

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.012

基于可压缩两相流模型的薄壁构件注塑充填模拟

邹书琴¹,董勤喜¹,贾伟²,于行³

[1.海南大学土木建筑工程学院,海口 570228; 2.海南大学海洋科学与工程学院,海口 570228; 3.东玺技术(山东)有限公司,济南 250003]

摘要:基于可压缩两相流模型,对薄壁构件的注塑充填过程进行了模拟。针对厚度尺寸小于长、宽尺寸二十分之一的薄壁构件,研究其厚度方向上网格的划分标准,以及薄壁构件在充填过程中各物理量的分布规律。通过对等厚薄壁构件在厚度上划分不同层数的网格,分别进行充填模拟,分析相关物理量计算的准确性,得出当薄壁构件在厚度上的网格层数不少于7层时,能够对注塑充填过程进行较为准确的计算。据此标准,对两个薄壁构件进行了填充模拟,其中,等厚薄壁构件网格尺寸为0.247 1 mm,网格总数551 124个,厚度方向为7层;不等厚薄壁构件网格尺寸为0.285 7 mm,网格总数为2 262 498个,厚度方向为7层。模拟结果与已有的实验结果和商业软件计算结果一致,验证了此薄壁构件网格划分标准的可行性。此外,对两个薄壁构件充填过程中的物理量分布特征进行分析,结果表明,型腔内部压力均在充填结束时表现为浇口周围较大,沿着熔体前沿流动方向的对称轴呈对称分布,在厚度方向上分布均匀,但速度在厚度方向上分布不均,通常在壁面附近速度较小,在型腔中心位置速度较大。

关键词:可压缩两相流模型;薄壁构件;网格划分标准;网格尺寸;充填模拟

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0092-08

Injection molding filling simulation of thin-walled components based on a compressible two-phase flow model

ZOU Shuqin¹, DONG Qinxu¹, JIA Wei², YU Hang³

[1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. School of Marine Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. DonSys Technology (Shandong) Co., Ltd., Jinan 250003, China]

Abstract : The injection molding filling process of thin-walled components was simulated based on the compressible two-phase flow model. For the thin-walled components whose thickness is less than one-twentieth of the length and width, the mesh delineation criteria in the thickness direction and the distribution of physical quantities of the thin-walled components in the filling process were investigated. By filling simulation with the meshes divided into different layers on the thickness direction and analyzing the accuracy of the results, it was concluded that when the mesh layers on the thickness direction is not less than 7, the injection molding filling process can be simulated accurately. According to this criterion, filling simulation for two thin-walled components was carried out. The grid size of equal-thickness thin-walled component is 0.247 1 mm, the total number of grids is 551 124, and the thickness direction is 7 layers. The grid size of unequal-thickness thin-walled component is 0.285 7 mm, the total number of grids is 2 262 498, and the thickness direction is 7 layers. The simulation results are consistent with the existing experimental results and commercial software calculations, verifying the feasibility of the thin-walled component meshing standard. In addition, the physical quantity distribution characteristics of the two thin-walled cavities during the filling process were analyzed, and the results show that the internal pressure of the cavities are all larger around the gate at the end of filling, symmetrically distributed along the axis of symmetry of the flow direction, and uniformly distributed in the thickness direction. While the velocity is unevenly distributed in the thickness direction, is usually smaller near the wall, and is larger in the position of the center of the cavity.

Keywords : compressible two-phase flow model ; thin-walled component ; meshing standards ; grid size ; filling simulation

基金项目: 海南省院士创新科研专项(YSPTZX202106)

通信作者: 贾伟,工学博士,研究生导师,主要研究方向为数值模型及工程应用

收稿日期: 2024-11-27

引用格式: 邹书琴,董勤喜,贾伟,等.基于可压缩两相流模型的薄壁构件注塑充填模拟[J].工程塑料应用,2025,53(2):92-99.

ZOU Shuqin, DONG Qinxu, JIA Wei, et al. Injection molding filling simulation of thin-walled components based on a compressible two-phase flow model[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 92-99.

塑料制品具有质量轻、受力性能好、加工成型过程易于自动化等优点,被广泛应用于各行业,其市场占比也远大于其他材料制品^[1]。塑料的成型方法主要有挤出成型、吹塑成型和注塑成型^[2]。充填阶段是注塑成型的关键阶段,其数值模拟计算结果对预测产品性能和工艺缺陷具有重要的指导意义^[3]。

