

·封面文章·

紧凑型彩虹折射仪的开发与实验测试

曹建政, 李灿, 吴迎春*, 吴学成**, 陈玲红, 邱坤赞, 岑可法

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 设计了一种基于全场彩虹测量技术的紧凑型彩虹折射仪。该折射仪采用笼式结构和全密封设计, 光路的整体尺寸明显小于传统的彩虹光路, 折射仪的尺寸为 $0.42\text{ m} \times 0.42\text{ m} \times 0.15\text{ m}$ 。使用该彩虹折射仪对单组分液滴折射率、双组分液滴浓度进行了一系列实验测试。采用去离子水喷雾测试了折射仪的折射率测量精度, 测量误差约为 2×10^{-4} 。测量了体积分数为 $0 \sim 100\%$ 的乙醇液滴的折射率, 与文献数据进行了对比, 并分析了误差来源。结果表明, 所研发的紧凑型折射仪具有测量液滴折射率的功能, 以及体积小、精度高的优点, 适用于工业生产环境, 在喷雾场测量中具有很好的应用前景。

关键词 测量; 光学仪器设计; 彩虹折射仪; 喷雾液滴; 折射率

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.101201

Development and Experimental Test of Compact Rainbow Refractometer

Cao Jianzheng, Li Can, Wu Yingchun*, Wu Xuecheng**,

Chen Linghong, Qiu Kunzan, Cen Kefa

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

Abstract In this study, a compact rainbow refractometer is developed based on the global rainbow technology. This refractometer adopts a cage structure and a completely sealed design. The overall size of the refractometer, exhibiting a length, width, and height of 0.42, 0.42, and 0.15 m, respectively, is obviously smaller than those of the traditional refractometers. Further, the performance of the rainbow refractometer is validated by the experimental measurement of the refractive index of a single-component droplet, the concentration of a two-component droplet, and the droplet temperature. The accuracy of the refractive index measured using the rainbow refractometer is verified using a deionized water spray, and the measurement error is observed to be approximately 2×10^{-4} . The refractive indices of the water-ethanol droplets with volume fractions from 0 to 100% are measured and compared with the values in the literature, and the error sources are analyzed. The results denote that the developed compact refractometer exhibits a unique function of measuring the refractive indices of droplets; additionally, the compact refractometer possesses the advantages of small volume and high accuracy. Furthermore, it is applicable to industrial environments and exhibits a good application prospect in the measurement of spray fields.

Key words measurement; design of optical instruments; rainbow refractometer; spray droplet; refractive index

OCIS codes 120.4570; 290.5820; 290.1350

1 引言

喷雾在工业领域有着广泛的应用, 包括喷雾燃烧、喷雾脱除污染气体、喷雾干燥等。对喷雾的粒径、速度、温度、组分等关键参数的精确测量, 对于深入理解气液两相流作用机理, 验证两相流模拟结果,

进而指导和优化工业生产, 具有十分重要的意义。喷雾的温度测量方法可分为接触式测量和非接触式测量。采用热电偶等接触式温度测量方法会破坏喷雾流场, 导致测量结果产生偏差。而彩虹测量技术作为非接触式测量方法, 其测量原理是基于液滴在单色光照射下彩虹折射光的角度位置对折射率非常

收稿日期: 2018-11-16; 修回日期: 2018-12-04; 录用日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(51576177, 91741129)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51621005)

* E-mail: wuxch@zju.edu.cn; ** E-mail: wycgsp@zju.edu.cn

敏感,根据折射率可推算液滴的温度或组分信息。

彩虹测量技术测量液滴折射率的精度高,研究人员对该技术进行了持续研究。Roth 等^[1]最早提出了标准彩虹测量技术,用于测量单个液滴或单分散液滴流,发现液滴的非球形度对测量结果有明显的影响。为此,van Beeck 等^[2]提出了全场彩虹测量技术,该技术通过延长曝光时间和增大通光孔径,使随机取向的非球形液滴信号的偏差叠加为均匀的背景信号,并消除了高频纹波结构。标准彩虹测量技术和全场彩虹测量技术都是零维测量技术,只能测量空间中的某个点区域。文献[3]提出的一维彩虹测量技术,使同时测量同一直线上的液滴成为可能。之后,文献[4]发展出了基于高频纹波结构的相位彩虹技术,可测量单液滴的纳米级粒径变化,进而获得液滴瞬态蒸发率。近些年,彩虹测量技术在测量液滴折射率^[5-6]、粒径^[7-8]、温度^[9-11]、组分^[12]、非球形度^[13-16]等方面得到了广泛的应用,在彩虹测量技术仪器化方面也取得了一定进展^[17-22]。

