

太赫兹波对烟幕的透射能力研究

王启超,汪家春,赵大鹏,林志丹,苗雷

(脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽合肥 230037)

摘要: 基于 Mie 散射理论计算获得烟幕对 337 μm 太赫兹波的衰减特性, 并与其对传统的 1.06 μm 激光、3~5 μm 和 8~12 μm 的热红外波段的衰减特性进行了对比。结果表明: 石墨烟幕对 337 μm 太赫兹波的质量消光系数比其他波长和波段小 1~2 个数量级。选取两种不同粒径的石墨烟幕在上述波长和波段上分别进行消光特性实验, 获得了两种烟幕在各波长和波段上的质量消光系数。实验结果表明: 两种烟幕对 337 μm 太赫兹波的质量消光系数均小于 0.045 m^2/g , 且远小于其他探测波长和波段, 说明波长更长的太赫兹波具有更强的穿透烟幕的能力。

关键词: 太赫兹; 烟幕; 透射; 质量消光系数

中图分类号: O436.2 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)12-3696-05

Research on transmission capacity of THz for smoke

Wang Qichao, Wang Jiachun, Zhao Dapeng, Lin Zhidan, Miao Lei

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The extinction characteristic of graphite smoke at 337 μm was calculated on the basis of Mie scattering model. And the extinction characteristics of it at conventional infrared bands(3~5 μm , 8~12 μm) and representative wavelength of laser (1.06 μm) were calculated later. The results indicate that the mass extinction coefficient (MEC) of the smoke at 337 μm is smaller by 1~2 orders of magnitude than that of other wavelengths or wavebands. Then, the transmission experiments about two kinds of smoke with different diameters of graphite particles were conducted respectively at those wavelengths and wavebands mentioned above. Finally, the MECs at 337 μm , 1.06 μm , 3~5 μm and 8~12 μm were deduced, and corresponding experimental results were contrasted. The MECs of two kinds of smoke at 337 μm are all less than 0.045 m^2/g , and the values at other wavelengths or wavebands are further higher than it. The final results demonstrate that THz wave of 337 μm has stronger penetration capacity for smoke.

Key words: THz; smoke; transmission; MEC

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-05-20

作者简介: 王启超(1989-), 男, 博士生, 主要从事 THz 探测和系统设计方面的研究。Email: wqc_wqc@126.com

导师简介: 汪家春(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事 THz 系统方面的研究。Email: w_jiachun@163.com

0 引言

烟幕作为一种人工产生的遮蔽物,通常由悬浮于空气中的无数微粒组成,这些微粒对于传统探测波段的光波具有较强的衰减作用,使得穿过烟幕后的光功率大大衰减,能够有效削弱光学系统接收到的信号能量,缩短其作用距离,使其难以发现、识别或跟踪目标。

太赫兹波是频率在 0.1~10 THz (波长在 30 μm~3 mm)范围内的电磁辐射。由于其具有独特的穿透特性,使得其在安全检查、无损检测、医疗诊断以及目标探测等诸多领域具有广阔的应用前景^[1-4]。在目标探测方面,烟幕的使用使得传统的近红外、中远红外、激光等探测波段往往难以奏效,而太赫兹波良好的穿透能力使得对烟幕遮蔽下的目标探测成为可能。因此,选择合适的太赫兹波段可实现烟幕条件下的远距离探测,能有效弥补红外和激光探测系统的不足。

文中首先基于 Mie 散射理论,计算分析石墨烟幕对 337 μm(0.89 THz)太赫兹波的衰减特性,并与其对传统的 1.06 μm 激光、3~5 μm 和 8~12 μm 的热红外波段的衰减特性进行对比。随后,选取不同粒径的石墨烟幕,分别测试其在上述波长和波段的质量消光系数(MEC),验证了该太赫兹波长的穿透能力,为其在烟幕遮蔽条件下的目标探测应用奠定了基础。

