

基于激光的多相流测试技术应用研究进展

吴 暉^{1,2}, 焦晶晶¹, 杨 彪^{1,2}, 金 光¹

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古科技大学内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:激光测速已广泛存在多相流动测量中,测量原理主要有相关性原理和多普勒原理,将两种测量原理分别与成像技术或光散射理论结合发展了多种测试技术。本文对基于激光的多相流测试技术多相流动测量应用研究进展进行分析和综述,并对今后发展进行展望。粒子成像测速技术、激光多普勒测速仪、相位多普勒风速计等已成为多相流动参数测量的有效工具,激光诱导荧光技术在工程多相流动相分离领域应用前景较好。随着对多相流动机理认识的加深,三维粒子成像测速技术、全息粒子图像测速技术等将是今后多相流动测量领域发展的热点。

关键词:激光;多相流;粒子图像测速;多普勒效应

中图分类号: TB126 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.02.002

Application research progress of the multiphase flow measurement technology based on laser

WU Xuan^{1,2}, JIAO Jing-jing¹, YANG Biao^{1,2}, JIN Guang¹

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Bayan Obo Multi-Metallic Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Laser velocimeter has been widely used in multiphase flow measurement. Its measurement principle can be divided into the correlation principle and Doppler principle, and the combination of the two measuring principles and imaging technology or light scattering theory can develop a variety of measurement techniques. The application research progress of the multiphase flow measurement technology based on laser are analyzed and reviewed, and the future development is forecasted. Particle image velocimetry, laser Doppler velocimetry and phase Doppler anemometry etc. have become effective tools for the measurement of multiphase flow parameters. The laser induced fluorescence technique has good application prospect in the multiphase flow separating field. With the deep understanding for the mechanism of multiphase flow, three-dimensional particle imaging velocimetry, holographic particle image velocimetry etc. will be the focus in the development of multiphase flow measurement field in the future.

Key words: laser; multiphase flow; particle image velocimetry; Doppler effect

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51166010);内蒙古自治区自然科学基金项目(No. 2014MS0530)资助。

作者简介:吴 暉(1976-),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为多相流动与传热传质研究。E-mail:wlzhebei@126.com

通讯作者:焦晶晶(1987-),女,硕士研究生,研究方向为多相流动规律研究。E-mail:jiaohebe@126.com

收稿日期:2015-05-09;**修订日期:**2015-05-23

1 引言

复杂的多相湍流流动广泛存在于搅拌釜、循环流化床、管壳式换热器、油气混输管路、水轮机等工程设备中,准确描述其流场特性十分困难,有必要采取实验测试或数值模拟对多相流动规律加以研究。实验测试方法主要有接触式和非接触式,前者主要包括探针法,热平衡法,Pavlov 管法、光纤探头法,热线风速仪法等,其测量过程均需侵入流场,对流型存在一定干扰,测量精度较低,无法实现实时在线测量。随着激光技术、光纤技术、计算技术和数字图像处理技术的发展,以光学为基础测试技术以其非接触式、对流场无干扰、实时在线测量等优点,已广泛用于多相流中。本文对基于激光的多相流测试技术应用现状进行综述,并对其今后发展进行展望。

2 激光技术

激光(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Laser)产生于20世纪60年代,它使古老光学科学和技术有革命性发展^[1]。将激光用于多相流测量中,是多相流参数测量一大进步。基于激光的先进测试技术以其非接触式,空间分辨率高,结果可真实反应多相流动规律等优点,广泛用于多相流速度、浓度、分散相粒径等测量中。多相流中激光测速是对被测对象进行两次特定时间间隔激光测距,取该时间间隔的位移,从而得到被测对象速度。基于激光的多相流测试技术的测速原理主要有相关性原理和多普勒原理。

2.1 相关性原理

相关性原理是速度提取方法的一种,可分为自相关法和互相关法。自相关法相邻两次曝光成像在同一图像上,提取速度时存在速度二义性问题,对零矢量无能为力。目前广泛采用互相关法进行速度处理。互相关法中两次曝光形成两幅不同图像,图像时间序列由拍摄顺序确定,可解决自相关法的问题。

