• 工艺技术 Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.03.004

基于 SPH 新方法铸造充型过程三维数值模拟

宋振亮[1],牛晓峰[1],阎佩雯[2],赵静雨[1],黄华贵[3]

(1. 太原理工大学 材料科学与工程学院,山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 现代科技学院,山西 太原 030024;3. 燕山大学 机械工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘　要:引入一种新的无网格光滑粒子流体动力学 SPH 方法模拟铸造充型过程,SPH 方法能够避免网格法在求解过程中的网格扭曲和缠绕,并且改善网格法求解精度。基于 SPH 法的优势,建立了基本数学模型,编写了三维计算程序,并引用虚粒子边界解决三维情况下边界不易施加的问题。通过对底注式平板件铸造充型过程进行数值模拟,并将模拟结果与实验结果和基于网格法的 ProCast 模拟结果进行对比,验证了 SPH 方法在计算铸造充型过程中的可行性和有效性。

关键词:光滑粒子流体动力学;虚粒子法;数值模拟;铸造充型过程

中图分类号:TG21+1;TP391.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)03-0249-04

3D Numerical Simulation of Casting Filling Process Based on SPH Methods

SONG Zhenliang[1], NIU Xiaofeng[1], YAN Peiwen[2], ZHAO Jingyu[1], HUANG Huagui[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Polytechnic Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A new meshless smooth particle hydrodynamics (SPH) method was introduced to simulate the filling process of casting. The SPH method can avoid the mesh distortion and winding in the process of solving the mesh method, and improve the precision of solving the mesh method. Based on the advantages of SPH method, the basic mathematical model was established and the 3D calculation program was written. Moreover, the virtual particle boundary was used to solve the problem that the boundary was not easy to be applied in 3D. Through the numerical simulation of the filling process of bottom injection flat panel casting, the simulation results are compared with the experimental results and the simulation results of ProCast based on grid method, and the feasibility and effectiveness of SPH method in calculating the filling process of casting are verified.

Key words: SPH; dummy particle method; numerical simulation; casting filling process

金属液充型过程是个高温、瞬时的复杂流动过程,很难直接观察,随着数值模拟技术的引入,可以实现对流动状态的定性分析,为预测诸多铸造缺陷奠定了基础,对铸造工艺的确定、产品试制周期的缩短和生产成本的降低有一定的参考价值[1-3]。目前,铸造过程数值模拟主要基于有限差分法和有限元法等这些有网格的数值方法,然而基于有网格的数值方法在计算中存在网格扭曲、缠绕,求解自由表面运动问题上精度不足,难以精确保持流体界面等问题[4,5]。无网格的 SPH 法作为一种新方法,将问题域离散为一系列粒子,具有无网格特性,所以相对于传统网格方法,SPH 法能够从本质上解决网格法在求解自由表面流动过程中的网格扭曲和缠绕,相比网格法具有更加优异的几何灵活性,在处理复杂外形方面有很大优势,并且改善网格法在求解自由表面运动时精度不足的问题[6]。基于以上优点,SPH 在固体力学方面已经开始广泛研究应用,而 Cleary 等用 SPH 方法对水模拟充型过程进行仿真分析[7],并和 Schmid 等的实验及 VOF 结果对比,充分说明了 SPH 在流体力学的应用价值,但国内对 SPH 仿真充型研究的论文并不多。

目前,对于 SPH 的研究大都处于二维平面中,本文建立了铸造充型基本数学模型,编写了三维计算程序,对底注式平板件铸造充型过程进行了模拟,并将模拟结果与实验结果和基于网格法的 ProCast 模拟结果对比,验证了 SPH 方法在计算铸造充型过程中的可行性和有效性。

收稿日期:2018-10-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574176,51874209)
作者简介:宋振亮(1993-),陕西宝鸡人,硕士.研究方向:铸造过程数值模拟研究.电话:15513677952,
E-mail:415100602@qq.com

1 SPH 基本数学模型

1.1 SPH 控制方程组

拉格朗日描述下的流体控制方程可写作一系列偏微分方程，其中包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。铸造充型过程遵循流体动力学的基本控制方程，暂不考虑能量变化，铸造充型过程可用质量守恒方程和动量守恒方程描述，用 SPH 方法进行离散可得[8]：