薄壁构件一般指厚度方向尺寸为长、宽方向尺寸的十分之一及以下的构件。随着塑料产品向更轻薄方向的发展,很多塑料制件的厚度从原来的5~10 mm减小到1~3 mm,甚至更小^[4]。部分学者针对薄壁构件的注射成型,开展了相关研究。Nian等^[5]针对薄壁构件注塑中易出现的翘曲问题,提出了一种模具温度的设置方法,有效地减少了制件的翘曲情况。Lucchetta等^[6]研究了不同工艺参数和氧化铝、类金刚石碳、氧化硅3种模具涂层在使用聚苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二酯(PET)两种材料注塑充填时的影响,结果表明,所有涂层都能有效降低使用PET充填时的型腔压力,高达8%,只有氧化铝能有效降低使用PS充填时的型腔压力,达到3%。Zhang等^[7]利用多参数耦合的分析方法,研究了模具的结构参数和注塑工艺参数对薄壁构件变形的影响,探索零件变形的关键因素,结果表明,影响塑料零件变形的最重要因素是填充压力。Kwon等^[8]通过数值模拟研究了薄壁构件注塑过程中的压力、残余应力和翘曲力变化情况,并测量构件的双折射,与数值模拟得到的残余应力结果进行比较。Feng等^[9]将塑料薄壁汽车空调通风口在注塑过程中出现的缺陷分为翘曲、伸缩、焊线3个主要缺陷,开发了一套多目标优化设计系统,加速优化过程,并采用混合多目标RBF-MOGA优化方法,寻找3种缺陷同步减小的最优参数点。Huang等^[10]使用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)和聚碳酸酯(PC)材料,在不同注塑速度、注塑压力、模具温度、填充时间、熔体温度条件下,研究了不同工艺参数对注塑成型的薄壁零件翘曲的影响,通过测量构件的翘曲度,得出影响最大的工艺参数是注塑充填时间。尽管薄壁构件在注塑充填模拟领域已取得诸多成果,但现有的研究大多针对薄壁构件的注塑工艺进行优化,而对于薄壁构件数值模拟存在的问题,尤其是对于薄壁构件网格划分的针对性研究较少。

在注塑模拟中,薄壁构件的网格划分存在一定

难度。若厚度方向上的网格层数较少,就难以正确模拟充填过程中,相关物理量在厚度方向的变化情况。但划分网格层数过多时,考虑到数值模拟对网格长、宽比的限制,厚度方向的网格尺寸会限制长、宽方向上的网格尺寸,进而导致网格总量过多,严重影响计算效率。另外,薄壁构件在进行注塑成型模拟时,更容易出现数值误差,模型的网格对模拟结果至关重要。网格划分标准可以提供快速划分网格的参考依据,提高划分网格效率和网格质量,而已有的研究缺少对薄壁构件网格划分标准的探索。因此,有必要开展进一步研究。

笔者基于可压缩两相流模型^[11],开展对薄壁构件的注塑充填模拟研究。选取厚度方向尺寸均小于长、宽方向二十分之一的典型薄壁构件,划分不同尺寸的网格,得出薄壁构件的网格划分标准,研究薄壁构件充填过程中各物理量的分布规律,并与已有研究进行对比,验证笔者提出的薄壁构件网格划分标准的可行性。

1 模型介绍

1.1 控制方程

注塑充填过程是非牛顿流体在型腔内的流变过程,将熔体视为连续性介质,以三大守恒定理为基础,结合熔体的材料特性模型来模拟注塑充填过程中的物理变化^[12]。充填模拟考虑熔体可压缩性,忽略重力加速度 g 的影响,并忽略模具的弹性。基于上述假定,流体的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程的表达式分别见式(1)~式(3)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot \sigma \quad (2)$$

$$C_p \left[\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u T) \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

$$+ \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + \nabla \cdot p u + \sigma : \nabla u$$

式中: ρ 为密度,单位为 kg/m^3 ; t 为时间,单位为 s ; ∇ 为散度; u 为速度,单位为 m/s ; T 为温度,单位为 K ; C_p 为比热容,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为导热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; β 为压缩系数; p 为压力,单位为 MPa ; σ 为黏性应力张量。

采用7参数Cross-WLF模型^[13]描述熔体黏度,公式见式(4)。

$$\eta(\gamma, T, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_0 \gamma}{\tau^*} \right]^{1-n}} \quad (4)$$

式中: $\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left[-\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right]$, 为零剪切黏度; η 为黏度; γ 为剪切速率; $T^* = D_2 + D_3$; n 为非牛顿指数; $D_1, D_2, D_3, A_1, A_2, \tau^*$ 为材料常数。

1.2 数值方法

采用有限体积法^[14]对数值模型进行离散。求解时, 压力作为模拟过程中需要求解的基本物理量, 没有独立的压力控制方程, 只能通过转换连续性方程为关于压力的控制方程来求解压力, 目前常用的耦合算法有压力隐式算子分割算法^[15](PISO算法)和半隐式压力耦合方法^[16](SIMPLE算法)。其中, PISO算法在求解速度-压力耦合方程时, 引入瞬时压力修正, 并考虑了速度修正, 通过PISO循环计算直到结果收敛, 具有数值解精度高、收敛速度快等优点。故采用PISO算法求解压力-速度耦合方程, PISO算法流程图如图1所示。

