

基于 SPH 方法的压铸 AM60B 镁合金冷隔缺陷预测模型构建

贾金波 王天成 王浩伟 牛晓峰
(太原理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 通过分析冷隔演化机理,构建了基于光滑粒子流体动力学(SPH)方法的冷隔缺陷预测模型。通过对压铸 AM60B 镁合金零件进行三维建模,采用自主研发的 SPH 程序对其进行铸造过程数值模拟,发现模拟结果和试验结果的冷隔缺陷生成位置一致,验证了冷隔预测模型的准确性。

关键词 SPH 方法;冷隔;数值模拟

中图分类号 TG249.2;TG146.22;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.021 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Construction of Cold Shut Prediction Model for AM60B Alloy Based on SPH Method
Jia Jinbo, Wang Tiancheng, Wang Haowei, Niu Xiaofeng
(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: By analyzing the evolution mechanism of cold insulation, a prediction model of cold insulation defects based on SPH method was established. The three-dimensional modeling of the die casting AM60B alloy parts was carried out, and the numerical simulation of the casting process was conducted using independently developed SPH program. The results indicate that the simulation results are in consistent with the experimental results, verifying the correctness and practicability of cold insulation prediction model.

Key Words: SPH Method, Cold Shut, Numerical Simulation

冷隔是铸造生产过程中常见的缺陷^[1-3], 其会降低铸件的表面精度以及力学性能, 严重时会导致铸件萌生裂纹, 甚至导致铸件报废。目前的铸造模拟软件大多通过分析金属液流场及凝固场, 从而间接判断冷隔缺陷的生成位置。CAO L 等^[4]、曹流^[5]、薄延强^[6]利用 VOF 方法提出了界面前沿判断算法, 并在此基础上基于网格法提出了一种冷隔缺陷生成模型。但是对于具有复杂外形的铸件来说, 生成高品质的计算网格较困难。相比网格法, 无网格法具有更加优异的几何灵活性, 因此在计算运动边界等方面优势明显, 同时也给气液两相流的计算带来了便利^[6-7]。COLAGROSSI A 等^[8]、GRENIER N 等^[9]研究了 SPH 方法处理气液两相流动问题, 计算了液体中气泡上升问题和溃坝过程气液两相流的问题。SPH 方法在计算气液两相流方面优势明显。赵静雨^[10]通过底侧式水动力模型进一步验证了 SPH 方法处理复杂气液两相流问题的能力, 对比发现模拟结果与

实际结果一致。但是目前有关 SPH 方法的研究大都是关于 SPH 方法自身存在问题的改进, 采用 SPH 方法对铸造过程中冷隔缺陷预测的研究报道很少。

因此, 本研究以气液两相流计算模型为基础, 采用特殊的方式提取界面前沿, 最终构建一个基于 SPH 方法的冷隔缺陷生成模型。通过模拟铸造过程中 AM60B 镁合金的充型凝固过程, 得到铸件的冷隔预测结果, 然后将模拟结果和试验结果进行对比, 验证 SPH 方法的冷隔缺陷生成模型的实用性, 为实际铸造过程冷隔预测提供参考。

1 基于 SPH 法的冷隔缺陷计算模型建立

1.1 冷隔缺陷演化机理

从本质上来看, 冷隔缺陷实际上是由充型流动过程和凝固过程即枝晶生长共同影响。分别从宏观和微观

收稿日期: 2022-09-29; 修改稿收到日期: 2022-11-14
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874209); 山西省科技重大专项基金资助项目(20191102007); 中央引导地方科技发展资金资助项目(YDZJSX2022A012)
第一作者简介: 贾金波, 男, 1997 年出生, 硕士研究生, 太原(030000), E-mail: 935975674@qq.com
通信作者: 牛晓峰, 男, 1982 年出生, 教授, 太原(030000), E-mail: niuxiaofeng@tyut.edu.cn
引用格式: 贾金波, 王天成, 王浩伟, 等. 基于 SPH 方法的压铸 AM60B 镁合金冷隔缺陷预测模型构建[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(7): 967-970.
JIA J B, WANG T C, WANG H W, et al. Construction of cold shut prediction model for AM60B alloy based on SPH method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7): 967-970.

