

液滴撞壁空气夹带形成及其对换热的影响

吴小雨¹, 王娟^{1*}

(1. 西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西省先进飞行器服役环境与控制重点实验室, 陕西 西安 710049)



背景简介

- 液滴撞击壁面过程往往伴随有**空气夹带现象**, 由于夹带空气存在, 液体不能与壁面直接接触, 这对液滴撞壁过程中**动力学及传热行为**均存在较大影响。
- 现有液滴撞壁空气夹带现象研究**大多基于实验研究**, 对液滴运动形态的演变过程缺乏深入分析, 且**难以对撞壁过程中液滴运动机制及传热特性规律进行揭示**。
- 常用的两相流数值方法中, **宏观方法**, 如NS方程结合界面追踪方程, 求解速度慢, 并行复杂且效率低; **介观方法**, 如LBM, 难以求解大密度比大粘性比问题。

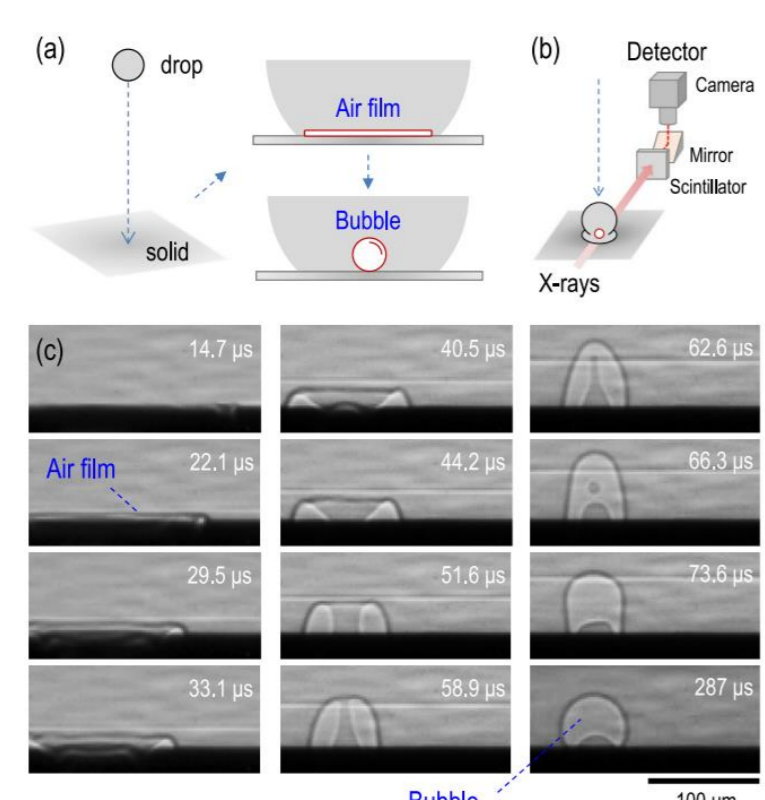


图1 水滴撞击过程中中央带空气的复杂演变^[1]