连续性方程：

$$\frac{d\rho_i}{dt}=m_i\sum_{j=1}^{N}\nu_{ij}\cdot\nabla_i W_{ij} \tag{1}$$

式中，ρ_i 表示 i 粒子的密度；m_i 为粒子 i 的质量；N 为 i 粒子支持域中的粒子总数，$\nu_{ij}=\nu_i-\nu_j$。$W_{ij}=W(x_i-x_j, h)$ 为核函数；$\nabla_i W_{ij}$ 表示核函数对 i 粒子的空间导数。

动量方程：

$$\frac{d\nu_i}{dt}=-\sum_{j=1}^{N}m_j\left(\frac{P_i}{\rho_i^2}+\frac{P_j}{\rho_j^2}\right)\nabla_i W_{ij}+\sum_{j}^{N}m_j\frac{\mu_i+\mu_j}{\rho_i\rho_j}\nu_{ij}\left(\frac{1}{r_{ij}}+\frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}\right)+g \tag{2}$$

式中，ν_i 表示 i 粒子的速度，等式右边第一项表示压力项，其中 P_i，P_j 分别表示 i 粒子和 j 粒子的压强，ρ_i，ρ_j 分别表示 i 粒子和 j 粒子的密度，第二项是粘度项，μ 为动力粘度系数，r_{ij} 为 i 粒子和 j 粒子之间的距离，第三项重力加速度 g=9.8 m/s^2。

1.2 状态方程

不可压缩流动问题中，流体实际的状态方程限制了时间步长的大小，为有效计算动量方程中的压力项，引入弱可压缩状态方程描述[9]：

$$P=P_0\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma}-1\right] \tag{3}$$

式中，参数 P_0 为参考压强，可通过 $P_0=100\rho_0 v_{max}^2/\gamma$ 获得，其中 ρ_0 为液体的初始密度，v_{max} 为流体的最大速度。γ 是常数，一般取 7。

1.3 时间积分

SPH 方法同样需要进行时间积分，本文采用 leap-frog 格式的时间积分方法[10]，即：

$$\phi_i(t+\frac{1}{2}\Delta t)=\phi_i(t-\frac{1}{2}\Delta t)+\phi_i(t)\times\Delta t \tag{4}$$

$$x_i(t+\Delta t)=x_i(t)+v_i(t+\frac{1}{2}\Delta t)\times\Delta t \tag{5}$$

其中：ϕ 表示密度 ρ 及速度 v，x_i 是粒子 i 的位置坐标。为保证数值积分的稳定，必须使用合适的时间步长 Δt，一般应用 CFL 条件对时间步长进行估计。

1.4 边界条件

由于拉格朗日粒子法的本质，SPH 方法中的固壁边界条件很难像网格方法一样严格实施，长期以来成为阻碍 SPH 方法发展的难点之一。传统的基于罚函数法的边界条件[11]，通过边界粒子对流体粒子直接施加罚函数形式的排斥力防止流体粒子穿透边界，但是一些参数的选取较为困难，如果选取不当会导致粒子穿透边界，而且对于复杂外形边界难以处理，尤其在计算三维制件时，不再像二维情况下容易定义边界，所以本文引用基于虚粒子方法的固壁边界，更易处理三维情况下边界的问题。

虚粒子边界的实施是在流体外部沿边界曲线布置 3 或 4 层虚粒子，虚粒子具有与流体粒子相同的几何尺寸，可以看成是流体粒子的扩展，有条件地参加连续性方程计算，其配置如图 1 所示[8,12]。

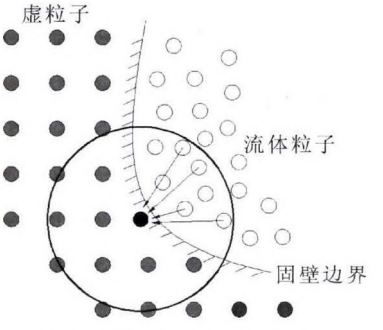


图 1 虚粒子边界配置示意图

Fig.1 Schematic diagram of dummy particle boundary configuration

其基于虚粒子边界的流体-固壁作用方程为：

$$\left(\frac{d\rho_i}{dt}\right)_b=\begin{cases}m_b v_{ib}\cdot\nabla_i W_{ib} & v_{ib}\cdot n_b=0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{6}$$

$$\left(\frac{dv_i}{dt}\right)_b=\begin{cases}\left[-m_b\left(\frac{P_i+P_b}{\rho_i\rho_b}\right)n_b\cdot\nabla_i W_{ib}\right]n_b & (P_i+P_b)>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

