

# 高温颗粒在冷却剂中运动阻力的 实验与数值研究

袁明豪, 杨燕华, 李天舒, 胡志华

(上海交通大学核科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 利用已有的高温颗粒下落冷池可视化实验装置, 获得了一批新的关于高温  $ZrO_2$  小球在饱和冷却剂中运动特性的实验数据。实验结果表明: 在膜态沸腾条件下高温颗粒在冷却剂中运动的阻力系数大于非膜态沸腾的情况, 而颗粒温度对阻力系数的影响不大。使用专门开发的基于 volume of fluid (VOF) 方法的 CFD 程序对实验工况进行了数值模拟。计算得到的阻力系数与实验数据比较符合。颗粒表面的压力分布解释了在膜态沸腾条件下高温颗粒阻力的产生机理。

**关键词:** 蒸汽爆炸; 膜态沸腾; 阻力; 终端速度; 数值模拟

**中图分类号:** TL33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2007)S0-0098-06

## Experimental and Numerical Study of Drag Force on Hot Particle in Coolant

YUAN Ming-hao, YANG Yan-hua, LI Tian-shu, HU Zhi-hua

(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A new set of experimental data for high temperature  $ZrO_2$  particle movement characteristic in coolant liquid was obtained with a visualized facility. The experimental results show that the drag force coefficient on a hot particle with film boiling is larger than on a cold particle without film boiling and the drag force coefficient is not sensitive to the particle temperature. A CFD code based on VOF method is used to simulate the experimental case. The drag force coefficient in simulation is in agreement with the experimental data. The pressure distribution on the particle explains the mechanism for drag force with film boiling.

**Key words:** vapor explosion; film boiling; drag force; terminal velocity; numerical simulation

在蒸汽爆炸的粗混合阶段, 高温熔融物液滴与冷却剂形成一个混合区域, 混合区域状态与范围决定后续爆炸性膨胀的初始条件与可能转换成破坏性机械能的总的热能<sup>[1]</sup>。在此阶

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50376036)

作者简介: 袁明豪(1980—), 男, 江苏吴江人, 博士研究生, 核能科学与工程专业

段,高温熔融物液滴的周围被一层蒸汽膜覆盖,这些蒸汽不断从冷却剂液体和蒸汽的交界面上产生,并在蒸汽膜内连续地从熔融物液滴底部流向顶部,使得冷却剂液体和熔融物液滴不能直接接触。在此膜态沸腾条件下,圆球绕流的标准阻力曲线不能正确描述作用在高温颗粒上的阻力。对于高温颗粒在冷却剂中运动阻力,国内外已进行了一些理论与实验研究<sup>[2-5]</sup>。

近年来,直接模拟自由界面的数值方法已经扩展到可以应用于界面上存在相变的情况<sup>[6-10]</sup>,将其用于模拟高温颗粒周围的流动和传热将有助于揭示一些在实验中难以观察的现象,更好地对膜态沸腾条件下高温颗粒在冷却剂中运动阻力特性进行研究。

本文使用文献<sup>[4-5]</sup>中的实验装置,获得了一批新的高温  $ZrO_2$  小球在饱和冷却剂中运动特性的实验数据,用专门开发的基于 VOF 方法的 CFD 程序对实验工况进行了数值模拟,并将数值模拟的结果与实验数据进行对比。

## 1 实验方案与结果

整个实验系统由高温电阻炉、可视化实验水箱、高速摄像机等组成。 $ZrO_2$  小球在高温电阻炉中被加热到设定的温度,则从距离水面约 1 m 处下落到可视化实验水箱内,高速摄像机将小球的运动过程拍摄下来。

本次实验使用的小球为  $ZrO_2$  轴承陶瓷球,直径为 6.350 0 mm,精度等级为 G10,密度为  $6.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。高速摄像机拍摄频率为 133 帧/s。此次实验的目标是研究膜态沸腾条件下高温颗粒在冷却剂中运动阻力特性,为了增大蒸汽产生量且保证小球在下落过程中始终处于膜态沸腾,可视化水箱内的水被加热到饱和或极接近饱和的状态。高温电阻炉的设计温度最高可达 2 200  $^{\circ}\text{C}$ ,但是如果小球温度过高,在下落过程中发出强光,将会影响观察效果。所以  $ZrO_2$  小球在下落之前的初始温度选取 1 200  $^{\circ}\text{C}$ 、1 600  $^{\circ}\text{C}$  和室温(不加热)3 种情况,每种情况重复 2~4 次实验。

