

文章编号 1004-924X(2016)增-0028-07

扇形气力雾化 SNCR 喷嘴雾化特性的全息测量

雷 岚*, 曹 娜, 曹 亮, 徐 青, 韩长材, 段宝军

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

摘要: 基于微粒场全息术设计了一种粒子场离轴全息测量系统, 用以获得扇形气力雾化(SNCR)喷嘴的液滴粒径及粒度分布等雾化特性。首先介绍了该全息测息系统的基本原理和组成, 然后通过单次实验获得了 $\Phi 70$ mm 圆形区域的雾化场全息图, 对全息图进行再现采集及图像处理获得了指定区域的索特平均直径(SMD)和不同粒径的液滴数量占位比。实验结果表明: 该喷雾场的雾化粒度 D_{32} 在 $50 \sim 170 \mu\text{m}$ 之间, 中心雾化粒度大, 向边缘方向逐渐减小, 是理想的 SNCR 喷嘴雾化形式; 在液体流量固定的情况下, 雾化粒度 D_{32} 会随着气耗率的上升而下降。该结果是评估 SNCR 喷嘴雾化性能的主要数据, 对喷嘴在实际运行中的控制技术和雾化机理的理论研究具有指导意义。

关键词: 全息测量; 扇形气力雾化喷嘴; 雾化性能; 脉冲全息; SNCR; 烟气脱硝

中图分类号: TQ051.73; TK223.26; X701.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0028

Holographic measurement of atomization characteristics of fan-shaped air-blast atomization SNCR nozzle

LEI Lan*, CAO Na, CAO Liang, XU Qing, HAN Chang-cai, DUAN Bao-jun

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest
Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

* Corresponding author, E-mail: leilan@nint.ac.cn

Abstract: An off-axis pulsed particle holographic system was established based on micro particle holography, for measuring the spray characteristics such as particle size and distribution of the fan-shaped air-blast atomization nozzle. The principle and composition of the optical holographic system was introduced firstly, by which the atomization field hologram for the $\Phi 70$ mm circular area was recorded. After collection of the hologram reproduction and image processing, the Sauter Mean Diameter (SMD) and the occupation ratio of droplets with different diameters were acquired. The experimental results show that droplet size D_{32} of the atomization field is between $50 \mu\text{m}$ and $170 \mu\text{m}$, with larger droplet size in middle part and gradually diminishing towards the edge. It is an ideal atomization mode for the SNCR nozzle; where there is a fixed liquid flow, the atomization droplet size D_{32} will decrease as the gas loss rate goes up. It indicates that the main evaluation data for atomization property of the SNCR nozzle is of great guiding significance to the theoretical research on control technology

收稿日期: 2016-06-12; 修订日期: 2016-07-02.

基金项目: 国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLLIM1010)

and atomization mechanism of the nozzle in practical operation.

Key words: holographic measurement; fan-shaped air-blast atomization nozzle; atomization property; pulse holography; SNCR; flue gas denitrification

1 引 言

选择性非催化还原(Selective Non-catalytic Reduction, SNCR)技术可最低成本地满足烟气排放要求,适合现阶段的中国国情,因而得到了广泛的应用^[1-3]。相关研究表明,多数实际运行中的脱硝率只能达到实验室中最高脱硝率的约 55%,喷射雾滴和烟气的混合效果是制约实际脱硝率的关键^[4-8]。喷嘴的雾化特性是影响混合效果的主要因素之一,因此,雾化性能的研究是 SNCR 喷嘴研发和应用中的重要内容,对提高 SNCR 技术的实际脱硝率和实现大规模的工业应用具有重要研究价值。同时,雾化特性与雾化气压力和流量有直接关系^[7],因此其研究对喷嘴在实际运行中的控制技术也具有重要意义。由于喷嘴的雾化机理十分复杂,而目前对雾化过程的理论研究还不完善^[8],因此,实验测量数据就显得至关重要。

