

基于CUDA的挤压铸造SPH两相流建模与仿真

张英姿¹ 牛晓峰^{1,2} 李文琪¹ 姚佳业¹ 胡慧瑾¹

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学镁基材料山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要 为了实现挤压铸造充型过程中两相流的流动场模拟, 采用多相光滑粒子流体动力学(SPH)方法对金属液以及型腔内空气进行建模, 并提出用于流体计算的统一计算设备架构(CUDA)并行算法。针对金属液与空气两相界面不连续的问题, 基于多相SPH基本原理在控制方程中加入扩散项, 并引入多相密度正则化和动态边界条件, 提高模拟大密度比两相流的稳定性和准确性。在此基础上, 引入了粒子位移技术, 用于消除流体流态剧烈变化导致的粒子堆积。为了克服SPH计算高消耗的问题, 采用基于CUDA架构的SPH两相流算法实现了数据并行计算。结果表明, 所提出的SPH两相流模型能够绘制不同工艺条件下金属液与空气流动以及卷气的动态效果, 对充型缺陷进行精准预测, 同时大大提高了计算效率。

关键词 挤压铸造; CUDA; 光滑粒子流体动力学; 多相流; 数值模拟

中图分类号 TG249.2; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250018

Squeeze Casting SPH Two-phase Flow Modeling and Simulation Based on CUDA

ZHANG Yingzi¹, NIU Xiaofeng^{1,2}, LI Wenqi¹, YAO Jiaye¹, HU Huijin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024; 2. Shanxi Key Laboratory of Magnesium-based Materials, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: The liquid metal and air in the cavity was modeled by multiphase smoothed particle hydrodynamics (SPH) method to simulate the flow field of two-phase flow during the filling process of squeeze casting, and a compute unified device architecture (CUDA) parallel algorithm for fluid calculation was proposed. Aiming at the problems of discontinuous interface between liquid metal and air, diffusion term was added to the governing equation based on the basic principle of multiphase SPH, and the multiphase density regularization as well as dynamic boundary conditions were introduced to improve the stability and accuracy of simulating two-phase flow with large density ratio. On this basis, particle displacement technique was introduced to eliminate the particle accumulation caused by drastic change of fluid flow. In order to overcome the high consumption of SPH calculation, SPH two-phase flow algorithm based on CUDA architecture was utilized to realize data parallel computing. The results indicate that the proposed SPH two-phase flow model can plot the flow of liquid metal and air under different process conditions and dynamic effect of air entrapment defect to predict the filling defects accurately. Meanwhile, the computational efficiency is greatly improved.

Key Words: Squeeze Casting, CUDA, Smoothed Particle Hydrodynamics, Multiphase Flow, Numerical Simulation

挤压铸造是一种用于生产近净形、尺寸精密以及形状复杂金属零件的制造工艺^[1], 压射充型是挤压铸件成形最关键的流程之一, 易出现浇不足、卷气等缺陷^[2]。利用计算机辅助工程进行挤压铸造充型过程数值模拟, 能够预测挤压铸造的充型质量, 从而帮助优化模具设计以及工艺参数^[3-4]。

挤压铸造充型过程仿真目前大多基于金属液单相流体的计算, 忽略了空气对金属液的影响。虽然在一定程度上能够反映充型过程中金属液的流动轨迹, 确

定流体的速度分布特征^[5], 但都与真实的流体流动存在差距, 也无法准确预测出卷气缺陷的位置以及形成过程。因此, 考虑空气对挤压铸造充型过程的影响, 进行了挤压铸造两相流的建模与仿真。挤压铸造过程中金属液和空气都是具有大变形的物理实体, 对于变形量较大的流体仿真一直是计算流体动力学的热点。流体计算方法主要以Navier-Stokes(N-S)方程为基础^[6], 分为欧拉法和拉格朗日法。其中欧拉法基于网格进行计算, 拉格朗日法则基于粒子进行计算, 后者更加适合大

收稿日期: 2025-01-09; 修订日期: 2025-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474418)、中央引导地方科技发展基金资助项目(YDZJSX2022A012)

第一作者简介: 张英姿, 女, 2000年出生, 硕士研究生, E-mail: zyz170187@163.com

通信作者: 牛晓峰, 男, 1982年出生, 教授, E-mail: niuxiaofeng@tyut.edu.cn

引用格式: 张英姿, 牛晓峰, 李文琪, 等. 基于CUDA的挤压铸造SPH两相流建模与仿真[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(11): 1664-1672.

ZHANG Y Z, NIU X F, LI W Q, et al. Squeeze casting SPH two-phase flow modeling and simulation based on CUDA[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(11): 1664-1672.

规模的流体仿真,模拟效果也更接近真实流体。

SPH方法作为一种典型的无网格拉格朗日法,在众多计算流体动力学方法中,具有更高的稳定性以及计算效率,因此更加适用于模拟挤压铸造充型过程中气、液两相的流动^[7]。由于金属液与空气的密度比大,使用常规SPH方法进行计算时,动量方程的计算结果会发生改变,压力场也会从均匀变成不均匀,甚至导致界面处相邻粒子处的压力值被过度放大,产生仿真错误^[8]。HAMMANI I等^[9]在GRENIER N等^[10]提出的多相SPH模型中加入了数值扩散项,来消除数值噪声。COLAGROSSI A等^[8]采用最小二乘法进行插值,不断进行密度的重新初始化。CHEN Z等^[11]采用界面压力修正以及粒子体积的连续性假设,平滑了界面处的密度场,并使用截断模型来避免负压的出现。因此,通过在常规SPH算法中加入稳定多相流的关键技术,就可以消除由于界面不连续性带来的失稳,实现挤压铸造过程中大密度比两相流的仿真。