式中，$(d\rho_i/dt)_b$，$(dv_i/dt)_b$ 分别表示流体粒子 i 所受到边界虚粒子 b 的作用而产生的密度、速度增量；n_b 为边界虚粒子 b 的单位法向，$v_{ib}=v_i-v_b$。式(6)(7)表明：当流体粒子沿边界切向运动时，边界对流体密度及压力场不产生影响，流体运动状态不会因边界作用发生变化；当流体出现靠近边界的运动时，流体的密度增大，密度变化通过弱可压缩状态方程作用于压力场，使得压力升高，边界附近出现局部正压力，对流体粒子施加斥力作用，防止流体穿透边界。其中边界虚粒子的压力通过对各点的 CSPM 插值获得：

$$P_b=\frac{\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}(P_b)_j W_{bj}}{\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}W_{bj}} \tag{8}$$

式中，$(P_b)_j$ 表示在流体粒子 j 处泰勒展开得到的虚粒子 b 的估计压力值。

2 数值模拟模型与结果分析

本文对底注式平板件铸造充型过程进行了 SPH 三维数值模拟，目前很少有 SPH 充型过程三维数值模拟的研究，国外学者 Cleary 等进行过充型过程三维数值模拟[13]，强洪夫等国内学者多对计算固体力学进行 SPH 三维数值模拟。

