

基于气相追踪与气泡破碎判据的铸件卷气缺陷预测

陈云祥¹, 陈卓², 廖敦明²

(1. 浙江机电职业技术学院, 浙江杭州 310053; 2. 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 宏观卷气缺陷严重影响铸件的质量, 易造成应力集中等问题。微观气泡分散在铸件中, 对铸件质量的影响往往可以忽略。当前卷气缺陷预测的研究往往满足不了实际生产的需要, 因此在单向流动模型基础上, 通过追踪宏观气泡在每一计算时间步的动态变化和所受合力, 建立卷气预测模型, 判定宏观气泡是否会破碎成微观气泡, 在数值模拟结果中将未破碎的宏观气泡作为卷气缺陷标记出来。通过方向盘实物件卷气位置与卷气模型预测位置的对比, 证明卷气预测模型的正确性。

关键词: 数值模拟; 铸造; 卷气缺陷; 气相追踪; 气泡破碎

卷气缺陷在铸造过程中, 特别是压铸过程中极易产生, 对铸件的使用造成严重的影响。卷气缺陷会影响铸件的物理与力学性能, 造成应力集中等问题^[1], 使得铸件的使用性能下降^[2], 甚至使铸件报废。军工、航空和航天等行业的重要装备用铸件产品工况苛刻、铸造技术条件严格, 一般要求铸件内部不允许存在孔洞类缺陷, 包括易造成应力集中的卷气缺陷。卷气缺陷形成的主要原因是快速流动的金属液在复杂型腔中形成表面湍流翻卷或对流, 裹挟进入的气体无法及时逃逸并遗留在铸件中^[3]。压力铸造的高速高压特点更易引起卷气缺陷^[4]。卷气是铸件产品中主要气孔类型^[5]。

针对卷气缺陷的数值模拟及预测, 国内外很多专家学者做了相关的研究。Homayonifar等^[6]依据气相所在场受力情况, 提出破裂依据, 对卷气缺陷进行预测。Caboussat等^[7]依据不可压缩流方程组数值模拟卷气生成过程, 阐述了气体类型的演变。Kimatsuka等^[8]利用守恒定律, 将气体的析出与产生考虑进方程组中实现了气泡分布预测。赵海东等^[9]提出了单元表面无量纲距离、表面积充填比率和体积充填比率, 来描述自由表面的形状, 提出了相关计算模型并验证。以上每一种卷气模型都能够合理地解释相关试验条件下卷气的行为, 但是当气相动态变化剧烈、充型流动不平稳时, 预测的卷气位置与实物的卷气位置有较大差距。

本研究建立了基于气相追踪与气泡破碎判据的卷气缺陷预测模型。该模型在单向流动模型基础上, 追踪每一计算步内气泡的动态变化, 并对每个气泡的受力进行分析, 判定气泡是否破碎成微观气泡, 将始终未破碎气泡的位置作为该模型预测的卷气位置。为了对上述卷气预测模型的正确性进行验证, 针对铝合金方向盘压铸件的铸造过程进行数值模拟, 并在流动场基础上预测卷气缺陷位置, 将预测结果与实物件中的卷气位置进行对比。通过比较发现两者吻合度较高, 表明卷气预测模型的准确性。

作者简介:

陈云祥(1964-), 男, 副教授, 主要研究方向为铸造工艺设计。电话: 13958006825, E-mail: chyx-zy@163.com

通信作者:

廖敦明, 男, 教授, 博士。电话: 027-87558134, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

中图分类号: TG391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)07-0806-07

基金项目:

国家重点研发计划项目(2020YFB2008300-2)。

收稿日期:

2021-05-06 收到初稿,

2021-06-15 收到修订稿。

1 液相流动计算模型

1.1 充型过程的控制方程

在铸造数值模拟中, 金属液常被假设为不可压缩粘性流体且采用定常热物性

参数,采用质量守恒方程和动量守恒方程描述流体运动,如式(1)和(2)所示^[10]:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体速度, \mathbf{U} 为速度矢量, p 为静压强, \mathbf{F} 为源项, \mathbf{g} 为重力加速度, μ 为动力粘度, ∇ 为散度算子。

