

DOI:10.11918/202409030

中斯托克斯数载粒子射流速度演变实验分析

李庆展^{1,2}, 曾怡¹, 李泳耀¹, 姜华伟¹, 刘宇飞¹, 江磊¹, 王维³

(1. 中国兵器工业集团 中兵智能创新研究院有限公司, 北京 100072; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 3. 中国科学院 过程工程研究所, 北京 100190)

摘要: 为系统全面地理解中斯托克斯数载粒子射流(MSPJ)的动力学特性, 并验证泰勒流体粒子理论在更小粒子情况下的适用性, 开展了中斯托克斯数载粒子射流速度演变实验分析。首先, 搭建了粒子图像测速(PIV)实验台。其次, 分别进行了6组不同初速度下的宏观大尺度与介观尺度测量实验。最后, 进行了两种尺度下粒子的瞬时速度、平均速度和脉动速度的演化规律对比分析, 并结合泰勒流体粒子理论模型对MSPJ速度衰减进行了预测和验证分析。结果表明: 沿射流中心线的粒子平均速度衰减趋势与气相相似, 呈现出先增大后减小的趋势; 而由于壁面反弹的低速粒子与射流中心的高速粒子混合, 粒子脉动速度的衰减显著不同, 呈现出先减小后增大再减小的趋势。此外, 喷嘴附近的粒子脉动速度场与平均速度场的分布存在显著差异, 脉动速度场表现为中间速度较小、边缘及过渡区速度较大的分布特征, 平均速度场则相反。泰勒流体粒子理论对MSPJ粒子速度衰减预测的最大累积误差为6.16%。重粒子的速度自相似性因明显的惯性效应而更快衰减。本研究能够为滑移速度、曳力及发动机油液喷雾等相关领域的进一步研究提供参考。

关键词: 射流; 中斯托克斯数; 速度场; 粒子图像测速(PIV); 衰减

中图分类号: O358

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)08-0105-10

Experimental analysis of velocity evolution in moderate-Stokes-number particle-laden jets

LI Qingzhan^{1,2}, ZENG Yi¹, LI Yongyao¹, JIANG Huawei¹, LIU Yufei¹, JIANG Lei¹, WANG Wei³

(1. China North Artificial Intelligence & Innovation Research Institute, Norinco Group, Beijing 100072, China;
2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To systematically and comprehensively understand the dynamics of the moderate-Stokes-number particle-laden jet (MSPJ) and to verify the applicability of Taylor's fluid particle theory for smaller particles, an experimental analysis of the velocity evolution of moderate-Stokes-number particle jet is carried out. Firstly, a particle image velocimetry (PIV) experimental bench is built. Then, six sets of experiments including macroscopic large-scale and mesoscale measurements are carried out at different initial velocities. Finally, the evolution characteristics of instantaneous velocity, average velocity and fluctuating velocity of particles at two scales are compared and analyzed, and the MSPJ velocity decay is predicted and verified by combining with Taylor's particle-laden fluid theory model. The results indicate that the average velocity of particles along the jet centerline decays similarly to the gas phase, exhibiting an initial increase followed by a decrease. In contrast, due to the mixing of low-velocity particles rebounding off the wall and high-velocity particles in the center of the jet, the attenuation of particle fluctuating velocity exhibits a different trend: it first decreases, then increases, and finally decreases again. Moreover, a significant difference is observed between the distributions of the particle pulsating velocity field near the nozzle and the average velocity field; the fluctuating velocity field displays a profile characterized by lower velocities in the center and higher velocities at the edges and in the transition zone, while the average velocity field shows the opposite pattern. The maximum cumulative error of Taylor's fluid particle theory in predicting MSPJ particle velocity attenuation is 6.16%. Additionally, the velocity self-similarity of heavy particles decays more rapidly due to significant inertial effects. This study provides a reference for further research in the areas of slip velocity, drag force, and engine oil spray.

Keywords: jet; moderate-Stokes-number; velocity field; particle image velocimetry(PIV); decay

收稿日期: 2024-09-10; 录用日期: 2024-12-23; 网络首发日期: 2025-07-08

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250708.1443.010>

基金项目: 国家自然科学基金(52205035, 22161142006, 51876212); 国家重点研发计划项目(2024YFB4711100);

作者简介: 李庆展(1994-), 男, 博士, 高级工程师

通信作者: 江磊, feist201@qq.com.

多相射流,尤其是中斯托克斯数载粒子射流 (moderate-Stokes-number particle-laden jet, MSPJ),广泛存在于各种工程应用和人类生活中,例如气固混合^[1-3]、喷雾^[4-6]、发动机燃烧^[7-8]、油雾润滑^[9]等。MSPJ 是一种“点发射”^[10]、单向“锥形”的自相似两相扩散流动^[11-13],扩散形式与气相射流相近。气相射流沿轴可分为 4 个区域:“势核心区”、“过渡区”、“剖面相似区”和中心线速度快速下降的终止区域。气相射流产生许多漩涡,这些漩涡在射流下游的尺寸增加,表现出强烈的湍流混合扩散特性,并伴有卷吸夹带^[12-14]。近年来相关文献报道集中在数值仿真模拟和“点”测量实验,全场可视化实验测量分析、系统和多尺度的射流动力学特性分析有待加深研究。

载粒子射流速度的研究主要强调沿射流中心线的速度衰减率以及轴上的其他高阶统计分析^[15],而粒子的轴向速度分量是射流最具代表性的因素。由于粒子的分散和更多相关因素,例如粒度分布和体积分数^[16-17],粒子和漩涡之间的复杂相互作用^[18-19]等,使载粒子射流的动力学更加复杂。即使在非常少的粒子,涡旋的状态也会因粒子的存在而改变^[20-21]。通常,粒子对湍流涡旋的响应由斯托克斯数 (Stokes' function) 决定^[16], $St = \tau_p / \tau_f$, 其中: τ_p 为粒子弛豫时间; τ_f 为流体时间尺度。小斯托克斯数的粒子往往能够较好地跟随气流运动^[16,22],大斯托克斯数的大粒子通常认为是遵循弹道运动^[13,16],而中斯托克斯数小粒子的运动受湍流及其不规则特性的影响更大,更加难以预测,使问题变得更加复杂^[23-24],揭示中斯托克斯数载粒子射流的速度场演变和速度衰减很有必要。

实验研究方面,关于载粒子射流的实验测量,已经开发了许多非侵入性技术,以捕获时间分辨粒子运动和气体速度场,如激光多普勒风速计^[25] (laser-doppler anemometry, LDA),相位多普勒风速计 (phase-doppler anemometry, PDA) 以及高速相机技术,特别是粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 和粒子跟踪测速 (particle tracking velocimetry, PTV) 作为全场可视化方法在实验流体力学中得到了许多应用^[26-28]。许多学者^[16,19,29]使用 LDA 和 PDA 进行了载粒子射流速度测量实验,分析了粒子的轴向速度和轴向湍流分量的下游演化。Krothapalli 等^[30]通过 PIV 实验发现射流中水滴粒子的存在显著改变了湍流结构,与正常射流相比,轴向和法向脉动速度分别降低了约 10% 和 30%,对湍流剪切应力峰值的影响更大,降低了多达 40%。Sakakibara 等^[31]也通过 PIV 测量发现在射流中心线附近,湍流耗散量较大。

