

脉冲激光引信烟雾后向散射特性研究

陈慧敏, 马超, 齐斌, 郭鹏宇, 杨尚贤, 高丽娟, 霍健

(北京理工大学机电动态控制重点实验室, 北京 100081)

摘要: 激光引信的探测性能容易受到烟雾的干扰, 引起虚警和漏警。为研究脉冲激光引信在烟雾环境中的传输特性, 基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法, 建立脉冲激光引信烟雾后向散射模型, 仿真 905 nm 脉冲激光在不同烟雾环境下的回波特性, 进行相关试验, 对比仿真归一化峰值强度与实测峰值电压, 进行相关性分析, 验证模型的准确性。分析不同烟雾质量浓度、烟筒长度与距离下脉冲激光引信在烟雾环境中的后向散射特性, 得到不同条件对回波的影响规律, 研究结果可为脉冲激光引信抗烟雾干扰提供支撑。

关键词: 脉冲激光引信; 烟雾; Mie 散射; Monte Carlo 方法; 后向散射特性

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0403005

Study on backscattering characteristics of pulsed laser fuze in smoke

Chen Huimin, Ma Chao, Qi Bin, Guo Pengyu, Yang Shangxian, Gao Lijuan, Huo Jian

(Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The detection ability of laser fuze is easily disturbed by smoke, which causes false alarm. In order to study on the backscattering characteristics of pulsed laser fuze in smoke, the relevant model based on Mie scattering theory and Monte Carlo method was established, and the backscattering signal in smoke was simulated using 905 nm pulsed laser. To verify the accuracy of the model, the actual peak voltage was compared with the simulated normalized intensity and correlation analysis was conducted. Then, the backscattering characteristics of the pulsed laser fuze under different smoke concentrations, length of pipes and distances were analyzed. Finally, the influence of different smoke environment was obtained. The results can provide support for the anti-smoke interference of the pulsed laser fuze.

Key words: pulsed laser fuze; smoke; Mie scattering; Monte Carlo; backscattering characteristics

0 引言

激光引信利用激光的方向性强、单色性好的特点, 具有突出的抗电磁干扰能力和精确的炸点控制能力。战场环境下, 烟雾作为光电干扰的无源干扰手段, 会对激光产生散射和吸收作用, 造成激光信号衰减, 严重影响光电类武器的作战效能, 容易引起虚警和漏警。因此, 研究脉冲激光在烟雾中的后向散射特

性具有重要意义, 为激光引信抗烟雾干扰提供理论基础。

目前, 国内外研究人员和学者对激光在烟雾中的传输特性方面进行了大量研究。李晓峰等^[1]数值模拟了不同波长下激光在烟雾中的吸收、散射和衰减效应, 得到相同复折射率下的烟雾对激光的衰减规律, 但未考虑到不同波长下烟雾的复折射率不同的实际情况。Mori 等^[2]数值模拟了烟雾粒子在单次散射情

收稿日期: 2020-02-08; 修订日期: 2020-03-15

基金项目: 机电动态控制重点实验室基金 (6142601180307); 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金 (U1630131); 上海航天科技创新基金重点项目 (SAST2017-074); 国防基础科研重大项目 (JCKY2016-208A005)

作者简介: 陈慧敏 (1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光探测与目标识别方面的研究。Email: laserchm@126.com

况下的 Mie 散射系数和非对称因子随粒径的变化规律,以及多次散射下的透过率随光学厚度的变化规律。陈文建等^[3-4]研究了导弹尾烟和固体发烟剂对多波长激光传输特性影响的差异程度,得到了烟雾对激光的衰减与烟雾粒子的关系。朱耀麟等^[5]研究了爆炸产生的烟雾对激光传输衰减的影响,得到衰减变化随烟雾量的增加呈指数降低的规律。王红霞等^[6]模拟计算了 1.06 μm 激光在烟雾中的传输,得到了透过率与粒子粒径、浓度的关系。参考文献 [2-6] 均是对激光透射特性的研究,未对激光在烟雾中的后向散射特性进行研究。宗思光等^[7]研究了激光后向散射下的烟雾粒子测量方法,得到了烟雾环境下的消光系数模型。刘凯^[8]研究了烟尘气溶胶介质中的激光散射特性,得到 5°~20°的散射光强与浓度的关系,但未考虑其他散射角度的情况。