SPH的计算依赖于计算域上离散的大量粒子,迭代计算过程中需要消耗大量的计算资源^[12]。对于大尺度模型的仿真,如果单纯使用CPU进行处理,计算速度会非常缓慢,致使SPH在计算效率方面远低于其他数值计算方法。随着图形处理器的发展,GPU不仅可以进行图像渲染,而且逐渐成为通用的计算工具。HÉRAULT A等^[13]首次使用CUDA在GPU上实现了SPH计算,与基于CPU的算法相比具有更高的计算效率,此后GPU的计算能力迅速普及并不断发展。

本研究依据多相SPH的基本原理,对SPH算法进行改进,实现了挤压铸造大密度比两相流的数值模拟。分析对比不同充型速度下的流动场,实现挤压铸造充型过程的缺陷预测。为了提高SPH算法的计算效率,建立基于CUDA架构的SPH算法,旨在为相关研究提供参考。

1 基于CUDA的SPH两相流建模

1.1 SPH两相流模型

1.1.1 控制方程

SPH模拟流体运动的基本思想是将连续的问题域拆分成一系列任意分布的粒子,引入光滑核函数对影响域进行积分插值,从而计算得到位置、速度等场变量。挤压铸造过程中两相流体控制方程的拉格朗日形式为:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} + \Phi \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{F}^u + \mathbf{g} \quad (2)$$

式中, ρ 为密度; t 为仿真时间; $\mathbf{v}$ 为速度矢量; Φ 为密度耗散项; P 为压力; $\mathbf{F}^u$ 为黏性力; $\mathbf{g}$ 为体力,本研究仅包含重力; ∇ 为场变量的梯度。

本研究假设金属液及空气均为弱可压缩流体,因此引入弱可压缩SPH(WCSPH)方案中的状态方程^[14]:

$$P = c_0^2(\rho - \rho_0) + P_0 \quad (3)$$

式中, c_0 为数值声速,用来控制压缩性; ρ_0 为参考密度; P_0 为背景压力,用来避免压力负值出现^[11],选择背景压力值为100 Pa。

SPH方法的核心步骤包括:借助光滑核函数以积分的方式近似场函数,称为核近似;然后用相邻粒子上值的加权总和来表示粒子的场变量,称为粒子近似。为了消除界面处数值的发散,在计算位于界面处的粒子时,将中心粒子的异相相邻粒子转换为同相^[11]。式(1)和式(2)经过核近似、粒子近似以及相转换后表示为:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = -\rho_a \sum_{b=1}^N V_b (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) + \Phi_a \quad (4)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\frac{1}{\rho_a} \sum_{b=1}^N V_b (\rho_b + \rho_a \Pi_{ab}) \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) + \mathbf{F}^u + \mathbf{g} \quad (5)$$

式中,下标 a 为目标中心粒子;下标 b 为粒子 a 支持域内相邻粒子。对于三维计算来说支持域是一个以粒子 a 为中心,以 κh 为半径的球体,见图1。在球形体积范围内的粒子均为粒子 a 的相邻粒子, κ 为一个标量常数, h 为光滑长度。 ρ_a 为中心粒子 a 的密度; N 为支持域内相邻粒子数的总和; V_b 为粒子体积; $\mathbf{v}_a$ 和 $\mathbf{v}_b$ 分别为粒子 a 和粒子 b 的速度矢量; $W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)$ 为光滑核函数; $\mathbf{r}_a$ 和 $\mathbf{r}_b$ 分别为粒子 a 和粒子 b 的位置矢量; Φ_a 为粒子 a 的密度耗散项; P_b 为粒子 b 的压力; Π_{ab} 为人工黏度项。

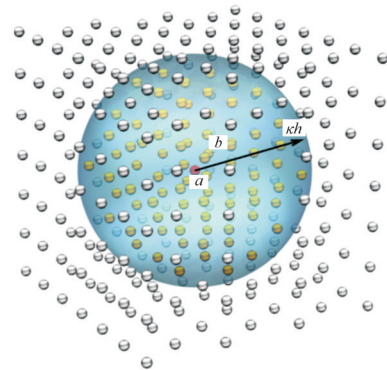


图1 三维模型中心粒子的支持域及其相邻粒子

Fig.1 Support domain and neighbor particles of central particles in 3D model

控制方程中 Φ_a 和 Π_{ab} 分别为连续性方程与动量方程的扩散项,能够很好地稳定压力场,分别表示为^[14-15]:

$$\Phi_a = 2\lambda c_0 h \sum_{b=1}^N \psi \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) V_b \quad (6)$$

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} -\alpha c_0 \gamma_{ab} & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) < 0 \\ 0 & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\psi = (\delta\rho_a - \delta\rho_b) \frac{\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b|^2} \quad (8)$$

$$\delta\rho = \rho - \rho_0 = \frac{P - P_0}{c_0^2} \quad (9)$$

$$\gamma_{ab} = \frac{h(\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b|^2 + \eta^2} \quad (10)$$

式中, λ 为控制参数, 选择推荐值 0.1 来平衡稳定性; ψ 为密度扩散项的控制参数; α 为人工黏度系数; γ_{ab} 为人工黏度项的控制参数; $\delta\rho_a$ 和 $\delta\rho_b$ 分别为粒子 a 和粒子 b 的密度增量; η 被用于避免分母为 0, $\eta = 0.1h$ 。

考虑层流条件下, 式(5)右侧的粘性力表示为^[16]:

$$F^\mu = \nu_0 \nabla^2 \mathbf{v} = \sum_{b=1}^N \frac{2V_b \nu_b (\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)}{(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)^2 + \eta^2} (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \quad (11)$$

