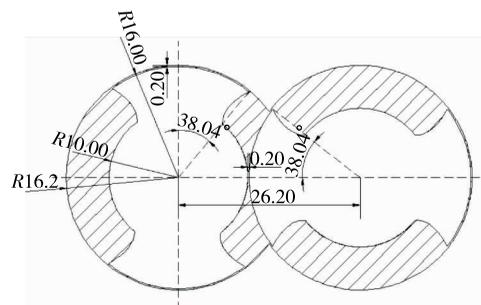


图 1 异向螺纹元件的端面型线

Figure 1 The profile line of the end face of the counter-threaded component

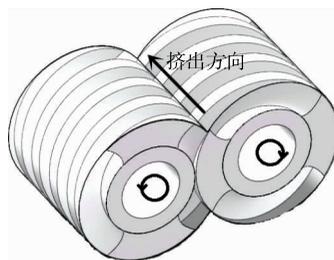


图 2 异向螺纹元件的三维模型

Figure 2 Three-dimensional model of counter-threaded components

动量方程:

$$\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau = 0, \quad (2)$$

本构方程:

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

式中:

∇ ——哈密尔顿算子;

v ——速度矢量, m/s;

p ——压力, Pa;

η ——表现黏度, Pa·s;

τ ——应力张量, Pa;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} ;

D ——形变速率张量, s^{-1} 。

研究仿真的是聚乳酸在异向双螺杆挤出机的等温流动过程,聚乳酸的物性参数见表 2^[19]。聚乳酸为非牛顿黏弹流体,式(3)遵循式(4)中的 Bird-carreau 模型^[20],用于表述聚乳酸的流变特性。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}, \quad (4)$$

式中:

η_{∞} ——无限剪切黏度, Pa·s;

η_0 ——零剪切黏度, Pa·s;

λ ——carreau 模型时间参数, s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} ;

n ——熔体非牛顿指数。

2.3 网格划分

将流道和异向螺纹元件的几何模型导入 Gambit 分别划分网格,流道网格为六面体网格,网格数为 8 640 个。径向网格分段数为 8,轴向网格分段数为 15,圆周方向网格数为 48,不添加边界层;螺纹元件网格为四面体网格,尺寸为 2 mm。流道网格单元数的数据如表 3。

2.4 边界条件和转速的设定

流道区域的出入口边界设置法向力和切向力为 0,说

表 2 聚乳酸的物性参数

Table 2 Physical parameters of polylactic acid

η_0 /(Pa·s)	η_{∞} /(Pa·s)	n	λ /s
2 504.235	0	0.253	0.060 7

表 3 网格单元数的数据

Table 3 Data on the number of grid cells

网格名称	流道网格(细化前)	流道网格(细化后)
Maxdiv 值为 0	8 640	8 640
Maxdiv 值为 1	8 640	35 761
Maxdiv 值为 2	8 640	113 680
边界层网格	36 720	36 720

明出入口流体可以自由流动;左右孔边界法向速度和切向力为 0,说明流体不可贯穿边界,属于滑移边界;外壁面的边界设置为法向速度和切向速度为 0,表示边界无滑移^[21]。转速设置为 40 r/min。

3 结果分析

3.1 流道区域的边界网格

图 3 为异向双螺杆螺纹元件流道入口边界的网格划分情况。由图 3 可知,随着 Maxdiv 值的增加,流道入口截面的网格越来越细致;边界层网格的加密区域集中在啮合区、螺杆间隙等狭小区域。