Viggiano 等^[10]通过 PTV 测量研究了大粒子载粒子射流的粒子速度分布,为验证大粒子载粒子射流自相似性提供了宝贵的数据,然而中、小粒子的载粒子射流自相似性还有待研究。此外,研究粒子的速度场及轴向速度衰减也有助于两相间滑移速度和相关曳力模型的研究^[21,32]。

理论研究方面,许多研究者从速度分布^[16,19,31]、穿透或沉积距离^[33-35]等相互关联的方面研究了载粒子射流的扩散行为,发现它们是自相似的,喷嘴直径通常用作射流几何相似度的尺度参数^[12]。例如, Bourouiba 等^[13]使用 $r = C_\theta s$ 来量化这种自相似性,这意味着载粒子射流的扩散半径 r 与扩散角 θ 和距喷嘴的距离 s 成正比^[13,23]。Batchelor 等^[36]提出泰勒的流体粒子理论^[37]可以拓展到自相似的流动,如尾流和射流。Viggiano 等^[10]基于此启发,对直径为 0.25 mm 的粒子速度分量进行拉格朗日统计分析,将泰勒的流体粒子理论扩展到自相似流动的情况,发现对于小尺度大颗粒拉格朗日动力学,仅在实验测量的最远下游位置观察到自相似性。这归因于有限粒径效应的影响,这些效应沿射流轴线演变,不同的下游位置对粒子动力学的影响不同,特别是专门针对更小粒子的情况需要进一步的研究,以得出自相似性的最终结论。

本文旨在从系统的和两种测量尺度的角度,同时了解大尺度和介观尺度下的射流演变及其动力学特性,包括粒子的瞬时速度、平均速度、脉动速度、速度衰减和速度自相似性,并通过实验验证泰勒的流体粒子理论对于中斯托克斯数下的载粒子射流的适用性。本文采用 PIV 进行测量实验,粒子采用直径为 40.86 μm 的 SiO_2 微球,对 MSPJ 分别进行了 6 组宏观大尺度 (macroscale) 和介观尺度 (mesoscale) 的测量实验。本文关于中斯托克斯数载粒子射流速度的变化规律研究成果能够在一定程度为实际工程应用中气固/气液之间的动量、能量交换提供研究基础。

1 实验概况

1.1 实验台及误差分析

MSPJ 的实验台如图 1 所示,实验台包括喷射系统和 PIV 系统。喷射系统包括压缩机、气罐、缓冲罐、减压阀、过滤器、粒子发生器 (Solid - 3, Seika Digital Image Co., Ltd., JP) 和喷射器 (FOX - 1/2, USA) 等装置。其中,粒子发生器是一种微型流化床。喷射器是一种文丘里混合喷射器,出口直径为 12 mm,纯净的压缩空气从喷射器的左侧主管道进入,粒子从喷射器上方进口进入,两者在喷射器腔内

中混合,然后喷出到测量域中。测量域是由钢化玻璃和金属框架组成的空心长方体空间,尺寸为 $2.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。Solid-3粒子发生器产生 SiO_2 微球,其驱动气体流量为 50.31 L/min ,相应的 SiO_2 微球颗粒质量流量为 0.01042 g/s ,并在整个实验过程中保持不变。调整喷射器左侧进口的气体流量用以调整喷射器出口的气速。气体的流量和压力通过高频(1 000 Hz)传感器测量记录。通过多功能I/O设备(NI, USA)将传感器信号传输到计算机。压力传感器(PCM300, CHN)和流量传感器(TKL50-DN15, CHN)的测量精度分别为 $\pm 0.1\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。

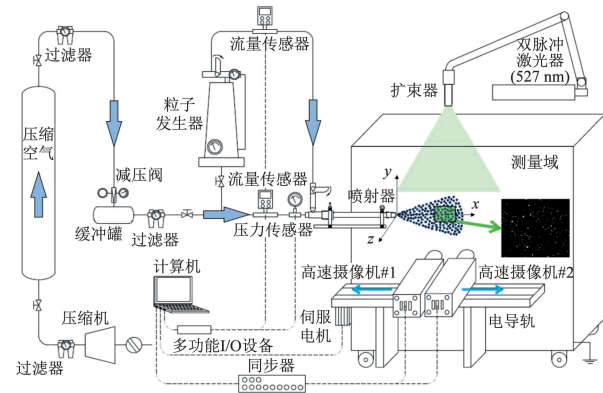


图1 中斯托克斯数载粒子射流实验台示意

Fig.1 Schematic diagram of the moderate-Stokes-number particle-laden jet experimental bench

PIV系统包括两台高速摄像机#1、#2(HX-5E, NAC, JP),双脉冲激光器(TOLAR-527, Beamtech Optronics Co., Ltd., CHN),扩束镜(BZ-61, Seika Digital Image Co., Ltd., JP),同步器(LC-880, Labsmith, USA)和计算机。双脉冲激光器产生的激光波长为 527 nm ,片光厚度为 0.5 mm ,双曝光时间间隔设置为 $100\text{ }\mu\text{s}$,激光强度为 50 mJ 。使用同步器同时触发高速摄像机和双脉冲激光器,触发精度可达 0.1 ns ,频率为 1 000 Hz 。通过伺服电机和电动轨道调控实验过程中高速摄像机的拍摄位置。

用于测量粒子速度的PIV方法与之前的研究工作相同^[38],此处简要描述。PIV软件采用了日本Seika Digital Image和德国DLR开发的Koncerto II软件。基于跨帧技术拍摄得到大量成对的时间间隔非常小的图像,每一对图像都被划分成大量 24×24 或合适像素的相关性窗口(interrogation window),将多路互相关算法^[39]应用于成对图像的相关性窗口,通过峰值检测和位评估得到每个相关性窗口的位移,速度通过计算位移 Δs 和时间间隔 Δt 可以得到:

$$u_i = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

式中 i 为相关性窗口的索引。

1.2 粒子参数

粒子的材料为 SiO_2 微球,密度为 2 000 kg/m^3 ,平均粒径为 $40.86\text{ }\mu\text{m}$,均方根波动为 $10.29\text{ }\mu\text{m}$,粒径分布如图2所示,此粒径尺寸与Prevost等^[19]和Kennedy等^[40]选取的粒子在同一量级,便于后文对比分析。粒子弛豫时间为 0.0103 ms 。通过计算粒子的斯托克斯数 St 评估其气相跟随性。 St 定义为粒子弛豫时间 τ_p 与流体时间尺度 τ_g 之比^[16]:

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_g} \quad (2)$$

其中:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_g}$$

$$\tau_g = \frac{L_v}{u}$$

式中: ρ_p 为粒子密度, d_p 为粒子直径, μ_g 为气体黏度, L_v 为相干涡的长度尺度, u 为流体速度。

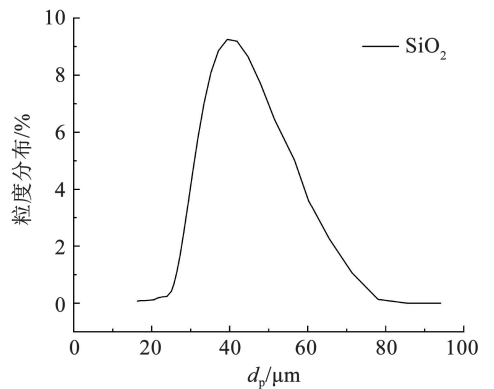


图2 SiO_2 微球粒子的粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of SiO_2 microspheres

