

# 有尺度分布的水雾激光散射及其动态测试

谢文科, 李致远

(中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:**研究了单粒子和有尺度分布的水雾粒子对 1064 nm 激光后向散射的理论模型, 根据散射截面与 Stocks 矢量关联的散射相函数和不同尺度散射参数, 将粒子分布尺度代入散射相函数进行加权计算得到有尺度分布的水雾粒子总散射相函数。考察散射角在  $150^\circ \sim 180^\circ$  之间后向散射, 稀疏大尺度水雾粒子表现为单散射特征、有尺度分布混合型水雾粒子具有相对较大的后向散射效应。利用光电探测器组件、衰减片组、反射镜、偏振片等设计了水雾生成装置和散射效应测试系统, 通过独立激光入射出射窗口、尾镜、内壁消光等措施减小和避免因实验环境造成的影响。使用该装置进行了水雾粒子对激光后向散射效应的动态测试, 结果与理论符合较好。通过分析水雾粒子对激光后向散射的随机涨落现象、动态规律和特点, 指出水雾粒子对激光的后向散射是一个复杂的动态过程, 是传输路径上不同尺度水雾散射和强吸收的共同影响。

**关键词:**激光传输; 尺度分布; 水雾粒子; 激光后向散射; 理论分析; 动态测试; 应用

**中图分类号:** TP391    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.003

## Laser scattering of water fog particles with size distribution and its dynamic test

XIE Wen-ke, LI Zhi-yuan

(School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The 1064 nm laser backward scattering theoretical models of single particle and water fog particles with size distribution are studied. According to scattering parameters and scattering phase function related to scattering cross section and Stocks vectors, total scattering phase function of water fog particles with size distribution are calculated and obtained through the weighted function of particles size distribution. For laser backward scattering angle between  $150^\circ \sim 180^\circ$ , the sparse large water fog particles have single scattering feature, while water fog particles with the mixed size distribution have large backward scattering effect. The water fog generating equipment and laser backward scattering testing system are designed, including electro-optical detector, attenuator sets, mirrors, polarizing films, etc. The special designs are used to reduce environment's effects, such as independent incident and outgoing window, rear reflector and the inner wall extinction. The laser backward scattering effect of water fog particles is measured by using this device, and the gotten results are consistent with theoretical value. The results show that the laser backward scattering of water particles is a complicated dynamic process, and it is related to the absorption and scattering of water fog particles with different size distributions in propagation path.

**Key words:** laser propagation; size distribution; water fog particles; laser back scattering; theoretical analysis; dynamic test; application

1 引言

水雾的形成与过饱和水汽含量有关,其凝聚过程发生在空气冷却、辐射冷却、对流冷却等条件下水汽接近饱和状态时<sup>[1-2]</sup>,由于其生成和存在状况的复杂性,水雾粒子粒径分布测量和模型也相对复杂。在对流层靠近地面气层,凝聚后水的主要存在形态是近似球形<sup>[3-5]</sup>,一般雾滴的粒子半径为 1 ~ 10 μm、浓度为 100 ~ 10 cm<sup>-3</sup>,雾油类烟幕是对油类液体的雾化形成的,在空中以液滴形式存在<sup>[4-6]</sup>。

自然界存在的气溶胶粒子大部分不是严格球形的<sup>[7-9]</sup>,实际计算过程中,在平面对称随机方向平均和等效粒子近似计算中,可用球形粒子作为一种简单的近似<sup>[3-6]</sup>。大气中的霾、雾以及人工烟幕中的水融性物质、水珠等很多种粒子在空气中都可以近似为球形均匀粒子,具有球形粒子的光学特性。因此,研究该类水雾粒子的动态散射特征对于水雾、烟幕的遮蔽和散射一般特征具有代表性和实用性<sup>[1-6]</sup>。