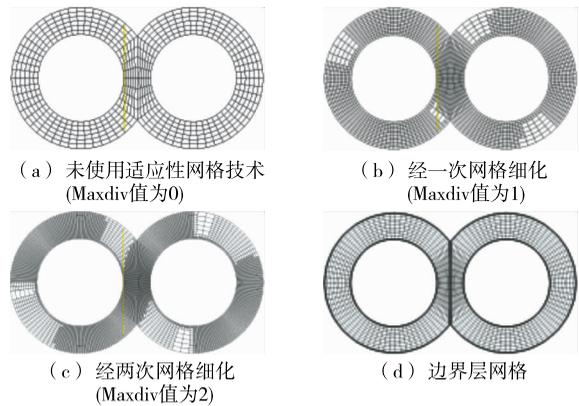


图 3 网格细化后的端面网格

Figure 3 End face mesh after mesh refinement

3.2 inside 场分析

图 4 为螺纹元件流道入口边界 inside 场的变化云图。由图 4 可知,Maxdiv 值为 0 时,运动部件轮廓模糊,啮合区内螺纹元件 inside 的范围两两交叉重叠,对描述啮合区内流体流动情况存在一定干扰;Maxdiv 值为 1 时,螺纹元件轮廓基本清晰,但啮合区内 inside 的范围依然存在交叉的现象;Maxdiv 值为 2 时,螺纹元件轮廓更加清晰,啮合区内两螺杆 inside 场范围独立分明。由此可见,运用适应性网络技术可以提高螺纹元件轮廓的光滑度和清晰度。

3.3 剪切速率场分析

图 5 是流道流场的轴向平均剪切速率图。分别观察适应性网络技术仿真结果的变化趋势可以得到,轴向平均剪切速率曲线随着 z 轴距离的变化轻微上扬;由于转速只有 40 r/min,所以曲线的上下波动不明显。因为网格密度的增加,系统能够计算到存在于双螺杆的间隙处和螺杆与机筒的间隙处等小区域的高剪切速率值,所以 Maxdiv 值为 2 的曲线处在折线图最上层,Maxdiv 值为 0 的曲线处在最下层,即 Maxdiv 值越大,计算到轴向平均剪切速率值越大,曲线就越高。

由于边界层网格的网格加密区域和网格密度集中在螺杆机筒间隙处,所以该网格能够计算到更多高剪切速

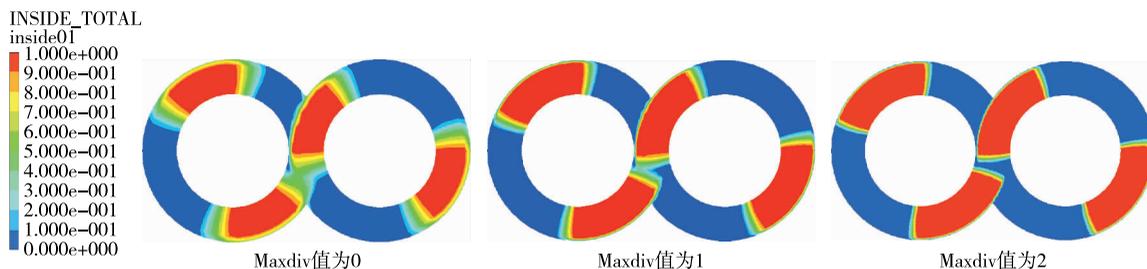


图 4 网格细化后的 inside 云图

Figure 4 Inside cloud image after mesh refinement

率,如图 6(d)边界层网格的剪切速率云图所示,同时比 Maxdiv 值为 1 的曲线位置更高,处于 Maxdiv 值为 2 的曲线与曲线 Maxdiv 值为 1 的曲线之间。

如图 6 所示,高剪切速率主要存在于双螺杆啮合区间隙处和螺棱与机筒间隙处这两个区域内,间隙处流体的流动速度快,间隙尺寸小,产生了较高的速度梯度,因此剪切速率高^[22]。随着 Maxdiv 值的增大,剪切速率分布范围逐渐变小,分布情况逐渐变好,说明随着网格细化次数的增加,计算的结果越来越精确。

