

关于气泡在 LIMCA 系统中变形的数值模拟

杨文志¹, 王晓东^{*2}

1 中国科学院大学, 2 中国科学院大学

*通讯作者: 北京市怀柔区中国科学院大学, xiaodong.wang@ucas.ac.cn

摘要: 文章从数值模拟角度研究了气泡在液态铝 LIMCA 系统中的变形情况, 为了追踪两相界面之间的变形情况, 我们使用了水平集方法。气泡的变形受到小孔附近壁面的形状变化、液态金属的物理性质、气泡和液态金属的表面张力系数和感应产生的洛伦兹力等影响。本研究中, 我们着重测量代表着液态金属中气泡变形情况的电阻脉冲这一信号。为了实现该目的, 当气泡通过小孔时, 我们在液态金属中导入大电流, 从而在小孔附近建立一个电敏感区。因此, 流动结构的计算要受到电磁力作用的影响。数值计算结果给出了在气泡变形情况下的流场、电磁场、洛伦兹力场的分布, 并得到了球状气泡的变形情况。最后, 基于计算结果, 我们给出了气泡变形对电阻脉冲信号的影响情况, 并提供了与硬颗粒不同的电阻脉冲的主要特征, 该特征包括峰值、电阻脉冲形状和气泡的瞬态运动时间。现有的研究表明, 使用 LIMCA 技术可以区分气泡和硬颗粒。

关键词: LIMCA, 两相流, 水平集

1. 简介

LIMCA (Liquid Metal Cleanliness Analyzer) 技术是一种原位测量高温液态金属中杂质颗粒的数目和尺寸的方法, 这一技术在过去 30 年内已经被应用于冶金工业。测量的原理为: 在一个小孔内外设置一对电极, 并且通以电流, 这样可以在孔口附近形成一个电敏感区, 当杂质经过电敏感区时, 通过测量电阻脉冲信号以检测杂质的信息。因为杂质与金属液的电导率不同, 这将导致电敏感区电阻和电压的变化。这些杂质可能是非氧化物硬颗粒如铝颗粒, 也可能是乳胶颗

粒或者气泡。关于硬颗粒, 前人从数值、物理解析和实验角度已经做了很多工作。但许多关于气泡或者乳胶颗粒杂质在 LIMCA 系统中的研究都是在气泡不会变形这一条件的假设下进行的^[1], 这一假设在特定条件下并不成立。

与硬颗粒相比, 气泡对液态金属质量的损害较小, 因为气泡产生的压力较小, 在凝固过程中不易形核, 并且在金属后处理阶段容易被去除。对于 LIMCA 技术而言, 气泡的存在会形成类似于硬颗粒的信号, 这将导致 LIMCA 测量精度降低。因此在 LIMCA 技术中, 区别气泡和硬颗粒是十分必要的。

我们通过分析和比较电敏感区的电阻脉冲信号来区分气泡和硬颗粒。影响电阻脉冲信号的因素主要来自两个方面: 表面张力的存在总是使颗粒的自由表面趋向于球状, 而初始条件和流体流动中的压力梯度却使表面趋于非球状。在本研究中, 受壁面形状影响的感应电磁力和壁面形状本身的变化都会影响流体运动中的压力梯度。气泡的变形和体积收缩都会影响气泡受到的拖拽力和气泡通过小孔的瞬态时间, 这些都会反应在电阻脉冲信号上。

模型中存在着气泡和铝金属液两相, 在流动结构的计算中两相之间界面的处理非常关键。在本模型中, 我们采用了水平集方法。

2. 数值模型与理论基础

我们建立了一个数值模型来描述气泡通过电敏感区时的变形情况，模型使用了 COMSOL 软件中的“层流两相流-水平集”和“电磁场”接口，几何模型和一些物理条件的设定如图 1。气泡和液态铝以相同的初始速度向相同方向运动，同时在液态导电金属中通以电流。由于流体和气泡是运动的，流动会受到洛伦兹力的影响，所以在流场中加入由电磁场计算得到的“mef.FLTzr”“mef.FLTzz”作为体积力源项。同时流动结构的改变也会影响电磁场，两个物理场之间存在着强耦合，需要同时求解。

入口流入速度设定为 0.1m/s，由于与声速相比很小，所以通道内的流动可以认为是不可压缩流动。同时假设流动模式为层流，在电敏感区内流动平稳。在这些假设下，模型的动量和能量在流动中的传输可以通过流体的连续性方程和 N-S 方程来描述：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \nabla \cdot p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + F_{st} + F_{em}$$

