

大气气溶胶对 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光衰减的实验研究

吴际华 孙凤仪 龚知本
(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

提 要

实验研究初步证实 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光气溶胶衰减系数和能见度或气溶胶浓度之间的关系具有很大的不确定性,但就统计平均而言,二者之间还存在一定的关系,我们给出这种关系的近似表达式,并讨论了它在工程上的可能应用。

一、引 言

众所周知,引起 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光辐射在大气中衰减的主要因素有水汽分子的连续吸收、大气 CO_2 气体分子的线中心共振吸收、大气气溶胶的吸收和散射。对于水汽和 CO_2 分子的吸收,已有不少实验和理论研究,一些计算模式得到了实验验证^[1,2],虽然还有一些理论问题有待进一步研究(例如水汽连续吸收的物理机制),但是就其激光的工程应用而言,这些计算模式都具有足够的精度。至于大气气溶胶对 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的衰减,近年来的理论计算表明, $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的气溶胶衰减系数与气溶胶浓度之间的关系具有很大的不确定性,这种不确定性主要来自于气溶胶谱型和折射指数的变化^[3]。然而直到目前为止,尚缺乏必要的实验验证。在实际大气中,这种不确定性究竟有多大?从统计观点看, $10.6\ \mu\text{m}$ 的气溶胶衰减与气溶胶浓度(或能见度)是否存在某些关系?为了研究上述两个问题,我们在实际大气中进行了 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光大气衰减测量。与此同时,在光程上进行了大气气溶胶浓度、 CO_2 含量、相对湿度、温度和压力的测量。其目的是试图通过计算扣除 CO_2 和水汽吸收对 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光衰减的贡献,研究气溶胶衰减与能见度之间的关系。为了避免水汽对 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光吸收过大,影响气溶胶衰减测量的精度,整个测量是在冬季水汽含量小的情况下进行的。为了定量地获得能见度资料,也同时进行了 $6328\ \text{\AA}$ 激光的衰减测量。

二、实验装置和测量方法

同时测量 $6328\ \text{\AA}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光大气衰减的实验装置如图 1 所示。发射端主要包括激光光源(CO_2 激光器或 He-Ne 激光器 3)、斩波器 2、分束板 4、发射望远镜 5 和有关监测装置。 $6328\ \text{\AA}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光首先调整同轴。它们均由分束板 4 分成两束,一束通过直径为 300 mm 的卡塞格林式望远镜发射进入大气,另一束用于监测激光器输出功率的稳定性, $10.6\ \mu\text{m}$ CO_2 激光器(以压电陶瓷控制腔长使其在 P_{20} 线上运转)连续输出功率为 1 W,以 800 μs 的机械斩波器 2 斩波。 $6328\ \text{\AA}$ 氦-氖激光器 3 连续输出功率为 2 mW。接收端主要

由直径为 320 mm 的球面反射镜 6、分束板 4 和探测记录系统组成。发射望远镜将光束聚焦到接收反射镜上,接收镜上的光斑大小约为 15 cm,可实现全接收测量。发射端和接收端的测量系统是相同的。6328 Å 和 10.6 μm 分别由光电倍增管 7 和钽酸锂热释电探测器 8 探测。光电倍增管的输出信号直接由双笔 X-Y 记录仪 12 的一支笔记录,钽酸锂热释电探测器的输出信号经前置放大器 9、选频放大器 10 和检波器 11 检波后,由记录仪的另一支笔记录。

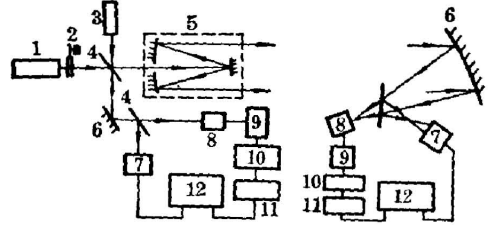


图 1 实验装置方框图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement

在测量大气衰减之前,接收端的测量系统预先与发射端的监测系统进行相对定标。设传输距离为零时,6328 Å 和 10.6 μm 的接收信号分别为 $I_1^{6328\text{Å}}$ 和 $I_1^{10.6\mu\text{m}}$, 监测信号分别为 $I_0^{6328\text{Å}}$ 和 $I_0^{10.6\mu\text{m}}$, 那我们定义定标常数为

$$\xi^{6328\text{Å}} = I_0^{6328\text{Å}} \cdot I_1^{6328\text{Å}}, \quad (1)$$

$$\xi^{10.6\mu\text{m}} = I_0^{10.6\mu\text{m}} / I_1^{10.6\mu\text{m}}, \quad (2)$$

实际测量时,若 6328 Å 和 10.6 μm 激光的接收信号分别为 $I_2^{6328\text{Å}}$ 和 $I_2^{10.6\mu\text{m}}$, 监测信号分别为 $I_3^{6328\text{Å}}$ 和 $I_3^{10.6\mu\text{m}}$, 则得光程上的透射率分别为

$$T^{6328\text{Å}} = \xi^{6328\text{Å}} I_2^{6328\text{Å}} / I_3^{6328\text{Å}}, \quad (3)$$

$$T^{10.6\mu\text{m}} = \xi^{10.6\mu\text{m}} I_2^{10.6\mu\text{m}} / I_3^{10.6\mu\text{m}}. \quad (4)$$