气流对粒子扩散的影响随斯托克斯数的增加而减小^[16,22]。通常低斯托克斯数远小于1的粒子能够很好的跟随流体或气相运动,往往被用来当做流体可视化示踪粒子。而本文实验中粒子的斯托克斯数约为 $9.6 \sim 24.9$,属于中斯托克斯数范围,在这个量级下,粒子只能部分响应气流的波动,导致粒子运动更加随机和复杂^[16]。

2 实验工况及方法

本文对MSPJ分别进行了6组宏观大尺度(macroscale)和介观尺度(mesoscale)的测量实验,尺度的放缩能够淹没和突出许多特征,空间平均的尺度放缩对射流特征的影响同样存在,大一些的尺度有助于理解和把控全局而一些局部细节被淹没,小一些的尺度会使细节更突出但是缺失了全局的理解,多种尺度的结合能使对问题的认知更全面和深刻。需要注意的是介观尺度通常认为是能够看到清

晰射流旋涡的尺度,其大小与旋涡在同一量级。然而,旋涡同样大小不一,因此,本文没有非常严格的定义,但是有研究^[12]指出,喷嘴直径可作为射流几何相似度的尺度参数,且本文实验中观察估计到旋涡大小比喷嘴最多大一个量级,最小小一个量级,因此设置了 $6D \times 7D$ 左右的测量窗口进行介观尺度实验,基本能涵盖大多数旋涡尺度,而宏观大尺度设置又比介观尺度大一个量级,为 $20D \times 55D$ 左右的测量空间。通过调整喷射器左侧进口的气体流量 $Q_{g,inlet}$ 改变喷射器出口的气体速度,6 组实验的喷射器进口气体流量 $Q_{g,inlet}$ 及其均方根波动 $Q_{g,inlet} (RMS)$ 见表 1。表中 Re 为喷嘴出口处射流雷诺数, M_p 为负载率,均方根波动参数 $Q_{g,inlet} (RMS)$ 通过流量传感

器测量得到的随时间变化的流量数值计算均方根得到。宏观大尺度和介观尺度实验测量的图像参数见表 2。

表 1 实验组别

Tab. 1 Experimental sequence

实验编号	$Q_{g,inlet} / (L \cdot \min^{-1})$	$Q_{g,inlet} (RMS) / (L \cdot \min^{-1})$	St	Re	$M_p / 10^3$
Exp. 1	0	0	9.61	6 378	15.90
Exp. 2	20.3	0.26	12.20	8 952	9.70
Exp. 3	40.3	0.33	16.10	11 488	6.60
Exp. 4	60.4	0.50	19.90	14 036	4.65
Exp. 5	80.2	0.62	22.90	16 547	3.16
Exp. 6	95.2	0.76	24.90	18 487	2.35

表 2 图像参数

Tab. 2 Image parameters

参数	像素分辨率/pixels	空间分辨率/mm	图像空间尺寸/mm	相关窗口尺寸/ mm^2	
				$24 \times 24 / \text{pixels}$	$32 \times 32 / \text{pixels}$
宏观大尺度	$2\,560 \times 1\,080$	0.246	630×266	5.90×5.90	0.89×0.89
介观尺度	$2\,560 \times 1\,920$	0.037	95×71	7.87×7.87	1.18×1.18

图 3 显示了 MSPJ 实验的宏观大尺度和介观尺度测量的示意图。宏观大尺度测量捕获的图像空间更大,对称性更强。介观尺度测量是通过沿射流轴遍历和捕获图像来实现的,提供了沿射流轴线的特定流动细节,因此生成的图像空间尺寸较小。将在沿射流轴线下游的 7 个连续位置进行介观尺度测量实验。每个图像窗口的末端作为后续图像窗口的起点,由伺服电机控制的导轨能够实现实验过程高速摄像机拍摄位置的精确定位。

3 结果分析

3.1 瞬时速度

图 4、5 显示了在 Exp. 1 中宏观大尺度和介观尺度射流实验的瞬态图像,对应的瞬态速度场是由一对 PIV 图像处理得到的后一帧图像的数据,可认为 PIV 算法计算得到的速度是后一帧图像的,表示瞬时速度(图中虚线表示最大速度的位置)。喷嘴直径 D 通常用作射流几何相似度的尺度参数^[12],因此本文用喷嘴直径 D 归一化处理坐标长度。从图 5 中可以看出,射流过程中的速度峰值与射流中心线不一致,而是围绕射流中心线波动的,介观尺度实验则提供了更精确和详细的速度场,表现出强烈的湍流混合扩散特性,图 5(a) ~ (g) 为逐渐远离喷嘴出口。

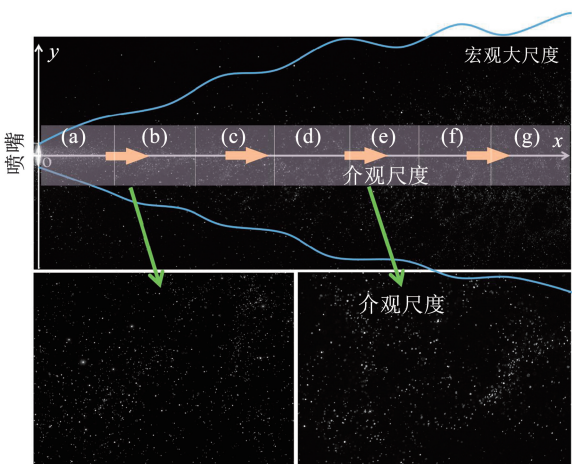


图 3 不同拍摄尺度下的 MSPJ 示意 (Exp. 1)

Fig. 3 Schematic diagram of MSPJ at different shooting scales (Exp. 1)

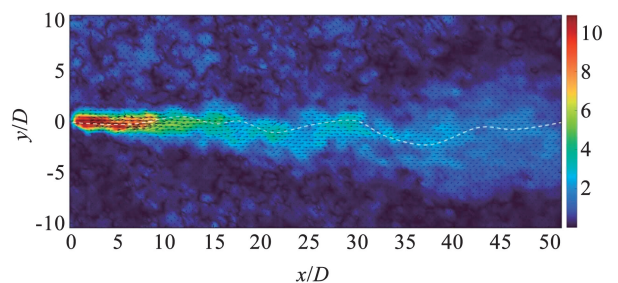
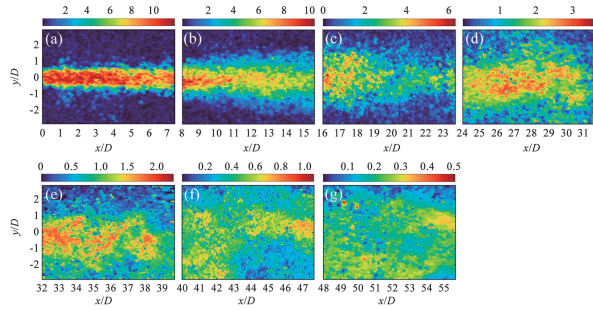
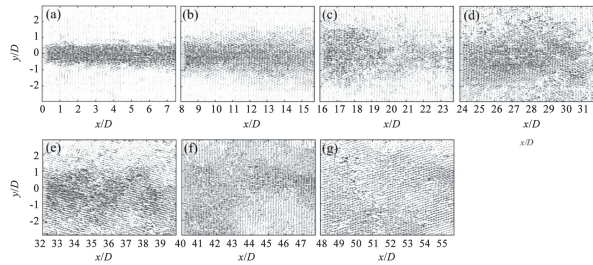