文中基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法,建立脉冲激光在烟雾中的后向散射模型,选取近红外波长 905 nm 激光进行仿真,分析回波强度与烟筒长度、烟雾浓度以及距离之间的关系,并通过相关试验加以验证,进而为激光引信抗烟雾干扰提供理论基础。

1 烟雾环境下的激光后向散射模型建立

结合 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法,建立脉冲激光发射模型、激光在烟雾中的传输模型、激光接收模型,模拟激光发射、传输、接收过程。

1.1 激光发射建模

激光器发射的脉冲激光光束在光强分布上接近高斯光束,振幅表达式为^[9]:

$$A(x, y, z) = \frac{A_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \times \exp\left\{-ik\left[\frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + z\right] + i\varphi(z)\right\} \quad (1)$$

式中: $w(z) = w_0[1 + (z/z_0)^2]^{1/2}$ 为激光光束在传输距离 z 处的半径, $w_0 = (\lambda z_0/\pi)^{1/2}$ 为束腰半径, z_0 为瑞利长度。

以激光束腰为光子发射点,激光束腰处的每个位置发射的光子数量服从高斯分布,光子的发射位置为^[10]:

$$\begin{cases} x_i = w_0 \xi_1 \\ y_i = w_0 \xi_2 \\ z_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ξ_1, ξ_2 为标准正态分布随机数。光子初始发射方向为^[11]:

$$\begin{cases} u_{xi} = \sin \theta_i \cos \varphi_i \\ u_{yi} = \sin \theta_i \sin \varphi_i \\ u_{zi} = \cos \theta_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\theta_i = |(\theta/2) \cdot \xi_3|$ 为光子发射方向天顶角, θ 为激光光束发散角, ξ_3 为标准正态分布随机数; $\varphi_i = 2\pi\xi_4$ 为光子发射方向方位角, ξ_4 为 [0,1] 区间上的均匀分布随机数。

1.2 激光在烟雾中的传输建模

光子在烟雾环境中的传输过程包括光子与烟雾粒子的碰撞散射过程、光子的移动过程和光子的衰减过程。

光子在进入烟雾环境后会与烟雾粒子发生碰撞,碰撞粒子的粒径根据粒径分布抽样确定。为保证仿真与试验的一致性,对发烟材料燃烧释放的烟雾样品,用激光散射粒度分布分析仪 LA-950 进行测试,得到烟雾粒子的粒径范围,如图 1 所示。

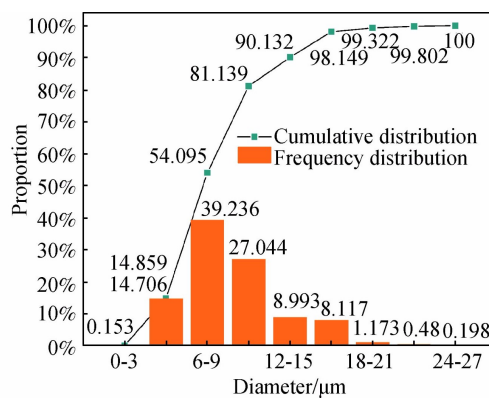


图 1 烟雾粒子的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of smoke particles

进行最小二乘回归分析和显著性检验,得到粒径分布服从 Rosin-Rammler 分布:

$$F(d) = 1 - \exp(-\beta d^n) \quad (4)$$

式中: d 为粒径; β 为特征参数; n 为分布指数; $F(d)$ 为粒径小于 d 的累积百分比。 $\beta=3.09 \times 10^{-4}$, $n=3.45$ 。

光子与粒子发生碰撞之后,光子的移动方向会发生变化,变为:

$$\begin{cases} u'_{xs} = \frac{\sin \theta_{sca}}{\sqrt{1-u_{zs}^2}} (u_{xs} u_{zs} \cos \varphi_{sca} - u_{ys} \sin \varphi_{sca}) + u_{xs} \cos \theta_{sca} \\ u'_{ys} = \frac{\sin \theta_{sca}}{\sqrt{1-u_{zs}^2}} (u_{ys} u_{zs} \cos \varphi_{sca} + u_{xs} \sin \varphi_{sca}) + u_{ys} \cos \theta_{sca} \\ u'_{zs} = -\sin \theta_{sca} \cos \varphi_{sca} \sqrt{1-u_{zs}^2} + u_{zs} \cos \theta_{sca} \end{cases} \quad (5)$$