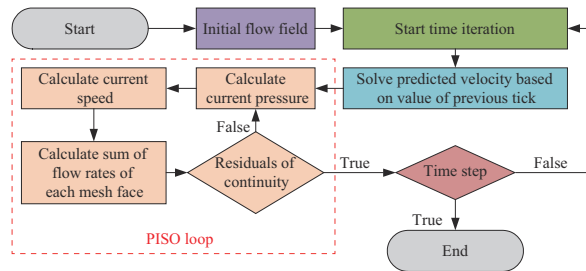


图1 PISO算法流程图

Fig. 1 Flowchart of PISO algorithm

计算模型的边界条件为: 模具浇口处速度与实际注塑速度相等, 温度采用第一类边界条件, 压力采用第二类边界条件; 模具壁面处的速度采用无滑移边界条件, 温度采用对流换热边界条件, 压力采用第二类边界条件。

1.3 自由面追踪方法

采用流体体积法(VOF)追踪熔体前沿, VOF方法^[17]通过求解质量守恒方程, 追踪流体与气体之间的界面, 利用离散单元中流体体积占据率, 判断两相之间界面的形状和位置。流体体积分数定义为每一相流体体积占据网格体积的百分数, 取值为0~1, 流体体积分数的相传输方程^[18]表达式见式(5)。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) + \nabla \cdot [\alpha(1 - \alpha)u_c] = 0 \quad (5)$$

式中: α 为体积分数; u_c 为压缩速度, 单位为 m/

s, 大小取决于计算区域内的最大速度。

$$\rho_m = \alpha \rho_a + (1 - \alpha) \rho_0 \quad (6)$$

$$\eta_m = \alpha \eta_a + (1 - \alpha) \eta_0 \quad (7)$$

式中: ρ_m 为熔体密度, ρ_a 为气体密度, ρ_0 为界面的混合密度, 单位为 kg/m^3 ; η_m 为熔体黏度, η_a 为气体黏度, η_0 为界面的混合黏度, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2 数值计算

2.1 等厚薄壁构件充填模拟

等厚薄壁构件几何示意图如图2所示, x 轴为长度方向, y 轴为宽度方向, z 轴为厚度方向, 其长度为120 mm, 宽度为40 mm, 厚度为1.73 mm, 浇口大小为4 mm×1.73 mm, 位置如图2所示, 模型尺寸与论文一致^[19]。

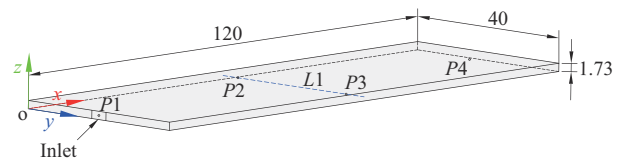


图2 等厚薄壁构件的几何模型

Fig. 2 Geometric modeling of equal-thickness thin-walled component

为便于分析不同位置熔体物理量的变化, 在平板型腔上取不同位置的4个点($P1 \sim P4$), 其中点 $P2$, $P3$ 为对称点, 各点在型腔上的位置见图2, 4个点坐标见表1。

表1 等厚薄壁构件不同点的坐标

Tab. 1 Coordinates of different points of equal-thickness thin walled component

Points	x/mm	y/mm	z/mm
$P1$	0	20	0.865
$P2$	60	5	0.865
$P3$	60	35	0.865
$P4$	115	20	0.865

2.1.1 网格尺寸对模拟结果的影响研究

此算例使用材料为聚丙烯(PP), 具体型号为KMT6100, 制造商为壳牌(中国)有限公司。材料的密度为890 kg/m^3 , 比热容为2 740 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, Cross-WLF黏度模型的七个参数分别为 $n=0.275$, $\tau^*=24\ 200$ Pa, $D_1=4.66 \times 10^{12}$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$, $D_2=263.15$ K, $D_3=0$ K/Pa, $A_1=26.12$, $A_2=51.6$ K。浇口处熔体填充速率为 3×10^4 mm^3/s , 浇口处熔体温度为210 $^{\circ}\text{C}$, 壁面初始温度40 $^{\circ}\text{C}$, 模拟总时间为0.276 s。

对此等厚薄壁模型划分了7种不同层数的网格, 分别命名为M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, 网格参数详见表2, 其中, M5网格示意图见图3。

表2 网格参数

Tab. 2 Grid parameters

Name	Number	Size/mm	Layers
M1	43 056	0.576 6	3
M2	103 044	0.432 5	4
M3	193 795	0.346 0	5
M4	342 792	0.288 3	6
M5	551 124	0.247 1	7
M6	793 520	0.216 3	8
M7	1 173 744	0.192 2	9

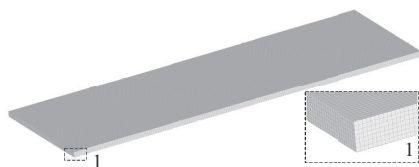


图3 等厚薄壁构件网格示意图

Fig. 3 Mesh schematic for equal-thickness thin-walled component

取直线 $L1(x=60\text{ mm}, z=0.865\text{ mm})$, 比较在不同网格条件下模拟计算时, 直线 $L1$ 上的熔体温度大小, 如图4所示。从图4可以看出, 在采用M1, M2, M3, M4网格时, 温度计算不准确。当薄壁构件厚度方向上的网格数量为至少7层时, M5, M6, M7种网格的温度分布曲线几乎重合, 可认为当网格数量达到M5时温度的计算已与网格大小无关, 证明了M5网格对温度的收敛性良好。厚度上网格层数为7层、8层、9层的温度曲线趋于重合, 可知薄壁构件厚度上网格层数达到7层时, 能够对温度进行较好的计算。