虽然彩虹测量技术近些年发展迅速,但目前仍局限于实验室测量,通常彩虹测量的光路系统占用场地面积较大,长度大于 1 m^[23],可将待测量的喷雾移至测量点附近,而且光路系统对环境的清洁度要求较高。然而,工程实际中的待测喷雾往往难以迁移,且环境恶劣,灰尘、液滴等极易沾污光路系统,这极大地限制了彩虹测量技术的应用。因此,开发

一款集成式的体积小、便携、密封的彩虹测量装置十分必要。本文设计开发了一款采用笼式结构的紧凑型彩虹折射仪,将整个全场彩虹测量系统的光路集成在一个体积较小的全密封箱体中,为彩虹测量技术的应用提供了便利,并对折射仪进行了实验测试。

2 紧凑型彩虹折射仪设计

图 1(a)为点测量的彩虹折射仪典型光路图。球透镜 1 采集接收散射光,为了收集足够角度的彩虹散射光,透镜直径一般为 5~10 cm、焦距通常大于 100 mm。成像透镜 2 则将透镜 1 焦距处的彩虹光投射到相机靶面上。为了减小像差以及保持一定的放大率,整个光路长度通常大于 1 m。图 1(b)为优化后的紧凑型彩虹折射仪光路示意图,折射仪的光路系统包括激光器、反射镜、2 个镜头、滤光片、光阑、相机。安装在精密旋转台上的反射镜,可精密调整激光的角度,使信号接收端能够采集到测量点处液滴的后向彩虹信号。在紧凑型设计中,镜头 1 代替了传统全场彩虹光路中的透镜 1,用来收集彩虹散射光。改用镜头后,由于镜头本身的设计能减小或消除像差,可选用焦距较小的镜头,从而在轴向方向明显缩短光路系统的长度,减小装置的体积。定焦镜头代替了传统全场彩虹系统中的成像透镜 2,同样是为了缩短装置的轴向长度。中心孔与待测点关于镜头 1 傅里叶成像。

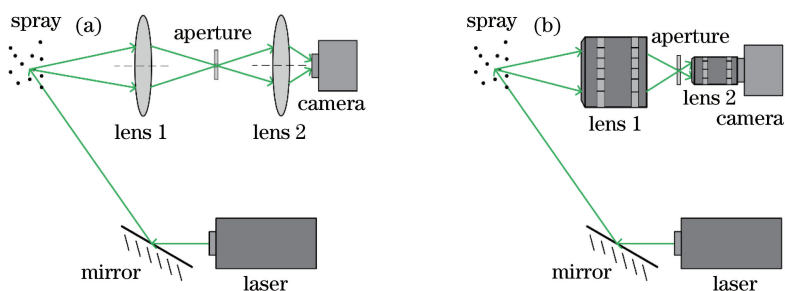


图 1 光路原理图。(a)传统彩虹;(b)彩虹折射仪

Fig. 1 Principle diagram of optical path. (a) Traditional rainbow; (b) rainbow refractometer

彩虹折射仪的信号接收端采用笼式系统集成,笼式系统能够轻松实现光路的对准,避免使用笨重的光学位移台和升降台,光学元件无需使用接杆固定,降低了折射仪的整体高度,保证了装置的紧凑性。彩虹折射仪结构如图 2 所示,整个光路系统安装在一块光学面包板上,光学面包板固定在密封的外壳内,外壳由 6 块经过表面发黑处理的铝材拼接而成。在外壳前端的激光出光处和信号接收端前分别设置光学窗口。激光器和工业相机的电源线数和