式中, ν_0 为粒子 a 处流体的运动黏度; ν_b 为粒子 b 的运动黏度。

1.1.2 提高稳定性的关键技术

使用 SPH 方法模拟类似于金属液与空气两相流时, 气液界面两侧的密度值不连续, 导致界面处的压力振荡^[17]。为解决该问题, 使用 CHEN Z 等^[11]提出的多相密度正则化。计算过程中, 每隔 20 个时间步长就所有的粒子更新一次密度为:

$$\rho_a^{\text{new}} = \frac{\sum_{b=1}^N \frac{m_b}{\rho_b} W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \rho'_b}{\sum_{b=1}^N \frac{m_b}{\rho_b} W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)} \quad (12)$$

$$\rho'_b = \frac{P_b - P_0}{c_0^2} + \rho_{a0} \quad (13)$$

式中, ρ_a^{new} 为更新后流体粒子的密度; m_b 和 ρ_b 分别为粒子 b 的质量和密度; ρ'_b 为修正后相邻粒子 b 的密度; P_b 为粒子 b 的压力; ρ_{a0} 为中心流体粒子的初始参考密度。

为了防止气液两相粒子穿透型腔边界, 需要在模型中施加固壁边界条件, 在 SPH 两相流模型中使用 LIU M B 等^[18]提出的动态边界条件。图 2 为动态边界示意图。固体边界粒子由内外 3 层固定粒子构成, 分别包括固体壁上的一层排斥边界粒子以及固体边界外的两层虚拟粒子, 3 层粒子均会对附近流体粒子施加软排斥力, 防止流体粒子穿透边界且不会对流体本身产生严重的压力干扰。3 层边界粒子的位置固定不变, 但是边界粒子同流体粒子一样储存该位置的场变量。排斥

边界粒子的场变量信息由插值支持域内流体粒子数据得出, 虚拟粒子的场变量信息则源自所有排斥粒子与流体粒子。

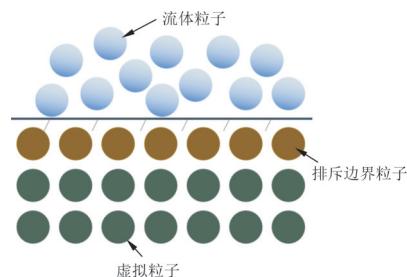


图2 动态边界示意图

Fig.2 Schematic diagram of dynamic boundary

在挤压铸造的高速充型阶段, 流体状态发生显著变化, 不再维持平稳、缓慢的层流形态, 而是转变为紊流。在此过程中, 流体粒子的运动轨迹变得复杂无序, 尤其在相界面附近会发生粒子的聚集或者空洞, 导致仿真失败。XU R 等^[19]基于菲克扩散定律提出了粒子位移技术(PST), 见图 3。该技术通过在每个时间步长内对所有粒子进行位移矫正来避免粒子的不均匀性, 矫正后的位置为:

$$\mathbf{r}_a^{\text{new}} = \mathbf{r}_a + \delta\mathbf{r}_a \quad (14)$$

$$\delta\mathbf{r}_a = -C_{FL} \cdot M_a \cdot 2h \cdot \sum_{b=1}^N \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) V_b \quad (15)$$

式中, $\mathbf{r}_a$, $\delta\mathbf{r}_a$ 和 $\mathbf{r}_a^{\text{new}}$ 分别为流体粒子的初始位置、位置增量以及校正后的位置; C_{FL} 为用于调节稳定性和收敛性的常数; M_a 为马赫数。

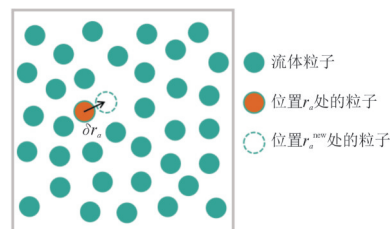


图3 粒子位移技术

Fig.3 Particle displacement technique

1.2 并行计算流程

使用 SPH 方法对挤压铸造充型过程进行数值模拟时, 程序计算的流体粒子数量直接影响仿真结果的精度。SPH 流体粒子越多, 所能反映出来的流态细节就越多, 仿真结果更接近真实情况。然而, 在使用基于 CPU 的 SPH 程序计算时发现, CPU 的计算资源消耗会随着处理粒子数的增多而显著增加, 计算速度相对缓慢。

图形处理单元(GPU)具有强大的并行计算能力, 且带有众多的流处理器^[20], 因此借助 GPU 并行计算的优势, 能够显著提高密集数据处理的效率。为了实

现GPU的通用计算功能,NVIDIA提供了一种全新架构CUDA,基于CUDA架构完成了SPH两相流模型算法的编写。图4为CUDA架构下GPU加速的SPH算法流程图。程序的运行分为CPU和GPU两个部分。其中,CPU部分主要负责读取粒子信息进行数据初始化、实现与GPU之间的数据交换以及计算机结果的输出。GPU部分主要负责核心计算,包括相邻粒子列表搜索、状态方程计算、粒子相互作用计算以及所有场变量的更新。

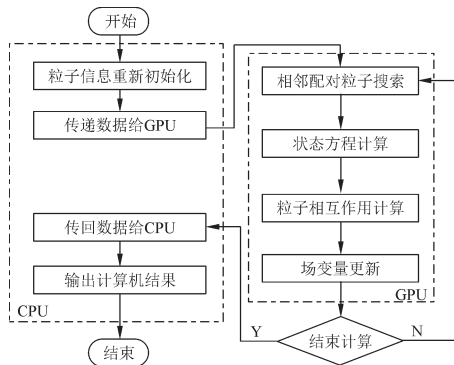


图4 CUDA架构下GPU加速的SPH算法流程图

Fig.4 Flow chart of GPU-accelerated SPH algorithm under CUDA architecture

CUDA通过调用核函数来实现GPU并行计算,并行计算时会调用最小的计算单元线程在GPU设备上执行。在CUDA架构中,并行处理有两种类型,分别是数据并行和任务并行^[21]。对于SPH方法来说,所有流体粒子均采用同样的计算流程完成场变量的更新,且所有粒子的计算并不会相互干扰,因此本研究采用数据并行算法,即每一个核函数都启用不同的线程并行计算,每一个线程承担一个粒子的计算,提高了SPH两相流程序的计算效率。