互相关法中,如图1,已知流场点A相邻时刻运动图像,ΔX,ΔY分别为x,y方向位移,t₂-t₁是两幅图像时间间隔,该时间间隔内位移变化是时间的函数,两幅图像中粒子运动轨迹接近直线且速度恒定时可由公式(1)求出该点速度。

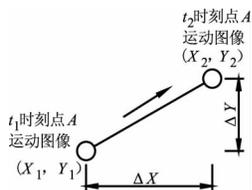


图1 互相关性原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross correlation principle

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1}, v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

目前,基于相关性原理的多相流测试技术主要是粒子成像测速技术,包括二维、三维粒子成像测速技术、全息粒子图像测速技术、微流场粒子成像测速技术等。

2.2 多普勒原理

多普勒原理基于多普勒效应,根据测速方法可分为两类。一类是通过测量散射光信号多普勒频移得到待测点速度。如图2,相互平行的人射激光束通过聚焦透镜汇交对待测点,运动粒子从垂直激光束方向通过时向四周发出反射光。由于运动粒子与探测器之间存在相对速度,使接收频率与发射频率存在一定频移,该频移与运动粒子速度大小存在一定线性关系。

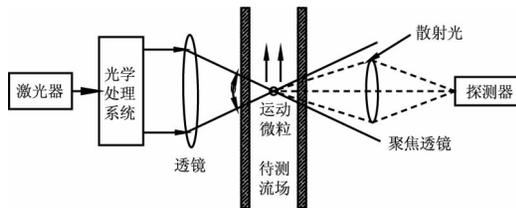


图2 多普勒测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Doppler measurement principle

另一类是把分子吸收线频移与荧光辐射强度变化相结合,通过测荧光辐射强度实现待测点速度测量。1964年,Yeh和Cummins^[2]首先应用多普勒效应测得流体速度,之后发展了多种基于多普勒原理测试技术,主要有激光多普勒测速仪、相位多普勒风速计、激光诱导荧光技术等。以下对基于以上两种原理的多相流测试技术进行介绍。

3 粒子成像测速技术

粒子成像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)是在流动显示技术和计算机技术基础上发展起来的平面二维或三维速度测量技术。PIV测速需向待测流场均匀布撒跟随性好、密度与待测流体相当的示踪粒子,用片光源照亮某一流动平面,用垂直于该平面CCD相机连续两次或多次曝光,记录粒子运动图像。利用图像处理技术提取粒子位移,通过相关算法计算粒子速度矢量,用该速度矢量代替待测点速度,进而得到流场其他参数分布^[3-4]。

3.1 二维粒子成像测速技术(2DPIV)

最初的PIV是平面二维瞬态流动速度场测量技术。多相流中PIV通过添加各相示踪粒子,实现单相或多相同时测量。其所有测量装置均不必介入流场,可处理得到速度矢量场、涡量场,测量精度远超

过传统测速技术。张明亮^[5]等用2DPIV测定水垫塘二维淹没射流流场,得到流场流态、等流函数线、涡量等特征参数分布,测量结果为水垫塘结构优化提供依据。Montante^[6]等利用2DPIV实验和数值模拟方法研究标准气液搅拌釜内流体动力学特性,实验结果验证了CFD模型的正确性。但需要指出的是,示踪粒子除要具备无毒、无腐蚀、化学性质稳定等一般特性外,还需具有良好的光散射性和跟随性;PIV所测速度为示踪粒子速度,而非所测流场速度;PIV试验对空间体积有一定限制,对含有固体颗粒的流动,无法进行粒径分析。实际多相流问题多为复杂的三维三相流动,用2DPIV技术测量误差较大,而三维速度场的获得对于真实了解多相流动规律具有重要意义。

3.2 三维粒子成像测速技术(3DPIV)

3DPIV是PIV与体视三维重建理论的结合,把2DPIV提取粒子运动位移时基于二维统计平均的思想扩展到三维平均,基于视差原理采用两个相机获得不同视角下粒子运动二维相关信息;应用体视摄影理论,重建空间三维位移,已知采集时间间隔,由速度定义公式可得到该时间间隔内平均速度^[7-8]。与2DPIV相比,3DPIV增加一个CCD相机和一个标定系统,一般包括同步器、激光器、两台CCD相机、图像采集处理软件和标定镜及标定软件。卢义玉^[9]等用3DPIV双梯度喷嘴出口流场测试实验验证数值模拟结果,找出煤层割缝器最优喷嘴结构。李大亮^[10]等将3DPIV用于开敞式进水池内流场实验研究,获得能够真实反映实际流动的三维流场分布,验证3DPIV实验研究的可行性。

