

# 基于粒子聚合长大-随流运动耦合模型的夹渣运动轨迹跟踪

柏雪, 饶磊, 苗田雨, 游凯

(河海大学力学与材料学院, 江苏南京 211100)

**摘要:** 夹渣缺陷显著破坏了铸件基体的连续性, 在服役过程中极易造成局部应力集中, 从而促进疲劳裂纹的萌生和扩展, 因此对铸件内夹渣位置及形态的准确预测对产品的失效分析具有重要的意义。本文基于分散粒子随流运动数学模型, 在粒子随流运动过程中考虑粒子的聚合长大现象, 构建了铸型充型和铸件凝固全过程的粒子聚合长大-随流运动耦合数学模型。以铝合金手轮铸件为例, 研究了外来夹渣粒子在铸型内运动、聚合长大的全过程, 并对铸件中夹渣最终的分布特征及形态特征进行了统计分析。结果表明, 采用粒子聚合长大-随流运动耦合模型可准确地跟踪铸件成形过程中粒子的运动轨迹, 可为提高铸件夹渣预测精度提供理论参考。

**关键词:** 夹渣; 聚合长大; 耦合; 数值模拟

## 作者简介:

柏雪(1996-), 女, 硕士生, 研究方向为铸造过程仿真。E-mail: 1586277374@qq.com

## 通讯作者:

饶磊, 男, 教授。E-mail: raol@hhu.edu.cn

中图分类号: TG21<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)12-1329-07

## 基金项目:

国家自然科学基金(51775167)。

## 收稿日期:

2019-06-05 收到初稿,

2019-10-12 收到修订稿。

由于铸件的质量与浇注过程、生产环境密切相关, 且合金材料具有复杂的凝固行为和组织结构形态, 从而容易导致多种铸造缺陷的产生。其中夹渣缺陷属于典型的非连续性缺陷<sup>[1-3]</sup>。内嵌于金属基体中的夹渣物会在一定程度上削弱基体的连续性和机械强度, 在铸件服役过程中往往成为应力集中点, 并最终发展为零件疲劳裂纹萌生的起源部位<sup>[4-6]</sup>。这类缺陷的形态、尺寸、数量和分布等特征对铸件疲劳裂纹的萌生、扩展和断裂周期都有很大的影响<sup>[7-9]</sup>。

夹渣物按来源不同可分为内生夹渣和外来夹渣<sup>[10-12]</sup>。内生夹渣是指液态合金中的合金化元素与溶解在其中的氧、氮和硫的反应产物, 具有数量多、颗粒细小、呈弥散分布的特点; 而外来夹渣的主要来源是浇注过程中随金属液一起流入铸型中的金属氧化物及其他杂质粒子<sup>[13]</sup>。外来夹渣的引入大多是由于扒渣或挡渣不完全或氧化皮破裂而卷入金属液等原因造成。由于挡渣器件和浇注系统的阻挡, 目前铸件内夹渣普遍控制在一个较低的水平, 铸件内的少量分布式夹渣缺陷并不会对零件的静态力学性能产生较大影响, 但对于某些在交变载荷条件下工作的重要零件, 夹渣缺陷将会严重影响其疲劳寿命。大量的工程实践表明, 具有较小尺寸、呈高度弥散态的内生夹渣对疲劳裂纹形成的影响远小于外来夹渣, 且零件疲劳断裂经常起源于夹渣物聚集区或具有较大尺寸的夹渣。

铸件在浇注和凝固过程中, 夹渣粒子随金属液流动过程中会因不断相互碰撞、吸引而聚集长大, 因聚合后粒子体积、重量等发生变化而导致其对运动轨迹和最终停留位置有较大影响。粒子在金属液中的运动和聚合长大影响因素众多, 如铸型形状、铸型材质、型内粗糙度、金属液流速等, 并且运动与聚合现象耦合在一起, 是一个动态过程, 对其进行仿真预测较为困难。本文基于分散粒子随流运动模型建立了粒子的聚合长大-随流运动耦合数学模型, 以铝合金手轮铸件为例, 研究了粒子在型腔中充型和凝固过程中的运动轨迹及其在运动中的聚合长大行为, 并在此基础上分析了两种计算模型对铸件中夹渣位置及分布形态的影响规律, 对提高夹渣缺陷预测准确性具有较好的实际意义。