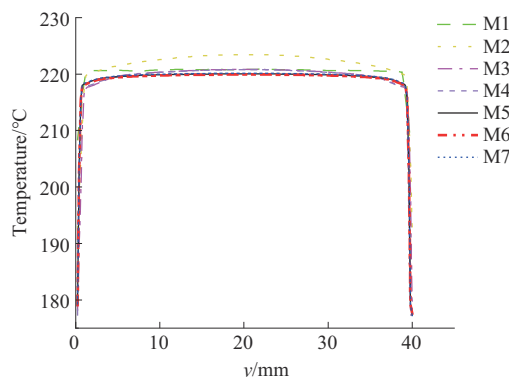


图4 不同网格条件下直线L1上的温度分布曲线

Fig. 4 Temperature distribution curves on straight line $L1$ under different grid conditions

取截面 $x=60\text{ mm}$, 分析在不同网格条件下模型计算的温度分布情况, 如图5所示。从图5可以看出, 截面上温度分布均匀, 温度在壁面附近较低, 型腔中心位置较大。当网格数量达到M5及以上时, 截面上温度分布几乎相同, 可知当网格在厚度上达

到至少7层时, 能够对温度进行较好计算。

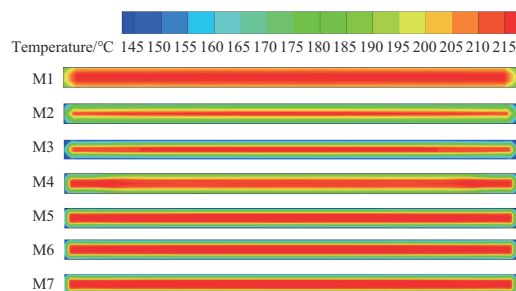


图5 温度随网格层数变化的分布情况

Fig. 5 Distribution of temperature as a function of number of grid layers

取直线 $L1(x=60\text{ mm}, z=0.865\text{ mm})$, 比较在不同网格条件下模拟计算时, 直线 $L1$ 上的熔体速度大小, 如图6所示。从图6可以看出, 在采用M1, M2, M3, M4网格时, 速度计算不准确, 甚至出现边缘速度大、中间速度小的不合理情况。当网格数量增加到M5数量级及以上时, 即薄壁构件厚度方向上的网格数量至少为7层时, M5, M6, M7种网格的速度分布曲线几乎重合, 可认为当网格数量达到M5网格数量时速度的计算已与网格大小无关, 证明了网格收敛性。为了保证计算效率, 采用M5网格进行计算。

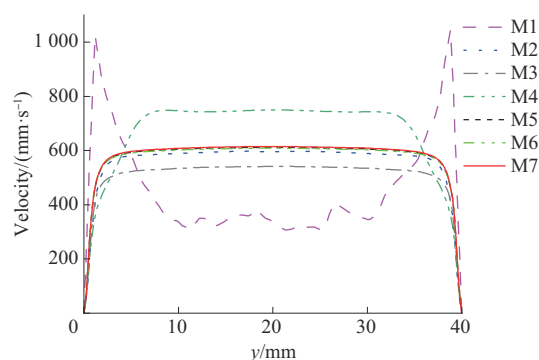


图6 不同网格条件下直线L1上的速度分布曲线

Fig. 6 Velocity distribution curves on straight line $L1$ under different grid conditions

取截面 $x=60\text{ mm}$, 在不同网格下的速度云图结果如图7所示。从图7可以看出, 速度云图在网格层数达到至少7层时结果几乎一致, M5, M6, M7种网格的速度计算结果分布均匀, 均呈型腔中心速度较大, 壁面附近速度较小的状态, 符合注塑速度的一般规律, 并与论文^[11]得到的充填模拟结果类似, 因此模型厚度方向上的网格达到7层时, 能够较好地计算熔体在型腔内的充填速度。

等厚薄壁构件在不同网格下模拟时的温度、速

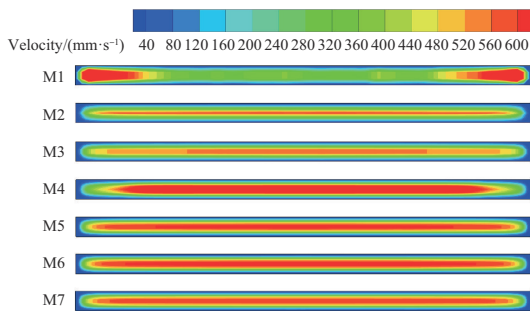


图7 不同网格的速度云图

Fig. 7 Velocity clouds map at different grids

度结果表明在网格达到7层时,计算结果与网格大小无关。当厚度上网格达到7层时,进一步增加网格层数对计算结果影响较小,所以采用M5网格对等厚薄壁构件进行充填模拟,分析其充填结果。

