

全场彩虹技术测量喷雾浓度及粒径分布*

吴迎春¹⁾ 吴学成^{1)†} Sawitree Saengkaew²⁾ 姜溟予¹⁾ 洪巧巧¹⁾
Gérard Gréhan²⁾ 岑可法¹⁾

1) (浙江大学能源工程学系, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

2) (UMR 6614/CORIA, LABEX EMC3, Centre National de la Recherche Scientifique, Université et Institut National des Sciences

Appliqués de Rouen, Site du Madrillet, Avenue de l'Université, BP12 76801 Saint Etienne du Rouvray, France)

(2012年11月8日收到; 2012年12月4日收到修改稿)

喷雾颗粒的浓度、粒径等多参数的同时测量是研究喷雾的关键. 对应用全场彩虹技术测量双组分液滴的浓度及粒径分布进行了研究. 基于改进的 Nussenzweig 理论, 对液滴折射率和粒径分布采用无分布函数算法进行最优化求解, 然后通过折射率与浓度的关系反推液滴浓度. 用模拟全场彩虹信号对该算法进行了验证, 该算法可准确反演具有单峰分布、双峰分布粒径特征的液滴群的折射率与粒径分布. 并对体积分数从 0% 到 100% 的乙醇溶液喷雾进行了实验测量, 结果表明, 所测得折射率与理论值符合, 粒径分布稳定. 该技术在喷雾浓度测量方面具有广阔的应用前景.

关键词: 全场彩虹技术, 折射率, 粒径, 组分

PACS: 07.60.Hv, 42.25.Fx, 47.80.+v

DOI: 10.7498/aps.62.090703

1 引言

喷雾流场在工业过程中有广泛应用, 喷雾流场中液滴粒径、组分等参数的在线测量对研究和优化喷雾流场具有重要意义. 如在能源环境方面, 喷雾液滴蒸发^[1]、冷凝^[2]等过程的测量, 湿法脱硫、脱硝中, 喷雾液滴内吸收污染物的吸收效率(即液滴内污染物浓度)测量, 以及 CCS (碳捕捉与封存) 等诸多碳捕捉技术中, 氨水吸收 CO₂ 效率(即液滴内 (NH₄)₂CO₃ 浓度)的在线测量. 目前常用喷雾流场分析技术主要有相位多普勒分析仪^[3] (phase doppler anemometry, PDA)、激光干涉成像粒径测量仪^[4] (interferometric laser imaging droplet sizing, ILIDS) 和粒子图像测速仪^[5] (particle image velocimetry, PIV) 等. PDA 可以测量颗粒的粒径与三维速度, ILIDS 可以测量二维平面内颗粒的粒径和二维速度, PIV 仅可以测量喷雾流场的二维速度

场. 遗憾的是, 上述测量技术无法获得喷雾液滴的浓度参数.

球形透明液滴的一阶主彩虹的角度位置对液滴的折射率变化非常敏感, 而液滴折射率随液滴组分浓度、温度等参数变化而变化; 同时, 一阶主彩虹的形状对液滴粒径敏感. 彩虹技术是通过测量球形液滴的主彩虹角度附近的散射光亮度, 从而反演液滴折射率、粒径、浓度和温度等参数. 彩虹技术最初由 Roth 等^[6] 以标准彩虹技术 (standard rainbow technique, SRT) 形式提出, 记录单个颗粒彩虹信号并反演单个颗粒的折射率、粒径等参数. 但标准彩虹技术对颗粒的球形度非常敏感, 且容易受到一阶彩虹上高频纹波 (ripple) 结构的影响. Van Beeck 等^[7] 把标准彩虹技术扩展为全场彩虹技术 (global rainbow technique, GRT); 通过延长曝光时间和扩大通光孔径, 从而记录成千上万颗、具有一定粒径分布的液滴群的彩虹, 进而反演喷雾液滴群的平均折射率、粒径分布、平均温度等. 采用全

* 国家自然科学基金 (批准号: 51176162)、国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2009CB219802)、十二五国家科技支撑计划 (批准号: 2012BAB18B03) 和高等学校学科创新引智计划 (批准号: B08026) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wuxch@zju.edu.cn

场彩虹技术记录的彩虹信号, 由于多个颗粒的散射光相互叠加, 附加在单个颗粒一阶彩虹上的高频纹波信号被消除, 形成平滑了彩虹信号. Van Beeck 等人应用 Airy 理论, 用彩虹技术测量喷雾液滴的粒径^[8-10]、温度^[7,11-14]、以及颗粒内部折射率梯度^[15], 并对液-液悬浮液^[16,17]、两相射流^[18]、液滴蒸发与扩散^[19]进行了测量. Gréhan 等对全场彩虹技术进行了大量研究, 应用全场彩虹技术来测量液滴折射率^[20]及折射率梯度^[21]、温度^[22]及粒径分布^[20]. 全场彩虹技术甚至被应用到双组分液滴的蒸发过程中的组分测量^[23,24]. 国内若干学者也报道了一些研究工作, 宋飞虎、王式民等^[25,26]提出基于 Debye 理论, 应用经验模态分解去噪的标准彩虹信号反演方法, 并利用标准彩虹技术对液滴粒径、折射率和吸收率的多参数进行了测量. Wang 等^[27,28]模拟研究了颗粒的非球形性对彩虹信号的影响. Wu 等^[29]应用全场彩虹技术对单喷雾浓度、双喷雾组分进行了测量. 综上所述, 目前国内外研