单位长度的衰减系数 k 可用如下方程计算:

$$k = -\ln T / L, \quad (5)$$

其中 L 为光程长度。

实验期间,同时测量了光程上的大气气溶胶浓度、CO₂ 含量、水汽含量、大气温度和压力。气溶胶浓度用我所自制的 10 道光电子计数器测量。由于受仪器响应灵敏度的限制,所测量的是半径大于 0.25 μm 的粒子浓度和谱分布。CO₂ 含量用 FQ-W-CO₂ 型红外线分析仪测量,其它气象要素的测量均使用常规气象仪器。

三、10.6 μm 激光气溶胶衰减系数的计算和误差分析

1. $k_{10.6\mu\text{m}}$ 的计算

为了获得由大气气溶胶引起的 10.6 μm 激光的衰减,必须在 10.6 μm 激光衰减的实验测量值(总衰减)中,扣除大气 CO₂ 气体和水汽的吸收,CO₂ 气体对 10.6 μm CO₂ 激光 (P_{90} 线)的吸收可用下式进行计算^[1]

$$k_{\text{CO}_2}^{10.6\mu\text{m}} = \frac{6.87x}{\theta^{0.43}Q(\theta)} \exp\left[7.44 - \frac{2233}{\theta}\right] \text{ cm}^{-1}, \quad (6)$$

式中 x 是大气中 CO₂ 气体的体积混合比浓度 (ppm), θ 是绝对温度 (K), $Q(\theta)$ 是配分函数。对于水汽的连续吸收,最近我们用光声法测量获得的经验公式为

$$k_{\text{H}_2\text{O}}^{10.6\mu\text{m}} = \frac{0.267}{\theta} p_{\text{H}_2\text{O}} [p_{\text{H}_2\text{O}} + \nu(P - p_{\text{H}_2\text{O}})] \exp\left[4000\left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{296}\right)\right] \text{ km}^{-1}, \quad (7)$$

其中 $\nu = 0.0034 \exp\{7000[(1/296) - (1/\theta)]\}$, 这里 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 P 分别为水汽分压力和大气压

力(Torr), θ 是绝对温度(K)。

根据测量期间所记录的 CO_2 含量、水汽含量、温度和压力, 利用方程(6)和(7), 分别计算 $10.6 \mu\text{m}$ 激光衰减测量值中的 CO_2 和水汽吸收值。这样, 我们就能从下式得到 $10.6 \mu\text{m}$ 激光的气溶胶衰减系数 $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 。

$$k_a^{10.6\mu\text{m}} = k_B^{10.6\mu\text{m}} - k_{\text{CO}_2}^{10.6\mu\text{m}} - k_{\text{H}_2\text{O}}^{10.6\mu\text{m}}, \quad (8)$$

其中 $k_B^{10.6\mu\text{m}}$ 是实测值。

2. $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值的误差分析

$k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值的分析可以分为两类: 一类是系统误差, 它表现为 $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值可能系统地偏高或偏低, 主要来自于方程(6)和(7)的精度。根据我们的实验验证, 上述两个公式的精度一般都优于 8%, 整个测量期间, 大气 CO_2 含量的变化范围为 290~380 ppm, 水汽分压力和温度的变化范围分别为 3~8 Torr 和 271~290 K, 这样造成的 $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值的系统绝对误差最大不超过 0.012 km^{-1} 。另一类是测量随机误差, 它表现为 $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值的不确定性。这类误差主要来自于水汽和 CO_2 含量的测量误差以及测量装置的相对定标误差。前者根据标定, CO_2 含量和相对湿度的测量误差均小于 1%。因此上述气象要素测量误差导致的 $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值的不确定性可忽略不计。后者导致透射率测量的相对误差一般不大于 3%。这样在我们的测量范围内, 其衰减系数实测值 $k_B^{10.6\mu\text{m}}$ 的随机最大绝对误差为 0.022 km^{-1} 。根据上述讨论并参见方程(8), 可求得 $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值的总绝对误差不大于 0.025 km^{-1} 。就其相对误差而言, 它将随着 $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值的减小而增大。例如能见距离为 5 km 时, 最大相对误差约为 26%, 而能见距离超过 15 km 时, 最大相对误差可达 76% 以上。因此对于大于 15 km 的能见距离, 目前的测量精度似乎还是不够的。

四、测量结果和讨论

实验是 1978 年 11 月 20 日至 12 月 20 日在合肥市郊区进行。传输光程为 1.38 km, 离地面平均高度约为 25 m。测量期间温度、相对湿度和压力的变化范围分别为 271~290 K、25~80% 和 1015~1030 mbar。在此期间我们共进行了 335 次观测。图 2 表示 $10.6 \mu\text{m}$ 激光气溶胶衰减系数与半径大于 $0.25 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子浓度之间的关系。图中每一个资料点代表三分钟内五次观测结果的平均值, 由图 2 可以看出, 虽然从统计观点看, 它们之间存在着较为明显的相关(线性相关系数为 0.61), 但这种关系具有很大的不确定性, 特别是气溶胶浓度大于 $1.0 \times 10^5 \text{ l}^{-1}$ 时, 其离散程度已远远超过实验误差。这种不确定性的原因, 正如文献[3]所指出, 可能是由于测量期间气溶胶谱型和折射指数的变化。

