

# 均匀各向同性湍流中液滴团聚的实验研究\*

朱航宇<sup>1</sup>, 连欢<sup>2</sup>, 潘翀<sup>1</sup>, 王晋军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>流体力学教育部重点实验室, 北京航空航天大学, 北京 100191)

(<sup>2</sup>中国科学院力学研究所, 北京 100191)

**摘要** 湍流与惯性颗粒相互作用在云物理、沙尘暴、气力输送和喷雾燃烧等地球物理现象和工业应用中广泛存在。由于湍流掺混效应和颗粒惯性的联合作用, 颗粒在湍流中呈现非均匀的空间分布, 这种现象被称为颗粒倾向聚集现象<sup>[1][2]</sup>; 具体表现为在颗粒空间分布上形成局部浓度高于平均值的团聚区和低于平均值的空隙区。此现象对众多工程应用均造成显著影响; 例如, 在聚集区中油滴的蒸发速率会降低, 从而导致局部燃油富集区的出现, 由此造成颗粒物排放的增加和燃烧效率的降低。因此, 了解液滴聚集的机理对于优化众多的工程实际应用至关重要。颗粒-湍流相互作用是一个多尺度、非稳态的复杂物理过程, 研究颗粒-湍流之间的关联耦合效应以及颗粒团聚的物理机制尤为困难。均匀各向同性湍流 (Homogeneous isotropic turbulence, HIT) 是一种对复杂湍流的较为理想的简化<sup>[3]</sup>, 由于没有平均剪切流动贡献, 特别适合于研究多相流动。

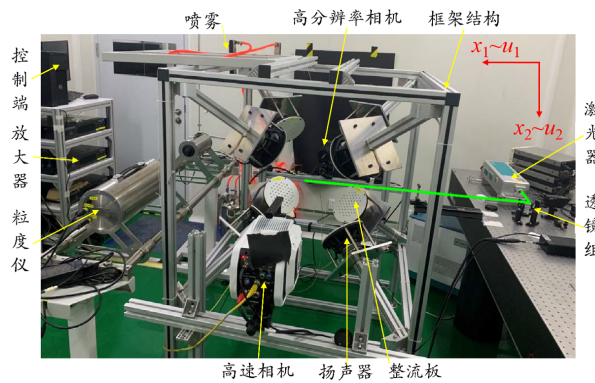


图 1 各向同性湍流生成装置及实验测量系统

如图 1 所示, 是中科院力学所的均匀各向同性湍流实验装置, 其中 HIT 由八个扬声器的薄膜振动产生的空气射流形成; HIT 区域在图中框架中心约 5cm<sup>3</sup> 的范围内。通过调节各个扬声器的幅值可以调节射流强度, 从而改变 HIT 的泰勒雷诺数 ( $Re_\lambda$ )。液滴由位于框架上方的喷雾产生, 喷头位于测量区域 (框架中心) 正上方 1m; 通过调节喷雾的空气流量可以调节液滴粒径大小, 调节喷雾的液体流量可以调节测量区域液滴的体积分数。

表 1 各向同性湍流基本参数

| 工况   | 泰勒雷诺数<br>$Re_\lambda$ | 湍动能 $q^2$<br>(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | 耗散率 $\varepsilon$<br>(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ) | Kolmogorov<br>时间尺度 $\eta$ (mm) | 泰勒微尺度 $\lambda$<br>(mm) |
|------|-----------------------|--|--|--------------------------------|-------------------------|
| 工况 A | 227                   | 0.75   | 0.226  | 3.3                            | 6.7                     |
| 工况 B | 264                   | 0.88   | 0.209  | 2.8                            | 6.7                     |

在对流场进行标定后, 本实验先采用高分辨率 (4400 × 4400 pixel<sup>2</sup>) CCD 相机测量无液滴的各向同性湍流二维流场, 采样频率为 1Hz, 测量区域为 53 mm ( $x_1$ ) × 53 mm ( $x_2$ ), 其

\* 资助项目: ① 国家自然科学基金创新研究群体项目—NFSC No. 11721202. ② 国家自然科学基金项目“各向同性湍流中颗粒团聚结构及多尺度聚集效应的特性研究”—NFSC No. 11872366. Email: [zhuyrise@buaa.edu.cn](mailto:zhuyrise@buaa.edu.cn)