图 1~3 分别为高速摄像机拍摄到的初始温度为 1 200  $^{\circ}\text{C}$ 、1 600  $^{\circ}\text{C}$  和室温的  $ZrO_2$  小球下落到水箱内,在水中向下运动的前 11 帧照片。由于水箱内的水处于饱和状态,高温小球

下落到水中后有大量蒸汽产生,在小球后面形成一个狭长的汽泡,汽泡内的蒸汽过多时,就会从小球后面的汽泡中脱离出来。在图 2 中,初始温度为 1 600  $^{\circ}\text{C}$  的  $ZrO_2$  小球由于温度较高,发出了较强的白光,使小球轮廓看上去变大了一些。

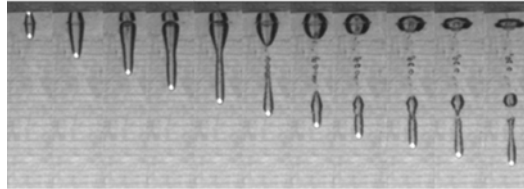


图 1 初始温度为 1 200  $^{\circ}\text{C}$  的  $ZrO_2$  小球下落到水箱内,在水中向下运动的照片

Fig. 1 Successive 11 pictures for  $ZrO_2$  particle at 1 200  $^{\circ}\text{C}$  moving in saturate water

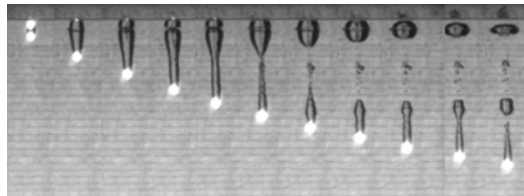


图 2 初始温度为 1 600  $^{\circ}\text{C}$  的  $ZrO_2$  小球下落到水箱内,在水中向下运动的照片

Fig. 2 Successive 11 pictures for  $ZrO_2$  particle at 1 600  $^{\circ}\text{C}$  moving in saturate water

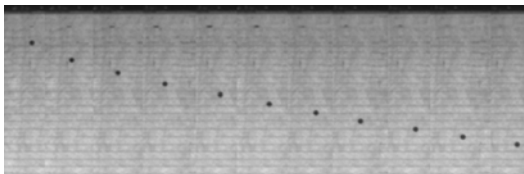


图 3 初始温度为室温的  $ZrO_2$  小球下落到水箱内,在水中向下运动的照片

Fig. 3 Successive 11 pictures for  $ZrO_2$  particle at room temperature moving in saturate water

小球在空气中自由下落到水面之前,速度为 5 m/s 左右,此后由于水的阻力作用,不断减速,当阻力与小球受到的重力及浮力相互平衡时,小球保持匀速运动状态,此时小球的速度即为终端速度。在小球的速度达到终端速度之前,小球是处于减速运动状态,此时小球受力复杂,除了受到重力、浮力、阻力,还必须考虑附加

质量力,因此,较难对其阻力进行分析。当小球达到终端速度后,附加质量力为零,而小球的重力和浮力是可知的,故只需测量其终端速度即可研究小球的阻力特性。为了减小由于摄像机像素限制引入的误差,在小球达到匀速运动状态后,测定小球在连续 10 帧照片内下落的距离,除以 10 帧照片总的时间,以此作为小球下落的终端速度。表 1 列出各实验工况测得的终端速度。相同球温的实验工况作为 1 组,共分为 3 组。

表 1 不同温度的  $ZrO_2$  小球在饱和水中自由下落的终端速度及阻力系数

Table 1 Terminal velocity and drag force coefficient for  $ZrO_2$  particle moving in saturate water