图 4 Exp. 1 的宏观大尺度实验

Fig. 4 Macroscale experiment of Exp. 1



(a) MSPJ的粒子瞬态速度场云图



(b) MSPJ的粒子瞬态速度矢量量图

图 5 Exp. 1 的介观尺度实验速度云图

Fig. 5 Mesoscale experimental velocity field of Exp. 1

3.2 平均速度

粒子平均速度采用时间平均法,基于 2 000 张图像得到。宏观大尺度实验测量的粒子平均速度场(见图 6),当粒子远离喷嘴出口和射流中心线时,速度逐渐衰减,呈现出以中心大和边缘小为特征的分佈趋势。介观尺度实验测量的粒子平均速度场(见图 7,8),速度分佈趋势与宏观尺度测量一致,但介观尺度测量具有较高的精度,提供了更多的细节。从图 8 中也可以看出,喷嘴附近的速速场呈现“锥形”分佈。

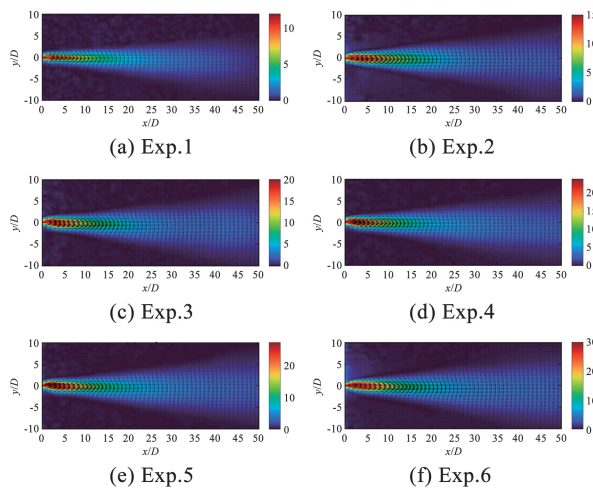


图 6 宏观大尺度实验的粒子平均速度场

Fig. 6 Mean particle velocity field of macroscale experiments

不同测量尺度下的粒子速度沿射流中心线的演变如图 9(a)所示,从图中可知宏观大尺度和介观尺度测量值都显示先略有增大后逐渐衰减的相同速度

演变趋势,尽管数值存在细微差异。Prevost 等^[19], Kennedy 等^[40], Krothapalli 等^[30]和 Calvo 等^[41]也观察到了这种现象,其中速度的增加归因于喷嘴出口处的气体速度高于颗粒速度,从而导致颗粒加速。两个尺度之间的数值差异是由于宏观尺度测量的精度有限。因此,在接下来的分析中,粒子速度衰减的分析将依赖于介观尺度实验结果。

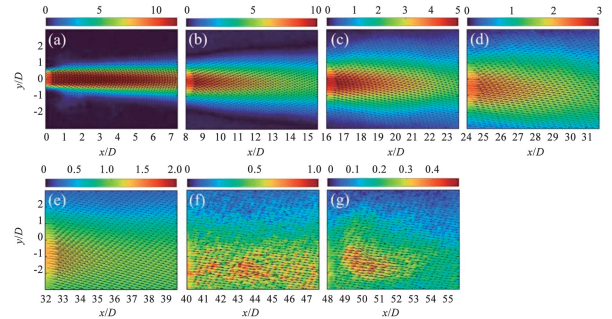


图 7 Exp. 1 的介观尺度实验 (MSPJ 的粒子平均速度场)

Fig. 7 Mesoscale experiment of Exp. 1 (mean particle velocity field)

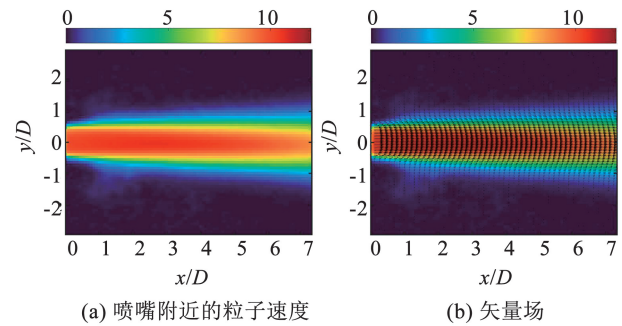


图 8 Exp. 1 的介观尺度实验

Fig. 8 Mesoscale experiments of Exp. 1

图 9(b)显示了与文献结果相比的归一化粒子速度衰减趋势。其中,Prevost 等^[19]实验中使用的粒子为约 45 μm 的玻璃珠,喷嘴直径为 10 mm,初始气体速度为 20.0 m/s。Kennedy 等^[40]中使用了约 60 μm 的液滴,喷嘴直径为 7 mm,初始气体速度为 64.5 m/s。如图 9 所示,粒子速度衰减趋势与文献中的一致。在这项研究中,由于 Prevost 等^[19]和 Kennedy 等^[40]使用了更大、更惯性的粒子,粒子速度衰减更快。

图 9(c)显示了在相同的实验条件下,气体和粒子速度的比较,其中气体(Gas)数据为相同实验条件下,将 SiO₂ 粒子替换成气相示踪粒子(DOS 油)的实验结果,其中,DOS 油的密度为 918 kg/m³,气相示踪粒子平均粒径为 2 ~ 3 μm,气相示踪粒子弛豫时间为 0.011 3 ~ 0.025 5 ms,斯托克斯数约为 0.01 ~ 0.06,远小于 1,可以很好地跟踪气相运动。气相和粒子的速度衰减趋势看起来相似,尽管气相衰减更快。需要注意的是在喷嘴出口处,气相速度

先增大后衰减的原因和粒子不同,在喷嘴出口由于弱膨胀^[30]和喷嘴处出口速度分布的存在^[42],气相速度在喷嘴出口附近的区域可能会表现出轻微增加,特别是在多相射流的情况下,而粒子加速是由于

滑移速度和曳力。此外,在远离喷嘴的地方,粒子速度逐渐超过了气相速度。这一观察结果与 Prevost 等^[19]和 Fan 等^[43]的发现一致。因为粒子比气体具有更大的惯性,导致较慢的速度衰减。

