

板间液滴射流的参数化建模及实验与数值研究

王广航^{1,3} 黄荐² 王静竹^{1*} 王一伟^{1,2,3}

1 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190 2 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

3 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049

介绍/亮点 Introduction/Highlight

- ✓ 界面平衡与稳定性效应
- ✓ PMMA涂料控制板间亲、疏水液面
- ✓ 空泡动力学和溃灭射流、界面射流破碎行为

- ✓ 板间接触角和空泡内压强对液面变形、射流速度演变的影响
- ✓ 复杂液面接触角条件下的射流形态畸变及“卷吸”作用
- ✓ 复杂液面的聚焦效率参数化建模

Methods

- ✓ Nd: YAG 脉冲激光器供给能量
- ✓ 50 KV 高压电火花空化空泡

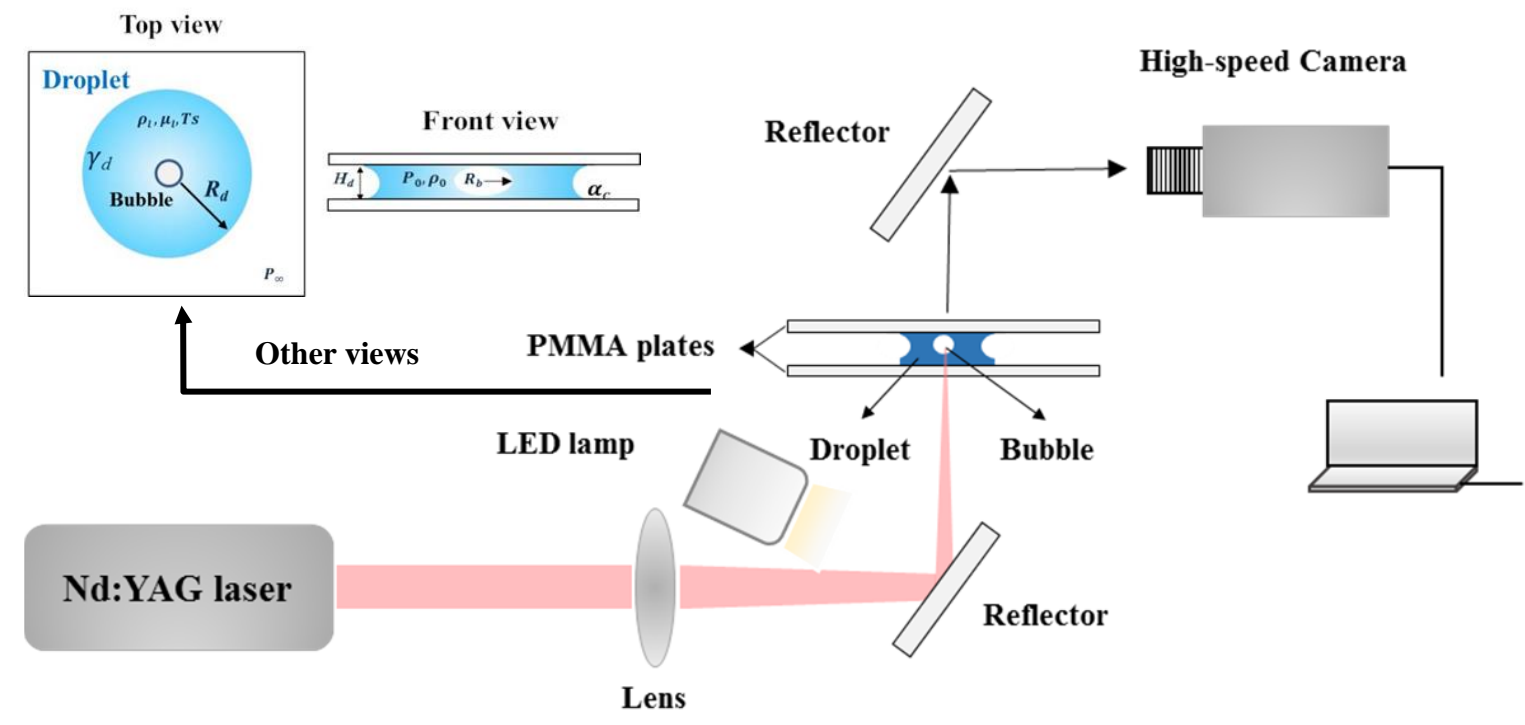


Fig.1 实验系统建模

- ✓ 聚甲基丙烯酸甲酯改变亲疏水性
- ✓ Phantom V1612高速相机拍照

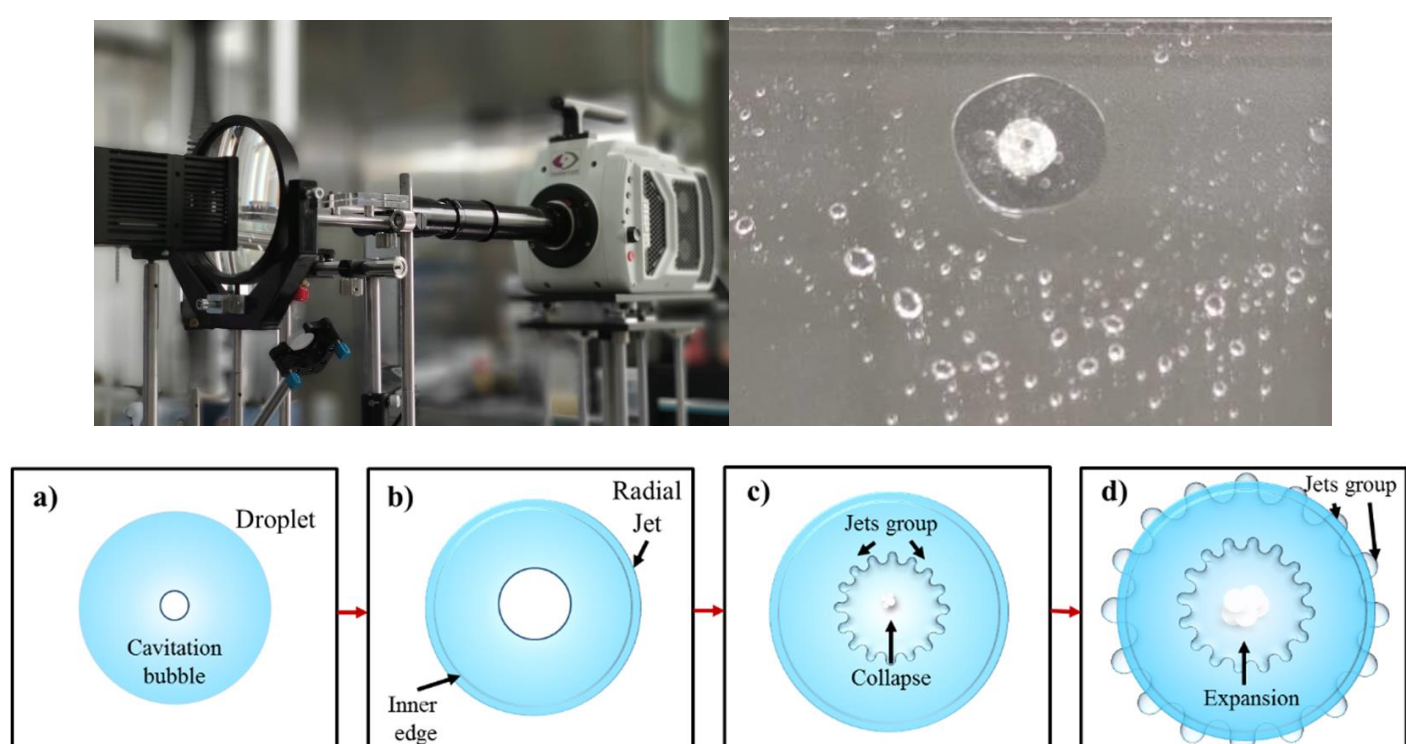


