试验研究 Experimental Research ● DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2022.10.003

特邀论文

# 气孔缺陷及含障碍物的气泡动力学 三维相场模拟研究

张 昂<sup>1</sup>,李闯名<sup>1</sup>,苏东泊<sup>1</sup>,杜经莲<sup>2</sup>,刘 峰<sup>2</sup>,蒋 斌<sup>1</sup>

(1.重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心,重庆 400044 2.西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘 要:镁合金铸造过程中气孔缺陷难以避免,而气孔源于未从金属液中逸出的气泡。本文以 Mg-Al 合金为研究对 象,分析了铸态 Mg-30%Al(质量分数)合金的气孔缺陷特征。通过将气泡在熔体中的动力学行为抽象为在含障碍物微通 道内的动力学行为,以及采用保守相场-格子玻尔兹曼模型,研究了气泡在含障碍物微通道内的演变规律。通过引入形 状参数对气泡形状进行量化,研究了障碍物尺寸对气泡动力学的影响。结果表明,随着障碍物宽度的增大,气泡会由被 障碍物分裂变为被阻挡,并在后续上升过程中,呈现不同的动力学特征。

关键词:镁合金;气孔;气泡动力学;障碍物;相场模拟

中图分类号: TG146.2+2 文献标识码:A

A 文章编号:1000-8365(2022)10-0863-06

# Gas Porosity Defect and Three–Dimensional Phase–Field Simulation of Bubble Dynamics in a Microchannel with Obstacle

ZHANG Ang<sup>1</sup>, LI Chuangming<sup>1</sup>, SU Dongbo<sup>1</sup>, DU Jinglian<sup>2</sup>, LIU Feng<sup>2</sup>, JIANG Bin<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract**: Gas porosity, which is difficult to avoid during the solidification of magnesium alloys, originates from gas bubbles that do not escape from the melt. In this work, the gas porosity defect in the Mg-30%Al (mass fraction) alloy is characterized, and the bubble dynamics in the melt are investigated by abstracting such dynamics as bubble rising behavior in a microchannel with the obstacle. A conservative phase-field lattice-Boltzmann model is employed to solve the bubble dynamics, and two shape parameters are introduced to characterize the bubble shape. The effect of the obstacle width on the bubble dynamics is quantified. The results show that the bubble changes from being split by the obstacle to being blocked with increasing obstacle width and presents different dynamic characteristics in the subsequent rising process. **Key words**: magnesium alloy; gas porosity; bubble dynamics; obstacle; phase-field simulation

作为最轻的金属结构材料,镁合金因其优异的 物理特性、较低的成本、出色的力学性能及吸能效果, 在汽车和航空航天等领域有着广阔的应用前景,更 是享有"21世纪的绿色结构材料"美誉<sup>[1-2]</sup>。当前,镁 合金零部件主要通过铸造工艺生产,例如座椅框 架、方向盘轴等<sup>[3-4]</sup>。镁合金铸造成形工艺主要有砂型 铸造、金属型铸造、挤压铸造、压铸等,无论采用哪种 成形工艺,气孔缺陷都难以避免<sup>[5-6]</sup>。气孔来源于未 从金属液中逸出的气泡,如果凝固速度大于气泡的

收稿日期:2022-09-09

作者简介:张 昂(1993—),博士,副教授.研究方向:镁合金凝 固组织和缺陷控制等.