究学者对彩虹技术及其在喷雾气液两相流中的应用进行了很好地尝试, 取得了一些有意义的研究成果, 但在单喷雾液滴流场中, 对液滴浓度和粒径 (尤其是具有多峰分布的粒径) 的多个参数同时测量研究较少.

本文采用全场彩虹技术对同时测量喷雾液滴的浓度和粒径分布进行了研究. 应用改进的 Nussenzweig 理论, 对喷雾颗粒的折射率以及粒径分布进行最优化反演, 得到颗粒的粒径、浓度, 从而实现喷雾场的多参数测量.

2 反演算法

假设 CCD 记录的彩虹信号的光强为各个颗粒散射光的光强之和, CCD 记录光强记为列向量 $\mathbf{E} = [e_1, e_2, e_3, \dots, e_m]$. 假设液滴具有相同的组分浓度和折射率, 液滴粒径分布没有限定, 为自由分布, 记为列向量 $\mathbf{N} = [N(d_1), N(d_2), N(d_3), \dots, N(d_k)]$. 各个粒径的液滴对应的彩虹的光能分布系数 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t(n, \theta_1, d_1) & t(n, \theta_1, d_2) & t(n, \theta_1, d_3) & \cdots & t(n, \theta_1, d_k) \\ t(n, \theta_2, d_1) & t(n, \theta_2, d_2) & t(n, \theta_2, d_3) & \cdots & t(n, \theta_2, d_k) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ t(n, \theta_m, d_1) & t(n, \theta_m, d_2) & t(n, \theta_m, d_3) & \cdots & t(n, \theta_m, d_k) \end{bmatrix}.$$

其中矩阵 \mathbf{T} 用改进的 Nussenzweig 理论计算得到. 这两个向量与矩阵通过线性方程组 $\mathbf{E} = \mathbf{T}\mathbf{N}$ 联系在一起. 图 1 为全场彩虹信号反演算法流程图. 采用非负最小二乘法 (NNLS) 对方程组求解, 求解时加入光顺因子 r 作为光顺约束, 得到比较平滑的粒径分布; 根据改进的 Nussenzweig 理论, 利用反演的折射率与粒径分布计算反演的全场彩虹信号, 并与 CCD 记录的原始彩虹信号相比较, 看是否收敛达到最优解. 若不收敛, 用 Brent's Method 对结果进行优化, 直到得到最优化的折射率 n 和粒径分布 \mathbf{N} . 实际使用过程中, 该反演算法经过几次迭代 (一般 3—8 次) 便收敛.

3 模拟验证

为了验证反演算法的准确性, 用模拟全场彩虹信号对其进行了验证. 在测量区域中随机分布了 5000 个球形液滴群, 根据 Lorenz-Mie 散射理论^[30],

计算单个液滴在彩虹角附近的散射光, 将每个液滴的散射光强叠加, 并忽略散射光之间的干涉, 得到模拟的全场彩虹. 每个模拟工况中, 液滴群中液滴具有相同的折射率, 分别为 1.3300, 1.3400, 1.3500 和 1.3600, 每种不同折射率的液滴群的粒径分布为均值 \bar{d} , 分别为 100 μm , 80 μm , 60 μm 和 20 μm , 其粒径分布的标准差 σ 分别为 20 μm , 15 μm , 10 μm , 5 μm , 3 μm 的高斯分布. 对模拟得到的彩虹信号进行反演, 结果如图 2 所示. 反演得到的折射率平均值分别为 1.3303, 1.3401, 1.3499 和 1.3599, 平均粒径为 102 μm , 82 μm , 63 μm , 42 μm 和 22 μm . 反演粒径分布的标准差相对稳定, 但比模拟实际值稍微偏小, 如表 1 所示. 反演粒径分布的平均值误差较小, 但其标准差偏小, 说明反演粒径分布更加集中平均值附近. 与模拟的精确值比较表明, 该反演算法能精确反演产生全场彩虹液滴的折射率和粒径.