2.1.2 充填模拟结果分析

在M5网格条件下,使用三维可压缩模型对此等厚薄壁构件进行充填模拟计算,模拟总时间为0.276 s,几何尺寸、材料参数和充填参数均与论文[19]一致。

根据该模型的数值计算结果,首先分析了熔体的前沿状态,如图8所示。从图8可以看出,熔体充填时间 t 达到0.06,0.08,0.10,0.16,0.20,0.23 s时的前沿状态与文献[19]中的实验结果和数值模拟结果基本吻合。由于壁面温度较低,当高温熔体到达低温壁面时,温度会有所降低,导致壁面处熔体流动速度低于型腔对称轴附近熔体的速度,出现壁面周

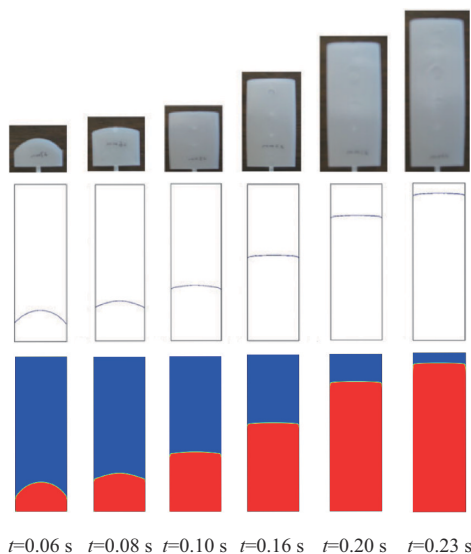


图8 熔体前沿位置对比图(上:实验结果;中:文献模拟结果;下:本文模拟结果)

Fig. 8 Comparison diagram of melt front positions
(top: experimental results; middle: simulation results of literature;
bottom: simulation results in this paper)

围熔体流动慢的情况,因此熔体前沿界面先由半圆弧状向周围扩展运动后到达型腔壁面,随着充填时间的推移,熔体前沿不断向前运动,充填过程逐渐进入比较平稳的扩展流状态,随后熔体将以扩展流状态继续向前推进,直至熔体填满整个型腔。

充填结束时,型腔内的压力云图见图9。从图9可以看出,当充填结束时,靠近浇口处的压力值较高,这是由于随着充填长度的增加,熔体的黏性阻力逐渐变大,导致浇口处的压力增大;距离浇口越远,压力越小,在离浇口最远的型腔末端压力最小,且型腔内部的压力沿着平板对称轴对称分布,这与文献[20]得出的结论吻合。

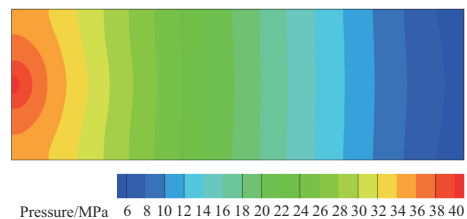


图9 充填结束时的压力云图

Fig. 9 Pressure cloud map at end of filling

沿 $y=20$ mm截面,取5个时间点的压力变化云图如图10所示。由图10可知,压力在厚度方向上分布均匀,同一位置压力随充填时间的增加而增大。同时,取 $P1, P2, P3, P4$ (见图2)4个点,绘制4个点的压力随时间变化图,如图11所示。由图11可以看出,压力随着充填时间的增加而增大,当充填结束时达到最大。其中,对称点 $P2, P3$ 的压力随时间变化的曲线几乎重合,说明关于 y 方向轴对称的点压力变化基本一致。

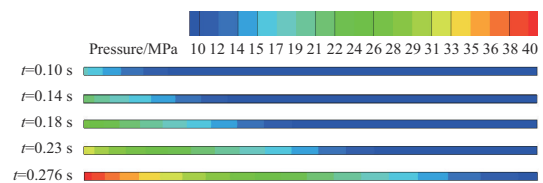


图10 等厚薄壁构件不同时刻厚度上的压力分布

Fig. 10 Pressure distribution over thickness of an equal-thickness thin-walled component at different moments in time

从等厚薄壁构件的模拟结果可以看出,当薄壁构件在厚度上的网格层数不少于7层时,能够较为准确地计算型腔内熔体的温度、速度和压力等物理量,也可以较为准确地模拟出薄壁构件内熔体前沿的流动状态。这一结论可为薄壁构件注塑充填模拟的网格划分提供基本依据。