3DPIV技术具有较高分辨率和精度,但其空间粒子场多态运动重构存在较大困难,同时示踪粒子分布存在遮挡问题,在大型工程实际应用还比较困难。为了弥补3DPIV的不足,已开展相关研究,1998年,Fabry^[11]将全息照相技术和立体PIV相结合测定三维流场速度。

3.3 全息粒子图像测速技术

全息粒子图像测速技术(Holographic Particle Image Velocimetry, HPIV)是在PIV技术、全息技术、传输和处理技术基础上发展起来的。HPIV记录流体内大量粒子全息瞬间3D信息,然后在三维空间重构获取粒子三维位置,进而得到三维速度^[12]。HPIV测速分为两个阶段:1)干涉记录,激光发射光与经过粒子后反射或折射光波发生相干产生干涉条纹并记录在全息干板上,干涉条纹的变化体现波面

形状变化差异;2)衍射再现,对干涉条纹信息处理得到粒子全部三维信息。HPIV可测得三维瞬时流动结构和速度向量场,但其采用传统全息干板和底片,需进行化学湿处理,实践应用比较困难^[13]。

20世纪80年代,数字技术、全息技术与PIV技术结合发展起来的数字全息粒子图像测速技术(Digital Holographic Particle Image Velocimetry, DHPIV)用CCD代替传统全息干片和底片,用CCD记录瞬时空间场全息干涉条纹,不需化学湿处理,使DHPIV可精确记录粒子空间分布瞬态场和粒子完整的演化过程,实时连续测定三维空间流场、粒径和速度分布。李光勇^[14]等在旋转流场测定实验中用综合灰度梯度法实现粒子精确定位,用三维互相关算法解决示踪粒子空间匹配问题,验证DHPIV用于旋转流场的可行性。DHPIV可一次性采集三维流场全部信息,测量精度和效率较高。虽有一些DHPIV用于多相流动测量研究成果,但DHPIV实验测量对设备、环境条件要求比较苛刻,如光源必须具有较好相干性,CCD分辨率限制全息图像记录完整性等,使不同工况下DHPIV流场测试应用难度较大。

3.4 微流场粒子成像测速仪技术

粒子成像测速技术在微尺度(1 μm ~ 1 mm)流场测量方面发展也较快。微流场粒子成像测速仪技术(Micro-PIV)将PIV与光学显微技术结合,可实现微尺度管道内微米级运动粒子全场空间瞬时速度、位移等定量测量,其空间分辨率和测量精度较高,是微尺度气液两相流速度场主要测量手段之一。

Micro-PIV系统主要由显微镜、CCD高速摄像机、双脉冲激光器、操控平台以及有数据处理功能的计算机等构成。其测速原理与PIV相近,但其采用显微观测技术获取运动图像,采用通体照明方式,示踪粒子一般为受布朗运动影响较大的百微米级荧光粒子。付涛涛^[15]用Micro-PIV观测微通道气液两相流动特性,指出微通道速度场可由理论计算得到。王凌^[16]等用Micro-PIV测得微通道气液柱塞流尾流气泡运动图像和速度矢量图。Xiong^[17]等采用Micro-PIV测量气液并流气泡生成过程和液相流体分布特性。

4 基于多普勒原理多相流测速技术

4.1 激光多普勒测速仪

激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimetry, LDV)以光散射理论和多普勒原理为基础,是单点、非接触式测速技术。测速系统包括:①激光器;②分光、聚焦光路系统;③信号收集和检测系统;④信号

处理系统^[18-20]。在光学系统中,双光束光路测量系统较常用,如图2,运动微粒与探测器之间存在相对速度,使探测器接收频率和运动微粒反射光频率存在频差 f_D, f_D 与粒子速度存在下列关系:

$$f_D = \left(\frac{2n}{\lambda_i} \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot v_n \quad (2)$$