3.4 黏性场分析

根据式(4)可以得出,黏度随着剪切速率的增大而减小^[23]。对比图 5 和图 7 可知,两者曲线的变化趋势符合规律。由于图 5 和图 7 的曲线是选取平均值绘制的,分析的是剪切速率和黏度值两者轴向的宏观变化,加之网格局部细化带来的精度升级,所以 Maxdiv 值为 1、曲线 Maxdiv 值为 2 和曲线边界层网格的黏度数值变化在误差允许的范围内^[24-25]。

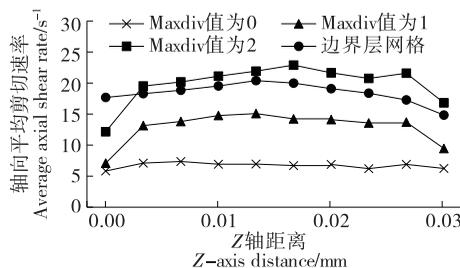


图 5 轴向平均剪切速率图

Figure 5 Axial average shear rate diagram

由图 8 可知,螺棱与机筒间隙处以及靠近螺棱处的流场黏度较小,螺槽中的黏度值较大。边界层网格的黏度云图与适应性网格(Maxdiv 值为 0)的差别不大。对比 3 种适应性网格的云图,得出:随着 Maxdiv 值的增大,螺槽内黏度的区域随之扩大,说明网格细化次数的增多,能够增加黏度计算的区域,显示黏度分布的更多细节。