实际应用中,在激光传输路径上的水雾粒子对激光的散射效应是一个复杂的动态过程<sup>[2-3]</sup>,散射效应的动态测试和相关理论进行分析是必要的。本文针对水雾粒子散射效应对波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 单脉冲激光和高重频激光的传输应用,进行水雾粒子不同尺度的单次散射、有尺度分布的混合型均匀球形水雾的总散射等对激光后向散射效应的理论分析。并结合实际测试利用光电探测器组件、衰减片组、反射镜、偏振片等设计了激光后向散射动态测量装置进行动态测试,对测试方法和测试中的现象进行分析。

2 水雾粒子后向散射特点和有尺度分布的散射理论模型

一般地,均匀球形近似的水雾粒子单次散射的计算可采用经典 Lorenz-Mie 散射理论模型<sup>[5-6]</sup>。该方法利用球面调谐函数方程和连带勒让德多项式得到入射波与散射波的矢量波动方程,粒子体散射效应通过单个粒子的散射截面与入射和散射光波斯托克斯(Stocks)矢量关联的散射相函数来表述,这里直接使用入射和散射光场的 Stocks 矢量  $I_i, I_s$  关系归一化振幅散射强度的表述形式<sup>[5]</sup>:

$$I_s = \frac{\sigma_s}{4\pi r^2} P(\theta) I_i \quad (1)$$

其中,  $r$  是散射体与探测器之间的距离;  $\sigma_s$  为散射截面;  $P(\theta)$  是归一化相函数;  $\theta$  是散射角。

定义入射和散射分量在单位立体角内的散射光强度分量和电场强度  $E_0$  为  $I_0 = C|E_0|^2$  和  $I = C|E|^2$ ,其中  $C = \sigma_s / (4\pi r^2)$  为考虑散射截面  $\sigma_s$  定义的球形粒子的归一化因子。在不同散射方向的散射强度分布与相函数的关系<sup>[5]</sup>:

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sigma_s P(\theta)}{r^2 4\pi} = I_0 C P(\theta) \quad (2)$$

作为示例,分别取激光波长 1.064 μm、水的复折射率指数为 1.326 + i0.000005,当粒子半径分别为 0.53 μm、1.064 μm、2.10 μm 和 10.6 μm 的球形水粒子对应的单次散射相函数分别如图 1、图 2 所示。

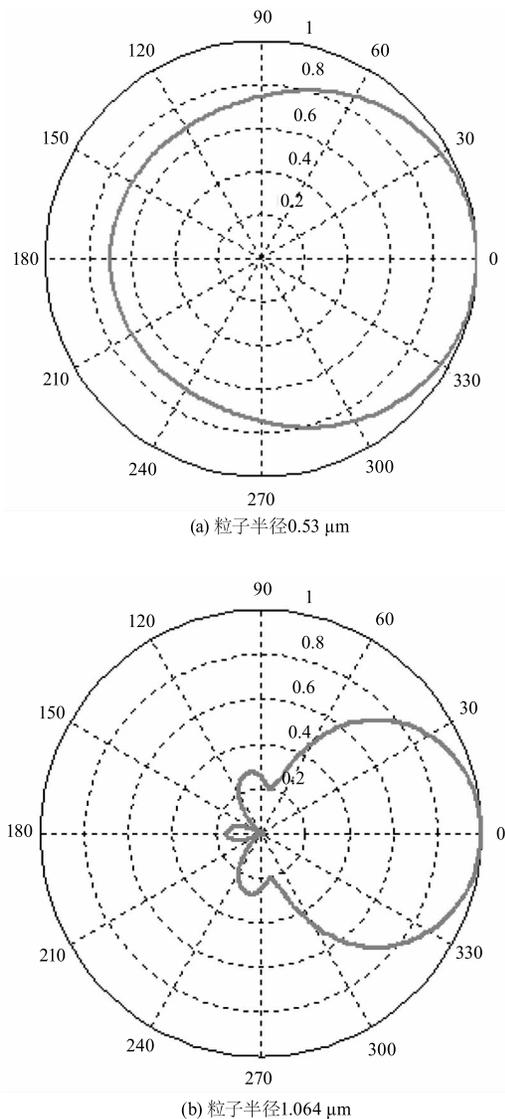


图 1 小尺寸粒子对应散射相函数的极坐标图  
Fig.1 Single scattering phase functions of smaller particles

