

# 垂直平板绕流下液滴气动破碎的实验研究

康鹏，郭鉴锋，穆恺，司廷\*

中国科学技术大学近代力学系

\*Email: tsi@ustc.edu.cn

## 引言

液滴的气动破碎过程涉及边界层流动与分离、高速绕流、界面不稳定性发展等基本物理问题，在发动机燃料雾化，飞行器雨滴侵蚀等方面有着重要的应用及研究价值。目前对于均匀来流中液滴的气动破碎问题已有较为全面的研究<sup>[1-2]</sup>，而在自然界和工程实际中广泛存在着各类非均匀非定常流场，例如在飞行器表面的绕流流场中，液滴的气动破碎对于其结冰与除冰是个值得关注的问题。目前研究发现，低韦伯数情况下液滴在绕流流场中会表现出钉扎、回弹等特征<sup>[3-4]</sup>，而高速绕流流场下的液滴气动变形与破碎研究较少，液滴变形和破碎机制尚不明晰，相关研究有待开展。

## 研究方法

本实验在自主设计搭建的垂直激波管系统中进行。垂直平板绕流由平面激波冲击柱体上表面产生，柱体上表面与气流方向垂直，液滴位于其中央，如图1所示。本实验中，液滴为去离子水，液滴直径为 $d=1.6\sim 3.2$  mm。柱体表面进行了疏水处理，液滴接触角为 $130^\circ\sim 150^\circ$ 。柱体直径 $D=3$  mm~10 mm。激波马赫数为 $Ma=1.18$ ，波后气体为空气，波后速度为 $U=94$  m/s。

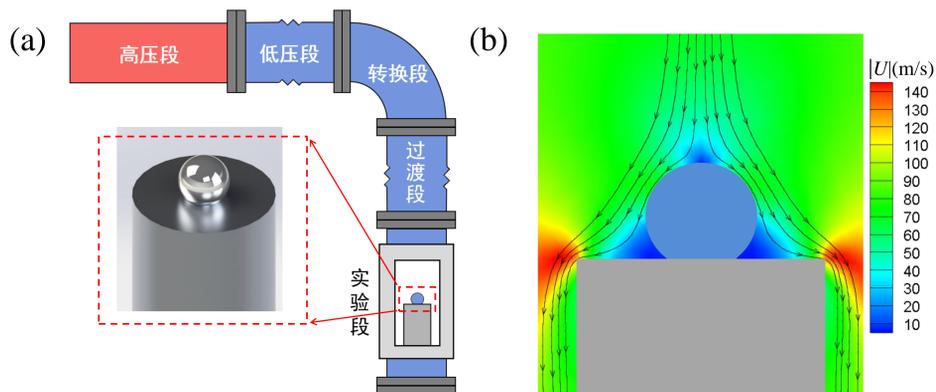


图1 (a) 垂直激波管装置图 (b) 流场示意图

## 结果

我们基于高速摄影的拍摄结果，对液滴的演化进行动力学分析，采用液滴直径 $d$ 为特征长度，波后气体速度 $U$ 为特征速度对实验时间及各参数与进行无量纲化。图2给出了液滴在 $D=8$  mm,  $d=2.6$  mm工况下，几个关键时间节点的演化图像。在垂直平板绕流下，液滴迎风面会产生标志性的Rim结构( $t^*=0.28$ )，随着时间的发展，Rim结构在迎风面上铺展并最终从液滴主体剥离( $t^*=0.84$ )，之后破碎( $t^*=0.92$ )。图3(a)给出了同样工况下，液滴在破碎过程中无量纲的Rim直径 $r_1^*$ 、迎风面直径 $r_2^*$ 和高度 $H^*$ 随无量纲时间的变化。由定量数据可看出，Rim结构在无量纲时间 $t^*=0.42$ 至 $t^*=0.84$ 之间的铺展是线性的，根据液滴的行为特征，我们将此阶段命名为剥离阶段， $t^*=0.42$ 之前和 $t^*=0.84$ 之后的阶段分别命名为变形阶段与破碎阶段。同时，在Rim从迎风面剥离后，迎风面直径同样呈近似线性铺展。

为解释并预测液滴在绕流流场中的变形和破碎行为，我们提出了由能量守恒出发的分析液滴运动的方法。液滴的能量增加主要来源于气流产生的气动压力的做功( $k\rho_g U_2 r_2^2 dH$ )，并体现为动能的增加和表面能的增加( $dE_k + dE_s$ )。将液滴主体假设为圆台进行建模，最终可推导得(1)式。

## 结论

1. 在垂直平板绕流下，液滴迎风面会产生标志性的Rim结构，Rim结构在迎风面上逐渐铺展并最终从液滴主体剥离破碎。
2. 由能量守恒得到了液滴迎风面铺展的控制方程，由迎风面直径增长拟合出了气动阻力系数 $k$ ，并通过迎风面高度对比验证了模型的可靠性。

[1] Guildenbecher, D. R., López-Rivera, C. & Sojka, P. E. 2009 Secondary atomization. *Exp.Fluids* 46(3), 371–402.

[2] Theofanous, T. G. 2011 Aerobreakup of Newtonian and viscoelastic liquids. *Annu.Rev.Fluid Mech.* 43,661–690.