式中: (u_{xs}, u_{ys}, u_{zs}) 为散射前的光子移动方向; φ_{sca} 为散射方位角; θ_{sca} 为散射天顶角。

碰撞之后,光子会沿着新方向继续移动,且粒子

能量发生衰减, 移动自由程和衰减之后的光子能量为^[12]:

$$\begin{cases} \Delta s = -\frac{\ln \varepsilon}{\mu_t} \\ E' = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}} E \end{cases} \quad (6)$$

式中: E' 、 E 分别为光子散射前、散射后的能量; Q_{sca} 为烟雾粒子的散射效率因子; Q_{ext} 为消光效率因子; Δs 为光子的自由程; ε 为区间 [0,1] 上均匀分布的随机数; μ_t 为烟雾的衰减系数, 用质量浓度表示为:

$$\mu_t(\lambda) = \sum_{i=1}^n \frac{3Q_{ext}(\lambda, r_i)}{4\rho r_i} c(r_i) \quad (7)$$

式中: ρ 为粒子的密度; $c(r_i)$ 为半径 r_i 粒子的质量浓度。905 nm 波长下, 烟雾粒子的散射、吸收、消光效率因子如图 2 所示。

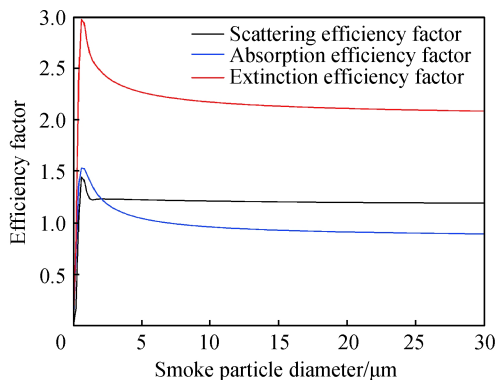


图 2 905 nm 波长下烟雾粒子的效率因子曲线

Fig.2 Efficiency factor curves of smoke particles at the wavelength of 905 nm

1.3 激光接收建模

若光子离开烟雾环境, 且光子移动方向朝向脉冲激光引信一侧, 则光子有可能被脉冲激光引信接收, 成为回波光子的。光子到达引信接收窗口平面的位置:

$$\begin{cases} x_f = x_l - u_{xl} \frac{z_l}{u_{zl}} \\ y_f = y_l - u_{yl} \frac{z_l}{u_{zl}} \\ z_f = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: (x_l, y_l, z_l) 为光子离开粒子环境前最后一次散射或反射的位置; (u_{xl}, u_{yl}, u_{zl}) 为光子最后一次散射或反射后的移动方向。光子的入射角度为:

$$\theta_m = \arcsin(u_{xl}^2 + u_{yl}^2) \quad (9)$$

若光子到达位置在接收窗口内, 且光子入射角度

在接收视场角内, 即满足公式 (10), 则光子被成功接收。

$$\begin{cases} (x_f - d_{tr})^2 + y_f^2 \leq R_r^2 \\ \theta_{in} \leq \frac{\theta_{view}}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: d_{tr} 为脉冲激光引信的收发光轴间距; R_r 为接收端镜头半径; θ_{view} 为脉冲激光引信的接收视场角。

2 仿真流程与仿真条件

脉冲激光在烟雾中的传输特性仿真流程如图 3 所示。首先在激光后向散射模型中输入试验中的相关参数, 对光子状态进行初始化设置, 光子与粒子发生碰撞之后, 计算光子的位置与能量, 若光子在烟雾范围内且光子未消失, 则重复碰撞过程, 直到光子消失或被引信接收, 进行新的光子碰撞。当最后一个光子完成循环之后, 计算出激光回波归一化强度。