3.5 压力场分析

图 9 为 4 种仿真结果的流场压力分布云图,4 种结果

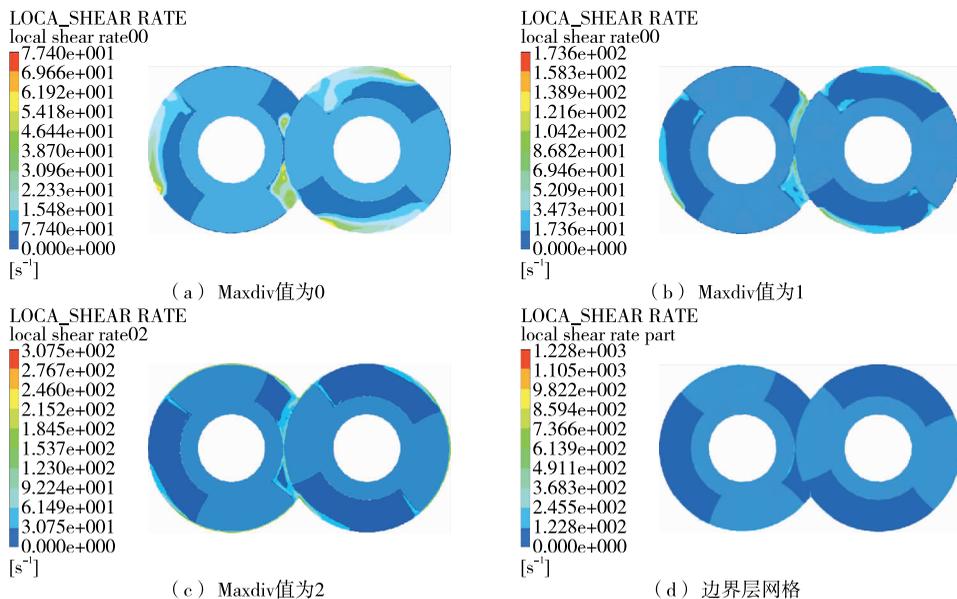


图 6 流道入口截面的剪切速率云图

Figure 6 Shear rate cloud diagram of the inlet section of the flow channel

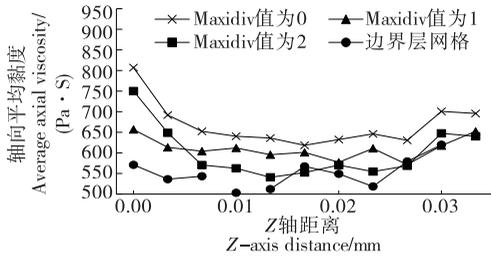


图 7 轴向平均黏度折线图

Figure 7 Axial average viscosity line graph

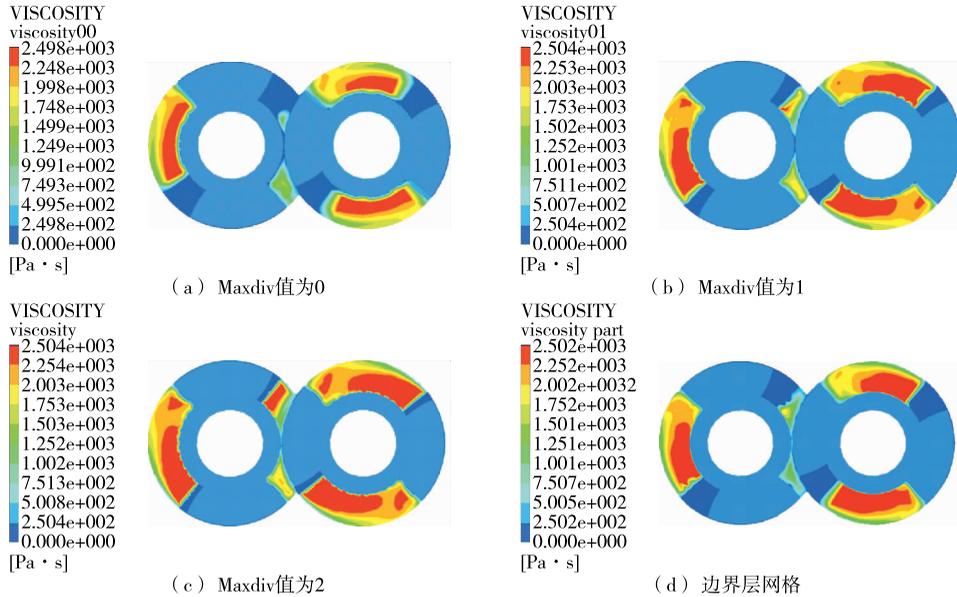


图 8 流道入口截面的黏度云图

Figure 8 Viscosity cloud diagram of the inlet section of the runner

进一步衰减,最终呈梯田状。这是由于网格细化次数的增多,网格的尺寸不断变小,系统能够更加精密地计算螺棱螺槽等细小尺寸内的压力大小,压力分布的轮廓自然变得更加均匀连续。说明运用适应性网格技术能够获得精度更高的计算结果,增加压力分布的细节,有效提高压力分布云图的清晰度。图 9(d)显示的压力分布接近于图 9(b),即边界层网格和适应性网格的压力分布相近。

3.6 计算资源消耗的分析

体积流率是研究流场流动的重要参数,数值的大小将直接影响到产品的质量,大的流率可提升生产效率,而过大的流率会严重影响产品质量。并根据式(5)可知,体积流率主要受温度、转速和螺杆几何参数的影响^[26]。同时,由于设置的温度、转速和几何参数条件都是不变的,出口的体积流率在理论上是定值,故以出口流率量计算结果的精确性。根据表 4,以 Maxdiv 值为 0 的计算时间、最大内存和出口流率作为参考值,Maxdiv 值为 1 的仿真消耗 10.94 倍的参考计算时间和 6.36 倍的参考最大内存,得到 1.35 倍的计算精度;Maxdiv 值为 2 的仿真结果

的压力分布普遍不均匀,且沿挤出方向呈增长的趋势。流道下部的压力高于上部,螺棱与机筒的间隙处出现了高压带,且流道下部的啮合区出现局部高压。

图 9(a)显示的压力分布呈中心发散式的,压力随着距离逐渐减小。图 9(b)显示的压力分布呈条状,由于螺棱与机筒间存在间隙,在瞬态模拟中,压力集中在螺棱处,随着两侧尺寸的变化,压力分布向两侧衰减成条状,与螺槽内分布的低压力形成鲜明的对比。图 9(c)显示的压力分布:在条状的基础上,模糊了高低压的边界,压力