# 1 分散粒子聚合长大模型构建

## 1.1 模型的基本假设

为了简化计算过程、提高计算效率，针对粒子在金属液中运动的特点做出如下假设：

(1) 所有的粒子均为实心球体，粒子聚合后进行体积叠加，合并后的外形仍为球体，且不再分离；

(2) 在粒子作用域范围内采用小粒径粒子向大粒径粒子合并的策略，小粒子的体积和质量叠加到大粒子上，合并后的小粒径粒子淹没，输入粒子的总体积和总质量保持守恒；

(3) 考虑到高流速区金属液对粒子的剪切作用明显，粒子合并后极易分开，计算中设定速度阈值，在金属液流速高于阈值的区域内的粒子不发生聚合长大；

(4) 聚合计算中仅考虑动量守恒，忽略动能损失。

## 1.2 粒子聚合长大模型的构建

### 1.2.1 粒子运动控制方程

在金属液浇注及凝固过程中，夹渣粒子随金属液一起运动，期间主要受金属液的推动力、运动阻力、自身重力、浮力等，粒子受力如图1所示。

基于粒子的受力分析，粒子的运动控制方程如下<sup>[14-15]</sup>：

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \frac{du_{pi}}{dt} = (F_{pi} + F_{gi}) - (F_{Di} + F_{bi}) \quad (1)$$

式中：角标*i*表示*x*、*y*、*z*分量；*u<sub>pi</sub>*为粒子速度分量；*t*为时间；*ρ<sub>p</sub>*为粒子密度；*d<sub>p</sub>*为粒子直径；*F<sub>pi</sub>*为金属液内压力梯度传递给粒子的作用力分量；*F<sub>gi</sub>*为粒子重力分量；*F<sub>Di</sub>*为金属液对粒子的运动阻力分量；*F<sub>bi</sub>*表示粒子所受浮力分量。

金属液作为连续相，其运动控制方程为<sup>[16]</sup>：

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

$$F_i = \sum \left[ \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} (u_{pi} - u_i) \right] \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \quad (4)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (5)$$

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_i - u_{pi}|}{\mu} \quad (6)$$

式中：*u*为金属液流动速度，*ρ*为金属液密度，*P*为金属液内压力，*μ*为金属液粘度系数，*g<sub>i</sub>*为重力加速度分量，*F<sub>i</sub>*为相间耦合源项，表达离散相和连续相间的动量传递，*u<sub>i</sub>*金属液速度分量，*Re<sub>p</sub>*为相对粒子雷诺数，*C<sub>D</sub>*是阻力系数，*a<sub>1</sub>*、*a<sub>2</sub>*、*a<sub>3</sub>*为试验常数。

### 1.2.2 粒子聚合长大模型

在铸件充型和凝固过程中，夹渣粒子在金属液中的相互作用及其聚合过程原理如图2所示。

图2中粒子周围的虚线范围表示其作用范围，进入到粒子作用范围内的粒子将发生聚合，聚合过程中小粒子向大粒子聚合，最终形成一个较大体积的粒子。聚合后的粒子保持球形，但其质量和体积均为所有合并粒子的总和。粒子的作用范围与粒子直径、局部金属液粘度等条件有关。由于粒子处于不断的运动中，

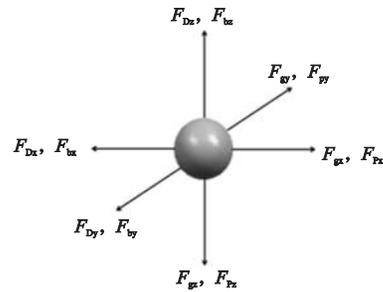


图1 粒子在金属液中受力示意图  
Fig. 1 Force diagram of a particle in molten metal

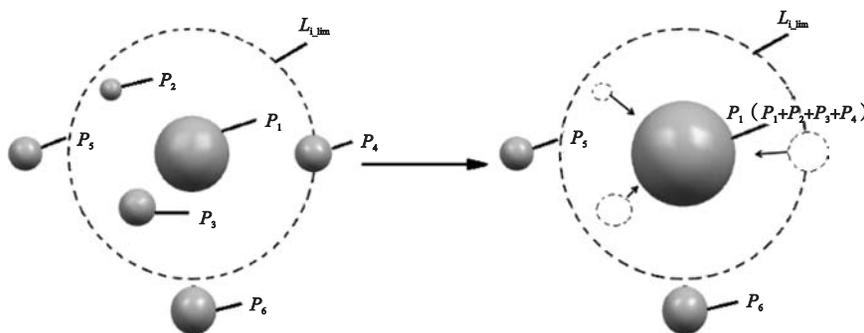


图2 夹渣粒子聚合长大原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of particles aggregation and growth