液滴粒径及粒度分布是评估雾化特性的主要参数,也是喷嘴结构选型与定型的主要依据。在众多测量液滴粒径的方法中,光学测量方法最为先进,目前已发展起来的非接触光学测量技术主要有激光多普勒技术(PDPA)、激光衍射法(马尔文法)、平面激光诱导荧光-米氏散射法、激光阴影法、激光全息技术等^[9-15]。在这些技术中,多数只能对球形颗粒进行测量,如激光多普勒技术和激光衍射法是根据颗粒产生的信号获取粒子直径,而非球形粒子则被视为噪声;而且只能获得测量区域内粒子直径的统计分布,无法获得雾化场的粒径空间分布,例如消光法获得线状测量区域的粒径统计分布,PDPA 获得点状测量区域的粒径统计分布,通过空间多点扫描可以获得粒径空间分布,但需要多次重复实验。此外,多数技术所能测量的区域只有 2 mm×2 mm 甚至更小,需要多次重复喷射才能测量全部雾化场。相比其他测量技术,激光全息技术在微粒场的粒径测量中有其不可替代的独特优势,表现为它不受测量物体形状的限制、对雾化粒子的粒径跨度没有约束、在单次实验中就可获得整个测试区间颗粒的粒径及

瞬态三维空间分布,所以它被视为雾化场的精确与标准测量方法,并已经得到了广泛应用^[16-21]。全息技术以记录介质分为光学全息和数字全息,光学全息用干板记录全息图,数字全息用光电传感器件记录全息图。近年来,随着计算机和光电耦合器件(CCD)的发展,数字全息以其操作简单和可快速获取数据的优势,得到了广泛的关注和应用,然而受 CCD 灵敏面尺寸和分辨率的限制,在大视场和高分辨率的应用测量中,传统的光学全息仍然具有不可替代的地位。

理想的 SNCR 喷嘴形式为气力雾化,喷雾形状为平面扇形,喷雾场中心雾化粒度大,两侧雾化粒度小,且雾化粒度分布在 50~300 μm^[7]。扇形气力雾化喷嘴就是结合扇形喷雾和气力雾化两种优点而提出的一种新型 SNCR 喷嘴。目前,国内多家单位致力于其结构的开发研究。在性能测试中,通常采用激光粒度分析仪测量雾滴粒径,通过在三维方向上移动喷嘴取得雾化粒度的三维分布^[7-8],这种测量方式对喷嘴位置的定位精度和测量时运行工况的稳定性要求很高。本文以脉冲离轴粒子场光学全息技术为手段,对一种用于某电力系统的扇形气力雾化 SNCR 喷嘴的雾化场进行了测量。通过单次实验获得了 Φ70 mm 圆形区域的雾化场全息图,计算得到了指定区域的索特平均直径^[22](SMD,常用 D_{32} 表示)和不同粒径的液滴数量占位比,并分析了雾化场的特点以及气力雾化对雾化粒度的影响,从而为扇形气力雾化喷嘴的研发提供理论指导。

2 基本理论

微粒场全息术是一种对小颗粒进行定量分析的现代科学技术,可以对动态粒子场的粒度分布、空间分布及速度分布等三维信息进行诊断测量。自 B. J. Thompson 等将全息技术应用于微粒大小的分析后,随着理论和实验技术的不断发展和成熟,全息术已经广泛应用于科学与军事研究中。

微粒场全息术是通过两束相干光的干涉实现对粒子场信息的记录,其记录方式主要分为离轴

全息和同轴全息。同轴全息记录方式中激光束穿过物场照射到干板记录,物光同时作为参考光,不需要对激光束分束,因而光路结构简单且调节方便降低了对光路元件的精度和记录介质的分辨率要求,在测量一些特殊对象时表现出明显的优势,所以该方式在粒子场测量中占据非常重要的地位。但由于其参考光要通过被测场,在密度较大的微粒场测量中难以获得清晰的全息图像,从而限制了其应用。离轴全息记录方式中参考光与物光束以一定的夹角入射到干板,能够实现

再现虚像与再现实像的空间分离,并记录较大密度的粒子场,是全息测量技术中最常用的记录方式。

图 1 为离轴全息的测量原理示意图,激光束分束为参考光与物光,参考光束与通过微粒场后的物光束在全息干板上发生干涉,形成全息干涉图。干板经冲洗后,用再现光照射全息图,在干板前后形成微粒场的再现像,再现实像通过成像透镜成像于 CCD 靶面上,CCD 对粒子场图像进行采集并处理后可以获得粒子的空间分布信息。