层面来分析其形成机理^[4-5]。

从宏观角度来看,两股金属流的界面前沿区域都发生了部分凝固,当汇聚时由于发生了碰撞,使得已经凝固的金属固相聚集,但并不能形成完美的契合,这导致了冷隔缺陷形成。

从微观角度来看,当金属液某一时刻温度低于液相线温度时,这部分液相就开始结晶。结晶的本质是形核和长大的过程。有过冷度存在时,首先会在液体中形成一些晶核,当这些晶核的半径大于临界晶核半径时会继续长大,同时液态金属中也会不断产生新一批的晶核,重复上述过程。考虑到冷隔缺陷形成过程中只是一小部分金属液发生了凝固,所以原子在形核长大的过程中扩散能力较强,即使晶粒取向不同,也能够形成牢固的连接。当两股金属液汇聚时,由于每股已经形成牢固连接,导致两股流之间的金属原子扩散能力受到限制,因此两股金属的晶粒不能在原子尺度形成牢固连接,导致冷隔形成。

综上,冷隔缺陷的影响因素有:①界面前沿的凝固状态。若界面前沿未发生凝固则不会产生冷隔;否则,凝固的金属液量越多,越容易产生冷隔。②界面前沿碰撞剧烈程度。当两股金属液碰撞越激烈时,表示前沿的金属液混合的程度越高,不利于前沿金属流的有效熔接,使冷隔倾向变大。

1.2 基于 SPH 法的冷隔预测模型构建

由于冷隔是界面前沿的金属液发生碰撞所造成的,所以预测冷隔缺陷最关键的一步是要进行界面前沿的判断和提取。由于 SPH 方法的无网格特性,在寻找界面前沿时需要通过配对粒子数来判断。为了防止粒子穿透,采用虚粒子边界法。对于流动过程中的每一个金属流体粒子来说,判断此流体粒子光滑核函数支持域内各类配对粒子的数目来确定该粒子是否为流体前沿。

$$\frac{N_1 + N_2}{N_1 + N_2 + N_3} \leq 0.2 \quad (1)$$

式中,总配对粒子数包括配对金属流体粒子数 N_1 、配对虚粒子数 N_2 和配对空气粒子数 N_3 。如果金属流体粒子满足式(1)时,该粒子即为界面前沿粒子。

从冷隔形成的影响因素可知,冷隔生成模型需要综合考虑流体粒子的固相率 f_s 、流体粒子速度。

(1)固相率影响因子 两股流体汇聚时,只有当前沿有一定的固相时才会产生冷隔,所以本研究认为只有当固相率 f_s 达到 0.1 以上时^[5],才会对冷隔的形成产生影响,基于粒子固相率的第一影响因子 C_{fs1} 为:

$$C_{fs1} = \text{sgn}[\max(f_s - 0.1, 0)] \quad (2)$$

式中,sgn 为符号函数;max 为最大值函数;当 $f_s > 0.1$ 时, $C_{fs1} = 1$;当 $f_s \leq 0.1$ 时, $C_{fs1} = 0$ 。

由冷隔演化机理可以看出,随着固相率不断提高,

冷隔缺陷生成速率也会增加。所以基于粒子固相率的第二影响因子 C_{fs2} 为:

$$C_{fs2} = \frac{0.1}{1.1 - f_s} - 0.1 \quad (3)$$

结合式(5)和式(6),得到固相率影响因子 β_{fs} 为:

$$\beta_{fs} = C_{fs1} C_{fs2} = \left(\frac{0.1}{1.1 - f_s} - 0.1 \right) \text{sgn}[\max(f_s - 0.1, 0)] \quad (4)$$