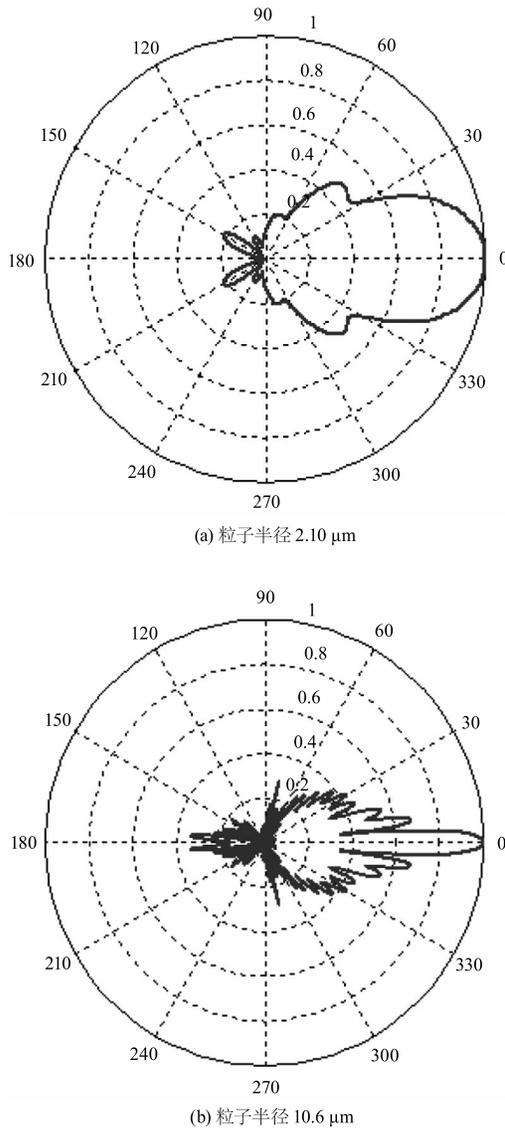


图 2 大尺寸粒子对应单散射相函数的极坐标图  
Fig. 2 Single scattering phase functions of larger particles

具有一定尺度分布的混合粒子总散射可以根据不同尺度的单次散射参数求得<sup>[5]</sup>,将粒子分布尺度分布范围( $r_{min}, r_{max}$ )划分为若干个采样空间对应的粒子平均尺度为 $dr$ ,散射相函数为 $P(\theta, r)$ ,散射截面 $\sigma_{sca}(r)$ ,该采样区间对应的粒子数 $n(r)$ 。则总散射相函数由各采样区间的 $P(\theta, r)$ 加权平均得到:

$$\bar{P}(\theta) = \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} P(\theta, r) \sigma_{sca}(r) n(r) dr}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} \sigma_{sca}(r) n(r) dr} \quad (3)$$

按照水雾粒子尺度的对数正态分布假设,利用平均粒子尺度 $3.4 \mu\text{m}$ 、分布偏差 $1.91$ 等典型数据计算的混合型均匀球形水雾的总散射相函数,如图