组别	编号	终端	终端速度	阻力系数
		速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	平均值/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	
1 (球温 200 $^{\circ}C$ )	1	0.89	0.875	0.570
	2	0.86		
	3	0.86		
	4	0.89		
2 (球温 600 $^{\circ}C$ )	5	0.89	0.880	0.564
	6	0.87		
3 (球温 10 $^{\circ}C$ )	7	0.93	0.928	0.507
	8	0.89		
	9	0.95		
	10	0.94		

## 2 数据分析

由表 1 可知,在膜态沸腾条件下高温颗粒在冷却剂中运动的终端速度要略小于非膜态沸腾的情况,而颗粒温度对终端速度的影响不大。

在圆球绕流情况下,由于流体有粘性,球面上的压强分布是不对称的,颗粒受到与来流方向一致的压力合力,称压差阻力。另一方面,颗粒表面上的摩擦剪应力,其合力也与来流方向一致,称摩擦阻力。因此,颗粒在粘性流体中运动时,流体作用于球体上的阻力由压差阻力和摩擦阻力组成。习惯上把阻力  $F_d$  的表达式写成:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho (v_1 - v_p)^2 S \quad (1)$$

式中:  $v_1$  和  $v_p$  分别为流体和颗粒的速度;  $\rho$  是流体的密度;  $S$  是颗粒的迎风面积,  $S = \pi R^2$ ;  $C_d$

为阻力系数。

由于球形颗粒表面的附面层非常复杂,只有极少特殊情况 ( $Re$  很小的情况下) 阻力系数可从流体运动控制方程组导出计算式,如斯托克斯定律、奥森公式。目前,阻力系数主要依靠实验来确定。在  $500 < Re < 2 \times 10^5$  的范围内,实验表明球体表面上层流附面层脱体点基本上保持在从前滞止点算起约  $83^{\circ}$  的地方,涡系离开球体而形成尾流,总阻力主要来自压差阻力的贡献。 $C_d$  为  $0.44 \sim 0.5$ , 几乎与  $Re$  无关。

表 1 中 3 组实验工况下的阻力系数可通过颗粒的受力平衡方程来求得:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_p - \rho) g = \frac{1}{2} C_d \rho v_p^2 S \quad (2)$$

式(2)左端是颗粒的重力与浮力的合力,右端是阻力,  $v_p$  即颗粒的终端速度。通过式(2)求得的阻力系数列于表 1。

在膜态沸腾条件下,高温颗粒的前端有一层很薄的汽膜,后部是一狭长的汽泡,如图 1、2 所示。文献[2]认为,高温颗粒后部(从前滞止点算起  $90^{\circ}$  之后)的汽泡内的压力保持不变,而颗粒前端(从前滞止点算起  $90^{\circ}$  之前)的压力分布为根据势流理论得到的圆球绕流的分析解:

$$p = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 \left[ 1 - \frac{9}{4} \sin^2 \theta \right] \quad (3)$$

式中:  $\theta$  是从前滞止点算起的角度。文献[3]的模型也与此类似,认为在边界层分离点之前压力分布根据式(3)确定,分离点之后保持不变。根据文献[2]的模型,作用在颗粒上的压力合力对阻力系数的贡献  $C_d^p$  计算如下:

$$C_d^p = \frac{9}{2} \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{9}{8} \quad (4)$$

此结果远大于表 1 中的实验测量值。根据文献[2]中模型的假设,颗粒前端(从前滞止点算起  $90^{\circ}$  之前)的压力分布为根据势流理论得到的圆球绕流的分析解。但在膜态沸腾条件下,由于颗粒后部存在一狭长的汽泡,在此汽泡的影响下,颗粒周围边界层之外的流动将会显著地偏离势流分析解。所以文献[2]中的模型对阻力系数的估计存在较大的偏差。同样,文献[3]中的模型也有相类似的问题。因此,在膜态沸腾条件,要正确估计作用在颗粒上的阻力,需要考虑颗粒尾部的汽泡对流动的影响。而颗