1 烟幕对入射波的衰减

入射辐射在均匀分布烟幕中的传播遵循朗伯-比尔定律^[5]。若考虑一个厚度为 L 的烟幕层,如图 1 所示。

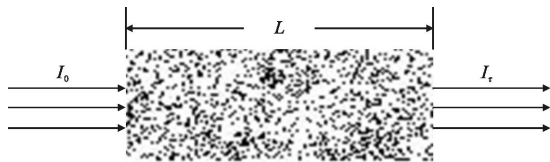


图 1 入射光穿透烟幕层示意图

Fig.1 Schematic diagram of radiation transmission in smoke

光强为 I_0 , 波长为 λ 的入射光在烟幕中传输时,其透射光强 I_t 将变为:

$$I_t = I_0 \cdot \exp\left[-\int_0^L \beta(\lambda) dL\right] \quad (1)$$

消光系数 $\beta(\lambda)$ 包含烟幕微粒的吸收和散射贡献,通常可由下式进行计算:

$$\beta(\lambda) = N \int_{r=0}^{\infty} \sigma_E(\lambda, r) \cdot f(r) dr \quad (2)$$

式中: N 为烟幕微粒数的浓度; r 为烟幕微粒粒径; $\sigma_E(\lambda, r)$ 为粒径为 r 的微粒对波长 λ 的消光截面; $f(r)$ 为粒径的分布函数。

对于同样粒径的微粒,球形具有最简单的形状,而均匀介质构成的球形粒子吸收、散射和消光截面可以用 Mie 散射理论进行计算分析^[6]。

引入质量消光系数 $\beta_M(\lambda)$, 其表征的是单位质量浓度时烟幕的消光能力,可表示为^[7]:

$$\beta_M(\lambda) = \frac{\int_{r=0}^{\infty} \sigma_E(\lambda, r) \cdot f(r) dr}{\int_{r=0}^{\infty} \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho_M \cdot f(r) dr} \quad (3)$$

式中: ρ_M 为构成烟幕材料的质量密度。

2 烟幕对太赫兹波和红外消光特性的理论计算与对比

烟幕对近红外、热红外波段及包含在内的激光波长都具有良好的消光性能,以石墨粉烟幕为例,分别计算其对近红外 1.06 μm 激光、热红外 3~5 μm 和 8~12 μm、以及 337 μm 太赫兹波的消光能力。

由于实际烟幕微粒的粒径存在一定的分布,而消光系数与粒径分布有很强的关联,采用单一粒径或平均粒径来计算相应的消光系数其意义并不大。为此,需找到烟幕微粒的粒径分布。对于常见的烟幕,其粒径分布通常用对数正态分布进行描述^[8]:

$$f(r) = \frac{1}{r \sqrt{2\pi} \ln s} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2(\ln s)^2}\right] \quad (4)$$

式中: r_0 和 s 分别为粒径 r 的几何平均和几何偏差。

假设石墨粉粒径服从对数正态分布,计算得到石墨烟幕对上述波长和波段的质量消光系数随 r_0 和 s 的变化规律,如图 2 所示。其中,反映 3~5 μm 和 8~12 μm 质量消光系数的曲线十分接近,基本重合,难以辨别。

对比图 2 中不同 s 值的质量消光系数曲线的变化趋势,可以看出:

(1) 当 s 一定时,随着 r_0 的增大,对于 1.06 μm、3~5 μm 和 8~12 μm, 石墨的质量消光系数均处于单调递减状态,而对 337 μm 波长却呈现单调递增

趋势;尤其是在 r_0 较小时,这一变化趋势体现地更加明显。

(2) 当 r_0 一定时,对于 $1.06\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 石墨的质量消光系数随着 s 的增大而减小。而对于 $337\ \mu\text{m}$ 波长,其随着 s 的增大呈现单调递增趋势。因此,粒径不均匀性的增大导致石墨烟幕对太赫兹波的消光性能增强,即太赫兹波穿透烟幕的能力降低。