其中 \mathbf{u} 为流速， t 为时间， ρ 代表流体密度， μ 代表动力粘度， F_{st} 为表面张力， F_{em} 为感应产生的洛伦兹力。

模型的难点在于涉及的两相（液态金属和气泡）在密度、粘度、电导率和表面张力系数这些方面都存在很大差异，这导致两相之间的界面上的物理参数不易确定。模型采

用水平集方法来解决界面处存在的问题。在 COMSOL 中，水平集方法通过追踪水平集函数 $\phi=0.5$ 的等值线来定义两相之间界面^[2]。关于水平集函数的控制方程为：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left[\frac{\varepsilon \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}}{\phi} \right]$$

其中， γ 和 ε 是重新初始化参数， ε 控制两相之间界面的厚度。

在界面处，流体的密度、粘度和电导率由水平集函数 ϕ 来描述：

$$\rho = \rho_{lm} + (\rho_{lm} - \rho_b) \cdot \phi$$

$$\mu = \mu_{lm} + (\mu_{lm} - \mu_b) \cdot \phi$$

$$\sigma = \sigma_{lm} + (\sigma_{lm} - \sigma_b) \cdot \phi$$

其中， ρ_{lm}, ρ_b 和 μ_{lm}, μ_b 以及 σ_{lm}, σ_b 分别代表液态金属和气泡的密度、粘度和电导率。

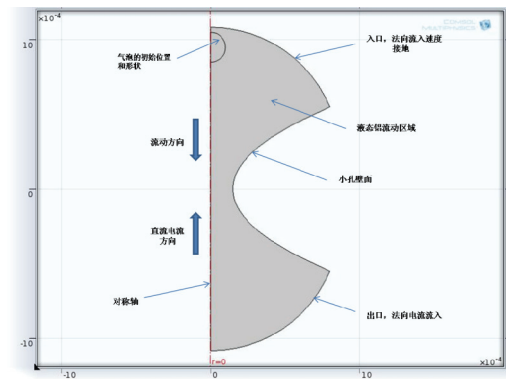


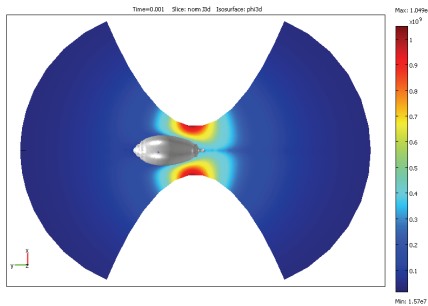
图 1. 模型的几何形状与物理边界条件

3. 计算结果

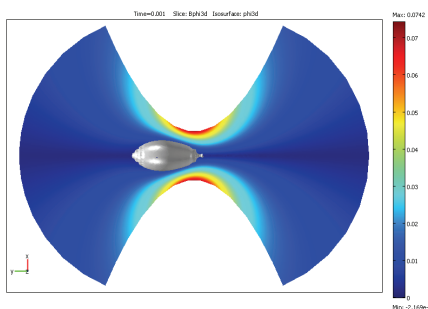
3.1 变形过程中的场分布

我们设定气泡位于模型的对称轴线。变形气泡内部是空气，为不导电物质，所以气泡不会受到电磁力的直接影响。电磁力通过影响液态铝的流动来影响气泡的变形情况，而气泡的变形也会影响通道内的电场、磁场和洛伦兹力场的分布情况（如图 2）。

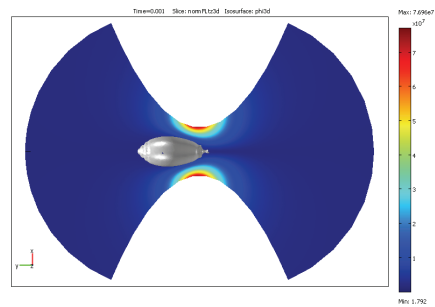
由图可知，最大电流密度总是在孔口最窄区域靠近壁面处，并且随着气泡的变形而变化。不导电气泡也影响着磁通量的变化。同时可以看到感应的洛伦兹力场分布和电流密度的分布相似，这与安培定律相吻合。



(a)



(b)