1.2 自由表面的追踪

采用了VOF (Volume of fluid) 法追踪界面运动和表征界面形状。在VOF法中,定义了一个变量用来表示流体中的液相体积分数,即流体域网格体积比^[11],假设在气液两相系统中某个网格单元处,若其中充满了液体,则为1,若充满了气体,则 α 为0,若气液混合则介于0和1之间,也就是说VOF法需要严格控制标的体积分数在0和1之间。标量传输方程如式(3)所示:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

2 卷气缺陷位置预测模型

通过以上液相流动计算模型的求解,可以计算出单相流动场的液相体积分数文件,在液相体积分数文件基础上,利用连通域填充算法^[12]标记各个孤立气相域,追踪气相在前后时刻的变化情况,计算得出自由表面处气液两相的压力差,同时求解自由表面的其他受力,依据合力判定气泡是否破碎,从而对未破碎的气泡进行统计,并设定为卷气缺陷预测出现的位置。

2.1 气相追踪

铸造充型过程中气相是在动态变化的,充型过程的气相追踪,就是聚焦于某一个气泡,找出前后两个相邻的时间步中该气泡所处位置的变化、属性变化等,观察宏观气相演变过程。气相追踪对于判定在相邻时间步内两个气泡的继承关系、力场的变化等具有重要意义。

充型过程中气相的变化如图1所示^[13],图中(1)~(4)分为气泡体积的变化、气泡的分裂、新气泡的生成、气泡的融合。

在图1中,为简化计算,将气相看作理想气体,气泡的分裂只考虑一个分裂成两个,气泡的融合也仅考虑两个融合为一个。新气泡的生成仅需要在当前时刻进行标记,参与下一时刻的气相追踪即可。气泡体积的变化、气泡的分裂和气泡的融合这三种情形,依据理想气体状态方程,得到的控制方程分别为:

$$P_0(t_0)V_0(t_0) = P_1(t_1)V_1(t_1) \quad (4)$$

$$P_0(t_0)V_0(t_0) = P_1(t_1)V_1(t_1) + P_2(t_2)V_2(t_2) \quad (5)$$

$$P_0(t_0)V_0(t_0) + P_1(t_1)V_1(t_1) = P_2(t_2)V_2(t_2) \quad (6)$$

式中: P 、 V 、 t 分别代表气泡内部的压力、气泡体积与不同的时刻,下标代表不同的气泡。

数值模拟计算设置的计算步长对气相的变化与追踪尤为重要。如果步长设置过小,导致流动场文件过多,计算时间过长;如果步长设置过大,前后时刻气相变化不连续,导致误差过大。对于气泡体积增大和气泡融合而言,两者都存在体积变大的情况,需要进行区分。同理对于气泡体积减小和气泡分裂而言,两者都存在体积变小的情况,也需要进行区分。综上所述,提出了以下准则用以解决以上问题。

(1) 气泡体积变化的准则。计算的时间间隔尽量小,尽量在充型总时间的1%以下;对于相邻两个时刻的两个气泡,只要其满足以下条件就认为两者是同一个气泡,且较晚时刻的气泡是较早时刻气泡体积变化得到的。条件就是这两个气泡在铸件中所处位置有70%以上是重合的,且较早时刻气泡所占的网格在较晚时刻中只有一个气泡与其重合,较晚时刻气泡所占网格在较早时刻只有一个气泡与其重合;如果较早时刻某个气泡与较晚时刻多个气泡重合,或较晚时刻某个气泡与较早时刻多个气泡重合,则不属于体积变化情况。

(2) 气泡融合的准则。对于相邻两个时刻,假设前一时刻有两个相邻的气泡,在后一时刻这两个气泡所处位置只存在一个气泡,就认为两者发生了融合,与体积变化最主要的区别在于前一时刻该位置处存在的气泡个数,若前一时刻只存在一个气泡则为体积变化,前一时刻存在两个气泡则为融合。