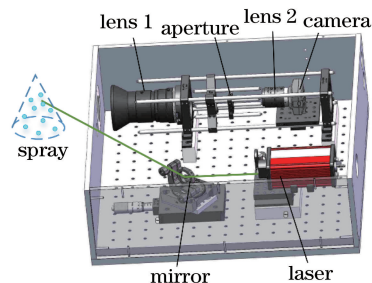


图 2 彩虹折射仪三维图

Fig. 2 Three-dimensional view of rainbow refractometer

据线穿过外壳后端的专用双面护线圈,确保折射仪的密封性。外壳的侧面安装把手,便于携带。折射仪的基本参数如表 1 所示。折射率的测量范围为

1.330~1.368。通过调节位移台,可使反射镜工作距离在 0~2.4 cm 范围内前后调节。

表 1 彩虹折射仪的基本参数

Table 1 Basic parameters of rainbow refractometer

Length /m	Width /m	Height /m	Refractive index	Refractive index	Working distance /cm
			measurement range	measurement accuracy	
0.42	0.42	0.15	1.333-1.366	2×10^{-4}	6.8-9.2

本折射仪的工作距离为 8 cm。当需要更长的工作距离时,应增大激光器与信号接收端的距离,镜头 1 选用焦距更大的型号,理论上的最大工作距离与镜头 1 能接收的散射角有关,应保证镜头 1 能接收的散射角大于 10° ,最大工作距离为

$$L_{\max} = \frac{2D}{3 \tan 5^\circ} = 7.62D, \quad (1)$$

式中: D 为镜头 1 的直径。

折射仪的最小工作距离与反射镜的角度有关,必须确保激光出射角不被镜头 1 遮挡,则最小工作距离为

$$L_{\min} = \frac{D}{2 \tan \theta}, \quad (2)$$

式中: θ 为反射镜的出射激光与信号接收端的轴线夹角。 θ 为彩虹角 θ_{rg} 的补角, θ_{rg} 的计算公式为

$$\theta_{\text{rg}} = 2 \arccos \left[\frac{1}{m^2} \left(\frac{4 - m^2}{3} \right)^{3/2} \right], \quad (3)$$

式中: m 为待测液体的折射率,与激光波长和温度有关,随激光波长和温度的增大而减小。因此,当待测液体种类、激光波长或者温度发生变化,相机无法记录完整的彩虹主峰时,光路中的 θ 应随之调整,具体调整方法是当彩虹主峰向左偏出相机图像时,增大 θ ;反之减小 θ 。

折射率测量的量程大小与工作距离有关,当工作距离延长时,折射率测量的量程减小,这是由于镜头 1 能接收的散射角范围减小。因此,工作距离和量程的选择应当综合考虑。

折射仪搭建完成后,需要对光路系统的散射角与相机像素点的关系进行一次标定,旋转反射镜法具有结构简单、精度高的优点,是彩虹测量技术中最常用的标定方法,因此,彩虹折射仪标定采用旋转反射镜法^[23]。标定完成后,由于光路固定在装置内部,不易受到外界干扰,且笼式系统结构稳定,因此折射仪每次使用时无需再次进行标定。

彩虹折射仪使用时,首先开启激光器,调整彩虹折射仪的位置,使待测喷雾处于激光与信号接收端轴线的交点。此时,被反射镜反射的激光照射在待

测喷雾上,后向散射光被镜头 1 接收,在光阑处形成像点,通过调整光阑孔径控制测量区域的大小。镜头 1 的像侧焦平面处形成喷雾的彩虹图像被镜头 2 会聚在相机靶面上。当彩虹图像的高频纹波结构明显时,应延长相机的曝光时间,减小激光强度,从而得到平滑的彩虹信号。对彩虹信号连续采集,即可得到一系列待测喷雾的彩虹图像。

拍摄的彩虹信号图像采用已开发好的软件进行反演,其中折射率及液滴粒径的反演过程采用无分布函数算法进行最优化求解,具体算法见文献[24]。结合折射率与液滴浓度、温度等之间的已知关系式,即可得到液滴的浓度、温度等信息。