2 仿真结果及算法性能分析

使用SPH两相流模型对SCHMID M等^[22]提出的弓形件实例进行了数值模拟。首先,通过真空环境下弓形水动力模型的二维仿真结果与自主开发算法的三维仿真结果对比,验证了建立SPH两相流算法的准确性。随后对弓形挤压铸件两相流的充型缺陷进行预测分析:让金属液流体低速充入型腔,对SPH两相流模型的稳定性和有效性进行验证;增大充型速度,分析高速充型过程中气液两相流体的流动情况,对算法在流体流态剧烈变化情况下的稳定性进行验证,最后测试算法的加速效率。

2.1 模型及仿真参数设置

弓形件模型的挤压铸造系统见图5。整个系统由

模具、金属液、冲头以及充满空气的型腔4部分组成,型腔是一个具有连续直角弯的“弓”字形通道,对于验证流体流动特性具有显著优势。为了使空气粒子能够排出型腔,在弓形型腔尾部设置一个矩形排气孔。

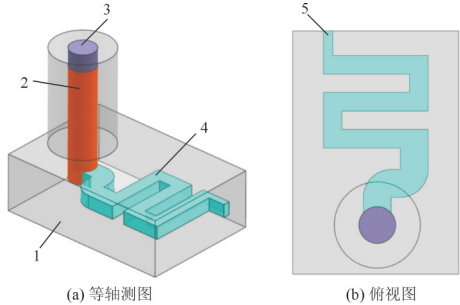


图5 弓形件的挤压铸造系统

Fig.5 Squeeze casting system of bow-shaped model

1.模具 2.金属液 3.冲头 4.型腔 5.排气孔

弓形件材质为A356铝合金,铸型材质为H13钢,金属液的参考密度为 $2\,600\text{ kg/m}^3$,空气的参考密度为 1.29 kg/m^3 ,密度比约为2 000,金属液在冲头的推动作用下以不同的速度压射进入型腔,其他相关材料热物性参数见表1。在SPH流动场仿真中使用 0.8 mm 的网格将三维模型离散成粒子模型,该模型的总粒子数为272 088,其中流体粒子数为26 307,边界粒子数为245 781。数值声速 c_0 设为 20 m/s ,人工黏度系数 α 为0.05,考虑重力对流体运动的影响,设置重力加速度 g 为 -9.8 m/s^2 。

表1 材料热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of materials

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	液相线 温度/ $^{\circ}\text{C}$	固相线 温度/ $^{\circ}\text{C}$
A356	2 600	0.002	1 200	0.8	620	590
H13	7 850	—	32	0.46	1 491	1 331

2.2 SPH两相流模型正确性验证

为了验证所建立SPH两相流模型流动场计算的正确性,基于弓形水动力模型,对比了二维SPH仿真结果与自主开发算法的三维仿真结果。该模型设置液相为水,型腔内为真空,流体粒子密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$,黏度为 $0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$,充型速度为 1.8 m/s ,整个模拟设定在室温条件下进行,其余SPH参数设置与弓形件挤压铸造数值模拟一致。

图6为不同时刻已知二维SPH仿真结果^[23]和自主开发算法三维计算结果对比。程序设定模具、液相流体、冲头及气相流体各部分编号分别为1、2、3、4,依据图例中的PID数值,即可辨认粒子属性。可以看出,水在高速充填过程中自由界面复杂,在型腔各个拐角位置形成孤立的气腔,后续受到回流液体的填充以及后方液体的推动作用逐渐破碎直至消失,各个时刻自主开发算法所绘制出

的水流体撞击型腔之后产生的流态都与已知结果保持一致。另外,本研究在三维尺度上对水动力模型进行仿真计算,并考虑了重力因素,不仅能够预测空腔所在的具体空间位置,追踪其动态演变过程,对于空腔内自由液面以