Fig.2 仪器及气泡发展过程

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)改变亲疏水性

聚甲基丙烯酸甲酯喷涂到有机玻璃表面, 可实现不同的亲疏水性, 控制加入板间水滴量, 可实现板间液滴形成特定液滴直径及接触角(上、下接触角为 β, α)。

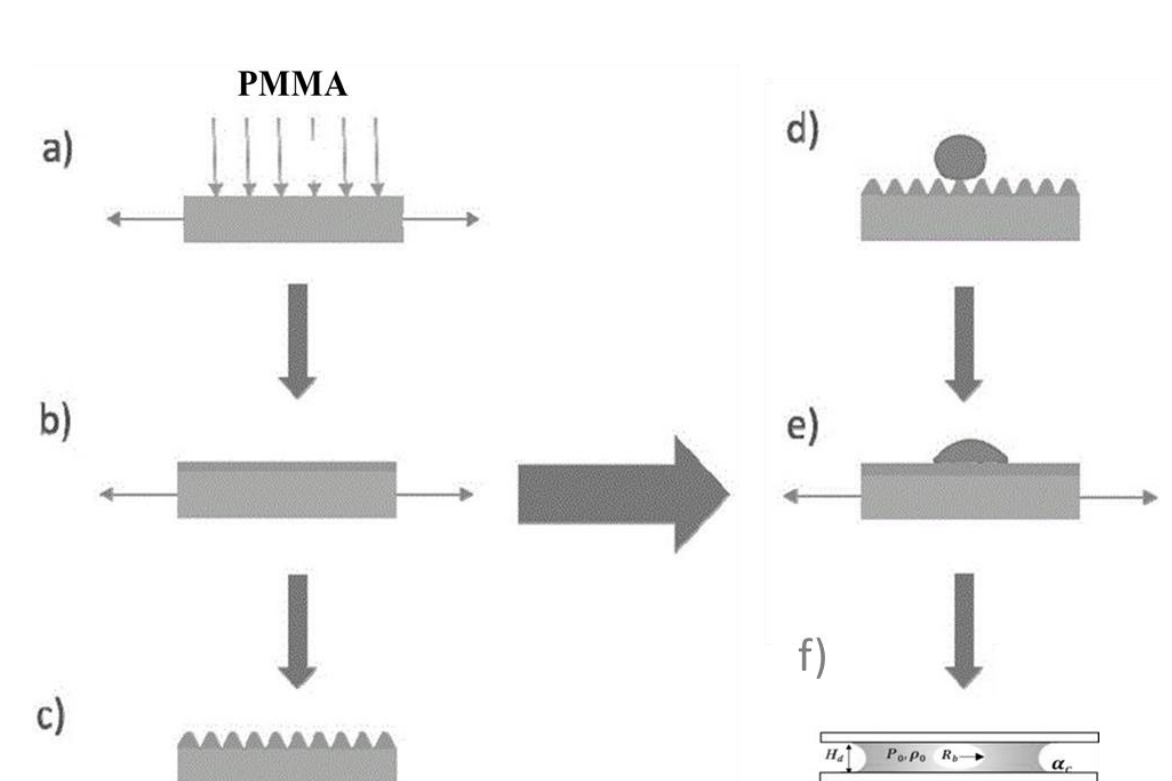


Fig.3 亲疏水性控制示意图

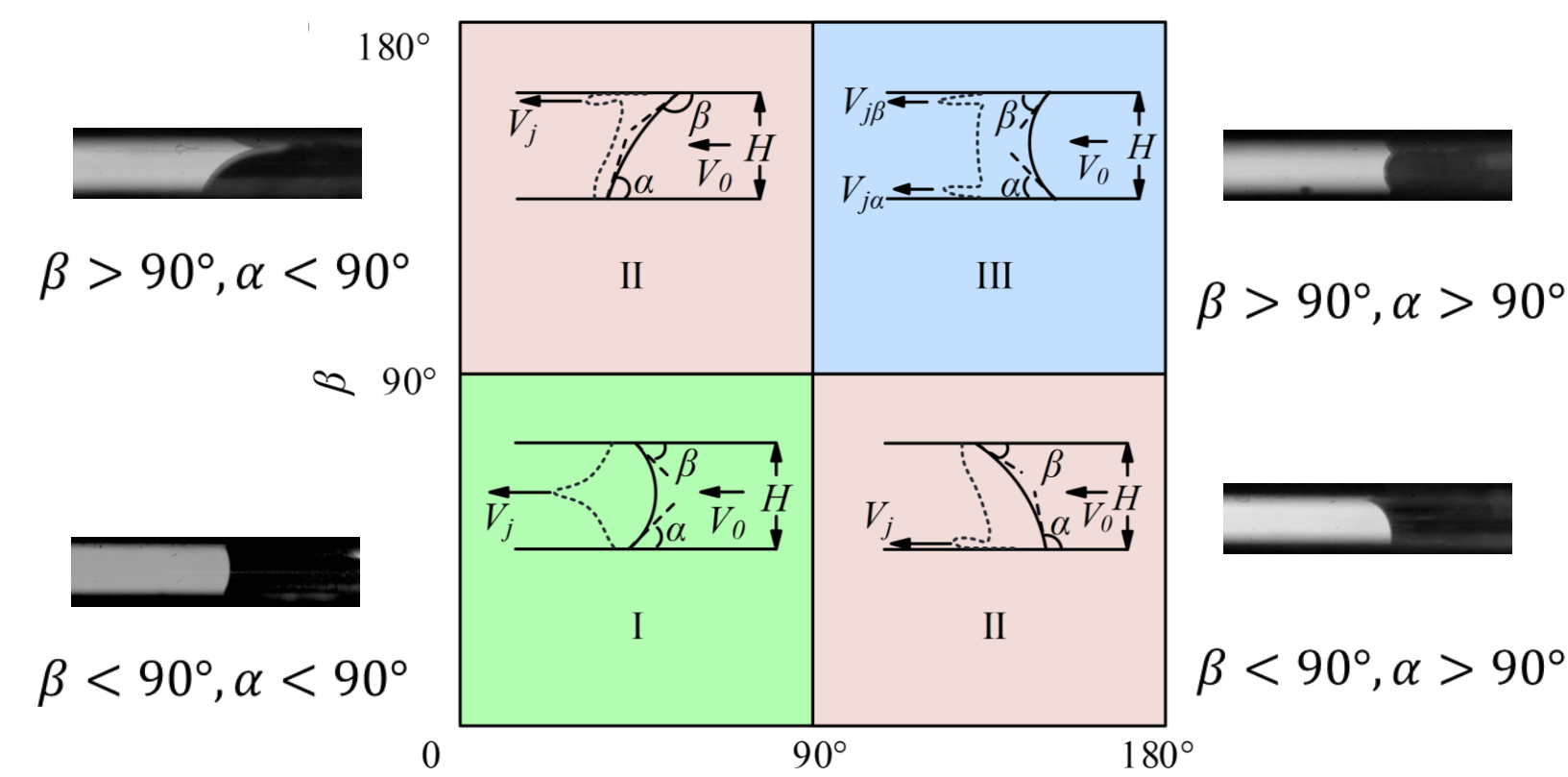
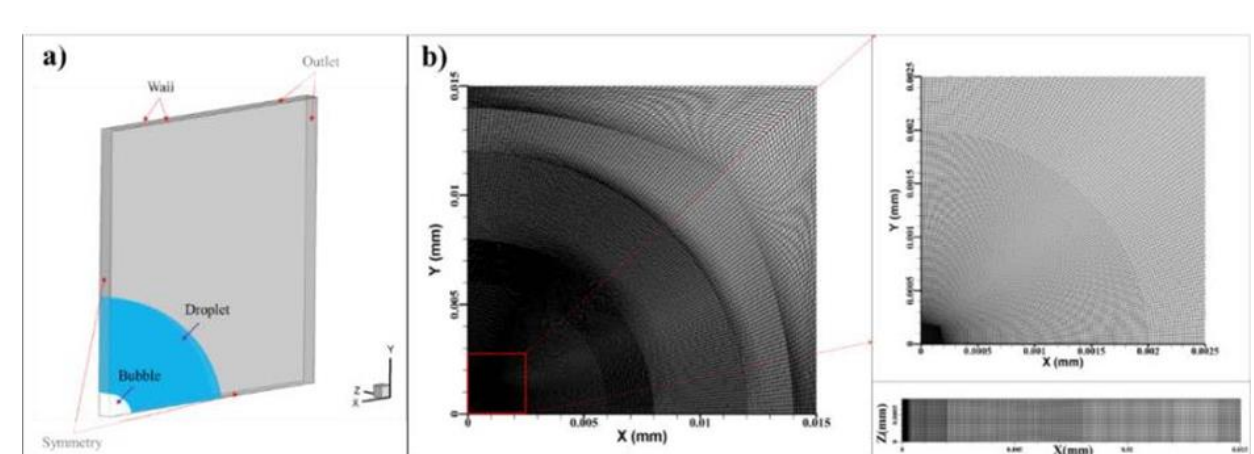