(2)速度影响因子 速度可以用来体现界面前沿粒子碰撞的激烈程度,考虑到粒子运动过程中的无规则性,用粒子的速度来充当速度影响因子。粒子速度越大时,碰撞激烈程度越高。因此速度影响因子 β_μ 为:

$$\beta_\mu = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (5)$$

式中, u 为粒子 x 方向的速度; v 为粒子 y 方向的速度; w 为粒子 z 方向的速度。

采用 SPH 粒子法进行冷隔缺陷模拟时,由于粒子在控制方程的作用下,冷隔缺陷会伴随着粒子一起运动,同时冷隔生成量会随着时间的不断的累积。可压缩流体粒子的运动由 Navier-Stokes 方程来控制,通过 SPH 法离散后的 Navier-Stokes 方程^[6-7]为:

质量守恒方程:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (6)$$

动量守恒方程:

$$\frac{d v_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (7)$$

能量守恒方程:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i + p_j}{p_i p_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2 \rho_i} \epsilon_i^{\alpha\beta} \epsilon_j^{\alpha\beta} \quad (8)$$

式中, v_i 为速度矢量; E 为能量; m 为粒子质量; σ_i 和 σ_j 分别为 i 和 j 粒子的总应力张量; ρ_i 和 ρ_j 分别为 i 和 j 粒子的密度; p_i 和 p_j 分别为 i 和 j 粒子的压力; α 和 β 为坐标方向; $\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$ 为光滑核函数 W_{ij} 的导数; N 为影响域内粒子个数; μ 为粘性系数; ϵ 为剪应变率。

最终将上述两个影响因子综合起来可将冷隔缺陷生成模型构建为:

$$\beta_\varphi = A_\beta \beta_{fs} \beta_\mu = A_\beta \left(\frac{0.1}{1.1 - f_s} - 0.1 \right) \text{sgn}[\max(f_s - 0.1, 0)] \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (9)$$

式中, β_φ 为冷隔缺陷生成量(采用无量纲的标量来表征冷隔); A_β 为冷隔生成常量,需要结合实际生产过程来确定,是无量纲的常量,将其值设为 10^{-8} 。

2 数值计算结果及分析

2.1 数值计算三维模型

冷隔计算的三维模型图见图 1。铸件的总体尺寸

为 95 mm×95 mm×20 mm,模具尺寸为 113 mm×113 mm×89 mm,且假设模具、冲头与金属液之间无摩擦。模拟仿真过程在自主研发的 SPH 程序中进行,采用高压铸造进行充填,冲头采用压力为 40 MPa,浇注时间为 1.25 s,浇注温度为 680 ℃。将冲头 3 和模具部分设置为边界虚粒子,将金属液体 2、溢流槽 4 设置为内部实粒子。边界粒子数为 462 075,内部粒子数为 50 429。初始时刻粒子间距为 1 mm,光滑长度 h 为粒子间距的 1.5 倍,时间步长为 10^{-6} s。浇注合金选择 AM60B 镁合金,合金成分(质量分数):6.0% 的 Al、0.5% 的 Mn、0.22% 的 Zn、0.01% 的 Si、0.01% 的 Cu、0.002% 的 Ni、0.005% 的 Fe,余量为 Mg。金属液初始温度设置为 680 ℃,与试验浇注条件相同。试验过程中冲头和模具均未进行预热,因此模拟时将边界初始温度设置为 25 ℃。

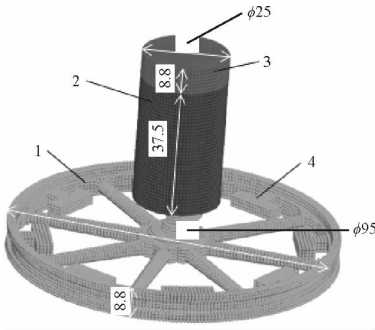


图 1 冷隔预测三维模型图

Fig.1 3D model diagram of cold shut defect prediction

1.铸件 2.金属流体 3.冲头 4.溢流槽

2.2 计算结果及分析

图 2 为基于 SPH 方法的冷隔缺陷计算模拟结果。可以看出,充型初期($t=0.5$ s 时),随着前端金属液不断经过冷的壁面,有少量金属液发生了凝固,此部位金