3 所示。

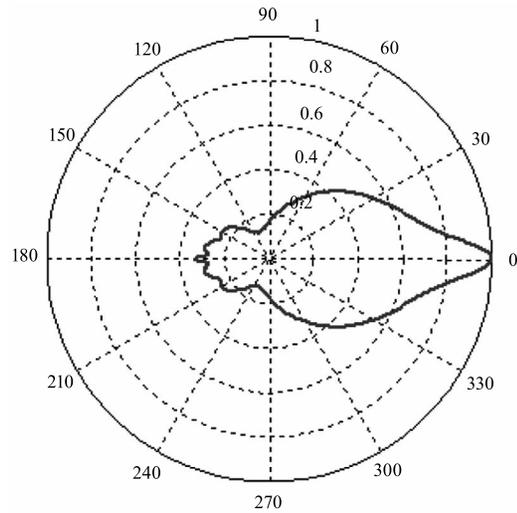


图 3 有尺度分布的混合粒子总散射相函数极坐标图  
Fig. 3 Bulk scattering phase functions of distributed particles

从图 3 可以看出,有尺度分布的混合型均匀球形水雾的散射相函数相对平缓,前向散射在小散射角度有极大峰值,随后迅速减小,在 $110^\circ$ 附近有极小值。而后向散射相对平缓。后向散射和前向相比,散射相函数具有明显的几个后向散射峰值,散射角度在 $150^\circ \sim 180^\circ$ 之间具有相对较大的后向散射。

根据激光能量探测理论,在定义通量密度和散射截面后,入射功率 $P_i$ 和探测器接收的功率 $P_r(\theta)$ 为:

$$P_r(\theta) = P_i \tau \frac{\bar{\sigma}_s \bar{P}(\theta)}{A_i 4\pi r^2} A_r \quad (4)$$

其中, $A_i$ 为探测器处对应的激光截面面积; $A_r$ 为探测器面积; $\bar{\sigma}_s = \beta_s / N$ 为粒子平均散射截面; $\tau$ 为路径衰减因子; $N$ 粒子平均数密度; $\beta_s$ 为散射系数。

实验室利用较短路径和稠密水雾粒子的情况下,设激光发射脉冲的长度为 $\Delta h$ ,有效散射体积内的粒子总数为 $NA_i \Delta h / 2$ ,此时在 $\theta$ 方向上接收到的散射信号功率:

$$P_r(\theta) = P_i \frac{P(\theta)}{4\pi r^2} A_r \beta_s \Delta h / 2 \quad (5)$$

给出消光系数 $\beta_e$ 和散射体长度 $l$ ,路径衰减因子根据比尔定律给出:

$$\tau = \exp\left\{-2 \int_0^l \beta_e(l) dl\right\} \quad (6)$$

则到达探测器的散射功率:

$$P_r(\theta) = P_i \frac{P(\theta)}{4\pi r^2} A_r \beta_s \Delta h / 2 \exp\left\{-2 \int_0^l \beta_e(l) dl\right\} \quad (7)$$

根据以上模型,激光通过长度  $l$  的散射体的后向散射信号功率与介质中的微小粒子的种类、粒子的尺度分布、粒子的密度等因素密切相关,水雾粒子对激光后向散射效应的影响的本质可以归结到粒子的总散射相函数和单位体积内的粒子密度这两种主要因素。

对于相对稀薄的大气介质,即大气相对洁净能见度较好时,激光路径上仅存在比较稀疏的大气分子或小尺度水汽粒子。此时大量的光子行进路径上基本上不存在任何大粒子,激光传输的散射现象相对较弱,且主要表现为单次散射效应,此时不适用多次散射理论。根据计算结果图 1 可以知道,当水雾粒子尺度小于入射波长且比较稀薄时,基本上是大气体分子造成的瑞利漫散射和无选择性吸收衰减起主要作用,在宏观上激光后向散射现象不特别明显。

当激光路径上存在比较稀疏的大尺度水汽粒子。此时大量的光子行进路径上散射现象相对增强,主要表现为单次散射效应。根据图 1、图 2 的结果,激光后向散射现象比较明显,其规律按照图 3 中有尺度分布的混合型均匀球形水雾的散射相函数,散射角度在  $150^\circ \sim 180^\circ$  之间的后向具有较大的散射信号。激光在无源烟幕或浓密烟雾中传输时多次散射效应占据主要地位,激光路径衰减和激光后向散射现象同时比较明显,在前向和后向较大的探测范围可接收到散射信号。