[3] Hooshanginejad, A., Dutcher, C., Shelley, M.J. & Lee, S. 2020 Droplet breakup in a stagnation-point flow. *J. Fluid Mech.* 901, A19.

[4] Edward B. W. & Jason A. S. 2008 A Runback Criterion for Water Drops in a Turbulent Accelerated Boundary Layer. *J. Fluid Eng.* Vol.130/061302-5

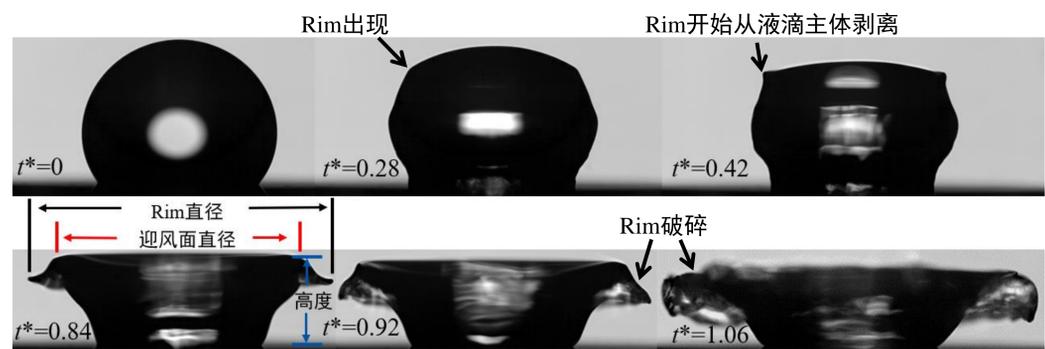


图2  $D=8$  mm,  $d=2.6$  mm工况下液滴的演化图像

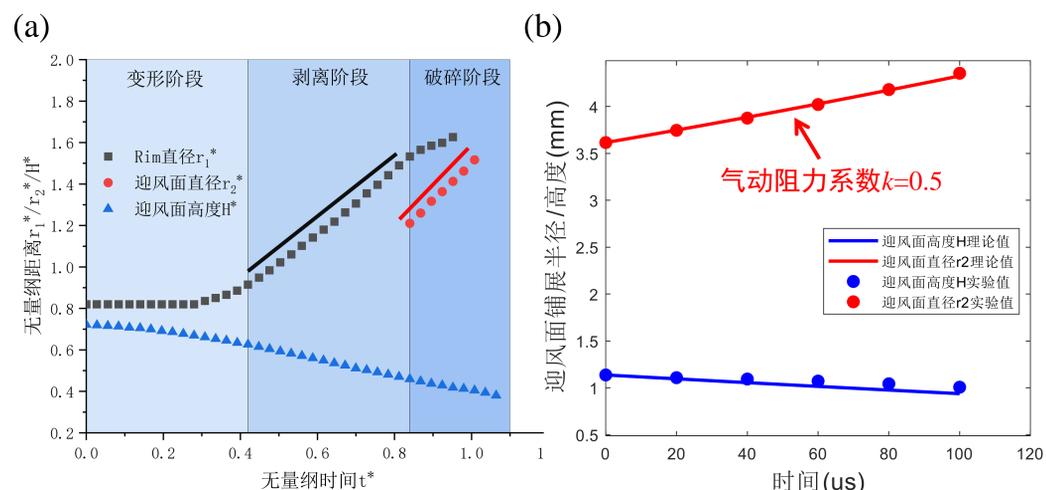


图3  $D=8$  mm,  $d=2.6$  mm工况下(a)液滴各无量纲量随时间的演化图像 (b)迎风面直径和高度的理论值与实验值对比图像

$$HB r_2'' + C r_2'^2 + \frac{D\sigma}{r_2} = \frac{kA\rho_g U^2}{\rho_l} \quad (1)$$

$$\text{其中: } A = \frac{dH}{dr_2} = \frac{(2r_2 + r_1)H}{r_2^2 + r_1^2 + r_1 r_2} \sim O(1) \quad B = \frac{\pi}{20} \left( \frac{r_1^2}{6r_2^2} + \frac{r_1}{2r_2} + 1 \right) \sim O(1)$$

$$C = AB + \frac{\pi}{20} \frac{H}{r_2} \left( \frac{r_1}{2r_2} + 2 \right) \sim O(1) \quad D = \pi \left( \frac{L}{r_2} + \frac{r_1 + r_2}{r_2} \frac{dL}{dr_2} + 2 \right) \sim O(10)$$

公式(1)中，气动阻力系数 $k$ 为待定参数，拟合发现，在 $D=8$  mm,  $d=2.6$  mm工况下，当 $k=0.48$ 时，理论结果可良好的预测实验中液滴迎风面的铺展，与 $k=1/2$ 的近似理论结果相近。同时迎风面高度 $H$ 与理论值也符合较好，验证了模型的可靠性。进一步工作拟对液滴周围流场进行定量示踪，对气动阻力系数 $k$ 进行理论预测，并明确柱体直径 $D$ 、液滴破碎阶段的迎风面直径 $r_2$ 及高度 $H$ 等参数对气动阻力系数 $k$ 的影响规律。