(3) 新气泡生成的准则。在充型过程中,前后两个时刻同一位置处,如果在前一时刻该处为液相或液

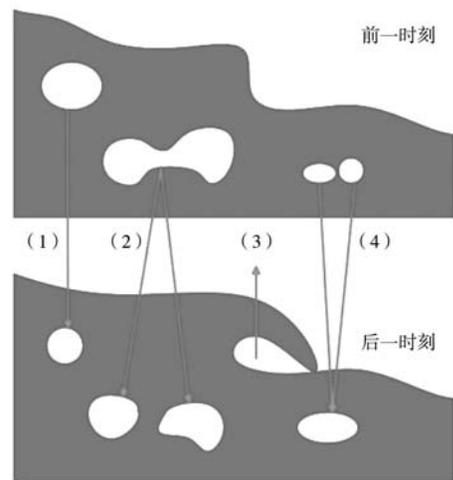


图1 金属液中气相变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas phase change in liquid metal

相前沿,后一时刻该处形成了孤立气相域,那么就认为该处新卷入了气体。

(4) 气泡分裂的准则。对于相邻两个时刻,假设前一时刻只有一个气泡,在后一时刻该气泡所处位置存在两个气泡,就认为气泡发生了分裂现象,与体积变化最主要的区别在于后一时刻该位置处存在的气泡个数,若后一时刻只存在一个气泡则为体积变化,后一时刻存在两个气泡则为分裂。

2.2 气泡破碎判据

随着充型过程的不断进行,液相、气相及自由表面的压力也是动态变化的。宏观气泡在液相的不断冲刷、挤压之下可能会发生破碎,形成微观气泡,而微观气泡对铸件性能的影响往往可以忽略不计,因此气泡能不能破碎对最终卷气缺陷位置具有重要意义。气泡的破碎与自由表面的受力有关,因此分析自由表面的受力情况至关重要,只要自由表面处有一个网格受力失衡,那么就会发生气泡的破碎。

气泡的破碎与自由表面受力情况有关。自由表面受力如图2所示^[6]。

重力对于其他力来说是个小量,因此忽略不计;气液两相压力差以及曳力垂直于表面,压力差指向气泡内部属于破坏气泡的力,曳力方向与流动方向相反,指向气泡外部属于维持气泡的力,毕成^[14]在博士论文指出合力为式(7)所示:

$$\sum F = F_p + F_D + F_s \quad (7)$$

式中: F_p 是由于气相和液相两侧压强之差引起的压力; F_D 是曳力; F_s 是自由表面受到的表面张力在法线方向的分量。

其中压力 F_p 计算公式如式(8)所描述:

$$F_p = (P_l - P_g)S \quad (8)$$

式中: P_l 是液相压强; P_g 是气相压强; S 是自由表面面积即受力面积。

曳力 F_D 的计算公式如式(9)所示:

$$F_D = -0.5C_D\rho_l U_l^2 S \quad (9)$$

式中: C_D 是曳力系数,主要取决于液相的雷诺数; ρ_l 是液相的密度; U_l 表示液相在曳力方向的绝对速度; S 是自由表面面积即受力面积。

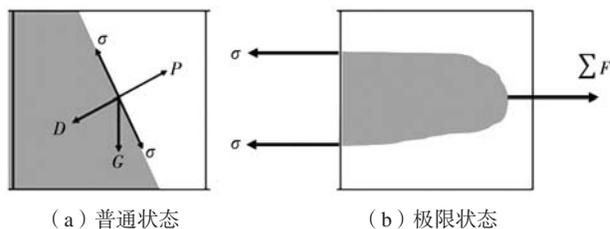


图2 自由表面受力情况
Fig. 2 Free surface force state

气泡形状的变化,表面张力的方向和大小也会随着变化,当到达破裂的临界点时,也就是极限状态,如图2b所示,此时表面张力全部用来维持气泡存在,故此时表面张力计算公式如式(10)所示^[11]:

$$F_s = 4\sigma \Delta l \quad (10)$$

由于受气泡形状的影响很大,因此在计算过程中必须对网格划分足够精细才能正确获得的数值,稳定性不足且误差较大,因此采用SPH (Smoothed particle hydrodynamics) 方法^[15]计算表面张力的方向。SPH方法首先需要构造一个色标函数,可将标量场作为色标函数,这里将液相体积分数作为所需的标量场,对这个标量场做哈密顿运算得到同时也是该标量场的梯度,这里给出了两个信息:一是梯度在液相或气相内部为0,在自由表面处有着较大值,可据此判断自由表面的位置;二是梯度的方向与表面张力的方向一致,因此在计算表面张力的时候,表面张力的方向由梯度的方向确定。表面张力计算公式为:

$$F_s = -\sigma \nabla^2 C_s \frac{\nabla C_s}{|\nabla C_s|} \quad (11)$$

依据以上公式,得到最终合力的表达式为:

$$\sum F = (F_l - F_g)S - 0.5C_D \rho_l U_l^2 S - \sigma \nabla^2 C_s \frac{\nabla C_s}{|\nabla C_s|} \quad (12)$$