### 3 散射效应动态测试系统的设计

在水雾粒子对激光后向散射的实验室动态测试中,设计了水雾生成装置和散射效应测试系统。水雾粒子对激光后向散射动态测试系统组成和工作原理示意图如图 4 所示。

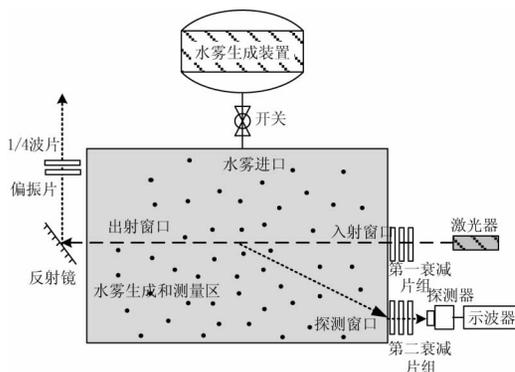


图 4 散射效应测量系统组成和工作原理示意图  
Fig. 4 Sketch of scattering effects' test system structure and working principle

测试中,利用一个长方体密闭容器形成激光散射信号动态测量的测量区域。通过严格规划光路和合理布置衰减片位置和角度并采取了独立激光入射出射窗口、主光束反射、内壁用消光材料装饰消光等措施,尽量减小和避免因实验环境可能对测量结果造成的影响。

在长方体密闭容器不同的位置和方向上分别设置若干个探测窗口,利用不同窗口进行直接照射信号、前向散射信号、后向散射信号的探测。水雾生成和测量光路测量位置设计的立体示意图如图 5 所示。

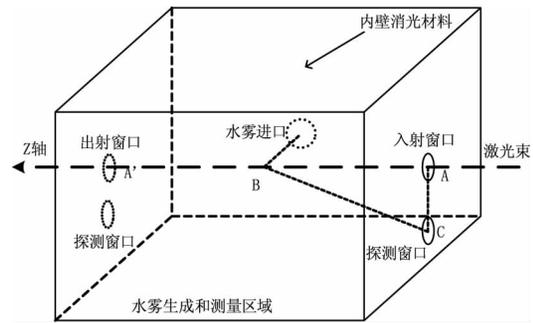


图 5 水雾生成和测量光路示意图

Fig. 5 Sketch of vapor generation and the light path in system

定义入射窗口几何中心与出射窗口几何中心所在直线为坐标系的  $Z$  轴,该轴为激光器发射激光方向,水雾进口开在与入射窗口几何中心与出射窗口几何中心连线平行的长方体密闭容器表面几何中心附近。探测窗口开在具有入射窗口或者出射窗口的长方体密闭容器端面上,探测窗口的几何中心到  $Z$  轴的距离  $d$  根据测量所需要的散射角  $\theta$ 、水雾散射体中心到入射窗口(或出射窗口)几何中心的距离  $s$  来确定。入射窗口几何中心位置  $A$  与出射窗口几何中心位置  $A'$  分别位于容器两个端面的几何中心;水雾进口开在长方体密闭容器后侧表面的几何中心,过水雾进口中心的直线垂直相交直线  $AA'$  于  $B$  点,该点为散射体中心位置根据散射角、水雾散射体中心到入射窗口中心的距离按照三角关系计算探测窗口中心  $C$  到  $A$  的距离和确定。