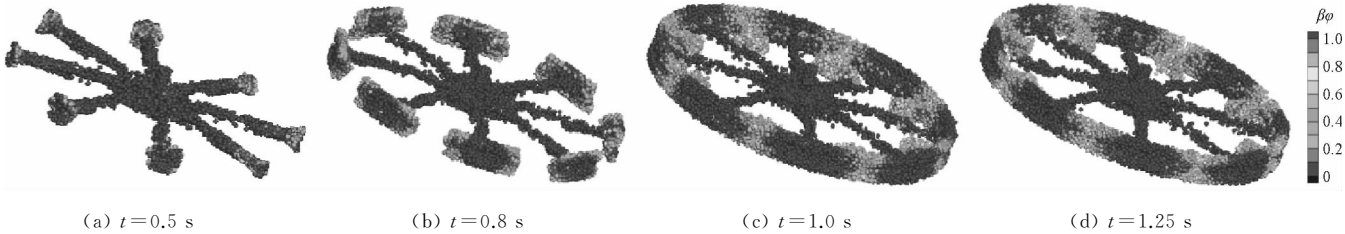


图 2 冷隔缺陷预测过程

Fig.2 Prediction process of cold shut

属液固相率较高,同时单股金属液内部也产生碰撞,因此在金属流前端生成了少量的冷隔缺陷。随着前端金属液继续流经冷的壁面,金属固相率渐渐变大,产生的冷隔缺陷也不断增加,见图 2b。当两股金属流发生激烈碰撞时,冷隔缺陷量明显增加,见图 2c。随着充型继续进行,冷隔缺陷随着金属流体继续运动。在充型的最后阶段($t=1.25$ s 时),一部分冷隔不断地向溢流槽中流动,由于溢流槽最终会被切除,因此冷隔缺陷最终形成在两根辐条之间的轮辋上。

图 3 为冷隔缺陷最终形成位置的模拟预测结果与实际结果的对比图。

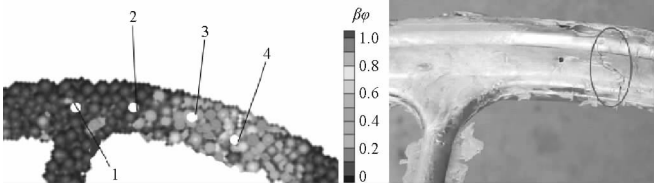


图 3 冷隔缺陷模拟结果与实际结果对比

Fig.3 Comparison of cold shut simulation and actual results

为了进一步阐述冷隔缺陷的生成过程以及预测结果的正确性,在铸件和溢流槽侧表面以及轮辋中心线上分别选取了 4 个位置(见图 3a)的 8 个点进行分析,得

到冷隔缺陷计算见图 4。

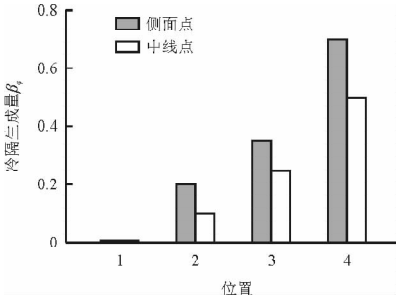


图 4 所取点冷隔缺陷计算值

Fig.4 Calculation value of the cold shut of the taken point

可以看出,在接近辐条的轮辋部位冷隔生成量接近 0,同时由于轮辋侧面接触的壁面较多,因此冷隔形成量较中线高。此外,铸件中冷隔缺陷量在侧面点 4 位置处具有较大值 0.7,此为模拟预测得到的较易形成冷隔缺陷的位置,与图 3b 中实际浇注件冷隔缺陷位置相近。