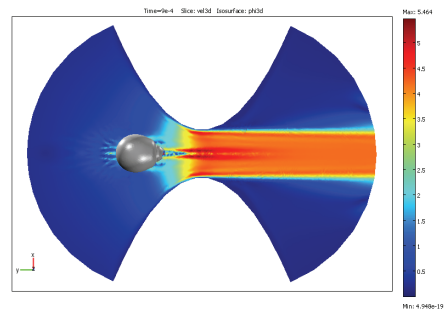


(c)

图 2. 气泡变形过程中，在 $t=1\text{ms}$ 时各物理场的分布 (a) 电流密度分布 (b) 磁通量分布 (c) 洛伦兹力分布

3.2 气泡的变形情况

图 3 显示了四个时刻 ($t=0.9\text{ms}$, $t=1\text{ms}$, $t=1.08\text{ms}$, $t=1.16\text{ms}$) 的气泡变形情况和当时的速度场分布。可以清楚地看到，这是一个持续变化过程。在 $t=0.9\text{ms}$ 时，气泡由于受到流动压力和磁压的作用开始变得扁平，然后在 1ms 时运动到孔口最窄处变得更为细长，在如此短的时间内，在气泡尖端形成了一个速度较小的区域，这是由于气泡的变形使得气泡的运动受阻。当气泡离开最窄处时，由于较大的表面张力使气泡趋于球状，所以在气泡后端形成了尾状，当流体加速更为明显时，尾部消失，气泡向相反方向变形。



(a)

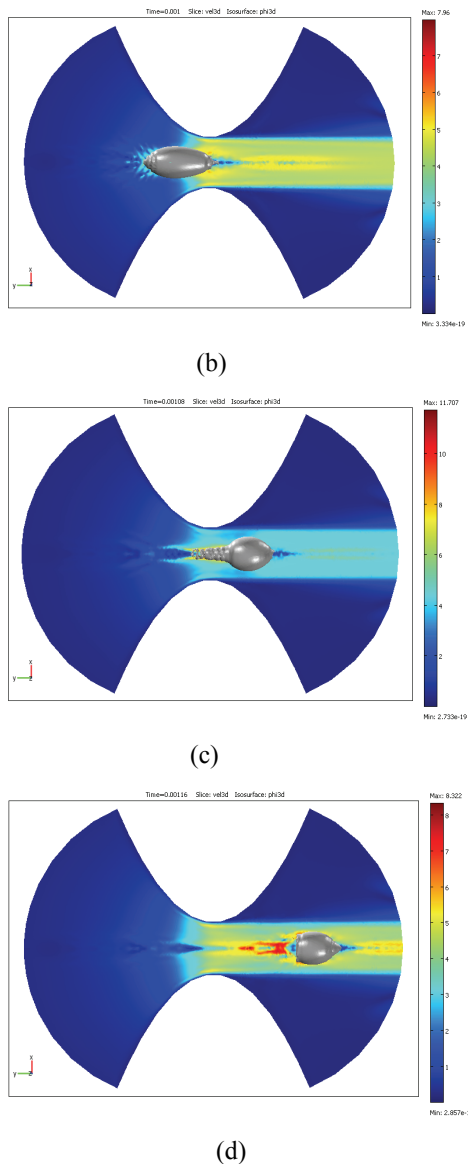


图 3. 气泡通过抛物线通道不同时刻的变形情况
 (a) $t=0.9\text{ms}$ (b) $t=1.0\text{ms}$
 (c) $t=1.08\text{ms}$ (d) $t=1.16\text{ms}$