当 $\sum F > 0$, 说明压力差大于维持稳定的曳力与表面张力,要破碎;当 $\sum F < 0$, 说明压力差小于维持稳定的曳力与表面张力,不破碎; $\sum F = 0$, 处于临界状态。以上就是气泡破碎的判据。

在追踪气相的过程中,存在着前一时刻气泡没有破碎,但是当前时刻气泡却消失了,这种情况是由于单相流未考虑到气液两相的作用,因此若出现这种情况,需要将前一时刻该气泡所在位置的网格,在当前时刻标记出来,并重新计算在当前时刻是否会破碎,若不破碎,则记录到最终卷气预测结果里面,若破碎则不需要记录。

2.3 卷气预测模型的建立

依据前两节的分析与讨论,可以自然而然地进行模型的建立,重点在于将气相追踪及破碎判据结合起来。气相追踪的目的在于分析演变过程、计算自由表面合力,所以可以将气相追踪模型作为气泡破碎判据中计算气液压力差的一部分。卷气预测模型流程如图3所示。

(1) 首先遍历流动场文件。

(2) 依据连通域填充算法^[12]在当前文件中寻找孤立气相,不存在气相则进行(9)。

(3) 读取前一时刻文件,对照前后时刻流动场文件,分析气泡演化过程。

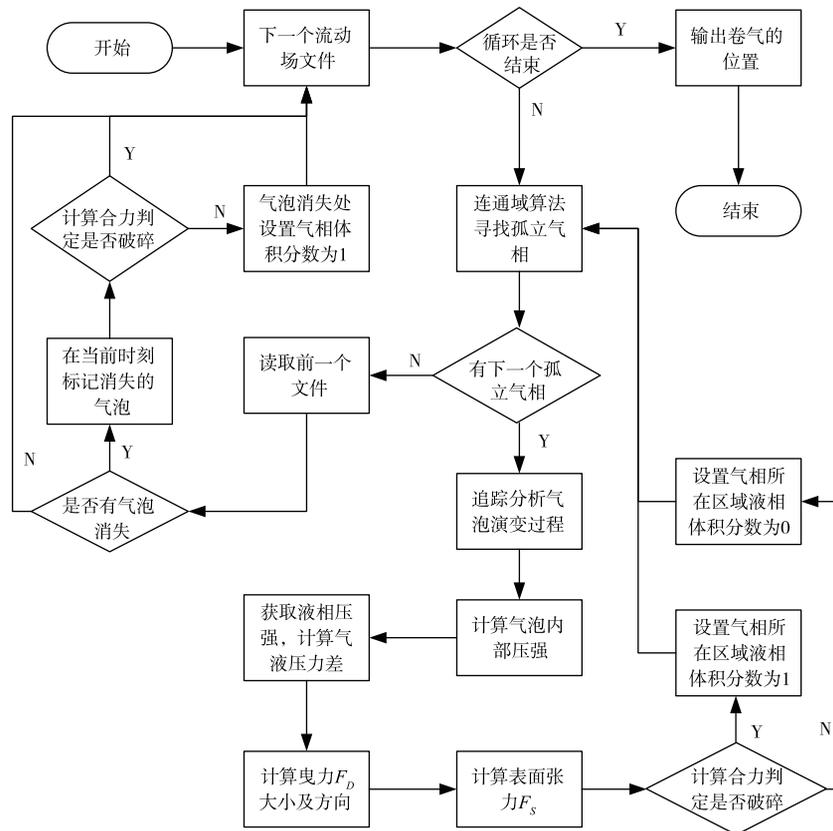


图3 卷气模型流程图

Fig. 3 Flow chart of air entrapment model

(4) 依据(3)气泡演化过程计算气泡内部压强。

(5) 从流场文件读取气泡周围液相压强, 针对每个网格, 将得到的气泡内部压强及每个自由表面网格周围液相压强计算压力差。

(6) 针对每个网格计算曳力大小及方向。

(7) 计算每个网格表面张力的大小及方向。

(8) 计算合力, 判断是否破碎。若破碎则记录卷气位置更新数据, 将该气泡所处的网格设置液相体积分分数为100%, 不破碎则设置该处气相体积分分数为100%。无论是否破碎, 继续执行(2)。

(9) 若不存在孤立气相域, 则读取上一时间步文件, 对比前后时刻分析是否有气泡消失。若有气泡消失, 则在当前文件标记出来, 计算在当前时刻是否破碎, 若不破碎则放入到最终预测结果里面, 不论是否破碎都需要继续遍历; 若没有气泡消失, 则继续遍历。

(10) 循环结束输出卷气位置, 即所有气相体积分分数为1位置。

3 铝合金方向盘压铸件实例

3.1 铸造工艺方案