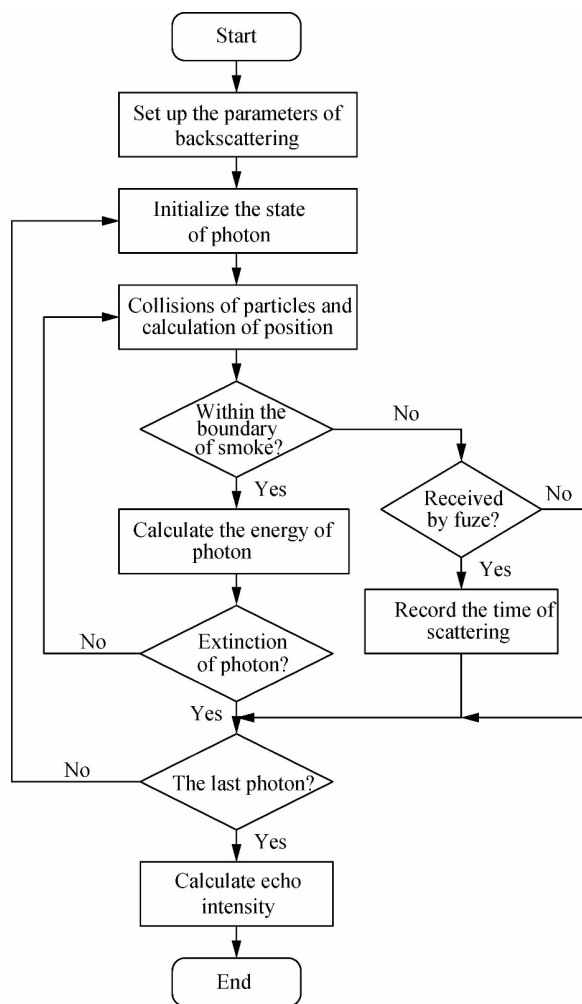


图 3 仿真计算流程图

Fig.3 Flowchart of simulation

对仿真条件进行设置, 仿真分为两组。一组为相同距离下, 回波强度随质量浓度和烟筒长度的变化; 另一组为相同烟筒长度下, 回波强度随质量浓度和距离的变化。仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件设置

Tab.1 Settings in simulation

Parameters	Value	
Wavelength/nm	905	
Pulse width/nm	50	
Beam divergence/rad	0.005	
Laser fuze	Receiving optical lens diameter/mm	50
	Emission-receiving distance/mm	35
	Receiving field angle/rad	0.2
Smoke	Density/g·cm ⁻³	1.096
	Complex index of refraction	1.750-0.430i
	Particle size/μm	3-26
Parameters of tests	Concentration of smoke/g·m ⁻³	3、7、10.5、14、18、21、24、28
	Length of pipe/m	0.3、0.5、0.8、1.0
	Distance of fuze and smoke/m	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0

3 试验方案设计

试验系统示意图如图 4 所示, 将自研脉冲激光回波动态测试系统固定, 保持位置不变, 烟雾环境模拟装置的大小、位置和烟雾的质量浓度随试验要求改变。

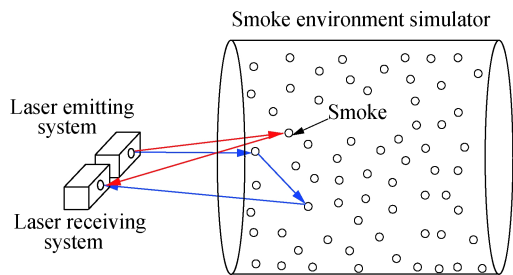


图 4 试验系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of experimental system

试验开始前, 烟雾环境模拟装置里没有烟雾粒子, 由于试验光路相对较短, 发射激光将几乎没有任何损耗地通过模拟装置。试验所采用的烟筒直径为 50 cm, 实施的试验步骤如下:

(1) 按照图 5 布设试验系统, 发射接收系统处在烟雾模拟装置中心延长线上, 接收系统外接示波器观测回波信号, 设置发射激光的脉宽;