3.3 气泡变形情况对电阻脉冲信号的影响

图 4 显示了气泡通过电敏感区时的电阻脉冲信号。(a)显示的是信号随时间的变化情况，(b)显示的是信号随空间的变化情况。电

阻最大值出现在 $t=1.38\text{ms}$ 时，此时气泡位于 $z=-1.5\times 10^{-4}\text{m}$ 。

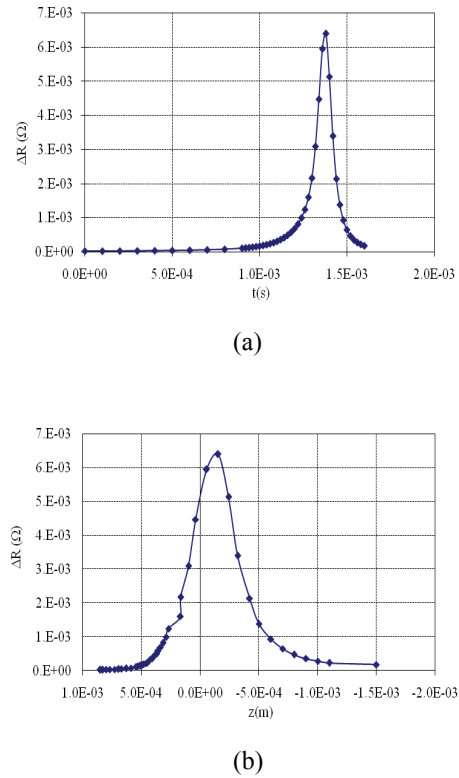


图 4. 电阻脉冲信号

为了比较气泡变形情况对电阻脉冲信号的影响，我们假设一个不变形的气泡通过相同通道时的电阻脉冲变化。该模型是由 ELA (Eulerian-Lagrange Approach) 方法来模拟，而非水平集方法，这是因为水平集方法不能用来追踪气泡的固定边界^[3]。

在其他条件相同的前提下，我们研究了不同直径气泡下变形与不变形条件下的电阻脉冲变化。主要有 3 个不同特征。第一，电阻峰值不同，由于气泡在通过最窄处时变得细长，因此电敏感区的电阻降低了。由图 5

看到：在 a 中，气泡的直径为 $250\mu\text{m}$ ，最大电阻峰值由 $2.6\times 10^{-2}\Omega$ 降为 $0.64\times 10^{-2}\Omega$ ，而对于 $250\mu\text{m}$ 直径气泡，气泡变形后最大电阻峰值由 $7.7\times 10^{-2}\Omega$ 降为 $1.8\times 10^{-2}\Omega$ 。在两种情况下电阻峰值都大概为原来的四分之一。第二，对于不变形气泡而言，脉冲信号是轴对称的，而气泡变形时这一信号不再轴对称。第三，气泡变形情况下，电阻脉冲信号的宽度变得更大。这些都提供了区分气泡和硬质颗粒的理论基础。

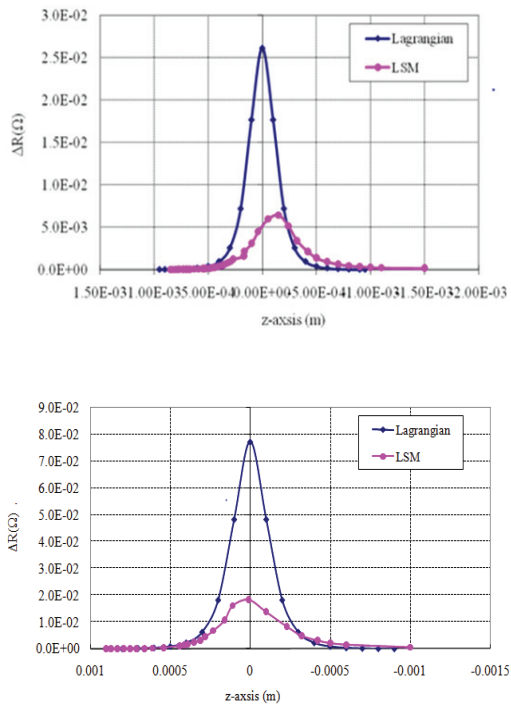


图 5. 气泡与硬质颗粒的电阻脉冲信号

(a) $d=200\mu\text{m}$; (b) $d=250\mu\text{m}$.

4. 结论

本研究使用水平集方法模拟了气泡通过特定抛物线形状通道的变形情况，数值计算结果给出了在气泡变形情况下的流场、电磁场和洛伦兹力场的分布，并得到了球状气泡的变形情况。最后，我们给出了气泡变形情况下与硬颗粒不同的电阻脉冲的主要特征，该特征包括峰值、电阻脉冲形状和气泡的瞬态运动时间。研究表明，使用 LIMCA 技术可以区分气泡和硬颗粒。

5. 参考文献

1. MEI LI, CHRIS CAROZZA and RODERICK I.L.GUTHRIE. Particle discrimination in water based LIMCA system. Canadian Metallurgical Quarterly, Vol 39, No 3, pp 325-338, 2000
2. Sethian, J.A., 1999. Level Set Method and Fast Marching Methods. Cambridge University press.
3. Xiaodong Wang, Mihaiela Isac and Roderick I.L.Guthrie. Numerical studies on the in-situ measurement of inclusions in liquid steel using the E.S.Z. or LiMCA technique. ISIJ. Vol. 49, No.7 (2009), pp.975-984.