这里,针对引起测量误差的误差来源进行分析,在测试中采取的主要措施如下:

a. 针对衰减片表面之间多次反射、干涉效应和光学表面微小粒子散射影响。采用两级衰减片组的方法用于入射激光能量的调节,采用相邻两衰减片之间放置保持不同夹角的方式减小衰减片表面污染的影响和避免探测器能量饱和减小衰减片表面之间多次反射效应、干涉效应和光学表面微小粒子杂散影响。

b. 采用倾斜放置反射镜在与激光器、入射窗

口、出光窗口直线的方法,将激光大部分光束反射到远离光路通道位置,减少多次反射和漫射光的影响,提高激光散射动态测量的精度。

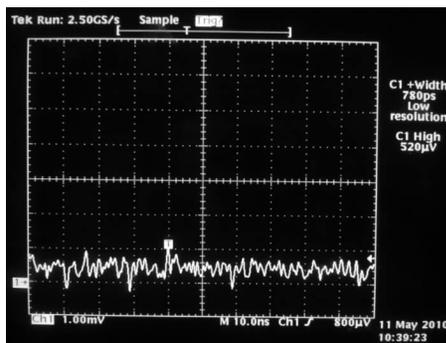
c. 利用软基消光布进行容器各个内壁消光处理、合理设置出光孔、在主光路中摆放反射镜等措施。

d. 采用软基黑体消光材料对测量容器各内壁进行表面处理,激光杂散吸收率分别在 90% 以上。防止杂散光对散射信号影响并降低测量系统对外界环境的依赖。

e. 到达探测器的能量主要是容器内介质的散射效应、激光出口散射效应、衰减片组 1 的杂散光和内壁消光不彻底等因素的贡献,以及经过探测器后的信号还包括探测器与探测电路的白噪声等。作为基本测试条件的检核,在不生成水雾的情况下,测量直接到达出射出口、探测窗口的激光能量。通过数据的对比和归一化,用差分测量的方法,进行散射信号随时间变化的动态测量,扣除基底噪声和扣除激光出口散射效应、衰减片组杂散光和内壁消光不彻底的影响并消除直接进入探测器能量的影响。

#### 4 水雾对激光后向散射效应的动态测试与分析

利用该测量系统进行了一系列水雾对激光散射效应的动态测试。首先利用单脉冲激光器发射激光并采集从无水汽、有水汽、水汽平衡、停止加气后的散射信号,对重频激光信号散射测量的一组典型数据如图 7 所示。