然而,通过图 2 中结果的对比分析可以看出,太赫兹波对烟幕的穿透能力总是强于前三个波长和波段的穿透能力,且在 r_0 较小时,其差距可达两个数量级;随着 r_0 的增大,差距逐渐缩小到约一个数量级,并呈现较为平稳的趋势。

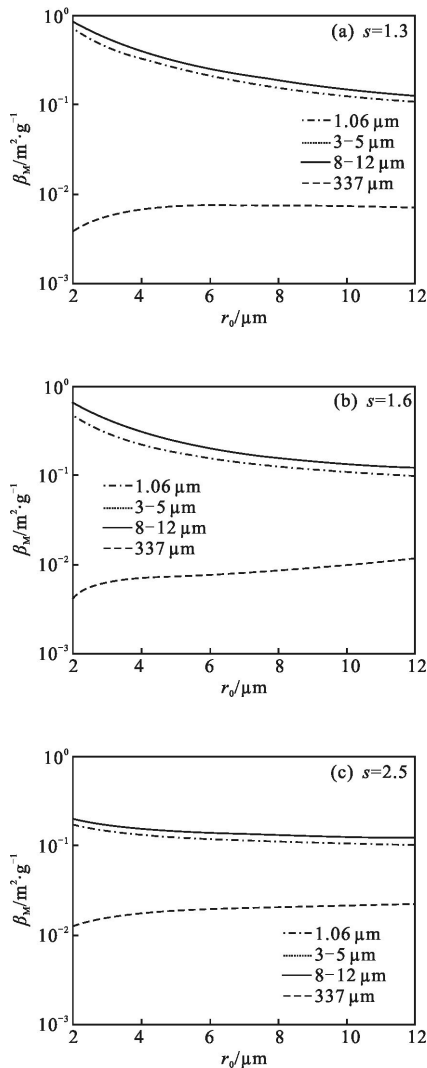


图 2 不同 s 值时石墨的质量消光系数随 r_0 的变化规律
Fig.2 Changing rule of MEC of graphite with r_0 and s

综上所述,石墨烟幕粒径分布的中心粒径 r_0 和几何偏差 s 越小,其对红外波段的消光作用越强,而对 $337\ \mu\text{m}$ 太赫兹波的消光作用反而越弱。这正是利用太赫兹波进行烟幕遮蔽下目标探测的一大优势。

3 烟幕对太赫兹波和红外消光特性的实验测试与分析

由公式(1)和公式(3)可得烟幕的质量消光系数的另一种表达式:

$$\beta_M(\lambda) = \frac{V}{M} \cdot \beta(\lambda) = \frac{V}{M} \cdot \frac{\ln \tau}{L} \quad (5)$$

式中: V 为烟幕的体积; M 为烟幕材料的总质量; τ 为入射辐射的透过率; L 为烟幕的厚度。

透过率 τ 可通过入射辐射穿透烟幕前后的辐射通量的测量而获得,并且由于探测器的线性响应度,可以认为穿透烟幕前后探测器测得的电压比等于前后的辐射通量之比,即透过率为:

$$\tau = \frac{\varphi_t}{\varphi_i} = \frac{V_t}{V_i} \quad (6)$$

式中: φ_i 和 φ_t 分别为穿透烟幕前后的辐射通量; V_i 和 V_t 分别为穿透烟幕前后探测器测得的电压信号。此时忽略了烟幕对入射辐射的反射作用。

因此,基于该测量原理,为获得烟幕对上述波长和波段的消光特性,搭建实验平台,通过测量入射辐射的透过率进行间接求解烟幕对各个波长和波段的质量消光系数。

实验选取两种不同粒径分布的石墨粉,其中,A号粉的粒径主要集中在 $4.3\sim 20.6\ \mu\text{m}$ 之间,最大分布百分比的位置在 $10\ \mu\text{m}$ 附近;B号粉的粒径主要集中在 $32.5\sim 85\ \mu\text{m}$ 之间,最大分布百分比的位置在 $50\ \mu\text{m}$ 附近;且两种粉的粒径分布均基本服从对数正态分布。实验系统的示意图如图 3 所示。