及流体前沿的液体飞溅也可以很好地计算并绘制出来,并通过粒子分布的疏密程度来反映出空腔的大小、形态,从而为深入研究分析流体流动提供关键的可视化依据。

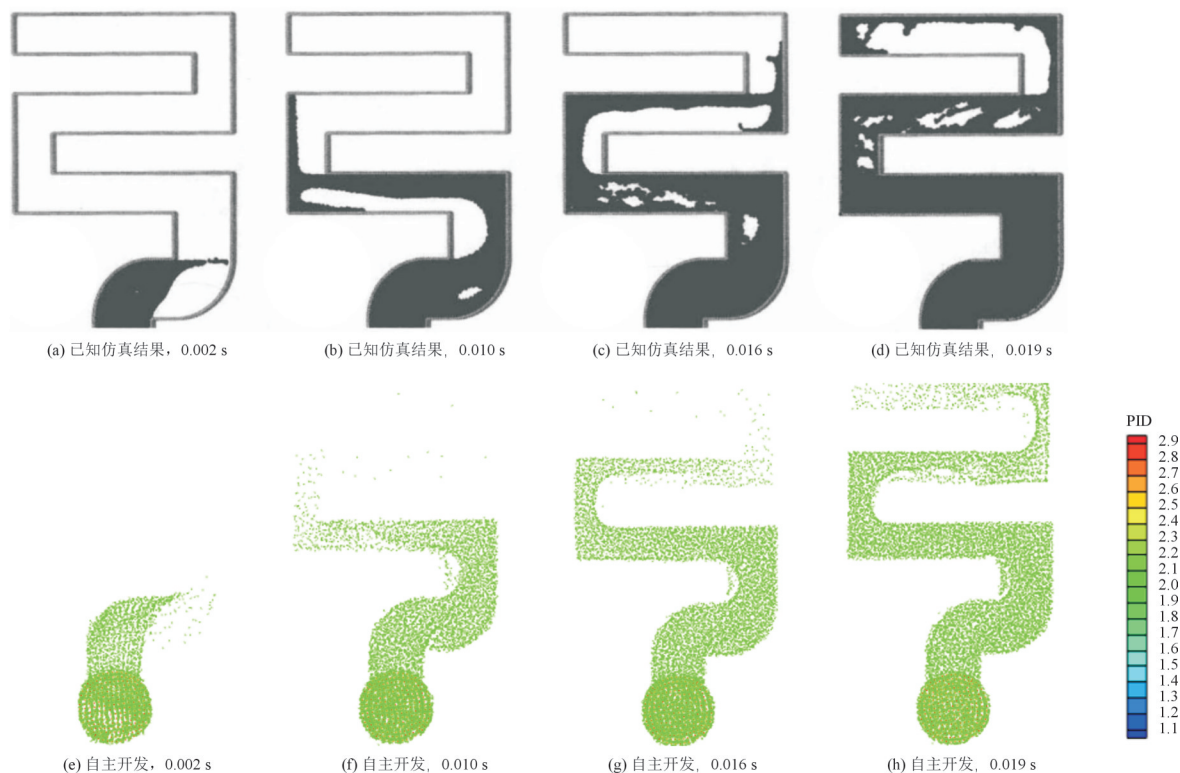


图6 二维SPH仿真结果与自主开发算法三维仿真结果对比图^[23]

Fig.6 Result comparison between two-dimensional SPH simulation and self-developed three-dimensional simulation^[23]

以上分析说明了本研究算法在流动场计算方面的正确性,基于此算法,可以捕捉流体流动的复杂现象,为后续气液两相流的计算以及挤压铸造缺陷预测分析提供参考。

2.3 低速充型的仿真结果及分析

为了防止粒子移动速度给SPH两相流程序带来额外的非稳性,使用低速充型挤压铸造模型来验证算法的稳定性及有效性。设置冲头的移动速度为0.1 m/s,金属液的充型时间为0.52 s。

图7为低速充型过程中气液两相的仿真结果示意图,图中绿色粒子代表金属液,红色粒子代表空气(基于原图彩色描述)。熔融的金属液在冲头的推动作用下逐步缓慢地进入型腔,整体金属液前沿都比较平稳,没有出现明显的扰动。在各个时刻,熔融金属受重力加速度的作用,流体前沿呈现出一定坡度。此时,底层金属液缓慢推动气相粒子向前流动,上层金属液则会包裹住空气和气相协同向前流动。以 $t=0.064$ s时刻弓形件拐角处的流动情况为例,金属液沿着平行于壁面的方向流动,在这个过程中,对空气产生挤压作用。

与此同时,边界粒子施加排斥力阻止流体粒子溢出,使得气相压力不断升高,导致每个拐角处的上层金属液受到空气阻力的影响而改变流动方向,从而避免冲击到对向的型腔壁。

空气粒子伴随着金属液的流动不断向前,多余的空气通过排气孔排成型腔。在 $t=0.112$ s时以及 $t=0.184$ s时转角位置出现了卷气缺陷。正常情况下,被金属液包裹的空气只要和型腔内的空气连通,就不会引发卷气缺陷。一旦液相表面出现弥合,裹挟的空气被困住,从而导致卷气形成,局部封闭的气体继续随金属液向前流动。由于充型速度相对缓慢,充型结束后只在弓形件末尾上表面残留了少量空气粒子。在实际生产中,能够对模具结构加以改进,将这部分因气体残留导致的缺陷集中到溢流槽中,从而有效提高挤压铸件的整体质量。

图8为模拟真空条件下低速挤压铸造充型过程示意图。与两相流计算结果对比发现,在真空环境中,流体在各个时刻都不会受到前方空气的压缩作用,这使得液相前沿界面不再平滑,大量孤立的粒子溢出液体而自由移动,这种现象与实际的金属液充型过程不符。