Email: ang zhang@cqu.edu.cn

外逸速度,气泡就会残留在金属中形成气孔<sup>[7]</sup>。按照 形成原因,气孔可分为卷入性气孔、侵入性气孔、反应 性气孔和析出性气孔等<sup>[8]</sup>。气孔会对铸件的性能产 生负面影响,如减少材料的有效承载面积、产生应力 集中、恶化力学性能等,从而影响铸件的使用寿命。

在实际工况中, 气泡的动力学行为极其复杂, 不 仅受浮力、表面张力等的作用, 其形貌还会受到熔体 中杂质颗粒、固体组织等障碍物的影响, 如凝固过程 中的枝晶组织会与气泡发生复杂的相互作用<sup>[9-10]</sup>。因 此,研究铸造过程熔体中的气泡动力学行为对减少 和消除气孔缺陷至关重要<sup>[11]</sup>。然而, 在镁合金零部件 的铸造过程中, 熔体温度高、流速大, 再加上铸造模 具不透明、合金易氧化等原因, 采用实验手段对铸造 过程中的气泡动力学行为进行直接的观察和研究存 在较大的困难<sup>[12]</sup>。

通过数值模拟,将气泡在镁合金熔体中的动力

基金项目:国家自然科学基金(52101125、U2037601);中央高校 基本科研业务费(2022CDJKYJH042);凝固技术国家 重点实验室开放课题(SKLSP202206)

学行为抽象为气泡在含障碍物微通道内的动力学 行为,将凝固过程中的枝晶组织抽象为不同尺寸和 形状的障碍物,可以对气泡和障碍物间的相互作用 进行定量化研究。本文在对镁合金气孔缺陷实验表 征的基础上,借助数值模拟技术,将熔体中的气液 两相流行为抽象化,通过在计算域中设置可变宽度 的障碍物,研究障碍物尺寸对气泡动力学的影响, 为研究镁合金熔体中的气泡动力学行为及气孔缺 陷的控制提供指导。研究成果对提高镁合金铸件性 能和扩大镁合金在汽车等行业中的应用具有重要 意义。

## 1 实验和模型方法

#### 1.1 实验方法

本文选用铸态 Mg-30%Al(质量分数)合金作为 研究对象。实验中所用的原材料为高纯 Mg(99.99%)和 纯铝(99.9%)。合金在 RPM-20-9 坩埚熔化电阻炉中 进行熔炼,炉膛预热温度为 500 ℃,熔炼时通入 CO<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub> 为 99:1 的混合保护气体,熔炼结束后采用 圆柱形铸造模具进行浇注,模具内壁均匀涂抹氮化 硼-无水乙醇悬浮液,模具预热温度为 200 ℃。

将制备的圆柱铸锭沿中轴线进行取样,样品尺 寸为 10 mm×10 mm×5 mm。使用碳化硅砂纸对试样 进行水磨,研磨完成后,先后用蒸馏水和无水乙醇 冲洗试样,再用风干机吹干备用。采用金相腐蚀液 (2 mL 冰乙酸+10 mL 无水乙醇+过饱和苦味酸)对 试样表面进行腐蚀,并用无水乙醇冲洗合金试样表 面的腐蚀产物,吹干后进行显微组织观察。使用 JEOL JSM-7800F 场发射扫描电子显微镜 (SEM)对 铸态合金的显微组织和气孔的分布、形貌等进行观 察。合金实际成分采用电感耦合等离子体发射光谱 仪(ICP-OES)进行测定。

1.2 相场-格子玻尔兹曼模型

1.2.1 保守相场模型

引入非守恒序参量,即相场变量 $\phi$ ,刻画体系状态。当 $\phi=0$ 时,表示液相;当 $\phi=1$ 时,表示气相;当 $\phi$ 在 0~1之间取值时,表示气液两相弥散界面。通过 获得每个时刻 $\phi$ 的分布来确定体系的演变。 $\phi$ 的控制方程为<sup>[13]</sup>:

 $\partial_{t}\phi + \nabla \cdot (\nu\phi) = \nabla \cdot \left[ M \left( \nabla \phi - \frac{\phi - \phi^{2}}{\delta} \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right]$ (1) 式中, *M* 是迁移率;  $\delta$  是界面厚度参数;  $\nu$  是流速 矢量。

在平衡状态下,沿界面法线方向, $\phi$ 的变化用双 曲正切来描述,即:

$$\phi^{\text{eq}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{\varepsilon}{2\delta}\right) \tag{2}$$