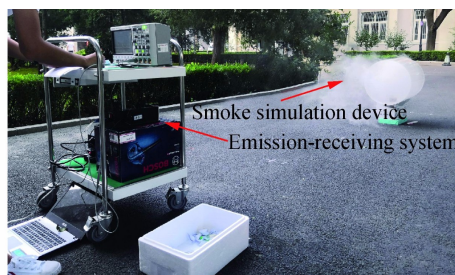


图 5 试验系统布设

Fig.5 Set up the experimental system

(2) 在烟雾模拟装置中点燃一定质量的烟饼, 两侧分别用硬板挡住, 保证产生的烟雾不漏出, 等燃烧充分、烟雾大致均匀之后, 同时将两侧打开, 快速采集回波信号。称量燃烧前后的烟饼质量分别为 m_1 和 m_2 , 质量浓度计算如公式 (11) 所示:

$$c = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (11)$$

式中: c 为模拟装置中烟雾的质量浓度; V 为圆筒的体积。

(3) 分别改变烟雾质量浓度、烟筒长度、发射接收系统与模拟装置之间的距离, 记录回波波形并保存。烟雾质量浓度分别为 3、7、10.5、14、18、21、24、28g/m³, 烟筒长度分别为 0.3、0.5、0.8、1.0 m, 距离分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m。

4 结果分析

4.1 烟雾质量浓度对回波影响

固定发射接收系统, 与模拟装置距离保持 1.0 m 不变, 在四种不同烟筒长度下, 仿真得到烟雾质量浓度对脉冲激光回波的影响规律, 其仿真与试验回波的峰值强度 (电压) 对比结果如图 6 所示。结果表明, 仿真与试验结果的变化趋势基本吻合, 其相关系数分别为 0.997 6、0.978 6、0.987 6、0.966 5, 在烟筒长度与距离一定的前提下, 脉冲激光回波强度与质量浓度呈正相关, 浓度越大, 回波越强; 当质量浓度超过 14 g/m³ 时, 回波强度的变化逐渐变缓; 而当质量浓度超过 24 g/m³ 时, 回波强度基本不再随质量浓度的增大而变强。