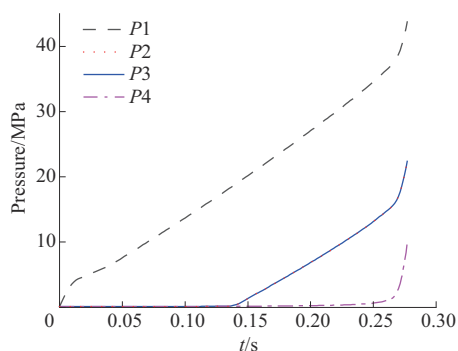


图11 等厚薄壁构件内各点压力随时间变化图

Fig. 11 Pressure versus time graph at four points of an equal-thickness thin-walled component

2.2 不等厚薄壁构件充填模拟

不等厚薄壁构件的几何模型尺寸如图12所示。坐标原点在模型对称轴上, x 轴为长度方向, y 轴为宽度方向, z 轴为厚度方向。型腔总长度为342 mm,宽度为80 mm,从 $x=35$ mm到 $x=39.5$ mm,其厚度由2 mm减小为1 mm,从 $x=39.5$ mm到 $x=42$ mm,其厚度由1 mm增大到2 mm,其余位置厚度均为2 mm。浇口为圆形浇口,浇口位置如图12所示。

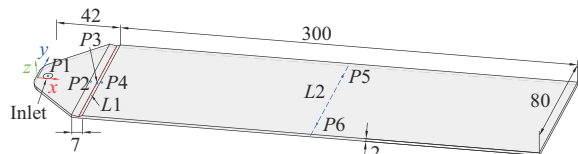


图12 不等厚薄壁构件的几何模型

Fig. 12 Geometric model of unequal thickness thin-walled component

为研究不同位置点的压力随时间的变化,在模型上选取了6个点,其中 $P5$ 和 $P6$ 为对称点,各点在型腔上的位置见图12,6个点的坐标见表3。

表3 不等厚薄壁模型内的不同点坐标

Tab. 3 Coordinates of different points within unequal thickness thin wall model

Points	x/mm	y/mm	z/mm
$P1$	7	0	2
$P2$	35	0	1
$P3$	39.5	0	0.5
$P4$	42	0	1
$P5$	192	30	1
$P6$	192	-30	1

此算例使用材料为增强型聚酰胺(PA),牌号为PA66-GF3,制造商为南京聚隆科技股份有限公司,材料密度 $1\,171.5\text{ kg/m}^3$,比热容 $2\,124\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,材料的Cross-WLF黏度模型的七个参数分别为: $n=0.287\,9$, $\tau^*=336\,287\text{ Pa}$, $D_1=2.776\,13\times 10^{10}\text{ Pa}\cdot\text{s}$, $D_2=323.15\text{ K}$, $D_3=0\text{ K/Pa}$, $A_1=47.315$, $A_2=51.6\text{ K}$ 。浇口处熔体填充

速率为 $3.48\times 10^2\text{ mm}^3/\text{s}$,浇口处熔体温度为 $290\text{ }^\circ\text{C}$,壁面初始温度 $85\text{ }^\circ\text{C}$,充填总时间为 1.505 s ,与文献[21]一致。

根据上文研究结果,对此不等厚薄壁构件划分网格,厚度方向上的网格层数为7层,网格尺寸为 $0.285\,7\text{ mm}$,网格总数为 $2\,262\,498$ 个,网格示意图见图13。



图13 不等厚薄壁构件体的网格示意图

Fig. 13 Mesh schematic for unequal thickness thin-walled component

首先取与文献[21]一致的五個充填时间点,作充填时间 $t=0.035, 0.188, 0.439, 0.941, 1.380\text{ s}$ 时的熔体前沿位置图,如图14所示。由图14可以看出,在充填过程中,随着浇口处熔体的注入,熔体前沿界面先是呈半圆弧状从入口向壁面扩散,随后向前延伸进入平稳的扩展状态,直至充填完成。熔体前沿状态与文献[21]中使用Moldflow软件的模拟结果基本一致,符合前沿流动的一般规律,验证了本文模拟计算对熔体前沿追踪的有效性。

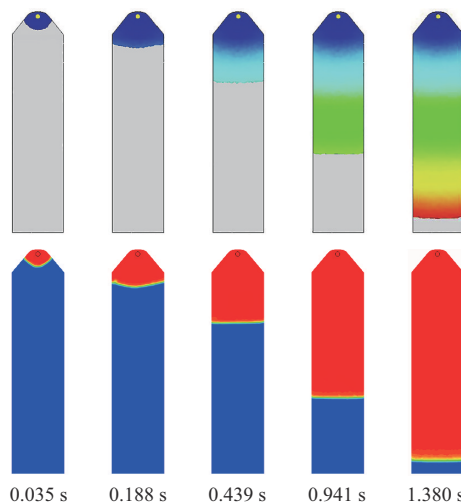
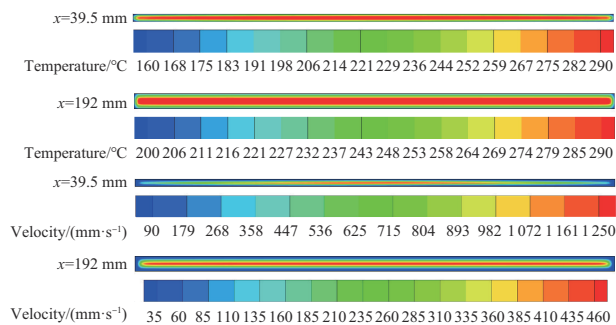