式中, $\varepsilon$ 是沿界面法线方向的坐标。

#### 1.2.2 格子玻尔兹曼模型

当气泡接触障碍物时,会出现较大的变形,如挤 压、分裂等,影响数值求解的稳定性<sup>[14]</sup>。考虑到相界 面本质上是介观的,而格子玻尔兹曼模型也是介观 的,因此采用基于介观动力学的格子玻尔兹曼方法 计算流体速度。相比基于连续介质的 Navier-Stokes 方程,格子玻尔兹曼模型假设真实的流体由一系列 粒子组成,稳定性高,易于处理复杂边界。基于Bhatnagar-Gross-Krook (BGK)碰撞模型<sup>[15]</sup>,分布函数的演 化描述如下:

$$f_{i}(r+\delta r, t+\delta t) = f_{i}(r, t) - \frac{f_{i}(r, t) - f_{i}^{eq}(r, t)}{\tau} + F_{i}(r, t)\delta t \quad (3)$$

式中, $f_i(r, t)$ 是分布函数; $\tau$ 是弛豫时间,它与运动黏度 $v_{kin}$ 有关:

$$\tau = \frac{1}{2} + \frac{3\upsilon_{\rm kin}}{c^2 \,\delta t} \tag{4}$$

 $f_{i}^{eq}(r,t)$ 是平衡分布函数,表示为:

$$f_{i}^{eq} = \rho w_{i} \left( 1 + \frac{3(c_{i} \cdot \nu)}{c^{2}} + \frac{3(c_{i} \cdot \nu)^{2}}{2c^{4}} - \frac{3(\nu \cdot \nu)}{2c^{2}} \right)$$
(5)

式中, $\rho$  是粒子密度; $c=\delta x/\delta t=1$  是晶格速度; $\delta x$  和  $\delta t$ 分别是晶格间距和格子玻尔兹曼模型中的时间步 长; $w_i$  是权重系数。图 1 为格子玻尔兹曼模型中的三 维十九速度(D3Q19)离散速度模型,其中 3 是指空 间维数,19 是指离散速度模型中格子分速度方向的 数目。因 D3Q19 模型具有较高的精确度和数值稳定 性,所以采用 D3Q19 模型。对于 D3Q19 模型, $w_0=$  $1/3, w_{1-6}=1/18, w_{7-18}=1/36$ , 沿各自方向的离散速度 $c_i$ 见 表 1。



$$F_i(r, t)$$
是离散外力:

$$F_{i}(r,t) = \left(1 - \frac{1}{2\tau}\right) w_{i} \left(\frac{3(c_{i} - \nu)}{c^{2}} + \frac{9(c_{i} \cdot \nu)c_{i}}{c^{4}}\right) \cdot (F_{g} + F_{s}) \quad (6)$$

$$F_{\rm g} = -(\rho - \rho_{\rm l})g \tag{7}$$

$$F_{s} = \mu \nabla \phi \qquad (8)$$

表1 D3Q19模型中 $c_i$ 的3个速度分量 $c_i=(u, v, w)$ 

					~~		eroereg	eop		01 01 0	,.,	,							
i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
и	0	1	-1	0	0	0	0	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0	0	0	0
ν	0	0	0	1	-1	0	0	1	1	-1	-1	0	0	0	0	1	-1	-1	1
w	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1

Tab.1 Three velocity components of  $c_i = (u, v, w)$  in the D3Q19 model

式中, $F_g$ 是驱动气泡运动的浮力(或惯性力)密度;g是沿 y 轴负方向的重力加速度; $F_s$ 是表面张力密度;  $\mu$  是化学势,它取决于  $\phi$  的梯度<sup>[16-17]</sup>,即:

$$\mu = \frac{12\sigma\phi(\phi-1)(\phi-1/2)}{\delta} - 6\sigma\delta\nabla^{2}\phi \tag{9}$$