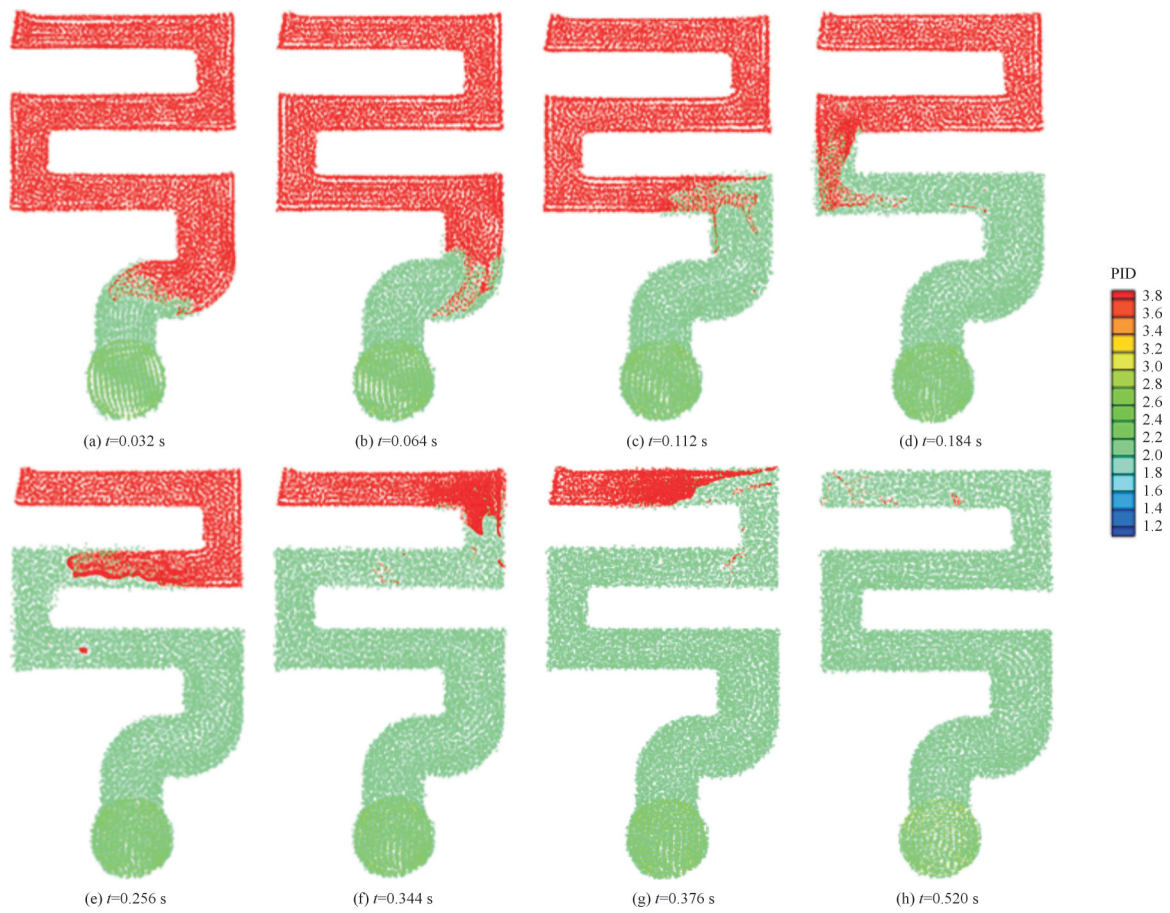


图7 低速充型过程中气液两相流体的仿真结果图

Fig.7 Simulation results of gas-liquid fluid in low-speed filling process

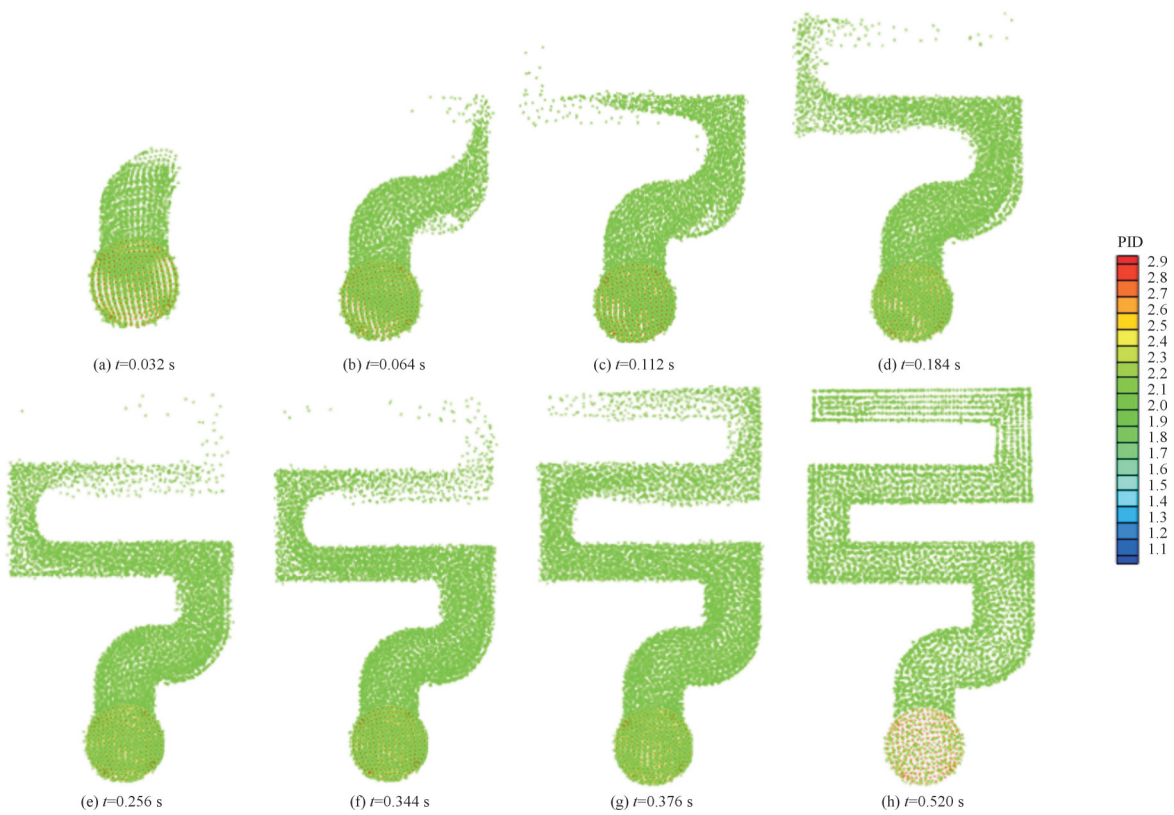


图8 低速充型过程中单相流的仿真结果图

Fig.8 Simulation results of single-phase fluid in low-speed filling process

由此说明,本研究提出的 SPH 两相流模型不仅能够确保大密度比两相流挤压铸造计算过程的稳定性,而且其计算结果也更为贴近真实的流体充型情况。

2.4 高速充型的仿真结果及分析

图 9 是充型速度为 1.8 m/s 时的气液两相仿真图,同样地,图中绿色粒子代表金属液,红色粒子代表空气(基于原图彩色描述)。可以看出,随着流速增大,金属液的流态发生了明显的变化。