图14 不同时刻熔体前沿位置(上:文献模拟结果;下:本文模拟结果)

Fig. 14 Position of melt front at different moments (top: simulation results of literature; bottom: simulation results in this paper)

取截面 $x=39.5\text{ mm}$, $x=192\text{ mm}$,分析在7层网格条件下计算的温度和速度分布情况,如图15所示。从图15可以看出,温度和速度计算结果光滑、无振荡,且关于轴线对称,说明充填模拟结果较为稳定。在厚度方向上,靠近壁面处的温度和速度较低,而靠近中心处温度和速度较高。

图15 $x=39.5$ mm, $x=192$ mm 截面上的温度和速度分布Fig. 15 Temperature and velocity distribution on $x=39.5$ mm, $x=192$ mm cross section

充填结束时,型腔内部压力如图16所示。由图16可以看出,充填结束时,浇口周围压力最大,距离浇口位置越远,压力越小,压力分布关于型腔对称轴对称,与文献[22]得到的结果一致,验证了本文模拟计算对压力求解的稳定性。

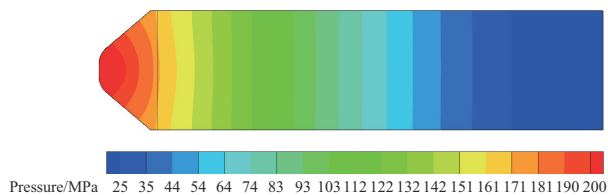


图16 不等厚薄壁构件充填结束时的压力分布

Fig. 16 Pressure distribution at end of filling of thin-walled component of unequal thicknesses

沿 $y=0$ mm 截面,取6个时间点的压力变化云图,如图17所示,压力在厚度方向上分布均匀,同一位置压力随充填时间的增加而增大。浇口处压力最大,距离浇口越远,压力越小,任意位置压力均在充填结束时达到最大。

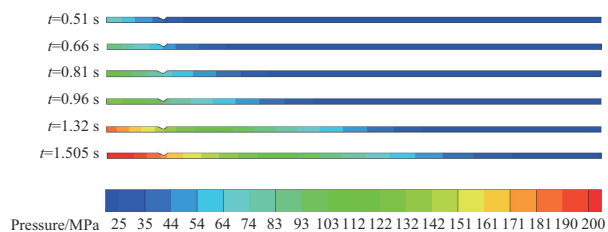


图17 不等厚薄壁构件不同时刻厚度上的压力分布

Fig. 17 Pressure distribution over thickness of a thin-walled component of unequal thickness at different moments in time

选取 $P1, P2, P3, P4, P5, P6$ (位置见图12) 等6个点,压力随时间变化曲线如图18所示。从图18可以看出,6个点的压力随时间总体呈增大趋势,在充填完成时各个点压力均达到最大值,对称点 $P5$ 和 $P6$ 的压力随时间的变化曲线几乎重合,说明型腔内对称点的压力变化一致。

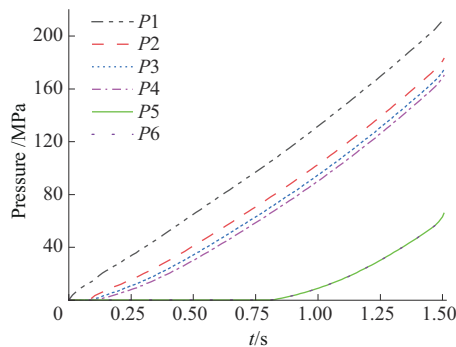


图18 不等厚薄壁构件不同位置处的压力随时间变化曲线

Fig. 18 Pressure variation curves with time at different position points of unequal thickness thin-walled component

通过以上对不等厚薄壁构件的计算结果,进一步验证了对薄壁构件的填充过程进行模拟时,当网格在厚度方向上划分至少7层时,能够准确模拟出熔体前沿的流动状态,也可以较好地计算型腔内部的温度、压力、速度等物理量。

3 结论

(1)对等厚薄壁构件划分不同尺寸的网格,结果发现当薄壁构件在厚度上的网格层数至少为7层时,能够对注塑过程进行准确模拟,且计算结果与文献结果一致。这一结论为薄壁构件的注塑模拟提供了网格划分的基本依据。

(2)分别对等厚薄壁构件和不等厚薄壁构件厚度上划分7层网格,进行了充填模拟,从计算结果可以看出,基于可压缩两相流数值模型,对薄壁构件注塑充填过程的熔体前沿界面进行了有效追踪,与已有的实验结果和商业软件 Moldflow 模拟结果吻合。