其中, f_D 为多普勒频差; λ_i 为激光波长, θ 为入射光波夹角; v_n 为运动微粒速度分量; n 为流体折射率。

激光多普勒测速仪通过测定流场示踪粒子速度来反应待测流场速度。李广年^[21]等进行PIV,LDV螺旋桨尾流测试比对试验,得出两者对流场宏观量测试结果具有一致性。Posner^[22]等用LDV、PIV和CFD研究机械通风房间几何参数与气流模式之间关系,实验结果与模拟结果较好吻合。Weigand^[23]等用LDV测定气轮机燃烧器火焰燃烧流场。Vail^[24]等用LDV测定气升式反应器内局部气速和液体分布特性。LDV对流场无干扰,空间分辨率高、测速范围宽、动态响应快、能辨别速度方向。但LDV采用吸收线频移方法直接测定速度,因而只能测量空间单点速度,无法获得全场瞬态信息,也无法测定颗粒粒径。

4.2 相位多普勒风速计

相位多普勒风速计(Phase Doppler Anemometry, PDA)在LDV基础上发展起来,测速原理与LDV相同。将图2所示系统中探测器改为两个探测器,PDA利用接收的多普勒信号相位差可进行粒径测量。PDA对所测流场无干扰,空间分辨率、测量精度较高,可测量气泡速度,颗粒尺寸和浓度分布,是现阶段最先进气液或液固两相流场激光测量系统。Liu^[25]等用PDA测定喷雾器内部气液两相流动液滴尺寸、速度和到达时间。Zhang^[26]等用PDA测量液固两相微型水力旋流器内速度分布、粒子平均直径等。Kang^[27]等将PDA用于风沙运动粒子速度分布特性实验研究中。

PDA利用多普勒频移原理测速,利用多普勒相位差原理测粒径,把测得的速度和粒径通过软件计算得到浓度分布。PDA浓度测量精度受测量截面的估算精度影响较大,使得浓度测量精度远低于速度和粒径的测量精度。PDA采用统计法进行粒径数据处理,流场有效颗粒数需在100以上,颗粒必须为球形。目前PDA用于不规则颗粒已开展相关研究^[28],但成果并不乐观。刘虎^[29]指出可用三探测器PDA系统对非球形颗粒流进行粒径测量,用三个探测器同时收集颗粒多普勒信号,但三探测器两两

之间相位差之和需在一定误差范围内,否则测量数据无效。

4.3 激光诱导荧光技术

激光诱导荧光技术(Laser Induced Fluorescence, LIF)将分子吸收线频移与荧光辐射强度变化相结合,通过测量荧光辐射强度实现待测点速度测量。本质上LIF属于分子示踪实现全场测速,待测流场中示踪物质分子被特定波长激光照射由基态跃迁至激发态,激发态分子不稳定,在降到基态过程中发出辐射光,该辐射光被称为荧光。CCD或ICCD相机可捕捉荧光光强变化图像,经过软件处理得到相应速度、温度和浓度分布^[7,21,30]。平面激光诱导荧光技术(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)采用片光源照亮流体内部一个或多个平面,实现二维测量。LIF测速时需要同时获得浓度、温度等信息,对于同时需要测定温度、浓度场合较适宜。LIF在高速流场测试中虽已广泛应用,但目前实验室内较难找到适合大多数分子吸收光所处频段的激光器,且由于荧光分子平均寿命低,信号强度太小,使得激光器功率大大增加、探测元件灵敏度要求较高,使LIF广泛应用受到限制,工程中多相流动多以气液两相流动为主,气液两相传质传热机理至今还不能完全被人们所掌握。LIF技术用于两相PIV相分离研究,可实现不同相粒子分离。其原理是向气液两相流中布撒一定数量荧光粒子示踪液相,激光诱导荧光粒子发出与原入射光波长不同的荧光,气相采用气泡示踪,气泡散射光波长与原入射激光相同,通过光学滤波器实现气液两相分离^[31-32]。杨斌^[33]等用PLIF和PIV对风沙流气固两相流动特性进行研究,分别获得气固两相运动粒子图像对,并得到各相速度分布。Ivan^[34]等用PLIF和PIV研究垂直下降管内气液两相环流运动特性。Andrey^[35]等用LIF技术测定水平管内高速气液两相液膜剪切流动特性。