本卷气预测模型是基于实验室自主开发的铸造

CAE软件, 因此首先需要使用软件数值模拟计算铸件的充型过程。本实例选用方向盘铝合金压铸件, 该铸件在生产过程中易出现卷气缺陷, 造成该铸件性能下降而成为废件, 因此正确预测卷气缺陷位置对于改进压铸工艺、优化产品设计制造方案具有重要意义。所用铸件整体尺寸为: 425 mm × 157 mm × 470 mm, 铝合金方向盘三维模型如图4所示。

材料选用压铸用铝合金, 合金代号YL113, 合金牌号是YZAlSi11Cu3, 合金的化学成分如表1所示。铸型材料使用H13热作模具钢, 牌号为4Cr5MoSiV1。铸件的浇注温度为680, 铸型的初始温度为20, 充型速度为2.3 m/s。

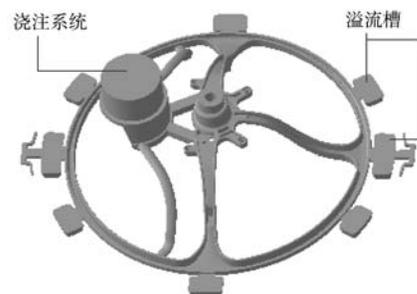


图4 铝合金方向盘示意图

Fig. 4 Schematic diagram of aluminum alloy steering wheel

数值模拟过程中设置的换热系数如表2所示。

3.2 数值模拟结果分析

图5为不考虑卷气缺陷的情况下不同时刻的液相体积分数。

卷气缺陷位置预测的基础是流动场，图5中包括液面所在的位置，该铸件在铸造过程中压铸时间短、充型压力大，通过观察结果可知该件由于壁薄且狭长，充型较为紊乱。数值模拟过程中并未考虑卷气缺陷的存在，因此充型100%时刻整个铸件被填满。由于流动不平稳速度快，可以推测出在液面交汇处流动不平稳，易裹挟入气体形成卷气。基于铸件充型过程流动场，使用基于气相追踪模型与气泡破碎判据的卷气位置预测模型遍历流动场文件进行计算，获得最终卷气

缺陷位置。如图6所示，卷气位置气相体积分数和实物缺陷的位置。

表1 YL113的化学成分
Table 1 Chemical composition of YL113 $w_B/\%$

Si	Cu	Zn	Al
9.5~11.5	2.0~3.0	≤2.9	余量

表2 数值模拟过程中设置的换热系数
Table 2 Heat transfer coefficients used during numerical simulation

类型	换热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
铸件-铸型	500
铸型-空气	10
铸件-空气	10