粒尾部的汽泡中不断会有过多的蒸汽脱离出来,形状是动态变化的,并不容易确定。在这种情况下,数值模拟就成了研究高温颗粒的阻力特性的有效方法。

### 3 数值模拟

为了用数值方法研究膜态沸腾条件下高温颗粒在冷却剂中运动的阻力特性,开发了用于计算带相变的自由界面问题的基于适体坐标的CFD程序。程序<sup>[1]</sup>使用改进后的VOF方法追踪汽液自由界面,使用SIMPLE方法求解流场,连续表面力(CSF)模型模拟表面张力。

在计算中,使用了二维柱坐标,网格分辨率为 $120 \times 120$ ,计算区域为 $0.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ,由于蒸汽膜很薄,在球面附近布置了较多的网格以精确地捕捉汽膜的位置。计算网格和边界条件如图4所示。由于计算采用了定网格,所以球体保持静止,流体从下到上流过球体,这与球体在静止的流体中向下运动的情形是等效的。水的物性参数取为: $\rho_l = 958.0 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_l = 0.000279 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ,  $k_l = 0.680 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ,  $c_{p_l} = 4217 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ;蒸汽物性参数为: $\rho_g = 0.2579 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_g = 0.0000297 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ,  $k_g = 0.0637 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ,  $c_{p_g} = 2186 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。其它的参数为表面张力 $\sigma = 0.0589 \text{ N/m}$ ,饱和

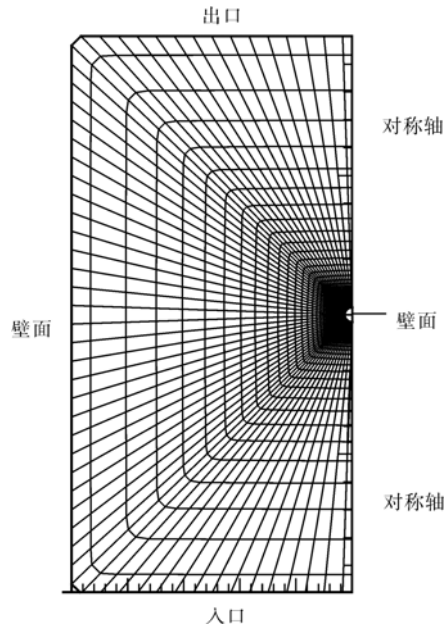


图4 计算网格和边界条件

Fig. 4 Grid for calculation and boundary conditions

温度  $T_s = 373 \text{ K}$ , 相变潜热  $h_{lg} = 225700 \text{ J/kg}$ , 重力  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ , Stefan-Boltzmann 常数  $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8}$ , 球体表面发射率  $\epsilon = 0.7$ 。

颗粒的温度设定为  $1373 \text{ K}$ , 来流速度设为  $1.0 \text{ m/s}$ , 计算初始化时液面距离球心  $0.01 \text{ m}$ 。在整个过程中汽液自由界面随时间的变化如图5所示。当球体完全浸没在液体中