图 3 表示 $10.6 \mu\text{m}$ 激光气溶胶衰减系数与能见距离的关系。图中的能见距离是根据 6328 \AA 激光衰减系数的实测值, 通过如下经验公式换算而得

$$R_v = 3.91 / k^{6328\text{\AA}}. \quad (9)$$

图 3 表明, 二者之间存在着一定的关系, $k_a^{10.6\mu\text{m}}$ 值随着能见距离的减小而增大。根据实验资料, 我们获得如下经验公式(图中用实线表示):

$$k_a^{10.6\mu\text{m}} = A / R_v, \quad (10)$$

式中 $A=0.60$, 其均方根误差为 0.27; 衰减系数 $k_a^{10.6\mu\text{m}} (\text{km}^{-1})$; 能见距离 $R_v (\text{km}^{-1})$ 。从图

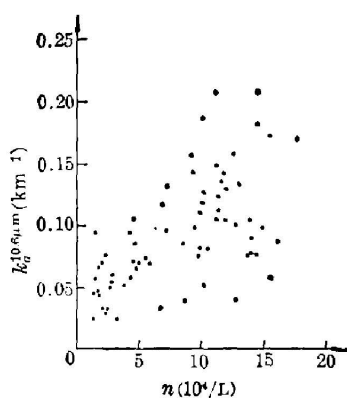


图2 $10.6\mu\text{m}$ 激光气溶胶衰减系数与气溶胶浓度的关系

Fig. 2 Correlation between aerosol extinction coefficients at $10.6\mu\text{m}$ and aerosol concentration

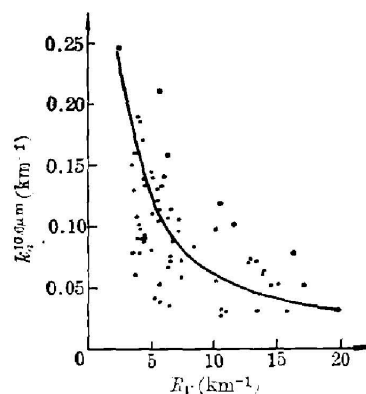


图3 $10.6\mu\text{m}$ 激光气溶胶衰减系数与能见度距离的关系

Fig. 3 Correlation between aerosol extinction coefficients at $10.6\mu\text{m}$ and visibility

中也可以清楚地看到,上述关系的不确定性是十分明显的。即使在能见距离为 15 km 左右,资料点相对于经验曲线的最大偏差可达 100% ,已远远超过测量误差(最大随机误差约为 55%)。这说明要正确地预计 $10.6\mu\text{m}$ 激光的气溶胶衰减,只用能见度来描述是不够的,必须考虑局地条件下气溶胶的谱型和折射指数^[3]。然而,公式(10)是一个统计平均结果,它给出了在某一能见度下,气溶胶引起 $10.6\mu\text{m}$ 激光衰减的最可几值及其均方根误差。因此,在使用特别是在设计某些激光应用工程时,公式(10)可以提供所必需的有关大气气溶胶在不同能见度下可能产生的影响的数据。

五、结 论

我们的实验初步证实了理论预言^[3],用能见度(或气溶胶浓度)来描述 $10.6\mu\text{m}$ 激光大气气溶胶衰减具有很大的不确定性。这种不确定性可能主要来自于气溶胶谱型和折射指数的变化。但就其统计平均而言,它们之间仍存在某些较为明显的关系。我们给出了这种关系的近似表达式,它可为某些激光应用工程提供气溶胶影响的近似估计。同时也指出了使用此近似表达式时可能导致的误差。

参加实验工作的还有韩景诚、王绍卿、浦达生、窦根娣、陈爱珍等同志。

参 考 文 献

- [1] 龚知本、吴际华;《大气科学》,1980,4, No. 4 (Dec), 319.
- [2] R. E. Roberts *et al.*; *Appl. Opt.*, 1976, 15, No. 8 (Aug), 2085.
- [3] 吕达仁;魏重;《大气科学》,1978,2, No. 2 (Jun), 145.

Experimental study of 10.6 μm laser extinction by atmospheric aerosol

WU JIHUA SUN FENGYI AND GONG ZHIBEN

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei)

(Received 10 October 1982, revised 6 December 1982)

Abstract

An experimental study demonstrates that there is a strong uncertainty of the 10.6 μm laser extinction by atmospheric aerosol in relation to the same value of visibility or aerosol concentration. However, the data seem to indicate that there is a certain correlation between 10.6 μm laser extinction by atmospheric aerosol and visibility from the statistical point of view. For such a correlation an approximate expression is given here, and the possible applications in laser engineering are discussed.