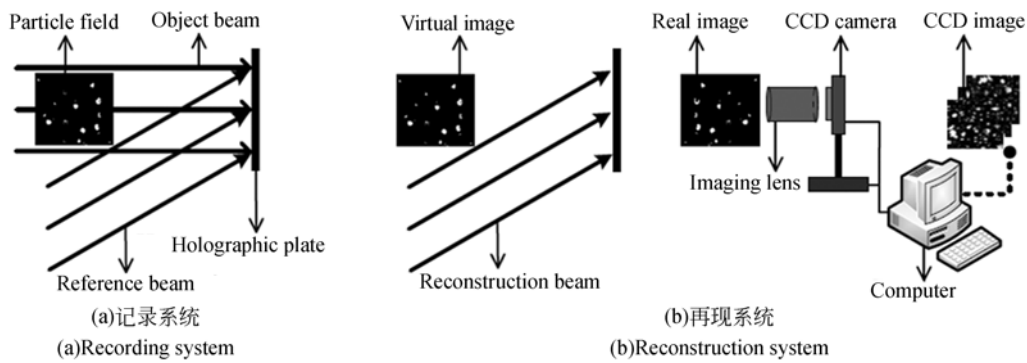


图 1 粒子场离轴全息测量原理示意图

Fig. 1 Principle scheme of particle field measurement using off-axis holography

3 记录系统

3.1 记录系统

实验记录系统将被测粒子场记录在 VRP-M 干板上,主要由准直记录光源、成像传输系统、介质记录系统和同步触发控制系统几部分组成,如图 2 所示。脉冲激光光源和激光准直扩束系统组成记录光源,获得测试所需要的平行光,其中脉冲激光光源为 Nd : YAG 脉冲激光器,波长为 532 nm,脉冲频率是 1 Hz,扩束后的光斑直径为 $\Phi 70$ mm。全息记录要求被测对象在记录时间内保持相对静止,因而激光器的脉冲宽度是一个很重要的参数。理论计算与实验结果表明^[23],在一个光脉冲的时间间隔内,当粒子的位移小于其直径的十分之一时,可以避免粒子运动引起的干涉条纹模糊,成功实现运动粒子的全息记录。实验所用脉冲激光器的脉冲宽度为皮秒量级,被测粒子的运动速度为百米/秒,直径为微米量级,因此该记录光源可以实现被测粒子场的清晰记录。

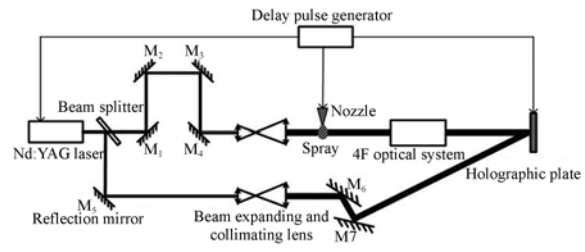


图 2 全息记录系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of holographic recording system

对于微米量级的小颗粒,其远场距为毫米量级,为避免全息干板在此距离处被高速运动的颗粒损坏而无法实现安全的全息记录,必须通过成像透镜将粒子场搬到合适的记录位置进行记录。由于单透镜的像空间放大率不均匀,通常采用 4f 成像系统,组成该系统的两组透镜可以采用不同的焦距,从而获得不同的放大倍率。这样,由于粒子处在平行光路中,在经过变换放大后,光场仍然保持平行,因此,像空间的所有粒子都具有相同的放大率,便于系统标定及粒子数据处理。实验所

用 $4f$ 成像系统的理论放大率为 $1:1$ 。

记录系统中由 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 组成的反射透镜组可以方便地完成光路的程差匹配,由 M_5 、 M_6 、 M_7 组成的反射透镜组可调节物光与参考光入射干板的夹角。多路输出信号、延迟时间可调的同步触发控制系统可完成激光器、粒子源及干板快门暗盒准确的时间同步。

3.2 粒子场再现与图像采集系统

记录了粒子场信息的全息干板经化学冲洗后置于粒子场再现与图像采集系统进行图像再现、采集与存储,为下一步的图像处理提供原始数据。图 3 所示为粒子场再现与图像采集系统示意图, Nd:YAG 激光器输出的激光经空间滤波器与凸