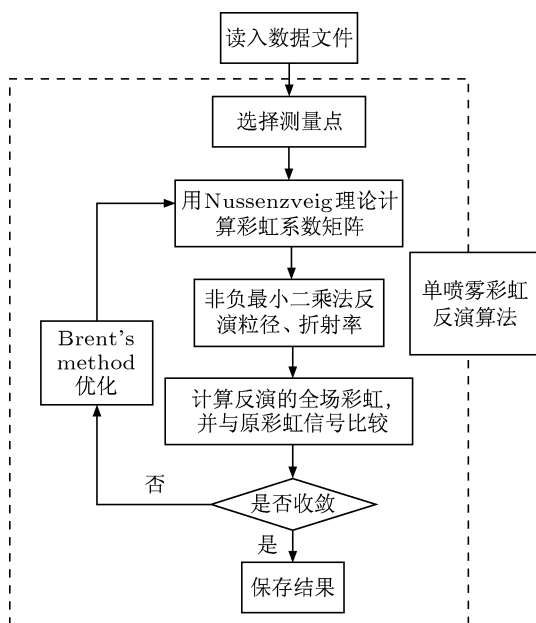


图1 全场彩虹信号反演算法流程图

实际喷雾粒径测量中, 喷雾粒径分布可能为双峰甚至多峰分布. 对折射率为 1.3300、粒径具有双峰分布的液滴群的全场彩虹图进行了模拟, 其中粒径的两个峰值分布分别为平均粒径为 40 μm 、标准差为 5 μm 和平均粒径为 80 μm 、标准差为 5 μm 的高斯分布. 图 3(a) 为模拟得到的全场彩虹信号与反演的全场彩虹信号对比图, 二者几乎重合. 反演液滴的折射率为 1.3297, 粒径分布也具有双峰分布,

其中双峰的平均值分别为 39 μm 和 78 μm . 反演粒径分布与模拟的实际粒径分布相比较发现二者一致, 如图 3(b) 所示, 表明该反演算法能准确反演具有双峰分布的液滴群的折射率与粒径.

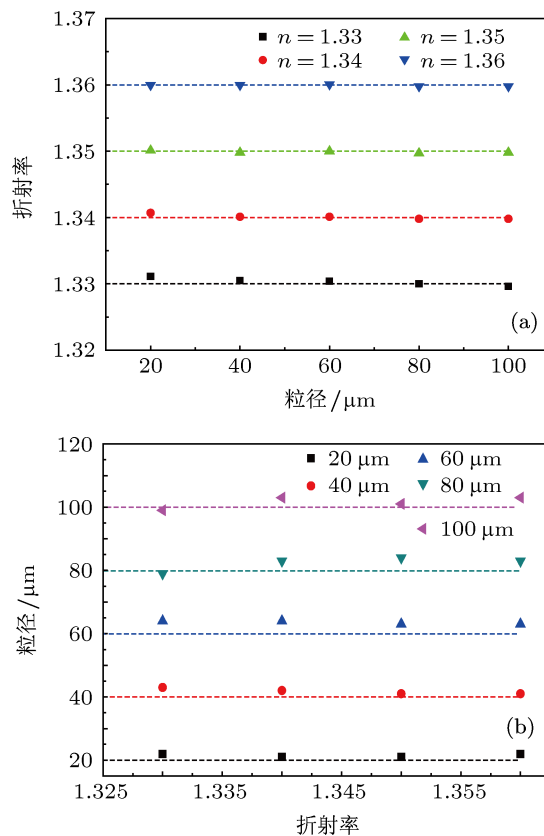


图2 模拟全场彩虹反演颗粒的 (a) 折射率与 (b) 平均粒径

表1 颗粒折射率、粒径分布及标准差的模拟值与反演值的比较

条件	$n = 1.3300$	$n = 1.3400$	$n = 1.3500$	$n = 1.3600$
$\bar{d} = 20 \mu\text{m}, \sigma = 3 \mu\text{m}$	$n = 1.3311$	$n = 1.3407$	$n = 1.3501$	$n = 1.3600$
	$\bar{d} = 22 \mu\text{m}$ $\sigma = 2.6 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 21 \mu\text{m}$ $\sigma = 2.5 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 21 \mu\text{m}$ $\sigma = 2.8 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 22 \mu\text{m}$ $\sigma = 1.6 \mu\text{m}$
$\bar{d} = 40 \mu\text{m}, \sigma = 5 \mu\text{m}$	$n = 1.3305$	$n = 1.3401$	$n = 1.3498$	$n = 1.3600$
	$\bar{d} = 43 \mu\text{m}$ $\sigma = 3.7 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 42 \mu\text{m}$ $\sigma = 3.6 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 41 \mu\text{m}$ $\sigma = 3.3 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 41 \mu\text{m}$ $\sigma = 4.1 \mu\text{m}$
$\bar{d} = 60 \mu\text{m}, \sigma = 10 \mu\text{m}$	$n = 1.3304$	$n = 1.3401$	$n = 1.3500$	$n = 1.3601$
	$\bar{d} = 64 \mu\text{m}$ $\sigma = 8.7 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 64 \mu\text{m}$ $\sigma = 6.2 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 63 \mu\text{m}$ $\sigma = 6.4 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 63 \mu\text{m}$ $\sigma = 6.1 \mu\text{m}$
$\bar{d} = 80 \mu\text{m}, \sigma = 15 \mu\text{m}$	$n = 1.3300$	$n = 1.3398$	$n = 1.3497$	$n = 1.3598$
	$\bar{d} = 79 \mu\text{m}$ $\sigma = 9.2 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 83 \mu\text{m}$ $\sigma = 9.2 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 84 \mu\text{m}$ $\sigma = 9.4 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 83 \mu\text{m}$ $\sigma = 10.7 \mu\text{m}$
$\bar{d} = 100 \mu\text{m}, \sigma = 20 \mu\text{m}$	$n = 1.3296$	$n = 1.3398$	$n = 1.3498$	$n = 1.3598$
	$\bar{d} = 99 \mu\text{m}$ $\sigma = 18.4 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 103 \mu\text{m}$ $\sigma = 14.3 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 101 \mu\text{m}$ $\sigma = 14.7 \mu\text{m}$	$\bar{d} = 103 \mu\text{m}$ $\sigma = 14.5 \mu\text{m}$