Fig.4 板间液滴三种接触角类型

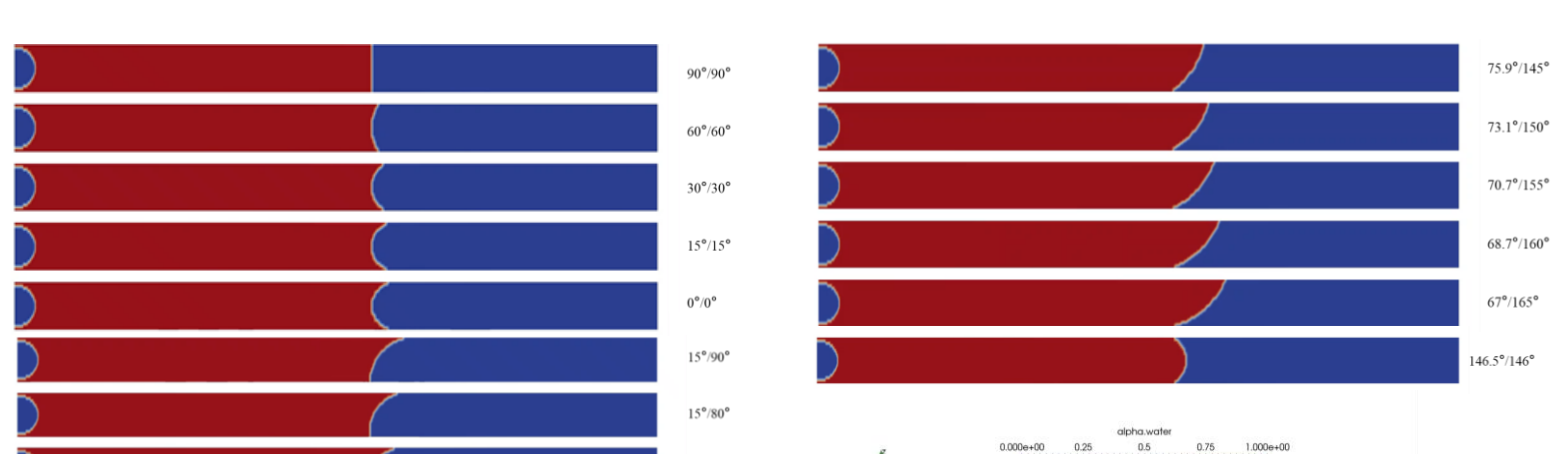
OpenFOAM建模仿真

采用OpenFOAM的LES湍流模型(KEqn)及VOF界面捕捉方式, 内置SetFields以及FunkySetFields函数初始化流场, 以及可压缩求解器CompressibleInterFoam求解器仿真了上述不同亲、疏水性情况下的板间空泡射流。