透镜后形成准直光束,经反射镜 M_1 与 M_2 后沿参考光方向照射全息干板,在干板后空间成像位置处形成粒子场的再现实像。为满足图像接收器件 CCD 的分辨要求,将再现实像经成像透镜放大 ($3\times$) 后再成像到 CCD (DIS-902HB, 600 线, $1/2$ 英寸,灵敏面尺寸为 $768\text{ pixel}\times 576\text{ pixel}$) 灵敏面进行接收,然后并传入计算机存储,再现实像中 1 个像素对应物空间的物理尺寸为 $2.63\text{ }\mu\text{m}\times 2.63\text{ }\mu\text{m}$ 。受 CCD 灵敏面积的限制,再现粒子场图像由多次分幅采集完成。采用三维精密平移台控制干板或 CCD 的移动方向和步长等参数,在 XYZ 3 个方向上按一定的顺序运动干板或 CCD,实现整个再现粒子场图像的完整采集。

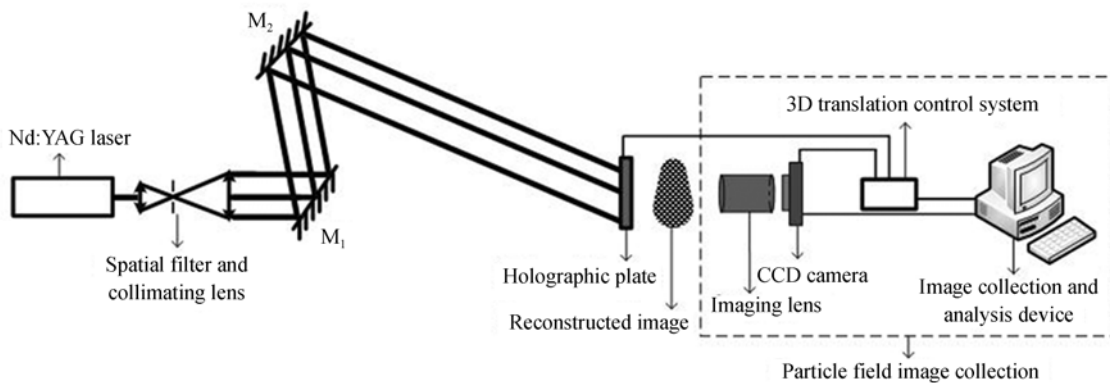


图 3 粒子场再现与图像采集系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of holographic reconstruction and image collection system

3.3 再现粒子像处理

再现粒子像的处理是指通过图像处理和识别技术,依据目标粒子的图像特征,将目标粒子从背景噪声中提取出来,从而获得其大小、形状和空间分布等参数。在离轴粒子场全息技术中,目标粒子的再现实像特征主要表现为:在焦粒子图像多处于低亮度区域,内部强度较为均匀,图像边沿较为规则、平滑,边沿梯度较高;同时,粒子图像存在于多个层面,且相邻层面粒子的图像形状非常相似。而噪声图像的随机性较大,较小的噪声区域多数仅存在于单一层面,对于个别较大的噪声区域,虽然会存在于多个临近层面,但形状和面积上通常存在较大差异。

以标准粒子板为测量对象,对本测量系统的测量精度进行了实验标定,结果表明系统对直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上粒子的标准不确定度小于 10% 。

4 实验结果

采用脉冲离轴粒子场光学全息技术对用于某电力系统的扇形气力雾化 SNCR 喷嘴的雾化场进行了测量。该雾化场是一个厚度很薄的扇形喷雾场,定义喷雾出口的中心为坐标零点,喷嘴轴线方向即喷雾射流方向为 X 方向,扇形喷雾面为 XY 平面,如图 4 所示。

实验获得了 $\Phi 70\text{ mm}$ 圆形区域(见图 4 中虚线圆圈)内的粒子场全息图。图 5(a)所示为 CCD 采集得到的一幅全息再现实像,可以看到除在焦粒子外,图像上存在很多噪声和离焦粒子。通过图像处理技术从中提取出可能为粒子的图像,如图 5(b)所示。最后经过在焦判读获得的在焦粒子图像,如图 5(c)所示。