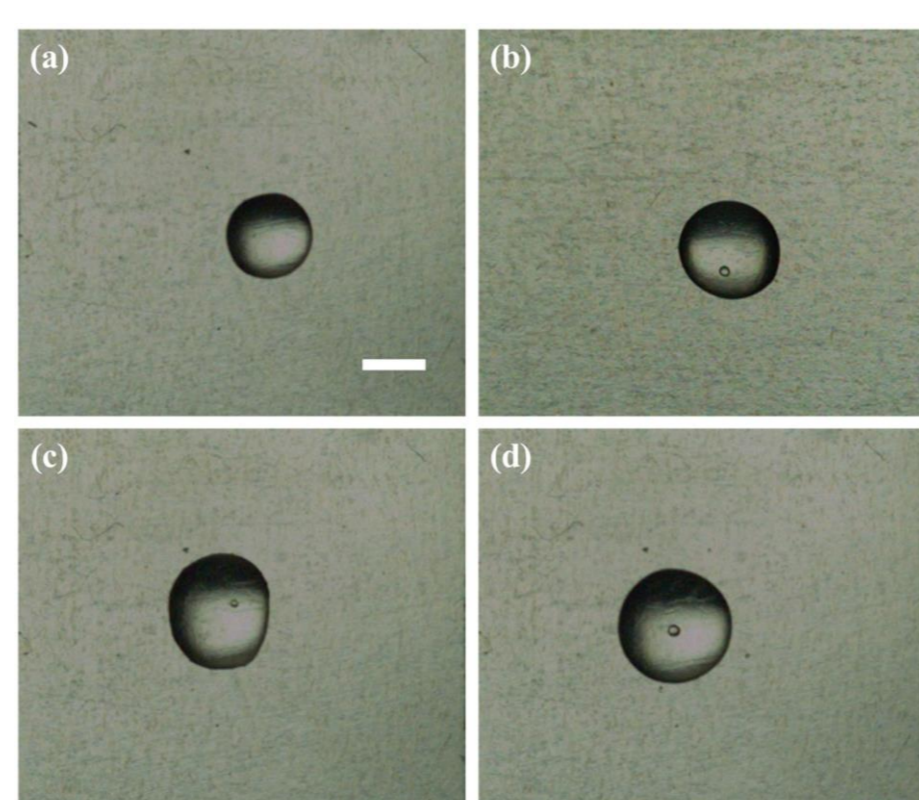


图2 撞击剥离膜片后气泡被困住的稳定滴形^[2]

研究方法

本研究采用**基于相场方法的热格子玻尔兹曼模型**结合GPU加速技术, 对三维液滴撞击壁面时的流动和传热进行了数值研究。

数值方法

界面追踪方程: **守恒形式的Allen-Cahn方程**

两相流系统: **介观LB模型**

界面捕捉方程 (Allen-Chan方程):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[M \left(\nabla \phi - \frac{4\phi(1-\phi)}{\xi} \mathbf{n} \right) \right]$$

初始相界面:

$$\phi(x) = \frac{1}{2} \left[1 - \tanh \left(\frac{x - x_0}{\xi/2} \right) \right]$$

连续方程:

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

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_b$$

能量方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} T) = \alpha \nabla^2 T$$

相场分布函数LBE^[3]:

$$h_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) = h_\alpha(x, t) - \frac{h_\alpha(x, t) - h_\alpha^{eq}(x, t)}{\tau_\phi + 1/2}$$

$$h_\alpha^{eq} = \phi \Gamma_\alpha + w_\alpha \frac{M}{c_s^2} \left[\frac{4}{\xi} \phi(1-\phi) \right] (e_\alpha \cdot \mathbf{n})$$

压力场分布函数LBE^[3]:

$$\bar{g}_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) = \bar{g}_\alpha(x, t) + \Omega_\alpha(x, t) + F_\alpha(x, t)$$

$$F_\alpha = \delta t \left[(\Gamma_\alpha - w_\alpha) (\rho_u - \rho_l) c_s^2 + \Gamma_\alpha \mu_\phi \right] (e_\alpha - \mathbf{u}) \cdot \nabla \phi + \delta t \Gamma_\alpha (e_\alpha - \mathbf{u}) \cdot \mathbf{F}_b$$

$$\Omega_\alpha = \Omega_\alpha^{MRT} = -M^{-1} \hat{\mathbf{S}} \mathbf{M} (\bar{g}_\alpha - \bar{g}_\alpha^{eq})$$

温度场分布函数LBE^[3]:

$$f_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) - f_\alpha(x, t) = -\frac{1}{\tau_f} [f_\alpha(x, t) - f_\alpha^{eq}(x, t)]$$