- 三维对称模型
- 网格数: 916,800
- O-block结构化网格
- 网格无关性验证

Fig.5 板间液滴空化射流网格建模



- 上、下接触角为 β, α
- 实验气泡初始生成位置无关性验证

Fig.6 不同接触角初始物理场

Theory Modelling

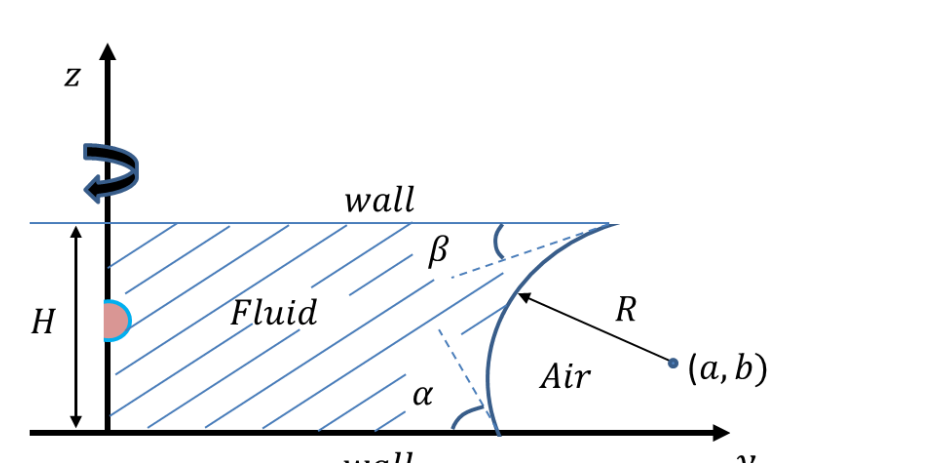


Fig.7 板间液滴理论建模

2D- Young-Laplace Equation

$$\left[1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2\right]^{-3/2} \frac{d^2x}{dy^2} = -\frac{\Delta p}{\gamma}$$

Ignore gravity Δp is constant

$$\left[1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2\right]^{-3/2} \frac{d^2x}{dy^2} = \frac{1}{R} = -\frac{\Delta p}{\gamma}$$

Integration

$$R = \frac{H}{\cos\alpha + \cos\beta}$$

Summary:

不计重力, 板间距离 H , 以及上下板的接触角决定了板间液面的圆弧半径与圆心

Results/Discussion

不同接触角类型射流演变主要过程

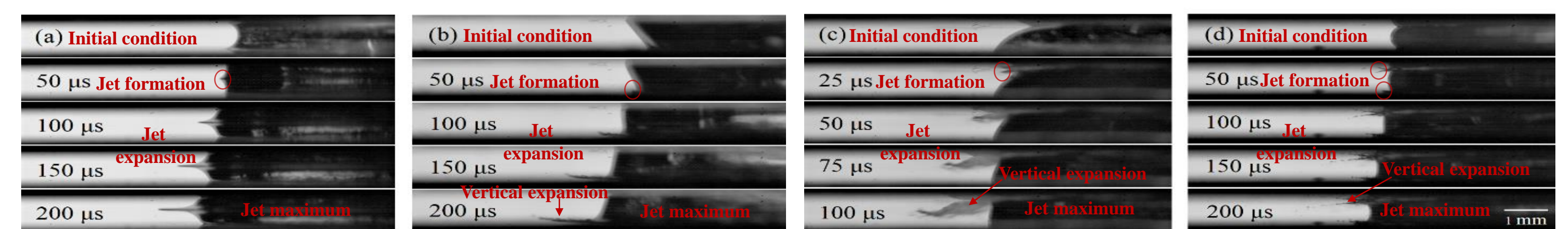


Fig.8 实验中板间液滴不同接触角类型I(a)、II(b)、III(d)的射流演变过程

不同类型接触角情况下平板间射流的演化过程大致相似, 主要经历了初始状态, 气泡的膨胀过程, 射流初始形成过程, 射流发展阶段, 射流最大值阶段; 亦捕捉到了射流在形成过程中的垂向上的扩张, 考虑到可能是壁面受激光能量冲击带来的垂向震荡效应。