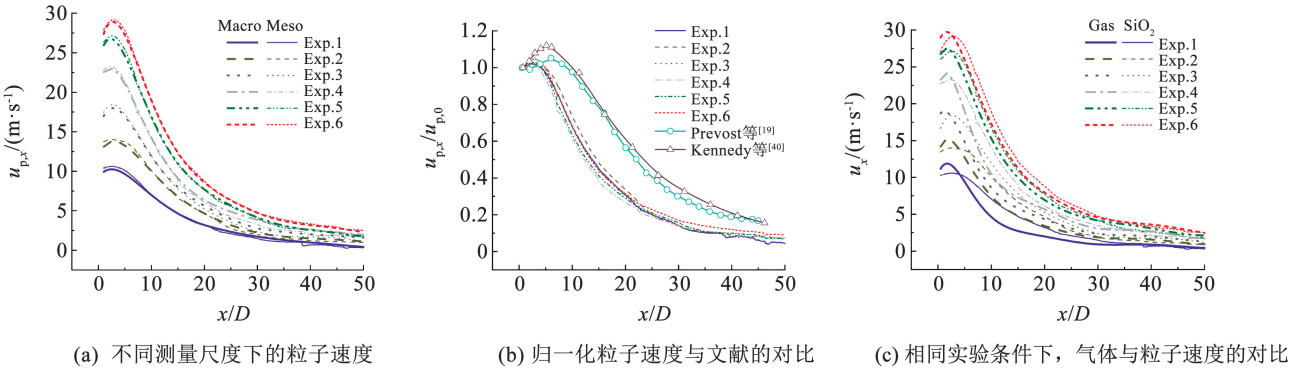


图 9 粒子平均速度沿射流轴线的演变

Fig. 9 Evolution of the mean particle velocity along the jet axis

3.3 脉动速度

粒子平均脉动速度采用时间平均法得到。图 10、11 分别显示了由宏观大尺度和介观尺度实验得出的平均脉动速度场。两种尺度下的脉动的速度分布趋势基本一致,介观尺度实验更加精确。除了喷嘴附近,粒子脉动速度随着远离喷嘴的距离增大逐渐衰减。经过调研,在 0 ~ 1D 距离的喷嘴附近,在图像分辨率为 2 560 pixels × 1 920 pixels、空间分辨率为 0.037 mm 的尺度上,中斯托克斯数粒子脉动速度场实验数据鲜有报道。从一些文献[10,30]中可以看出平均脉动速度的分布与平均速度的分布较为相似。结合图 7 和图 11 能够看出,这一说法适用于喷嘴附近以外的区域,在喷嘴附近区域的粒子脉动速度和平均速度的分布表现出显著差异。推测这是因为“potential core”区域的速度波动很小,而“mixing region”和“transition”区域的速度波动较为明显所致。

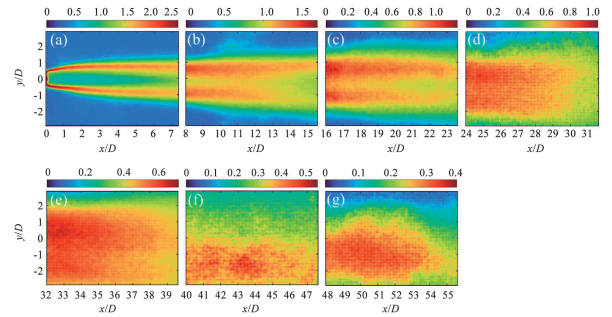


图 11 Exp. 1 的 MSPJ 粒子平均脉动速度场

Fig. 11 Mean particle fluctuating velocity field of Exp. 1

沿射流中心线的粒子脉动速度的演变如图 12 所示,图 12(a) 比较了相同条件下,气相和粒子沿射流中心线的脉动速度。显然,气相和粒子的脉动速度衰减趋势不同,气相脉动速度先增大后减小,而粒子脉动速度呈现先减小后增大再减小的规律。在射流的下游,与气相速度衰减的结果类似,由于粒子的速度衰减和大惯性,粒子的脉动速度超过了气相的脉动速度。Prevost 等^[19]的研究中也提到了粒子脉动速度在喷嘴出口处先减小这一现象,如图 12(b) 所示,为了便于与文献对比,使用初始速度对脉动速度进行归一化。可以将这种现象归因于喷射器中气相和粒子之间相互作用的存在以及粒子沿喷射器壁反弹^[19,44],来自低速区域(靠近喷射器壁)的粒子和来自高速区域(沿着射流的轴线)的粒子在喷射器出口处混合在射流内,导致平均粒子速度的降低和喷射器出口附近的波动速度的增加^[19],能够看出粒子的速度衰减趋势与文献中结果基本一致。

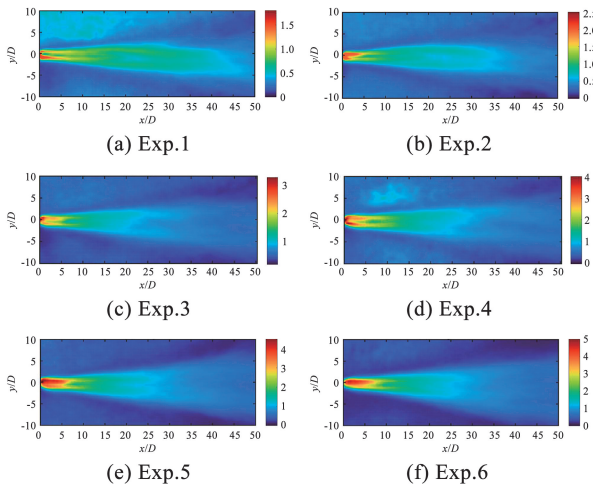
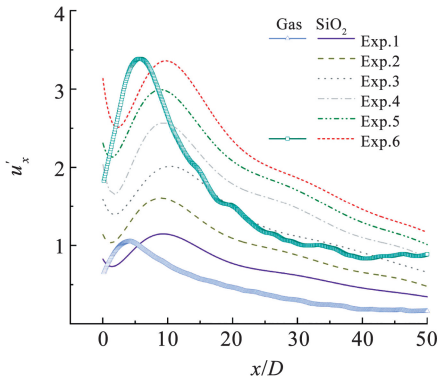
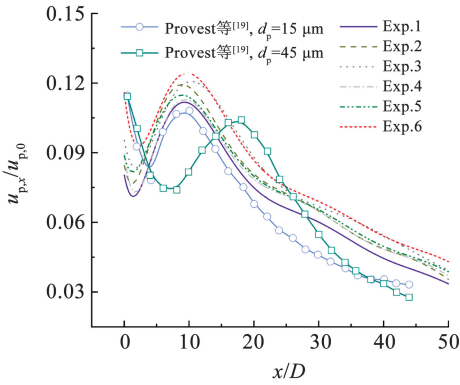


图 10 宏观大尺度实验的粒子平均脉动速度场

Fig. 10 Mean particle fluctuating velocity field of macroscale experiments



(a) 相同实验条件下, 粒子脉动速度与气相脉动速度的对比



(b) 归一化粒子脉动速度与文献的对比

图 12 沿射流中心线的粒子脉动速度演变

Fig. 12 Evolution of particle fluctuating velocity along the jet centerline

3.4 速度衰减

由于粒子直径、密度、湍流和各种气固相互作用力等因素的影响,粒子的加入使射流更加复杂。目前,还没有中斯托克斯数载粒子射流的粒子速度衰减的预测模型。对于中等斯托克斯数的粒子,尽管粒子不会完全响应气流,但它们会部分跟随气流。