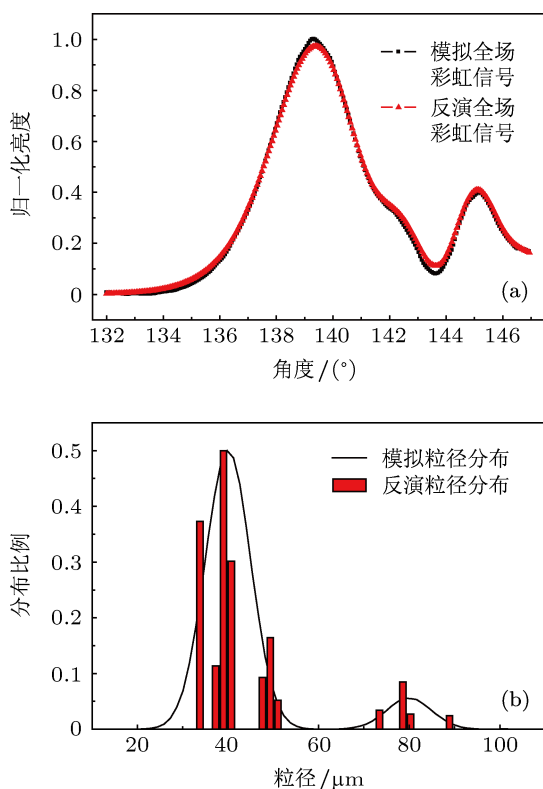


图3 粒径具有双峰分布的液滴群模拟验证 (a) 反演全场彩虹信号与模拟全场彩虹信号对比; (b) 反演粒径分布与模拟粒径分布对比

4 实验结果与讨论

4.1 实验布置

图4为在实验室建立的全场彩虹测量喷雾系统实验示意图(a)及其照片(b)。如图所示,垂直偏振的半导体激光($\lambda = 532 \text{ nm}$)照射喷雾流场,喷雾颗粒彩虹角($P = 2$, 本文约为 $132^\circ\text{--}147^\circ$)附近的散射光被直径为 10 cm 大孔径透镜1收集,透镜2的像平面与第一个透镜的焦平面重合,二者构成一个傅里叶成像系统,透镜1前表面的彩虹信号通过这个傅里叶成像系统被投射到CCD(2048×2048 , 像素大小 $7.4 \mu\text{m}$)上并被记录。小孔光阑位于测量区域在透镜1的像平面上,通过调节光阑的大小来控制测量区域的大小。相机的曝光时间调整为 $400\text{--}600 \text{ ms}$,用记录多颗粒的散射光来平滑高频纹波结构。试验中,对不同体积浓度($0\%\text{--}100\%$)的乙醇溶液(溶剂为水,溶质为乙醇)的喷雾液滴进行了测量,其中喷雾为空心锥形喷雾。

彩虹技术需要测量液滴散射光与绝对角度的关系,因此需要记录的彩虹信号进行角度标定。在光路调整过程中,使用了两个激光器,两个激光器的交点为测量点。标定时,调节反射镜,使其镜面中

心与测量点重合,将激光反射到CCD上,如图5(a)所示。在CCD前放置衰减片,减弱激光强度以防止CCD被打坏。用高精度手动旋转位移台旋转反射镜,记录旋转角度与反射光在CCD上的位置,如图5(b)所示。结合反射镜与激光垂直时(此时入射激光与反射镜的反射光重合)的角度,可以得到标定点的散射角度,通过对标定点进行线性拟合,可以得到CCD像素与散射角之间的关系^[11]。