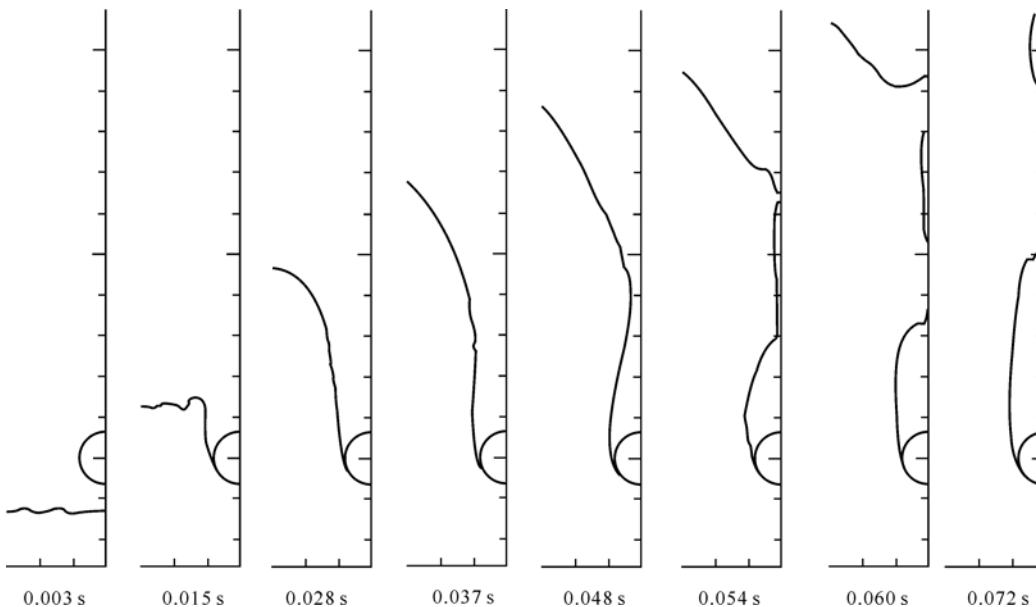


图5 汽液自由界面随时间的变化

Fig. 5 Vapor-liquid interfaces at different time

后,球体后面的汽泡中过多的蒸汽会脱离出来,与实验观察到的现象相符合。在  $t=0.072\text{ s}$  时,球体前端蒸汽膜及液体内的速度分布见图 6。由于在蒸汽膜内粘性力占主导地位,故速度分布沿径向呈抛物线形状。

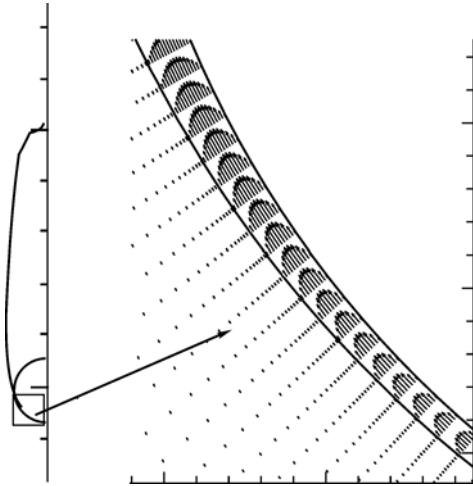


图 6  $t=0.072\text{ s}$  时球体前端蒸汽膜及液体内的速度分布  
Fig. 6 Velocity field at front of sphere in vapor and liquid at  $t=0.072\text{ s}$

对球体表面的压力和粘性力积分即可求得球体受到的压差阻力和摩擦阻力,除以  $0.5\rho v^2 S$  后即得到压差阻力和摩擦阻力对阻力系数的贡献。图 7 为计算过程中压差阻力和摩擦阻力随时间的变化。在此过程中,摩擦阻力一直很小,故阻力的主要来源是压差阻力。在小球刚接触液面时,压差阻力有一短暂的峰值,当小球没入液面后,压差阻力比较平稳。当小球尾部的汽泡中过多的蒸汽脱离出来时,压差阻力出现明显的波动。实验得到的阻力系数与计算值比较符合。

图 8 为  $t=0.072\text{ s}$  时计算得到的球面上的压力分布。实验曲线为非膜态沸腾条件下,  $Re=157\ 200$ , 圆球绕流的球体表面的压力分布<sup>[12]</sup>。由图 8 可知,在小球后部汽泡的影响下,前端的压力分布与势流理论解有较大的偏差。非膜态沸腾条件下,在分离点之后球后部的压力还有略微的回升,而膜态沸腾条件下尾部汽泡中的压力基本保持不变,这使得高温小球相比冷球阻力系数要略大一些。

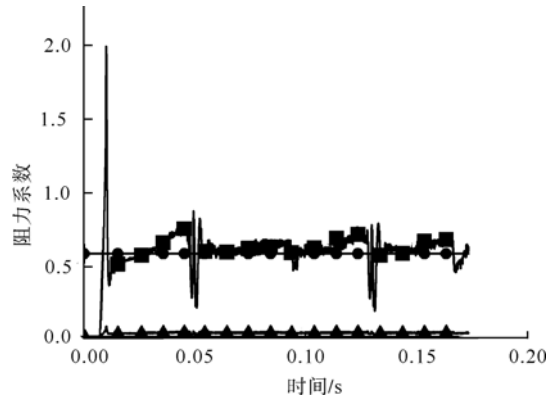


图 7 阻力系数随时间的变化

Fig. 7 Drag force coefficient comparison

■——压差阻力(数值计算);  
▲——摩擦阻力(数值计算);  
●——总阻力(实验结果,球温  $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