表 3 不同初始条件下,文献中 K_d 和 x_p 的取值

Tab. 3 K_d and x_p in the literature under different initial conditions

参数	$U_{p,0}/(m \cdot s^{-1})$	D/mm	$Re/10^4$	$\tan \beta$	K_d	x_p/D
Wyganski 等 ^[49]	51.0	25.4	10.00	0.086	5.7	3.0
Hussein 等 ^[46]	56.2	25.4	9.55	0.094	5.8	4.0
	56.2	25.4	9.55	0.102	2.9	2.7
Malmström 等 ^[45]	3.0 ~ 40.0	0.04	0.50 ~ 4.50	0.090 ~ 0.150	4.0 ~ 6.5	-2.0 ~ 4.0
	1.0 ~ 15.0	0.15	1.50 ~ 4.50	0.090 ~ 0.150	4.0 ~ 6.0	-1.0 ~ 5.5

基于该模型获得的 K_d , x_p 和 β 及其变化趋势与文献结果的对比见图 13 ~ 16。对于气体和粒子 (SiO_2 微球), K_d 随着上升速度和 Re 的增加而增加,并且粒子的 K_d 略小于气体的 K_d ,这是因为相对于气体而言,粒子的惯性更大,其速度衰减得慢,见图 13、14。如图 15 所示,气体和粒子的 x_p 都随着速度的增加而增加,但粒子的 x_p 大于气体的 x_p ,并且它

因此,本文试图采用经典速度衰减模型——泰勒的流体粒子理论^[37]——来预测粒子速度,并评估其对中等斯托克斯数载粒子射流的适用性。模型中射流中心线速度衰减表示为^[45-46]

$$\frac{u_x}{u_0} = \frac{K_d D}{x - x_p} \quad (3)$$

式中: u_x 为 x 方向上的中心线平均速度, u_0 为出口平均速度, K_d 为衰减系数, D 为喷嘴直径, x_p 为从喷嘴出口到射流虚拟原点的距离。射流虚拟原点是由 Allison 等^[47] 提出的假设,即,存在一虚拟源,是射流出发的原点。

$$\frac{u_1}{u_x} = e^{-\ln 2 \eta^2} \quad (4)$$

其中

$$\eta = \frac{y}{y_{1/2}}$$

式中: u_1 为剖面横向速度, y 为 y 轴方向上的坐标, $y_{1/2}$ 为 $u_1/u_x = 0.5$ 时 y 轴方向上的坐标,定义为

$$y_{1/2} = (x - x_p) \tan \beta \quad (5)$$

式中: β 为射流半角,和 K_d 的关系可以表示为

$$\tan \beta = \frac{(0.5 \ln 2)^{1/2}}{K_d} \quad (6)$$

所以式(3)也可以写作^[45,48]:

$$\frac{u_x}{u_0} = e^{-K_d^2 n^2} \quad (7)$$

其中

$$n = \frac{y}{x - x_p}$$

基于式(3)和式(7), K_d 和 x_p 可以使用最小二乘拟合法获得。本文总结了文献中不同射流出口条件下 K_d 和 x_p 的取值,见表 3。

们之间的差异很大。这表明,气体的“potential core”区域比粒子的区域小,其虚拟原点位于更靠近喷嘴的位置,出现这种现象的原因也是粒子的大惯性。从图 16 中可以看出, β 随速度减小,粒子的 β 略大于气相的 β ,这表明粒子的径向分散程度大于气体的径向分散度,原因是粒子惯性大,由于沿喷嘴出口处壁面的粒子反弹和喷嘴扩张角的运动的趋势更明显。

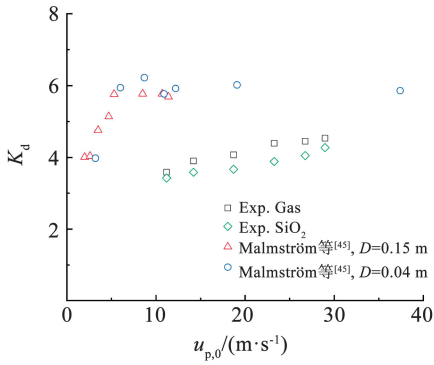


图 13 K_d 随 $u_{p,0}$ 的变化趋势

Fig. 13 Trend of K_d with $u_{p,0}$

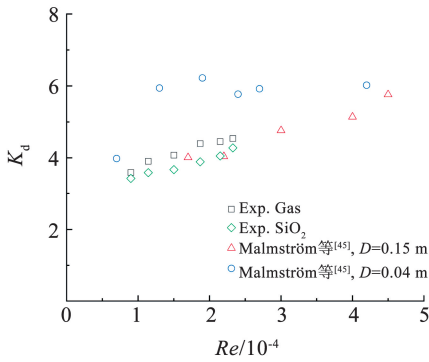


图 14 K_d 随 Re 的变化趋势

Fig. 14 Trend of K_d with Re

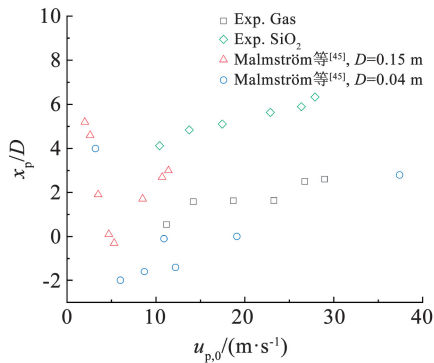


图 15 x_p 随 $u_{p,0}$ 的变化趋势

Fig. 15 Trend of x_p with $u_{p,0}$

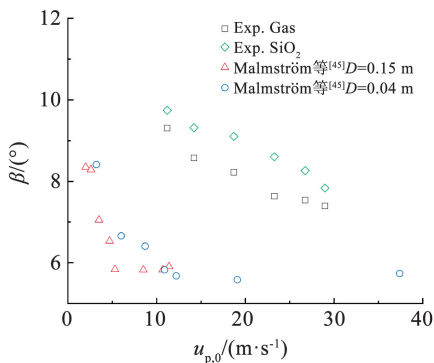


图 16 β 随 $u_{p,0}$ 的变化趋势

Fig. 16 Trend of β with $u_{p,0}$

图 17 比较了沿射流中心线粒子速度衰减的模型预测和实验数据。能够看出,在射流下游 $10D$ 距离以后,该模型能够预测粒子速度的衰减趋势,但是不同初始条件下的预测精度略有差异。从数值的角度来看,模型预测结果在喷射流的早期阶段小于实验,并且测量误差相对较大,最大平均累积误差可达 6.16%,见表 4,远端下游实验数据则更符合模型预测。这印证了 Viggiano 等^[10]观测到直径为 0.25 mm 的大颗粒在最远下游位置表现出泰勒自相似性的结果。本文针对更小粒子 ($20 \mu\text{m} < d_p < 80 \mu\text{m}$) 情况的进一步研究则表明泰勒的自相似衰减预测模型适用于中等斯托克斯数的载粒子射流,尤其是在射流的中下游位置。

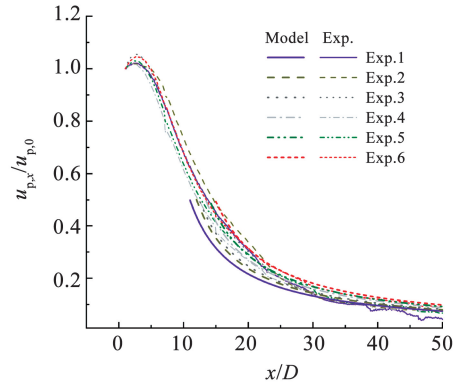


图 17 沿射流中心线粒子速度衰减模型预测值与实验值对比

Fig. 17 Comparison of the predicted and experimental values of particle velocity decay along the jet centerline