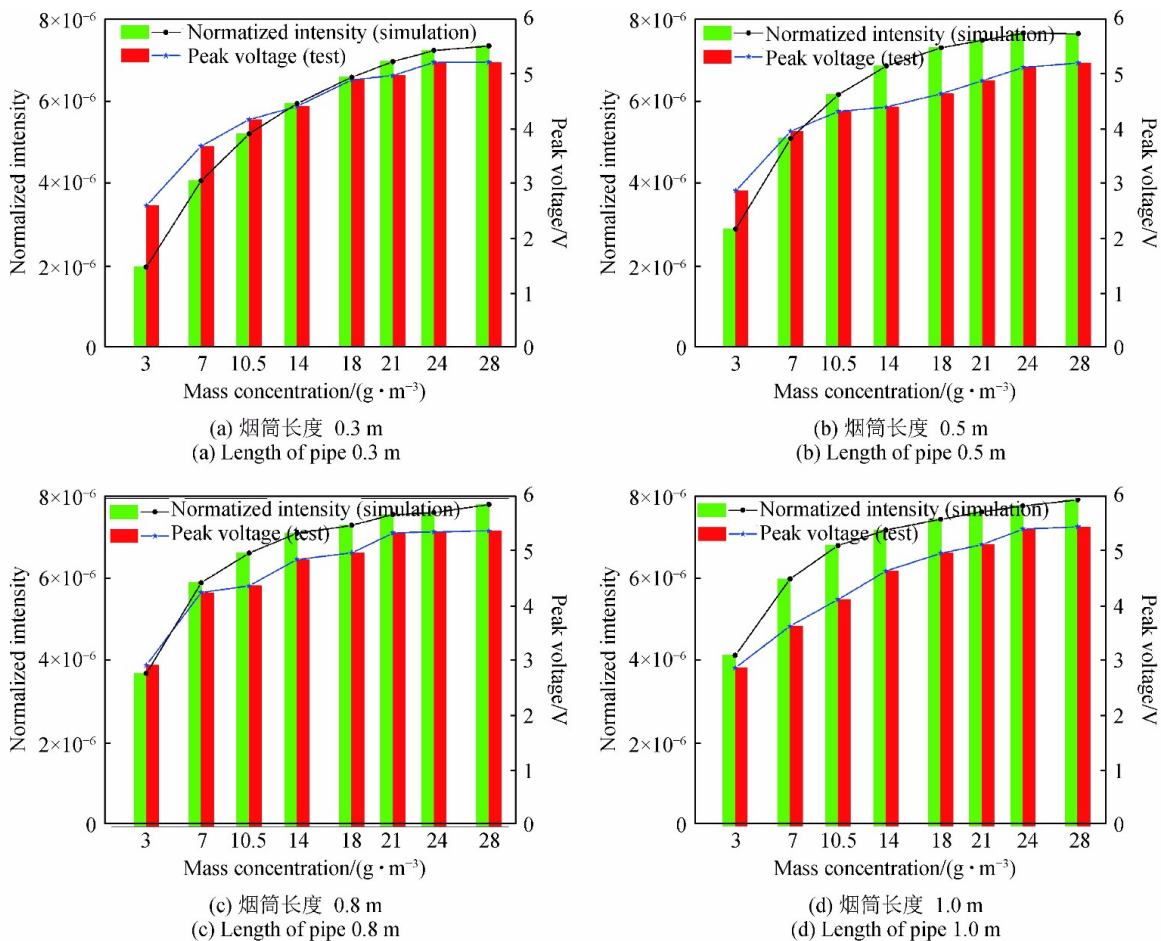


图 6 仿真与试验结果对比

Fig.6 Comparison diagrams of simulation and test

4.2 烟筒长度对回波影响

保持发射接收系统与模拟装置距离 1.0 m 不变, 在八种不同烟雾质量浓度下, 得到烟筒长度对脉冲激

光回波的影响, 其仿真与试验回波的峰值强度 (电压) 对比结果如图 7 所示。

当质量浓度小于 14 g/m^3 时, 脉冲激光回波强度

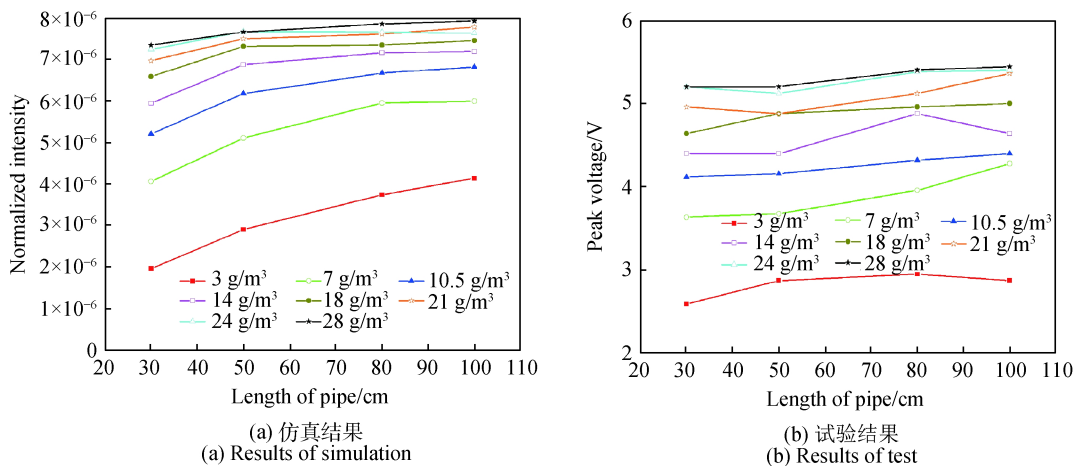


图 7 不同烟筒长度下的脉冲激光回波强度

Fig.7 Pulse laser echo intensity at different length of pipes

随烟筒长度的增加而增大明显;当质量浓度超过 14 g/m^3 时,回波强度随烟筒长度增大而增大的趋势逐渐变缓;而当质量浓度大于 24 g/m^3 时,不同质量浓度下回波强度几乎不随烟筒长度变化而变化,说明烟雾浓度过大时,激光在不同烟筒长度的烟雾中穿透深度已基本不变。

4.3 距离对回波影响

改变发射接收系统与烟雾模拟装置之间的距离,

分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m,烟筒长度 0.5 m 保持不变,得到不同距离处、四种烟雾质量浓度下的脉冲激光回波,仿真与试验的对比结果如图 8 所示。在质量浓度一定时,距离与脉冲激光回波强度呈负相关,距离越远,质量浓度越小,且质量浓度减小的趋势逐渐变缓。仿真与试验结果的变化趋势基本吻合,其相关系数分别为 0.980 5、0.970 5、0.962 3、0.902 0。