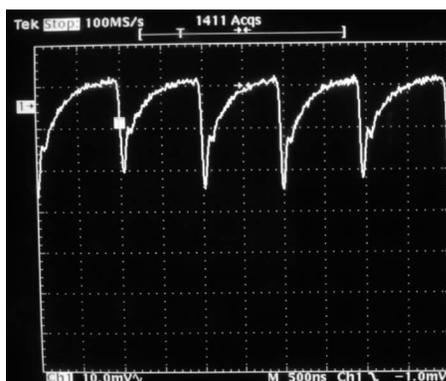


(c)停止水汽后

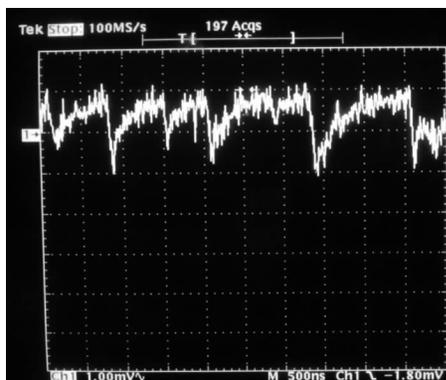
图 6 单脉冲信号的散射效应测试数据

Fig. 6 Data of Scattering Effects of Single Laser Pulse

利用重频激光器分别发射激光,并采集从无水汽、有水汽、水汽平衡、停止加气后的散射信号,对重频激光信号散射测量的一组典型数据如图 7 所示。



(a)水汽稳定时

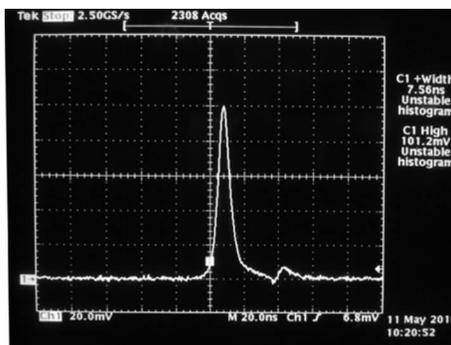


(b)停止水汽后

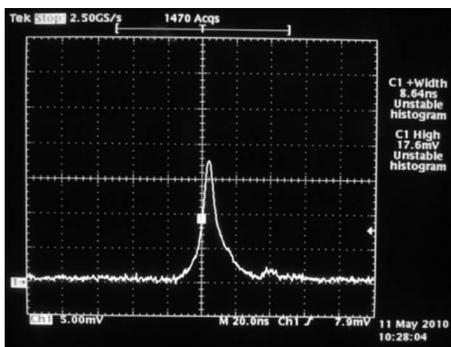
图 7 重频激光散射能量和脉冲宽度的变化

Fig. 7 Data of scattering energy and pulse length of repetition frequency laser

测试中可以观察到后向散射效应引起的到达探测器的明显信号变化,当散射存在时探测到的散射信号峰值是无散射信号的 10 倍以上。对比示波器数据发现散射对脉冲激光信号的信号强度有明显的衰减作用,脉冲宽度没有明显展宽的变化。其原因是在散射介质比较稠密的时候,发生多散射的几率



(a)水汽稳定时



(b)水汽消失过程中

大大增加,水雾容器的大气路径相对较短,多次散射发生时水雾粒子形成的多次散射叠加在粒子对激光信号的吸收上,表现为激光能量衰减效应相对突出;而容器内路径延时引起的脉冲展宽因其数值较小难以探测,因而多次散射效应引起的脉冲展宽现象不明显。

测试并记录了从没有水汽到加汽平衡到停止加汽过程的后向散射信号的动态过程,其中的一组随时间变化的后向散射信号动态测试数据如图 8 所示。

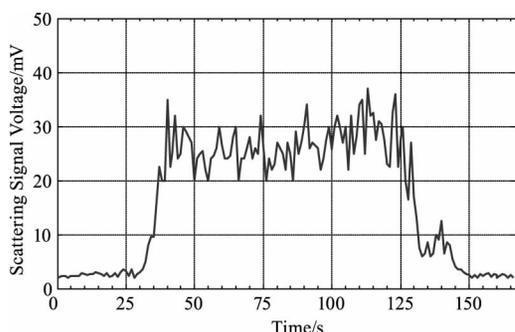


图 8 散射能量时间变化数据

Fig. 8 Data of Scattering Energy Varies with Time

当容器内水雾的浓度没有到达某一阈值时,探测到的散射信号非常微弱,甚至难以探测。当开始释放水汽时,散射信号并没有立即随其响应,当水汽浓度到达特定浓度阈值后散射信号迅速增强。在水汽稳定后,散射信号并非处于稳定状态出现不规则抖动,即存在明显的信号随机涨落现象。与开始释放水汽的过程相比,当停止释放水汽后探测到的散射信号持续维持的时间较长。如图 8 所示的一个测试过程,当停止释放水汽以后,在 140 s 附近出现反向的局部峰值,然后继续下降到噪声信号的水平,散射信号基本消失。分析其原因,在散射体内单位体积内的水含量、粒子尺度、粒子数密度变化引起接收到的光强变化是随机涨落的,是一个随机的动态过程,表现为后向散射信号形成过程和时间上的突变和非线性的。

水汽稳定后从图 8 的 40 s 到 130 s 的后向散射信号随时间变化测试数据可以看出明显的随机涨落现象,实际上光电探测器在持续释放水雾的状态时接收到的散射激光的信号光强是不断变化的且没有稳定在一个特定的数值,而表现为在一定范围内随机涨落的。其涨落的幅度在总信号的 25% ~ 35% 之间,因此在实际测试过程中不能忽略其影响。在