消耗 69.49 倍的参考计算时间和 39.16 倍的参考最大内存,得到 1.48 倍的参考计算精度。对比 Maxdiv 值为 1 和 2 时的数据,后者比前者 1 多花费 58.55 倍的参考计算时间和 32.80 倍的参考最大内存,提高了 0.13 倍的参考计算精度,故得出:虽然增大 Maxdiv 值能加密网格,提升计算精度,但对计算资源的消耗也同样增加;Maxdiv 值为 2 的仿真虽然消耗大量的计算资源,但是计算精度的提升有限,故 Maxdiv 值为 1 的仿真更加适用于常规研究中。在运用适应性网格技术的过程中,应当考虑计算时间和计算机的性能,选择合适的网格细化次数。

$$Q = \left[\frac{\alpha}{1 + \frac{\beta + \gamma}{K_Q}} \right] n, \quad (5)$$

式中:

Q——挤出机的体积流率, m³/s;

α 、 β 、 γ ——与螺杆几何参数有关的常数, m;

K_Q ——与温度相关的常数, m³;

n——螺杆转速, r/s。

边界层网格的仿真消耗 4.79 倍的参考计算时间和

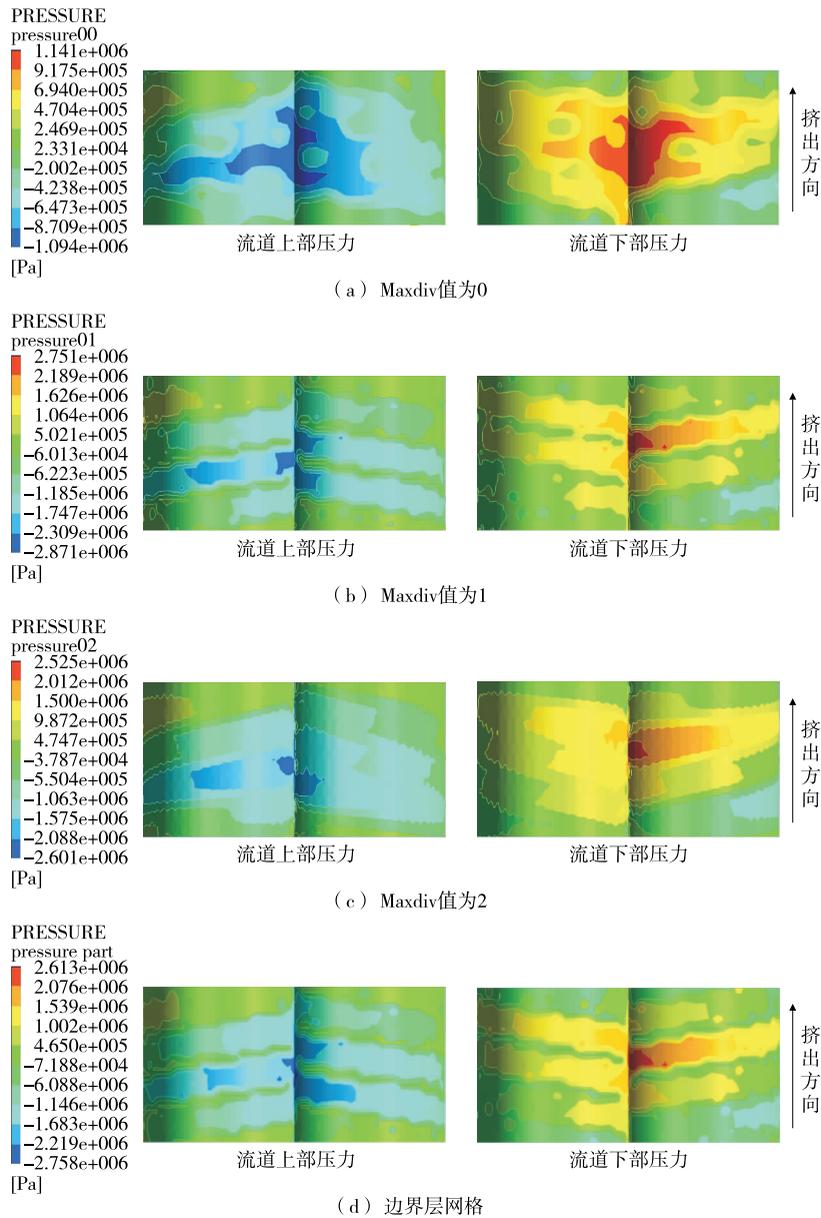


图 9 流道压力云图

Figure 9 Flowchannel pressure cloud diagram

5.24 倍的参考最大内存,得到 1.08 倍的参考计算精度。与网格单元数相近的适应性网格技术(Maxdiv 值为 1)对比,适应性网格比边界层网格多花费 6.15 倍的参考计算时间和 1.12 倍的参考最大内存,提高了 0.40 倍的参考计算精度。虽然适应性网格在自动划分网格上多花费了计算时间,但是在整个操作上节省了选择网格加密区域和网格密度的时间,故适应性网格的计算时间在可接受的范围内。两者在最大内存上的差距并不大。相对于边界层网格技术,适应性网格技术提升了 0.40 倍的计算精度,说明适应性网格技术能够获得更准确的计算结果。