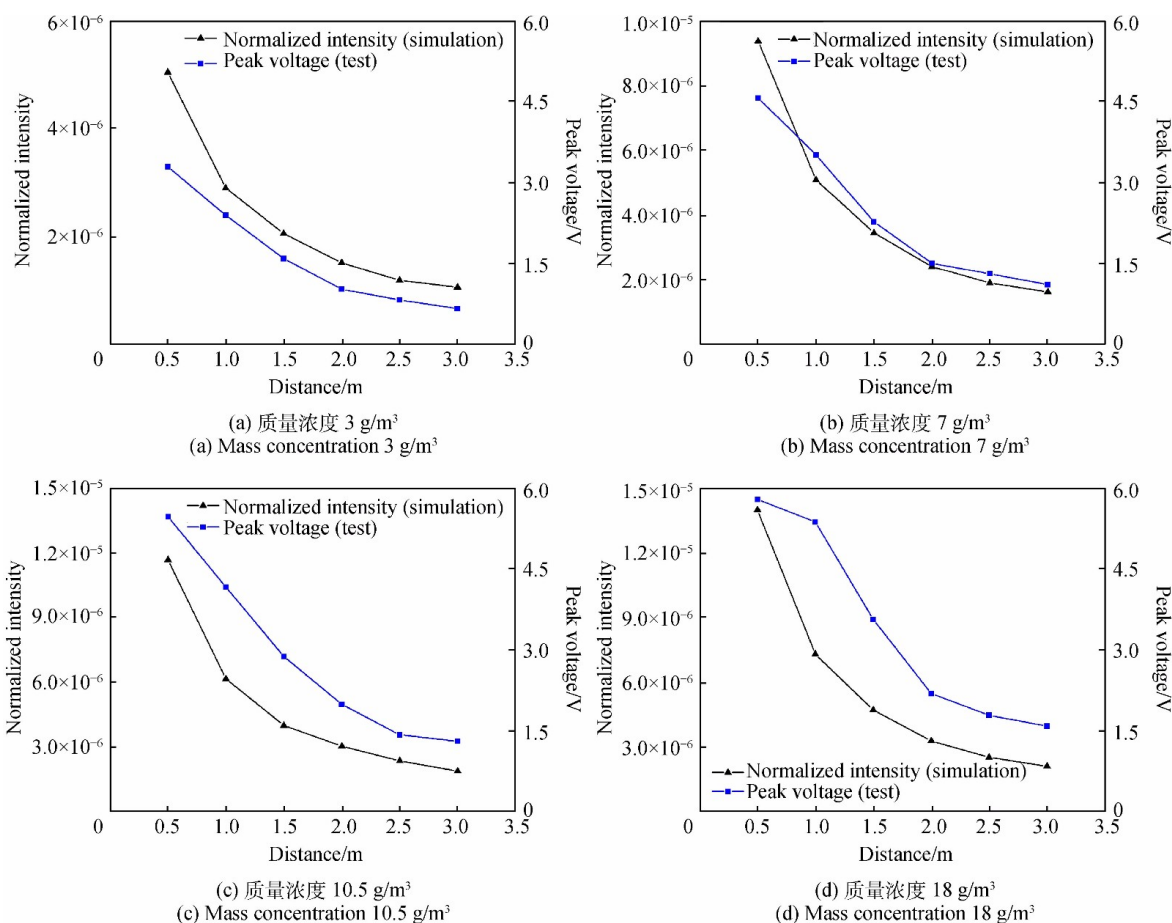


图 8 仿真与试验结果对比

Fig.8 Comparison diagrams of simulation and test

5 结论

文中基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法建立脉冲激光烟雾后向散射模型,输入仿真参数,得到不同烟雾质量浓度、烟筒长度与距离下的回波特性,并通过相关试验验证,得到如下结论:

(1) 在不同的烟雾环境条件下,试验测得的回波峰值电压变化与仿真计算的归一化峰值强度变化具

有较好的相关性和一致性,相关系数均在 0.90 以上,证明模型较为准确;

(2) 烟筒长度 (0.3、0.5、0.8、1.0 m) 与距离 (1.0 m) 一定的情况下,回波强度与质量浓度呈正相关,但当质量浓度超过 14 g/m^3 时,回波强度的变化逐渐变缓;而当质量浓度超过 24 g/m^3 时,回波强度基本不再随质量浓度的增大而变强;