其位置和速度条件均在实时变化，因此在每一个计算时间步上都进行粒子聚合条件判断。触发聚合必须要同时满足表1中的约束条件。

表中 $L$ 表示空间两粒子球心之间的实际距离， $d_i$ 、 $d_j$ 分别表示粒子 $i$ 、 $j$ 的直径， $k$ 表示作用距离系数， $u_{p_i}$ 表

示粒子 $i$ 的绝对速度， $u_{p\_lim}$ 表示粒子临界绝对速度。

由于所有粒子均处于动态移动过程中，在满足上述约束条件的前提下，必须对两粒子的相对运动趋势进行判断，预判两粒子的运动发展趋势是相互靠近还是远离。图3为两粒子在三维空间内相对运动趋势图。

表1 夹渣粒子聚合长大约束条件  
Table 1 Constrain conditions of particles aggregation and growth

名称	约束条件	约束条件描述
距离约束条件	$L \leq \frac{1}{2}(d_i + d_j) \cdot k$ ，且 $k \geq 1$	空间两粒子之间的距离小于等于它们半径之和的 $k$ 倍
绝对速度约束条件	$ u_{p_i}  \leq  u_{p\_lim} $	粒子绝对速度小于临界绝对速度

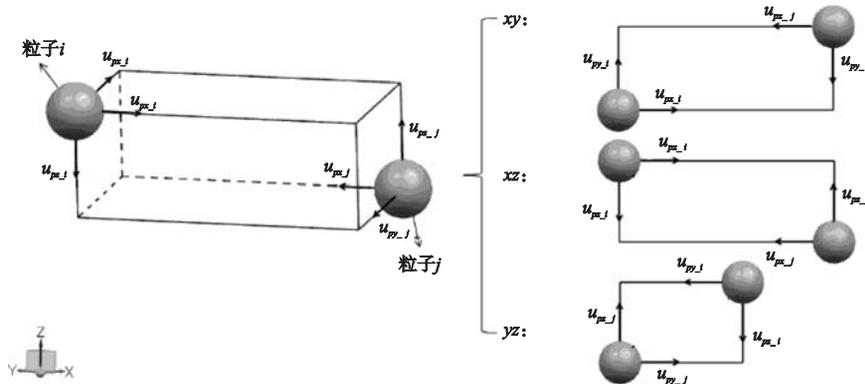


图3 两粒子在三维空间内相对运动趋势图

Fig. 3 Motion tendency of two particles in 3D space region

在进行相对运动趋势预判时，通过两粒子的相对速度及矢量积作为判断标准，以 $x$ 方向为例，表2表示两粒子在 $x$ 方向相对运动趋势判据。

$x_i$ 、 $x_j$ 表示粒子 $i$ 、 $j$ 在 $x$ 方向上的坐标； $u_{px_i}$ 、 $u_{px_j}$ 、

$u_{py_i}$ 、 $u_{py_j}$ 、 $u_{pz_i}$ 、 $u_{pz_j}$ 分别表示粒子 $i$ 、 $j$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的速度分量。 $u_{r\_lim}$ 为临界相对速度，为试验参数，与铸件形态、浇注速度等有关。粒子在 $y$ 或 $z$ 方向上的判断方法同上。

表2 两粒子在 $x$ 方向相对运动趋势判据  
Table 2 Motion trend criterion of two particles in  $x$  direction