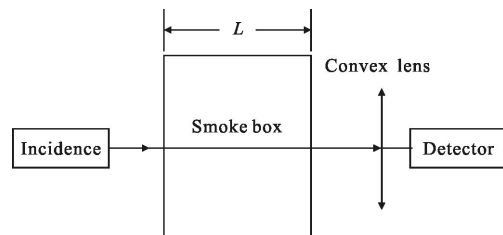


图 3 实验系统示意图
Fig.3 Schematic diagram of experiment system

在烟幕对 337 μm 太赫兹波的消光特性测试实验中, A 号粉和 B 号粉的质量分别为 5g 和 4g; 烟幕箱体积为 0.22 m^3 ; 烟幕厚度为 0.6m; 探测噪声为 80mV。

图 4 为两种不同粒径的石墨烟幕对 337 μm 太赫兹波的质量消光系数的测试结果。可以看出, 随着时间推移, 质量消光系数的值逐渐减小, 对于 B 号粉尤为明显, 这主要是由石墨微粒在烟幕箱中的悬浮时间较短所致。因此, 可将测试结果中的最大值认为是烟幕对 337 μm 太赫兹波的质量消光系数, 即 A 号粉: 0.021 5 m^2/g , B 号粉: 0.043 1 m^2/g 。

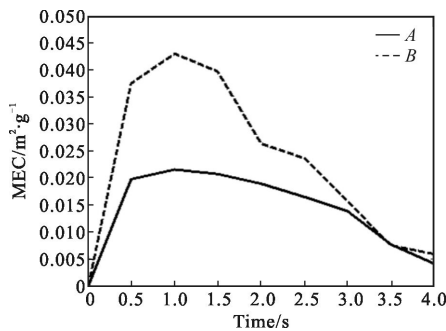


图 4 石墨烟幕对 337 μm 太赫兹波的质量消光系数
Fig.4 Mass extinction coefficient of smoke at 337 μm

对比两种不同粒径的烟幕可以看出, A 号粉的质量消光系数总是小于 B 号粉, 这说明粒径对质量消光系数存在较大影响。随后, 采用相同的方法获得两种烟幕对 1.06 μm 激光的质量消光系数, 其结果如图 5 所示。

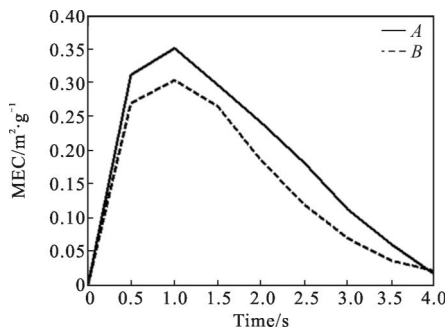


图 5 石墨烟幕对 1.06 μm 激光的质量消光系数
Fig.5 Mass extinction coefficient of smoke at 1.06 μm

与图 4 结果对比可以看出, 烟幕对这两个波长的质量消光系数的变化趋势基本相同, 均随着时间推移而逐渐减小。同样, 取测试结果中的最大值为烟幕对 1.06 μm 激光的质量消光系数, 即 A 号粉: 0.351 m^2/g , B 号粉: 0.303 8 m^2/g 。可以看出, 在相同的实验条件

下, 两种规格的石墨烟幕对两个波长的消光性能分别相差 16 倍和 7 倍。

此外, 选用体积为 2.88 m^3 、烟幕厚度为 1.2 m 的烟幕箱进行 3~5 μm 和 8~12 μm 波段的质量消光系数的测试实验。图 6 和图 7 分别为两种烟幕对 3~5 μm 和 8~12 μm 波段的质量消光系数的测试结果。