5 多相流场其他激光测试技术

其他多相流测试技术有激光干涉粒子成像测量技术、全场多普勒速度仪、分子激光测速、颗粒计数测速技术等,这些均是多相流动特性研究的重要工具。

5.1 激光干涉粒子成像测量技术

激光干涉粒子成像测量技术(Interferometric Particle Imaging, IPI)基于光学干涉离焦成像原理,是非接触式测量平面雾化液滴直径和速度的技术。测量原理是激光束照射透明球形粒子,粒子表面反

射光和经粒子后折射光在离焦面形成干涉条纹,在聚焦像面形成两点像,一个为反射光聚焦像,一个为折射光聚焦像,并在粒子离焦面形成干涉条纹。如图3所示,a、b、c为离焦像面,d为聚焦像面。通过拍摄每个粒子离焦像面干涉图,分析得到粒子尺寸;从高速摄像机较短时间间隔内拍摄的干涉图像可获得颗粒速度场。

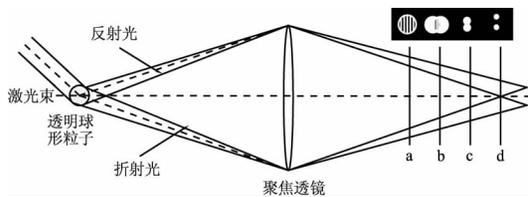


图3 激光干涉粒子成像测量原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Interferometric Particle Imaging measurement principle

Lacagnin^[36]等用 IPI 研究船螺旋桨模型空泡现象,得到模型内粒子尺寸和速度分布特性。Lacour^[37]等用 IPI 和 PIV 测定蒸发雾场气相涡旋流动特性。IPI 测量多液滴流场时,存在不同液滴干涉条纹图像重叠现象,测量结果不够准确,IPI 只适用于低浓度液滴流场测量。

5.2 全场多普勒速度仪

全场多普勒速度仪(Global Doppler Velocimetry, GDV)将 PIV 与多普勒技术相结合,是激光多普勒技术向全场、不规则颗粒测量的扩展。GDV 测速无需示踪粒子,其将粒子多普勒散射信号转换为光强信号,送到本底噪声极低、量子效率很高的相机内,由软件计算每个粒子的速度。GDV 不受模型和壁面反射光的影响,比较适合超高音速测量。多相流特征参数较多,含水(气)率、流型瞬息万变,这给多相流测量带来挑战,使得多相流测试技术要以先进技术为依托来迎接挑战,促进多相流理论发展。

6 结论与展望

(1) 激光测试技术已成为多相流特性测量有效工具。2DPIV 比较成熟,广泛用于多相流动二维速度全场准确测量中,但无法获得流场颗粒相粒径。

(2) LDV 和 PDA 逐一测定空间单点速度实现二维全场测量,存在示踪粒子跟随性问题;两探测器 PDA 系统利用多普勒信号相位差实现颗粒粒径测量,但颗粒必须为球形,实际工程流场测量应用比较困难。

(3) LIF 可实现速度场、温度场和浓度场同时测量,不需示踪粒子,避免对流场干扰和跟随性误差。将 LIF 用于两相 PIV 中,能方便实现多相流相分离,

LIF 将是今后分析多相流问题主要测量手段。

(4) IPI 可非接触式测量平面内液滴直径和速度,目前已广泛用于球形粒子测量中,对于非球形和非均匀粒子还处于理论研究阶段。

(5) 工程多相流多为三维三相非稳态流动,只进行速度、粒径和浓度等二维宏观上观测远不能揭示多相流动机理,这需要像 3DPIV、HPIV 等进行三维瞬态测量,揭示多相流微观层次运动规律。目前 3DPIV、HPIV 应用存在一定局限性,因此需研发不同环境下多种实用的全场三维测试技术,同时朝着四维甚至多维空间迈进,以更好地认识多相流动机理和复杂的时空结构。

参考文献:

- [1] GU Ying. The development history of laser technology [J]. China Mediatech, 2006, (Z3): 73 - 77. (in Chinese)
顾颖. 激光技术的发展历史[J]. 记录媒体技术, 2006, (Z3): 73 - 77.
- [2] Y Yeh, H Z Cummins. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer [J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(10): 176 - 178.
- [3] Saito T, Sakakibara K, Miyamoto Y, et al. A study of surfactant effects on the liquid-Phase motion around a zig-zagging-ascent bubble using a recursive cross-correlation PIV [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 158(1): 39 - 50.
- [4] Nagami Yasuyuki, Saito Takayuki. Measurement of modulation induced by interaction between bubble motion and liquid-phase motion in the decaying turbulence formed by an oscillating-grid [J]. Particology, 2013, 11(2): 158 - 169.
- [5] ZHANG Mingliang, CHEN Gang, XU Lianfeng, et al. Application of PIV for submerged jet in water cushion pool [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(3): 79 - 84. (in Chinese)
张明亮, 陈刚, 许联锋, 等. PIV 技术在水垫塘实验模型淹没射流中的应用[J]. 实验流体力学, 2005, 19(3): 79 - 84.
- [6] G Montante, A Pagliantimagelli, F Magelli. Experimental analysis and computational modelling of Gas-Liquid stirred vessels [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, (85): 647 - 653.
- [7] KANG Qi. The progress of full field speed measuring technology [J]. Advances in mechanics, 1997, 27(1): 106 - 121. (in Chinese)
康琦. 全场测速技术进展[J]. 力学进展, 1997, 27(1):

- 106 - 121.
- [8] ZHANG Yulun. 3D-PIV measurement and numerical simulation of flow field in the forebay of a pumping station [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese)
张玉伦. 泵站前池流场 3D-PIV 测量及数值模拟[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
- [9] LU Yiyu, ZHANG Lei, GE Zhaolong, et al. Structure design and optimization of dual gradient nozzle used in coal mine [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(1): 84 - 90. (in Chinese)
卢义玉, 张磊, 葛兆龙, 等. 煤层割缝器用双梯度喷嘴结构设计与优化 [J]. 重庆大学学报, 2014, 37(1): 84 - 90.
- [10] LI Daliang, LIU Chao, TANG Fangping. The application of 3DPIV to the flow measurements in opening pump sumps [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (4): 102 - 106. (in Chinese)
李大亮, 刘超, 汤方平. 开敞式进水池内部流动 3DPIV 实验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2012, (4): 102 - 106.
- [11] E P Fabry. 3D holographic PIV with a forward-scattering laser sheet and stereoscopic [J]. Exp Fluids, 1988, (24): 39 - 46.
- [12] Ye Pu, H Meng. An advanced off-axis holographic particle image velocimetry (HPIV) system [J]. Exp Fluids, 2000, (29): 184 - 197.
- [13] SHENG Gongxin, ZHANG Yonggang, CAO Xiaoguang, et al. Research advances in digital holography particle image velocimetry [J]. Advances in mechanics, 2007, 37(4): 563 - 574. (in Chinese)
申功忻, 张永刚, 曹晓光, 等. 数字全息粒子图像测速技术 (DHPIV) 研究进展 [J]. 力学进展, 2007, 37(4): 563 - 574.
- [14] LI Guangyong, YANG Yan. Digital holography particle image velocimetry applied for measurement of the rotating flow fields [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 184 - 192. (in Chinese)
李光勇, 杨岩. 数字全息粒子图像测速技术应用于旋转流场测量的研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 184 - 192.
- [15] FU Taotao. Study of gas-liquid two-phase flow and bubble behaviors in microchannels [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
付涛涛. 微通道内气液两相流及气泡行为研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [16] WANG Ling, LUO Rui, WANG Buxuan. Experimental investigations on three-dimensional flow field around the tail of gas-liquid slug flow in microchannels [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(11): 126 - 130. (in Chinese)
王凌, 罗锐, 王补宣. 微通道气液柱塞流尾部流场三维实验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(11): 126 - 130.
- [17] Maru Koichi, Watanabe Kento. Non-mechanical scanning laser doppler velocimetry with sensitivity to direction of transverse velocity component using optical serrodyne frequency shifting [J]. Optics Co-munications, 2014, 319: 80 - 84.
- [18] LIU You, YANG Xiaotao, MA Xiuzhen. Technique of flow field measurement based on laser doppler velocimetry [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 18 - 21. (in Chinese)
刘友, 杨晓涛, 马修真. 基于激光多普勒测速的流场测试技术 [J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 18 - 21.
- [19] Maru Koichi, Hata Takahiro. Directional discrimination for fiber-optic non-mechanical scanning laser doppler velocimeter using single transmission path [J]. Optik, 2014, 125(20): 6312 - 6312.
- [20] Renqiang Xiong, Mo Bai, Jacob N Chung. Formation of bubbles in a simple co-flowing micro-channel [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, (17): 1002 - 1011.
- [21] LI Guangnian, ZHANG Jun, LU Linzhang, et al. Comparative study of PIV and LDV measurements in the wake of a propeller [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 2083 - 2090. (in Chinese)
李广年, 张军, 陆林章, 等. PIV, LDV 在螺旋桨尾流测试中的比对应用 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 2083 - 2090.
- [22] J D Posner, C R Buchanan, D Dunn-Ranki. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room [J]. Energy and Buildings, 2003, (35): 515 - 526.
- [23] P Weigand, W Meier, X R Duan, et al. Investigations of swirl flames in a gas turbine model combustor I. Flow field, structures, temperature, and species distributions [J]. Combustion and Flame, 2006, (144): 205 - 224.
- [24] Ch Vial, S Poncina, G Wilda, et al. Experimental and theoretical analysis of the hydrodynamics in the riser of an external loop airlift reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2002, (57): 4745 - 4762.
- [25] Liu Meng, Duan Yufeng, Zhang Tienan. Evaluation of effervescent atomizer internal design on the spray unsteadiness using a phase/Doppler particle analyzer [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, (34): 657 - 665.
- [26] Zhang Yanhong, Liu Yi, Qian Peng, et al. Experimental Investigation of a Minihydrocyclone [J]. Chemical Engi-