相对运动趋势	判据
两粒子相向运动，可以聚合	$u_{px_i} \cdot u_{px_j} < 0$ 且 $(x_i - x_j) \cdot (u_{px_i} - u_{px_j}) < 0$
两粒子相背运动，不聚合	$u_{px_i} \cdot u_{px_j} < 0$ 且 $(x_i - x_j) \cdot (u_{px_i} - u_{px_j}) \geq 0$
两粒子同向运动，速度大的粒子追赶速度小的粒子，可以聚合	$u_{px_i} \cdot u_{px_j} > 0$ ， $ u_{px_i}  >  u_{px_j} $ 且 $u_{px_i} \cdot (x_i - x_j) < 0$ 或 $ u_{px_i}  <  u_{px_j} $ 且 $u_{px_i} \cdot (x_i - x_j) > 0$
两粒子同向运动，速度小的粒子追赶速度大的粒子，不聚合	$u_{px_i} \cdot u_{px_j} > 0$ ， $ u_{px_i}  >  u_{px_j} $ 且 $u_{px_i} \cdot (x_i - x_j) > 0$ 或 $ u_{px_i}  <  u_{px_j} $ 且 $u_{px_i} \cdot (x_i - x_j) < 0$ ，且 $ u_{px_i} - u_{px_j}  < u_{r\_lim}$

## 2 铸件夹渣分布及粒子运动轨迹仿真

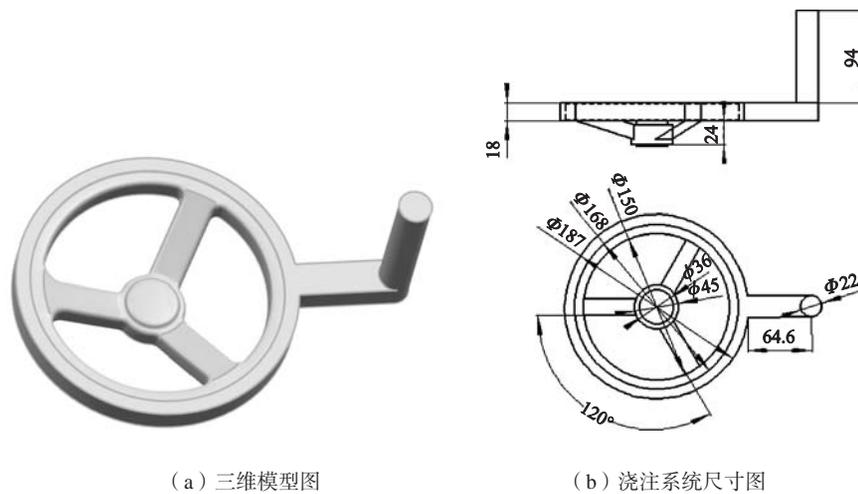
### 2.1 手轮铸件结构及浇注工艺

本文以手轮铸件作为研究对象，由于手轮铸件具有弧形对称结构，且金属液充型过程中会出现分流、汇流区域，较适合研究夹渣运动特征。铸件材质为 ZL102 合金，采用砂型铸造，浇注温度为680 ℃，充型速度是0.3 kg/s。试验采用二氧化硅粒子随流浇入铸型中的方法模拟外来粒子，二氧化硅的评价粒径为0.6 mm，密度为2.3 g/cm<sup>3</sup>，加入量为5 g，折算粒子总数约为2 400颗。铸件形态及浇注系统尺寸如图4所示。

### 2.2 铸件夹渣分布

对成形后的铸件进行了表面夹渣位置及夹渣形貌检测，图5为铸件及几个关键区域的局部夹渣形貌照片。

从图5中可以看出，铸件表面出现了大量的夹渣粒子，且粒子主要分布在铸件的汇流和分流区域，图中分别用A、B、C、D、E标出，而在铸件的其他位置的表面夹渣较少。从图5b-5e中可以看到，在A、B、C、D区域中，各个夹渣之间呈现分离状态，但每个夹渣均由多个二氧化硅粒子聚合而成。图5f清晰地显示了中心汇流区出现了大量聚集态的粒子，粒子数量和聚集程