2.1 底注式平板件铸造充型模型

底注式平板件充型模型尺寸如图 2 所示，平板件壁厚约为 6 mm，金属液由右侧直浇道注入型腔内部，从平板件底部向上逐渐填充直至充型完成。图

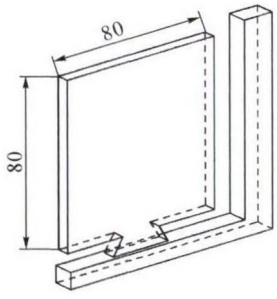


图 2 铸型简图
Fig.2 Model of casting

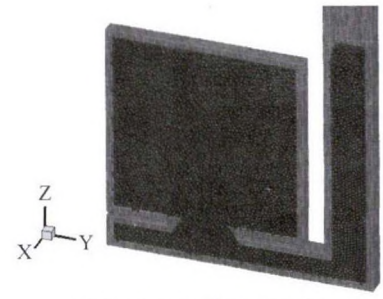


图 3 SPH 法模型截面图
Fig.3 The cross-section by SPH method

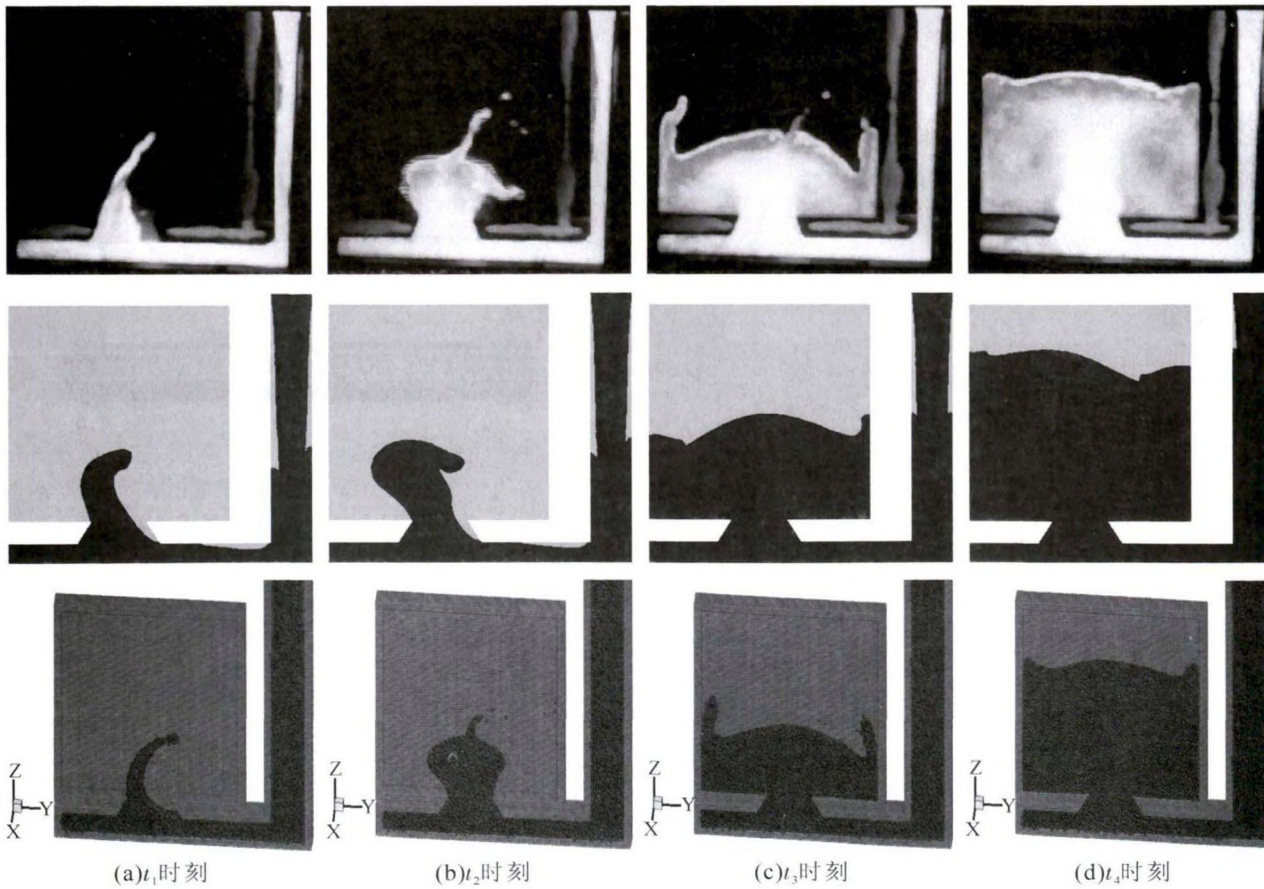
3 为 SPH 方法下底注式平板件充型完成时模型的截面图，计算区域已经被离散成一系列的粒子，总粒子数为 205 512，金属液粒子为 30 000，其中红色粒子代表虚粒子边界，蓝色粒子代表金属液。由于充型过程比较短暂，为简化模型，故暂不考虑充型过程温度变化，其充型过程参数设置如表 1。

表1 充型过程参数设置
Tab.1 Parameter setting of cast filling process

材料	浇注温度	密度	熔点
Al	700 ℃	2 371 kg/m^3	660 ℃
动力粘度系数	粒子初始间距(Δx)	时间步长(Δt)	光滑长度 /h
1.6×10^{-3} pa·s	0.001 m	10^{-5}	$1.2\Delta x$

2.2 底注式平板件铸造充型结果分析

图 4 给出了四个不同时刻底注式平板件铸造充



(a)t_1时刻　(b)t_2时刻　(c)t_3时刻　(d)t_4时刻

图 4 底注式平板件充型过程的实验结果(上)，ProCast 模拟结果(中)与 SPH 模拟结果(下)
Fig.4 Cast-filling process of plate: experiment (top), ProCast (middle) and SPH (bottom)

型过程的实验结果,ProCast 模拟结果与 SPH 模拟结果的对比,其中第一行为高速热成像摄影机拍摄的平板件铸造充型实验结果,第二行为基于网格法 ProCast 的模拟结果,第三行为 SPH 方法数值模拟结果。