(3)在填充过程中,薄壁构件型腔内的物理量分布存在一定特征。不同位置处的压力均随充填时间的增加而增大,在充填结束时达到该点的最大值。在充填结束时,浇口附近处的压力较大,沿对称轴呈对称分布,且在厚度方向上分布均匀。而速度在厚度方向上分布不均,通常在壁面附近速度较小,在型腔中心位置速度较大。

参考文献

- [1] 唐杰,黄荣学,王全亮,等. 基于Moldflow汽车灯罩翘曲分析与优化[J]. 塑料,2020,49(6):137-142.
TANG Jie, HUANG Rongxue, WANG Quanliang, et al. Warpage analysis and optimization of automotive lampshade based on moldflow[J]. Plastics, 2020, 49(6):137-142.
- [2] 中国机械工程学会. 中国模具设计大典:第2卷 轻工模具设计[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2003.
Chinese Mechanical Engineering Society. China mold design

- dictionary: volume 2 light industrial mold design[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2003.
- [3] 尚雪梅, 门静, 韩海燕, 等. 手机壳注塑成型模流分析及工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5):75–80.
- SHANG Xuemei, MEN Jing, HAN Haiyan, et al. Moldflow analysis and process optimization of mobile phone case injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5):75–80.
- [4] CHIANG K T. The optimal process conditions of an injection-molded thermoplastic part with a thin shell feature using grey-fuzzy logic: A case study on machining the PC/ABS cell phone shell[J]. Materials & Design, 2007, 28(6):1 851–1 860.
- [5] NIAN S, WU C, HUANG M. Warpage control of thin-walled injection molding using local mold temperatures[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 61:102–110.
- [6] LUCCHETTA G, MASATO D, SORGATO M, et al. Effects of different mould coatings on polymer filling flow in thin-wall injection moulding[J]. Cirp Annals-manufacturing Technology, 2016, 65:537–540.
- [7] ZHANG J, YIN X Q, LIU F, et al. The simulation of the warpage rule of the thin-walled part of polypropylene composite based on the coupling effect of mold deformation and injection molding process[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2018, 25:593–601.
- [8] KWON Y I, SONG Y S. Application of injection-compression molding to thin-walled polymeric parts[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2018, 30:161–167.
- [9] FENG Q, ZHOU X. Automated and robust multi-objective optimal design of thin-walled product injection process based on hybrid RBF-MOGA[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 101:2 217–2 231.
- [10] HUANG Y, HUANG C F, PENG B, et al. Experimental and numerical study determining the warpage phenomenon of thin-wall injection molding[J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020:1–13.
- [11] 王振海, 贾伟, 董勤喜, 等. 基于可压缩两相流模型的注射成型填充模拟[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(2):66–74.
- WANG Zhenhai, JIA Wei, DONG Qinxi, et al. Injection molding filling simulation based on a compressible two-phase flow model[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(2):66–74.
- [12] YANG B, TANG Q, WANG S, et al. Three-dimensional numerical simulation of the filling stage in resin infusion process[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(29):4 171–4 186.
- [13] PEYDRO M A, PARRES F, CRESPO J E, et al. Study of rheological behavior during the recovery process of high impact polystyrene using cross-WLF model[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120:2 400–2 410.
- [14] PETRILA T, TRIF D. Basics of fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics[M]. New York:Springer US, 2006.
- [15] XUE Y, LIU W, ZHAI Z. New semi-Lagrangian-based PISO method for fast and accurate indoor environment modeling[J]. Building and Environment, 2016, 105:236–244.
- [16] HADI A, MOHAMMED R J, JAWAD Q, et al. Simulation of flow around circular cylinders for complex von kármán vortex street phenomenon using SIMPLE, SIMPLEC and PISO[J]. Basrah Journal for Engineering Science, 2024, 24(2):43–49.
- [17] SO K K, HU X Y, ADAMS N.A. Anti-diffusion method for interface steepening in two-phase incompressible flow[J]. Journal of Computational Physics, 2011, 230:5 155–5 177.
- [18] ZHU G, ZHANG L, YAO J. Energy capillary number reveals regime transition of imbibition in porous media[J]. Physics of Fluids, 2021, 33:123111.
- [19] ZHOU J, TURNG L S. Three-dimensional numerical simulation of injection mold filling with a finite-volume method and parallel computing[J]. Advances in Polymer Technology, 2010, 25(4): 247–258.
- [20] YANG B, OUYANG J, ZHENG S, et al. Simulation of polymer molding filling process with an adaptive weld line capturing algorithm[J]. International Journal of Material Forming, 2012, 5(1): 25–37.
- [21] ISAINCU A, DAN M, UNGUREANU V, et al. Numerical investigation on the influence of fiber orientation mapping procedure to the mechanical response of short-fiber reinforced composites using Moldflow, Digimat and Ansys software[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45:4 304–4 309.
- [22] 庄昕. 三维粘弹性熔体注塑成型充填和保压过程的数值模拟研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.
- ZHUANG Xin. Numerical simulation of three-dimensional viscoelastic melt filling and packing processes in injection molding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.