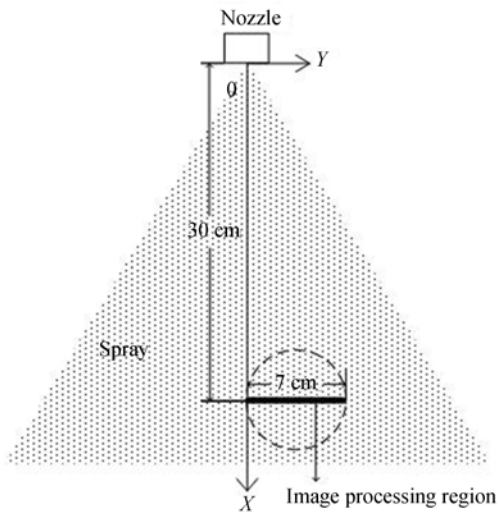
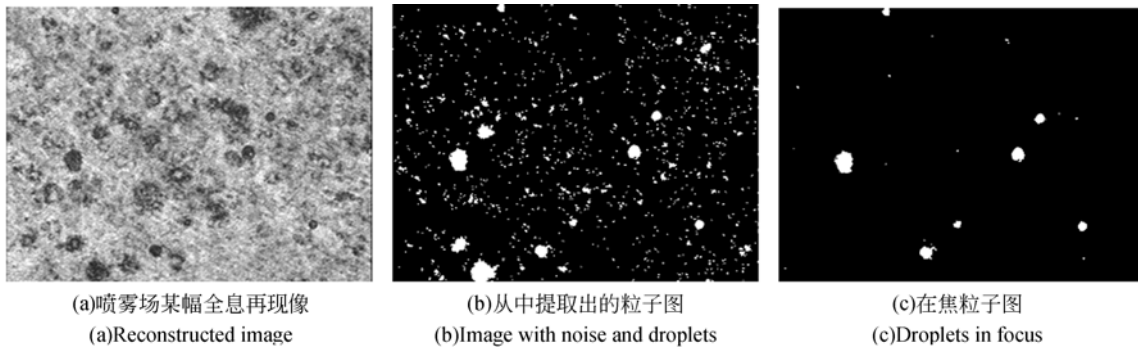


图 4 喷雾场测量区域示意图

Fig. 4 Measuring region in spray

喷雾中液滴的分布是不均匀的,常用液滴的某个平均粒径作为指标,其中索特平均直径 D_{32} 的使用最为广泛。对 $X=30\text{ cm}$ 处 2 mm 宽切片内 $Y=0\sim 7\text{ cm}$ 雾化场区间的液滴直径 D_{32} 进行了计算,该区域内液滴直径 D_{32} 随 Y 的变化曲线如图 6 所示。可以看到喷雾场的雾化粒度为 $50\sim 170\ \mu\text{m}$,属于理想 SNCR 喷嘴的雾化粒度范围;喷雾场的中心雾化粒度大,边缘雾化粒度小,中心的大颗粒速度快、穿透距离大且蒸发慢,可以抵达炉膛深处,而两侧的小颗粒混合更均匀且蒸发快,可以在喷入点与烟气充分混合。这种粒度分布形式在近壁面和炉膛中心区域都能实现好的雾滴和烟气混合效果,因而是理想的 SNCR 喷嘴雾化形式。