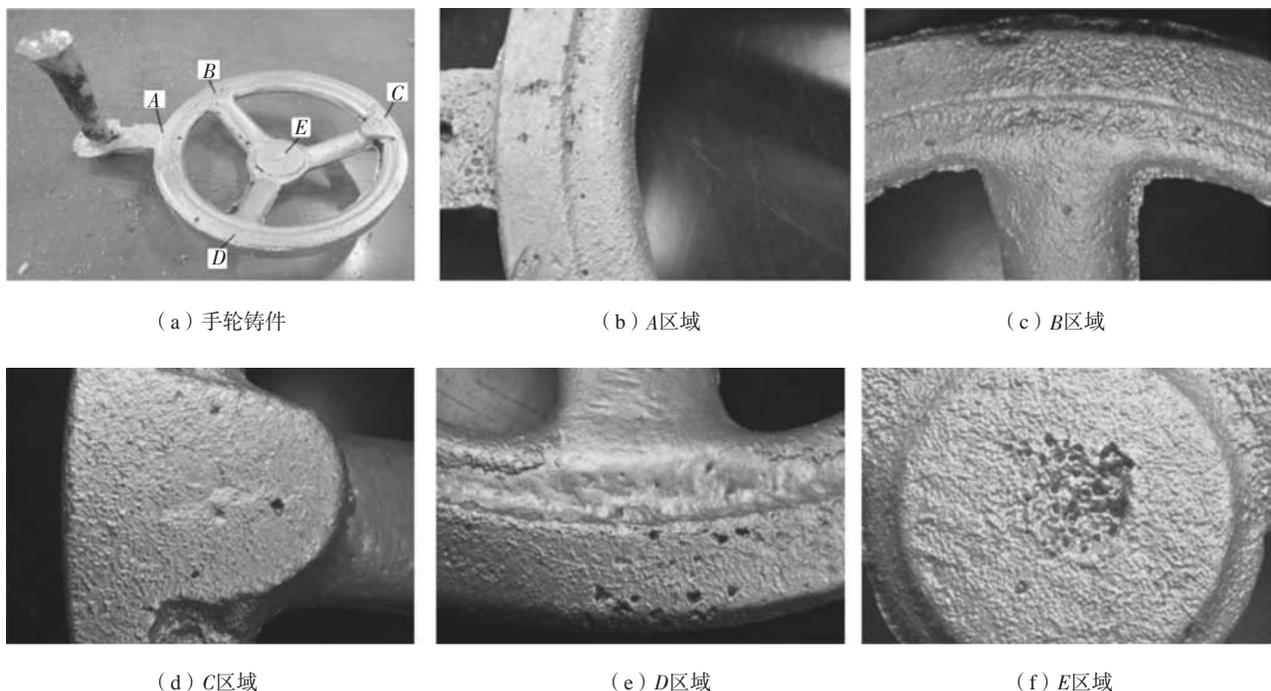


(a) 三维模型图

(b) 浇注系统尺寸图

图4 铸件三维模型及尺寸图

Fig. 4 The 3D model and dimensions of hand wheel casting with gating system



(a) 手轮铸件

(b) A区域

(c) B区域

(d) C区域

(e) D区域

(f) E区域

图5 铸件及局部夹渣形貌照片

Fig. 5 Aluminum alloy hand wheel casting and regions containing inclusions

度远高于其他区域。通过对铸件的表面观测发现，绝大多数表面粒子均是以聚合形态存在的，很少出现未聚合的单个粒子。图6显示了粒子的聚集形态和尺寸。

图6中显示观测区域中存在四个夹渣区，R1、R4区域由2~3颗粒子聚合而成，R2、R3区域有6~9颗粒子聚合而成（部分粒子已脱落）。粒子之间结合紧密，聚集形态呈现多样性。