中 $x_1$ 为垂直重力方向,  $x_2$ 为平行重力方向; 相应的速度分别为 $u_1$ 和 $u_2$ , 如图 1 所示; 采用基于多层迭代变形窗口的互相关算法计算气相速度场, 最后一层的查询窗口尺寸为  $32 \times 32$  pixel<sup>2</sup>, 重叠率为 75%; 向量场空间分辨率为 0.38 mm/vector; 向量间距约为 0.1mm 或 0.5 $\eta$ 。如表 1 所示为两个泰勒雷诺数情况下各向同性湍流的基本参数。

其后, 用同样的实验配置测量液滴在 HIT 中的运动。在本实验中测试了三种不同的空气流量, 并保持液体流量不变, 液滴的体积分数约为  $1 \times 10^{-5}$ , 可以认为液滴对流场基本没有影响。为了消除传统 PTV 算法计算液滴速度时出现的像素锁定现象, 本实验中液滴速度采用 PTV 互相关算法获得液滴的离散速度场。作为对照实验, 也测量了没有湍流(即未开扬声器)时, 相同喷雾条件(液体和空气流量)下测量区域内液滴的运动和分布状态。最后用粒度仪测量了待测区域内液滴的粒径分布, 并计算得到液滴的斯托克斯数 $St_p$ , 发现液滴粒径表现出明显的多分散性。

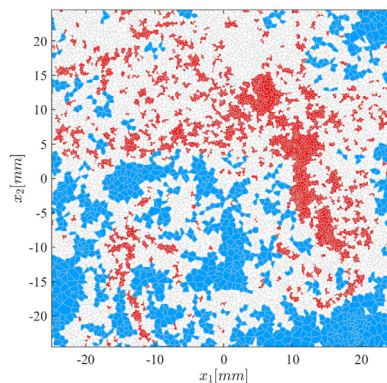


图 2 采用 Voronoi 分析识别得到的某瞬时液滴团聚区域(红色连通域)和空隙区域(蓝色连通域)

通过对比存在和不存在各向同性湍流时液滴的运动和空间分布, 发现: 在湍流作用下, 液滴出现了明显的团聚作用, 且团聚强度随 $Re_\lambda$ 的增加而增加。采用 Voronoi 分析提取出液滴空间分布中的团聚区域和空隙区域, 如图 2 所示。进一步的分析发现, 团聚区中的液滴的沉降速度( $u_2$ )明显高于空隙区的液滴, 后者更接近于流场速度; 团聚区中的液滴沉降速度随浓度增加而增加, 而空隙区中的沉降速度与浓度只呈弱相关。产生这种现象的原因是惯性液滴的局部扫掠现象, 即在湍流的作用下, 液滴倾向于朝重力方向运动, 继而形成沿重力方向的团聚。另外, 对液滴团聚区进行了几何特性的分析, 发现液滴团聚区存在自相似特性。对单个团聚区中的液滴空间坐标进行奇异值分解, 从而得到单个团聚区域的主轴长度、长细比、倾角等; 发现团聚尺度越大, 团聚区的长细比越大, 且越倾向于重力方向。基于 Voronoi 分析, 将液滴的速度信息映射到相应的 Voronoi 多边形内, 可以对液滴的速度场进行两点相关分析, 同时对湍流场也进行此分析, 发现液滴的横向速度分量 $u_1$ 的相干结构的横向和纵向尺度同步减少, 其尺度比例与湍流的 $u_1$ 分量基本一致, 说明液滴 $u_1$ 分量遵循湍流的尺度相关性; 而对于液滴 $u_2$ 分量的相干结构, 相比流场, 横向、纵向尺度均有增加, 且横向尺度增加更多, 这有可能是重力对液滴团聚结构的产生了显著的影响。

关键词: 均匀各向同性湍流, 两相湍流, 液滴团聚

## 参 考 文 献

- 1 Maxey, M. R. 1987. The gravitational settling of aerosol particles in homogeneous turbulence and random flow fields.
- 2 Balachandar, S. and J. K. Eaton 2010. Turbulent Dispersed Multiphase Flow. Annual Review Fluid Mechanics 42(1): 111-133.
- 3 Lian H, Chang X Y, Hardalupas Y. Time resolved measurements of droplet preferential concentration in homogeneous isotropic turbulence without mean flow. Physics of Fluids, 2019, 31(2).