表 4 不同的加密网格对于计算过程的影响

Table 4 The influence of different densified grids on the calculation process

网格名称	计算时间/ s	最大内存/ MB	出口流率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Maxdiv 值为 0	4 248.9	148.3	2.750×10^{-6}
Maxdiv 值为 1	46 465.5	941.5	3.725×10^{-6}
Maxdiv 值为 2	295 255.2	5 807.6	4.068×10^{-6}
边界层网格	20 392.6	777.2	2.975×10^{-6}

4 结论

(1) 随着 Maxdiv 值的增大,能够提高剪切速率场、黏度场和压力场等流场分布云图的分辨率,使得图像更加精细,有助于分析螺杆流动中复杂的流动情况。虽然增大 Maxdiv 值能加密网格,提升计算精度,但对计算资源的消耗也同样增加;Maxdiv 值为 2 的仿真虽然消耗大量的计算资源,但是计算精度的提升有限,故 Maxdiv 值为 1 的仿真更加适用于常规研究中。在运用适应性网格技术过程中,应当考虑计算时间和计算机的性能,选择合适的网格细化次数。

(2) 在流道网格单元数相近的情况下,适应性网格技术计算到的高剪切速率值少于边界层网格;在黏度场上,适应性网格的细节更多;在压力场云图上,两者的表现相近。相对于边界层网格技术,适应性网格技术提升了 0.40 倍的计算精度,说明适应性网格技术能够获得更准确的计算结果。总的来看,适应性网格技术在计算精度上具有优势。