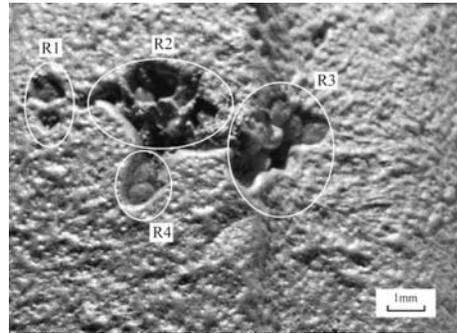


图6 粒子聚合形态

Fig. 6 Morphologies of aggregated particles

### 2.3 充型及凝固过程中粒子运动轨迹分析

基于粒子聚合长大-随流运动耦合数学模型，对手轮铸件进行充型和凝固过程模拟，图7为充型过程中铸件温度场分布及粒子位置及粒径分布图。

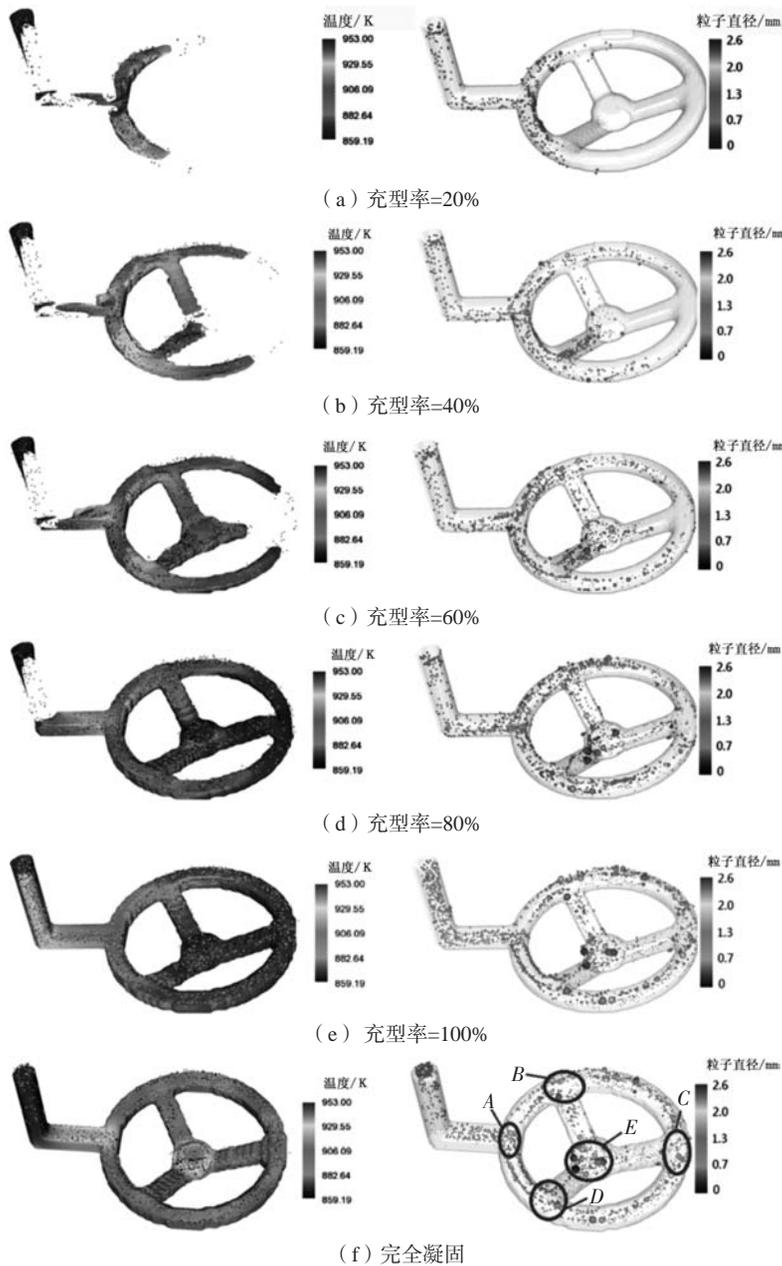


图7 铸件温度场、粒子轨迹及粒径分布

Fig. 7 Temperature field, motion trajectories and size distribution of particles

从图7a中可以看出,金属液由浇道进入铸型中,粒子随金属液不断进入直浇道中,由于直浇道中金属液流速较快,粒子运动过程中所受的剪切力较大,粒子在此区域中不易发生聚合长大。当金属液流经内浇道区域时,液流突然分成两股反向流,分别沿着轮缘的顺时针和逆时针方向流动。在A区域容易形成涡流,因涡流中粒子移动速度远低于在直浇道的流速,且粒子间距较小,因此粒子在A区域开始出现聚合长大倾向。

从图7b中可以看到,当金属液流经轮圈上的B、D区域时,金属液再次分流,一部分继续沿外轮圈继续流动,另一部分沿辐条向中部流动。经过分流后的金属液流速进一步降低,粒子在此位置的聚合倾向增大。