式中, $\sigma$ 是表面张力系数。

这 2 种力揭示了气泡上升动量和张力效应间 的竞争关系。较大的浮力(或惯性力)意味着更快的 上升速度和更大的变形,而较大的表面张力对应于 接近球形的形状,即变形较小。

考虑这2个力的影响,流速的计算公式如下:

$$\nu = \sum_{i} \frac{f_{i}c_{i}}{2} + \frac{\delta t(F_{g} + F_{s})}{2\rho}$$
(10)

将相场法和格子玻尔兹曼模型相结合,建立了 相场-格子玻尔兹曼模型,相场法用于刻画气液界 面,格子玻尔兹曼模型用于刻画气液两相流,该方 法结合了相场法的弥散界面特征和格子玻尔兹曼 模型的稳定性和边界易处理等特点,提高了气泡动 力学行为模拟的稳定性。

1.2.3 离散化

为了减小离散误差,式(1)在空间上采用显式有限差分法离散,在时间上用四阶 Runge-Kutta 法离散。在四阶 Runge-Kutta 法中,相场值的增量由 4 个估计斜率的加权平均值确定,其权重分别为1/6,2/6,2/6,1/6,即:

$\phi^{n+1}-\phi^n$	$f(\phi^{n})+2f(\phi^{n}+k_{1}/2)+2f(\phi^{n}+k_{2}/2)+f(\phi^{n}+k_{3})$
dt	6

	(11)
$L = \mathcal{U} \perp \mathbf{n}$	(12)

$$k_1 = f(\phi^n + k_1/2)$$
 (12)

$$k_{3} = f(\phi^{n} + k_{2}/2)$$

式中, $\phi^n$  是  $\phi(n)$ 在 *n* 时刻的 Runge-Kutta 近似值,

$$f(\phi) = \partial_t \phi = \nabla \cdot \left[ M \left( \nabla \phi - \frac{\phi - \phi^2}{\delta} \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) - \nu \phi \right] \quad (15)$$

当 4 个估计斜率均等于  $k_1$  时,四阶 Runge-Kutta 法还原成一阶欧拉法。

为了保持高稳定性,避免可能导致数值不稳定的 梯度急剧变化,式(16~17)中的散度和拉普拉斯算子 采用 D3Q19 晶格上的 18 个最近邻点进行离散<sup>[18]</sup>。

$$\nabla \phi = \frac{3}{2c\delta t} \begin{cases} i \sum_{\alpha=1}^{18} w_{\alpha}c_{\alpha} \cdot i[\phi(r+c_{\alpha}\delta t) - \phi(r-c_{\alpha}\delta t)] \\ j \sum_{\alpha=1}^{18} w_{\alpha}c_{\alpha} \cdot j[\phi(r+c_{\alpha}\delta t) - \phi(r-c_{\alpha}\delta t)] \\ k \sum_{\alpha=1}^{18} w_{\alpha}c_{\alpha} \cdot k[\phi(r+c_{\alpha}\delta t) - \phi(r-c_{\alpha}\delta t)] \end{cases}$$
(16)  
$$\nabla^{-2}\phi = \frac{1}{6(c\delta t)^{2}} \left[ \sum_{\alpha=1}^{18} \phi(r+c_{\alpha}\delta t) + \sum_{\alpha=1}^{6} \phi(r+c_{\alpha}\delta t) - 24\phi(r) \right]$$
(17)

式中,i,j和 k分别是沿 x,y和 z轴的单位向量。

# 2 结果与讨论

2.1 实验结果分析

通过 ICP-OES 测得样品实际成分为 Mg-30.37%Al (质量分数),SEM 组织如图 2 所示,气孔形貌相对比 较规则,周边平滑,呈现圆形或近圆形。从分布上来 看,气孔集中于 α-Mg 和共晶组织的交界处,呈现单 个或几个气孔同时存在的特征。此外,气孔还会与枝 晶发生相互作用。气孔影响枝晶的生长,阻碍枝晶发 展,枝晶会影响气体的运动,改变气孔形貌。