(3) 研究仅在常规双头螺纹元件上运用了适应性网格技术,之后可将该技术运用到具有复杂构造的螺杆元件上,进一步体现适应性网格自动划分网格的优势。

参考文献

- [1] ISHIKAWA T, AMANO T, KIHARA S I, et al. Flow patterns and mixing mechanisms in the screw mixing element of a co-rotating twin-screw extruder[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2002, 42(5): 925-939.
- [2] 吴小娟, 朱建军, 殷伟芬. 单螺杆挤出非等温三维流场的数值分析[J]. *镇江高专学报*, 2015, 28(4): 48-51.
- [3] 王晓瑾, 李志敏. 异向双螺杆挤出机机头模具内三维流场的数值模拟[J]. *安阳工学院学报*, 2006(2): 18-21.
- [4] ISHIKAWA T, KIHARA S, FUNATSU K. 3-D non-isothermal flow field analysis and mixing performance evaluation of kneading blocks in a co-rotating twin screw extruder[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2001, 41(5): 840-849.
- [5] 邓雾兰. 组合式三螺杆挤出机中流动和混合的数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 30-32.
- [6] 尹晖东, 张亚军, 董力群, 等. 异向双螺杆元件对含能材料脱挥效果的影响[J]. *塑料*, 2019, 48(2): 66-70.
- [7] 杨晓彤, 任冬云, 张立群. 废旧胶粉异向双螺杆挤出机连续脱硫挤出传热模拟及实验[J]. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(3): 100-105.
- [8] 方炜. 非啮合异向旋转波形双螺杆挤出机性能的研究[J]. *中国塑料*, 1993, 7(2): 44-49.
- [9] 苗一, 朱向哲, 谢禹钧. 啮合异向旋转双螺杆混合元件一齿型元件的流场分析[J]. *塑料工业*, 2004(8): 34-37.
- [10] 施丰, 耿孝正. 啮合型双螺杆挤出机非常规螺纹元件设计新方法[J]. *中国塑料*, 2001(1): 69-74.
- [11] HETU J F, ILINCA F. Immersed boundary finite elements for 3D flow simulations in twin-screw extruders[J]. *Computers & Fluids*, 2013, 87: 2-11.
- [12] BERTRAND F, THIBAUT F, DELAMARE L, TANGUY P A. Adaptive finite element simulations of fluid flow in twin-screw extruders[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2003, 27(4): 491-500.
- [13] 毕超. Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 162-164.
- [14] 孙旭建. 双螺杆捏合机螺杆转子型线设计及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 10-16.
- [15] 魏静, 张光辉. 双螺杆捏合机螺纹元件型线设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 22-28.
- [16] 罗兵, 龙志斌, 何敏. 啮合异向双螺杆不同螺纹元件的数值模拟及其制备 PP 阻燃电缆的研究[J]. *中国塑料*, 2008, 22(3): 86-90.
- [17] 张超, 樊瑜瑾, 田野. 啮合同向双螺杆挤出机滑移条件下的仿真分析[J]. *塑料科技*, 2019, 47(8): 71-75.
- [18] 马秀清, 林群章, 李晓卫. 捏合块元件混合含能材料的安全性分析[J]. *塑料*, 2019, 48(1): 88-91.
- [19] 黄志刚, 蒋卫鑫, 李鑫, 等. 啮合异向双螺杆挤出机仿真研究[J]. *包装学报*, 2019, 11(3): 9-15.
- [20] 刘湘河, 彭涛, 马永寿. 异向双螺杆 S 型元件混炼效果的数值研究[J]. *工程塑料应用*, 2014, 42(4): 51-55.
- [21] 吴冰清. 异向双螺杆参数化造型与流固耦合分析[D]. 北京: 东北大学, 2015: 47-48.
- [22] 赵玉莲, 李鑫, 安琪, 等. 非等温条件下啮合同向双螺杆挤出过程数值模拟分析[J]. *食品与机械*, 2019, 35(4): 76-79.
- [23] 马秀清. 啮合异向双螺杆挤出过程停留时间分布实验研究[J]. *中国塑料*, 2003(11): 91-94.
- [24] CARRAACO F, SANTANA O, CAILLOUX J, et al. Kinetics of the thermal degradation of poly (lactic acid) obtained by reactive extrusion: Influence of the addition of montmorillonite nanoparticles[J]. *Polymer Testing*, 2015, 48: 69-81.
- [25] SONG K, WU F, TONG T, et al. Areal-time mooney-viscosity prediction model of the mixed rubber based on the independent component regression-gaussian process algorithm[J]. *Journal of Chemometrics*, 2012, 26(11/12): 557-564.
- [26] 李晓林. 单螺杆精密挤出机理的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2003: 59-60.