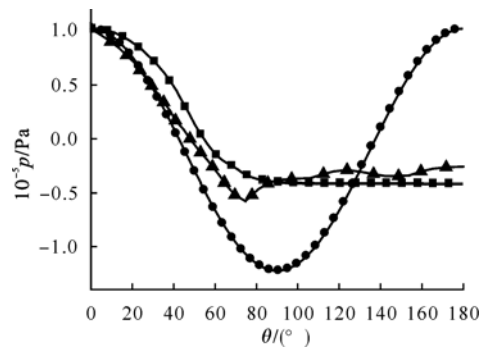


图 8  $t=0.072\text{ s}$  时球面上的压力分布

Fig. 8 Pressure distributions on particle at  $t=0.072\text{ s}$

■——数值计算;▲——实验数据<sup>[12]</sup>;  
●——势流理论解

## 4 结论

实验结果表明在膜态沸腾条件下高温颗粒在冷却剂中运动的阻力系数大于非膜态沸腾的情况,而颗粒温度对阻力系数的影响不大。计算得到的阻力系数与实验数据比较符合。颗粒表面的压力分布解释了在膜态沸腾条件下高温颗粒阻力的产生机理。

## 参考文献:

- [1] THEOFANOUS T G, YUEN W W. The prediction of dynamic loads from ex-vessel steam explosions[C]// Proceedings of the International Conference on New Trends in Nuclear System Thermohydraulics. Pisa:[s. n.], 1994:257-270.

- [2] FODEMSKIT R. Forced convection film boiling in the stagnation region of a molten drop and its application to vapor explosions[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1992, 35: 2 005-2 016.
- [3] CAO Xuewu, YOSHIHARU T. Drag correlations for a hot particle/droplet with vapor film [J]. *J Nucl Sci Technol*, 2001, 38(9): 721-728.
- [4] 李小燕, 杨燕华, 陈宏, 等. 蒸汽爆炸粗混合阶段冷液中高温球传热阻力耦合特性的实验研究 [J]. *核动力工程*, 2003, 24(5): 422-425.  
LI Xiaoyan, YANG Yanhua, CHEN Hong, et al. Experiment study of the Coupling effect between film boiling heat transfer and evaporation drag around a high-temperature particle in cold liquid during coarse mixing stage of vapor explosion[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2003, 24(5): 422-425(in Chinese).
- [5] 胡志华, 杨燕华, 詹经祥. 高温小球下落冷池运动机理的实验研究 [J]. *核动力工程*, 2006, 27(3): 20-23.  
HU Zhihua, YANG Yanhua, ZHAN Jingxiang. An experimental study on the movement mechanism of the high-temperature particles falling into the coolant pool[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2006, 27(3): 20-23 (in Chinese).
- [6] WELCH S W J. Local simulation of two-phase flows including interface tracking with mass transfer[J]. *Journal of Computational Physics*, 1995, 121: 142-154.
- [7] SON G, DHIR V K. Numerical simulation of saturated film boiling on a horizontal surface[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1997, 119: 525-533.
- [8] JURIC D, TRYGGVASON G. Computations of boiling flows[J]. *International Journal of Multi-phase Flow*, 1998, 24: 387-410.
- [9] SON G, DHIR V K. Numerical simulation of film boiling near critical pressures with a level set method [J]. *ASME Journal of Heat Transfer* 1998, 120: 183-192.
- [10] WELCH S W J, WILSON J J. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change [J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 160: 662-682.
- [11] 袁明豪, 杨燕华. 基于 VOF 方法的带相变的自由界面的计算 [C]//中国工程热物理学会. 2006 多相流学术年会. 重庆: [出版者不祥], 2006: 501-508.
- [12] 郭烈锦. 两相与多相流体动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 346.