通过对不同位置试样的组织形貌进行对比,发现气孔沿铸锭高度方向的分布具有一定规律性,在



(14)

图 2 铸态 Mg-30%Al(质量分数)合金的 SEM 组织图片 Fig.2 SEM images of the as-cast Mg-30%Al(mass fraction) alloys

铸锭底部区域气孔数量较少,随着取样位置的升高, 气孔数量增加。这一方面是由于位置相对靠上的熔 体温度较低,气体的溶解度较小,另一方面是由于气 泡形成后会上浮,容易在铸锭上部积聚。

2.2 数值模拟分析

#### 2.2.1 初始条件和边界设置

图 3 为三维数值模拟中障碍物的设置和气泡初 始位置。球形气泡初始直径  $d_0$  为 32 dx,中心位于 (0.5*X*, 0.5*Y*, 0.2*Z*),其中 *X*=160 dx,*Y*=160 dx,*Z*=384 dx, 表示矩形微通道的大小,dx 为网格尺寸。障碍物为 长方体形状,中心位于(0.5*X*, 0.5*Y*, 0.5*Z*),沿 *X*-*Z* 中 央纵截面截取障碍物,其二维截面中障碍物纵向尺 寸为  $ver/d_0=1$ ,横向尺寸设置 6 种宽度, $hor/d_0$  分别 为 1/32、1/16、1/8、1/4、1/2 和 1。无量纲参数设置如 下:液相密度  $\rho_1=1.0$ ,气相密度  $\rho_g=1.0\times10^{-3}$ ,迁移率 *M* =1.0×10<sup>-2</sup>,液体运动黏度  $v_{kin}=1.500\times10^{-1}$ ,表面张力  $\sigma$ =5.5×10<sup>-2</sup>,界面厚度  $\delta=3.2$ ,dx=0.8。对应的Reynolds、 Eötvös 和 Morton 3 个无量纲数的大小分别为34.12、 14.88 和 2.43×10<sup>-3</sup>,位于 Bhaga 和 Weber<sup>[19]</sup>提出的气 泡形状图谱中的球形区域。





在计算域所有壁面和障碍物表面,对相场变量 采用零诺伊曼边界条件,对速度场变量采用无滑移 边界条件。流动发生在液相和气相中,气泡碰到障碍 物表面和壁面后发生挤压变形。

2.2.2 不同障碍物设置下的气泡动力学

图 4 为不同障碍物设置下的气泡演变过程模拟 结果。气泡轮廓根据  $\phi=0.5$  提取。在惯性力、黏性力 和表面张力的综合作用下,气泡沿中心对称轴自底 向上运动,在  $hor/d_0 \leq 1/4$  时,提取 9 个时刻;当 $hor/d_0 > 1/4$  时,因障碍物宽度较大,气泡到达障碍物附近后 无法继续向上运动,提取 4 个时刻。障碍物通过影响 流场分布,改变了气泡动力学。当矩形障碍物宽度  $hor/d_0 \leq 1/4$  时,气泡接触障碍物后,受障碍物切割作 用发生分裂,形成两个子气泡继续上升,因左右两侧 流场分布存在差异,气泡具有不同的上升速度,如 图 4(a~d)所示;当  $hor/d_0 > 1/4$  时,气泡到达障碍物底 部后,无法继续上升,发生挤压变形,如图 4(e~f) 所示。

为了表征气泡形状的演变,引入三维形状因子 FF3 和二维形状因子 FF2 两个形状参数量化气泡形 状与流场条件、障碍物几何尺寸间的关系。

三维形状因子 FF3 定义为气泡实测体积与具 有和气泡相同表面积的球的体积之比,表示气泡形 状和球之间的相似性,取值范围(0,1],三维形状因 子 FF3 越接近1,气泡越接近球形,其表达式为:

$$FF3 = \frac{6V\sqrt{\pi}}{\sqrt{S^3}} \tag{18}$$

式中,V为气泡的实测体积;S为气泡的实测表面积。

二维形状因子 FF2 定义为气泡在 y=0.5Y 面上 的横截面积与具有和气泡横截面相同周长的圆的面 积之比,表示气泡横截面和圆之间的相似性,取值范 围 (0,1],二维形状因子 FF2 越接近 1,气泡横截面 越接近圆形,其表达式为:



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$FF2 = \frac{4\pi A}{P} \tag{19}$$

式中,A 为气泡在 y=0.5Y 面上的横截面积;P 为气 泡在 y=0.5Y 面上的横截周长。

图 5 为在计算域内设置不同类型的障碍物时, 气泡的三维形状因子 *FF*3 和二维形状因子 *FF*2 随 时间的变化,其中  $t^*=1$  000  $dt_o$  在气泡接触到障碍物 之前,形状因子--时间曲线重合;接触到障碍物后, 曲线发生较大波动。当矩形障碍物宽度 *hor/d\_o*>1/4 时,气泡碰到障碍物后发生分裂,分裂后的气泡表 面积、横截周长等发生较大变化,在  $t/t^*=1.1$  时,*FF*3 和 *FF*2 出现明显下降。分裂后新形成的两个子气泡 绕过障碍物后,继续上升,形貌变化较小,*FF*3 和 *FF*2 出现微小波动。当 *hor/d\_o*>1/4 时,气泡受到障碍 物阻挡无法继续上浮,在障碍物底部发生挤压变 形,*FF*3 和 *FF*2 在 1.1  $\leq t/t^* \leq 2.2$  时出现明显波动; 在后续过程中,气泡形状维持近球形,*FF*3 和 *FF*2 趋 于稳定;由于气泡没有发生分裂,气泡的形状因子 比 *hor/d\_o*≤1/4 时大。

图 6 为形状参数 FF3 和 FF2 与矩形障碍物宽度 hor 的关系。当矩形障碍物宽度 hor 较小时,气泡受到障碍物的切割作用,形状发生较大变化。hor 越小,气泡碰到障碍物后发生分裂的倾向越明显,FF3 和 FF2 越小。当矩形障碍物宽度 hor/d<sub>0</sub>>1/4 时,气泡

受到障碍物阻挡。hor 越大,阻挡作用越强,但受限于 气泡直径和障碍物间的相对大小, 气泡变形度并不 是越来越大。以图 4(e)为例,气泡虽被障碍物阻挡, 但碰到障碍物后,会将障碍物包裹,产生比图 4(f)更 大的变形,FF3 和 FF2 随 hor 的增大而增大。

气泡在计算域顶部的变形也被考虑,通过和在 障碍物附近的变形进行对比,FF3 和 FF2 的值均变 小,且在障碍物宽度变化时,其值基本没有变化,平 均值分别为 0.68 和 0.48,表明气泡碰到计算域顶部 后虽会发生进一步的变形,但该变形受障碍物宽度 的影响较小。

微通道中的气泡动力学与障碍物的几何尺寸有 很大关系。随着障碍物宽度的增大,障碍物对气泡运 动的影响由切割作用变为阻挡作用。结合图4中的 气泡轮廓图及图5~6中形状参数的变化,障碍物的 切割作用会导致更大的气泡变形。这为研究凝固过 程中气泡与凝固组织间的相互作用提供了指导。以 凝固过程为例,枝晶尖端半径对气泡的上升过程会 产生明显影响,通过调控凝固条件,改变枝晶尺寸, 将改变气泡的分裂和上升行为,从而影响气泡从熔 体中的逸出过程。

### 3 结论



(1)铸态 Mg-Al 合金中的气孔缺陷集中于 α-Mg

图 6 形状参数与障碍物宽度的关系 Fig.6 Relationship between shape parameters and obstacle horizontal width