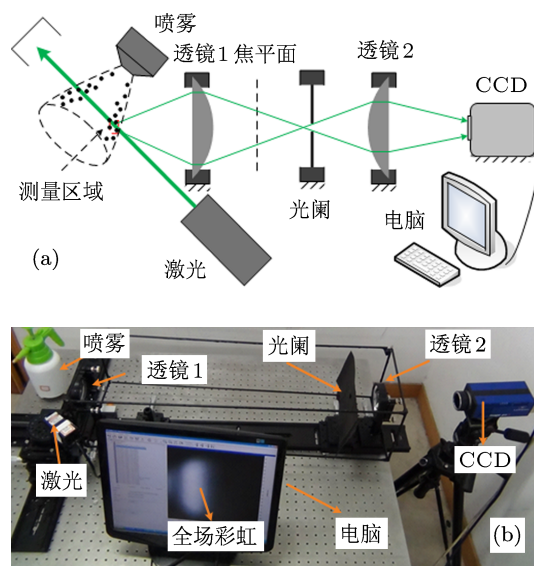


图4 全场彩虹系统示意图(a)及实验图片(b)

4.2 结果与讨论

图6(a)为体积分数从 0% 到 100% 不同浓度的乙醇溶液喷雾流场的全场彩虹图。多个颗粒的散射光相互叠加,从而平滑了单个颗粒彩虹信号的高频纹波信号,得到光滑的彩虹图。从图中可以看出,由于不同浓度的乙醇溶液具有不同的折射率,喷雾颗粒的彩虹的位置不同。为了降低噪声影响,在全场彩虹图上以标定激光照射在CCD上的亮斑为中心,取上下 100 行像素值并平均,得到平滑的彩虹曲线信号,如图6(b)所示。

应用上述反演算法对实验得到的全场彩虹信号进行处理,得到喷雾液滴的折射率、粒径分布等。图7为全场彩虹信号测量得到的不同浓度乙醇溶液的折射率,并将其与已报道的精确值相比较^[31],发现本实验测量值与精确值基本一致。在乙醇溶液浓度较低时(乙醇体积分数不大于 50%),折射率的实验测量值与精确值之间的偏差很小,当乙醇体积分数较大时,折射率的实验测量值与精确值之间的

有一定偏差, 约为 0.001 到 0.002. 这主要是由于液滴温度与激光波长的偏差造成的. 一方面, 液滴折射率会随着激光波长变化而变化, 另一方面, 乙醇浓度较大时, 液滴蒸发性增强, 蒸发导致液滴温度降低, 而引起折射率变化. 液滴折射率与液滴温度和激光波长的关系为

$$n(\lambda, t) = A(t) + \frac{B(t)}{\lambda^2} + \frac{C(t)}{\lambda^4} + \frac{D(t)}{\lambda^6},$$

为了简单起见, 将温度偏差和激光波长偏差对液滴折射率的影响分开:

$$n(\lambda, t) = \left. \frac{dn}{dt} \right|_{t_0, \lambda_0} (t - t_0) + \left. \frac{dn}{d\lambda} \right|_{t_0, \lambda_0} (\lambda - \lambda_0) + n(\lambda_0, t_0),$$

其中对纯乙醇溶液 [32,33],

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t_0=20^\circ\text{C}, \lambda_0=589\text{ nm}} \approx -8 \times 10^{-4} (^\circ\text{C}^{-1}),$$

$$\left. \frac{dn}{d\lambda} \right|_{t_0=20^\circ\text{C}, \lambda_0=589\text{ nm}} \approx -0.0311 (\mu\text{m}^{-1}).$$

温度偏差和激光波长偏差引起的折射率偏差分别约为 -0.004 和 0.002, 二者产生的总体偏差与折射率的实验值和报道的精确值之间的偏差相符合.

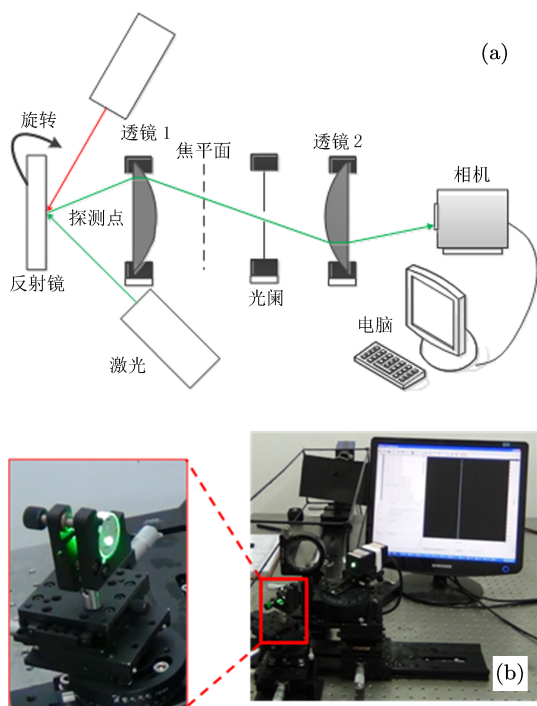


图5 散射角标定示意图 (a) 及照片 (b)

图 8 为测量得到的粒径分布, 绝大部分液滴的粒径分布约在 20 μm 到 60 μm 之间, 但是由于实验

过程中不同浓度的喷雾压力不同, 不同浓度下喷雾液滴的平均粒径有波动. 同时也发现, 小部分液滴的粒径较大, 约分布在 80 μm 到 100 μm 之间. 对比图 8 中各条件下粒径分布发现, 该喷嘴喷雾具有双峰特性, 喷雾粒径分布较稳定.