$\phi = \sum_\alpha \phi_\alpha$

$p^* = \sum_\alpha p_\alpha^*$

$\bar{g}_\alpha = \sum_\alpha \bar{g}_\alpha$

$T = \sum_\alpha T_\alpha$

$f_\alpha = \sum_\alpha f_\alpha$

$\bar{g}_\alpha = \sum_\alpha \bar{g}_\alpha$

$f_\alpha = \sum_\alpha f_\alpha$

$\bar{g}_\alpha = \sum_\alpha \bar{g}_\alpha$

$f_\alpha = \sum_\alpha f_\alpha$

GPU加速技术

本研究利用GPGPU(general purpose graphics process unit)的并行加速能力结合CUDA编程模块实现LBM的并行计算。

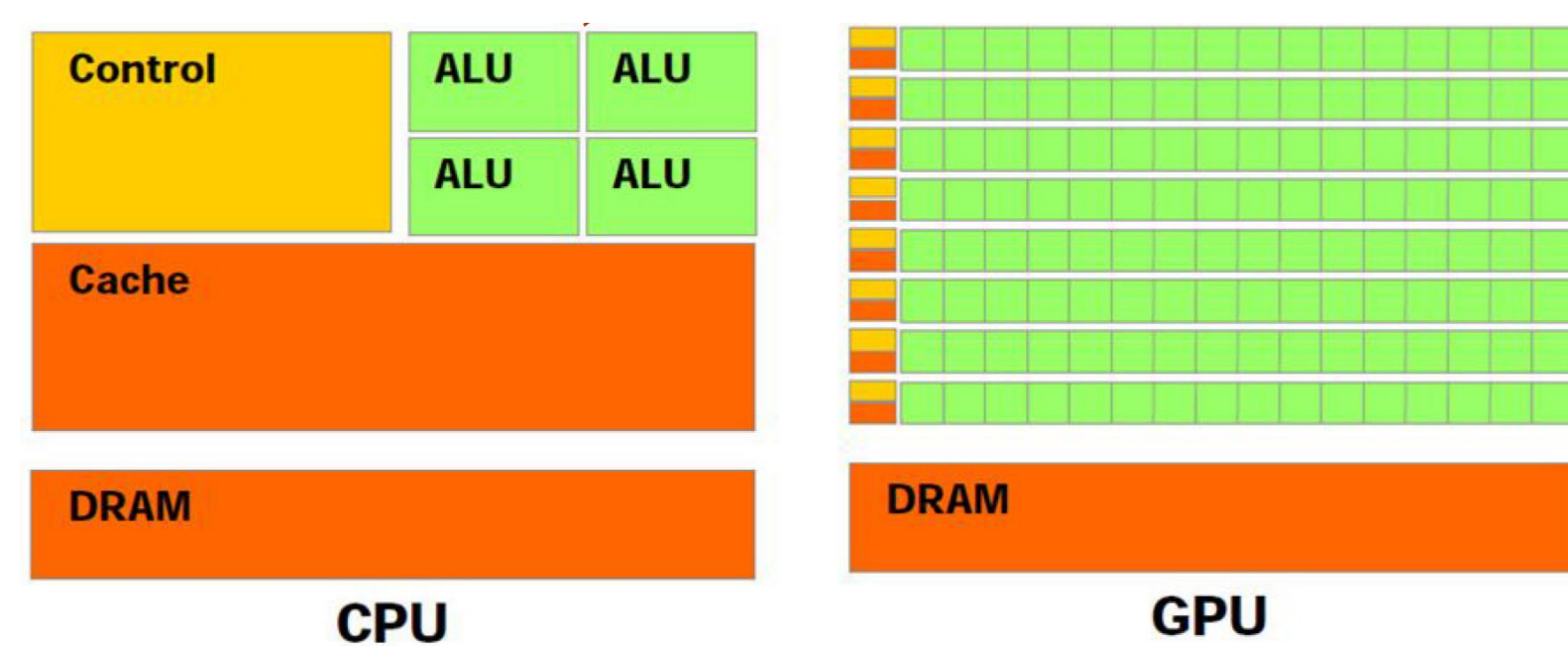


图3 CPU、GPU架构



图4 Nvidia Tesla V100 GPGPU

结论

- 通过结合Tesla V100 GPGPU加速的热相场晶格玻尔兹曼求解器, 数值研究了三维液滴撞击壁面时的流动和传热问题。
- 气液两相之间的压差是影响界面变化和滞留空气形成的主要因素; 形成的夹带空气运动过程产生的涡促进它的演化, 关于产生涡的作用有待进一步研究。
- 夹带空气阻碍了液滴与壁面间的热量传递, 在夹带空气影响下, 液滴撞击壁面中心点处的热流密度骤降, 严重影响冷却效果。

研究结果

GPU加速效率

- 测试基准问题: 单液滴撞击壁面动态铺展; 无相变效应。
- 计算网格规模: 256×128, 最终完成计算步数为8×10⁴, 计算边界与初值条件等均保持一致。
- 1颗 Intel Core i5-9500 CPU VS. 1颗Tesla V100 GPGPU。

测试分组	运行时长 (s)	加速比
#1 台式机CPU * 1颗	7240.0258 (2 hrs)	-
#1 Tesla V100 GPGPU * 1颗	37.92445 (0.63 min)	190.9
#2 台式机CPU * 1颗	7263.6582 (2 hrs)	-
#2 Tesla V100 GPGPU * 1颗	38.4291015 (0.64 min)	189.0