3 实验测试及结果

3.1 折射率测量

首先,应用搭建好的彩虹折射仪,对喷雾水滴进行测量,以校验其折射率测量精度。由于水无毒无刺激性气味,获取简单,蒸发较慢,温度稳定,且对水的折射率研究较深入,因此去离子水适用于彩虹折射仪性能的实验室测试。去离子水喷雾由超声波喷头产生,超声波设备实验时的功率为 4.1 W,压气机提供超声波喷头所需的气体,气体流量 10 L/min,液体由注射泵提供,液体流量 1200 mL/h,彩虹折射仪置于超声波喷头侧下方,激光照射在超声波喷头产生的喷雾中心,测量喷雾的折射率,室内温度为 24°C 。测量系统示意图如图 3 所示。

根据折射率数据库^[25], 25°C 下 532 nm 波长处水的折射率为 1.3337,水的折射率随温度的升高而减小,每升高 1°C 折射率减小 1.37×10^{-4} ,因此 24°C 下对应的 532 nm 波长处水的折射率约 1.3338。实验中拍摄到的彩虹图片如图 4 所示,由于相机曝光时间为 30 ms,在测量点处大量液滴彩虹信号的叠加下,高频的纹波结构被完全消除,得到了平滑的全场彩虹信号。对彩虹折射仪拍摄的 17 张彩虹图片进行反演,如图 5 所示,其折射率的平均值为 1.3338,标准差为 1.18×10^{-4} 。利用彩虹

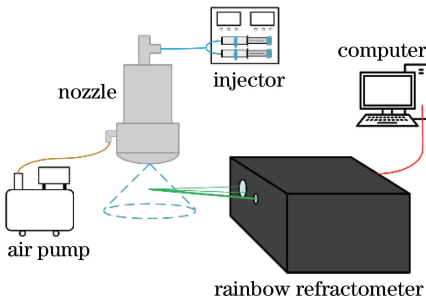


图3 紧凑式彩虹折射仪测量喷雾液滴实验系统图

Fig. 3 Experimental setup of spray droplet measurement with compact rainbow refractometer

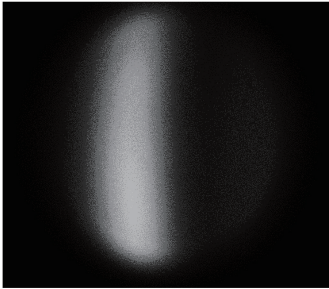


图4 去离子水的彩虹图片

Fig. 4 Rainbow picture of deionized water

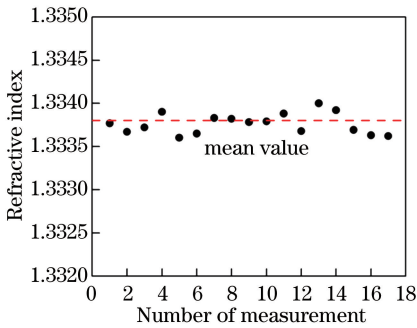


图5 去离子水的折射率反演结果

Fig. 5 Inversion results of refractive index of deionized water

折射仪测量水折射率的误差小于 2×10^{-4} , 误差主要由液滴温度波动造成的。

3.2 双组分液滴浓度测量

液滴的折射率与液滴内组分有关, 对于二元溶液, 其折射率主要由溶液混合比(浓度)决定。应用本彩虹折射仪, 对水和乙醇的混合溶液喷雾进行测量, 以校验彩虹折射仪测量的液滴溶液浓度。当水和乙醇以不同比例混合时, 溶液的折射率随之变化, 当折射率与乙醇体积分数的变化规律已知时, 可根据溶液的折射率推算乙醇的体积分数。在 24 °C 室温下, 实验测量乙醇体积分数在 0~100% 变化时喷

雾的折射率。喷雾液滴通过超声波喷头产生, 超声波喷头的运行参数与 3.1 节一致。实验中拍摄的彩虹图片如图 6 所示, 在所有乙醇浓度工况中, 彩虹主峰都被完整地记录下来, 说明乙醇溶液的折射率没有超出彩虹折射仪的测量量程, 当体积分数分别为 0 和 80% 时, 彩虹的主峰恰好处于图像的两端, 可据此估算彩虹折射仪的测量量程。图 7 给出了不同浓度乙醇的折射率反演结果, 并与波长 589.3 nm、20 °C 的乙醇溶液折射率的理论值^[26]进行对比。从图 7 可见, 彩虹折射仪的测量结果与乙醇溶液折射率的理论值变化趋势相同, 波长的差别导致彩虹折射仪的测量值比理论值大 0.0013~0.0022, 温度的差别导致测量值比理论值小 0.001~0.002, 最终二者的折射率基本接近, 偏差主要来自于不同浓度的乙醇溶液折射率随温度的变化规律不同, 以及实验中乙醇溶液液滴蒸发, 导致温度相比室温略有下降, 且乙醇浓度存在微小改变。实验选取的气体流量为 10 L/min, 是使液体能被超声波喷头雾化的最小