(3) 烟雾质量浓度 (3、7、10.5、14、18、21、24、

28 g/m³) 与距离 (1.0 m) 一定的情况下, 烟筒长度与回波强度呈正相关, 当质量浓度小于 14 g/m³ 时, 脉冲激光回波强度随烟筒长度的增加而增大明显, 随着质量浓度的增大趋势逐渐减缓, 而质量浓度超过 24 g/m³ 时, 激光在烟雾中的穿透深度已基本不变。

(4) 烟雾质量浓度 (3、7、10.5、18 g/m³) 与烟筒长度 (0.5 m) 一定的情况下, 距离与回波强度呈负相关, 距离越远, 质量浓度越小, 且质量浓度减小的趋势逐渐变缓。

参考文献:

- [1] Li Xiaofeng, Zhou Xin, Lu Xi, et al. Numerical simulation and analysis of laser transmitting characteristic in smog [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(3): 381–384. (in Chinese)
李晓峰, 周昕, 卢熙, 等. 激光在烟雾中传输特性的数值模拟分析[J]. *激光技术*, 2010, 34(3): 381–384.
- [2] Saverio Mori, Frank S Marzano. Microphysical characterization of free space optical link due to hydrometeor and fog effects [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(22): 6787–6803.
- [3] Chen Wenjian, Zhang Ruofan, Chen Shengshi, et al. Study on multi-wavelength laser attenuation influenced by missile tail smoke [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 772–775. (in Chinese)
陈文建, 张若凡, 陈胜石, 等. 导弹尾烟对多波长激光传输影响研究[J]. *应用光学*, 2016, 37(5): 772–775.
- [4] Chen Wenjian, Mu Rangxiu, Zhang Ruofan, et al. Transmittance measurement on smog of solid smoke agent in several wavebands [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 738–741. (in Chinese)
陈文建, 穆让修, 张若凡, 等. 固体发烟剂烟雾几种波段透过率测试[J]. *应用光学*, 2016, 37(5): 738–741.
- [5] Zhu Yaolin, Zhang Yong, Meng Chao. Research on the smoke produced by explosion impact on laser transmission [J]. *Laser Journal*, 2013, 34(5): 7–9. (in Chinese)
朱耀麟, 张勇, 孟超. 爆炸产生的烟雾对激光传输影响研究[J]. *激光杂志*, 2013, 34(5): 7–9.
- [6] Wang Hongxia, Liu Daizhi, Song Zibiao, et al. Monte Carlo simulation of laser transmission through a smoke screen [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2013, 30(3): 415–421. (in Chinese)
王红霞, 刘代志, 宋仔标, 等. 激光在烟雾中传输的蒙特卡罗模拟[J]. *计算物理*, 2013, 30(3): 415–421.
- [7] Zong Siguang, Liang Shanyong, Cao Shui, et al. Research of smoke particle measurement with laser backward scattering [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(9): 1082–1088. (in Chinese)
宗思光, 梁善永, 曹水, 等. 激光后向散射式烟幕粒子测量方法研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(9): 1082–1088.
- [8] Liu Kai. Study on the laser light-scattering field properties of soot aerosol[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016. (in Chinese)
刘凯. 烟尘气溶胶介质中的激光散射场特性研究[D]. 陕西: 西安工业大学, 2016.
- [9] Teng Shuyun, Liu Liren, Wan Lingyu, et al. Propagation of Gaussian beam limited by an aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 157–160. (in Chinese)
滕树云, 刘立人, 万玲玉, 等. 孔径光阑限制下高斯光束的传输[J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 157–160.
- [10] Wang F J, Chen H M, Ma C, et al. Construction of backscattering echo caused by cloud in laser fuze [J]. *Optik*, 2018, 171: 153–160.
- [11] Wang Fengjie, Chen Huimin, Ma Chao, et al. Research on the characteristics of fog backscattering laser echo [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0506002. (in Chinese)
王凤杰, 陈慧敏, 马超, 等. 云雾后向散射激光回波特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0506002.
- [12] Wang F J, Chen H M, Yang S X, et al. Comparison of detection performance of near-, mid-, and far-infrared laser fuzes in clouds [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 8078–8086.