计算模型

网格数量: 448 × 448 × 224 (4500万)

接触角: $\theta = 60^\circ$

雷诺数: $Re = 500$

韦伯数: $We = 20$

密度比: $\rho_H/\rho_L = 1000$

粘性比: $\mu_H/\mu_L = 100$

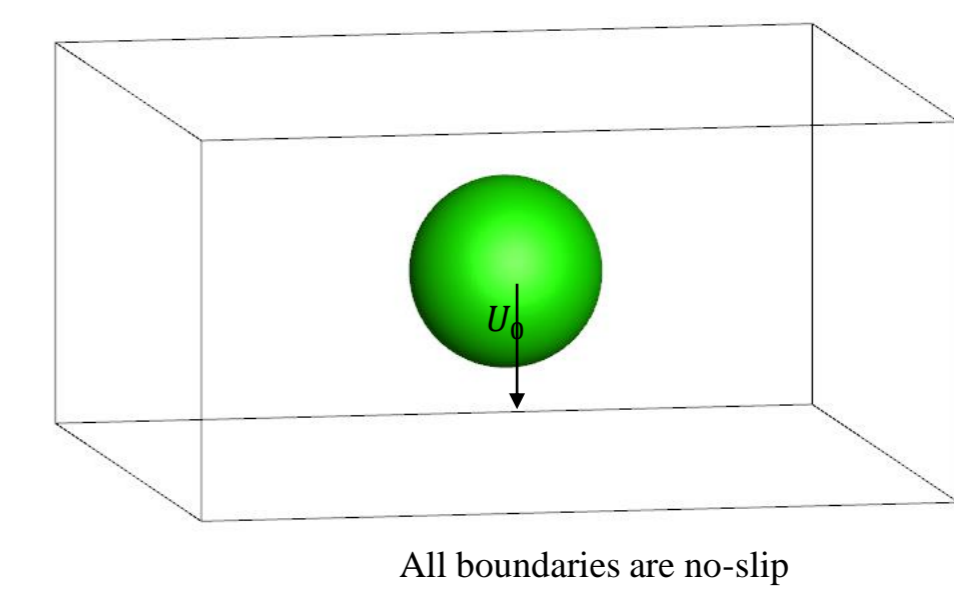


图4 计算模型

夹带空气形成机理

夹带空气形成前, 随着时间的增加, 夹带空气处的压力发生剧烈变化; 气液两相之间的压差是影响界面变化和夹带空气形成的主要因素。

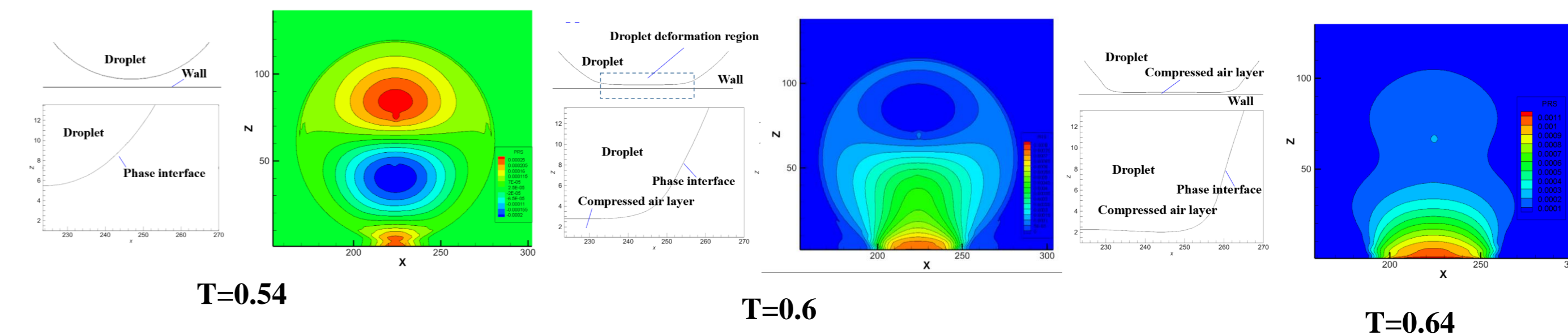


图5 撞壁前x-z截面两相界面及压力分布