实验与CFD结果对比

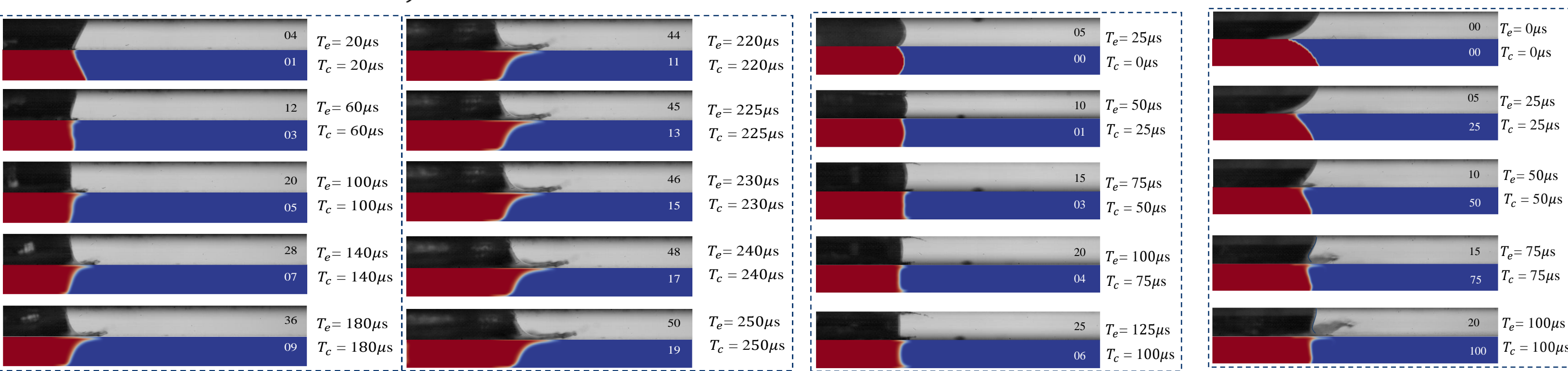
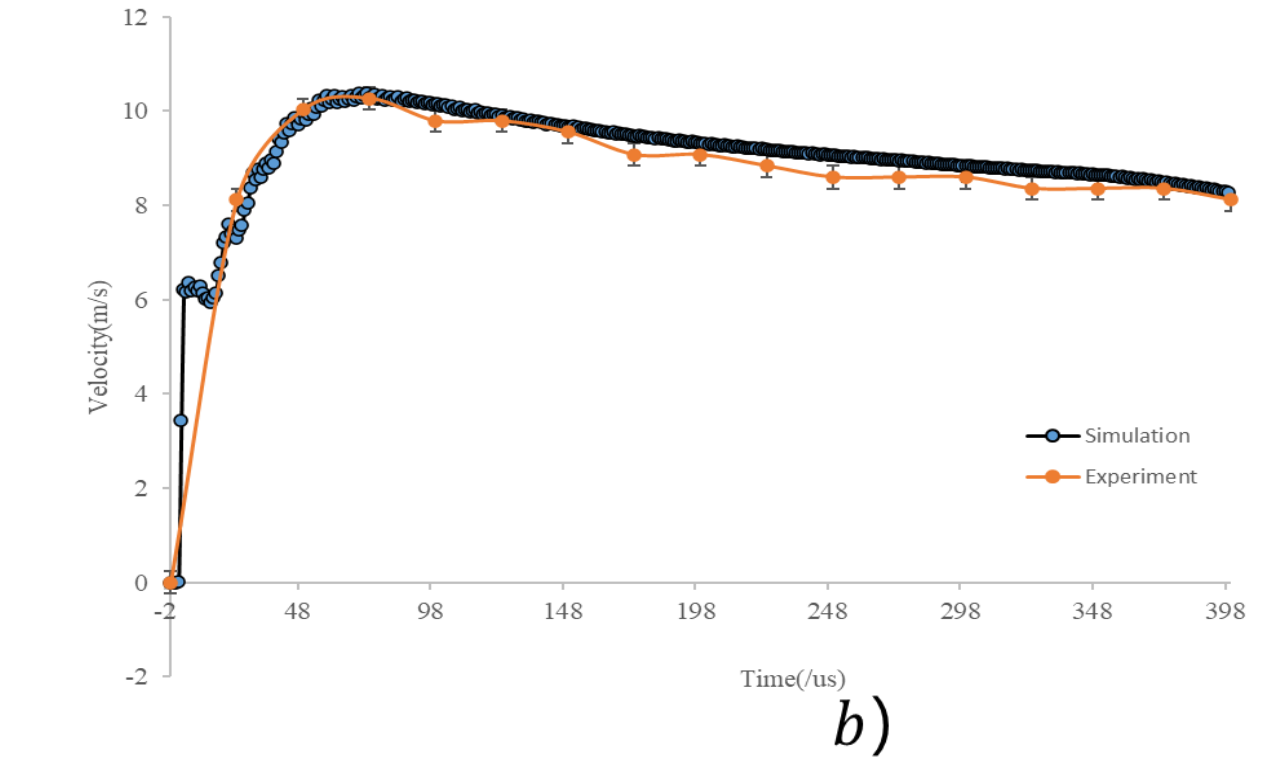
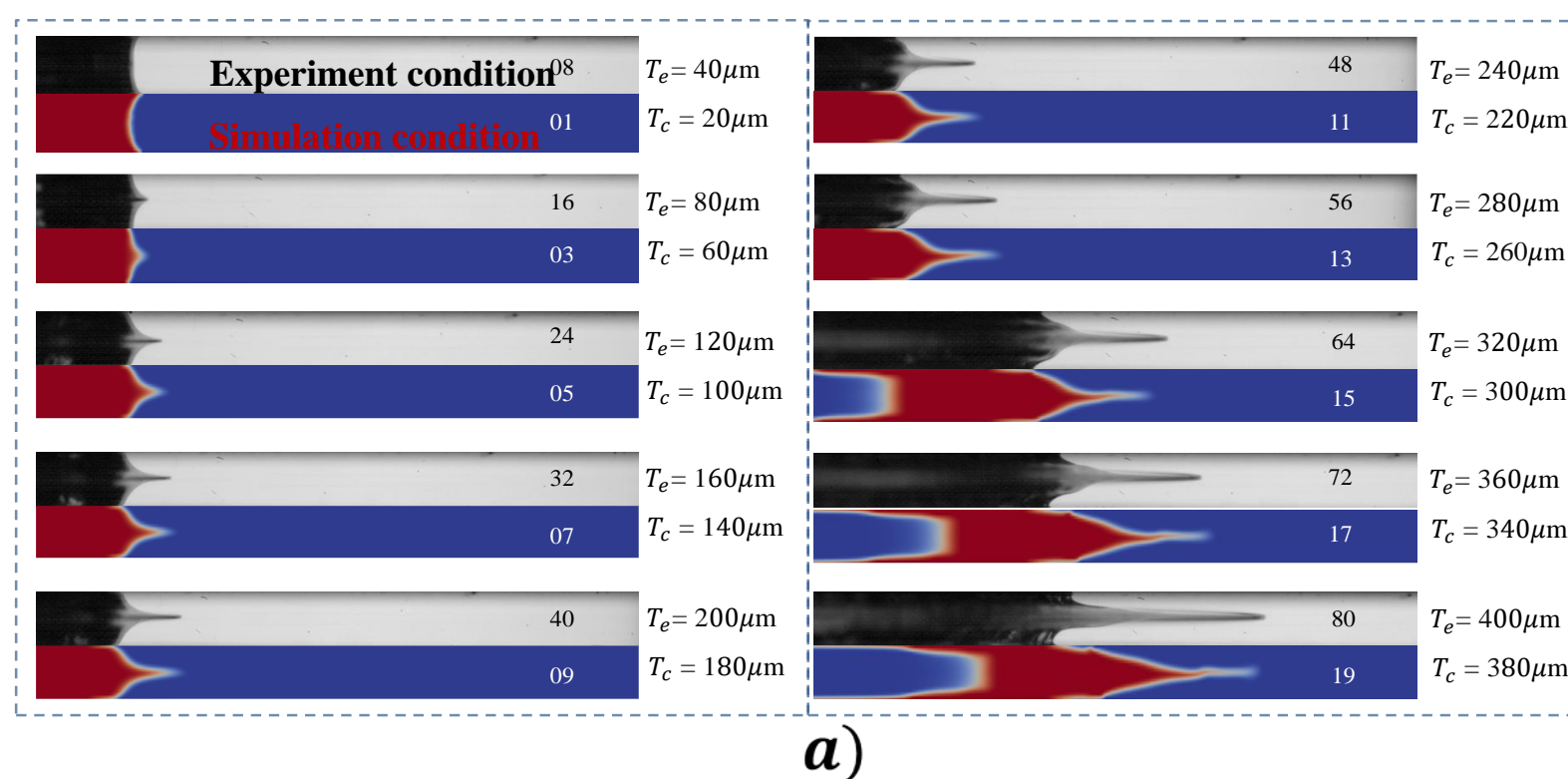