- neering & Technology, 2009, 31(8): 1274 - 1279.
- [27] Liqiang Kang, Liejin Guo, Dayou Liu. Experimental investigation of particle velocity distributions in windblown sand movement[J]. Science in China(Series G: Physics, Mechanics & Astronomy), 2008, 51(8): 986 - 1000.
- [28] LV Hongbo. The research of PDA technique and its application in non-ideal spherical particle characteristics measurement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2000. (in Chinese)
吕宏波. PDA 技术及其在非理想球形粒子特性测量中的应用的研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [29] LIU Hu. Study on the influences of the reception mode and parameters of PDA on the measure of gas-solid flow field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
刘虎. PDA 接收方式和参数对气固两相流场测量影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [30] MA Xiao, HE Xu, WANG Jianxin. Research progress of laser-induced fluorescence in combustion visualization of internal combustion engine [J]. Vehicle Engine, 2008, (1): 7 - 13. (in Chinese)
马骁, 何旭, 王建昕. 激光诱导荧光法用于内燃机燃烧可视化的研究进展[J]. 车用发动机, 2008, (1): 7 - 13.
- [31] ZHAO Shufang, WANG Wentan, HU Yinyu, et al. Liquid mixing and Curcumin nanoparticle preparation in stirred tanks[J]. CIESC Journal, 2013, 64(3): 841 - 848. (in Chinese)
赵述芳, 王文坦, 胡银玉, 等. 搅拌釜内液-液混合溶
- 析沉淀法制备纳米姜黄素颗粒[J]. 化工学报, 2013, 64(3): 841 - 848.
- [32] LIU Xiaohui. Study on particle image velocimetry and inverse analysis in aeration tank[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
刘晓辉. 曝气池中气液两相流粒子图像测速技术及逆解析研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [33] YANG Bin, WANG Yuan, ZHANG Yang. Simultaneous velocity measurements of gas-solid phases in eolian sediment transport by particle image velocimetry-planar laser induced fluorescence[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 101 - 104. (in Chinese)
杨斌, 王元, 张洋. 风沙流中气固两相速度场的 PIV-PLIF 测量[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 101 - 104.
- [34] Ivan Zadrazil, Christos N. Markides. Dynamics of laminar circular jet impingement upon convex cylinders[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, (67): 42 - 53.
- [35] Andrey V Cherdantsev, Davia B Hann, Bary J Azzopardi. Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, (67): 52 - 64.
- [36] G Lacagnina, S Grizzi, M Falchi, et al. Simultaneous size and velocity measurements of cavitating microbubbles using interferometric laser imaging[J]. Exp Fluids, 2011, (50): 1153 - 1167.
- [37] C Lacour, D Durox, S Durox, et al. Interaction of a polydisperse spray [J]. Exp Fluids, 2011, (51): 295 - 311.