和共晶组织的交界处,其表面较为光滑,形貌一般呈 圆形或近圆形。气孔会与枝晶相互作用,形貌发生 变化,影响枝晶生长。

(2)气泡在微通道内运动时,受障碍物影响,形 状发生变化,障碍物切割作用导致的气泡形状改变 明显大于其阻挡作用。

(3)当矩形障碍物宽度较小时,受障碍物切割作 用,气泡会发生分裂,障碍物宽度越小,发生分裂的 倾向越明显。当矩形障碍物宽度较大时,障碍物的 影响会变为阻挡作用,宽度越大,对气泡运动的阻 挡作用越大。

#### 参考文献:

- [1] 潘复生,吴国华.新型合金材料:镁合金[M].北京:中国铁道出版社,2017.
- [2] SONG J F, CHEN J, XIONG X M, et al. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(4): 863-898.
- [3] 肖旅,侯正全,吴国华,等.高强韧稀土镁合金大型复杂铸件制
  造技术研究现状及展望[J].特种铸造及有色合金,2021,41(7): 793-801.
- [4] 薛斌,许忠斌,张小岩,等.轻量化精密铸造成型技术在航空航 天关键部件中的应用[J].铸造技术,2022,43(4):290-294.
- [5] 张占领,张艳琴,刘真,等. 镁合金压铸件常见缺陷及改进措施[J]. 铸造技术,2019,40(7):718-721.
- [6] 蒋斌,刘文君,肖旅,等. 航空航天用镁合金的研究进展[J]. 上海 航天,2019,36(2):22-30.
- [7] 张昂,郭志鹏,蒋斌,等.合金凝固组织和气孔演变相场模拟研究进展[J].中国有色金属学报,2021,31(11):2976-3009.
- [8] 陈荣石,周波,李吉林,等.铸造高强耐热 Mg-Y-Nd(-Gd)-Zr 和 Mg-Gd-Y-Zr 系镁合金组织性能和铸造缺陷对比[J].铸造,2021,70 (1):15-20.
- [9] ZHANG A, GUO Z P, JIANG B, et al. Multiphase and multi-

physics modeling of dendrite growth and gas porosity evolution during solidification[J]. Acta Materialia, 2021, 214: 117005.

- [10] ZHANG A, DU J L, ZHANG X P, et al. Phase-field modeling of microstructure evolution in the presence of bubble during solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51: 1023-1037.
- [11] 喻兵,贾征,李又佳,等. 镁合金熔体净化技术研究进展[J]. 铸造 技术,2021,42(7): 635-643,650.
- [12] 苏东泊. 铸造镁铝合金气孔缺陷及气泡动力学模拟研究 [D]. 重 庆:重庆大学,2022.
- [13] ZHANG A, DU J L, GUO Z P, et al. Conservative phase-field method with a parallel and adaptive-mesh-refinement technique for interface tracking[J]. Physical Review E, 2019, 100(2): 023305.
- [14] ZHANG A, SU D B, LI C M, et al. Investigation of bubble dynamics in a micro-channel with obstacles using a conservative phase-field lattice Boltzmann method[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(4): 043312.
- [15] BHATNAGAR P L, GROSS E P, KROOK M, et al. A Model for collision processes in gases. I. small amplitude processes in charged and neutral one-component systems[J]. Physical Review, 1954, 94(3): 511-525.
- [16] FAKHARI A, GEIER M, LEE T, et al. A mass-conserving lattice Boltzmann method with dynamic grid refinement for immiscible two-phase flows [J]. Journal of Computational Physics, 2016, 315: 434-457.
- [17] ZHANG A, GUO Z P, WANG Q G, et al. Three-dimensional numerical simulation of bubble rising in viscous liquids: A conservative phase-field lattice-Boltzmann study[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(6): 063106.
- [18] CHENG M, HUA J S, LOU J. Simulation of bubble-bubble interaction using a lattice Boltzmann method[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(2): 260-270.
- [19] BHAGA D, WEBER M E. Bubbles in viscous liquids: shapes, wakes and velocities [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 105: 61-85.