夹带空气运动机制

夹带空气层撞击壁面后开始收缩聚拢并合并, 其运动过程中在夹带空气处产生涡结构并促使其运动, 液滴内部的气液压力分布也是决定夹带空气运动的因素之一。

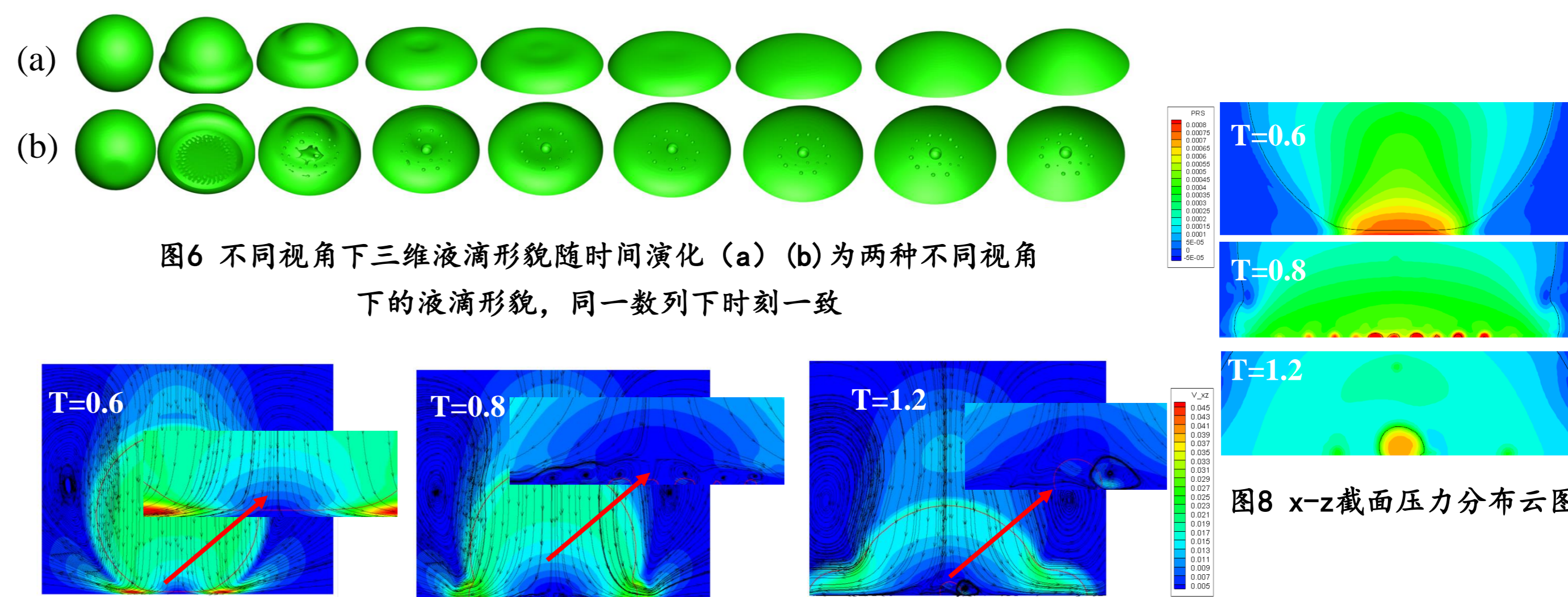


图6 不同视角下三维液滴形貌随时间演化 (a) (b) 为两种不同视角下的液滴形貌, 同一数列下时刻一致

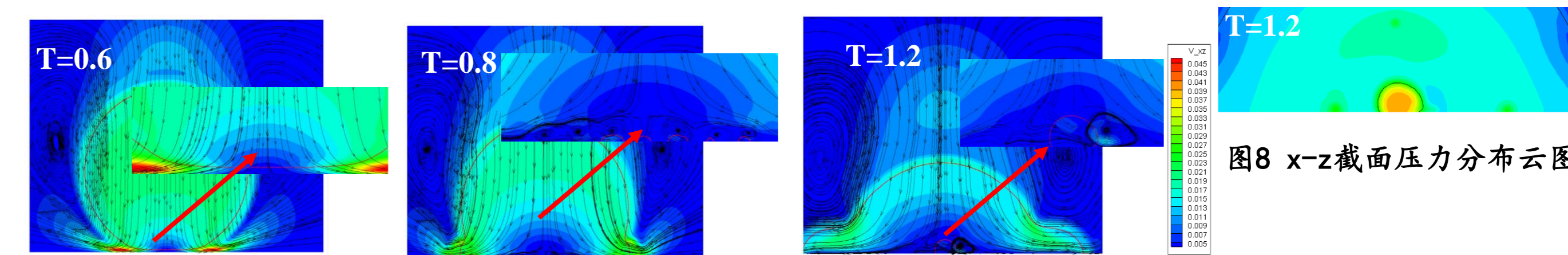


图7 x-z截面速度分布云图

夹带空气传热影响分析

分析X-Z截面下温度云图及壁面热流密度分布, 可观察到在夹带空气的影响下, 液滴撞击壁面中心点处热流密度骤降。