表 4 平均累计误差

Tab. 4 Average cumulative error

实验编号	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6
平均累计误差/%	5.30	3.55	3.42	6.16	4.32	5.28

3.5 速度自相似性

沿射流中心线不同轴向位置的粒子剖面横向速度如图 18 所示,同一轴向位置处,不同实验的粒子横向剖面分布如图 19 所示。从图中可以发现,无论射流下游不同位置或不同的实验,模型预测都与实验数据吻合良好,这表明射流中粒子剖面横向速度也存在自相似性。但是由于重粒子的强惯性和粒径效应^[10],其自相似性降低得更快^[40,50]。

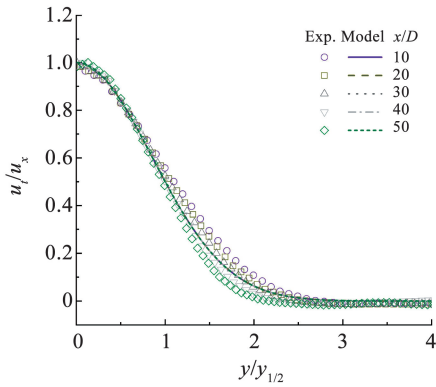


图 18 Exp. 1 中,不同轴向位置的粒子横向剖面速度分布

Fig. 18 Particle transverse profile velocity distribution of Exp. 1 at different axial positions

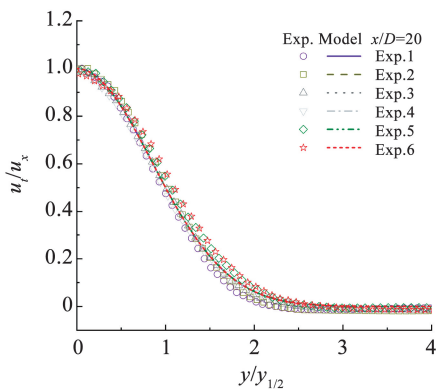


图 19 同一轴向位置处,不同实验粒子横向剖面速度分布

Fig. 19 Particle transverse profile velocity distribution of different experiments at the same axial position

4 结 论

本文基于两种尺度的流场可视化实验测量,对射流动力学特性进行了系统而全面的分析,验证了泰勒流体粒子理论在较小粒子情况下对粒子射流的适用性。主要结论如下:

1)沿射流中心线的粒子平均速度与脉动速度的演变趋势存在显著差异。粒子平均速度的衰减趋势呈现出先增大后减小的趋势,而脉动速度则呈现出先减小后增大再减小的演变过程。在喷嘴出口处,来自高速和低速区域的粒子相互混合导致喷嘴出口附近的平均粒子速度降低,同时脉动速度增加。

2)喷嘴附近区域的粒子脉动速度场与平均速度场的分布表现出显著差异。平均速度场呈现出中间区域速度较大、边缘及过渡区速度较小的“锥形”分布特征,脉动速度场则相反。

3)泰勒的自相似衰减预测模型适用于中等斯托克斯数的载粒子射流,尤以射流的中下游位置为显著,粒子剖面在横向上也展现出自相似性。

4)本文对泰勒流体粒子理论在更小粒子情况下的适用性验证还不够全面,只能在一定程度上得

出验证泰勒流体粒子理论在中斯托克斯数更小粒子情况下的适用性,还欠缺低斯托克斯数情况下更小粒子的验证。此外,还可以从不同角度分析多相射流的演化规律,如不同粒径(与斯托克斯数强相关)、不同喷嘴大小,而且有研究表明,射流对出口条件敏感。本文限于篇幅通过控制变量的方法只改变了初速度,主要是为了验证速度衰减。关于更低斯托克斯数的验证、不同粒径(不同斯托克斯数)和出口条件的敏感性程度的研究将会在后续研究中开展。

参考文献

- [1] BATTISTA F, PICANO F, TROIANI G, et al. Intermittent features of inertial particle distributions in turbulent premixed flames [J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23 (12): 123304. DOI: 10.1063/1.3671734
- [2] ZAFIRYADIS F, DEGN JENSEN A, LIN Weigang, et al. Injection of gas-liquid jets into gas-solid fluidized beds: a review [J]. *Particuology*, 2023, 76: 63. DOI: 10.1016/j.partic.2022.08.014
- [3] KONERU R B, ROLLIN B, DURANT B, et al. A numerical study of particle jetting in a dense particle bed driven by an air-blast [J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32 (9): 093301. DOI: 10.1063/5.0015190
- [4] BOBZIN K, WIETHEGER W, KNOCH M A, et al. Estimation of particle mass flow rate in free jet using in-flight particle diagnostics in plasma spraying [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(5): 921. DOI: 10.1007/s11666-020-01027-4
- [5] BOUTHIER L V, DELLORO F, HACHEM E. Application and assessment of the improved delayed detached eddy simulation model to the cold spray process: Toward high fidelity computation fluid dynamics simulations [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34 (9): 095109. DOI: 10.1063/5.0100954
- [6] 王辉, 曹伟, 张帅, 等. 双股射流碰撞雾化特征实验 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(1): 93
WANG Hui, CAO Wei, ZHANG Shuai, et al. Atomization characteristics experiment of impinging jets [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(1): 93. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.013
- [7] ZENG Wei, SJÖBERG M, REUSS D L. Combined effects of flow/spray interactions and EGR on combustion variability for a stratified DISI engine [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2907. DOI: 10.1016/j.proci.2014.06.106
- [8] ZENG Wei, SJÖBERG M, REUSS D L, et al. The role of spray-enhanced swirl flow for combustion stabilization in a stratified-charge DISI engine [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 168: 166. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.03.015
- [9] LI Shicong, QIAN Caifu, LI Shuangxi, et al. Study of sealing mechanism of gas-liquid miscible backflow pumping seal [J]. *Tribology International*, 2020, 142: 105974. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.105974
- [10] VIGGIANO B, BASSET T, SOLOVITZ S, et al. Lagrangian diffusion properties of a free shear turbulent jet [J]. *Journal of Fluid Mechanics* 2021, 918: A25. DOI: 10.1017/jfm.2021.325
- [11] DHIVYARAJA K, GADDES D, FREEMAN E, et al. Dynamical similarity and universality of drop size and velocity spectra in sprays [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 860: 510. DOI: 10.1017/jfm.2018.893
- [12] DAVIES P O A L, FISHER M J, BARRATT M J. The characteristics of the turbulence in the mixing region of a round jet [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1963, 15(3): 337. DOI: 10.1017/S0022112063000306
- [13] BOUROUBA L, DEHANDSCHOEWERCKER E, BUSH J W M. Violent expiratory events: on coughing and sneezing [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 745: 537. DOI: 10.1017/jfm.2014.88
- [14] 高军, 李晓冬, 高甫生. 大空间分层空调射流气流重合与卷吸