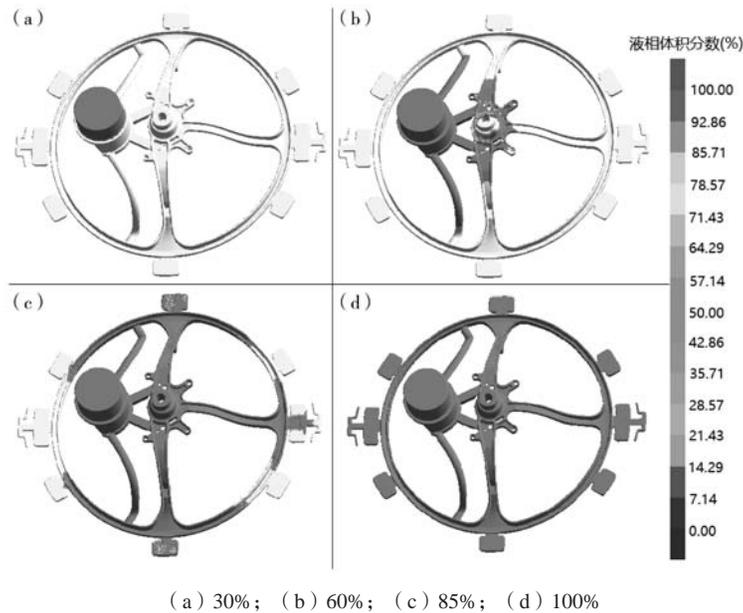


图5 液相在充型过程不同时刻的体积分数分布

Fig. 5 Volume fraction distribution of liquid phase at different time in mold filling process

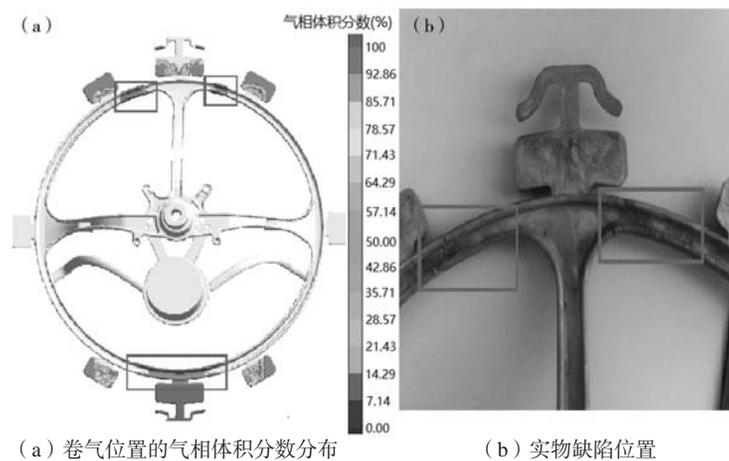


图6 卷气位置的气相体积分数分布和实物缺陷位置

Fig. 6 Gas volume fraction distribution of air entrapment position and location of physical defects

从图6a可以看出,气相体积分数越大,说明此处气体越多,更容易产生卷气缺陷,那么本程序所预测的卷气缺陷位置就在气相体积分数较大处。除溢流槽外,气相体积分数较大处在方向盘的上下两侧,由于方向盘下侧的气体最终会从溢流槽跑出,因此下侧的气相不作为参考,上侧位置处两个气相为最终模型所预测的卷气位置(图6a中上方线框)。如图6b所示,卷气位置主要在方向盘的上侧,远离浇注入口处,在该处由于存在着液相交汇,两股液相相遇时会互相冲击形成涡流,从而裹挟入气体,而交汇位置处并没有溢流槽,因此气体会存在于此处直到充型过程完成,在后续的冷却凝固过程中,气体无法溢出,铸件无法执行补缩,因此该处形成了卷气缺陷。

对比图6a和图6b,表明基于气相追踪模型与气泡破碎判据的卷气位置预测模型可以正确地得出方向盘铝合金压铸件卷气缺陷所在的位置,本章模型在卷气位置预测方面具有可行性;通过对比发现数值模拟结果与实物件溢流槽处都存在着气体卷入现象,因此可以发现溢流槽的正确设置对于避免卷气缺陷有着重要作用。

参考文献:

- [1] LAUKLIHI, ARNBERGL, LOHNEO. Effects of grain refiner additions on the grain structures in HPDC A356 castings [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2005, 18 (2): 65-72.
- [2] 刘琪明, 李俊涛. 铸造缺陷克星——对支架压铸件气孔和断裂的消灭 [C]//第十届中国国际压铸会议论文集. 中国机械工程学会铸造分会, 2015: 59-63.
- [3] 胡亮, 冯振平, 冯璐, 等. 铸造充型过程气孔缺陷的数值模拟研究 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (2): 306-308.
- [4] 赵浩峰, 张椿英, 于鹏, 等. 铝合金压铸件卷气缺陷的控制 [J]. 铸造工程, 2019, 43 (5): 72-74.
- [5] DAVID T S, HIRT C W. Modeling entrainment of air at turbulent free surfaces [J]. World Water and Environment Resources Congress, Salt Lake City, USA, 2004, 9: 559-574.
- [6] HOMAYONIFAR P, BABAEI R, ATTAR E, et al. Numerical modeling of splashing and aientrapment in high-pressure die casting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39 (3-4): 219-228.
- [7] CABOUSSAT A, PICASSO M, RAPPAZ J. Numerical simulation of free surface incompressible liquid flows surrounded by compressible gas [J]. Journal of Computational Physics, 2004, 203 (2): 626-649.
- [8] KIMATSUKA A, KUROKI Y. Mold filling simulation for predicting gas porosity [J]. IHI Engineering Review, 2007, 40 (2): 603-610.
- [9] 赵海东, OHNAKA I. 铝合金铸件充型过程及氧化膜卷入的数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2005 (8): 1200-1207.
- [10] 高智. 简化Navier-Stokes方程的层次结构及其力学内涵和应用 [J]. 中国科学 (A辑数学物理学天文学技术科学), 1988 (6): 625-640.
- [11] 张健, 方杰, 范波芹. VOF方法理论与应用综述 [J]. 水利水电科技进展, 2005 (2): 67-70.
- [12] 陈卓, 廖敦明, 陈涛. 基于扫描线的铸造气相域种子填充算法改进 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (1): 42-46.
- [13] 李帅君, 熊守美, JOHN Allison. 压铸充型过程中卷气现象的数值模拟研究 [J]. 金属学报, 2010, 46 (5): 554-560.
- [14] 毕成. 压铸充型过程卷气及压室预结晶组织的数值模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [15] ZHENG B X, SUN L, YU P. A novel interface method for two-dimensional multiphase SPH: Interface detection and surfacetension formulation [J]. Journal of Computational Physics, 2021, 431: 1-20.

4 结论

基于单相流模型,开发了基于气相追踪和气泡破碎判据的卷气预测模型。

(1) 气相追踪的作用主要是分析气泡在铸件充型过程数值模拟设定的任意有限时间段内前后时刻属性的变化,从而依据理想气体状态方程得到气泡内部压强的变化,并将气相压强作为合力计算的一部分传入合力计算程序。

(2) 气泡破碎判据通过对气液两相的界面处进行受力分析,计算液相压强、曳力、表面张力,结合气相追踪计算得出的气相压强以求解合力,并依据合力的大小分析气泡是否破碎成微观气泡,从而在结果中标记出未破碎的卷气位置。

(3) 为了验证卷气位置预测模型的正确性,采用铝合金方向盘压铸件进行充型过程计算,并针对流动场文件进行卷气预测模型的求解,将得到的卷气位置与实物件进行对比,证明了卷气预测模型的正确性。

Prediction of Air Entrapment Defect in Casings Based on Gas Phase Tracking and Bubble Breaking Criterion

CHEN Yun-xiang¹, CHEN Zhuo², LIAO Dun-ming²

(1. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

Macroscopical air entrapment defect seriously affects the quality of castings and easily leads to stress concentration and other problems. Micro bubbles disperse in the casting and the influence of micro bubbles on casting quality can be ignored. The current research on the prediction of air entrapment defect often cannot meet the needs of actual production, therefore, on the basis of one phase flow model, by tracking the dynamic changes and resultant force of macro bubbles in each calculation time step, the air entrapment prediction model was established to determine whether macro bubbles will break into micro bubbles. The unbroken macro bubbles were labeled as air entrapment defects in the numerical simulation results. The correctness of the prediction model was proved by comparing the actual air entrapment position of the steering wheel with the predicted position using the air entrapment model.

Key words:

numerical simulation; casting; air entrapment defect; gas phase tracking; bubble breaking