(a) 喷雾场某幅全息再现像
(a) Reconstructed image

(b) 从中提取出的粒子图
(b) Image with noise and droplets

(c) 在焦粒子图
(c) Droplets in focus

图 5 实验结果

Fig. 5 Measurement results

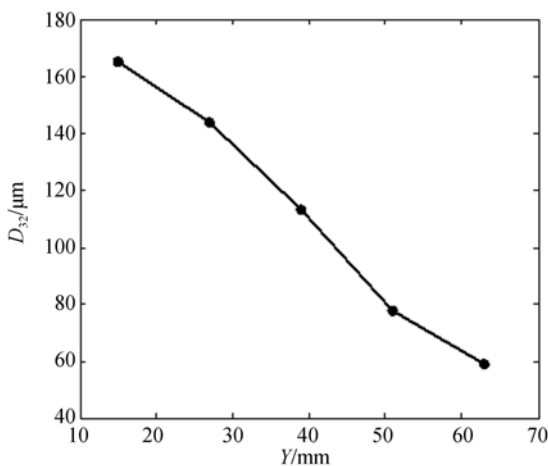


图 6 液滴直径 D_{32} 随 Y 的变化曲线

Fig. 6 Variation of droplets size D_{32} with Y

理论上气力雾化的作用会使喷雾的雾化粒度下降^[7],实验测量了在液体流量相同时两个气耗

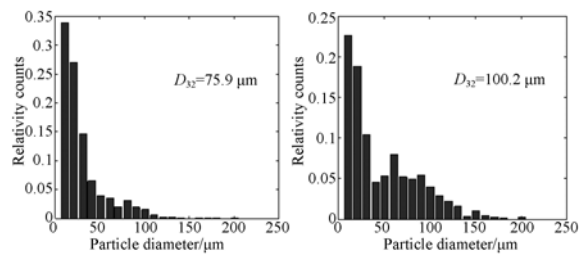


图 7 相同区域在不同气耗率时的粒径分布及 D_{32} 值 ($k_1/k_2 = 2.3$)

Fig. 7 Droplets size distribution and D_{32} in same region under different air-liquid ratios ($k_1/k_2 = 2.3$)

率下的喷雾场,图 7 所示为雾化场同一区域两次所得的粒径分布及 D_{32} (左图对应的气耗率 k_1 是右图对应气耗率 k_2 的 2.3 倍)。可以看出,在液体流量固定的情况下,雾化粒度会随着气耗率的上升而下降,该结论体现了气力雾化对雾化粒度

的作用效果,对喷嘴在实际运行中的控制具有指导意义。

5 结 论

本文采用脉冲离轴粒子场光学全息技术对一种扇形气力雾化 SNCR 喷嘴的雾化场进行了测量,通过单次实验获得了 $\Phi 70$ mm 圆形区域的雾化场全息图,对全息图再现采集及图像处理获得了雾化场指定区域的索特平均直径(SMD)和不同粒径的液滴数量占位比,并分析了雾化场的

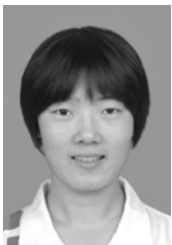
特点以及气力雾化对雾化粒度的影响。实验结果表明:喷雾场的雾化粒度在 $50\sim 170\ \mu\text{m}$ 之间;中心雾化粒度大,向边缘方向粒度变小,中心的大颗粒穿透距离大且蒸发慢,可以抵达炉膛深处与烟气混合,而两侧的小颗粒混合更均匀且蒸发快,可以在喷入点与烟气充分混合;在液体流量固定的情况下,雾化粒度会随着气耗率的上升而下降。该实验测量方法可为 SNCR 喷嘴的结构设计、最终选型和定型提供重要的测试数据和评估依据,同时所得结果对喷嘴在实际运行中控制技术和雾化机理研究具有指导意义。

参考文献:

- [1] YANG W J, CHEN Z C, ZHOU Z J, *et al.*. Cost-efficient nitrogen oxides control by a hybrid selective non-catalytic reduction and selective catalytic reduction system on a utility boiler [J]. *Environmental Engineering Science*, 2011, 28(5): 341-348.
- [2] NGUYEN T D B, KANG T H, LIM Y I, *et al.*. Application of urea-based SNCR to a municipal incinerator: On-site test and CFD simulation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 152(1): 36-43.
- [3] SHIN M, KIM H S, JANG D S. Numerical study on the SNCR application of space-limited industrial boiler [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27: 2850-2857.
- [4] 王海涛,杨卫娟,周俊虎,等. 液滴在高温气流中蒸发混合特性计算分析[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2011,45(5):878-884.
WANG H T, YANG W J, ZHOU J H, *et al.*. Calculation and analysis on evaporation and mixing characteristics of droplets in high temperature flue [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2011, 45(5):878-884. (in Chinese)
- [5] 余昊. 选择性非催化还原脱硝技术的实验研究[D]. 浙江:浙江大学,2013.
YU H. *Experimental Study on the Selective Non-catalytic Reduction* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [6] 杜双琦. 选择性非催化还原脱硝技术混合特性研究[D]. 浙江:中国计量学院,2012.
DU SH Q. *Research on the Mixing Characteristics of Selective Non-catalytic Reduction* [D]. Zhejiang: China Jiliang University, 2012. (in Chinese)
- [7] 卢志民. SNCR 反应机理及混合特性研究[D]. 浙江:浙江大学,2006.
LU ZH M. *Study on Reaction Mechanism and Mixing Characteristics of SNCR Technique* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [8] 周林华. SNCR 气力式雾化喷嘴雾化特性的实验研究[D]. 浙江:浙江大学,2007.
ZHOU L H. *Experimental Research on the Atomization Characteristics of Air-blast Spray Nozzles for Selective Non-catalytic Reduction System* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [9] 李治龙,吴志军,王幸,等. 液滴半径与其侧向散射光通量关系的实验[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10):2502-2507.
LI ZH L, WU ZH J, WANG X, *et al.*. Experiments on relationship between droplet radius and its lateral scattering luminous flux[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2502-2507. (in Chinese)
- [10] 隋国荣,程利,陈抱雪. 用光纤耦合法实现颗粒测量[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12):2844-2853.
SUI G R, CHENG L, CHEN B X. Measurement of particles by optical fiber coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2844-2853. (in Chinese)
- [11] 杨晖,郑刚,张仁杰. 用动态光散射时间相干度法测量纳米颗粒粒径[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1546-1551.
YANG H, ZHENG G, ZHANG R J. Measurement of nanoparticle sizes by variance of temporal coherence of dynamic light scattering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1546-1551. (in Chinese)
- [12] 王燕民,陈琪星,潘志东. 激光粒度测量的综合反