Fig.9 实验与数值仿真工况下射流随时间演变过程对比(a: $\beta = 11^\circ, \alpha = 18^\circ$; b: $\beta = 11^\circ, \alpha = 18^\circ$ 时射流速度对比; c: $\beta = 60^\circ, \alpha = 117^\circ$; d: $\beta = 146.5^\circ, \alpha = 146^\circ$; e: $\beta = 66.4^\circ, \alpha = 167.4^\circ$)

实验与数值仿真射流速度结果具有很高的一致性; 不同接触角的实验与仿真吻合度高;

射流形态畸变及“卷吸”现象

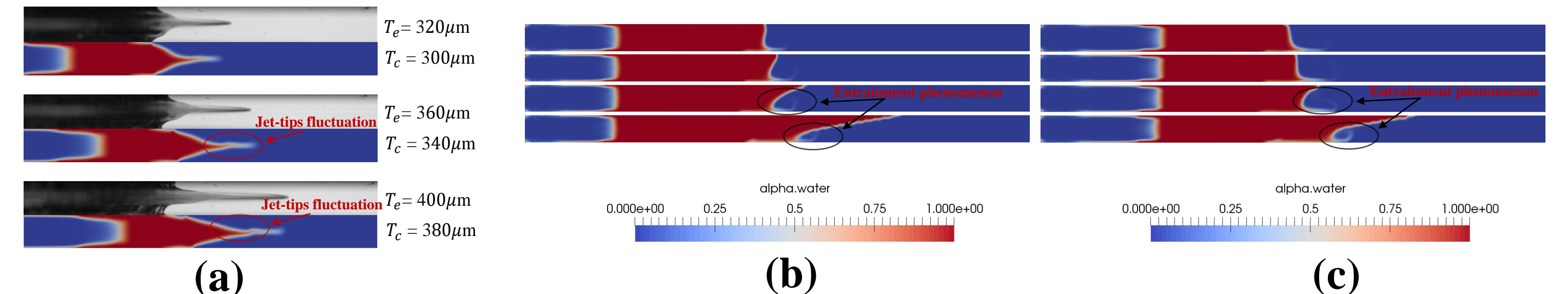


Fig.10 射流顶点的非线性小幅振荡(a)及“卷吸”现象(b, c)