首先,由于流速的增加,金属液从缓慢平稳的层流变成了混乱的湍流,惯性力的作用超过了黏滞力的作用。在 $t=0.004$ s 时,向前流动的金属液受到空气的阻碍而改变流动方向,但由于流动速度过大,流体前

沿直接冲刷模具的型腔面,致使相当一部分空气被封闭,见图中的红色气相粒子团。 $t=0.007$ s 时的仿真结果显示,少部分空气在随金属液流动过程中有机会逸出并回到型腔,但仍有部分空气始终滞留在金属液中,见弥散分布的红色气相粒子,卷气缺陷由此产生,挤压铸件最终的产品质量降低,后续充型过程在每个转角位置都产生了由惯性带来的气体封闭。另外,与缓慢充型过程不同的是,高速充型时金属液不断地冲击型腔,由此加剧了挤压铸件生产设备的损耗。在 $t=0.028$ s 时,由于充型速度过快,导致空气在末端聚集且没有办法及时排出,这使得充型阻力加大,冲头移动缓慢,金属液前沿逐渐冷却导致流动性降低,造成充型不完整的缺陷。

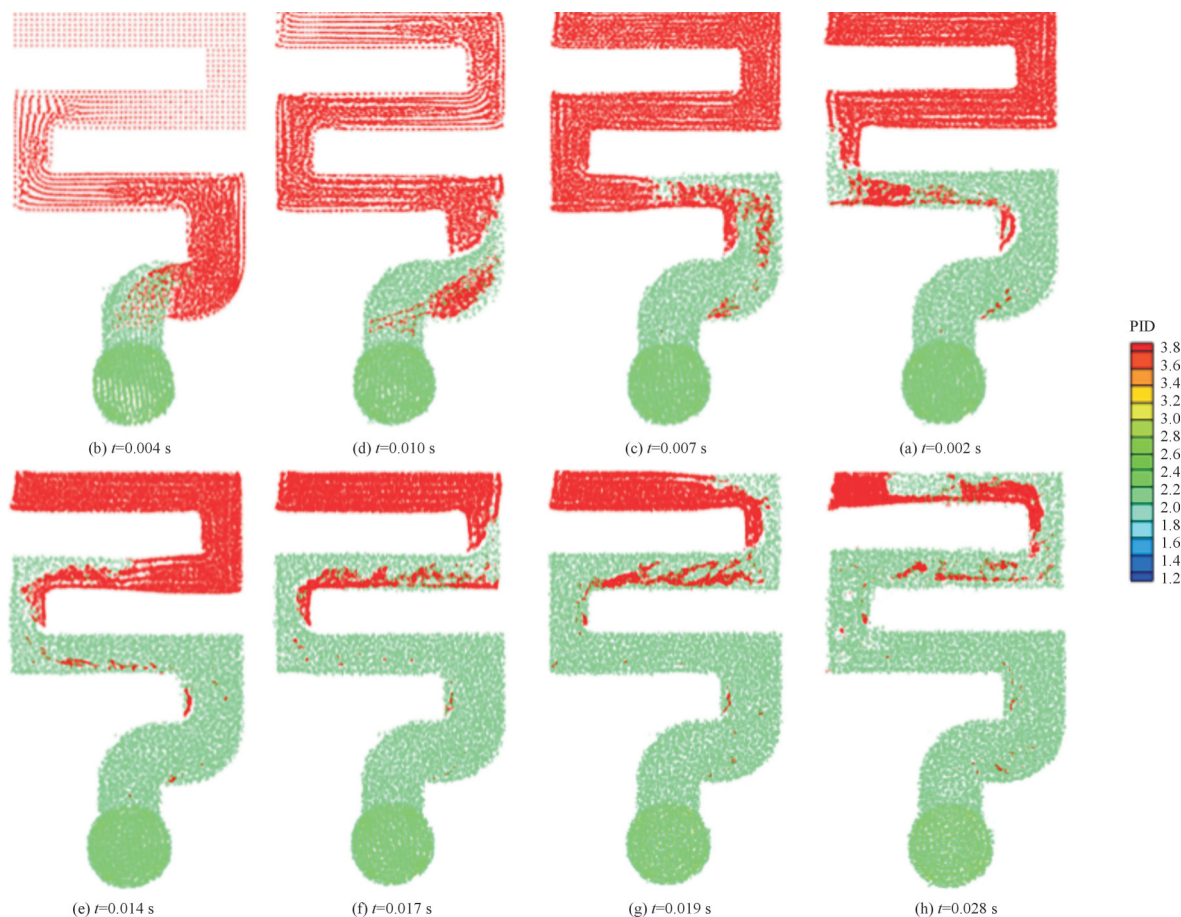


图 9 高速充型过程中气液两相流体的仿真结果图

Fig.9 Simulation results of gas-liquid fluid in high-speed filling process

通过以上分析,证明了引入粒子位移技术的 SPH 两相流模型处理紊流时的稳定性。该模型能够实现不同工艺参数下挤压铸造流动场的预测,有助于深入理解挤压铸造的物理机制;同时能精准预测充型过程中的卷气、充型不完整等缺陷。

2.5 CUDA 架构下算法性能测试

本研究通过 CUDA 架构下 SPH 两相流算法程序的试验评估,测试 GPU 并行的性能。试验环境如下:

操作系统为 Windows10,硬件部分包括 AMD EPYC 9754 CPU 和 NVIDIA Quadro GV100 GPU,软件部分基于 CUDA Toolkit 11.5。

首先对比了单线程、128 线程并行的 CPU 程序以及 CUDA 架构下的 GPU 程序的计算速度,试验基于 10 组离散弓形件模型,粒子总数范围从 10 万到 100 万。GPU 相对于不同线程 CPU 计算的加速比见图 10。可以看出,CUDA 并行的计算速度远高于基于 CPU 的计