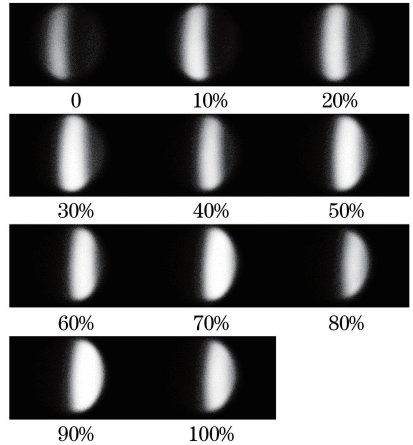


图6 体积分数为 0~100% 的乙醇溶液的彩虹图片

Fig. 6 Rainbow pictures of ethanol solution with volume fractions of 0-100%

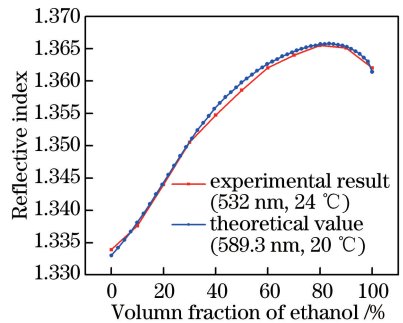


图7 不同体积分数的乙醇溶液的折射率测量结果

Fig. 7 Measurement results of refractive index of ethanol solution different volume fractions

气体流量,并且测量点选取喷嘴出口处,以此最大限度减弱乙醇溶液液滴蒸发的影响。彩虹折射仪的测量量程为 1.333~1.366。

4 结 论

设计了一种紧凑型的彩虹折射仪,能够克服传统彩虹光路占用空间大、不便移动的缺点;全密封的设计确保了装置不受外界环境影响,适用于复杂的工业生产环境。介绍了彩虹折射仪测量原理及内部构造,给出了所设计的彩虹折射仪的性能参数和调整的方法,并对其的性能进行了测试。对去离子水的折射率测量结果表明,设计的彩虹折射仪能可靠地测量喷雾的折射率,测量误差约 2×10^{-4} 。此外,使用该紧凑型彩虹折射仪,对已知组分的水-乙醇及乙醇喷雾场进行了实验测量,结果表明,该彩虹折射仪能原位、非接触准确测量双组分喷雾液滴浓度。所开发的紧凑型折射仪测量精度高、体积小、便于携带,适用于工业生产环境,在喷雾燃烧、喷雾吸收等实际场景中具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Roth N, Anders K, Frohn A. Refractive-index measurements for the correction of particle sizing methods[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(33): 4960-4965.
- [2] van Beeck J P A J, Giannoulis D, Zimmer L, *et al.* Global rainbow thermometry for droplet-temperature measurement[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(23): 1696-1698.
- [3] Wu X C, Jiang H Y, Wu Y C, *et al.* One-dimensional rainbow the rmometry system by using slit apertures[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 638-641.
- [4] Wu Y C, Promvongsa J, Saengkaew S, *et al.* Phase rainbow refractometry for accurate droplet variation characterization[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4672-4675.
- [5] Vetrano M R, van Beeck J P A J, Riethmuller M L. Generalization of the rainbow Airy theory to nonuniform spheres [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(6): 658-60.
- [6] Vetrano M R, Gauthier S, van Beeck J P A J, *et al.* Characterization of a non-isothermal water spray by global rainbow thermometry [J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 40(1): 15-22.
- [7] Vetrano M R, van Beeck J P A J, Riethmuller M L.