从图 4 中看出,当铸件充型到 t_1 时刻,金属液由浇注系统开始向铸件内部充型,金属液在铸件内部有飞溅趋势,对比数值模拟结果与实验结果可以看出,SPH 和 ProCast 数值模拟结果基本一致,都能很好的预测实验结果;当铸件充型到 t_2 时刻,金属液充型逐渐趋向稳定,并开始有向两侧运动的趋势,对比数值模拟结果,SPH 模拟结果更加接近实验,并且能大致预测出金属液的飞溅;当铸件充型到 t_3 时刻,由于中部一直有金属液注入,所以呈现中间高,两边底的液面形状,并向两侧运动冲击型腔,在冲击处出现飞溅现象,对比数值模拟结果,SPH 飞溅现象更加明显;当铸件充型到 t_4 时刻,充型过程比较稳定,液面逐步上升,由于金属液的不断注入,金属液面还继续呈现曲面状,但是曲面较为平缓,在两侧型腔处,由于冲击较为平稳,没有非常明显的飞溅,只是液面有少许上升,相比之下,SPH 数值模拟结果曲面更加平稳,与实验结果更加相似。

从以上对比结果可以看出,SPH 数值模拟结果与实验结果基本一致,能较准确反映出金属液在铸造充型过程中的流动状态,并且与基于网格的方法相比,SPH 模拟结果更加接近实验,改善了网格法的精度,从而验证了 SPH 方法在计算铸造充型过程中的可行性和有效性。

3 结语

本文运用一种无网格的 SPH 方法,建立了 SPH 基本数学模型并编写了三维计算程序,通过引用虚粒子方法的固壁边界,以解决三维情况下传统罚函数边界不易施加的问题。通过对底注式平板件铸造充型过程的数值模拟,并与实验结果和基于网格法 ProCast 模拟结果的对比,验证了 SPH 方法在计算铸造充型过程中的可行性和有效性,具有一定的工程参考价值。

目前,SPH 算法开始在很多流体问题模拟中应用,随着算法在工程领域的拓宽,对算法本身也提出了很大挑战,可以预见,随着对 SPH 算法的不断深入研究,它将以独特的优势在铸造问题的研究中发挥更大作用。

参考文献:

[1] 侯华,毛红奎,张国伟. 铸造过程的计算机模拟[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[2] 吴健,殷亚军,唐清富,等. 特种材料铸造充型过程水模拟及数值模拟研究[J]. 铸造技术,2017,38(5):1697-1700.

[3] 郭红星,杨志强. 数值模拟技术在充型凝固过程中的应用[J]. 铸造技术,2016,37(12):2676-2680.

[4] Benson D J. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1992,99(2-3):235-394.

[5] Charles E, Anderson Jr. An overview of the theory of hydrocodes [J]. International journal of impact engineering, 1987(1-4),5:33-59.

[6] G.R.Liu, M.B.Liu. 光滑粒子流体动力学[M]. 长沙:湖南大学出版社, 2005.

[7] Paul Cleary, Joseph Ha, Vladimir Alaguine, et al. Flow Modelling in Casting processes [J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26(2):171-190.

[8] 强洪夫. 光滑粒子流体动力学新方法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2017.

[9] Monaghan J J. Simulation Free Surface Flows with SPH [J]. Journal of computational physics, 1994, 110(2):399-406.

[10] 强洪夫,韩亚伟,王坤鹏,等. 基于罚函数 SPH 新方法的水模拟充型过程的数值分析[J]. 工程力学,2011, 28(1):245-250.

[11] 韩亚伟,强洪夫,赵玖玲,等.光滑粒子流体动力学方法固壁处理的一种新型排斥力模型 [J]. 物理学报, 2013, 62(4):044702.

[12] Adami S, Hu X Y, Adams N A. A generalized wall boundary condition for smoothed particle hydrodynamics [J]. Journal of computational physics, 2012, 231(21):7057-7075.

[13] Paul Cleary, Joseph Ha, Vladimir Alaguine, et al. Flow Modelling in Casting processes [J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26(2):171-190.

书讯

《铸造缺陷及其对策》

由日本铸造工学会编写,由大连理工大学张俊善教授和尹大伟先生翻译成中文,机械工业出版社出版。通俗易懂地解说各种铸造缺陷,能够帮助现场的铸造技术人员及时判断他所遇到的缺陷属于何种类型的缺陷,找出缺陷产生的原因及解决方案,是铸造相关人员的好帮手。全书分 8 部分,247 页,234 千字。16 开,精装,定价 58 元,特快专递邮购价:80 元。

邮购地址:铸造技术杂志社
(710048 西安理工大学 608 信箱)
联 系 人:李巧凤 029-83222071