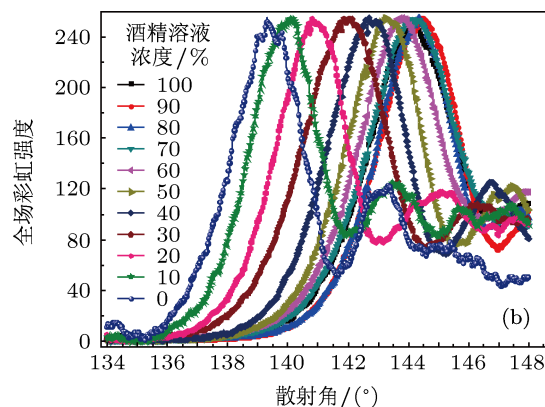
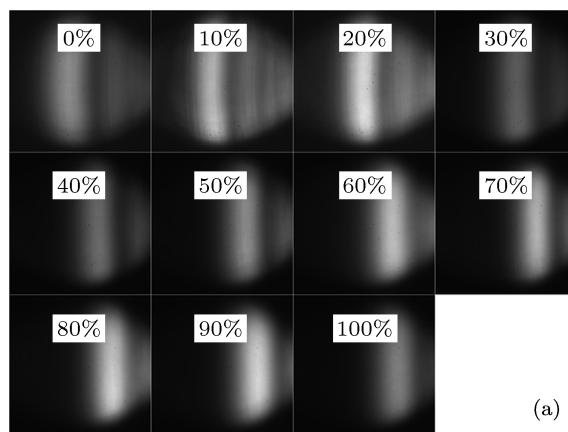


图 6 不同乙醇浓度 (0%—100%) 的 (a) 全场彩虹图及其 (b) 信号曲线

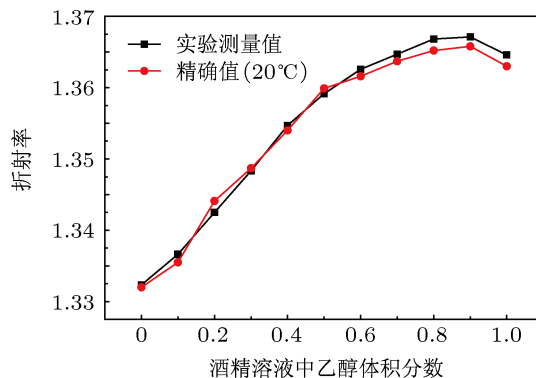


图 7 不同乙醇浓度折射率及与理论值对比图

在测量液滴浓度时, 全场彩虹技术能精确测量喷雾液滴的折射率, 然后通过折射率与溶液浓度的已知曲线关系反推溶液浓度. 值得注意的是, 许多溶液的折射率并不是溶液浓度的单调函数, 而是在

某一浓度下存在一个极值^[32,33]. 如本文试验中的乙醇溶液, 折射率先随着溶液浓度增大而增大, 到达某一浓度(摩尔浓度约为40%)时折射率最大, 然后

折射率随着溶液浓度增大而下降. 应用全场彩虹技术通过折射率测量液滴浓度时, 只适用于折射率随溶液浓度单调变化的浓度区间.