复杂液面的聚焦效率参数化建模

实验聚焦效率 $\eta_E = \frac{V_j - V_0}{V_0}$ V_j 最大射流速度; V_0 聚焦前的初始速度

■ 三种不同接触角类型时预测聚焦效率 η_p 为:

I型接触角:

$$\eta_{p-I} = \frac{1}{2}(\cos\alpha + \cos\beta)^2 \sqrt{\frac{2\cos\beta}{\cos\alpha + \cos\beta}}$$

II型接触角:

$$\eta_{p-II} = -\cot\alpha[2.971 + 2.496(\cos\alpha + \cos\beta)]$$

III型接触角:

$$\eta_{p-III-\alpha} = -\cot\alpha(2.971 + 2.496\cos\alpha)$$

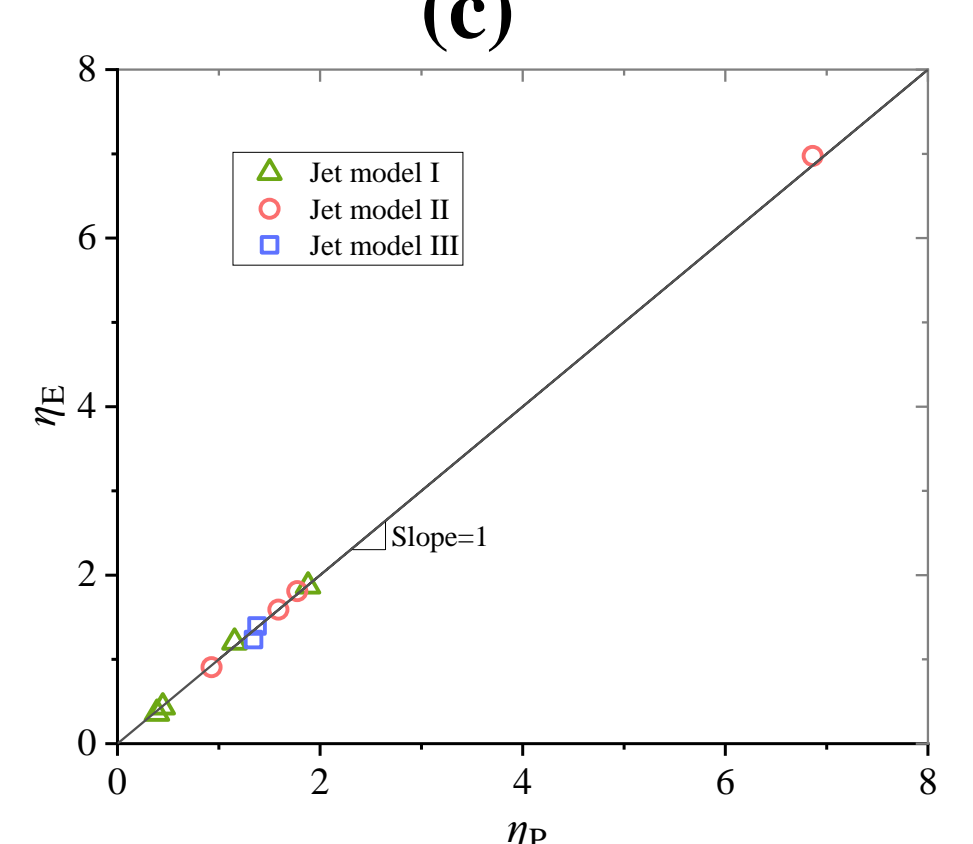


Fig.11 实验及预测聚焦效率对比

Conclusions

1. 观测不同类型接触角射流演变, 实验捕捉了板间射流主要历程(初始状态, 气泡的膨胀过程, 射流初始形成过程, 射流发展阶段, 射流最大值阶段); 以及射流在形成过程中的垂直板面方向上的扩张;
2. 实验与仿真中不同类型(I、II、III)接触角引起的射流演变过程一致, 两者射流速度曲线基本重合, 证明CFD仿真方法与设置的合理性与可行性;
3. 仿真中发现射流在上下表面非对称接触角时($\beta \neq \alpha$), 射流形态会发生畸变, 且在上下接触角差别较大时会形成“卷吸”现象;
4. 对接触角进行分类, 通过建立无量纲判别条件, 对射流的聚焦效率进行预测。

Main references

1. A. Kiyama, Y. Tagawa, K. Ando, and M. Kameda, J. Fluid Mech. 787, 224 (2016).
2. E. Turkoz, A. Perazzo, H. Kim, H. A. Stone, and C. B. Arnold, Phys. Rev. Lett. 120, 074501 (2018).