图7c、7d显示了金属液沿外轮圈继续流动,两支流在C区域发生交汇。两支流经碰撞融合后流速大幅度降低,因此粒子在此位置聚合长大现象明显。

图7e显示了轮圈的金属液沿三根辐条向中心区域流动,并在E区域汇集。E区域中金属液流动速度缓慢,且粒子间距较小,从而极易发生粒子的聚合长大。

图7f显示了最终的夹渣分布,型腔充满后,此时金属液的流动非常慢,粒子在自身重力和浮力的作用下开始上浮,上浮过程中继续发生聚合长大。由于粒子聚合使得夹渣体积快速增加,同时浮力的增量远大于重量的增加,因此聚合后的粒子更快地上浮于铸件

表面,而未聚合的粒子则大部分停留在铸件中。

## 2.4 粒子聚合行为对夹渣分布的影响

为了进一步研究粒子聚合长大行为对夹渣运动轨迹和停留位置的影响,分别采用聚合长大-随流运动耦合模型和仅用分散粒子随流运动模型对上述铸件的粒子运动进行了模拟计算,图8为两种模型的计算结果对比。

由图8可以看出,两种模型的计算结果有较大差别,分散粒子运动模型计算结果中粒子呈弥散状分布于铸件中,数量较多;而采用聚合长大-运动耦合模型计算结果中粒子出现明显的区域聚集倾向,同时粒子数大幅度减小。针对铸件的A、B、C、D、E五个关键分流区域,从图8a可以看出,采用分散粒子运动模型并没有预测出该区域出现了明显的粒子汇集现象,同时C区域的粒子聚集程度非常低。而采用聚合长大-运动耦合模型则较好地反映出在这几个分流区域的粒子聚合和上浮,在这几个关键区域均出现了粒子汇聚,这与试验结果是较为吻合的。表3列出了两种模型获得的夹渣尺寸、铸件内夹渣数量等计算结果。

从表3中可以看出,采用聚合长大-运动耦合模型获得的夹渣尺寸分布范围较广,同时铸件内夹渣数量也远低于分散粒子运动模型的计算结果,其计算结果更接近真实情况。

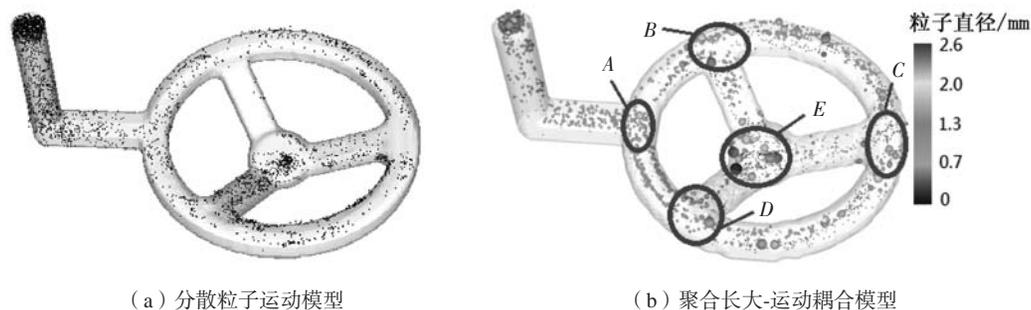


图8 两种计算模型计算结果对比

Fig. 8 Results comparison of two calculation models

表3 两种计算模型结果对比

Table 3 Results comparison of two calculation models

计算模型	最小粒径/mm	最大粒径/mm	平均粒径/mm	铸件内夹渣数量/个
分散粒子随流运动模型	0.6	0.6	0.6	1 158
聚合长大-随流运动模型	0.6	2.62	0.91	549

## 3 结论

(1) 在金属液充型和凝固过程中,夹渣粒子的位置和形貌处于动态变化中,粒子的聚合长大行为受到金属液流速、粒子相对速度、粒子运动方向、粒子实时尺寸等多种因素的影响,粒子的聚合长大形貌对其运动轨迹存在较大的影响,并直接影响到铸件最终的