测试过程中该信号的总体影响是随机的、动态的且在散射信号形成和遮蔽过程中在强度上出现突变,明显是非线性的随机涨落的表现形式。

测试中出现随机涨落现象的原因主要是测量区域内的以下几个因素引起的:①粒子数和尺度分布的变化引起的散射体状态不稳定;②虽然在宏观上系统在一定时刻达到平衡,但在内部的微观形态方面,气流到达内壁经反射后形成了紊流和涡流,整体系统处于不均匀和不稳定状态,导致粒子的尺度分布发生比较大的变化;③由于容器内气流的波动,粒子流以不均匀的状态按照随机的速度经过测量区域,导致测量区域的粒子数目不断发生起伏变化。综合以上因素的影响,造成了在时间上的散射信号随机涨落。

可以看出激光信号与水雾粒子的相互作用是复杂的动态过程,在比较稀疏的介质中,后向散射信号以单次散射为主,而在稠密介质中多次散射效应占据主要地位。在时间和空间上散射信号与激光信号自身的时空特性、粒子组成成分、粒子尺度、数密度分布以及激光入射角度等因素密切相关。

## 5 结束语

本文结合激光在有尺度分布的水雾散射体内的后向散射现象,进行了水雾粒子对激光后向散射效应模型分析,利用光电探测器组件、衰减片组、反射镜、偏振片等设计了水雾生成装置和散射效应测试系统,使用该系统进行了水雾对激光脉冲信号和高重频信号散射效应的动态实验和测试方面的初步研究,并依据测试数据分析了水雾粒子对激光后向散射实验现象、影响规律和特点。应该指出,水雾散射介质属于耗散系统,受到测试成本、实验环境等方面条件限制,难以精确控制分散、弥散状态。限于篇幅,本文仅考虑了散射区域内的动态散射效应模型、测试手段和结果分析,下一步要在规范探测手段、提高水雾生成装置的可控性、稳定性等方面进行改进。

## 参考文献:

- [1] RAO Ruizhong. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] YE Chao, MENG Rui, GE Baozhen. Survey of particle measurement methods based on light scattering[J]. Laser

- & Infrared, 2015, 45(4):343-348. (in Chinese)  
叶超, 孟睿, 葛宝臻. 基于光散射的粒子测量方法综述 [J]. 激光与红外, 2015, 45(4):343-348.
- [3] YANG Yuchuan, LONG Chao, TAN Bitao, et al. Study on the influence of atmosphere back-scattering on laser pulse [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(5):482-485. (in Chinese)  
杨雨川, 龙超, 谭碧涛, 等. 大气后向散射对主动探测激光脉冲的影响 [J]. 激光与红外, 2013, 43(5):482-485.
- [4] YAO Lujie, GAO Junlin, XIAO Kaitao, et al. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2004. (in Chinese)  
姚禄久, 高钧麟, 肖凯涛, 等. 烟幕理论与测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [5] LIAO Guonan. An introduction to atmospheric radiation [M]. 2nd. ed. Guo Caili, Zhou Shijian, Transl. Beijing: China Meteorological Press, 2004. (in Chinese)  
廖国男. 大气辐射导论 [M]. 2 版. 郭彩丽, 周诗健, 译. 北京: 气象出版社, 2004.
- [6] Alexander A Kokhanovsky. Light scattering reviews (Single and multiple light scattering) [M]. Paxis Publishing Ltd. Chichester, UK, 2006:433-439.
- [7] SUN Xianming, WANG Haihua, LIU Wanqiang, et al. Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5):1506-1510. (in Chinese)  
孙贤明, 王海华, 刘万强, 等. 沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(5):1506-1510.
- [8] LIU Xichuan, GAO Taichang, LIU Lei. Effect of rainfall on laser transmission attenuation based on non-spherical raindrops [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1):167-173 (in Chinese)  
刘西川, 高太长, 刘磊. 基于非球形雨滴的降雨对激光传输衰减的影响 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1):167-173.
- [9] Oleg Dubovik, Alexander Sinyuk, Tatyana Lapyonok, et al. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111:D11208.