- 演及参数选择[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9): 2120-2127.
- WANG Y M, CHEN Q X, PAN ZH D. Hybrid inversion algorithm for laser scattering particle size analyzer and its parameter selection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2120-2127. (in Chinese)
- [13] YANG M G, ZHANG F, KANG C, *et al.*. Experiment and numerical simulation of free water jet by a central-body nozzle [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(6): 797-804.
- [14] IGUSHI T, YOSHIDA H. Investigation of low-angle laser light scattering patterns using the modified twomey iterative method for particle sizing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82: 015111.
- [15] 张龙, 张力虎, 曹娜, 等. 运用激光全息术和 PDPA 测量喷射燃料粒子场[J]. 实验流体力学, 2011, 25(2): 83-87.
- ZHANG L, ZHANG L H, CAO N, *et al.*. Spray fuel particle field measurement by using laser holography and PDPA technology [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(2): 83-87. (in Chinese)
- [16] 徐青, 曹娜, 曹亮, 等. 静电雾化场的数字全息实验研究[J]. 激光技术, 2013, 37(2): 143-146.
- XU Q, CAO N, CAO L, *et al.*. Experimental research of electrostatic spray with digital holography [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 143-146. (in Chinese)
- [17] CAO N, CAO L, HAN C C, *et al.*. A study of the spray characterization from a centrifugal nozzle by pulsed laser holography [C]. *International Conference on Mechanical Engineering and Materials, Australia*, 2012: 846-851.
- [18] 陈亮, 乐嘉陵, 宋文艳, 等. 超声速冷态流场液体射流雾化实验研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(2): 29-40.
- CHEN L, LE J L, SONG W Y, *et al.*. Experimental investigation of liquid jets atomization in supersonic cold cross flow [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(2): 29-40. (in Chinese)
- [19] YANG Y, BOSEON K. Measurements of the characteristics of spray droplets using in-line digital particle holography [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23: 1670-1679.
- [20] LI T, NISHIDA K, HIROYASU H. Characterization of initial spray from a D. I. gasoline injector by holography and laser diffraction method [J]. *Atomization and Spray*, 2004, 14(5): 103-120.
- [21] 吴迎春, 吴学成, 岑可法, 等. 数字全息测量颗粒场研究进展[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0601001-1-0601001-11.
- WU Y CH, WU X CH, CEN K F, *et al.*. Development of digital holography in particle field measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0601001-1-0601001-11. (in Chinese)
- [22] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 8-9.
- GAN X H. *Aero Gas Turbine Engine Fuel Nozzle Technology* [M]. Beijing: National defense industry press. 2006: 8-9. (in Chinese)
- [23] Vikram C. *Particle Field Holography* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 18-38.

作者简介:



雷 岚(1984—),女,山西平遥人,硕士,助理研究员,2006年于吉林大学获得学士学位,2009年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事脉冲激光全息诊断技术的研究。E-mail: leilan@nint. ac. cn



曹 娜(1969—),女,河南南阳人,博士,研究员,2003年于复旦大学获得博士学位,主要从事脉冲激光全息诊断技术的研究。E-mail: caona@nint. ac. cn