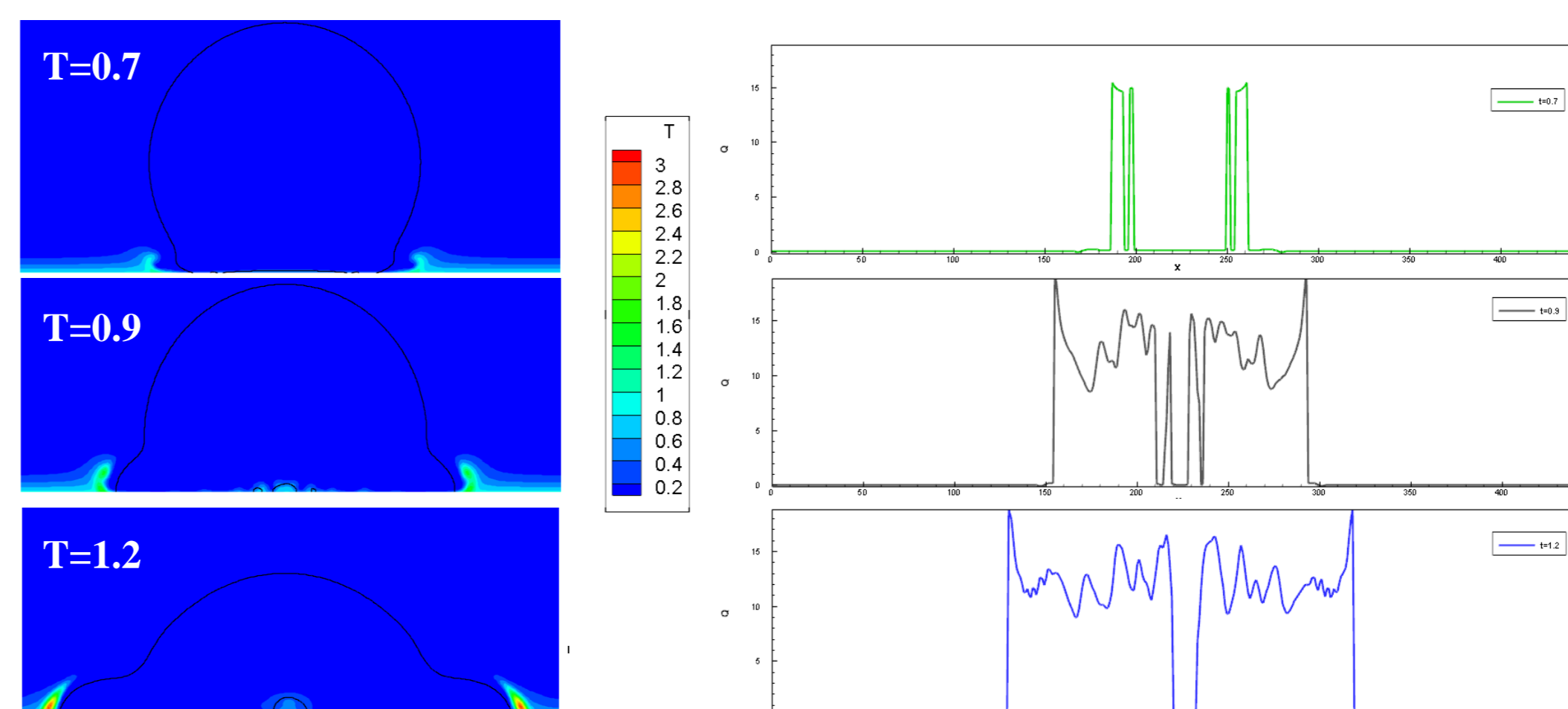


图9 X-Z截面温度分布云图

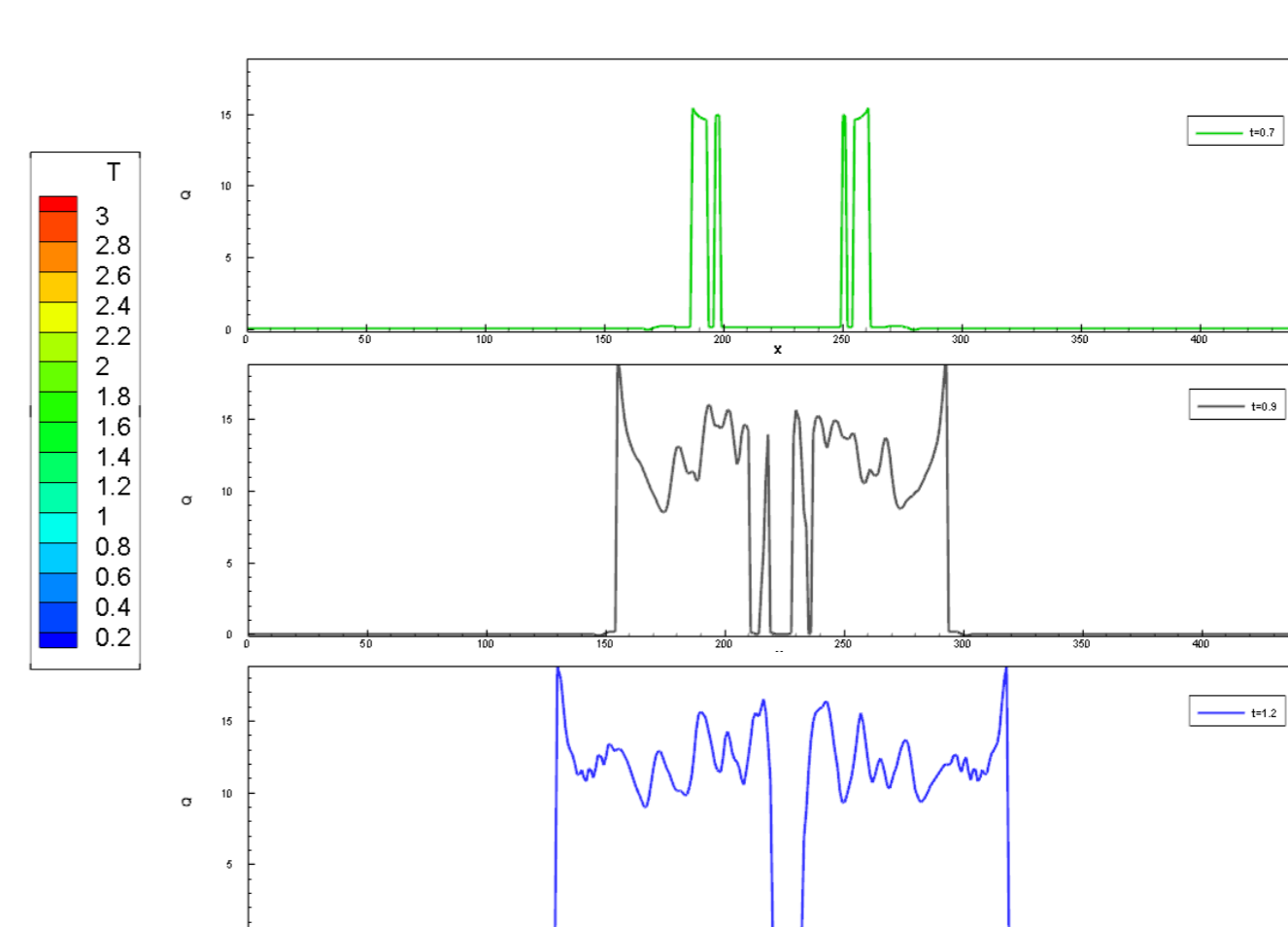


图10 X-Z截面壁面热流密度分布

参考文献

- [1] Lee J S, Weon B M, Je J H, et al. How does an air film evolve into a bubble during drop impact. Physical Review Letters, 2012, 109(20): 204501.
- [2] Halder S, Granda R, Wu J W, et al. Air bubble entrapment during drop impact on solid and liquid surfaces. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 149: 103974.
- [3] Fakhari A, Bolster D. Diffuse interface modeling of three-phase contact line dynamics on curved boundaries: A lattice Boltzmann model for large density and viscosity ratios. Journal of Computational Physics, 2017, 334, 620-638.