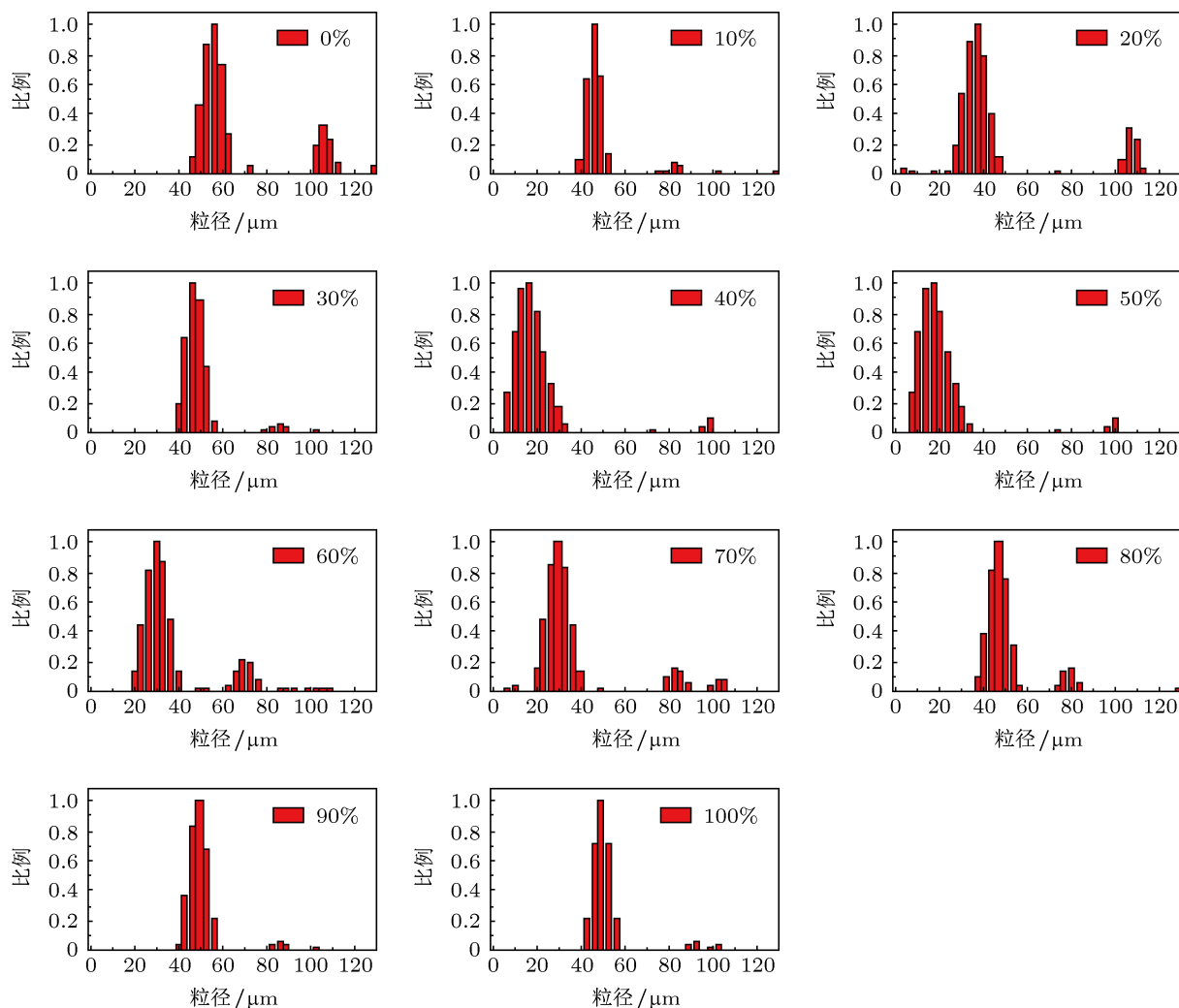


图8 不同浓度乙醇溶液喷的雾粒径分布

5 结论

对全场彩虹技术测量喷雾液滴的浓度和粒径分布进行了研究. 基于改进的 Nussenzweig 理论, 对液滴折射率和粒径分布采用无分布函数算法进行最优化求解, 并用模拟全场彩虹信号对该算法进行

了验证, 该算法可准确反演具有单峰分布、双峰分布粒径特征的液滴群的折射率与粒径分布. 搭建了全场彩虹试验台, 并对体积分数从0%到100%的乙醇溶液喷雾进行了测量, 测量的折射率和理论值误差很小, 粒径分布稳定. 研究表明用全场彩虹技术测量液滴的浓度和粒径是可行的.