3 结 论

(1)冷隔缺陷的主要影响因素是界面前沿的凝固状态和界面前沿碰撞剧烈程度,其主要来源于界面前沿的流体,因此提取界面前沿是冷隔缺陷预测模型的关键一步。基于 SPH 方法进行流体前沿提取时,可以通过配

流量计阀体精铸工艺设计

徐贵强 王立新 秦晓朋 武志勇 郑蕊
(石家庄盛华企业集团有限公司)

摘要 针对流量计阀体熔模铸件要求内部组织致密、流道尺寸精度高、流道表面粗糙度低等,采用 ProCAST 软件对其凝固过程进行数值模拟,优化组树工艺,保证铸件内部品质。采用水溶蜡芯配合制壳中封填砂工艺,保证流道尺寸及表面品质,从而得到优质铸件,缩短开发周期,降低试制成本。

关键词 流量计阀体;数值模拟;水溶蜡芯

中图分类号 TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Investment Casting Process Design of Flowmeter Valve Body

Xu Guiqiang, Wang Lixin, Qin Xiaopeng, Wu Zhiyong, Zheng Rui
(Shijiazhuang Shenghua Group Co., Ltd.)

Abstract: Aiming at requirements of dense internal microstructure, flow channel with high dimensional accuracy and high surface roughness for investment castings of flow metervalue body, the liquid metal solidification process was simulated by ProCAST software, and the assembling process of wax tree was optimized to ensure the internal quality. Meanwhile, water soluble core was adopted to coordinate with filling process in shell to ensure the flow channel size and surface quality, which helps to shorten the development cycle and reduce the cost of trial production.

Key Words: Flowmeter Valve Body, Numerical Simulation, Water Soluble Core

液体流量计是用于测量密封管道中液体、气体、蒸汽流量的精密仪表,由于检测元件密封在检测体内,且内部无可动部件,无需进行现场维护,因此被广泛用于纺织印染、石油、化工、冶金制药、热电、造纸和消防工业

收稿日期:2022-08-15;修改稿收到日期:2022-10-25

第一作者简介:徐贵强,男,1980 年出生,工程师,石家庄(050800),E-mail:xuguiqiang1980@163.com

引用格式:徐贵强,王立新,秦晓朋,等. 流量计阀体精铸工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):970-973.

XU G Q, WANG L X, QIN X P, et al. Investment casting process design of flowmeter valve body[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):970-973.

对粒子数判断。

(2)接近辐条的轮辋部位冷隔生成量几乎为 0,生成冷隔的可能性较小。

(3)对比发现模拟结果与试验结果中冷隔的生成位置一致。

参 考 文 献

- [1] 蒋德平,姚宗湘.压铸镁合金件冷隔缺陷的分析及对策[J].铸造技术,2016,37(11):2 518-2 520.
- [2] 杨群收,康晋辉.铸件产生冷隔的原因及防止措施[J].金属加工(热加工),2021(6):108-110.
- [3] 王荣,王维昌.铸件浇不足和冷隔缺陷的成因及防止措施[J].金属加工(热加工),2008(17):60-62.
- [4] CAO L, LIAO D M, SUN F, et al. Numerical simulation of cold-lap defects during casting filling process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5-8):2 419-2 430.
- [5] 曹流.铸造充型过程中成形类缺陷演化机理及数值模拟研究[D].武汉:华中科技大学,2018.
- [6] 薄延强,王晨晨,王涵,等.基于 SPH 法纯镁包套等通道挤压三维数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2019,39(11):1 198-1 201.
- [7] 宋婷婷,薄延强,牛晓峰,等.基于 SPH 法的 AZ31 镁合金 BP-ECAP 过程三维数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2021,41(2):219-222.
- [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] GRENIER N, ANTUONO M, COLAGROSSI A, et al. An hamiltonianinter face SPH formulation formulti-fluid and free surface flows[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228:8 380-8 393.
- [10] 赵静雨.基于光滑粒子流体动力学的铸造充型过程三维数值模拟[D].太原:太原理工大学,2020.

(编辑:刘晨辉)