- 特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(6): 815
GAO Jun, LI Xiaodong, GAO Fusheng. Coincidence and entrainment of air jets of the stratified air conditioning in large spaces[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(6): 815. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2004.06.034
- [15] BIRZER C H. Correlative analysis of organised structures in turbulent jets[J]. Experiments in Fluids, 2012, 53(6): 1681. DOI: 10.1007/s00348-012-1383-4
- [16] LONGMIRE E K, EATON J K. Structure of a particle-laden round jet[J]. Journal of Fluid Mechanics 1992, 236: 217. DOI: 10.1017/s002211209200140x
- [17] FESSLER J R, KULICK J D, EATON J K. Preferential concentration of heavy particles in a turbulent channel flow[J]. Physics of Fluids, 1994, 6(11): 3742. DOI: 10.1063/1.868445
- [18] KULICK J D, FESSLER J R, EATON J K. Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 277: 109. DOI: 10.1017/s0022112094002703
- [19] PREVOST F, BOREE J, NUGLISCH H J, et al. Measurements of fluid/particle correlated motion in the far field of an axisymmetric jet[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(4): 685. DOI: 10.1016/0301-9322(96)00009-2
- [20] LÁZARO B J, LASHERAS J C. Particle dispersion in the developing free shear layer. Part 1. Unforced flow[J]. Journal of Fluid Mechanics 1992, 235: 143. DOI: 10.1017/s0022112092001071
- [21] CERECEDO L M, AÍSA L, BALLESTER J. Experimental study on a non-dilute two-phase coflowing jet: Dynamics of particles in the near flow field[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(5): 468. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.07.003
- [22] ANDERSON S L, LONGMIRE E K. Particle motion in the stagnation zone of an impinging air jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 299: 333. DOI: 10.1017/s0022112095003521
- [23] RENZI E, CLARKE A. Life of a droplet: Buoyant vortex dynamics drives the fate of micro-particle expiratory ejecta[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(12): 123301. DOI: 10.1063/5.0032591
- [24] BALACHANDAR S, EATON J K. Turbulent dispersed multiphase flow[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42: 111. DOI: 10.1146/annurev.fluid.010908.165243
- [25] PETERSEN A J, BAKER L, COLETTI F. Experimental study of inertial particles clustering and settling in homogeneous turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 864: 925. DOI: 10.1017/jfm.2019.31
- [26] KÄHLER C J, ASTARITA T, VLACHOS P P, et al. Main results of the 4th international PIV challenge[J]. Experiments in Fluids, 2016, 57(6): 97. DOI: 10.1007/s00348-016-2173-1
- [27] 文键, 厉彦忠, 王斯民, 等. 基于 PIV 技术对换热器入口流场的可视化研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(1): 113
WEN Jian, LI Yanzhong, WANG Simin, et al. Investigation of flow patterns in the entrance of heat exchanger by PIV technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(1): 113
- [28] 黄明其, 武杰, 何龙, 等. 旋翼模型悬停状态桨尖涡特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(4): 124
HUANG Mingqi, WU Jie, HE Long, et al. Blade tip vortex characteristics of rotor under hovering status[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(4): 124. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201703089
- [29] M CERECEDO L, AÍSA L, A GARCÍA J, et al. Changes in a coflowing jet structure caused by acoustic forcing[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(6): 867. DOI: 10.1007/s00348-003-0769-8
- [30] KROTHAPALLI A, VENKATKRISHNAN L, LOURENCO L, et al. Turbulence and noise suppression of a high-speed jet by water injection[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 491: 131. DOI: 10.1017/s0022112003005226
- [31] SAKAKIBARA J, WICKER R B, EATON J K. Measurements of the particle-fluid velocity correlation and the extra dissipation in a round jet[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(5): 863. DOI: 10.1016/0301-9322(96)00014-6
- [32] SONG Zifeng, LI Qingzhan, LI Fei, et al. MP-PIC simulation of dilute-phase pneumatic conveying in a horizontal pipe[J]. Powder Technology, 2022, 410: 117894. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117894
- [33] XIE X, LI Y, CHWANG A Y, et al. How far droplets can move in indoor environments: revisiting the Wells evaporation-falling curve[J]. Indoor Air, 2007, 17(3): 211. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x
- [34] LI Hongying, LEONG F Y, XU G, et al. Dispersion of evaporating cough droplets in tropical outdoor environment[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(11): 113301. DOI: 10.1063/5.0026360
- [35] LIU K, ALLAHYARI M, SALINAS J, et al. Investigation of theoretical scaling laws using large eddy simulations for airborne spreading of viral contagion from sneezing and coughing[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(6): 063318. DOI: 10.1063/5.0054651
- [36] BATCHELOR G K. Diffusion in free turbulent shear flows[J]. Journal of Fluid Mechanics 1957, 3(1): 67. DOI: 10.1017/s0022112057000488
- [37] TAYLOR G I. Diffusion by continuous movements[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1922, s2-20(1): 196. DOI: 10.1112/plms/s2-20.1.196
- [38] LI Qingzhan, ZHU Renshuai, WANG Wei, et al. Time-resolved particle-scale dynamics of a particle-laden jet[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(1): 013309. DOI: 10.1063/5.0131425
- [39] WILLERT C, RAFFEL M, KOMPENHANS J, et al. Recent applications of particle image velocimetry in aerodynamic research[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1996, 7(3/4): 247. DOI: 10.1016/S0955-5986(97)00012-5
- [40] KENNEDY I M, MOODY M H. Particle dispersion in a turbulent round jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1998, 18(1): 11. DOI: 10.1016/S0894-1777(98)10009-2
- [41] CALVO E, GARCÍA J A, SANTOLAYA J L, et al. Periodic structure of the dispersed phase in a forced jet and their effects on the particle dispersion[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 82: 119. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.02.009
- [42] TSUJI Y, MORIKAWA Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe[J]. Journal of Fluid Mechanics 1982, 120: 385. DOI: 10.1017/s002211208200281x
- [43] FAN Jianren, ZHANG Xinyu, CHEN Lihua, et al. New stochastic particle dispersion modeling of a turbulent particle-laden round jet[J]. Chemical Engineering Journal, 1997, 66(3): 207. DOI: 10.1016/S1385-8947(97)00006-5
- [44] PREVOST F, BOREE J, NUGLISCH H J, et al. Characterization of a polydispersed particle-laden jet using a phase Doppler anemometer[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Rouen: Begellhouse, 2023: 938. DOI: 10.1615/iclass-94.1200
- [45] MALMSTRÖM T G, KIRKPATRICK A T, CHRISTENSEN B, et al. Centreline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets[J]. Journal of Fluid Mechanics 1997, 346: 363. DOI: 10.1017/s0022112097006368
- [46] HUSSEIN H J, CAPP S P, GEORGE W K. Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet[J]. Journal of Fluid Mechanics 1994, 258: 31. DOI: 10.1017/s002211209400323x
- [47] ALLISON F E, VITALI R. A new method of computing penetration variables for shaped-charge jets: 1184_16[R]. Md: Ballistic Research Laboratory, 1963
- [48] ATTHANAYAKE I U, DENISSENKO P, CHUNG Y M, et al. Formation-breakdown cycle of turbulent jets in a rotating fluid[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 868: 666. DOI: 10.1017/jfm.2019.186
- [49] WYGNANSKI I, FIEDLER H. Some measurements in the self-preserving jet[J]. Journal of Fluid Mechanics 1969, 38(3): 577. DOI: 10.1017/s0022112069000358
- [50] SNYDER W H, LUMLEY J L. Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow[J]. Journal of Fluid Mechanics 1971, 48: 41. DOI: 10.1017/s0022112071001460