算。对于单线程CPU的计算来说,即使粒子总数只有10万,GPU的加速比也接近6倍,在百万粒子数附近更是达到了22倍以上。与单线程CPU的加速效果相比,GPU相对于128线程CPU的加速效果略差,但在接近百万粒子数时,GPU的计算速度比单纯使用CPU的情形快了1.5倍。另外,测试结果表明,随着计算总粒子数增加,GPU的加速效果不断增强。由此可见,针对大尺度模型的仿真工作,GPU更能发挥并行计算的优势,大大提升计算效率。

使用CUDA架构改进SPH两相流程序,一方面是为了实现并行计算,提高数值模拟的效率;另一方面由于GPU显卡拥有比CPU更高的内存带宽,能够实现更大粒子数模型的计算。为了测试CUDA架构下GPU并行的计算容量与CPU计算的差距,不断缩小离散模型的粒子间距,增加模型的总粒子数。测试结果表明,在同样的试验环境下,一旦粒子数量超过1 000 000,CPU程序便无法启动计算。然而,基于GPU的程序允许处理的粒子数高达9 000 000,提高了约一个数量级。这充分说明,采用CUDA架构改进SPH两相流程序,不仅能够完成更高分辨率的仿真计算,还能够实现更大规模的挤压铸造充型数值模拟,为相关领域的研究与实践提供了更为强大且高效的计算支持。

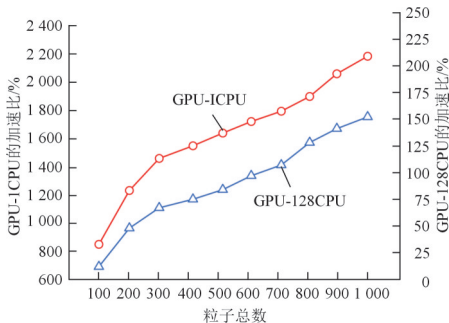


图10 GPU相对于单线程和128线程CPU在不同粒子数下的加速比

Fig.10 Speedup of GPU relative to single-thread and 128-thread CPU under different particle amounts

3 结 论

(1)建立了SPH两相流模型,用于大密度差两相流的仿真计算。在传统SPH方法中加入扩散项,并引入多相密度正则化以及动态边界条件,消除界面处的数值振荡。在粒子场变量更新阶段使用粒子位移技术,对所有流体粒子进行位移修正,避免粒子高速无序运动带来的粒子塞积和粒子空洞。借助真空弓形水动力模型验证了算法的正确性。研究了弓形件模型挤压铸造充型过程,证明了所提出的SPH模型可以有效模拟具有稳定界面的两相流。在高速充型仿真计算中,可

以很好地捕捉到金属液冲击时刻的空气封闭以及两相界面轮廓变化,卷气和充型不完全的缺陷都被精准预测,验证了该算法对不同工艺参数的响应。

(2)采用CUDA架构对SPH两相流模型进行了GPU加速。测试结果表明,CUDA并行架构可以大幅提升计算速度,加速效果也会随着系统处理粒子总数的增加而更加显著。

参 考 文 献

- [1] AKHIL M G, PREENU S, HARI S, et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of squeeze-cast Al-5Si-3Cu alloy for automotive applications [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(5): 1 129-1 132.
- [2] CAO L, SUN F, CHEN T, et al. Quantitative prediction of oxide inclusion defects inside the casting and on the walls during cast-filling processes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 119: 614-623.
- [3] 牛晓峰, 王天成, 葛涛涛, 等. 铸造充型过程宏观数值模拟研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10): 1 312-1 318.
- [4] 郭俊伟, 吴孟武, 熊守美, 等. 压铸过程数值模拟技术研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10): 1 366-1 375.
- [5] 葛涛涛, 赵展, 牛晓峰, 等. 基于SPH-FEM耦合方法的挤压铸造数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(7): 909-916.
- [6] 丁伟伟, 叶松茂, 张辉. 基于改进SPH方法的三维浮式防波堤水动力性能预报 [J]. 船海工程, 2024, 53(6): 111-117.
- [7] O'CONNOR J, ROGERS B D. A fluid - structure interaction model for free-surface flows and flexible structures using smoothed particle hydrodynamics on a GPU [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 104: 103 312.
- [8] COLAGROSSI A, LANDRINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics [J]. Journal of Computational Physics, 2003, 191(2): 448-475.
- [9] HAMMANI I, MARRONE S, COLAGROSSI A, et al. Detailed study on the extension of the δ -SPH model to multi-phase flow [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 368: 113 189.
- [10] GRENIER N, ANTUONO M, COLAGROSSI A, et al. An Hamiltonian interface SPH formulation for multi-fluid and free surface flows [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(22): 8 380-8 393.
- [11] CHEN Z, ZONG Z, LIU M B, et al. An SPH model for multiphase flows with complex interfaces and large density differences [J]. Journal of Computational Physics, 2015, 283: 169-188.
- [12] CEN C, FOURTAKAS G, LIND S, et al. A single-phase GPU-accelerated surface tension model using SPH [J]. Computer Physics Communications, 2024, 295: 109 012.
- [13] HÉRAULT A, BILOTTA G, DALRYMPLE R A. SPH on GPU with CUDA [J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48 (S1): 74-79.
- [14] MORRIS J P, FOX P J, ZHU Y. Modeling low reynolds number incompressible flows using SPH [J]. Journal of Computational Physics, 1997, 136(1): 214-226.
- [15] ANTUONO M, COLAGROSSI A, MARRONE S, et al. Free-surface flows solved by means of SPH schemes with numerical diffusive terms [J]. Computer Physics Communications, 2010, 181(3): 532-549.