夹渣位置。

(2) 粒子的聚合行为加剧了夹渣在浇冒口系统、汇流涡流区域、缓流区域等位置的滞留,同时促进了夹渣向铸件表面的移动,减小铸件的夹渣率。

(3) 采用粒子聚合长大-随流运动耦合模型能更为准确地跟踪铸件成形过程中粒子的运动轨迹,为提高铸件夹渣预测精度提供了理论参考。

**参考文献:**

- [1] 雷洪, 杨柳, 赫冀成. 湍流状态下钢液中夹渣物的分形长大过程 [J]. 工业加热, 2008, 37 (5): 14-16.
- [2] 朱权利, 夏勇, 陈家坚. 挤压铸造ZA27合金中的夹渣物分析 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 158-161.
- [3] 员飞, 黄顶俊, 苟华强. 球墨铸铁夹渣物的电解萃取研究 [J]. 铸造, 2016 (12): 1192-1197.
- [4] 舒志浩, 程树森, 赵晶晶. 钢液中夹渣物的碰撞长大及去除率 [J]. 北京科技大学学报, 2009 (S1): 118-120.
- [5] 雷洪, 赫冀成. 板坯连铸机内钢液流动和夹渣物碰撞长大行为 [J]. 金属学报, 2007, 43 (11): 1195-1200.
- [6] 孙泽棠, 傅高升, 王火生. 铝熔体中夹渣物与氢相互关系的分子动力学模拟探索 [J]. 铸造, 2018, 67 (6): 497-501.
- [7] 常桂华, 郭大勇, 高航. 钢帘线用盘条夹渣物成分控制技术对比 [J]. 金属制品, 2010, 36 (2): 59-62.
- [8] 徐匡迪, 肖丽俊. 特殊钢精炼中的脱氧及夹渣物控制 [J]. 钢铁, 2012, 47 (10): 1-13.
- [9] 陈本文, 栗红, 常桂华. 洁净钢中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹渣物预测模型 [J]. 炼钢, 2010 (4): 43-45.
- [10] 雷锐戈. 316L不锈钢夹渣物水平的改善 [J]. 世界钢铁, 2010, 10 (3): 34-38.
- [11] 吕春风, 尚德礼, 于广文. Ti-Al复合脱氧钢中夹渣物的析出行为及对钢的组织的影响 [J]. 冶金丛刊, 2010 (4): 1-5.
- [12] 饶磊, 胡启耀, 朱炼兵. 铸造过程中粒子运动轨迹及夹渣位置研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (12): 1433-1438.
- [13] 饶磊, 朱炼兵, 胡启耀, 等. 基于分散相模型的连铸钢包内粒子运动轨迹分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (11): 991-994.
- [14] 王亮, 董守平, 周建平, 等. 剪切流场中分散相液滴形变三维力学模型论证 [J]. 石油化工设备, 2011, 40 (2): 1-6.
- [15] 王耀, 李宏, 郭洛方. 钢液中球状夹渣物颗粒受力情况的数值模拟 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35 (11): 1437-1442.
- [16] PFERILER C, WU M, LUDWIG A. Influence of argon gas bubbles and non-metallic inclusions on the flow behavior in steel continuous casting [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 413: 115-120.

---

## Slag Particle Trajectory Tracking Based on Particle Aggregation Growth-Motion Coupling Model

BAI Xue, RAO Lei, MIAO Tian-yu, YOU Kai

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China)

**Abstract:**

The inclusion defects in the castings destroy the continuity of the metal matrix, and it is easy to cause local stress concentration during the service process, thus promoting the initiation and expansion of fatigue cracks. Accurate prediction of the position and shape of the slag inclusions in the castings is very important for the failure analysis of the parts. Based on the mathematical model of dispersed particle motion, the growth of slag particles is considered in the process of slag particle flow, and the particle-growth-motion coupled mathematical model of the whole process of mold filling and casting solidification is constructed. Taking aluminum alloy hand wheel castings as an example, the whole process of movement and polymerization of foreign slag particles in the mold was studied, and the final distribution characteristics and morphological characteristics of the slag inclusions in the castings were analyzed. The results show that using the dispersive particle polymerization growth-motion coupling mathematical model can accurately track the motion trajectory of particles in the process of casting forming, which will be a reference for the improvement of the prediction accuracy of the slag inclusions in the castings.

**Key words:**

inclusion; polymerization growth; couple; numerical simulation