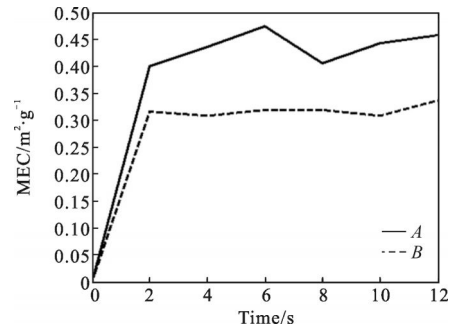


图 6 石墨烟幕对 3~5 μm 波段的质量消光系数
Fig.6 Mass extinction coefficient of smoke at 3~5 μm

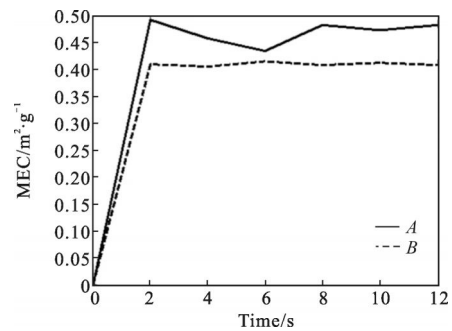


图 7 石墨烟幕对 8~12 μm 波段的质量消光系数
Fig.7 Mass extinction coefficient of smoke at 8~12 μm

可以看出, 石墨烟幕对两个波段的质量消光系数分别集中在 0.3~0.5 m^2/g 和 0.4~0.5 m^2/g 之间, 且在 8~12 μm 波段, 粒径对质量消光系数的影响较小。

通过对比以上测量的四组结果可以看出, 337 μm 太赫兹波对粒径处于 50 μm 以下的石墨烟幕的穿透性明显强于传统的热红外波段和激光波长。

4 结论

烟幕微粒的中心粒径和均方差越小, 其对近红外和热红外辐射的衰减作用越强烈, 而对 337 μm 太赫兹波的衰减作用却越弱。实验结果表明, 石墨烟幕对太赫兹波的衰减能力要远小于其他探测波长和波段。这表明波长更长的太赫兹波具有更强的穿透烟幕的能力, 红外烟幕对其衰减作用将大幅降低。因

此, 利用大气窗口内的太赫兹波可实现烟幕遮蔽条件下的远距离目标探测, 有效弥补红外和激光探测系统的不足。

参考文献:

- [1] Liu Jia, Fan Wenhui. Investigation of various fabrics in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1538–1540. (in Chinese)
刘佳, 范文慧. 常见服装面料的太赫兹光谱研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1538–1540.
- [2] Cui Haixia, Yao Jianquan, Wan Chunming. The study on THz wave propagation feature in atmosphere [C]//SPIE, 2010, 7854: 785404–1–785404–3.
- [3] Guan Xiaotong, Hu Min, Fu Wenjie, et al. Terahertz transmission imaging with 2.52 THz continuous wave [J]. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2013, 11(4): 368–370.
- [4] Guo Lantao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 52–53. (in Chinese)
郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 52–53.
- [5] Cui Haixia, Yao Jianquan, Zhong Kai, et al. The study on atmosphere propagation feature of THz wave [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(S): 238–239. (in Chinese)
崔海霞, 姚建铨, 钟凯, 等. 太赫兹波大气传输特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(S): 238–239.
- [6] Wang Rongrong, Wu Zhensen, Zhang Yanyan, et al. Transmission characteristics of terahertz signal in fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2264–2265. (in Chinese)
王蓉蓉, 吴振森, 张艳艳, 等. 太赫兹波段信号在雾中的传输特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2264–2265.
- [7] Dai Bing, Luo Xiangdong, Chang Heming. Study on calculating method of aerosol extinction coefficients [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 29(10): 12–15. (in Chinese)
戴兵, 罗向东, 唱鹤鸣. 大气气溶胶消光系数的计算方法研究 [J]. 环境科学与技术, 2008, 29(10): 12–15.
- [8] Liu Xiangcui, Zheng Weiping. Study on extinction characteristic of nano-Fe powders smoke screen to 1.06 μm and 10.6 μm laser [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(9): 913–915. (in Chinese)
刘香翠, 郑卫平. 纳米铁粉烟幕对 1.06 μm 和 10.6 μm 激光的消光特性研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 913–915.