- Global rainbow thermometry: improvements in the data inversion algorithm and validation technique in liquid-liquid suspension [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(18): 3600-3607.
- [8] Promvongsa J, Wu Y C, Grehanl G, *et al.* One-dimensional rainbow technique to characterize the evaporation at ambient temperature and evaporation in a flame of monodispersed droplets [C/OL] // *Proceeding of the European Combustion Meeting*, 2015: 1-5. [2018-10-25]. <http://www.ecm2015.hu/papers/P3-12.pdf>.
- [9] Letty C, Renou B, Reveillon J, *et al.* Experimental study of droplet temperature in a two-phase heptane/air V-flame[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(9): 1803-1811.
- [10] Verdier A, Marrero Santiago J, Vandel A, *et al.* Experimental study of local flame structures and fuel droplet properties of a spray jet flame [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2595-2602.
- [11] Song F H, Xu C L, Wang S M, *et al.* Measurement of temperature gradient in a heated liquid cylinder using rainbow refractometry assisted with infrared thermometry [J]. *Optics Communications*, 2016, 380: 179-185.
- [12] Wilms J, Weigand B. Composition measurements of binary mixture droplets by rainbow refractometry [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 2109-2118.
- [13] Yu H T, Xu F, Tropea C. Spheroidal droplet measurements based on generalized rainbow patterns [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 126: 105-112.
- [14] Yu H T, Xu F, Tropea C. Optical caustics associated with the primary rainbow of oblate droplets: simulation and application in non-sphericity measurement[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 25761.
- [15] Pan Q, Zhang Z J. Experimental validation of non-sphericity effect on monochromatic rainbow measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8759: 875940.
- [16] Han Y P, Méès L, Ren K F, *et al.* Scattering of light by spheroids: the far field case [J]. *Optics Communications*, 2002, 210(1/2): 1-9.
- [17] Wu X C, Li C, Cao K L, *et al.* Instrumentation of rainbow refractometry: portable design and performance testing [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(8): 085604.

- [18] Wu X C, Cen K F, Wang Z H, *et al.* One-dimensional global rainbow measurement device and measurement method: US20150177065[P]. 2015-06-25.
- [19] Wu X C, Cen K F, Jiang H Y, *et al.* Self-calibrating global rainbow measurement device based on dual-wavelength scattering angle: CN204789239U [P]. 2015-11-18.
吴学成, 岑可法, 姜洪宇, 等. 基于双波长的散射角自标定全场彩虹测量装置: CN204789239U [P]. 2015-11-18.
- [20] Wu X C, Cen K F, Qiu K Z, *et al.* A compact global rainbow measuring probe: CN106124369A[P]. 2016-11-16.
吴学成, 岑可法, 邱坤赞, 等. 一种紧凑式全场彩虹测量探头: CN106124369A[P]. 2016-11-16.
- [21] Wu X C, Cen K F, Jiang H Y, *et al.* Global rainbow measurement method and device based on dual-wavelength scattering angle self-calibration: CN105043946A[P]. 2015-11-11.
吴学成, 岑可法, 姜洪宇, 等. 基于双波长的散射角自标定全场彩虹测量方法及装置: CN105043946A [P]. 2015-11-11.
- [22] Wu X C, Cen K F, Chen L H. Method and device for on-line measurement of liquid spray by global rainbow: CN103698256A[P]. 2014-04-02.
吴学成, 岑可法, 陈玲红. 一种全场彩虹在线测量液体喷雾的方法和装置: CN103698256A [P]. 2014-04-02.
- [23] Wu Y C, Wu X C, Saengkaewi S, *et al.* Concentration and size measurements of sprays with global rainbow technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 090703.
吴迎春, 吴学成, Sawitree Saengkaew, 等. 全场彩虹技术测量喷雾浓度及粒径分布 [J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 090703.
- [24] Song F H, Yang P J, Xu C L, *et al.* An improved Global Rainbow Refractometry for spray droplets characterization based on five-point method and optimization process [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 40: 223-231.
- [25] Polyanskiy M N. Refractive index database [OL]. [2018-10-25]. <https://refractiveindex.info>.
- [26] Refractometer[OL]. [2018-10-25]. <http://www.refractometer.pl/refractiondatasheet-ethanol>.