- [1] Du R J, Xie W J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114302 (in Chinese) [杜人君, 解文军 2011 物理学报 **60** 114302]
- [2] Lan Z, Zhu X, Peng B L, Lin M, Ma X H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 150508 (in Chinese) [兰忠, 朱霞, 彭本利, 林勤, 马学虎 2012 物理学报 **61** 150508]
- [3] Albrecht H E, Damaschke N, Borys M, Tropea C 2002 *Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques* (1st Ed.) (Springer)
- [4] Tropea C 2011 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **43** 399
- [5] Adrian R J, Westerweel J 2010 *Particle image velocimetry* (Cambridge Univ. Pr.)
- [6] Roth N, Anders K, Frohn A 1991 *Appl. Opt.* **30** 4960
- [7] Van Beeck J, Giannoulis D, Zimmer L, Riethmuller M 1999 *Opt. Lett.* **24** 1696
- [8] Vetrano M R, Van Beeck J, Riethmuller M L 2003 *Optical Technology and Image Processing for Fluids and Solids Diagnostics* (SPIE) **5058** 16
- [9] Vetrano M R, Van Beeck J, Riethmuller M L 2004 *Appl. Opt.* **43** 3600
- [10] Vetrano M R, Van Beeck J, Riethmuller M L 2005 *Opt. Lett.* **30** 658
- [11] Vetrano M R, Gauthier S, Van Beeck J, Boulet P, Buchlin J M 2006 *Exp. Fluids* **40** 15
- [12] Van Beeck J, Zimmer L, Riethmuller M L 2001 *Part. Part. Syst. Charact.* **18** 196
- [13] Van Beeck J, Riethmuller M L, Lavergne G, Biscos Y, Atthasit A 2001 *Optical Diagnostics for Fluids, Solids, and Combustion* (SPIE) 251
- [14] Van Beeck J, Giannoulis D, Zimmer L, Riethmuller M 2002 *10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics* (Lisbon)
- [15] Vetrano M R, Van Beeck J, Riethmuller M L 2005 *Appl. Opt.* **44** 7275
- [16] Vetrano M R, Van Beeck J, Riethmuller M L 2003 *Proceedings of Photonics in Mechanical and Industrial Processes* (Louvain-la-Neuve, Belgium)
- [17] Vetrano M R, van Beeck J 2003 *9th ICLASS* (Sorrento, Italy, Ed. Ragucci) July 13-17
- [18] Yildiz D, Van Beeck J, Riethmuller M L 2002 *11th International Symposium of Application of Laser Technique to Fluid Mechanics* (Lisboa Portugal) July 8-11
- [19] Vetrano M R 2006 *Ph. D. Dissertation* (Università degli Studi di Napoli 'Federico II')
- [20] Saengkaew S, Charinpanikul T, Laurent C, Biscos Y, Lavergne G, Gouesbet G, Grehan G 2010 *Exp. Fluids* **48** 111
- [21] Saengkaew S, Charinpanikul T, Vanisri H, Tanthapanichakoon W, Biscos Y, Garcia N, Lavergne G, Mees L, Gouesbet G, Grehan G 2007 *Exp. Fluids* **43** 595
- [22] Lemaitre P, Porcheron E, Grehan G, Bouilloux L 2006 *Meas. Sci. Technol.* **17** 1299
- [23] Wilms J, Weigand B 2007 *Appl. Opt.* **46** 2109
- [24] Bodoc V, Moreau F, Biscos Y, Basile R, Lavergne G 2009 *11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (Vail, Colorado USA)
- [25] Song F H, Xu C L, Wang S M 2012 *Proceedings of the CSEE* **2** 110 (in Chinese) [宋飞虎, 许传龙, 王式民 2012 中国电机工程学报 **2** 110]
- [26] Pan Q, Wang S M 2009 *Chinese Journal of Lasers* **3** 736 (in Chinese) [潘琦, 王式民 2009 中国激光 **3** 736]
- [27] Wang J J, Grehan G, Han Y P, Saengkaew S, Gouesbet G 2011 *Experiments in Fluids* **51** 149
- [28] Shi Y 2009 *M. S. Dissertation* (Xi'an: Xi Dian University) (in Chinese) [史莹 2009 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [29] Wu X C, Wu C, Saengkaew S, Meunier-Guttin-Cluzel S, Grehan G, Chen L H, Cen K F 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 125302
- [30] Wu X C, Meunier-Guttin-Cluzel S, Wu Y C, Saengkaew S, Lebrun D, Brunel M, Chen L H, Coetmellec S, Cen K, Grehan G 2012 *Opt. Commun.* **285** 3013
- [31] Refractometer. Available from: <http://www.refractometer.pl/refraction-datashet-ethanol>.
- [32] Jiménez Riobóo R, Philipp M, Ramos M, Krüger J 2009 *Eur. Phys. J. E* **30** 19
- [33] Herráez J, Belda R 2006 *J. Solut. Chem.* **35** 1315

Concentration and size measurements of sprays with global rainbow technique*

Wu Ying-Chun¹⁾ Wu Xue-Cheng^{1)†} Sawitree Saengkaewi²⁾ Jiang Hao-Yu¹⁾
Hong Qiao-Qiao¹⁾ Gérard Gréhan²⁾ Cen Ke-Fa¹⁾

1) (State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (UMR 6614/CORIA, LABEX EMC3, Centre National de la Recherche Scientifique, Université et Institut National des Sciences Appliquées de Rouen,
Site du Madrillet, Avenue de l'Université, BP 12 76801 Saint Etienne du Rouvray, France)

(Received 8 November 2012; revised manuscript received 4 December 2012)

Abstract

Simultaneous measurement of the concentration and size of spray droplets plays an important role in understanding sprays. The global rainbow technique is applied to measure the concentration and size of bi-component droplets. Based on the modified Nussenzweig theory, the refractive index and size distribution are optimally evaluated, and then the concentration is retrieved with prior relationship between the refractive index and concentration. The inverse algorithm is verified by the simulated global rainbow signals; results shows that it can accurately retrieve the refractive index and size distribution of the droplets with an unimodal or bimodal particle size distribution. Sprays of water-ethanol solution with volume concentration from 0% to 100% are measured. Results show that the measured refractive indices agree well with the exact values, and the size distribution is stable. The global rainbow technique shows great potential in concentration measurement of spray droplets.

Keywords: global rainbow technique, refractive index, droplet size, concentration

PACS: 07.60.Hv, 42.25.Fx, 47.80.+v

DOI: 10.7498/aps.62.090703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51176162), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB219802), the National Key Technology R&D Program of China (Grant No. 2012BAB18B03), and the Program of Introducing Talents of Discipline to University (Grant No. B08026).

† Corresponding author. E-mail: wuxch@zju.edu.cn